BMUB -UMWELTINNOVATIONSPROGRAMM

Abschlussbericht

zum Vorhaben:

Hallenbad-Passivhaus Lünen (Lippe Bad in Lünen)
Nr. des Vorhabens: 20184
UBA-Aktenzeichen: 70441-3/3

Fördernehmer/-in:

Bädergesellschaft Lünen mbH

Umweltbereich

Energie, Klimaschutz

Laufzeit des Vorhabens

1. September 2009 bis voraussichtlich Mai 2014

Autor

Dr. Gerd Koch, Bädergesellschaft Lünen mbH

Gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Datum der Erstellung

Februar 2014

Report-Coversheet

UBA 70441-3/3		Report-No. 20184
Report Title: Hallenbad-Passivhaus Lünen (Lippe Bad in Lünen), Passive House concept for swimming pools		
Author(s), Family Name(s), First Name(s) Dr. Koch, Gerd, Bädergesellschaft Lünen mbH		Report Date February 2014 Publication Date
Performing Organisation (Name, Adress) Bädergesellschaft Lünen mbH Borker Straße 56-58 44534 Lünen		Start of project 1. September 2009 End of project estimated completion date May 2014
Sponsoring Agency (Name, Adress) Bundesumweltministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (Federal Ministry for Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety)		No. of Pages report (37 p.)+ annex 1 (100 p.), annex 2 (141 p.), annex 3 (139 p.)
Supplementary Notes		

Abstract/ Summary

The Bädergesellschaft Lünen opened the doors of its public swimming pool “Lippe Bad” to the public on September 9th 2011 after a two year construction period. This innovative environmental project is the first of its kind, it being built and operated based on the Passive House concept for swimming pools. The deciding factor for a construction according to this new approach was the goal to achieve significant savings with regard to energy, water and waste water and thus reduce the building’s environmental impact.

Support from the Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), the Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (mwme.nrw), as well as the Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB, Federal Ministry for Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety) made this innovative project possible. Successful project planning and energy assessment could only be achieved with the technical guidance and consultancy from the Passive House Institute in Darmstadt.

The results prove it: By applying the Passive House concept to this newly built public swimming pool, its energy demand and respective emissions could be considerably reduced compared to a typical corresponding newbuild in accordance with the current German regulations for energy saving in buildings (Energieeinsparverordnung EnEV). Via extensive monitoring, the operating data and actual energy flows of the exemplary Passive House could be made transparent. The final energy demand of the “Lippe Bad”

could be reduced to approximately 40% of the energy consumption expected of a typical EnEV newbuild (1.62 million kWh instead of 4.39 million kWh). Of the total energy consumed during the monitoring period, 62% went into space heating and 38% into electricity. According to calculation results this corresponds to emissions of CO_2-equivalent of around 350 tons per year. The energy supply of the built project thus achieves impressive savings with approx. 75% less CO_2-equivalent in comparison to an EnEV newbuild (350 t/a instead of 1400 t/a).

With an overall goal of energy savings in mind, innovative solutions for the thermal envelope and building services were coupled with improved best-practice swimming pool technology.

The project was implemented based on the findings of an extensive preliminary study, which was carried out together with the Passive House Institute and kindly supported by the Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU). The resulting final report of this study „Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad“ is included in annex 1 (available only in German) of this report.

Annex 2 (available only in German) of this report is a second supplementary publication about the comprehensive planning process of the „Lippe Bad“: „Integrale Planung für die Realisierung eines öffentlichen Hallenbades mit Konzepten der Passivhaustechnologie“.

The operating conditions and usage of the pool were documented with an extensive and long-term monitoring project. The first results of the monitoring data analysis have been published in a report by the Passive House Institute (see annex 3, available only in German).

An economic feasibility study shows that the payback time for the additional investments required for a Passive House indoor swimming pool is at most 10 years. Keeping in mind that a pool is operated for typically 40 years, there is no doubt about the additional investment towards the Passive House standard is money well spent. Apart from this economic reasoning, there is another motivation to build to this energy efficient standard: 1050 tons CO_2-equivalent are saved per year in comparison to a conventional pool built to the EnEV regulations.

As described in annex 3 (monitoring report), the optimisations of the “Lippe Bad” in terms of energy savings are to be carried even further. An additional potential energy reduction of approximately 390000 kWh/a has been identified. In order to tap these savings, the system for processing and recycling the filter backwash is to be put to use as well as a reduction of the air flows on a demand basis.

The already completed monitoring in the “Lippe Bad” and the ongoing data analysis of the second Passive House project “Bambados” in Bamberg are both significant contributions for establishing a better understanding required for the construction and operation of modern indoor swimming pools.

The quantitative analysis of measurements taken at different humidity levels in the “Lippe Bad” indicate that the average evaporation rates during pool usage, are merely 50% or even less than indicated in the regulations for dimensioning swimming pool ventilation units. The high evaporation rates as per regulation have the effect that ventilation units are operated with an unnecessarily high air flows most of the time, leading to significantly increased energy consumption. In light of these findings, the current dimensioning and operation criteria for ventilation systems should be revised together with those responsible for writing the respective regulations.

Keywords

Passive House concept for swimming pools, “Lippe Bad”, innovative solutions for the thermal envelope and building services, monitoring

Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen: 70441-3/3	Vorhaben-Nr.: 20184
Titel des Vorhabens: Hallenbad-Passivhaus Lünen (Lippe Bad in Lünen)	
Autor: Dr. Koch, Gerd, Bädergesellschaft Lünen mbH	Vorhabensbeginn: 1. September 2009
	Vorhabenende (Abschlussdatum): voraussichtlich Mai 2014
Fördernehmerin: Bädergesellschaft Lünen mbH Borker Straße 56-58 44534 Lünen	Veröffentlichungsdatum:
	Seitenzahl: Bericht (37 S.)+ Anlage 1 (100 S.), Anlage 2 (141 S.), Anlage 3 (139 S.)
Gefördert (aus der Klimaschutzinitiative) im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms des Bundesumweltministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)	

Kurzfassung

Die Bädergesellschaft Lünen hat am 9. September 2011 nach 2 Jahren Bauzeit mit dem Lippe Bad das erste öffentliche Hallenbad eröffnet, das als Umwelt-Innovationsprojekt mit Konzepten der Passivhaustechnologie realisiert wurde. Es ist gelungen, mit der Übertragung des Passivhausstandards auf einen Hallenbadneubau, eine deutliche Reduzierung des Energiebedarfes und der daran gebundenen Emissionen gegenüber dem standardmäßigen Neubauniveau (EnEV) zu erreichen und die energetischen Betriebsdaten und Zusammenhänge über einen Monitoring-Prozess in dem nach Passivhauskriterien gebauten Beispiel transparent zu machen. Der Endenergiebedarf im Lippe Bad konnte auf ca. 40 % des bei EnEV-Baustandard erwarteten gemindert werden (1,62 Mio. kWh anstatt 4,39 Mio. kWh) und wird zu rund 62 % für Wärme- und zu 38 % für Stromanwendungen benötigt. Die Berechnungsergebnisse zeigen daran gekoppelte Emissionen von rund 350 t/a CO_2-Äquivalente. So überzeugt das Energieversorgungssystem im gebauten Beispiel mit um 75 % geringerer Menge an CO_2-Äquivalenten im Vergleich zur EnEV-Variante (350 t/a anstatt 1.400 t/a). Anhand einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung konnte abgeleitet werden, dass sich die Mehraufwendungen zum Passivhaushallenbad nach längstens 10 Jahren amortisieren werden. Die Ergebnisse, insbesondere die zu den Stoffübergangskoeffizienten bei der Verdunstung, sollen mit den Regelwerk setzenden Gruppen erörtert werden.

Schlagwörter
Hallenbad-Passivhaus, Passivhallenbad, Lippe Bad, Hallenbad, Bäder, Passivbauweise, Passivhauskonzept, Passivhausstandard, Grundlagenuntersuchung, Integrale Planung, Monitoring, Nichtwohngebäude

Anzahl der gelieferten Berichte Papierform: 10 Elektronischer Datenträger: 1	Sonstige Medien: keine Veröffentlichung im Internet geplant auf der Homepage: www.baeder-luenen.de

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1.	**Einleitung**	2
1.1	Kurzbeschreibung der Bädergesellschaft Lünen mbH	3
1.2	Ausgangssituation	3
2.	**Vorhabensumsetzung**	7
2.1	Ziel des Vorhabens	7
2.2	Darstellung der technischen Lösung	7
2.3	Darstellung der Umsetzung	8
2.4	Behördliche Anforderungen	8
2.5	Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten	9
3.	**Ergebnisse**	9
3.1	Bewertung der Vorhabensdurchführung	10
3.2	Ergebnisse des Messprogramms, Stoff- und Energiebilanz	10
3.3	CO_2-Äquivalente im Vergleich, Umweltbilanz	11
3.4	Konzeption, Durchführung und Ergebnisse des Messprogramms	21
3.5	Wirtschaftlichkeitsanalyse	22
3.6	Technischer Vergleich zu konventionellem Verfahren	26
4.	**Empfehlungen**	28
4.1	Erfahrungen aus der Praxiseinführung	29
4.2	Modellcharakter	31
4.3	Zusammenfassung	32
5.	**Anlagen**	
5.1	Anlage 1: Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad	
5.2	Anlage 2: Integrale Planung für die Realisierung eines öffentlichen Hallenbades mit Konzepten der Passivhaustechnologie	
5.3	Anlage 3: Monitoring Passivhaus-Hallenbad Lippe Bad Lünen	

1. Einleitung

Das Angebot von Schwimmbädern ist eine ebenso bedeutende wie hochwertige Dienstleistungsaufgabe. Der weitaus größte Teil der deutschen Bäder wird von Kommunen bereitgestellt und betrieben (direkt/indirekt).

Zur Förderung der Gesundheitsvorsorge einzelner, aber auch gemeinschaftlicher Sportaktivitäten (Vereinssport) und von Bildungsangeboten (Schwimmausbildung, Schulsport) ist Bäderinfrastruktur als gesellschaftspolitisch wichtige Aufgabe verankert. Eine große Zahl von Menschen, die entsprechende Wasserflächen als Dienstleistungen erwarten, müssen mit marktgängigen Angeboten erreicht werden.

Auf der Nachfrageseite haben sich über viele Jahre Veränderungen eingeschlichen. Gesellschaftlicher wie auch demografischer Wandel geht mit veränderten Nutzeransprüchen einher. Auf der Angebotsseite ist die vorhandene Infrastruktur vielerorts in die Jahre gekommen, geringwertig attraktiv oder sogar alsbald aufgebraucht. Demgegenüber schränken angespannte Haushaltslagen das Handeln der Kommunen zur nachhaltigen Verbesserung stark ein.

Einschlägige Statistiken zeigen, dass bei über 50 % der Hallenbäder erheblicher Sanierungsbedarf besteht. Für mehr Zukunftsfähigkeit muss besonderes Augenmerk auf ein effizientes Gesamtkonzept mit auch niedrigen Energie- und Wasserkosten gelenkt werden. Innovationen sind gefragt, denn Standardkonzeptionen sind nicht ausreichend, um heute bereits mögliche Systemverbesserungen zu erschließen.

Der vorliegende Bericht behandelt das Innovationsprojekt Passivhaus-Hallenbad der Bädergesellschaft Lünen mbH. Das gebaute Beispiel (Lippe Bad in Lünen, 2 Jahre Bauzeit, Eröffnung September 2011) zeigt konkret, dass moderne Hallenbäder über heute bereits handhabbare Konzeptionen und Technologien im System zu optimieren sind. Mit diesem Ansatz sind erhebliche Einsparungen an Energie, Wasser, Abwasser und den damit verbundenen Umweltbelastungen möglich.

1.1 Kurzbeschreibung der Bädergesellschaft Lünen mbH

Gegenstand des im Jahr 1995 gegründeten Unternehmens Bädergesellschaft Lünen mbH (www.baeder-luenen.de) ist der Betrieb von öffentlichen Bädern in der Stadt Lünen (ca. 85.000 Einwohner) und aller damit verbundenen Einrichtungen.

Heute besitzt und betreibt die Bädergesellschaft Lünen mbH ein Hallenbad (Lippe Bad) und zwei Freibäder. Das kleinere Freibad im Stadtteil Lünen Brambauer wird in Hauptaufgaben durch einen Trägerverein betrieben.

Mit Fertigstellung des Lippe Bades (September 2011) und nach der Bewehrung im Probebetrieb wurde im Juni 2012 der Betrieb der zwei alten von Sanierungsstau betroffenen Hallenbädern und der zwei an Schulen angeschlossenen Kleinschwimmhallen vollends eingestellt. Gegenwärtig sind bereits zwei Hallenbad-Altstandorte komplett zurückgebaut.

31 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (rechnerisch 24 äquivalente Vollzeitstellen einschließlich Reinigungsfachkräfte) sind für den Betrieb der Bäder beschäftigt. Die Bädergesellschaft Lünen mbH ist ein Ausbildungsbetrieb (Fachangestellte für Bäderbetriebe gemäß BäderFAngAusbV).

99 % der Geschäftsanteile halten die Stadtwerke Lünen GmbH und 1 % sind im Besitz der Stadt Lünen. Die Bädergesellschaft Lünen mbH ist unbeschränkt körperschafts- und gewerbesteuerpflichtig. Durch einen bestehenden Ergebnisabführungsvertrag mit der Stadtwerke Lünen GmbH existiert eine vollumfängliche steuerliche Organschaft, wobei die Stadtwerke Lünen GmbH als Organträger Steuerschuldner ist.

1.2 Ausgangssituation

Mit Gründung der Bädergesellschaft Lünen mbH im Jahr 1995 wurden zwei Hallenbäder, zwei an Schulen angeschlossene Kleinschwimmhallen und zwei Freibäder von der Stadt Lünen in die Gesellschaft eingebracht.

Im vorliegenden Bericht wird der spezielle Themenkreis Freibäder nicht behandelt.

Die Ausgangssituation für Lünen war nicht untypisch im Vergleich mit vielen anderen Bäderbetrieben: Einerseits sind die alten Bäder aufgrund von vielfältigen Unzulänglichkeiten in der Bausubstanz, des mangelhaften Erhaltungszustandes und der Raumgestaltung nach heutigen Gesichtspunkten für Besucher wenig attraktiv - oft fehlt es auch an der nötigen Barrierefreiheit - und andererseits sind die Technischen Anlagen altersbedingt wenig effizient. Somit liegen gekoppelte Probleme vor: Wenig attraktiv im Angebot und gleichzeitig mangelhafte Technik. Die Notwendigkeit zum Handeln wächst stetig an. Dabei ist die Gesamtsituation meist auch von unzureichender Kostendeckung geprägt und sie erscheint vielerorts ausweglos.

Vor diesem Hintergrund sind Strategien gefragt, das Angebot von gedeckten Wasserflächen zukunftsgerecht gestalten und erhalten zu können. Dazu bedarf es redlicher Detailarbeit und der transparenten Diskussion mit den Entscheidungsträgern, d. h. für Lünen, mit der Kommunalpolitik und den organisierten Nutzergruppen wie Schulen und Vereine. Dabei war es wichtig, sorgsam darauf zu achten, dass die Ansprüche der Individualnutzer (Öffentlichkeit) gegenüber der Bestimmtheit der Ansprüche der organisierten Nutzergruppen nicht untergehen, denn zukunftsgerechte Lösungen müssen dem Anforderungsprofil aller Nutzer vernünftig und möglichst weitreichend entsprechen.

In ersten Schritten wurde für den Erhalt der vier Standorte ermittelt, dass die Netto-Kosten für eine Basissanierung auf den gültigen Standard der Energieeinsparverordnung (EnEV) mindestens 10,6 Mio. € (bezogen auf die Wasserfläche ca. 11.500 €/m^2_{WF}) betragen werden. Barrierefreiheit könnte dabei nur halbwegs mittelbar verbessert werden, der nach heutigen Ansprüchen nicht günstige funktionale Zuschnitt bliebe im Wesentlichen unverändert und es bestehen die üblich hohen Kostenrisiken für Maßnahmen der Kernsanierung: Insgesamt viel Manko bei annähernd so hohen Baukosten, wie sie für Neubauten kalkuliert und genannt werden (ohne Grundstückskosten).

In den dann folgenden Schritten wurde ein zentral positioniertes Neubaukonzept (EnEV-Standard) in mehreren Varianten zum Wasserflächendargebot überlegt, bewertet und diskutiert, wobei die vier Altstandorte dann komplett aufgegeben würden (an zwei ehemaligen Standorten wäre nach Rückbau der alten Hallenbäder eine Baulandvermarktung in nachgefragter Lage möglich).

Dieses zentrale Neubaukonzept im EnEV-Standard wurde vom Rat der Stadt als Bäderkonzept Lünen mehrheitlich entschieden. In Folge dieser Entscheidung wurde die Bädergesellschaft Lünen mbH mit der Umsetzung beauftragt.

Ziel der Bädergesellschaft war es nun, diese große Chance der Neugestaltung effektiv zu nutzen und dafür eine besondere Motivation zu begründen.

Mit dem globalen Blick auf Lebenszykluskosten (LCC, Life-Cycle-Costing) von Gebäuden zeigt sich, dass diese für viele Gebäudearten und –nutzungen meist im Rahmen von 20 % über die Baukosten (DIN 276, nebst Rückbaukosten) und zu 80 % über die Nutzungskosten (DIN 18960) bestimmt werden. Aufgrund der speziellen Bedingungen für Hallenbäder (ganzjährig hohe Temperaturen, hoher Reinigungsaufwand, zusätzliche Badewassertechnik und systembedingt allgemein höherer Technisierungsgrad) liegen hier die LCC-Kostenverhältnisse eher bei 10 % Baukosten und 90 % Nutzungskosten (einer Einsparung von 1 % jährlichen Nutzungskosten stehen bei einem mittelgroßen Hallenbadprojekt mit 14 Mio. € Baukosten rund 1,3 Mio. € Einsparung im LCC (Nutzungsdauer 40 Jahre) gegenüber). Dementsprechend ist es richtungsweisend, Wärme, Strom, Wasser und Abwasser einzusparen, Erneuerungsbedarfe zu reduzieren und günstige Reinigungskonzepte zu gestalten (funktionale Gestaltung, Langlebigkeit der Konstruktionen).

Im Verständnis der Bädergesellschaft zum Sparen geht es nicht darum Verzicht zu üben (z. B. zu kalte Raumtemperatur) oder im Sparen Mängel hinzunehmen (z. B. schlechte Luftqualität), sondern vielmehr darum, „Unnötiges" (z. B. heizen bei offenem Fenster) mit Vernunft zu vermeiden und so Kosten, Ressourcennutzung und Umweltbelastungen zu vermindern. Im Gestaltungsprozess für das neue Hallenbad galt es, folgende Leitsätze und deren Rangfolge konsequent an Kosten und Nutzen orientiert anzuwenden: 1. Bedarf systematisch minimieren (z. B. günstiges A/V-Verhältnis konstruieren, Wärmedämmung verstärken), 2. Effizienz Allerorts steigern (z. B. höhere Wirkungsgrade bei Elektromotoren, vorrangig Wärmerückgewinnung anwenden) und 3. Erneuerbare Energie nutzen.

Mit vielfältigen Überlegungen in der Bädergesellschaft entstand so das komplexe Vorhaben, die Maßgaben der Passivhausqualität erstmalig für ein Hallenbad zu nutzen (mit verbessertem Schutz gegen Taupunktunterschreitung aufgrund höherer

innerer Oberflächentemperaturen) und mit höherer Raumluftfeuchte weiteren Energiebedarf durch verminderte Beckenwasserverdunstung einzusparen. Es geht dabei um Innovation und Erkenntnisgewinn - nicht allein um dem konkreten Projekt Lünen zu dienen - sondern auch der gesamten Branche. So wurden mit dem Vorhaben Hallenbad-Passivhaus Lünen drei frei verfügbare Berichte erstellt, um technologische Transparenz zu gewährleisten.

Dieses Innovationsprojekt wurde erst mit fördernden Unterstützungen der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), des Ministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (mwme.nrw) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) möglich. Dafür, wie auch für die zielorientierte und stets aktive Zusammenarbeit bedanken wir uns recht herzlich.

Dem Projekt liegt eine solide Voruntersuchung zugrunde. Diese wurde gemeinsam mit dem Passivhaus Institut, Darmstadt erarbeitet. Der daraus hervorgegangene Bericht „Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad“ ist über
http://www.passiv.de/downloads/05_hallenbad.pdf
kostenfrei verfügbar und liegt diesem Abschlussbericht als **Anlage 1** bei.

In einem integrierten Planungsprozess über alle Gewerke wurde die erstmalige Realisierung eines öffentlichen Passivhaus-Hallenbades vorbereitet. Damit wird Energieeffizienz und nachhaltige Entwicklung auf den Punkt gebracht. Zielgerichtet werden im Lippe Bad innovative Lösungsansätze zur thermischen Hülle und der zum Einsatz kommenden Haustechnik zusätzlich um best-practice-Technologien für die im System „Hallenbad“ erforderliche Verfahrenstechnik ergänzt. Dazu wurde ein weiterer Bericht zum Projekt Lippe Bad mit dem Titel „Integrale Planung für die Realisierung eines öffentlichen Hallenbades mit Konzepten der Passivhaustechnologie“ erarbeitet, der über:
http://www.baeder-luenen.de/uploads/media/Bericht_Integrale_Planung_01.pdf
verfügbar ist. Dieser Bericht bildet die **Anlage 2** in diesem Abschlussbericht.

Die einhergehenden Betriebs- und Nutzungsbedingungen wurden für diesen Abschlussbericht über ein detailliertes Monitoring im Betrieb ermittelt. Damit werden

messtechnisch festgestellte Werte zu den einzelnen Verbrauchspfaden transparent gemacht. Die Ergebnisse sind in einem Monitoringbericht des Passivhaus Instituts, Darmstadt dargestellt. Auch dieser Bericht ist frei verfügbar unter:
http://www.baeder-luenen.de/uploads/media/Monitoringbericht_Passivhaus-Hallenbad_Lippe_Bad_Luenen_01.pdf
Dieser Bericht bildet die **Anlage 3** in diesem Abschlussbericht.

2. Vorhabensumsetzung

2.1 Ziel des Vorhabens

Ziel des Vorhabens war es, mit der Übertragung des Passivhausstandards auf einen Hallenbadneubau, eine deutliche Reduzierung des Energiebedarfes und der daran gebundenen Emissionen gegenüber dem standardmäßigen Neubauniveau (EnEV) zu erreichen und die energetischen Betriebsdaten und Zusammenhänge über einen Monitoring-Prozess in dem nach Passivhauskriterien gebauten Beispiel transparent zu machen.

Die Passivhauskriterien für ein Hallenbad wurden dazu vorbereitend über die „Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad“ abgeleitet (Anlage 1). Hier wurden insbesondere die Fragen von Materialschutz, Behaglichkeit und Bauschadensfreiheit im Passivhallenbad untersucht.

2.2 Darstellung der technischen Lösung

Die technischen Lösungen für das Modellprojekt Passivhallenbad wurden in einem Integralen Planungsprozess erarbeitet. Alle das Projekt bestimmenden Lösungsansätze sind in dem Bericht „Integrale Planung für die Realisierung eines öffentlichen Hallenbades mit Konzepten der Passivhaustechnologie“ dargestellt (Anlage 2).

2.3 Darstellung der Umsetzung

Die Arbeitsschritte zur Umsetzung des Bauvorhabens Passivhallenbad unterscheiden sich nicht grundsätzlich zu denen eines standardmäßigen Bauprojekts vergleichbarer Größenordnung (detaillierte Planung, Ausschreibung der Gewerke und Leistungen (hier europaweit), Angebotswertung und Auftragsvergabe, Ausführung der Bauleistungen mit Terminplanung, Bauüberwachung und ständigen Prüfungen bis zur Abnahme und Abrechnung).

Lediglich müssen die Besonderheiten gegenüber herkömmlichen Gebäuden bereits in der Ausschreibung reich an verständlichen Details vermittelt werden. Alle ausführenden Firmen zur Gebäudehülle müssen wissen, dass eine besonders luftdichte Ausführung zu realisieren ist, deren Qualität mittels Blower-Door-Test geprüft wird.

Allen Fachplanern obliegt die besondere Aufgabe, mit Hilfe einer detaillierten Planung und Beschreibung (Qualitäten, Arbeitsgänge, besondere Maßnahmen) jedem Bieter seine konkreten Aufgaben- und Leistungsbereiche zu vermitteln, damit dieser sein Angebot klar und aufwandsgerecht kalkulieren kann.

Seitens des Bauherrn muss mehr Engagement, als für Standardprojekte üblich, zur Überwachung des Ablaufs und der Ausführungsqualität erbracht werden.

2.4 Behördliche Anforderungen

Für das Projekt Passivhallenbad Lünen wurden keine erweiterten behördlichen Anforderungen im Vergleich zu Standardprojekten identifiziert (Bauordnung des Landes NRW). Die allgemeinen baurechtlichen Grundlagen werden in Anlage 2 behandelt (Anlage 2, Gliederungspunkt 3.3, S. 12 ff.).

Es konnte festgestellt werden, dass mit der Realisierung des Passivhallenbades Lünen keine Mehraufwendungen im Bereich des Brandschutzes einhergehen (Anlage 2, Gliederungspunkt 9., S. 124 ff.).

2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Im Lippe Bad wird eine moderne Gebäude-Leit-Technik (GLT) genutzt. Über diese wird der gesamte Betrieb der Technischen Anlagen geregelt. Dort laufen alle Informationen aus gesonderten Regelungen zusammen.

Der Leitrechner wird ebenso benutzt, um alle im System Hallenbad befindlichen Zähleinrichtungen und Sensoren auszulesen und mittels der Übergabe an einen weiteren Rechner auch zu archivieren (ca. 700 Kanäle). Beide Rechner sind über Fernzugriff per Zugangscode erreichbar.

Als federführender Dienstleister im Monitoring war das Passivhaus Institut (PHI), Darmstadt beauftragt und aktiv. Partnerschaftlich unterstützt wurden deren Aktivitäten seitens der Firma Eneratio, Ingenieurbüro für rationellen Energieeinsatz GbR, Hamburg (Planungsbüro zu sämtlichen Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung) und der Bädergesellschaft Lünen mbH (BGL). An dieser Stelle wird den damit befassten Personen Frau Jessica Grove-Smith (PHI), Herrn Soeren Peper (PHI), Herrn Olaf Ahrens (Eneratio) und Herrn Thomas Claus (BGL) besonderer Dank für die geleistete Arbeit ausgesprochen.

Die Messtechnik und die Messdatenauswertung sind detailliert in Anlage 3 (Monitoring Passivhaus-Hallenbad Lippe-Bad Lünen) auf den Seiten 23 bis 92 dargestellt.

3. Ergebnisse

Das Lippe Bad Lünen in Passivhausbauweise wurde planmäßig in rund 2 Jahren Bauzeit erstellt und am 9. September 2011 im Probebetrieb eröffnet. Es ist das erste öffentliche Hallenbad, das als Umwelt-Innovationsprojekt mit Konzepten der Passivhaustechnologie realisiert wurde.

Aus der Beurteilung aller am Bauprozess beteiligten und bauleitenden Fachleute geht hervor, dass das Lüner Projekt insgesamt keine typischen Besonderheiten im Vergleich zu Bauprozessen von Standardprojekten in EnEV-Bauweise begründete.

Zusammenfassend und im Vorgriff auf die folgenden Detailergebnisse des Monitorings kann beurteilt werden, dass die Erwartungen zur Energieeinsparung mit diesem Projekt in der Praxis sogar übertroffen wurden. Wie im Monitoringbericht (Anlage 3) zusammengefasst, wurde der auf die Energiebezugsfläche (EBF) bezogene Wärmebedarf mit 258 kWh/(m^2_{EBF}*a) und der Strombedarf mit 156 kWh/(m^2_{EBF}*a) festgestellt. Im Vergleich zu zitierten Literaturmittelwerten zeigt das Lippe Bad einen um 67 % niedrigeren Wärmebedarf und einen um 43 % niedrigeren Strombedarf.

3.1 Bewertung der Vorhabensdurchführung

Sehr positiv für die Vorhabensdurchführung erwiesen sich die soliden Vorbereitungen des Projekts über die vorhegende Grundlagenuntersuchung (Anlage 1) und den darauf aufbauenden, integralen Planungsprozess (Anlage 2). Mit diesen Vorbereitungen konnten die Unterlagen zur Angebotseinholung über europaweite Ausschreibungen sehr detailliert und für die Bieter recht eindeutig formuliert werden.

Vorteilhaft für die Projektabwicklung war es, dass die im integralen Planungsprozess beteiligten Personen der jeweiligen Fachplanung gleichfalls die Ausschreibungsunterlagen erstellt haben und dazu auch die Bauleitung im Bauprozess führten. Damit konnte die erfahrungsgemäß negative Wirkung zusätzlicher Schnittstellen (Planung/Ausführung) günstig gemindert werden.

3.2 Ergebnisse des Messprogramms, Stoff- und Energiebilanz

Die Ergebnisse des Messprogramms im Lippe Bad sind in Anlage 3 detailliert beschrieben.

Die Daten der Energiebedarfsstruktur und deren Deckung sind im folgenden Kapitel 3.3 zur Berechnung der CO_2-Äquivalente im Vergleich von EnEV-Variante (Tabelle 1 und 5), Passivhaus-Planungs-Variante (Tabelle 2 und 5) und IST-Situation Lippe Bad (Tabelle 6 und 8) zusammengestellt.

3.3 CO_2-Äquivalente im Vergleich, Umweltbilanz

Eine Bilanzierung der CO_2-Äquivalente gibt Aufschluss zu den wesentlichen Treibhausgas-Emissionen, die sich aufgrund der Energiebedarfe und der Art und Weise der zur Bedarfsdeckung gehandhabten Systeme ergeben.

Zunächst sollen die CO_2-Äquivalente der Energieversorgung für das Lippe Bad im Baustandard nach EnEV 2007 und nach den Vorgaben der Passivhaus-Planung ermittelt werden (Energiebezugsfläche (EBF) = 3.912 m^2).

Tabelle 1 zeigt die Energiebedarfsstruktur der Variante EnEV 2007 und Tabelle 2 die der Planung als Passivhaus.

Unter dem Punkt Wärme für Raumheizung/-lüftung sind die Wärmebedarfe aller Räume (Transmission und Lüftung) und die Wärmeverluste der nötigen Wärmeverteilung zusammengefasst.

Unter dem Punkt Wärme für Wasser sind die Wärmebedarfe für die Erwärmung von Beckenfrischwasser, zum Ausgleich von Beckenwasser-Wärmeverlusten und -Verdunstung und für die Duschwassererwärmung nebst der Speicher- und Verteilverluste für Trinkwarmwasser zusammengefasst.

Tabelle 1: Energiebedarf der Variante EnEV 2007 (Tabellenfortsetzung nächste Seite)

Variante EnEV-Plan (Simulation, EBF: 3.912 m^2)					
		spezifisch [kWh/(m^2*a)]	absolut [kWh/a]	Anteil an gesamtem End-energiebedarf	Anteil an Wärme- bzw. Strombedarf
Endenergiebedarf gesamt		1.121,0	**4.385.352**	100,0 %	
Wärmebedarf gesamt		868,8	*3.398.746*	77,5 %	100,0 %
W	*Wärme* für Raumheizung/-lüftung	350,9	1.372.721	31,3 %	40,4 %
W	*Wärme* für Wasser	517,9	2.026.025	46,2 %	59,6 %
Strombedarf gesamt		252,2	*986.606*	22,5 %	100,0 %

S	*Strom* für Lüftung, Heizung, Sanitär	112,1	438.535	10,0 %	44,4 %
S	*Strom* für Schwimmbad-/ Badewassertechnik	119,9	469.049	10,7 %	47,6 %
S	*Strom* für Beleuchtung und allg. Verbraucher	20,2	79.022	1,8 %	8,0 %

Tabelle 2: Energiebedarf der Variante Planung als Passivhaus

Variante Passivhaus-Plan (Simulation, EBF: 3.912 m²)					
		spezifisch [kWh/(m²*a)]	absolut [kWh/a]	Anteil an gesamtem End-energiebedarf	Anteil an Wärme- bzw. Strombedarf
Endenergiebedarf gesamt		549,0	**2.147.688**	100,0 %	
Wärmebedarf gesamt		405,2	*1.585.142*	73,8 %	100,0 %
W	*Wärme* für Raumheizung/-lüftung	95,5	373.596	17,4 %	23,6 %
W	*Wärme* für Wasser	309,6	1.211.155	56,4 %	76,4 %
Strombedarf gesamt		143,8	*562.546*	26,2 %	100,0 %
S	*Strom* für Lüftung, Heizung, Sanitär	32,9	128.705	6,0 %	22,9 %
S	*Strom* für Schwimmbad-/ Badewassertechnik	92,2	360.686	16,8 %	64,1 %
S	*Strom* für Beleuchtung und allg. Verbraucher	18,7	73.154	3,4 %	13,0 %

Zur Energieversorgung wird jeweils ein Erdgas-Blockheizkraftwerk (Erdgas-BHKW, gekoppelte Erzeugung von Wärme und Strom, Volllastbetriebsstunden > 6.000 h/a) nebst Erdgas-Brennwert-Spitzenheizkessel berücksichtigt. Der zum Objektbedarf im wärmegeführten BHKW-Betrieb erzeugte überschüssige BHKW-Strom wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Zur Strombedarfsdeckung nach Bedarfs-Lastgang ist zeitweise ein Strombezug aus dem vorgelagerten Versorgungsnetz erforderlich. Dieses System entspricht einem häufig angewendeten Energieversorgungssystem für Hallenbäder.

Zur Simulation und Auslegung der BHKW-Systeme wird die Software BHKW-Plan genutzt, die sich bei den Stadtwerken Lünen in vielfältigen Projekten bewährt hat.

Für das BHKW wird ein Gesamtwirkungsgrad von 88,3 % berücksichtigt (elektrisch 39,5 %, thermisch 48,8 %). Diese technischen Daten beruhen auf mehrjährig ermittelten Betriebsmittelwerten der Stadtwerke Lünen für insgesamt 7 Erdgas- und 14 Biogas-BHKWs (davon speisen 17 BHKWs vergleichbarer Leistungsklasse ihre Wärmeproduktion in das Fernwärmenetz und die Stromproduktion in das Versorgungsnetz der Stadtwerke Lünen ein). Für den Erdgas-Brennwert-Spitzenheizkessel wird ein Jahresnutzungsgrad auf Basis des Heizwertes von 103 % angesetzt. Die ermittelten Systemkennwerte sind in Tabelle 3 verzeichnet.

Tabelle 3: Kennwerte der Planung und der Energieversorgung im Baustandard EnEV 2007 und als Passivhaus auf Jahresbasis (Klima Standort Essen)

EBF 3.912 m²	**geplanter Baustandard EnEV 2007**	**geplanter Baustandard Passivhaus**
Wärmebedarf	3.398.746 kWh	1.585.142 kWh
Strombedarf	986.606 kWh	562.546 kWh
Wärmeleistungsbedarf	1.023 kW	510 kW
Wärmeleistung BHKW	324 kW	153 kW
Stromleistung BHKW	260 kW	123 kW
Kesselleistung	720 kW	400 kW
Volumen Pufferspeicher	2 m³	2 m³
Wärmeproduktion BHKW	2.075.544 kWh	1.034.892 kWh
Wärmeproduktion Kessel	1.323.202 kWh	550.250 kWh
Stromproduktion BHKW	1.679.999 kWh	831.972 kWh
Stromeigenverbrauch	814.506 kWh	480.000 kWh
Strombezug aus Netz	172.100 kWh	82.546 kWh
Stromeinspeisung Netz	865.493 kWh	351.972 kWh
Erdgasbedarf (H_U) BHKW	4.253.163 kWh	2.114.229 kWh
Erdgasbedarf (H_U) Kessel	1.284.662 kWh	534.223 kWh

Die Bilanzierung der CO_2-Äquivalente ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Die rechnerische Differenz zwischen der an die Energiezufuhr an das System Hallenbad (Erdgas für BHKW, Erdgas für Kessel, Strom aus dem Netz) gebundenen CO_2-

Äquivalente und der an die Energieabfuhr aus dem System Hallenbad (BHKW Strom Netzeinspeisung) gebundenen CO_2-Äquivalente entspricht der CO_2-Äquivalente, die dem Hallenbadbetrieb direkt zuzurechnen sind.

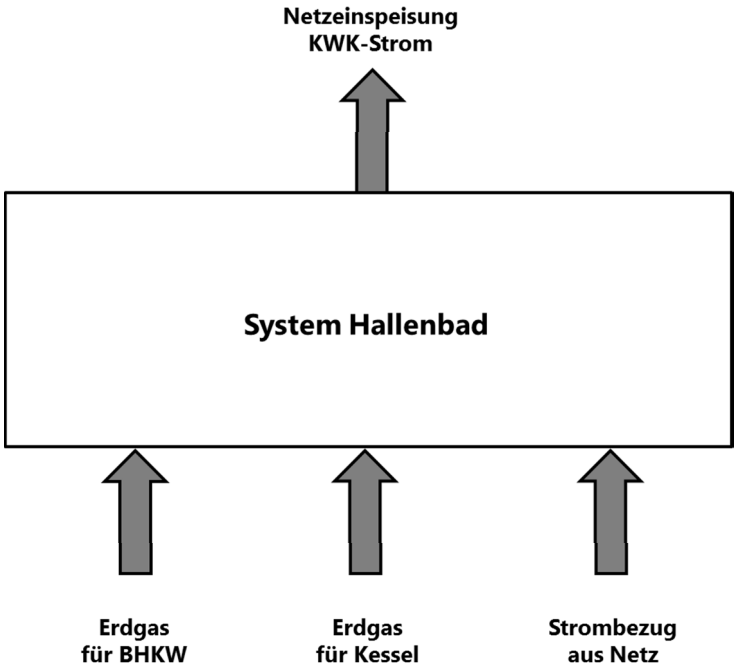


Bild 1: Schema zur Bilanzierung der Energieströme und der daran gebundenen CO_2-Äquivalente (Zufuhr +, Abfuhr -)

Für die Zuordnung bzw. Allokation von Emissionen auf die jeweiligen Koppelprodukte Strom und Wärme aus Anlagen der Kraftwärmekopplung werden unterschiedliche Methoden empfohlen[1]. In den hier erarbeiteten BHKW-Bilanzierungen wird die IEA-Methode (International Energy Agency) genutzt. Die IEA-Methode teilt die CO_2-Emissionen proportional im Verhältnis der gekoppelt erzeugten Produkte, wodurch dem Produkt mit dem höheren Wirkungsgrad (höherer Output) auch der höhere Emissionsanteil zukommt. Die spezifischen Emissionen je Kilowattstunde Strom und Wärme sind damit vom Betrag her aber gleich. Tabelle 4 zeigt die BHKW-Kennwerte und die zu berücksichtigenden CO_2-Äquivalente für den Wärme- und Stromzweig bei BHKW-Betrieb.

---

[1] Mauch, W., Corradini, R., Wiesemeyer, K. und Schwentzek, M.: Allokationsmethoden für spezifische CO_2-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 55. Jg. (2010) Heft 9 oder auch Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V.: Hinweise und Empfehlungen zur Ermittlung der spezifischen CO_2-Emissionen von aus KWK-Anlagen eingespeistem Strom im Rahmen der Stromkennzeichnungspflicht

Tabelle 4: Kennwerte zur Emissionsbetrachtung von einem Erdgas-BHKW (bezogen auf 1 kWh Erdgaseinsatz)

Gesamtnutzungsgrad	88,3%
Elektrischer Wirkungsgrad	39,5 %
Thermischer Wirkungsgrad	48,8 %
Stromkennzahl	0,80943
CO_2-Äquivalent Erdgas	285 g[2] (auf Heizwert bezogen)
Brennstoffanteil Stromzweig	39,5/(39,5+48,8) * 100 % = 44,73 %
Stromerzeugung	0,395 kWh_{el}
CO_2-Äquivalent für Strom	44,73 % * 285 g = 127,5 g
Spez. CO_2-Äquivalent Strom	127,5 g / 0,395 kWh_{el} = 322,8 g/kWh_{el}
Brennstoffanteil Wärmezweig	48,8/(39,5+48,8) * 100 % = 55,27 %
Wärmeerzeugung	0,488 kWh_{th}
CO_2-Äquivalent für Wärme	55,27 % * 285 g = 157,5 g
Spez. CO_2-Äquivalent Wärme	157,5 g / 0,488 kWh_{th} = 322,8 g/kWh_{th}

Zur Ermittlung der auf den Strombezug aus dem Versorgungsnetz entfallenden CO_2-Äquivalente wird der Wert 579 g/kWh verwendet[3]. Somit ergibt sich die Bilanz der CO_2-Äquivalente gemäß Tabelle 5.

Tabelle 5: CO_2-Äquivalente für das System Hallenbad nach EnEV 2007- und Passiv-Standard (Werte auf Jahresbasis, Systematik gem. Bild 1)
(Tabellenfortsetzung nächste Seite)

+ zugeführt, - abgeführt	**Baustandard EnEV 2007**			**Baustandard Passiv**		
	kWh	spez. CO_2-Äqui. [g/kWh]	ges. CO_2-Äqui. [kg]	kWh	spez. CO_2-Äqui. [g/kWh]	ges. CO_2-Äqui. [kg]
Erdgasbezug für BHKW	4.253.163	285	1.212.151	2.114.229	285	602.555

[2] Wert für Erdgas (bezogen auf Heizwert) gemäß Gemis 4.81

[3] vgl. http://www.kea-bw.de/service/emissionsfaktoren/

Erdgasbezug für Kessel	1.284.662	285	366.129	534.223	285	152.254
Strombezug aus Netz	172.100	579	99.646	82.546	579	47.794
Stromeinspeisung KWK-Strom	-865.493	322,8	-279.381	-351.972	322,8	113.617
Bilanzsumme	4.844.432	*(288,7)*	**1.398.545**	2.379.026	*(289,6)*	**688.986**
%-Minderung der CO_2-Äqui. über Passivbauweise	$=\frac{688.986-1.398.545}{1.398.545}*100\,\%=-50{,}74\,\%$					

Mit dem Baustandard des Lippe Bades nach EnEV 2007 wären an Umweltbelastung ca. 1.400 t CO_2-Äquivalent verbunden. Mit vergleichbarem Versorgungssystem können diese Emissionen über den Passiv-Baustandard um rund 51 % gemindert werden.

Die Bilanzierung der CO_2-Äquivalente wird nachfolgend mit den im Monitoring des Lippe Bades ermittelten Daten durchgeführt. Die zur verbesserten Emissionsminderung realisierten technischen Systeme sind:

- Einsatz eines Biogas-BHKWs (Leistung elektrisch 260 kW, Leistung thermisch 324 kW) mit rund 7.500 Volllastbetriebsstunden, vollständige Einspeisung des EEG-Stromes und Einspeisung von im Überschuss zum Objektbedarf erzeugter BHKW-Wärme in das Fernwärmenetz der Stadtwerke Lünen
- Nutzung von Abgas-Kondensationswärme und Gehäuseabwärme zur Objektversorgung aus dem Biogas-BHKW und einem in der Technikzentrale benachbarten Erdgas-BHKW der Stadtwerke Lünen zur Wärmeeinspeisung in deren Fernwärmenetz
- Restbezug von Wärme zur Objektversorgung aus dem Fernwärmenetz der Stadtwerke Lünen
- Objekt-Stromversorgung aus den Aufdach-Photovoltaikanlagen des Lippe Bades mit teilweiser Netzeinspeisung
- Vollständige Einspeisung des über zwei bodenstehende, dem Sonnenstand nachgeführte Photovoltaik-Tracker-Anlagen erzeugten Stroms (das gegenwärtig geltende EEG kennt keine Eigenverbrauchsregelung für bodenstehende PV-Anlagen)

Bild 2 zeigt das Schema zur Bilanzierung.

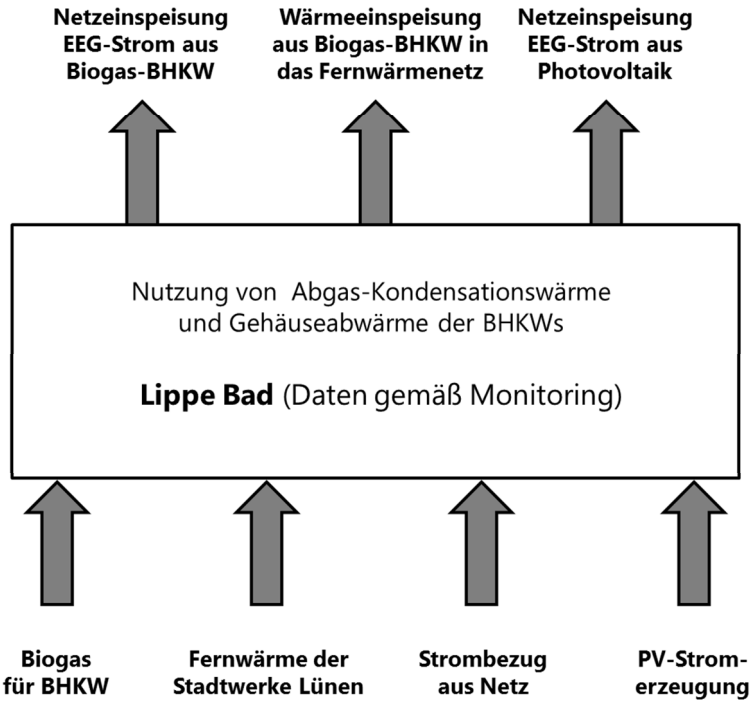


Bild 2: Schema zur Bilanzierung der Energieströme und der daran gebundenen CO_2-Äquivalente (Zufuhr +, Abfuhr -)

In Tabelle 6 sind die über das Monitoring festgestellten Energiemengen der einzelnen Bedarfs- und Deckungspfade aufgelistet.

62,3 % der eingesetzten Energie dienen der Wärmeversorgung und 37,7 % der Stromversorgung des Lippe Bades.

63,3 % der eingesetzten Wärme werden zur Wassererwärmung benötigt und 36,7 % für die Raumlufttechnischen Anlagen.

Im Strombedarf entfallen 49,3 % auf die Schwimmbad-/Badewassertechnik (einschließlich der Hauptpumpen, der Ultraviolettstrahler zur Minderung der Chloramine (Nebenprodukte des Desinfektionsprozesses mit Chlor) und Betriebsstrom der Elektrolyse zur Gewinnung von Chlor als Desinfektionsmittel aus dem im Badewasser gelösten Salz), 33,9 % auf die Lüftung (einschließlich einer Fortluft-Wärmepumpe im Hallenbereich 1 mit Warm- und Erholungsbecken) und 16,9

% auf die Beleuchtung mit weiteren allgemeinen Stromverbrauchern (Steckdosen, Dosierpumpen, kleinere Umwälzpumpen u. dgl.).

Tabelle 6: Energiebedarfe und deren Deckung gemäß den Monitoring-Ergebnissen für das Lippe Bad (Werte auf Jahresbasis)

Lippe Bad Monitoring (EBF: 3.912 m²)					
		spezifisch [kWh/(m²*a)]	absolut [kWh/a]	Anteil an gesamtem End-energiebedarf	Anteil an Wärme- bzw. Strombedarf
Endenergiebedarf gesamt		414,0	**1.619.568**	100,0 %	
Wärmebedarf gesamt		258,1	*1.009.687*	62,3 %	100,0 %
W	*Wärme* für Raumheizung/-lüftung	94,7	370.406	22,9 %	36,7 %
W	*Wärme* für Wasser	163,4	639.203	39,5 %	63,3 %
Strombedarf gesamt		155,9	*609.881*	37,7 %	100,0 %
S	*Strom* für Lüftung (und 1 Fortluft-Wärmepumpe)	52,8	206.554	12,8 %	33,9 %
S	*Strom* für Schwimmbad-/ Badewassertechnik	76,9	300.833	18,6 %	49,3 %
S	*Strom* für Beleuchtung und allg. Verbraucher	26,3	102.886	6,4 %	16,9 %
Deckungsanteile zum Endenergiebedarf					
W	*Wärme aus Biogas-BHKW*	87,5	342.284	21,1 %	33,9 %
W	*BHKWs Abgas-Kondensationswärme*	86,5	338.245	20,9 %	33,5 %
W	*BHKWs Gehäuseabwärme*	42,8	167.608	10,3 %	16,6 %
W	*Fernwärmebezug von den Stadtwerken*	41,3	161.550	10,0 %	16,0 %
S	*PV-Eigenverbrauch*	18,6	72.763	4,5 %	11,9 %
S	*Strombezug aus vorgelagertem Netz*	137,3	537.118	33,2 %	88,1 %
PV-Netzeinspeisung		-	*24.153*	-	-

Zur Emissionsbilanz Lippe Bad wird das hier eingesetzte Biogas-BHKW ebenso betrachtet, wie die Erdgas-BHKWs.

Für die Zuordnung von Emissionen auf die jeweiligen Koppelprodukte Strom und Wärme aus Anlagen der Kraftwärmekopplung wird hier ebenso die IEA-Methode (International Energy Agency) genutzt. Die IEA-Methode teilt die CO_2-Emissionen proportional im Verhältnis der gekoppelt erzeugten Produkte, wodurch dem Produkt mit dem höheren Wirkungsgrad (höherer Output) auch der höhere Emissionsanteil zukommt. Die spezifischen Emissionen je Kilowattstunde Strom und Wärme sind damit vom Betrag her aber gleich.

Tabelle 7 zeigt die BHKW-Kennwerte und die zu berücksichtigenden CO_2-Äquivalente für den Wärme- und Stromzweig des Biogas-BHKWs und in Tabelle 8 ist die Bilanz der CO_2-Äquivalente für das Lippe Bad auf Basis der Monitoringdaten aufgeführt (vgl. dazu Bild 2: Schema zur Bilanzierung der Energieströme und der daran gebundenen CO_2-Äquivalente).

Tabelle 7: Biogas-BHKW-Kennwerte und zu berücksichtigende CO_2-Äquivalente für den Wärme- und Stromzweig (bezogen auf 1 kWh Biogaseinsatz)
(Tabellenfortsetzung nächste Seite)

Gesamtnutzungsgrad	88,3%
Elektrischer Wirkungsgrad	39,5 %
Thermischer Wirkungsgrad	48,8 %
Stromkennzahl	0,80943
CO_2-Äquivalent Biogas	19 g[4] (auf Heizwert bezogen)
Brennstoffanteil Stromzweig	39,5/(39,5+48,8) * 100 % = 44,73 %
Stromerzeugung	0,395 kWh_{el}
CO_2-Äquivalent für Strom	44,73 % * 19 g = 8,5 g
Spez. CO_2-Äquivalent Strom	8,5 g / 0,395 kWh_{el} = 21,52 g/kWh_{el}

[4] Wert gemäß Prämissen der Klimaschutz-Allianz Hannover (Verweis auf Gemis 4.4/2007)

Brennstoffanteil Wärmezweig	48,8/(39,5+48,8) * 100 % = 55,27 %
Wärmeerzeugung	0,488 kWh_{th}
CO_2-Äquivalent für Wärme	55,27 % *19 g = 10,5 g
Spez. CO_2-Äquivalent Wärme	10,5 g / 0,488 kWh_{th} = 21,52 g/kWh_{th}

Tabelle 8: CO_2-Äquivalente für das Lippe Bad mit Daten des Monitorings (Werte auf Jahresbasis, Bilanzierung gem. Bild 2)
(Tabellenfortsetzung nächste Seite)

Lippe Bad (mit Daten des Monitorings)			
+ zugeführt, - abgeführt	kWh	spez. CO_2-Äqui. [g/kWh]	ges. CO_2-Äqui. [kg]
Biogasbezug für BHKW aus Biogasanlage Lünen	4.960.362	19	94.247
Fernwärmebezug aus Netz der Stadtwerke Lünen	161.550	146[5]	23.586
Strombezug aus Netz der Stadtwerke Lünen	537.118	579	310.991
Photovoltaik Stromerzeugung am Lippe Bad (multikristallin)	96.916	110[6]	10.661
EEG-Stromnetzeinspeisung aus dem Biogas-BHKW	-1.950.000	21,52	-41.964
Fernwärmenetzeinspeisung aus dem Biogas-BHKW	-2.087.716	21,52	-44.928
EEG-Stromnetzeinspeisung aus Photovoltaik	-24.153	110	-2.657
Bilanzsumme	1.694.077	*(206,6)*	**349.937**
%-Minderung der CO_2-Äqui. mit Bezug auf Baustandard EnEV 2007, vgl. Tab. 5	$= \frac{349.937 - 1.398.545}{1.398.545} * 100\,\% = -75{,}0\,\%$		

[5] Wert für das Fernwärmesystem der Stadtwerke Lünen (ermittelt im Jahr 2011, Bescheinigungen nach FW-309-1 gültig bis zum Jahr 2015, f_p-Gutachter-Nr.: FW 609-104): Primärenergiefaktor 0,21. Aus KWK-Prozessen stammen 93,7 % der Fernwärme. Erfüllungsgrad gem. EEWärmeG ist 196 %

[6] Wert gemäß Prämissen der Klimaschutz-Allianz Hannover (CO_2-Äquivalente in g/kWh für PV-multikristallin = 110, für PV-monokristallin = 117, für PV-amorph = 72)

%-Minderung der CO_2-Äqui. mit Bezug auf Baustandard Passiv, vgl. Tab. 5	$= \frac{349.937 - 688.986}{688.986} * 100\,\% = -49{,}2\,\%$

Die Berechnungsergebnisse (Tabelle 5) zeigen, dass über das Passivhauskonzept im Vergleich zur EnEV-Variante bei gleichem Techniksystem (Kraft-Wärmekopplung über ein Erdgas-BHKW) absolut rund 51 % geringere CO_2-Äquivalente zu erreichen sind. Absolut sind das rund -710 t CO_2-Äquivalente pro Jahr. Die spezifischen Werte der CO_2-Äquivalente zum Energieeinsatz der Objektversorgung sind in beiden Varianten aber annähernd gleich (EnEV: 288,7 g/kWh, PH: 289,6 g/kWh).

Die Ergebnisse zum Lippe Bad (Tabelle 8) mit den realen Daten des Monitorings und dem speziell gestalteten Versorgungssystem zeigen Emissionen auf Jahresbasis von rund 350 t CO_2-Äquivalente. Damit überzeugt das gebaute Beispiel Lippe Bad mit um 75 % geringerer Menge an CO_2-Äquivalenten im Vergleich zur EnEV-Variante (rund 350 t/a anstatt 1.400 t/a) und mit um 49 % geringerer Menge im Vergleich zu der Passivhaus-Planungsvariante (350 t/a anstatt 689 t/a).

Dieses sehr gute Ergebnis für das Lippe Bad wird zum einen bestimmt über den absolut niedrigeren Energieeinsatz im gebauten Beispiel und zum anderen auch über den spezifisch niedrigeren Emissionswert der für das Lippe Bad gewählten Techniksysteme zur Deckung des Energiebedarfs (spezifische CO_2-Äquivalente 207 g/kWh zu 289 g/kWh).

3.4 Konzeption, Durchführung und Ergebnisse des Messprogramms

Konzeption, Durchführung und Ergebnisse des Messprogramms sind der Anlage 3 zu entnehmen (Anlage 3: Monitoringbericht des Passivhaus Instituts, Darmstadt). Aufgrund der Komplexität wurde hierzu gesondert Bericht gelegt, der allen Interessenten kostenfrei über das Internet zur Verfügung steht.

3.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Das Projekt Lippe Bad ist die innovative Entwicklung zum ersten gebauten Beispiel eines Hallenbades im Passivhauskonzept. Im gebauten Beispiel ist es mit wissenschaftlich geführtem Monitoring im Betrieb gelungen, Transparenz und Funktionserfahrungen zu den technischen Systemen herbeizuführen.

Die Handhabung und Marktgängigkeit der Passivhaustechnologie für Hallenbäder ist neben den bisher positiven Erfahrungen im Betrieb, insbesondere von den Investitionsmehrkosten abhängig. Insofern soll nachfolgend die Wirtschaftlichkeit für das Projekt Lippe Bad abgeleitet werden.

Die unterschiedlichen Einzelmaßnahmen mit dem Ziel der Energie- und Wassereinsparung lassen sich im System Hallenbad nicht isoliert voneinander wirtschaftlich beurteilen, denn die Ausschöpfung der Einsparpotenziale wird nicht allein durch eine Aneinanderreihung mehrerer Einzelmaßnahmen erreicht, sondern ergibt sich erst aus deren Kombination.

So eröffnet die hohe thermische Güte der Hülle erst die Möglichkeit, das auch über Verdunstungsreduzierung und Lüftungssystem bestehende Einsparpotenzial auszuschöpfen. Bildhaft gesprochen ist die Bauwerkshülle in Passivhausqualität (darüber höhere innere Oberflächentemperaturen und somit Sicherheit vor Bauwerk schädigender Taupunktunterschreitung) quasi das Eintrittsentgelt dafür, um mit höherer Raumluftfeuchte eine weitere Energieeinsparung (durch Minderung der Verdunstung) erschließen zu können. Ebenso wirkt eine Warmwassereinsparung (z. B. Duschwarmwasser) auf den Wasserhaushalt (Trinkkaltwasser und Abwasser), auf den Wärmehaushalt und mittelbar über die Konzeptionen von Lüftung und Wärmerückgewinnung auch auf den Stromhaushalt.

Das Passivhallenbad Lünen ist ein Prototyp und im Erstlingswerk bestehen immer besondere Entwicklungsaufwendungen und auch Risikopositionen zur Gesamtfunktion, trotz bestmöglicher Vorbereitung.

Die während der Planung noch unsichere Erkenntnislage zur Schadstoffentwicklung in der Hallenbadatmosphäre birgt beispielsweise das Risiko, entgegen der Passivhauskonzeption die Anhebung der Luftwechsel vornehmen zu müssen, um die

vorgeschriebenen Betriebsbedingungen des Hallenbades sicherzustellen. Um diesem Risiko zu begegnen, wurde die Lüftung im Lippe Bad nach üblichen Rahmenbedingungen und dem Stand der Technik für Hallenbäder ausgelegt. Entsprechend ließen sich im Erstlingswerk keine mit dem Passivhauskonzept in Aussicht stehenden Einsparungen zur Anlagentechnik Lüftung realisieren (geringere Volumenströme, reduzierte Gerätegrößen, kleiner dimensioniertes Kanalnetz der Lüftung).

Mit den Erkenntnissen aus dem Monitoring des Lippe Bades besteht für Nachfolgeprojekte ein deutlich verbessertes Planungsniveau. Beispielsweise zeigt sich im Lippe Bad, dass die über das bestehende Regelwerk zur Leistungsauslegung der Lüftung vorgegebenen Stoffübergangskoeffizienten zur Ermittlung der Verdunstung teils mehr als doppelt so hoch sind, als die aus den Monitoringdaten berechneten Werte. Dies führt zur Überdimensionierung im Bereich der Lüftungstechnik (Größe der Lüftungszentralgeräte und zugehörigem Kanalnetz). Hierbei kann in Nachfolgeprojekten eingespart werden, denn die speziellen Versuche im Lippe Bad bestätigten auch, dass bei deutlich vermindertem Zuluftvolumenstrom eine gute Raumdurchströmung über die Induktionswirkung der Zuluftdüsen erhalten bleibt. Gleichfalls zeigten Messungen zu Luftschadstoffen (hier Trihalogenmethane (THM) als Desinfektionsnebenprodukte der Wasseraufbereitung mittels Chlorchemie) an, dass alle Messwerte in der Hallenluft unterhalb der Nachweisgrenze (5,0 bzw. 1,3 µg/m³ Luft) liegen. Eine erhöhte Belastung der Hallenluft mit THMs konnte selbst bei den niedrigen Außenluftvolumenströmen nicht festgestellt werden.

Mit dem BMUB-Umweltinnovationsvorhaben „Hallenbad-Passivhaus Lünen" wurden Netto-Investitionsmehrkosten (gegenüber Standard gem. EnEV 2007) zum ersten gebauten Beispiel von rund 5,33 Mio. € identifiziert. Davon wurden als förderfähige Mehrkosten rund 4,33 Mio. € festgelegt (nicht rückzahlbare Zuwendung auf die Ausgabenbasis von 12,98 Mio. €[7] in Höhe von 9,27 %, höchstens aber 1,2 Mio. €).

---

[7] Ende Dezember 2013 betrugen die Nettokosten für die Erstellung des Prototyps 12.855.712,99 € (BMUB-Ausgabenbasis). Die Projektabrechnung ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht vollends abgeschlossen. Teils sind rechtliche Auseinandersetzungen aufgrund von Insolvenzfällen beschäftigter Baufirmen und zu Mängelbeseitigungsansprüchen noch nicht abgeschlossen

Eine Wirtschaftlichkeitsbeurteilung aufgrund der konkreten Modellprojektkosten ist ungeeignet, weil bereits mit dem Planungsaufwand beginnend zu viele Mehrkosten aufgrund der Erstmaligkeit wirksam wurden.

Mit den im Modellprojekt gewonnenen Erkenntnissen ist die Übertragbarkeit auf andere Bäderprojekte in Gänze, aber auch in technischen und gestalterischen Teilbereichen gegeben. Das neue Wissen aus dem gebauten Beispiel lässt sich vorteilhaft in weiteren Neubauprojekten (Folgeprojekten) und auch in Sanierungsmaßnahmen zur Anwendung bringen.

Vor diesem Hintergrund besteht die Beurteilung, dass in Folgeprojekten ähnlicher Größe mit rund 50 % der zum Erstlingswerk nötigen Mehrkosten gegenüber einem EnEV-Standardprojekt zu rechnen sein wird. Das ist ein Betrag von ca. 2,6 Mio. € einschließlich der Planungsmehraufwendungen und Nebenkosten *(+1,6 Mio. € in Kostengruppe 300* (Baukonstruktion): 1.000 T€ für passivhaustaugliche Wärmedämmung der opaken Hülle, 600 T€ Verglasung mit Tageslichtoptimierung und *+1,0 Mio. € in Kostengruppe 400* (Technische Anlagen): 260 T€ für Lüftung, 360 T€ für Badewassertechnik, 300 T€ für Wärmeversorgung, Grauwasseranwendungen und erweiterte Abwasseranlagentechnik, 80 T€ für Beleuchtung). Bezogen auf die Kostenplanung für ein EnEV-Standardprojekt vergleichbarer Größe sind die Mehraufwendungen zur Passivhallenbadqualität rund 20 % bis 25 %.

Um die Wirtschaftlichkeit zu beurteilen, werden nachfolgend Standardprojekt (EnEV 2007) und Passivhallenbadprojekt auf Grundlage der vorgenannten Mehrkosten gegenübergestellt. Die Einsparungen an Wärme, Strom, Trinkwasser und Abwasser/Entwässerung sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Einsparungen an Wärme, Strom, Trinkwasser und Abwasser im Lippe Bad, Bezugspunkte sind Werte eines EnEV-Standardprojektes und die des Monitorings, (Werte auf Jahresbasis, Kosten netto)

Sparte	**Standard-projekt EnEV 2007**	**Passiv-Hallenbad (Monitoring)**	**Einspar-menge**	**spez. Kosten**	**Einspar-betrag**
Wärme	3.398.746 kWh	1.009.687 kWh	2.389.059 kWh	0,07 €/kWh	167.234 €
Strom	986.606 kWh	609.881 kWh	376.725 kWh	0,166 €/kWh	62.536 €
Trinkwasser	30.000 m^3	18.500 m^3	11.500 m^3	1,30 €/m^3	14.950 €
Schmutz-wasser[8]	28.000 m^3	11.000 m^3	17.000 m^3	2,36 €/m^3	40.120 €
Entwässerte, befestigte Fläche	5.000 m^2	0 m^2	5.000 m^2	1,41 €/m^2	7.050 €
				Summe Einsparbetrag	**291.890 €**

Zur weiteren Berechnung wird eine Zinshöhe von 3,5 % berücksichtigt. Den Mehraufwendungen von 2,6 Mio. € ist ein jährlicher Annuitätsbetrag von 195.310 € (aus Zins und Nutzungsdauer ermittelt, die berechnete mittlere Nutzungsdauer der Mehrkosten begründenden Systemtechnik ist 18,23 Jahre) und ein jährlicher Instandhaltungsaufwand von 41.770 € zuzuordnen (aus Mehrkosten und Instandhaltungsfaktor ermittelt). Die jährliche Teuerung von Strom-, Wärme, Trinkwasser- und Abwasserkosten wird mit 1,5 % berücksichtigt. Die jährliche Teuerung von Wartungs- und Instandhaltungskosten wird mit 1,2 % berechnet. Mit diesen Zahlen können nun folgende Jahreskostenrechnungen ausgeführt werden:

[8] Begründet durch die Lagegunst des Hallenbades wurde eine Direkteinleitung in den Fluss Lippe vorgesehen, um Niederschlagswasser und auch Überschussmengen von behandeltem Filterrückspülwasser der Badewasseraufbereitung ableiten zu können (ohne Gebühren einer sonst üblichen Abwasser-/Regenwasser-Kanaleinleitung)

Tabelle 10: Jahreskostenrechnung zur Wirtschaftlichkeit der Mehrinvestition zum Passivhallenbad (Nettobeträge)

	Mehrkosten Bauherr				**2.600.000**	€				
	Summe der Annuitätsbeträge				**195.310**	€				
	mittlere Nutzungsdauer der Systemtechnik				18,23	Jahre				
	Zins				3,50	%				
	Tilgung				4,01	%				
	Teuerung von Wasser, Abwasser u. Energie				1,5	%				
	Teuerung von Wartung/Instandhaltung				1,2	%				
	Energie-/Wasserkosten-Einsparung im 1. Jahr				291.890	€				
	Wartungs-/Instandhaltungskosten im 1. Jahr				41.770	€				
Alle Beträge in €										
	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	4. Jahr	5. Jahr	6. Jahr	7. Jahr	8. Jahr	9. Jahr	10. Jahr
Schulden	-2.600.000	-2.336.570	-2.069.263	-1.798.019	-1.522.778	-1.243.478	-960.056	-672.450	-380.595	-84.426
Zinsen	-91.000	-91.000	-91.000	-91.000	-91.000	-91.000	-91.000	-91.000	-91.000	-91.000
Tilgung	104.310	104.310	104.310	104.310	104.310	104.310	104.310	104.310	104.310	104.310
Einsparung	291.890	296.268	300.712	305.223	309.801	314.448	319.165	323.953	328.812	333.744
Wartung	-41.770	-42.271	-42.778	-43.292	-43.811	-44.337	-44.869	-45.408	-45.952	-46.504
Restschuld	-2.336.570	-2.069.263	-1.798.019	-1.522.778	-1.243.478	-960.056	-672.450	-380.595	-84.426	216.124

Anhand dieser Rechnung zeigt sich die Amortisation der Mehrinvestition mit dem Jahr, in dem erstmals kein Restschuldbetrag mehr ausgewiesen ist. Dies ist im 10. Jahr der Fall. Gehen wir von einer 40-jährigen Nutzungsdauer von Hallenbädern aus, zeigt sich, wie sinnvoll die Mehrinvestition zum Passivhallenbad ist. Die Motivation dazu ist aber nicht alleine wirtschaftlich begründet, denn es werden über diese Bauweise auch jährlich 1.050 t an CO_2-Äquivalenten im Vergleich zur EnEV-Variante eingespart.

Mit Optimierungen und Betriebserfahrungen im Lippe Bad, die zukünftige Handlungsoptionen zur Reduzierung der Technisierung als Kostentreiber absichern, stehen geringere Mehraufwendungen in Aussicht, die zu weiter verbesserter Wirtschaftlichkeit beitragen. Zur Absicherung neuen Wissens und dessen praktischer Handhabbarkeit, sollte das Thema Passivhallenbad weiter bearbeitet werden.

Im Markt sind Innovationen stark nachgefragt, denn bestehende Regelwerke und übliche Konzeptionen sind als nicht ausreichend einzuschätzen, um die heute bereits möglichen Einsparpotenziale zu erschließen. In diesem Sinne ist das Lippe Bad in Lünen ein wirklich erfolgreiches Modellprojekt im Techniksegment Bäder.

3.6 Technischer Vergleich zu konventionellem Verfahren

Der technische Vergleich von Passivhallenbad und konventioneller Bauweise nach EnEV wurde über die Energieverbrauchs- und Schadstoffkennwerte geführt (Kapitel 3.3). Es zeigte sich, dass mit dem Passivhauskonzept 63 % an Endenergieeinsatz und 75 % an Emissionen (CO_2-Äquivalenten) eingespart wurden.

Teilmaßnahmen des Passivhauskonzeptes zur Energieeinsparung, beispielsweise in der Badewasseraufbereitung, im Duschwarmwasser oder zur effektiven Tageslichtnutzung sind auch in einem Bauwerk nach EnEV zu realisieren. Zur umfangreichen Ausschöpfung des Potenzials zur Energieeinsparung und Schadstoffminderung bedarf es unabdingbar der hohen thermischen Qualität der passivhaustauglichen Bauwerkshülle. Diese Qualität ist quasi das Eintrittsentgelt, um weitere Einsparungen erschließen zu können. Erst diese Ausführung führt zu einem deutlich niedrigeren Transmissionswärmebedarf gegenüber Standard-Neubauten, woraus höhere, innere Oberflächentemperaturen resultieren und so die Möglichkeit eröffnet wird, das Bad mit höheren Luftfeuchten (bis zu 64 % relative Luftfeuchte) als in Standard-Neubauten üblich mit Sicherheit vor Taupunktunterschreitung zu betreiben. Das senkt die Verluste durch Verdunstung von Beckenwasser erheblich. Mit dem Einsatz hochwertiger Lüftungs-Wärmeübertrager werden die Lüftungswärmeverluste deutlich reduziert. Daraus folgt, dass die Ausschöpfung der Einsparpotenziale nicht allein durch eine Aneinanderreihung mehrerer Einzelmaßnahmen erreicht wird, sondern dies ergibt sich erst aus der Kombination derselben. Die theoretischen Zusammenhänge sind detailliert in Anlage 1 dargestellt und die messtechnischen Feststellungen im Monitoring (Anlage 3) bestätigen diese.

Mit Blick auf Betrieb, Instandhaltung und Anforderungen an Betriebspersonal werden über das Passivhauskonzept keine Erschwernisse ersichtlich.

Das Angebot von Hallenbädern ist eine sehr hochwertige Dienstleistungsaufgabe, die in der Öffentlichkeit meist nicht adäquat wahrgenommenen bzw. anerkannt wird. In Lünen wird darum über Einladungen zu technischen Führungen für Schulen, Vereine, Siedlergemeinschaften u. dgl. versucht, mehr Verständnis dafür zu vermitteln. Dazugehörig ist auch die Führung durch die Technik, um zu vermitteln, dass sich das Gros hierzu unterhalb der Wasseroberfläche befindet (ähnlich einem Eisberg).

4. Empfehlungen

Im Gestaltungsprozess für neue Hallenbäder oder auch für Kernsanierungen ist zu empfehlen, folgende Leitsätze und deren Rangfolge konsequent anzuwenden:

1. Energiebedarfsminimum konstruieren
2. Effizienz der unabdingbaren Systemtechnik Allerorts steigern
3. Erneuerbare Energie nutzen

Das Projekt Passivhallenbad Lünen ist ein transparentes Modellprojekt für einen solchen Gestaltungsprozess (vgl. Anlage 2, Integraler Planungsprozess).

In der Bauausführung zeigte sich, dass Maßnahmen der Qualitätssicherung konsequent und permanent auf hohem Niveau angewendet werden müssen. Viele routinierte Arbeitsabläufe der gängigen Baupraxis, über nahezu alle ausführenden Gewerke, entsprechen nicht der mit der Passivbauweise zwangsweise verbundenen Forderung nach Ausführungsqualität und Detailtreue. Im Bauvorhaben Lippe Bad wurde neben den grundlegenden Bauleitungsaufgaben mit zusätzlich einer 0,5 Vollzeitstelle der Prüfung und Dokumentation von Ausführungsqualitäten und Detailtreue nachgegangen (mit Berichterstattungen in den regelmäßigen Baubesprechungen). Für Nachfolgeprojekte ist zu empfehlen, diesbezügliches Engagement zu verdoppeln, um noch detaillierte Übersicht über alle täglichen Baufortschritte erhalten und direkter bei Fehlentwicklungen oder Minderleistungen eingreifen zu können.

Im Projekt Lippe Bad wurde mit der Einregulierungszeit der technischen Systeme rund 1 Woche vor Eröffnung begonnen. Weitere Anpassungen wurden dann im laufenden Betrieb unter Praxisbedingungen vorgenommen. Aufgrund der vielfältigen Aufgaben zum Monitoring und der damit verbundenen Systemprüfungen waren bei diesen Anpassungen die jeweiligen Fachleute stets vor Ort. Nur mit deren Hilfe konnten die Aufgaben gemeistert werden. Sofern diese Fachleute bei Nachfolgeprojekten nicht planmäßig ab Eröffnung vor Ort zu Verfügung stehen können, sollte eine Einregulierungszeit von 3 Wochen vor der Eröffnung eingeplant werden, um alle Systemeinstellungen vornehmen, abstimmen und prüfen zu können.

Im Projekt Lippe Bad werden relevante Daten zum Monitoring auf die Gebäudeleittechnik übertragen und damit transparent. Eine so detaillierte messtechnische Ausstattung ist aber keinesfalls Standard. Insofern sollte für Folgeprojekte (ohne Monitoringsystem) mindestens ein „abgespecktes" System zum Energiedatenmanagement mit regelmäßigem Report eingeplant werden, um Transparenz zu den Betriebs- und Verbrauchswerten zu sichern und zeitnah Fehleinstellungen, Fehlfunktionen oder unplanmäßige Entwicklungen erkennen zu können. Ebenso wie für viele andere betrieblichen Belange, gehört die Aufgabe und Verantwortung zum regelmäßigen Energiedatenmanagement nach unserem Verständnis in die Hände der Badleitung.

4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Die Erfahrungen mit der Praxiseinführung sind sehr gut. Mit Blick auf Betrieb, Instandhaltung und Anforderungen an Betriebspersonal werden über das Passivhauskonzept keine Erschwernisse ersichtlich.

Maßgebend für das Lippe Bad ist die gute Annahme des Bades durch die Öffentlichkeit, die Schulen und die Vereine. Das Bad gefällt den Nutzern in Gestaltung, Aufenthaltsqualität und Freundlichkeit des Personals.

Hinsichtlich Aufenthaltsqualität werden von vielen Besuchern die Sauberkeit und die angenehme Akustik benannt. Die gegenüber einem Standardbau höhere Luftfeuchte wird von den Nutzern weder negativ noch positiv erwähnt.

Eine vergleichende Einordnung in den Altenburg BäderReport 2013[9] gibt weiteren Aufschluss. Diese Branchenstudie zu öffentlichen Schwimmbädern erfasst die wesentlichen Informationen von rund 1.000 Bäderbetrieben in Deutschland. Im Fokus steht dabei die Analyse zukunftsfähiger Angebotsstrukturen zur Aufrechterhaltung der Sozialfunktion für Schulen, Vereine und Öffentlichkeit.

---

[9] Altenburg, D.; Steinert-Lieschied, M.: Altenburg BäderReport 2013, Altenburg Unternehmensberatung GmbH, Düsseldorf (www.altenburg-gmbh.de)

Schulen, Vereine und die Öffentlichkeit haben mit dem Lippe Bad in Lünen einen echten Mehrwert. Der Vergleich zu anderen Kommunen mit 50.000 bis 200.000 Einwohner ergibt: Das Lippe Bad punktet auf vielen Ebenen. Liegen die durchschnittlichen Besucherzahlen andernorts bei 81.000 Badegästen pro Jahr und Anlage, waren es im Lippe Bad rund 214.900 (2012 = 216.114, 2013 = 213.613). Dies zeigt an, wie gut das Badkonzept von Bürgerinnen und Bürgern angenommen wird.

Dem liegt insbesondere das höhere Nutzungsangebot zugrunde. Im Durchschnitt verfügen deutsche Hallenbäder über eine Wasserfläche von 472 qm. Das Lippe Bad hingegen weist mit rund 850 qm Wasserfläche über alle Beckenbereiche eine sehr viel größere und im Angebot vielfältig gestaltete Wasserfläche auf.

Diese Relationen machen deutlich, warum Schulen und Vereine im Vergleich zum bundesweiten Durchschnitt das Lippe Bad so gut nutzen können: Während Kommunen mit Einwohnerzahlen wie Lünen im Mittel 77.000 Gäste aus Schulen und Vereinen unterbringen können, nimmt das Lippe Bad rund 110.000 (2012 = 110.077, 2013 = 108.793) Schul- und Vereinsgäste auf. Das sind ca. 43 Prozent mehr als andernorts.

Mit Blick auf die barrierefreie Gestaltung der Gesamtanlage muss es eine Zukunftsaufgabe sein, mehr gehandicapte Nutzer für das Lippe Bad zu gewinnen. Trotz des guten Konzepts der Barrierefreiheit und der Vorhaltung unterstützend nutzbarer Gerätschaften (Rollatoren, Rollstühle, Beckenlift) im Lippe Bad, ist die Anzahl gehandicapter Nutzer im Gesamtspektrum zu gering, obgleich die heilpädagogisch günstige Wirkung der Bewegung im Wasser unter Fachleuten unumstritten ist.

In sportlicher Hinsicht werden im Lippe Bad die Stadt- und Vereinsmeisterschaften und auch besondere Sportveranstaltungen durchgeführt. So zum Beispiel die NRW-Landesmeisterschaften Kurzbahn-Masters. Die Wassersport treibenden Vereine in Lünen sind bemerkenswert aktiv und als Austragungsort von landesweiten Sportveranstaltungen ausgewählt zu sein zeigt, dass Sport im Lippe Bad auf hohem Niveau funktioniert.

Die Grundversorgung in Kommunen mit Hallenbädern ist aufgrund des hohen Betriebsaufwandes und der bewusst sozialen Preisgestaltung nicht kostendeckend

darstellbar und so zeigt der Altenburg BäderReport 2013, dass die Kostenunterdeckung (vor Abschreibung und Zinsen) bei Hallenbädern mit Wasserflächen um 400 qm und durchschnittlicher Anzahl an Jahresöffnungsstunden zwischen 4,00 bis 6,00 EUR je Besucher liegt. Ebenso zeigt sich, dass die Höhe der Unterdeckung mit der Größe der Wasserfläche zunimmt und bei ungünstigen Bedingungen auch über 7,00 EUR je Besuch liegen kann.

Für das Lippe Bad ergeben sich rund 4,00 EUR Unterdeckung je Besuch und das ist angesichts der ca. zweifach größeren Wasserfläche und der höheren Zahl an Öffnungsstunden ein vergleichsweise günstiger Wert. Dies ist wesentlich über die gute Auslastung und die Energie, Wasser und Abwasser einsparende Technik im Lippe Bad bestimmt. Die projektierten Erwartungen wurden gut erreicht.

4.2 Modellcharakter

Das Passivhallenbad Lünen hat Modellcharakter. Das Lippe Bad ist das gebaute Beispiel dafür, wie Energieeffizienz bei Gebäude und Technik, sowie die Nutzung erneuerbarer Energie für eine überzeugende Gesamtlösung zu konstruieren ist.

Während der „Woche der Umwelt 2012“ wurde das Lippe Bad als ein Beispielprojekt für innovative Umwelttechnologie (Vereinbarkeit von Ökologie, Ökonomie und sozialem Engagement) im Berliner Schloss Bellevue präsentiert. In Anerkennung des Projekts wurde das Lippe Bad im Dezember 2013 mit dem Gütelabel "Good Practice Energieeffizienz" der Deutschen-Energie-Agentur (dena) ausgezeichnet.

Dieses Innovationsprojekt wurde erst Dank der fördernden Unterstützung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), des Ministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (mwme.nrw) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) möglich.

Zum Projekt existieren kostenlos verfügbare Berichte: Eine solide Voruntersuchung (Anlage 1), ein Bericht zur Integralen Planung (Anlage 2) und ein Monitoringbericht (Anlage 3). Diese Unterlagen werden von Bäderfachleuten intensiv genutzt, wie uns

die Nachfragen dazu und die Vereinbarungen zu geführten Besichtigungsterminen im Lippe Bad signalisieren.

Mit viel Engagement arbeitet das Passivhaus Institut Darmstadt daran, das Projekt und den damit verbesserten Stand des Wissens transparent zu machen (Berichterstattung auf der jährlich stattfindenden Internationalen Passivhaustagung). Das Passivhaus Institut führt auch das Monitoring im zum Lippe Bad ähnlichen angelegten Projekt Bambados in Bamberg. Obwohl es sich bei diesem Projekt um ein größeres Spaßbad und nicht wie in Lünen um ein kommunales Sportbad handelt, werden konkrete Monitoringergebnisse mit Neugier erwartet, um System- und Detailergebnisse gegenüberstellen zu können.

Auch seitens der Bädergesellschaft werden Berichterstattungen und Teilnahmen an Fachveranstaltungen unternommen (z. B.: Wuppertaler-Wärmeschutz-Tagung, FORUM Institut Schwimmbadmanagement, Dr. Jentsch Schwimmbadseminare, Norddeutsche Passivhaus-Konferenz, sportinfra-Tagung, Arbeitsgruppensitzung Planen und Bauen der Energieagentur NRW, vhw-Bundesverband für Wohnen und Stadtentwicklung e. V., Fachtagung "Aktionsbündnis Pro Bad", Management-Symposium der Wenzel Consulting, Impulsreferat interbad, Firmenseminar Lignotrend, Firmenseminar Menerga, Osnabrücker Bädertage etc.).

Allen Interessenten steht die Tür zum Lippe Bad für Besichtigungen und Fachinformationen nach vorhergehender Terminvereinbarung stets offen.

4.3 Zusammenfassung

Die Bädergesellschaft Lünen hat am 9. September 2011 nach 2 Jahren Bauzeit mit dem Lippe Bad das erste öffentliche Hallenbad eröffnet, das als Umwelt-Innovationsprojekt mit Konzepten der Passivhaustechnologie realisiert wurde. Grundlegend dafür war die Idee, über diesen neuen Ansatz erhebliche Einsparungen an Energie, Wasser, Abwasser und den damit verbundenen Umweltbelastungen erschließen zu können.

Dieses Innovationsprojekt wurde Dank der fördernden Unterstützung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), des Ministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und

Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (mwme.nrw) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) möglich. Ebenso hat erst die fachtechnische Begleitung durch das Passivhaus Institut Darmstadt dazu beigetragen, das Projekt erfolgreich projektieren und bewerten zu können.

Die Ergebnisse zeigen es: Es ist gelungen, mit der Übertragung des Passivhausstandards auf einen Hallenbadneubau, eine deutliche Reduzierung des Energiebedarfes und der daran gebundenen Emissionen gegenüber dem standardmäßigen Neubauniveau (EnEV) zu erreichen und die energetischen Betriebsdaten und Zusammenhänge über einen Monitoring-Prozess in dem nach Passivhauskriterien gebauten Beispiel transparent zu machen. Der Endenergiebedarf im Lippe Bad konnte auf ca. 40 % des bei EnEV-Baustandard erwarteten gemindert werden (1,62 Mio. kWh anstatt 4,39 Mio. kWh) und wird zu rund 62 % für Wärme- und zu 38 % für Stromanwendungen benötigt. Die Berechnungsergebnisse zeigen daran gekoppelte Emissionen von rund 350 t/a CO_2-Äquivalente. So überzeugt das Energieversorgungssystem im gebauten Beispiel mit um 75 % geringerer Menge an CO_2-Äquivalenten im Vergleich zur EnEV-Variante (350 t/a anstatt 1.400 t/a).

Zielgerichtet werden im Lippe Bad innovative Lösungsansätze zur thermischen Hülle und der zum Einsatz kommenden Haustechnik zusätzlich um best-practice-Technologien für die im System Hallenbad erforderliche Verfahrenstechnik ergänzt.

Dem Projekt liegt eine solide Voruntersuchung zugrunde. Diese wurde mit freundlicher Unterstützung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gemeinsam mit dem Passivhaus Institut, Darmstadt erarbeitet. Der daraus hervorgegangene Bericht „Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad“ ist die Anlage 1 zu diesem Abschlussbericht.

Ergänzend ist ein weiterer Bericht zum Projekt Lippe Bad mit dem Titel „Integrale Planung für die Realisierung eines öffentlichen Hallenbades mit Konzepten der Passivhaustechnologie“ erstellt worden. Dieser ist die Anlage 2 zu diesem Abschlussbericht.

Die einhergehenden Betriebs- und Nutzungsbedingungen wurden über ein detailliertes, langfristiges Monitoring im Betrieb ermittelt. Die Ergebnisse sind in

einem Monitoringbericht des Passivhaus Instituts Darmstadt dargestellt. Dieser Bericht ist Anlage 3 zu diesem Abschlussbericht.

Anhand einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung konnte abgeleitet werden, dass sich die Mehraufwendungen zum Passivhaushallenbad nach längstens 10 Jahren amortisieren werden. Wird von einer üblichen 40-jährigen Nutzungsdauer ausgegangen zeigt sich, wie sinnvoll die Mehrinvestition zum Passivhallenbad ist. Die Motivation dazu ist aber nicht alleine wirtschaftlich begründet, denn es werden über diese Bauweise auch 1.050 t/a an CO_2-Äquivalenten im Vergleich zur EnEV-Variante eingespart.

Wie in Anlage 3 erläutert, ist die energetische Optimierung im Lippe Bad noch fortzusetzen. Es steht ein weiter erschließbar scheinendes Sparpotenzial von ca. 390.000 kWh/a in Aussicht. Dazu sind das System der Filterspülwasseraufbereitung und die Größe der Umluftvolumenströme weiter bedarfsgerecht anzupassen.

Das abgeschlossene Monitoring im Lippe Bad und das noch laufende des Spaßbades Bambados in Bamberg tragen dazu bei, das Verständnis und den Stand des Wissens für moderne Hallenbäder auszubauen.

Eine quantitative Auswertung der Messungen im Lippe Bad bei Feuchteänderung zeigt eindeutig, dass die im einschlägigen Regelwerk zu Auslegungszwecken angegebenen Stoffübergangskoeffizienten im Betrieb teils deutlich mehr als 50 % zu hoch angegeben sind. Deutlich zu hoch angenommene Stoffübergangskoeffizienten führen dazu, dass die Hallenbadlüftung zu groß ausgelegt wird (Zentralgeräte, Strömungsquerschnitte etc.), sofern neben den Bedingungen zur Feuchteabfuhr keine weiter bestimmenden Leistungsanforderungen dafürsprechen sollten. Insofern werden die konkreten Ergebnisse mit den Regelwerk setzenden Gruppen zu erörtern sein.

5.1 Anlage 1

Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad

PASSIV HAUS INSTITUT

Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad

Darmstadt 23.09.2009

Autoren:
Tanja Schulz
Dr. Rainer Pfluger
Jessica Grove-Smith
Oliver Kah
Dr. Benjamin Krick

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1

2. Randbedingungen für die Planung von Hallenbädern 2

2.1. Bauphysikalische Randbedingungen Oberflächentemperaturen ... 2

2.1.1. Einführung 2

2.1.2. Fassaden 3

2.1.3. Methode 3

2.1.4. Beschreibung der Varianten und Darstellung der Ergebnisse 7

2.1.5. Zusammenfassung und Empfehlungen 12

2.1.6. Bauphysikalische Randbedingungen - Materialschutz 13

2.2. Physiologische Randbedingungen 13

2.2.1. Behaglichkeit 13

2.2.2. Luftqualität und Luftschadstoffe 18

2.3. Ableitung der Randbedingungen für Hallenbäder in Passivhausbauweise 19

3. Rechenmodelle eines Hallenbades 22

3.1. Stationäre und dynamische Energiebilanz 24

4. Gebäudehülle 25

4.1. Anteile an der Energiebilanz und Potentiale 25

4.2. Hochwärmegedämmte Bauteilaufbauten 26

4.2.1. Massive Wandkonstruktionen 27

4.2.2. Leichte Wandkonstruktionen 29

4.2.3. Einfluss des Luftwechsels bei kombiniertem Außen- und Umluftbetrieb 40

4.2.4. Kellertemperaturen 41

4.2.5. Einfluss der Orientierung 41

4.3. Sommerliche Behaglichkeit 42

4.4. Tageslichtnutzung im Hallenbad 46

4.4.1. Einführung 46

4.4.2. Aufgabenstellung 47

4.4.3. Hallenbad Modell 47

4.4.4. Bewertung der Tageslichtsituation mit dem Tageslichtquotient 48

4.4.5. Einfluss der Fenster auf die Tageslichtnutzung 49
4.4.6. Hallenbad mit 4 m Hallenhöhe 49
4.4.7. Hallenbad mit 6 m Hallenhöhe 54
4.4.8. Künstliche Beleuchtung - Energiebedarf 57

5. Gebäudetechnik 60
5.1. Anteile an der Energiebilanz / Potentiale 60
5.1.1. Stromeffizienz Ventilatoren 61
5.1.2. Einfluss der Verdunstung 62
5.2. Heizwärmelast 64
5.2.1. Einfluss einer Nachtabsenkung 65
5.2.2. Einfluss einer Beckenabdeckung 66
5.3. Varianten zur Reduzierung der Enthalpieverluste 67
5.3.1. Entfeuchtung über Außenluftwechsel - Ausgangsvariante 67
5.3.2. Enthalpierückgewinnung 69
5.3.3. Umluftentfeuchtung Variante 4 74
5.3.4. Einfluss des Wärmeübertragers 77
5.4. Wärmeversorgung und primärenergetische Betrachtung 79

6. Zusammenfassung der Ergebnisse 82

7. Literatur 86

1. Einleitung

Die Bereitstellung von Sport- und Freizeitangeboten gehört zu den wesentlichen Aufgaben der Städte und Kommunen zur Förderung der Gesundheitsvorsorge einzelner, aber auch gemeinschaftlicher Sportaktivitäten (Vereinssport) sowie des Bildungsangebotes (Schwimmausbildung, Schulsport). Der Betrieb von Hallenbädern stellt die Kommunen vor besondere finanzielle Herausforderungen. Der Bau, der Betrieb und die Instandhaltung verursachen sehr hohe Kosten und dies führt immer häufiger zu Finanzierungsproblemen bis hin zur Schließung derartiger Einrichtungen.

Angeregt durch die Bädergesellschaft der Stadtwerke Lünen GmbH[1] wurden gemeinsame Überlegungen konkretisiert und zu klärende Fragestellungen mit dem Ziel abgeleitet, den Energiebedarf moderner Hallenbäder auf Basis heute bereits handhabbarer Konzeptionen und Technologien drastisch zu senken.

Mit fördernder Unterstützung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) konnten die Überlegungen zeitnah mittels der Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad konkretisiert werden.

Mit dem vorliegenden Bericht dieser Grundlagenuntersuchung werden weitreichende, dem speziellen Anforderungsprofil gerecht werdende Lösungsansätze vorgestellt, welche die Kosten für den Betrieb, insbesondere für den Energiebedarf, drastisch wie auch nachhaltig senken können.

Die hier erarbeiteten Zusammenhänge sollen Betreibern (z.B. Städte, Gemeinden) und fachspezifisch tätigen Spezialisten (Planer, Komponentenhersteller) nachhaltige Energieeinsparpotentiale aufzeigen, die mit heute verfügbaren Kenntnissen und Technologien bereits zu erschließen sind. Ebenso werden auch Perspektiven und Bedarfe zu weiteren Untersuchungen und für zukünftige Entwicklungen abgeleitet.

Die zentralen Ergebnisse des vorliegenden Berichts bilden die Grundlagen der Entwicklung des Lüner Hallenbadprojektes durch ein über alle Gewerke integriert arbeitendes Planungsteam. Das gebaute Beispiel ist das kurzfristige Ziel, um die Zusammenhänge transparent zu machen und sie in Theorie und Praxis zu evaluieren.

[1] Die Bädergesellschaft der Stadtwerke Lünen GmbH befand sich zu diesem Zeitpunkt am Start der planerischen Entwicklung eines Hallenbadneubaus. Dabei steht die initiale, systematische Entwicklungsaufgabe in Richtung der Passivhausbauweise und den damit verbundenen Leitgedanken im Vordergrund.

2. Randbedingungen für die Planung von Hallenbädern

Die Vorgaben der [VDI 2089 BLATT 1] für die maximale Wasserdampfkonzentration in Hallenbädern basiert auf der Forderung, dass während der Winterzeit bis zur mittleren Außentemperatur des kältesten Monats eines Jahres des betreffenden Klimagebietes eine Taupunktunterschreitung auf den Außenbauteilen vermieden wird. Die Grenze der zulässigen Luftfeuchte liegt danach bei 14,3 g/kg für Gebäude mit Wärmeschutz, entsprechend den gesetzlichen Vorschriften der Energieeinsparverordnung (EnEV). Die sehr gute Wärmedämmung von Passivhäusern erlaubt es aufgrund höherer innerer Oberflächentemperaturen der Außenbauteile diese Grenze zu höheren Feuchtegehalten zu verschieben. Mit steigender Raumluftfeuchte im Hallenbereich sinkt die Verdunstungsleistung des Beckenwassers. Dies hat wiederum einen großen Einfluss auf den erforderlichen Luftwechsel, der wiederum die Höhe der Lüftungswärmeverluste maßgeblich beeinflusst. Um eine Optimierung in diesem Sinne vorzunehmen, besteht eine wesentliche Aufgabe darin, die Grenze des zulässigen Feuchtegehaltes in der Hallenluft zu bestimmen. Folgende Parameter wurden in diesem Zusammenhang untersucht:

- Materialschutz
- Behaglichkeit
- Bauschadensfreiheit

2.1. Bauphysikalische Randbedingungen Oberflächentemperaturen

2.1.1. Einführung

Verglichen mit anderen Außenbauteilen weisen transparente Bauteile die größten flächenbezogenen Wärmeverluste auf. Andererseits werden durch sie solare Wärmegewinne möglich. Das Kriterium für Passivhaus geeignete Verglasungen besagt, dass durch die Gläser im mitteleuropäischen Kernwinter bei normalen Innentemperaturen (20°C) solare Nettogewinne bei Südausrichtung möglich sein müssen. Das Fenster wird unter solchen Bedingungen zum Energiesammler. Das Passivhaus Kriterium fordert einen Fassaden-U-Wert von U_{CW}=0,80 W/(m²K) im nicht eingebauten und $U_{CW,eingebaut}$=0,85 W/(m²K) im zweiseitig eingebauten Zustand bei einer Elementgröße von 1,20 m x 2,50 m. Zusätzlich erhöht sich bei passivhausgeeigneten Fensterqualitäten im Vergleich zur Standardverglasung die

innere Oberflächentemperatur der Gläser erheblich. Eine höhere thermische Behaglichkeit durch geringeren Strahlungswärmeentzug ist die willkommene Folge.

Unbeschadet dieser Verbesserungen bleibt auch im Passivhaus das Fenster die Regelfläche mit der geringsten Innenoberflächentemperatur. Auch (bei korrekter Planung und Ausführung aller Bauteile) konnte die Glasrandecke als kälteste Innenoberfläche im Passivhaus identifiziert werden, vgl. **Abbildung 1**. Sie wird daher im Folgenden intensiver betrachtet.

2.1.2. Fassaden

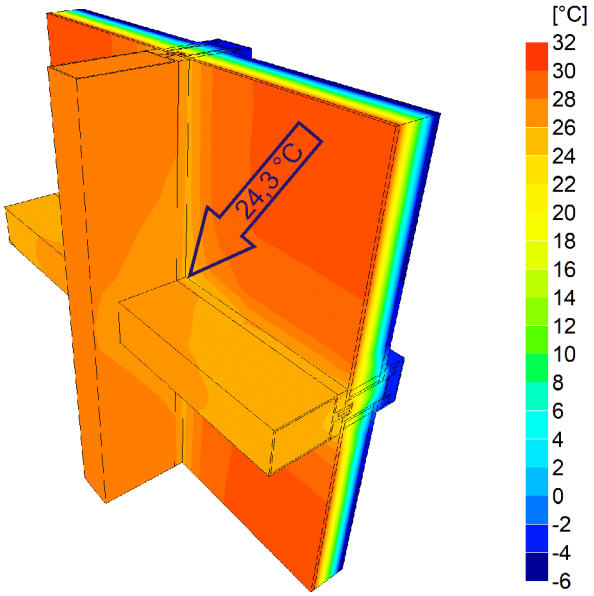


Abbildung 1: Isothermenbild einer thermisch hochwertigen Fassade bei -5 °C Außen- und 32 °C Innentemperatur

Der Energiebedarf von Schwimmbädern kann durch eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit erheblich gesenkt werden. Begrenzender Faktor für die Luftfeuchtigkeit ist unter anderem die minimale Oberflächentemperatur der Gebäudehülle. Diese tritt, wie bereits erwähnt, in der Glasrandecke von Pfosten-Riegelkonstruktionen auf. Kann die Temperatur an dieser Stelle erhöht werden, kann mit ihr die Luftfeuchte im Raum erhöht und der Energiebedarf des Hallenbades reduziert werden.

2.1.3. Methode

Vorgabe ist, die maximale Raumluftfeuchtigkeit zu ermitteln, bei der an der kältesten Stelle auf der Innenseite der wärmedämmenden Hülle keine Wasserdampf-kondensation zu erwarten ist. Dieser Zustand wird im sogenannten Taupunkt erreicht.

Bei einem fiktiven optimalen Glasrandverbund tritt kein Wärmebrückeneffekt und damit kein Absinken der dortigen Temperatur gegenüber der Regelfläche auf. In diesem Fall entsteht die niedrigste Oberflächentemperatur an dem Bauteil der Gebäudehülle mit dem höchsten Wärmedurchlasskoeffizienten. In der Regel am Glas. **Tabelle 1** listet die in der folgend beschriebenen Parameterstudie verwendeten Glas-U-Werte, die resultierenden Innenoberflächentemperaturen (bei einem Wärmeübergangskoeffizient von innen h_i = 8,0 W/(m²K), außen h_a = 25 W/m²K, -5 °C Außen- und 32 °C Innentemperatur) sowie die zugehörigen maximalen Raumluftfeuchten auf, unterhalb derer es nicht zu Tauwasserausfall kommt. Die angegebenen Luftfeuchten stellen damit einen idealen Höchstwert dar. Durch den mit heutiger Technik unvermeidlichen Wärmebrückeneffekt am Glasrand werden die realisierbaren Luftfeuchten deutlich niedriger liegen.

Tabelle 1: Verwendete Glas-U-Werte, resultierende Innenoberflächentemperaturen und maximale Raumluftfeuchten

U_g [W/(m²K)]	**1,23**	**0,61**	**0,54**
$T_{(RSI=0,125\ m²K/W),Glas}$ [°C]	26,31	29,18	29,51
$f_{(RSI=0,125\ m²K/W),Glas}$ [-]	0,85	0,92	0,93
f_{abs} [g]	21,77	25,90	26,42
Max rH [-]	**0,72**	**0,85**	**0,87**

$T_{(RSI=0,125\ m²K/W),Glas}$: Oberflächentemperatur in der Glasmitte bei den genannten Randbedingungen in Grad Celsius, $f_{(RSI=0,125\ m²K/W),Glas}$: Temperaturfaktor in der Glasmitte bei den genannten Randbedingungen (dimensionslos), f_{abs}: maximaler absoluter Wassergehalt im Gramm Wasser pro kg trockener Luft, Max rH: maximale relative Feuchte

In einer Parameterstudie wurden drei Grundkonstruktionen von Pfosten-Riegel-fassaden in 21 Varianten untersucht, um die Glasrandtemperaturen der verschiedenen Konstruktionen zu ermitteln und Möglichkeiten für eine Anhebung der Glasrandtemperatur zu identifizieren.

Die Untersuchungen wurden mit dem 3D-Wärmestromprogramm [SOLIDO] der Firma Physibel (Belgien) an einem vereinfachten Fassadenmodell durchgeführt. Das Berechnungsmodell ist 500 mm hoch, 500 mm breit und 250 mm tief, vgl. **Abbildung 2**. Die Modellgrenzen wurden als adiabatisch angenommen.

Das Berechnungsmodell besteht aus einem Pfostenstück, von dem nach links und rechts ein Riegel abzweigt. Die Materialien von Pfosten und Riegel wurden zwischen Aluminium, Stahl und Holz variiert. Das Glas wird über ein Systemträgerprofil an die Tragkonstruktion angeschlossen. Bei der Aluminium- und Stahlunterkonstruktion ist dieser Systemträger integriert, bei der Holztragkonstruktion besteht er aus Aluminium oder glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Das Glas ist beidseitig auf Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) gelagert. Der Glas-U-Wert wurde von Ug = 1,23 W/(m²K) (Standardverglasung) über 0,61 W/(m²K) (Passivhausverglasung, 6/16/6/16/4) zu 0,54 W/(m²K) (Passivhausverglasung, 6/18/6/18/4) variiert. Zur

Reduzierung des numerischen Aufwandes wurde die innere Scheibe im Modell nicht modelliert. Für den Glasrand wurde ein Ersatzmodell verwendet, welches den thermischen Eigenschaften des Abstandhalters „SwisspacerV“ der Fa. Saint Gobain entspricht.

Die Scheibe selbst steht auf zwei Glasträgern auf, die aus Aluminium oder GFK bestehen. Zwischen den Glasträgern und der Scheibe liegt ein Ausgleichsklotz aus GFK. Die Anpressleiste, mit der das Glas gegen Horizontalkräfte gesichert wird, besteht aus Aluminium oder GFK. Sie ist mittels Schrauben aus Edelstahl oder GFK mit dem Systemträger verbunden. Der Hohlraum zwischen dem Randverbund der Scheiben, dem Systemträger und der Anpressleiste ist komplett mit Polyethylenschaum ausgedämmt. Die Anpressleiste wird durch eine Abdeckleiste aus Aluminium bzw. GFK verkleidet. **Abbildung 2** zeigt das Modell einer Fassade mit Holztragwerk in der Variante 12. Links ist das komplette Modell abgebildet, rechts nur das Traggerüst aus Holz, der Systemträger aus Aluminium, die Glasträger aus glasfaserverstärktem Kunststoff und die Edelstahlschrauben, welche den Systemträger mit der Anpressleiste (nicht dargestellt) verbinden. Die Anordnung und Abmessungen der einzelnen Bauteile sind in allen Varianten gleich, lediglich die Materialien variieren. Eine Ausnahme bilden die Varianten 3a, 13a, 16a und 16b. Bei diesen Varianten beträgt die Verglasungsstärke 52 mm, bei allen anderen Varianten 48 mm. **Tabelle 2** listet die verwendeten Materialien mit ihren Leitwerten und zugewiesenen Farben auf.

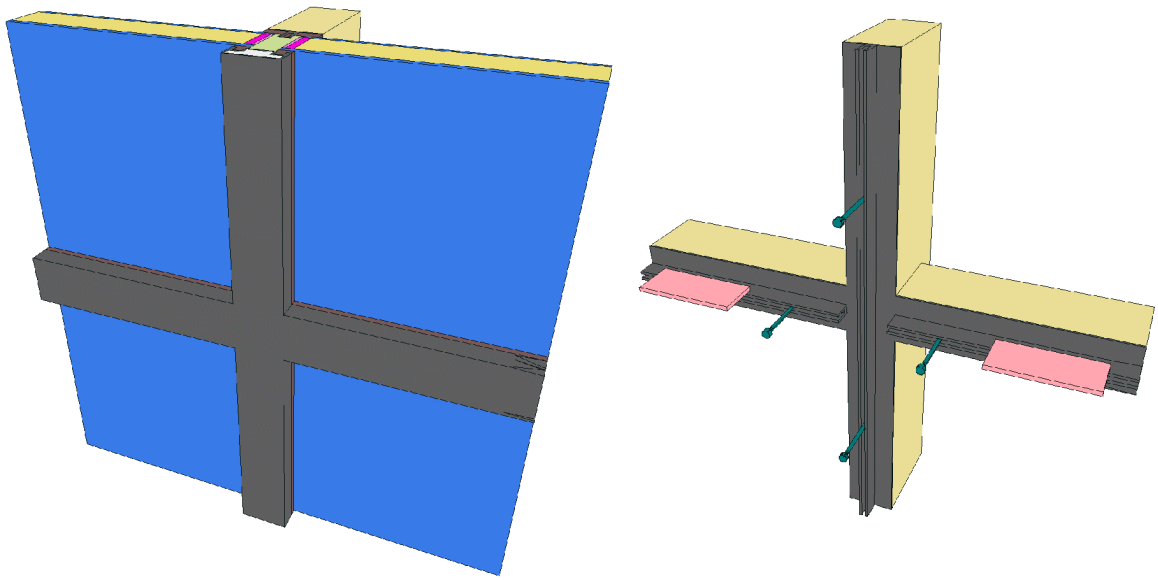


Abbildung 2: Modell der Fassade mit Holztragwerk in der Variante 12. Komplettes Modell (links) und rechts nur Traggerüst (Holz), Systemträger (Alu), Glasträger (GFK) und Schrauben (Edelstahl).

Tabelle 2: Verwendete Materialien mit ihren Wärmeleitfähigkeiten und den zugeordneten Farben

Farbe	Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
	Aluminium-Legierung	**160**
	Edelstahl	**15**
	Stahl	**60**
	Nadelholz	**0,13**
	Dämmung 035	**0,035**
	Glas (DIN EN 12524)	**1,0**
	EPDM	**0,25**
	Silikon	**0,35**
	Polysulfid	**0,42**
	Dichtstoff (nur bei Variante 16b)	**0,25**
	GFK	**0,30**
	SwisspacerV-Ersatz	**0,25**
	Scheibenzwischenraum Ug = 1,23	**0,060**
	Scheibenzwischenraum Ug = 0,61	**0,026**
	Scheibenzwischenraum Ug = 0,54	**0,025**

Zu jeder Variante wurden folgende Kennwerte ermittelt:

Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens U_f: Beschreibt die thermische Qualität des Rahmens. Je geringer der U-Wert, umso geringer die Energieverluste. U_f korreliert jedoch nicht zwangsläufig mit der Temperatur am Glasrand und damit mit der maximal möglichen Raumluftfeuchte.

Wärmebrückenverlustkoeffizient am Glasrand Ψ_g: Beschreibt die thermische Qualität des Randverbundes und hängt neben der Art des Randverbundes von der Überdämmung durch den Rahmen ab. Die Glasrandwärmebrücke hat einen erheblichen Einfluss auf die maximal mögliche Raumluftfeuchte.

Zusätzlicher Wärmeverlust durch die Schraube $\Delta U_{Schraube}$: Durch die Verschraubung zwischen Anpressprofil und Systemträger wird ein zusätzlicher Wärmeverlust verursacht. Dieser hat sowohl Einfluss auf die Energiebilanz der Fassade als auch auf die minimale Oberflächentemperatur. $\Delta U_{Schraube}$ bezieht sich hier auf einen Schraubenabstand von 0,25 m.

Wärmeverlust durch den Glasträger χ_{GT}: Hat ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Oberflächentemperatur. Ist der Glasträger aus Aluminium, wird die

Konstruktion im Bereich des Glasträgers regelrecht gekühlt, die Oberflächentemperatur sinkt.

Minimaltemperatur T_{min}: Von der Minimaltemperatur, die bei allen untersuchten Varianten in der Glasecke auftritt, hängt die maximale Raumluftfeuchte ab.

Temperaturfaktor am Glasrand f(Rsi = 0,125 m²K/W)): Wäre der Temperaturfaktor am Glasrand 1, wäre die dortige Temperatur gleich der Raumlufttemperatur. Wäre der Faktor 0, wäre die dortige Temperatur gleich der Außenlufttemperatur. Der Temperaturfaktor am Glasrand ermöglicht die Berechnung der Glasrandtemperatur bei beliebigen Außen- und Innentemperaturen.

Maximale Raumluftfechte Max rH Raum: Die Raumluftfeuchte hat einen signifikanten Einfluss auf den Energiebedarf des Hallenbades. Je höher die Raumluftfeuchte sein kann, umso niedriger der Energiebedarf. Die maximal zulässige Raumluftfeuchte hängt, bei gegebener Innentemperatur, von der minimalen Oberflächentemperatur ab und ist ein Indikator für den Energiebedarf des Hallenbades.

2.1.4. Beschreibung der Varianten und Darstellung der Ergebnisse

Folgend werden die drei untersuchten Systeme mit ihren Varianten beschrieben und die wichtigsten Ergebnisse dargestellt. Alle ermittelten Werte sind in **Tabelle 3** zusammengefasst. Alle angegebenen Minimaltemperaturen und maximalen relativen Luftfeuchten beziehen sich auf eine Innentemperatur von 32 °C.

Fassade mit Aluminiumtragstruktur

Pfosten und Riegel bestehen aus Aluminiumrohr, der Systemträger ist integriert. In sieben Varianten wird das Material der Glasträger, der Schrauben, des Anpress- und Abdeckprofils sowie die Verglasung variiert.

Variante 0

Diese Variante stellt mit einem Rahmen-U-Wert von 1,35 W/(m²K) eine heute übliche Standardfassade dar. Bis auf die Schrauben (Edelstahl) sind alle tragenden Teile aus Aluminium gefertigt. Es wurde ein Glas mit dem U-Wert von 1,23 W/(m²K) und Aluminiumrandverbund angesetzt. Die Minimaltemperatur wurde zu 12,73 °C berechnet, die maximale Raumluftfeuchte liegt bei **31%**. Im normalen Betrieb des Bades kommt es damit zwangsläufig zu Tauwasserausfall, der entweder toleriert, oder durch aufwendige Anlagentechnik begrenzt werden kann.

Variante 1

Abweichend zur Variante 0 wurde ein Glas-U-Wert von 0,61 W/(m²K) in Kombination mit einem hochwertigen Kunststoffabstandhalter in der Berechnung berücksichtigt.

Der Hohlraum zwischen den Glasrändern, dem Systemträger und der Anpressleiste wurde mit PE-Schaum ausgedämmt. Mit einem Rahmen-U-Wert von 0,735 W/(m²K) und einer Minimaltemperatur von 24,28 °C stellt diese Variante eine erhebliche Verbesserung dar. Durch den Aluminiumglasträger ist der Wärmebrückenverlust-koeffizient mit 0,038 W/K pro Glasträger sehr hoch. Die maximale Raumluftfeuchte konnte dennoch auf **64%** mehr als verdoppelt werden.

Variante 2

In Abweichung zu Variante 1 wurde der Aluminiumglasträger durch einen GFK-Träger ersetzt. Dessen Wärmebrückenverlustkoeffizient sinkt auf 0,003 W/K, die maximal mögliche Raumluftfeuchte steigt auf **69%**.

Variante 3

Hier wurde das Anpressprofil aus Aluminium durch ein GFK-Profil ersetzt. Dadurch wird der Wärmetransport in den Abstandhaltern reduziert. Die Folge ist eine Verringerung des Glasrandwärmebrückenverlustkoeffizienten, des zusätzlichen Wärmeverlustes durch die Verschraubung und eine Anhebung der minimalen Oberflächentemperatur auf 25,76 °C. Die mögliche Raumluftfeuchte erreicht nun **70%**, der Rahmen-U-Wert liegt bei 0,721 W/(m²K).

Diese Variante stellt das heute marktverfügbare Optimum bei Aluminiumfassaden mit der beschriebenen Verglasungsqualität dar. Durch die Verbesserung des Glases (2 mal 18 mm Scheibenzwischenraum, Variante 3a) kann die minimale Oberflächen-temperatur auf 25,42 °C, die maximale Raumluftfeuchte auf **72%** erhöht werden. Der Rahmen-U-Wert liegt bei dieser Variante bei 0,670 W/(m²K).

Varianten 4 und 5

Diese Varianten schätzen zukünftige Entwicklungspotentiale ab. Bei ihnen wurden auch die Schrauben und die Abdeckleiste aus GFK gefertigt angenommen. Beide Änderungen haben einen recht geringen Einfluss auf die Glasrandtemperatur, die Glasfaserschrauben senken den Wärmeverlust jedoch erheblich. Die maximale Raumluftfeuchte liegt bei Variante 5 bei **71%.**

Fassade mit Stahltragstruktur

Pfosten und Riegel bestehen aus Stahlrohr, der Systemträger ist integriert. In fünf Varianten wird das Material der Glasträger, der Schrauben, des Anpress- und Abdeckprofils sowie die Verglasung variiert. Dabei sind die Änderungen der Varianten 6 bis 10 analog der Varianten 1 bis 5.

Die Wärmedurchgangskoeffizienten und die Wärmebrückenverlustkoeffizienten sind in allen Varianten etwas günstiger als die der entsprechenden Aluminium-konstruktionen, die minimalen Oberflächentemperaturen und damit die maximalen

Luftfeuchten sind jedoch niedriger. Bei Variante 8, welche der Variante 3 entspricht, beträgt die minimale Oberflächentemperatur 25,51 °C, die maximale Raumluftfeuchte **69%**, der Rahmen-U-Wert liegt bei 0,716 W/(m²K).

Da Stahl die Wärme schlechter leitet als Aluminium, wird weniger Wärme aus dem Raum zu den kalten Stellen geleitet. Dies reduziert zwar die Wärmeverluste, senkt aber gleichzeitig die Temperatur der kältesten Stellen.

Fassade mit Holztragstruktur

Pfosten und Riegel bestehen aus Vollholz. In neun Varianten wird das Material des Systemträgers, der Glasträger, der Schrauben, des Anpress- und Abdeckprofils sowie die Verglasung variiert. Dabei sind die Änderungen der Varianten 11 bis 15 analog der Varianten 1 bis 5.

Die Wärmedurchgangskoeffizienten und die Wärmebrückenverlustkoeffizienten sind in allen Varianten deutlich günstiger als die der entsprechenden Aluminium-konstruktionen, da das Holz die Wärme aus dem Innenraum weniger stark in den Systemträger und von dort aus weiter Richtung Außenluft leitet. Dieser Effekt reduziert den Wärmeverlust erheblich, die minimalen Oberflächentemperaturen und damit die maximalen Luftfeuchten sinken jedoch entsprechend. Bei Variante 13, welche der Variante 3 entspricht, beträgt die minimale Oberflächentemperatur nur 22,61 °C, die maximale Raumluftfeuchte nur **59%**, der Rahmen-U-Wert liegt bei 0,668 W/(m²K).

Es stellte sich die Frage nach der Möglichkeit, hohe Oberflächentemperaturen bei einem geringen U-Wert zu erzielen. Also die Vorteile von Holz- und Aluminium-tragkonstruktionen zu kombinieren. Dazu wurden in Erweiterung des Modells der Variante 13 als Variante 13a Aluminiumleisten auf der Holzkonstruktion zum Glasrand hin angebracht, die vom Systemträger thermisch entkoppelt sind, vgl. **Abbildung 3**. Es kam das Glas mit 18 mm Scheibenzwischenräumen (Ug=0,54 W/(m²K)) zum Ansatz.

Bei dieser Kombination ergibt sich ein Rahmen-U-Wert, der mit 0,658 W/(m²K) sogar etwas besser ist als jener der reinen Holzvariante. Die minimale Oberflächen-temperatur erreicht 27,26°C, was Luftfeuchtigkeiten bis **76%** ermöglicht.

Damit stellt Variante 13a das bisherige Optimum dar. Die Technologie und die Komponenten zur Herstellung einer solchen Fassade sind bereits heute verfügbar.

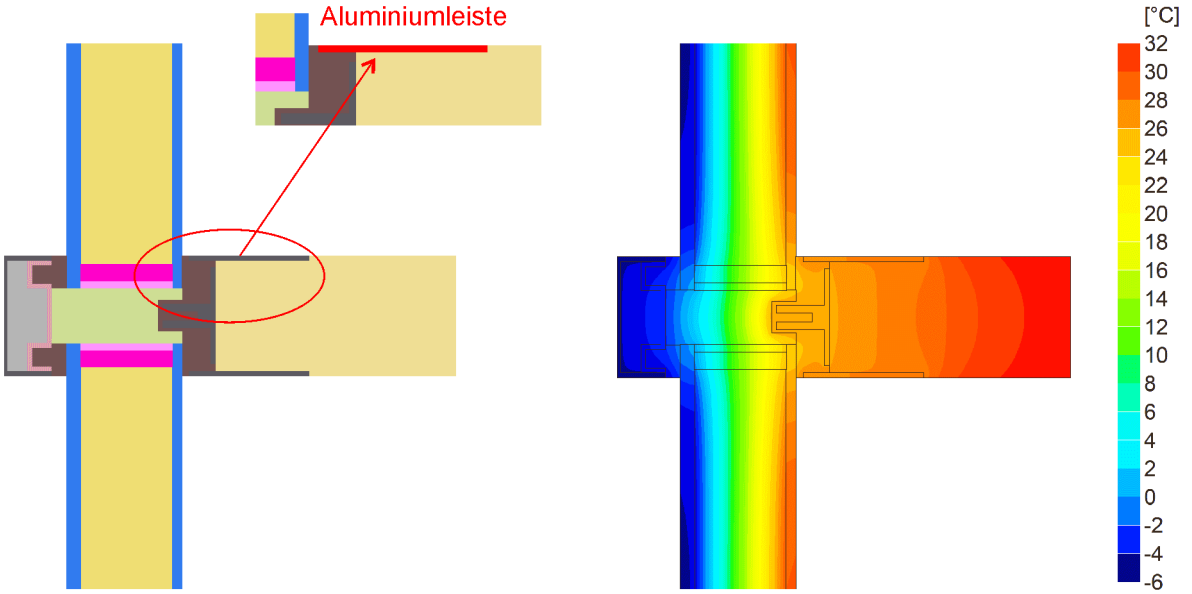


Abbildung 3: Holzkonstruktion mit Aluminiumleisten. Rechenmodell (links) und Isothermenbild (rechts)

In den Variante 14 bis 16b wurden teilweise heute noch nicht verfügbare Komponenten wie GFK-Schrauben, -Abdeckleisten und –Systemträger zum Ansatz gebracht.

Das Optimum aller untersuchten Kombinationen wird mit Variante 16b erreicht. Hier wurde die bessere Verglasung, ein leicht verbesserter Randverbund, eine verbesserte Wärmedämmung zwischen den Gläsern, dem Systemträger und der Anpressleiste, sowie zwischen der Anpress- und Abdeckleiste zum Ansatz gebracht. Alle Komponenten bis auf das Holztragsystem bestehen aus GFK, auch hier wurden die beschriebenen Aluminiumleisten zur Erhöhung der Oberflächentemperaturen im Glasrandbereich eingesetzt. Bei dieser Variante liegt der Rahmen-U-Wert bei 0,526 W/(m²K), es wird eine minimale Oberflächentemperatur von 28 °C erreicht, **80%** relative Luftfeuchte ist möglich. **Abbildung 4** zeigt die Isothermendarstellung der Standardfassade und der optimierten Passivhausfassade im Vergleich.

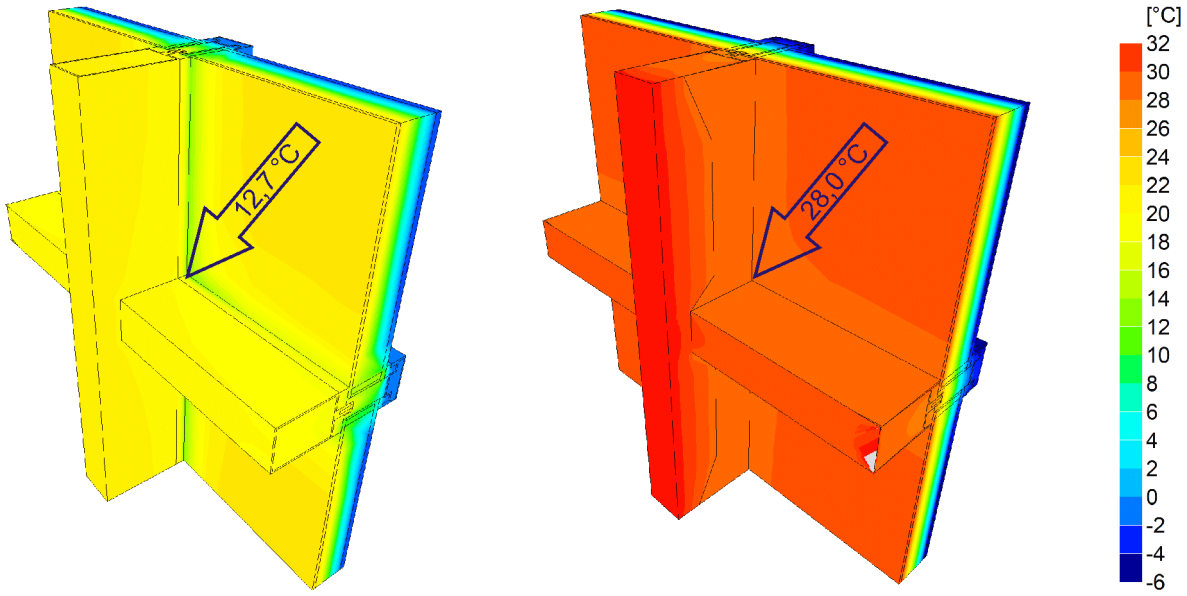
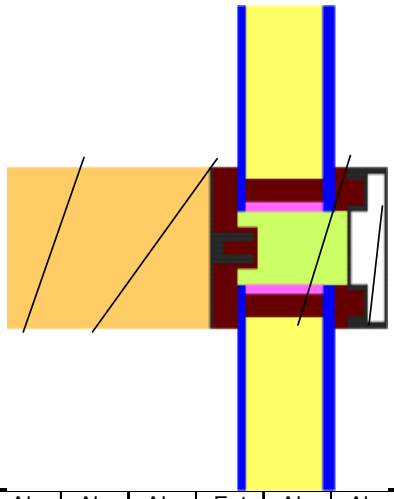


Abbildung 4: Standardfassade und thermisch optimierte Fassade im Vergleich

Tabelle 3: Übersicht der Ergebnisse der Parameterstudie

Variante							U_g [W/(m²K)]	U_f [W/(m²K)]	Ψ_g [W/(mK)]	$\Delta U_{Schraube}$ [W/(m²K)]	$\chi_{Glasträger}$ [W/K]	T_{min} [°C]	$f_{(Rsi=0,125\ (m²K/W))}$ [-]	Max rH Raum [-]
0	Alu	Alu	Alu	Est	Alu	Alu	1,23	1,352	0,270	0,100	0,009	12,73	0,48	0,31
1	Alu	Alu	Alu	Est	Alu	Alu	0,61	0,735	0,045	0,214	0,038	24,28	0,79	0,64
2	Alu	Alu	GFK	Est	Alu	Alu	0,61	0,735	0,045	0,214	0,003	25,59	0,83	0,69
3	Alu	Alu	GFK	Est	GFK	Alu	0,61	0,721	0,044	0,141	0,003	25,76	0,83	0,70
3a	Alu	Alu	GFK	Est	GFK	Alu	0,54	0,670	0,038	0,139	0,003	26,24	0,84	0,72
4	Alu	Alu	GFK	GFK	GFK	Alu	0,61	0,721	0,044	0,006	0,003	25,89	0,83	0,70
5	Alu	Alu	GFK	GFK	GFK	GFK	0,61	0,712	0,043	0,004	0,003	26,04	0,84	0,71
6	Stahl	Stahl	Alu	Est	Alu	Alu	0,61	0,730	0,045	0,208	0,035	23,90	0,78	0,62
7	Stahl	Stahl	GFK	Est	Alu	Alu	0,61	0,730	0,045	0,208	0,003	25,33	0,82	0,68
8	Stahl	Stahl	GFK	Est	GFK	Alu	0,61	0,716	0,044	0,137	0,003	25,51	0,82	0,69
9	Stahl	Stahl	GFK	GFK	GFK	Alu	0,61	0,730	0,045	0,005	0,003	25,65	0,83	0,69
10	Stahl	Stahl	GFK	GFK	GFK	GFK	0,61	0,708	0,043	0,004	0,003	25,81	0,83	0,70
11	Holz	Alu	Alu	Est	Alu	Alu	0,61	0,681	0,039	0,169	0,027	19,09	0,65	0,46
12	Holz	Alu	GFK	Est	Alu	Alu	0,61	0,681	0,039	0,169	0,002	22,61	0,75	0,58
13	Holz	Alu	GFK	Est	GFK	Alu	0,61	0,668	0,039	0,111	0,002	22,86	0,75	0,59
13a	Holz	Alu	GFK	Est	GFK	Alu	0,54	0,658	0,037	0,097	0,002	27,26	0,87	0,76
14	Holz	Alu	GFK	GFK	GFK	Alu	0,61	0,668	0,039	0,005	0,002	23,11	0,76	0,59
15	Holz	Alu	GFK	GFK	GFK	GFK	0,61	0,660	0,038	0,003	0,002	23,38	0,77	0,60
16	Holz	GFK	GFK	GFK	GFK	GFK	0,61	0,599	0,036	0,002	0,002	22,11	0,73	0,56
16a	Holz	GFK	GFK	GFK	GFK	GFK	0,54	0,600	0,036	0,003	0,002	27,58	0,88	0,78
16b	Holz	GFK	GFK	GFK	GFK	GFK	0,54	0,526	0,030	0,003	0,002	28,02	0,89	0,80
GFK = Glasfaserverstärkter Kunststoff; Est = Edelstahl; Delta U bezieht sich auf einen Schraubenabstand von 0,25 m														

2.1.5. Zusammenfassung und Empfehlungen

Am Glasrandverbund heute üblicher Glasfassaden entsteht bei niedrigen Außentemperaturen zwangsläufig Kondensat. Durch den Einsatz passivhaus-tauglicher Komponenten kann die Kondensatbildung vermieden, und die Luftfeuchte darüber hinaus erhöht werden. Diese Maßnahme reduziert den Transmissions-wärmeverlust und führt zu höheren Oberflächentemperaturen. Damit werden höhere Raumluftfeuchten möglich, wodurch die Verdunstung des Beckenwassers und damit einhergehend die Lüftungsverluste reduziert werden können.

Bezüglich der Oberflächentemperaturen sind zunächst Aluminiumtragsysteme im Vorteil. Werden Holzsysteme jedoch mit Aluminiumleisten aufgewertet, stellen diese sowohl hinsichtlich des Wärmedurchgangs als auch hinsichtlich der Oberflächen-temperaturen die beste der untersuchten Lösungen dar.

Bei der Planung von Fassaden sollte hinsichtlich der untersuchten Parameter auf folgende Punkte geachtet werden:

Es ist ein möglichst hochwertiger Glasrandverbund zu wählen

- Wenn möglich sollte der Scheibenabstand 18 mm betragen.
- Mit Aluminiumleisten aufgewertete Holzkonstruktionen sind Aluminiumkonstruktionen vorzuziehen.
- Metallische Glasträger sollten unbedingt vermieden werden
- Der Raum zwischen den Gläsern, dem Systemträger und der Anpressleiste sollte möglichst vollständig und hochwertig gedämmt sein.
- Wenn möglich sollten Anpressleisten aus GFK eingesetzt werden.
- Schrauben, Systemträger und Abdeckleisten aus GFK sollten eingesetzt werden, sobald diese marktverfügbar sind.

Das Weiterentwicklungspotential thermisch optimierter Pfosten-Riegel-Fassaden-systeme wird als hoch eingeschätzt. Ein diesbezügliches Forschungsprojekt mit Fassadenherstellern wäre zu begrüßen.

Alle dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf ein vereinfachtes Berechnungs-modell. Die Werte sind vor ihrer Verwendung an realen Fassadensystemen zu validieren.

2.1.6. Bauphysikalische Randbedingungen - Materialschutz

Laut [VDI 2089] wird zum vorbeugenden Schutz für Metall- und Holzbauteile im Schwimmhalleninnenraum die relative Raumluftfeuchte auf 64% begrenzt. Diese Forderung wird durch eine Studie der Bundesanstalt für Materialprüfung zur Korrosion von Metallen in Schwimmbädern [STICHEL 1986] gestützt. Danach bilden sich auf metallischen Oberflächen korrosive Elektrolytfilme ab relativen Feuchten von 60 bis 70 %. Die Art und Geschwindigkeit der Schädigung hängt stark von den Luftinhaltstoffen (z.B. Salz) aber auch von Art und Güte des verwendeten Metalls ab. Unlegierte Stähle und Aluminium korrodieren dieser Studie zufolge gleichmäßig und kalkulierbar, sodass den Tragfähigkeitsverlusten durch Anrechnen von Korrosionszuschlägen oder durch geeignete Schutzmaßnahmen (z.B. Feuerverzinken oder Beschichten) begegnet werden kann. Nichtrostende Stähle dagegen reagieren auf korrosive Belastung unkalkulierbarer und bieten daher keinen Standsicherheitsvorteil. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Korrosionsgeschwindigkeit mit dem Auftreten von Kondensat auf dem betreffenden Bauteil deutlich zunimmt. Dies unterstreicht die Bedeutung der hohen Oberflächentemperaturen der Außenhülle bei hochwärmegedämmten Konstruktionen. Sie dienen nicht nur der Energieeinsparung sondern verringern zudem die Korrosionsschäden an metallischen Bauteilen.

Die Tragfähigkeit von metallischen Bauteilen in einem Passivhaus-Hallenbad darf durch die Anhebung der Luftfeuchte auf keinen Fall herabgesetzt werden. Dies ist vor allem bei Tauwasserausfall auf verzinkten Stählen und Aluminium der Fall. [tl]Zusätzliche Maßnahmen, welche die Dauerhaftigkeit der Metalle erhöhen, sind empfehlenswert. Dazu gehört neben der Verwendung bestimmter Legierungen bei Edelstählen (bekannt durch die Herstellerangaben Hastelloy C4 und Inonel 625), das Anrechnen von Sicherheitszuschlägen bei der Bemessung der Materialquerschnitte von unlegierten Stählen und Aluminium oder auch eine Verbesserung des Korrosionswiderstandes durch Feuerverzinken bzw. organische Überzüge [STICHEL 1986].

2.2. Physiologische Randbedingungen

2.2.1. Behaglichkeit

Nach [VDI 2089] soll die Raumlufttemperatur in einer Schwimmhalle zwischen 30 und 34 °C liegen. Badegästen, die das Schwimmbecken verlassen wird über die benetzte Hautoberfläche durch Verdunstung Wärme entzogen, so dass höhere Temperaturen entsprechend angenehmer empfunden werden und die Toleranz gegenüber hohen Raumluftfeuchten größer ist. Ein wasserbenetzter Badegast würde bei einer operativen Temperatur von 34 °C eine relative Luftfeuchte von 90% als behaglich empfinden, bei knapp unter 33 °C läge die zulässige Hallenfeuchte theoretisch bei

100% **(Abbildung 5)**. Die Behaglichkeitsanforderungen von nassen Personen sind damit offensichtlich nicht die limitierende Größe der zulässigen Hallenfeuchte. Halten sich die Personen länger im Hallenbereich auf, bzw. trocknen sie sich ab, so bewirkt eine hohe Raumluftfeuchte, dass eine Wärmeabgabe durch Schwitzen erschwert wird und die Badegäste die Raumkonditionen als zu warm empfinden. In welcher Bandbreite sich die tolerierbaren Temperaturen und Feuchten bewegen, soll mit Hilfe des Predicted-Mean-Vote –Verfahrens [DIN EN ISO 7730] festgestellt werden. Danach hängt das thermische Wohlbefinden des Menschen hauptsächlich von den Faktoren operative Temperatur, Feuchtegehalt der Raumluft, Bekleidung, Aktivitätsgrad und Luftgeschwindigkeit ab. Sie wird anhand einer Skala von –3 bis +3 bewertet. Der Faktor Bekleidung wird analog [DIN EN ISO 7730] mit 0,03 clo angenommen. Dies entspricht einer für Badegäste typischen Bekleidung mit Badehose oder Badeanzug. Als Aktivitätsgrad werden zwei Varianten untersucht, die das Verhalten der Gäste möglichst widerspiegeln. Es wird einmal eine ruhende (0,8 met) und eine im Hallenbereich umherlaufende (1,5 met) Person angenommen.

+3	**heiß**
+2	**warm**
+1	**etwas warm**
0	**neutral**
-1	**etwas kühl**
-2	**kühl**
-3	**kalt**

Es wird untersucht wie sich Hallentemperatur und Feuchte auf die thermische Behaglichkeit der Badegäste auswirken. Dies ist vor dem Hintergrund der Anhebung der zulässigen Raumluftfeuchten zur Senkung der Verdunstung und des damit verbundenen hohen Energieverlustes eine wichtige Randbedingung für die Effizienzsteigerung von Hallenbädern. Um vor allem hallenbad-typische Nutzerprofile zu untersuchen, wird ein Berechnungs-modell verwendet, welches es erlaubt, das Behaglichkeits-empfinden unbekleideter, mit Wasser benetzter Menschen abzubilden [ASHRAE2005], [GAGGE1986], [SCHNIEDERS 2009]. Die Ergebnisse werden mit der nach [VDI 2089] festegelegten „Schwülegrenze“ (Feuchtegehalt der Raumluft $\leq$ 14,3 g/kg) verglichen.

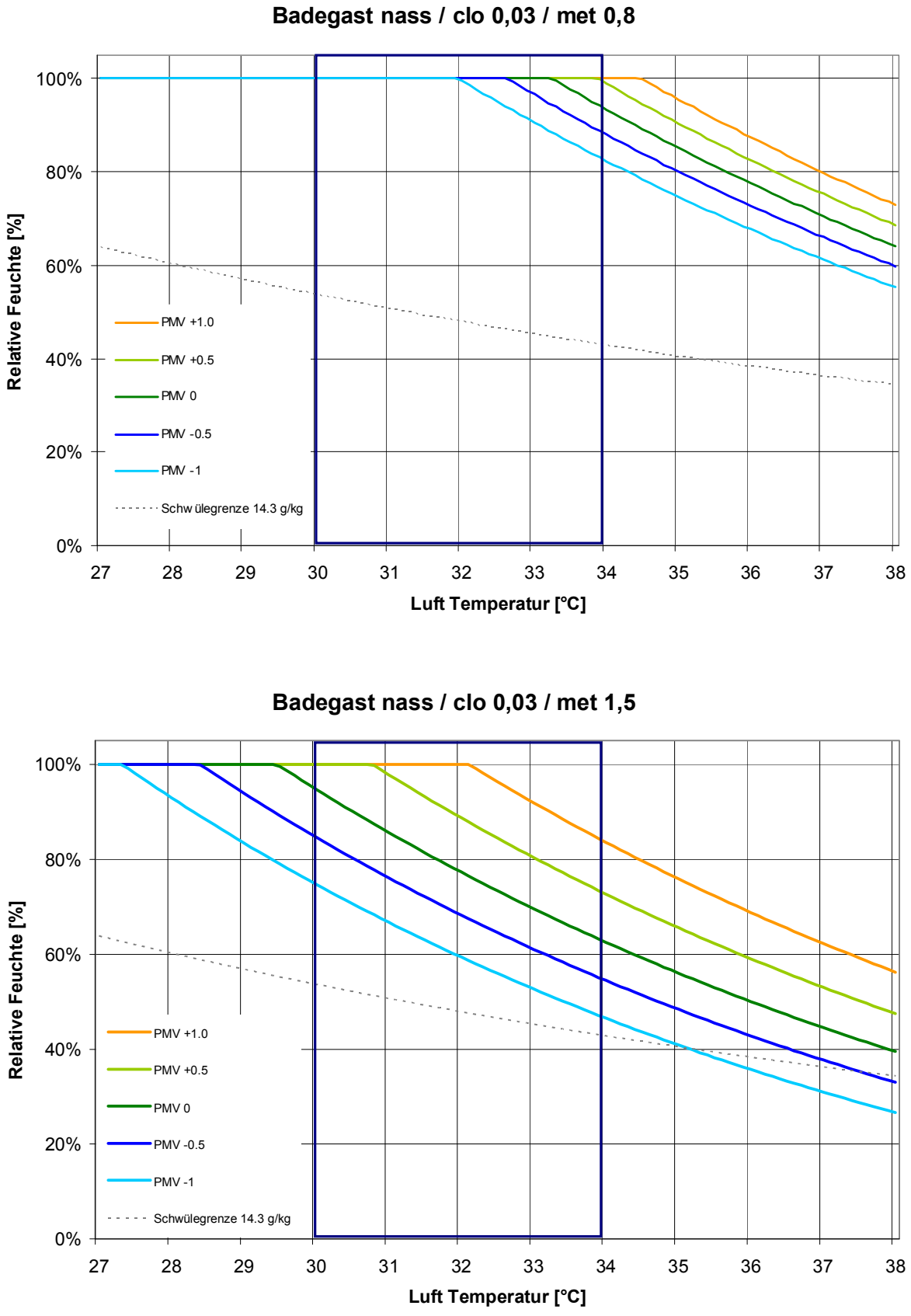


Abbildung 5: PMV für einen nassen aber ruhenden Badegast (oben) und für einen Badegast mit leichtem Aktivitätsgrad (unten)

In **Abbildung 5** wird deutlich, dass wasserbenetzte Personen eine sehr hohe Toleranz für hohe Luftfeuchten besitzen, jedoch bei sinkenden Feuchten das Hallenklima eher als kühl empfinden. Bei den im Hallenbad typischen Temperaturen von 30 bis 34 °C und geringer Aktivität sind relative Feuchten von über 90 % noch sehr gut bewertet. Auch bei leichter Aktivität werden bei einer Temperatur von 34 °C Luftfeuchten bis zu 75 % noch zwischen neutral und etwas warm bewertet. Ein leichtes Wärmeempfinden (PMV +1,0) erlaubt hier immer noch knapp über 80 %.

Deutlich anders fällt die Beurteilung des Raumklimas aus, wenn es sich um trockene Personen handelt. Selbst bei sehr leichter Badebekleidung und ruhender Position sinken die als angenehm empfundenen zulässigen Hallenfeuchten ab einer Hallentemperatur von 30 °C deutlich stärker ab. Bei 34 °C müsste die Luft fast völlig trocken sein um zumindest noch eine Beurteilung von PMV = +1 zu erhalten. Das bedeutet, dass die in Hallenbädern üblichen Temperaturen von 30 bis 34 °C von trockenen Personen fast immer als etwas warm bis warm empfunden werden. Noch deutlicher wird dieser Effekt für eine leichte Tätigkeit. Hier läge die Behaglichkeitsgrenze (PMV +1) bei einer Hallentemperatur von 30 °C bereits bei einer Raumluftfeuchte von 50 %. Ein Raumklima mit einer besseren Bewertung, also unter PMV =1 ist hier praktisch nicht möglich. Es sollte daher bei der Wahl der zulässigen Hallenfeuchte die Art der Hallenbadnutzung mit einbezogen werden. Handelt es sich um ein reines Sportbad werden sich die Personen nur kurz im Beckenumgang aufhalten bevor sie die Halle wieder verlassen. Ein Freizeitbad dagegen ist für längeren Aufenthalt evtl. mit Gastronomie im Hallenbereich vorgesehen. Hier wird es unter Umständen erforderlich, niedrigere relative Feuchten einzuregeln. Vor dem Hintergrund einer möglichst hohen Hallenfeuchte zur Minimierung der Energieverluste scheint es sinnvoll, Bereiche die dem längeren Aufenthalt der Badegäste dienen (Gastronomie, Ruheräume) klimatisch von der Halle abzutrennen.

Der Vergleich der „Schwülegrenze“, also der Verlauf der relativen Feuchte bei konstant 14,3 g/kg absoluter Feuchte mit den nach [ASHRAE2005], [GAGGE1986] berechneten Behaglichkeitskurven zeigt, dass es keine Korrelation zwischen den beiden Beurteilungskriterien gibt. Wasserbenetzte Badegäste würden nach PMV-Bewertung deutlich höhere Feuchten als behaglich empfinden als 14,3 g/kg, während für trockene Badegäste die behaglichen Feuchten noch weit darunter liegen.

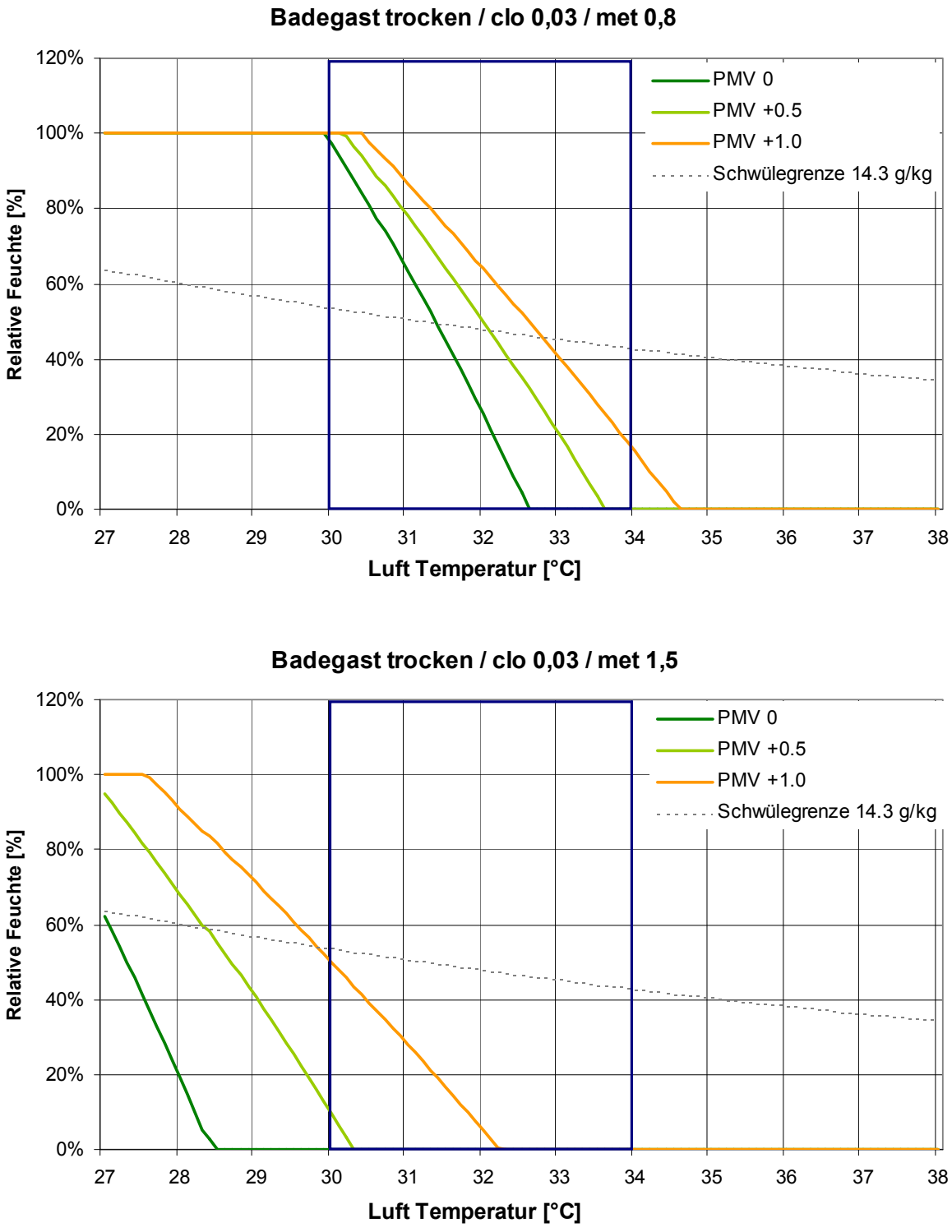


Abbildung 6: PMV für einen trockenen ruhenden Badegast (oben) und für einen Badegast mit leichtem Aktivitätsgrad (unten)

2.2.2. Luftqualität und Luftschadstoffe

Um die Übertragung von Krankheitserregern zu vermeiden, ist eine Desinfizierung des Beckenwassers erforderlich. Dies geschieht überwiegend durch die Zugabe von Chlor, welches in der Lage ist, binnen kurzer Zeit eine in das Wasser eingebrachte Keimzahl soweit zu verringern, dass keine Gefahr für die menschliche Gesundheit besteht. Auch Ozonung oder Membranverfahren sind in der Lage, pathogene Keime weitestgehend zu eliminieren, doch können beide keine Depotwirkung im Beckenwasser herstellen. Hierfür wird letztendlich, wenn auch in geringerer Dosis, Chlor zugesetzt, welches im Beckenwasser mit organischen und anorganischen Verschmutzungsstoffen reagiert. Neben diesem Effekt werden im Zuge der Reaktion unerwünschte Desinfektionsnebenprodukte (DNP) frei. Die Bekanntesten sind Trihalogenmethan (THM) und gebundenes Chlor (Chloramin). Letzteres ist u. A. für den typischen Hallenbadgeruch und die Reizung der Schleimhäute verantwortlich. Beide stehen im Verdacht gesundheitsschädigend zu wirken. Die Konzentrationen der DNP im Beckenwasser und der Hallenluft steht zunehmend im Fokus der öffentlichen Diskussionen und eine Vermeidung oder zumindest Verminderung dieser Stoffe ist daher zwingend geboten. Im Rahmen eines Verbundforschungsprojektes [BMBF-PROJEKT 2003] konnte gezeigt werden, dass durch die Wahl des Filtersystems Einfluss auf die DNP Konzentration im Beckenwasser genommen werden kann. So vermeiden Membranverfahren aufgrund ihrer kurzen Rückspülzyklen eine Anhäufung der Precursoren (die als Ursache für die Bildung von DNP gelten), was zu einer Reduzierung des Chloreinsatzes bei gleicher Desinfektionsleistung führt. Auch erweiterte Oxidationsverfahren z.B. Ozonung, UV-Bestrahlung oder Zugabe von Wasserstoffperoxid, sind nach [BMBF-PROJEKT 2003] geeignet. Eine geringere Chlormenge als Beckenwasserdepot verringert auch die Entstehung von DNP. Dies ist vor allem bei der Frage der erforderlichen Luftwechsel zur Sicherung der Luftqualität von Bedeutung.

Der schadstoffbezogene Außenluftmassenstrom ist nach [VDI 2089] so zu bemessen, dass die Konzentrationen der über die Wasseroberfläche an die Luft abgegebenen Schadstoffe (z.B. Trihalogenmethan THM) die geltenden Empfehlungswerte nicht überschreiten (z.B. Chloroform $\leq$ 200 μg/m³ Luft nach Empfehlung des Umweltbundesamtes). Für diese Bemessung ist allerdings die Kenntnis des an der Wasseroberfläche austretenden Gasmassenstromes unerlässlich, die [VDI 2089] gibt hierüber allerdings keine Auskunft.

Die Regelung des Außenluftanteils im anteiligen Umluftbetrieb nach [VDI 2089] fordert zur Sicherung einer angemessenen Luftqualität bei maximaler Hallennutzung einen Außenluftmassenstrom von 0,3 * Auslegungsmassenstrom.[t2] Nach [STOTTMEISTER 2006] ist dieser Wert sogar als Mindestwert anzusehen, um die Grenzwerte für Trichloramin in der Hallenluft einzuhalten. Untersuchungen zu Belastungen mit

Trihalogenmethan und Trichloramin in Hallenbädern haben keine Korrelation zwischen Wasser- und Luftkonzentrationen herstellen können [GUNDERMANN 1997], [STOTTMEISTER 2006], [WITTING 1997]. Keine der zitierten Untersuchungen stellte die Luftkonzentration in Verbindung mit dem Luftwechsel der Halle dar. Um sicherzustellen, dass durch eine Reduzierung der erforderlichen Luftmengen keine Überschreitung der zulässigen Schadstoffkonzentration hervorgerufen wird, werden zusätzliche Untersuchungen notwendig. Es ist davon auszugehen, dass Membranfilteranlagen und erweiterte Oxidationsverfahren gut geeignet sind, die Quellstärke der aus dem Wasser austretenden DNP zu verringern. Nach derzeitigem Stand der Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass auch der reduzierte Luftwechsel eine unkritische Luftqualität sicherstellen kann.

2.3. Ableitung der Randbedingungen für Hallenbäder in Passivhausbauweise

In Kapitel 2.1 und 2.2 wurden die Faktoren (Oberflächentemperaturen und Behaglichkeitsparameter) für Hallenbäder diskutiert, die als limitierende Größe für die Auslegung des Luftwechsels und der Hallenluftfeuchte gelten. Es konnte gezeigt werden, dass sich durch konsequente Umsetzung des Passivhausstandards hier neue Spielräume ergeben. Während eine Ausführung der Gebäudehüllen nach EnEV ein deutlich höheres Risiko für tauwasserbedingte Schäden aufweisen, liegt die zulässige Hallenfeuchte bei sehr gut wärmegedämmten Außenbauteilen entsprechend höher. Vor allem die Pfosten-Riegel-Konstruktion wird hier als kritisches Bauteil gesehen. Anhand der in 2.1 und 2.2 durchgeführten Analyse wird eine zulässige Feuchte von 23 g/kg für heute bereits marktverfügbare Systeme ermittelt.

Aufgrund der erstzunehmenden Schäden an metallischen Bauteilen, die u. U. auch statische Funktionen haben, sollte die relative Feuchte nach [STICHEL 1986] so begrenzt werden, dass die Konstruktionen nicht tauwasserbelastet sind. Es ist zu empfehlen, diese Randbedingungen einzuhalten bzw. alternative nichtmetallische Tragkonstruktionen (z.B. Holz) zu wählen.

Ziel ist es, eine möglichst geringe Verdunstung bei gleichzeitig guten Komfortbedingungen zu erreichen. In **Abbildung 7** ist die Verdunstung bei gegebener Hallentemperatur- und -feuchte unter Berücksichtigung der Behaglichkeitsanforderungen und der maximal zulässigen Feuchte zur Vermeidung von Kondensatschäden dargestellt.

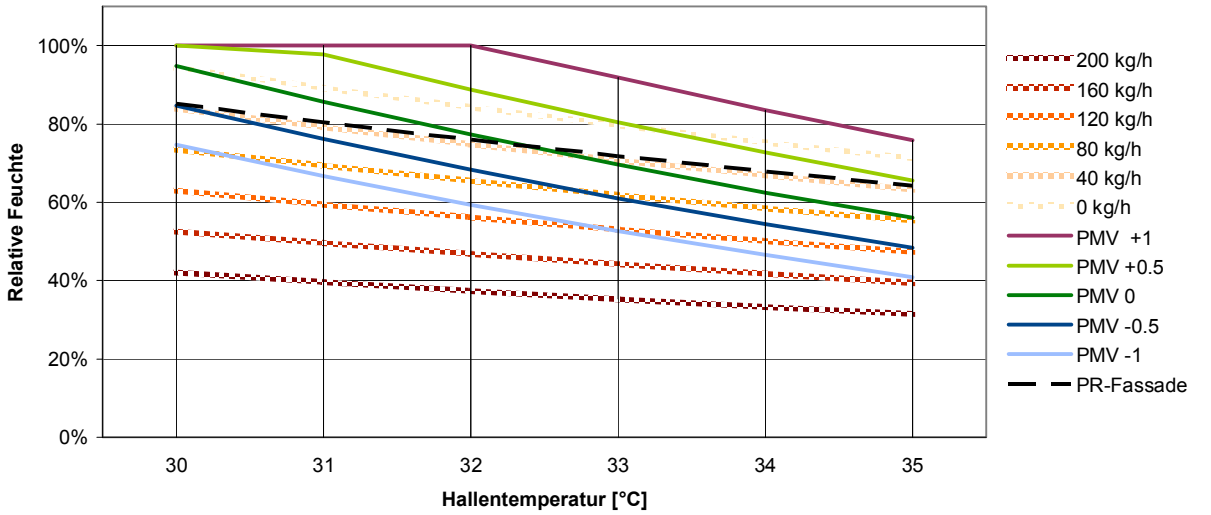


Abbildung 7: Verdunstung für ein Hallenbad mit 900 m² Wasserfläche (29°C Wassertemperatur) in Abhängigkeit der Hallentemperatur und -feuchte. Dargestellt sind jeweils Linien gleicher Verdunstung in kg/h, die Behaglichkeitsanforderungen für einen nassen Badegast (clo 0,03, met 1,5) für die Klimabeurteilung von -1 = etwas kühl über 0= neutral bis +1 = etwas warm), sowie die maximal zulässige Feuchte zur Vermeidung von Kondensatschäden an der Pfosten-Riegelfassade. Eine sehr gute Klimabeurteilung (PMV =0) bei gleichzeitig geringer Verdunstung wird im Bereich zwischen 32 bis 33 °C Hallentemperatur und bei einer absoluten Feuchte von 23 g/kg erzielt. Geringere Hallentemperaturen führen bei der zulässigen Feuchte von 23 g/kg zu einer etwas kühlen Klimabewertung.

Für Hallenbereiche in denen sich auch trockene Personen aufhalten, kann eine sehr gute Klimabeurteilung (PMV = 0) bei eher niedrigeren Hallentemperaturen aber dennoch hohen Hallenfeuchten erzielt werden. Dies ist vor allem bei Sportbecken von Interesse da dort von Schwimmern und Trainern eher Temperaturen zwischen 30 und 32 °C gewünscht werden.

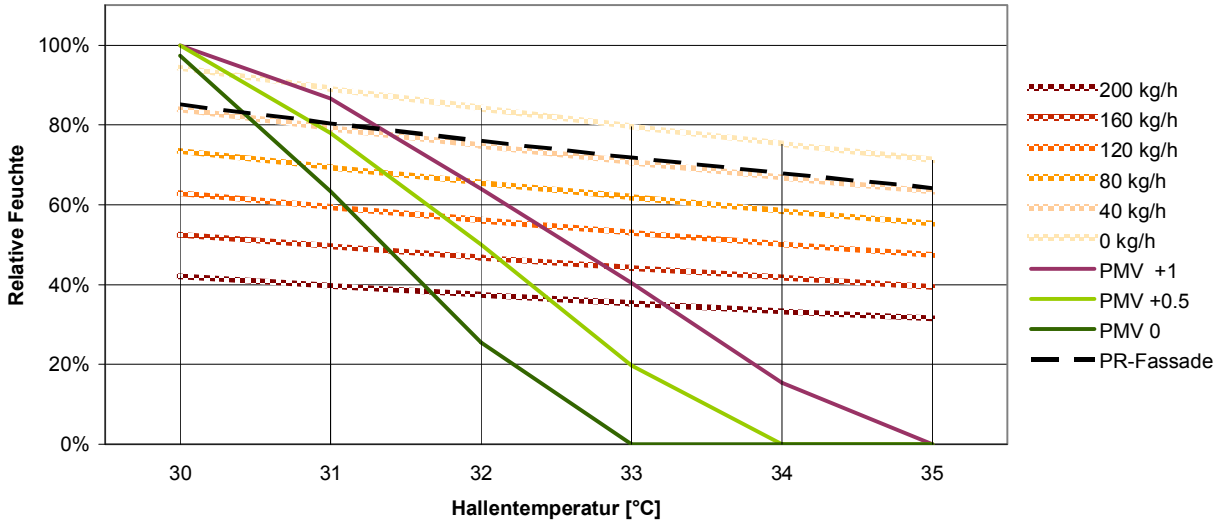


Abbildung 8: Verdunstung für ein Hallenbad mit 900 m² Wasserfläche (29°C Wassertemperatur) in Abhängigkeit der Hallentemperatur und –Feuchte. Dargestellt sind jeweils Linien gleicher Verdunstung in kg/h, sowie die Behaglichkeitsanforderungen für einen trockenen Badegast (clo 0,03, met 0,8) für die Klimabeurteilung von 0= neutral bis +1 = etwas warm). Das Optimum von Verdunstung, Kondensatkriterium und Behaglichkeit liegt hier bei geringeren Hallen-temperaturen mit zugehörigen Hallenfeuchten von 23 g/kg bei 30 °C und 18 g/kg bei 31°C

Den Anforderungen an die Behaglichkeit und Gesundheit der Nutzer muss höchste Priorität eingeräumt werden. Sinnvoll ist es sicherlich, Bereiche unterschiedlicher Nutzung (Sportbereich, Freizeitbereich, Ruhebereich) hinsichtlich der Temperatur und Feuchte thermisch zu trennen. Für die weitere Betrachtung wird eine Hallentemperatur von 32 °C und eine relative Feuchte von 64% (19,3 g/kg) gewählt, da hier moderate Verdunstungsmengen (ca. 80 kg/h) bei gleichzeitig akzeptablen Kimabeurteilungen sowohl von nassen als auch von trockenen Badegästen zu erwarten sind.

Während die Randbedingungen zur Sicherstellung des Nutzerkomforts definiert werden konnten, stellt sich bei der Frage der Schadstoffbelastung der Luft weiterhin die Frage, ob eine Reduzierung der Luftwechsel gleichzeitig eine Erhöhung der Belastung über die zulässigen Grenzen hinweg ausschließt. Diese Erkenntnisse sollen anhand der begleitenden Messungen gewonnen werden. Zurzeit wird davon ausgegangen, dass ein Mindestaußenluftwechsel von 30 % des Auslegungs-volumenstroms während der Nutzungszeit ausreichend für unbedenkliche Raumkonditionen ist.

Zulässige Hallenluftfeuchte bei 32 °C Hallentemperatur:

Oberflächenkriterium:	76% (23 g/kg)
Korrosionskriterium:	dauerhafte Sicherstellung der Tauwasserfreiheit
Behaglichkeitskriterium	65% (19,3 g/kg)
Schadstoffkriterium	mind. Außenluftwechsel 30 % Auslegungsvolumenstrom

Außerhalb der Öffnungszeiten spielen Behaglichkeitskriterien keine Rolle mehr, sodass hier Hallenfeuchten bis 76 % (23 g/kg) möglich sind. [t3]Dies ermöglicht weitere Einsparungen, die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet werden.

3. Rechenmodelle eines Hallenbades

Zur Untersuchung der Energieeinsparmaßnahmen wird ein Hallenbadmodell verwendet, welches einerseits möglichst einfach strukturiert ist, sich aber andererseits an den realen Bedürfnissen der Planer und Betreiber orientiert. Daher wird ein einfaches Hallenbad gewählt, welches für den reinen Schwimmbetrieb ausgelegt ist. Für Freizeit- und Spaßbäder lassen sich hier nur bedingt Handlungsanweisungen ableiten.

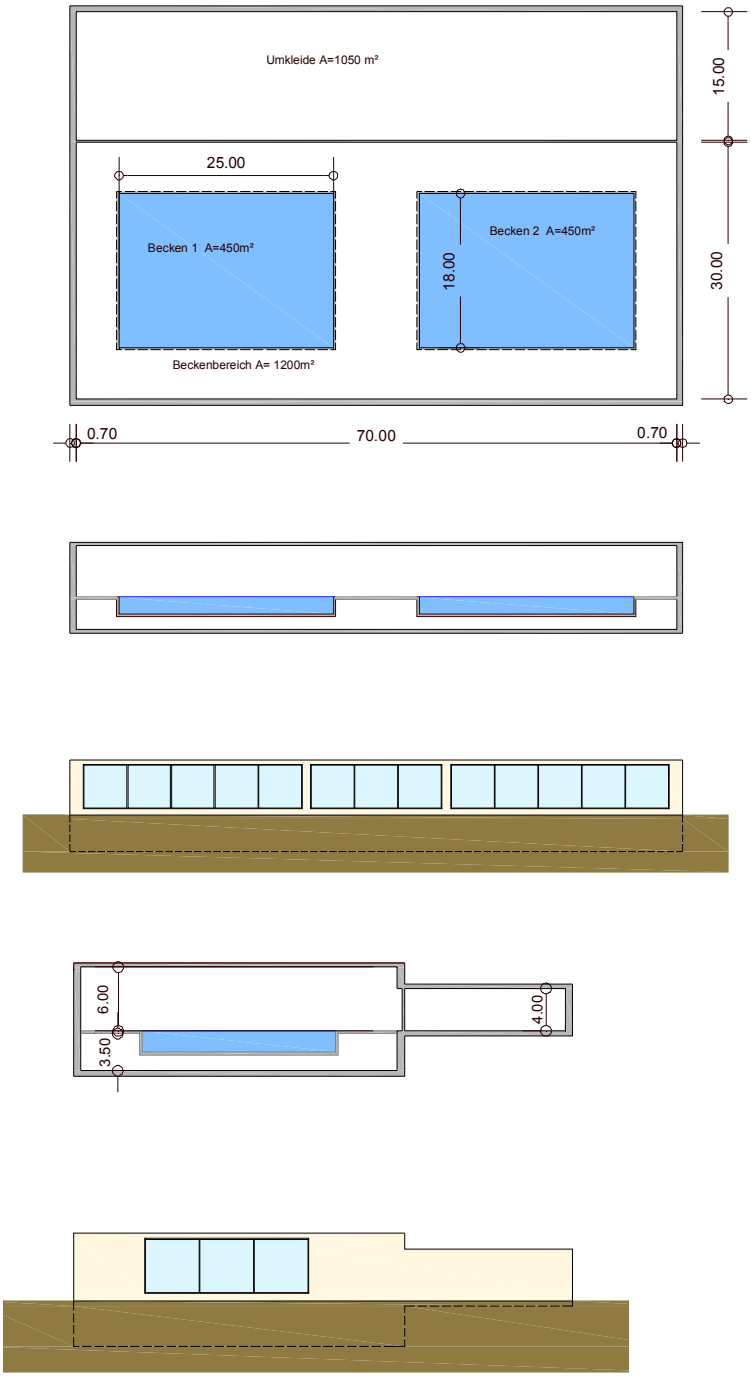


Abbildung 9: Grundriss, Schnitt und Ansicht des Simulationsmodells

Das gewählte Hallenbadmodell ist mit den großflächigen Verglasungen nach Süden ausgerichtet. Die Beckenfläche beträgt insgesamt 900 m².

Die Verdunstung wird analog den Verfahren der [VDI 2089] berechnet. Anhand von Messungen in einem Hallenbad wurde die tatsächliche Verdunstung bei ansteigender Nutzung des Beckens mit dem Auslegungswert verglichen. Selbst bei maximaler Nutzung wird hier deutlich weniger verdunstet. Für eine durchschnittliche Beckennutzung kann der Auslegungswert halbiert werden [ZYWICKI 2006].

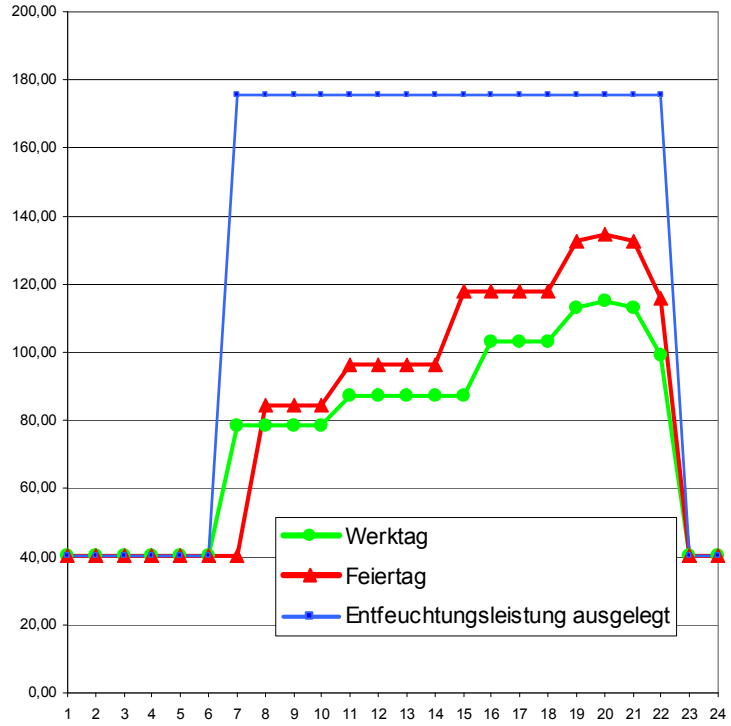


Abbildung 10: Gemessener und berechneter Verdunstungswassermassenstrom (kg/h) eines Hallenbades [Zywicki 2006]

Die Entfeuchtung des Hallenbades wird durch Anpassung des Außenluftwechsels entsprechend der Verdunstung erreicht. Lediglich in den warmfeuchten Sommerstunden ist die Entfeuchtungsleistung der Außenluft zu gering, so dass analog zur [VDI 2089] eine höhere Hallenfeuchte zugelassen wird.

Die Belegung des Hallenbades wird mit 600 Personen pro Tag angenommen. Bei einer nach [VDI 2089] erforderlichen Frischwassermenge von 30 l/Person ergibt sich ein täglicher Frischwasserbedarf von 18 m³ die den Becken zugeführt werden muss. Für die erwartete Besucherzahl werden insgesamt 900 m² Wasserfläche zur Verfügung gestellt. Das Hallenbad wird ganzjährig von 6:00 bis 22:00 geöffnet. Als für Hallenbäder typisches Standardklima werden 32 °C Hallentemperatur und 29 °C Wassertemperatur gewählt. Weiterhin wird für die gebäudetechnischen Varianten eine bivalente Energieversorgung des Hallenbades angenommen. Neben einer Wärmepumpe (JAZ 6) die zur Enthalpierückgewinnung oder zur Umluftentfeuchtung eingesetzt wird, verfügt das Hallenbad über einen Anschluss an ein Nahwärmenetz

(Primärenergiefaktor 0,8). Dies ist vor allem bei der primärenergetischen Betrachtung der Effizienz der Wärmepumpensysteme von Bedeutung. Mit sinkendem Primärenergiefaktor der Nahwärmeversorgung (z.B. Effizientere und/oder mit Energie aus nachwachsenden Rohstoffen betriebene Energieversorgung wie z.B. Biogas Blockheizkraftwerke) sinkt auch das primärenergetische Einsparpotential durch Einsatz einer Wärmepumpe.

3.1. Stationäre und dynamische Energiebilanz

Mit Hilfe einer stationären Energiebilanz nach [DIN EN ISO 13790] kann der Energiebedarf und das vorhandene Einsparpotential abgeschätzt werden. Als Berechnungstool dient eine angepasste Version des Passivhaus Projektierungs Pakets [PHPP2007], die eine monatsweise Anpassung der Luftwechsel und eine genauere Betrachtung der Prozesswärme ermöglicht. Anhand der monatsmittleren Außentemperaturen und –feuchten werden verschiedene gebäudetechnische Konzepte zur Feuchteregulierung und Enthalpierückgewinnung untersucht (Kapitel 5). Die zulässige Feuchte wird nach den in Kapitel 2 genannten Kriterien Behaglichkeit, Kondensatbildung und Korrosionsschutz auf 64 % (19,3 g/kg) festgelegt. Es wird sichergestellt, dass der Außenluftwechsel mindestens 30 % des Auslegungsvolumenstroms beträgt. Weiterhin wird die erforderliche Frischwassermenge monatsweise erfasst, da diese an variierende Besucherzahlen gekoppelt ist.

Bei dem hier betrachteten Hallenbad fällt bei Annahme eines EnEV-Standards nur knapp die Hälfte des gesamten Endenergiebedarfes auf die Raumheizung, bei einer Passivhaushalle ist es sogar nur ¼. Der Rest wird zur Beckenwassererwärmung benötigt. Aus diesem Grund umfasst die Heizenergiebilanz sowohl die Raum- als auch die Prozesswärme. Dies bietet sich vor allem vor dem Hintergrund an, dass die dem Beckenwasser durch die Verdunstung entzogene Wärme durch Enthalpierückgewinnung aus dem Fortluftmassenstrom zum Teil wieder in den Beckenkreislauf zurückgeführt werden kann. Es handelt sich also um eine enge Verbindung beider Heizsysteme, so dass eine getrennte Betrachtung ungeeignet wäre.

Während bei der stationären Simulation die monatsmittleren Außentemperaturen und –feuchten eine Aussage über den zu erwartenden Energiebedarf erlauben, werden durch eine dynamische Simulation stundengenaue Angaben zur Heizlast, zu den solaren und internen Gewinnen, den Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten aber auch zu Oberflächentemperaturen an kritischen Stellen möglich. Weiterhin erlaubt die dynamische Gebäudesimulation eine Beurteilung der sich einstellenden Raumtemperaturen infolge der Querwärmeströme zwischen den unterschiedlich temperierten Bereichen und erlaubt somit Empfehlungen zu thermischen Entkopplungen zwischen den verschiedenen Temperaturzonen.

4. Gebäudehülle

4.1. Anteile an der Energiebilanz und Potentiale

Zur Verbesserung der Effizienz von Hallenbädern ist die Kenntnis des Energiebedarfes sowie dessen Aufteilung auf verschiedene Sektoren (Gebäudehülle, Beckenwasser, Duschen etc.) sinnvoll. Als Grundlage dient in einem ersten Schritt das Modell eines Hallenbades in EnEV-Standard **(Abbildung 11)**.

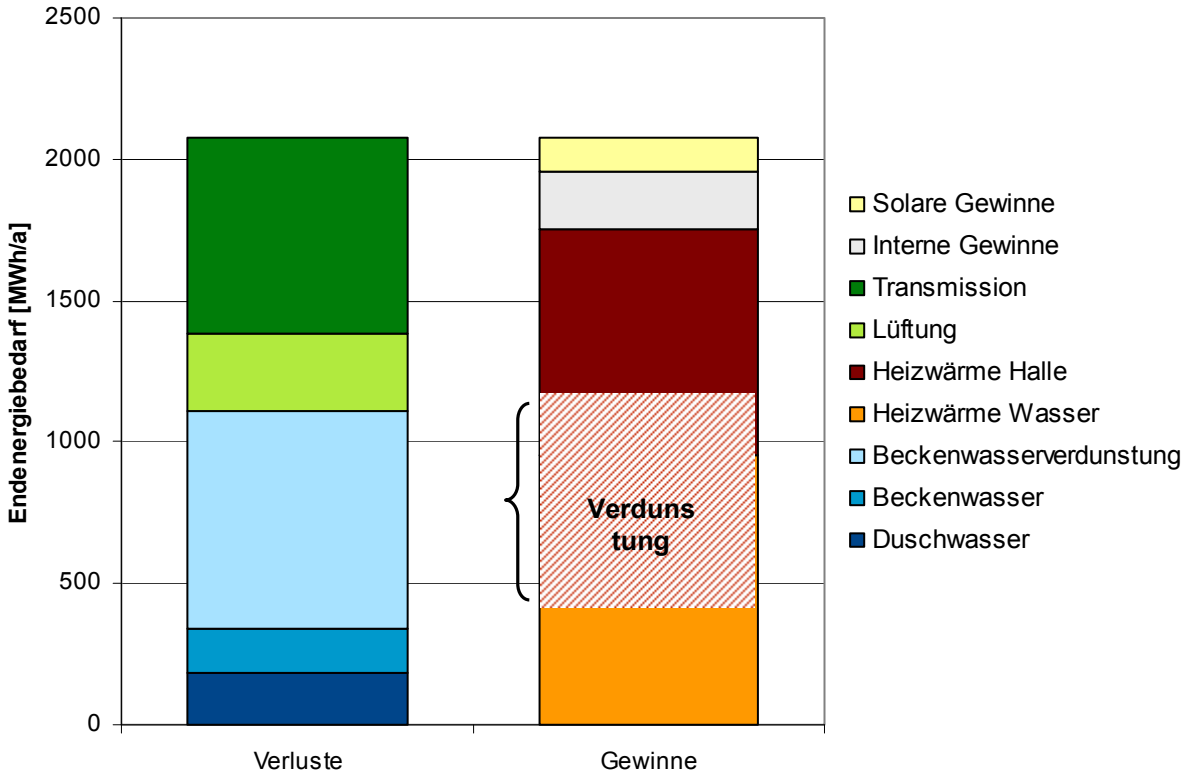


Abbildung 11: Heizenergiebilanz eines Hallenbades nach EnEV-Standard. Dargestellt sind auf der Verlustseite die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste, Warmwasserverluste für Becken und Duschen, sowie die Wasserverdunstung. Als Wärmegewinn wird hier die Beheizung der Halle, des Warmwassers sowie interne und solare Gewinne einbezogen. Randbedingungen: Hallentemperatur 32 °C, Hallenluftfeuchte 48 % (14,3 g/kg), Wassertemperatur 29 °C, Luftdichtheit der Gebäudehülle 1,5 h^{-1}.

Die höchsten Energieverluste entstehen danach durch die Transmission und die Abkühlung des Beckenwassers und der Hallenluft infolge der Verdunstung. Die Reduzierung der Transmissionswärmeverluste kann durch die konsequente Umsetzung des Passivhausstandards nahezu halbiert werden. Neben dieser Reduzierung kommt der hochwärmegedämmten Hülle auch aus einem zweiten Grund besondere Bedeutung zu. Erst durch die hohen Innenoberflächen-temperaturen besteht die Möglichkeit höhere Raumluftfeuchten einzustellen ohne dass es zu feuchtebedingten Bauschäden an der Gebäudehülle kommt.

Der Vergleich des Energiebedarfes für Passivhaus- und EnEV-Standard zeigen vor allem Einsparungen im Bereich Transmission und Lüftung. Die hierzu erforderlichen Maßnahmen wie hochwärmegedämmte Bauteilaufbauten, wärmebrückenfreie Details, hohe Luftdichtheit und hocheffiziente Wärmerückgewinnung sind hinlänglich bekannt. In den folgenden Kapiteln werden zuerst die Maßnahmen zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste diskutiert. Eine Verbesserung der Effizienz der Haustechnik und die damit verbundene Reduzierung des Energiebedarfes auf der Wasserseite wird in Kapitel 5 erörtert.

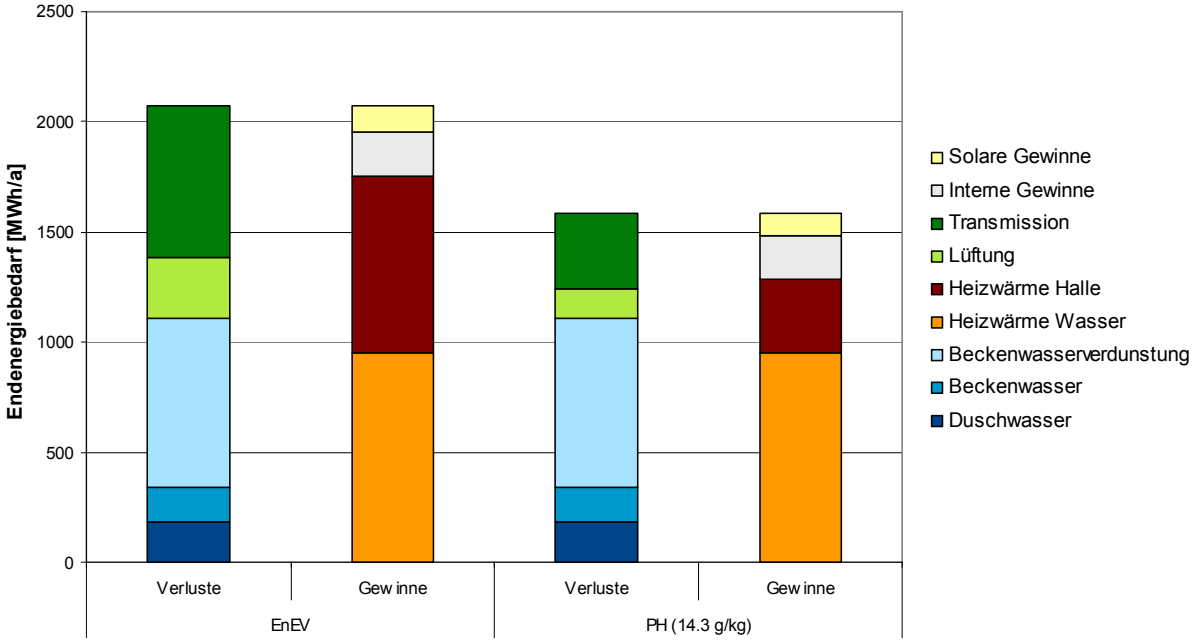


Abbildung 12: Vergleich der Energiebilanzen EnEV- und PH-Standard bei gleicher Hallenfeuchte (14,3 g/kg). Durch die Verbesserung der Gebäudehülle und der Haustechnik wird eine Reduzierung der Heizwärme um 27 % erreicht (Heizwärme umfasst hier die Beheizung der Halle und des Wasserkreislaufs inkl. Verdunstung – Bezogen nur auf die Hallenbeheizung führt die Verwendung von Passivhauskomponenten zu einer Endenergieeinsparung von 58%). Randbedingungen s. Abbildung 11, Luftdichtheit Passivhausstandard 0,4 h^{-1}.

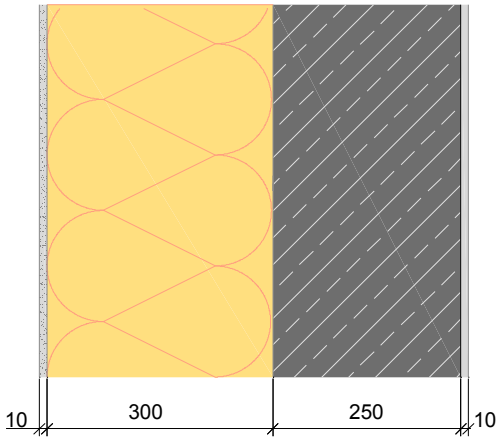
4.2. Hochwärmegedämmte Bauteilaufbauten

Um die erforderlichen hohen Oberflächentemperaturen der Außenbauteile zu gewährleisten, sind hochwärmegedämmte und luftdichte Konstruktionen erforderlich. Diese sind aus vielen Wohn- und Nichtwohngebäuden in Passivhausqualität bekannt und in der Praxis bewährt. Sie müssen allerdings in Anbetracht der besonderen Randbedingungen (ganzjährig hohe Raumluftfeuchten) auf ihre Bauschadensfreiheit hin überprüft und ggf. noch weiter verbessert oder angepasst werden. Zur Beurteilung eines Bauteilaufbaus sind dessen Dampfdiffusionseigenschaften zu untersuchen. Anhand einer dynamischen Simulation auf Basis von Stundenwerten der Innen- und Außentemperatur und –feuchte, sowie der Schlagregenbean-

spruchung können die hygrischen Vorgänge im Bauteil über einen Zeitraum von 10 Jahren untersucht werden [Delphin 4]. Dies ist sinnvoll, da Auffeuchtungen innerhalb der Konstruktion zum Teil erst nach einigen Tauperioden sicher festgestellt werden können.

4.2.1. Massive Wandkonstruktionen

Massive Wandkonstruktionen gelten allgemein als unkritisch in Bezug auf Bauschäden durch Tauwasser, weil hier zumindest im Neubau die Möglichkeit einer außenliegenden Dämmung gegeben ist. Dichte Oberputze aus Kunstharz behindern den Dampfdiffusionstransport, sodass deren Verwendung für den Hallenbadbau hier untersucht wurde.



Wandaufbau von innen nach außen

	Dicke [mm]	μ	sd [m]
Innenputz	**10**	**500**	**5**
Beton	**250**	**110**	**27.5**
Mineralwolle	**300**	**1**	**0.3**
Außenputz	**10**	**500**	**5**

Abbildung 13: MW 01 Massive Wandkonstruktion – außen und innen dampfdicht

In **Abbildung 14** ist der relative Feuchteverlauf des Bauteils im 10. Betrachtungsjahr aufgezeigt. Dabei wird jedes Material in mehrere Schichten diskretisiert, die als einzelne Linien in der Grafik erkennbar sind. Beginnend mit 64 % relativer Feuchte auf der Innenseite sind die Innenputzschichten dargestellt. Als nächste Schicht ist die Stahlbetonkonstruktion dargestellt (braune Linien). Vor allem der Bereich der Mineralwolle ist von Interesse, da hier auf der Außenseite eine hohe relative Feuchte bis hin zu Kondensat auftreten kann. Den äußeren Abschluss stellt die Außenputzschicht dar. Sie weist je nach Regenbelastung und Außenluftfeuchte hohe Schwankungen zwischen 60 und 100 % (im Mittel 88%) auf.

Analog ist die **Abbildung 15** zu verstehen. Hier ist der Wassergehalt der Bauteilschichten aufgetragen. Der Betonwassergehalt schwankt hier im Bereich von 3 bis 8,5 Vol-%. Die Dämmschichten liegen bis auf wenige Ausnahmen deutlich unter 1 Vol-%.

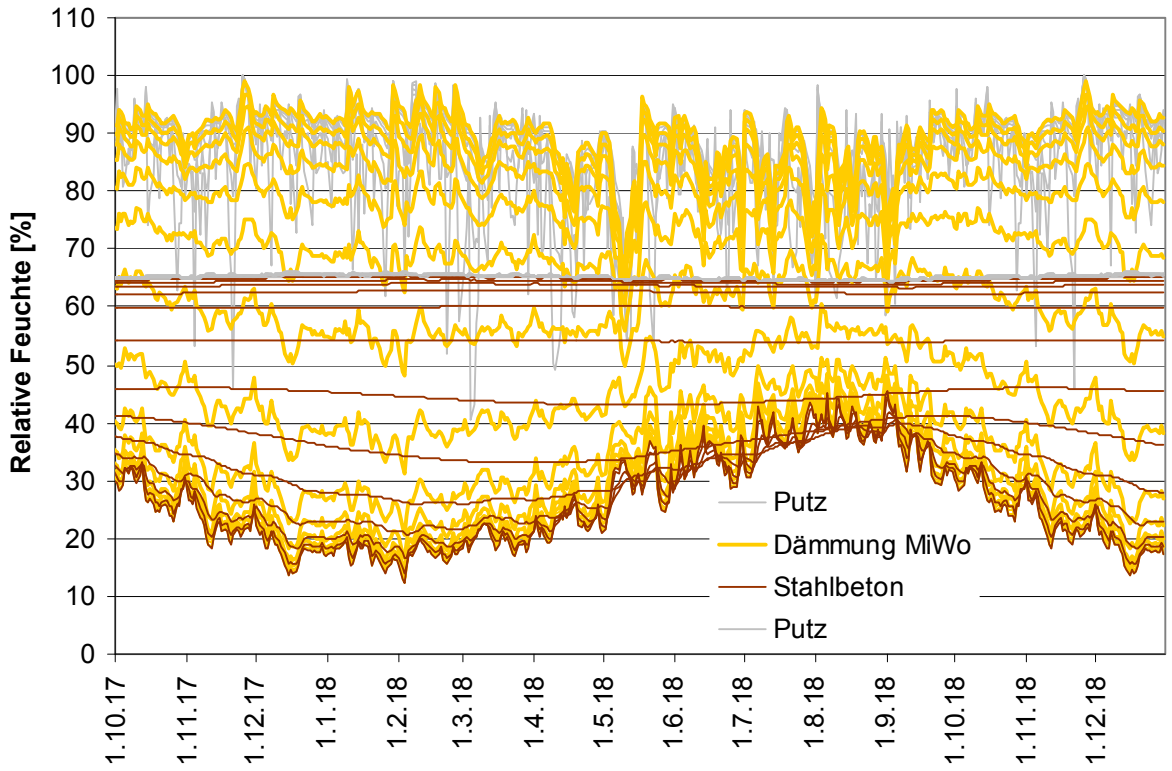


Abbildung 14: Verlauf der relativen Feuchte MW01 im 10. Jahr für mitteldeutsches Außenklima für eine Mineralwolledämmung

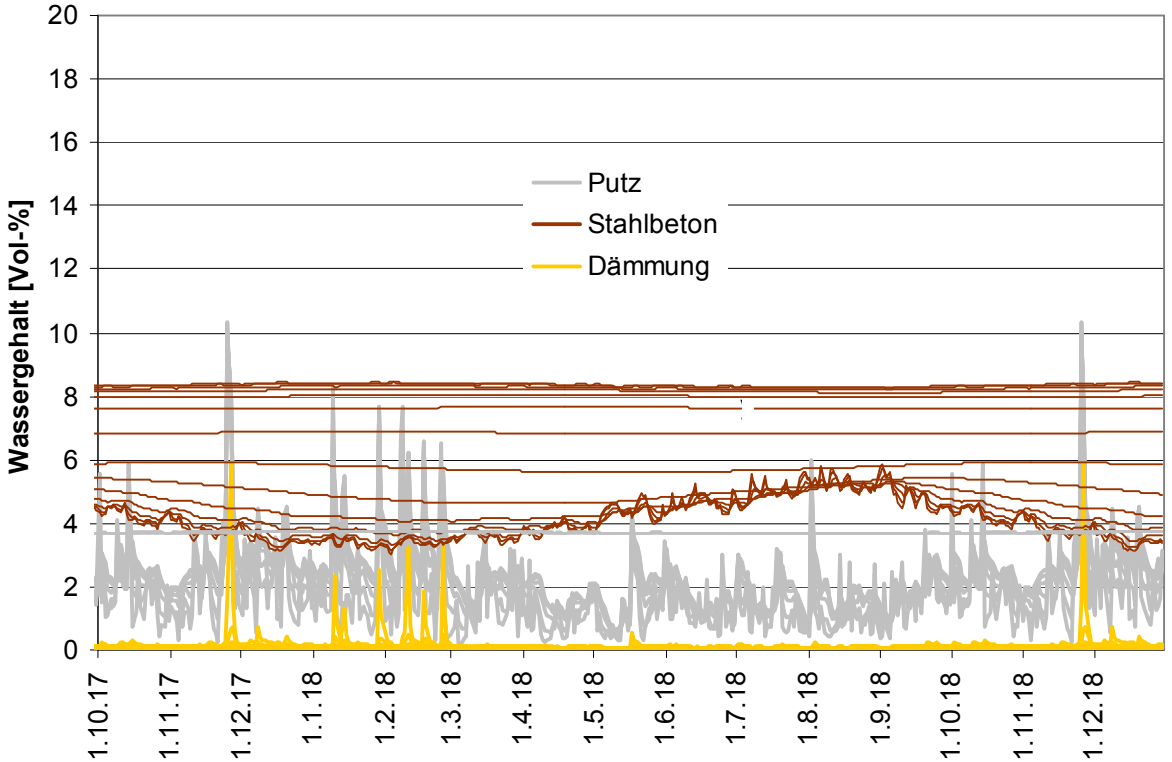


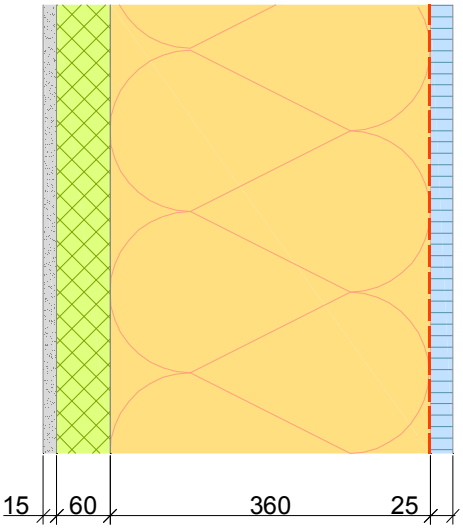
Abbildung 15: LW01 Wassergehalt der Baustoffschichten

4.2.2. Leichte Wandkonstruktionen

Während bei massiven Konstruktionen die Luftdichtheit durch den tragenden Beton selbst oder Putz sichergestellt wird, müssen leichte Wand- und Dachkonstruktionen innenseitig mit dampfbremsenden Schichten, z.B. Folien versehen werden. Vor allem Fehlstellen führen bei den in Hallenbädern gegebenen hohen Feuchten schnell zu massiven Feuchteschäden. Es empfiehlt sich daher Aufbauten zu wählen, die möglichst hohe Sicherheitsreserven in der Konstruktion aufweisen. Das bedeutet, dass der gewählte Wandaufbau im ungestörten Bereich möglichst keine kritischen Feuchten erreicht.
Zur Beurteilung der Gefahr von feuchtebedingten Bauschäden werden die zulässigen Höchstwerte der Feuchte nach [DIN 68800] mit den Berechnungsergebnissen verglichen. Der zulässige Feuchtegehalt für Plattenholzwerkstoffe der Holzwerkstoffklasse 20 beträgt 15 m%. Der zulässige Feuchtegehalt von tragenden Holzbauteilen ist nach [DIN 18334] auf 20 m% begrenzt.
Um die Ergebnisse der Berechnungen vergleichen zu können, werden die zulässigen Holzfeuchten der Holzwerkstoffe in Vol-% umgerechnet:

OSB 630 kg/m³	9,45 Vol-%
Vollholz Fichte 500 kg/m³	10 Vol-%

In den nachfolgenden Diagrammen ist der relative Feuchteverlauf im Bauteil sowie der Wassergehalt in Vol-% für einige exemplarische Wandaufbauten dargestellt:



Wandaufbau von innen nach außen

	Dicke [mm]	μ	sd [m]
OSB Platte	**25**	**280**	**7**
Dampfsperre	**1**	**100000**	**100**
Mineralwolle	**360**	**1**	**0.36**
EPS	**360**	**65**	**23.4**
Putzträgerplatte	**60**	**7**	**0.42**
Außenputz	**15**	**25**	**0.38**

Abbildung 16: LW 01 Leichte Wandkonstruktion – außen dampfdiffusionsoffen, innen dampfdicht

Abbildung 17 zeigt den Verlauf der relativen Feuchte im Bauteilquerschnitt. In den äußeren Dämmschichten treten hohe relative Feuchten bis fast an die Kondensatgrenze auf (95 %). Der Wassergehalt der Dämmschichten **(Abbildung 18)**

weist allerdings mit weniger als 1 Vol-% (Mineralwolle) und zwischen 1 und 2 Vol-% (EPS) geringe Werte auf. Lediglich die Putzträgerplatte und der Außenputz zeigen hier größere Schwankungen im Bereich von über 20 Vol-%. Eine Auffeuchtung der Bauteilschichten konnte in keinem der beiden Fälle festgestellt werden.

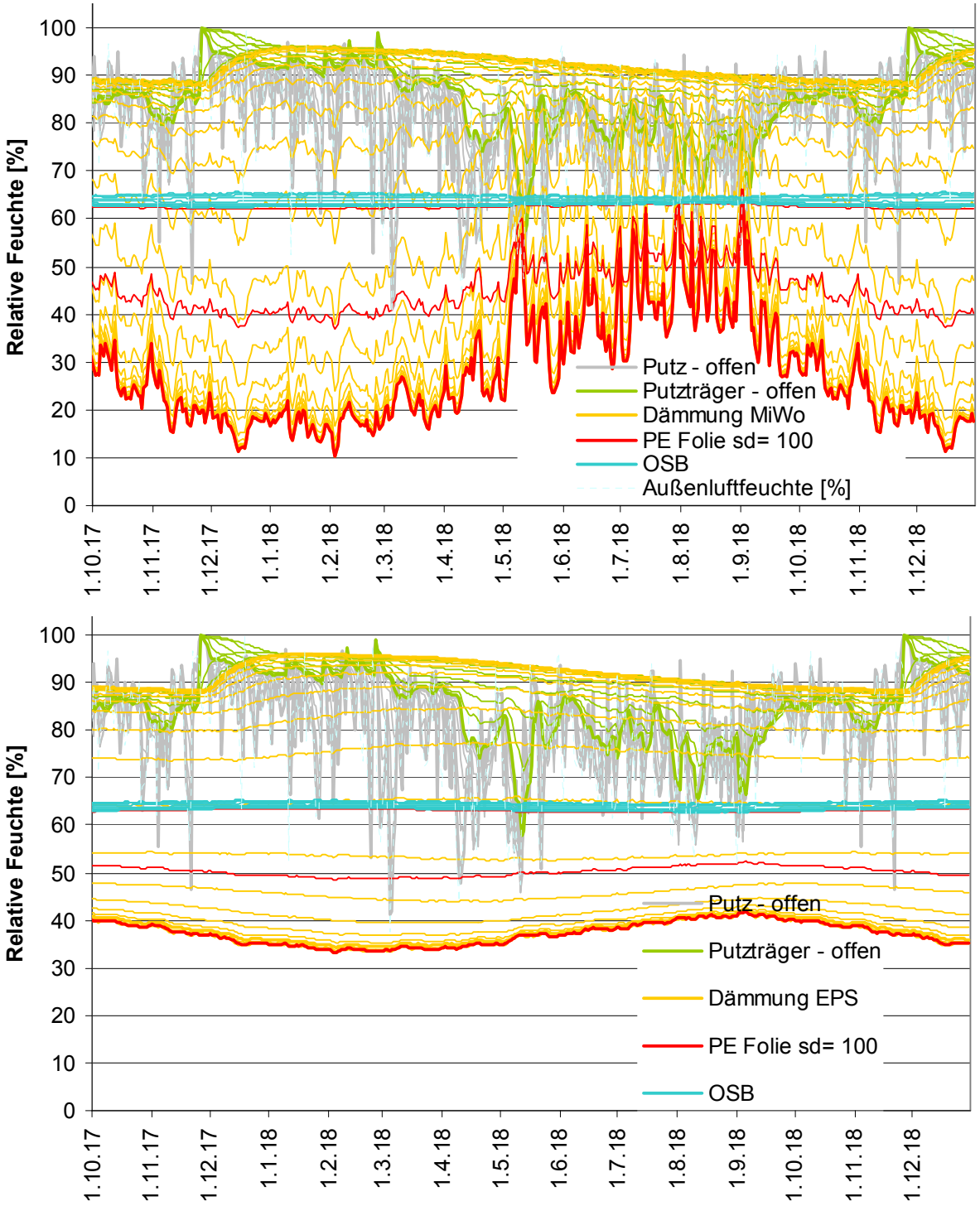


Abbildung 17: Verlauf der relativen Feuchte LW01 im 10. Jahr für mitteldeutsches Außenklima für eine Mineralwolle- und EPS Dämmung

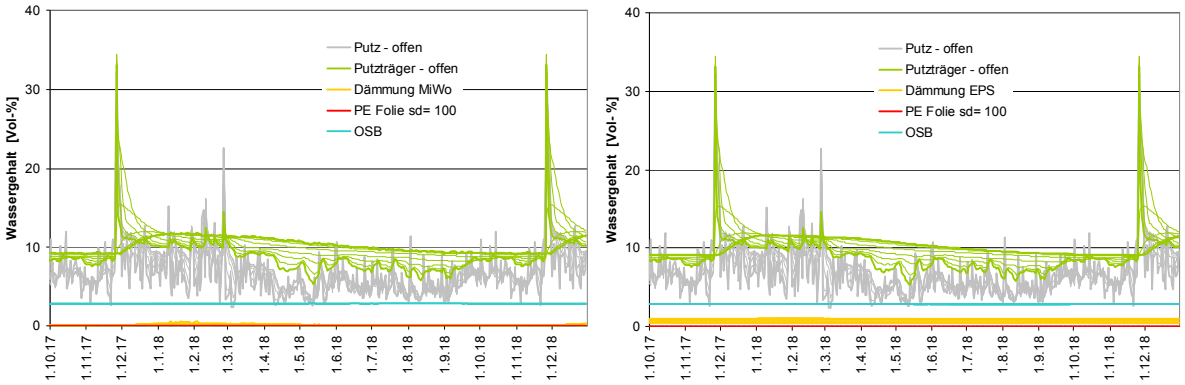
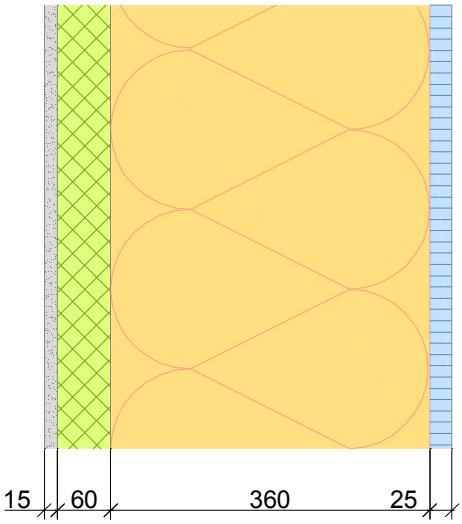


Abbildung 18: LW01 Wassergehalt der Baustoffschichten für Mineralwolle und EPS



Wandaufbau von innen nach außen

	Dicke	μ	sd
	[mm]		[m]
OSB Platte	**25**	**280**	**7**
Mineralwolle	**360**	**1**	**0.36**
EPS	**360**	**65**	**23.4**
Putzträgerplatte	**60**	**7**	**0.42**
Außenputz	**15**	**25**	**0.38**

Abbildung 19: LW 02 Leichte Wandkonstruktion – außen und innen dampfdiffusionsoffen

Wird statt der innenseitigen Dampfsperre lediglich eine OSB Platte mit einem s_d-Wert von 7 vorgesehen, treten in der Dämmung noch höhere relative Feuchten auf, die im Winter mit über 98 % (Mineralwolle) fast an die Kondensationsgrenze stoßen. Auch im Sommerhalbjahr sinkt die relative Feuchte nie unter 90 %. Die EPS Dämmung schneidet hier aufgrund ihrer dampfdiffusionsbremsenden Eigenschaft noch etwas besser ab. Der Blick auf den Wassergehalt der Bauteilschichten zeigt, dass die Mineralwolle hier deutlicheren Schwankungen von über 4 Vol-% ausgesetzt wird. Der Wassergehalt der EPS Dämmung liegt bei den Varianten LW 01 und LW 02 bei etwa 1 - 2 Vol-%.

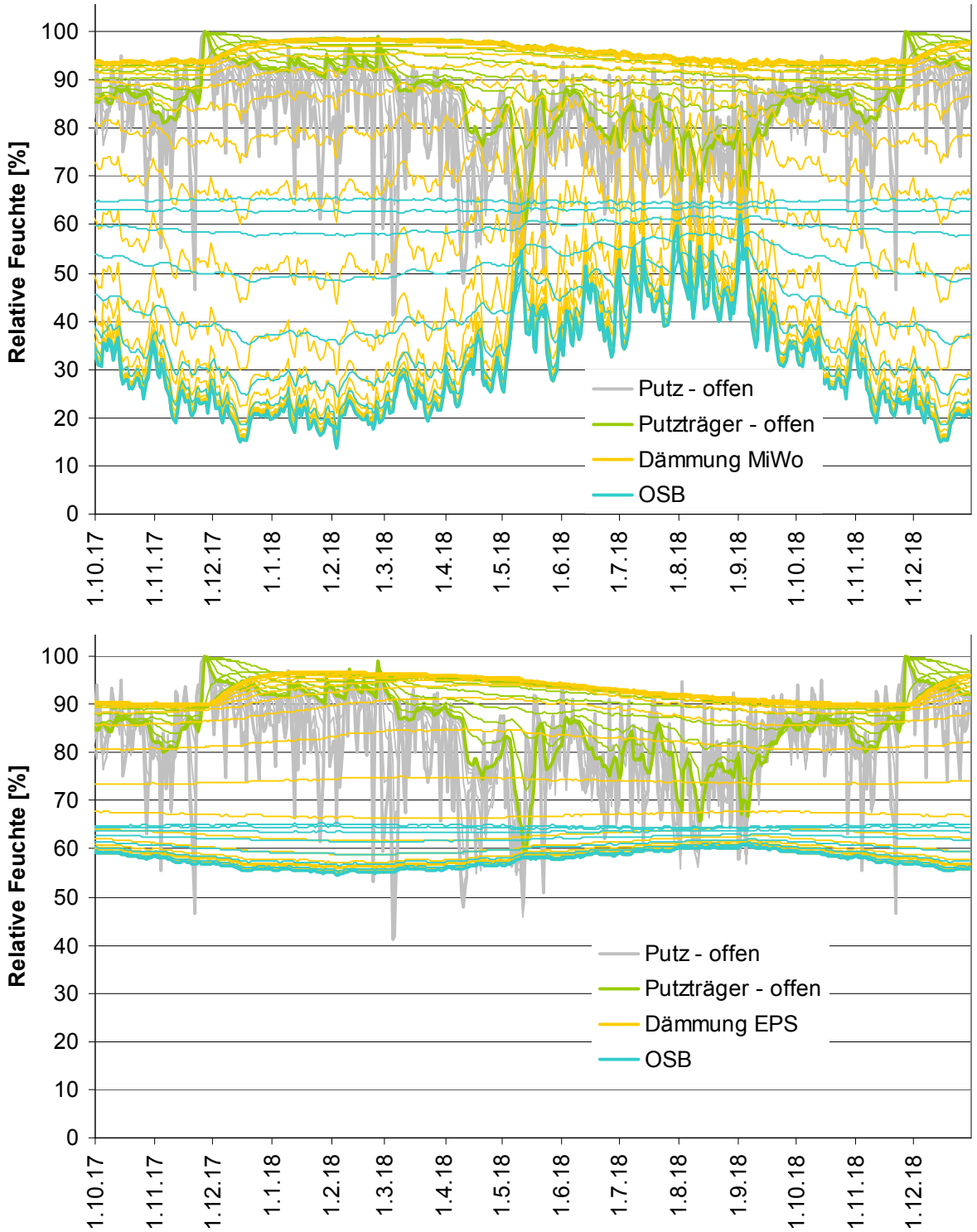


Abbildung 20: Verlauf der relativen Feuchte für LW 02 im 10. Jahr für mitteldeutsches Außenklima für eine Mineralwolle- und EPS Dämmung

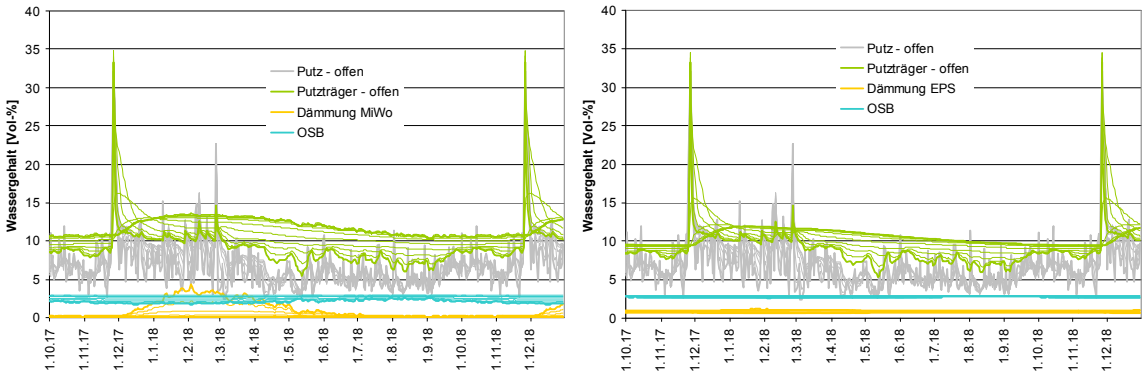
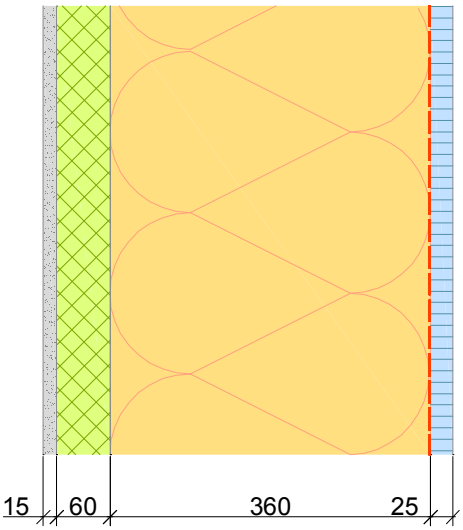


Abbildung 21: LW02 Wassergehalt der Baustoffschichten für Mineralwolle und EPS

Als dritte Variante wurde der Einfluss eines dichteren Außenputzes untersucht. Dabei wird innenseitig eine Dampfsperre (PE-Folie mit einem sd-Wert von 100) angenommen.



Wandaufbau von innen nach außen

	Dicke [mm]	μ	sd [m]
OSB Platte	**25**	**280**	**7**
Dampfsperre	**1**	**100000**	**100**
Mineralwolle	**360**	**1**	**0.36**
EPS	**360**	**65**	**23.4**
Putzträgerplatte	**60**	**7**	**0.42**
Außenputz	**15**	**500**	**7.5**

Abbildung 22: LW 03 Leichte Wandkonstruktion – außen dampfdiffusionsdichter, innen dampfdicht

Der dichtere Außenputz führt zu etwas geringeren relativen Feuchten der äußeren Dämmschichten, da das Eindringen von Schlagregen behindert wird. Auch der Wassergehalt in der Mineralwolle ist mit max. 0,25 Vol-% sehr gering. Der Wassergehalt der EPS Dämmung liegt hier bei knapp 1 Vol-%. Auch bei dieser Variante konnte keine Auffeuchtung festgestellt werden.

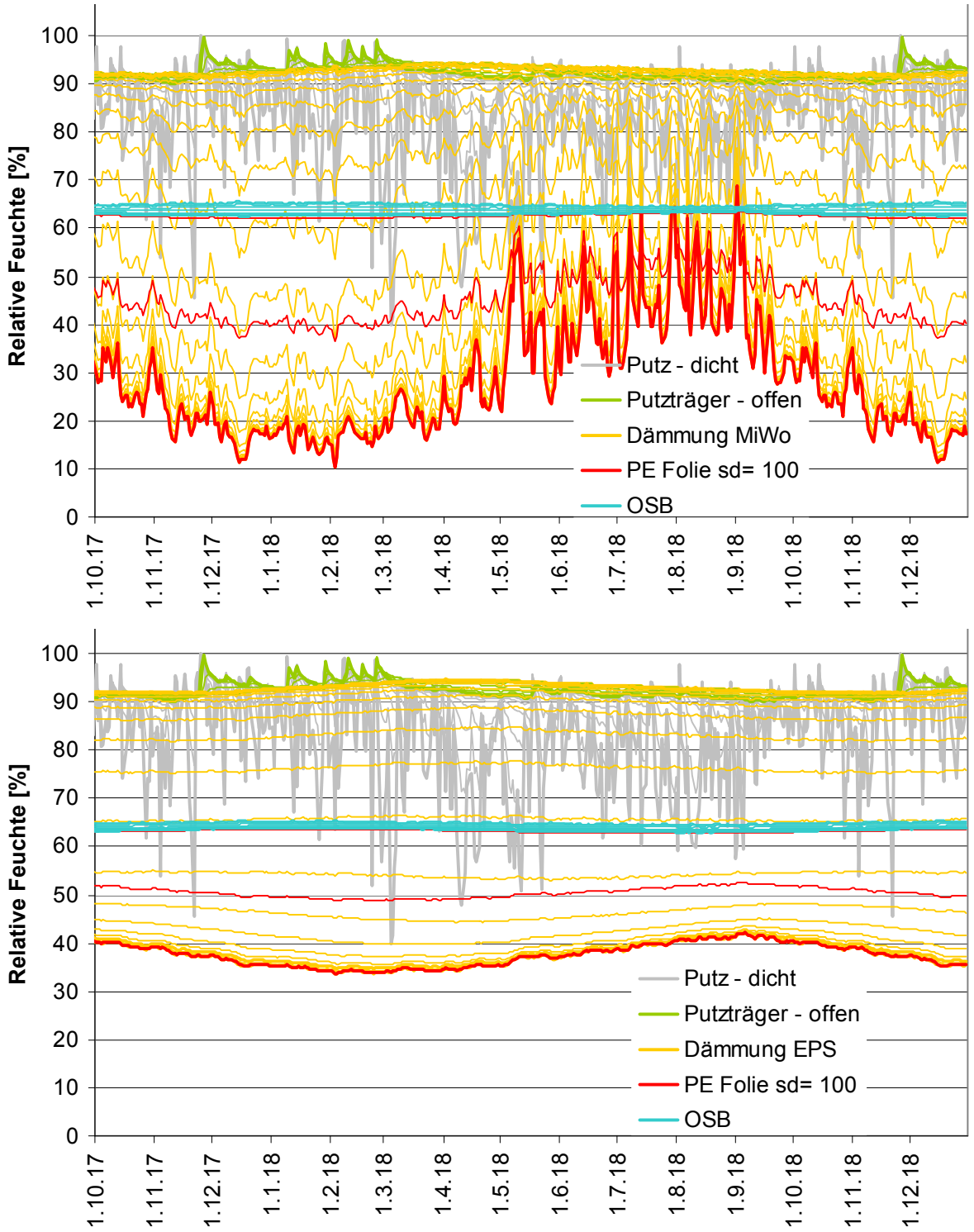


Abbildung 23: Verlauf der relativen Feuchte für LW 03 im 10. Jahr für mitteldeutsches Außenklima für eine Mineralwolle- und EPS Dämmung

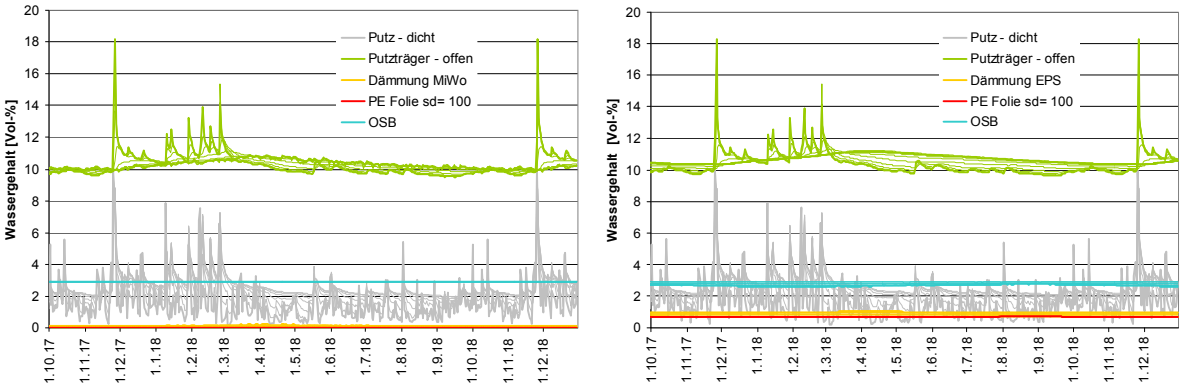
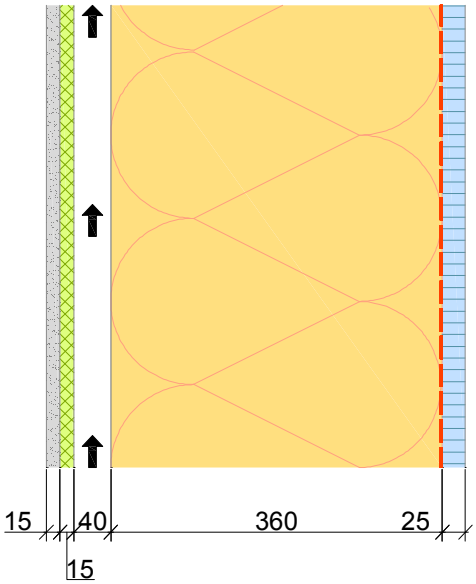


Abbildung 24: LW03 Wassergehalt der Baustoffschichten für Mineralwolle und EPS



Wandaufbau von innen nach außen

	Dicke	μ	sd
	[mm]		[m]
OSB Platte	25	280	7
Dampfsperre	1	100000	100
Mineralwolle	360	1	0.36
EPS	360	65	23.4

Abbildung 25: LW 04 Leichte Wandkonstruktion – hinterlüftete Außenhaut, innen dampfdicht

Als letzte Variante wurde eine hinterlüftete Außenwandkonstruktion untersucht. Die Dämmung steht im direkten Kontakt mit der Außenluft, so dass die relative Feuchte der äußeren Schichten eng an die Außenluftfeuchte geknüpft ist. Entsprechend stärker ausgeprägt sind die Schwankungen im Wassergehalt. Sie liegen mit 2 Vol% bei Mineralwolle und EPS am höchsten von allen Varianten.

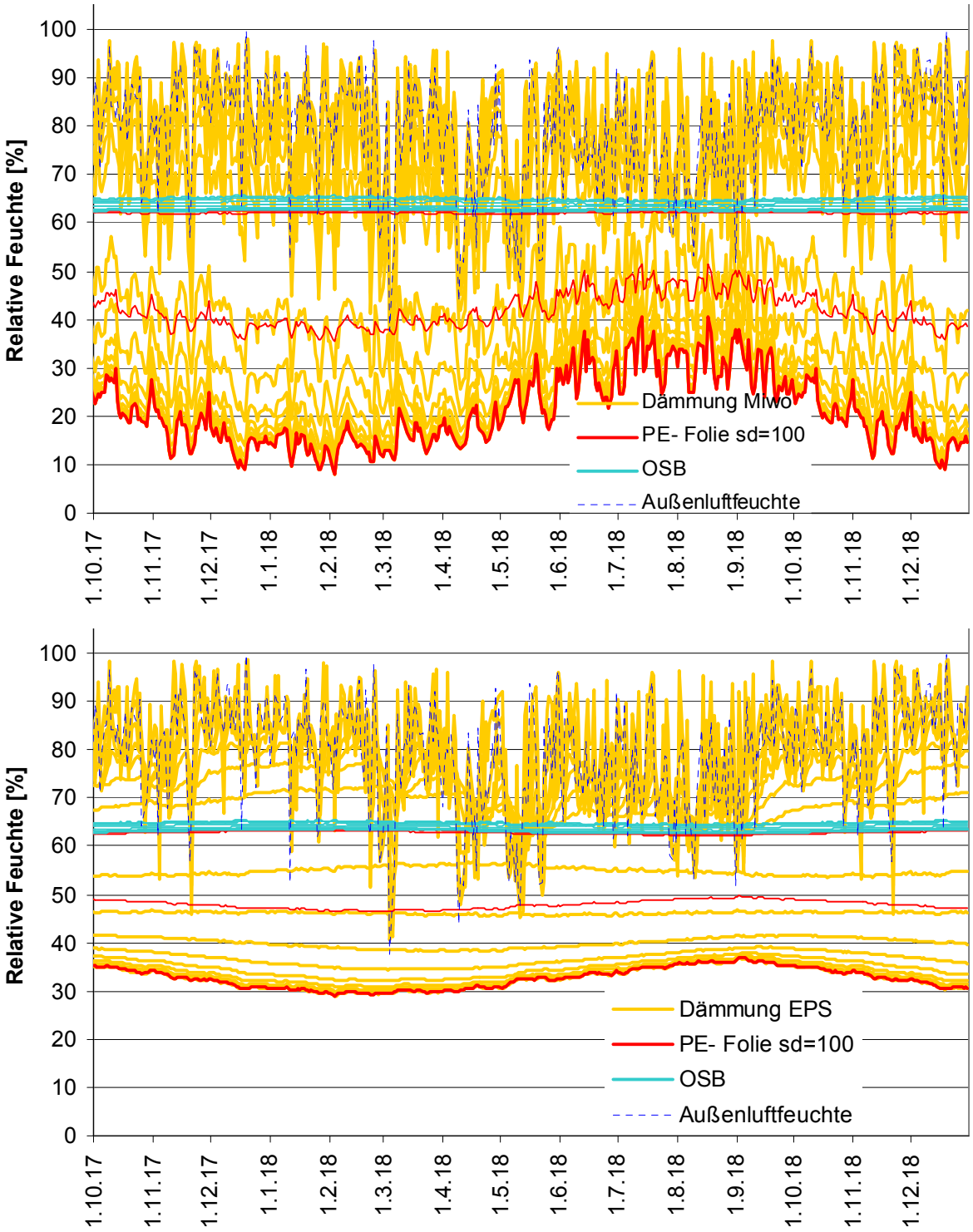


Abbildung 26: Verlauf der relativen Feuchte für LW 04 im 10. Jahr für mitteldeutsches Außenklima für eine Mineralwolle- und EPS Dämmung

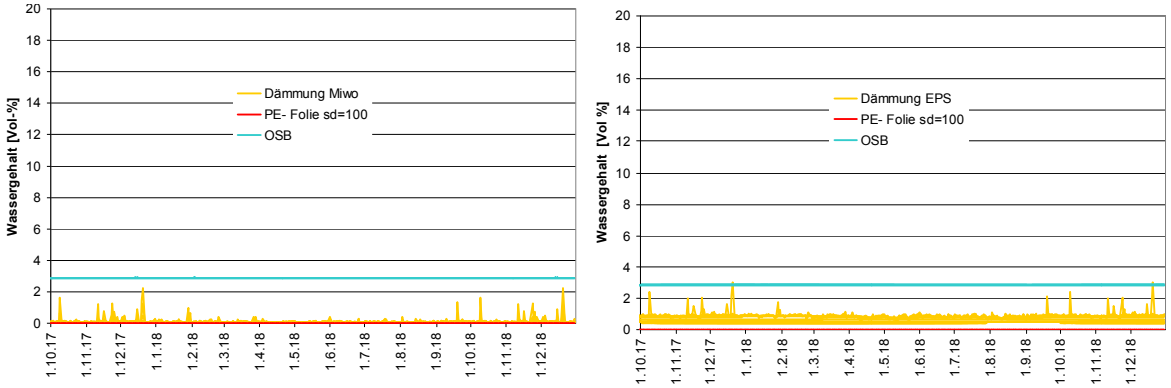
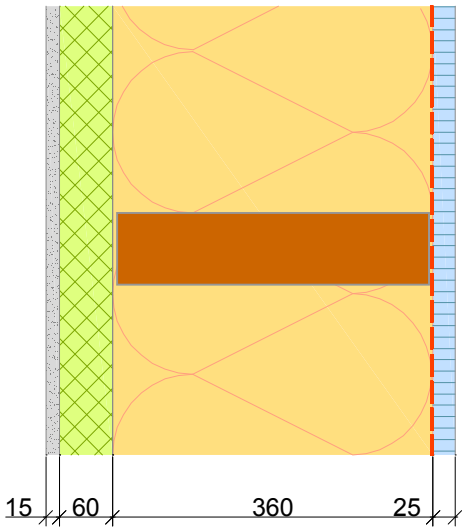


Abbildung 27: LW04 Wassergehalt der Baustoffschichten für Mineralwolle und EPS

Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf einen ungestörten Wandaufbau (ohne Balkenlage) und spiegeln den Feuchteverlauf für eine unbeschädigte und einwandfrei ausgeführte Dampfsperre wieder. Um abschätzen zu können, wie groß der Einfluss einer Leckage auf die Konstruktion ist, wurde ein Bauteilaufbau einmal mit einer Balkenlage und einmal mit einer Fehlstelle berechnet.



Wandaufbau von innen nach außen

	Dicke [mm]	μ	sd [m]
OSB Platte	**25**	**280**	**7**
Dampfsperre	**1**	**100000**	**100**
Mineralwolle	**360**	**1**	**0.36**
Vollholz	**360/100**	**236**	**86**
Putzträgerplatte	**60**	**7**	**0.42**
Außenputz	**15**	**500**	**7.5**

Abbildung 28: LW 01 a mit Balkenlage – innen dampfdicht, außen dampfdiffusionsoffener Putz

Das Konstruktionsvollholz stellt eine Wärmebrücke dar, die raumseitig die Temperatur senkt und außenseitig anhebt. Kondensatprobleme werden, wenn überhaupt, eher auf der kalten Außenseite erwartet, sodass die kritischen Stellen nicht im Bereich der Holzkonstruktion liegen.

Die Betrachtung des Wassergehaltes der Konstruktion zeigt den kritischen Fall einer von außen wirkenden hohen Befeuchtung. Der Wassergehalt des Balkens steigt hier kurzzeitig über 10 Vol-% an, trocknet aber rasch wieder ab. Bei der Betrachtung der Feuchteentwicklung über einen Zeitraum von 10 Jahren konnte keine stetige Auffeuchtung der Konstruktion festgestellt werden.

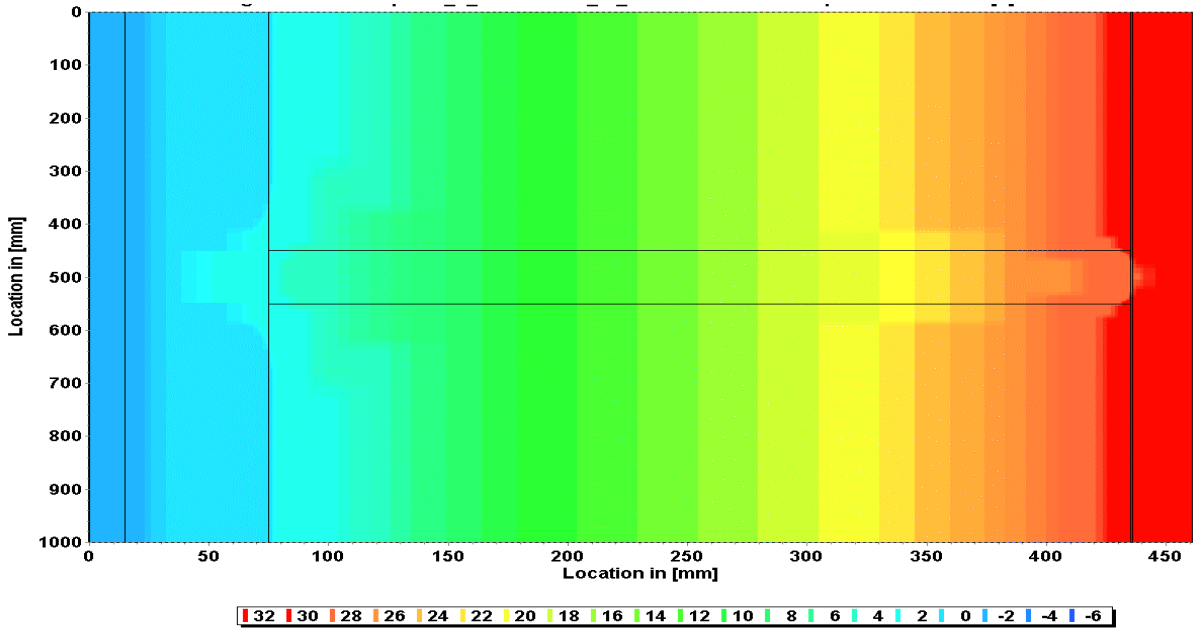


Abbildung 29: Temperaturverteilung Wandaufbau mit Holzbalken LW 01 a

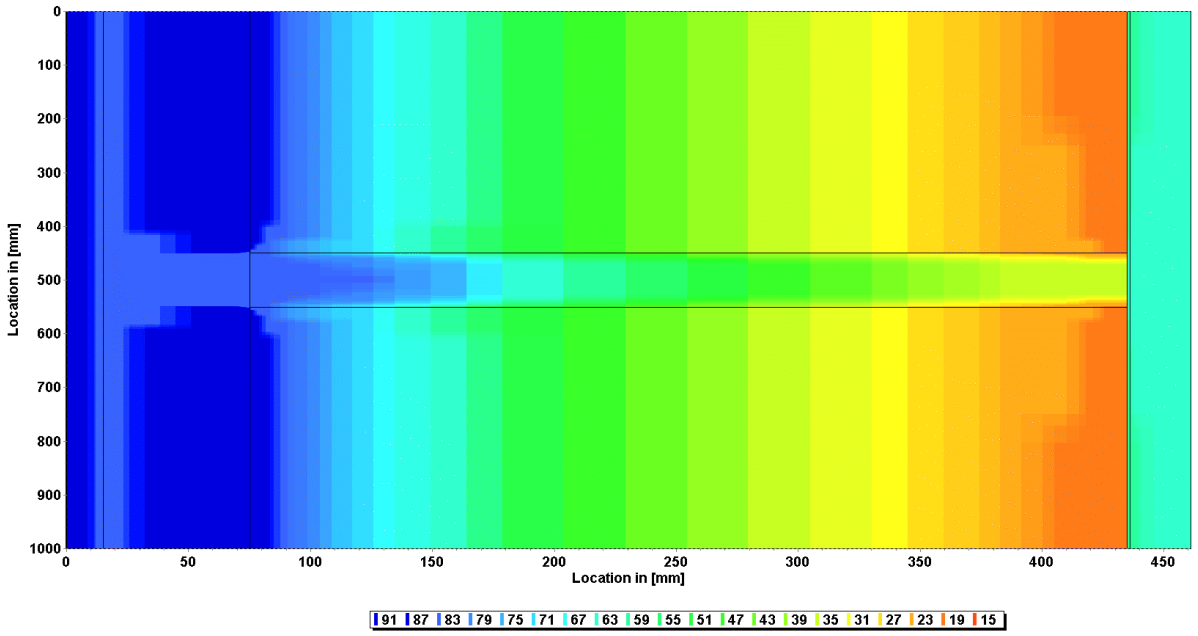


Abbildung 30: Relative Feuchte im Querschnitt mit Balkenlage LW 01 a

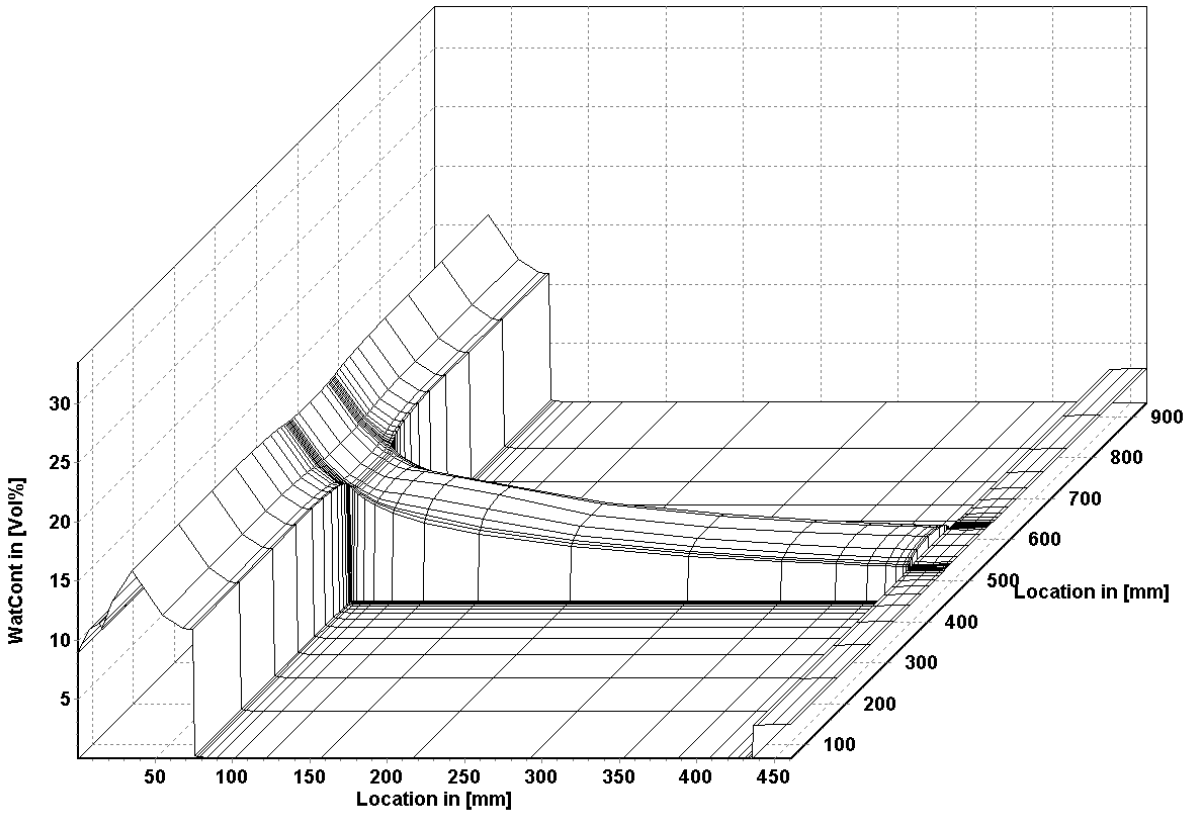
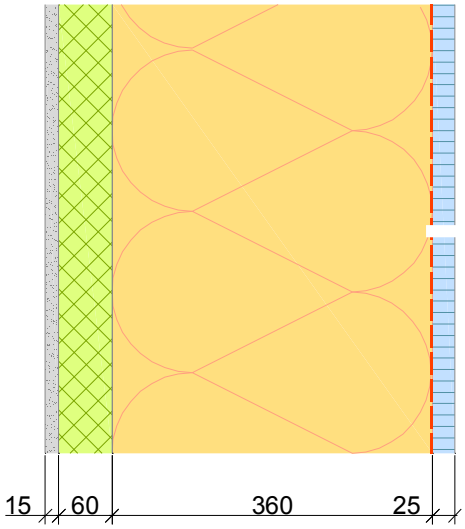


Abbildung 31: Wassergehalt im Wandaufbau mit Balkenlage LW 01 a. Aufgrund einer von außen wirkenden Befeuchtung steigt der Wassergehalt kurzzeitig auf über 10 Vol-% an.

Schließlich wird der Einfluss einer Fehlstelle der innen aufgebrachten Dampfsperre untersucht.



Wandaufbau von innen nach außen

	Dicke [mm]	μ	sd [m]
OSB Platte	25	280	7
Dampfsperre	1	100000	100
Mineralwolle	360	1	0.36
EPS	360	65	23.4
Putzträgerplatte	60	7	0.42
Außenputz	15	500	7.5

Abbildung 32: Wandaufbau entsprechend LW 03 mit einer 2mm Fuge in der PE Folie

Bei einer Fuge von 2 mm wird zusätzliche Feuchte in die Konstruktion eingetragen. Trotz dieser Fehlstelle gibt es keine stetige Auffeuchtung über die Jahre. Der Feuchtegehalt der Dämmung liegt hier unter 2 Vol-%.

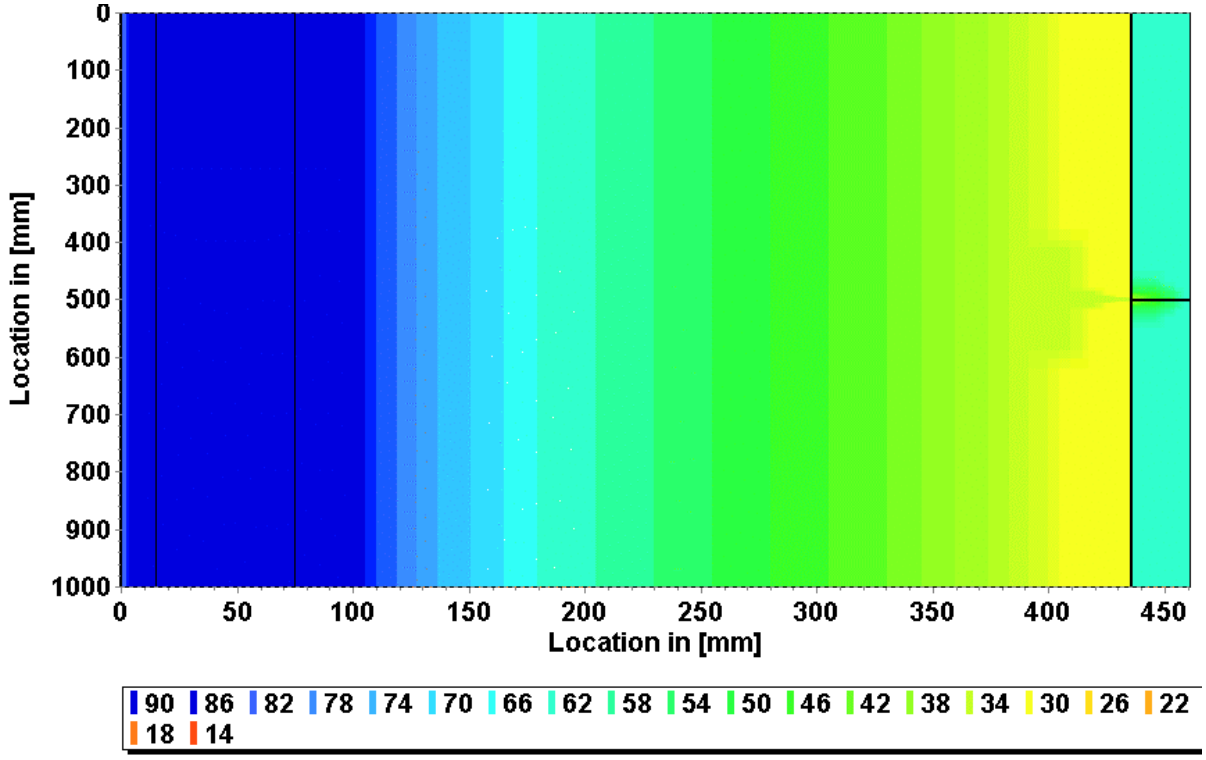


Abbildung 33: Verlauf der relativen Feuchte Winter des 10. Jahres

4.2.3. Einfluss des Luftwechsels bei kombiniertem Außen- und Umluftbetrieb

Oftmals wird zusätzlich zum erforderlichen Außenluftwechsel ein Umluftanteil vorgesehen, der einer optimalen Durchspülung der Halle dienen soll. Dieser zusätzliche Umluftanteil spiegelt sich im Stromverbrauch der Ventilatoren wider. Selbst bei effizienten Ventilatoren mit einer Stromaufnahme von 0,45 Wh/m³ entsteht bei kombiniertem Außen- und Umluftbetrieb ein zusätzlicher Stromverbrauch von bis zu 4,3 MWh/a (Endenergie). Es wird davon ausgegangen, dass die Notwendigkeit einer solchen zusätzlichen Luftumwälzung für Passivhaushallen nicht gegeben ist. Im Rahmen einer Untersuchung zur Lüftungseffizienz in Turnhallen mit Hilfe von Strömungssimulationen und einer Messung konnte gezeigt werden, dass es annähernd keine Temperaturschichtung in der Halle gibt und eine sehr gute Durchspülung erreicht werden kann [Kah 2009]. In Hallenbädern herrschen z.T. andere Randbedingungen vor, die Schichtungen und Durchspülung beeinflussen, führt das besonders warme Innenraumklima zu einem stärkeren Kaltluftabfall an den großflächigen Fassaden. Die Frage bleibt offen, ob die Luftfeuchte und Temperatur im Hallenquerschnitt als völlig homogen zu betrachten ist. Die Gefahr von

sogenannten „Feuchtenestern“ wie sie vor allem an Wärmebrücken mit entsprechend geringen Oberflächentemperaturen auftreten, ist bei konsequenter Umsetzung einer hochwärmegedämmten Hülle aber nicht zu erwarten.

Im Rahmen der Projektbegleitung für das Passivhaushallenbad hat sich allerdings gezeigt, dass einzelne Bauteile (z.B. Flügel von Rauch- und Wärmeabzügen) nicht in geeigneter Qualität am Markt verfügbar sind. Sollen feuchtebedingte Bauschäden dauerhaft vermieden werden, so darf die Hallenfeuchte nur so hoch sein, wie es die kälteste Oberfläche zulässt. Dies betont das Erfordernis einer konsequent hochwertigen thermischen Hülle.

Alternativ können einzelne Bauteile, die ein hohes Schadensrisiko aufweisen, direkt mit trockener warmer Zuluft angeströmt werden, um die Tauwassergefahr zu unterbinden. Da diese Maßnahme mit zusätzlichem Installationsaufwand und Energieverlust verbunden ist, soll im Rahmen der messtechnischen Begleitung mittels Oberflächenfühler die Notwendigkeit einer Anströmung an einzelnen thermischen Schwachstellen untersucht werden.

4.2.4. Kellertemperaturen

Häufig wird die gesamte Haus- und Wassertechnik im Keller installiert. Für das Hallenbadmodell werden Pumpen für die Wasserumwälzung und Filtration mit einer Leistung von insgesamt 21 kW angenommen, die 24 Stunden am Tag in Betrieb sind. Weiterhin befinden sich im Keller Warmwasserspeicher für die Duschanlagen mit entsprechenden Verteilleitungen sowie die Lüftungsgeräte. Viele dieser Geräte geben Wärme an den Kellerraum ab, so dass dieser bei herkömmlichen Hallenbädern Raumtemperaturen noch über den Hallentemperaturen aufweist. Für das Hallenbad in Passivhausstandard wurde untersucht, ob es aufgrund der besseren Dämmung des Kellers zu kritischen Kellertemperaturen kommen kann. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Umwälzpumpen eine Elektroeffizienz von 80% haben und 20 % ihrer Leistung in Form von Wärme an den Raum abgeben. Für den Keller bedeutet dies interne Wärmequellen von 3,5 W/m². Wärmeabgabe von WW-Speicher und Leitungen spielen hier im Vergleich zur Pumpenabwärme keine wesentliche Rolle, sofern sie gut gedämmt werden. Die Kellertemperaturen für das Hallenbadmodell lagen durchschnittlich im Bereich von 29 °C also vergleichbar der Wassertemperatur. Bei steigenden internen Wärmequellen durch z.B. stärkere Pumpen für Attraktionen oder Pumpen mit schlechterem Wirkungsgrad stellen sich entsprechend höhere Temperaturen bis etwa Hallentemperatur (ca. 32 °C) ein.

4.2.5. Einfluss der Orientierung

Eine Ausrichtung der Hauptglasfassaden nach Süden optimiert die solaren Wärmegewinne. Nicht immer ist eine optimale Ausrichtung möglich oder die Südseite ist durch umliegende Bebauung verschattet. Wird das in Kapitel 3 vorgestellte

Gebäude mit der Hauptverglasungsrichtung nach Norden ausgerichtet, so erhöht sich der Heizwärmebedarf für die Halle und Umkleide bei großzügiger Verglasung um ca. 5 %. Betrachtet man die Verteilung der Wärmegewinne und Verluste (Kapitel 4.1) so zeigt sich, dass der Anteil der solaren Gewinne ohnehin sehr gering ist **(Abbildung 11)**. Eine optimale Ausrichtung ist, soweit möglich, immer vorteilhaft, aber nicht zwingend erforderlich.

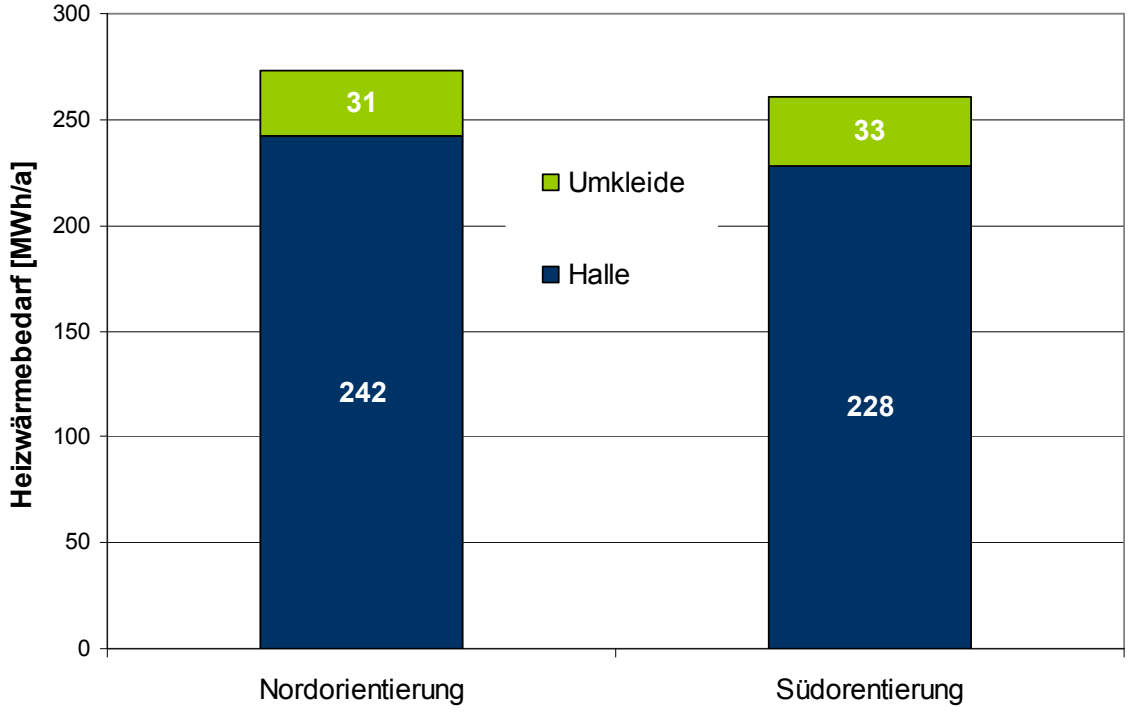


Abbildung 34: Heizwärmebedarf der Halle mit Umkleide für eine Nord- und Südorientierung der Hauptverglasungsflächen

4.3. Sommerliche Behaglichkeit

Aufgrund ihrer hohen Innenraumtemperaturen ist in Hallenbädern fast ganzjährig eine Beheizung erforderlich. Dennoch soll die Frage untersucht werden, ob und wann die Gefahr von Überhitzung besteht und welchen Einfluss die Verglasungsfläche und die Wahl der Verglasungsart auf die sommerliche Behaglichkeit haben. Zur optimalen Ausnutzung der solaren Gewinne wird das Hallenbadmodell mit Hauptverglasungsflächen nach Süden ausgerichtet. Zwei Varianten wurden untersucht: Die Fensterflächen sind einmal so bemessen, dass sie eine optimale Tageslichtausnutzung (325 m²) sowie den Außenbezug der Badegäste gewährleisten und alternativ mit einer großzügigen Verglasung auf der Süd-, West- und Ostseite der Halle (550 m²). Für beide Varianten wird der Einfluss einer Sonnenschutzverglasung untersucht.

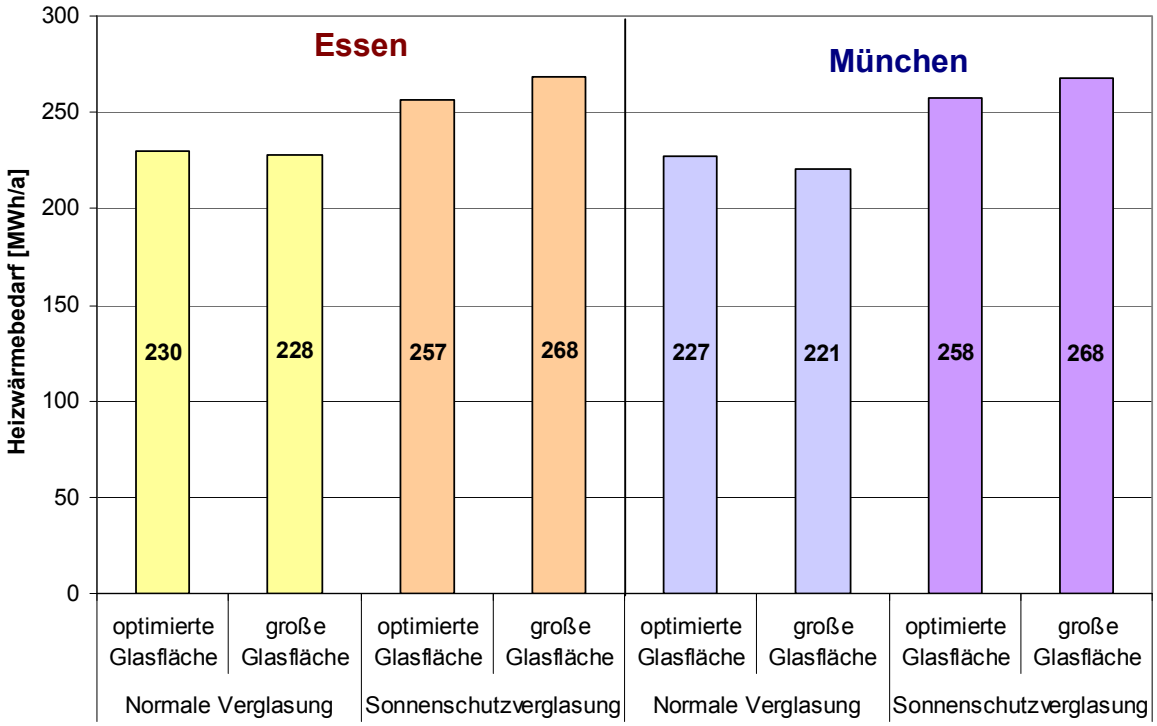


Abbildung 35: Heizwärmebedarf für die Halle bei größerer und kleinerer Verglasungsfläche für die Standorte Essen und München

Bei der nach Süden ausgerichteten Halle reduziert sich der Heizwärmebedarf mit steigender Fensterfläche, dies gilt vor allem in Klimabereichen mit höherem solaren Angebot (z.B. München). Negativ macht sich in allen Fällen die Verwendung von Sonnenschutzverglasung bemerkbar. Die solaren Gewinne werden aufgrund des deutlich geringeren g-Wertes der Verglasung reduziert, sodass die höheren Transmissionswärmeverluste der Glasfassade gegenüber einer opaken Hüllfläche deutlich zum Ausdruck kommen. Die sommerliche Behaglichkeit kann anhand des operativen Temperaturverlaufes der Halle beurteilt werden. Im Sommerhalbjahr stellen sich für die großzügige Verglasungsvariante mit Sonnenschutzverglasung keine höheren Temperaturen ein. Mit normaler Verglasung ergeben sich operative Temperaturen von 32 bis 34 °C ein. Ein Überhitzungsproblem liegt daher auch ohne sommerliche Verschattung nicht vor. Auch die Notwendigkeit einer Sonnenschutz-verglasung ist nicht gegeben.

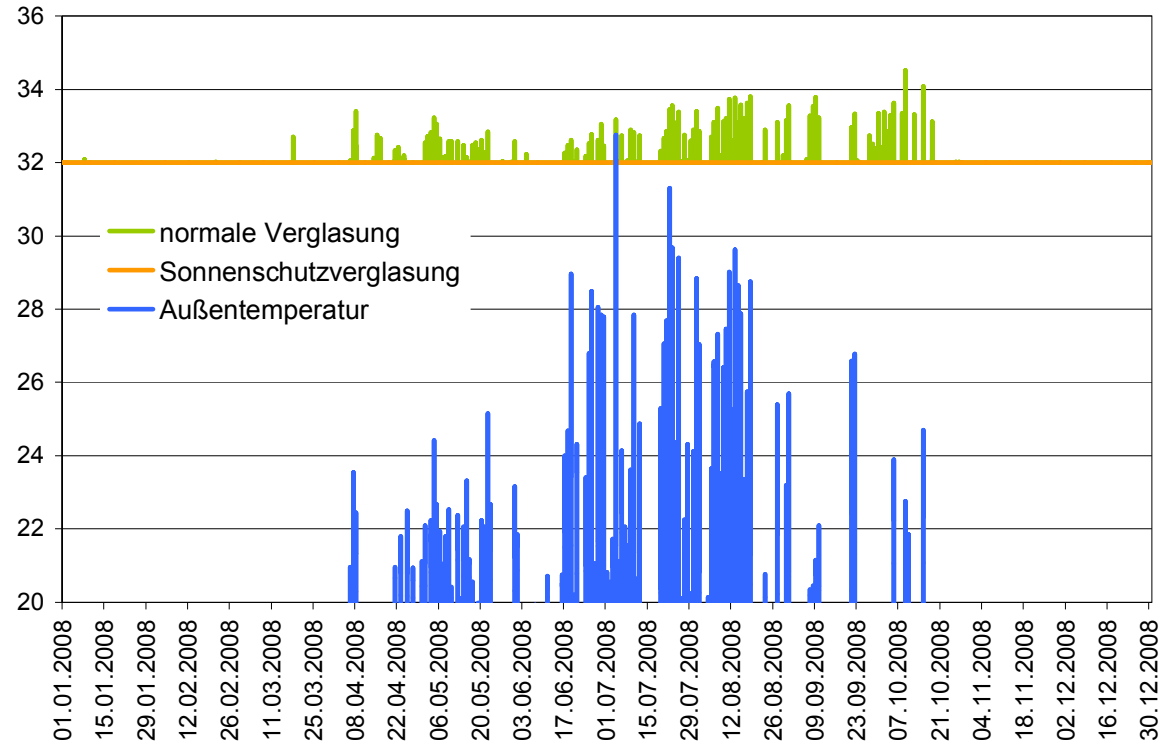


Abbildung 36: Operative Temperaturen der Halle bei großzügiger Verglasung für den Standort München

Neben der eigentlichen Schwimmhalle weist das Hallenbad weitere Temperaturzonen auf. Hierzu gehören z.B. Keller und Umkleidebereich die auf deutlich niedrigere Solltemperaturen beheizt werden. Durch Trennwände und Türen findet ein Querwärmestrom statt, der die Heizlast der Halle erhöht und die des Umkleidebereiches senkt. Dieser Querwärmestrom ist in zweifacher Hinsicht bedeutsam. Zum einen beeinflusst er direkt die Heizlast der Halle, was bei einer Beheizung allein über die Zuluft berücksichtigt werden muss, und zum anderen findet dieser Wärmestrom auch dann statt, wenn die Solltemperatur der Umkleide (24 °C) bereits erreicht ist. Während der Sommermonate kann dies zu Überhitzungen des Umkleidebereiches führen. Aufgrund der schlechteren Regelbarkeit der Zonentemperaturen steigt der Gesamtheizwärmebedarf des Hallenbades bei höheren Querwärmeströmen.

Abbildung 37 zeigt den Heizwärmebedarf und die operativen Temperaturen der Halle und der Umkleide. Der U-Wert der Trennwand ist mit 2,7 W/(m²K) angenommen. Durch den Wärmestrom der wärmeren Halle hin zum Umkleidebereich steigt der Wärmebedarf der Halle, während der des Umkleidebereiches sinkt. In den Sommermonaten wird die Solltemperatur der Umkleide ständig überschritten.

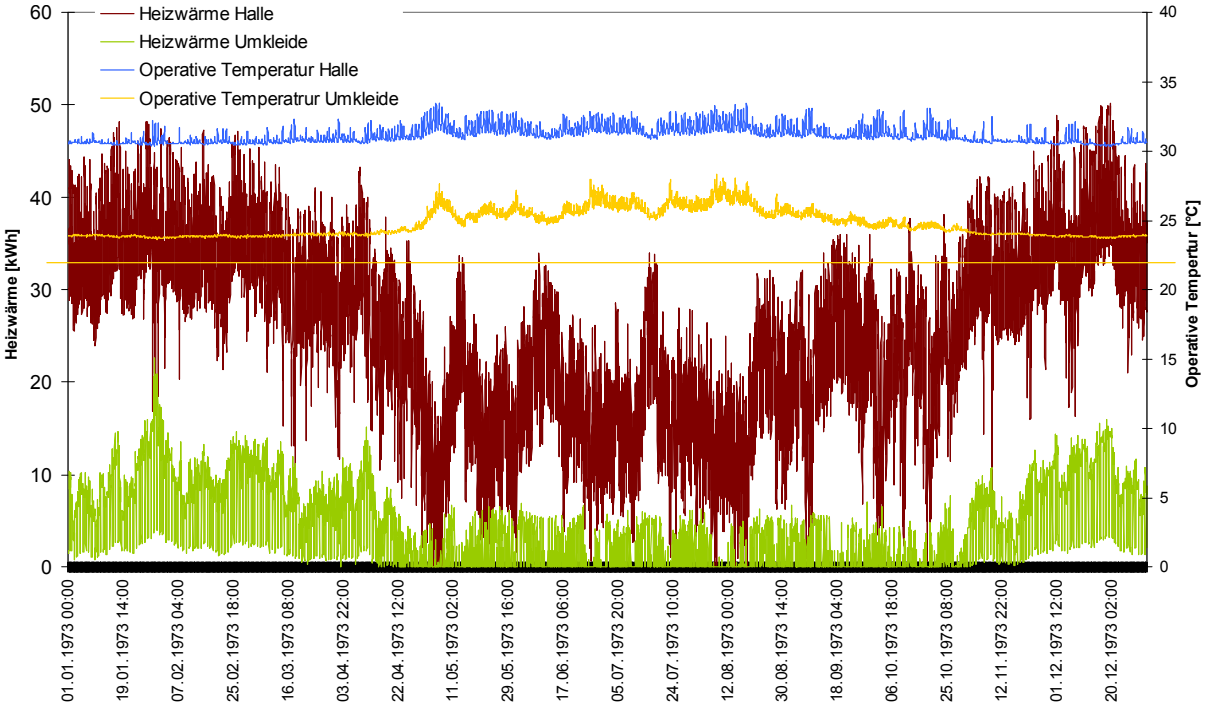


Abbildung 37: Heizwärmebedarf und operative Temperaturen Halle und Umkleide. Solltemperatur der Halle 32°C und der Umkleide 24°C. U-Wert der Trennwand 2,7 W/(m²K)

Wird der Umkleidebereich besser thermisch entkoppelt, so sinkt der Heizwärmebedarf der Halle während der der Umkleide steigt. Insgesamt kann aber eine Reduzierung festgestellt werden, da der Umkleidebereich nicht so stark überhitzt. Zu bedenken ist allerdings der zusätzliche Raumbedarf für die Dämmung

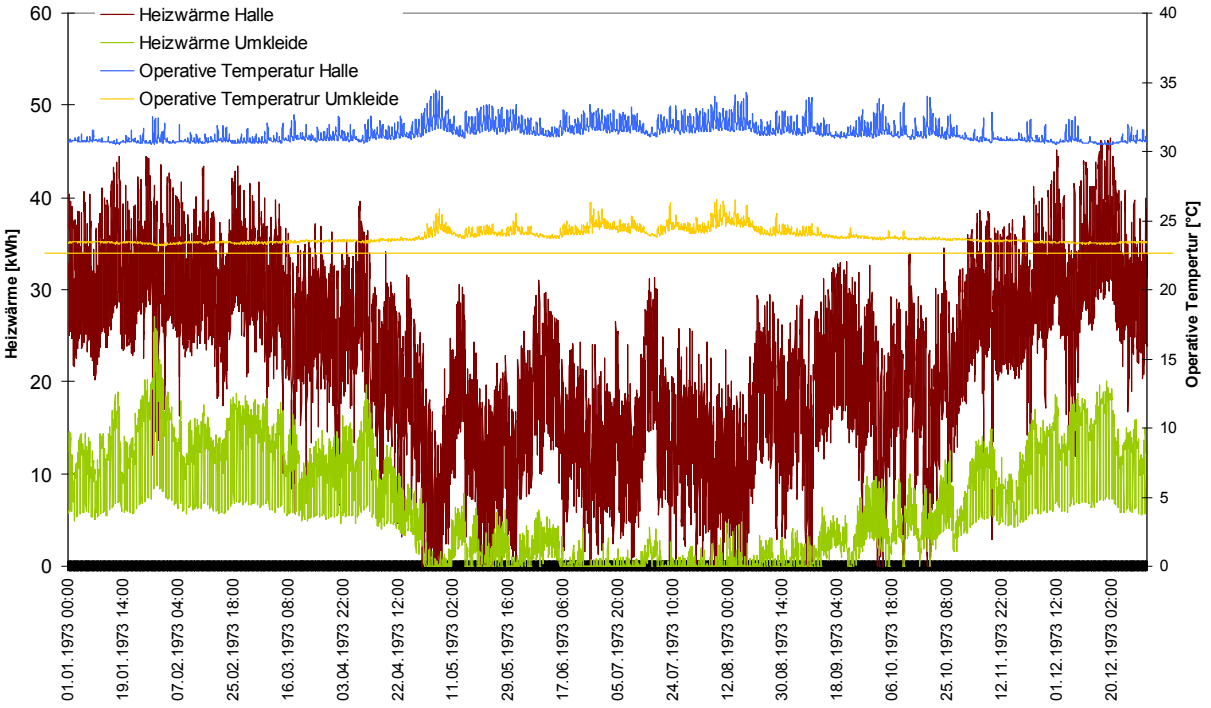


Abbildung 38: Heizwärmebedarf und operative Temperaturen Halle und Umkleide. Solltemperatur der Halle 32°C und der Umkleide 24°C. U-Wert der Trennwand 0,17 W/(m²K)

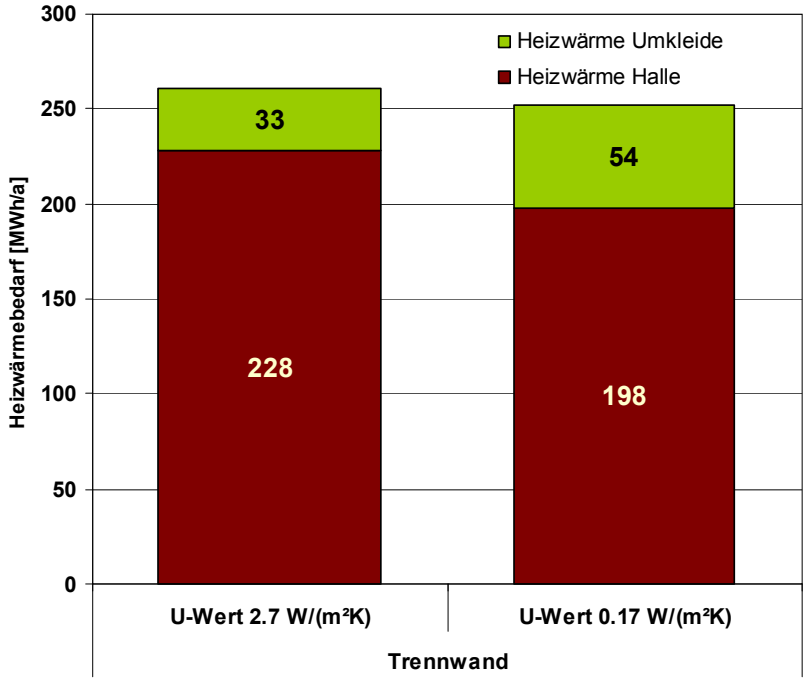


Abbildung 39: Heizwärmebedarf des Hallenbades für verschiedene U-Werte der Trennwand zwischen Halle und Umkleide

4.4. Tageslichtnutzung im Hallenbad

4.4.1. Einführung

In diesem Abschnitt wird die Tageslichtnutzung bei Schwimmbädern behandelt. Mit dem Gebäudeentwurf wird durch Größe, Anordnung und Gestaltung der verglasten Flächen die Nutzbarkeit des Tageslichtangebots wesentlich beeinflusst.
Höhere Fensteranteile verbessern die Tageslichtversorgung, wohingegen hinsichtlich der sommerlichen Behaglichkeit und des Heizwärmebedarfs eher moderate Fensterflächen anzustreben sind. Im Folgenden soll daher geklärt werden, wie mit eher moderaten Fensterflächenanteilen eine ausreichende und gleichmäßige Tageslichtversorgung erzielt werden kann. Anhand von Variantenstudien werden die wesentlichen Einflussfaktoren auf die natürliche Beleuchtung im Hallenbad dargestellt. Die Tageslichtplanung stellt weitere Anforderungen, wie die Vermeidung von kritischer Blendung und des Sichtkontakts nach außen, die zusätzlich beim Entwurf berücksichtigt werden müssen. Diese zusätzlichen tageslichttechnischen Anforderungen stehen nicht im Zentrum der Variantenuntersuchung, da die grundlegenden Einflussfaktoren bzgl. der Tageslichtnutzung gezeigt werden sollen. Diese gesonderten Anforderungen müssen noch ergänzend bei der konkreten Tageslichtplanung berücksichtigt werden.
Anhand von systematischen Tageslichtsimulationen auf Grundlage eines Radiosity-Verfahrens wurden die folgenden Ergebnisse ermittelt.

4.4.2. Aufgabenstellung

Für eine ausreichende natürliche Beleuchtung eines Hallenbades sind in [DIN 67526-3] Mindestanforderungen zusammengestellt. Demnach sollte der Tageslichtquotient (vgl. auch Abschnitt 4.4.4) auf waagerechter Nutzfläche (1 m über dem Fußboden) am ungünstigsten Punkt 2% nicht unterschreiten. In Hallen mit Oberlichtern sollte zusätzlich der mittlere Tageslichtquotient ≥ 4% sein.
Als zusätzliche Anforderung sollten die Fensterflächen derart gestaltet sein, dass ein Sichtkontakt nach außen (vgl. [DIN 67526-3]) möglich ist. Diese Anforderung kann als erfüllt gelten, wenn die Unterkante der verglasten Fläche nicht höher als 1.0m und die Oberkante nicht niedriger als 2,5 m sind. Die Gesamtfensterbreite sollte dabei nicht unter 2/3 der Fensterwandbreite betragen.
Weiterhin sollte gemäß [DIN 67526-3] eine direkte Besonnung der Wasserfläche vermieden werden, da dies zu kritischer Blendung des Aufsichtspersonals führen kann. Darüber hinaus kann die direkte Sonneneinstrahlung zu Algenbildung und zum vermehrten Entweichen von Wasseraufbereitungsmitteln führen.
In Hallenbädern für Freizeit- und Schulsport bzw. Training gelten hinsichtlich der künstlichen Beleuchtung die Anforderungen gemäß Klasse III (vgl. [DIN EN 12193]):

- mittlere horizontale Beleuchtungsstärke: Eav: 200 lx
- Gleichmäßigkeit: Emin/Eav >=0,5

(Zum Vergleich: in Büros wird eine Kunstlicht-Beleuchtungsstärke von 500 lx gefordert)

4.4.3. Hallenbad Modell

Die Hallenabmessungen bei einem Beckenumgang von jeweils 3 m Breite und die angesetzten Reflexionsgrade der inneren Hallenoberflächen sind in **Tabelle 4** und **Tabelle 5** zusammengefasst. **Abbildung 41** zeigt schematisch das untersuchte Hallenbad-Modell. Die Raumdimensionen orientieren sich dabei an den gebräuchlichen Abmessungen eines Bades mit einem Schwimmbecken (vgl. [KOK 2002]). **Abbildung 41** zeigt für die weitere Ergebnisdarstellung den Betrachtungsquerschnitt in der Halle.
Bzgl. der Hallenhöhe werden zwei Varianten gemäß den Empfehlungen von [KOK 2002] betrachtet: bei reinem Schwimmbetrieb wird eine Mindesthallenhöhe von 4 m und bei Wasserballnutzung eine Höhe von 6 m empfohlen. Die Modellannahmen orientieren sich dabei an den Mindesthöhen, da mit größeren Raumhöhen die natürliche Beleuchtung unkritischer wird.

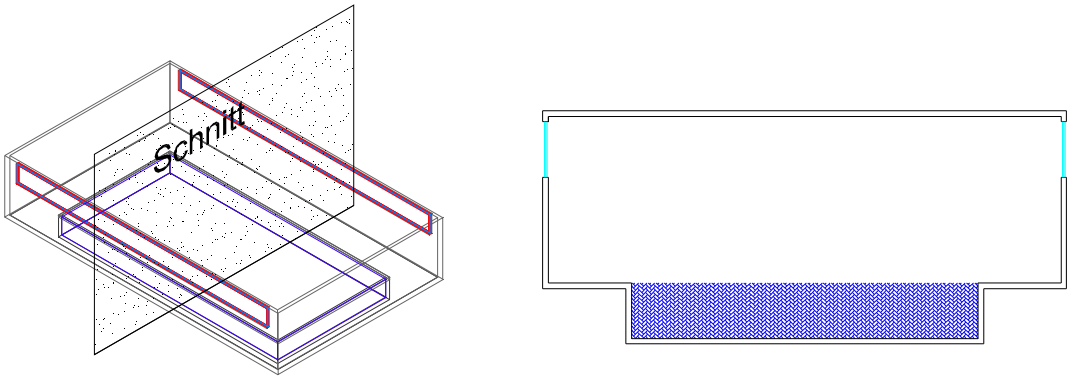


Abbildung 41: Schematisches Modell des Hallenbades / Querschnitt durch Halle

Tabelle 4: Geometrische Kenngrößen des Hallenbad-Modells

	Breite	Länge	Höhe
Halle (Innenabmessung)	**18,5 m**	**31,0 m**	**4 m bzw. 6 m**
Schwimmbecken	**12,5 m**	**25,0 m**	

Tabelle 5: Angesetzte Reflexionsgrade der Innenoberflächen

	Standard Annahme in Berechnung
Bodenfläche	**30%**
Wandfläche	**50%**
Deckenfläche	**70%**

4.4.4. Bewertung der Tageslichtsituation mit dem Tageslichtquotient

Die natürliche Beleuchtungsstärke im Raum verhält sich proportional zur Helligkeit im Freien. Zur Bewertung der Tageslichteigenschaften eines Raums hat es sich als praktisch herausgestellt, das Verhältnis von Außenbeleuchtungsstärke zur Intensität der Beleuchtung im Raum zu bestimmen. Dieses Verhältnis wird als Tageslicht-quotient bezeichnet:

Tageslichtquotient D: Verhältnis der tatsächlichen Beleuchtungsstärke (E_p) im Gebäude zur außerhalb des Gebäudes verfügbaren Beleuchtungsstärke (E_a) bei bedecktem Himmel (vgl. [DIN 5034-1]).

Bei einer typischen Beleuchtungsstärke am Tag bei bedecktem Himmel von 10.000 lx und einer resultierenden Beleuchtungsstärke von 300 lx im Raum beträgt der Tageslichtquotient 3%.
Im Folgenden wird die natürliche Beleuchtung des Hallenbad-Modells anhand des Tageslichtquotienten bewertet (die betrachtete Ebene liegt 1 m oberhalb des Bodens).

4.4.5. Einfluss der Fenster auf die Tageslichtnutzung

Die Ausführung der Verglasung beeinflusst die Tageslichtnutzung, da das Tageslicht an den Glasscheiben z.T. auch reflektiert bzw. absorbiert wird. Der Transmissionsgrad nimmt dabei mit der Anzahl der Scheiben und Beschichtungen ab und liegt bei 3-Scheiben Wärmeschutzglas etwa 10 % unter dem Transmissionsgrad eines konventionellen Zweischeiben-Wärmeschutzglases (vgl. **Tabelle 6**). Diese Reduktion kann aber durch entsprechend höhere Verglasungsanteile problemlos ausgeglichen werden. Bei Sonnenschutzverglasungen ist in der Regel neben dem Energiedurchlassgrad auch der Lichttransmissionsgrad deutlich verringert.
Weiterhin sind Fensterformate mit geringem Rahmenanteil zu bevorzugen. Im Schwimmbadbereich werden häufig Pfosten-Riegel-Fassaden eingesetzt. Der tatsächliche Einfluss der Profile auf die Durchlässigkeit ist durch den schrägen Einfall des Lichts auf die Fassade größer als in der Horizontalprojektion. Kleinformatige Elemente mit tiefen Profilen sollten daher vermieden werden.

Tabelle 6: Transmissionsgrad von ausgesuchten Verglasungen

	Trans missions- grad [%]
4 mm Floatglas	**0,92**
2-Scheiben Isolierglas	**0,82**
2-Scheiben Wärmeschutzglas	**0,78**
3-Scheiben Wärmeschutzglas	**0,69**
Sonnenschutzglas	**0,46**

4.4.6. Hallenbad mit 4 m Hallenhöhe

Mit einer zweiseitigen Befensterung an den Längsseiten kann noch eine genügende natürliche Beleuchtung erreicht werden. Zur Hallenmitte hin lässt jedoch die Tageslichtausleuchtung deutlich nach. Mit hoch angeordneten Fensterbändern wird ein Mindest-Tageslichtquotient von 2% (vgl. [DIN 67526-3]) auch im mittleren Hallenbereich eingehalten. Die Fensterbänder sollten bei dieser Anordnung bis an die Stirnseiten reichen, damit diese nicht zu dunkel erscheinen.

Zusätzliche Fensterbänder an den Stirnseiten haben nahezu keinen Einfluss auf den kritischen mittleren Hallenbereich, verbessern jedoch die natürliche Ausleuchtung der stirnseitigen Beckenumgänge.

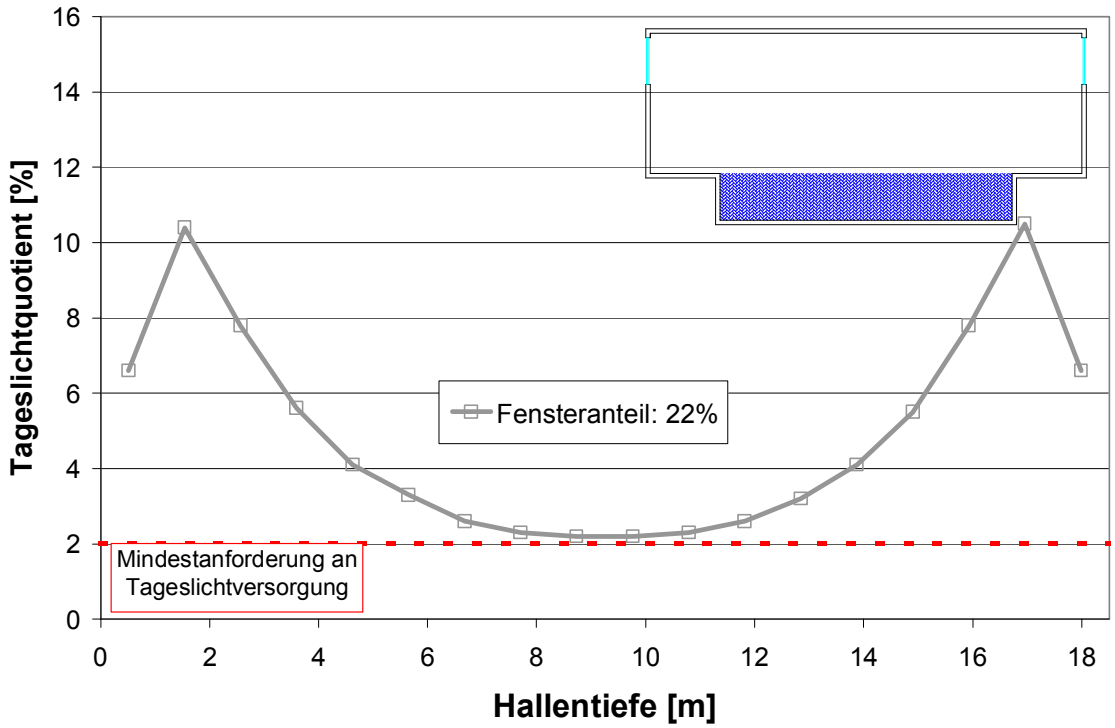


Abbildung 42: Verlauf des Tageslichtquotienten im Querschnitt der Halle bei hoch angeordneten Fensterbändern. Mit zumindest einer zweiseitigen Befensterung an den Längsseiten kann eine ausreichende natürliche Beleuchtung realisiert werden. Die Fensterbänder sind 2 m hoch. Damit liegt der Fensteranteil bezogen auf die Bodenfläche bei 22 %.

Einfluss der Fensterfläche

Eine Vergrößerung der Fenster durch zusätzliche transparente Flächen im unteren Fassadenbereich hat kaum Einfluss auf die Lichtintensität in der Raumtiefe (vgl. **Abbildung 43**). In der Raumtiefe wird die natürliche Beleuchtung durch den oberen Teil des Fensters bestimmt, entscheidend ist die Höhe der Fensteroberkante. Der untere Fensterbereich erhöht die Lichtintensität in Fensternähe.

Neben der ausreichenden natürlichen Beleuchtung sollten jedoch Fenster im Aufenthaltsbereich die Sicht nach außen ermöglichen.

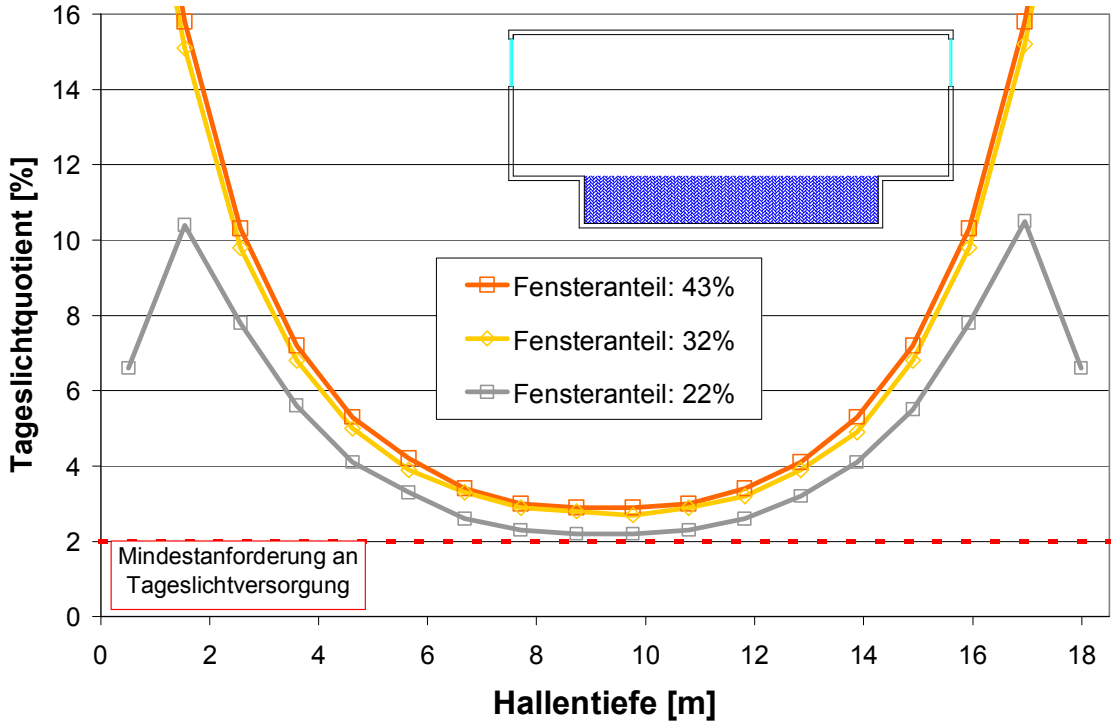


Abbildung 43 Verlauf des Tageslichtquotienten im Hallen-Querschnitt bei unterschiedlichen Fensteranteilen. Zusätzliche Fensterflächen im unteren Fassadenbereich verbessern die Tageslichtversorgung vor allem in Fensternähe. Der Tageslichtquotient in der Hallenmitte wird kaum beeinflusst. Höhe der untersuchten Fensterbänder 2 m (Fensteranteil bezogen auf Bodenfläche 22%), 3 m (Fensteranteil 32%), 4 m (Fensteranteil 43%, vollverglaste Längsseiten).

Einfluss der Helligkeit der Rauminnenflächen

Über Reflexionen an Innenoberflächen gelangt Tageslicht zusätzlich in den tieferen Raumbereich. Eine möglichst helle Gestaltung der Innenoberflächen verbessert daher die Tageslichtversorgung (vgl. **Abbildung 44**).

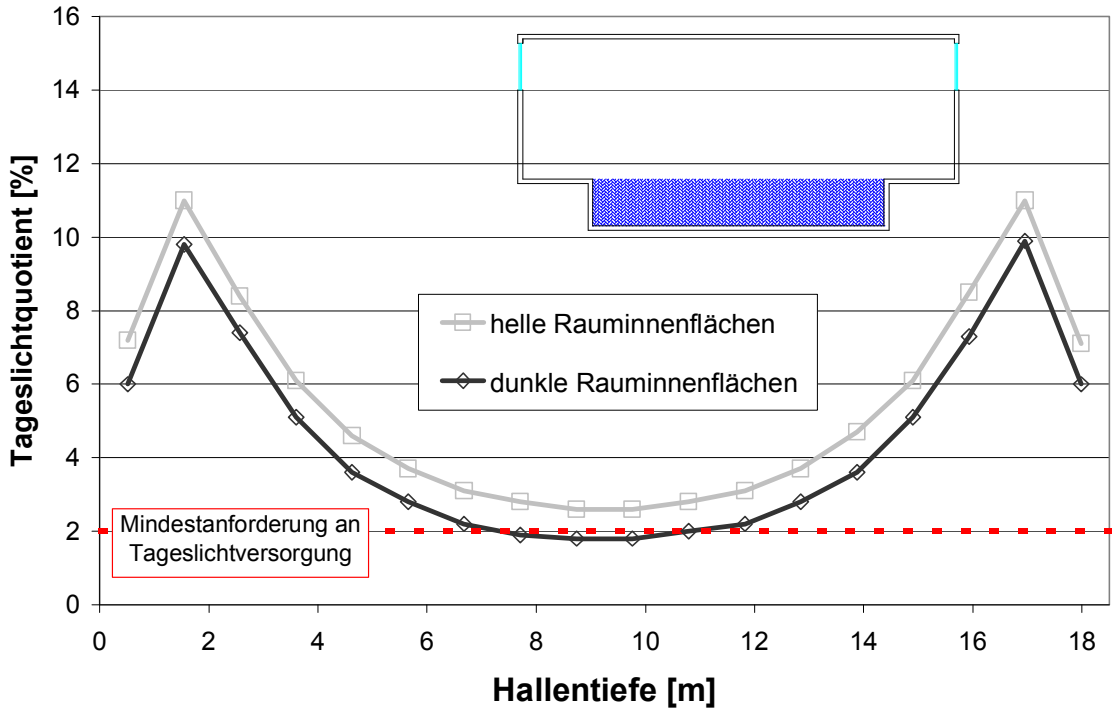


Abbildung 44: Einfluss der Reflexionsfaktoren der Rauminnenfläche auf die Tageslichtversorgung. Die hellere Raumgestaltung erhöht den Tageslichtquotienten.
hell: Wände ρ = 60%, Boden ρ = 40%, Decke ρ = 85%
dunkel: Wände ρ = 30%, Boden ρ = 20%, Decke ρ = 50%.

Tabelle 7: Reflexionsfaktoren von Baumaterialien und Farbanstrichen [SLG 1989]

Baumaterial	Reflexionsgrad	Farbanstrich	Reflexionsgrad
Ahorn, Birke	ca. 0,6	weiß	0,75 bis 0,85
Eiche, hell	0,25 bis 0,35	hellgrau	0,4 bis 0,6
Granit	0,20 bis 0,25	mittelgrau	0,25 bis 0,35
Kalkstein	0,35 bis 0,55	dunkelgrau	0,1 bis 0,15
Marmor, poliert	0,30 bis 0,70	hellblau	0,4 bis 0,5
Innenputz (Gips)	ca. 0,80	dunkelblau	0,15 bis 0,2
Sandstein	0,2 bis 0,4	hellgelb	0,6 bis 0,7
Zement, Beton roh	0,2 bis 0,3	rosa	0,45 bis 0,55
Ziegel, rot, neu	0,10 bis 0,15	dunkelrot	0,15 bis 0,2

Einfluss von Lichtlenkung über ein “Light Shelf“

Mit einem „Light Shelf“ kann Außenlicht zusätzlich in den Innenraum umgelenkt werden. Über Innenreflexionen gelangt das zusätzliche Außenlicht in die Raumtiefe. Möglichst hohe Reflexionsfaktoren des Light Shelf und der Decke sind hier erforderlich. **Abbildung 45** zeigt den Einfluss eines Light Shelfs unterhalb der Fensterbänder.

Bei raumhohen Fenstern verbessert ein Light Shelf hingegen die Gleichmäßigkeit der Tageslichtversorgung im Raum. Über die Fensterfläche oberhalb des Lichtschwerts wird zusätzlich Licht in den Raum gelenkt, während der untere Fensterteil verschattet wird. Bei Südausrichtung kann der Sonnenschutz durch das Light-Shelf gleich miterfüllt werden.
Vergleichbar dem Light Shelf lenken bei raumhohen Fenstern auch helle Außenbodenflächen zusätzliches Licht in den Raum.

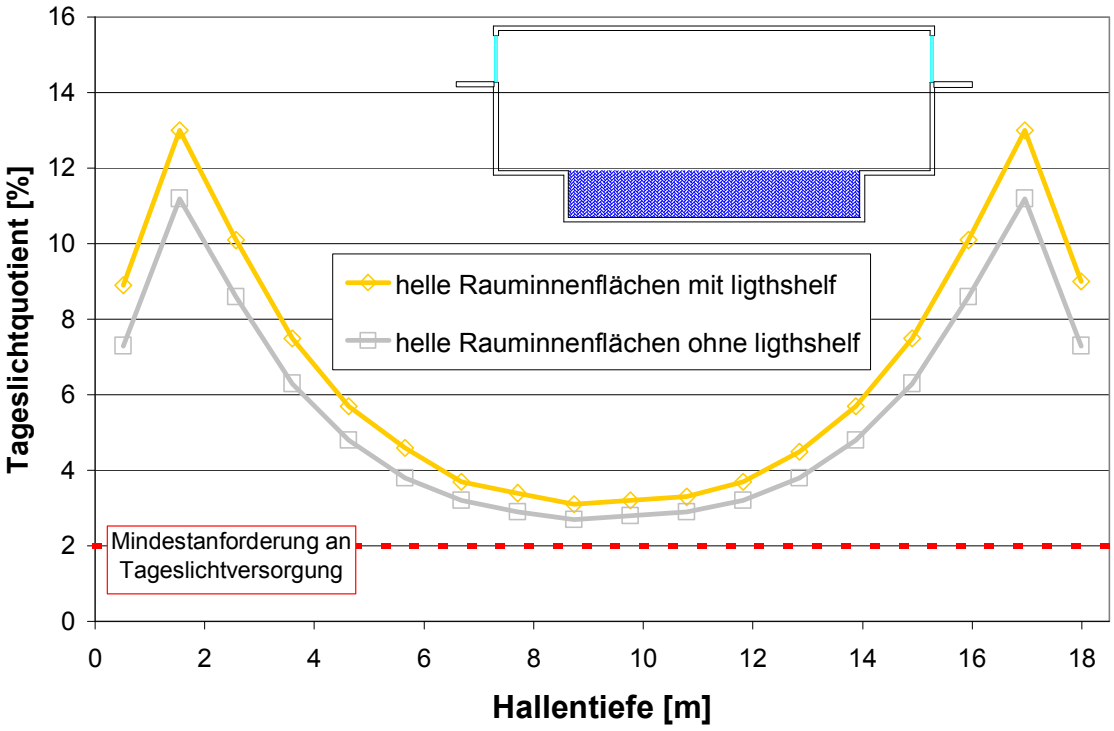


Abbildung 45 Einfluss eines „Light Shelfs“ unterhalb der hochangeordneten Fensterbänder. Zusätzliches Außenlicht gelangt über das „Light Shelf“ und Deckenreflexionen in den Aufenthaltsbereich. Höhe der untersuchten Fensterbänder 2 m (Fensteranteil bezogen auf Bodenfläche 22%).

4 m-Halle mit Oberlichtern

Mit Oberlichter kann ein gutes, gleichmäßiges Tageslicht in Hallen erzielt werden. 12 bis 15% Oberlichtfläche bezogen auf die Bodenfläche sind hierfür ausreichend (gemäß [DIN 67526-3] sollte dabei ein mittlerer Tageslichtquotient von 4% nicht unterschritten werden). Für eine gute Beleuchtung über Oberlichter im Dach ist eine geringere Fensterfläche erforderlich als bei senkrechten Fenstern in der Fassade, jedoch ist die Ausführung der Dachfenster und der Fensteranschlüsse im Dach in der Regel aufwendiger. Für eine genügende Gleichmäßigkeit der natürlichen Ausleuchtung sind allerdings zahlreiche Einzelfenster erforderlich. Gemäß [FVLR] sollte der Mittenabstand der Oberlichter untereinander höchstens so groß sein wie die Höhe von deren Unterkante über dem Boden. Damit ergibt sich eine Anzahl von

40 erforderlichen Einzelfenstern bei der betrachteten Hallengröße, welche jeweils auch angeschlossen werden müssen (wasserdicht, wärmebrückenarm).
Bei geringen Raumhöhen sollten daher Dachoberlichter in Kombination mit Fensterbändern in der Fassade zur Verbesserung der natürlichen Beleuchtung in der Hallenmitte verwendet werden. Auch für Dachoberlichter gilt, dass eine direkte Sonnenbestrahlung der Wasserfläche vermieden werden sollte (vgl. [DIN 67526-3]).
Neben den positiven Tageslichteigenschaften sind Dachoberlichter und Lösungen mit Sheds jedoch aufgrund der wärmebrückenbehafteten Anschlüsse energetisch eher ungünstig. Der Gesamtwärmedurchgangskoeffizient eines eingebauten energieeffizienten Dachoberlichts liegt typischerweise um 0,2 W/(m²K) höher als bei einem Fassadenfenster gleicher Größe.

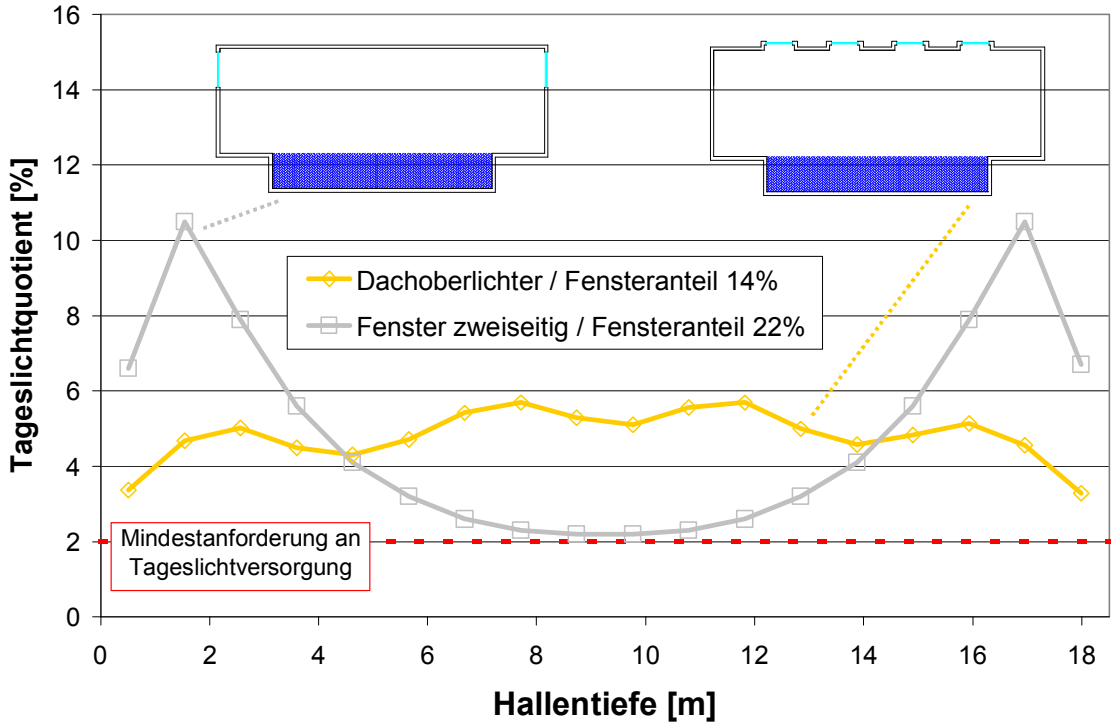


Abbildung 46: Einfluss von Dachoberlichtern im Vergleich zu Fensterbändern in der Fassaden auf die Tageslichtversorgung. Mit Dachoberlichtern kann mit geringen Fensterflächen eine gute natürliche Beleuchtung der Halle erzielt werden. Bei einer Raumhöhe von nur 4 m sind jedoch zahlreiche Einzelfenster für eine gleichmäßige Beleuchtung erforderlich. Vorteilhafter bei geringen Raumhöhen ist daher eine Kombination von Fassaden- und Dachflächenfenstern.

4.4.7. Hallenbad mit 6 m Hallenhöhe

Bei 6 m Hallenhöhe, kann mit einer zweiseitigen Befensterung eine genügende und gleichmäßige Tageslichtausleuchtung erzielt werden. Die größere Hallenhöhe führt bei gleicher Fensterfläche und Anordnung des Fensterbands jeweils unter der Decke zu einer deutlich besseren Tageslichtversorgung im mittleren Hallenbereich.

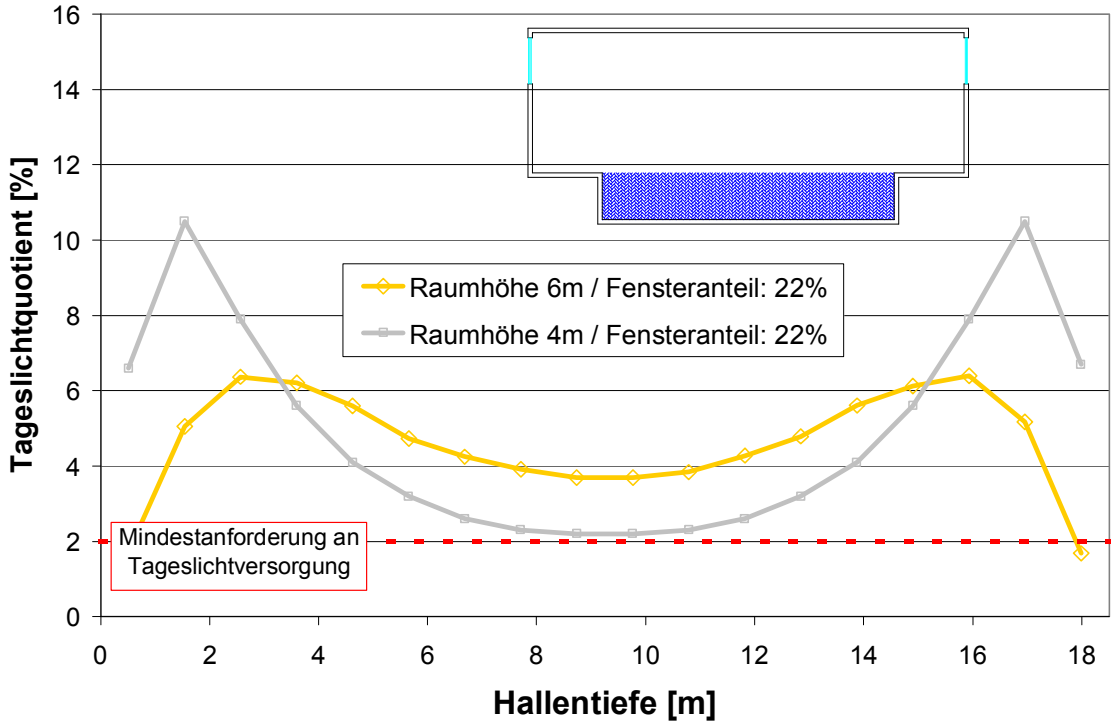


Abbildung 47: Einfluss der Raumhöhe bzw. der Fensteroberkante auf die Tageslichtversorgung. Die größere Hallenhöhe mit den höher angeordneten Fensterbändern führt auf eine gleichmäßigere Beleuchtung über die Raumtiefe.

Einseitige Befensterung

Bei einseitiger Befensterung wird die Mindestanforderung an die Tageslichtversorgung noch erfüllt. Im Vergleich zur Anordnung der Fensterbänder an beiden Längsseiten sind insgesamt größere Fensterflächen erforderlich. Die Rauminnenflächen sollten möglichst hell gewählt werden.

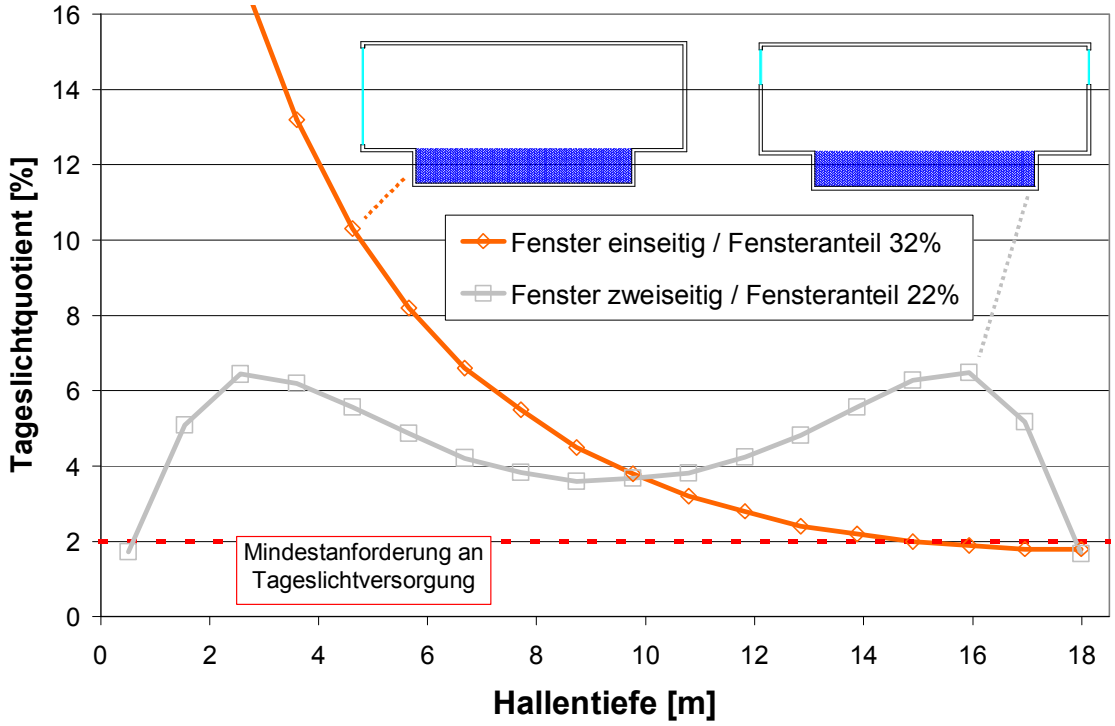


Abbildung 48: Tageslichtversorgung bei einseitiger im Vergleich zur zweiseitigen Befensterung.

Verringerung der direkten Bestrahlung der Wasserfläche

Gemäß [DIN 67526-3] kann eine Besonnung der Wasserfläche zu Algenbildung und Entweichen der Aufbereitungsmittel aus dem Wasser führen. Weiterhin können Lichtreflexe das Aufsichtspersonal stören, so dass kritische Situationen ggf. erst spät erkannt werden. Eine direkte Bestrahlung der Wasserfläche sollte daher vermieden werden.

Die Problematik der direkten Besonnung kann z.B. durch einen Blendschutz verringert werden. Bei einer Südausrichtung der Hauptfassade kann durch geeignet angeordnete feststehende Lamellen die Direktstrahlung zwischen Übergangszeit und Sommer ausgeblendet werden. Abgesehen von der Reinigung ist bei feststehenden Lamellen der Wartungsaufwand gering. Jedoch vermindert dieser feststehende Blendschutz auch die Tageslichtversorgung des Innenraums, da das Tageslicht ausschließlich über Mehrfachreflexionen in den Aufenthaltsbereich der Badegäste gelangt und jede zusätzliche Reflexion den Lichtstrom vermindert (vgl. **Abbildung 49**).

Aufgrund der Minderung der Tageslichtversorgung sollte eine Lösung mit feststehenden Lamellen vor allem bei ohnehin guter Tageslichtsituation eingesetzt werden.

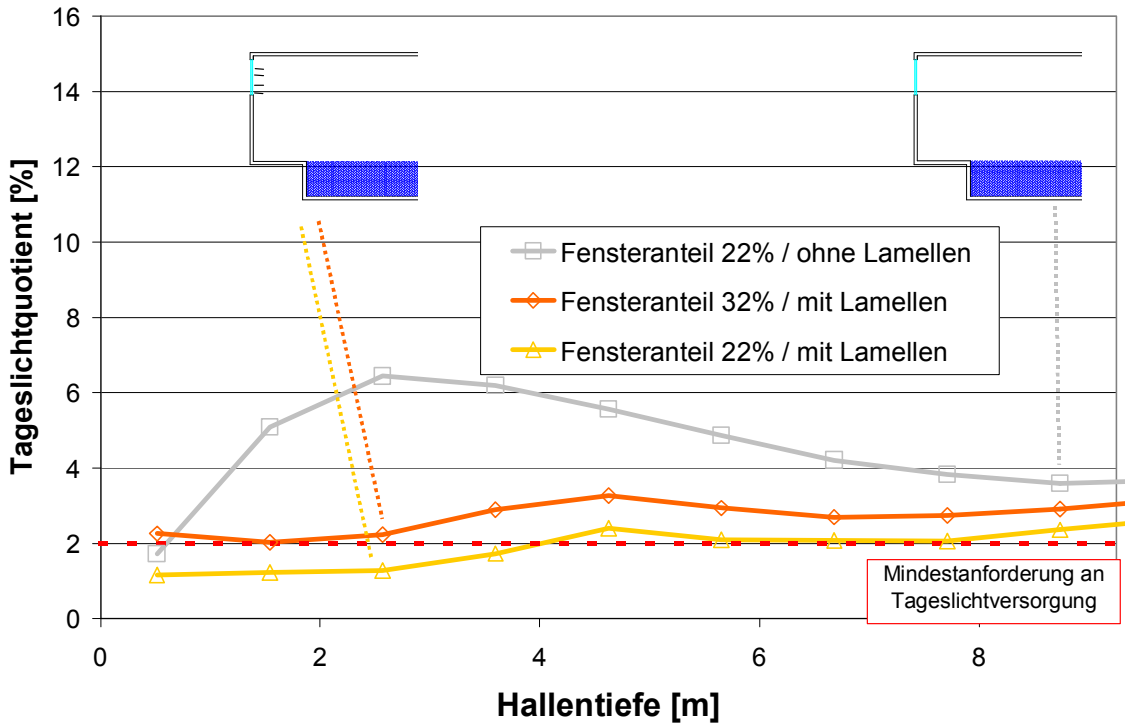


Abbildung 49: Einfluss von feststehenden innenliegenden Lamellen zur Vermeidung der direkten Besonnung des Beckenwassers. Die feststehenden Lamellen verringern die Tageslichtnutzung, da das Tageslicht nur über Mehrfachreflexionen in den Aufenthaltsbereich gelangt (Annahme bzgl. der Lamellen: Ab einer Sonnenhöhe über dem Horizont von 30° wird die Direktstrahlung ausgeblendet).

4.4.8. Künstliche Beleuchtung - Energiebedarf

In Freizeitbädern sind die Anforderungen an die Beleuchtungsstärke mit 200 lx eher gering (vgl. [DIN EN 12193]). Tagsüber kann über Tageslicht regelmäßig eine angemessene Beleuchtung erzielt werden. In Abhängigkeit von der Tageslicht-versorgung ist während 50 bis 70% der Nutzungszeit das Tageslicht ausreichend (Tageslichtautonomie); Annahme einer typischen Nutzungszeit von 8:00 bis 22:00. Im Vergleich zu Büronutzungen ist aufgrund der Abendnutzung häufigeres Einschalten des Kunstlichts erforderlich.

Dabei spart eine weitere Verbesserung der Tageslichtsituation über Tageslicht-quotienten oberhalb von 3% hinaus nur noch wenig Energie (vgl. **Abbildung 50**). Ein deutliches Einspar-Potential birgt hier noch die Kunstlichtplanung. Durch Optimierung der Leuchtenanordnung und -auswahl kann die installierte Leistung für Kunstlicht und damit auch der Strombedarf regelmäßig um nochmals 25% gesenkt werden (vgl. [SIA 380/4], [LEE]). Die installierte Leistung für Kunstlicht wurde dabei gemäß den Mindestwerten (mäßig effizient) und Zielwerten (effizient) des [LEE] angesetzt. Für die künstliche Beleuchtung wird empfohlen, frühzeitig Ziel- und Grenzwerte mit dem Lichtplaner zu vereinbaren (vgl. **Tabelle 8**).

Tabelle 8: Planungsempfehlungen für die spezifische installierte Leistung der Beleuchtung

	Empfehlung für Grenzwert bei 200lx	Empfehlung für Zielwert bei 200lx
SIA 380/4, Elektrische Energie im Hochbau [SIA 380/4]	**6,5 W/m²**	**5,0 W/m²**
Leitfaden Elektrische Energie im Hochbau [LEE]	**7,1 W/m²**	**5,3 W/m²**

Das Kunstlicht sollte in Leuchtengruppen schaltbar sein. Darüber hinaus sollte das Kunstlichtsystem zumindest tageslichtabhängig abgeschaltet werden. Der Zusatzaufwand ist hierfür gering, da im Hallenbereich über ein Steuergerät gleich mehrere Leuchten versorgt werden können.

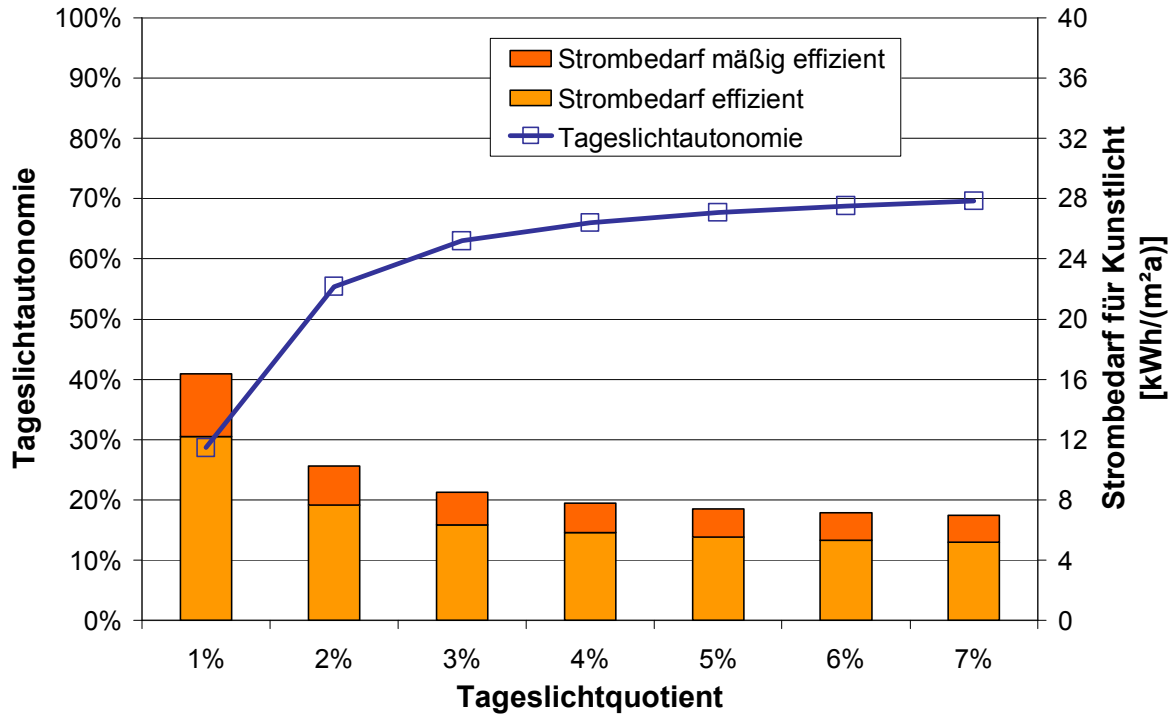


Abbildung 50: Strombedarf für Beleuchtung bei Hallenbadnutzungszeiten in Abhängigkeit von der Tageslichtnutzung (Annahme: Nutzungszeit von 8:00 bis 22:00, Tageslichtsteuerung ein/aus, erforderliche Beleuchtungsstärke 200lx). Bis zu einem Tageslichtquotienten von 3 bis 4% verbessert sich die Tageslichtautonomie noch merklich. Ab einem Tageslichtquotienten von etwa 2% führt die Optimierung der künstlichen Beleuchtung auf eine höhere zusätzliche Stromeinsparung als eine weitere Verbesserung der Tageslichtnutzung. Die Tageslichtautonomie ist der Anteil an der Nutzungszeit, in der kein Kunstlicht für die Raumbeleuchtung benötigt wird.

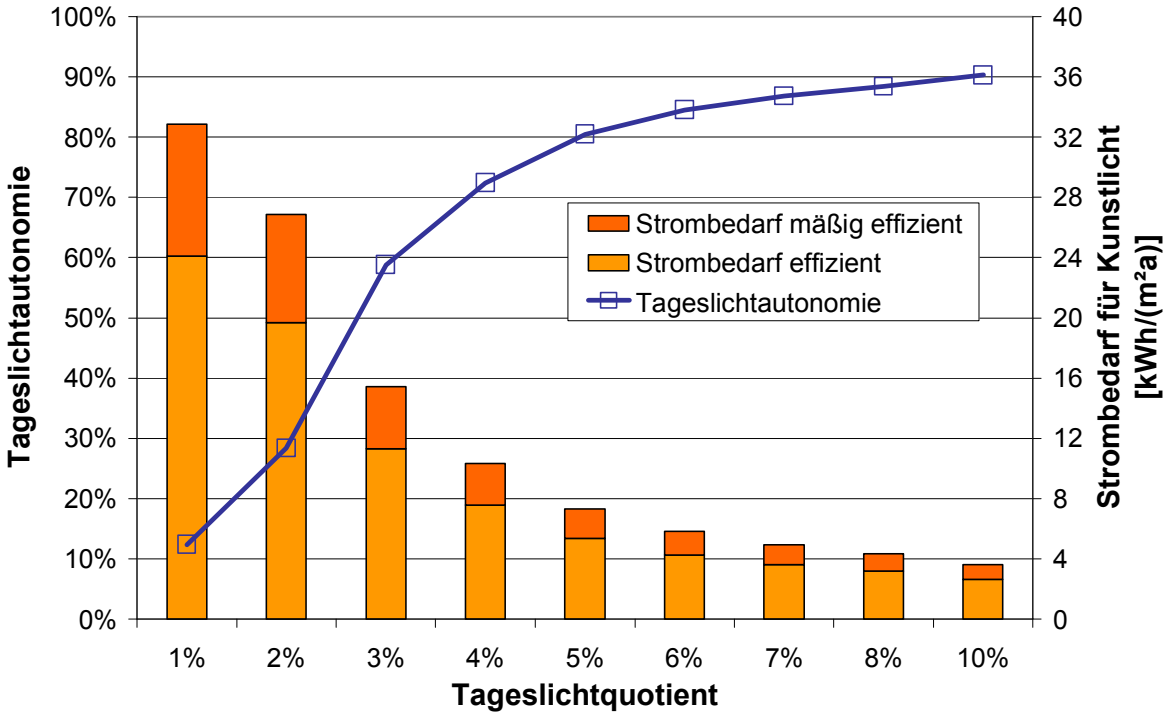


Abbildung 51: Zum Vergleich ist hier der Strombedarf für Beleuchtung bei Büronutzung dargestellt. Aufgrund der überwiegenden Nutzung zu Tagstunden kann mit verbesserter Tageslichtnutzung die Tageslichtautonomie auf bis zu 90% erhöht werden.

5. Gebäudetechnik

5.1. Anteile an der Energiebilanz / Potentiale

Durch den Einsatz hocheffizienter Gebäudetechnik wie beispielsweise Wärmeübertrager mit effektiven Wärmebereitstellungsgraden von 80 bis 85 % kann der Lüftungswärmeverlust auf fast die Hälfte reduziert werden. Dabei wird zunächst vorausgesetzt, dass die Lüftungsanlage im Hallenbad der Passivhausvariante entsprechend der [VDI 2089] eine Luftfeuchte von 14,3 g/kg durch Anpassung des Außenluftwechsels einregelt. Aufgrund der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln wird davon ausgegangen, dass die Hallenluftfeuchte auf 19,3 g/kg angehoben werden kann (entspricht 64% rel.H bei 32 °C Hallentemperatur). Dies bewirkt eine Reduzierung des Heizwärmebedarfs für Halle und Warmwasser um weitere 20 %. Insgesamt weist diese Variante eine Endenergieeinsparung von 50 % gegenüber der EnEV Variante auf. Selbst hier muss ein bedeutender Anteil der Heizwärme zur Deckung der Verdunstungsenthalpieverluste bereitgestellt werden (426 MWh/a). In den folgenden Kapiteln werden mehrere Lösungen untersucht, die eine Reduzierung dieser Verluste ermöglichen.

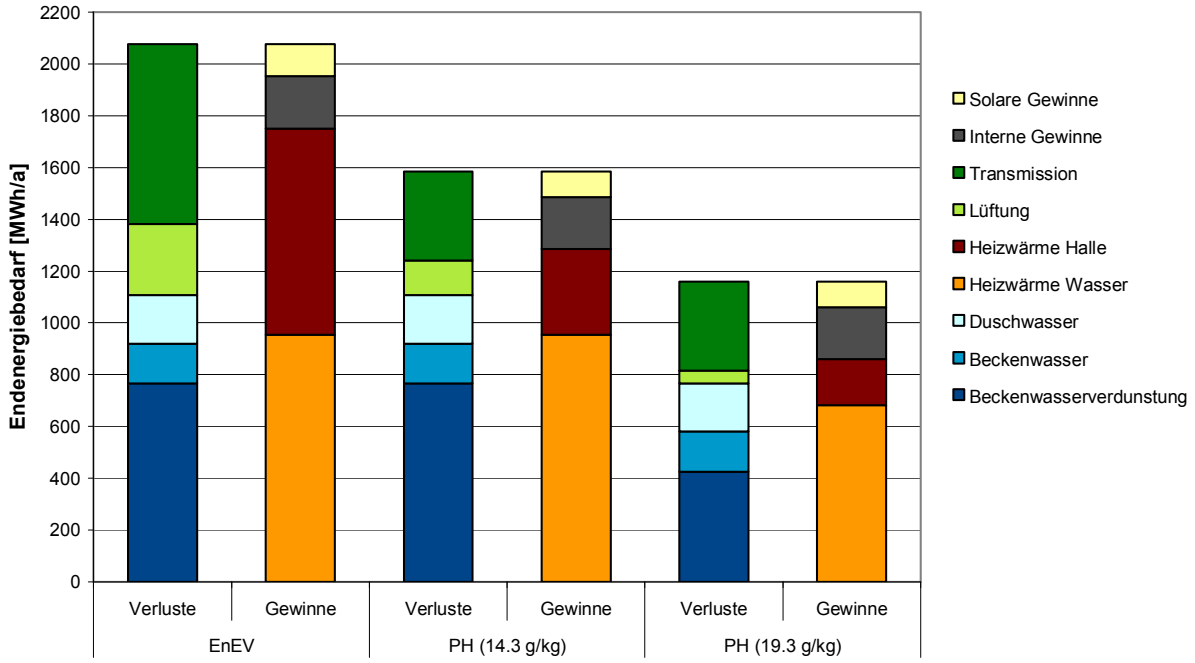


Abbildung 52: Vergleich der Energiebilanzen EnEV- und PH-Standard. Durch die Verbesserung der Gebäudehülle und der Haustechnik wird eine Reduzierung der Heizwärme um 50 % erreicht (Heizwärme umfasst hier die Beheizung der Halle und des Wasserkreislaufs inkl. Verdunstung – Bezogen nur auf die Hallenbeheizung führt die Verwendung von Passivhauskomponenten inkl. Anhebung der Feuchte zu einer Endenergieeinsparung von 78%).

5.1.1. Stromeffizienz Ventilatoren

Für den Referenzfall (EnEV-Standard) wird eine Stromeffizienz der Ventilatoren von 0,9 Wh/m³ angenommen. Da die Hallenfeuchte bei 14,3 g/kg liegen sollte, sind für Hallen im EnEV-Standard höhere Luftwechsel erforderlich, die sich auch im Ventilatorenstromverbrauch ausdrücken (178 MWh/a) **(Abbildung 53)**. Wird eine Gebäudehülle nach Passivhausanforderungen realisiert, die Hallenfeuchte aber nicht angehoben, so steigt die erforderliche Außenluftmenge leicht an. Grund hierfür ist die höhere Luftdichtheit der Gebäudehülle und die damit verbundene Reduzierung der Entfeuchtung über den Leckageluftwechsel.
Durch den Einsatz effizienter Ventilatoren mit einer Stromaufnahme von max. 0,45 Wh/m³ sinkt der Ventilatorstrombedarf insgesamt um 46 % auf 96 MWh/a. Durch Anheben der zulässigen Hallenfeuchte sinkt der notwendige Außenluftwechsel und damit die Ventilatorenarbeit nochmals und liegt dann im Vergleich zur EnEV-Variante bei 17 % (30 MWh/a).

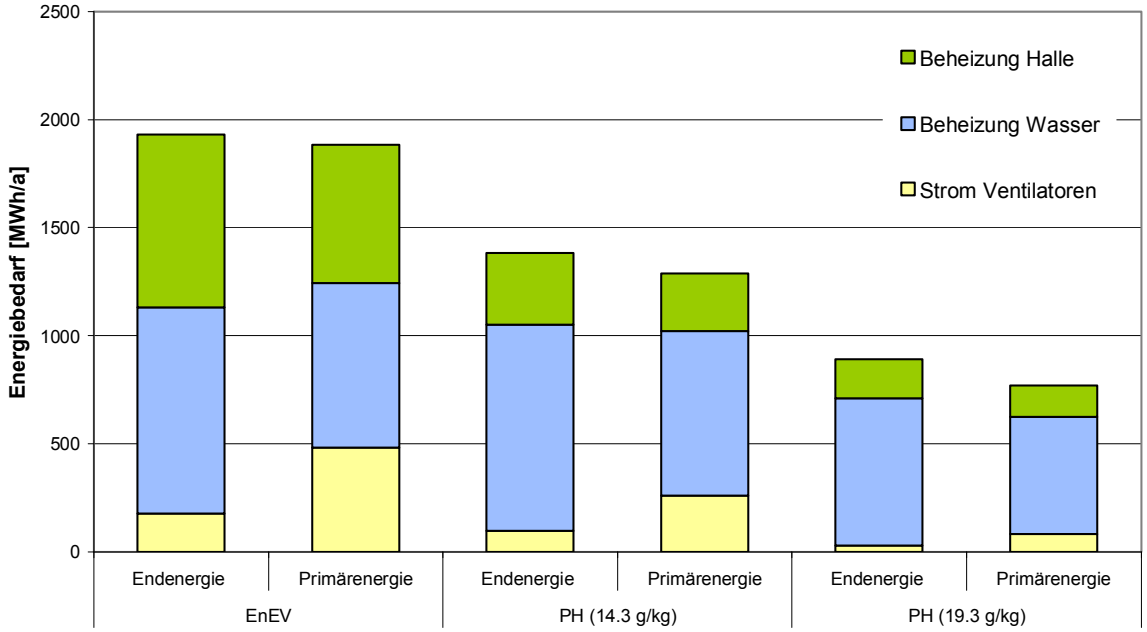


Abbildung 53: Primär- und Endenergiebedarf für Ventilatorenstrom für Hallenbäder im EnEV- und Passivhausstandard (Primärenergiefaktoren für Heizung 0,8 (Nahwärme) und 2,7 für Strom)

Weitere technische Entwicklungen lassen zukünftig noch geringere Ventilatorenstromaufnahmen von bis zu 0,40 Wh/m³ erwarten. Für das hier vorgestellte Beispiel bedeutet dies einen Strombedarf von nur noch 27 MWh/a. Bedeutsam ist hier auch der Primärenergiebedarf für Ventilatorenstrom im Verhältnis zur Heizung (Warmwasser und Halle). Bei der EnEV-Variante beträgt der Stromanteil mit 482 MWh/a ein Viertel. Bei der Passivhaushalle mit höherer Luftfeuchte sinkt dieser Anteil für Ventilatorstrom auf 11 % bzw. auf 81 MWh/a. Sowohl die hohe Effizienz der Ventilatoren als auch die Möglichkeit der Reduzierung des zu fördernden Luftvolumenstromes bewirken eine Primärenergieeinsparung um 85 % im Vergleich

zur EnEV-Variante und stellt damit neben der tageslichtoptimierten Planung den zweiten wichtigen Bestandteil des Stromeinsparpotentials dar.
Der durch die Halle strömende Gesamtvolumenstrom liegt in den heutigen Hallenbädern normalerweise über dem Außenluftvolumenstrom. Dazu wird ein Teil der Hallenluft im Umluftbetrieb gefördert. Dies soll vor allem die Gefahr von „Feuchtenestern“ an der Außenhülle unterbinden, indem die Fassade direkt angeblasen wird. Wird dieser Umluftvolumenstrom über die Lüftungsanlage gefahren, erzwingt er einen zusätzlichen Stromverbrauch. Selbst bei effizienten Ventilatoren mit einer Stromaufnahme von 0,45 Wh/m³ ergibt sich bei der hier betrachteten Halle ein Mehrverbrauch von 4,3 MWh/a. Primärenergetisch bedeutet dies einen zusätzlichen Energieeinsatz von 11,7 MWh/a. Aufgrund der sehr gut wärmegedämmten Außenhülle im Passivhaushallenbad wird nun davon ausgegangen, dass auf diesen zusätzlichen Volumenstrom verzichtet werden kann. Im Rahmen des begleitenden Messprojekts soll die Tauwassergefahr an einzelnen kritischen Punkten mit Hilfe von Oberflächensensoren überprüft werden. Die folgende energetische Bilanzierung geht davon aus, dass der Gesamtvolumenstrom dem Außenluftvolumenstrom entspricht.

5.1.2. Einfluss der Verdunstung

Die treibenden Kräfte für die hohe Wasserverdunstung sind das Dampfdruckgefälle zwischen dem Beckenwasser und der Hallenluft sowie die Wasserbewegung durch die Schwimmer. Während letzteres naturgemäß unvermeidlich ist, kann durch die Senkung des Dampfdruckgefälles eine Reduzierung der Verdunstung und der damit verbundenen Heizenergie zur Kompensation der Verdunstungskälte erzielt werden. Darüber hinaus führt die geringere Verdunstung zugleich zu geringeren erforderlichen Außenluftwechseln, die sich wiederum positiv auf die Lüftungswärmeverluste auswirken. In **Abbildung 54** ist die Reduzierung des Heizwärmebedarfes in Abhängigkeit der Hallenfeuchte dargestellt. Je Prozentpunkt zusätzlicher Hallenfeuchte sinkt der Heizwärmebedarf für Halle und Wasser um 2,5 %. Die nach [VDI 2089] zulässige Hallenfeuchte von 14,3 g/kg entspricht bei einer Hallentemperatur von 32 °C einer relativen Luftfeuchte von 48 %. Ein Anheben der relativen Feuchte auf 64 % führt danach zu einer Reduktion um 39 %. Um dieses Energieeinsparpotential ausschöpfen zu können, ist die genaue Kenntnis der zulässigen Hallenluftfeuchte erforderlich. Als begrenzende Faktoren gelten die Bauschadensfreiheit der Bauteile sowie das Behaglichkeitsempfinden der Besucher. Eine genaue Betrachtung der zulässigen Hallenluftfeuchte wurde in Kapitel 2.3 durchgeführt.

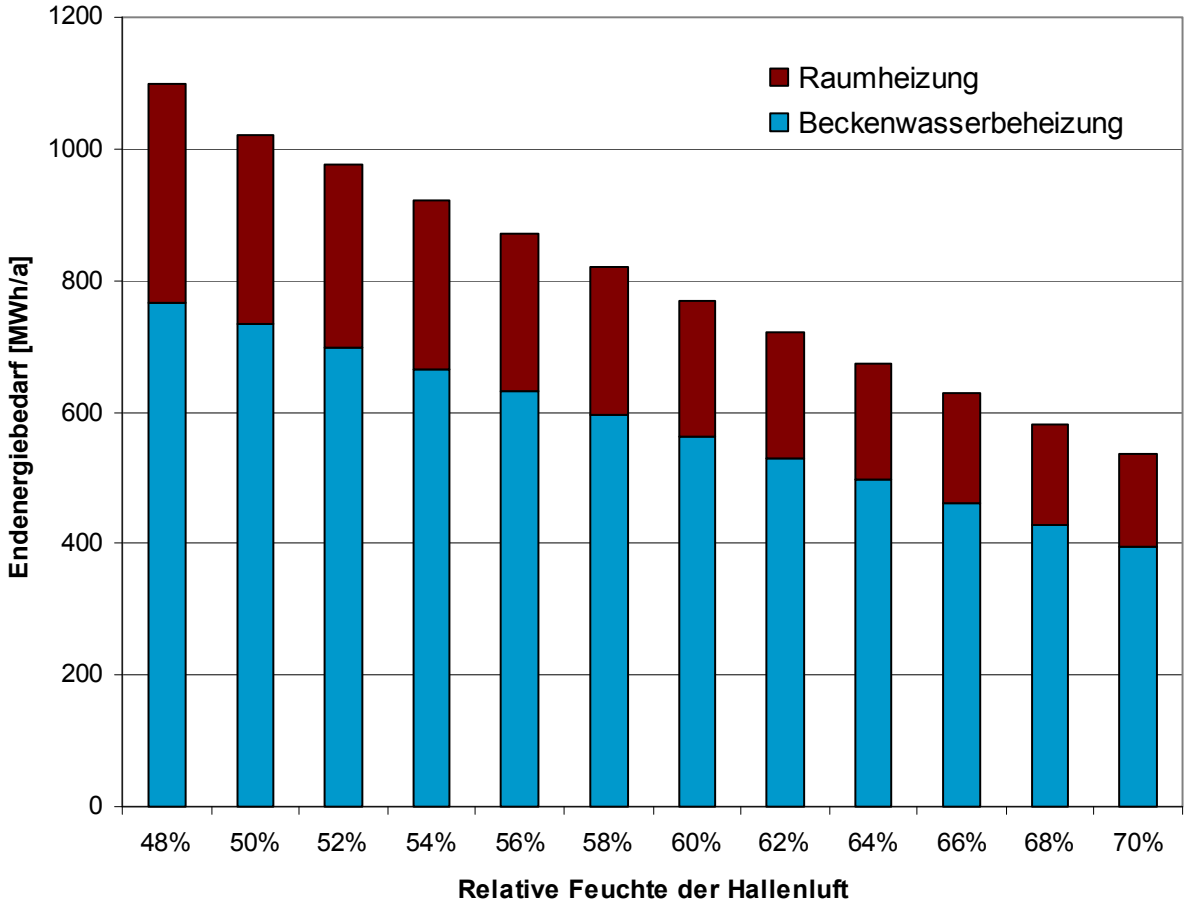


Abbildung 54: Reduzierung der Heizwärme für Halle und Beckenwasser in Abhängigkeit der Raumluftfeuchte (Hallentemperatur 32°C, Wassertemperatur 29°C). Eine Hallenfeuchte von 48 % entspricht hier dem Normwert von 14,3 g/kg.

Auch bei hohen Hallenluftfeuchten ist der Anteil der Heizenergie, die zur Deckung des Kühleffekts der Verdunstung aufgebracht werden muss, sehr hoch **(Abbildung 54)**. Kann die Verdunstung nicht weiter vermindert werden, so stellt die Rückgewinnung der in der Abluft vorhandenen Enthalpie (insbesondere Latentwärme) eine weitere Möglichkeit dar, die Effizienz von Hallenbädern zu verbessern. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden drei Varianten betrachtet, die eine Reduzierung der Enthalpieverluste ermöglichen (Kapitel 5.3).

In Kapitel 3 wird erläutert, dass zur realistischen Abbildung des Verdunstungsereignisses ein Wasserübergangskoeffizient von 14 m/h statt 28 m/h (nach [VDI 2089]) angenommen wird. In den meisten Hallenbädern werden neben den reinen Schwimmbecken auch Freizeitbecken mit verschiedenen Wasserattraktionen angeboten. Diese führen zu höheren Verdunstungen und damit zu höheren erforderlichen Luftwechseln. Um den Einfluss einer höheren Verdunstung abschätzen zu können, wurde die Energiebilanz der Halle sowohl mit einem Übergangskoeffizienten von 14 m/h als auch mit einem von 28 m/h berechnet: Mit der Verdopplung der Verdunstung steigt der Gesamtenergiebedarf für die Beheizung der Halle und des Beckenwassers um 63 %.

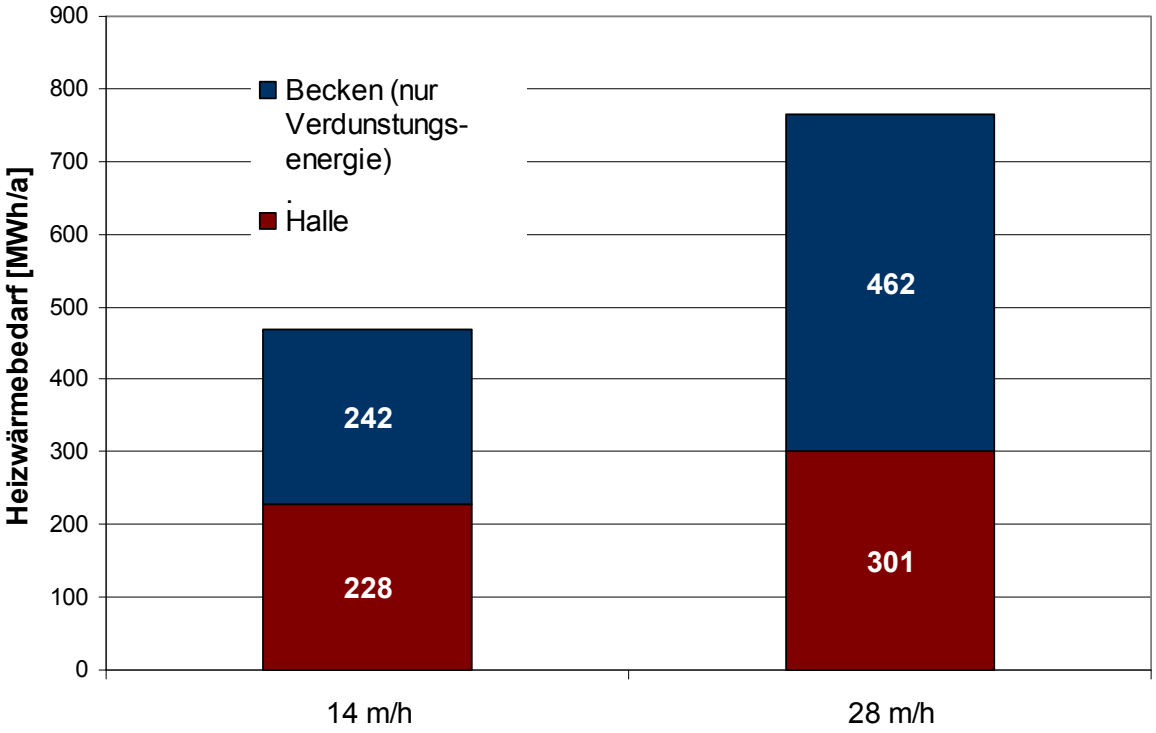


Abbildung 55: Vergleich des Heizwärmebedarfes für Halle und Beckenwasser für eine Verdunstung von 14 m/h und für eine erhöhte Verdunstung von 28 m/h. Angenommen ist hier, dass die Verdunstungsenergie zu 80% aus dem Wasser und 20% aus der Hallenluft stammt.

5.2. Heizwärmelast

Die minimierte Verdunstung führt bei einer Entfeuchtung über den Außenluftwechsel zu geringen Massenströmen in der Halle. Entsprechend reduziert ist die über die Zuluft transportierbare Wärme. Soll die Wärme allein über die Zuluft eingebracht werden, wird ggf. ein Umluftanteil erforderlich. Alternativ kann die Wärmeeinbringung zusätzlich in Form einer Flächenheizung (z.B. Wärmebänke) erfolgen

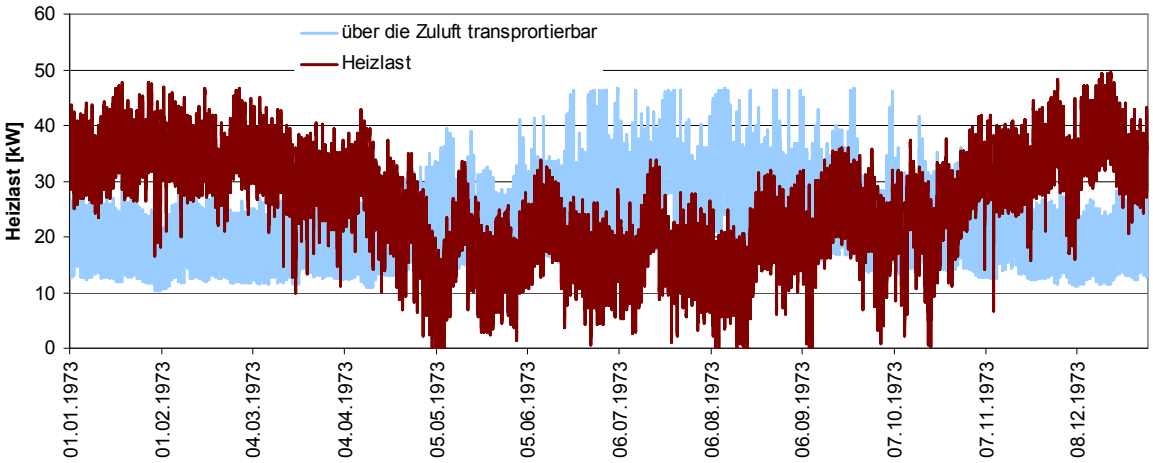


Abbildung 57: Heizwärmelast und über die Zuluft transportierbare Heizwärme für den Standort Essen bei reinem Außenluftbetrieb

Abbildung 57 zeigt die vorhandene Heizwärmelast der Hallenluft sowie die über die Zuluft transportierbare Wärmemenge. Wird die Halle ausschließlich über Außenluft entfeuchtet, sind die vorhandenen Luftmengen im Winterhalbjahr zu gering, um die gesamte Heizwärme bereitzustellen. Hier wäre ein Umluftanteil bzw. ein weiteres Wärmeübergabesystem vorzusehen. Die hier gezeigte Heizlast ergibt sich unter der Voraussetzung, dass 20 % der zur Verdunstung erforderlichen Energie aus der Hallenluft bezogen wird. Dies ist eine eher vorsichtige Annahme, der Anteil der Verdunstungsenergie aus der Luft dürfte etwas geringer sein, wird aber mangels genauer Kenntnis mit 20 % angenommen. Weiterhin können die Heizleistungen des Hallenbereiches weiter gesenkt werden, wenn zukünftig verbesserte Pfosten-Riegel-Fassaden marktverfügbar sind. Positiv auf die Heizlast wirkt sich auch eine thermische Entkopplung zu kühleren Gebäudebereichen wie Umkleide, Foyer und Keller aus (s. Kapitel 4.3). Auch mit diesen Maßnahmen wird eine reine Beheizbarkeit über die Zuluft i.d.R. nicht erreicht.

5.2.1. Einfluss einer Nachtabsenkung

Die Reduzierung der Hallentemperaturen hat einen positiven Effekt auf den Heizwärmebedarf. Kann die Hallentemperatur in den Nachtstunden bis auf 25 °C abfallen, so reduziert sich der Heizwärmebedarf im Jahr um 43 MWh. Allerdings wird für den Wiederaufheizfall eine höhere Leistung erforderlich. Diese steigt von 40 kW auf gut 65 kW an. Wird die Halle allein über Zuluft beheizt, so kann diese zusätzliche Leistung über einen Umluftbetrieb eingebracht werden. Die nächtliche Absenkung der Hallentemperatur sollte allerdings so begrenzt werden, dass die kritischen Feuchten nicht überschritten werden.

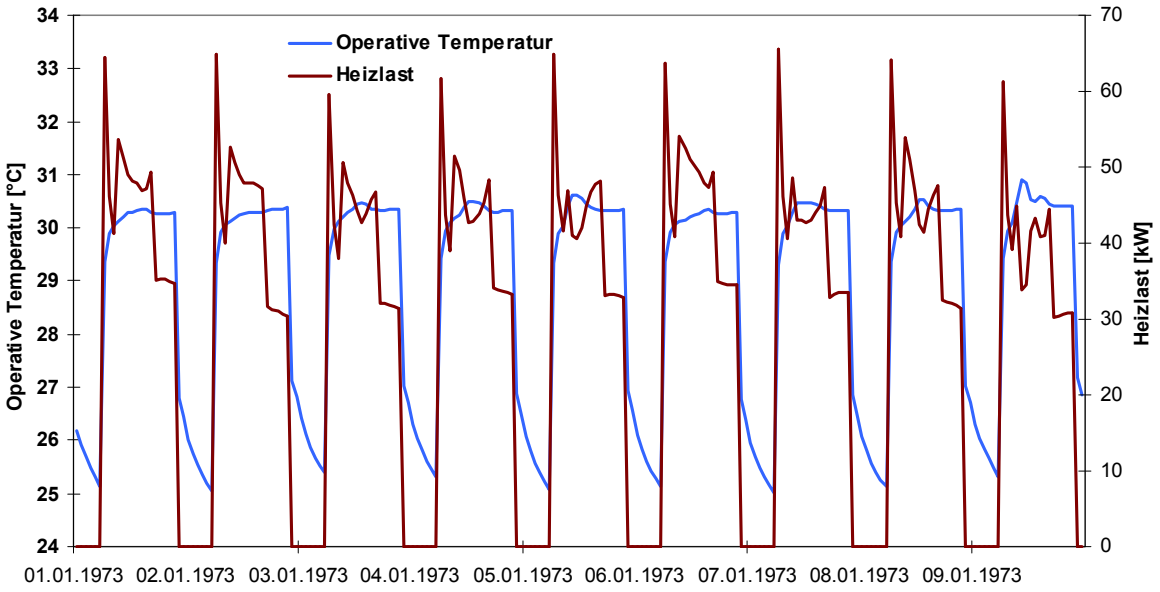


Abbildung 58: Verlauf der operativen Temperatur und der Heizleistung bei Nachtabsenkung von 32 auf 25 °C.

5.2.2. Einfluss einer Beckenabdeckung

Eine Möglichkeit, die Verdunstung zumindest in den Nachtstunden weiter zu reduzieren, ist die Abdeckung der Becken mit Hilfe von schwimmenden Kunststoffplanen. Die Installation von Beckenabdeckungen ist sowohl mit nennenswerten Investitionskosten als auch mit Wartungskosten für Reinigung und Instandhaltung verbunden. Während der Nachtstunden verdunsten ohnehin nur geringe Wassermengen, sodass der Einfluss einer Abdeckung relativ gering ist.

Abbildung 59 zeigt den Heizwärmebedarf einer Halle die tags und nachts eine relative Feuchte von 19,3 g/kg bzw. 64 % bei konstant 32 °C aufweist mit und ohne Beckenabdeckung und zusätzlich noch eine Variante, bei der die Hallenluftfeuchte nachts auf 23 g/kg bzw. 76 %angehoben wird. Im Vergleich zur kostenintensiven Beckenabdeckung ist eine Anhebung der Hallenluftfeuchte in den Nachtstunden genauso effektiv.

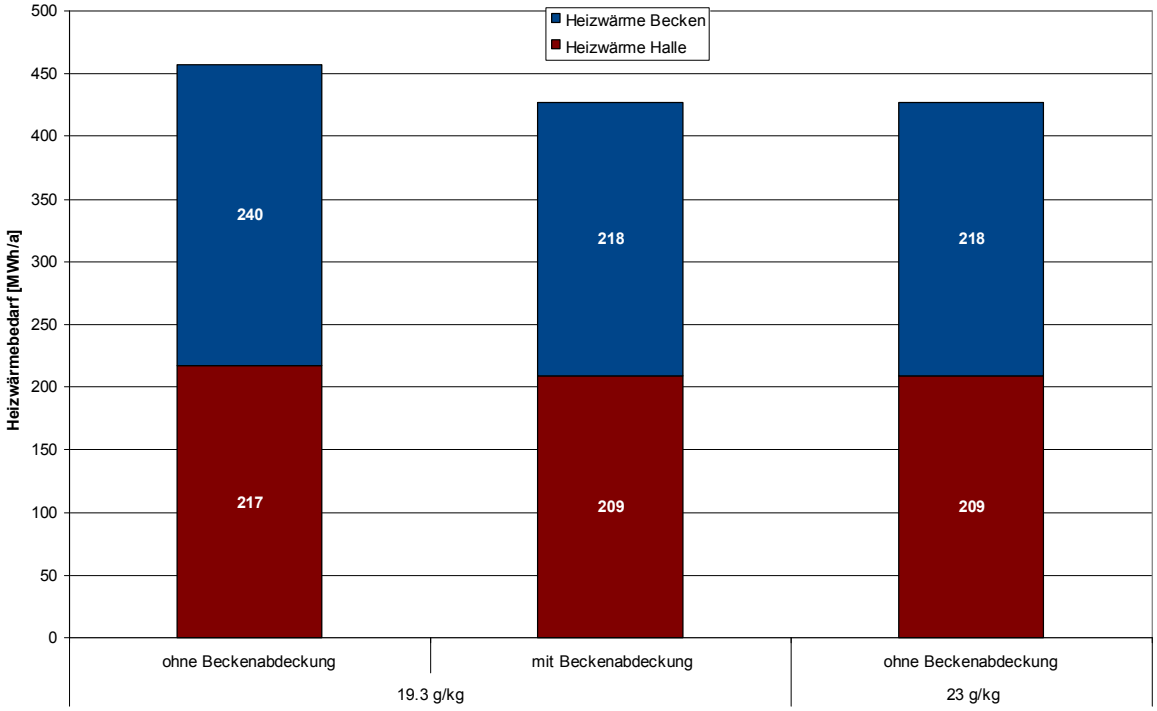


Abbildung 59: Heizwärmebedarf der Halle bei konstanter Hallenluftfeuchte von 19,3 g/kg mit und ohne Beckenabdeckung und einer Anhebung der Feuchte nachts auf 23 g/kg. Randbedingungen: Wasserübergangskoeffizient ohne Beckenabdeckung 7 m/h, mit Beckenabdeckung 0,7 m/h.

5.3. Varianten zur Reduzierung der Enthalpieverluste

5.3.1. Entfeuchtung über Außenluftwechsel - Ausgangsvariante

Normalerweise werden Hallenbäder ausschließlich über die Anpassung des Außenluftwechsels entfeuchtet. Dies ist immer dann möglich, wenn der Feuchtegehalt der Außenluft geringer ist als der der Hallenluft. Der erforderliche Außenluftmassenstrom ergibt sich aus der Verdunstungsmenge, der Feuchtedifferenz zwischen Außen- und Hallenluft und dem Leckagemassenstrom:

$$\dot{m}_{AU} = \frac{\dot{M}_{D,B}}{(x_{Halle} - x_{AU})} - \dot{m}_{Leck} \qquad [kg/h] \qquad (1)$$

mit: $\dot{M}_{D,B}$ = *verdunstender Wassermassenstrom* [kg/h]

x_{AU} = *absolute Feuchte der Außenluft* [kg/kg]

x_{Halle} = *absolute Feuchte der Hallenluft* [kg/kg]

$\dot{m}_{AU}$ = *Außenluftmassenstrom* [kg/h]

$\dot{m}_{Leck}$ = *Leckagemassenstrom* [kg/h]

Wird die Differenz zwischen Hallen- und Außenluftfeuchte zu gering, so übersteigt der erforderliche Massenstrom den Auslegungsmassenstrom und die Hallenfeuchte steigt über den Sollwert an. Da höhere Außenluftfeuchten nur in den Sommermonaten auftreten, sodass zeitgleich auch hohe Außenlufttemperaturen herrschen, ist die Gefahr von Kondensat bedingten Bauschäden praktisch nicht vorhanden. Die Komfortbedingungen sowie die Grenzwerte für Korrosionsschutz (max. 64% rel.H) können ggf. nicht mehr eingehalten werden.

Die Verdunstung hängt stark von der Bewegung der Wasseroberfläche ab. In den Nachtstunden ergeben sich daher deutlich reduzierte Verdunstungen und somit auch ein geringerer Außenluftmassenstrom. Für das Modellgebäude ergeben sich unter den in Kapitel 2 genannten Randbedingungen im Monatsmittel folgende Außenluftmassenströme für den Tag- und Nachtbetrieb:

Tabelle 9: Außenluftmassenstrom bei monatsmittlerer Außentemperatur und –feuchte für den Tag- und Nachtbetrieb

ENTFEUCHTUNG ÜBER AUSSENLUFT			Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
		d/mon	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Außenluft-temperatur	T_{amb}	°C	3.6	3.1	4	6.2	14.5	15.2	16.3	17.1	13.3	11.1	5.8	2.7
Rel. Feuchte Außenluft	φ_H		90%	87%	87%	84%	62%	78%	81%	75%	84%	82%	93%	92%
Abs. Feuchte Außenluft	x	kg/kg	0.0044	0.0041	0.0044	0.0049	0.0064	0.0084	0.0093	0.0091	0.0080	0.0067	0.0053	0.0042
Dichte der Außenluft	ρ_{amb}	kg/m³	1.27	1.27	1.27	1.26	1.22	1.22	1.21	1.21	1.23	1.24	1.26	1.28
Sättigungs-dampfdruck der Außenluft	p_s	Pa	791	764	814	949	1652	1728	1854	1951	1529	1323	923	742
WRG trocken	$\eta_{WRG,tr}$		85%											
WRG real	$\eta_{WRG,Kond}$		92%	93%	92%	92%	89%	89%	88%	88%	90%	90%	92%	93%
Außenluft-massenstrom TAG	m_{dot}	kg/h	5410	5295	5411	5614	6316	7556	8275	8103	7274	6478	5787	5333
Außenluft-massenstrom NACHT	m_{dot}	kg/h	2504	2446	2504	2605	2956	3576	3936	3850	3435	3038	2692	2465
Zuluft-temperatur nach WRG	T_{Zu}	°C	29.9	29.8	29.9	29.9	30.1	30.1	30.2	30.2	30.1	30.0	29.9	29.8
Fortluft-temperatur nach WRG	T_{Fo}	°C	19	19	19	20	22	22	23	23	22	21	20	19
absolute Feuchte Fortluft	x	kg/kg	0.0139	0.0137	0.0140	0.0146	0.0169	0.0171	0.0174	0.0176	0.0165	0.0159	0.0145	0.0136
Kondensat-menge	kg/h		13.5	13.5	13.2	12.2	7.0	7.8	7.3	6.3	9.3	10.1	12.9	13.9

mit: $\dot{M}_{D,B}$ = *86 kg/h (TAG)*

= *43 kg/h (NACHT)*

$\dot{m}_{Leck}$ =*575 kg/h*

Für die betrachtete Modellhalle ergibt sich unter der Voraussetzung einer höheren möglichen Luftfeuchte (19,3 g/kg) die in **Abbildung 60** dargestellte Energiebilanz.

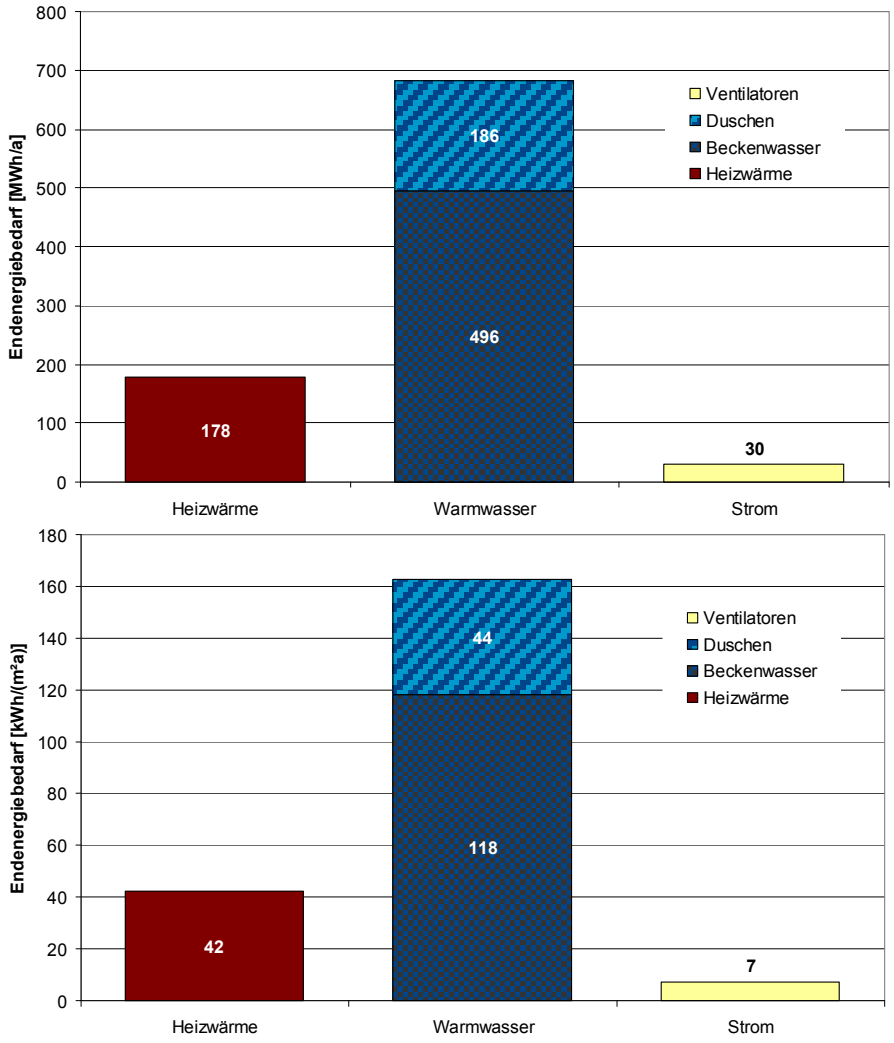


Abbildung 60: Endenergiebedarf absolut und spezifisch für Raumheizung und Warmwasser sowie für den Betrieb der Lüftungsanlage. Als Randbedingungen werden hier vorausgesetzt: Hallenfeuchte 64%, Gesamtluftwechsel entspricht dem Außenluftwechsel.

5.3.2. Enthalpierückgewinnung

Bei den hohen Ablufttemperaturen und –feuchten (32°C und 64 % rel.H) fällt während der überwiegenden Zeit des Jahres Kondensat am Wärmeübertrager an. Die Fortlufttemperatur beträgt im Monatsmittel des kältesten Monats noch knapp 20°C. Diese Luft ist wassergesättigt und besitzt eine hohe Enthalpie, die normalerweise mit dem Fortluftstrom an die Umwelt abgegeben wird. Im vorliegenden Kapitel werden mehrere Varianten untersucht, welche die Rückgewinnung der Fortluftenthalpie und damit eine deutliche Reduzierung des Energiebedarfes für Raum- und Beckenwassererwärmung ermöglichen.

Bereits im Wärmeübertrager wird ein Teil der in der Abluft gebundenen Feuchte auskondensiert. Die entstehende Kondensationswärme wird zum Teil auf die Zuluft übertragen. Aufgrund des höheren Wärmekapazitätsstroms der Abluft gegenüber der Zuluft, fällt die Abkühlung der Abluft geringer aus als die Aufwärmung der Außenluft.

Der Wirkungsgrad des Wärmeübertragers verbessert sich dadurch in einer Größenordung von 5 %. Anhand des Hallenbadmodells wurden die folgenden Fortluftenthalpien ermittelt:

Tabelle 10: Fortluftenthalpien im Tag- und Nachtbetrieb

			Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
WRG trocken	$\eta_{WRG,tr}$		85%											
WRG real	$\eta_{WRG,Kond}$		92%	93%	92%	92%	89%	89%	88%	88%	90%	90%	92%	93%
Außenluft-massen-strom TAG	m_{dot}	kg/h	5410	5295	5411	5614	6316	7556	8275	8103	7274	6478	5787	5333
Zuluft-temperatur nach WRG	T_{Zu}	°C	29.9	29.8	29.9	29.9	30.1	30.1	30.2	30.2	30.1	30.0	29.9	29.8
Fortluft-temperatur nach WRG	T_{Fo}	°C	19.1	18.9	19.2	19.9	22.2	22.4	22.7	22.9	21.9	21.3	19.7	18.8
absolute Feuchte Fortluft	x	kg/kg	0.0139	0.0137	0.0140	0.0146	0.0169	0.0171	0.0174	0.0176	0.0165	0.0159	0.0145	0.0136
Kondensat-menge	kg/h		29.2	29.3	28.6	26.3	15.0	16.4	15.4	13.2	19.7	21.6	27.8	30.1
Außenluft-massen-strom NACHT	m_{dot}	kg/h	2504	2446	2504	2605	2956	3576	3936	3850	3435	3038	2692	2465
Kondensat-menge	kg/h		13.5	13.5	13.2	12.2	7.0	7.8	7.3	6.3	9.3	10.1	12.9	13.9
Fortluft-enthalpie TAG	H_{Fo}	kW	80	78	81	87	113	136	151	150	127	109	90	78
Fortluft-enthalpie NACHT	H_{Fo}	kW	37	36	38	41	53	64	72	71	60	51	42	36

Durch weiteres Abkühlen der Fortluft (aktive oder passive Maßnahme) kondensiert ein weiterer Teil der Luftfeuchte. Im Folgenden wird der Einfluss einer aktiven Kühlung der Fortluft mittels einer Wärmepumpe und einer passiven Kühlung mit Hilfe eines zweiten Wärmetauschers, der zur Frischwasservorerwärmung dient, untersucht.

Aktive Enthalpierückgewinnung mit Hilfe einer Wärmepumpe (WP) - Variante 1

Durch Anordnung des Verdampfers im Fortluftstrom wird diese auf eine Temperatur von z.B. 3°C abgekühlt. Die gesamte Wärmemenge, die an das Arbeitsmedium übertragen werden kann, ist die Summe aus der Abkühlung des Fortluftstroms (ΔT) und der Wärme, die durch Kondensation des Wasserdampfes auf der Verdampferoberfläche frei wird.

Die so gewonnene Wärme kann z.B. in das Warmwassersystem eingespeist werden. Wird dort keine Wärme nachgefragt, so kann der Heizkreislauf zur Beheizung der Halle unterstützt werden. Dadurch ergibt sich eine deutliche Heizenergieeinsparung, die allerdings einen nennenswerten Stromeinsatz für die Wärmepumpe erfordert.
Die Energiebilanz für den Einsatz einer Wärmepumpe zur Fortluftkühlung ergibt sich entsprechend **Abbildung 63**.

Tabelle 11: Wärmeaufnahme der Wärmepumpe durch Abkühlen der Fortluft. In den Sommermonaten stünde durch die Enthalpierückgewinnung mehr Energie zur Verfügung als gebraucht wird. Die Fortluft wird daher nur soweit abgekühlt wie erforderlich.

			Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Fortluft-temperatur nach WP	$T_{fo,WP}$	°C	3	3	3	3	3	8	13	9	3	3	3	3
absolute Feuchte Fo	x	kg/h	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0068	0.0090	0.0074	0.0049	0.0047	0.0047	0.0047
Kondensat-menge		kg/h	50	48	50	55	77	78	69	83	85	73	57	48
Kondensa-tionswärme		kW	34	33	35	38	53	54	47	57	59	50	39	33
Sensible Wärme		kW	24	24	25	26	34	30	24	31	37	33	27	24
Wärme-aufnahe Verdampfer		kW	59	57	59	65	87	84	71	88	96	83	66	56
Storm-aufhahme WP		kW	12	11	12	13	18	17	14	18	20	17	13	11
Wärme-abgabe WP		kW	70	68	71	77	104	100	85	105	115	100	79	68
Fortluft-enthalpie nach WP TAG	$H_{Fo,\ WP}$	kW	22	22	22	23	26	53	81	63	31	26	24	22

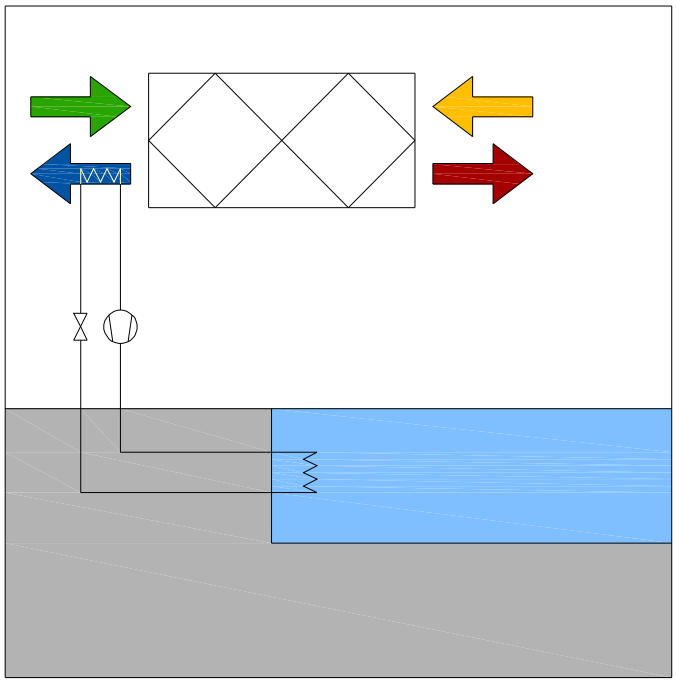


Abbildung 62: Schematische Darstellung der Fortluftenthalpienutzung mit Hilfe einer WP und Wärmeabgabe an das Beckenwasser

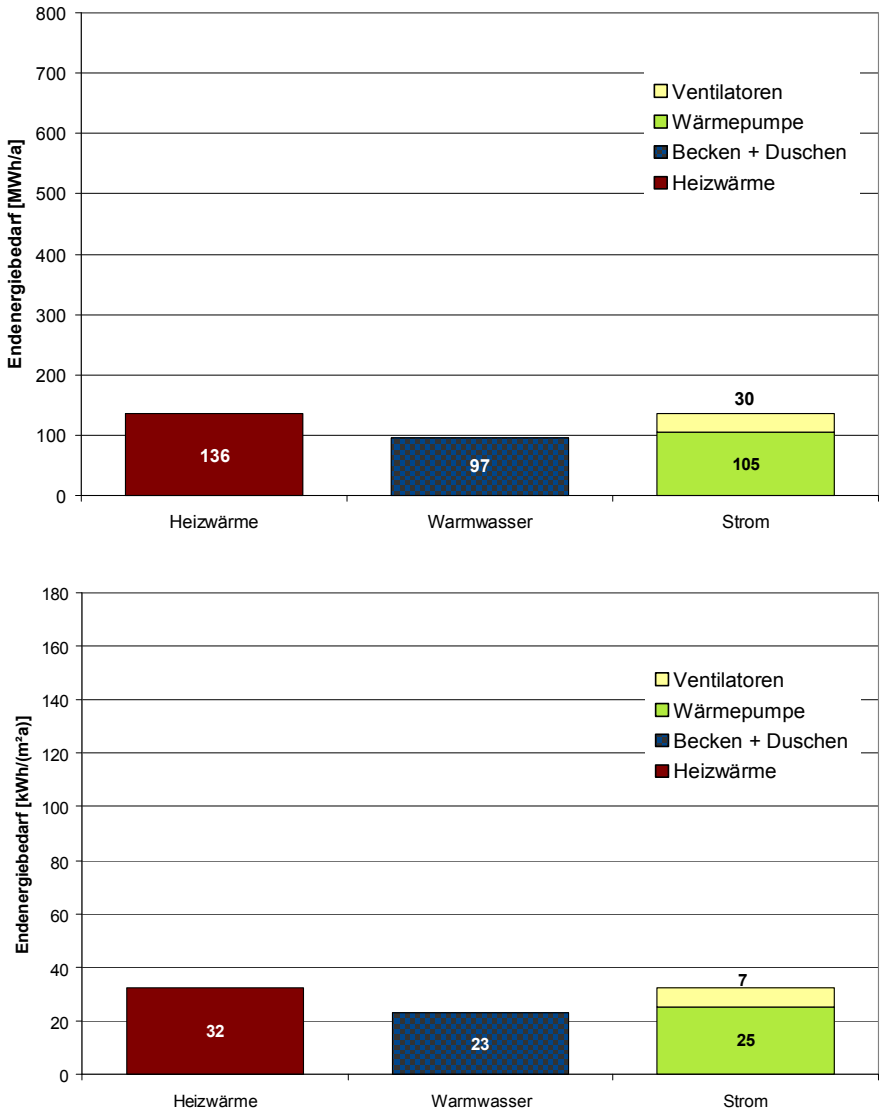


Abbildung 63: Endenergiebedarf absolut und spezifisch für Raumheizung und Warmwasser sowie für den Betrieb der Lüftungsanlage und der Wärmepumpe. Als Randbedingungen werden hier vorausgesetzt: Hallenfeuchte 64%, Verdunstungsenergie wird vollständig aus dem Wasser bereitgestellt, Gesamtluftwechsel entspricht dem Außenluftwechsel. Enthalpierückgewinnung durch Fortluftkühlung mit Hilfe einer Wärmepumpe

Gegenüber der Ausgangsvariante (EnEV) ergibt sich eine Energieeinsparung auf Basis Endenergie von **70%**. Vorrangig wird hier das Beckenwasser mit Wärme versorgt, sodass sich der Heizwärmebedarf kaum reduziert. Die Vorrangschaltung für das Beckenwasser ist vor allem wegen des besseren Wärmeübergangs des Kondensators zum Wasser sinnvoll.

<u>Passive Enthalpierückgewinnung mittels Luft-Wasser-Wärmeübertrager – Variante 2</u>

Die passive Wärmeübertragung mit Hilfe eines zweiten nachgeschalteten Luft-Wasser-Wärmeübertragers bietet sich an, da sowohl große Frischwassermengen zu erwärmen sind, als auch hohe Verdunstungswärmeverluste gedeckt werden müssen.

Das Frischwasser gelangt mit etwa 10 °C ins Gebäude und muss entsprechend der Becken- und Duschwassertemperaturen auf 29 bzw. 38 °C aufgewärmt werden. Da die Fortluft nach dem Luft-Luft-Wärmetauscher wassergesättigt ist, entsteht bei weiterem Abkühlen sofort Kondensationswärme, die auf das Frischwasser übertragen werden kann. Durch Kühlung mit Hilfe von Wärmepumpen werden kleinere Fortlufttemperaturen erreicht als das beim Luft-Wasser-Wärmeübertrager der Fall ist, daher ist die Energieeinsparung hier nicht so deutlich.

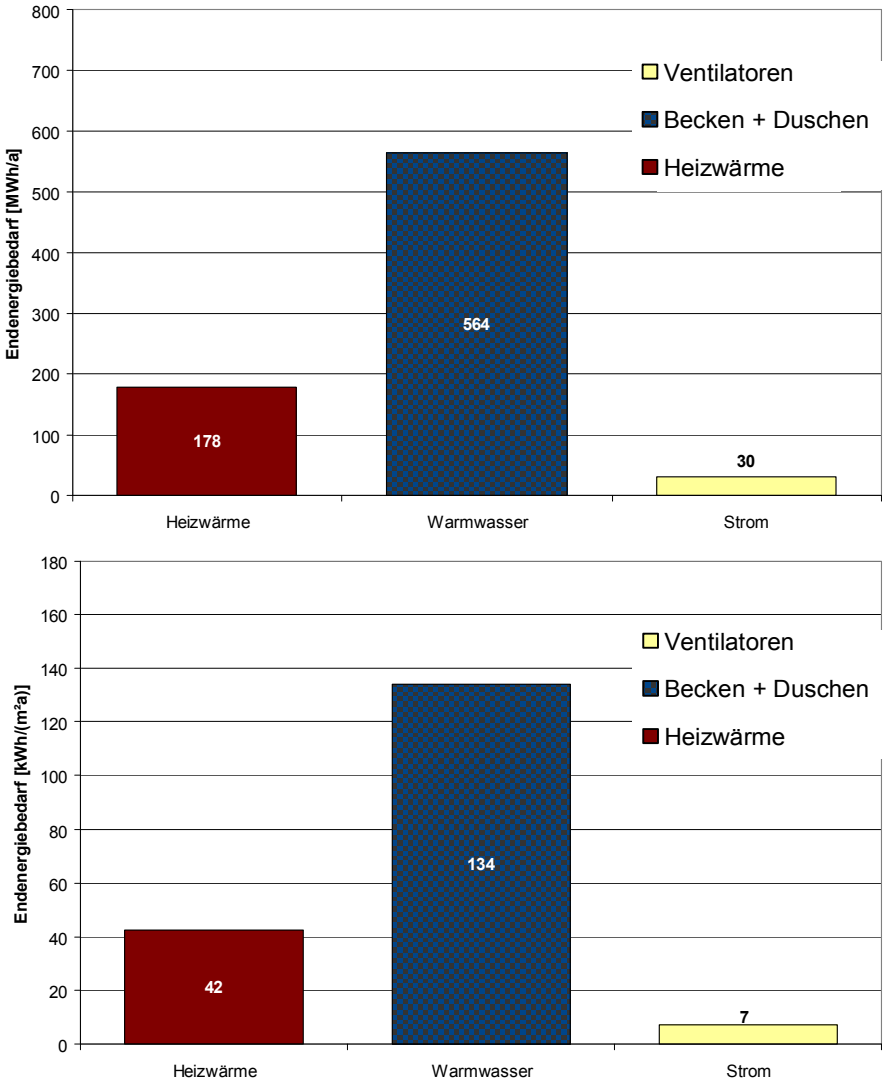


Abbildung 64: Endenergiebedarf absolut und spezifisch für Raumheizung und Warmwasser sowie für den Betrieb der Lüftungsanlage. Als Randbedingungen werden hier vorausgesetzt: Hallenfeuchte 64%, Verdunstungsenergie wird vollständig aus dem Wasser bereitgestellt, Gesamtluftwechsel entspricht dem Außenluftwechsel. Enthalpierückgewinnung durch Fortluftkühlung mit Hilfe eines Luft-Wasser-Wärmetauschers

Kombination aus Luft-Wasser-Wärmeübertrager und Wärmepumpe Variante 3

Kombiniert man erst alle passiven Wärmerückgewinner und setzt erst am Ende der Kette eine Wärmepumpe ein, so ergibt sich in etwa die gleiche Endenergieeinsparung im Vergleich zu Variante 1. Der Vorteil dieser Kombination liegt zum einen

am Einsatz deutlich kleinerer Wärmepumpen aber vor allem bei der Primärenergie-einsparung (s. Kapitel 5.4)

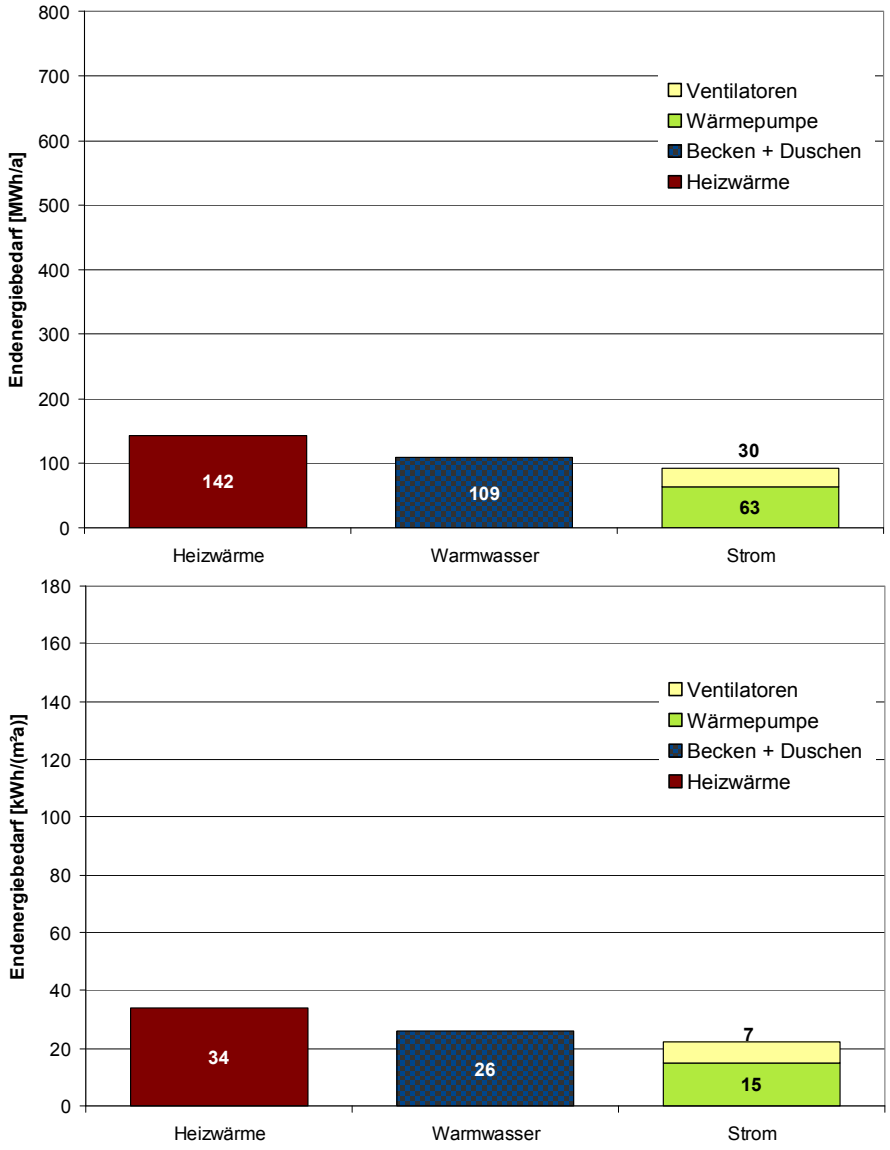


Abbildung 65: Endenergiebedarf absolut und spezifisch für Raumheizung und Warmwasser und für den Betrieb der Lüftungsanlage und der Wärmepumpe. Als Randbedingungen werden hier vorausgesetzt: Hallenfeuchte 64%, Verdunstungsenergie wird vollständig aus dem Wasser bereitgestellt, Gesamtluftwechsel entspricht dem Außenluftwechsel. Enthalpierückgewinnung durch Fortluftkühlung mit Hilfe eines Luft-Wasser-Wärmetauschers und einer Wärmepumpe.

5.3.3. Umluftentfeuchtung Variante 4

Alternativ zur Entfeuchtung über den Außenluftwechsel, kann die Halle im Umluftverfahren getrocknet werden. Die erforderliche Außenluftmenge wird dann nur noch nach den hygienischen Erfordernissen bemessen. Es wird der nach [VDI2089] vorgeschriebene Mindestaußenluftwechsel von 30% des Auslegungsvolumenstroms angesetzt. In den Nichtbetriebszeiten kann vollständig auf einen Außenluftwechsel

verzichtet werden. Die Hallenluft wird im Umluftbetrieb mit Hilfe einer Wärmepumpe abgekühlt, so dass ein Teil des Wasserdampfes auskondensieren kann und anschließend wieder aufgeheizt. Der entsprechende Umluftwechsel ergibt sich zum Einen aus der erforderlichen Entfeuchtung und zum Anderen aus der zulässigen Tiefsttemperatur. Die erforderliche Entfeuchtung entspricht der Differenz zwischen der Verdunstungsmenge und der durch den Außenluftwechsel und durch Leckagen bereits vorhandenen Entfeuchtungsleistung.

$$\dot{m}_{Uml} = \frac{(\dot{M}_{D,B} - \dot{M}_A - \dot{M}_L)}{(x_{WP,\min} - x_{Halle})} \qquad [kg/h] \qquad (2)$$

mit:

$\dot{M}_{D,B}$	= *verdunstender Wassermassenstrom*	[kg/h]
$\dot{M}_A$	= *Entfeuchtung durch Außenluftwechsel*	[kg/h]
$\dot{M}_L$	= *Entfeuchtung über Leckagen*	[kg/h]
$x_{WP;\min}$	= *absolute Feuchte bei minimaler Temperatur WP*	[kg/kg]
x_{Halle}	= *absolute Feuchte der Hallenluft*	[kg/kg]
$\dot{m}_{Uml}$	= *Umluftmassenstrom*	[hg/h]

Der Gesamtmassenstrom der von der Lüftungsanlage zu bewegen ist, ergibt sich aus dem Außenluft- und dem Umluftmassenstrom:

$$\dot{m}_{ges} = \dot{m}_{AU} + \dot{m}_{Uml} \qquad [kg/h]$$

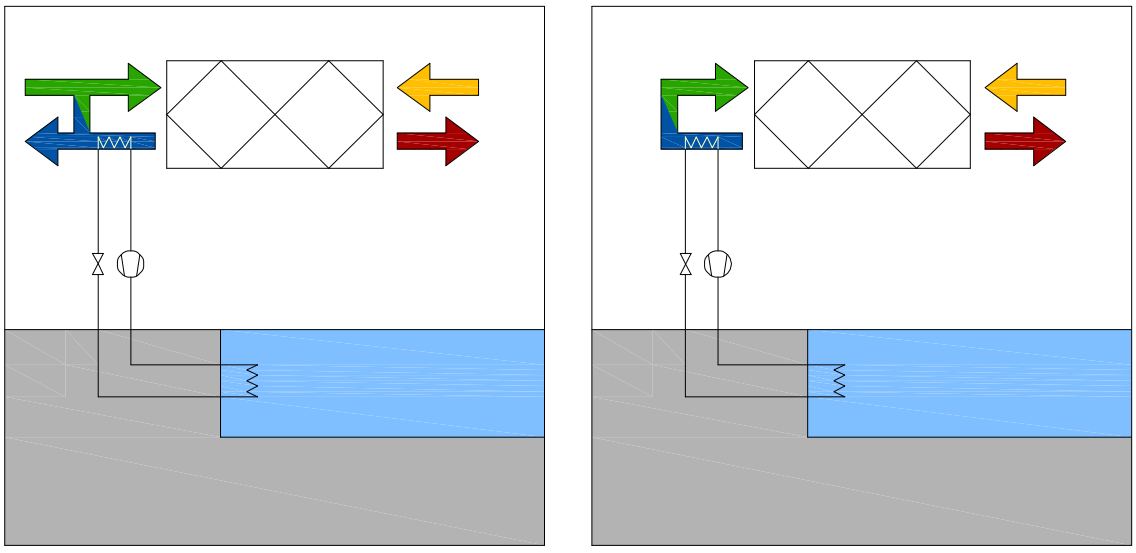


Abbildung 66: Schematische Darstellung der Umluftentfeuchtung mit Wärmeabgabe an das Beckenwasser (links:Tagbetrieb, rechts: Nachtbetrieb)

Das Energieeinsparpotential dieser Variante wird durch die Verringerung der Lüftungswärmeverluste bestimmt. Die hierzu erforderlichen Außenluftmengen liegen ganzjährig unter den erforderlichen Luftwechseln bei Außenluftentfeuchtung. Bei der

Abkühlung der Hallenluft durch die Wärmepumpe wird mehr Kondensationswärme frei als für die Wiederaufheizung benötigt wird. Aufgrund des besseren Wärmeübergangs sollte also auch hier vorrangig das Beckenwasser beheizt werden. Besteht hier keine Wärmenachfrage, so wird die Wärme in den Heizkreis der Halle eingespeist.

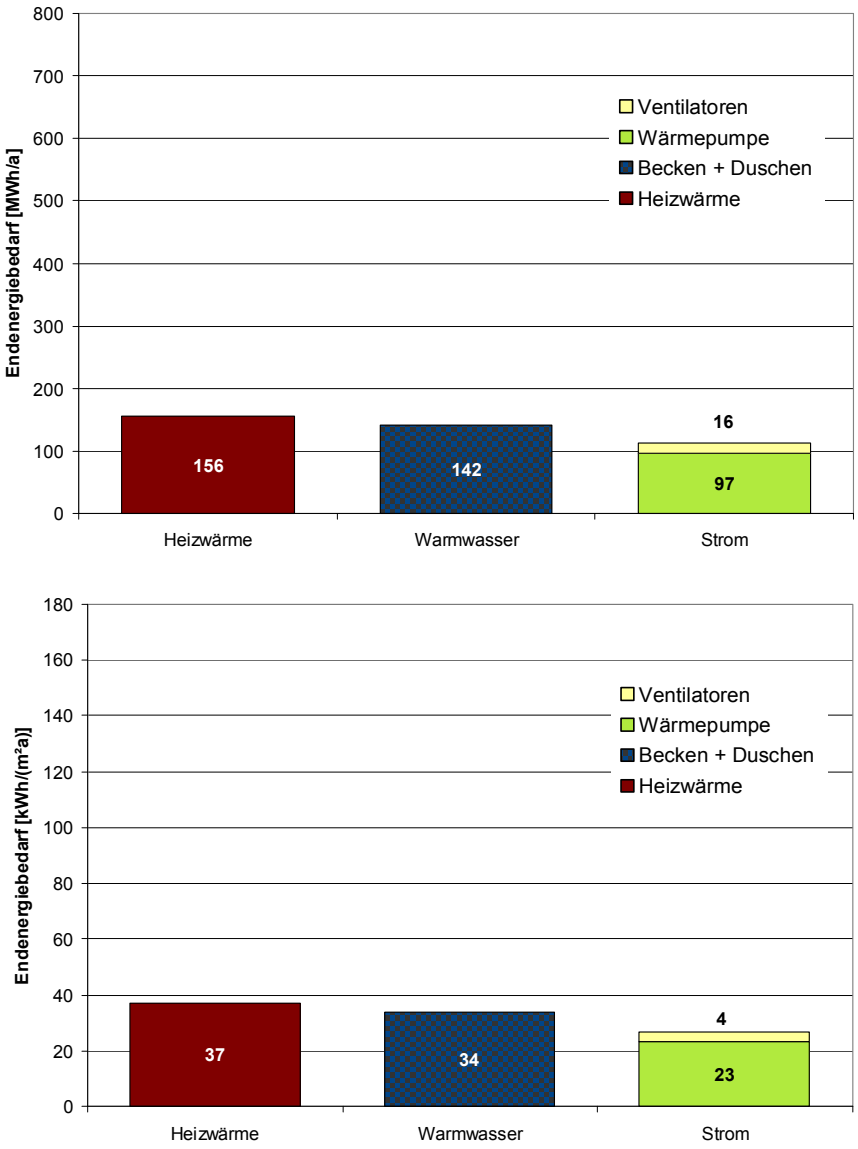


Abbildung 67: Endenergiebedarf absolut und spezifisch für Raumheizung und Warmwasser sowie für den Betrieb der Lüftungsanlage und der Wärmepumpe. Als Randbedingungen werden hier vorausgesetzt: Hallenfeuchte 64%, Verdunstungsenergie wird vollständig aus dem Wasser bereitgestellt. Außenluftwechsel = 30% des Auslegungsvolumenstroms + Umluftwechsel zur Entfeuchtung mit Hilfe einer WP.

Für die Wahl eines geeigneten haustechnischen Systems zur Minimierung des Heizwärmebedarfes ist die Gegenüberstellung der Varianten auf Basis des Endenergiebedarfes nur bedingt hilfreich. Die Enthalpierückgewinnung mit Hilfe von Wärmepumpensystemen benötigt Strom, der mit einem Primärenergiefaktor von 2,7 die

Primärenergiebilanz maßgeblich beeinflusst. Passive Systeme gewinnen zwar nicht so viel Enthalpie zurück, sie benötigen aber im Gegenzug keine elektrische Energie. Im Kapitel 5.4 werden die Varianten deshalb primärenergetisch verglichen und bewertet.

5.3.4. Einfluss des Wärmeübertragers

Wärmeübertrager für große Volumenströme sind mit hohen Wärmebereitstellungsgraden (bis zu 85%) verfügbar. Da in der Hallenabluft große Feuchtemengen gebunden sind, fällt im Wärmeübertrager ständig Kondensat an, welches aufgrund der frei werdenden Kondensationswärme eine höhere Wärmeübertragung zulässt. Anhand der stationären Energiebilanz wurde der Einfluss des Wärmebereitstellungsgrades untersucht. Wird statt des sehr guten Wärmebereitstellungsgrades von 85 % lediglich ein Standardgerät mit 75 % gewählt, so erhöht sich der Heizwärmebedarf für die Raumwärme um 15 %. Bezogen auf den Gesamtheizwärmebedarf für Raumheizung und Warmwasser ist der zusätzliche Endenergieverbrauch bedingt durch einen schlechteren Wärmetauscher 3 %. Wird zur Enthalpierückgewinnung eine Fortluftwärmepumpe eingesetzt, so werden die höheren Fortlufttemperaturen beim schlechteren Wärmerückgewinner zumindest noch durch die Wärmepumpe genutzt. Dadurch sinkt der Unterschied zwischen „gutem“ und „schlechtem“ Wärmeübertrager auf 1 %.

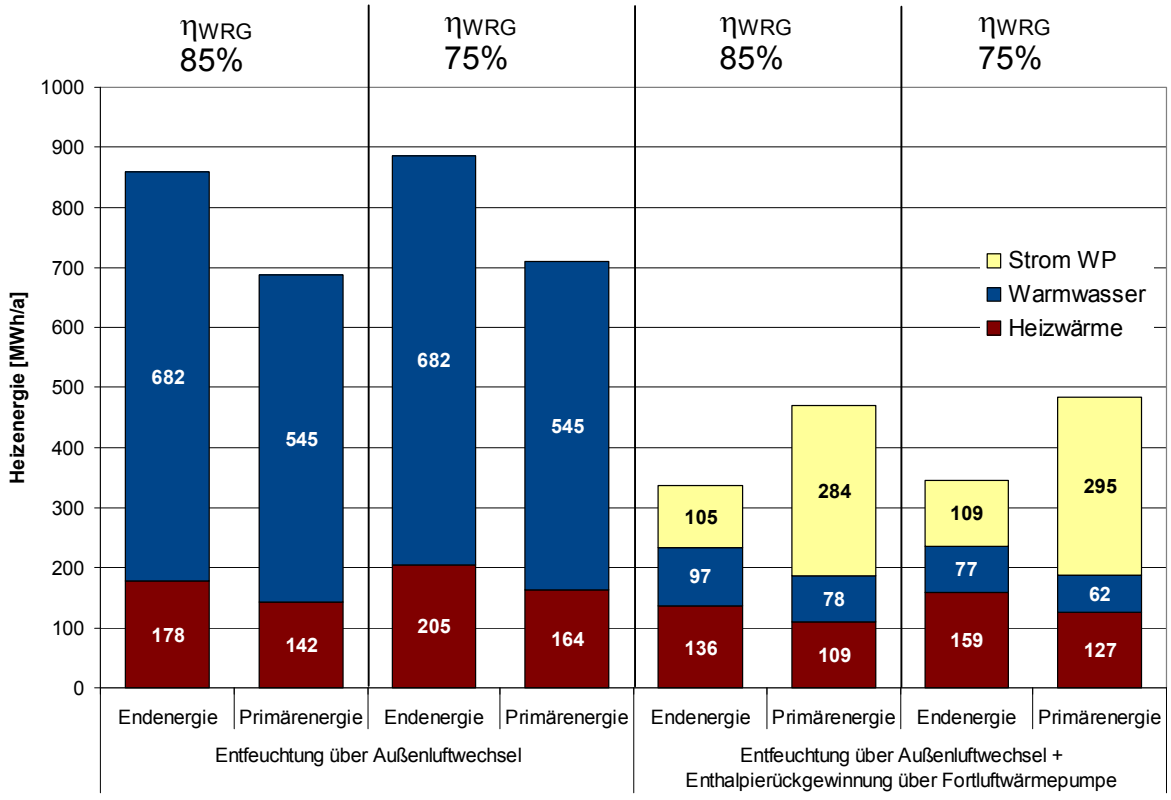


Abbildung 68: Vergleich der Energiebilanzen bei unterschiedlichen Wärmerückgewinnern im Lüftungsgerät. Für den primärenergetischen Vergleich wurden ein Fernwärmeanschluss mit einem Primärenergiefaktor von 0,8 und eine Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 6 und einem Primärenergiefaktor für Strom von 2,7 angenommen.

Der Wärmebereitstellungsgrad des Wärmeübertragers gewinnt allerdings an Bedeutung wenn keine weiteren Maßnahmen zur Fortluftbehandlung (z.B. aktive oder passive Kühlung) vorgesehen werden.

Die Raumtemperaturen in den Nutzungsbereichen Umkleide, Foyer, Badehalle reichen von 20 bis zu 35 °C. Die Lüftungsgeräte zur Versorgung dieser Bereiche werden häufig im Keller, z. T. an unterschiedlichen Stellen, untergebracht. Aus Wohn- und Bürobau ist bekannt, dass lange kalte Leitungen (Außen- und Fortluft) bei Aufstellen der Geräte innerhalb der thermischen Hülle mit enormen Wärmeverlusten verbunden sind. Durch die hohen Innentemperaturen im Hallenbad wird dieser Effekt nochmals verschärft. Die kalten Kanäle müssen außerdem mit einer dampfdichten Wärmedämmung versehen werden. Hierzu werden entweder aluminiumkaschierte Mineralwolldämmung oder Kautschukmaterialien verwendet. Ersteres erweist sich in der Praxis immer wieder als schadensanfällig, da eine Verletzung der empfindlichen Aluminiumkaschierung gerade bei den hohen Luftfeuchten unweigerlich zu hohen Kondensatmengen in der Dämmung führen und letzteres ist bei größeren Dämmstärken sehr kostenintensiv. Es ist daher unbedingt zu empfehlen, die kalten Außen- und Fortluftleitungen möglichst kurz zu halten. Weiterhin sind Durchdringungen der Gebäudehülle zusätzliche Schwachstellen, die es zu vermeiden gilt. Eine zentrale Luftansaug- und Ausblasstelle mit direktem Anschluss an den Wärmeübertrager ist hier aus energetischer Sicht empfehlenswert.

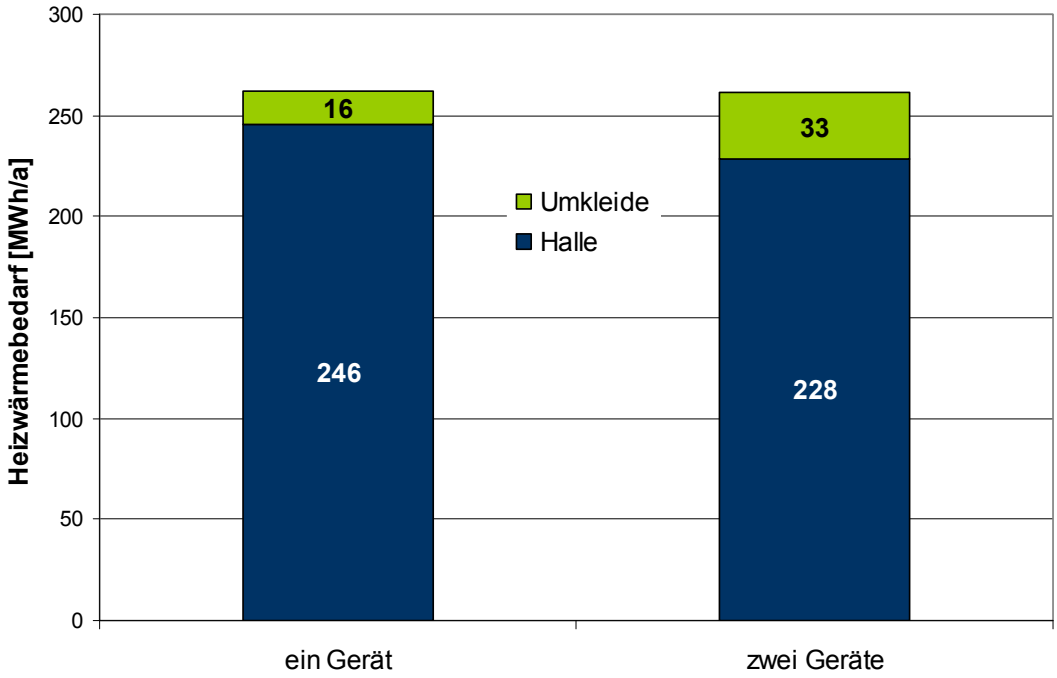


Abbildung 69: Heizwärmebedarf für Halle und Umkleide bei Verwendung von je einem Wärmeübertrager je Temperaturzone und bei Vermischung der Ab- und Zuluftströme.

Wird zum Beispiel ein zentraler Wärmeübertrager direkt an der Außenhülle angeordnet, so werden die Zu- und Abluftströme der unterschiedlichen Temperatur-

zonen gemischt. Die Nachheizung erfolgt dann getrennt gemäß den Anforderungen in den Zonen. Wird für jede Zone ein eigener Wärmeübertrager vorgesehen, so verschiebt sich der Heizwärmebedarf zugunsten der wärmeren Halle. Die warme Schwimmhalle benötigt ganzjährig eine Beheizung. Der Betrieb einer Wärmerückgewinnung ist daher ganzjährig sinnvoll. Wird ein zentraler Wärmeübertrager für mehrere Lüftungsgeräte unterschiedlicher Temperaturzonen vorgesehen, muss beachtet werden, dass die kühleren Zonen (z.B. Umkleiden mit 24°C) im Sommer überhitzen können. Um dies zu vermeiden kann ein Bypass für die Frischluftversorgung kühlerer Zonen vorgesehen werden.

5.4. Wärmeversorgung und primärenergetische Betrachtung

Eine große Zahl öffentlicher Hallenbäder wird über lokal tätige Versorgungsunternehmen bzw. deren Tochterunternehmen geführt, die auch Nah- und Fernwärmenetze betreiben und die Bäder über entsprechende Wärmeübergabestationen versorgen. Beim Vergleich unterschiedlicher gebäudetechnischer Varianten auf Basis des Primärenergiebedarfes sind die Annahmen zum Anteil der Kraftwärmekopplung (KWK) sowie zum verwendeten Brennstoff (fossil oder regenerativ) von besonderer Bedeutung. Allgemein wird für ein Nah- oder Fernwärmenetz mit einem KWK Anteil von 70% ein Primärenergiefaktor von 0,8 angenommen. Zukünftig könnten durch Steigerung der Effizienz niedrigere Primärenergiefaktoren möglich werden. Wird das Hallenbad durch ein solches Nahwärmesystem versorgt, so stellt sich der Einsatz von Wärmepumpen zur Enthalpierückgewinnung in der primärenergetischen Bewertung anders dar.
Zum Vergleich der Systeme zur Enthalpierückgewinnung wird zuerst einheitlich von einer Wärmeversorgung mit einem „Standard“-Primärenergiefaktor von 0,8 (z.B. Nahwärmeanschluss mit KWK Anteil von 70%) und einer zukunftsweisenden Wärmepumpe mit einer Arbeitszahl von 6 ausgegangen.
Bei Wärmenetzen mit Primärenergiefaktoren von 0,8 weisen die Varianten mit Wärmepumpen im Vergleich zur Ausgangsvariante Primärenergieeinsparungen auf. Die höchste Effizienz wird mit einer Kombination aus passiven Wärmeübertragern (Luft und Wasser) und einer aktiven Enthalpierückgewinnung mit Hilfe einer Wärmepumpe erzielt (Variante 3). Hier ergeben sich Primärenergieeinsparungen in Höhe von 40% im Vergleich zur Ausgangsvariante. Wird die Wärmepumpe zur Enthalpienutzung der Fortluft oder im Umluftbetrieb eingesetzt beträgt die Einsparung 28 bis 29%. Die passive Nutzung der Fortluftenthalpie mit Hilfe eines Frischwasser-Wärmetauschers führt hier „nur“ zu knapp 12% Primärenergieeinsparung (Variante 2). Bei sehr gutem Primärenergiefaktor der Nahwärme sinkt erwartungsgemäß der Gesamtprimärenergiebedarf des Hallenbades. Wichtig ist vor allem die Verschiebung der Einsparpotentiale der Varianten zu Gunsten der passiven Systeme. Vergleicht man die Ausgangsvariante mit der Variante 1 so zeigt sich, dass

der Vorteil einer Enthalpienutzung mit Hilfe einer Wärmepumpe nicht mehr gegeben ist. Der Energiebezug zur Beheizung für ein Nahwärmesystem mit einem Primärenergiekennwert von 0,4 ist primärenergetisch gesehen so hoch wie der Stromeinsatz für den Betrieb einer Fortluftwärmepumpe. Die Einsparung durch passive Frischwasservorerwärmung (Variante 3) bewegt sich im Bereich von 11%. Wird zusätzlich eine Wärmepumpe nachgeschaltet, die einen weiteren Teil der restlichen Feuchte auskondensiert, so lassen sich insgesamt 20 % Primärenergie einsparen.

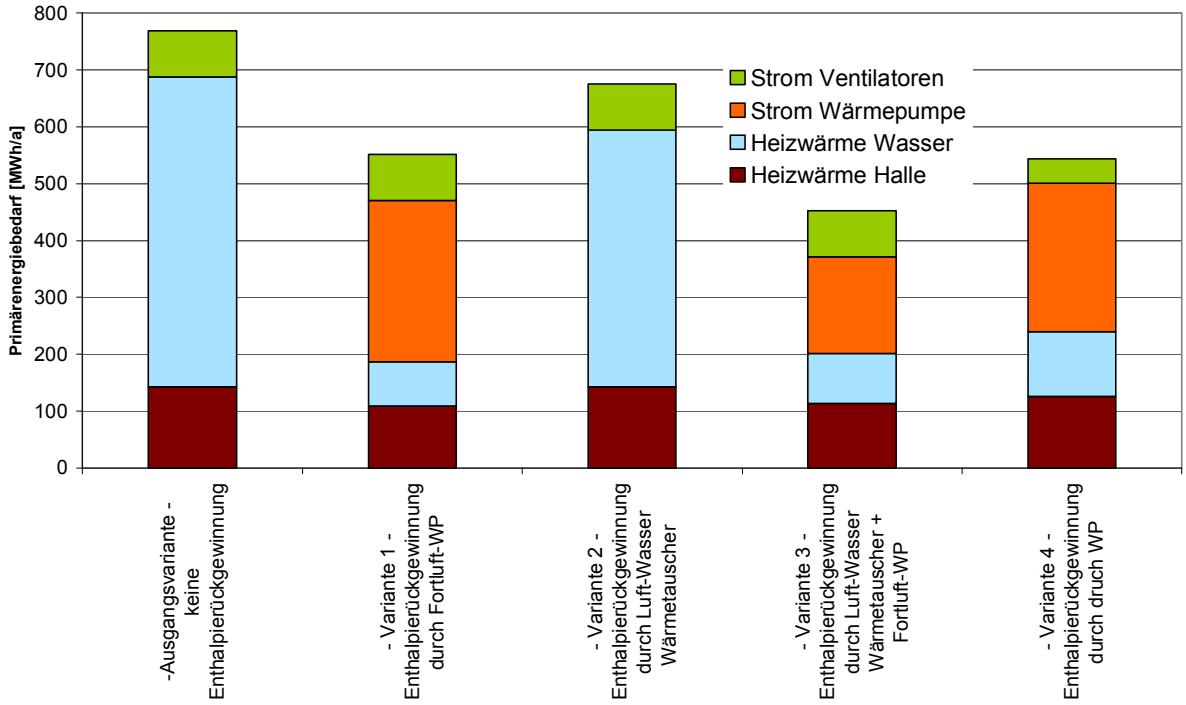


Abbildung 70: Vergleich der Varianten zur Nutzung der Enthalpie auf Basis des Primärenergiebedarfes – Primärenergiefaktor KWK =0,8; JAZ WP =6.

Ein weiterer Faktor, der das Verhältnis der Varianten untereinander maßgeblich beeinflusst, ist die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe. Diese ist für die Wärmeabgabe an den Warmwasserkreislauf mit 6 angenommen. Betrachtet man die Einsparpotentiale für eine Wärmepumpe mit schlechterer Arbeitszahl von z.B. 5, so ergibt sich folgendes Bild:

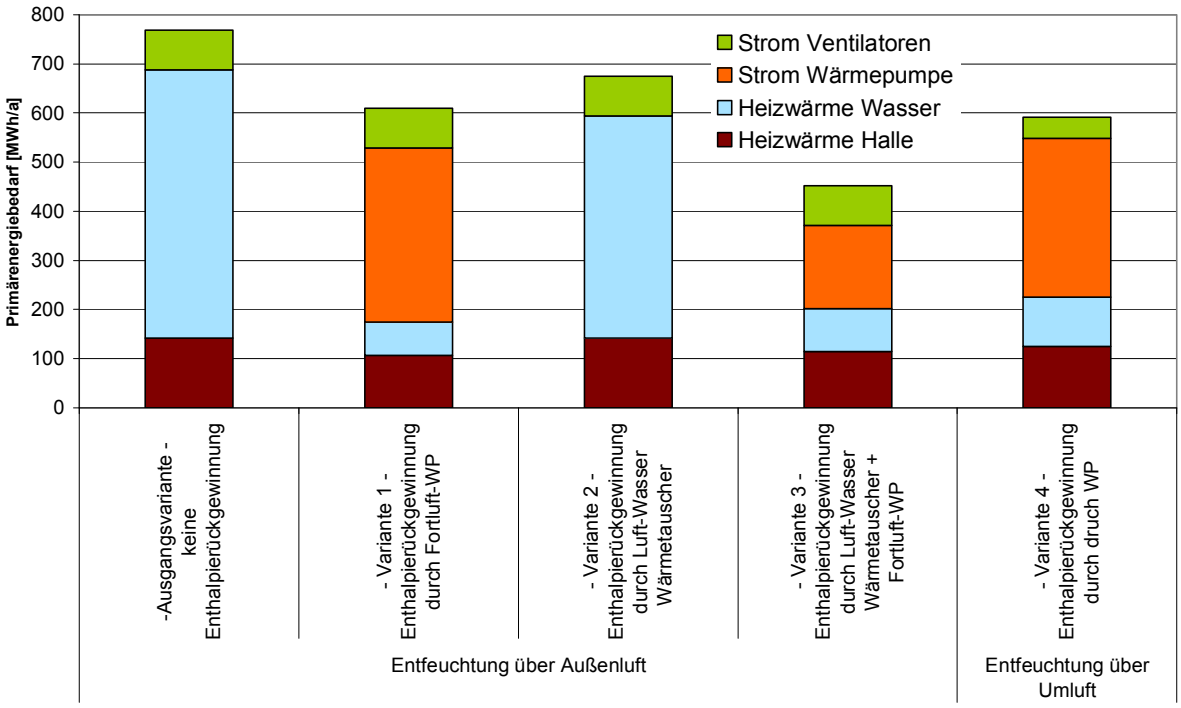


Abbildung 71: Vergleich der Varianten zur Nutzung der Enthalpie auf Basis des Primärenergiebedarfes – Primärenergiefaktor KWK =0,8; JAZ WP =5.

Die Einsparung der Varianten 1 und 4 gegenüber der Ausgangsvariante reduziert sich aufgrund der geringeren Jahresarbeitszahl auf nur noch 21 bis 23% und liegen damit noch etwas besser als Variante 2 (passiver Frischwasserwärmetauscher). Bei einem sehr guten Primärenergiefaktor der Nahwärmeversorgung (0,4) führt der Wärmepumpeneinsatz sogar zu einer Steigerung des Primärenergiebedarfes (Variante 1 und 4).

Bei dieser Analyse wurden die derzeitigen Primärenergiefaktoren in Ansatz gebracht. Insbesondere die Bewertung von Biomasse mit Faktor 0,4 kWh/kWh ist von großem Einfluss. Um im Sinne einer für die Gesamtnutzungsdauer eines Hallenbades nachhaltigen Planungsentscheidung Fehloptimierungen zu vermeiden, sollten die PE-Faktoren an dieser Stelle hinterfragt werden.

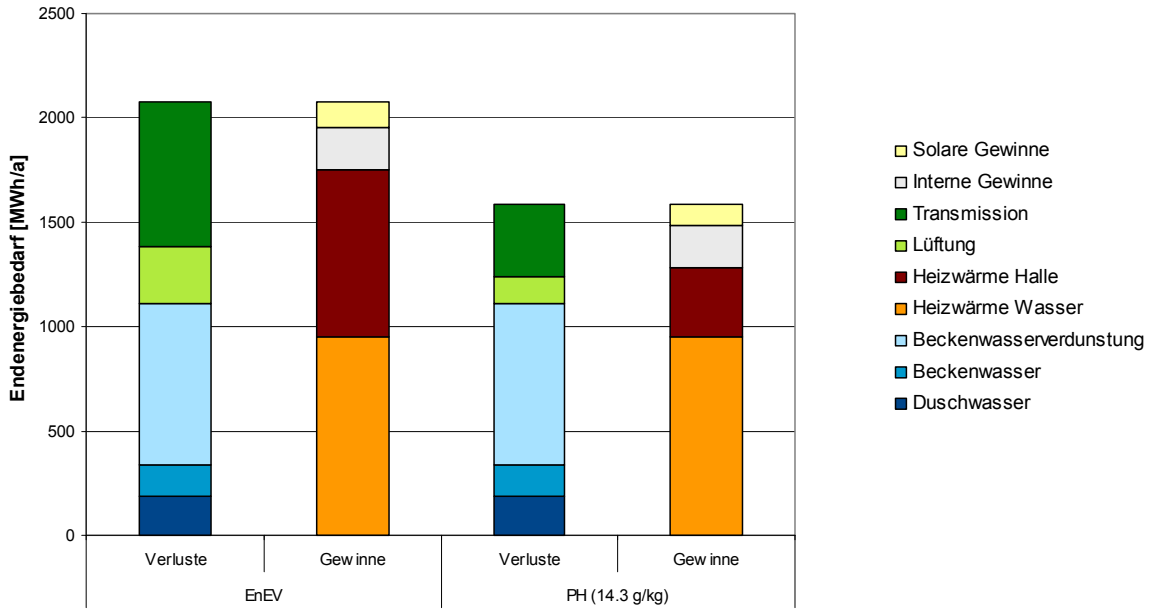
Unbestritten erlaubt die Nutzung von Biomasse einen hinsichtlich CO_2-Emissionen optimierten Gebäudebetrieb, auch sind solche Energieträger erneuerbar. Im Gegensatz zu den „technischen“ Quellen erneuerbarer Energie (Wind, Wasser, Sonne, etc.) sind die verfügbaren Energiemengen aber begrenzt und nicht wesentlich steigerbar [BMU 2004]. Zudem stehen die biogenen Ressourcen in zunehmender Nachfragekonkurrenz hinsichtlich Nahrungserzeugung und stofflicher Nutzung sowie zur Herstellung künstlicher Treibstoffe für den Verkehr. Dies wird auch die Einkaufspreise für solche Energieträger längerfristig beeinflussen.

Anders, als durch den günstigen PE-Faktor suggeriert, ist also auch im Bereich von Biobrennstoffen eine umsichtige und hoch effiziente Energienutzung unerlässlich. Der für die Zukunft anzunehmende deutliche Zuwachs bei den “technischen“ Formen

erneuerbarer Energien wird mit der Zeit eine Senkung des PE-Faktors für den Strom-Mix im europäischen Verbundnetz zur Folge haben. Dies sollte bei der Bewertung der Rechenergebnisse berücksichtigt werden.

6. Zusammenfassung der Ergebnisse

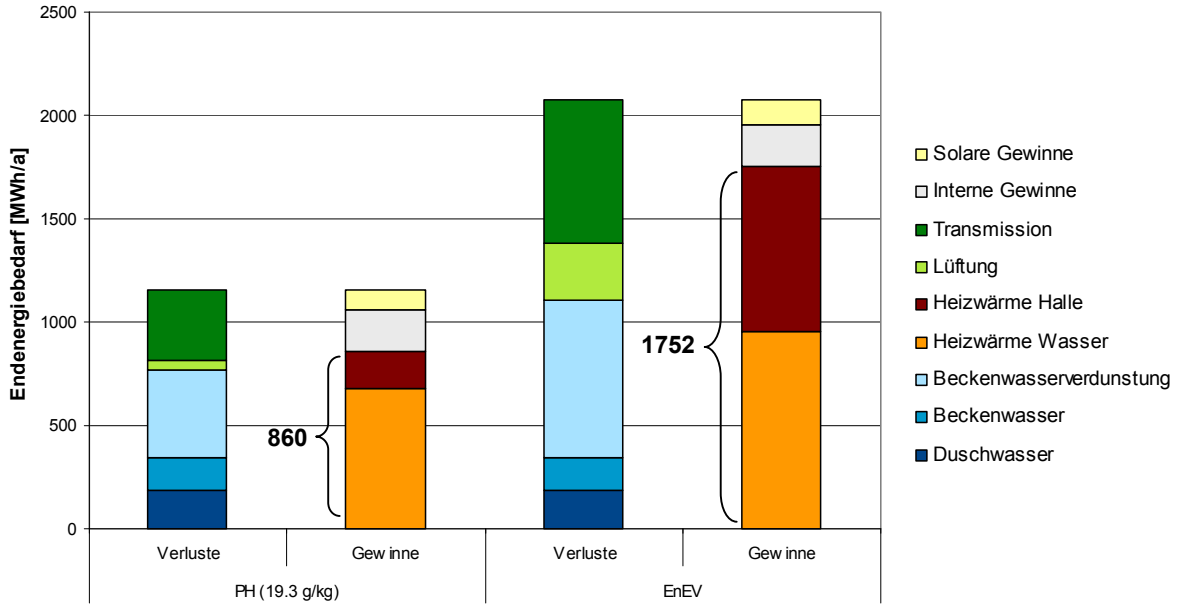
Hallenbäder weisen aufgrund der hohen Raumtemperaturen von 30 bis 34 °C und der hohen Beckenwasserverdunstung, die sowohl der Luft als auch dem Wasser Wärme entzieht, einen sehr hohen Energiebedarf auf. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde überprüft, ob der Passivhausstandard hier einen bedeutenden Beitrag zur Energieeinsparung leisten kann. Die aus dem Passivhauswohn- und -nichtwohnbau bekannten Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz waren aufgrund der verschärften Randbedingungen und der unterschiedlichen Bilanzanteile von Gewinnen und Verlusten zu überprüfen.
Den größten Einzelposten stellt der Energiebedarf der Verdunstung von Beckenwasser dar. Hieraus wird deutlich, wo die besondere Herausforderung zur Energieeinsparung liegt.



Das Einsparpotential durch eine sehr gut gedämmte, wärmebrückenfreie und luftdichte Gebäudehülle liegt in einer Größenordnung von 27 % gegenüber dem EnEV Standard. Je geringer der Energieverlust über die Gebäudehülle wird, desto deutlicher treten die Verlustanteile durch Wasserverdunstung in den Vordergrund.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zu bereits untersuchten Passivhaus-Nichtwohngebäuden besteht in der Dimensionierung und Regelung der Lüftung. In nahezu allen bis heute realisierten Passivhausprojekten wird der Luftwechsel nach

den Anforderungen einer hygienisch einwandfreien Raumluft dimensioniert. In Hallenbädern wird häufig über die Anpassung der Luftmengen die Hallenfeuchte geregelt. Diese Luftmengen liegen deutlich über der für die projektierte Nutzerzahl notwendige Frischluftmengen von 30 m³/(Person*h).
Die Ursache für die Wasserverdunstung ist das Dampfdruckgefälle zwischen Beckenwasser und Hallenluft. In Kapitel 5.1.2 wird der Einfluss der zulässigen Hallenluftfeuchte auf die Verdunstung diskutiert. Die wesentlichen Maßnahmen zur Reduzierung des Verdunstungsenergiebedarfes sind einmal die Minimierung der Verdunstung selbst und die Nutzung der in der Abluft enthaltenen Enthalpie.
Eine Reduzierung der Verdunstung kann effektiv nur über die Senkung des Dampfdruckgefälles erreicht werden. Die Anforderungen an eine sehr gute Behaglichkeit begrenzen den Spielraum zur Senkung von Luft- und Wassertemperaturen. Anforderungen an Materialschutz und Kondensatfreiheit bilden die Grenze für die Höhe der zulässigen Hallenluftfeuchte. Diese wird nach den derzeitigen Erkenntnissen bei einer Hallentemperatur von 32 °C auf 64 % begrenzt (19,3 g/kg).



Diese Anhebung der Hallenluftfeuchte bewirkt eine weitere deutliche Reduzierung der Heizwärme für Halle und Warmwasser aufgrund der geringeren Verdunstung. Gegenüber der EnEV Variante beträgt die Heizenergieeinsparung 50%.

Energieeinsparung durch hocheffiziente Gebäudehüllen

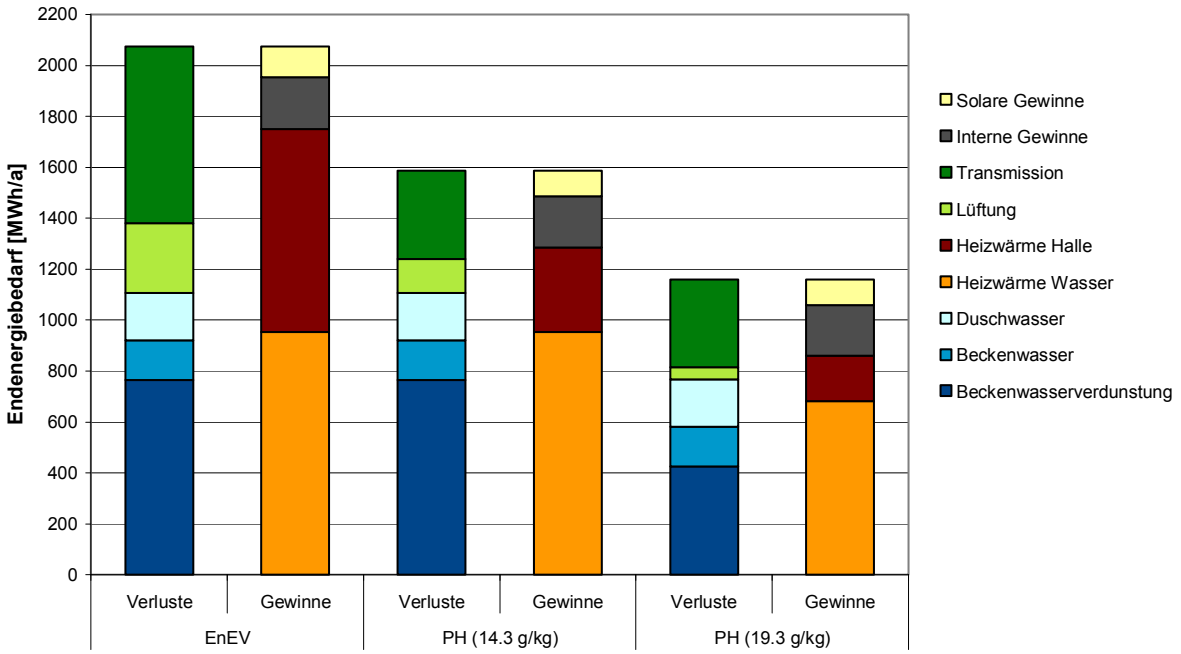
Hochwärmegedämmte Gebäudehüllen sind in unzähligen Passivhaus- und Niedrigstenergiehausprojekten bekannt. Hinsichtlich der verschärften Randbedingungen in Hallenbädern stellen sich aber Fragen bezüglich Luftdichtheit und Dampfdiffusionseigenschaften, insbesondere bei leichten Konstruktionen in Dach und Wand. Anhand von Dampfdiffusionsberechnungen verschiedener Wandaufbauten konnte gezeigt werden, dass die aus Wohn- und Bürobau bekannten

Wandaufbauten auch für Hallenbäder geeignet sind, solange Leckagen und Verletzungen der dampfdichten Innenseite sorgfältig vermieden werden.
Glasfassaden genießen in Hallenbädern besonders hohen Stellenwert. Reichen sie bis auf den Boden, so stellen sie für den Schwimmer im Becken als auch für die Besucher am Beckenrand einen Sichtbezug nach Außen her. Bei optimierter Planung leisten sie zudem einen beachtlichen Beitrag zur Tageslichtautonomie und damit zur Stromeinsparung (Kapitel 4.4). Nachteilig wirkt sich der höhere U-Wert der Glasfassaden im Vergleich zu opaken Bauteilen und die damit verbundene Gefahr von Kondensat bei niedrigen Außentemperaturen aus. Ist die Gebäudehülle wärmebrückenfrei konzipiert, so stellt der Glasrand der Pfosten-Riegel-Konstruktion den „schwächsten“ Punkt der Gebäudehülle dar. In Kapitel 2.1 werden konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung von Pfosten-Riegel-Fassaden vorgestellt. Hier liegt ein hohes Potential für weitere Energieeinsparungen von Gebäuden mit hohen Raumluftfeuchten. Allerdings sind bereits heute hochwertige Pfosten-Riegel-Systeme verfügbar, die Raumluftfeuchten bis zu 76% zulassen.
In Bezug auf die großen Glasfassaden wird häufig die Notwendigkeit einer Sonnenschutzverglasung diskutiert. Diese reduziert den Eintrag solarer Lasten in das Gebäude. Aufgrund der hohen Innenraumtemperaturen sind aber solare Gewinne ganzjährig nutzbar, sodass eine feste bauliche Reduzierung nicht erwünscht ist.
Anhand dynamischer Simulationen wurden die Temperaturverläufe der Halle im Sommerhalbjahr für verschiedene Klimazonen untersucht und hinsichtlich der Überhitzungsgefahr beurteilt. Selbst großzügig verglaste Hallen mit Süd-, West- und Ostfenstern liegen max. 2 K über der Solltemperatur, sodass die Verwendung von Sonnenschutzverglasung nicht erforderlich ist.
Die hohe thermische Qualität einer Hülle nach Passivhausanforderungen macht es nach momentanem Kenntnisstand nicht erforderlich zu dem Außenluftwechsel einen zusätzlichen Umluftwechsel vorzusehen. Die Durchspülung der Halle wird bei guter Planung der Zuluftelemente auch bei geringeren Luftmengen sichergestellt.

Einsparung durch hocheffiziente Gebäudetechnik

Der zweite Teil der Studie beschäftigt sich überwiegend mit der Frage wie die in der Abluft enthaltene Enthalpie zurückgewonnen werden kann. Die Abluft enthält je Kilogramm trockene Luft 19,3 g Wasser (32 °C und 64 % rel.H.). Selbst hocheffiziente Lüftungsgeräte mit trockenen Wärmebereitstellungsgraden von 85 % können nur einen kleinen Teil der gebundenen Feuchte auskondensieren. Die Fortluft besitzt mit 19 °C und knapp 14 g/kg immer noch eine hohe Enthalpie. Als Varianten zur Enthalpierückgewinnung wurden aktive Systeme mit Wärmepumpen und passive Systeme mit Frischwasserwärmetauschern untersucht. Erstere können die Fortluft stark abkühlen und gewinnen einen großen Teil der Enthalpie zurück, allerdings unter nennenswertem Stromeinsatz. Frischwassergegenströmer kühlen die Fortluft bis auf max. 10 °C ab, benötigen aber keinerlei Strom. Der Einsatz von

Wärmepumpen zur Enthalpierückgewinnung erfordert zudem nicht zwingend hocheffiziente Wärmerückgewinner. Wird stattdessen ein Standardgerät (75 %) gewählt, so wird dies zum überwiegenden Teil von der Wärmepumpe kompensiert.
Wird allerdings auf den Einsatz von aktiven oder passiven Maßnahmen zur Enthalpierückgewinnung verzichtet, so steigt die Bedeutung eines hocheffizienten Wärmeübertragers.



Der Vergleich einer außenluftgeführten Volumenstromregelung mit nachgeschalteter Fortluftwärmepumpe im Vergleich zum Umluftbetrieb mit Wärmepumpe zeigt, dass die Umluftvariante zu geringen Mehreinsparungen führt. Dies wird allerdings mit einem deutlich geringeren Frischluftanteil (30% des Auslegungsvolumenstroms) erkauft. Aufgrund der offenen Fragestellung hinsichtlich Schadstoffbelastungen wird bis zum Vorliegen neuerer Erkenntnisse ein höherer Außenluftwechsel und damit die Variante mit Fortluftwärmepumpe als empfehlenswert erachtet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch weitgehende Effizienzmaßnahmen an Gebäudehülle und –technik eine Primärenergieeinsparung für Heizwärme der Halle und des Wassers sowie für Ventilatorenstrom von 60 % gegenüber einem EnEV-Hallenbad erreichbar ist. Durch Nutzung der Fortluftenthalpie lässt sich eine weitere Primärenergieeinsparung von nochmals 40% erreichen.

7. Literatur

[Stichel 1986]	Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen, *Stichel, Wolfgang* Forschungsbericht 126, S. 41, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin 08/1986
[VDI 2089]	Technische Gebäudeausrüstung von Schwimmbädern Hallenbäder, VDI 2089, Entwurf März 2005
[ASHRAE 2005]	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE): ASHRAE 2005 Fundamentals.
[Gagge 1986]	A standard predictive index of human response to the thermal environment, *Gagge, A.P., A.P.Fobelets, L.G. Berglund* ASHRAE Transactions, Vol. 92:2B (1986), 709-731.
[Stottmeister 2006]	Trichloramin in der Hallenluft, *Stottmeister, Ernst; Voigt, Kerstin,* Bädertechnik, A.B. Archiv des Badewesens
[WITTING 1997]	Praktikable Qualitätssicherungskonzepte für die Routine Spurenanalytik Organischer Schadstoffe, *Witting U., Cammann K., Binding N., Karst U., Pötter W., Czeschinski P.A., Kläning H.*
[DIN EN ISO 13790]	Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008); Deutsche Fassung EN ISO 13790:2008 ; September 2008
[PHPP2007]	Energiebilanz Software : Passivhaus Projektierungs Paket 2007 Passivhaus Institut Darmstadt
[Kah 2009]	Leitfaden für energieeffiziente Bildungsgebäude im Neubau und bei der Modernisierung" *Kah Oliver* , Passivhaus Institut, 2009
[Schnieders 2009]	Passive Houses in South West Europe. A quantitative investigation of some passive and active space conditioning techniques for highly energy efficient dwellings in the South West European region. 2nd, corrected edition. *Schnieders, Jürgen.* Darmstadt, Passivhaus Institut, 2009
[DWD]	Deutscher Wetter Dienst
[Delphin 4]	Bauklimatik Dresen Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Stofftransport
[Gundermann 1997]	Trihalogenmethane in Hallenbädern mit Meerwasser- und Solebecken, Belastungen von Wasser, Luft und Personen – Faktoren der Bildung – Möglichkeiten der Verminderung, *Gundermann K.O., Jentsch F., Matthiessen A.* Institut für Hygiene und Umweltmedizin der Universität Kiel, 1997
[BMU 2004]	Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland, *J. Nitsch, M. Pehnt, M. Fischedick u. a.,* DLR Stuttgart, IFEU Heidelberg, WI Wuppertal, Forschungsvorhaben FKZ 901 41 803 im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2004.
[SOLIDO]	PHYSIBEL SOFTWARE for thermal simulation
[BMBF-Projekt 2003]	Abschlussbericht für das BMBF-Projekt : 02 WT 0001/9 :Minimierung von Desinfektionsnebenprodukten unter Berücksichtigung chemischer Aspekte und neuer Aufbereitungstechnologien. Engler-Bunte-Institut, Lehrstuhl für Wasserchemie
[Zywicki 2006]	Menerga Apparatebau GmbH *Dipl.-Ing (FH) Christian Zywicki*

[DIN EN ISO 7730]	Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005, Berichtigungen zu DIN EN ISO 7730:2006-05
[DIN 18334]	Zimmer- und Holzbauarbeiten ATV DIN 18334, Stand Oktober 2006
[DIN 68800]	Holzschutz – Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau (1996)
[DIN 67526-3]	DIN 67526 Teil 3, Sportstättenbeleuchtung, Richtlinien für die Beleuchtung mit Tageslicht, Berlin 1976.
[DIN EN 12193]	DIN EN 12193, Licht und Beleuchtung – Sportstättenbeleuchtung, Berlin 2008.
[FVLR]	Fachverband Tageslicht und Rauchschutz e. V., Heft 9, Lichtkuppeln und Lichtbänder, Heft 9, Detmold, www.fvlr.de
[KOK 2002]	Koordinierungskreis Bäder, Richtlinien für den Bäderbau, Deutsche Gesellschaft für das Badewesen e.V., Essen 2002.
[LEE]	Leitfaden Elektrische Energie im Hochbau, Institut Wohnen und Umwelt, im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten, Darmstadt 2000.
[SIA 380/4]	Elektrische Energie im Hochbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Ausgabe 2006.
[SLG 1989]	Schweizerische Lichttechnische Gesellschaft (SLG/USL), Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht, SEV 8911.1989 SEV / VSE, Zürich, 1989.

Anhang

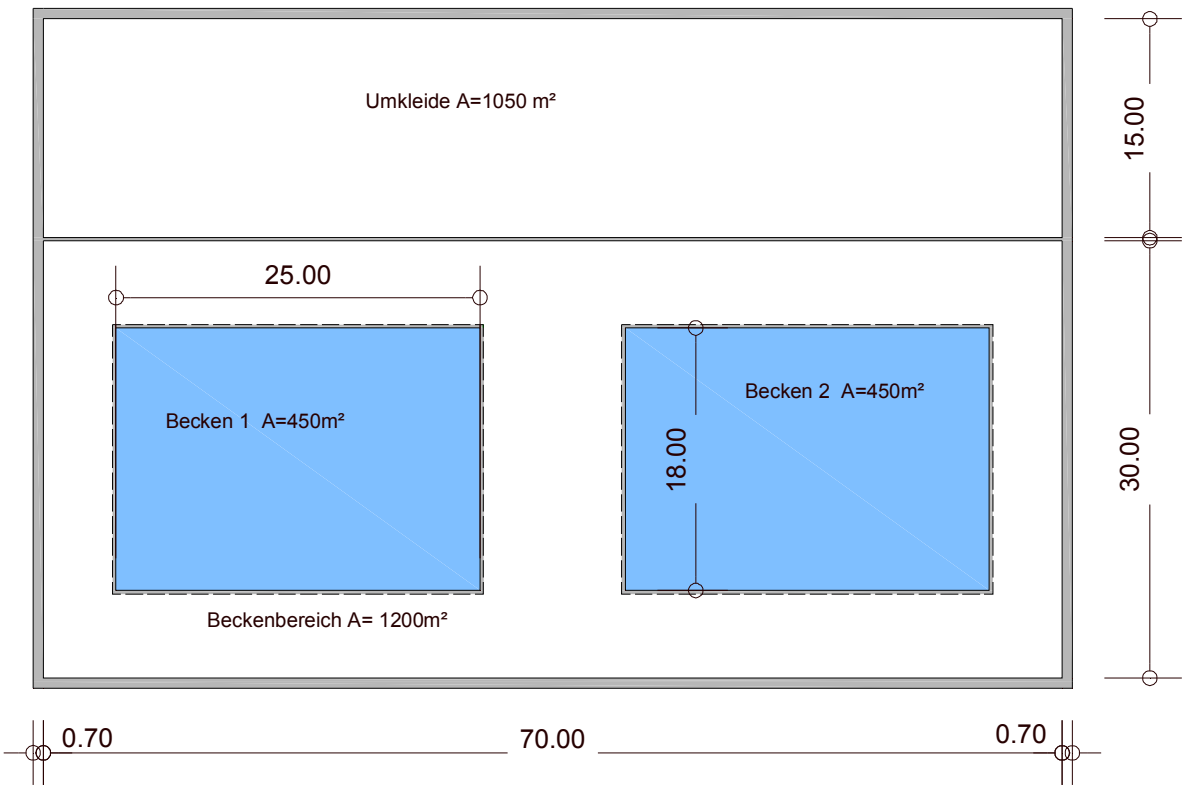
A Dokumentation des Simulationsmodells

A.1 Allgemeines

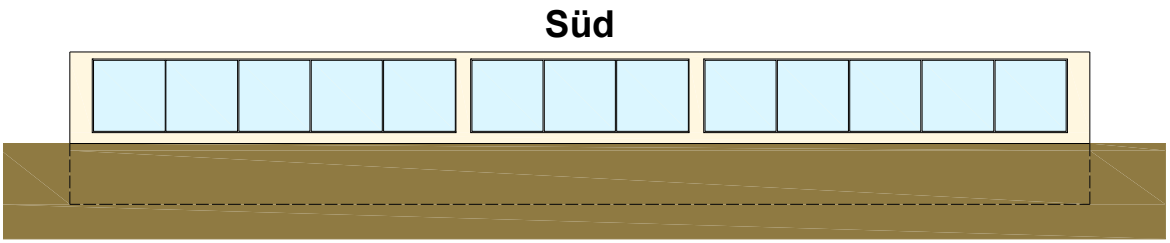
Für die dynamische Gebäudesimulation wurde ein einfaches Modell einer kompakten Schwimmhalle verwendet. Die Abbildungen in den folgenden Abschnitten zeigen die Ansichten sowie Querschnitte und den Grundriss der Halle. Es handelt sich um ein kompaktes, teilweise unterkellertes Gebäude mit verglasten Flächen in alle Himmelsrichtungen. Die Halle enthält zwei Schwimmbecken mit je 25 m Länge bzw. einer gesamten Wasseroberfläche von 900 m². Wasserattraktionen wurden zunächst nicht berücksichtigt. An die Nordseite der Halle grenzt der Eingangs- und Umkleidebereich an. Von Interesse sind jedoch nur die Verhältnisse in der Schwimmhalle, der Umkleidebereich wurde im Rahmen dieser Untersuchung daher nicht im Detail betrachtet.

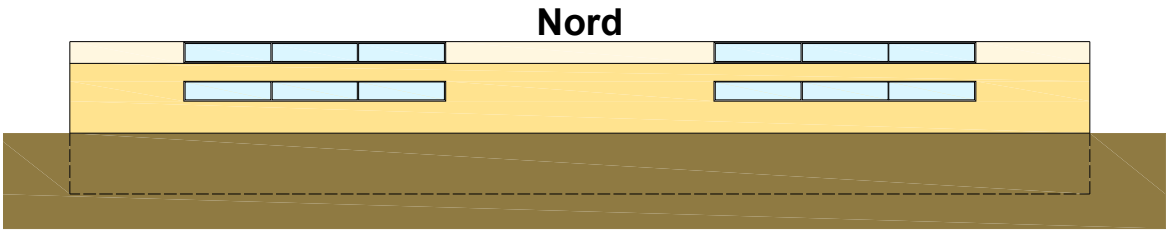
Betriebszeiten: Täglich 6 bis 22 Uhr
Tägliche Besucherzahl: 600 Personen

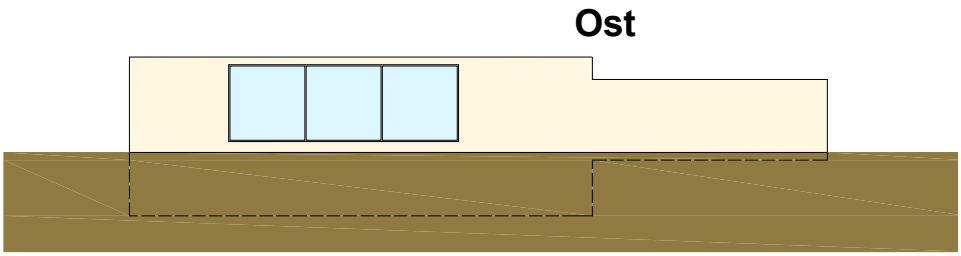
A.2 Grundriss

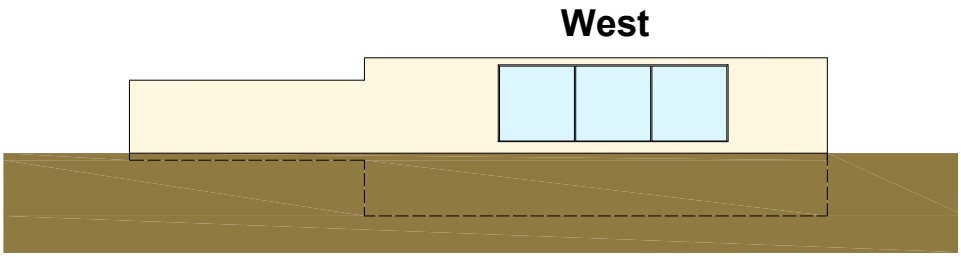


A.3 Ansichten









A.4 Zoneneinteilung

Zone 1 = Halle
Zone 2 = Becken 1
Zone 3 = Becken 2
Zone 4 = Keller
Zone 5 = Umkleide

A.5 Bauteile

Außenwand				
U-Wert des Bauteils [W/(m²K)]			**0.106**	
Material	**Dicke d [cm]**	**Dichte ρ [kg/m³]**	**Wärme-kapazität c [kJ/(kgK)]**	**Wärmeleit-fähigkeit λ [W/(mK)]**
Außenputz	**1.5**	**1900**	**0.85**	**0.8**
Polystyrol-Hartschaum 035	**30**	**30**	**1.8**	**0.035**
Ziegelmauerwerk 1400	**36.5**	**1400**	**0.836**	**0.58**
Zementputz	**1.5**	**2000**	**1.05**	**1.4**

Dach				
U-Wert des Bauteils [W/(m²K)]			**0.111**	
Material	**Dicke d [cm]**	**Dichte ρ [kg/m³]**	**Wärme-kapazität c [kJ/(kgK)]**	**Wärmeleit-fähigkeit λ [W/(mK)]**
Betondachsteine	**4**	**2400**	**1.08**	**2.3**
Luftschicht horizontal	**2**	**42**	**0.272**	**0.12**
Polystyrol-Hartschaum 035	**30**	**30**	**1.8**	**0.035**
Spanplatte	**1.3**	**600**	**1.98**	**0.13**

Bodenplatte				
U-Wert des Bauteils [W/(m²K)]			**0.129**	
Material	**Dicke d [cm]**	**Dichte ρ [kg/m³]**	**Wärme-kapazität c [kJ/(kgK)]**	**Wärmeleit-fähigkeit λ [W/(mK)]**
Styrodur	**30**	**33**	**1.5**	**0.04**
Normalbeton	**20**	**2400**	**1.08**	**2.1**

Kellerwand				
U-Wert des Bauteils [W/(m²K)]			**0.129**	
Material	**Dicke d [cm]**	**Dichte ρ [kg/m³]**	**Wärme-kapazität c [kJ/(kgK)]**	**Wärmeleit-fähigkeit λ [W/(mK)]**
Styrodur	**30**	**33**	**1.5**	**0.04**
Normalbeton	**17.5**	**2400**	**1.08**	**2.1**

Beckenaufbau				
U-Wert des Bauteils [W/(m²K)]			**2.638**	
Material	**Dicke d [cm]**	**Dichte ρ [kg/m³]**	**Wärme-kapazität c [kJ/(kgK)]**	**Wärmeleit-fähigkeit λ [W/(mK)]**
Normalbeton	**25**	**2400**	**1.08**	**2.1**

Trennwand				
U-Wert des ungedämmten Bauteils [W/(m²K)]			**2.742**	
Material	**Dicke d [cm]**	**Dichte ρ [kg/m³]**	**Wärme-kapazität c [kJ/(kgK)]**	**Wärmeleit-fähigkeit λ [W/(mK)]**
Zementputz	**1.5**	**2000**	**1.05**	**1.4**
Normalbeton	**17.5**	**2400**	**1.08**	**2.1**
Polystyrol-Hartschaum 035	**0 / 20**	**30**	**1.8**	**0.035**
Zementputz	**1.5**	**2000**	**1.05**	**1.4**

Zwischendecke				
U-Wert des ungedämmten Bauteils [W/(m²K)]			**2.566**	
U-Wert des gedämmten Bauteils [W/(m²K)]			**0.167**	
Material	**Dicke d [cm]**	**Dichte ρ [kg/m³]**	**Wärme-kapazität c [kJ/(kgK)]**	**Wärmeleit-fähigkeit λ [W/(mK)]**
Zementputz	**1.5**	**2000**	**1.05**	**1.4**
Normalbeton	**25**	**2400**	**1.08**	**2.1**

A.6 Fenster

Im Folgenden sind die Fenster- und Fensterrahmeneigenschaften aufgelistet. Die Tabelle beschreibt die Größen der verglasten Flächen auf den einzelnen Fassaden.

U-Wert = 0,7 W/(m²K)
g-Wert = 0,5 bzw. 0,25 bei Sonnenschutzverglasung
ΨEinbau = 0,04 W/(mK)
ΨGlasrand = 0,038 W/(mK)

Fassade	**Verglaste Fläche (m²)**		**Verglasungsanteil**	
	Variante 1	**Variante 2**	**Variante 1**	**Variante 2**
Nord (Umkleide)	**75**		**23 %**	
Nord	**75**		**53 %**	
Ost	**0**	**75**	**-**	**37 %**
Süd	**250**	**325**	**54 %**	**70 %**
West	**0**	**75**	**-**	**37 %**

A.7 Lüftung

Die Simulation enthält zwei Modelle für die Führung der Luftvolumenströme: In einer Variante werden alle Volumenströme der verschiedenen Zonen (Halle, Umkleide, Keller) vermischt und über ein großes zentrales Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung geführt. Das zweite Modell hingegen enthält zwei getrennte Lüftungsgeräte. Hier wird die Hallenbelüftung vom restlichen Lüftungskonzept getrennt betrachtet. In diesem Fall kann die Wärmerückgewinnung für die Zonen 4 und 5 (Keller, Umkleide) per Sommerbypass zwischen Mai und September umgangen werden. Die effektiven trockenen Wärmebereitstellungsgrade beider Wärmetauscher beträgt 85 %.

In der Schwimmhalle (Zone 1) richtet sich der Außenvolumenstrom nach den Feuchteverhältnissen, er wird in jedem Zeitschritt neu berechnet um die gewünschte Hallenfeuchte zu halten. Die Begrenzungen für den maximalen und minimalen Außenluftvolumenstrom wurden nach den Anforderungen der DIN 2089 ausgelegt (Maximal: Auslegungsvolumenstrom der Lüftungsanlage nach DIN 2089; Minimal: 30% des Auslegungsvolumenstroms bzw. 15% wenn die Schadstoffkonzentration dies zulässt). Soll die Entfeuchtung *nicht* ausschließlich über die Außenluft erfolgen, so wird der Halle während den Öffnungszeiten durchgängig der minimal erforderliche Außenluftvolumenstrom zugeführt. Außerhalb der Öffnungszeiten findet in diesem Fall kein Luftaustausch zwischen der Halle und der Außenluft statt. Die Hallenluft wird aktiv entfeuchtet, um das gewünschte Feuchtniveau zu erreichen.

In der Umkleide (Zone 5) und dem Keller (Zone 4) sind während den Öffnungszeiten konstante Luftwechselraten von jeweils 0,4 h^{-1} und 0,2 h^{-1}angesetzt. Zusätzlich wird im Umkleidebereich (Zone 5) der nach DIN 2089 erforderliche Volumenstrom für die Duschen zu- und abgeführt. Nachts findet in diesen Zonen kein mechanischer Luftwechsel statt.

In allen belüfteten Zonen kommt durchgängig eine Infiltration durch die Undichtheit des Gebäudes hinzu, welche mit einem n_{50}-Wert von ca. 0,6 h^{-1} berücksichtigt wurde. Eine zusätzliche Lüftung über die Fenster wurde zunächst nicht angesetzt, wobei dieser Effekt im Falle von Überhitzung im Sommer gegebenenfalls in einer weiteren Studie untersucht werden sollte.

Zwischen der Schwimmhalle und den Umkleiden findet bedingt durch den Personenverkehr ein Luftaustausch statt. Dieser wird mit einem mittleren Austausch von 1250 m³/h während den Öffnungszeiten berücksichtigt.

A.8 Heizung und Kühlung

Die folgenden Soll-Temperaturen gehen aus der DIN 2089 hervor. Die Schwimmhalle (Zone 1) wird auf 32 °C beheizt, während die Becken (Zonen 2 & 3) durch aktive Beheizung oder ggf. Kühlung mit einer konstanten Temperatur von 28 °C simuliert werden. Die Solltemperatur des angrenzenden Eingangs- bzw. Umkleidebereiches (Zone 5) liegt bei 24 °C. Ausschließlich der Keller wird im Modell nicht aktiv gekühlt oder geheizt, da es hier keine konkreten Anforderungen an die Temperaturverhältnisse gibt.
Der Heizbedarf des nachfließenden Frischwassers wird in der Simulation nicht berücksichtigt.

A.9 Interne Wärmegewinne

Es wurde von einer Beleuchtungsstärke von 200 lux ausgegangen, sowohl in der Schwimmhalle als auch im Umkleidebereich. Dies entspricht einer Leistung von 7,2 W/m². Im Umkleidebereich (Zone 5), bei einer durchschnittlichen täglichen Beleuchtungszeit von 8 Stunden wegen geringer Tageslichtnutzung, ergibt sich eine mittlere Leistung von 3,6 W/m². Für die Halle (Zone 1) wird eine sehr gute Tageslichtnutzung vorausgesetzt, so dass die Beleuchtung nur in den Morgen- und Abendstunden benötigt wird. Somit liegt die Berechnung des Heizwärmebedarfs eher auf der sicheren Seite. Es wurde zwischen den Sommer- und Wintermonaten differenziert, mit 3 Beleuchtungsstunden während den Sommermonaten und 8 Stunden im Winter.

Im Umkleidebereich (Zone 5) wurde zusätzlich eine mittlere Leistung von 1,9 kW für die sich dort aufhaltenden Personen gerechnet.

Im Keller (Zone 4) bestehen die internen Wärmegewinne aus der Wärmeabgabe der installierten Pumpen. Bei einer elektrischen Pumpeneffizienz von 80 % ergibt sich eine mittlere Wärmeabgabe von durchgängig 4,2 kW.

A.10 Verdunstung / Feuchtequellen

Die verdunstende Wassermenge der Schwimmbecken wurde nach VDI 2089 berechnet. In der folgenden Tabelle sind alle verwendeten Wasserübergangs-koeffizienten aufgelistet. Die Verdunstungsenthalpie wird zu 100 % oder 80 % dem Wasser entzogen (zwei Varianten).

		Wasserübergangs-koeffizient [m/h]
Während den Öffnungszeiten	**Durchgängig benutztes Becken**	**28**
	Reduzierte Verdunstung	**14**
Außerhalb der Öffnungszeiten	**Unbedeckte Wasseroberfläche**	**7**
	Bedeckte Wasseroberfläche	**0,7**

Im Umkleidebereich sind die Duschen als Feuchtequelle mit durchschnittlich 20 kg/h Wasserverdunstung berücksichtigt (Abschätzung).

A.11 Verschattung

Es wurde keine Verschattung des Gebäudes berücksichtigt. Für die Fensterflächen wurde keine außenliegende Verschattung angesetzt.

A.12 Klima

Verwendet wurden am PHI vorliegende Datensätze des Testreferenzjahres [DWD] der Regionen 4 (Berlin), 5 (Essen), 12 (Frankfurt) und 13 (Muenchen).

B Vergleichsmodell EnEV

B.1 Bauteile

Außenwand

U-Wert des Bauteils [W/(m²K)]			0.427
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Außenputz	1.5	1900	0.8
Dämmung	8	30	0.040
Stahlbeton	36.5	2400	2.1
Zementputz	1.5	2000	1.4

Dach

U-Wert des Bauteils [W/(m²K)]			0.44
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Stahlbeton	30	2400	2.3
Dämmung	8	30	0.040

Bodenplatte

U-Wert des Bauteils [W/(m²K)]			0.349
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Estrich	6	2000	1.4
Dämmung	4	30	0.04
Stahlbeton	30	2400	2.1
Dämmung	6	30	0.04

B.2 Fenster

Im Folgenden sind die Fenster- und Fensterrahmeneigenschaften aufgelistet. Die folgende Tabelle beschreibt die Größen der verglasten Flächen auf den einzelnen Fassaden.

U-Wert = 1,2 W/(m²K)
g-Wert = 0,6

Fassade	Verglaste Fläche (m²)
Nord Umkleide	**75**
Ost	**75**
Süd	**300**
West	**75**

B.3 Lüftung

Das Lüftungsgerät besitzt einen Wärmeübertrager mit 75 % Wärmerückgewinnung. Die Luftmengen sind entsprechend der VDI 2089 für eine Hallenfeuchte von 14,3 g/kg ausgelegt. Zusätzlich zum erforderlichen Außenluftstrom wird ein Umluftstrom zur besseren Durchspülung der Halle vorgesehen. Die Stromeffizienz der Ventilatoren wird mit 0,9 Wh/m³ entsprechend den geltenden Anforderungen angenommen.

5.2 Anlage 2

Integrale Planung für die Realisierung eines öffentlichen Hallenbades mit Konzepten der Passivhaustechnologie

Integrale Planung für die Realisierung eines öffentlichen Hallenbades mit Konzepten der Passivhaustechnologie

Endbericht Lünen, Dezember 2011

Autorinnen und Autoren:
Dipl.-Ing. Olaf Ahrens (ENERATIO Ingenieurbüro für rationellen Energieeinsatz GbR, Hamburg)
Dipl.-Ing. Stefan Beckert (*CONSTRATA*, Ingenieur-Gesellschaft mbH, Bielefeld)
Dipl.-Ing. Thomas Franke (Ingenieursozietät Schürmann – Kindmann und Partner GbR, Dortmund)
MPhys. Jessica Grove-Smith (Passivhaus Institut, Darmstadt)
Dipl.-Ing., Architekt Andreas Hitz (nps tchoban voss GmbH & Co.KG, Hamburg)
Dipl.-Ing. Wolfgang Horstmann (Ingenieurbüro für Akustik und Lärm-Immissionsschutz, Hagen)
Dipl.-Phys. Oliver Kah (Passivhaus Institut, Darmstadt)
Dr.-Ing., Dipl.-Ing. Gerd Koch (Bädergesellschaft Lünen mbH, Stadtwerke Lünen GmbH, Lünen)
Dr.-Ing. Benjamin Krick (Passivhaus Institut, Darmstadt)
Dipl.-Ing. Uwe Ostermann (Ostermann Ingenieur-Büro für Tragwerksplanung, Lünen)
Dipl.-Ing. Sören Peper (Passivhaus Institut, Darmstadt)
Dipl.-Ing. Markus Pöter (Ingenieursozietät Schürmann – Kindmann und Partner GbR, Dortmund)
Dipl.-Ing. Tanja Schulz (Passivhaus Institut, Darmstadt)
Dipl.-Ing. Frank Bramey (Stapelmann & Barmey AG, Architekten und Ingenieure, Schalksmühle)

Bädergesellschaft Lünen mbH
Borker Straße 56-58
44534 Lünen
Tel. 02306 / 707-111
E-Mail: info@baeder-luenen.de
www.baeder-luenen.de

Stadtwerke Lünen GmbH
Borker Straße 56-58
44534 Lünen
Tel. 02306 / 707-111
E-Mail: info@SWL24.de
www.SWL24.de

nps tchoban voss GmbH & Co. KG
Kommanditisten:
Dipl.-Ing. Architekt Alf M. Prasch
Dipl.-Ing. Architekt Sergei Tchoban
Dipl.-Ing. Architekt Ekkehard Voss
Ulmenstraße 40 22299 Hamburg 040/48 06 18-0
www.npstv.de, mail@npstv.de

INGENIEURBÜRO FÜR RATIONELLEN ENERGIEEINSATZ GbR
Olaf Ahrens-Michael Hildmann
Gerd Holtkamp-Michael Müller

Alsterdorfer Straße 276, 22297 Hamburg
Tel: 040-514828-0 www.eneratio.de

Rheinstr. 44-46
64283 Darmstadt
Tel. 06151 / 826 99-0
E-Mail:mail@passiv.de
www.passiv.de

Stapelmann und Bramey AG
Architekten und Ingenieure
info@stapelmann-bramey.de

Mühlenweg 28
58579 Schalksmühle
Tel: 02355/ 9283-0

Ingenieurbüro für Akustik und
Lärm-Immissionsschutz
Dipl.-Ing. Peter Buchholz
E-Mail: ialhagenbuchholz@aol.com

Eppenhauser Sraße 101
58093 Hagen
Tel: 02331 51616
Fax: 02331 58015

CONSTRATA
Ingenieur-Gesellschaft mbH
E-Mail: beckert@constrata.de

Oberntorwall 16-18
33602 Bielefeld
Tel: 0521 400 75-0
Fax:0521 400 75-10

OSTERMANN
Ingenieur Büro für Tragwerksplanung
E-Mail: info@ib-ostermann.de

Münsterstraße 50
44534 Lünen
Tel: 02306 306130
Fax: 02306 3061320

Ingenieursozietät Schürmann, Kindmann
und Partner GbR, Dortmund
E-Mail: info@skp-ing.de

Prinz-Friedrich-Karl-Str. 36
44135 Dortmund
Tel: 0231 9520770
Fax: 0231 47717920

Gefördert durch die

DBU Aktenzeichen: 27316 – 24/2

Inhaltsverzeichnis

1 Vorwort: Gemeinschaftlich verantwortungsvoll gestalten 1
2 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 3
3 Einführung 7
3.1 Die integrale Planung als Projektgrundlage 7
3.2 Projektbeschreibung 11
3.3 Baurechtliche Grundlagen 12
3.4 Optimierungen der Konzeptionen für einen ökologisch nachhaltigen und zukunftsorientierten Standort Lippe Bad Lünen 12
3.5 Projektsteuerung 15
4 Gebäude 19
4.1 Baugrundstück 19
4.2 Baukörper- und Bereichsgliederung 21
4.3 Statisches Konzept 26
4.3.1 Bestandsgebäude, ehemaliges Fernheizwerk 26
4.3.2 Neubauteil 28
4.4 Farbliche Gestaltung der Außenbauteile 30
4.5 Bauteilkonstruktionen Gebäudehülle 30
4.5.1 Boden gegen Erdreich 31
4.5.2 Außenwand gegen Erdreich 32
4.5.3 Außenwand gegen Außenluft 32
4.5.4 Dächer gegen Außenluft 33
4.5.5 Fenster und Glasfassaden 34
4.5.6 Innenbauteile zwischen Temperaturzonen 42
4.6 Wärmebrücken 44
4.7 Luftdichtheitskonzept 47
4.8 Sommerfall 48
4.9 Tageslichtoptimierung 48
4.9.1 Tageslichtquotient 48
4.9.2 Optimierung der Tageslichtnutzung im Gebäudebestand 49
4.9.3 Optimierung der Tageslichtnutzung im Hallenbereich Ost 54
4.9.4 Optimierung der Tageslichtnutzung im westlichen Neubau 58
5 Gebäudetechnik 61
5.1 Allgemeines 61
5.2 Energieversorgung, Primärenergiefaktoren 61
5.3 Lüftungstechnik und Wärmerückgewinnung 62
5.3.1 Auslegung 62
5.3.2 Regelung 65
5.4 Reduzierung der Verdunstung: Wesentliches Energiesparpotential erschlossen 66
5.5 Beckenwasser- und Schwimmbadtechnik 67
5.5.1 Optimierung der Hydraulik 67
5.5.2 Beckenwassererwärmung: Abwärmenutzung 68
5.5.3 Filtration: Ultrafiltration bringt Vorteile 68
5.5.4 Chlorung: Sicherste und behaglichste Lösung gewählt 70
5.6 Heizungstechnik 71
5.6.1 Wärmebedarf: Wesentlich reduziert 71
5.6.2 Wärmeversorgung: Brennwertnutzung 71
5.6.3 Wärmeverteilung: Keine statischen Heizflächen 72
5.7 Trink-/Brauchwasser, Abwasser, Regenwasser 73

5.7.1 Spülabwasser: Kontinuierlicher Anfall ermöglicht Recycling 73
5.7.2 Regenwassernutzung: Wegen des Recycling-Konzeptes nicht sinnvoll 75
5.7.3 Brauchwasser: Konsequenter Einsatz wassersparender Technik 75
5.7.4 Trinkwasserhygiene: Ultrafiltration und Chlordioxidzugabe 75
5.7.5 Trinkwarmwasser: Zirkulationsleitung vermieden 76
5.8 Elektroeinsatz und Effizienzbedingungen 76
5.8.1 Strombedarf: Reduktion und Eigenerzeugung 76
5.8.2 Beleuchtung: Reduktion des Energiebedarfes durch effiziente Leuchten, intelligente Steuerung und Lichtsimulationen 77
5.8.3 Anlagentechnik: Effiziente Pumpen, Motoren, Ventilatoren und Verdichter 78
5.9 Monitoring 79
5.9.1 In-Situ-Messungen von Energie- und Stoffströmen, Temperatur und Luftfeuchte 79
5.9.2 Luftschadstoffe 80
5.9.3 Blower Door Messung 81
5.9.4 Thermographie 81
6 Energiebilanz / Simulation 81
6.1 Stationäre Energiebilanz 82
6.1.1 Zonierung 82
6.1.2 Randbedingungen 84
6.1.3 Ergebnisse 88
6.2 Dynamische Gebäudesimulation 91
6.2.1 Zonierung 91
6.2.2 Randbedingungen 92
6.2.3 Ergebnisse 94
6.3 Vergleich der Rechenverfahren 96
6.4 Vergleich der Energiebilanzen des Lippe Bades als Passivhaus wie geplant und nach EnEV 100
7 Reinigungskonzept 104
7.1 Anforderungsprofil 105
7.2 Lösungsansätze zum Anforderungsprofil 106
7.2.1 Gestaltung der Sauberlaufzone 106
7.2.2 Bodenbelag zum Anforderungsprofil 107
7.2.3 Lösungsansätze zur maschinell gestützten Boden-Nassreinigung, zu den Verglasungsflächen und dem Bodengefälle in Nassbereichen 108
7.2.4 Eingetretene Neuerungen im Rahmen des Projektfortschritts 116
8 Akustikkonzept 117
8.1 Planung 118
8.2 Zu erwartende Nachhallzeiten in den Schwimmhallenbereichen 119
9 Brandschutz 124
9.1 Einleitung 124
9.2 Baurechtliche Einstufung 124
9.3 Brand- und Rauchabschnitte 125
9.4 Baulicher Brandschutz 127
9.5 Rettungswege 129
9.6 Anlagentechnischer Brandschutz 129
9.7 Fazit 130
10 Kosten und Wirtschaftlichkeit 131
11 Quellen 135

1 Vorwort: Gemeinschaftlich verantwortungsvoll gestalten

Aktuelle Bauvorhaben werden mehr denn je über Zeitbedarf und Baukosten getrieben und oft hapert es an der so wichtigen Verantwortung für Behaglichkeit und Folgekosten (Betriebs- und Instandhaltung). Die überwiegende Konsequenz ist die Beschränkung im Gestaltungsprozess auf Standards (in Konzepten und Qualitäten). Diese Situation ist unzulänglich, da die Lebenszyklen von Bauten in der Regel mehrere Jahrzehnte betragen und unser Wohlergehen über das Leben von Generationen mit und in Bauten sehr weitreichend beeinflusst wird. Eine auf umfassendem Wissen basierende und ideenreiche Planungsleistung, mit Berücksichtigung der Beziehungen zwischen Architektur, Nutzungsqualität, Technikbedarf und Kosten, ist der bessere Ansatz. Dafür müssen Bauherren vom Besseren getrieben sein und ausreichend Raum geben (Fachleute, Zeit, Budget).

Wesentlich für eine erfolgreiche Planung ist das gegenseitige Verständnis (Fachkenntnis) der anderen Planungsdisziplinen. Dies gilt besonders für innovative Ansätze, da hier neue Wege beschritten werden, die alle Planer auf ihrem Fachgebiet verständlich und nachvollziehbar darstellen müssen. Die Planung und Errichtung energiesparender Gebäude auf hohem Qualitätsniveau sind Aufgaben, die den Einsatz aller Beteiligten erfordern. Dies ist im Bewusstsein aller Partner zu verankern. Ziel muss sein, gestalterische, technische und energetische Aspekte in ein funktionales Gesamtkonzept zu führen.

Die Übertragung des Passivhausstandards auf Hallenbäder verspricht eine deutliche Reduzierung des Energiebedarfes gegenüber dem Standardneubau. Um dieses Ziel zu erreichen, ist die Bereitschaft zur Innovation von allen Planungsbeteiligten unabdingbar. Dies gilt sowohl für die Bauherren als auch für alle zu beteiligenden Fachplaner. Es muss die Bereitschaft und Aktivität da sein, dem gesetzten Ziel entsprechend neue Wege zu gehen.

Für die Auswahl der Planungsbeteiligten sind Innovationsbereitschaft, Interesse an neuem Wissen und Teamfähigkeit maßgebend. Individuelle Erfahrungen aller Teammitglieder im Passivhausbereich sind weniger maßgebend, da im Zuge des integralen Planungsprozesses die Erarbeitung von Lösungen gemeinschaftlich und in Abstimmung aller Beteiligten verläuft (eigenes Wissen vermitteln ↔ vom anderen Wissen lernen).

Die Grundsätze energiesparenden Bauens sind weitestgehend bekannt. Dennoch sind die Auswirkungen von Planungsentscheidungen auf die Energiebilanz nicht immer offensichtlich. Bei dem hier vorgestellten Hallenbadneubau sind neben einer Reihe neuer Effizienzkonzepte, bekannte Planungsaspekte des Passivhausbaus

umzusetzen. Diese Zielstellung muss frühzeitig und konkret kommuniziert werden, damit sie umfassend bei allen Planungsschritten berücksichtigt wird.

Bereits in der Vorentwurfphase müssen diejenigen Aspekte untersucht werden, die wesentlichen Einfluss auf das energetische Konzept des Gebäudes haben. Hier sind unter anderem Orientierung, Kompaktheit und Zonierung zu nennen. Diese Maßgaben haben weitreichende Auswirkungen auf das energetische Konzept des Gebäudes und sind vor allem für eine wirtschaftliche Umsetzung des Projektes von Bedeutung. Umso wichtiger ist es, dass bereits in dieser frühen Phase alle Fachplaner gemeinsam Lösungsansätze diskutieren. So sind Entscheidungen bezüglich der Kompaktheit und Zonierung sowohl unter gestalterischen und gebäudetechnischen Gesichtpunkten als auch unter Aspekten der Tageslichtversorgung und des Brandschutzes abzuwägen. Im hier vorgestellten Hallenbadprojekt (Lippe Bad Lünen) ist die Zonierung und Kompaktheit allein durch die Nutzung weitestgehend vorgegeben. Dennoch sind von Beginn an Fragen bezüglich der Lage der Lüftungsgeräte und der zugehörigen Kanalführungen zu berücksichtigen. Dies wurde anhand mehrerer Kellervarianten in Zusammenarbeit der Fachplaner diskutiert. Durch die gegebenen Randbedingungen des zu integrierenden Bestandsgebäudes (Lage, Kubatur) werden sowohl die solaren Gewinne als auch die Möglichkeiten zur Tageslichtversorgung des Hallenbereiches beeinflusst. Auch hier konnten nur durch frühzeitige, gemeinsame Überlegungen die Ergebnisse der Tageslichtuntersuchungen effektiv und kostengünstig in den Planungsprozess einfließen.

Die Grundsätze energiesparenden Bauens müssen bei zunehmendem Detaillierungsgrad der Planung berücksichtigt werden, um häufige Korrekturläufe zu vermeiden. Besonders zu nennen ist hier die Planung bezüglich der Luftdichtheit und Wärmebrückenfreiheit. Die Abstimmung der Details durch die Fachplaner hilft Kollisionspunkte frühzeitig zu erkennen und zu beheben. Nur der integrale Planungsprozess und die gemeinsame Kontrolle des Planungsstandes aller Fachplaner sind geeignet, eine qualitativ hochwertige Ausgangslage zur Umsetzung des Bauvorhabens zu gewährleisten.

Besonderheiten gegenüber herkömmlichen Gebäuden müssen bereits in der Ausschreibung reich an verständlichen Details vermittelt werden. Alle ausführenden Firmen zur Gebäudehülle müssen wissen, dass eine besonders luftdichte Ausführung zu realisieren ist, deren Qualität mittels Blower-Door-Test geprüft wird. Allen Fachplanern obliegt die besondere Aufgabe, mit Hilfe einer detaillierten Planung und Beschreibung (Qualitäten, Arbeitsgänge, besondere Maßnahmen), jedem Bieter seine konkreten Aufgaben und Leistungsbereiche zu vermitteln, damit dieser sein Angebot klar und aufwandsgerecht kalkulieren kann. Seitens des Bauherrn muss die Bereitschaft vorhanden sein, mehr Engagement zur

Ablaufsüberwachung und Qualitätssicherung vergleichsweise zu Standardprojekten zu leisten.

2 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Mit der Planung des Lippe Bades Lünen ist es gelungen, ein Hallenbad mit Konzepten der Passivhaus Technologie umzusetzen. Die mit Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) erarbeitete Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad (Bädergesellschaft Lünen und PHI 2009) war das grundlegende Fundament dazu.

Durch die thermisch sehr hochwertige Gebäudehülle konnte der Transmissionswärmebedarf relativ zu Standard-Neubauten und noch deutlicher zu bestehenden Bädern signifikant gesenkt werden. Aus der entscheidenden thermischen Verbesserung der Gebäudehülle, hier insbesondere der transparenten Bauteile, resultieren höhere minimale Oberflächentemperaturen (vgl. Abbildung 1), durch welche die Möglichkeit gegeben ist, im Bad höhere relative Luftfeuchten zu fahren.

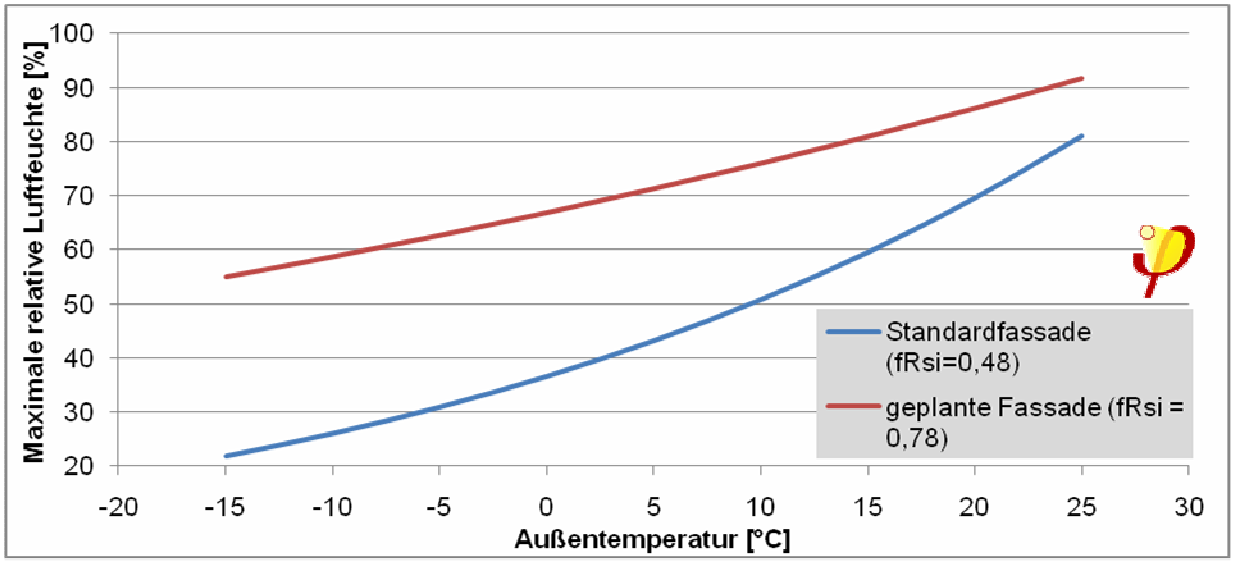


Abbildung 1: Maximale tauwasserfreie Raumluftfeuchten einer Standardfassade (Aluminium Tragsystem, 2-Fach Verglasung, Aluminium Randverbund) und der geplanten Fassade in Abhängigkeit von der Außentemperatur (Quelle: PHI).

Diese Maßnahme senkt die Verluste durch Verdunstung von Beckenwasser erheblich. Durch den konsequenten Einsatz äußerst hochwertiger Lüftungswärme-

tauscher, sowie eine intelligente Lüftungssteuerung werden die Luftvolumenströme und die Lüftungswärmeverluste deutlich reduziert.

Heizung und Warmwasserbereitung arbeiten konsequent mit Niedertemperaturwärme, es werden durchgehend höchst energieeffiziente elektrische Anlagen eingesetzt (Beleuchtung, Pumpen, Motoren).

Laut dem aktuellen Stand der Energiebilanzierung mittels eines modifizierten Passivhaus Projektierungs-Paketes (PHPP) konnte der Endenergiebedarf durch diese Maßnahmen auf 549 kWh/(m²a) reduziert werden.

In Verbindung mit den Beiden Blockheizkraftwerken am Standort Lippe Bad, von denen eines mit Biogas und eins mit Erdgas betrieben wird, lassen sich durch die Nutzung von Ab- und Brennwertwärme auf Niedertemperaturniveau (vgl. Abbildung 2) ausgesprochen vorteilhafte Primärenergiefaktoren für die Beheizung und die Warmwasserbereitung von unter 0,1 erreichen. Es resultiert ein Primärenergiebedarf von lediglich 409 kWh/(m²a). Es wird erwartet, dass dieser Wert im weiteren Verlauf der Planung durch die Konkretisierung der Anlagentechnik weiter sinkt.

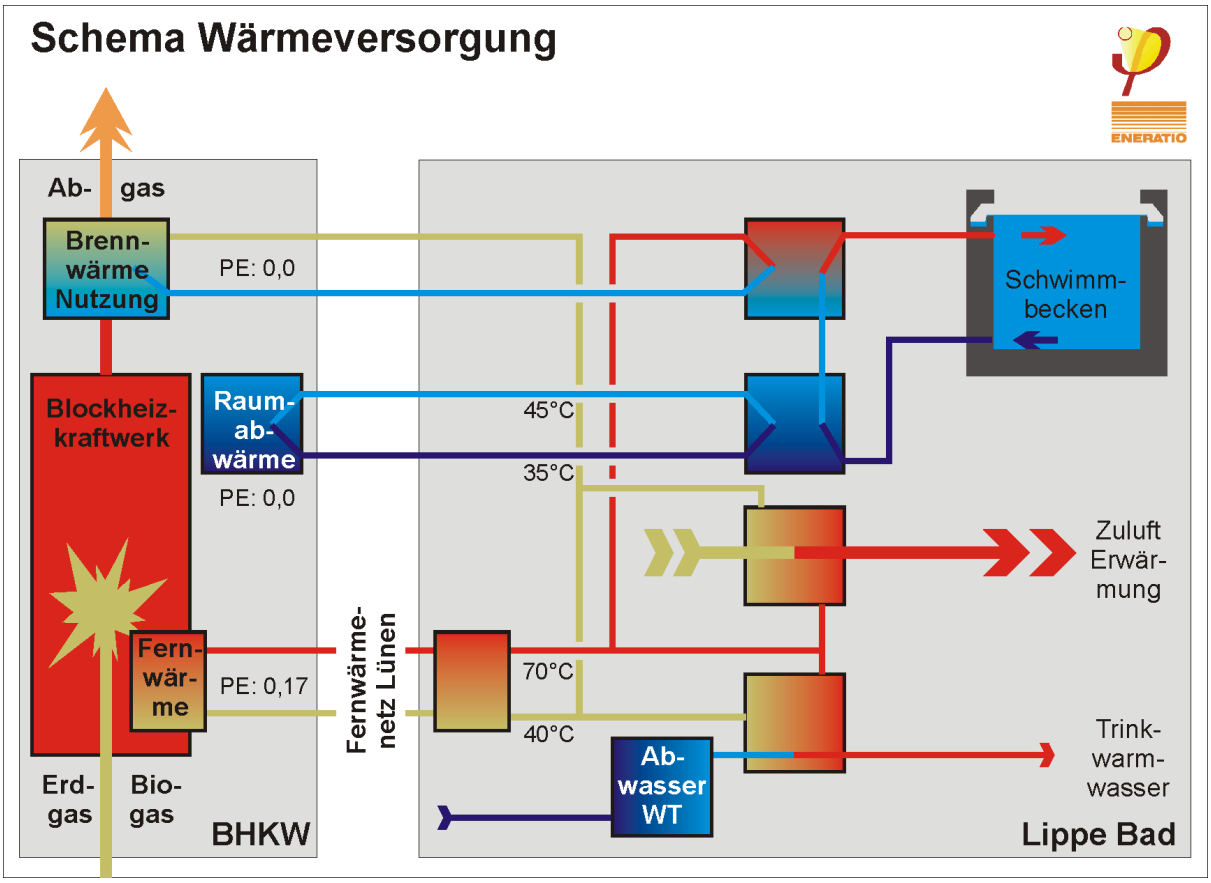


Abbildung 2: Schema der Wärmeversorgung über das Blockheizkraftwerk (Grafik: PHI)

Der Einsatz einer Ultrafiltrationsanlage erwies sich als eine wirtschaftliche Variante. Durch die bei der Ultrafiltration quasi kontinuierlich anfallenden Abspülwässer wird ein Wasserrecycling möglich (vgl. Abbildung 3). Ein großer Teil des Abspülwassers wird aufbereitet und als Beckenwasser wieder verwendet. Ein weiterer Teil substituiert Frischwasser für die Toilettenspülung. Sparsame Armaturen und WC- und Urinalspülungen sorgen für weitere Einsparungen, sodass eine Reduktion des Trinkwasserbedarfes von ca. 67% erwartet wird.

Es konnte festgestellt werden, dass die Verwendung von Passivhaus Technologien keine Mehraufwendungen im Bereich des Brandschutzes nach sich ziehen.

Durch ein durchdachtes und innovatives Reinigungskonzept, welches auch auf Erfahrungen des Betreibers beruht und tief in die Gestaltung des Gebäudes und die Anlagentechnik eingreift, werden erhebliche Betriebskosteneinsparungen, sowie Einsparungen von Wasser und Reinigungschemikalien erwartet. Durch das Konzept wird es möglich, Reinigungsarbeiten in größerem Umfang teils auch in die Schwachlast-Öffnungszeiten des Bades zu verlegen. Hierdurch wird, durch die Verringerung der Gesamtbetriebszeit, auch eine Verringerung des Energiebedarfes erreicht.

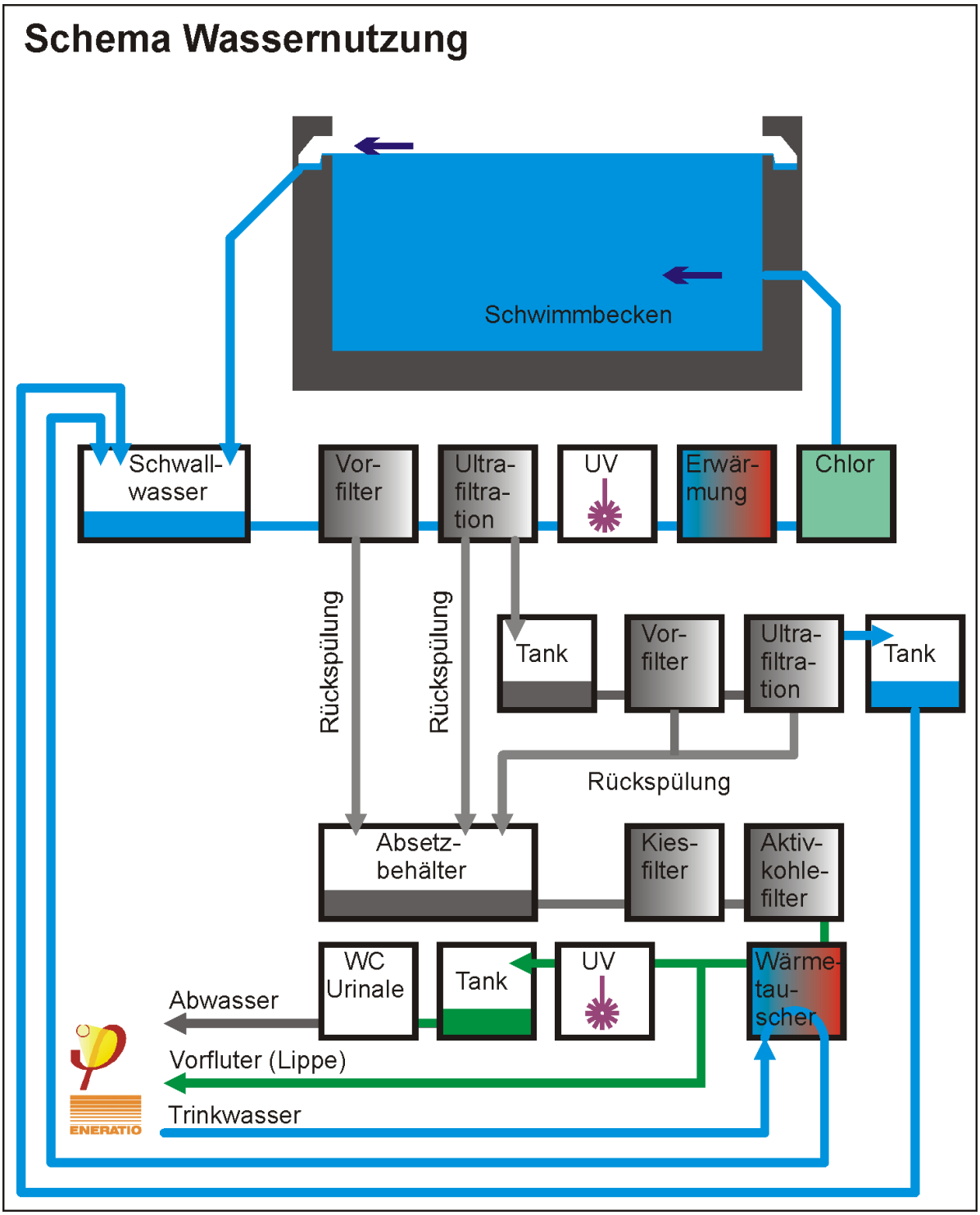


Abbildung 3: Schema zur Filtration und zum Wasserrecycling (Grafik: PHI)

Im integrierten Planungsprozess konnten über die jeweiligen Gewerkegrenzen hinweg vielfältige Ansätze zur Energie- und Wassereinsparung formuliert werden. Die Planung entwickelte sich dabei stets ideenreich. Durch die angestrebte Kooperation von Wissenschaft und Praxis im Team wurden innovative Lösungsansätze erreicht und handfest entwickelt. Jedes Mitglied im integrierten

Planungsteam hat dadurch gelernt und an neuem Wissen gewonnen. Dies kommt dem Gesamtprojekt eindeutig zu Gute.

In der bisherigen Bauausführung zeigt sich, dass Maßnahmen der Qualitätssicherung konsequent und permanent angewendet werden müssen. Viele routinierte Arbeitsabläufe der gängigen Baupraxis, über nahezu alle ausführenden Gewerke, entsprechen nicht der mit der Passivbauweise zwangsweise verbundenen Forderung nach Ausführungsqualität und Detailtreue.

Ein sehr detailliertes und transparentes Monitoring im Badbetrieb ist unverzichtbar. Erst dadurch können im Betrieb weitere Optimierungen vorgenommen und die gewählten Lösungsansätze qualifiziert werden. Besonderes Augenmerk muss dabei auf maßgebliche Bedingungen gelegt werden, wo der aktuell geltende Stand der Technik nicht dem Betriebsregime des Lippe Bads mit Passivhauskonzept entspricht.

Der Funktionsnachweis eines Hallenbades mit Passivhauskonzepten wird mit besonderem Interesse erwartet, wie die ständig zunehmenden Nachfragen zum Projekt Lippe Bad zeigen.

3 Einführung

3.1 Die integrale Planung als Projektgrundlage

Die integrale Planung eines Hallenbades ist sehr viel mehr als die Vorbereitung von Strategien zur Bedarfsminimierung für Wärme und Strom, denn auch der Einsatz und die Handhabung von Trinkwasser, von Chemikalien zur Wasseraufbereitung und Hygiene, sowie der anfallenden Abwassermengen wirken auf Betriebskosten und Umweltbedingungen. Weiter unabdingbarer Bestandteil ist die intensive Einbindung der im Badbetrieb erfahrenen Mitarbeiter/innen (Wissen und Erfahrung), um die zukünftigen Arbeitsbedingungen und Arbeitsgänge verbessert zu gestalten und durchgängig die nachhaltigen Qualitäten zu schaffen, die auch Einsparungen an Maintenance und Erneuerungsbedarf in Aussicht stellen.

Vor diesem Hintergrund wird klar, dass die Planungsphase für die Realisierung innovativer Konzeptideen von entscheidender Bedeutung ist. Eine auf umfassendem Wissen basierende und ideenreiche Planungsleistung mit Berücksichtigung der Beziehungen zwischen Architektur, Nutzungsqualität, Technikbedarf und Kosten ist unverzichtbar. Die Planung ist grundlegend entscheidend für den Projekterfolg und es bedarf Mehrleistung in einem integralen Planungsprozess, weil nur in der Planungsphase die Beeinflussbarkeit der Errichtungs- und Folgekosten umfassend gegeben ist.

Über die Betrachtung der Lebenszykluskosten eines Hallenbadprojektes lässt sich ableiten, dass Mehrleistungen für einen qualitativ hochwertigen Planungsprozess sehr wirtschaftlich sind, sofern damit nachhaltige Betriebskosteneinsparungen ohne Abstriche im Anforderungsprofil und an Nutzungsqualität erreicht werden. Während die Lebenszykluskosten im Durchschnitt unterschiedlicher Gebäudearten (von Wohnbau über Verwaltungsgebäude, Krankenhäuser bis hin zu Schulen und Kindergärten) zu 20 % über die Investition und zu 80 % über die Betriebskosten bestimmt werden, liegen die Anteile für Hallenbäder bei rund 10 % Investition und 90 % Betriebskosten. Daraus folgt, dass in mittelgroßen Hallenbadprojekten (Investition 14 Mio. €, Nutzungsdauer 40 Jahre, jährliche Kostensteigerung 1,95 %, Rückbaukosten 0,6 Mio. €) mit 1 % Betriebskosteneinsparung um 1,3 Mio. € geringere Lebenszykluskosten erzielt werden. Weiter motivierend kommt hinzu, dass die Mehraufwendungen zum Erreichen energetisch wie funktional nachhaltig optimierter Neubauten in der Regel sehr risikoarme Investitionen für die Zukunft sind.

Der Innovationsansatz Passivhallenbad wurde über die Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad [PHI 2009] mit Erfordernissen und Lösungsansätzen weitreichend ausgearbeitet. Diese bildet das sehr konkrete Anforderungsprofil an die integrale Planung zur Vorbereitung der praktischen Umsetzung für das Lippe Bad in Lünen.

Die Hallenbadhülle nach Passivhausanforderungen ist der erste Baustein zur Energieeinsparung. Die Transmissionswärmeverluste werden so maßgeblich reduziert und höhere innere Oberflächentemperaturen stellen sich ein. Mit höheren inneren Oberflächentemperaturen der Außenbauteile wird der Grenzpunkt der Taupunktunterschreitung hin zu höherer Raumluftfeuchte verschoben. Das ist der zweite Baustein zur Energieeinsparung, denn mit steigender Raumluftfeuchte im Hallenbereich sinkt die Verdunstungsleistung des Beckenwassers, und ungeachtet weiterer Einflussfaktoren kann der erforderliche Luftwechsel und damit der Lüftungswärmeverlust gemindert werden. Aus diesem Zusammenhang heraus kann die Ausführung der Hallenbadhülle in Passivhausqualität als „Eintrittsentgelt“ angesehen werden, um weitere Einsparungen erschließen zu können. Der dritte große Baustein zur Energieeinsparung liegt in den Gebäude- und Verfahrenstechniken eines Hallenbades und es stellen sich sehr umfangreiche Planungsaufgaben, um funktionale Systeme mit günstigen Effizienzbedingungen herauszuarbeiten.

Was sind die Erfolg bestimmenden Kriterien im integralen Planungsprozess? Zur Beantwortung dieser Frage werden folgend die Bedingungen, Maßnahmen und Funktionen auf Basis der gewonnenen Erfahrungen im konkreten Prozess behandelt:

Bauherr

Der Bauherr muss die Entscheidung zur Umsetzung des Innovationsansatzes bei Minimierung der Lebenszykluskosten kompromisslos treffen. Nur mit dieser Grundlage ist er zweifellos von der Vorteilslage des integralen Planungsprozesses überzeugt und zur Gewährleistung zusätzlicher Rahmenbedingungen bereit (mehr an Planungszeit, Projekt-Teamarbeit, Planungsbudget). Aus der speziellen Situation heraus, weil hier der Bauherr nicht nur Errichter des Bauwerkes, sondern auch erfahrener Betreiber und Nutzer (Kursangebote) ist, ist er quasi zur Führung des Projektmanagements verpflichtet. Der Bauherr und seine im Betrieb erfahrenen Mitarbeiter/innen müssen das Anforderungsprofil (Nutzungskonzept, Pflichtenheft, besondere Detailansprüche) vorgeben und den in der Regel über mehrere Lösungsansätze zum Anforderungsprofil ablaufenden Planungsprozess mit Qualitäts- und Kostenbewertung bis zur Entscheidung für die Ausführungsvariante durchgängig begleiten. Dabei muss der Bauherr besonders darauf achten, dass keine Optimierungsmaßnahmen der Bestimmung des Gebäudes entgegenstehen, denn die Nutzer entscheiden aufgrund der wahrgenommenen Aufenthalts- und Nutzungsqualität, ob sie das Hallenbad wiederholt nutzen und auch zur Nutzung empfehlen werden. Im integralen Planungsprozess müssen darum begünstigende Bedingungen für Aufenthalts- und Nutzungsqualität ideenreich und funktional mit Ansätzen zur Einsparung (Energie, Wasser, Chemie, Reinigung, Betrieb) kombiniert werden.

Voraussetzungen zur engagierten Wahrnehmung dieser detailreichen Bauherren-funktionen sind Erfahrungen im Projektmanagement, interdisziplinär technisches und wirtschaftliches Verständnis und adäquat bemessene Bearbeitungszeit.

Planungsteam und Projektorganisation

Um das Planungsteam geeignet auswählen zu können, sollten vorher der Zielkatalog (Hauptziele, erweiterte Zielstellungen) und die damit anstehenden Planungsaufgaben definiert sein. Im hier behandelten Projekt Passivhallenbad waren die Hauptziele durch die vorbereitende Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad [PHI 2009] sehr detailliert definiert. Erweiterte Zielstellungen ergaben sich über die Ansprüche an Energie und Wasser sparende Systeme für die im Hallenbad spezifische Verfahrenstechnik, die Barrierefreiheit und die erweiterten Ansprüche an eine verbesserte Raumakustik, an das Reinigungskonzept und die Betriebsführung.

Das Ziel im Planungsprozess ist nicht die Perfektion eines einzelnen Gewerkes, sondern die den komplexen Zielkatalog weitestgehend erfüllende Gestaltung des Gesamten, wozu variantenreiche Bewertungen und Abwägungen zu treffen sind. Dahinter steckt Teamarbeit. Im Team müssen von Anfang an alle Hauptgewerke

kompetent vertreten sein, wobei für gesonderte Details im laufenden Planungsprozess auch gesonderte Spezialisten zur Beratung und Feinabstimmung hinzugezogen werden sollten, sofern die spezielle Aufgabenbearbeitung nicht anforderungsgerecht von Mitgliedern des Kernteams geleistet werden kann. Diese Spezialisten können auch praktisch erfahrene Techniker von einschlägigen Fachunternehmen/Produktherstellern sein, zu deren Kernkompetenz die Bearbeitung der individuellen Detailfragen gehört (konkretes Beispiel: Bedingungen und Steuerungssysteme für Schiebetüren in öffentlichen Funktionsbereichen).

Um die Rahmenbedingungen für eine effektive Teamarbeit günstig zu gestalten, sollten möglichst wenig unterschiedliche Planer, aber so viele Fachleute wie nötig dem Team von Planungsbeginn an zugehören. Mit Blick auf die Technische Gebäudeausrüstung bedeutet dieser Grundsatz beispielsweise, eher ein in mehreren Sparten erfahrenes Planungsbüro einzubeziehen und nicht die Gewerke Sanitär-, Elektro-, Heizungs- und Lüftungstechnik durch jeweils unterschiedliche Büros bearbeiten zu lassen.

Es sind auch erweiterte Anforderungen an die einzelnen Teammitglieder zu stellen. An erster Stelle sollte klar sein, dass der Bauherr überdurchschnittliches Engagement zur Innovation von allen Teammitgliedern erwartet, zu dessen Leistung jedes Teammitglied bereit sein muss. Weiter sind als Eingangsvoraussetzungen von Jedem hohes Basiswissen, Kommunikationskompetenz und Detailinteresse bei hochwertiger Dienstleistungsqualität mitzubringen. Sofern der Bauherr nicht aus anderen Projekten/Erfahrungen heraus auf bewährte Planungsunternehmen zugreifen kann, sollte er auf Grundlage der Ansprüche an Teammitglieder mit einem Spektrum von Dienstleistungsunternehmen konkret sprechen und anhand von Referenzen, persönlichem Eindruck und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen neue Projektpartner auswählen.

Um die Planungsaufgaben im Rahmen von Qualität, Zeit und Kosten leisten zu können, müssen regelmäßige Teamsitzungen (z. B. anfangs wöchentlich, dann 14-tägig) vom Projektleiter (Bauherr) moderiert stattfinden. Im Gesamtprozess ist die Nutzung eines Planungs-Servers empfehlenswert, um allen Mitgliedern den digitalen Austausch von Unterlagen und Plänen einfach zu ermöglichen und gleichzeitig die Entwicklungsschritte/Planstände transparent zu dokumentieren. Über die einzelnen Fortschreibungen im Planungs-Server erhält der Bauherr so auch eine Übersicht zu den laufenden Aktivitäten und dem Vorangehen der einzelnen Fachplaner wie auch insgesamt.

Wichtige Aufgaben aller Planer sind, die Besonderheiten gegenüber herkömmlichen Gebäuden und technischen Lösungsansätzen bereits in der Ausschreibung reich an verständlichen Details zu vermitteln. Allen Fachplanern obliegt die besondere Aufgabe, mit Hilfe einer praktisch durchdachten detaillierten Planung und

Beschreibung (Qualitäten, Arbeitsgänge, besondere Maßnahmen) jedem Bieter seine konkreten Aufgaben und Leistungsbereiche zu vermitteln, damit dieser sein Angebot klar und aufwandsgerecht kalkulieren kann. Hierzu kann es förderlich sein, bereits bei der Erstellung der Ausschreibungsunterlagen mit mehreren Fachfirmen entworfene Texte und Pläne zu beraten, um Unzulänglichkeiten oder Unklarheiten im Lösungsansatz und in der Leistungsbeschreibung auszuräumen. Es sollte auch im Planungsstadium bereits herausgearbeitet werden, bei welchen Arbeitsschritten und in welcher Art und Weise die ausführenden Firmen im Allgemeinen und im Speziellen zur Qualitätssicherung zu unterstützen und zu überwachen sind.

3.2 Projektbeschreibung

Im Rahmen eines Bäderkonzeptes für Lünen baut die Bädergesellschaft Lünen mbH ein zentrales Hallenbad an der Konrad-Adenauer-Straße. Die jährliche Besucherzahl für das neue Hallenbad wird mit rund 230.000 Besuchern prognostiziert. Das Bad ist konzipiert für den Sport und die Bewegung im Wasser.

Grundlegende Aspekte der Planung sind:

a) Reduzierung der Betriebskosten durch

- Errichtung des Neubaus und Ertüchtigung des Bestandsbaukörpers mit Passivhaus Komponenten

  - hochwertig gedämmte, wärmebrückenminimierte Gebäudehülle
  - hohe Güte der Gebäudehülle hinsichtlich der Luftdichtheit
  - effiziente Anlagentechnik, günstige Hydraulik
  - Einsatz erneuerbarer Energie

- Erhöhung der Luftfeuchte (dadurch Verringerung der Verdunstung und somit Energieeinsparung bei der Beckenwassererwärmung)

- Reduzierung des Energiebedarfs für künstliche Beleuchtung

- Wassermanagement

  - Badewasseraufbereitung durch Ultrafiltrationsverfahren
  - Rückspülwassernutzung

- Wasser sparende Armaturen und Spülsysteme

- optimiertes Reinigungskonzept

b) Berücksichtigung der Belange von Menschen mit Behinderung durch

- baulich unterstützte Integration der gehandicapten Besucher in allen Bereichen (Verkehrsflächen/Türsysteme/ Umkleiden/ Sanitärbereiche)

- stufenlose Zugänglichkeit aller Besucherbereiche

- Planungsabstimmungen im Vorfeld mit Behindertenorganisationen

c) Behaglichkeit und Akustik

- Hohe innere Oberflächentemperaturen

- günstige Raumluftfeuchte (im Mittel ca. 64%)

- geringe Raumluftgeschwindigkeit

- ansprechende Material- und Farbgestaltung

- gute Raumakustik durch geringe Nachhallzeiten und Vermeidung von Flatterechos

3.3 Baurechtliche Grundlagen

Die planungsrechtliche Grundlage für das Bauvorhaben wurde durch den Vorhaben bezogenen Bebauungsplan Lünen Nr. 201 V+E (Teilabschnitt Lippe Bad), im September 2009 geschaffen.

Das Plangebiet wird als Fläche für den Gemeinbedarf ausgewiesen. Die Festsetzungen des Bebauungsplanes werden von der geplanten Bebauung eingehalten.

3.4 Optimierungen der Konzeptionen für einen ökologisch nachhaltigen und zukunftsorientierten Standort Lippe Bad Lünen

Die Stapelmann und Bramey AG wurde von der Bädergesellschaft Lünen mbH beauftragt, für das zukünftige Lippe Bad Lünen folgende Planungen zu erstellen:

- Bauleitplanung,

- Freiraumgestaltung,
- Verkehrsplanung,
- Ver- und Entsorgungsplanung,
- Bauleitung Freiraumarchitektur, Verkehrs- und Erschließungsanlagen.

Die Stapelmann und Bramey AG leistet damit einen Beitrag zur Verwirklichung des wegweisenden und impulsgebenden Projektes „Lippe Bad Lünen“ mit Konzepten der Passivhaustechnologie.

Das Vorhaben wirkt auch als Initiator für die Entwicklung der ehemaligen Betriebsfläche des Heizwerkes Lünen, zu einem ökologisch nachhaltigen und zukunftsorientierten Standort. Die Gebietsentwicklung mit Kopplung von Wohnen, Wasser und Erholung ist ein Baustein zum Erreichen der städtebaulichen Ziele der Stadt Lünen.

Die Leitgedanken zum Passivhaus Hallenbad sind ausweitbar auf die Idee eines ökologisch hochwertigen Standortes. Um diese Vision zu realisieren, ist es notwendig, auch in der Ver- und Entsorgung, in der Verkehrsplanung sowie in der Freiraumgestaltung Qualitäten einzubringen, die dieser Idee Rechnung tragen.

Aus diesem Grund erfolgt die Abwasserentsorgung im Trennsystem. Das gesamte Oberflächenwasser der versiegelten Flächen sowie das abzuleitende Beckenwasser des Hallenbades werden vorab gereinigt über ein unterirdisches Regenrückhaltebecken gedrosselt in die Gebiets angrenzende Lippe eingeleitet. Lediglich das im Hallenbad anfallende Schmutzwasser wird dem kommunalen Mischwasserkanal und so der öffentlichen Kläranlage zugeführt, wo es mit vergleichsweise hohem Energieaufwand gereinigt werden muss.

Zukünftig reduziert zwar die mit dem Neubau des Lippe Bades einhergehende Oberflächenversiegelung die Grundwasserneubildungsrate in diesen Bereichen, dennoch sind die Oberflächenwässer nicht grundsätzlich für das Grundwasser in diesem Areal verloren, denn das auf den Verkehrs- und Dachflächen anfallende Niederschlagswasser und das nachbehandelte Beckenwasser des Hallenbades werden an einer ortsnahen Stelle über die Lippe dem Grundwasser wieder zugeführt.

Die Wärmeversorgung wird durch ein im Lippe Bad Lünen integriertes Biogas-BHKW und ein Erdgas-BHKW betrieben. Beide BHKWs werden mit nachgeschalteter Abgasbrennwertnutzung betrieben, wodurch die Effizienz deutlich verbessert wird. Zum Wärmeverbrauch des Lippe Bades überschüssig in Kraft-Wärmekopplung (KWK) produzierte Wärme wird stets in die Fernwärmeleitung der Stadt Lünen

eingespeist, und steht somit zur Bedarfsdeckung für viele andere Wärmeverbraucher der Stadt Lünen zur.

Im Bereich der Verkehrsplanung sind insbesondere Flächeneinsparungen sowie die Verringerung der Lärmentwicklung ausschlaggebende für eine ökologisch nachhaltige Entwicklung am Standort. Ziel der Gesamtplanung ist auch die verbesserte Erreichbarkeit des Hallenbades (zentrale Lage) und des gesamten Lippedreiecks für den nicht motorisierten Individualverkehr, für den Öffentlichen Personennah-, Schul- und Sportverkehr. Damit wird der motorisierte Individualverkehr tendenziell reduziert. Damit geht ein reduzierter Anspruch für versiegelte Parkplatzanlagen (Anzahl der Stellplätze) und eine Verkehrslärmminderung (weniger individuelle PKW An- und Abfahrten) einher. Letztere wird weiterhin durch die gelungene Konzentration der Verkehrsanlagen im nördlichen Bereich des Plangebietes reduziert. Dadurch wird das südliche sowie westliche Umfeld des Bades weitestgehend von Verkehrslärm frei gehalten, was die Erholungsfunktion des Gebietes fördert und insbesondere die Erhaltung und Entwicklung des Schutzgutes Fauna begünstigt.

Die Ökologie des Freiraums lebt insbesondere von der Behaglichkeit und diese v.a. vom Ortsbild, insbesondere von Plätzen, von Monumenten, von der Fernsicht. Das Monument ist das skulptural gestaltete Hallenbad in seiner Form und Funktion. Dem gegenüber wurde der Lippe-Bad-Platz konzipiert. Der ebene und weite Platz mit dem solitären Gebäude gilt als Basis und Fundament für das gesamte Areal Lippedreieck, mit seiner Funktion und Architektur als nachhaltiger Identifikations- und Orientierungspunkt, als neues Wahrzeichen, den Standort und somit die Stadt Lünen prägend. Der Platz selbst soll den Dreh- und Angelpunkt, das Zentrum, den Treffpunkt des gesamten Lippedreiecks darstellen.

Weitere Faktoren, die in der freiraumarchitektonischen Planung eine Rolle spielten, tragen zur Behaglichkeit, aber vor allem auch zur energiesparenden Funktion und Nutzung des Lippe Bades bei. Diese sind der Einbezug der Umgebung (Fluss Lippe und deren Deichlandschaft), die Nutzung der bestehenden Topografie und die Beleuchtung des Areals.

Um diese Merkmale zu vereinen war es notwendig, die Teilfläche des Lippe Bades von der Gesamtfläche Lippedreieck entkoppelt initiatorisch vorzubereiten. Dazu wurde von der Stapelmann und Bramey AG ein Vorhaben bezogener Bebauungsplan angefertigt, der folgende Planungsziele im Einzelnen beinhaltet und langfristig planungsrechtlich sichert:

- Ausgestaltung des städtebaulichen Zieles der Stadt Lünen,
- Ausformulierung der Randbereiche des Hauptdeiches der Lippe als Qualitätsmerkmal,

- Berücksichtigung der vorhandenen Grün- und Freiraumstrukturen,
- funktionelle Verkehrsanbindung,
- Maßnahmen zur Sicherung qualitätsvoller Architektur und zur Einbindung bestehender Architektur und
- Ausnutzung solarer- und regionaler Energie sowie Umweltwärme als Beitrag für eine nachhaltige und ökologische Integration des Hallenbades in die Stadt Lünen.

Mit dem Bauleitplan werden die funktionalen Anforderungen in herausragender Weise erfüllt und bauplanungsrechtliche Voraussetzungen für das Innovationsprojekt Passivhaus Hallenbad geschafft.

3.5 Projektsteuerung

Auf Basis des durch die Bädergesellschaft Lünen vorgegebenen Raumprogrammes wurde im Jahre 2009 der Entwurf des Lippe Bades erarbeitet und mit dem Bauherrn und den beteiligten Gremien (Bäderbeirat, Schulausschuss, Behindertenbeirat) abgestimmt. Die Aufgabe der weiteren Planung bestand darin, dass Bad sowohl von der Gebäudehülle, als auch von der Technik den Vorgaben eines Passivhaus Standards anzupassen.

Für die Errichtung des Lippe Bads mit Komponenten der Passivhaustechnologie wurde der Weg über eine Generalunternehmung aufgrund der Komplexität nicht verfolgt. Die Vielfältigkeit der Details und die erforderliche Überwachung der Ausführungsqualitäten haben dazu beigetragen, am Projektstart bereits auf ein integriert arbeitendes Planungsteam, ergänzt über individuelle Fachbauleitungen zu setzen.

Mit Unterstützung des Passivhaus Instituts und der beteiligten Fachplaner wurden Bauteile und Details entwickelt, die den bauphysikalischen Anforderungen gerecht werden, die in einer Schwimmhallenatmosphäre vorhanden sind. Abbildung 4 zeigt ein Organigramm des Zusammenwirkens der Projektbeteiligten.

Im Rahmen der weiteren Ausführungsplanungen wurden teils Materialien gewählt, deren Nutzung in deutschen Schwimmhallen neuartig ist, die aber in Funktion und Optik wesentliche Vorteile versprechen. So werden im Beckenumgangsbereich Kunststoffbodenbeläge verwendet, die sowohl die erforderliche Rutschfestigkeit bieten, aber auch weitestgehend fugenlos verlegt werden können. Der hoch liegende Beckenkopf wird mit einer Sitzbank aus Mineralwerkstoff belegt. Ein geringer

Fugenanteil soll auch hier Schwachstellen vermeiden helfen und gleichzeitig günstige Hygienebedingungen gewährleisten.

Auf Basis der Ausführungsplanungen und den gewählten Materialien werden die Ausschreibungen europaweit im offenen Verfahren durchgeführt. Nach Prüfung der Angebote und Erarbeiten eines Vergabevorschlages erfolgt die Auftragserteilung durch die Bädergesellschaft Lünen. Abbildung 5 visualisiert den formalen Verfahrensablauf für Ausschreibung und Vergabe.

Im Zuge der Bauausführung werden zeitnah Budget und Kosten, sowie die angesetzten Bauzeiten und Meilensteine durch die Projektsteuerung überwacht. Abweichungen vom Planungssoll werden dem Bauherrn angezeigt und fristgerecht beseitigt. Durch 14-tägig anberaumte Projektbesprechungen erfolgt die Kontrolle der gesetzten Ziele. Hierbei ist auch der Bauherr intensiv eingebunden. Je nach Arbeitsprogramm werden die regelmäßigen Projektbesprechungen durch individuelle Sondertermine ergänzt. Auch hier ist der Bauherr detailliert beteiligt.

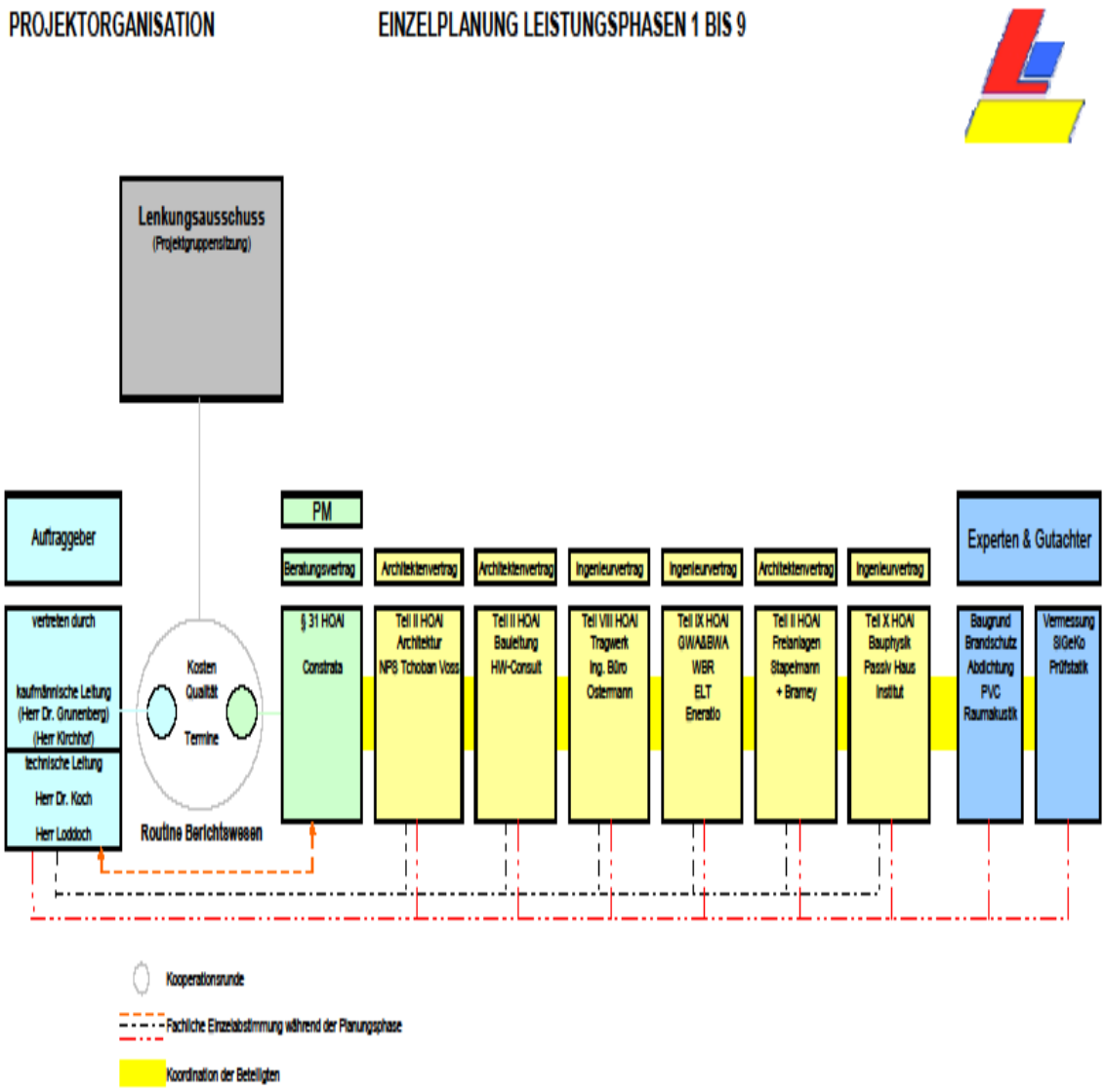


Abbildung 4: Projektorganisation. Grafik: Constrata.

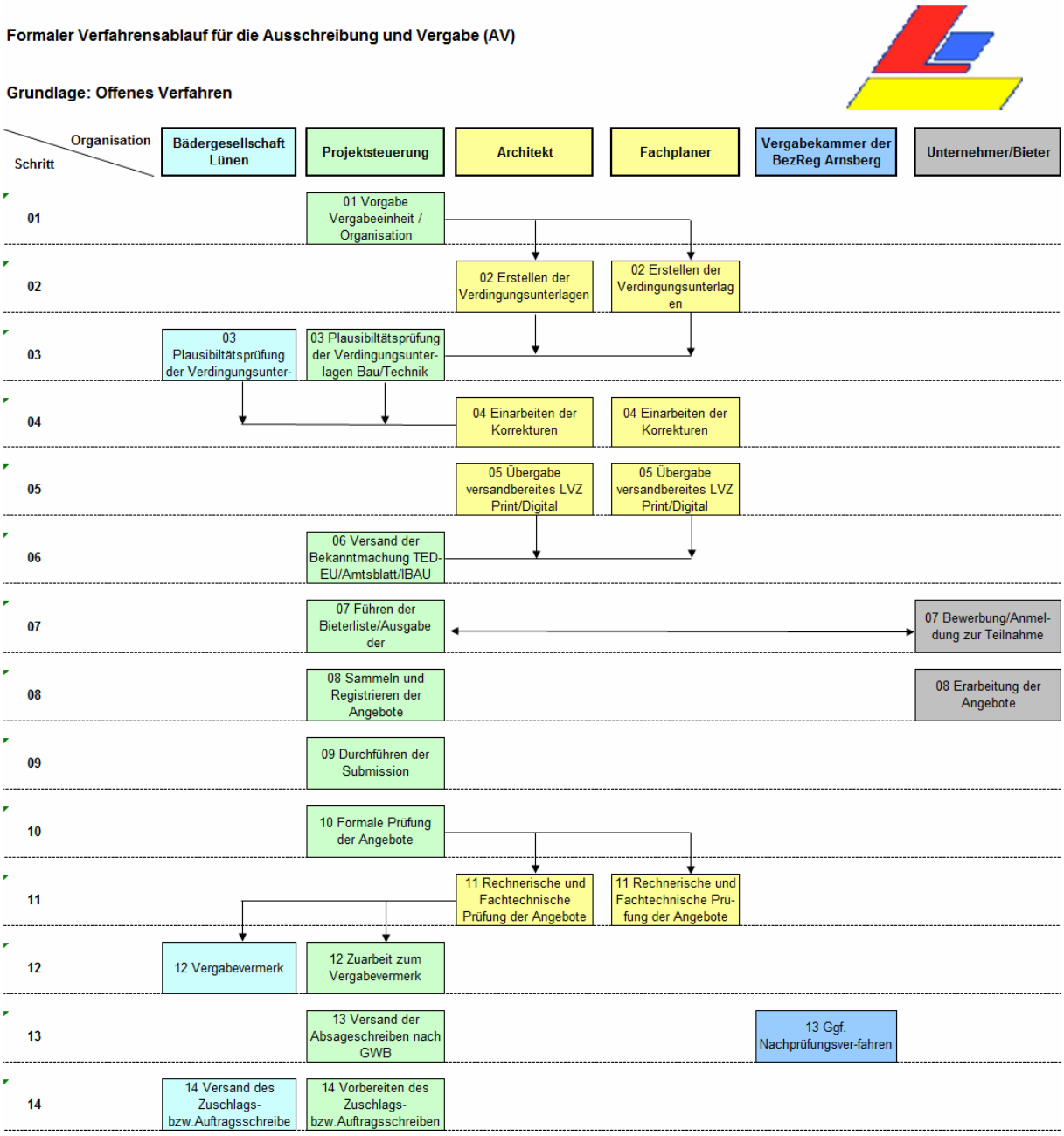


Abbildung 5: Verfahrensablauf Ausschreibung und Vergabe (Grafik: Constrata)

4 Gebäude

4.1 Baugrundstück

Das rund 17.500 m² umfassende Baugrundstück befindet sich in zentraler, innenstadtnaher Lage an der Lippe und ist im Besitz der Stadtwerke Lünen GmbH.

Das Grundstück ist mit einem heute nicht mehr genutzten Fernheizwerk (FHW) aus den 60er Jahren bebaut, vgl. Abbildung 6.

Innerhalb des FHW ist ein Schalthaus zur Verteilung von Elektroenergie integriert. Das Schalthaus bleibt mit Ausnahme der Fassadenerneuerung und der thermischen Entkopplung vom Rest des Gebäudes unverändert erhalten.

Die Höhenlage des zukünftigen Erdgeschossfertigfußbodens beträgt 52,05 m ü.NN. Der Höchstgrundwasserstand liegt bei 46,17 m ü.NN und damit unterhalb der geplanten Bauwerkssohle. Der 100-jährige Hochwasserstand ist mit 50,13 m ü.NN angegeben.

Abbildung 6: Baugrundstück an der Lippe mit Gebäudebestand (Quelle: npstv)

Die derzeitige Grundstückszufahrt des FHW über die Graf-Adolf-Straße wird durch eine neue Hauptzufahrt zum Neubau über die Konrad-Adenauer-Straße ergänzt.

Für die Verkehrserschließung über die Konrad-Adenauer-Straße werden Um- und Ausbaubaumaßnahmen im Rahmen der öffentlichen Erschließung erforderlich.

Auf dem Vorplatz des Grundstücks wird eine Wendeschleife für den Schulbusverkehr errichtet. Die Schleppkurve berücksichtigt auch die Nutzung von Schubgelenkbussen.

81 von der Bädergesellschaft bewirtschaftete Stellplätze, sieben Kurzparker-Stellplätze und eine Fahrradabstellanlage werden auf dem nördlichen Teil des Grundstückes errichtet. Hier befindet sich auch der Anlieferhof für Warenverkehr und die Abfallentsorgung.

Der Löschwasserbedarf wird über Hydranten auf dem Grundstück und im öffentlichen Bereich sichergestellt.

Die Medienversorgung (Strom/Wasser/Telekommunikation/Fernwärme) erfolgt über Versorgungsnetze der Stadtwerke Lünen. Die Schmutzwasserentsorgung erfolgt über die öffentliche Schmutzwasserkanalisation. Niederschlagswasser und vorgereinigtes Beckenwasser werden über ein Regenrückhaltebecken gedrosselt in die Lippe eingeleitet.

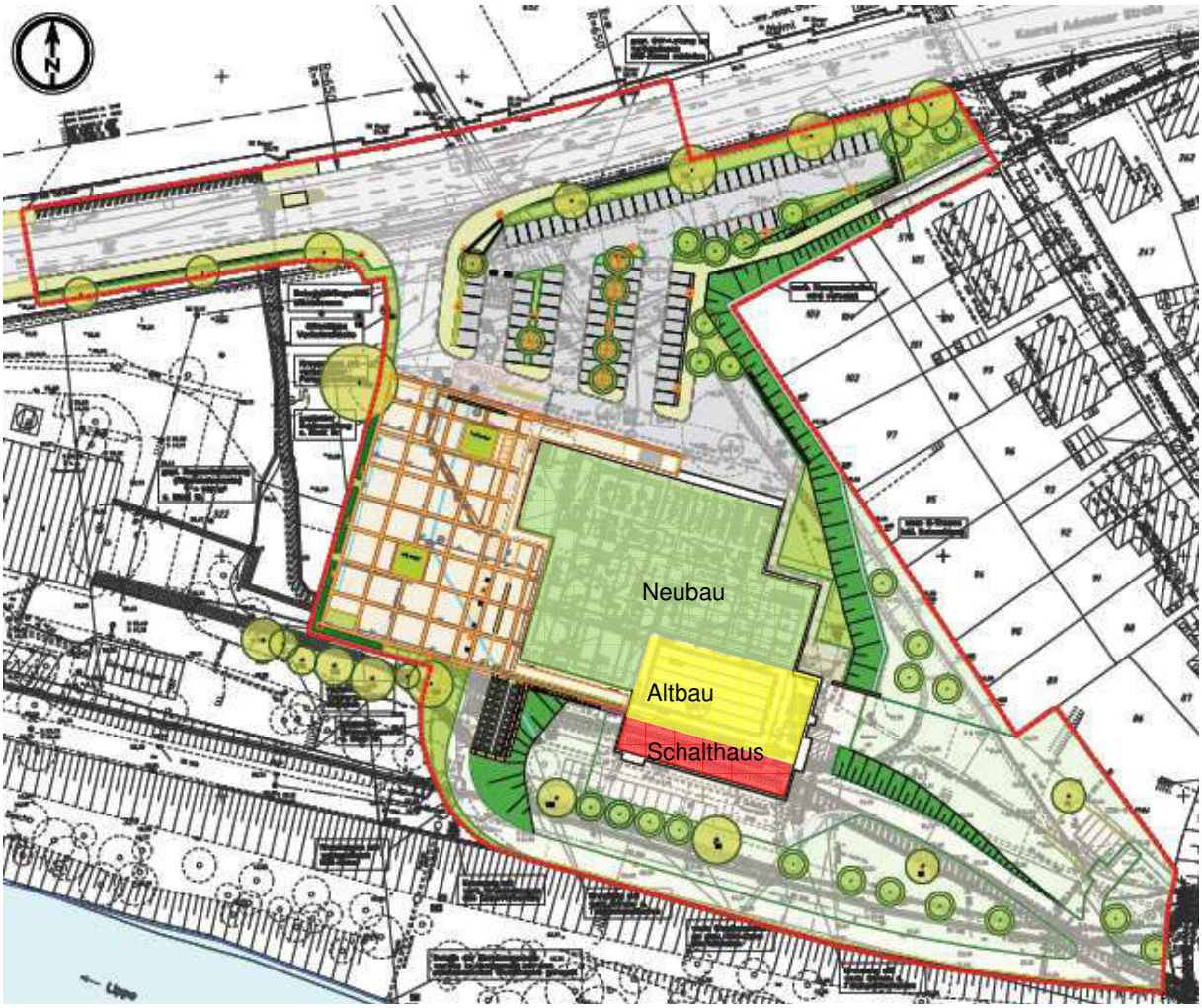


Abbildung 7: Plan der Außenanlagen des künftigen Hallenbades (Quelle: npstv, ergänzt: PHI)

4.2 Baukörper- und Bereichsgliederung

Der Baukörper gliedert sich in drei Teilbereiche (vgl. Abbildung 4): Neubauteil (BGF ca. 5.000 m², einschließlich Untergeschoss), ehemaliges Fernheizwerk der Stadtwerke Lünen (FHW, BGF ca. 2.100 m², welches durch Abriss- und Umbaumaßnahmen Teil des neuen Hallenbades wird), sowie das im FHW integrierte Schalthaus (welches im Zuge der Umbaumaßnahmen lediglich eine neue Fassade erhält und nicht Gegenstand dieses Berichtes ist). Die Oberkante Rohbetonboden im Erdgeschoss ist mit +51.85m ü. NN festgesetzt.

Alle für die Badegäste bestimmten Bereiche erfüllen die baulichen Anforderungen gem. §55 BauO NRW und werden den Erfordernissen an barrierefreies Bauen gem. DIN 18024-1 und DIN 18024-2 ausgestattet.

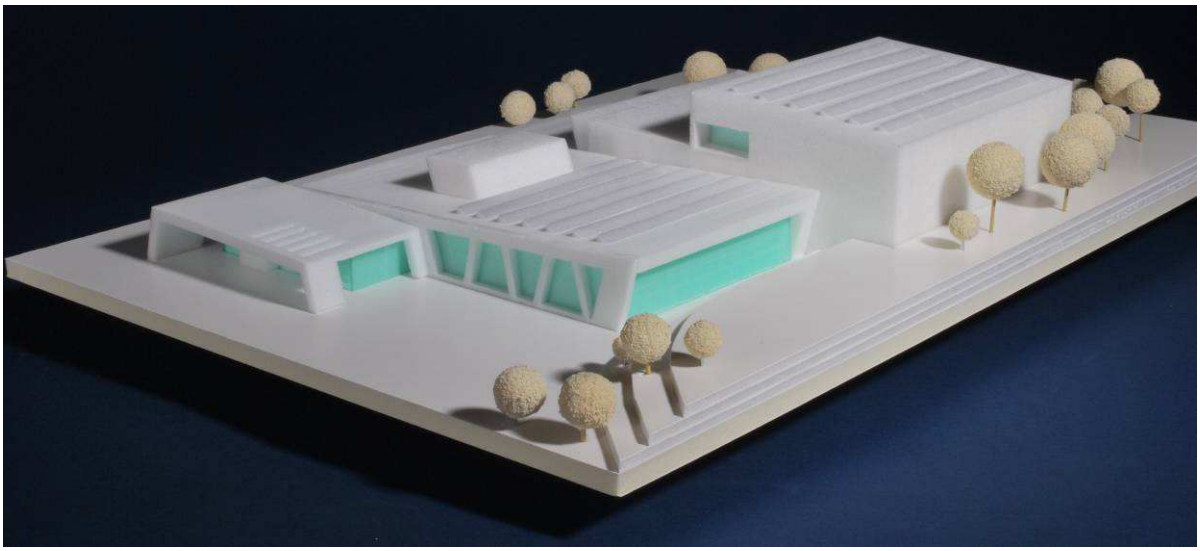


Abbildung 8: Arbeitsmodell des Bades, Stand Dezember 2008 (Quelle: npstv)

Das Raumprogramm, basierend auf den KOK-Richtlinien für den Bäderbau, stellt sich wie folgt dar:

Erdgeschoss

Eingangsbereich:

Ein großzügiges Vordach, eine vollverglaste Windfanganlage sowie das Foyer mit Tresen für Information und mit Personal gestützten Kassenautomaten bilden einen einladenden Eingangsbereich. Eine bestuhlte Verweilfläche mit Blickbeziehung zum Badbereich ist weiterer Bestandteil des Eingangsbereiches. Hier ist der Verzehr von Snacks und Getränken aus Automaten möglich.

Abbildung 9: Perspektive Eingangsbereich (Quelle: npstv)

Umkleide-/ Sanitärbereich:

Trennung in Sammelumkleidebereich für Schul- und Vereinssport und Einzelumkleidebereich für Individualbadegäste. Durch die Trennung der Umkleidebereiche und die Schaffung eines zentralen Zu-/Ausganges in den Beckenbereich wird eine von Schul-/Vereinssportveranstaltungen ungestörte Nutzung des Erholungsbereiches für Individualgäste und Familien erreicht. Dachoberlichter ermöglichen neben Fassadenfensteröffnungen eine gute Tageslichtversorgung.

Der Beckenzugang erfolgt über die Duschanlagen. Die Toilettenräume werden über die Duschräume betreten. Fönplätze können vor Verlassen des Bades genutzt werden.

Beckenbereiche:

Die solehaltigen Wasserflächen von insgesamt ca. 830 m² gliedern sich wie folgt:

Sportbecken 1: 4-Bahnenbecken 25 x 10m, im Sprungbereich mit 3m-Plattform und 1m- Brett, max. Wassertiefe bis 3,50m

Sportbecken 2 (im FHW): 5-Bahnenbecken 25 x 12,50 m, Wassertiefe 1,80m

Lehrschwimmbecken:	Becken mit Hubboden (10 x 10 m), Wassertiefe von 0,00 bis 1,60m
Warmwasserbecken:	Erholungsbecken (ca. 130 m²), max. Wassertiefe 1,35m
Eltern-Kind-Becken:	abgetrennter, ca. 35 m² großer Teil des Warmwasserbeckens mit max. Wassertiefe von 0,30 m

Das Warmbecken und das Eltern-Kind-Becken wird in einem kombinierten Becken dargeboten (Wasserfläche 167 m²).

Die Beckenköpfe sind rund 50 cm über den Beckenumgängen angeordnet und können als Sitzfläche genutzt werden.

Dem Erholungsbecken ist ein Bereich für die Aufstellung von Liegen angegliedert.

Die Beckenbereiche werden teilweise aufgrund unterschiedlicher Raumklimazonen und aus akustischen Gründen durch Glaswände räumlich getrennt. Eine sehr gute Raumakustik wird durch großflächige Wand- und Deckenakustikpaneele ermöglicht.

Eine bestuhlte Verweilfläche am Eltern-Kind-Becken mit Blickbeziehung zum Foyer ist weiterer Bestandteil des Beckenbereiches. Hier ist der Verzehr von Snacks und Getränken aus Automaten möglich.

Der Schwimmmeister erhält eine zentrale, erhöhte Aufsichtsposition in einem räumlich, klimatisch und akustisch separierten Raum. Eine direkte Verbindung zu den Technikräumen des Untergeschosses ist durch eine Treppenanbindung gegeben.

Ein Erste-Hilfe-Raum mit sowohl direkter Beckenanbindung als auch Anbindung an die rückwärtige Anlieferzone ermöglicht kürzeste Rettungswege außerhalb des allgemeinen Besucherverkehrs.

Großflächige Fassadenöffnungen (teilweise mit RWA-Funktion) sorgen in Kombination mit Oberlichtbändern für eine optimierte Tageslichtversorgung.

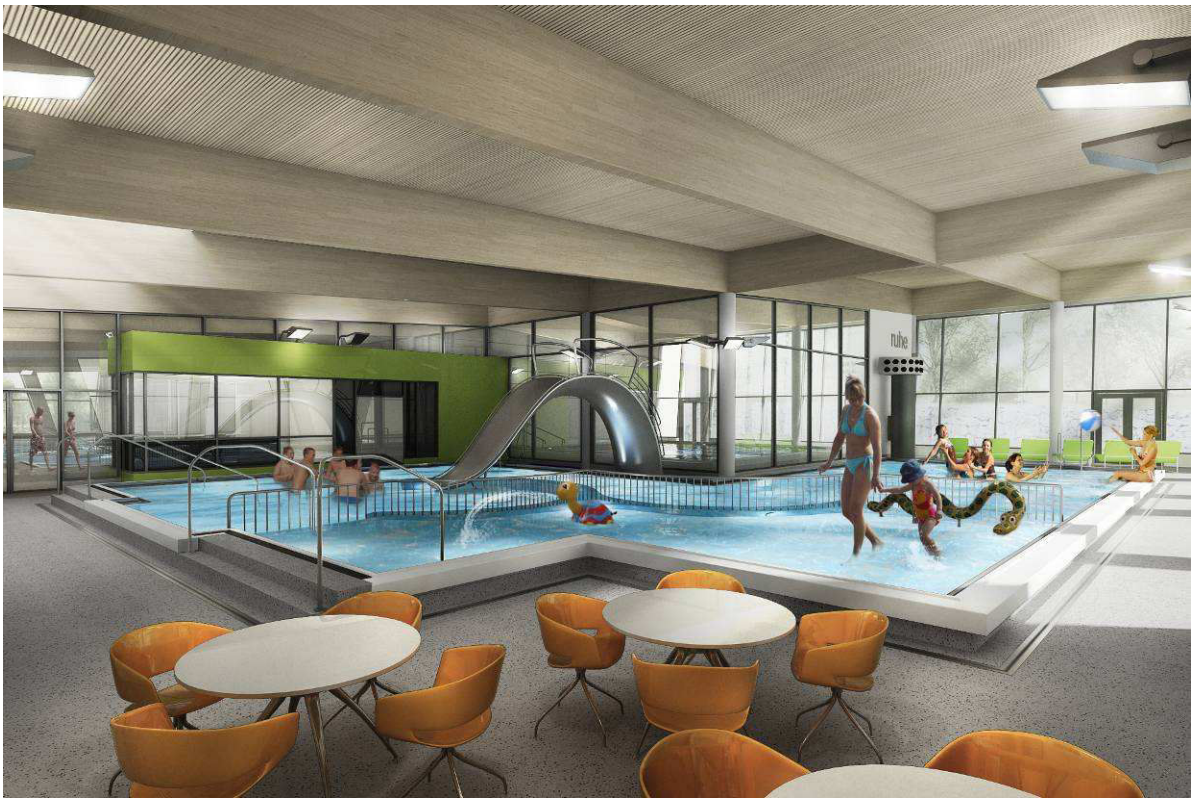


Abbildung 10: Perspektive Eltern-Kind-Becken mit Erholungsbereich (Quelle: npstv)

Untergeschoss:

Für die umfangreichen technischen Installationen wird der komplette Neubau mit Ausnahme des Foyerbereiches unterkellert. Die lichte Höhe im Untergeschoß beträgt 3.00 m.

Die Personalbereiche (Umkleide-/Sanitär-/Pausenraum) befinden sich im Untergeschoss. Sie sind über den Personaleingang an der Nordfassade direkt zu erreichen. Der Pausenraum wird über ein Souterrainfenster mit Tageslicht versorgt.

Die Hausanschlüsse (Fernwärme/Wasser/Elektro/Telekommunikation) befinden sich ebenfalls im Untergeschoss.

Ein Aufzug im Anlieferungsbereich ermöglicht den Transport schwerer Lasten zwischen Erd- und Kellergeschoss.

1.-3. Obergeschoss FHW:

Die früheren Nebenräume des ehemaligen FHW werden durch Integration in die Umbaumaßnahmen Teil der Passivhaushülle (Fassadendämmung, neue Fensterelemente, innere Teilbereichsdämmung zur entstehenden Schwimmhalle (Becken 2).

4.3 Statisches Konzept

4.3.1 Bestandsgebäude, ehemaliges Fernheizwerk

Der Bestandsbau Fernheizwerk ist ein Industriebau in Stahlbeton-Skelettbauweise, der für die Kraftwerke und Anlagen der Fernwärmeversorgung Lünen Ende der 60er Jahre errichtet wurde. Der Bestand setzt sich aus einem siebenachsigen Hallenbau und einem seitlich angesetzten Achsenfeld mit Verwaltungs- und Sozialräumen zusammen.

In den Nord-Süd Achsen verlaufen Stahlbeton-Dachbinder. Diese sind schlaff bewehrt mit zur Mitte hin ansteigenden Obergurten ausgeführt. Sie tragen eine aus Siporex-Platten, Korkdämmung und Abklebung bestehenden Dachaufbau.

Zur Aussteifung des Gebäudes sind auf Höhe des 2. und 3. OG Randunterzüge angeordnet, die die Außenstützen miteinander verbinden, welche wiederum biegesteif in die Bodenplatte eingebunden sind (System: Kragstütze ab OK Sohle bzw. Kellerdecke).

Im Verwaltungstrakt sind die Deckenauflager teilweise als Unterzug, teilweise als tragende Mauerwerkswand ausgeführt worden.

Die komplette Konstruktion ist auf einer Bodenplatte mit angeschlossenen Bohrpfählen gegründet.

In der ehemaligen Kesselhalle sind sämtliche Anlagen der Fernwärmeerzeugung entfernt worden. Im ehemaligen Kohlebunker-Bereich sind ebenfalls alle Einbauten entfernt worden. Die Decken sind als Stahlbetondecken ausgeführt.

Für die neue Nutzung wurde die Stahlbetondecke über dem Kelergeschoss im Bereich der ehemaligen Kesselhalle für den Einbau eines Schwimmbeckens nahezu komplett entfernt. Da die Stahlbetonsohleplatte auf Pfählen gegründet ist und ungedämmt war, wurde entschieden, eine druckfeste Dämmung auf die Bodenplatte aufzubringen und darauf mit Einzelfundamenten eine gleichmäßige Druckverteilung zu erwirken. Hierbei wurde Glasschaumdämmung (Foamglas) gewählt, da bei dieser praktisch keine Stauchung bzw. Setzung zu erwarten ist.

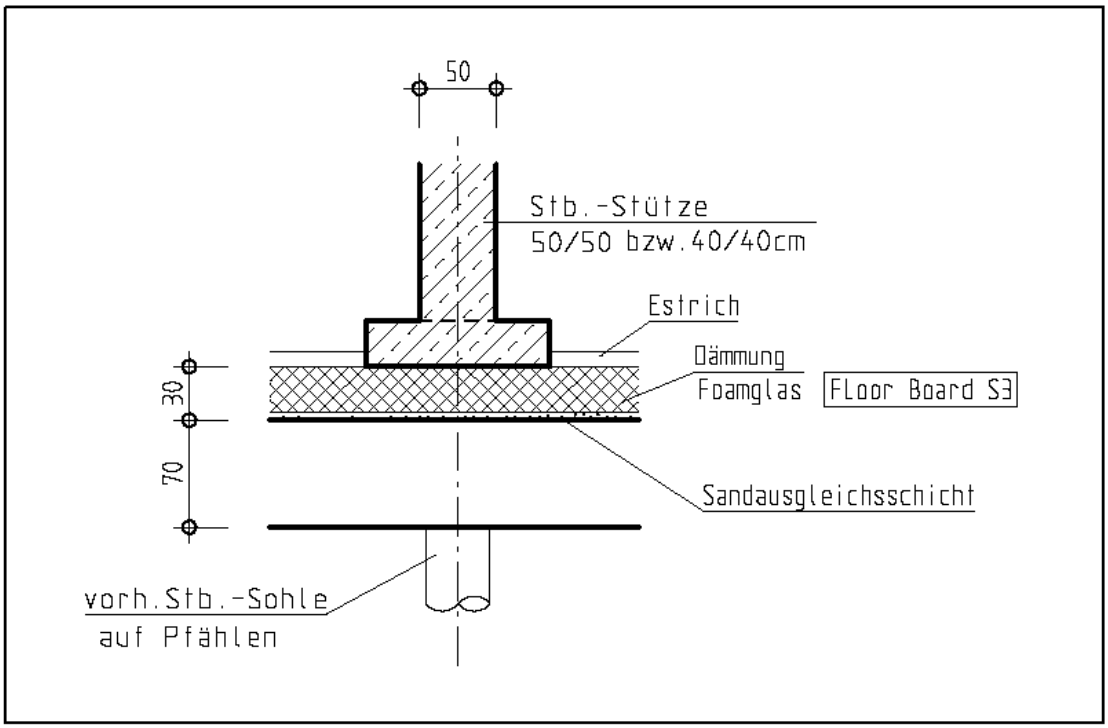


Abbildung 11: Systemdetail Auflager Becken auf Schaumglas im Bestand (Quelle: Ostermann)

Die gesamte bestehende Betonkonstruktion wie Stützen, Decke und Binder wurden von einem Sachverständigen bezüglich der vorhandenen Widerstandsfähigkeit der Schwimmbadatmosphäre beurteilt und es wurden Sanierungsvorschläge für die Oberflächen erarbeitet.

Im Dachbereich erfolgte ein Abbau der vorhandenen Leichtbetonplatten samt Abdichtung, jedoch mit Erhalt der Stahlbetonbinder, zugunsten einer neuen Tragkonstruktion aus Holzelementen mit Wärmedämmung analog zum Neubauteil.

Der Übergang vom Altbau zum Neubau wurde konsequent mit einer Bauwerksfuge von der Gründung bis zum Dach ausgeführt und im Bereich der weißen Wanne im Kellergeschoss gegen drückendes Wasser mit Dichtbändern abgedichtet.

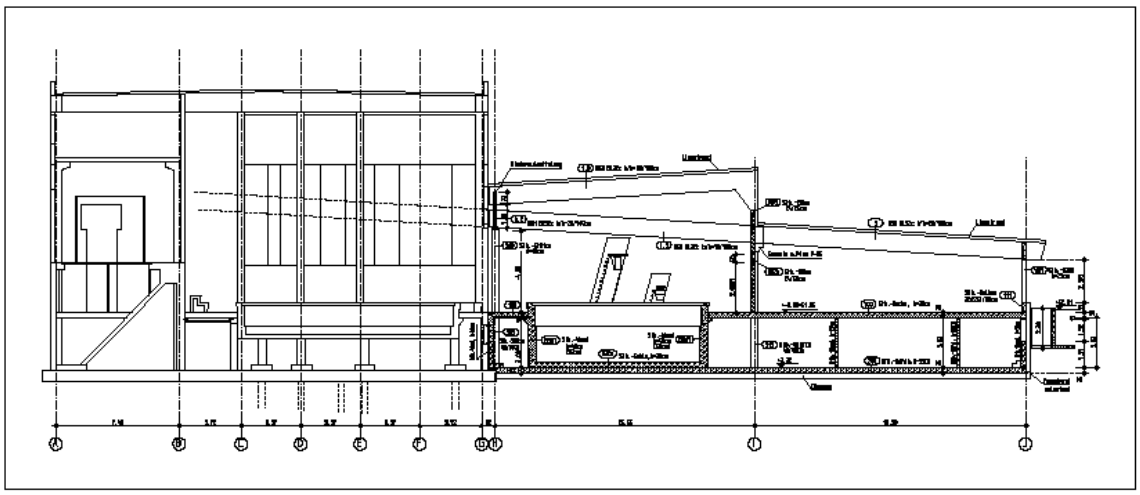


Abbildung 12: Querschnitt durch Alt- und Neubau (Quelle: Ostermann)

4.3.2 Neubauteil

Für den Neubau wurde eine Massivbauweise in überwiegender Betonkonstruktion gewählt.

Die Aussteifung des Gebäudes erfolgt über die in der Kellerwand eingespannten 24 cm starken auskragenden Wandscheiben des Erdgeschosses. Mit dieser Variante wurden aufwändige Dachverbände und deren Anschlüsse vermieden, da die Windlast sofort an der Außenfläche abgeleitet wird.

Als Dachkonstruktion wurden Brettschichtholzbinder b/d = 20/108 cm im Achsraster von 5,00 m und Spannweiten von 16.0 m mit Lignotrend-Dachelementen gewählt. Diese Ausführung hat den Vorteil, dass man die Dachelemente über 3 Felder zügig verlegen kann und die Kipphalterung der Binder über diese Dachscheibe gewährleistet wird.

Das Erdgeschoß besteht größtenteils aus Umfassungswänden aus Stahlbeton und innen angeordneten Stahlbetonrundstützen, die die Dachkonstruktion tragen.

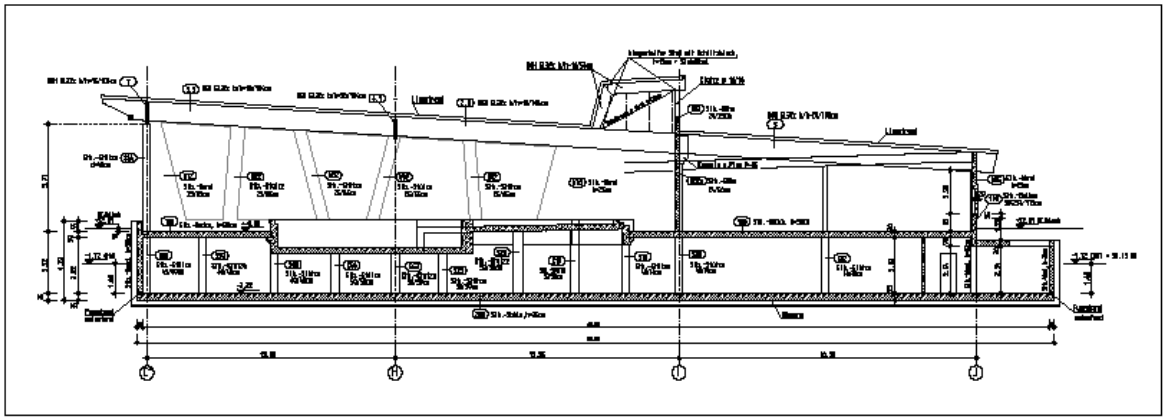


Abbildung 13: Querschnitt durch den Neubau (Quelle: Ostermann)

Für die Kellerdecke, die die Beckenumgänge und Decke im Bereich der Umkleiden bildet, wurde eine unterzugsfreie Stahlbetonflachdecke mit d=30 cm gewählt. Die Innen liegenden Stahlbetonbecken erhalten an den Außenwänden eine umlaufende Konsole, auf der die Kellerdecke linienmäßig gelagert wird.

Um eine einfache Verlegung der Last abtragenden Wärmedämmplatten zu gewährleisten, wurde eine durchgehende elastisch gebettete Stahlbetonbodenplatte (d=35 cm) ohne Querschnittsprünge berechnet. Ebenso wurde in diesem Zusammenhang auf einen Sohlplattenüberstand verzichtet und mit vorgefertigten Dämmelementen gleichzeitig der Schalungsrand der Bodenplatte erstellt.

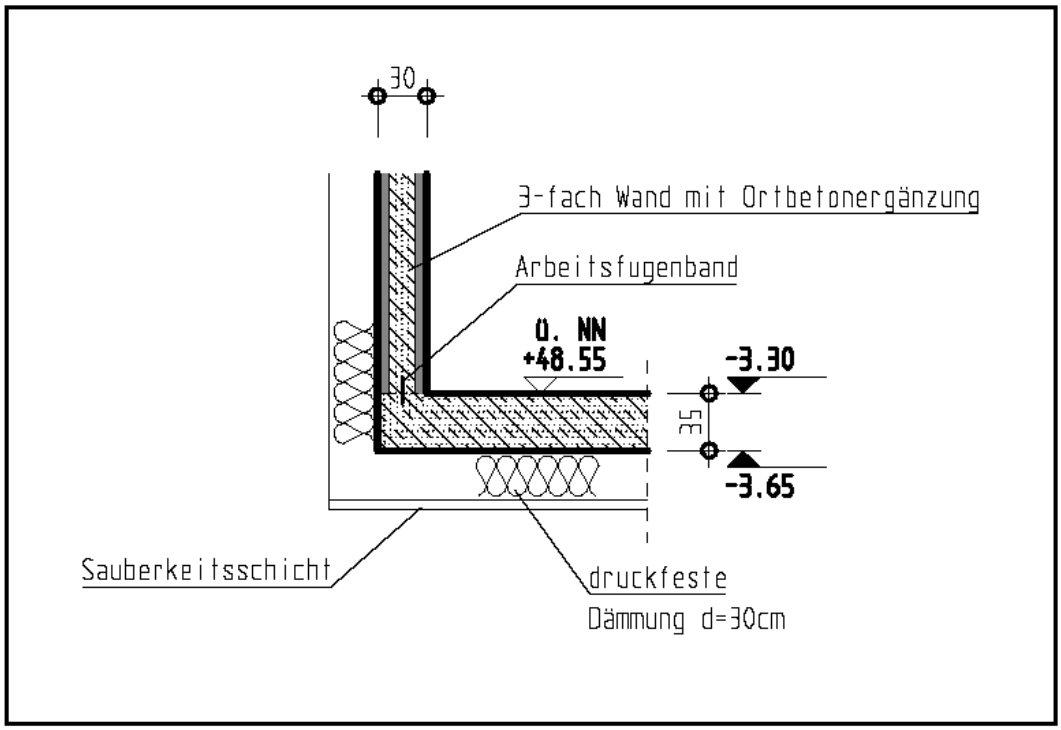


Abbildung 14: Systemdetail Übergang Sohle-Wand (Quelle: Ostermann)

Da mit einem Hochwasserstand der angrenzenden Lippe zu rechnen ist, wurde die Sohlplatte als Weiße Wanne mit erhöhter Bewehrung zur Rissbeschränkung ausgeführt. Die Ausführung der Kellerwände erfolgte als 3-fach Wand mit Ortbetonergänzung und ist ebenfalls wasserdicht ausgebildet.

Um die Passivhaushülle nahezu ungestört zu belassen und Wärmebrücken zu vermeiden, werden der Entrauchungsschacht und die Lichtschächte als eigenständige Bauwerke vor die Dämmhülle der Kelleraußenwand im Erdreich gestellt. Genauso wird das Vordach in Stahlbauweise vor dem Eingangsfoyer als eigenständiges Stahl-Rahmen-Tragwerk mit einer Fuge vor das Passivhaus gebaut.

4.4 Farbliche Gestaltung der Außenbauteile

- Wände grau, teilweise mit weiß gefassten Fensterelementen
- Türen grau
- Vordach Hauptzugang weiß
- Glas-Pfosten-Riegel-Fassade, Fenster: 3-Scheiben-Wärmeschutz-Isolierverglasung, Abdeckleisten/ Fensterbänke/ Beschläge silber/grau
- Dach hellgrau, teilweise mit aufgeständerten Photovoltaikmodulen
- Stahlgeländer feuerverzinkt
- Zu-/Fortluftschächte Edelstahl, silbergrau

4.5 Bauteilkonstruktionen Gebäudehülle

Alle Bauteilkonstruktionen wurden in Zusammenarbeit bzw. gemäß den Vorgaben des Passivhausinstitutes Darmstadt definiert. Der Bestandsbaukörper Fernheizwerk wird Teil der Passivhülle.

Die gesamte Gebäudehülle wird im Detail luftdicht geplant. Die Ausführung wird während der Bauzeit überwacht und durch Luftdichtigkeitsmessungen kontrolliert.

Das solehaltige Beckenwasser impliziert die Verwendung korrosionsbeständiger Montage-/Befestigungsmittel aus Edelstahlwerkstoffen (V4A) und Aluminium.

Berücksichtigt werden 64% Luftfeuchtigkeit während der Betriebszeiten sowie eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit auf bis zu 80% während der Nacht.

4.5.1 Boden gegen Erdreich

a) gewählter **Aufbau Sohle Neubau** (von innen nach außen):

- WU-Beton (300 mm)
- Trennlage PE-Folie
- XPS-Perimeterdämmung (WLK 041, 320 mm)
- Sauberkeitsschicht
- Wärmedurchgangskoeffizient: 0,12 W/(m²K)

Entscheidungsfindung:

XPS-Dämmung:

- als durchgehende Dämmung auch bei hoher Druckbelastung (Becken) möglich.
- durch gewählte Flachgründung einfache und fugenlose Verlegung möglich
- wirtschaftliche Lösung

b) gewählter **Aufbau Sohle Bestand** (von innen nach außen):

- Zementestrich (100 mm)
- Trennlage PE-Folie
- Abdichtung
- Schaumglasdämmung (300 mm, WLK 040)
- Sandausgleichsschicht
- Stahlbetonsohle Bestand (600 mm)
- Wärmedurchgangskoeffizient: 0,12 W/(m²K)

Entscheidungsfindung:

Schaumglasdämmung:

- Kombination von höchster Druckfestigkeit und Wärmedämmung,
- dampfdichte Ausführung und Nichtbrennbarkeit bringt hier Vorteile gegenüber Hartschaumdämmstoffen
- dadurch Vermeidung von Durchdringungen der Passivhülle durch Neubauteile möglich

4.5.2 Außenwand gegen Erdreich

Gewählter **Aufbau Außenwand UG** (von innen nach außen):

- WU-Beton (300 mm)
- XPS-Perimeterdämmung verklebt (300 mm, WLK 041)
- Wärmedurchgangskoeffizient: 0,13 W/(m²K)

Entscheidungsfindung:

- wie unter 4.5.1 a)

4.5.3 Außenwand gegen Außenluft

a) gewählter **Fassadenaufbau Neubau** (von innen nach außen):

- Kalkzementputz mit Anstrich
- massive Außenwand (Mauerwerk/ Stahlbeton), teilweise tragend, 250 mm
- Wärmedämmverbundsystem aus EPS-Hartschaum, WLK 035, 300 mm stark, Schichtenaufbau gem. Zulassung des Herstellers, geklebte Montage
- abgestimmtes Anstrichsystem mit evtl. Zusatzbeschichtungen (imprägnierend, fungizid etc.)
- Wärmedurchgangskoeffizient: 0,11 W/(m²K)

Entscheidungsfindung:

- WDVS:
  - Bewährte Gebäudedämmung mit bestmöglicher Reduzierung von Wärmebrücken durch geklebte Ausführung = Vorteil gegenüber vorgehängter Fassade mit notwendiger Unterkonstruktion
  - gute Dämmwerte und weitestgehend wärmebrückenfreie Konstruktionen sind wirtschaftlich darzubieten
- Innenputz:
  - Hohe dampfbremsende Wirkung und damit Schutz des Wandaufbaus vor Kondensatschäden
  - Gesamtwandaufbau von innen nach außen zunehmend diffusionsoffen

b) gewählter **Fassadenaufbau Bestand** (von innen nach außen):

- Zementputz (Bestand)
- tragende Massivaußenwand (Bestand)
- Wärmedämmverbundsystem aus EPS-Hartschaum, , WLK 035, 300 mm stark, Schichtenaufbau gem. Zulassung Hersteller, geklebt
- abgestimmtes Anstrichsystem mit evtl. Zusatzbeschichtungen (imprägnierend, fungizid etc.)
- Wärmedurchgangskoeffizient: 0,11 W/(m²K)

Entscheidungsfindung:

- wie vorhergehend

4.5.4 Dächer gegen Außenluft

a) gewählter **Dachaufbau Neubau** (von innen nach außen): :

- tragende Dachbinder (5m-Raster) gem. Statik aus Brettschichtholz in F30-Qualität
- Holzkastenfertigelemente aus Brettschichtholz gem. Statik mit unterseitig integriertem Holzakustikabsorber in F30-Qualität
- Notabdichtung (bituminöse Dichtungsbahn)
- Dampfsperre
- Wärmedämmung (EPS-Hartschaum), WLK 035, 300 mm Stärke. 2-lagig mit versetzten Stössen verklebte Ausführung
- Kunststoffdachdichtungsbahn, Verklebung
- Wärmedurchgangskoeffizient: 0,11 W/(m²K)
- Entwässerung über vorgehängte Rinnen und Fallrohre

Entscheidungsfindung:

- Tragkonstruktion aus Holzbauteilen (nachwachsender Rohstoff), der die Kombination aus Brandschutzanforderungen und hoher Korrosions-beständigkeit erfüllt
- 6% Dachneigung für dauerhaft sichere Entwässerung und Vermeidung von Langzeitschäden durch stehendes Wasser

- Warmdachausführung als geklebtes System zur Vermeidung von Wärmebrücken durch mechanische Befestigungen; nur in Randbereichen sind punktuell mechanische Zusatzbefestigungen notwendig
- Verwendung von EPS- (alternativ PUR) Dämmstoffen mit sehr guter Dämmeigenschaft bei geringem Gewicht
- Dachstatik ermöglicht die Montage von Aufdach-Photovoltaiksystemen
- Vermeidung von Dachdurchdringungen der Technischen Gebäudeausrüstung (Vermeidung zusätzlicher Wärmebrücken)

b) gewählter **Dachaufbau Bestand** (von innen nach außen):

- wie vor, jedoch auf Bestandsdachbinder aus Stahlbeton
- Wärmedurchgangskoeffizient: 0,11 W/(m²K)

Entscheidungsfindung:

- Ersatz des gering gedämmten Bestandsaufbaus durch einen Passivhaus gerechten Dachaufbau
- statische Berücksichtigung der Montageoption von wärmebrückenfrei aufgeständerten Photovoltaikmodulen
- sonst wie vor

4.5.5 Fenster und Glasfassaden

Fenstern kommt in Passivhäusern eine besondere Bedeutung zu. Einerseits bilden sie die thermische Schwachstelle der Gebäudehülle (mit ca. 0,8 W/(m²K) haben die Fenster den höchsten Wärmedurchgangskoeffizienten und im Bereich des Randverbundes treten die geringsten Innenoberflächentemperaturen auf) und andererseits werden aber transparente Bauteile benötigt, um die Sichtverbindung nach Außen, die Tageslichteinbringung und die Nutzung solare Gewinne zu realisieren.

Wärmedurchgangs- und Wärmebrückenverlustkoeffizienten der Rahmen

In Absprache mit den Projektbeteiligten wurden die folgenden Qualitäten für Fenster und Pfosten-Riegel-Fassaden festgelegt.

- Holz-Pfosten-Riegelfassade aus Lärche, lasiert, außen Aluminium-Deckleisten

- Randverbund aus Kunststoffleisten
- 3-fach-Wärmeschutzisolierverglasung mit Edelgasfüllung
- Sicherheitsverglasung
- mit integrierter Sitzbankausbildung der unteren Fensterbank
- Außentüren als Holzrahmentüren im Passivhausstandard
- notwendige RWA-Öffnungen als hochwertig gedämmte Fensterelemente mit Zustimmung im Einzelfall

Entscheidungsfindung:

- in Abstimmung mit dem Passivhausinstitut festgelegtes System
- U- Werte um 0,7-0,8 möglich
- Vorteile gegenüber einer Alu-Konstruktion bezügl. Dämmeingenschaften
- zusätzl. Metall-Wärmeleitblech gem. Vorgabe PHI am Randverbund
- Verwendung nachwachsender Rohstoffe

Zum Einsatz wird die vom Passivhaus-Institut zertifizierte Pfosten-Riegel-Fassade Therm+ 50 h-v der Firma Raico kommen. Die Fassade wird durch höhere Glasstärken und den Abstandhalter Super Spacer Tri-Seal der Firma Edgetec gegenüber der zertifizierten Variante thermisch nochmals aufgewertet.

Tabelle 1 zeigt die thermischen Qualitäten der Fenster und Pfosten-Riegel-Fassaden entsprechend dem Planungsstand. Die Werte wurden vom PHI in Anlehnung an die DIN EN ISO 10077-2 ermittelt. Diese Norm sieht Randbedingungen von -10℃ außen und 20℃ innen von. Diese Randbedingungen wurden, a bweichend von den tatsächlichen Temperaturen im Bad übernommen. Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die Berechnungsmodelle und Isothermengrafiken der berechneten Konstruktionen.

Tabelle 1: Thermische Qualitäten der verwendeten Fenster und Pfosten-Riegel-Fassaden

Nr.	**Rahmen**	**Wärme-durchgangs-koeffizient U** [W/(m²K)]	**Rahmen-ansichts-breite b** [m]	**Wämebrückenverlust-koeffizient (Glasrand) Ψ** [W/(mK)]
1	Pfosten in der Halle	0,95	0,05	0,037
2	Riegel in der Halle*	0,93	0,05	0,035
3	Pfosten (übriger Bereich)	0,91	0,05	0,034
4	Riegel (übriger Bereich)*	0,89	0,05	0,032
5	Öffnungsflügel (alle Schnitte, alle Bereiche)	0,97	0,13	0,031
6	Oberlichte**	1,10	0,13	0,040
* Werte auf Grundlage der Pfosten und der zertifizierten Variante abgeschätzt ** Annahmen, noch keine konkreten Produktinformationen vorhanden				

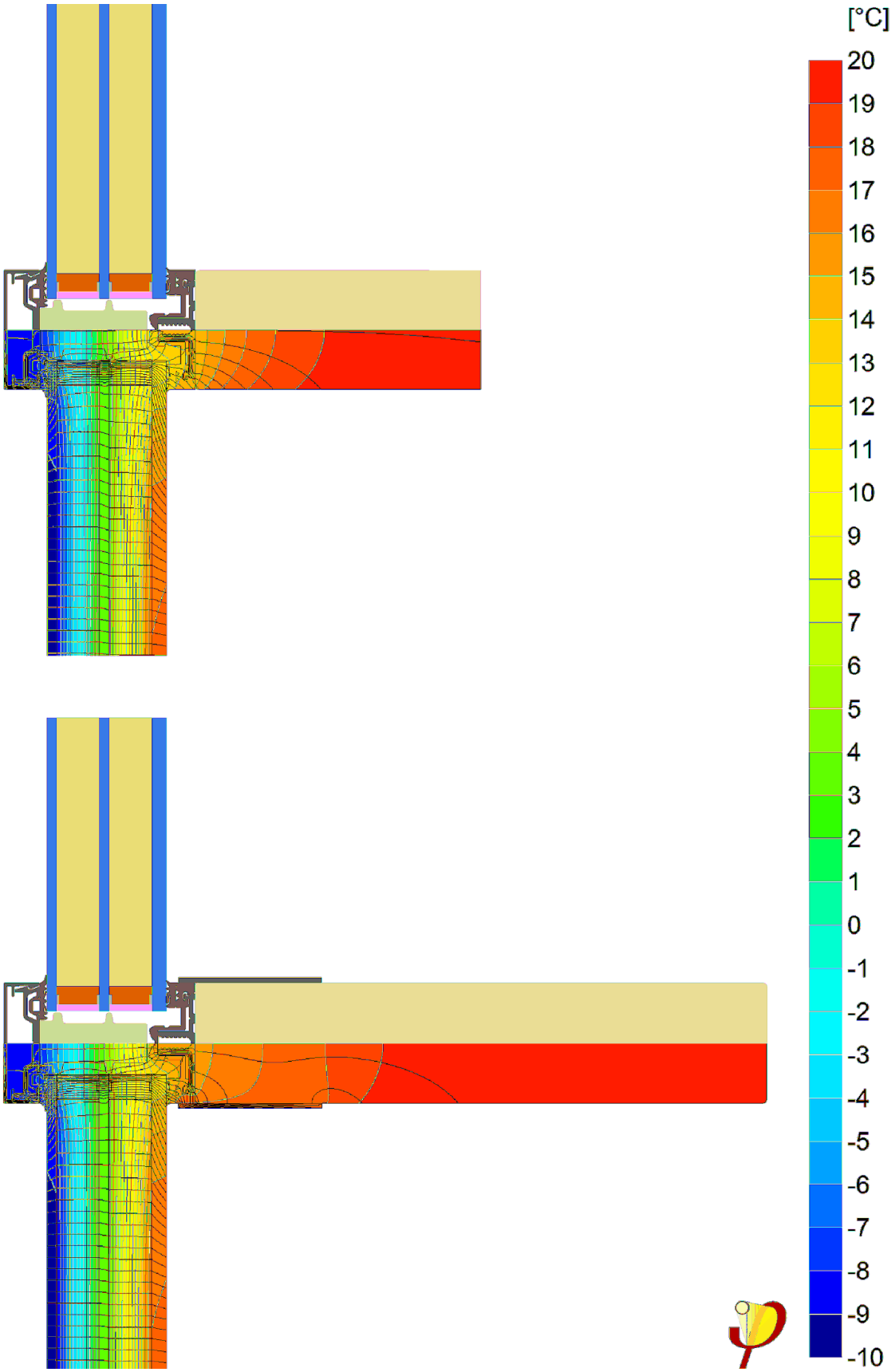


Abbildung 15: Pfosten-Riegel-Fassade Raico Therm+ 50 h-v in den im Lippebad verwendeten Versionen (Oben: Berechnungsmodel, unten: Isothermengrafik mit Temperatur- und Wärmestromlinien). In der Halle wird eine Variante mit Wärmeleitblechen zur Erhöhung der Glasrandtemperatur zur Anwendung kommen (untere Abbildung) (Quelle: PHI)

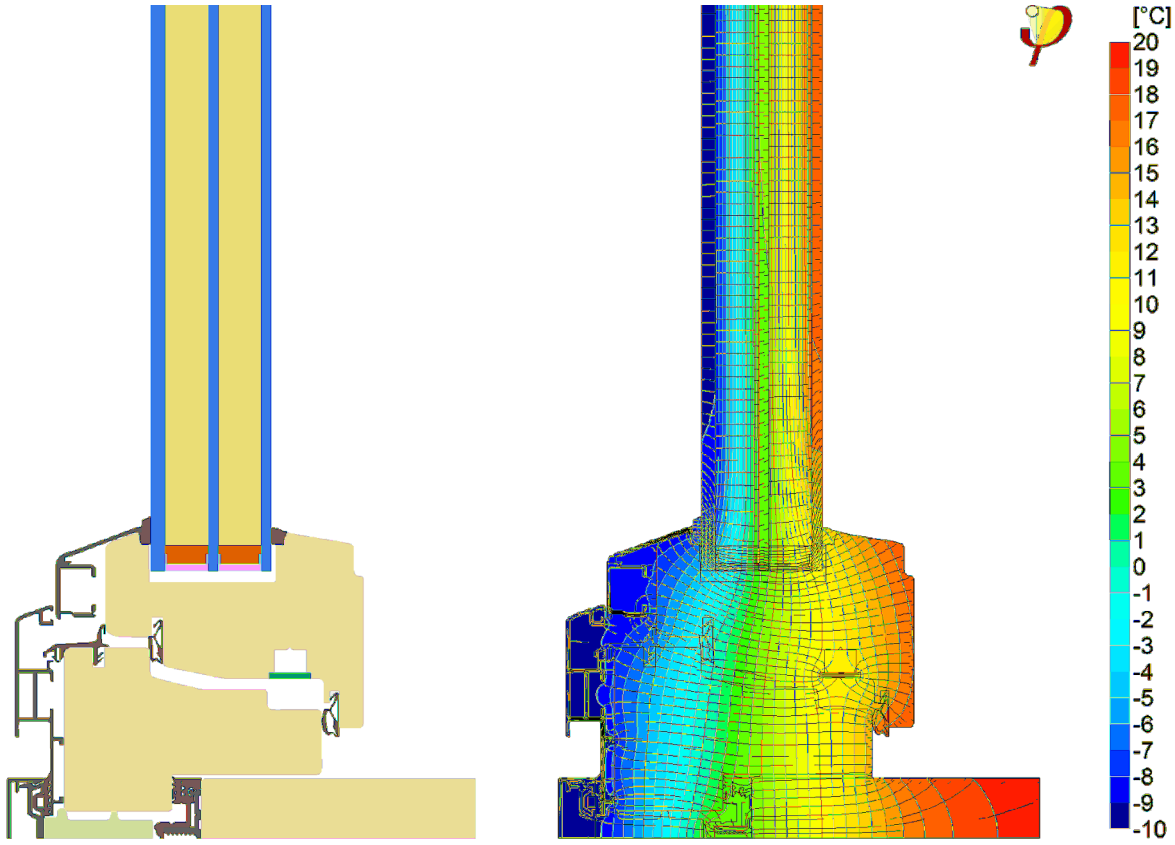


Abbildung 16: Öffnungsflügel in der zur Anwendung kommenden Version der Fassade Raico Therm+ 50 h-v. Links: Berechnungsmodell, rechts: Isothermengrafik mit Temperatur- und Wärmestromlinien (Quelle: PHI)

Einbausituation

In Abbildung 17 ist die Einbausituation exemplarisch dargestellt. Der Einbauwärmebrückenverlustkoeffizient liegt mit 0,070 W/(mK) in einem für Pfosten-Riegel-Fassaden üblichen Bereich.

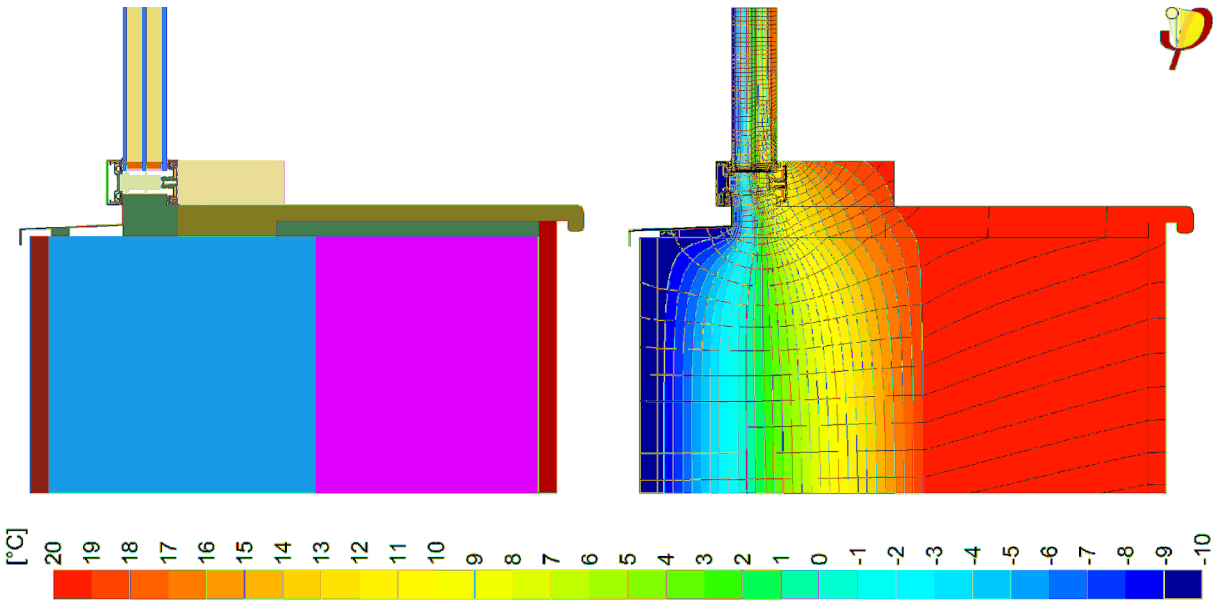


Abbildung 17: Einbausituation "unten" der zum Einsatz kommenden Pfosten-Riegel-Fassade in die geplante Betonwand mit Wärmedämmverbundsystem (Quelle: PHI)

Minimaltemperatur und resultierende maximale relative Fechte

Im Rahmen der vom Passivhaus Institut durchgeführten Grundlagenuntersuchung [PHI 2009] wurde festgestellt, dass sich durch die Erhöhung der Luftfeuchte im Bad und der damit einhergehenden Verringerung der Verdunstung erhebliche Energieeinsparungen erzielen lassen vgl. auch 5.3.1.

Da Tauwasser aus hygienischen und baukonstruktiven Gründen vermieden werden soll, ist die maximale Luftfeuchte unter anderem von der minimalen Oberflächentemperatur innerhalb des Bades begrenzt.

Als kältestes Außenbauteil wurde in der Grundlagenstudie die Eckausbildung des inneren Glasrandbereiches von Pfosten-Riegel-Fassaden identifiziert.

Bezüglich der Oberflächentemperaturen sind zunächst Aluminiumtragsysteme im Vorteil. Werden Holzsysteme jedoch mit Aluminiumleisten aufgewertet, stellen diese sowohl hinsichtlich des Wärmedurchgangs als auch hinsichtlich der Oberflächentemperaturen die beste der in der Grundlagenstudie untersuchten Lösungen dar.

Bei der Planung der Fassaden für das Lippe Bad Lünen wurden die Empfehlungen aus der Grundlagenuntersuchung umgesetzt. Zum Einsatz wird die Pfosten-Riegel-Fassade Therm+ 50 h-v der Fa. Raico Bautechnik kommen, die hinsichtlich der Oberflächentemperatur durch Aluminiumleisten aufgewertet wird. Als Abstandhalter ist der SuperSpacer Tri-Seal der Fa. Edgetec geplant, welche als thermisch beste marktverfügbare Lösung gilt. Der hohe Scheibenabstand von 18 mm ermöglicht einen Wärmedurchangskoeffizienten des Glases von 0,56 W/(m²K) bei Argongasfüllung.

Um die minimale Oberflächentemperatur zu ermitteln, wurde eine Fassadenecke dreidimensional modelliert (vgl. Abbildung 18) und das thermische Verhalten simuliert.

Bei einer angenommenen Außentemperatur von -5℃ und einer Innentemperatur von 32 ℃ stellt sich in der modellierten Fassadenecke eine Temperatur von 23,98℃ ein (vgl. Abbildung 19). Dies entspricht einer maximalen kondensatfreien Raumluftfeuchte von 63% bei den genannten Randbedingungen. In Abbildung 20 sind die maximalen tauwasserfreien relativen Raumluftfeuchten einer Standardfassade und der geplanten Fassade in Abhängigkeit von der Außentemperatur dargestellt.

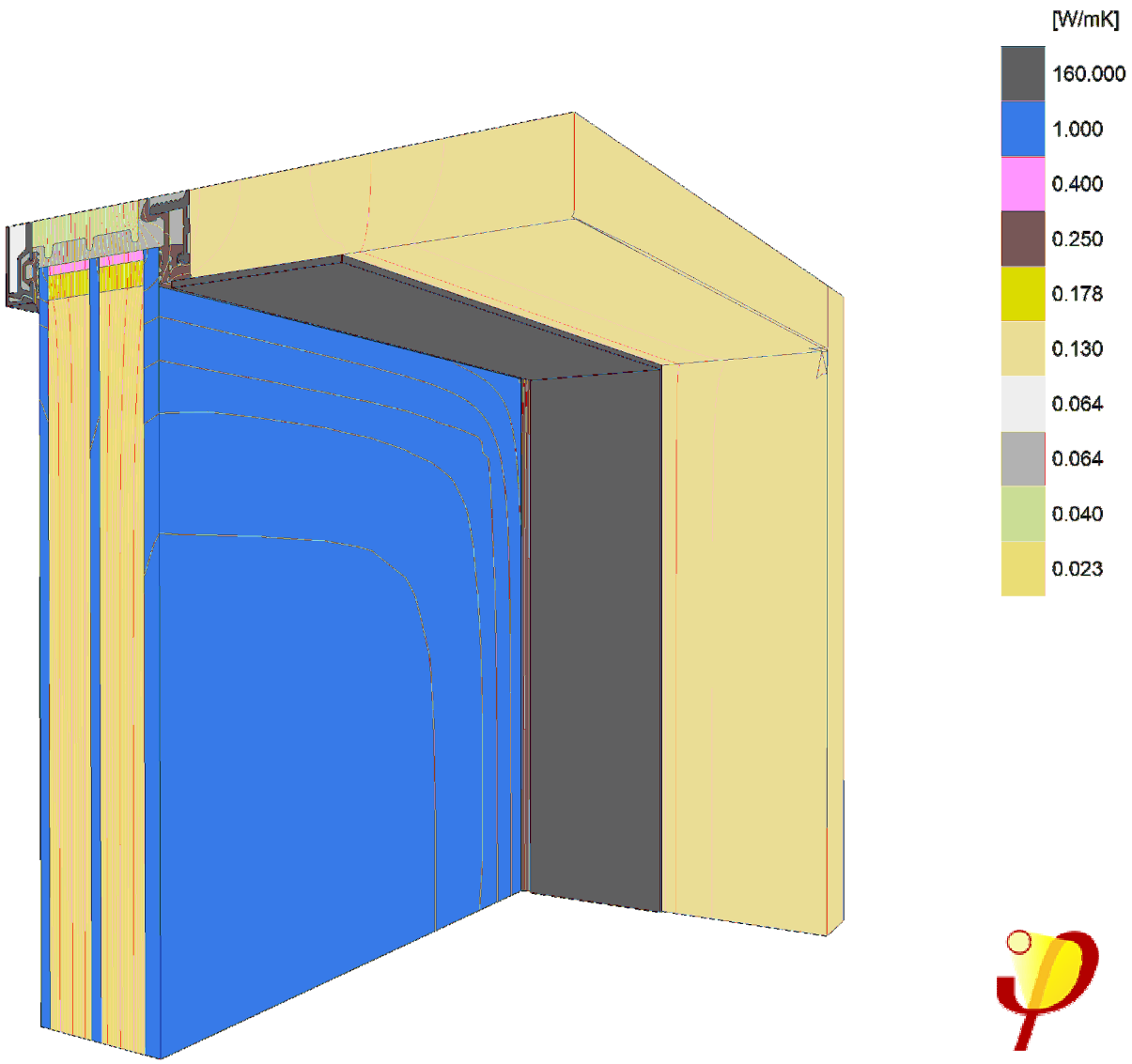


Abbildung 18: Simulationsmodell zur Ermittlung der minimalen Oberflächentemperatur der geplanten Fassade (Quelle: PHI)

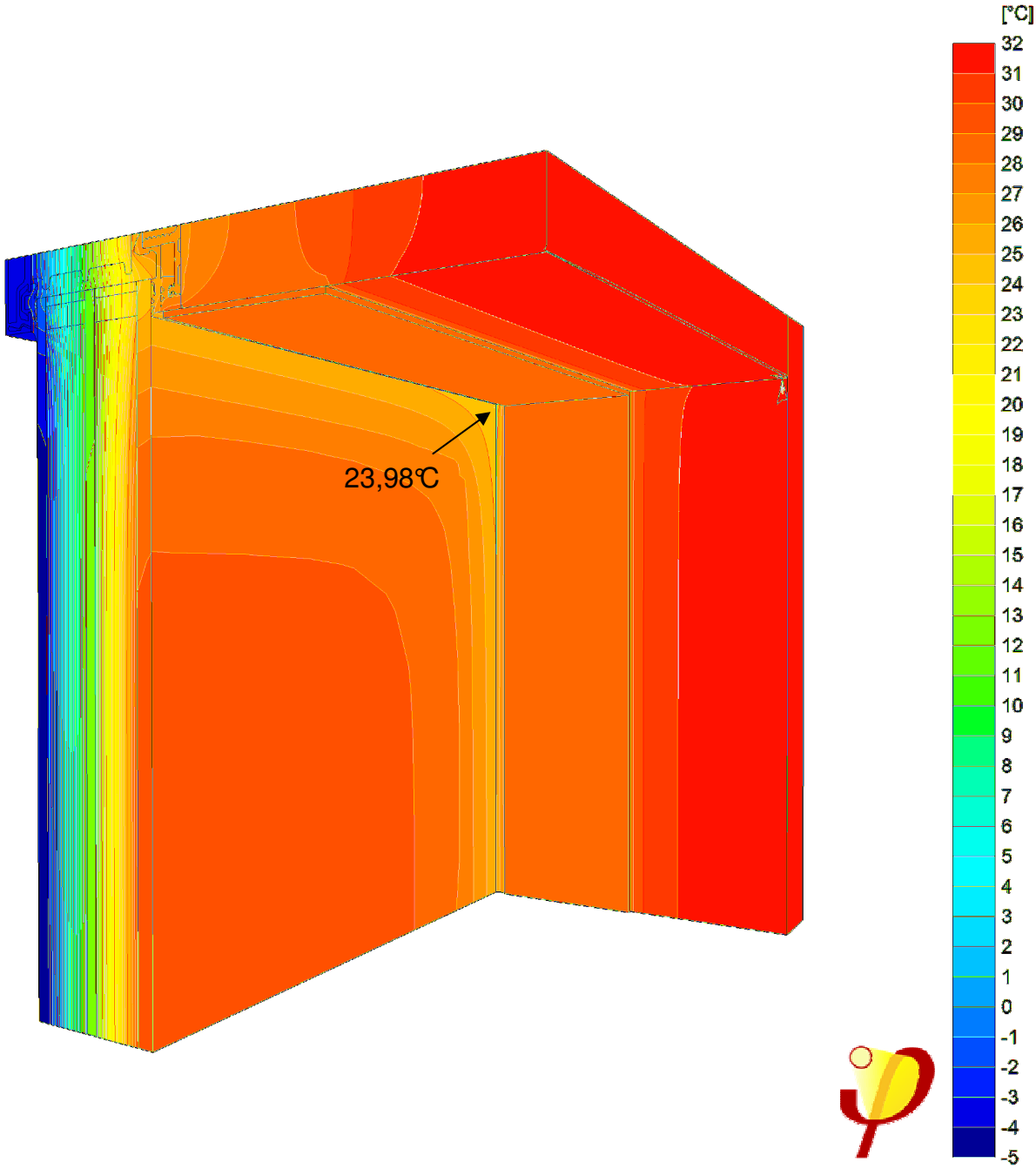


Abbildung 19: Isothermendarstellung für das Simulationsmodell zur Ermittlung der minimalen Oberflächentemperatur der geplanten Fassade bei einer Außentemperatur von -5 °C und einer Innentemperatur von 32 °C (Quelle: PHI)

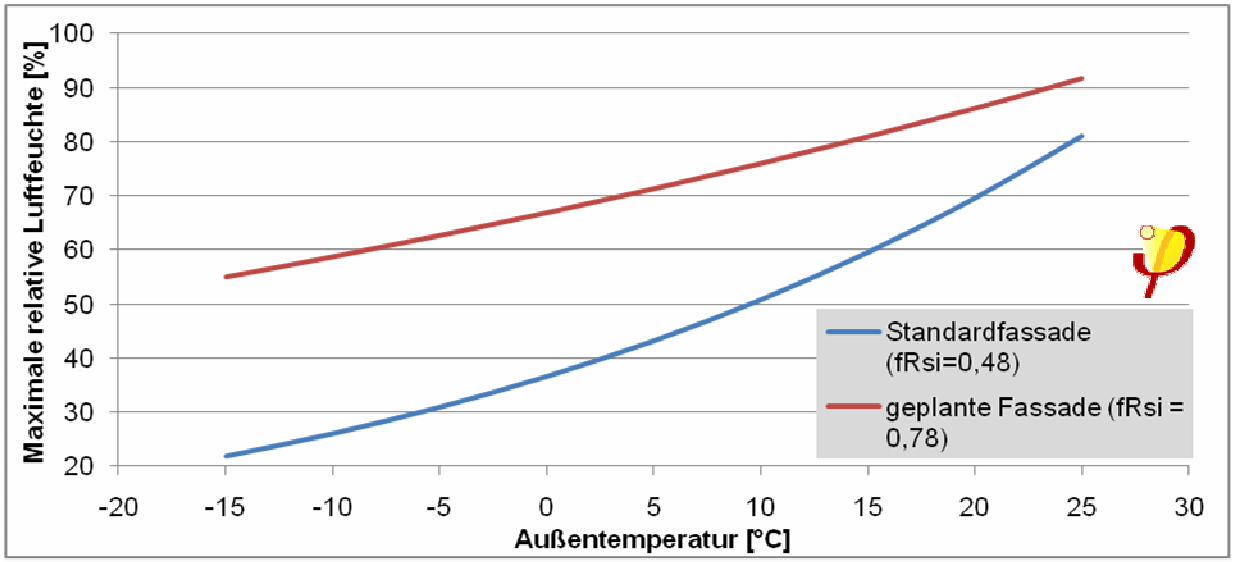


Abbildung 20: Maximale tauwasserfreie Raumluftfeuchten einer Standardfassade (Aluminium Trafsystem, 2-Fach Verglasung, Aluminium Randverbund) und der geplanten Fassade in Abhängigkeit von der Außentemperatur (Quelle: PHI).

Glasqualitäten

Im Lippe Bad Lünen werden bei allen vertikalen Verglasungen, bei denen dies statisch möglich ist, Scheibenzwischenräume von 18 mm gewählt. Dies ermöglicht Glas-U-Werte von 0,56 W/(m²K) auch mit Argon-Füllung. Der Gesamtenergiedurchlassgrad g wird mit 0,46 angenommen.

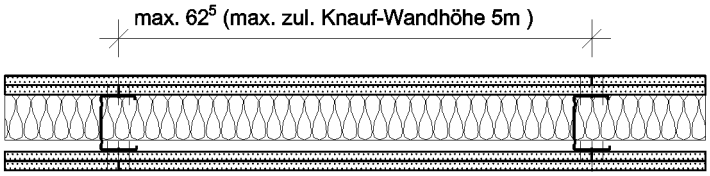
Für die Lichtkuppeln im Bereich der Umkleiden wurde ein Glas-U-Wert von 0,7 W/(m²K) bei einem Gesamtenergiedurchlassgrad g von 0,3 angenommen.

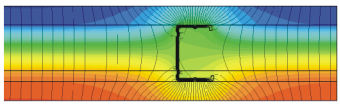
4.5.6 Innenbauteile zwischen Temperaturzonen

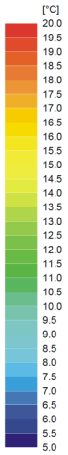
Um den Wärmefluss zwischen den Temperaturzonen zu reduzieren, werden auch die Innenwände mit einer Dämmung versehen. Teilweise werden hier Leichtbauwände mit Stahlprofil Tragstruktur eingesetzt. Diese Stahlprofile stellen Wärmebrücken dar, die durch das PHI ermittelt und in der Energiebilanzierung berücksichtigt wurden:

LW 1

Trennwand mit Metall-Einfachständerwerk, doppelt beplankt
z.B. KNAUF AQUAPANEL Cement Board Indoor
Einbaubereich 2





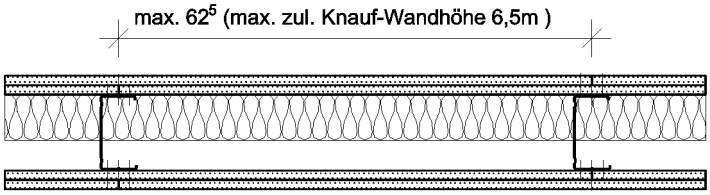


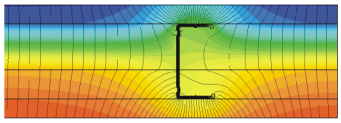
AQUAPANEL Cement Board, 2x12,5mm	2,5cm	λ = 0,36 W/(mK)
Metallständerwerk CW 75/0,6-Profil	7,5cm	λ = 50,00 W/(mK)
Mineralfasereinlage A_F>= 5kPa/m² optional	6 cm	λ = 0,04 W/(mK)
AQUAPANEL Cement Board, 2x12,5mm	2,5cm	λ = 0,36 W/(mK)

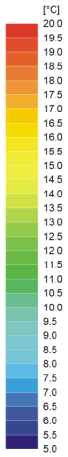
Ψ_{WB}	=	0,158 W/(mK)
ΔU_{WB}	=	0,253 W/(m²K)
U	=	0,733 W/(m²K)

LW 2

Trennwand mit Metall-Einfachständerwerk, doppelt beplankt
z.B. KNAUF AQUAPANEL Cement Board Indoor
Einbaubereich 2





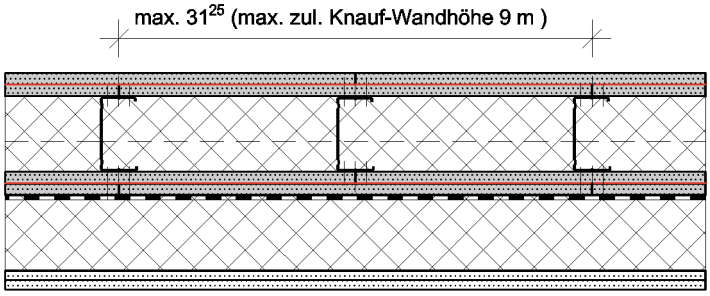


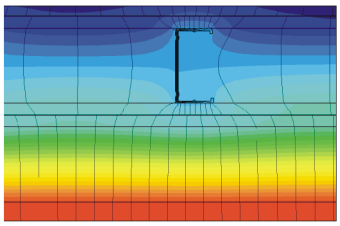
AQUAPANEL Cement Board, 2x12,5mm	2,5cm	λ = 0,36 W/(mK)
Metallständerwerk CW 100/0,6-Profil	10cm	λ = 50,00 W/(mK)
Mineralfasereinlage A_F>= 5kPa/m² optional	6 cm	λ = 0,04 W/(mK)
AQUAPANEL Cement Board, 2x12,5mm	2,5cm	λ = 0,36 W/(mK)

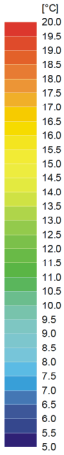
Ψ_{WB}	=	0,162 W/(mK)
ΔU_{WB}	=	0,259 W/(m²K)
U	=	0,757 W/(m²K)

LW 3

Brandwand A1, nichttragend als Montagewand
mit Metall-Einfachständerwerk, doppelt beplankt
z.B. KNAUF W132
Treppenhaus E.09 Altbau







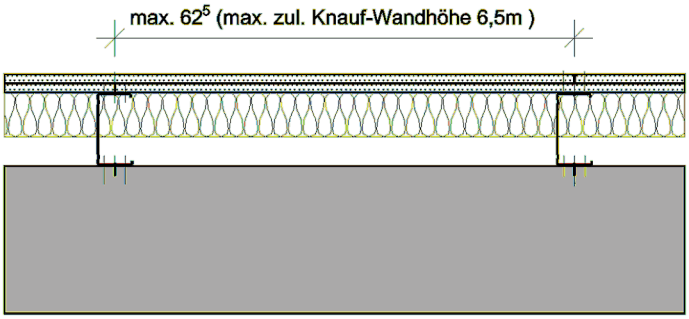
Brandwand F90 nach DIN 4102-3, nichttragend D= 61,1cm

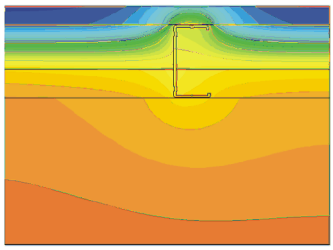
Knauf Fireboard, 2x15mm Stahleinl 0,5mm	3,05cm	λ = 0,25 W/(mK)
Metallständerwerk CW 100/50/0,6-Profil	10cm	λ = 50,00 W/(mK)
Dämmschicht Bauklasse A	10,cm	λ = 0,04 W/(mK)
Knauf Fireboard, 2x15mm Stahleinl 0,5mm	3,05cm	λ = 0,25 W/(mK)
Schaumglas, dampfdicht geklebt,		λ = 0,042 W/(mK)
z. B. FOAMGLAS Platten T4+ o.glw.	10cm	
AQUAPANEL Cement Board, 2x12,5mm	2,5cm	λ = 0,36 W/(mK)

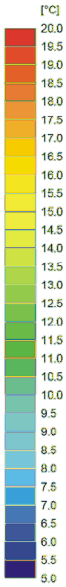
Ψ_{WB} = 0,030 W/(mK)
ΔU_{WB} = 0,094 W/(m²K)
U = 0,280 W/(m²K)

LW 7

Trennwand mit Metall-Einfachständerwerk, doppelt beplankt
z.B. KNAUF AQUAPANEL Cement Board Indoor
Auf Stahlbetonwand







AQUAPANEL Cement Board, 2x12,5mm	2,5cm	λ = 0,36 W/(mK)
Metallständerwerk CW 100/0,6-Profil	10cm	λ = 50,00 W/(mK)
Mineralfasereinlage A_F>= 5kPa/m² optional	6 cm	λ = 0,04 W/(mK)
Stahlbeton	20 cm	λ = 2,3 W/(mK)

Ψ_{WB} = 0,199 W/(mK)
ΔU_{WB} = 0,319 W/(m²K)
U = 0,794 W/(m²K)

4.6 Wärmebrücken

Eine wesentliche Säule des Passivhaus Konzeptes ist die Vermeidung von Wärmebrücken. Daher werden für Passivhäuser grundsätzlich wärmebrückenfreie Konstruktionen und Anschlüsse gefordert (vgl. z.B. Feist 2001). Bei komplexen Gebäuden kann es aus statischen und konstruktiven Gründen jedoch zu unvermeidbaren Wärmebrücken kommen (vgl. z.B. AkkP 35). Dies gilt insbesondere

bei der energetischen Ertüchtigung von Bestandsgebäuden (siehe z.B. AkkP 24, AkkP 32, AkkP 39). In Tabelle 2 sind die identifizierten Wärmebrücken mit ihren Wärmebrückenverlustkoeffizienten und Längen aufgeführt. Abbildung 21 bis Abbildung 23 zeigen die Simulationsmodelle und Temperaturverläufe.

Tabelle 2: Bilanzierte Wärmebrücken

Nr.	**Wärmebrücke**	**Ψ** [W/(mK)] bzw. **χ** [W/K]	**Länge** [m]	**Quelle**
1	Dämmschürze, Neubau	0,167	35,2	Abbildung 21
2	Anschluss Entrauchungs- bzw. Lüftungsschacht, Neubau	0,227	28,9	Abbildung 21
3	Auskragende Wandecke, Neubau	0,040	22,0	Abbildung 21
4	Einbindung Betondecke Altbau	0,694	35,3	Abbildung 22
5	Attikaanschluss Altbau	0,097	63,6	Abbildung 22
6	Anschluss Schwimmhalle-Schalthalle Altbau	0,658	37,9	Abbildung 22
7	Fußpunkt Altbau	0,668	27,0	Abbildung 23
8	Anschluss Bodenplatte Alt- und Neubau	1,128	49,5	Abbildung 23
9	(Strang-) Entlüftungsrohre	0,1	27,5	PHI
10	Befestigungspunkte für Alu-Steigleiter (punktförmig, Anzahl)	0,01	4	AkkP 35
11	Glasträger (punktförmig, Anzahl)	0,04	294	Krick 2010

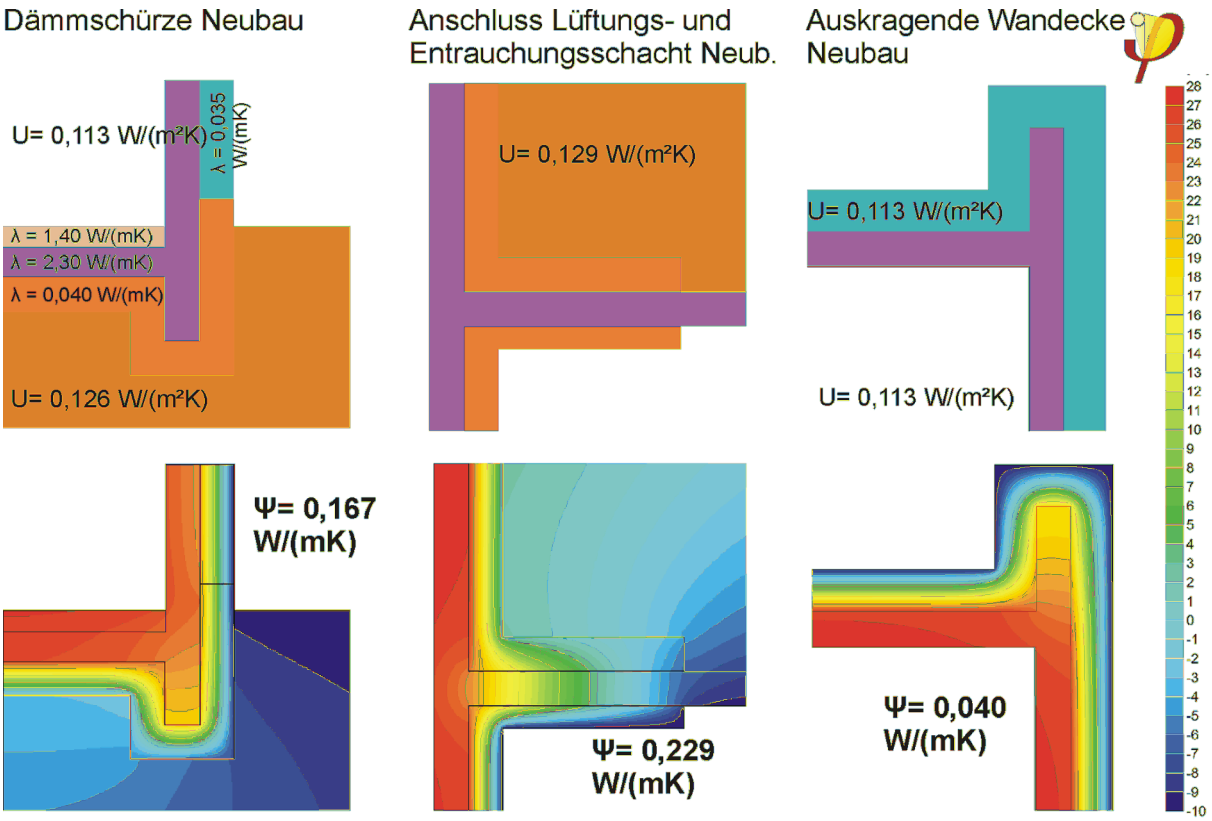


Abbildung 21: Berechnete Wärmebrücken im Bereich des Neubaus (PHI)

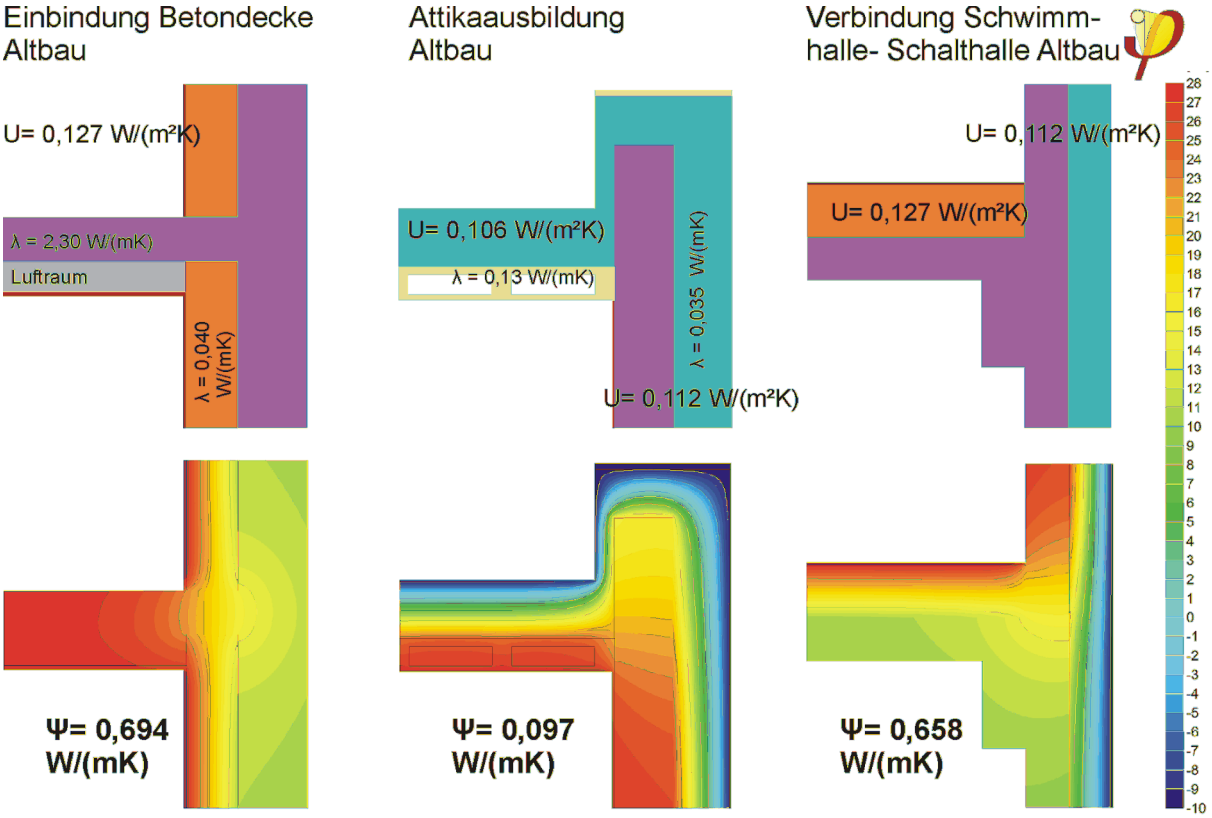


Abbildung 22: Berechnete Wärmebrücken im Bereich des Altbaus (1) (PHI)

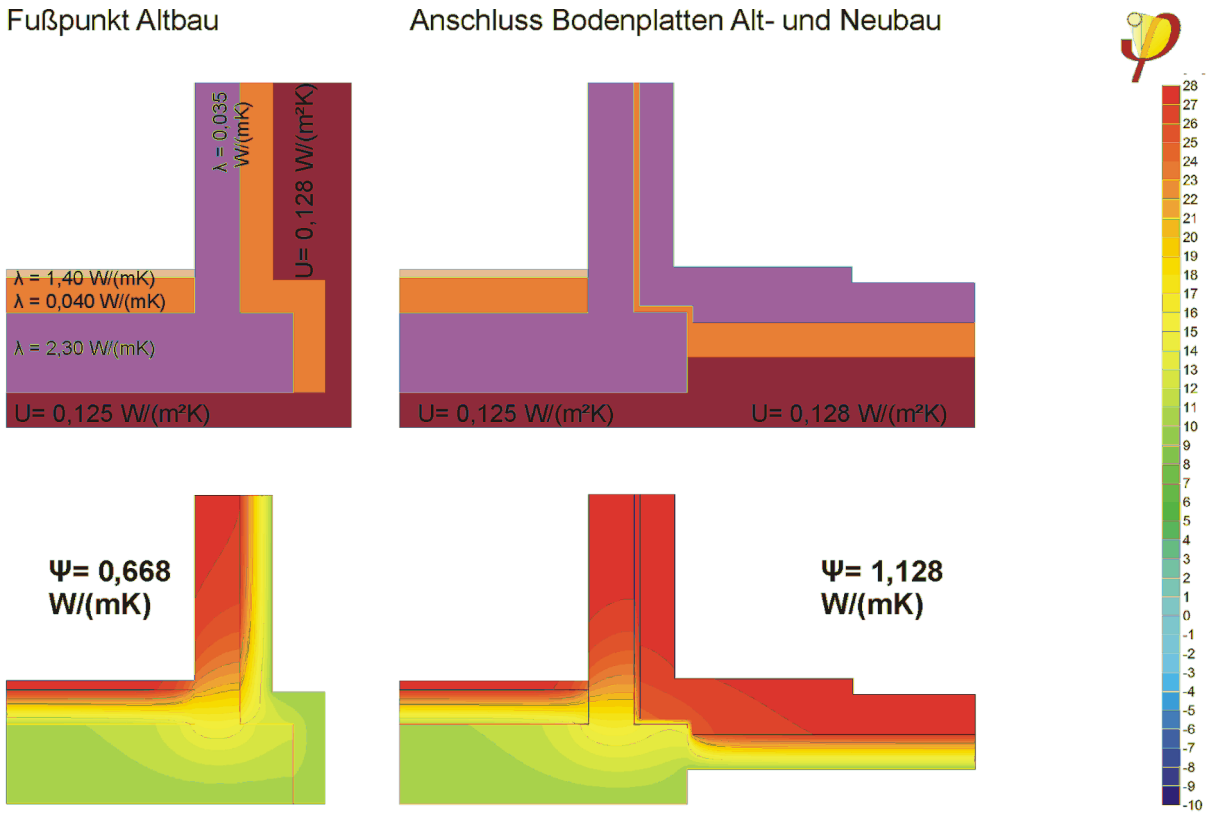


Abbildung 23: Berechnete Wärmebrücken im Bereich des Altbaus (2) (PHI)

4.7 Luftdichtheitskonzept

Die Erfahrungen mit großvolumigen Passivhäusern zeigen, dass im Durchschnitt n50-Werte von 0,3 h^{-1} erreicht werden. Bei sehr guten Luftdichtheitskonzepten und sehr guter Ausführung liegen die n_{50}-Werte sogar unter 0,1 h^{-1}. Eine präzisere Aussage über die Güte der Luftdichtheit gibt der Leckageluftwechsel bezogen auf die Fläche der Außenbauteile, der so genannte q_{50}-Wert wieder. Dieser liegt im Schnitt etwas unter 0,6 $m^3/h/m^2$. Setzt man diesen als oberen Grenzwert für das Hallenbadgebäude in Lünen fest, so ergibt sich ein n_{50}-Wert von 0,2 h^{-1}. Aufgrund der höheren Innraumfeuchten und des damit verbundenen Bauschadensrisikos im Bereich der Leckagen wird dieser Wert als Zielwert festgelegt:

$$n_{50} \leq 0{,}2\ h^{-1}$$

Im Boden- und Wandbereich wird die luftdichte Ebene durch die Stahlbetonkonstruktion, teilweise in Verbindung mit dem Innenputz hergestellt. Im Dachbereich bildet die Dampfsperre zwischen Dämmung und Holzkonstruktion die luftdichte Ebene. Die Übergänge der Ebenen und die Anschlüsse an Fenster- und Pfosten-Riegel-Fassaden wurden sorgfältig detailliert.

4.8 Sommerfall

Die Untersuchungen zum Grundlagenbericht Passivhaus Hallenbad [PHI 2009] zeigen, dass es aufgrund der hohen Temperaturen im Hallenbad auch ohne Sonnenschutz kaum zu Übertemperaturen im Sommer kommt. Aus diesem Grund wurde, abgesehen von den Dachüberständen, auf Verschattungseinrichtungen verzichtet. Eine Kühlung erfolgt über eine Erhöhung des Außenluftwechsels.

4.9 Tageslichtoptimierung

Der Primärenergieeinsatz zur Sicherstellung einer ausreichenden Beleuchtung erreicht bei Nichtwohngebäuden bedeutende Größenordnungen. Im Sinne einer nachhaltigen Energieeffizienzstrategie sollen, wo dies gesamtwirtschaftlich vertretbar ist, alle baulichen Möglichkeiten ausgeschöpft werden, die dazu beitragen, den Kunstlichteinsatz zu reduzieren. Dazu zählt neben der Wahl der Reflexionsgrade der Raumumfassungsflächen vor allem die Optimierung der transparenten Flächen. Hierzu wurde eine Tageslichtsimulation der einzelnen Hallenabschnitte durch das PHI durchgeführt. Anhand der Ergebnisse konnten dann Verbesserungen hinsichtlich der Kunstlichtautonomie erzielt werden.

4.9.1 Tageslichtquotient

Der Tageslichtquotient (D) gibt das Verhältnis der im Gebäude tatsächlich vorhandenen Beleuchtungsstärke (E_P) zur außerhalb des Gebäudes verfügbaren Beleuchtungsstärke, gemessen auf einer horizontalen Fläche (E_{HZ}), an:

$$D = E_P/E_{HZ} \ [\%]$$

Die durchschnittliche Beleuchtungsstärke im Freien beträgt bei bedecktem Himmel 10.000 Lux. Bei einer gewünschten Beleuchtungsstärke im Hallenbereich von 300 Lux muss der Tageslichtquotient mindesten 3 % erreichen.

Die Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung stellt ein weiteres wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Qualität der Tageslichtversorgung dar. Hohe Quotienten im

fensternahen Bereich und niedrige in Hallenmitte führen zu starken Kontrasten, was einer optimalen Nutzerfreundlichkeit entgegensteht.

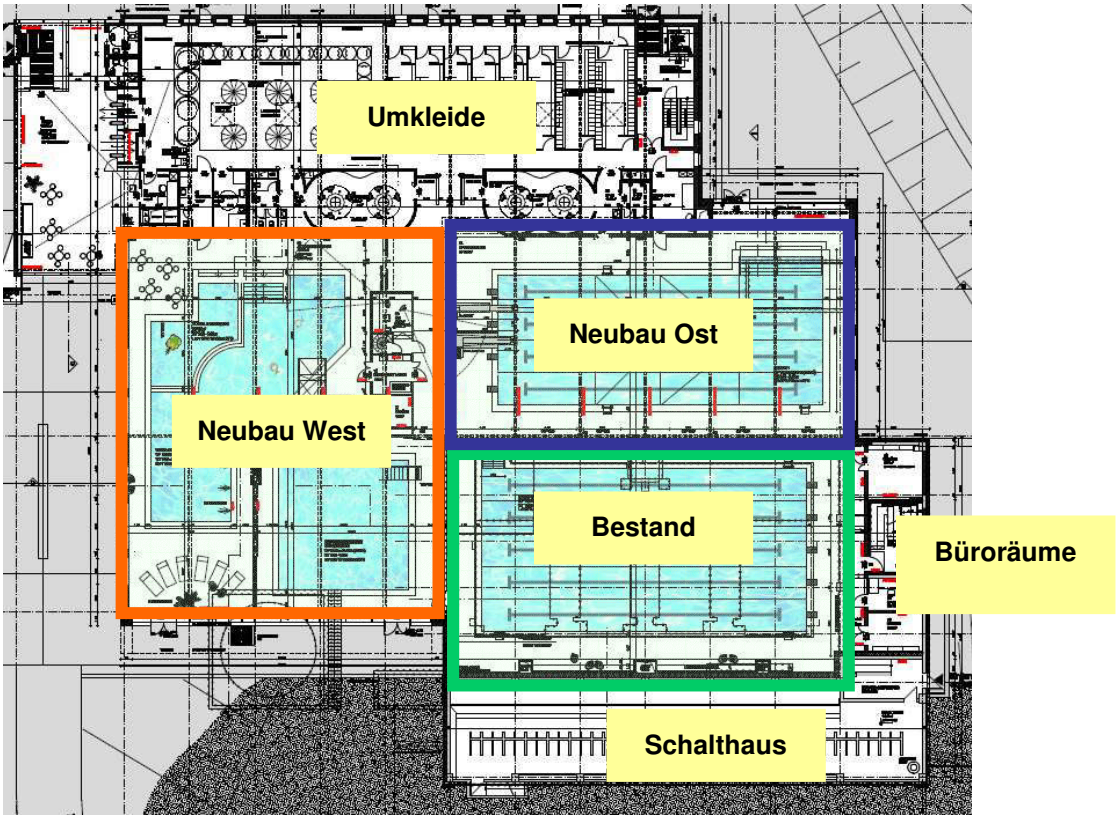


Abbildung 24: Grundriss des Hallenbades – betrachtete Bereiche der Tageslichtsimulation

4.9.2 Optimierung der Tageslichtnutzung im Gebäudebestand

Das Fernheizwerk besteht aus einer massiven Stahlbetonkonstruktion mit einer lichten Hallenhöhe von 12,8 m. Die Südseite des Hallenbereiches wird durch das Schalthaus begrenzt, im Ostbereich liegen Büroräume, an der Nord- und Westseite schließt der Neubau mit einer Hallenhöhe von etwa 6 m an. Für eine Tageslichtversorgung stehen daher lediglich die oberen Hallenbereiche der West- und Nordseite sowie die Dachflächen zur Verfügung. Für die Simulation wurden Reflexionsgerade der Wand und Decken von 70 %, sowie der Bodenflächen 60% (sehr hell) angenommen. Zum Vergleich: ein weißer Anstrich weist Reflexionsgrade von 75 bis 85 % auf.

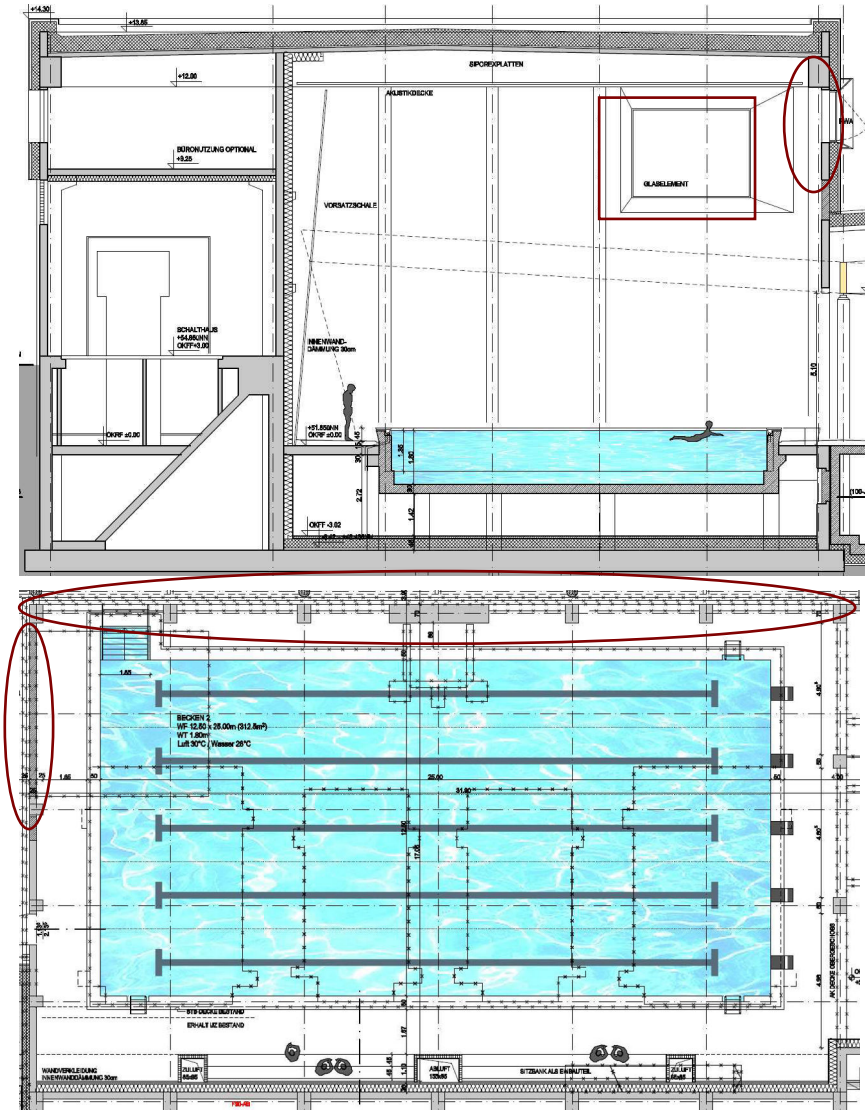


Abbildung 25: Schnitt und Grundriss des Fernheizwerkes mit geplanten Fensterelementen auf der West- und Nordseite

Die Tageslichtsimulation zeigte eine deutliche Unterschreitung des gewünschten Tageslichtkoeffizienten. Selbst im direkten Bereich der Fenster beträgt die Lichtausbeute lediglich 2,3 % (Abbildung 26).

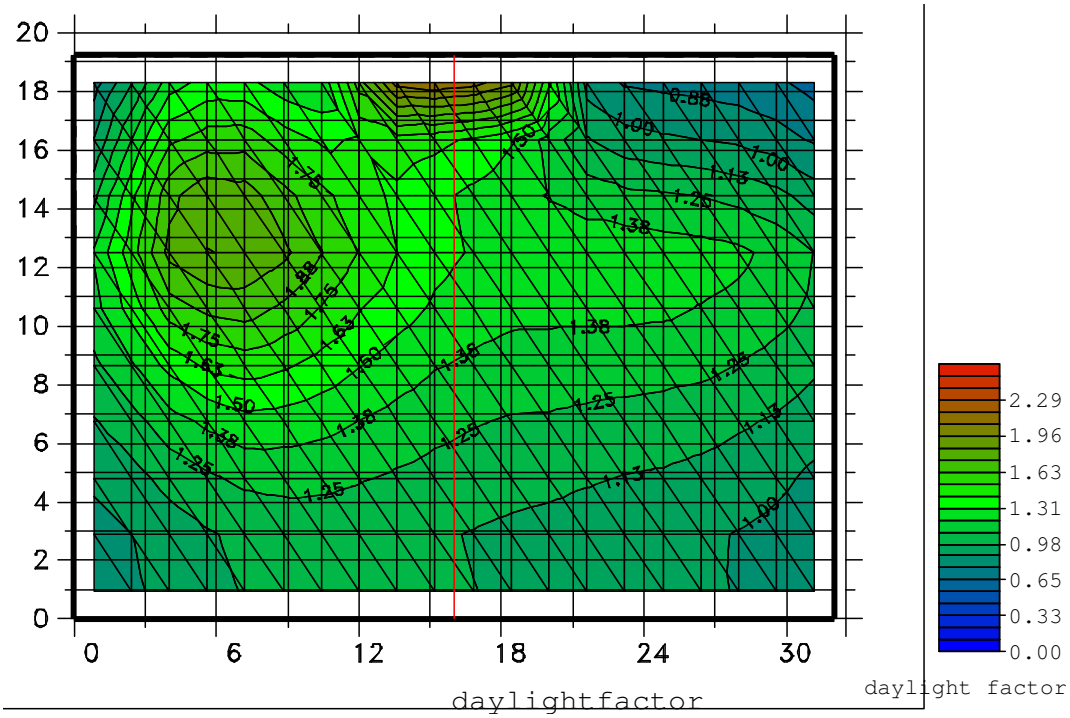


Abbildung 26: Tageslichtkoeffizient für den Hallenabschnitt im Bestandsgebäude

Zur Optimierung des Tageslichtquotienten wurde eine Vergrößerung der Fensterhöhe im Norden auf 1,5 m und eine Erhöhung der Fensterfläche im Westen vorgeschlagen. Durch diese Maßnahmen konnte eine deutlich bessere Tageslichtnutzung sowie eine gute Gleichmäßigkeit der Beleuchtung erzielt werden (Abbildung 27 und Abbildung 28).

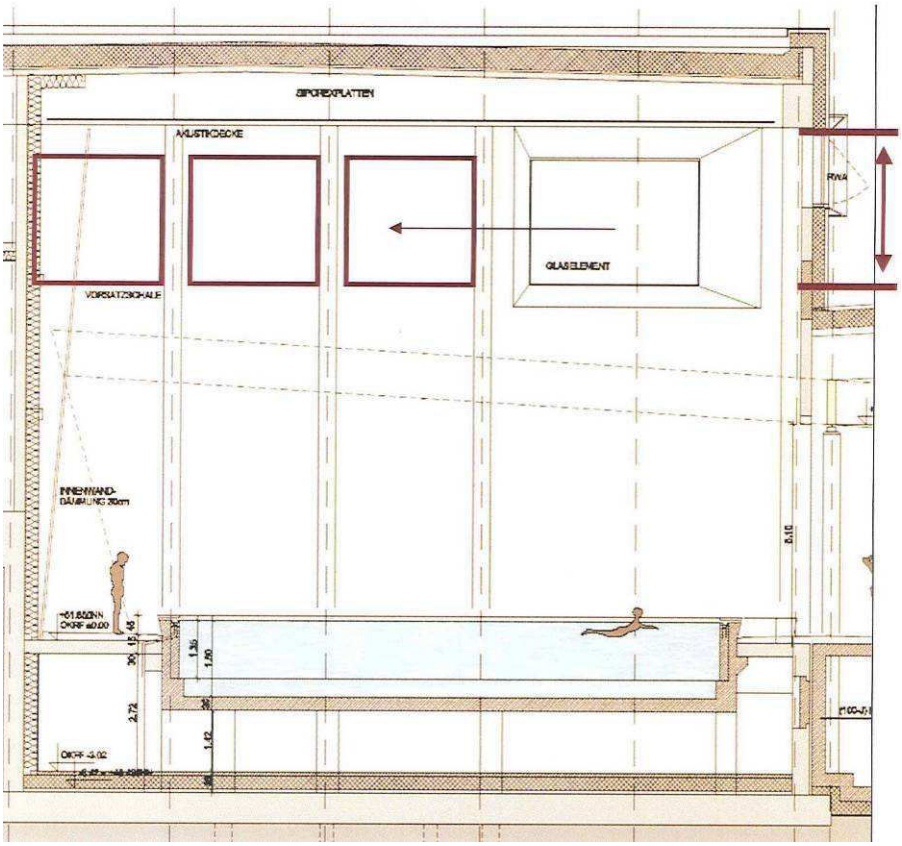


Abbildung 27: Verbesserungsvorschlag zur Optimierung der Tageslichtausbeute im Bestandsgebäude

Lichtkuppeln im Dachbereich bereiten bei Hallenbädern im Passivhausstandard noch Schwierigkeiten, da alle verfügbaren Konstruktionen mit Wärmebrücken behaftet sind. Bei der geplanten Anhebung der Hallenluftfeuchte könnte dies zu Kondensatproblemen führen. Weitere Gründe für die Entscheidung gegen Lichtkuppeln waren erhebliche Mehrkosten, Überhitzungsprobleme im Sommer, Blendung der Schwimmer, Reduzierung der für Photovoltaik nutzbaren Dachfläche sowie ein hoher Aufwand zur Wartung und Reinigung.

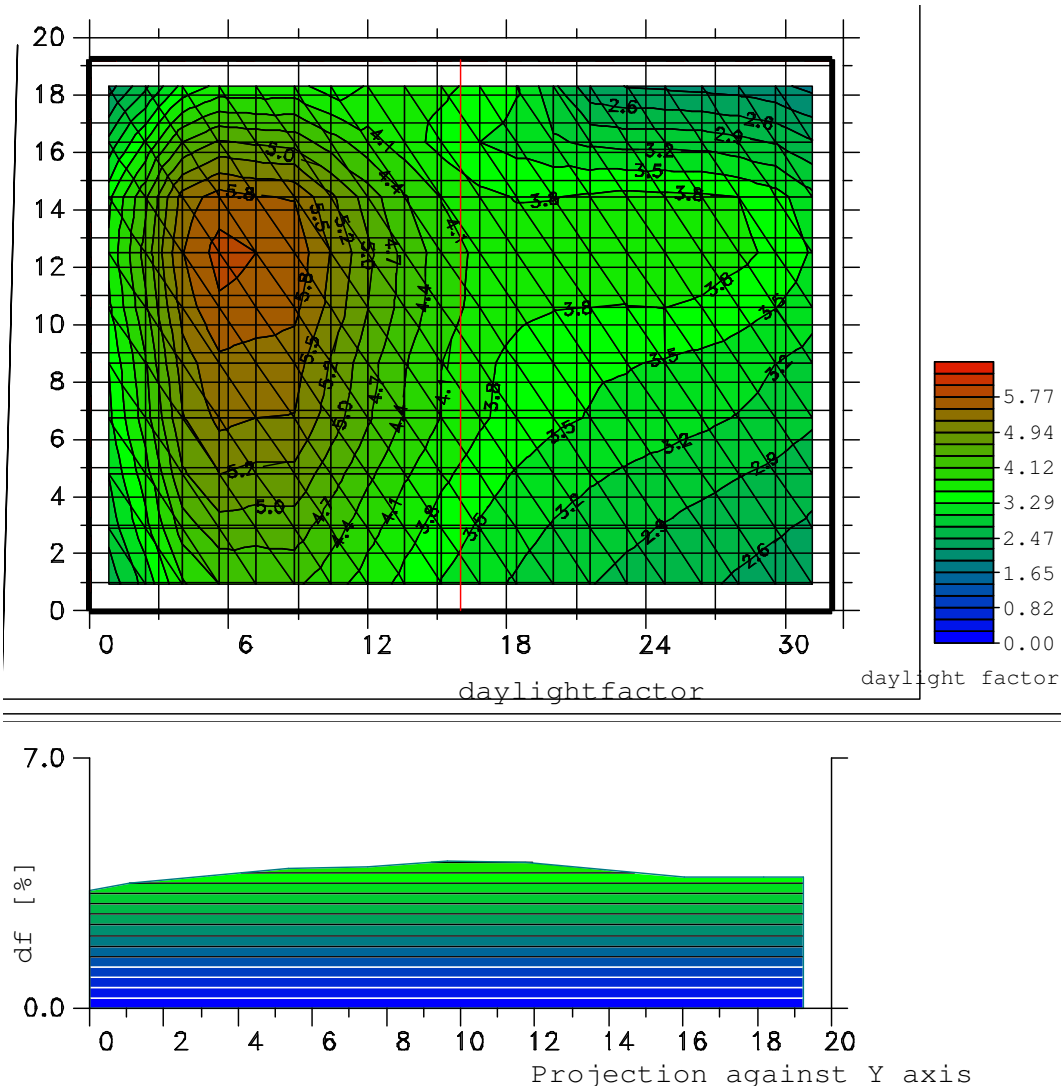


Abbildung 28: Tageslichtkoeffizient für den Hallenabschnitt im Bestandsgebäude mit optimierten Fensterflächen

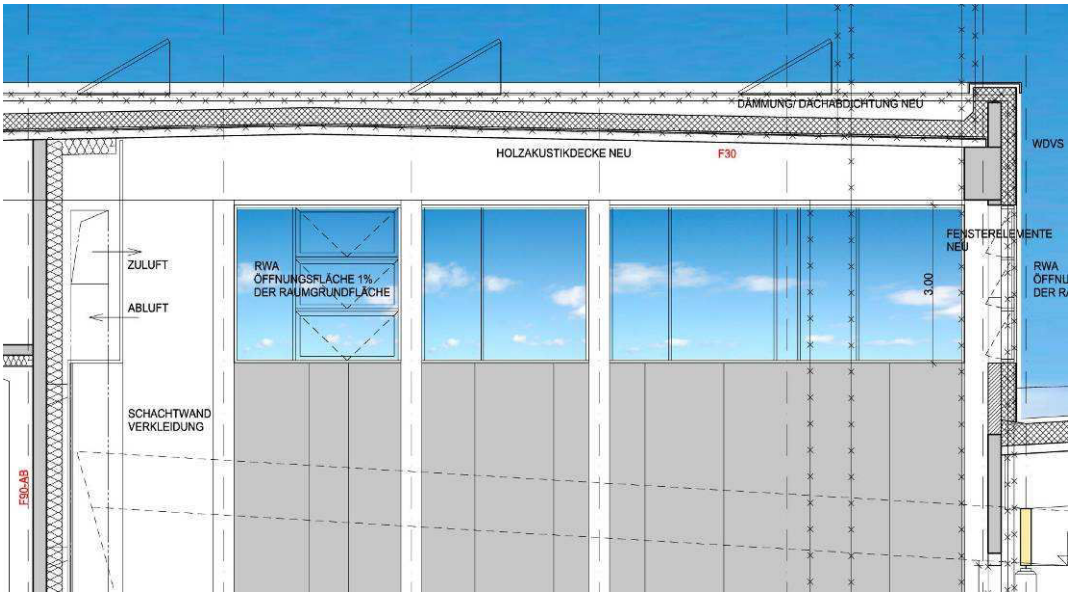


Abbildung 29: Verbesserte Fenstersituation im Bestandsgebäude

Die Empfehlungen aus der Tageslichtsimulation für diesen Bereich wurden wie folgt in die Planung umgesetzt:

- Vergrößerung des Fensterbandes Nordfassade von h= 1,50m auf h= 3,00m.
- h= 3,50m aufgrund des Dachanschlusses nicht möglich.
- Vergrößerung (h= 3,00m) und Verlängerung des Fensterbandes Westfassade in Südrichtung.
- Verlängerung bis an die Schalthauswand des Raumes aufgrund der TGA-Installationswand nicht möglich.
- Reflexionsgrade: Wand: ca. 80% (im wesentlichen weisser Anstrich)
  Decke: ca. 70% (Weisstanne natur)
  Boden: noch nicht festgelegt (produktabhängig)

4.9.3 Optimierung der Tageslichtnutzung im Hallenbereich Ost

Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen die geplante Situation im östlichen Bereich des Neubaus. Dort sind die Fensterflächen sowohl im Norden als auch im Osten raumhoch vorgesehen. Im Bereich der Umkleiden sind nur Oberlichter möglich.

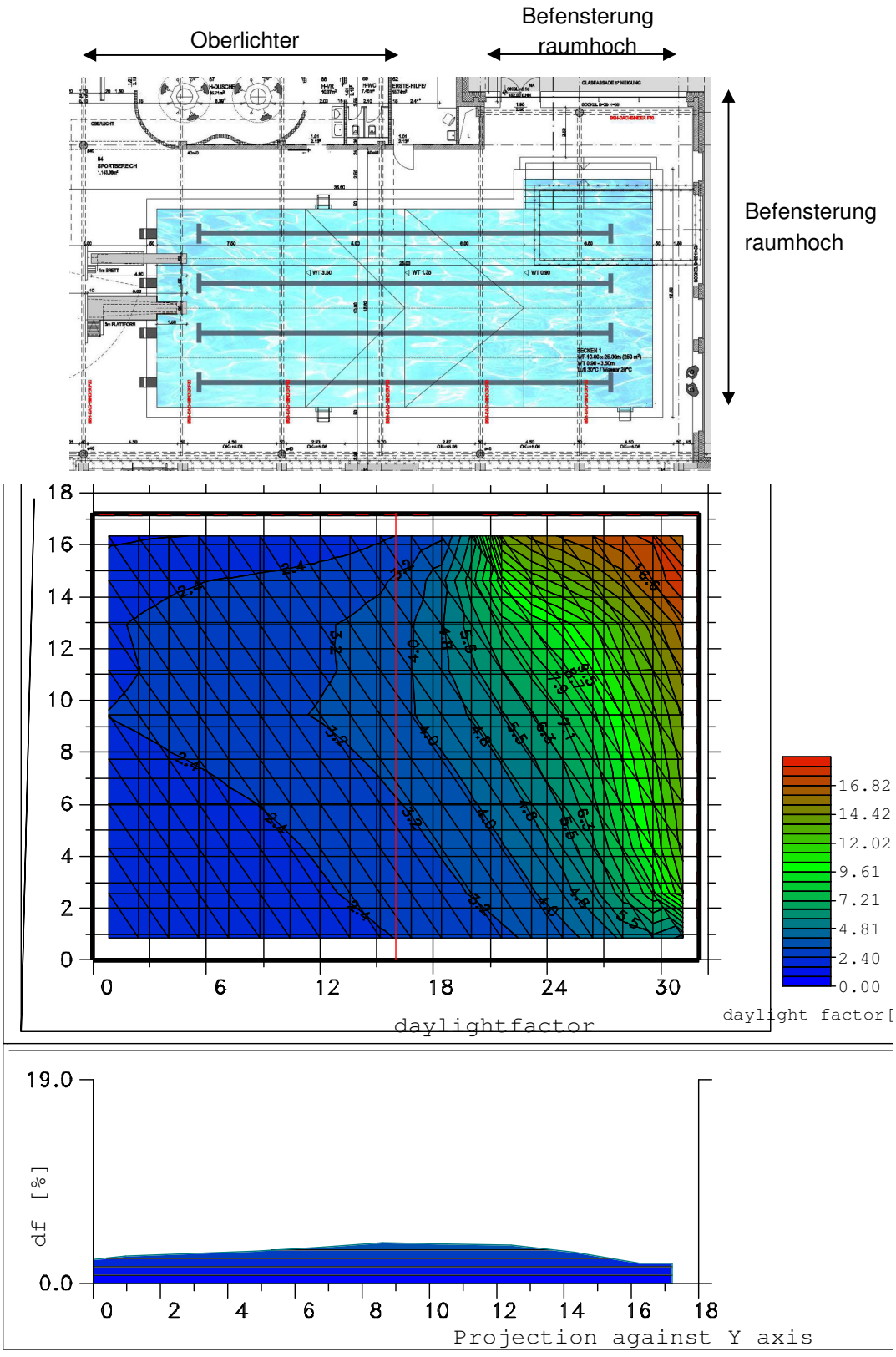


Abbildung 30: Tageslichtkoeffizient für den Hallenabschnitt Ost

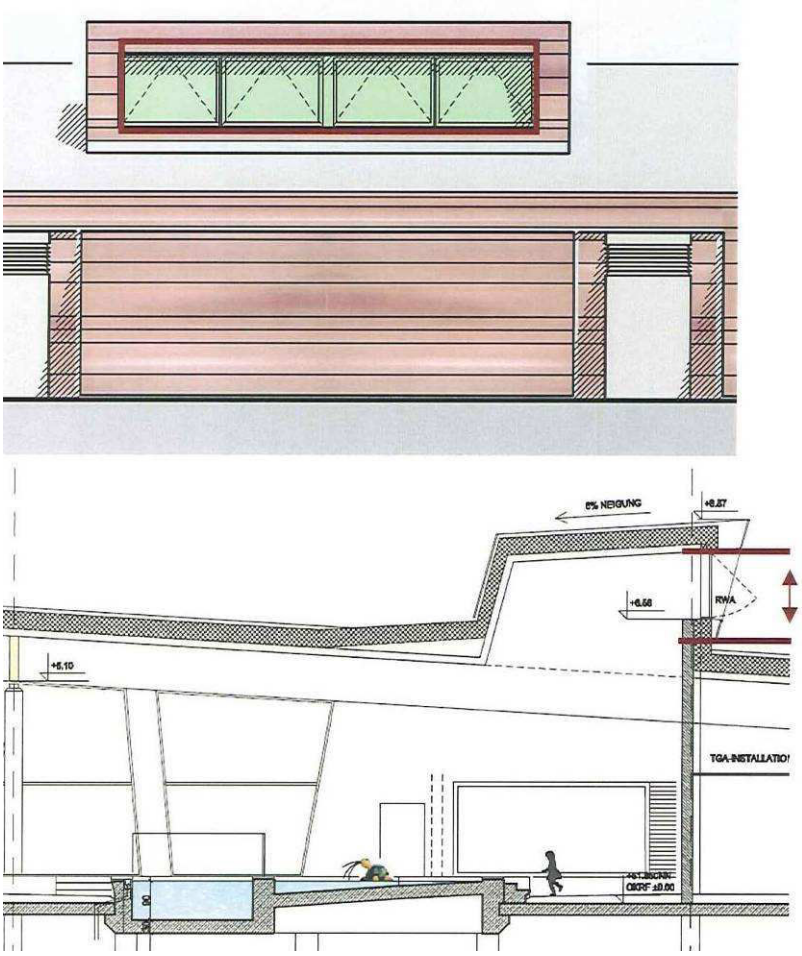
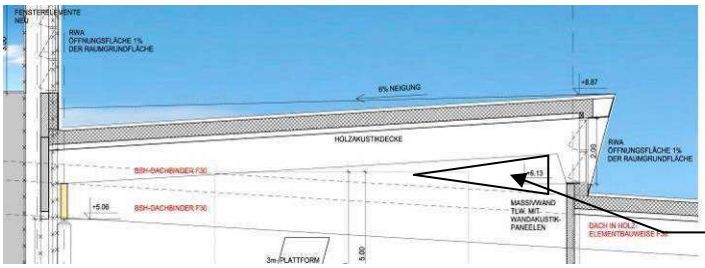


Abbildung 31: Verbesserungsvorschlag zur Optimierung der Tageslichtausbeute des östlichen Neubaus durch höhere Oberlichter

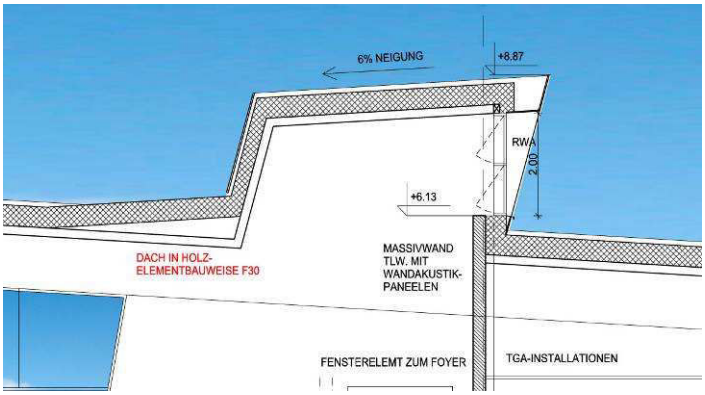
Die Simulation brachte folgende Ergebnisse: Der Tageslichtkoeffizient nimmt von Nordosten nach Südwesten hin deutlich ab. In Hallenmitte (Bereich Sprungturm) werden sehr geringe Werte von unter 3% erreicht.
Die Nordostecke wird aufgrund der raumhohen Verglasung überversorgt sodass die Tageslichtversorgung ungleichmäßig ist. Zur Verbesserung der Tageslichtversorgung in Hallenmitte könnten die Oberlichtbänder vergrößert bzw. erweitert werden. Werden die raumhohen Verglasungen mit Brüstungen versehen, so verbessert sich die Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung.
Die Empfehlungen aus der Tageslichtsimulation für diesen Bereich wurden wie folgt in die Planung umgesetzt:



Oberlichtband

Sportbecken 1

Kein Fenster möglich!



Oberlichtband

Warmwasser-/Erholungsbecken

- Vergrößerung der Oberlichtbänder Nordfassade von H= 1,50m auf H= 2,00m.
- Dachgaube Sportbecken 1: zusätzliches, seitl. Fensterelement an West/Ostfassade aufgrund seitl. Dachanschluß nicht möglich.

Trotz der Vergrößerung der Nord-Oberlichter ist die Versorgung in Hallenmitte noch nicht optimal. Die Tageslichtversorgung über dem Becken ist ausreichend, vgl. Abbildung 32.

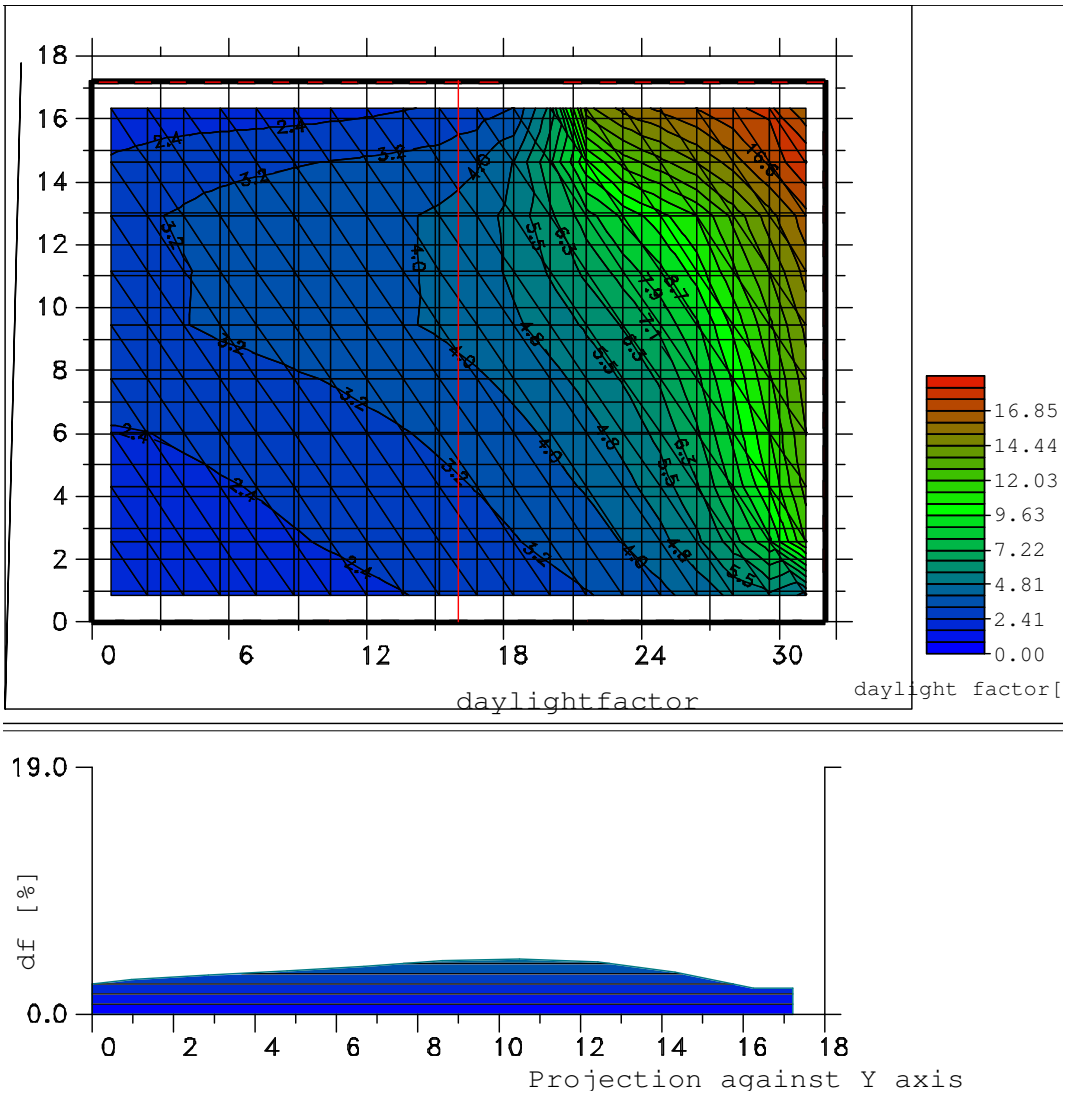


Abbildung 32: Tageslichtkoeffizient für den Hallenabschnitt Ost mit optimierten Fensterflächen

4.9.4 Optimierung der Tageslichtnutzung im westlichen Neubau

Die West- und Südfassaden im westlichen Teil des Neubaus sind großzügig verglast, im Norden wird dieser Teil durch das Foyer begrenzt, im Osten schließen die zuvor beschriebenen Hallenbereiche des Bades an.
Abbildung 33 zeigt die geplante Situation und die Ergebnisse aus der Tageslichtsimulation.

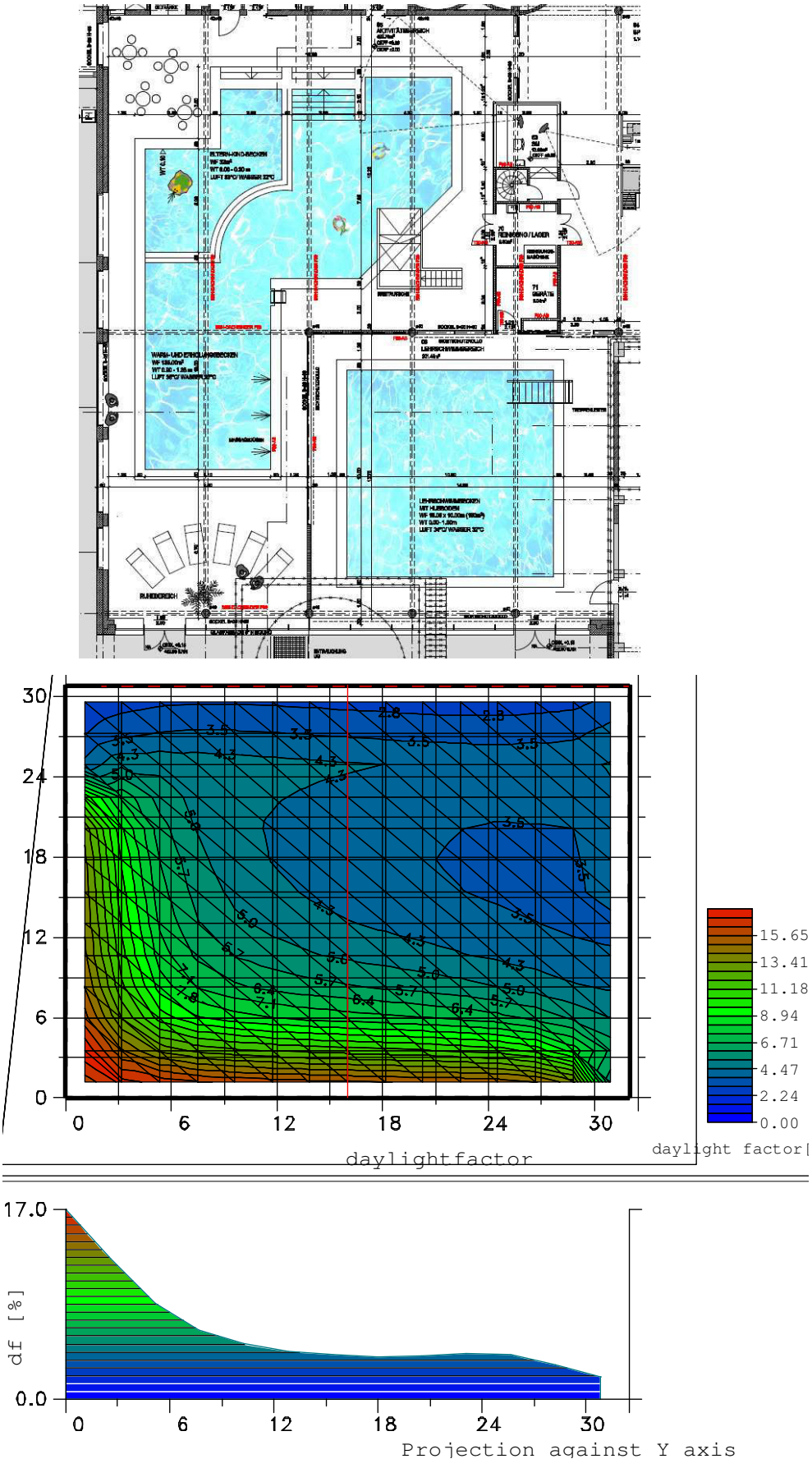


Abbildung 33: Tageslichtkoeffizient für den Hallenabschnitt Süd-West

Ergebnisse aus der Simulation: Während die Nordwand unterversorgt ist, verfügt die Süd-West Fassade über sehr hohe Tageslichtquotienten. Durch Schließen der Fassaden im unteren Bereich kann eine gleichmäßigere Ausleuchtung erzielt werden.

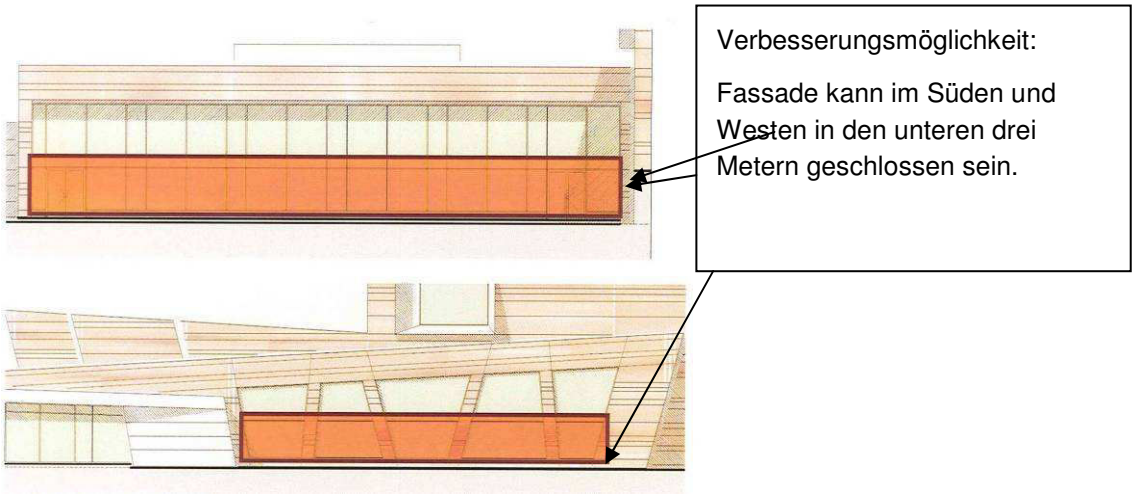


Abbildung 34: Verbesserungsmöglichkeiten im Bereich des Hallenteils West

Verglasungsfläche im südwestlichen Teil des Bades (vgl. Abbildung 35) wurde aus folgenden Gründen nicht reduziert:

- Der positive, helle Raumeindruck und der sehr gute Außenbezug (insbesondere im Liege-/Erholungsbereich) sollen erhalten bleiben.
- Die durch die großen Flächen entstehenden solaren Gewinne tragen zur Reduzierung des Jahresheizwärmebedarfes bei.
- Durch eine verstärkte Bodenreflexion gelangt mehr indirektes Licht in die Tiefe des Raumes

Abbildung 35: Ansicht des Schwimmbades von Südwesten (Quelle: ntspv)

5 Gebäudetechnik

5.1 Allgemeines

Die Verzahnung der verschiedenen technischen Gewerke ist bei keinem anderen öffentlichen Bauwerk derartig komplex wie in einem Hallenbad. Hier haben selbst kleinste Änderungen in Teilbereichen, wie z.B. die Anzahl der Sanitärobjekte, Änderung der Überlaufrinne am Becken, Einbau zusätzlicher Wasserattraktionen, etc. Auswirkungen fast auf alle anderen technischen Gewerke.

So bringt z.B. der Einbau einer zusätzlichen Kinderrutsche eine deutliche Veränderung der Verdunstungsmenge, diese wiederum hat Einfluss auf den Außenluftanteil und die Zuluftmenge, die wiederum auf die Wärmerückgewinnung sowie auf den Platzbedarf im Technikbereich bis hin zur Dimensionierung der Außenluftansaugung, die ihrerseits Einfluss auf die Architektur nimmt.

Vor diesem Hintergrund wurden in diversen Planungsbesprechungen immer wieder versucht mit sämtlichen beteiligten Fachplanern eine Optimierung des Gebäudes inkl. der Anlagentechnik zu erreichen.

Hierbei wurden bei der grundsätzlichen Auswahl der einzelnen Konzepte weder allein die Investitionskosten mit dem günstigsten Preis noch die beste energetische Variante berücksichtigt. Sondern gerade die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Anlagen innerhalb des Gesamtkomplexes stand im Vordergrund.

5.2 Energieversorgung, Primärenergiefaktoren

Im Gebäude des Schwimmbades befinden sich zwei Blockheizkraftwerke, von denen eines mit Biogas und eins mit Erdgas betrieben wird. Die BHKWs sind Teil des Fernwärmenetzes der Stadt Lünen, für welches aufgrund eines hohen Anteils regenerativer Energien ein sehr niedriger Primärenergiefaktor von 0,17 ermittelt wurde (vgl. [Wibera 2010]). Das Bad bezieht einen Teil der benötigten Wärme aus dem Fernwärmenetz.

Da im Bad ein hoher Bedarf an Niedertemperaturwärme besteht, kann sowohl Kondensationsabwärme der BHKWs (Brennwertnutzung) als auch Abwärme aus dem Aufstellraum der BHKWs genutzt werden. Die Nutzung dieser Abwärme ist ausschließlich in Verbindung mit dem Bad möglich. Daher wird der Primärenergiefaktor für diese Abwärme zu Null angesetzt.

Der Primärenergiefaktor für Strom wird den Regelungen der aktuellen Energie Einsparverordnung (EnEV) entsprechend mit 2,6 angenommen.

5.3 Lüftungstechnik und Wärmerückgewinnung

5.3.1 Auslegung

Die Anzahl der Lüftungsanlagen wurde entsprechend der verschiedenen Zonen innerhalb des Schwimmbades, aufgeteilt nach Temperatur bzw. Luftqualität ausgewählt. Insgesamt ergaben sich für das geplante Lippe Bad 6 verschiedene Zonen. Dieses sind im Einzelnen (vgl. Abbildung 36):

- Kinder- / Warmbecken
- Lehrschwimmbecken
- Sportbecken (4 Bahnen, Neubau)
- Sportbecken (5 Bahnen, Altbau)
- Umkleide und Duschbereich
- Eingangsbereich, Schwimmmeisterraum, Sanitätsraum, Personal- und Nebenräume

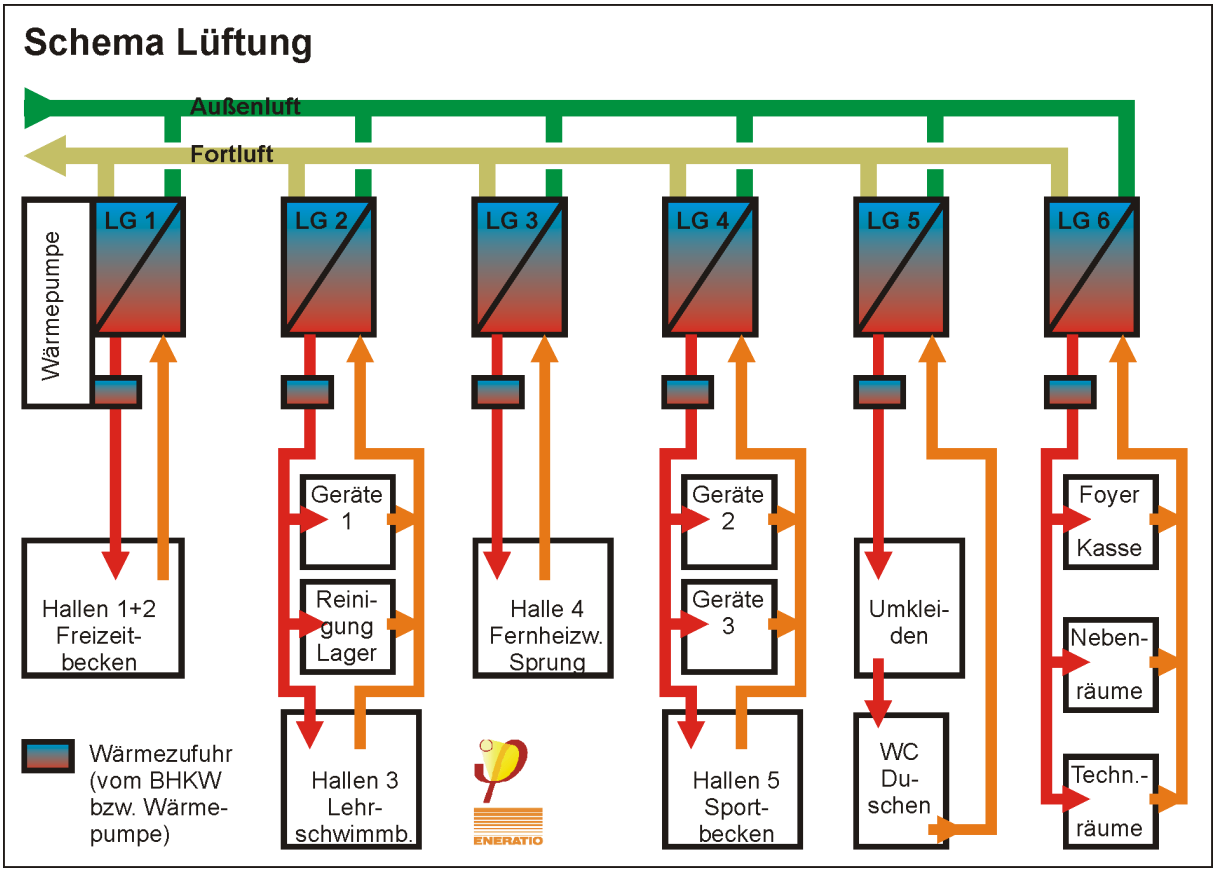


Abbildung 36: Schematische Darstellung der Lüftung im Lippebad (Grafik: PHI)

Um die Wärmebrücken im Bereich der Frischluftansaugung und des Fortluftauslasses sowie der kalten Lüftungsleitungen möglichst weit zu reduzieren, wurde eine zentrale Außenluftansaugung / Fortluft mittels Lüftungstürmen geplant. Die Außenluft wird anschließend durch unter der gedämmten Kellersohle verlegte GFK Rohre direkt an die jeweiligen Lüftungsgeräte geführt. Ebenso wird die in der Wärmerückgewinnung (teilweise mit Verdampfern) abgekühlte Fortluft auf kurzem Wege aus der Passivhaushülle und zum Fortluftturm geführt. Hiermit werden große Flächen kalter Außenluftkanäle innerhalb des Gebäudes vermieden, die sonst wegen erheblicher Dämmstärken einen großen Platzbedarf im Keller und hohe Investitionskosten für die diffusionsdichte Dämmung zur Folge hätten.

Jedes Lüftungsgerät verfügt über eine rekuperative Wärmerückgewinnung bestehend aus einem Propylen-Wärmetauscher. Das Lüftungsgerät 1 in Abbildung 36 ist zusätzlich mit einer Wärmepumpe ausgestattet. Hiermit wird die Fortluft deutlich unter den Taupunkt abgekühlt und auskondensiert. Ein drehzahlgeregelter Verdichter bringt die so gewonnene latente Kondensationswärme mit einer Leistungsziffer von mindestens 5 auf ein Temperaturniveau von 40°.

Aufgrund des sehr niedrigen Primärenergiefaktors der gesamten Wärmeversorgung durch den Einsatz von Biogas in einem Blockheizkraftwerk und den hohen Investitionskosten für die Wärmepumpen, wurde die Wärmepumpenausrüstung nur für das Lüftungsgerät 1 vorgesehen, da hier durch Attraktionen (Rutsche, Massagedüsen, Spieltiere) und Nutzerverhalten (Freizeitbecken, Spaß, Kinder) die höchsten Verdunstungen zu erwarten sind. Zudem ist dieser Hallenbereich gut vom Rest des Bades abtrennbar, sodass messtechnische Untersuchungen der Wärmepumpenanlage gut möglich werden, vgl. Abbildung 37.

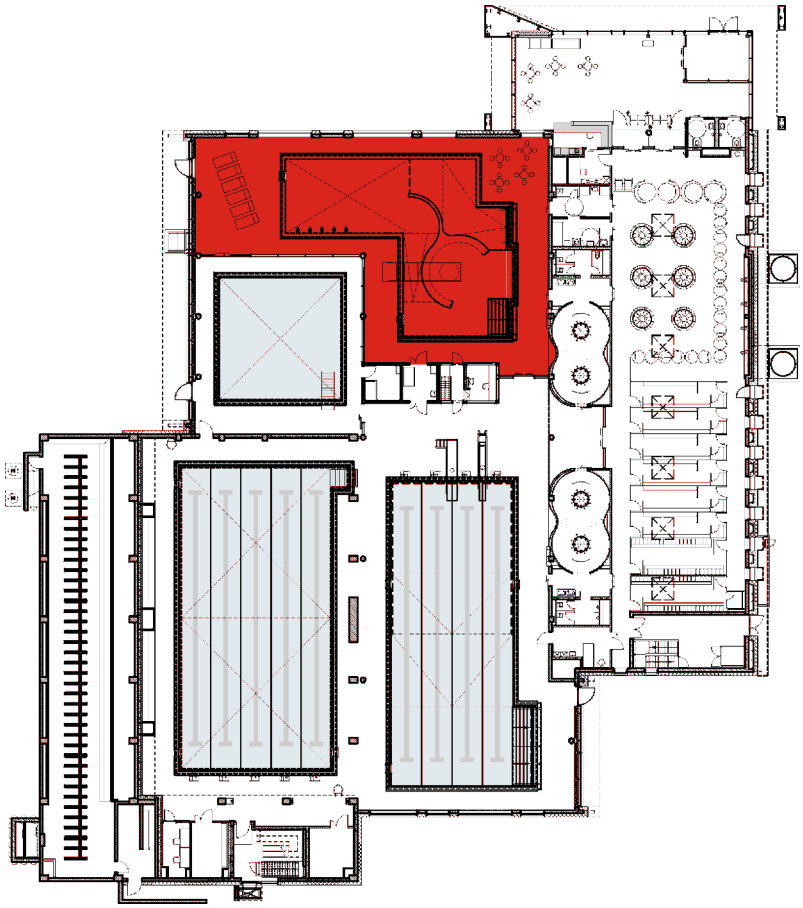


Abbildung 37: Bereich, der über die Wärmepumpe versorgt wird (rot markiert) (Grafik: PHI, ntspv)

Die Wärmerückgewinnung ist für die gesamte nach KOK-/VDI-Richtlinie benötigte Außenluftmenge (ca. 60.000 m³/h) dimensioniert. Dazu wurde für die Hallenlüftungsgeräte die Verdunstungsmenge in Abhängigkeit der Nutzung und der Beckenwassertemperatur bestimmt. Die dafür benötigte maximale Außenluftmenge ergibt sich im Sommerfall bei einem absoluten Feuchtegehalt von 14,3 g/kg innerhalb der Schwimmhalle. Die Anlage soll jedoch mit deutlich geringeren durchschnittlichen Luftwechseln betrieben werden. Daraus resultieren erheblich verbesserte Wärmerückgewinnungsgrade über einen Großteil des Jahres.

Im Allgemeinen wird die Hallenfeuchte über den Außenluftanteil geregelt. Um die Zuluftmenge im Hallenbereich konstant zu halten, wird mehr oder weniger Hallenluft beigemischt. So wird eine ausreichende Luftdurchströmung der Halle erreicht.

Für die zulässige Luftfeuchte und damit für den benötigten Außenluftwechsel ist die minimale Oberflächentemperatur der Außenbauteile maßgebend. Je höher diese Temperatur ist, umso höher liegt der Taupunkt und erlaubt damit eine höhere bauschadensfreie Luftfeuchte. Je höher die Luftfeuchte ist, umso weniger Wasser verdunstet, umso weniger Heizenergie muss dem Beckenwasser zugeführt werden. Durch die geringere Entfeuchtungsleistung kann auch der nachzuerwärmende

Außenluftanteil deutlich reduziert werden. Energieeffizient ist es daher, höhere Luftfeuchten zuzulassen.

Im Betrieb soll festgestellt werden, inwieweit die absolute Feuchte angehoben werden kann, ohne dass dies zu einer Beeinträchtigung des Behaglichkeitsempfindens der Badegäste und des Betriebspersonals führt. An diesen Betriebspunkt wird sich über die vorhandenen Hallenfeuchte- und -temperaturfühler über eine Reduktion des Außenluftanteils herangetastet.

5.3.2 Regelung

Die Luftverteilung innerhalb der einzelnen Lüftungsbereiche erfolgt mittels einstellbarer Weitwurfdüsen, die zum einen in Wurfrichtung, zum anderen gruppenweise über Regelklappen eingestellt werden können. Hierüber soll vor allem im Badbereich die Zuluftmenge reduziert werden, um dann in einer weitergehenden Untersuchung zum einen die Schadstoffbelastung der Luft, zum anderen die Luftverteilung innerhalb der Halle genauer untersuchen zu können. Hierzu sind einzelne Zuluftdüsenboxen mit Jalousieklappen ansteuerbar, die Luftmenge je Halle ist in 20-25%-Schritten reduzierbar. Durch die individuelle Einstellbarkeit der Luftauslässe können zum einen große Wurfweiten innerhalb der Halle ohne Zugerscheinungen realisiert, zum anderen können auch evtl. kondensatkritische Punkte an der Außenfassade (z.B. Türen, RWA-Öffnungen) direkt angeblasen werden.

Das Regelkonzept sieht vor, die Lüftungsanlage außerhalb der Betriebszeiten komplett abzuschalten und den Feuchteanstieg an den gefährdeten Bauteilen zu überwachen. So muss die Lüftungsanlage nur bei Überschreiten eines Grenzwertes mit einem hohen Außenluftanteil angefahren werden, um die Feuchte abzuführen. Ist eine unkritische Feuchte erreicht, wird die Anlage wieder abgeschaltet.

Ähnlich angelegt ist die Regelung der Temperatur, wobei die Lüftung lediglich bei Unterschreiten eines eingestellten Sollwertes im vollen Umluftbetrieb, d.h. ohne Außenluftanteil, Wärme einbringt, um die Temperatur wieder einzustellen.

Die Be- und Entlüftung des Eingangsbereiches sowie der Umkleiden / Duschen erfolgt ohne Umluftanteil aufgrund des Anschlusses des WC-Bereiches.

Hier ist zum einen geplant die warme, trockene, unbelastete Abluft des Umkleidebereiches nachzuerwärmen und dann in die Duschen zur Entfeuchtung zu geben. So kann ein erheblicher Energieanteil, der zur Erwärmung der Duschenzuluft nötig wäre, eingespart werden. Gleichzeitig werden die benötigten Raumkonditionen sicher eingestellt.

Im Bereich des Warmbeckens wird eine besonders innovative Lösungsvariante eingesetzt: Zunächst wird über einen Plattenwärmetauscher Wärmeenergie von der Fortluft auf die Frischluft übertragen. In der Abluft sind jedoch noch erhebliche Wärmemengen in Form von Wasserdampf enthalten. Dieser wird mittels einer Wärmepumpe auskondensiert und so die in der Abluft enthaltene Enthalpie zurückgewonnen. Diese Variante wurde bereits durch das Passivhausinstitut im Zuge des Grundlagenberichtes [PHI 2009] erwähnt und berechnet. Hiermit sind bei exakter Planung der Wärmpumpenanlagen und der statischen Rückgewinnung Einsparungen gegenüber dem vorgenannten System grundsätzlich zu erreichen, allerdings sind hierfür auch die größeren Investitionskosten notwendig.

Auf Grund der hier im Lippe Bad speziellen Voraussetzungen, bei denen auch Abwärme aus Blockheizkraftwerken zur Verfügung steht, wird nicht das gesamt Bad mit der beschriebenen Technologie ausgerüstet.

5.4 Reduzierung der Verdunstung: Wesentliches Energiesparpotential erschlossen

Bereits unter 5.3.1 wurde erläutert, dass im Zuge des Betriebes die Raumluftfeuchte angehoben wird, um die Verdunstung zu reduzieren und damit den Außenluftwechsel und die zuzuführende Verdunstungsenergie ebenfalls zu minieren.

Weitere Untersuchungen wurden zur Abdeckung des Beckens außerhalb der Betriebszeiten durchgeführt. Wenn die Feuchte nachts zu lassen bis in den Kondensationsbereich an einzelnen Gebäudebauteilen (Schlechtwertregelung) ansteigen kann, wird die Ruheverdunstung schon sehr weit abgesenkt, dass auf die kosten- und wartungsintensive Abdeckung verzichtet werden kann. Dies ist in der Regelung so vorgesehen.

Des Weiteren ist geplant, die Umwälzung der Becken außerhalb der Betriebszeiten auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren. Hierbei wird die zugeführte Wassermenge unterhalb des Beckenwasserspiegels und des Schwallwasserbehälters bzw. der Umwälzpumpe direkt zugeführt und unterhalb der Wasseroberfläche wieder abgezogen. So wird das Überlaufen in die Überlaufrinne vermieden und die damit einhergehende Verdunstung außerhalb der Betriebszeiten ohne großen technischen Aufwand reduziert. Während dieses Nachtbetriebes werden grundsätzlich alle Beckenwasser-Hygieneparameter überwacht und bei Bedarf die Umwälzung in Normalbetrieb umgestellt.

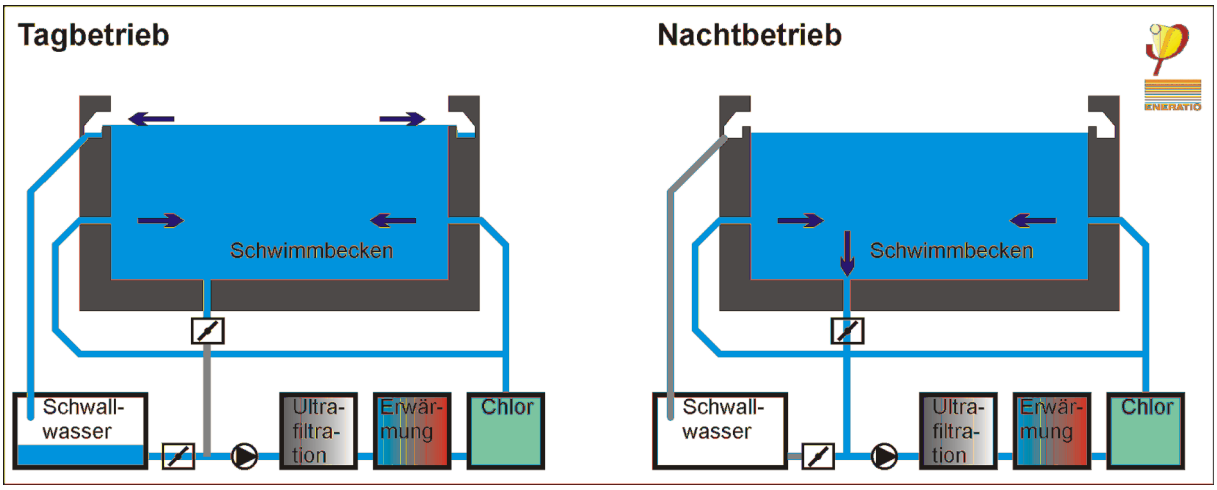


Abbildung 38: Schema der Beckenhydraulik im Tag- und Nachtbetrieb (Grafik: PHI)

5.5 Beckenwasser- und Schwimmbadtechnik

5.5.1 Optimierung der Hydraulik

Zur Reduktion der Rohrreibungsverluste werden strömungsgünstige Rohre aus HDPE eingesetzt und strömungsungünstige Formteile wie 90°-Winkel und T-Stücke weitestgehend vermieden und durch Bögen großer Radien und Y-Stücke ersetzt.

Für die Beckenhydraulik ist eine Horizontaldurchströmung (Strahlenturbulenz) vorgesehen. Mit dieser Technik lässt sich auch bei den geplanten geringen Wasserwechselraten (Reduktion durch Ultrafiltration und durch Anpassung des Volumenstroms an die tatsächliche Personenbelegung der Becken) erfahrungsgemäß eine gute Durchmischung erreichen.

Das Einströmsystem wird dabei an den beiden Längsseiten der Becken im unteren Drittel installiert, die Einströmdüsen werden auf den Nennvolumenstrom bemessen, sind aber im Betrieb einzeln regelbar.

Um den Stromeinsatz weiter zu minimieren, wurde hier geplant den Schwallwasserbehälter so hoch wie möglich aufzustellen, um die von den Pumpen zu leistende Förderhöhe zu reduzieren.

Sämtliche Becken erhalten einen hochliegenden Wasserspiegel, da die Beckenkante gleichzeitig als Sitzmöglichkeit für Badegäste genutzt werden kann und so weitere Einrichtungen wie Wärmebänke etc. entfallen können. Die Überlaufrinne ist als Wiesbadener Rinne mit einer Breite von 10 cm vorgesehen, in der Rinnenabläufe DN 80 geplant sind. Nach Abstimmung mit dem Gemeindeunfallversicherer benötigen diese Rinnensteine selbst keine weitere Rostabdeckung, wodurch Verwirbelung und Verdunstung vermieden werden. Lediglich die Rinnenabläufe selbst erhalten eine

gewölbte und gelochte Abdeckung. Aufgrund der relativ kleinen Rinne wird die Fallhöhe gering gehalten und das überlaufende Wasser schnell in die sich darunter befindliche Rinnensammelleitung geführt. Mit beiden Maßnahmen soll die Verdunstung des Beckenwassers reduziert werden.

5.5.2 Beckenwassererwärmung: Abwärmenutzung

Für die Beckenwassererwärmung steht zum einen die Fernwärme der Stadtwerke Lünen zur Verfügung, die in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt wird. Zum anderen wird in jedem Beckenwasserkreislauf ein Niedertemperaturwärmetauscher eingesetzt, der die Abwärme der Raumabluft der BHKWs nutzen wird.

5.5.3 Filtration: Ultrafiltration bringt Vorteile

Im Zuge der Entwurfsplanung wurden verschiedene Filtersysteme geplant und in einem Gesamtkosten- / Nutzenvergleich gegenüber gestellt, vgl. Abbildung 39. Hierbei wurden im Wesentlichen 3 Filtersysteme betrachtet:

- Druckfiltration über Kiesfilter (Stahlfilter)
- Niederdruckfiltration über Kiesfilter
- Ultrafiltration (UF)

Bei der Auswertung wurden die jeweiligen Belastbarkeitsfaktoren der zurzeit gültigen DIN-Norm sowie der zurzeit in Diskussion stehende Entwurf der DIN 19346, Teil 6, Ultrafiltrationsanlagen berücksichtigt. Bei der Ultrafiltration wird aufgrund des deutlich verbesserten Filtrationsergebnisses nur die halbe Umwälzmenge je Becken gegenüber den anderen in der DIN genannten Verfahren benötigt. Dies hat Einfluss auf Schwallwasserbehältergröße, Dimensionierung der Rohrleitung, Anzahl der Reinwasser- und Rinnenstutzen und auf die elektrische Leistung und den Energieverbrauch der Umwälzpumpen. Die vorgenannten Punkte, erweitert um eine Bewertung des Platzbedarfs, der für die Ultrafiltration deutlich geringer ist als für die Druck- oder Niederfiltration, wurden bewertet. Als Grundlage des Gesamtkostenvergleiches dienen hierzu Angaben des Bauherrn bzgl. der Energiekosten für Strom, Wärme, Frischwasser, Abwasser/Regenwasser. Über alle Varianten stellte sich für das Lippe Bad in Lünen eine Ultrafiltrationsanlage als das günstigste Filtrationsverfahren heraus. Hier ist die Filteranlage selbst teurer als die anderen Varianten. Aber durch die Ersparnisse bei den Nebenaggregaten, Einbauteilen und vor allem bei dem umbauten Raum ergibt sich hierfür das beste Gesamtergebnis.

Die Ultrafiltration entspricht nicht den heutigen allgemein anerkannten Regeln der Technik für die Badewasseraufbereitung, es wird aber zur Zeit an einem weiteren Teil der Wasseraufbereitungsnorm DIN 19643 gearbeitet, in dem dieses Filtrationsverfahren beschrieben werden soll.

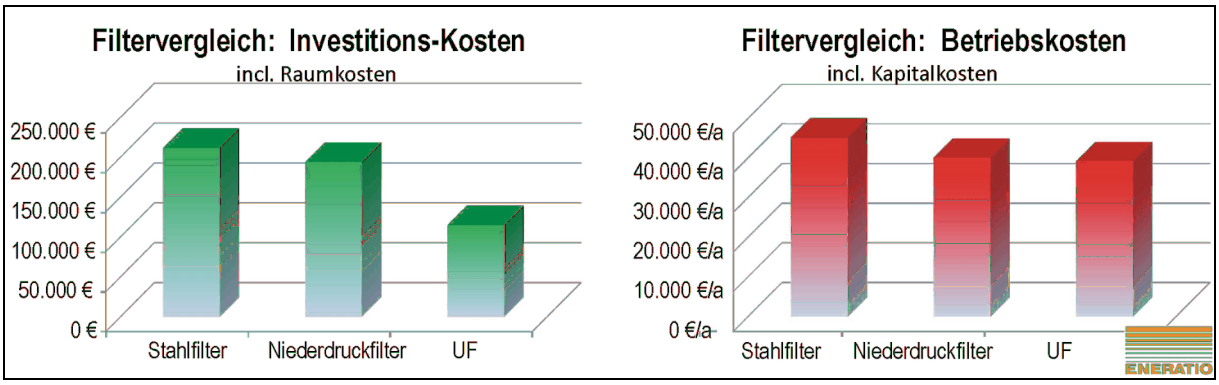


Abbildung 39: Gegenüberstellung der untersuchten Filtervarianten hinsichtlich ihrer spezifischen Investitions- und Betriebskosten (Quelle: ENERATIO)

Der Vorteil der Filtrationstechnik ist zum einen der geringe Platzbedarf, zum anderen eine deutlich verbesserte Filterwirkung, die eine Gesamtreduzierung der Umwälzmenge möglich macht. Mit dieser Reduzierung gehen einher eine geringere Chlorzugabe und ebenso ein geringerer Bedarf an Flockungs- und pH-Wert-Korrekturmitteln.

Für die Ultrafiltration sind Kellerhöhen von 2,50 m ausreichend, was bei den Baukosten zu erheblichen Reduzierungen führt.

Durch die geringere Chlorzugabe wird das THM-Bildungspotential reduziert. Sollte trotzdem in einer zukünftigen Badewasserverordnung ein evtl. genannter Grenzwert nicht eingehalten werden, kann ein Aktivkohlefilter in einen Teilstrom nachgeschaltet werden. Zur Reduzierung der Chloramine wird nach der Ultrafiltration ein Mitteldruck-UV-Brenner installiert. Mit dieser Technik wurden bereits gute Erfahrungen in anderen Hallenbädern gemacht.

5.5.4 Chlorung: Sicherste und behaglichste Lösung gewählt

Als verschiedene Desinfektionsverfahren wurden folgende Möglichkeiten zur Chlorung untersucht und gegenüber gestellt.

1. Chlorgas - Vollvakuumanlage
2. Membranzellenelektrolyse
3. Inline-Elektrolyse

Für alle Varianten wurde eine mittlere Beckenbelastung über das gesamte Jahr angesetzt und so der Desinfektionsmittelbedarf ermittelt.

Beim *Chlorgasverfahren* wird das Chlorgas in Druckbehältern in einem dafür vorgesehenen Chlorgasraum gelagert und über Treibwasser Injektoren dem jeweiligen Beckenwasserkreislauf zugeführt. Die Variante Chlorgasverfahren ist in Bezug auf Investitions- und Betriebskosten mit Abstand die günstigste, birgt aber aufgrund der Druckbehälter im Havariefall ein nicht zu kalkulierendes Risiko.

Bei der *Membranzellenelektrolyse* wird Natriumchlorid in Tablettenform vor Ort gelagert und hieraus im Membranzellenelektrolyse-Verfahren eine wässrige Chlorlösung erstellt, die dann mittels Dosierpumpen dem jeweiligen Beckenwasserkreislauf zugeführt wird. Die Investitionskosten und Betriebskosten liegen im mittleren Rahmen. Aufgrund der relativ geringen Konzentration der wässrigen Lösung sind große Motordosierpumpen notwendig, die einen zu beachtenden Strombedarf haben. Bei undichten Dosierleitungen kann es zu erheblichen Schäden in der gesamten technischen Anlage kommen.

In der 3. Variante wurde das *Inline-Elektrolyseverfahren* untersucht, bei dem das gesamte Beckenwasser mit einem leichten Salzgehalt von 0,4% gefahren wird. Die Elektrolyse findet direkt innerhalb der Reinwasserleitung auf dem Weg zum Schwimmbecken in Abhängigkeit der jeweiligen Personenbelastung statt. Bei dieser Variante geht praktisch keine Gefahr von der Chlorungsanlage aus. Der bei der Elektrolyse entstehende Wasserstoff wird über die Hallenlüftung abgeführt. Dieses wird durch ein unabhängiges Gutachten belegt. Nachteile dieser Variante sind die hohen Investitions- und Betriebskosten, die auch daher rühren, dass sämtliche technischen Aggregate und beckenwasserberührten Teile seewasserbeständig ausgeführt werden müssen, da es durch den Salzgehalt zu deutlich höheren Chloridkonzentrationen an den jeweiligen Bauteilen kommt.

Der Bauherr hat dieses Chlorungsverfahren bereits erfolgreich in mehreren seiner Bäder eingesetzt und dafür auch einen Innovationspreis für die Vermeidung des

Umganges mit Chlorgas erhalten. Des Weiteren schätzen die Lüner Badegäste den leichten Salzgehalt als sehr angenehm.

Aus den vorgenannten Gründen wurde die Entscheidung nicht nach dem wirtschaftlichsten, sondern nach dem für die Badegäste angenehmsten und auch aus sicherheitstechnischen Gründen besten Chlorungsverfahren getroffen.

5.6 Heizungstechnik

5.6.1 Wärmebedarf: Wesentlich reduziert

Auf Grund der geplanten hocheffizienten Wärmerückgewinnung und der Passivhaushülle verliert der Lüftungswärmebedarf, der über die Fernwärmeheizung gedeckt werden muss, gegenüber einem herkömmlichen Bad an Bedeutung. Wesentlich ist nun die regelmäßige Energiezufuhr für die Verdunstungswärme der Becken sowie des Ersatzes des Filterspülabwassers und die Brauchwarmwassererwärmung.

Bei Zugrundelegung der KOK-Richtlinien ist für Duschwasser, Beckenwasser und Lüftung eine Anschlussleistung von 675 kW in Summe zur Verfügung zu stellen. Diese Leistung wird an einem kalten Wintertag (-15°C) benötigt. Gleichzeitig ist diese Leistung ausreichend, um die Schwimmbecken innerhalb von 24 Stunden auf die benötigte Temperatur (28 bzw. 32°C) zu bringen. Bei de Ereignisse dürften allerdings nicht gleichzeitig stattfinden.

5.6.2 Wärmeversorgung: Brennwertnutzung

Die Wärmeversorgung des Hallenbades erfolgt im Wesentlichen aus dem Fernwärmeanschluss der Stadtwerke Lünen (vgl. Abbildung 40). Das vorhandene Fernwärmesystem wird mittels einer Übergabestation indirekt an das Hausnetz angekoppelt. Die größten Verbraucher sind die Heizregister zur Erwärmung der Hallenluft (mit der auch der Transmissionswärmebedarf gedeckt wird) und der Wärmebedarf der Becken.

Der gesamte Rücklauf des Bades soll nicht höher als 40°C sein, damit die beiden nahegelegenen Blockheizkraftwerke im stabilen Brennwertbetrieb arbeiten können (Abgaskondensationstemperatur unterschreiten). Da die Einspeisetemperatur für die Fernwärme deutlich höher liegt, können Blockheizkraftwerke zu diesem Zweck nicht im Brennwertbetrieb arbeiten. Es ist hervorzuheben, dass nur die unmittelbare Nähe der BHKWs zum Schwimmbad in Verbindung mit der niedrigen Rücklauftemperatur

die Möglichkeit des Brennwertbetriebes eröffnet. Somit kann ein Großteil des Wärmebedarfes des Bades aus einer Quelle gedeckt werden, die normalerweise an die Umwelt abgegeben würde.

In einem weiteren Ausbauschritt war angedacht, eine solarthermische Anlage zur Brauchwasservorerwärmung zu installieren. Dabei ist zu beachten, dass hohe solare Deckungsraten (z.B. 40%, wie im Wohnbaubereich üblich) für ein Hallenschwimmbad weder sinnvoll noch wirtschaftlich sind, da hier große Duschwassermengen in kurzen Zeiten benötigt werden. Insofern kann mit einer solarthermischen Anlage lediglich eine Unterstützung im wirtschaftlichen Rahmen erfolgen. Der Großteil der Brauchwarmwasserwärme wird aus dem Fernwärmenetz bezogen. Eine Detailbetrachtung des gesamten Wärmekonzepts hat ergeben, dass im Lippe Bad aus Effektivitätsgründen zu Gunsten einer vergrößerten Photovoltaikanlage auf Wärmekollektoren verzichtet wird.

5.6.3 Wärmeverteilung: Keine statischen Heizflächen

Die Wärmezufuhr erfolgt ausschließlich über die Lüftung und das Beckenwasser. Statische Heizflächen sind nicht vorgesehen.

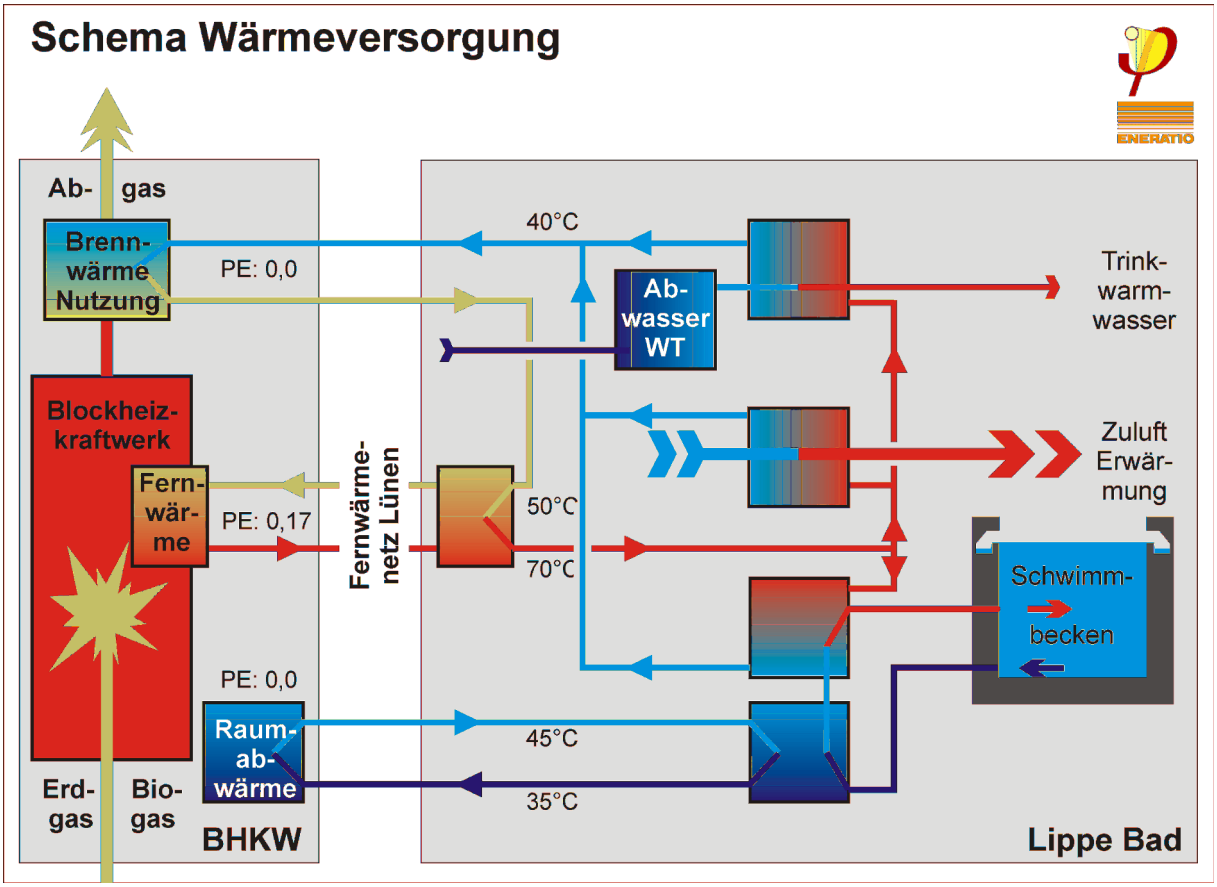


Abbildung 40: Schema der Wärmeversorgung über das Blockheizkraftwerk (Grafik: PHI)

5.7 Trink-/Brauchwasser, Abwasser, Regenwasser

5.7.1 Spülabwasser: Kontinuierlicher Anfall ermöglicht Recycling

Die Spülabwassermenge einer Ultrafiltrationsanlage zur Beckenwasseraufbereitung ist mit der einer normalen Druckfiltration vergleichbar. Durch die Ultrafiltration wird die Abwassermenge also zunächst nicht reduziert. Druckfilter werden in der Regel zweimal wöchentlich gespült. In diesen Phasen fällt Abwasser konzentriert in großen Mengen an. Die Ultrafiltration wird bis zu 8 mal pro Tag mit erheblich kleineren Wassermengen gespült. Das Abwasser fällt gleichmäßiger an und kann quasi kontinuierlich für eine Weiternutzung aufbereitet werden.

Das Filterspülabwasser der Beckenwasseraufbereitungsanlage wird in einem Zwischenbehälter gesammelt und von dort aus über eine weitere Vorfiltration mit nachgeschalteter Ultrafiltration aufbereitet und dem Schwallwasserbehälter als Frischwasserersatz wieder zugegeben. Dieses Filtrationswasser ersetzt ca. 70 % (9.000 m³/a) des normalerweise notwendigen Frischwasserbedarfs der Schwimmbecken.

Durch Spülabwasseraufbereitung werden neben dem Frischwasserzusatz auch erhebliche Wärmeenergiemengen eingespart, da das aufbereitete Wasser während der Filterung nur wenig abkühlt.

Das restliche Filterspülabwasser sowie das Filterabspülwasser aus den nachgeschalteten Aufbereitungsanlagen werden dem Absetzbehälter zugeführt. In diesem Behälter kann sich das Spülabwasser in einem Zeitraum von 2 bis 4 Stunden beruhigen (absetzen). Das sich im oberen Bereich der Absetzbehälter befindende Klarwasser wird abgezogen und über eine weitere Aufbereitungsanlage geführt. Diese besteht im Wesentlichen aus einem Kiesfilter und einem nachgeschalteten Aktivkohlefilter. Durch diese Behandlung wird das Filterabspülwasser soweit aufbereitet, dass es direkt in die nahe Lippe eingeleitet werden kann. Ein Teil des Filterabspülwassers (ca. 1.200 m³/a) wird über eine weitere UV-Aufbereitungsanlage geführt und hausintern zur WC und Urinalspülung genutzt. Durch das Recycling, die Weiterverwertung und die Direkteinleitung werden erhebliche Schmutzwasser-mengen vermieden und die kommunale Kläranlage deutlich entlastet.

Die beantragten Einleitungsgenehmigungen der zuständigen Behörden (Lippeverband, Kreis, Stadt) liegen bereits vor.

Im Lippe Bad ist das gesamte Beckenwasser auf Grund des gewählten Chlorungsverfahren mit 0,4%-iger Sole versetzt. Da das Salz nicht durch die Ultrafiltration entfernt wird, ist es auch im Abwasser enthalten. Nach Klärung mit

diversen Herstellern ist die Beaufschlagung von Druckspülarmaturen an den WC-/Urinalanlagen mit dem solehaltigen Abwasser möglich. Um Korrosions-erscheinungen weitestgehend zu minimieren, ist der Einsatz von Kunststoffrohr für diese Druckleitungen vorgesehen. Des Weiteren sind Maßnahmen einzuhalten, wie die Verlegung der Rohre in einem komplett von Trinkwassersystem getrennten Kreis, sowie mit einer deutlichen optischen Unterscheidung um Queranschlüsse sicher zu vermeiden. Zusätzlich werden sämtliche Zapfstellen mit dem Warnhinweis „Kein Trinkwasser“ beschriftet.

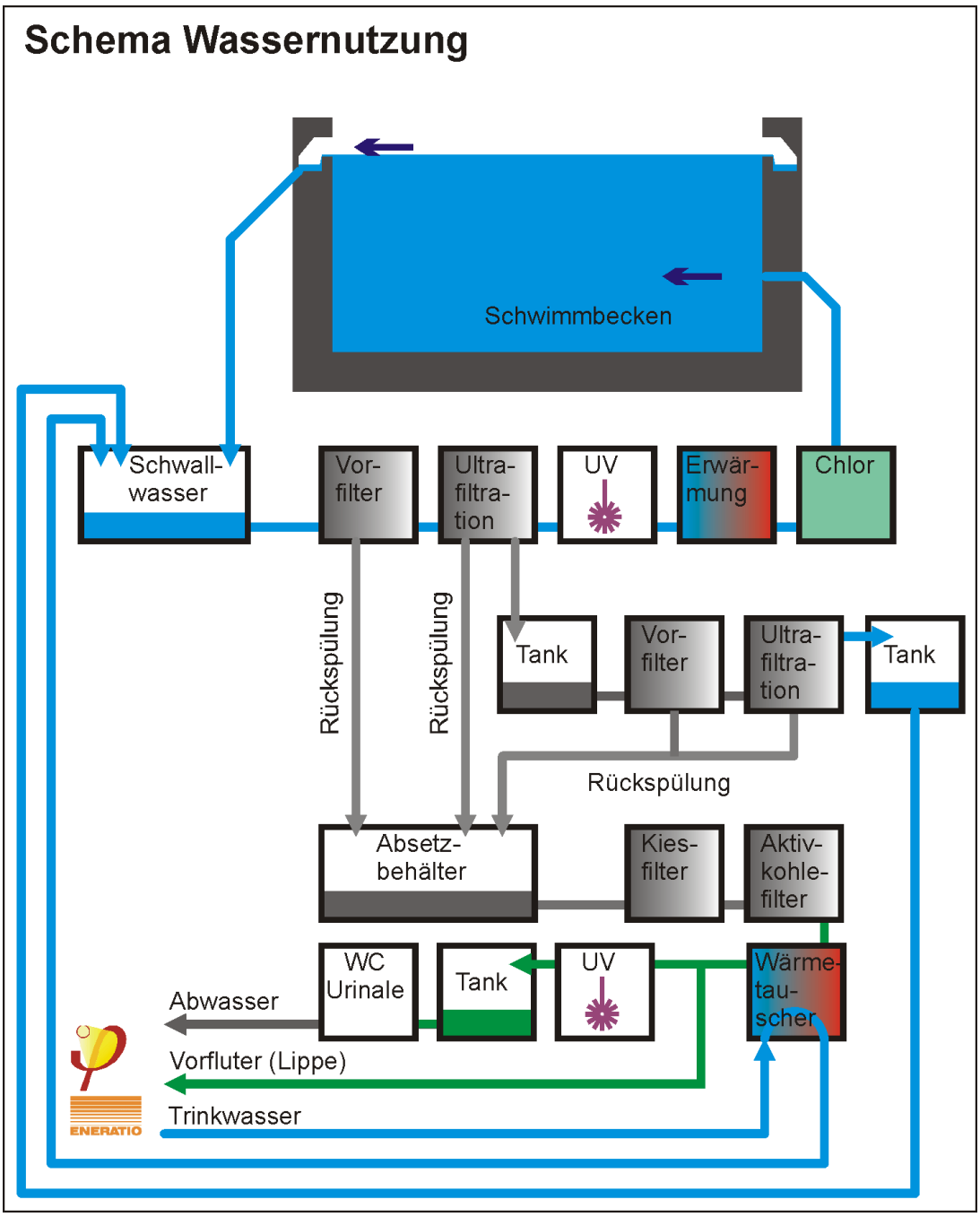


Abbildung 41: Schema zur Filtration und zum Wasserrecycling (Grafik: PHI)

5.7.2 Regenwassernutzung: Wegen des Recycling-Konzeptes nicht sinnvoll

Zum Einsatz innerhalb der WC-/Urinalspülungen wurde ebenfalls eine Regenwassernutzungsanlage angedacht, die in einer außen liegenden Zisterne sämtlich anfallendes Dachregenwasser einfängt und von dort aus über eine Druckerhöhungsanlage den infrage kommenden Armaturen zur Verfügung stellt. Wie bereits im vorherigen Absatz beschrieben, ist eine zweifache Nutzung des zwingend vorhandenen Spülabwassers möglich. In diesem Zusammenhang wurde die Regenwassernutzungsanlage als wirtschaftlich nicht sinnvoll verworfen.

5.7.3 Brauchwasser: Konsequenter Einsatz wassersparender Technik

An allen Trinkwasserzapfstellen wird Wert auf Wasser sparende Armaturen gelegt. So sind an den Handwaschbecken, sowie an den Duscharmaturen und Urinalen elektronische, bedarfsabhängig gesteuerte Auslösereinheiten vorgesehen. Diese sind gerade im öffentlichen Bereich hygienisch einwandfrei zu halten. Im Bereich der Duschen, die im Allgemeinen der größte Warmwasserverbraucher im Hallenbad sind, wurden Armaturen mit einer Sensortechnik geplant, die beim Verlassen eines Einwirkbereiches die Duschwasserzufuhr nach einer einstellbaren Nachlaufzeit automatisch abstellen. Es werden Duschköpfe mit einem Durchfluss von 6 l/min eingesetzt. Dies ist eine Reduzierung von 50% gegenüber normalerweise eingesetzten Duschköpfen. Die geringere Wassermenge wird durch ein spezielles Verwirbelungssystem mit Lufteinsaugung ausgeglichen, so dass es zu keinen Einschränkungen im Duschkomfort kommt. Im Bereich der WC-Anlagen werden Druckspüler mit 2-Mengenautomatik eingesetzt, die mittels elektronischer Taster ausgelöst werden können. Auf Grund einer deutlichen Beschriftung („KLEIN“/“GROSS“) soll die notwendige Spülung durch den Nutzer gewählt werden.

Durch den konsequenten Einsatz der Wasserspartechnik kann die gesamte Installation inkl. der Brauch- und Warmwassererwärmungsanlage kleiner dimensioniert werden.

5.7.4 Trinkwasserhygiene: Ultrafiltration und Chlordioxidzugabe

Zur Reduktion der Chloramine im Beckenwasserbereich hat sich in den letzten Jahren die Zugabe von Chlordioxid zum Beckenfüllwasser in Verbindung mit der UV-Technologie bewährt. Das Mittel Chlordioxid ist ein zugelassenes Desinfektionsmittel im Bereich von Trinkwassernetzen.

Um neben der Beckenwasserhygiene auch eine dauerhafte Trinkwasserhygiene sicher zu stellen, ist der Einsatz einer Ultrafiltrationsanlage im Bereich des Trinkwasserhauptanschlusses geplant. Hiermit werden sämtliche Bakterien bereits am Hauseingang abgefangen. Das Leitungsnetz kann nicht besiedelt werden. Zur weiteren Sicherstellung von hygienisch einwandfreiem Trinkwasser wird die eigentlich nur für das Schwimmbecken benötigte Chlordioxidanlage ebenfalls für das Trinkwassernetz der Duschen und Wasserzapfanlagen genutzt. Auf Grund dieser beiden nacheinander geschalteten Systeme (Ultrafiltration + Chlordioxidanlage) kann die Brauchwarmwassertemperatur im gesamten Bad mit 40°C gefahren werden. Hierdurch werden Speicher-, Leitungs- und Zirkulationsverluste deutlich reduziert. Selbstverständlich kann bei einer trotzdem auftretenden Verkeimung das gesamte Leitungsnetz entsprechend DVWG Arbeitsblatt gefahren und desinfiziert werden.

5.7.5 Trinkwarmwasser: Zirkulationsleitung vermieden

Eine Zirkulation ist nicht vorgesehen. Stattdessen wird die Temperatur am Ende des Rohrleitungsnetzes der Kalt- und Warmwasserleitungen überwacht. Sollte die eingestellte Wunschtemperatur über- oder unterschritten werden, wird die Wassermenge solange in den Schwallwasserbehälter Becken 4/5 geführt, bis die Wunschtemperatur wieder erreicht ist.

Zur Brauchwassererwärmung wird ein Speicherladesystem mit externem Plattenwärmetauscher geplant, um niedrige Rücklauftemperaturen zu erhalten. Zur Vorwärmung wird das Trinkwasser im Gegenstrom zum direkt eingeleiteten Spülabwasser über einen Plattenwärmetauscher vorerwärmt. Hiermit wird dem Abwasser die Restwärme von 25°C auf ca. 15°C entzog en.

5.8 Elektroeinsatz und Effizienzbedingungen

5.8.1 Strombedarf: Reduktion und Eigenerzeugung

Auf die Reduktion des Strombedarfes für Beleuchtung, Antriebe etc. wurde besonderes Augenmerk gelegt. Ein Großteil des Bedarfs wird mit den beiden im Technikkeller des alten Fernheizwerkes befindlichen Blockheizkraftwerken erzeugt (2 Motore, jeweils 260 kW_{el}, 1*Biogas, 1*Erdgas).

Um den Strombedarf insgesamt gering zu halten, sind verschiedene Konzepte erarbeitet und in der Planung umgesetzt worden.

5.8.2 Beleuchtung: Reduktion des Energiebedarfes durch effiziente Leuchten, intelligente Steuerung und Lichtsimulationen

Im Bereich der Beleuchtungstechnik werden nur Leuchten mit hohen Wirkungsgraden eingesetzt.

In den Umkleidebereichen sind Beleuchtungsbänder mit Leuchtstoffröhren vorgesehen. Diese sind tageslichtabhängig gesteuert, da zum einen über die Fensterfassade, zum anderen über die Oberlichter viel natürliches Licht in den Bereich fällt. Zusätzlich überwachen Präsenzmelder die einzelnen Bereiche und schalten bei längerer Nichtbenutzung die Beleuchtung ab. Innerhalb der Duschräume sind ebenfalls Leuchtstofflampen vorgesehen, die über Präsenzmelder geschaltet werden.

Über eine Tageslichtmessung wird auch die Hallenbadbeleuchtung gesteuert. Hierbei werden einzelne Beleuchtungskreise zu- bzw. abgeschaltet, um eine einheitliche Beleuchtungsstärke zu erreichen. Es werden immer einzelne der doppelflammig bestückten Metalldampflampen mit einer Effizienz von ca. 100 lm/W geschaltet. Die gewünschte Beleuchtungsstärke (verschiedene Szenarien) kann an der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) vorgewählt werden, danach läuft die Steuerung automatisch ab.

Die optimalen Standorte der Leuchten wurden durch Lichtsimulationen ermittelt. So wird die in den Richtlinien geforderten Beleuchtungsstärken auf und neben der Wasserfläche mit sehr geringem Energieeinsatz erreicht. Eine Ein- und Ausschaltung von Hand, z.B. durch den Betriebsleiter oder Schwimmmeister soll nur noch in Ausnahmefällen und bei besonderen Veranstaltungen erfolgen.

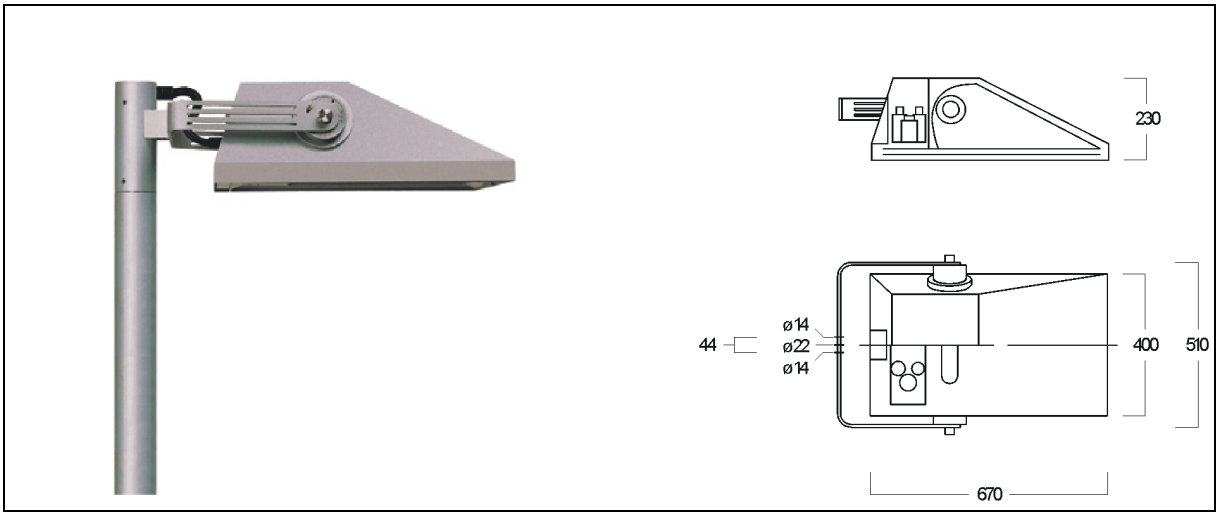


Abbildung 42: Gewählte Leuchte: we-ef Modell FLA760. (Quelle: www.weef.de)

Die gesamte Beleuchtung kann an zentraler Stelle (Personaleingang) ausgeschaltet werden, sodass beim Verlassen des Bades sichergestellt ist, dass nicht unnötiger Weise eine Beleuchtung dauerhaft betrieben wird. Gleichzeitig wird über Schlüsselschalter sichergestellt, dass das Reinigungspersonal, das vor Badebeginn in die Halle kommt, lediglich die zur Reinigung benötigte Beleuchtung einschalten kann.

Sämtliche Beleuchtungskörper sind so geplant, dass die Wartung / Instandhaltung / Austausch der Leuchtmittel von einer Leiter aus erfolgen kann. Durch diese Maßnahme wird mit einer deutlichen Senkung der Betriebskosten gerechnet. Mit der Forderung der Wartungsmöglichkeit mittels Anleiterung geht eine Beschränkung der Montagehöhen in einzelnen Bereichen einher. Anhand von Lichtberechnung wurde jedoch nachgewiesen, dass die geforderten Beleuchtungsstärken im Normal- und Wettkampfbetrieb trotzdem eingehalten werden können.

In Bereichen der Unterwasserbeleuchtung wird auf moderne LED-Unterwasserscheinwerfer zurückgegriffen, die ihrerseits durch eine vorgeschaltete Linsentechnik in der Lage sind, Beleuchtungsabbildungen innerhalb der Becken ähnlich der Metalldampflampen zu erzeugen. Die deutlich längere Lebensdauer und die Möglichkeit der Farbgebung war Grundlage für die Entscheidung. Die Unterwasserscheinwerfer sind vom kellerseitigen Beckenumgang aus bedienbar und dienen lediglich dem optischen Eindruck. Eine für Wettkämpfe ausgelegte Unterwasserbeleuchtung wurde vom Bauherrn nicht gefordert.

5.8.3 Anlagentechnik: Effiziente Pumpen, Motoren, Ventilatoren und Verdichter

Sämtliche Antriebsmotoren an den Umwälzpumpen der Badewasser- und Heizungstechnik, sowie an den Ventilatoren werden mit möglichst hohen Wirkungsgraden ausgestattet sein. Es ist die Effizienzklasse 1 (EFF1=IE2) als Mindeststandard vorgeschrieben. Umwälzpumpen und Lüftermotoren mit hohen Laufzeiten sind schon als IE3 Elektromotoren geplant. Damit ist sichergestellt, dass Motoren der neusten Generation mit den höchsten Wirkungsgraden zum Einsatz kommen.

Im Bereich der aktiven Wärmerückgewinnung mittels Wärmepumpe wird neben der Effizienzklasse der Motoren auch auf einen exakt ausgelegten Kältekreislauf geachtet und ein drehzahlgeregelter Verdichter eingesetzt, um möglichst hohe Leistungsziffern (>5) zu erreichen.

5.9 Monitoring

Der Erfolg der zu realisierenden Maßnahmen „Öffentliches Hallenbad mit Konzepten der Passichaustechnologie“, sowie mögliches weiteres Optimierungspotential soll durch ein wissenschaftliches Monitoring belegt bzw. aufgezeigt werden. Im Vordergrund steht dabei der Nachweis der benötigten Energiemengen für den Betrieb des Bades durch das Aufstellen einer vollständigen Energiebilanz. Dazu müssen nach dem Messkonzept alle energetisch relevanten Größen erfasst werden. Danach sollen die Ergebnisse des Monitorings der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden um ggf. in spätere Regelwerke einfließen zu können.

5.9.1 In-Situ-Messungen von Energie- und Stoffströmen, Temperatur und Luftfeuchte

Insgesamt ist geplant, dass an den relevanten Anlagenteilen insgesamt etwa 280 Messstellen bzw. Sensoren montiert werden, um alle notwendigen Größen zu erfassen. Dabei sind insbesondere die folgenden Parameter zu nennen:

- Energiebezug Wärme und Strom
- Wärmequellen bzw. –senken, wie die bezogene Kaltwassermenge und die das Gebäude verlassenden Abwassermengen mit deren Temperaturen
- Die über die Lüftungsanlagen transportierten Energiemengen der feuchten Außen- und Fortluft

Neben diesen obligatorischen Messstellen, wie Temperatur, Wärme-, Strom- und Wassermenge, etc. werden hier insbesondere auch Feuchtesensoren an kritischen Bauteilen montiert werden, um die Grenzbereiche der Luftfeuchtigkeit während und außerhalb der Betriebszeiten zu ermitteln.

Außerdem sollen sich über das Kassensystem und den sich dahinter befindlichen elektrisch gesteuerten Türen anhand der Personenzahl und der Türbewegungen, Besucherströme nachvollziehen lassen. Diese haben ihrerseits wiederum Auswirkung auf Reinigungs-, Desinfektionsarbeiten, sowie auf Umwälzleistungen und Außenluftleistungen in den jeweiligen Hallenbereichen.

Um auch den Trinkwasserverbrauch für zukünftige Bäder genauer beurteilen zu können, werden sämtliche Wasserverbräuche mit den dazugehörigen Auslösungen (Dusche, WC, Urinal, Handwaschbecken) gezählt und ausgewertet.

In einem anderen Hallenbad der Bädergesellschaft Lünen wurde ein Lasersystem getestet, welches die gesamte Beckenwasseroberfläche regelmäßig scannt und so

mit geringen Unschärfen in der Lage ist, die aktuelle Zahl der im Wasser befindlichen Personen zu ermitteln. Dieses System soll auch im Neubau, erst einmal am Freizeitbecken, eingesetzt werden, um Umwälzleistung und Desinfektionsmittelzugabe nach den tatsächlichen Erfordernissen regeln zu können. Auf diese Weise sollen weitere Einsparpotentiale bei Strom, Wärme, Wasser und Betriebsmitteln erschlossen werden.

Alle zu messenden Parameter werden während des ersten Betriebsjahres zuzüglich der Einregulierungsphase (geschätzt 3 bis 4 Monate) im 10-Minuten-Raster gemessen und auf der Gebäudeleittechnik (GLT) aufgezeichnet. Das PHI greift auf diese für das Monitoring entscheidenden GLT-Daten zu und prüft diese min. wöchentlich auf Plausibilität. Die weitere Datenaufbereitung und Auswertung erfolgt im Hinblick auf die energetischen Ziele und eine mögliche Betriebsoptimierung.

5.9.2 Luftschadstoffe

Bei der energetisch motivierten Reduzierung der Luftwechselraten in einem Hallenbad sind die entscheidenden Parameter der Luftqualität zwingend zu berücksichtigen. Bei Bädern die durch Chlorung die Badewasserhygiene sicherstellen, ist insbesondere die entstehende Gruppe der Trihalogenmethane (THM) zu berücksichtigen. Vorliegende Untersuchungen (z.B. [Gundermann 1997]) lassen keine Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen der THM-Konzentration in Wasser und Luft mit der Luftwechselrate zu. Daher soll dieser Zusammenhang in einer Untersuchung in Zusammenarbeit mit einem chemischen Analyselabor untersucht werden. Unter Leitung des Passivhaus Instituts und in Absprache mit der Bädergesellschaft sollen an mehreren Messtagen etwa 200 bis 250 Raumluftproben gezogen und im Labor auf die THM Konzentration untersucht werden.

Das PHI erarbeitet die Positionen der Probennahme im Bad, wobei unterschiedliche Probenahmehöhen und unterschiedliche Luftwechselraten berücksichtigt werden sollen. An den Probenahmepositionen werden parallel zur Probenahme vom PHI der Turbulenzgrad der Luft, die Lufttemperatur und die relative Feuchte messtechnisch erfasst. Die Daten werden mit den Laboranalysen unter Berücksichtigung der jeweiligen Luftwechselraten und der sich im Wasser befindenden Personenzahl ausgewertet und interpretiert.

5.9.3 Blower Door Messung

Voraussetzung für die Funktion der Lüftungsanlagen und Vermeidung von Bauschäden infolge von Exfiltrationen ist eine hohe Luftdichtheit der Gebäudehülle. Bei einem Hallenbad ist die Notwendigkeit einer luftdichten Hülle aufgrund der erhöhten Raumluftfeuchte besonders wichtig. Bei der angestrebten Betriebsweise mit noch höheren Raumluftfeuchten wird dies noch weiter verschärft. Daher ist die Überprüfung der Luftdichtheit mittels Luftdichtheitsmessungen eine zentrale Voraussetzung und dient zudem der Qualitätssicherung noch während der Bauphase. Zur Durchführung der Messung muss ein Zeitpunkt möglichst direkt nach dem Schließen der Gebäudehülle gewählt werden. Nur so können gefundene Mängel noch beseitigt werden. Durch eine detaillierte Leckagesuche im gesamten Gebäude können die wichtigsten Fehlstellen beurteilt und ggf. bauseits nachgearbeitet werden. Vor der Durchführung der eigentlichen Luftdichtheitsmessung nach EN 13829 mit Unter- und Überdruckmessreihe steht insbesondere die Gebäudepräparation für den Messtag und die Auswahl des Messtermins im Fokus der Tätigkeiten (Vortermin).

5.9.4 Thermographie

Zur Kontrolle der realisierten Qualität der Gebäudehülle, insbesondere an möglicherweise kritischen Punkten wie den verglasten Bereichen (Pfosten-Riegel-Konstruktion, Glasrand, Anschlüsse) und den verbleibenden Wärmebrücken im Bestandsbau (Innendämmung) wird mit einer hochauflösenden Thermographiekamera eine Innen- und Außenthermographie in der kalten Jahreszeit durchgeführt.

6 Energiebilanz / Simulation

Um die einzelnen Komponenten des Gebäudes und der Technik des geplanten Hallenbades in Lünen beurteilen und optimieren zu können, wurde der Energiebedarf planungsbegleitend berechnet. Für eine genaue Betrachtung und Analyse des thermischen und hygrischen Verhaltens wurde eine dynamische Gebäudesimulation durchgeführt. Zusätzlich wurde eine anschauliche und vereinfachte stationäre Berechnung mit einer, für diesen Zweck erweiterten, Version des Passivhaus Projektierungspaket (PHPP) erstellt.

In diesem Teil des Berichtes werden der aktuelle Stand dieser Berechnungen und die aktuellen Ergebnisse beschrieben und die wichtigsten Parameter identifiziert.

Einige einflussreiche Faktoren stehen zum derzeitigen Planungsstand noch nicht endgültig fest. In diesen Fällen wurden möglichst realistische Annahmen und Abschätzungen getroffen. Beide Modelle sollen während des Betriebes und der geplanten messtechnischen Untersuchung des Bades nachgeführt werden, um den Energieverbrauch nachvollziehen zu können.

6.1 Stationäre Energiebilanz

Dynamische Gebäudesimulationen sind komplex und erfordern einen vergleichbar großen Arbeits- und Zeitaufwand zur Erstellung und Auswertung. Deutlich handhabbarer sind stationäre Energiebilanzen, die mit einer vereinfachten Rechenmethode übersichtlich den Energiebedarf eines Gebäudes ausgeben. Das Passivhaus Projektierungspaket (PHPP) hat sich seit vielen Jahren in der Praxis als Hilfsmittel für die Planung von energieeffizienten Wohn- und Nichtwohngebäuden bewährt. Für die Projektierung des Hallenbades wurde das bestehende PHPP erweitert, um die verschiedenen zusätzlichen Komponenten dieses Gebäudetyps und die Wechselwirkungen zwischen den Zonen abbilden zu können.

Das Modell bildet das Gesamtkonzept aus Gebäudehülle und Haustechnik stationär, basierend auf Monatsmittelwerten des lokalen Klimas ab, und berücksichtigt dabei auch Transmissions- und Lüftungswärmeströme zwischen den einzelnen Temperaturzonen des Gebäudes.

6.1.1 Zonierung

Die Grundlage für die stationäre lanz des Hallenbades in Lünen ist eine Zonierung des Gebäudes in sechs Temperaturbereiche. Die gewählten Zonen sind in Tabelle 3 aufgelistet und zur Visualisierung in Abbildung 43 in den Grundrissen des Hallenbades gekennzeichnet. Zur Vereinfachung wurden einzelne Bereiche des Gebäudes so weit wie möglich und sinnvoll zusammengefasst; so wurden zum Beispiel alle Hallenbereiche mit einer volumengemittelten Temperatur als eine Zone abgebildet, sowie die Umkleiden mit einer Solltemperatur von 26 ℃ und die Duschen/Toiletten mit einer Solltemperatur von 28 °C.

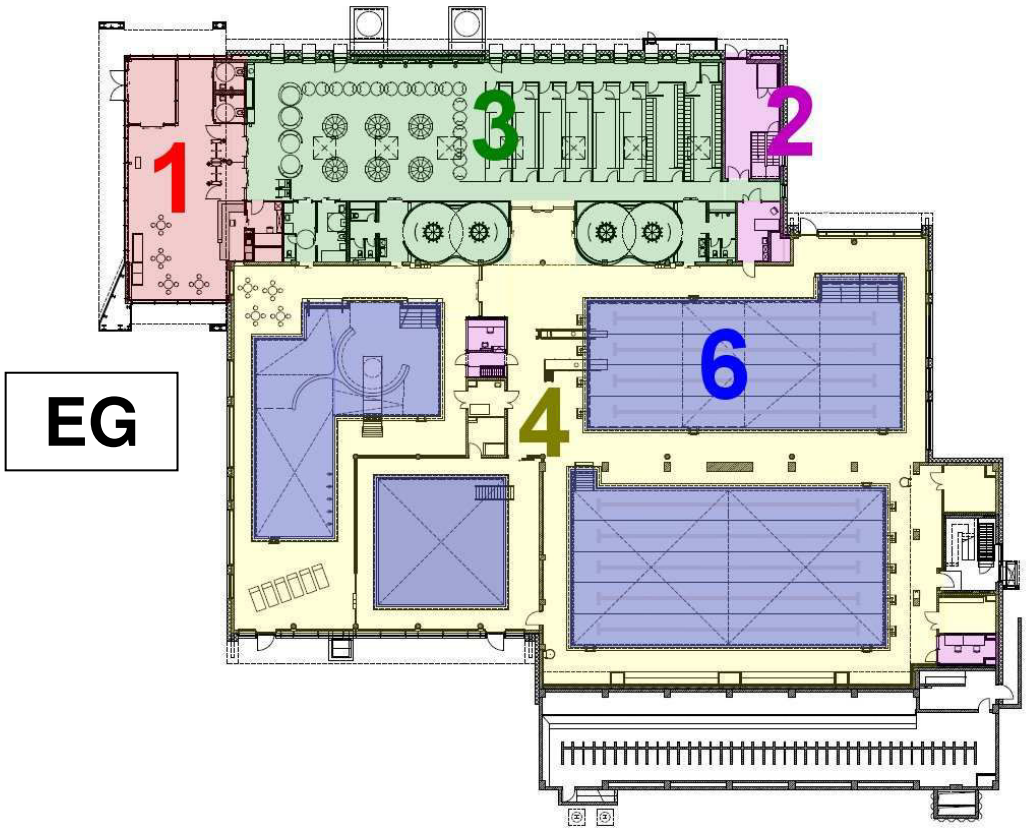
Tabelle 3: Zonen der stationären Energiebilanz.

	Bezeichnung	Solltemperatur [℃]	Energiebezugs-fläche [m²]
Zone 1	Foyer	22	121
Zone 2	Alle	22	106

	Nebenräume		
Zone 3	Umkleiden Duschen Toiletten	26,3[1)]	606
Zone 4	Hallenbereiche	31,3 [1)]	941
Zone 5	Keller	[2)]	1288
Zone 6	Becken	29,1 [1)]	850
Summe			**3912**

[1)] Diese Temperaturen sind Volumenmittel der einzelnen umfassten Bereiche.

[2)] Die Temperatur im Keller stellt sich aufgrund der internen Wärmequellen und Querwärmeströme aus den angrenzenden Zonen ein.



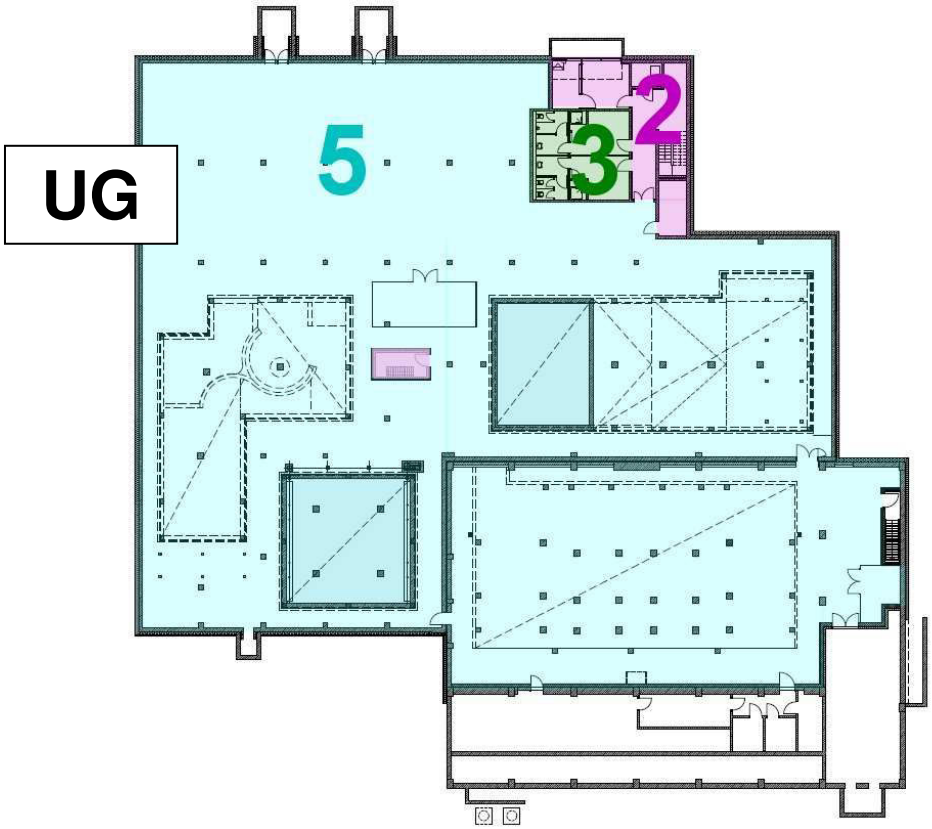


Abbildung 43: Einteilung des Gebäudes in 6 Temperaturzonen für die stationäre Energiebilanz.

6.1.2 Randbedingungen

Kennwerte der Bauteile

Die Bauteilaufbauten wurden für die Berechnung gemäß Angaben in Kapitel 4.5 übernommen. Die Innenraumverglasung der Trennwände zwischen Temperaturzonen wird derzeit als Zweifach-Wärmeschutzverglasung modelliert bzw. alle Schiebetüren als Einfachverglasung. Die Entkopplung der Temperaturbereiche trägt wesentlich zur Energieeinsparung und Komforterhöhung bei, eine Variantenstudie der Verglasungsqualität mit Rücksicht auf entstehende Zusatzkosten soll noch durchgeführt werden.

Angrenzender Altbau

Alle Trennwände an den angrenzenden Altbau wurden pauschal als Außenflächen mit einem Reduktionfaktor von 75% angesetzt.

Nutzungszeiten

Die Öffnungszeiten des Bades werden voraussichtlich folgende sein: Montag bis Freitag 6.15 Uhr bis 21.45 Uhr, Samstag/Sonntag 7.00 Uhr bis 21.45 Uhr. Für die Bilanzierung wurde zunächst täglich 6.00 bis 22.00 angesetzt um zusätzliche Vor- und Nachspülzeiten, sowie die Reinigungsphasen berücksichtigen zu können.

Verdunstung und Lüftung

Einer der größten Energieverbraucher im Hallenbad ist der Wasserkreislauf bzw. die durch die Verdunstung verursachten Wärmeverluste. Es gilt diese so genau wie möglich abzubilden, was jedoch nur unter Annahmen geschehen kann. Die Verdunstung ist von der Nutzung abhängig, die nur schwer voraussehbar ist. Um auf der sicheren Seite zu rechnen wurden der Berechnung während den Öffnungszeiten konstante Wasserübergangskoeffizienten nach [VDI 2089] zugrunde gelegt (siehe Tabelle 4). Durch die Unterwasserumwälzung (vgl. Kapitel 5) und das Abschalten der Überlaufrinnen wird nachts von einer reduzierten Verdungstungsrate ausgegangen. Der Wasserübergangskoeffizient wurde dafür mit 6 m/h angesetzt. Aus den Wasserübergangskoeffizienten und den Solltemperaturen der Becken- und Hallenzone ergeben sich konstante Verdunstungsmengen während den Betriebsstunden und außerhalb dieser, die der Halle als Feuchtequellen angerechnet werden.

Tabelle 4: Wärmeübergangskoeffizienten der Becken nach VDI 2089.

	β [m/h] tagsüber
Eltern-Kind & Warmbecken	40
Lehrschwimmbecken	28
Sportbecken 4	35
Sportbecken 5	28

Eine der Besonderheiten eines Passivhaushallenbades ist die Möglichkeit, dank der sehr guten Gebäudehülle, höhere Hallenfeuchten zulassen zu können ohne Bauschäden zu riskieren (siehe Kapitel 4 und [PHI 2009]). Der Energiebilanzierung wurde daher, entsprechend den Ergebnissen der Grundlagenuntersuchung zu Passivhausbädern [PHI 2009], für die Schwimmhalle durchgängig eine Raumluftfeuchte von 64 % zu Grunde gelegt. Diese Sollfeuchte bestimmt den Außenluftvolumenstrom der Hallenlüftung, der zur Entfeuchtung benötigt wird.

Alle anderen Zonen werden während der Öffnungszeiten mit einem konstanten Luftwechsel nach Auslegung des Haustechnikplaners belüftet. Im noch laufenden Planungsprozess werden diese Werte in Absprache des Planungsteams nach Möglichkeit weiter optimiert, um Lüftungswärmeverluste zu reduzieren.

Der trockene Wärmebereitstellungsgrad aller Lüftungsgeräte wurde mit 70% angesetzt. Die genauen Gerätespezifikationen werden noch nachgetragen. Zusätzliche Wärmegewinne durch das im Wärmetauscher entstehende Kondensat (Enthalpiegewinne) werden berücksichtigt.

Für die Lüftungsgeräte wurde zunächst eine Stromeffizienz von 0.45 Wh/m³ angesetzt. Dieser Wert entspricht den generellen Passivhausanforderungen. Dank optimierten Druckverlusten und effizienten Ventilatoren/Motoren sind die tatsächlichen Werte voraussichtlich niedriger. Die Energiebilanz wird entsprechend angepasst, wenn die Spezifikationen feststehen.

Nach derzeitigem Planungsstand ist vorgesehen den Luftwechsel der Hallen tagsüber konstant zu halten und den benötigten Außenluftvolumenstrom mit Umluft zu ergänzen (siehe Kapitel 5), um eine konstante Durchspülung der Hallen zu gewährleisten. Diese Umluft erhöht den Stromverbrauch der Lüftungsgeräte – eine weitere Maßnahme zur Energieeinsparung besteht also darin, den Umluftanteil weitestgehend zu reduzieren. Dies wird im Betrieb angestrebt. Der zusätzliche Stromverbrauch durch den Umluftanteil während der Öffnungszeiten wird in der Energiebilanz separat ausgewiesen.

Die Wärmepumpe im Hallenbereich des Lehrschwimmbeckens wird im derzeitigen Gebäudemodell wegen der komplexen Zusammenhänge und der schwer abschätzbaren Einflussfaktoren nicht berücksichtigt. Die Auswirkung auf den Energiehaushalt soll im Betrieb vermessen werden. Auf die Ergebnisse kann eine Modellierung nachträglich aufsetzen.

Ein gewisser Luftaustausch zwischen den einzelnen Temperaturzonen durch geöffnete Türen lässt sich nicht vermeiden. Es wurden Annahmen zum Besucherverhalten getroffen und entsprechende Luftwechsel abgeschätzt.

Für die Luftdichtheit der Gebäudehülle und den entsprechenden Infiltrations-luftwechsel wurde ein Drucktestergebnis bei 50 Pa Druckdifferenz von $n_{50} = 0{,}2\ h^{-1}$ angenommen.

Warmwasser

Die Wärmeverluste durch die Verdunstung wurden als Wärmesenken in der Zone „Becken“ berücksichtigt. Separat hierzu wird der Heizbedarf des benötigten Beckenfrischwassers berechnet. Die Menge des Frischwassers wird zum einen durch den hygienischen Bedarf und zum anderen durch die Verluste der notwendigen Filterspülung und Verdunstung bestimmt. Im Regelfall sind diese Verluste höher als der hygienische Mindestwasseraustausch, so dass die Summe dieser Größen für die Energiebilanz ausschlaggebend ist.

Der Energiebedarf für das Duschwarmwasser wurde anhand der erwarteten Besucherzahl von 230000 Besuchern pro Jahr berechnet (ausgehend von einer Durchflussmenge der Duschköpfe von 6 Liter pro Minute und einer durchschnittlichen Duschzeit von 3 Minuten).

Die Verteilverluste der Heizungsrohre, der Warmwasser- und Kaltwasserleitungen können in der Energiebilanz berücksichtigt werden. Sie wurden abgeschätzt aber in den hier aufgeführten Ergebnissen vernachlässigt, da der Einfluss auf die Gesamt-Primärenergiebilanz vergleichbar gering ist und noch keine genauen Angaben vorliegen.

Verbraucher

Die derzeit im PHPP angesetzten Werte der Stromverbraucher basieren auf Abschätzungen des Haustechnikplaners. Hierbei wird zwischen der Gebäudetechnik (Hilfsstrom Heizung, Sanitär, Schwimmbadtechnik), der Beleuchtung und sonstigen Verbrauchern (Kasse, Föhne, Verwaltung, ggf. Aufzug etc.) unterschieden. Eine Überarbeitung dieser Werte erfolgt im noch laufenden Planungsprozess.

Interne Wärme- und Feuchtequellen

Die internen Wärmequellen des Bades unterscheiden sich in jeder Zone. Sie setzten sich zusammen aus der Wärmeabgabe der Besucher, der Beleuchtung, der Gebäudetechnik, sonstigen Anwendungen und der Verteilverluste. Insbesondere im Keller sind die Wärmequellen durch die zentrale Technikausstattung auf vergleichbar engem Raum recht hoch. Mit Hilfe des PHPP können die Wärmeabgaben recht genau für jede Zone berechnet werden, sofern die relevanten Parameter bekannt sind oder verlässlich abgeschätzt werden können. Um für die Berechnung des Heizwärmebedarf zunächst auf der sicheren Seite zu liegen, wurden für den hier aufgeführten Bilanzierungsstand Standardwerte aus dem Nichtwohngebäudesektor übernommen: Bis auf den Keller und die Becken wurde jeder Zone 3.5 W/m² angerechnet. Die Gewinne der Becken durch Schwimmer und Beleuchtung wurden vernachlässigt und dem Keller kommen pauschal 15 W/m² zugute.

Klimadaten

Verwendet wurde der Klimadatensatz des Testreferenzjahres TRY 5 (Essen) des Deutschen Wetterdienstes [Christoffer 2004].

6.1.3 Ergebnisse

Endenergiebedarf

Endenergiebedarf nach derzeitigem Projektierungsstand (ohne Umluft): 549 kWh/(m²a)

Der mit dem PHPP berechnete Endenergiebedarf ist in Abbildung 44 dargestellt. Unterschieden wird hierbei zwischen dem Heizwärmebedarf der Raumluft, dem Heizwärmebedarf des Becken- und Duschwassers, sowie dem Strombedarf der Haustechnik und sonstiger Verbraucher. Deutlich zu erkennen ist, dass die Raumbeheizung in der Gesamtsumme eine eher untergeordnete Rolle spielt – auch dank der sehr gut gedämmten und luftdichten Passivhausgebäudehülle. Den größten Endenergiebedarf hat das Wasser, wobei die Verdunstung des Beckenwassers die größten Verluste verursacht.

Der Hauptenergieverbraucher „Verdunstung“ wird mit dem Passivhaus-Konzept erheblich reduziert. Dies wird deutlich, wenn man die Bilanz desselben unveränderten Gebäudes bei einer nach Norm ausgelegten Hallenfeuchte von 14,3 g/kg betrachtet (Abbildung 45). Der Gesamtendenergiebedarf liegt dann bei 793 kWh/(m²a), wobei in dieser Zahl der erhöhte Stromverbrauch der Schwimmbad- und Heiztechnik noch nicht berücksichtigt ist. Konkret wird durch die höhere Hallenfeuchte der Heizwärmebedarf der Halle um ca. 46 % reduziert und der des Beckenwassers (nur Transmissions- und Verdunstungsverluste) um ca. 36 %. Weitere Einsparungen in diesem Bereich sind aus Komfort- und bauphysikalischen Gründen kaum möglich, diese Grenzen sollen während der geplanten messtechnischen Untersuchung validiert werden.

Neben dem Wärmebedarf der Raumluft und des Becken-, sowie Duschwassers, ist in den folgenden Grafiken der projektierte Strombedarf des Gebäudes aufgeführt. Diese Werte sind zum jetzigen Zeitpunkt am unsichersten, die hier aufgeführten Zahlen basieren auf Abschätzungen und Hochrechnungen, die auf der sicheren Seite liegen. Der Stromverbrauch der Lüftungsventilatoren wurde, wie in den Randbedingungen beschrieben, mit einer Stromeffizienz der Lüftungsgeräte von 0.45 Wh/m³ berechnet. Er ist unterteilt in den Strombedarf der für die Entfeuchtung erforderlichen Außenluftmenge und dem zusätzlichen Strombedarf bei maximalem Umluftbetrieb (Differenz zwischen Auslegungs- und Außenluftvolumenstrom) während der Öffnungszeiten. Hier ist deutlich zu erkennen, dass der benötigte Ventilatorstrom ohne Umluft wesentlich reduziert werden kann. In diesem Fall sind es fast 50 %.

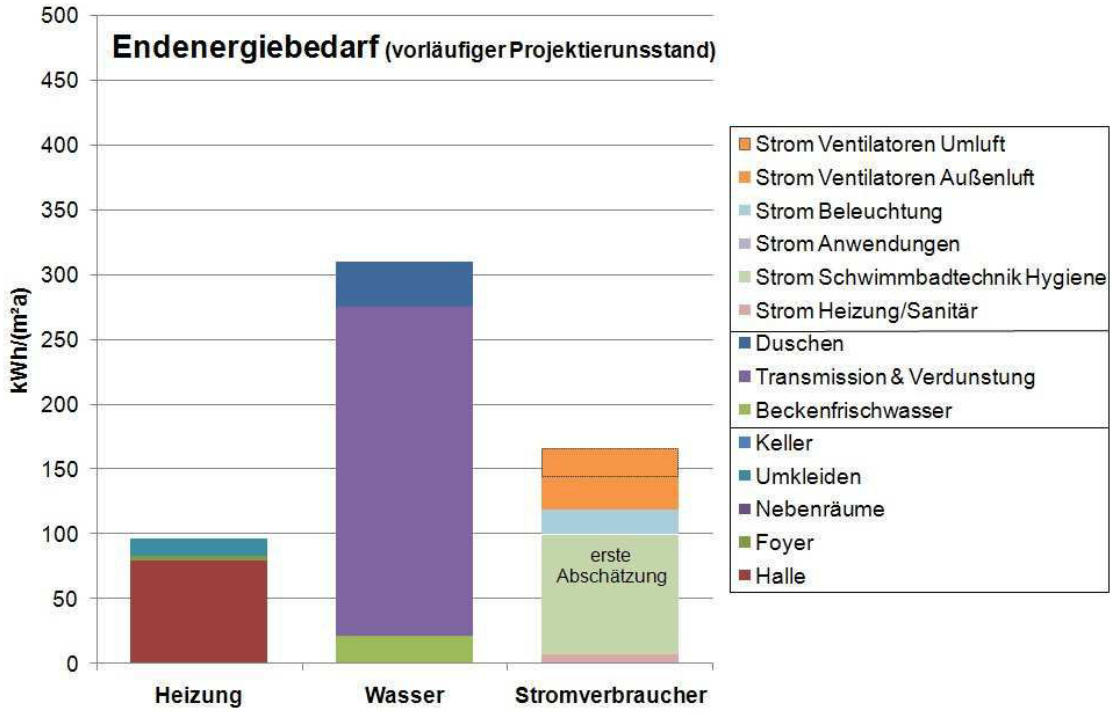


Abbildung 44: Der Endenergiebedarf des Gebäudes nach dem derzeitigen vorläufigen Projektierungsstand, unterteilt in Raumheizwärmebedarf, Heizbedarf des Wassers und Stromverbraucher.

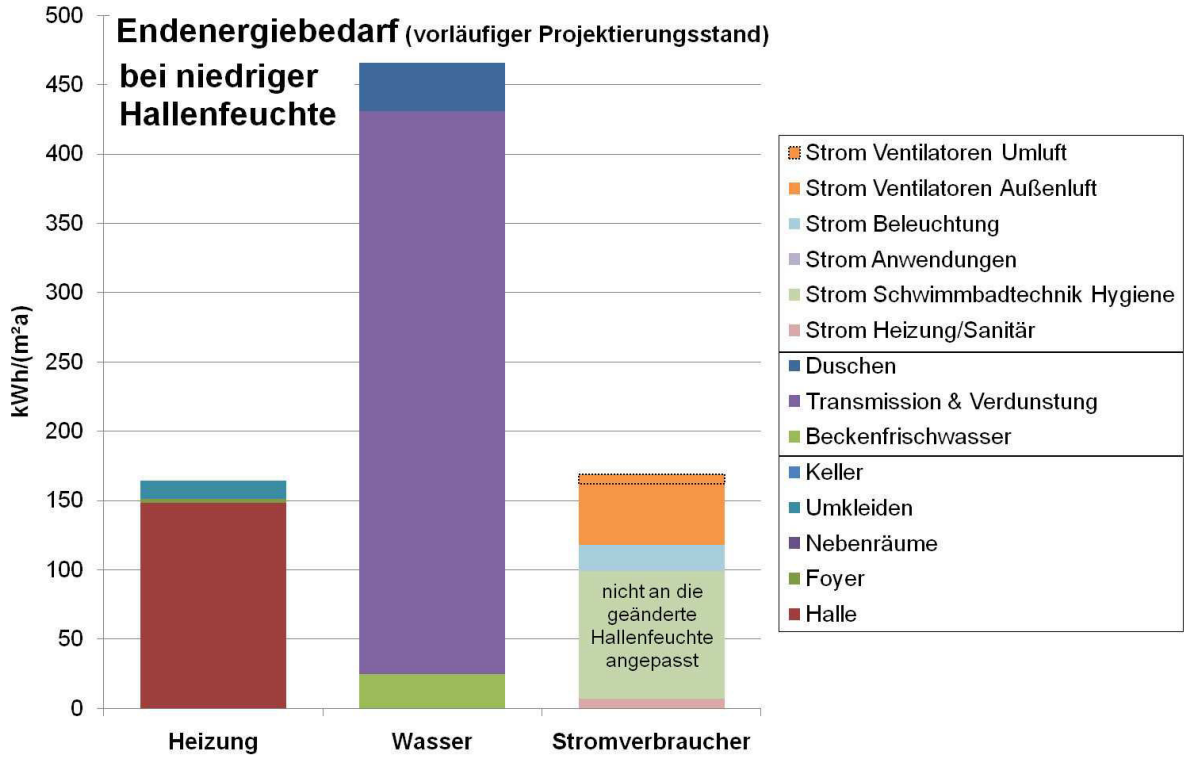


Abbildung 45: Der Endenergiebedarf des Gebäudes nach dem derzeitigen vorläufigen Projektierungsstand, unterteilt in Raumheizwärmebedarf, Heizbedarf des Wassers und Stromverbraucher bei einer niedrigeren Hallenfeuchte nach [VDI 2089].

Primärenergiebedarf

Die bisherigen Aussagen über den Endenergie- und Strombedarf sind interessant und relevant, da hiermit detailliert und eindeutig die Energieströme nachvollzogen und somit mögliche Einsparpotentiale identifiziert werden können. Für die endgültige energetische Bewertung des Gebäudes ist es jedoch notwendig und sinnvoll, die Primärenergiebilanz zu betrachten, d.h. die Art der Wärmebereitstellung zu berücksichtigen und den Endenergiebedarf mit Primärenergiefaktoren zu gewichten.

Primärenergiebedarf nach derzeitigem Projektierungsstand (ohne Umluft): 409 kWh/(m²a)

In Abbildung 46 ist die mit dem PHPP berechnete Primärenergiebilanz des aktuellen Projektierungsstandes des Lippe Bads aufgeführt, unterteilt in die gleichen Bereiche wie der Endenergiebedarf im vorhergehenden Textabschnitt. Die Gewichtung dieser Bereiche verschiebt sich erheblich, da der Primärenergiefaktor für Strom mit 2,6 wesentlich ungünstiger ist als der der Fernwärmeversorgung mit 0,17 [Wibera 2010]. In diesem speziellen Fall wird außerdem die Abwärme des BHKWs genutzt um ca. 50 % des Heizbedarfs abzudecken, die mit einem Primärenergiefaktor von 0[1] angesetzt wurde.

An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass das Lippe Bad mit einem primärenergetisch sehr günstigen Fernwärmeanschluss und der Möglichkeit zur direkten BHKW-Abwärmenutzung unter vorteilhaften Randbedingungen gebaut wird. In anderen Fällen muss eine Wärmepumpe zur Enthalpierückgewinnung aus der Fortluft eingesetzt werden, um ähnliche Primärenergiekennwerte zu erreichen (vgl. [PHI 2009]).

[1] Der Strombedarf für die zusätzlich erforderlichen Pumpen dieses Heizkreises wurde über den Stromverbrauch der Heiztechnik berücksichtigt.

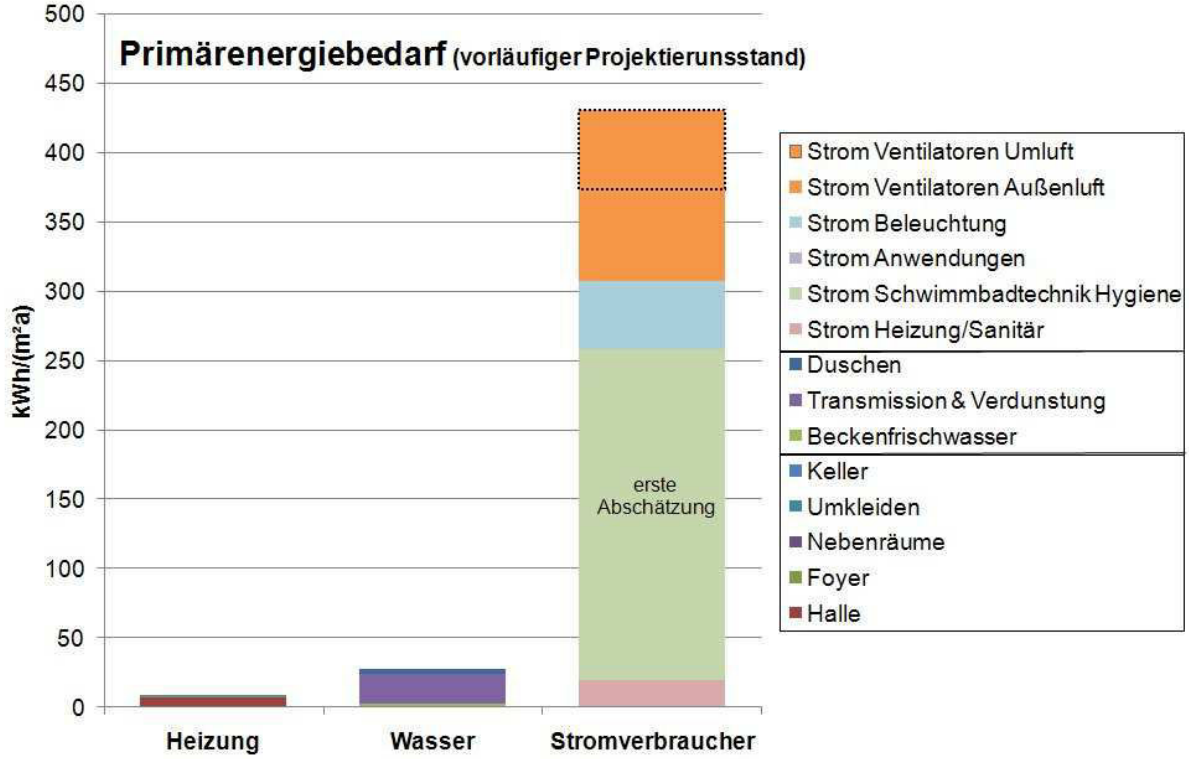


Abbildung 46: Der mit dem PHPP projektierte Primärenergiebedarf nach dem derzeitigen vorläufigen Projektierungsstand, unterteilt in Raum-Heizwärmebedarf, Heizbedarf des Wassers und Stromverbraucher.

Bei der Primärenergiebilanz steht eindeutig der Stromverbrauch im Vordergrund. Dies verdeutlicht, dass bei der Planung besonders darauf zu achten ist, unnötige Druckverluste zu vermeiden und hocheffiziente Geräte einzusetzen. Wie bereits beschrieben, sind die hier aufgeführten Werte noch sehr vorläufig – an der Gewichtung der einzelnen Bereiche wird sich jedoch voraussichtlich nicht viel ändern. Den Hauptverbraucher stellt die Schwimmbadtechnik dar, gefolgt von der Lüftung und der Beleuchtung.

6.2 Dynamische Gebäudesimulation

Für die dynamische Simulation wurde das PHI-eigene Simulationsprogramm DYNBIL verwendet, das umfassend validiert wurde [vgl. Feist 1994], sich seit vielen Jahren in der Praxis für die Simulation von verschiedenen Gebäudetypen sehr gut bewährt hat und fortlaufend weiter entwickelt wird. Es ermöglicht eine detaillierte Vorhersage des thermischen und hygrischen Verhaltens von Gebäuden auf Grundlage der physikalischen Zusammenhänge.

6.2.1 Zonierung

Das geplante Bad wurde so genau wie sinnvoll und möglich abgebildet, mit einer Zonierung in 13 Temperatur- und Nutzungsbereiche. Diese Zonen und ihre jeweiligen Solltemperaturen sind in Tabelle 5 aufgelistet. Entsprechend der geplanten Haustechnik und der abzusehenden Nutzung wurden für jede Zone separat interne Wärmequellen bzw. –senken, Feuchtequellen und Luftwechselraten angesetzt.

Tabelle 5: Zonen der dynamischen Gebäudesimulation.

	Bezeichnung	Solltemperatur [°C]
Zone 1	Foyer	22
Zone 2	Umkleiden	26
Zone 3	Duschen Toiletten	28
Zone 4	Aktivitätsbereich	34
Zone 5	Lehrschwimmbereich	34
Zone 6	Sportbereich	30
Zone 7	Eltern-Kind- & Warmbecken	32
Zone 8	Lehrschwimmbecken	32
Zone 9	Sportbecken 1&2	28
Zone 10	Keller (Technik)	[1)]
Zone 11	Schwimmmeisterraum (SM)	22
Zone 12	Sprecherraum	22
Zone 13	Nebenräume NO	22

1) Die Temperatur im Keller stellt sich aufgrund der internen Wärmequellen und Querwärmeströmen aus den angrenzenden Zonen ein.

6.2.2 Randbedingungen

Die Randbedingungen der Berechnungen entsprechen denen der stationären Energiebilanz, außer in folgenden Details:

Kennwerte der Bauteile

Die Bauteilaufbauten wurden analog zu denen der stationären Energiebilanz in das Simulationsmodell eingetragen, mit dem Unterschied, dass die Wärmeübergangswiderstände an den Oberflächen nicht als konstant angenommen werden sondern in jedem Zeitschritt entsprechend der Randbedingungen neu berechnet werden. Die Wärmedurchgänge durch die Bauteile sind somit genauer abgebildet. Auch die Energiebilanz der einzelnen Fenster und inneren Verglasungsflächen wird von DYNBIL wesentlich komplexer und korrekter berechnet.

Angrenzender Altbau

In der dynamischen Simulation wird für den angrenzenden Altbau zwischen drei Zonen unterschieden: Nebenräume, BHKW-Aufstellraum und Schalthaus. Hierbei wird davon ausgegangen, dass es in Nebenräumen nicht kälter als 20 °C und nicht wärmer als 25 °C wird, dass die internen Wärmegewin ne im Schalthaus im Winter für eine Mindesttemperatur von 10 °C sorgen, und dass i m BHKW-Aufstellungsraum das ganze Jahr über 50 °C Lufttemperatur herrschen.

Verdunstung und Lüftung

Die Verdunstungsmenge wird entsprechend der Temperatur- und Feuchteverhältnisse der Becken und der jeweiligen Hallenluft in jedem Zeitschritt neu berechnet, basierend auf den in Tabelle 4 aufgelisteten Wasserübergangskoeffizienten. In der Praxis ist der Wasserübergangskoeffizient je nach Nutzung variabel – dies kann in der Simulation nach den ersten Messungen entsprechend angepasst werden.

Einer der wesentlichen Unterschiede zur stationären Berechnung ist, dass die Belüftung in der dynamischen Simulation zeitabhängig betrachtet werden kann. Die Belüftung der Hallenbereiche ist feuchtegesteuert, d.h. der Außenluftvolumenstrom wird abhängig von der Verdunstungsrate und der Außenluftfeuchte in jedem Rechenschritt der Simulation neu berechnet, um die Sollfeuchte der Hallenluft zu halten. Analog zur stationären Berechnung wurde dem dynamischen Simulationsmodell eine Hallenfeuchte von *durchgängig* 64 % zugrunde gelegt. Im Betrieb soll nachts eine noch höhere Hallenfeuchte zugelassen werden (siehe Kapitel 5); daher wurden in das Simulationsmodell weitere Berechnungsvarianten integriert, bei welchen die Hallenlüftung nachts ganz ausgeschaltet bleibt oder einen höheren Grenzwert zulässt. Die restlichen Zonen werden ausschließlich während der Öffnungszeiten belüftet. Zudem wird in diesem dynamischen Modell die geplante Überströmung von den Umkleiden in die Duschen berücksichtigt. Auch die zentrale Belüftung mehrere Zonen über ein Lüftungsgerät (Foyer, Keller und Nebenräume) kann besser abgebildet werden.

Das Lüftungsgerät der Nebenräume (Foyer, Keller, Schwimmmeister, Sprecherraum, Nebenräume NO) ist mit einem temperaturgeregelten Bypass der Wärmerückgewinnung ausgestattet, um Überhitzung im Sommer vorzubeugen. Eine zusätzliche Nachtlüftung zur Auskühlung dieser Bereiche ist nicht vorgesehen.

Die Wärmepumpe des Lüftungsgerätes für den Erholungsbereich wird auch in der dynamischen Simulation nicht abgebildet. Auch der Umluftanteil der Hallenlüftungsgeräte wird nicht berücksichtigt. Beide Faktoren spielen für den Heizwärmebedarf und die Wärmeströme zwischen den Zonen keine relevante Rolle, sie spiegeln sich in der Primärenergiebilanz des Gebäudes wider.

Heizung

Alle Zonen sind aktiv auf die jeweilige Solltemperatur beheizt. Im derzeitigen Simulationsmodell ist die Beheizung ideal abgebildet, d.h. DYNBIL berechnet den theoretischen Wärmebedarf und somit die Heizlast separat für jede Zone, ohne Berücksichtigung der Nebeneffekte eines reellen Heizsystems (Verteilverluste, begrenzte Heizleistung etc.). Im nächsten Schritt soll die Beheizung als Luftheizung simuliert werden, um die tatsächlichen Verhältnisse noch besser abbilden zu können.

Verbraucher

Die einzelnen Verbraucher gehen in die Simulation nur indirekt über ihre Wärmeabgaben ein. Der jährliche Strombedarf wird mit DYNBIL nicht berechnet.

Interne Wärme- und Feuchtequellen

In der dynamischen Simulation können interne Wärme- und Feuchtequellen akkurater abgebildet werden, da anstelle von Mittelwerten mit einer stundengenauen Aufteilung der einzelnen Quellleistungen gerechnet werden kann. Im derzeitigen Modell wird zwischen Öffnungszeiten und Ruhebetrieb (keine interne Wärmequellen außer im Keller) unterschieden.

Außer der Beckenverdunstung gibt es durch die nassen Badegäste, Handtücher, Duschen etc. verschiedene Feuchtequellen, die nur schwer abzuschätzen sind. Für die Zone der Duschen wurde ein Feuchteeintrag in die Luft von 200 g/Duschvorgang angenommen, gemittelt über den Öffnungszeitraum.

Warmwasser

Der Heizbedarf für das Warmwasser zur Duschnutzung fließt nicht in die dynamische Simulation ein, da es weitestgehend unabhängig von denen Temperaturverhältnissen der einzelnen abgebildeten Zonen ist und separat berechnet werden kann.

Der Heizbedarf des Beckenfrischwassers wird in diesem Modell nicht separat, sondern analog zur Verdunstung als Wärmesenke der einzelnen Becken angesetzt.

6.2.3 Ergebnisse

Endenergiebedarf

Endenergiebedarf nach derzeitigem Projektierungsstand: 389 kWh/(m²a)

Dieser Wert beinhaltet ausschließlich den Heizwärmebedarf aller Zonen und den Energiebedarf zur Beckenwassererwärmung.

In Abbildung 47 sind die berechneten Werte aller 13 Temperaturzonen grafisch dargestellt, unterteilt in die Raumluft- und Beckenwasserbeheizung.

Auch hier ist deutlich zu erkennen, dass das Wasser den Haupt-Endenergieverbraucher darstellt. Für eine genauere Betrachtung des Heizwärmebedarfs der Raumluft sind die berechneten Werte der einzelnen Zonen in Abbildung 48 absteigend sortiert aufgeführt. Wie zu erwarten, ist der Heizwärmebedarf des größten Hallenbereiches am höchsten, gefolgt von den kleineren (aber wärmeren) Hallenabschnitten und dem Umkleidebereich.

Der Heizwärmebedarf der Duschen ist trotz des höheren Temperaturniveaus von 28 °C niedriger als der der Umkleiden, da hier nur ein e Nacherwärmung der bereits auf 26 °C erwärmten Raumluft der Umkleiden erfolgen mus s. Dies ist ein gutes Beispiel für vorteilhafte Lüftungsplanung und Raumaufteilung. Der warme Duschbereich agiert als eine Art „Puffer“ zwischen dem deutlich wärmeren Hallenbereich und dem kühleren Umkleidebereich. Die Nebenräume haben einen sehr niedrigen Heizwärmebedarf, da sie fast komplett über die Querwärmeströme aus den angrenzenden wärmeren Zonen beheizt werden. Zudem wird für die Beheizung dieser Räume indirekt die Abwärme der Gebäudetechnik genutzt, da sie von demselben Lüftungsgerät (wie auch der Keller) versorgt werden und somit die erwärmte Abluft des Kellers über die Wärmerückgewinnung die Zuluft aller dieser Räume vorerwärmt.

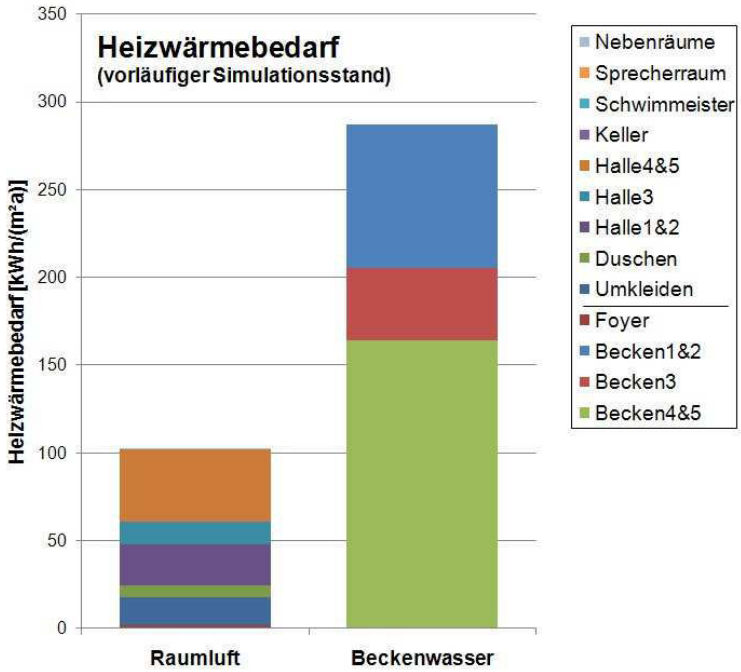


Abbildung 47: Der mit der dynamischen Simulation berechnete Heizwärmebedarf der einzelnen Zonen für den aktuellen, vorläufigen Stand, unterteilt in Raum- und Beckenwasserbeheizung.

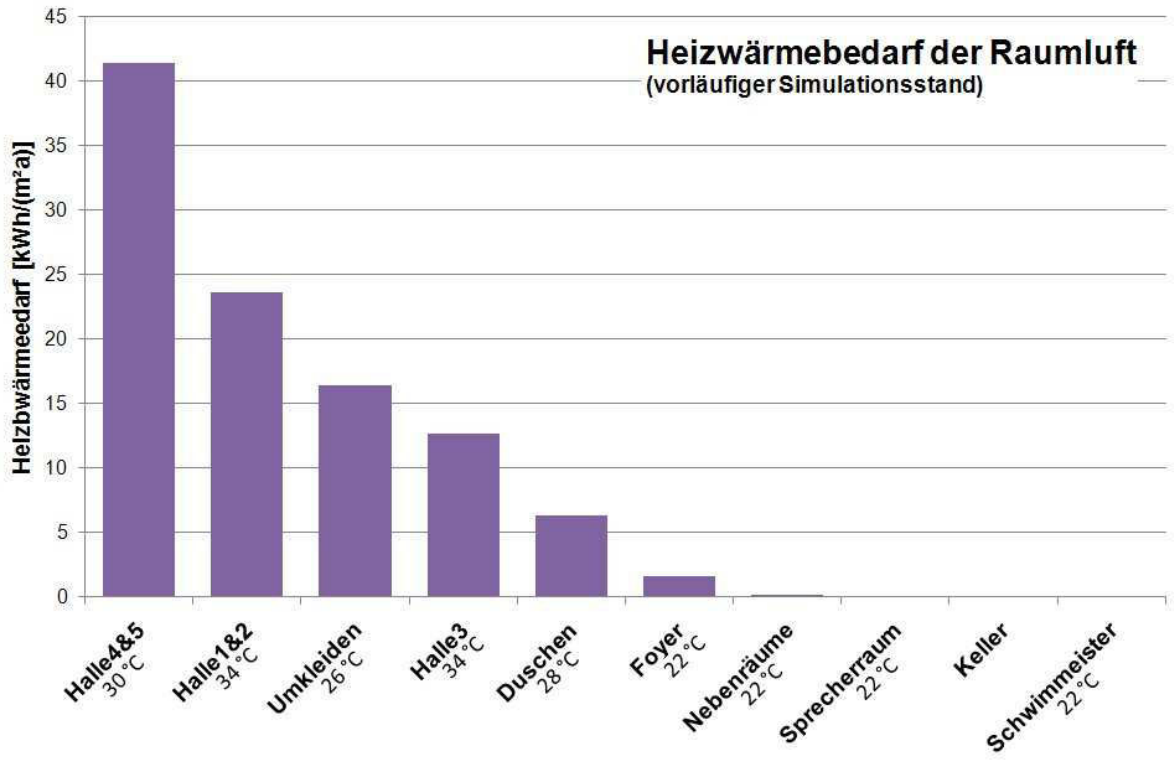


Abbildung 48: Der mit der dynamischen Simulation berechnete Heizwärmebedarf der Raumluft, absteigend sortiert.

In einzelnen Räumen (Schwimmmeister- und Sprecherraum) ist nun nicht mehr die Beheizung von zentraler Bedeutung, sondern vielmehr die Überhitzungsgefahr. Die dynamische Simulation bietet den großen Vorteil, dass die Temperaturverläufe der einzelnen Zonen genau betrachtet werden können; somit kann geprüft werden, ob die gesetzten Komfortrandbedingungen auch in einzelnen Räumen eingehalten werden. Die Ergebnisse der Simulation können dann direkt verwendet werden, um z.B. die Lüftungs- und Sommerbypassregelung weiter zu optimieren.

6.3 Vergleich der Rechenverfahren

Die Ergebnisse der beiden Rechenverfahren sehr gut überein, wie in den Abbildung 49 bis Abbildung 52 dargestellt. Die geringen Unterschiede in den Ergebnissen der beiden beschriebenen Rechenmodellen sind bereits allein auf Grund der unterschiedlichen Zonierung und der Rechenschritte (Monatswerte / Stundenwerte) zu erwarten. Zudem können die thermischen Wechselwirkungen mit der dynamischen Simulation wesentlich präziser abgebildet werden. Ein Beispiel hierfür ist die Versorgung mehrerer Zonen über ein Lüftungsgerät, was die Ablufttemperatur

und somit den Wärmebereitstellungsgrad der separaten Räume beeinflusst. Für die stationäre Bilanz müssen solche Effekte so gut wie möglich abgeschätzt werden bzw. als Teilergebnisse aus der Simulation übernommen werden.

In Abbildung 49 sind die Ergebnisse des Heizwärmebedarfs der stationären Energiebilanz und der dynamischen Simulation im Vergleich aufgeführt. Hierfür wurden die mit der dynamischen Simulation berechneten Werte für die Zonenaufteilung der stationären Energiebilanz aufsummiert und nur die relevanten Werte aus dem PHPP übernommen (kein Strombedarf, kein Duschwasser). Die Übereinstimmung ist sehr gut, beide Modelle bilden dieselben Tendenzen ab: Den größten Bedarf hat das Beckenwasser, gefolgt von den Schwimmhallen und dann den Umkleiden und Duschen. Die Nebenräume haben einen fast vernachlässigbaren Heizwärmebedarf und der Keller wird gar nicht beheizt.

Die Summe des Raumheizwärmebedarfs im Vergleich ist in Abbildung 50 dargestellt. Für den derzeitigen Projektierungsstand, wie in Kapitel 4.5 beschrieben, ergibt sich eine Abweichung von 6 %. Die Abweichung des Beckenwasserheizwärmebedarfs ist mit nur 4 % etwas niedriger (Abbildung 51).

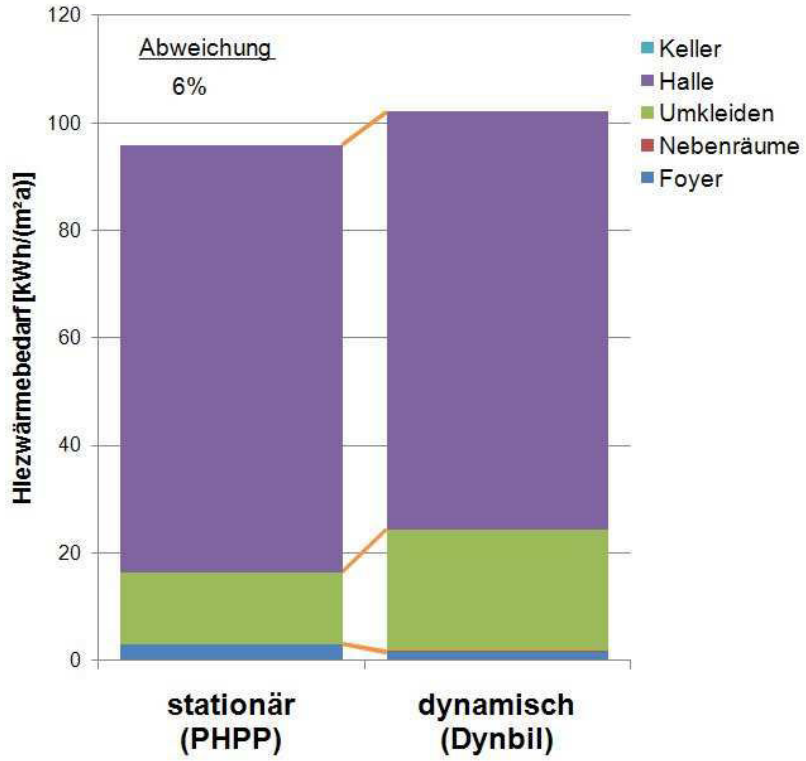


Abbildung 49: Vergleich des stationär und dynamisch berechneten Heizwärmebedarfs jeder Temperaturzone.

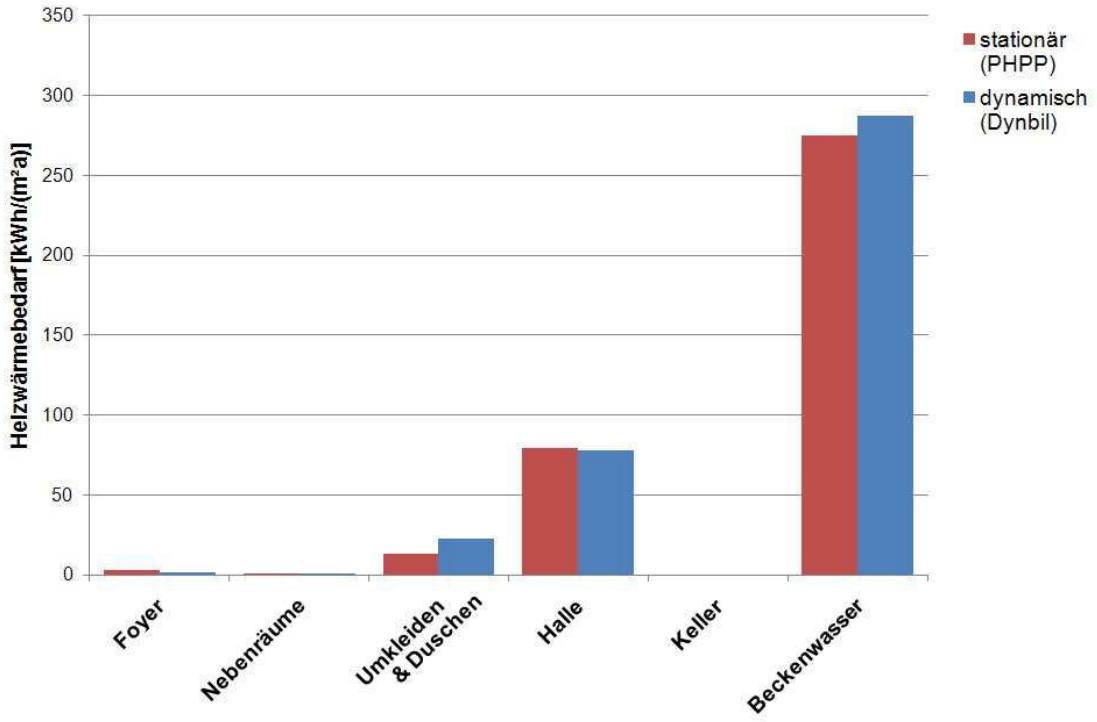


Abbildung 50: Vergleich des stationär und dynamisch berechneten Heizwärmebedarfs der einzelnen Zonen und die Gesamtabweichung des Ergebnisses.

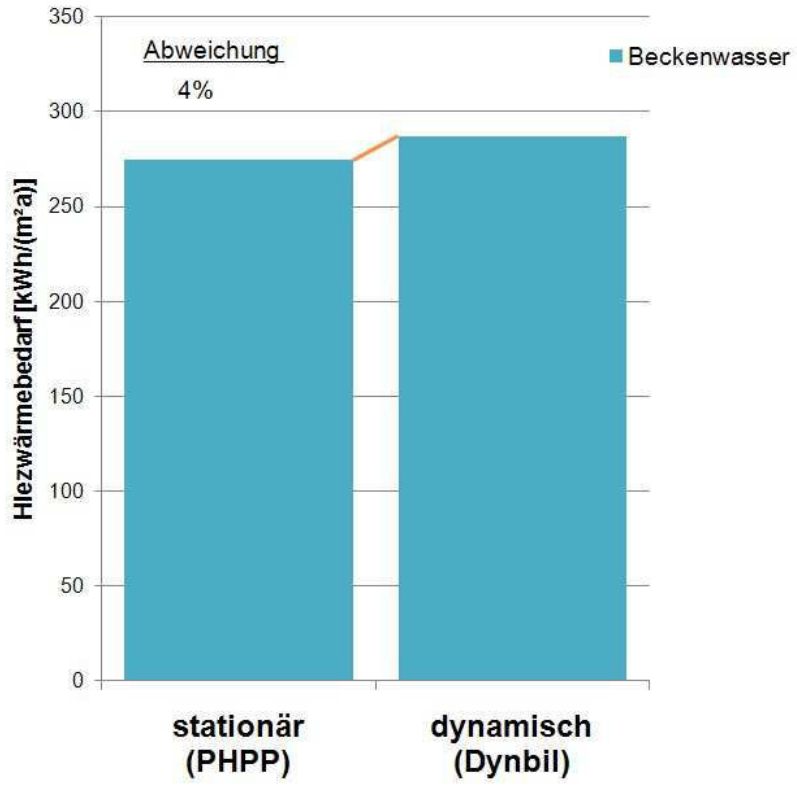


Abbildung 51: Vergleich des stationär und dynamisch berechneten Heizwärmebedarfs des Beckenwassers (Verdunstungs- und Transmissionsverluste, Frischwassererwärmung) und die Gesamtabweichung dieses Ergebnisses.

Beim Vergleich der Ergebnisse ist die genauere Betrachtung der Zonen, die in der dynamischen Simulation genauer aufgeteilt wurden besonders interessant, also der Bereich der Umkleiden und Duschen und die PHPP Zone „Nebenräume“, die unter Anderem den Schwimmmeister- und Sprecherraum beinhaltet. Die relevanten Temperaturverläufe (Monatsmittelwerte) sind in Abbildung 52 und Abbildung 53 dargestellt. Bei den Nebenräumen (Abbildung 52) stimmen die über die Raumvolumen gemittelten Temperaturen der dynamischen Simulation im ganzen Jahresverlauf sehr gut mit den stationär berechneten Werten überein. Deutlich zu erkennen ist jedoch, dass insbesondere der Schwimmmeisterraum stark von diesen Monatsmittelwerten abweicht: Durch die zentrale Lage, umgeben von den warmen Schwimmhallen, stellen sich hier höhere Temperaturen ein. Dieses Phänomen kann mit der stationären Energiebilanz nicht abgebildet werden. Die Situation bei den Umkleiden und Duschen ist ähnlich: Im Mittel stimmen die Werte recht gut überein, die tatsächlichen Temperaturen der kleineren Zone (Duschen) weichen, wie zu erwarten, etwas ab.

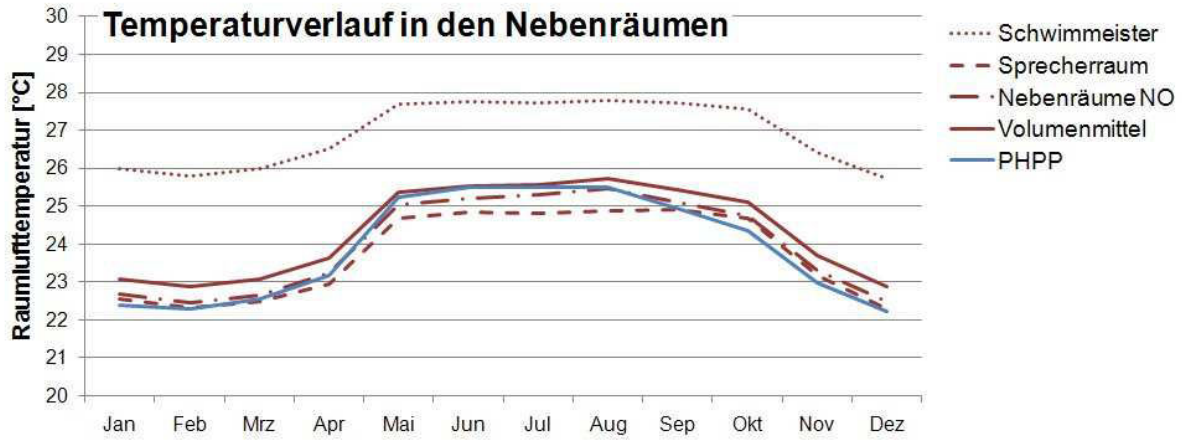


Abbildung 52: Die monatsmittleren Temperaturen der Nebenräume. In rot die Ergebnisse der dynamischen Simulation und in blau die der stationären Energiebilanz.

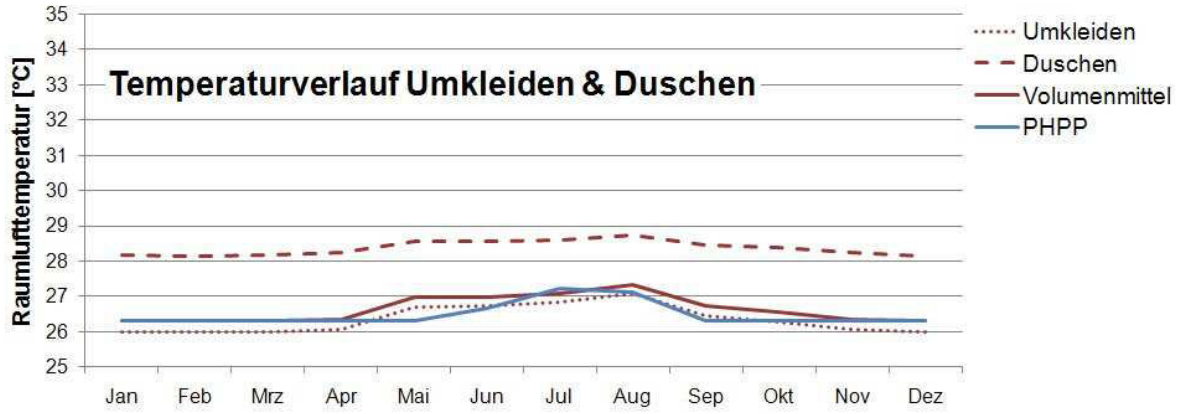


Abbildung 53: Die monatsmittleren Temperaturn der Umkleiden und Duschen. In rot die Ergebnisse der dynamischen Simulation und in blau die der stationären Energiebilanz.

Die sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse qualifiziert das stationäre Berechnungsverfahren nach PHPP. Der Vergleich zeigt aber auch, dass im Einzelfall darauf geachtet werden muss, ob die Temperaturverhältnisse in speziellen Räumen deutlich von den berechneten Mittelwerten abweichen. Abweichungen des berechneten Energiebedarfs zu dem tatsächlichen Energieverbrauch sind nicht auszuschließen und auf Grund nicht vorhersehbarer Nutzungsparameter sogar zu erwarten. Diese Parameter sind in einem so komplexen Gebäude nur schwer vorauszusagen, können aber das Endergebnis erheblich beeinflussen. Dies betrifft insbesondere die Schwimmbadtechnik und das Besucherverhalten bzw. Nutzungsprofil des Bades.

Die Ergebnisse zeigen deutlich den großen Einfluss der Verdunstung, welche wiederum u. A. von der Wasserbewegung, also dem Betriebszustand (Nutzung durch Freizeitschwimmer, planschende Kinder, Schulschwimmen etc.) beeinflusst wird. Auch die erforderlichen Pumpenleistungen und Beleuchtungszeiten können nur schwer präzise abgeschätzt werden, da sie von der Nutzung des Bades abhängen. Alle hier aufgeführten Ergebnisse sind daher als vorläufige Prognosen zu sehen.

6.4 Vergleich der Energiebilanzen des Lippe Bades als Passivhaus wie geplant und nach EnEV

Um die eingesparte Energiemenge des in diesem Bericht vorgestellten Hallenbades mit PH-Ansatz gegenüber einem konventionellen Hallenbad Neubau zu beurteilen, wurde eine Variante der Energiebilanz erstellt. Hierfür wurde dasselbe PHPP verwendet, in dem die Gebäudeeigenschaften angepasst wurden um einem Neubau nach EnEV zu repräsentieren. Die wesentlichen Unterschiede der Varianten sind in Tabelle 6 aufgelistet. Zur Vollständigkeit enthält die Tabelle in einer dritten Spalte

zusätzlich die aktualisierte Kennwerte des Passivhaus-Bades (Stand Juli 2011). Alle Werte wurden in Zusammenarbeit des PHI und ENERATIO erarbeitet.

In Abbildung 54 sind zwei Sankey Diagramme dargestellt, die die Ergebnisse für beide Gebäude im Vergleich grafisch darstellen. Gezeigt werden in rot die berechneten Wärmemengen und in braun die verschiedenen Komponenten des Strombedarfs. Im linken Teil der Grafik ist die Deckung der einzelnen Bedarfsbereiche (Raumwärme, Warmwasser, sowie des bilanzierten Strombedarfs aus den vier zur Verfügung stehenden Energiequellen (BHKW Raumabwärme, BHKW Kondensationsabwärme, Fernwärme und Strom) dargestellt. Rechts in den Diagrammen ist der sich aus dem berechneten Endenergiebedarf und der angesetzten Primärenergiefaktoren ergebende Gesamt-Primärenergiebedarf abzulesen. Wie weiter oben erwähnt, wird ein erheblicher Teil des Wärmebedarfes des Bades durch ansonsten nicht nutzbare Abwärme des BHKWs gedeckt. Da diese Abwärme nicht in unbegrenzter Menge zur Verfügung steht, verringert sich ihr Anteil am Gesamtwärmebedarf bei der Variante EnEV. Damit erhöhen sich die Primärenergiefaktoren für diese Variante.

Mit dem in diesem Bericht beschriebenen Passivhaus-Hallenbad (vorläufiger Projektierungsstand) können demnach etwa 52% Endenergie bzw. ca. 46% Primärenergie gegenüber einem typischen Neubau eingespart werden.

Tabelle 6: Kenndaten der Varianten Passivhaus und EnEV

Maßnahme	Passivhaus-Hallenbad		EnEV Standard
	Vorläufiger Stand September 2010	Änderungen bis Stand Juli 2011[2]	
Hallenfeuchte	64% relative Feuchte	unverändert	14,3 g/kg absolute Feuchte (entspricht 50,6% rel. Feuchte)
Mindestaußenvolumenstrom Hallenlüftung	15% des Auslegungswertes nach EnEV	unverändert	30% des Auslegungswertes nach EnEV
Hallenumluft	Keine Umluft	Differenz zu 50% des Außenluft-Auslegugswertes nach EnEV als Umluft[3]	Differenz zum Auslegungswert der Lüftungsgeräte als Umluft
Lüftung in den Nebenzonen	Konstant nach Planung des Haustechnikers, Bedarfsregelung ist vorgesehen	Luftmengen in Abhängigkeit der Luftqualität	Konstant
Stromeffizienz der Lüftungsgeräte	0,45 Wh/m³	0,25-0,4 Wh/m³	0,9 Wh/m³
WRG[4]	Hallen: 70% Umkleide/Duschen: 75% Foyer: 79% Nebenräume: 65% Keller: 62%	Hallen: 77% Umkleide/Duschen: 80% Foyer: 86% Nebenräume: 86% Keller: 64%	Hallen: 65% Umkleide/Duschen: 65% Foyer: 69% Nebenräume: 55% Keller: 52%
Luftdichtheit	0,2	unverändert	1
U-Werte (im Mittel) W/m²K	Außenwände (inkl. Trennwände zu Bestandsgebäude): 0,13 W/(m²K) Boden/Kellerwände: 0,13 W/(m²K) Dach: 0,11 W/(m²K) Alle Trennwände innen: 1,7 W/(m²K)	unverändert	Außenwände (inkl. Trennwände zu Bestandsgebäude): 0,88 W/(m²K) Boden/Kellerwände: 1,19 W/(m²K) Dach: 0,53 W/(m²K) Alle Trennwände innen: 2 W/(m²K)

[2] Es gibt auch an anderen Stellen der Energiebilanz Aktualisierungen gegenüber des vorläufigen Standes, der in diesem Bericht vorgestellt wird. Sie werden aus Übersichtlichkeitsgründen an dieser Stelle nicht aufgeführt.

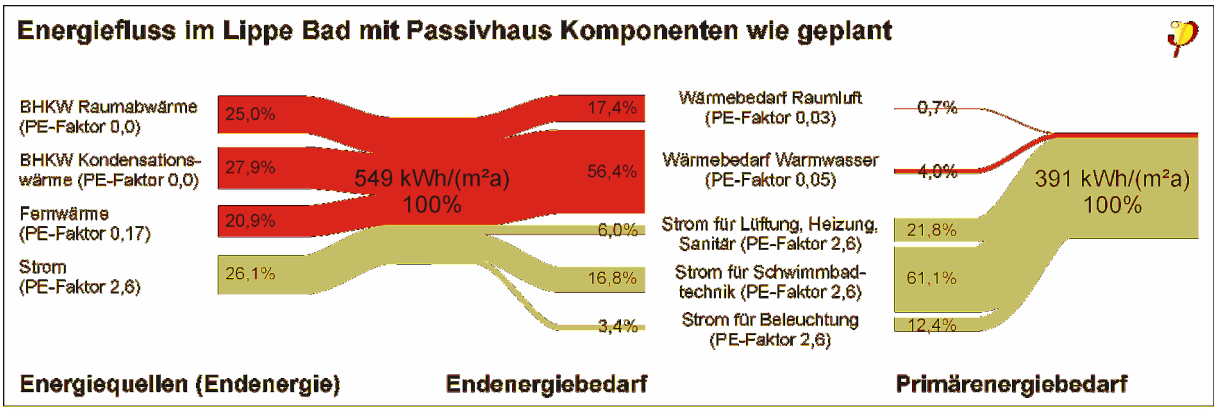
[3] Eine Validierung in wie fern die Umluftmenge in der Praxis tatsächlich reduziert werden kann ohne dass die Luftqualität beeinträchtigt wird ist Bestandteil des Monitorings. Es wird angestrebt ganz ohne Umluft auszukommen.

[4] Die hier genannten Werte des vorläufigen PH Projektierungsstandes wurden bewusst auf der sicheren Seite gerechnet, für den EnEV Standard wurden für die Nebenzonen pauschal 10% abgezogen. Da die Lüftungsgeräte der Nebenzonen teilweise verschiedene Temperaturbereiche versorgen, wurde die WRG der Geräte mit einer gemischten Abluft auf die entsprechenden Zonentemperaturen umgerechnet, sie reflektieren daher nicht direkt die Effizienz der eingesetzten Geräte.

Fensterqualität	Mittlerer U-Wert (mit Rahmen): 0,715 W/m²K g-Wert : 0.46-0.55	Mittlerer U-Wert (mit Rahmen): 0,745 W/m²K g-Wert : unverändert	Mittlerer U-Wert (mit Rahmen): 1,446 W/m²K0 g-Wert : 0,64
Filterspülung	Ultrafiltration[5] 13.500 m³/a	unverändert	Druckfilteranlage 13.000 m³/a
Filterwasseraufbereitung	ca. 70%	unverändert	ca. 70%
Duschwasser	18 l/Person	30 l/Person	30 l/Person
Wärmerückgewinnung aus Abwasser	30%	unverändert	0%
Strom der Verbraucher[6]	Heizung/Sanitär: 28.354 kWh/a SBT: 359.939 kWh/a Anwendungen: Noch nicht bekannt, daher vernachlässigt. Einsparungen gegenüber EnEV möglich! Beleuchtung: 73.200 kWh/a	Heizung/Sanitär: 22.875 kWh/a SBT: 221.981 kWh/a Anwendungen: Wird noch ermittelt Beleuchtung: 61.857 kWh/a	Heizung/Sanitär: + 50% des vorläufigen Standes SBT: + 30% des vorläufigen Standes Anwendungen: Vernachlässigt. Beleuchtung: +10% des vorläufigen Standes
Beckendurchspülung	Umwälzung auch während des Tages in Abhängigkeit der tatsächlichen Personenzahl (Laser-Personen-Scanning)	unverändert	Konstante Umwälzung

[5] Bei der Ultrafiltration wird zwar mehr Wasser zur Filterspülung benötigt, dafür kann das Umwälzvolumen erheblich gesenkt werden was sich auf den Pumpenstromverbrauch auswirkt.

[6] Der Stromverbrauch hängt nicht nur von den eingesetzten Geräten ab sondern auch stark vom Nutzerverhalten und der Regelung. Die angesetzten Zahlen sind Schätzungen basierend auf der bekannten Kennwerte und wahrscheinlichen Laufzeiten der Hauptverbraucher.



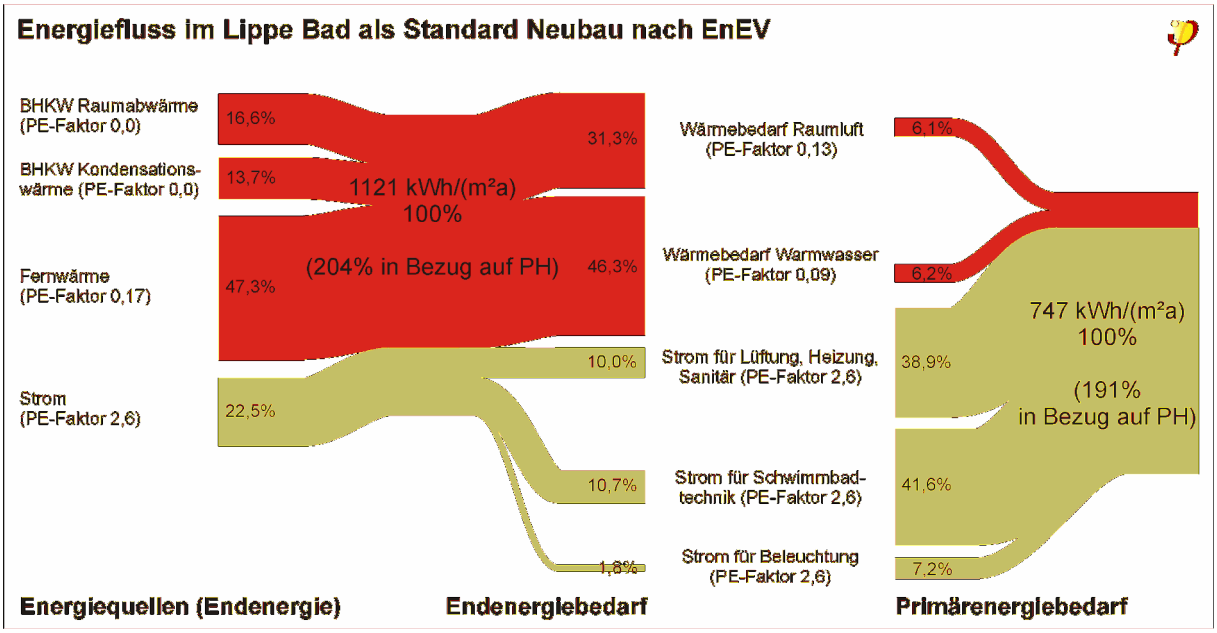


Abbildung 54: Grafische Darstellung des Energiebedarfes der Varianten PH und EnEV

7 Reinigungskonzept

Die Gewährleistung und Wahrnehmung von Hygiene über alle Bereiche ist als Behaglichkeitsfaktor erster Ordnung für das Wohlbefinden der Badnutzer bestimmend.

In Teamarbeit mit den im Betrieb der Hallenbad-Altstandorte langjährig erfahrenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Bädergesellschaft Lünen wurde bereits zu Planungsbeginn ein Anforderungsprofil zum Reinigungskonzept erarbeitet. Die einzelnen Merkmale des Anforderungsprofils wirken dabei sehr bestimmend auf den gesamten Gestaltungsprozess des Hallenbadneubaus.

In diesem Bericht zur integrierten Planung des Hallenbadneubaus stehen die konstruktiven Elemente für ein günstiges Reinigungskonzept im Vordergrund.

7.1 Anforderungsprofil

Sauberlaufzone

Um den Schmutzeintrag in das Bad über das Schuhwerk der Besucher zu reduzieren, ist eine kombinierte Sauberlaufzone auszugestalten.

Bodenbelag und Belagsfugen

Es besteht die Forderung nach einem möglichst einheitlichen Reinigungssystem. Die Erfüllung dieser Anforderung wird über den Einsatz eines einheitlichen Bodenbelags grundsätzlich begünstigt.

Da Fugen erfahrungsgemäß Problemstellen bei der Reinigung sind, ist der Fugenanteil des Bodenbelags absolut gering zu halten. Auch sollen Belagsfugen im Übergangsbereich zwischen Boden und aufstehender Wand weitestgehend vermieden werden. Als Lösungsansatz wird die Ausbildung einer Kehle im Übergangsbereich Boden zu aufstehender Wand angesehen.

Maschinell gestützte Boden-Nassreinigung

Die Ausgestaltung der inneren Verkehrswege (einschließlich der Beckenumgänge und der Umkleide- und Sanitärbereiche) soll günstige Einsatzbedingungen für eine maschinell gestützte Boden-Nassreinigung (Scheuersaugmaschine) gewährleisten.

Für die Optimierung der Reinigungsprozesse sollen frühzeitig Beratungsgespräche mit unterschiedlichen Herstellern von Belägen, Reinigungsmaschinen und Reinigungsmitteln geführt werden, um deren Maßgaben und Erfahrungen zu ähnlich gelagerten Einsatzfällen in die Lösungsansätze einfließen zu lassen.

Zur Optimierung des Personaleinsatzes wird die Unterhaltsreinigung der Beckenumgänge in Öffnungszeiten mit geringer Besucherzahl angestrebt (Schwachlastzeiten wie beispielsweise die ersten 1,5 Öffnungsstunden von 6:15 Uhr bis 7:45 Uhr).

Verglasungsflächen

Vermeidung von vertikalen, bis auf den Boden reichenden Verglasungsflächen.

Im Schwimmhallenbereich werden meist auch große Glasflächen dauerhaft und stark mit Spritzwasser belastet. Für ein sauberes Erscheinungsbild bedarf es entsprechender Reinigungshäufigkeit. Das ist nachteilig. Zusätzlich sind bodennahe

Glasflächen arbeitsphysiologisch beurteilt nur schwer zu reinigen (kniend/hockend bei gebeugtem/verdrehtem Rücken, insgesamt ungünstige Haltungswichtung).

Bodengefälle in Nassbereichen

Funktionale Gefälleausbildung in den mit Wasser belasteten Bodenbereichen, insbesondere der Beckenumgänge.

Über den Wasserablauf von der benetzten Körperoberfläche der Badnutzer wird permanent Wasser auf die Beckenumgänge getragen. Das Wasser auf den Beckenumgängen soll effektiv abgeleitet werden, da zum einen mit Nässe belastete Oberflächen in der Regel an sicherheitsrelevanter Rutschhemmung einbüßen (Wasser wirkt als Gleitmittel) und zum anderen die nassen Oberflächen des Beckenumgangs eine größere Phasengrenzfläche Wasser/Raumluft begründen (Verdunstung in die Raumluft), wodurch der Energiebedarf im Hallenbad unter üblichen Betriebsbedingungen tendenziell steigt.

7.2 Lösungsansätze zum Anforderungsprofil

7.2.1 Gestaltung der Sauberlaufzone

Bezogen auf eine durchschnittliche Schrittlänge von rund 63 cm besteht der erste Abscheidebereich der Sauberlaufzone aus drei Schritten auf einem Gitterbodenrost auf dem äußeren, überdachten Zugangsbereich zur Haupteingangstür (Abscheidung von Grobschmutz). Daran anschließend sind 6 bis 7 Schritte auf einer speziellen Sauberlaufmatte innerhalb des Windfangs zum Foyer erforderlich (Abscheidung von feineren Schmutzanhaftungen des Schuhwerks).

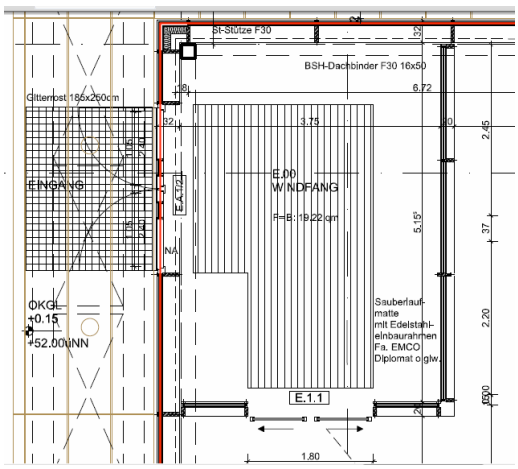


Abbildung 55: Sauberlaufzone im Gebäudezugang, Detailausschnitt des Erdgeschossplans (Quelle: ntspv)

Der 90° Richtungswechsel innerhalb des Windfangs (v gl. Abbildung 55) wurde dabei bewusst eingeplant, um die Durchgangsgeschwindigkeit und die Schrittlängen der Besucher tendenziell zu reduzieren. Es wird auch vermutet, dass durch zusätzliche Scherkräfte zwischen Schuhsohle und Oberfläche der Sauberlaufmatte im Begehen des Kurvenbereichs eine verbesserte Schmutzabscheidung einsetzen wird.

7.2.2 Bodenbelag zum Anforderungsprofil

Als Bodenbelag mit geringstem Fugenanteil empfehlen sich strukturierte Kunststoffbeläge, die theoretisch als Bahnenware über 40 m² fugenlos zu verlegen sind (gängige Abmessungen sind 2,0 m * 20 m). Es sind einzelne Standorte bekannt (vornehmlich im Ausland), wo in Schwimmbädern und den zugehörigen Sanitärräumen Bahnenwaren aus PVC eingesetzt wurden, teils auch als Wandbelag. Die Gestaltungsmöglichkeiten und Designs sind vielfältig. Dabei handelt es sich um einen elastischen, wasserfesten, dichten Bodenbelag, wobei als Trägerschicht in der Regel maßstabiles Glasfaservlies genutzt wird. Die Rutschsicherheit solcher Böden (z. B. R10 nach BGR 181) wird meist durch Strukturierung mittels Oberflächennoppen erzielt (je nach Hersteller unterschiedliche Noppendurchmesser, unterschiedliche Anzahl an Noppen je Flächeneinheit, ggf. auch ergänzt über mineralische Einstreuungen). Unterschiedliche Belagshersteller halten dazu Lösungsansätze mit dem Titel „Nassraumkonzept“ vor.

In weiteren Einsatzbereichen wie Zügen und Bussen und auch in Reinräumen hat sich diese Belagsart aufgrund des Verschleißverhaltens, der weitreichenden Beständigkeit, der Dichtheit und der allgemein guten Reinigungsfähigkeit bewährt. In vielen Anwendungsbereichen wird auch die mit den PVC-Belägen zu erzielende Trittschallverbesserung als vorteilhaft erachtet.

In Barfußbereichen wird ein geringer, vergleichsweise dem Material Holz ähnlicher Wärmeeindringkoeffizient als günstig passend zum Einsatzbereich angesehen. Über Behaglichkeitsuntersuchungen (unbekleidete Füße auf unterschiedlichen Belägen) zeigte Fanger, dass die Barfuß-Behaglichkeitsbodentemperatur bei einem Belag aus Holz, Kork oder PVC rund 2,5 K niedriger liegt als die für Beton-, Stein- oder Marmorbeläge. Demnach ist die Verwendung eines Bodenbelags mit geringem Wärmeeindringkoeffizient ein passender Baustein für das Lippe Bad, da aufgrund der simulierten Lufttemperaturen im Keller (stationärer Betrieb, Kellerlufttemperatur erwartungsgemäß um 29℃) auf eine sonst übliche Fuß bodenheizung innerhalb der Barfußgänge im Erdgeschoss verzichtet wird.

Auch die Verarbeitungs- und Verlegemerkmale eines PVC-Bodenbelags können dem Anforderungsprofil weitreichend entsprechen (kleben, schweißen (PVC zu PVC),

klemmen). So lässt sich über ein Hohlkehlprofil unterstützt der Bodenbelag fugenlos als Wandsockel aufgehend verlegen (Wannenausbildung), vgl. Abbildung 56. Für den Materialübergang PVC-Belag (Sockel) zu Wandbelag werden spezielle Übergangs- bzw. Verbindungsleisten angeboten.

Für die weiteren Detailplanungen zum Einsatz eines PVC-Bodenbelags wurde der einschlägig tätige Gutachter Torsten Grotjohann des Instituts für Fußbodenbau (iff, http://www.fussboden-gutachter.de) in das Planungsteam integriert.

7.2.3 Lösungsansätze zur maschinell gestützten Boden-Nassreinigung, zu den Verglasungsflächen und dem Bodengefälle in Nassbereichen

Die konstruktiven Merkmale dieser Lösungsansätze zum Anforderungsprofil greifen ineinander. Zur Erläuterung wurde deshalb eine Gesamtdarstellung gewählt (vgl. Abbildung 56).

Um eine bis auf den Boden reichende Verglasung zu vermeiden, wurde im Bereich der Glasfassaden eine Brüstung vorgesehen. Die Brüstungshöhe wurde so gewählt, dass diese auch als Sitzfläche dienen kann.

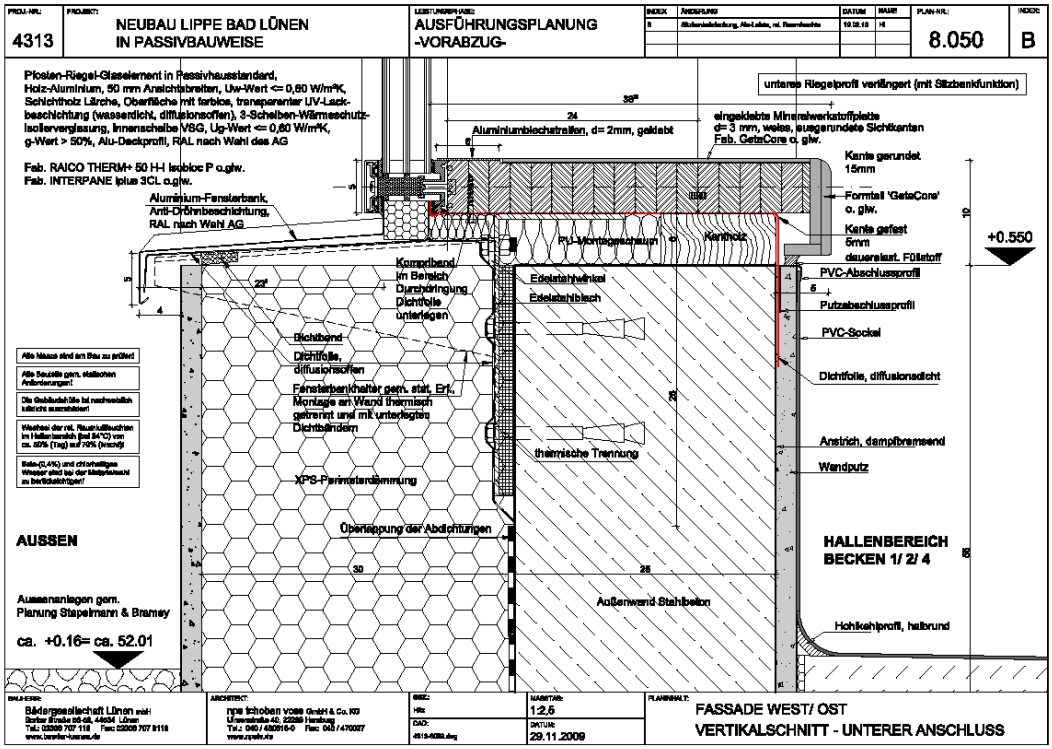


Abbildung 56: Detail Vertikalschnitt Glasfassade/Brüstung im Bereich der Außenwand (Quelle: ntspv)

Bezogen auf die Tageslichtversorgung in die Raumtiefe geht mit der dargestellten Brüstungssituation kein Nachteil einher, da der untere, bodennahe Glasanteil einer Fassade dazu keinen nennenswerten Beitrag leistet. Hinsichtlich der Baukosten ist davon auszugehen, dass die flächenbezogenen Baukosten der Brüstung, trotz deutlich günstigerem U-Wert, geringer sind als die der Fassadenkonstruktion mit Dreifachverglasung.

Bei sonst üblicher Beckengestaltung, wobei das Niveau der Wasseroberfläche ungefähr dem Niveau des Beckenumgangs entspricht, ergeben sich zwei Dinge, die nicht zu dem Anforderungsprofil passen würden. Zum einen könnte keine Reinigung der Beckenumgänge während Schwachlastnutzungszeiten durchgeführt werden und zum anderen würden die Schwimmerinnen und Schwimmer gegen die Brüstungsflächen unterhalb der Glasflächen blicken.

Befinden sich Wasseroberfläche und Beckenumgang auf annähernd gleichem Niveau, muss während der Nassreinigung der Beckenumgänge die Überlaufrinne des Beckens umgeschaltet werden, d. h. es muss sichergestellt werden, dass keine Schmutzflotte in den Badewasserkreislauf gelangt. Diese erforderliche Umschaltung würde eine Unterhaltsreinigung der Beckenumgänge bei gleichzeitigem (Schwachlast-) Schwimmbetrieb also nicht zulassen.

Weiterhin ist die möglichst großzügige Sichtverbindung für Schwimmer/Innen vom Niveau der jeweiligen Wasserfläche nach Außen ein wichtiges Qualitätsmerkmal moderner Schwimmhallen. Dieser Ausblick wird über beschriebene Brüstung im Fassadenbereich nachteilig eingeschränkt.

Zur Lösung wurde deshalb die Beckenwasseroberfläche analog zur Fensterbrüstung angehoben. So kann auch der Beckenkopf als Sitzfläche ausgebildet und genutzt werden. Für die Schwimmer/Innen ergibt sich eine unbehinderte Sichtverbindung nach Außen und eine Rinnenumschaltung während der Nassreinigung der Beckenumgänge ist aufgrund der Höhendifferenz zwischen Boden und Beckenwasseroberfläche nicht erforderlich.

Eine Fuge zwischen Bodenbelag und aufstehender Beckenwand wird durch die Weiterführung des PVC-Bodenbelags auf die äußere Beckenwand mittels Ausbildung einer Hohlkehle vermieden. Die Ausführungsdetails des Belags sind hierbei vergleichbar denen der Fassadenbrüstung, vgl. Abbildung 57.

Mit dieser Gestaltung ergeben sich weitere Aspekte:

- Die am Beckenumgang aufstehende Beckenwand bietet eine gewisse Barriere gegen das Springen in das Wasser vom Beckenrand in dafür nicht zugelassenen Bereichen

- Für das Führen der Reinigungsmaschine ergibt sich ein Schutz gegen das Abstürzen in das Becken

- Durch die höher liegende Beckenwasseroberfläche kann ggf. Bauhöhe im Kellerbereich (ca. 30 bis 35 cm) eingespart werden, sofern die dort befindliche und Bauhöhen bestimmende Infrastruktur/Technik (z. B. die Filter der Badewasseraufbereitung) dies auch zulässt

- Durch die Ausgestaltung des Beckenkopfes als Sitzfläche im Sportbad können andere Sitzgelegenheiten zumindest teilweise reduziert werden, die zum einen den Beckenumgang einengen (z. B. fest installierte Wärmebänke) oder aber zur Bodenreinigung stets zu räumen sind (Mobiliar wie Sitzbänke oder Stühle)

Der effektiven Ableitung des im Betrieb permanent anfallenden Wassers auf den Beckenumgängen wird konstruktiv begegnet. Der erfahrungsgemäß bedeutendste Wassereintrag auf die Beckenumgänge stammt vom Wasserablauf der benetzten Körperoberflächen. Besonders stark ist der Beckenwasseraustrag auf die Beckenumgänge im Bereich der hoch frequentierten Beckenleitern und Austrittsstufen. Hier gilt es im Besonderen, anfallendes Wasser zügig abzuleiten.

Durch den Einsatz einer Entwässerungsschlitzrinne mit Sohlgefälle (Linienentwässerung), parallel zum und nahe dem äußeren Beckenrand, wird eine funktional verbesserte Entwässerung der Beckenumgänge im Vergleich zu punktuell angeordneten Bodeneinläufen mit vierseitigem Gefälle erwartet. Da das Längsgefälle über die Rinnensohle erreicht wird, kann der Beckenumgang in Längsrichtung waagerecht ausgebildet werden. Durch die Positionierung nahe dem Beckenrand wird das an Beckenleitern und Beckentreppen ausgetragene Beckenwasser zügig abgeleitet. Dies gilt auch für das auf der Beckenkopfsitzfläche anfallende Beckenwasser. Abbildung 57 zeigt eine Schnittdarstellung zur Erläuterung der Konstruktion.

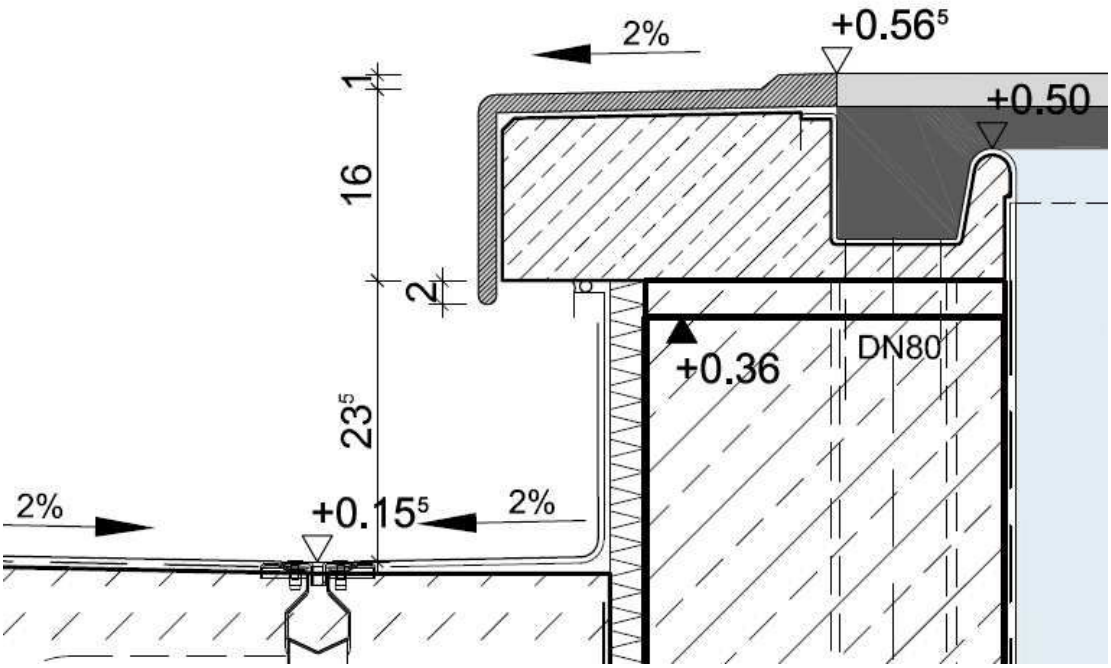


Abbildung 57: Vertikalschnitt von Beckenkopf und Beckenumgang, Schlitzrinne im Beckenumgang mit Sohlgefälle, Bodenquergefälle zur Schlitzrinne, Anschluss des PVC-Bodenbelags an der Schlitzrinne mittels Klemmflansch, an der Beckenwand fugenlos hoch geführter Bodenbelag (Wannenausbildung über Hohlkehle), Beckenkopf als Sitzfläche ausgebildet. Der Kunststoffbodenbelag kann mittels Klemmflansch dicht an die Schlitzrinne angeschlossen werden (Quelle: ntspv).

Abbildung 58 zeigt ein von der Firma Blücher Germany (www.bluecher.de) hergestelltes Edelstahlmodell (Edelstahl) der Schlitzrinne mit Sohlgefälle.

Abbildung 58: Edelstahlmodell der Schlitzrinne mit Sohlgefälle und Klemmflansch zum wasserdichten Anschluss von Bodenbelägen aus Kunststoff (Quelle: Blücher)

Das Erscheinungsbild der erläuterten und über Schnittdarstellungen vorgestellten Gestaltung wird folgend über fotorealistische Visualisierungen des Lippe Bades aus der integrierten Planungsphase (Abbildung 59 bis Abbildung 61) wiedergegeben.

Abbildung 59: Visualisierung des Bereiches mit Hubbodenbecken (Grafik: npstv)

Abbildung 60: Visualisierung des Bereiches mit dem 5 Bahnen (25 m lang) Sportbecken in der nach Passivstandard aufgearbeiteten Halle des ehemaligen Fernheizwerkes (Grafik: npstv)

Abbildung 61: Visualisierung des Bereiches mit dem 4 Bahnen (25 m lang) Schwimm- und Sprungbecken (3 m Sprungplattform, 1 m Sprungbrett) (Grafik: npstv)

Das System der Schlitzrinnenentwässerung soll auch in den Sanitär- und Umkleidebereichen zur funktionalen Gefälleausbildung eingesetzt werden, ebenso der bereits im Vorgenannten beschriebene Kunststoffbodenbelag.

Für die Duschräume wurden seitens der Stadtwerke Lünen spezielle Duschsäulen mit jeweils 8 Duschplätzen entwickelt (2 Duschsäulen je Geschlecht). Abbildung 62 zeigt Seitenansicht und Draufsicht der Duschsäule.

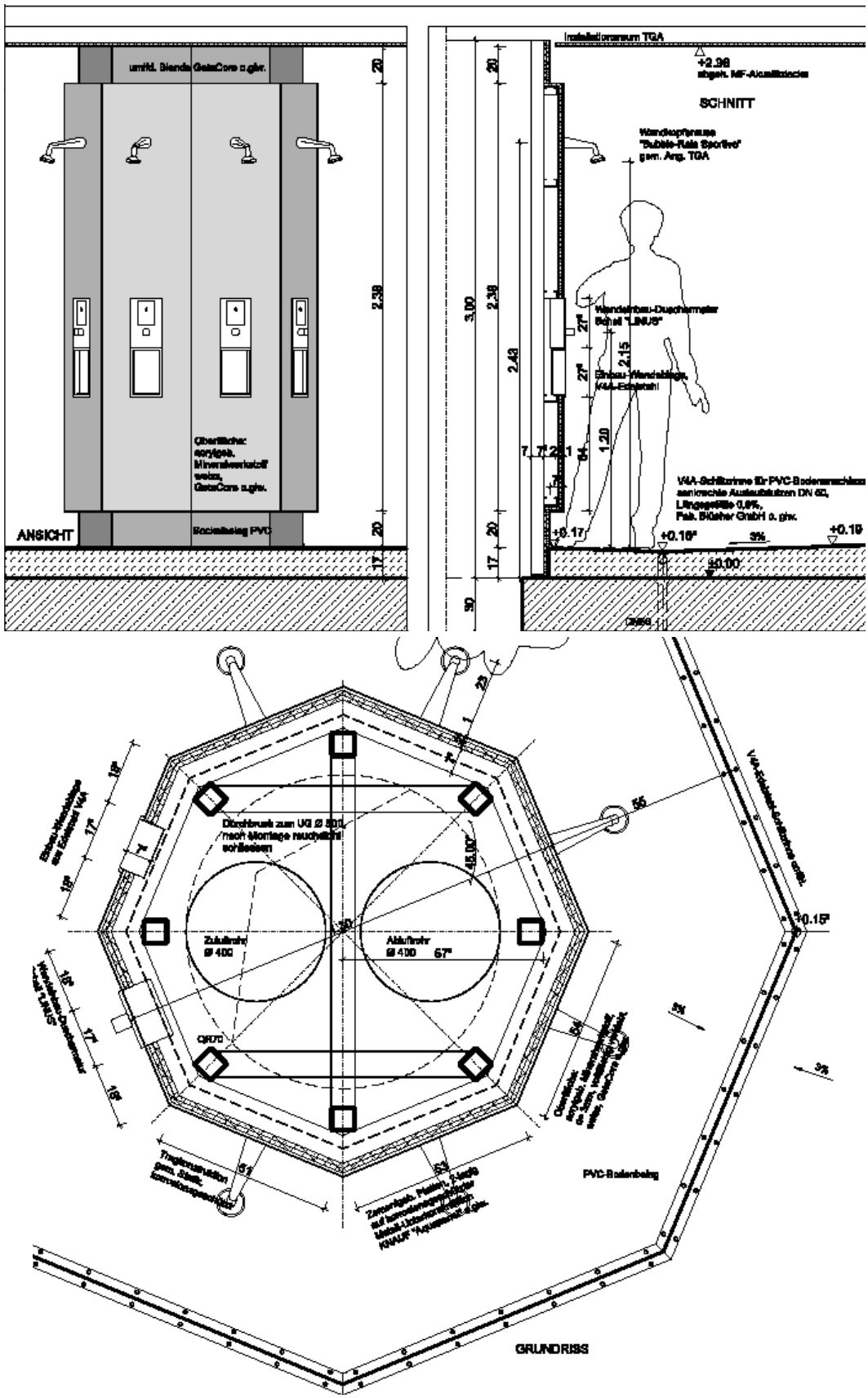


Abbildung 62: Seitenansicht und Draufsicht der Duschsäule (Ausschnitt) (Quelle: npstv)

Die Platzierung der Duschsäulen in Raummitte soll das Spritzwasser an die Raumwände minimieren und auch verbesserte Rahmenbedingungen zum Einsatz von geführten Reinigungsmaschinen gewährleisten.

Auf dem Boden wird das Duschabwasser über eine umlaufende Schlitzrinne abgeleitet. Auch diese Schlitzrinne verfügt über einen Klemmflansch. Die funktionstechnischen Bestandteile der zur Aufstellung vorgefertigten Duschsäulen (Wasserleitungen, Armaturen, Lüftungsrohre) werden von unten ausgehend durch die Kellerdecke versorgt. Der Innenraum der Duschsäulen ist für Inspektionen nach dem Ausbau von Lüftungsrohr-Passstücken vom Keller aus prinzipiell zugänglich gestaltet.

Im Rahmen von Vorarbeiten zum Reinigungskonzept wurden mehrere Gespräche mit Herstellern von Kunststoffbodenbelägen (z. B. www.altro.de), Reinigungsmaschinen (Gansow, Nilfisk, Kaercher, Hefter-cleantech) und Reinigungschemikalien (z.B. Witty, Dr. Nuesken) geführt. Dabei zeigte sich, dass eine Optimierung des Reinigungssystems für den jeweiligen Boden (Belagsart und individuelle Schmutzbelastung, Gerätetechnik und Bürstenart, bedarfsgerechter/minimaler Chemikaliensatz) nicht allgemeingültig abzuleiten ist, sondern über Erfahrungen im Praxiseinsatz unterschiedlicher Systemkonfigurationen zu leisten sein wird.

Hinsichtlich der Reinigungsmaschinen werden je nach Raumfläche bzw. Wegebreiten zwei Konfigurationen nach Sichtung der Gebäudepläne empfohlen.

Zum Einsatz auf den Beckenumgängen und anderen vergleichbar breiten Verkehrswegen wird eine personengeführte Scheuersaugmaschine (Elektroantrieb, Batterie um 180 Ah, maximale Geschwindigkeit des Fahrantriebs 4 bis 5 km/h) mit zwei gegenläufigen Bürstentellern empfohlen. Dabei liegen die Arbeitsbreiten zwischen 600 und 700 mm (Saugbreiten zwischen 900 und 1.050 mm). Die Reinigungschemikalien werden während des Einsatzes der Maschine automatisch dosiert und der Frischwasser- und Saugwassertank fasst zwischen 60 und 90 Liter. Das Leergewicht einer solchen Maschine beträgt zwischen 160 und 210 kg. Für diese Maschine bedarf es ausreichend Platz in einem dazu ausgestatteten Reinigungsgeräteraum (Elektroladestation, Frischwasserversorgung, Saugwasser-entsorgung, Chemikalienbefüllung).

Zum Einsatz in kleineren Räumen und auf schmäleren Verkehrswegen wird eine personengeführte Scheuersaugmaschine (Elektroantrieb, Batterie um 80 Ah) mit einem Bürstenteller empfohlen. Dabei liegen die Arbeitsbreiten um 450 mm (Saugbreiten um 700 mm). Auch hier können je nach Ausstattung die Reinigungschemikalien während des Einsatzes der Maschine automatisch dosiert werden. Der Frischwasser- und Saugwassertank fasst ca. 25 Liter. Das Leergewicht einer solchen Maschine beträgt zwischen 40 und 50 kg. Auch für diese Maschine

bedarf es ausreichend Platz in einem dazu ausgestatteten Reinigungsgeräteraum (Elektroladestation, Frischwasserversorgung, Saugwasserentsorgung, Chemikalienbefüllung).

Die Gerätehersteller raten dazu, das erfahrene Reinigungspersonal in die Entscheidung zum Einsatz einer Reinigungsmaschine auf kleineren Flächen und schmalen Fluren einzubinden. Hier ist nicht generell die maschinelle Reinigung vorteilhaft. Der individuelle Verschmutzungsgrad, die Rüstzeit der Maschine und der Aufwand der Ränderreinigung sind für die Entscheidung zum maschinellen oder manuellen Reinigungsprozess zu bewerten. Zur Führung und Betreuung der Reinigungsmaschinen bedarf es der Personalunterweisung und einer praktischen Trainingsphase unter Anleitung.

Lobenswert zu erwähnen bleibt, dass alle angesprochenen Reinigungsgerätehersteller diese Unterweisung und das Handhabungstraining für das Projekt Lippe Bad kostenlos und unverbindlich angeboten haben. Ebenso wurde seitens der Geräte- und Chemikalienspezialisten signalisiert, den Optimierungsprozess zum Reinigungskonzept Lippe Bad engagiert zu begleiten.

7.2.4 Eingetretene Neuerungen im Rahmen des Projektfortschritts

Im Rücklauf der Ausschreibungen zum PVC-Bodenbelag im Nassraumkonzept zeigte sich, dass kein Verlegeunternehmen die ausgeschriebenen Leistungen zur Ausführung angeboten hat. Selbst im direkten Kontakt vor Ort mit einem auf mehreren Spezialgebieten erfahrenen PVC-Verleger ergab sich keine Realisierungsmöglichkeit, da auch bei diesem Verleger die Unsicherheit zur Gewährleistung einer hochwertigen und in manchen Details auch handwerlich sehr anspruchsvollen Leistung dominierte. Aufgrund dieser Situation wurde der Bodenbelag auf Fliesenbelag (DIN EN 14411) mit entsprechender Rutschhemmung umgeplant. Für Foyer, Umkleidetrakt und Beckenumgänge wurden quadratische Fliesen mit 30 cm Rastermaß (Fugenanteil ≈ 3%) und für Toiletten- und Duschbereiche quadratische Fliesen mit 12,5 cm Rastermaß (Fugenanteil ≈ 6%) vorgesehen. Im Bereich aufgehender Wände und Aufbauten wurde auf dem Boden eine liegende Kehlsockelfliese vorgesehen, um die elastische Pflegefuge zur Wand ins Trockene zu heben. Das Entwässerungssystem über Edelstahl-Schlitzrinnen wurde generell beibehalten, wobei das System Klemmflansch (für PVC-Belag) auf Universalflansch (elastische Pflegefuge zum Fliesenrand) umgestellt wurde.

Die Fliesen, wie auch viele andere Oberflächenmaterialien des Lippe Bades wurden zur optimierten Abstimmung des Hygiene- und Reinigungskonzepts im Labor der Firma Dr. Nüsken untersucht. Die Kompetenz, das kundenorientierte Engagement

und die fachliche Begleitung des Reinigungspersonals in allen Belangen durch die Firma Dr. Nüsken überzeugten für die Zusammenarbeit zur Gewährleistung einer einwandfreien Schwimmbadhygiene.

Nach mehreren Erprobungsphasen von Scheuer-/Saugmaschinen zur Bodenreinigung durch eigenes, erfahrenes Fachpersonal wurde die Entscheidung für Maschinen des Herstellers Hefter-cleantech getroffen. Die praktische Erprobung über alle Reinigungsbereiche führte zu der Entscheidung, zwei baugleiche Maschinen (Turnado 55 pro, Arbeitsbreite 55 cm) in Einsatz zu bringen (allg. Qualitätsmerkmale, gute Handhabung, Reinigung unter Überbauungen, 360° drehbarer Schrubb- und Saugkopf, geringe Betriebsgeräusche, einheitliche Ersatzteile).

8 Akustikkonzept

Die Bädergesellschaft Lünen mbH hat bei der Planung des als Sportbad konzipierten Hallenbades Lippe Bad durch die Architekten nps tchoban voss GmbH & Co. KG, Hamburg, frühzeitig verschiedene Fachplaner am Planungsprozess beteiligt, um so durch eine integrierte Planung für alle Fachbereiche möglichst optimale Ergebnisse innerhalb eines vorgegebenen Kostenrahmens zu erzielen. Hierbei war als Besonderheit zu berücksichtigen, dass in den neu geplanten Gebäudekomplex mit verschiedenen Schwimmhallenbereichen und Nebenräumen das Bestandsgebäude eines ehemaligen Heizwerkes (Schwimmhalle Becken 5) mit integriert werden sollte.

Das neue Hallensportbad wird einerseits dem Schul- und Vereinssport (Parallelnutzung durch mehrere Klassen/Gruppen) und andererseits der Bevölkerung zum unorganisierten Freizeitsport zur Verfügung stehen.

Auf Wunsch der Bädergesellschaft sollte von Beginn an, der Raumakustik innerhalb des neuen Hallensportbades eine besondere Wertigkeit zukommen. Aufgabenstellung war deshalb, die zur Einstellung eines akustisch "hochwertigen" Raumklimas (hohe Raumschalldämpfung, geringe Geräuschpegel, gute Sprachverständlichkeit) erforderlichen raumakustischen Maßnahmen für folgende Bereiche anzugeben:

1 Erholungsbecken 1 + 2	(Warm- und Erholungsbecken und Eltern-Kind-Becken)
2 Lehrschwimmbecken 3	(mit Hubboden)
3 Becken 4	(Sportbecken mit 4 Bahnen)
4 Becken 5	(Sportbecken mit 5 Bahnen)
5 Eingangsfoyer	(mit Kassenbereich)
6 Umkleidebereich	
7 Duschräume	

Zur Orientierung bei der Definition der akustischen Anforderungen/Empfehlungen wurden die "Richtlinien für den Bäderbau" des Koordinierungskreises Bäder (KOK) sowie die DIN 18041 "Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen" herangezogen.

Die für die 4 Schwimmhallenbereiche ermittelten Raumvolumina V und die nach den "KOK-Richtlinien" anzustrebende Nachhallzeit $T_{soll,KOK}$ sowie die nach der DIN 18041 für Schwimmhallen anzustrebenden Nachhallzeiten $T_{soll,\ DIN}$ werden nachfolgend tabellarisch aufgelistet:

Raum	**Volumen in m^3**	**Soll-Nachhallzeit in s**	
	V	**$T_{soll,KOK}$**	**$T_{soll,\ DIN}$**
Erholungsbecken 1+2	3.000	1,7	1,9 (einzügig)
Lehrschwimmbecken 3	1.300	1,7	1,5 (einzügig)
Schwimmhalle Becken 4	3.550	1,7	1,6 (mehrzügig)
Schwimmhalle Becken 5	6.000	1,7	1,9 (mehrzügig)

Die Nachhallzeit eines Raumes ist abhängig von der Raumgröße (Volumen) und dem Schallabsorptionsvermögen der raumbegrenzenden Bauteile (Decke, Fußboden, Wände) sowie eventueller Einbauten (z.B. Garderobenschränke). Je länger die Nachhallzeit gewählt wird oder diese sich auf Grund der gewählten Bauteile ergibt, desto höhere Schallpegel werden später im Raum auftreten.

Vereinfacht: lange Nachhallzeiten = hohe Raumschallpegel
kurze Nachhallzeiten = niedrige Raumschallpegel

8.1 Planung

Bei der Ermittlung und Planung der erforderlichen raumakustischen Maßnahmen wurden in den Schwimmhallen vorrangig die Dachflächen sowie Teilflächen der Wände herangezogen. In den Nebenräumen wie Eingangsfoyer, Umkleideräume und Duschräume wurden ausschließlich die Dach- bzw. Deckenflächen berücksichtigt.

Für diese Flächen wurden zunächst verschiedene Varianten akustisch hochwirksamer Verkleidungen untersucht und empfohlen. Den speziellen Anforderungen eines Sportbades wie z.B. Ballwurfsicherheit in den Schwimmhallenbereichen und Feuchtebeständigkeit wurde hierbei Rechnung getragen. Durch die frühe Beteiligung

am Planungsprozess konnte darüber hinaus noch an zwei Stellen Einfluss auf die Planung genommen werden. So wurden zur Vermeidung unerwünschter Reflexionen und ggf. später auftretender "Flatterechos", die nach Süden orientierte Glasfassade im Bereich des Erholungsbeckens und im Bereich des Lehrbeckens sowie die nach Norden orientierte Glasfassade im Bereich der Schwimmhalle Becken 1 um 5° nach außen geneigt.

Für alle Dach- und Deckenflächen sieht die aktuelle Planung nun eine Ausführung aus Akustikelementen der Firma Ligno Trend Typ "Ligno Block Q3 Akustik alpha-Z1 plus" mit 25 mm Leistenbreite und 8 mm Fuge vor.

Die Schall absorbierend zu verkleidenden Wandflächen sollen mit Wandpaneelen der Firma Ecophon Typ "Wall Panel C / Super G" ausgeführt werden.

8.2 Zu erwartende Nachhallzeiten in den Schwimmhallenbereichen

Bereich Erholungsbecken 1 + 2

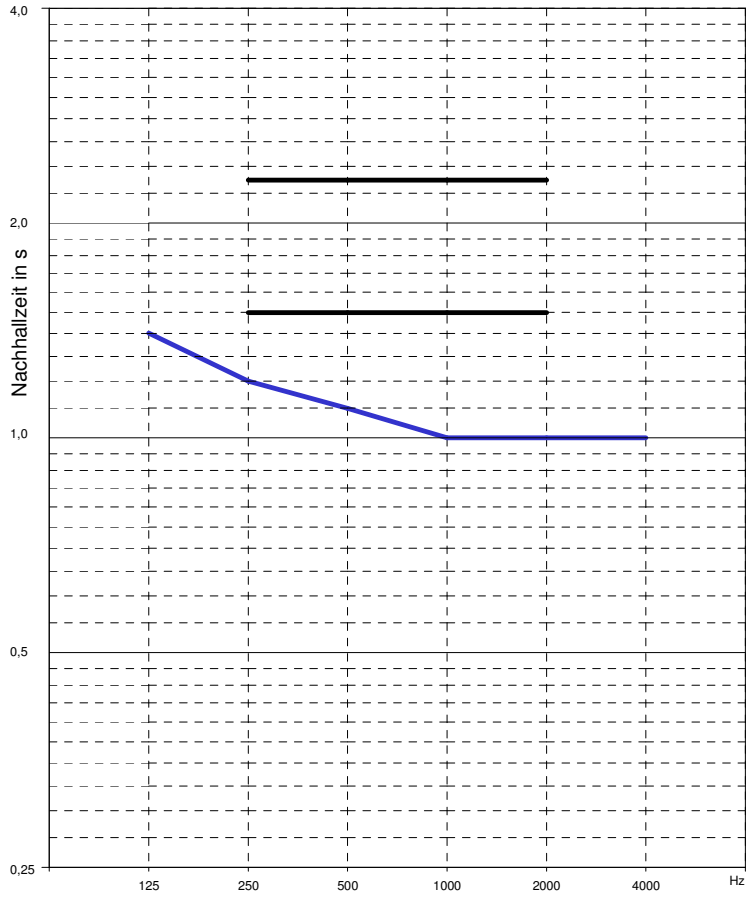
Im Bereich der Schwimmhalle Erholungsbecken ist die nach Süden orientierte Glasfassade um 5° nach außen geneigt. Die Dachfläche wird vollflächig mit den Akustikelementen "Ligno Block Q3 Akustik alpha-Z1 plus" ausgeführt. Die nördliche Wandfläche wird im oberen Bereich mit rd. 43 m² Wandpaneelen Typ "Wall Panel C / Super G" verkleidet. Damit ist im Bereich der Schwimmhalle Erholungsbecken eine mittlere Nachhallzeit von T_m = 1,1 s zu erwarten. Der Vergleich der mittleren Nachhallzeit mit den Vorgaben der KOK-Richtlinen von $T_{soll,KOK} \leq 1,7$ s und den volumen- und nutzungsabhängigen Anforderungen der DIN 18041 von $T_{soll,DIN\ 18041} \leq 1,9$ s zeigt, dass diese sicher erfüllt werden.

Raumakustische Maßnahmen

1) Dach Ligno Trend
Wand Ecophon

$T_{m,1}$ = 1,1 s

Toleranzbereich nach
DIN 18 041 für Sporthallen
und Schwimmhallen



Raumzustand 1)	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0

Der nach DIN 18041 anzustrebende Toleranzbereich wird von der frequenzabhängig berechneten Nachhallzeitkurve vollständig unterschritten, was hier nicht nur als erwünscht (besser als die Normvorgaben) sondern auch als akustisch vorteilhaft (hohe Raumschalldämpfung) anzusehen ist.

Lehrschwimmbecken 3

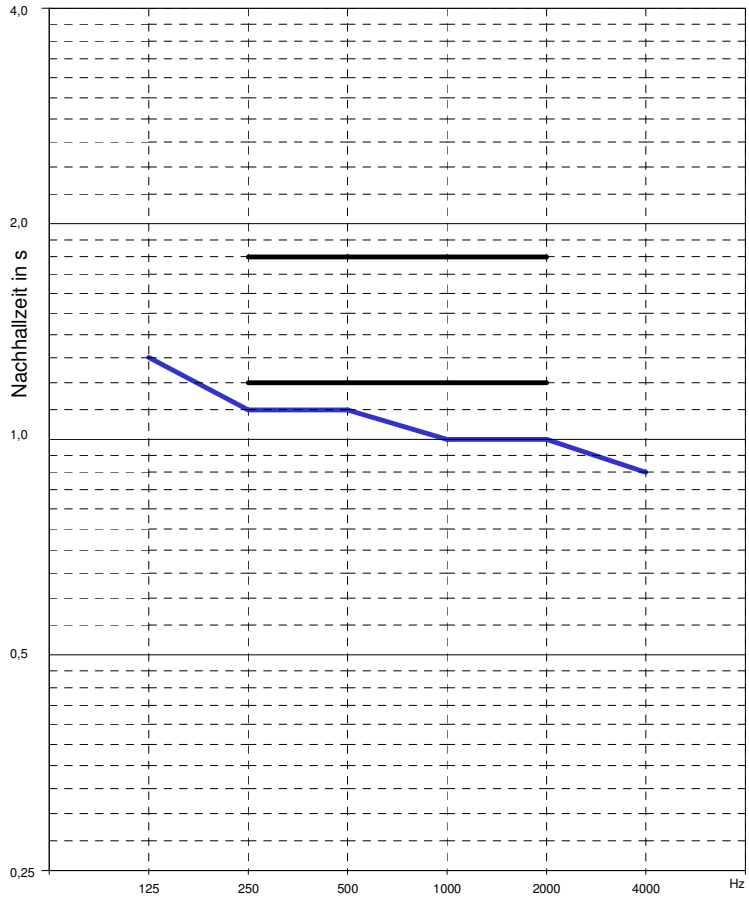
Im Bereich des Lehrschwimmbeckens ist die nach Süden orientierte Glasfassade um 5° nach außen geneigt. Die Dachfläche wird vollfläc hig mit den Akustikelementen "Ligno Block Q3 Akustik alpha-Z1 plus" ausgeführt. Die östliche Wandfläche wird im oberen Bereich mit rd. 35 m² Wandpaneelen Typ "Wall Panel C / Super G" verkleidet. Damit ist im Bereich des Lehrschwimmbeckens eine mittlere Nachhallzeit von T_m = 1,1 s zu erwarten. Der Vergleich der mittleren Nachhallzeit mit den Vorgaben der KOK-Richtlinen von $T_{soll,KOK} \leq 1,7$ s und den volumen- und nutzungsabhängigen Anforderungen der DIN 18041 von $T_{soll,DIN\ 18041} \leq 1,5$ s zeigt, dass diese sicher erfüllt werden.

Raumakustische Maßnahmen

1) Dach Ligno Trend
Wand Ecophon

$T_{m,1}$ = 1,1 s

Toleranzbereich nach
DIN 18 041 für Sporthallen
und Schwimmhallen



Raumzustand 1)	1,3	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9

Der nach DIN 18041 anzustrebende Toleranzbereich wird von der frequenzabhängig berechneten Nachhallzeitkurve vollständig unterschritten, was hier nicht nur als erwünscht (besser als die Normvorgaben) sondern auch als akustisch vorteilhaft (hohe Raumschalldämpfung) anzusehen ist.

Becken 4 (Sportbecken mit 4 Bahnen)

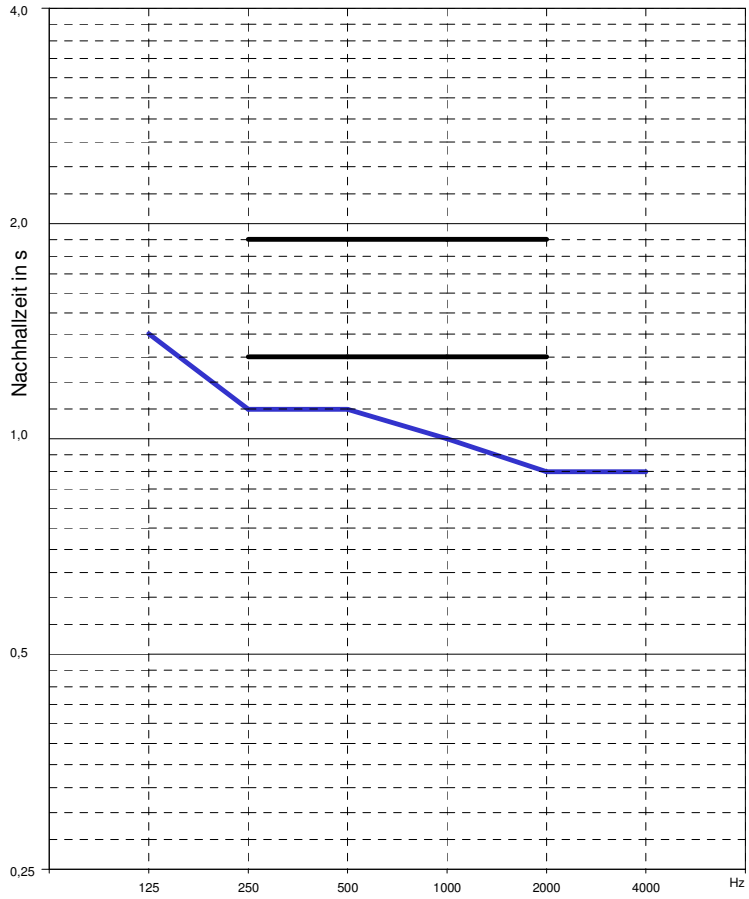
Im Bereich des Sportbeckens Becken 4 ist die nach Norden orientierte Glasfassade um 5° nach außen geneigt. Die Dachfläche wird vollf lächig mit den Akustikelementen "Ligno Block Q3 Akustik alpha-Z1 plus" ausgeführt. Die nördliche Wandfläche wird im oberen Bereich mit rd. 57 m² Wandpaneelen Typ "Wall Panel C / Super G" verkleidet. Damit ist im Bereich des Sportbeckens Becken 4 eine mittlere Nachhallzeit von T_m = 1,1 s zu erwarten. Der Vergleich der mittleren Nachhallzeit mit den Vorgaben der KOK-Richtlinen von $T_{soll,KOK} \leq 1,7$ s und den volumen- und nutzungsabhängigen Anforderungen der DIN 18041 von $T_{soll,DIN\ 18041} \leq 1,6$ s zeigt, dass diese sicher erfüllt werden.

Raumakustische Maßnahmen

1) Dach Ligno Trend
Wand Ecophon

$T_{m,1}$ = 1,1 s

Toleranzbereich nach
DIN 18 041 für Sporthallen
und Schwimmhallen



Raumzustand 1)	1,4	1,1	1,1	1,0	0,9	0,9

Der nach DIN 18041 anzustrebende Toleranzbereich wird von der frequenzabhängig berechneten Nachhallzeitkurve vollständig unterschritten, was hier nicht nur als erwünscht (besser als die Normvorgaben) sondern auch als akustisch vorteilhaft (hohe Raumschalldämpfung) anzusehen ist.

Becken 5 (Sportbecken mit 5 Bahnen)

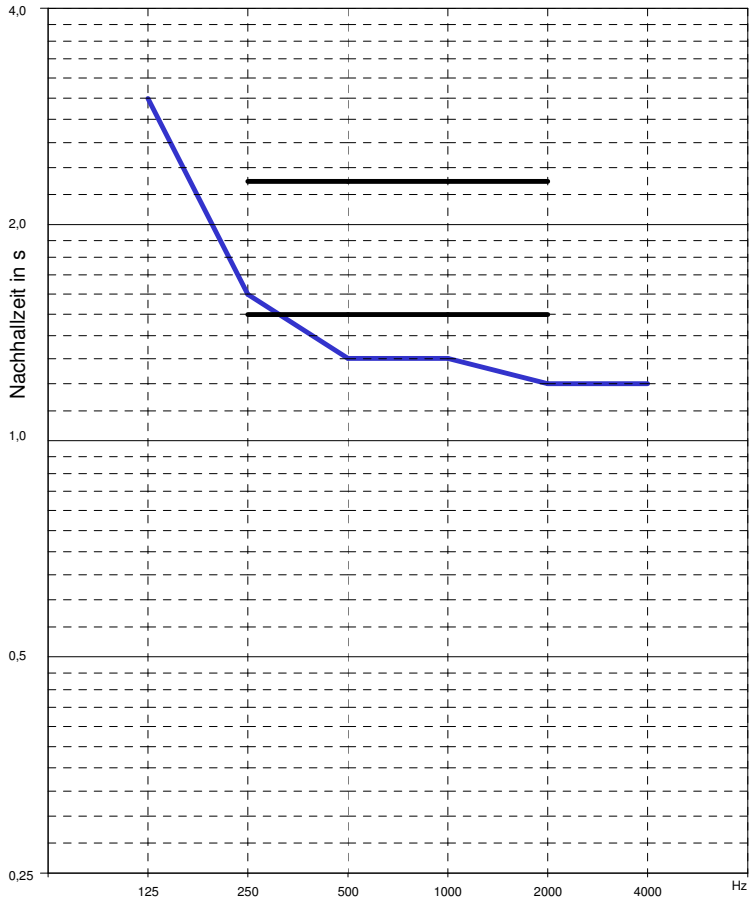
Im Bereich des Sportbeckens Becken 5 wird die Dachfläche vollflächig mit den Akustikelementen "Ligno Block Q3 Akustik alpha-Z1 plus" ausgeführt. Die südliche und die westliche Wandfläche werden im oberen Bereich mit rd. 325 m² Wandpaneelen Typ "Wall Panel C / Super G" verkleidet. Damit ist im Bereich des Sportbeckens Becken 5 eine mittlere Nachhallzeit von T_m = 1,3 s zu erwarten. Der Vergleich der mittleren Nachhallzeit mit den Vorgaben der KOK-Richtlinen von $T_{soll,KOK} \leq 1,7$ s und den volumen- und nutzungsabhängigen Anforderungen der DIN 18041 von $T_{soll,DIN\ 18041} \leq 1,9$ s zeigt, dass diese sicher erfüllt werden.

Raumakustische Maßnahmen

1) Dach Ligno Trend
Wand Ecophon

$T_{m,1}$ = 1,3 s

Toleranzbereich nach
DIN 18 041 für Sporthallen
und Schwimmhallen



Raumzustand 1)	3,0	1,6	1,3	1,3	1,2	1,2

Der nach DIN 18041 anzustrebende Toleranzbereich wird von der frequenzabhängig berechneten Nachhallzeitkurve nahezu vollständig unterschritten, was hier nicht nur als erwünscht (besser als die Normvorgaben) sondern auch als akustisch vorteilhaft (hohe Raumschalldämpfung) anzusehen ist.

Gemäß den durchgeführten raumakustischen Berechnungen werden in den Schwimmhallen mit den geplanten Ausführungen die Anforderungen/Empfehlungen an die Nachhallzeit erfüllt bzw. sogar unterschritten (hohe Raumschalldämpfung), wodurch bei der späteren Nutzung sowohl niedrige Geräuschpegel als auch eine gute Sprachverständlichkeit (Unterrichtsbetrieb) zu erwarten sind.

In den Nebenräumen werden durch die Verwendung akustisch hochwirksamer Verkleidungen bzw. Unterdecken ebenfalls hohe Raumschalldämpfungen erreicht. Ein akustisch "hochwertiges" Raumklima wird in den untersuchten Bereichen somit sichergestellt.

9 Brandschutz

9.1 Einleitung

Die Errichtung eines Gebäudes im Passivhausstandard erfordert aufgrund der Besonderheiten dieses Gebäudetypus eine schutzzielorientierte Betrachtung zum Brandschutz. Charakteristisch sind hierbei erhöhte Dämmstärken sowie die Verwendung von Bauteilen nach dem Passivhausstandard. Ggf. sind besondere Maßnahmen zur Lüftung erforderlich. Im Fall des Lippe Bades Lünen kommt bevorzugt auch der Baustoff Holz zum Einsatz.

Bei der Nutzung als Schwimmbad wird die Brandlast bei dieser Gebäudenutzung im Wesentlichen durch die Gebäudehülle bestimmt. Es wurden somit im Rahmen des Brandschutzkonzeptes weitergehende Maßnahmen entwickelt, um eine Brandübertragung in die Gebäudehülle wirksam zu verhindern.

9.2 Baurechtliche Einstufung

Für das Gebäude gilt grundsätzlich die Bauordnung des Landes NRW. Das Bestandsgebäude ist hierbei als Gebäude mittlerer Höhe eingestuft, während der Neubau des Schwimmbades als Gebäude geringer Höhe zu beurteilen ist. Das Gebäude stellt einen Sonderbau im Sinne der Bauordnung dar, für den besondere Erleichterungen oder zusätzliche Anforderungen zum Tragen kommen können. Die Sonderbauverordnung wurde jedoch nicht angewandt, da die Kriterien für den Geltungsbereich dieser Vorschrift nicht überschritten bzw. tangiert werden. Dies wäre allenfalls aufgrund der Anzahl der Nutzer erforderlich geworden, wenn eine Personenanzahl von 200 Personen überschritten wird und somit eine Einstufung als Versammlungsstätte vorliegt. Da dies nur vereinzelt bei Sonderveranstaltungen eintreten kann, erfolgt in diesen Fällen nach Abstimmung mit den Genehmigungsbehörden eine Genehmigung im Einzelfall.

Das Brandschutzkonzept dient der ganzheitlichen Betrachtung des Gebäudes unter Berücksichtigung der baurechtlichen Schutzziele. Die Schutzziele stellen sich im Einzelnen wie folgt dar:

- Verhindern einer Brandentstehung
- Begrenzung der Ausbreitung von Feuer und Rauch
- Ermöglichung von Rettung von Personen
- Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten

Diese Schutzziele stehen in enger Korrelation zueinander und bedürfen einer Konkretisierung im Rahmen eines Brandschutzkonzeptes. Das Brandschutzkonzept ist integraler Bestandteil des Bauantrages. Die Struktur eines Brandschutzkonzeptes ist vorgegeben durch die BauPrüfVO. Im Folgenden werden die Kernpunkte des Brandschutzkonzeptes unter Berücksichtigung der Errichtung nach dem Passivhausstandard beschrieben.

9.3 Brand- und Rauchabschnitte

Das Gebäude bildet insgesamt einen Brandabschnitt. Dies stellt bei einer maximalen Ausdehnung von ca. 76,35 m und einer Brandabschnittsfläche im Erdgeschoss von ca. 3.200 m² eine Abweichung von der zulässigen Ausdehnung von 40 m gemäß der Bauordnung dar. Diese Abweichung wurde im Wesentlichen begründet mit den geringen Brandlasten bzw. der Kapselung von Brandlasten sowie der Ausführung des Dachtragwerkes sowie des oberen Raumabschlusses in der Feuerwiderstandsklasse F 30.

Das Untergeschoss (vgl. Abbildung 63), das im Wesentlichen zur Unterbringung von technischen Anlagen genutzt wird, wird durch massive Decken in der Feuerwiderstandsklasse F 90 abgetrennt. Bezüglich des Raumabschlusses wurde aufgrund der geringen Brandlasten der Anlagentechnik und der unmittelbaren Zuordnung zum Schwimmbad bezüglich des Raumabschlusses die Anforderung der rauchdichten Ausführung an diese Geschossdecke gestellt. So wurde beispielsweise auf den Einbau von Brandschutzklappen in dieser Geschossdecke verzichtet.

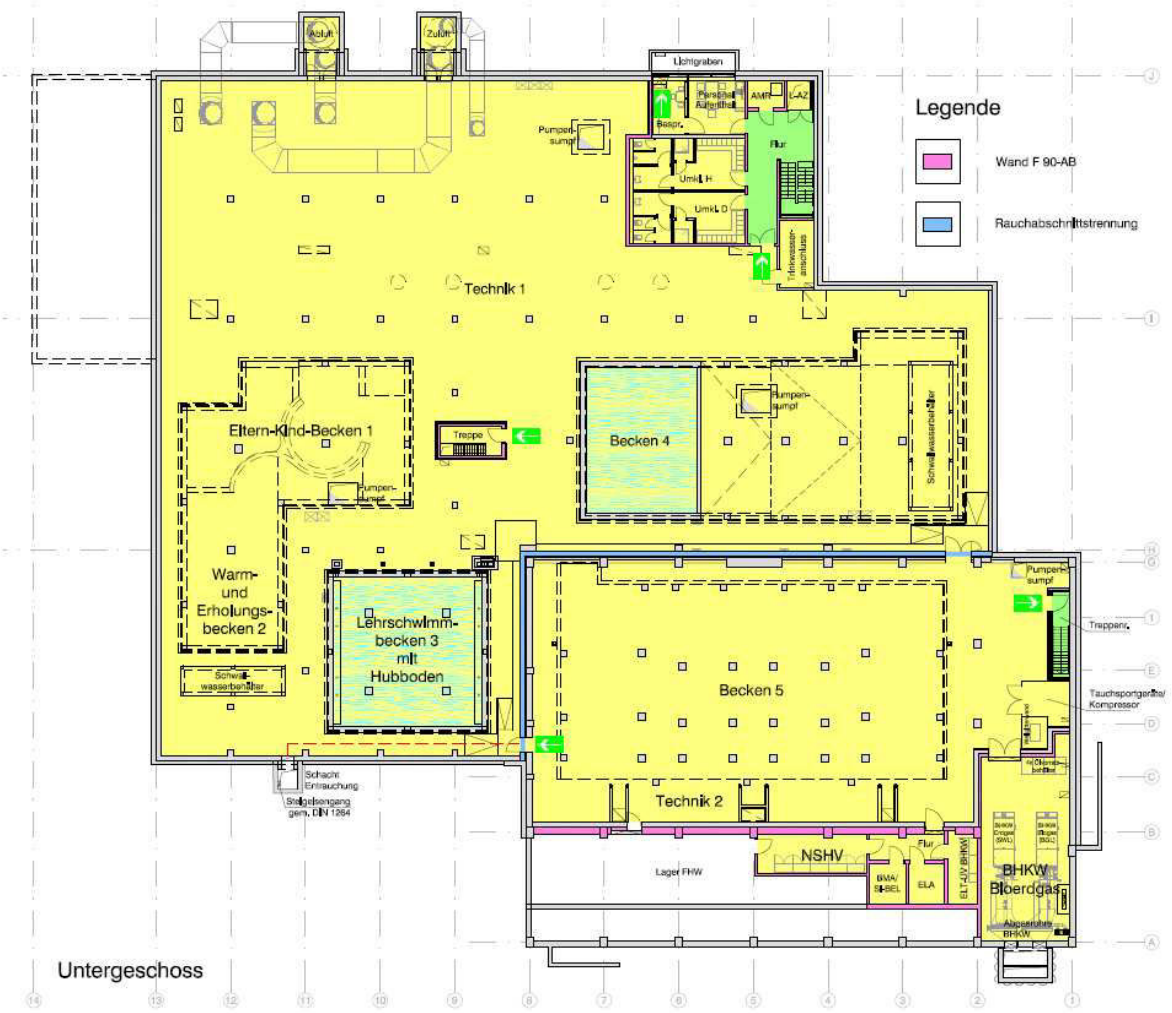


Abbildung 63: Übersichtsplan Brandschutz Untergeschoss (Quelle: skp)

Das Schalthaus des ehemaligen Heizwerkes sowie die Obergeschosse innerhalb des Bestandsgebäudes sind durch Decken und Wände in der Feuerwiderstandsklasse F 90 abgetrennt.

Das Schwimmbad ist unterteilt in zwei Raumbereiche, die jeweils einen Rauchabschnitt bilden. Des Weiteren wird eine Unterteilung zwischen dem Neubau und dem Altbau mittels einer Rauchschürze hergestellt (vgl. Abbildung 64).

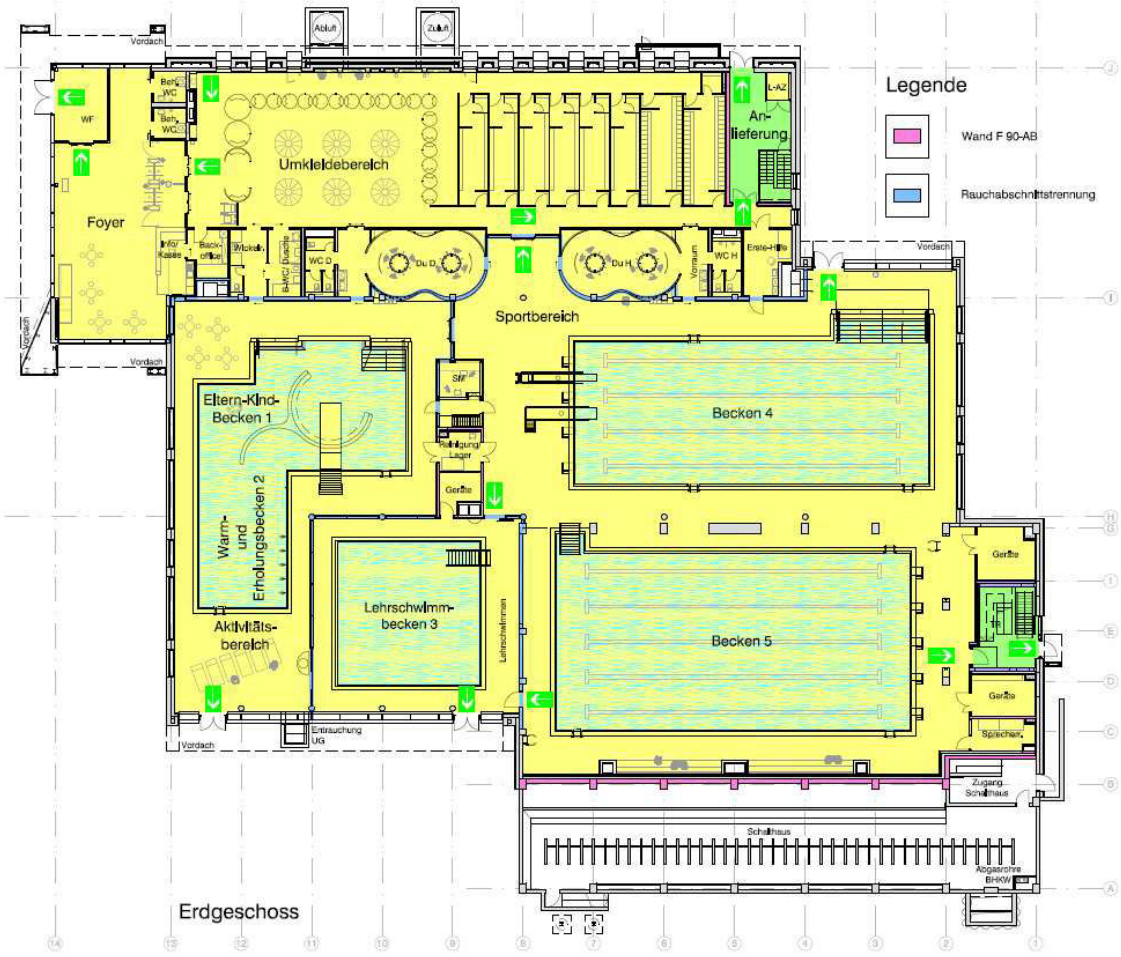


Abbildung 64: Übersichtsplan Brandschutz Erdgeschoss (Quelle: skp)

9.4 Baulicher Brandschutz

Der bauliche Brandschutz umfasst im Wesentlichen die Beschreibung von Anforderungen an die Bauteile und Baustoffe im Gebäude sowie die Beschreibung der baulichen Umsetzung. Für das Kellergeschoss und für das ehemalige Heizkraftwerk als Gebäude mittlerer Höhe wird die Anforderung der Feuerwiderstandsklasse F 90 gestellt, die durch die Stahlbetonkonstruktion erfüllt wird.

Für den Bereich des Schwimmbades wird an die tragende und aussteifende Konstruktion gemäß der Bauordnung die Anforderung F 30 gestellt. Diese Anforderung wird durch die Stahlbetonstützen in Verbindung mit den Leimholzbindern erfüllt. Aus baurechtlicher Sicht werden keine Anforderungen an den Raumabschluss durch die Bedachung gestellt.

Bei den Holzfertigteilen handelt es sich um streifenförmige Brettsperrholz-Elemente, die als Kastenelement aufgebaut werden. Die einzelnen Elemente sind mit Nut und

Feder verbunden. Unterseitig sind diese Holzfertigteile mit Holzakustikpaneelen bekleidet. Die Brettsperrholz-Elemente weisen aufgrund ihrer Bauart die Feuerwiderstandsklasse F 30 auf. Durch die Ausführung wird dem Schutzziel der Begrenzung einer Brandausbreitung Rechnung getragen, so dass bei einem Brand im Gebäude, dieser nicht unmittelbar in die Dachdämmung übertragen wird. Ein besonderes Augenmerk ist hierbei noch auf Dachdurchdringungen zu richten, die so ausgebildet wurden, dass ebenfalls eine Brandübertragung verhindert wird. Dies wurde realisiert durch die Ausführung der Dachdurchdringungen nach DIN 18234. Aufgrund der Größe der Dachflächen des Schwimmbades wurden durch die Feuerwehr als Brandschutzdienststelle weitere Maßnahmen zur Begrenzung einer Brandausbreitung über die Dachdämmung gefordert. Eine bauliche Unterteilung ist bereits durch die unterschiedlichen Höhen der Dachflächen gegeben. Eine weitere Unterteilung innerhalb der größten Dachfläche im Bereich des Neubaus des Schwimmbades ist durch einen Streifen mit nichtbrennbarer Dämmung in zwei Hälften gegeben (vgl. Abbildung 65).

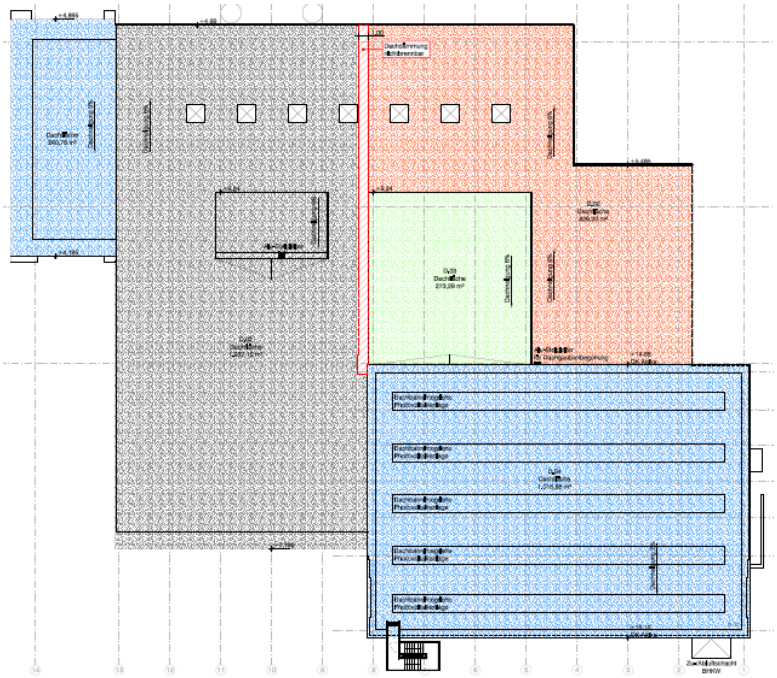


Abbildung 65: Segmentierung der Dachflächen (Quelle: skp)

Es werden durch die Bauordnung ausschließlich im Bereich des Bestandsgebäudes des Heizkraftwerkes Anforderungen an die Brennbarkeit bzw. Entflammbarkeit der Außenwände gestellt, da dieser Gebäudeteil als Gebäude mittlerer Höhe einzustufen ist. Gemäß der Bauordnung wurde an die Ausführung der nichttragenden Außenwände die Anforderung nicht brennbar gestellt. Diese Anforderung wird durch die Massivkonstruktion erfüllt. Die Dämmung bzw. die Außenwandbekleidung muss gemäß den Vorgaben der Bauordnung aus mind. schwerentflammbaren Baustoffen bestehen. Dies wird durch das Wärmedämmverbundsystem mit schwerentflammbarer Dämmung (EPS-Hartschaum) erfüllt.

Die Wände des Neubaus werden aus KSV-Mauerwerk / Stahlbeton mit einem Wärmedämmverbundsystem bzw. Verglasung errichtet. Besondere Anforderungen zum baulichen Brandschutz wurden nicht gestellt.

9.5 Rettungswege

Die Rettungswege für das Kellergeschoss bildet ein notwendiger Treppenraum innerhalb des Umkleidetraktes. Des Weiteren steht eine Treppe mittig im Gebäude zur Verfügung.

Für die erdgeschossigen Bereiche stehen direkte Ausgänge ins Freie zur Verfügung. Die Anzahl der Ausgänge wurde so optimiert, dass eine möglichst geringe Anzahl von Gebäudeöffnungen in der Außenhülle erforderlich wurde, dennoch aber die zulässige Rettungsweglänge von 35 m nicht überschritten wird.

Der erste Rettungsweg in den Obergeschossen des ehemaligen Heizkraftwerkes wird der erste Rettungswege über einen notwendigen Treppenraum sichergestellt. Der zweite Rettungsweg für das 1. und 2. Obergeschoss wird über anleiterbare Fenster gewährleistet. Aufgrund der ggf. zu erwartenden höheren Personenanzahl wurde für das 3. Obergeschoss ein baulicher Rettungsweg in Form eines Außentreppenturms zur Nachrüstung konzipiert.

Für die Kennzeichnung der Rettungswege kommen beleuchtete Hinweiskennzeichen zum Einsatz. Die Rettungswege werden auf Flucht- und Rettungsplänen dargestellt.

9.6 Anlagentechnischer Brandschutz

Das Kellergeschoss bildet einen eigenständigen Rauchabschnitt. Die Entrauchung des Kellergeschosses wird über eine maschinellen Entrauchung mittels eines Brandgasventilators gewährleistet, um eine wirksame Brandbekämpfung zu ermöglichen.

Für die Entrauchung des Schwimmbades sind baurechtlich keine konkreten Anforderungen formuliert, so dass eine schutzzielorientierte Betrachtung erforderlich wurde. Die Entrauchung wurde daher im Schwimmbad in Anlehnung an die Sonderbauverordnung konzipiert. Diese formuliert für Räume mit einer Fläche von 200 bis 1.000 m² erleichterte Anforderungen an die Entrauchung. Dies können wahlweise Rauchableitungsöffnungen mit einer freien Öffnungsfläche von mind. 1% oder 2% freie Öffnungsfläche in Form von Fenstern und Türen jeweils bezogen auf die Grundfläche sein. Die Bereiche des Schwimmbades wurden mit

Rauchableitungsöffnungen mit 1% bezogen auf die Grundfläche ausgestattet. Die vorgesehenen Fenster zur Rauchableitung gemäß dem Passivhausstandard entsprechen nicht den Anforderungen der EN 1201 Teil 1. Da es sich jedoch nicht um eine Rauchabzugseinrichtung gemäß den technischen Regelwerken hierzu handelt, bestanden gegen Abweichung von dieser Norm aus brandschutztechnischer Sicht keine Bedenken. Es werden zugelassene Antriebe verwendet, die für die Fenster ausreichend bemessen werden.

Das Gebäude ist nicht mit einer automatischen Brandmeldeanlage ausgestattet. Zur Sicherstellung des Personenschutzes ist gemäß der zu erwartenden Brandszenarien eine Alarmierungsanlage für den Hausalarm mit Handfeuermeldern im Bereich der Ausgänge installiert worden. Die Alarmierungsanlage ist aufgeschaltet auf die ständige besetzte Leitwarte der Stadtwerke Lünen.

Um einen Brandeintrag durch Blitzeinschlag zu verhindern, wurde eine Blitzschutzanlage entsprechend der technischen Regelwerke installiert.

Innerhalb des Gebäudes werden zur Wärme- und Stromerzeugung zwei Blockheizkraftwerke betrieben, die mit Erdgas bzw. Biogas betrieben werden. Diese Blockheizkraftwerke werden in brandschutztechnisch abgetrennten Bereichen untergebracht. Für die Abschaltung durch die Feuerwehr im Zuge einer Brandbekämpfung wurden Notaus-Einrichtungen installiert.

Die Lüftungsanlagen des Gebäudes sind als Be- und Entlüftungsanlagen mit Umluftanteil ausgeführt. Die Lüftungsgeräte sind im Untergeschoss aufgestellt. Im Brandfall erfolgt eine Abschaltung der Lüftungsanlagen durch Rauchmelder in den Lüftungsanlagen.

9.7 Fazit

Die Errichtung des Gebäudes im Passivhausstandard führt aus brandschutztechnischer Sicht nicht zu Problemstellungen, die einen wesentlich erhöhten Investitionsaufwand darstellen. Die getroffenen Kompensationsmaßnahmen zum Brandschutz wurden im Wesentlichen nicht durch die Errichtung im Passivhausstandard, sondern durch die Gebäudekubatur und durch die Art der Nutzung bestimmt. Die Verwendung des Baustoffes Holz steht nicht im Widerspruch zum baulichen Brandschutz, wenn dies bei der Planung bereits entsprechende Berücksichtigung findet.

10 Kosten und Wirtschaftlichkeit

Das Projekt Lippe Bad ist die innovative Entwicklung zum ersten gebauten Beispiel eines Hallenbades nach Passivhauskonzept. Im gebauten Beispiel Lippe Bad wird es mit wissenschaftlich geführtem Monitoring im Betrieb gelingen, Transparenz und Erfahrungen zu den technischen Systemen herbeizuführen. Allein dieser Erkenntnisgewinn im Erstlingswerk ist förderungswürdig. Andererseits sind Handhabung und Marktgängigkeit der Passivhaustechnologie und der ergänzenden Ansätze zur Einsparung (Energie, Trinkwasser, Abwasser, Chemie, Arbeitsgänge, Erneuerungsbedarfe) neben den Erfahrungen im Betrieb insbesondere von den Investitionsmehrkosten abhängig.

Die unterschiedlichen Einzelmaßnahmen mit dem Ziel der Energie- und Wassereinsparung lassen sich im System Hallenbad nicht isoliert wirtschaftlich beurteilen. Die Ausschöpfung der Einsparpotenziale wird nicht allein durch eine Aneinanderreihung mehrerer Einzelmaßnahmen erreicht, sondern ergibt sich erst aus der Kombination derselben. Die über das speziell erweiterte Passivhaus-Projektierungspaket durchgeführten Simulationen zeigen die ineinander greifenden Abhängigkeiten im Hallenbadsystem. So eröffnet die hohe thermische Güte der Hülle erst die Möglichkeit, das auch über Verdunstungsreduzierung und Lüftungssystem bestehende Einsparpotenzial auszuschöpfen. Ebenso wirkt eine Warmwassereinsparung auf den Wasserhaushalt (Trinkwasser, Abwasser), auf den Wärmehaushalt und mittelbar über das Konzept der Wärmerückgewinnung auch auf den Stromhaushalt. Wie immer, bestehen auch im innovativen Erstlingswerk Passivhallenbad gewisse Risikopositionen. Die heute noch unsichere Erkenntnislage zur Schadstoffentwicklung in der Hallenbadatmosphäre birgt beispielsweise das Risiko, entgegen der Passivhauskonzeption die Anhebung der Luftwechsel vornehmen zu müssen, um die Betriebsbedingungen des Hallenbades sicherzustellen. Um diesem Risiko zu begegnen, wurde die Lüftung im Lippe Bad nach üblichen Rahmenbedingungen und dem Stand der Technik für Hallenbäder ausgelegt. Entsprechend ließen sich im Erstlingswerk keine mit dem Passivhauskonzept in Aussicht stehenden Einsparungen zur Anlagentechnik Lüftung realisieren (geringere Volumenströme, reduzierte Gerätegrößen, kleiner dimensioniertes Kanalnetz Lüftung). Auch werden die mit dem Lüftungskonzept Passivhallenbad verbundenen Energieeinsparungen solange ungesichert sein, bis die Ergebnisse des Monitorings zu Schadstoffen in der Hallenbadatmosphäre die Funktionalität und Eignung des Lüftungskonzepts Passivhallenbad aufklären. Damit wird das Monitoring zur Schlüsselaufgabe im Lippe Bad, weil die Erkenntnisse auch für Konzeptionen von Nachfolgeprojekten so bedeutungsvoll sind.

Die innovativen Ansätze für das Lippe Bad, die noch offenen Risikoposition und die Notwendigkeit des Monitorings wurden im Projekt Lippe Bad durch Fördergeldgeber mitgetragen (Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Ministerium für Wirtschaft,

Mittelstand und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit). Mit Berücksichtigung von Fördergeld, noch unklaren Risikopositionen und den noch ausstehenden Erkenntnissen des Monitorings im Betrieb, ist die Ableitung von Aussagen zur Wirtschaftlichkeit aus dem Erstlingsprojekt Lippe Bad mit Blick auf Nachfolgeprojekte ungeeignet. Um dennoch eine Vorstellung zu entwickeln, werden nachfolgend ein Standardprojekt (EnEV 2007) und ein „funktionierendes" Passivhallenbadprojekt kostenmäßig gegenübergestellt. Die Rahmendaten zu dieser Betrachtung sind weitestgehend aus dem konkreten integralen Planungsprozess abgeleitet.

Über die Betrachtung der Lebenszykluskosten eines Hallenbadprojektes kann weiter abgeleitet werden, dass Investitionsmehrkosten durchaus sehr wirtschaftlich investiert sind, sofern damit nachhaltige Betriebskosteneinsparungen ohne Abstriche im Anforderungsprofil und an Nutzungsqualität erreicht werden. Während die Lebenszykluskosten im Durchschnitt unterschiedlicher Gebäudearten (von Wohnbau über Verwaltungsgebäude, Krankenhäuser bis hin zu Schulen und Kindergärten) zu 20 % über die Investition und zu 80 % über die Betriebskosten bestimmt werden, liegen die Anteile für Standard-Hallenbäder bei rund 10 % Investition und 90 % Betriebskosten.

Die in Planungen des Lippe Bades theoretisch abgeleiteten Endenergieeinsparungen betragen für Strom 426 MWh/a (rund 70 T€/a netto) und für Wärme 1.811 MWh/a (rund 100 T€/a netto). Auf der Trinkwasserseite werden Einsparungen von rund 15.000 m³/a (ca. 19,5 T€/a netto) erwartet. Begründet durch die Lagegunst des Hallenbades wurde eine Direkteinleitung in die Lippe vorgesehen, um quasi unbelastetes Wasser (Niederschlagswasser, Grauwasserüberschuss) ohne übliche Abwassergebühren ableiten zu können, womit vermiedene Abwasser-/Entwässerungskosten von rund 41 T€/a netto einhergehen. So beträgt der insgesamt in Aussicht stehende Einsparbetrag bei Strom, Wärme, Trinkwasser, Abwasser und Niederschlagswasser auf heutiger Preisbasis ca. 230 T€/a netto.

Unter der Voraussetzung, dass die Ergebnisse des Monitorings die Funktionalität des Passivhallenbades bestätigen werden, ergeben sich in Summe modellhaft mit Blick auf Nachfolgeprojekte rund 2,1 Mio. € netto Mehrkosten zur Realisierung eines Passivhallenbades. Zur weiteren Berechnung wurden jeder Mehrkostenmaßnahme eine Nutzungsdauer und ein Instandhaltungsaufwand zugeordnet, um mit Zins (3,5 %) und Nutzungsdauer (zwischen 10 und 30 Jahre) den gesamten Annuitäts- und Wartung-/Instandhaltungsbetrag zu berechnen. Mit diesen Zahlen wurden dann folgende Jahreskostenrechnungen ausgeführt.

Tabelle 7: Zahlenwerte der Jahreskostenrechnung

Mehrkosten	2.100.000	€
Summe Annuitätsbetrag	159.200	€
mittlere Nutzungsdauer der Systemtechnik	18	Jahre
Zins	3,5	%
Tilgung	4,1	%
Teuerung von Wasser-, Abwasser- und Energiekosten	3,5	%
Teuerung von Wartungs-/Instandhaltungskosten	2,0	%
Energie-/Wasserkosteneinsparung im 1. Jahr	230.000	€
Wartungs-/Instandhaltungskosten im 1. Jahr	26.900	€

Alle Beträge in €

	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	….	**9. Jahr**
Schulden	-2.100.000	-1.884.700	-1.661.888	….	-151.394
Zinsen	-73.500	-73.500	-73.500	….	-73.500
Tilgung	85.700	85.700	85.700	….	85.700
Einsparung	230.000	238.050	246.382	….	302.866
Wartung	-26.900	-27.438	-27.987	….	-31.518
Restschuld	-1.884.700	-1.661.888	-1.431.293	….	**132.155**

Anhand dieser Rechnung zeigt sich die Amortisation der Mehrinvestition mit dem Jahr, in dem erstmals kein Restschuldbetrag mehr ausgewiesen ist. Dies ist im 9. Jahr der Fall.

Tabelle 8 stellt vergleichsweise die Ergebnisse der Berechnungen zu den Lebenszykluskosten über 40 Betriebsjahre dar. Es zeigt sich, dass trotz höherer Investition (Mehrkosten 2,1 Mio. €) für die Passivbauweise und die ergänzenden Techniksysteme insgesamt 11,5 Mio. € an Lebenszykluskosten eingespart werden. Betrachtet man die berechnete Entwicklung der Lebenszykluskosten über die Jahre so zeigt sich, dass im 10. Betriebsjahr die Lebenszykluskosten bei Passivbauweise kleiner werden als die des Standardprojektes (konkret 23,5 Mio. € zu 23,7 Mio. €).

Tabelle 8: Lebenszykluskosten der unterschiedlichen Projektstandards im Vergleich

	Standardprojekt (Basis EnEV 2007)		Hallenbad mit Passivhaustechnologie	
Investition	9,5 Mio. €	10,0 %	11,6 Mio. €	13,9 %
überschlägige Rückbaukosten	600 T€		650 T€	
anfängliche Betriebskosten	1.263 T€/a		1.060 T€/a	
mittlere Betriebskostensteigerung	2,5 %			
Summe Betriebskosten auf 40 Jahre berechnet	85,2 Mio. €	89,5 %	71,5 Mio. €	85,4 %
Lebenszykluskosten auf 40 Jahre berechnet	95,2 Mio. €	100 %	83,7 Mio. €	100 %

Mit weiteren Optimierungen und mit Ergebnissen des Monitorings, die Handlungsoptionen zur Reduzierung der Technisierung als Kostentreiber absichern, steht die weiter verbesserte Wirtschaftlichkeit für Hallenbäder im Passivhauskonzept in Aussicht. Zur Absicherung neuen Wissens und praktischer Handhabbarkeit muss das Thema Passivhallenbad weiter intensiv bearbeitet werden. Im Markt sind Innovationen stark nachgefragt, denn bestehende Regelwerke und übliche Konzeptionen sind als nicht ausreichend einzuschätzen, um die heute bereits möglichen Einsparpotenziale zu erschließen.

11 Quellen

AkkP 24 Feist, Kaufmann, Schulze Darup, Dahlem, Greifhagen, Pfluger: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Phase III, Band 24 „Einsatz von Passivhaustechnologie bei der Altbausanierung“; PHI Darmstadt, 2003

AkkP 32 Feist, Kaufmann, Loga, Pfluger, Ratzlaff, Schnieders, Simons: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Phase III, Band 32 „Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten“; PHI Darmstadt, 2005

AkkP 35 Feist, Schulz, Hasper, Schnieders, Füssler, Heuß, Such: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Phase IV, Band 35 „Wärmebrücken und Tragwerksplanung – die Grenzen des wärmebrückenfreien Konstruierens“; PHI Darmstadt, 2007

AkkP 39 Feist, Bastian, Kaufmann, Kah, Rongen, Schulz: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Phase IV, Band 39 „Schrittweise Modernisierung mit Passivhaus Komponenten“; PHI Darmstadt, 2009

Christoffer 2004 Christoffer, J.; Deutschländer, T.; Webs, M.: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, 2004

Gundermann 1997 Gundermann, Prof. Dr. K.O.; Jentsch, Dr. F.; Matthiessen, Dr. A.: „Trihalogenmethane in Hallenbädern mit Meerwasser- und Sole-Becken. Belastung von Wasser, Luft und Personen, Faktoren der Bildung, Möglichkeiten der Verminderung“, Institut für Hygiene und Umweltmedizin der Universität Kiel, Kiel 1997

Feist 1994 Feist, Wolfgang, Dr.: „Thermische Gebäudesimulation“ C.F. Müller Verlag, 1994

Feist 2001 Feist, Wolfgang, Univ. Prof. Dr.: „Grundlagen Passivhäuser“ Verlag Das Beispiel, 2001

Feist 2010 Feist, Wolfgang, Univ. Prof. Dr. (Hrsg.): Internationale Passivhaustagung 2010, Protokollband. PHI, Darmstadt 2010

Krick 2010 Krick, Benjamin, Dr.-Ing.: „Neue Zertifizierungskriterien für Passivhaus geeignete transparente Bauteile“ in Feist 2010, S. 151-158.

PHI 2009 Schulz, Pfluger, Grove-Smith, Kah, Krick: „Grundlagen-untersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad„ Passivhaus Institut Darmstadt, 23.09.2009

VDI 2089 VDI 2089 Blatt 1 (Entwurf), Technische Gebäudeausrüstung von Schwimmbädern Hallenbäder, Beuth Verlag GmbH, Berlin, September 2008

Wibera 2010: Wibera Wirtschaftsberatung Aktiengesellschaft Wirtschaftsprüf-gesellschaft: „Gutachten zur Bestimmung des Primärenergie-faktors der Fernwärmeversorgung der Stadtwerke Lünen GmbH für das Jahr 2010“, Düsseldorf, 11.01.2010

5.3 Anlage 3

Monitoring Passivhaus-Hallenbad Lippe Bad Lünen

Monitoring Passivhaus-Hallenbad Lippe-Bad Lünen

Auftraggeber:
Bädergesellschaft Lünen

BÄDERGESELLSCHAFT LÜNEN

Mit Förderung durch das
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

August 2013

Monitoring Passivhaus-Hallenbad Lippe-Bad Lünen

Autoren:
Dipl.-Ing. (FH) Søren Peper
MPhys. Jessica Grove-Smith

Unter Mitarbeit von:
Florian Gressier
Waldemar Rupps
Dr. Benjamin Krick
Esther Gollwitzer
Arthur Dumler

Herausgeber:
PASSIVHAUS INSTITUT
Dr. Wolfgang Feist
Rheinstraße 44/46
D-64283 Darmstadt
Tel: 06151-82699-0
E-Mail: mail@passiv.de
www.passiv.de

Darmstadt, August 2013

Dieser Bericht entstand im Auftrag der Bädergesellschaft Lünen mit Fördermitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Wir danken Dr. Gerd Koch und Thomas Claus von der Bädergesellschaft Lünen für die gute Zusammenarbeit.
Insbesondere danken wir für die konstruktive Mitarbeit sowie die schnellen Antworten und guten Ideen dem Technikfachplaner des Bades Olaf Ahrens vom Ingenieurbüro ENERATIO Hamburg.

Alle Abbildungen und Grafiken dieses Berichtes sind Eigentum des Passivhaus Instituts. Abweichend sind jeweils die Quellen angegeben.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zusammenfassung 1
2 Gebäudebeschreibung 8
2.1 Luftdichtheit 12
2.2 Wärmeversorgung 14
2.3 Beckenwasserkreisläufe 17
2.4 Lüftungstechnik 19
3 Messtechnik 23
3.1 Temperatur- und Feuchtemessung in den Räumen 23
3.1.1 Kalibrierung der Sensoren 24
3.1.2 Hallen-Mittelwerte: Temperatur und Feuchte 26
3.2 Beckenwassertemperatur 29
3.3 Lüftungsgeräte 29
3.4 Stromverbrauchsmessungen 31
3.4.1 Erzeugung Solarstrom (PV) 32
3.5 Weitere Sensoren 33
4 Messdatenauswertung 34
4.1 Besucherzahlen 34
4.2 Wetterdaten 36
4.3 Lufttemperaturen und Luftfeuchten im Gebäude 38
4.3.1 Oberflächentemperatur Verglasung 45
4.4 Wassertemperaturen 47
4.5 Lüftung 49
4.5.1 Volumenstrom Hallengeräte 49
4.5.2 Volumenstrom Geräte der Nebenzonen 52
4.5.3 Auswirkungen der Volumenstromänderungen (Geräte Nebenzonen) 55
4.5.4 Stromeffizienz der Lüftungsgeräte 58
4.5.5 Durchströmung der Halle / Nebelversuche 59
4.5.6 Außenluftanteil 60
4.5.7 Änderung des Regelverhaltens 62
4.5.8 Luftgeschwindigkeit über der Wasseroberfläche 63
4.6 Versuchsreihen und geänderte Betriebsbedingungen 65
4.6.1 Variation der Hallenfeuchte 65
4.6.2 Reduktion der Zuluftmenge 68
4.7 Wasserverbrauch 70
4.8 Energieverbrauch 72
4.8.1 Wärmelieferung 74
4.8.2 Wärmeverbrauch 75
4.8.3 Stromverbrauch 80
4.8.4 Stromverbrauch und Durchfluss Beckenwasserkreisläufe 87
4.9 End- und Primärenergie 90
5 Optimierung durch Energiebilanzierung 93
5.1 Vergleich: Messdaten und berechneter Endenergiebedarf 94
5.1.1 Beckenwassererwärmung 95
5.1.2 Raumheizung 110
5.1.3 Trinkwarmwasser 116
5.1.4 Strom 119
5.2 Energiebilanzierung: Zusammenfassung & Aussichten 120
6 Perspektiven 124
7 Literaturangaben 126
8 Anhang: Entfeuchtungsleistung im Verlauf 128

1 Einleitung und Zusammenfassung

Der Energieverbrauch von Schwimmbädern ist, bedingt durch die hohe Raumlufttemperatur, den hohen Lüftungswärmeverlusten sowie der energieaufwendigen Wassertechnik sehr hoch. Bedingt durch den Bau vieler Bäder in den 70er Jahren stehen in vielen Städten und Gemeinden grundlegende Sanierungen bzw. der Abriss und ggf. Neubau von Hallenbädern an. Es ist ein Sanierungsstau entstanden und viele Städte und Gemeinden sind von den hohen Betriebskosten der alten Bäder stark belastet. In Deutschland gibt es nach [Heiden/Meyrahn 2012] allein 3.448 Hallen-, Freizeit- und Kombibäder - der Bedarf, energetisch verbesserte Lösungen zu entwickeln und umzusetzen, ist damit hoch.

Vor diesem Hintergrund wurde untersucht, wie sich das Passivhaus-Konzept als Leitprinzip auch auf Hallenbäder anwenden lässt: Das Ziel ist, ein Optimum an Behaglichkeit (z.B. durch hohe Oberflächentemperaturen auch an großen Verglasungsflächen) bei deutlich reduziertem Energieeinsatz zu ermöglichen. Die Potenziale wurden zunächst vom Passivhaus Institut in einer Grundlagenstudie für Passivhaus-Hallenbäder bestimmt [Schulz et al. 2009], um die konkreten Maßnahmen dann in Pilotprojekten umzusetzen.

Als Kernpunkte des Passivhaus-Hallenbad-Konzeptes kristallisierten sich heraus:

- Durch eine thermisch sehr hochwertige Gebäudehülle werden die Transmissionswärmeverluste signifikant gesenkt.
- Die thermisch verbesserte Gebäudehülle, insbesondere auch die transparenten Bauteile, bewirken höhere Oberflächentemperaturen und reduzierten Kaltluftabfall an den Bauteilen, insbesondere an der Verglasung und anderen Fensterkomponenten. Durch diese Qualität wird zum einen die Behaglichkeit erhöht, zum anderen kann das Bad mit höheren Luftfeuchten betrieben werden (bis zu 64 %), ohne dass es zu Kondensat Ausfall kommt.
- Durch die erhöhte Raumluftfeuchte werden die Wärmeabgabe durch die Verdunstung vom Beckenwasser sowie der Entfeuchtungsbedarf der Hallenluft erheblich gesenkt.
- Durch den Einsatz hochwertiger Lüftungswärmetauscher sowie einer angepassten Lüftungssteuerung können die Lüftungswärmeverluste sowohl in den Schwimmhallen als auch in den Nebenräumen deutlich reduziert werden.
- Der Strombedarf wird ebenfalls signifikant reduziert (z.B. durch Vermeidung hoher Umluftmengen und dem Einsatz von hocheffizienten Geräten wie Lüftungsmotoren, Leuchtmittel, Pumpen etc.)

- Verbesserte Schwimmbadtechnik mit energieeffizienten elektrischen Anlagen sowie die umfangreiche Wiederverwendung von Filterrückspülwasser (Abwasseraufbereitung) sind weitere wichtige Grundpfeiler des Konzeptes.

Die Grundlagenstudie zu Passivhaus-Hallenbädern wurde am Beispiel des geplanten Neubaus des Lippe-Bades vom Passivhaus Institut erstellt. Daran hat sich als Umsetzung der Bau des Lippe-Bades als Prototyp angeschlossen. Die Planung und der Bau des Bades wurden durch das Projekt zur integralen Planung begleitet [BGL 2011]. Das Bad ging im September 2011 in Betrieb. Da es sich damit bei diesem Gebäude um ein Pilotprojekt des Passivhaus-Hallenbadkonzeptes handelt, von dem grundlegende Erkenntnisse zu den Energieströmen in solchen Bädern erwartet werden, wurde ein umfassendes Monitoring durchgeführt. Dieser Bericht enthält die Auswertung der Messdaten aus dem ersten Messjahr und die daraus gewonnenen Erkenntnisse.

Bei dem Hallenbad handelt es sich um ein Sportbad mit insgesamt fünf Becken. Zusätzlich zum Grundlagenkonzept wird im Lippe-Bad für die Heizungs- und Warmwasserbereitung Niedertemperaturwärme aus der Gehäusekühlung sowie der Abgaskühlung (Brennwertnutzung) der beiden unmittelbar benachbarten Blockheizkraftwerke des Fernwärmenetzes Lünen genutzt. Damit wurde eine primärenergetisch extrem günstige Wärmeversorgung realisiert. Die Energiebezugsfläche (EBF) des gesamten Hallenbades beträgt 3.912 m², die Wasserfläche der insgesamt fünf Becken 850 m². Es gibt ein kombiniertes Eltern-Kind- und Warmbecken (175 m²), ein Lehrbecken (100 m²) mit Hubboden sowie zwei Sportbecken mit insgesamt neun Bahnen (Länge: 25 m / Fläche: 575 m²). Die Beheizung findet ausschließlich über die Zuluftnacherwärmung statt, auf statische Heizflächen sowie Fußbodenheizung konnte verzichtet werden, womit sich die Vorzüge des Passivhaus-Konzeptes in Bezug auf technische Vereinfachung hier zwanglos umsetzen ließen. Im Jahr 2012 haben über 208.000 Besucher das Hallenbad an der Lippe genutzt, insbesondere Vereine und Schulen sind dabei stark vertreten.

Das Gebäude wurde von dem Architekturbüro „nps tchoban voss“ (npstv) aus Hamburg entworfen und geplant. Die Planung der gesamten Haus-, Lüftungs- und Schwimmbadtechnik erfolgte durch das Ingenieurbüro ENERATIO aus Hamburg. Die energetische Beratung und Qualitätssicherung erfolgte durch das Passivhaus Institut, Darmstadt. Bauherrin und Initiatorin ist die Bädergesellschaft Lünen.

Details zum Gebäude, zur integralen Planung und Realisierung des Projektes sind in dem vorausgehenden Bericht zur integralen Planung des Bades [BGL 2011] dargestellt. Für die energetische Bilanzierung des Bades wurde in der Planungszeit, neben dynamischen Simulationen, ein speziell angepasstes Mehrzonen-PHPP (Passivhaus Projektierungs-Paket) für Hallenbäder entwickelt und angewendet [PHPP].

Abbildung 1: Luftbild des Lippe-Bades (Quelle: Bädergesellschaft Lünen)

Von Interesse für die energetische Gesamtbeurteilung des Bades sind zunächst die Endenergieverbrauchswerte, die vom Gebäude insgesamt bezogen wurden. Als spezifische Jahresverbrauchswerte des Lippe-Bades ergibt sich für den Jahreszeitraum April 2012 bis einschließlich März 2013 [1]:

Wärmebezug: 258 kWh/(m^2_{EBF} a)
Strombezug: 156 kWh/(m^2_{EBF} a)

Bezieht man diese gesamten Jahresverbrauchswerte auf die **Beckenfläche** von 850 m², so ergeben sich die folgenden spezifischen Verbrauchswerte:

Wärmebezug: 1.189 kWh/(m^2_{Becken} a)
Strombezug: 718 kWh/(m^2_{Becken} a)

Der Vergleich mit anderen Bädern gestaltet sich nicht einfach, denn es sind nur wenige verlässliche bzw. geeignete Vergleichsdaten bekannt. Bei den verfügbaren Literaturangaben [ages 2007], [DGfdB R 60.04], [Schlesiger 2001] und [VDI 2089-Blatt 2] handelt es sich um keine einzelnen Bäder, sondern um Mittelwerte oder Bandbreiten von ganz unterschiedlichen Bädern oder Bädergruppen, daher ist die Schwankungsbreite der angegebenen Energieverbräuche sehr groß. Um dennoch eine erste Einordnung des Lippe-Bades vornehmen zu können, wurden die Angaben aus der Literatur gemittelt und deren Schwankungsbreite (Größt- und Kleinstwert) angegeben (Abbildung 2).

[1] Insgesamt zwölf Monate, d.h. ein vollständiges Jahr. Der Zeitraum enthält einige Interpolationsrechnungen bei Zählerausfall und Zählerumbau und inkludiert einen Zeitraum von sechs Wochen mit Revisonsarbeiten im Sommer 2012.

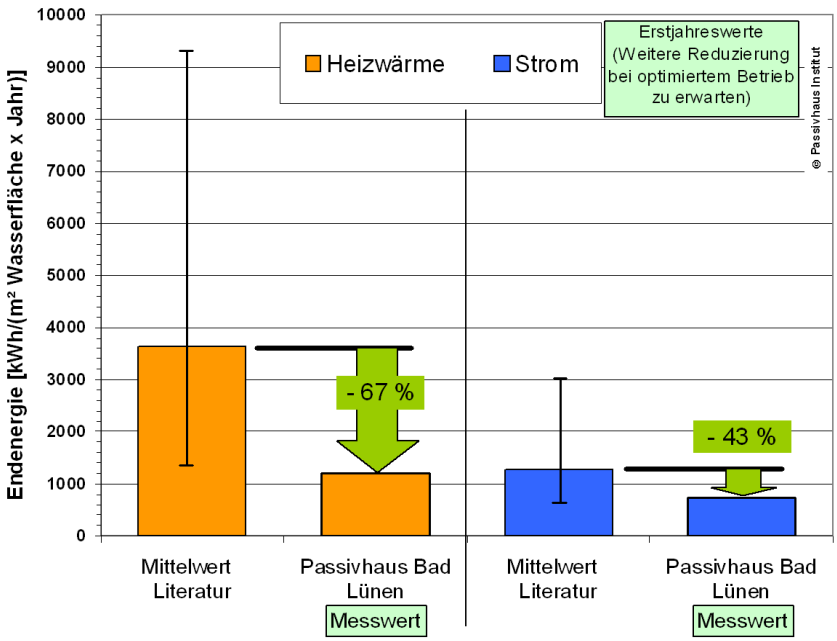


Abbildung 2: Vergleich der gemessenen Verbrauchswerte für den gesamten Wärme- und Strombezug (Endenergie) des Hallenbades Lünen mit Werten aus der Literatur. Die Schwankungsbreite der Literaturwerte ist durch die Größt- und Kleinstwerte (schwarze vertikale Linien) angegeben.

Bereits diese erste Orientierung zeigt deutlich, dass die Verbrauchswerte in Lünen bereits im ersten Betriebsjahr deutlich unter den Mittelwerten der Literatur liegen: Im Wärmebereich liegt der Messwert fast 70 % unter dem Literaturmittelwert, beim Strom sind es mehr als 40 %. Das erste Betriebsjahr im Lippe-Bad war, wie es bei gerade in Betrieb genommenen Neubauten generell der Fall ist, gekennzeichnet durch die Einregulierung der komplexen Gebäudetechnik. Die Auswertung der Messdaten in diesem Bericht verdeutlicht, dass im Betrieb durchaus ein weiteres Optimierungspotential vorhanden ist und in der Zukunft noch niedrigere Verbrauchswerte erwartet werden können.

Wärmeverbrauch im Hallenbad Lünen

Der Wärmeverbrauch teilt sich in drei Verbrauchsbereiche auf:

- Beckenwassererwärmung / 123,4 kWh/(m²a)
- Nachheizung Lüftung (Luftbeheizung) / 93,7 kWh/(m²a)
- Warmwasserbereitung (Duschen/Reinigung) / (35,0 kWh/(m²a)

Die Beckenwassererwärmung hat in diesem Bad mit 49 % den größten Anteil am Wärmeverbrauch. Innerhalb des zweitgrößten Teilbereichs, der Luftnachheizung, benötigt die Beheizung der vier Hallen dominante 72 % des Wärmeverbrauchs. Die geringe Differenz (2,3 %) zwischen der Wärmelieferung an das Bad und dem Wärmeverbrauch der Teilbereiche ist in der Wärmeabgabe des Leitungsnetzes sowie Messabweichungen der Wärmezähler begründet.

Eine in Lünen installierte umfangreiche Abwasseraufbereitungsanlage kann maximal etwa 70 % des Filterrückspülwassers aufbereiten und in die Beckenwasserkreisläufe einspeisen. Diese große Wassermenge (bis über 15.000 m³/a) muss nicht mit Kaltwasser von außen nachgespeist und aufgeheizt werden. Die Anlage war während der überwiegenden Zeit des Monitorings *nicht* in Betrieb. Nach technischer Anpassung soll sie zeitnah wieder angeschlossen werden. Damit einhergehend ist eine erhebliche weitere Einsparung von ca. 50 bis 60 kWh/(m²a) zu erwarten.

Wärmelieferung an das Hallenbad Lünen

Die Lieferung der Wärme für alle Verbraucher erfolgt aus diesen vier Quellen:

- Direktbezug vom Biogas-BHKW (ab Juni 2012) (33,9 %)
- Abgaswärmetauscher von zwei BHKWs (Brennwertnutzung) (33,5 %)
- Gehäuseabwärme von zwei BHKWs (16,6 %)
- Fernwärmenetz Stadt Lünen (16,0 %),

Damit ist eine primärenergetisch sehr günstige Lösung realisiert worden, weil durch die zwei direkt benachbarten BHKW-Anlagen Wärme auf niedrigem Temperaturniveau genutzt werden kann. Im Normalfall würde diese als Abwärme weggelüftet bzw. als Abgaswärme freigesetzt werden. Zudem verfügt das Fernwärmenetz aufgrund eines hohen Anteils regenerativer Energie über einen sehr niedrigen Primärenergiefaktor. Durch die hohe Effizienz des Bades selbst reicht sowohl das Temperaturniveau als auch das Mengengerüst dieser Quellen aus: Die Anlage ist ein gutes Beispiel dafür, wie Energieeffizienz bei Gebäude und Technik sowie die Nutzung erneuerbarer Energie zu Synergien führen, die eine wirklich überzeugende Gesamtlösung ermöglichen.

Stromverbrauch im Hallenbad Lünen

Die Stromversorgung des Bades wird durch Netzbezug sowie eigene Solarstromproduktion sichergestellt. Das Bad verfügt über eine große PV-Anlage auf dem Dach (91 kWp) sowie zwei im Außenbereich aufgestellte PV-Tacker (19,7 kWp). Zeitweilige Stromüberschüsse sowie die komplette Stromproduktion der PV-Tracker werden in das öffentliche Netz eingespeist. Von den verbrauchten 156 kWh/(m²a) Strom im Hallenbad konnten knapp 12 % von Solarstrom gedeckt werden. Zusätzlich wurden 6,2 kWh/(m²a) Solarstrom eingespeist (entspricht absolut über 24.200 kWh). Beim Strom liegt in diesem Fall trotz der sehr hohen Effizienz somit immer noch ein deutlich höherer Verbrauch im Hallenbad vor, als mit der PV-Anlage im Jahresdurchschnitt erzeugt werden kann. Dies unterstreicht die Notwendigkeit der Entwicklung und des Einsatzes stromeffizienter Techniken.

Den mit Abstand größten einzelnen elektrischen Verbrauchsbereich stellt die Lüftungstechnik dar (34 %), gefolgt von den Umwälzpumpen der Beckenwasserkreisläufe (24 %).

Lüftungskonzept

Zur Versorgung der unterschiedlichen Gebäudebereiche werden insgesamt sechs Lüftungsgeräte mit Nachheizregistern betrieben, welche sich im Keller des Gebäudes befinden. Eingesetzt werden zwei unterschiedliche Gerätetypen. Bei den Hallengeräten handelt es sich um eine Sonderanfertigung mit je zwei Kreuzstrom- und einem Gegenstromwärmeübertrager in Reihe. Eines der Geräte ist mit einer Wärmepumpe ausgerüstet, um der Fortluft weitere Wärme zu entziehen (Enthalpierückgewinnung). Wegen der thermisch hochwertigen Gebäudehülle ist es nicht mehr notwendig, die Pfosten-Riegel-Fassaden mit trockener Luft anzublasen.

Der Lüftungstechnik kommt in einem energieoptimierten Hallenbad eine Schlüsselfunktion zu. In der Einregulierungsphase konnte – trotz der bereits guten Ergebnisse – noch nicht das vollständige Potenzial ausgenutzt werden: Die Hallenfeuchte kann noch weiter erhöht werden, die Regelung der Geräte muss noch weiter optimiert werden.

Die Analyse zeigt außerdem, dass der Umluftvolumenstrom in Summe aller Geräte des Hallenbades im Mittel etwa 70 % beträgt, der Außenluftvolumenstrom dagegen nur 30 %. Nur Letzterer ist für die Entfeuchtung der Hallen und für die Einhaltung der Luftqualität (Abtransport von Schadstoffen) notwendig. Der Umluftvolumenstrom dagegen ist nur vorgesehen, um eine gute Durchmischung der Hallenluft sicherzustellen, wozu auch geringere Umluftvolumenströme ausreichen würden. Dies haben die durchgeführten Versuche zur Hallendurchströmung gezeigt (Nebelversuche). Ziel des Passivhaus-Konzeptes für Hallenbäder ist letztlich eine Betriebsweise vollständig ohne Umluftanteil, da dies eine erhebliche Reduktion des Stromverbrauchs der Lüftungsgeräte mit sich bringt.

Im Zuge des Monitorings wurden verschiedene Versuchsreihen zur Auswirkung der höheren Hallenfeuchte und des geringen Umluftvolumenstroms durchgeführt. Damit konnten die erheblichen Auswirkungen auf den Heizwärme- und Stromverbrauch aus der Grundlagenuntersuchung auch in der Praxis bestätigt werden.

Optimierung durch Energiebilanzierung

Die Möglichkeit, bereits während der Planungsphase den Energiebedarf eines Gebäudes verlässlich voraussagen zu können, ist eine grundlegende Voraussetzung, um hohe Energieeffizienz erreichen zu können. Sie ermöglicht die Optimierung einzelner Komponenten sowie des ganzheitlichen Gebäudekonzeptes. Die Energieströme in einem Hallenbad sind aufgrund vieler Wechselwirkungen und Regelungen sehr komplex und daher nur schwer erfassbar. Aus diesem Grund

wurde das oben erwähnte Mehrzonen-PHPP entwickelt. Das Tool wurde während der Planungsphase des Bades für die entstehenden Anforderungen angepasst und befindet sich auch weiterhin in der Entwicklung.

Die vorliegenden Messdaten aus dem Monitoring wurden verwendet, um die Annahmen, Ansätze und Berechnungsmethoden der Energiebilanz zu überprüfen und weiter zu verbessern. Nur im Bereich der Beckenwassererwärmung war eine größere Anpassung der Berechnungsannahmen notwendig. An dieser Stelle lagen die Messdaten deutlich unter den prognostizierten Werten. Die Hauptursache für diese Abweichung waren die während der Planungsphase bewusst auf der sicheren Seite eher hoch angesetzten Verdunstungsmengen, da keine verlässlichen Daten für eine plausible Einschätzung vorlagen. Die vorgestellten Messdaten bestätigen, dass die mittleren Verdunstungsmengen in der Praxis während der Nutzungsstunden deutlich niedriger ausfallen als in der [VDI 2089] zur Auslegung der Lüftungsgeräte angegeben (dabei handelt es sich korrekterweise um die Spitzenlast). Die Größenordnung der tatsächlich vorliegenden Messwerte liegt zwischen ca. 20 % und 40 % der VDI-Auslegungsdaten, je nach betrachtetem Beckenkreislauf und gegebenen Randbedingungen.

Abgesehen von der Beckenwassererwärmung wurde die Größenordnung der restlichen Hauptverbraucher (Raumheizung, Wassererwärmung und Strom) in der Energiebilanz der Planungsphase korrekt abgebildet. Die Übereinstimmung der Messdaten mit den Berechnungen bei angepassten Randbedingungen ist im Rahmen der vorhandenen Unsicherheiten gut, womit der Rechenansatz prinzipiell bestätigt wird und sich eine validierte Grundlage für Folgeprojekte ergibt.

Gesamtbewertung

Das Lünener Hallenbad hat trotz der zu erwartenden Abweichungen aufgrund der typischen Effekte der Einregulierungszeit einen sehr guten Energiekennwert im ersten Messjahr erreicht. Die Maßnahmen aus der Planung haben den beabsichtigten Erfolg erzielt. Wie an verschiedenen Stellen in diesem Bericht beschrieben, ist die energetische Optimierung hinsichtlich der Betriebsweise trotzdem noch nicht ausgeschöpft. Die aktualisierte Energiebilanz für das Bad unter den angestrebten Randbedingungen (z.B. 64 % Hallenfeuchte, reduzierte Umluftvolumenströme, 70 % Filterspülwasseraufbereitung) zeigt, dass eine weitere betriebliche Reduktion des Endenergiebedarfs um bis zu ca. 100 kWh/(m²a) möglich ist. Den größten Anteil dieser orientierenden Berechnung macht hierbei die Einsparung durch die Filterspülwasseraufbereitung aus. Auch der Strombedarf kann durch Reduktion der Umluftmenge deutlich weiter reduziert werden, was bei der primärenergetischen Betrachtung von hoher Relevanz ist.

Das Monitoring wurde im Auftrag der Bädergesellschaft Lünen mit Fördermitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführt.

2 Gebäudebeschreibung

Das Hallenbad „Lippe-Bad Lünen“ wurde als Passivhaus-Hallenbad nach dem Konzept der Grundlagenuntersuchung des Passivhaus Instituts [Schulz et al. 2009] errichtet und ging im September 2011 in Betrieb.

Die Grundgedanken des Konzeptes bestehen aus folgenden Bausteinen: Durch die thermisch sehr hochwertige Gebäudehülle kann der Transmissionswärmebedarf gegenüber Standard-Neubauten signifikant gesenkt werden. Aus der thermischen Verbesserung der Gebäudehülle, insbesondere auch der transparenten Bauteile, resultieren höhere minimale Oberflächentemperaturen, wodurch die Möglichkeit gegeben ist, das Bad mit höheren Luftfeuchten zu betreiben (bis zu 64% rF). Diese Maßnahme senkt die Verluste durch Verdunstung von Beckenwasser und den entstehenden Entfeuchtungsbedarf erheblich. Durch den zusätzlichen Einsatz hochwertiger Lüftungswärmetauscher sowie intelligenter Lüftungssteuerung werden die Lüftungswärmeverluste deutlich reduziert.

Im Lippe-Bad nutzen die verschiedenen Heizkreise die Niedertemperaturwärme aus der Gehäusekühlung (Raumabwärme) sowie der Abgaskühlung (Brennwertnutzung) der beiden unmittelbar benachbarten Blockheizkraftwerke des Fernwärmenetzes Lünen. Damit wurde eine primärenergetisch sehr günstige Wärmeversorgung realisiert. Des Weiteren werden diverse energieeffiziente elektrische Anlagen eingesetzt (Beleuchtung, Pumpen, Motoren). Auch im Bereich der Wassertechnik sind diverse Optimierungen realisiert worden.

Die Energiebezugsfläche (EBF) des gesamten Hallenbades beträgt **3.912 m²**, die Wasserfläche der insgesamt fünf Becken **850 m²**. Es gibt ein kombiniertes Eltern-Kind- und Warmbecken (175 m²), ein Lehrbecken (100 m²) mit Hubboden sowie zwei Sportbecken mit insgesamt 9 Bahnen (Länge: 25 m, 575 m²). Die Beheizung findet ausschließlich über die Lüftung statt, statische Heizflächen sind nicht vorhanden, auch keine Fußbodenheizung.

Das Gebäude wurde von dem Architekturbüro „nps tchoban voss“ (npstv) aus Hamburg entworfen und geplant. Die Planung der gesamten Haus-, Lüftungs- und Schwimmbadtechnik erfolgte durch das Ingenieurbüro ENERATIO aus Hamburg. Die energetische Beratung und Qualitätssicherung erfolgte durch das Passivhaus Institut, Darmstadt. Bauherrin ist die Bädergesellschaft Lünen.

Details zum Gebäude, zur integralen Planung und Realisierung des Projektes sind in [BGL 2011] dargestellt. Die folgenden Abbildungen geben einen Eindruck vom Gebäude:

Abbildung 3: Westfassade des Bades mit Haupteingang (links) und Halle 1+2 (rechts unten)

Abbildung 4: Luftbild des Bades (Quelle: Bädergesellschaft Lünen)

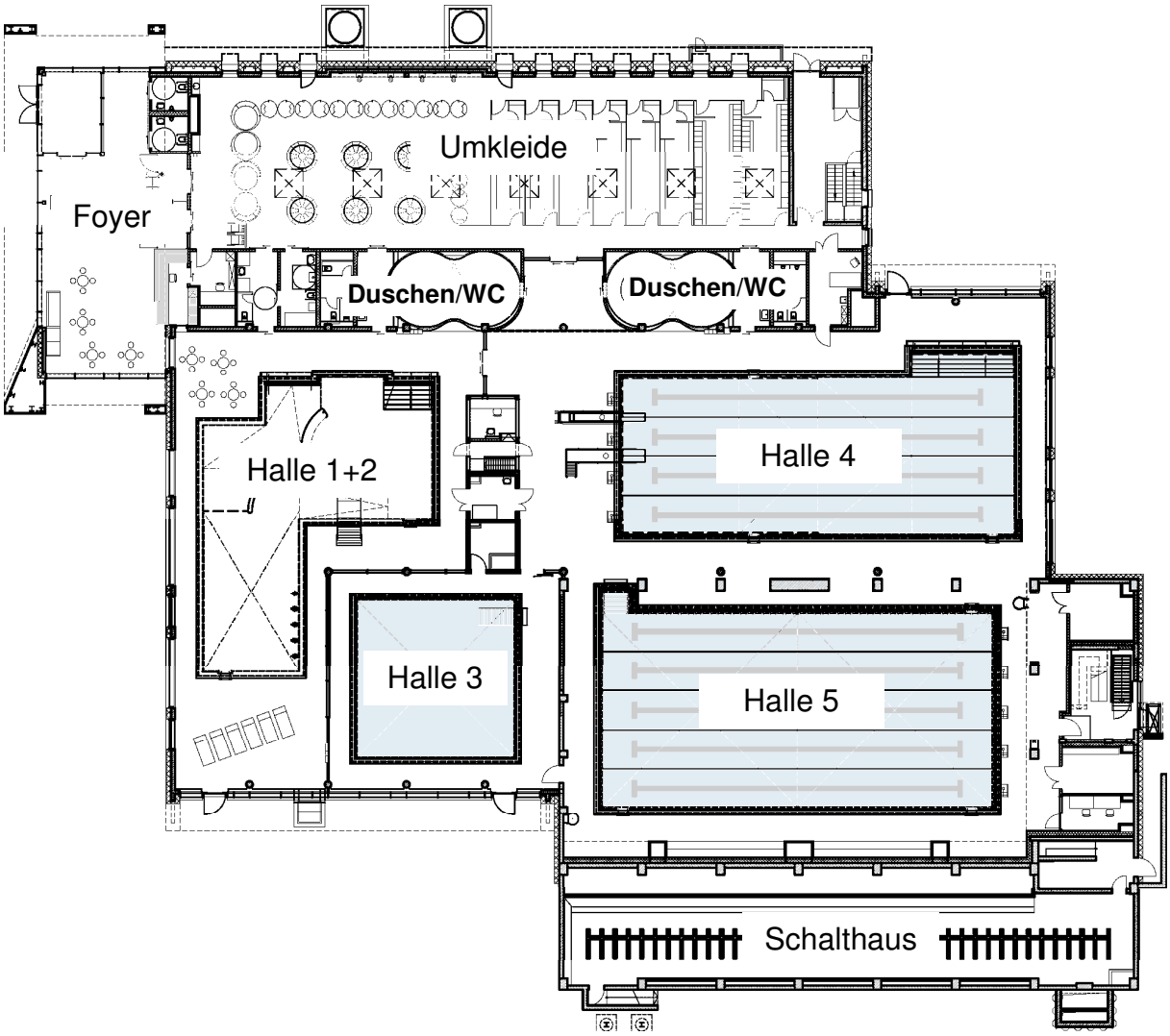


Abbildung 5: EG Grundriss des Gebäudes mit den unterschiedlichen Nutzungsbereichen (Quelle: npstv)

Abbildung 6: Innenansichten von Halle 1+2 mit dem Freizeitbecken und Eltern-Kind-Bereich (links von Süden, rechts von Osten)

Abbildung 7: **Innenansichten von Halle 3 mit dem Lehrschwimmbecken mit Hubboden (links von Süden, rechts von Nord-Osten mit Zuluftelement)**

Abbildung 8: **Innenansichten von Halle 4 mit vier 25-Meter-Bahnen (links von Westen, rechts von Süden)**

Abbildung 9: **Innenansichten von Halle 5 (im Altbauteil) mit fünf 25-Meter-Bahnen (links von Osten, rechts von Westen)**

Abbildung 10: Duschen (links) und Umkleide (rechts)

Abbildung 11: Eingangsbereich/Foyer mit dem Kassenbereich

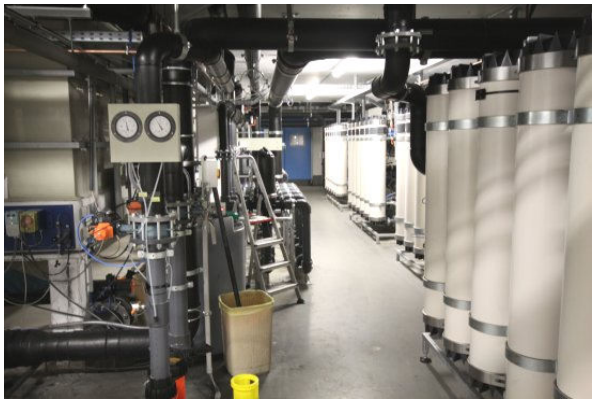


Abbildung 12: Wassertechnik (Filter) im Keller (links) und Lüftungsgeräte im Keller (rechts)

2.1 Luftdichtheit

Die Luftdichtheit eines Schwimmbades ist aufgrund der erhöhten Raumluftfeuchte von ganz besonderer Wichtigkeit. Aufgrund dieser Tatsache und der Größe des Gebäudes (Luftvolumen: 23.962 m³) wurde der Anforderungswert bereits in der Planungszeit auf n_{50} = 0,2 1/h festgelegt. Bei großen Gebäuden ist - aufgrund des deutlich günstigeren A/V-Verhältnisses (hier 0,39 1/m) - der n_{50}-Wert nur von untergeordneter Aussagekraft. Von Bedeutung ist der hüllflächenbezogene Kennwert q_{50}

mit der Einheit [m³/(h m²)]. Bei diesem Gebäude ergibt sich bei der Anforderung n_{50} = 0,2 1/h der Kennwert zu q_{50} = 0,52 m³/(h m²).

Vom PHI wurde am 12.08.2011 die erste Luftdichtheitsmessung des Gesamtgebäudes mit intensiver, mehrstündiger Leckagesuche durchgeführt. Es wurden neben kleineren Einzelleckagen insbesondere Undichtheiten an der Pfosten-Riegel-Fassade sowie im Deckenbereich von Halle 5 zum bisher ungenutzten Bürobereich lokalisiert (siehe Abbildung 14 und Abbildung 15). Diese vorläufige Messung ergab einen Messwert der deutlich über dem Zielwert von n_{50} = 0,2 1/h lag.

Bei der nachträglichen Klärung wurde ein systematischer Fehler beim Anschluss aller Oberlichter im Umkleidebereich ausgemacht und später behoben. Weitere Kontrollmessungen durch einen Dienstleister ergaben weitere Verbesserungen der Luftdichtheit. Die Leckagen im Dachbereich von Halle 5 konnten bisher nicht nachgearbeitet werden. Dies ist für die nächste Revisionsphase geplant. Unter anderem auch aus diesen Gründen können in dieser Halle bisher nicht die geplanten, erhöhten Raumluftfeuchten verwirklicht werden.

Abbildung 13: Beispiele für die Leckagesuche bei 50 Pa Unterdruck im Bereich der Dachgaube (Halle 1+2) (links) und an den Fenstern im oberen Bereich von Halle 5 (mitte) sowie die abgelöste Verklebung an der Abdichtung der Pfosten-Riegel-Fassade zur Brüstung (rechts)

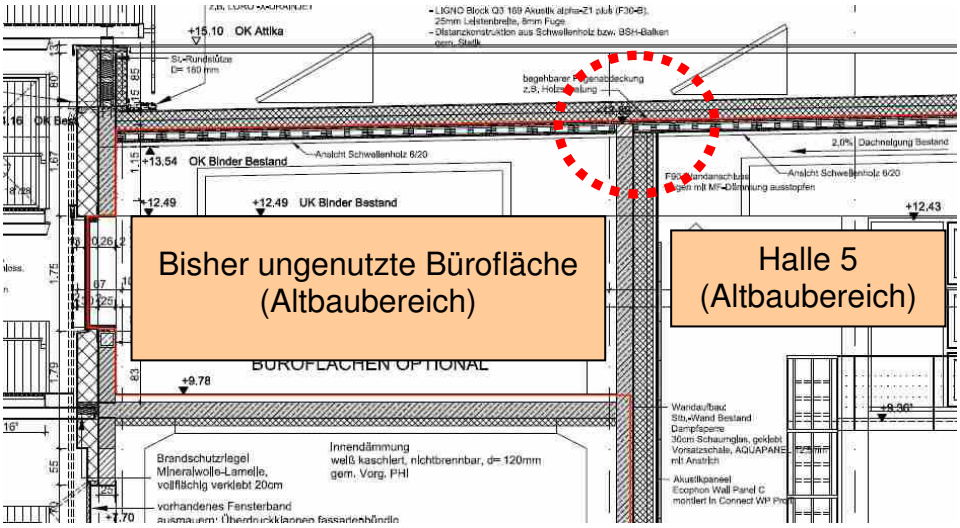


Abbildung 14: Planausschnitt vom Deckenbereich im Altbauteil von Halle 5 und dem bisher ungenutzten Bürobereich. Im Deckenübergang über der Trennwand wurde auf der gesamten Länge eine unzureichende Abdichtung festgestellt (Quelle: npstv)

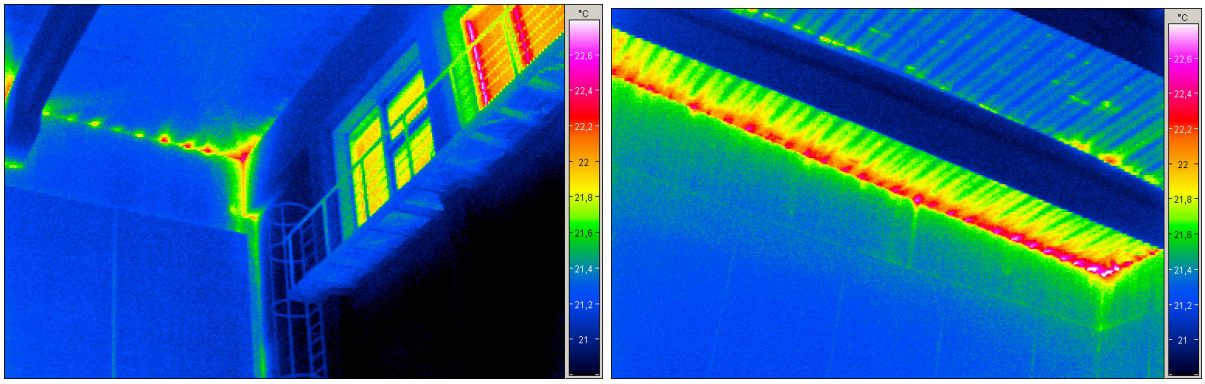


Abbildung 15: Thermographien der Leckagen im Deckenbereich von Halle 5 (Altbauteil) bei Unterdruckbedingungen (50 Pa). Zur Zeit der Messung war das Bad unbeheizt und die Luft vom angegliedertem Nebenbereich wärmer als die Hallenluft.

2.2 Wärmeversorgung

Die Wärmeversorgung des Hallenbades zur Beheizung und Wassererwärmung erfolgt aus unterschiedlichen Wärmequellen. Im direkt dem Hallenbad angeschlossenen Altbauteil (früheres Heizwerk) befindet sich das Schalthaus mit der Elektroverteilung zur Versorgung für einen Teil der Stadt Lünen. In dem Keller unter diesem Bereich befinden sich zwei BHKW-Anlagen (Erd- und Biogas), welche das Fernwärmenetz der Stadt Lünen versorgen. Das Biogas-BHKW ist zudem direkt an die Wärmeversorgung des Bades angeschlossen.

Die Wärmeversorgung des hydraulischen Wärmenetzes („HT“) des Bades für die Beheizung von Lufterhitzern und Wassererwärmung erfolgt auf drei Wegen:

- Fernwärmenetz der Stadt Lünen
- Abgaswärmetauscher vom Erd- und Biogas-BHKW (Brennwertnutzung)
- Wärmelieferung Biogas-BHKW direkt (Nachrüstung Juni 2012)

Durch die unmittelbar räumliche Nähe der Versorgungsanlagen und dem Bedarf an Wärmenutzung auf niedrigem Temperaturniveau zur Beckenwassererwärmung (ca. 28 bis 32°C) war es möglich, auch Wärmequellen zu erschließen, welche sonst nicht sinnvoll genutzt werden könnten (Brennwertnutzung Abgas). Es wurde zusätzlich noch ein zweites hydraulisches Netz, nur zur Grundlastversorgung der drei Beckenwasserkreisläufe installiert. Dieses Netz wird aus der Abwärme der **Gehäusekühlung** der beiden BHKWs gespeist und verfügt damit über ein niedrigeres Temperaturniveau (bezeichnet als „NT“ für „Niedertemperatur“). Diese Wärme wird jeweils vor der Nacherwärmung über das HT-Netz in die Beckenwasserkreisläufe eingespeist (siehe auch Abbildung 19 im folgenden Abschnitt).

Durch die Ausnutzung dieser Wärmequellen und dem Einsatz von Biogas ergeben sich für das Bad sehr günstige Primärenergiekennwerte (vgl. [BGL 2011]).

Die Beheizung des Bades erfolgt ausschließlich über die Nacherhitzung der Luft in den Lüftungsgeräten. Statische Heizflächen, Wärmebänke oder Fußbodenheizung sind nicht vorhanden.

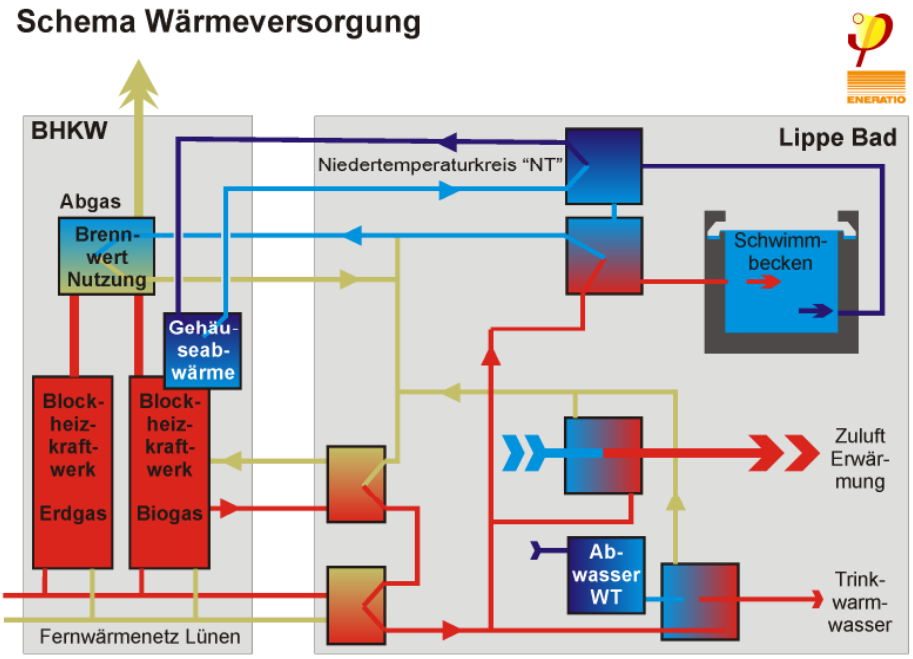


Abbildung 16: Schema der Wärmeversorgung des Hallenbades aus dem Fernwärmenetz, durch das Biogas-BHKW (direkt), Abgas-Brennwertnutzung beider BHKW-Anlagen, sowie der Abwärme aus den beiden BHKW-Gehäusen (angepasst nach [BGL 2011])

Abbildung 17: Heizungsraum im Keller (Altbaubereich) mit den beiden BHKW-Anlagen (links) und einem der beiden Abgaswärmetauscher (rechts)

Die unterschiedlichen Bereiche der Wärmeversorgung werden mittels Wärmezählern (WMZ) gemessen. Dazu sind insgesamt 19 Wärmezähler im Einsatz (siehe Tabelle 1). Die Wärmelieferung wurde im Juni 2012 durch einen direkten Wärmebezug vom Biogas-BHKW ergänzt. Zuvor speisten die beiden BHKWs nur direkt in das Fernwärmenetz ein und das Bad wurde aus diesem Netz versorgt. Der neue Zähler wurde am 21.09.2012 auf die GLT-Anlage aufgeschaltet. Der von diesem Zusatzzähler gemessene Verbrauch zwischen Einbau und Aufschaltung wurde gleichmäßig auf diesen Zeitraum verteilt.

Für die vollständige Erfassung der bezogenen Energie sind alle vier Versorgungszähler notwendig (Bilanzerstellung), für die Aufteilung nach den Abnahmebereichen alle restlichen Wärmezähler. Aufgrund von technischen Verzögerungen kann die vollständige Bilanz erst nach einigen Betriebsmonaten berechnet werden.

Tabelle 1: Einsatzbereiche und Anzahl der verwendeten Wärmezähler

Bereich	Anzahl	Teilbereiche
Wärmeversorgung HT	4 Stück	Fernwärme, Abgaswärmetauscher, Wärme Biogas-BHKW Direktbezug
Lüftungsgeräte	6 Stück	Luftheizregister
Nacherhitzer Lüftung	2 Stück	Luftheizregister Duschen
Warmwasserbereitung	1 Stück	Duschen und Kleinverbraucher
Beckenwasser HT	3 Stück	Drei Kreisläufe
Beckenwasser NT	3 Stück	Drei Kreisläufe (Gehäuseabwärme BHKW)
Summe	**19 Stück**	

Das NT-Netz wird durch die Gehäuseabwärme der beiden BHKWs versorgt. Dabei wird nicht zwischen Lieferung (von den Gehäusen) und den einzelnen Verbrauchsmessungen (= Abnahme) unterschieden. Es gibt nur die drei Wärmezähler vor den drei NT-Wärmeübertragern der Beckenwasserkreisläufe (= Verbraucher) (siehe nächster Abschnitt). Der Leitungsverlust wird aufgrund der geringen Vorlauftemperatur von ca. 32 bis 34 °C und der Kellertemperatur von knapp 27 °C verhältnismäßig niedrig ausfallen. Bei der Auswertung wurde der Leitungsverlust vernachlässigt und die gemessenen Verbrauchsmengen der drei WMZ identisch als Lieferwert verwendet.

2.3 Beckenwasserkreisläufe

Das Hallenbad verfügt über 4 Becken, wobei es sich bei dem einen um ein kombiniertes Becken mit zwei Bereichen handelt („Warm- und Eltern-Kind-Becken“).

Tabelle 2: Wasserflächen, -volumen und Beckentiefen

	Wasserfläche [m²] (inklusive Treppen)	Wasservolumen [m³]	Wassertiefe [m]
Becken 1+2 (Warm- und Eltern-Kind-Becken)	175	185	0,3 bis 1,35 m
Becken 3 (Lehrschwimmbecken mit Hubboden)	100	230	2,3 m
Becken 4 (Sportbecken 1 mit Sprungturm, 4 x 25 m Bahnen)	260	509	bis 3,5 m
Becken 5 (Sportbecken 2; 5 x 25 m Bahnen)	315	565	1,8 m
Summe	**850**	**1.489**	**---**

Der Betrieb der Becken erfolgt über drei getrennte Beckenwasserkreisläufe für Becken 1+2, Becken 3 und Becken 4+5. Jeweils sind Schwallwasserbehälter, Pumpengruppe, Wasseraufbereitung sowie Nachheizung über eine Niedertemperatur-Wärmetauscher (NT) und einen nachgeschalteten Wärmetauscher des Haupt-Heizungsnetzes (HT) installiert. Die Chlorung des Badewassers erfolgt im Lippe-Bad durch die Aufspaltung des zugesetzten Soleanteils mittels Elektrolysezellen. Die schematische Darstellung eines Wasserkreislaufs ist in Abbildung 18, die Anordnung der Nachheizung ist in Abbildung 19 dargestellt.

Zur Verbesserungen der Beckenwasserqualität wurde die temporäre Zudosierung von Aktivkohle nachgerüstet, welche ursprünglich nicht vorgesehen war. Dann wurden in allen drei Beckenwasserkreisläufen Kornkohlefilter nachgerüstet und die Zudosierung wieder rückgebaut (zuletzt Ende April 2013). Die Aufbereitung des

Rückspülwassers wird seit dem 09.07.2012 nicht betrieben. Zur Zeit muss daher das Spülwasser komplett als Abwasser entsorgt werden. Geplant waren etwa 70% des Rückspülwassers mit der Anlage aufzubereiten. Aus diesem Grund wird z.Z. deutlich mehr Frischwasser benötigt als geplant und damit ist auch ein zusätzlicher Energieaufwand zur Aufheizung des Frischwassers notwendig. Die Wasseraufbereitung soll nach Anpassung an die geänderten Filtergrößen etc. wieder in Betrieb genommen werden.

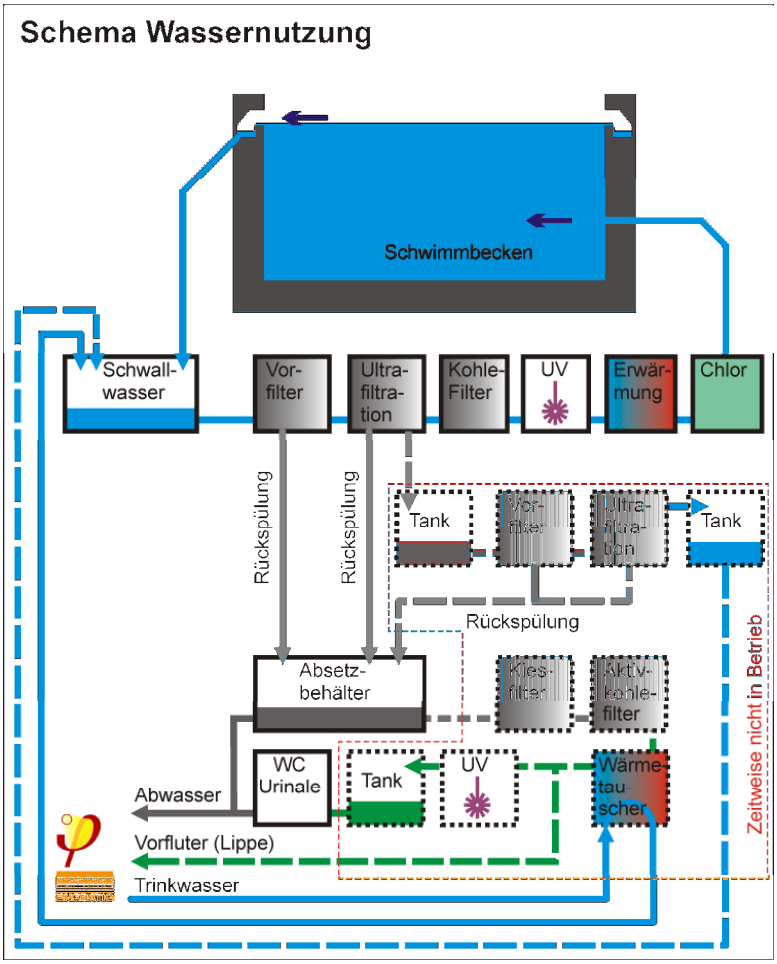


Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Beckenwasserkreislaufes im Lippe-Bad. Der Bereich der Aufbereitung des Rückspülwassers ist seit Juli 2012 nicht in Betrieb (ergänzt nach [BGL 2011]).

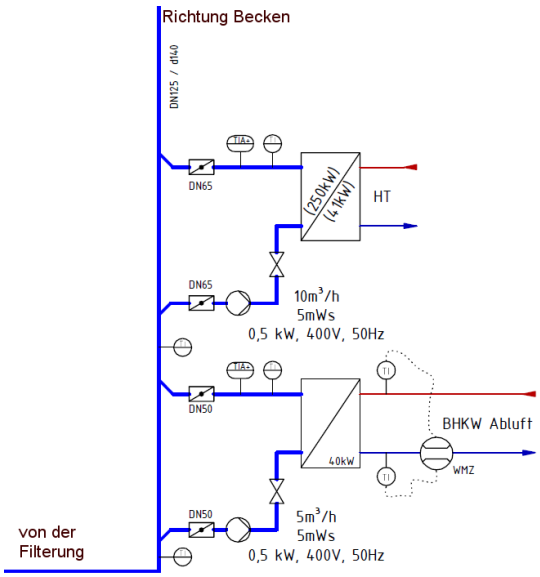


Abbildung 19: Links: Detail der Wärmeversorgung mit NT- („BHKW Abluft“) und HT-Netz aus der Ausführungsplanung zum Beckenwasserkreislauf von Becken 3 (Quelle: Eneratio). Rechts: Foto von einem Wärmeübertrager des Beckenwasserkreislaufs.

2.4 Lüftungstechnik

Zur Versorgung der unterschiedlichen Gebäudebereiche mit Außenluft, zur Luftentfeuchtung der Schwimmhallen sowie zur Beheizung werden insgesamt sechs Lüftungsgeräte mit Nachheizregistern betrieben, welche sich im Keller des Gebäudes befinden. Die Ansaugung der Außenluft und das Abführen der Fortluft erfolgt gemeinsam für alle Anlagen über zwei zentrale Bauwerke. Diese werden mit zwei kurzen (wenige Meter) Kanalschleifen angefahren, welche durch das Erdreich verlegt wurden.

Abbildung 20: Lüftungstürme für die zentrale Außen- und Fortluft aller sechs Lüftungsanlagen (Links) und Lüftungsgerät „Umkleiden/Duschen“ im Keller (rechts)

Bei den vier Hallengeräten handelt es sich um Anlagen der Fa. Menerga vom Typ „ThermoCond“ in modifizierter Bauweise und Regelung. Das Gerät für Halle 1+2 verfügt zusätzlich über eine Wärmepumpe mit der Wärmequelle (Verdampfer) in der Fortluft nach dem Wärmeübertrager und dem Kondensator im Zuluftstrom vor dem Nachheizregister.

Die beiden Anlagen für Umkleiden, Duschen, Foyer und Nebenräume inkl. Keller etc. sind vom Typ „Dosolair“ des gleichen Herstellers. Beim Bereich Umkleide/Duschen gibt es zusätzliche Stützventilatoren im Keller, welche den Lufttransport von den Umkleiden in die Duschen sicherstellen. In diesen beiden Strängen (Dusche und WC Damen sowie Herren) werden nach den Zusatzventilatoren zusätzliche Nachheizregister betrieben, um die höhere Lufttemperatur in den Duschen zu realisieren.

Abbildung 21: Kanalführung mit Zusatzventilator und Nacherhitzer für die Zuluft Duschen Herren

Tabelle 3: Übersicht Lüftungsgeräte (Bereiche, Typen und Volumenströme)

Anlage	Gerätetyp	Wärmeübertrager	Auslegungs-volumenstrom
Halle 1+2	ThermoCond	2 Kreuzstrom + 1 Gegenstrom in Reihe	14.500 m³
Halle 3	ThermoCond		8.150 m³
Halle 4	ThermoCond		12.000 m³
Halle 5	ThermoCond		15.100 m³
Umkleide/ Duschen	Dosolair	2 Kreuzstrom in Reihe	10.000 m³
Nebenräume	Dosolair		8.875 m³
		Summe	**68.625 m³**

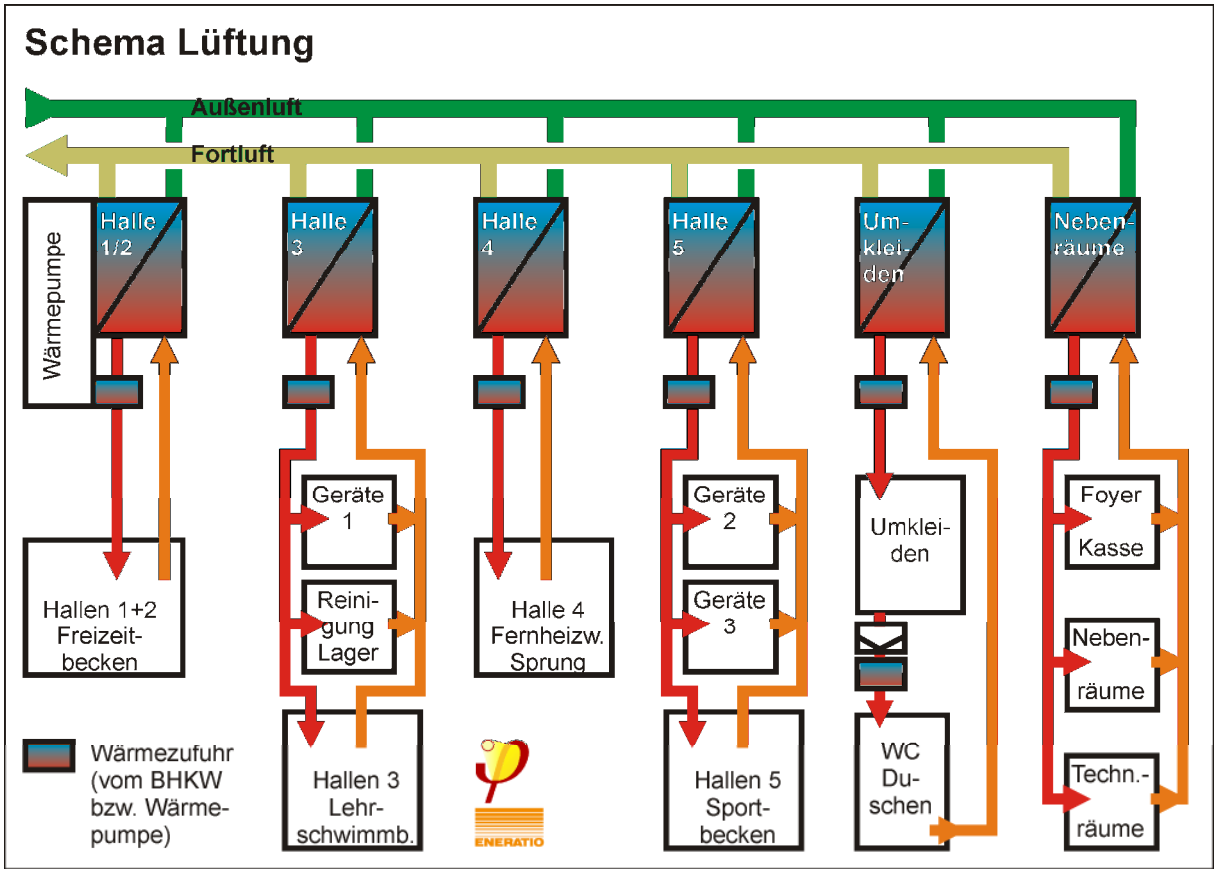


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Lüftungstechnik des Hallenbades (ergänzt nach [BGL 2011])

Aufgrund der thermisch hochwertigen Gebäudehülle ist es nicht mehr notwendig die Pfosten-Riegel-Fassaden mit trockener Luft anzublasen. Üblicherweise werden in einem Bad die Lüftungsgeräte während der Betriebszeiten immer mit dem Auslegungsvolumenstrom betrieben. Dabei wird der Außen- und Umluftanteil mit Hilfe von Klappen geregelt. Dieser dauerhaft hohe Betrieb verursacht einen hohen Stromverbrauch für die Luftförderung. Die vom PHI angestrebte Betriebsweise der

Hallengeräte verzichtet daher vollständig auf einen Umluftanteil. Dies konnte im Lippe-Bad bereits in der Planungsplanungsphase nicht vollständig erreicht werden. Es wurde aber ein deutlich reduzierter Umluftvolumenstrom vorgesehen. Das Kanalnetz inkl. Steuerung der Lüftungstechnik ist daher für die vier Hallen bereits in der Planung so angelegt worden, dass Klappen im Kanalnetz einen reduzierten Luftvolumenstrom (bis etwa halbe Luftmenge) ermöglichen. Durch die Klappen wird sichergestellt, dass eine noch ausreichende Druckdifferenz an der dann reduzierten Anzahl der Weitwurfdüsen vorhanden ist (Motorklappen siehe Abbildung 23). Diese Betriebsweise wurde später getestet (siehe Abschnitt 4.5.5).

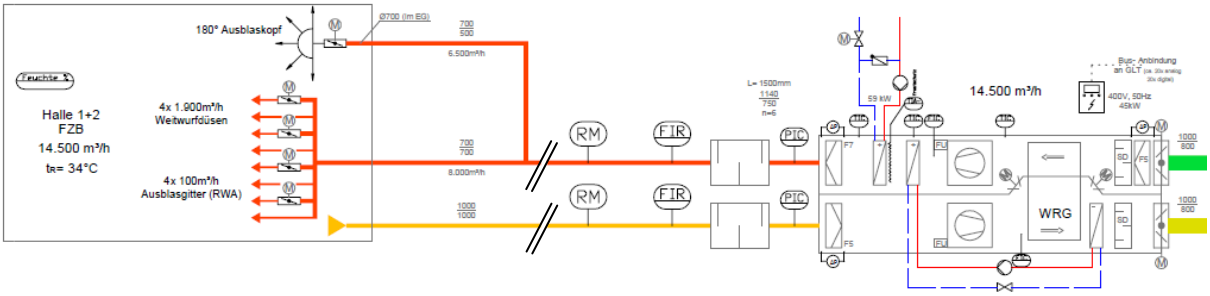


Abbildung 23: Ausschnitt vom Gerät Halle 1+2 aus der „Ausführungsplanung Schema Lüftung“ (Quelle: Eneratio)

Abbildung 24: Weitwurfdüsen für die Zuluft in Halle 3. Die unteren und oberen beiden Reihen der Düsen können getrennt angefahren werden. Links im Bild befindet sich die Abluftöffnung (mit Lamellen).

In den Bereichen Foyer und Umkleide bzw. Duschen sind CO_2- bzw. Feuchtesensoren mit einer entsprechenden Regelung realisiert worden. Damit werden geringere Volumenströme als im normalen Regelbetrieb möglich.

3 Messtechnik

Im Gebäude ist eine Gebäude-Leit-Technik (GLT) realisiert, mit der der gesamte Betrieb des Gebäudes (Heizung, Wassertechnik, Beleuchtung etc.) geregelt wird bzw. bei der die Informationen aus gesonderten Regelungen zusammenlaufen und Sollwerte vorgegeben werden. Der Leitrechner wird auch genutzt um alle im Bad befindlichen Zähler und Sensoren auszulesen. Zur Speicherung der ca. 700 Kanäle ist durch die GLT-Firma Hermes ein zweiter PC eingesetzt worden, welcher ebenfalls per Fernzugriff erreichbar ist. Für das Monitoring sind diverse zusätzliche Zähler und Sensoren montiert worden, von denen die für das Monitoring entscheidenden hier beschrieben werden.

3.1 Temperatur- und Feuchtemessung in den Räumen

Die Messung der Raumluftparameter Temperatur und Feuchte erfolgt im Gebäude überwiegend mittels der Kombi-Sensoren vom Typ LC-FTA54VV des Herstellers Fa. Thermokon. Bei der Dauermessung via GLT sind 36 Kombi-Sensoren und sieben Temperatur-Sensoren in den Hallen, Umkleiden, Duschen, Foyer und Nebenräumen im Einsatz. An den Verglasungen von Fenstern und Türen in den Hallen 1+2, 3 und 4 sind insgesamt sechs Oberflächensensoren montiert (Fa. Thermokon, Typ OF14).

Abbildung 25: Kombisensor zur Temperatur-und Feuchtemessung der Raumluft

Tabelle 4: Anzahl der im Gebäude eingesetzten Sensoren zur Messung der Raumluftparameter in den Räumen/Hallen und der Oberflächentemperatur der Verglasung

Anzahl	Kombi-Sensoren (Temp./rF)	Temperatur-Sensoren	Oberflächentemperatur-Sensoren
Halle 1+2	10	-	2
Halle 3	6	-	2
Halle 4	3	-	2
Halle 5	3	-	-
Umkleide, Duschen	8	4	-
Nebenräume, Foyer	6	3	-
Summe	**36**	**7**	**6**

In den Hallen 1+2 und 3 sind an fünf Wandbereichen jeweils drei Kombi-Sensoren übereinander angeordnet (z.B. in ca. 2, 4 und 6 m Höhe) um Aussagen zu möglichen Schichtungen machen zu können (siehe auch Abbildung 26 im nächsten Abschnitt).

3.1.1 Kalibrierung der Sensoren

Für eine wissenschaftliche Messung ist die Qualität der eingesetzten Sensoren nicht ausreichend, außerdem können Einflüsse durch unterschiedliche Kabellängen nicht ausgeschlossen werden. Daher wurden am 28. und 29.03.2012 mit Datenloggern Kalibriermessungen an allen zugänglichen Temperatur-Feuchte-Sensoren und Temperatur-Sensoren durchgeführt. Es wurden 28 Kombi-Sensoren und vier Temperatur-Sensoren vermessen, insgesamt konnten damit 60 Messkanäle überprüft und kalibriert werden. Die dazu eingesetzten 16 Datenlogger (Fa. Onset, Typ: HOBO Pro V2) wurden vorher in der Klimakammer des PHI bei zwei unterschiedlichen Temperaturen und relativen Feuchten mit Referenzgeräten (Fa. Ahlborn, Temperatursensor ZA 9030-FS2 und Psychrometer FN A846) kalibriert.

Bei der Kalibrierung im Lippe-Bad wurden die Sensoren der Datenlogger direkt an dem jeweiligen Sensor der Dauermessung positioniert und mindestens eine Stunde Messdaten aufgenommen (Messintervall 1 Minute). Die entsprechenden Messdaten der Dauermessung (GLT) wurden mit den Messdaten verglichen und Offsetwerte ermittelt. Alle Messdaten werden mit diesen Kalibrierwerten vor der weiteren Verwendung verrechnet.

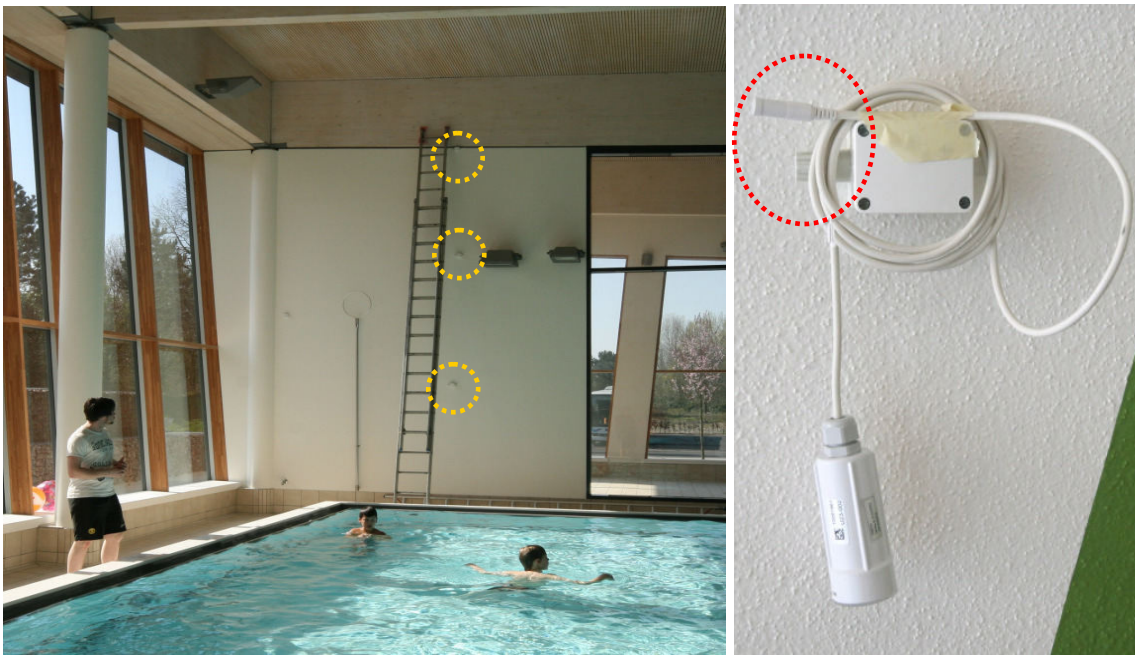


Abbildung 26: Kalibrierung der Temperatur-Feuchte-Sensoren. Bild links: Position von drei übereinander angeordneten Sensoren in Halle 3 vor der Verteilung der Datenlogger. Bild rechts: Kalibrierung des Wandsensors (Dauermessung) mit einem Datenlogger; die beiden Messelemente befinden sich im gestrichelten Kreis.

Kalibrierung der Oberflächensensoren

Die Kalibrierung der Oberflächensensoren erfolgte ebenfalls durch Referenzmessungen an allen sechs Einzelsensoren. Als Referenz wurden Pt100 Foliensensoren der Fa. Ahlborn (Typ FP 685) verwendet. Diese wurden vorher gesondert im Wasserbad kalibriert. In den Hallen wurden sie direkt neben den Dauermesspunkten auf der Verglasung fixiert und es wurden über einige Nachtstunden Vergleichsmessungen durchgeführt. Aufgrund der ganz unterschiedlichen Masse der Sensoren (Folie bzw. massiver Alukörper) wirkt sich Sonneneinstrahlung zeitlich ganz unterschiedlich aus. Daher wurden nur Messdaten der Nachtstunden zur Kalibrierung herangezogen.

Abbildung 27: Fensteroberflächensensor direkt an Rand der Verglasung (Alukörper) mit dem darüber mit Klebeband fixierten Oberflächensensor zur Kalibriermessung.

3.1.2 Hallen-Mittelwerte: Temperatur und Feuchte

In den Hallen gibt es, wie oben beschrieben, unterschiedliche Anzahlen von Temperatur- und Feuchtesensoren zur Messung der Raumluftbedingungen. Für die Aussage der mittleren Hallenfeuchte bzw. -temperatur muss definiert werden, was darunter zu verstehen ist.

Bei der Betrachtung der sommerlichen Temperaturmessdaten ist aufgefallen, dass einige der fensternahen Sensoren in Halle 1+2 sowie 3 direkt von der Sonne beschienen werden und damit Temperaturen deutlich über der Hallenlufttemperatur anzeigen (Abbildung 28). Die von den Sensoren gemessenen relativen Feuchten fallen durch diese Erwärmung deutlich ab (Abbildung 29). Bei der Mittelwertsbildung würde sich damit eine Verfälschung der, im Zusammenhang der Untersuchung eigentlich interessanten, mittleren Hallenfeuchte ergeben.

Aus diesem Grund wird die - in dieser Untersuchung weiter verwendete - mittlere Hallentemperatur aus den nicht direkt von der Sonne beeinflussten Sensoren durch einfache Mittelwertsbildung errechnet. Die Berechnung der mittleren relativen Hallenfeuchte erfolgt folgendermaßen: Die relativen Feuchten eines jeden Sensors (auch denen von der Sonne beeinflussten) werden mit den zugehörigen Temperaturen jeweils in absolute Feuchten umgerechnet. Bei den absoluten Feuchten wirkt sich die Sonnenstrahlung nicht störend aus, da diese aus den zusammengehörenden Temperatur- und rel. Feuchtedaten verrechnet werden. Die so berechneten absoluten Feuchten einer Halle werden zu einer mittleren absoluten Raumluftfeuchte gemittelt (Abbildung 30). Diese „mittlere absolute Feuchte“ der Halle wird mit der mittleren Hallentemperatur (siehe oben) zur mittleren relativen Hallenfeuchte umgerechnet.

In Halle 4 und 5 ist das beschriebene Vorgehen nicht notwendig, da dort die Sensoren nicht direkt dem Sonnenlicht ausgesetzt sind. Hier kann die mittlere relative Feuchte durch einfache Mittelwertsbildung der Messwerte erfolgen.

Die beiden Kombisensoren in den Gauben von Halle 1+2 und 4 werden bei der beschriebenen Mittelwertsbildung nicht berücksichtigt. Sie dienen insbesondere zur Überwachung des Bauteilschutzes in diesen exponierten Bereichen. Im Abschnitt 4.3 zeigt sich später, dass in diesen Bereichen keine kritischen Temperaturen erreicht werden.

Die Luftbedingungen an den unterschiedlichen Messorten unterscheiden sich durch die Position (Außen- oder Innenwand, Höhe, Entfernung vom Becken) sowie den Einfluss der Luftströmung (Überwiegend im Zuluft- Überström- oder Abluftbereich).

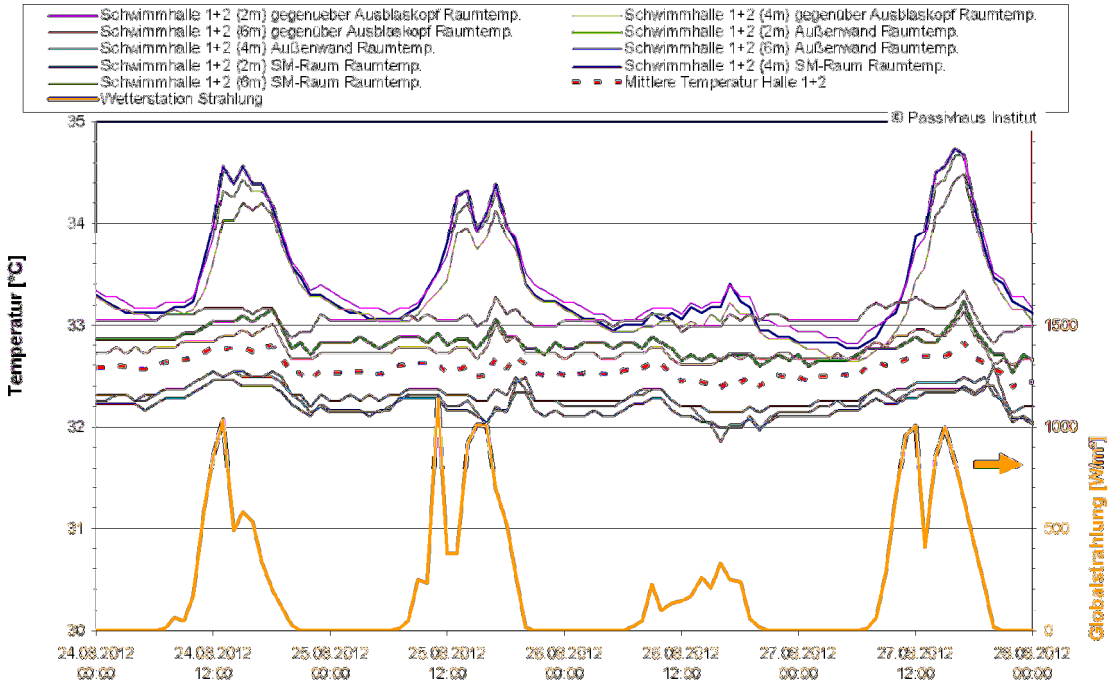


Abbildung 28: Raumlufttemperaturen der neun Sensoren in Halle 1+2, die „mittlere Hallentemperatur“ (siehe Text) sowie die Globalstrahlung vom 24. bis zum 27. August 2012 (Stundenmittelwerte).

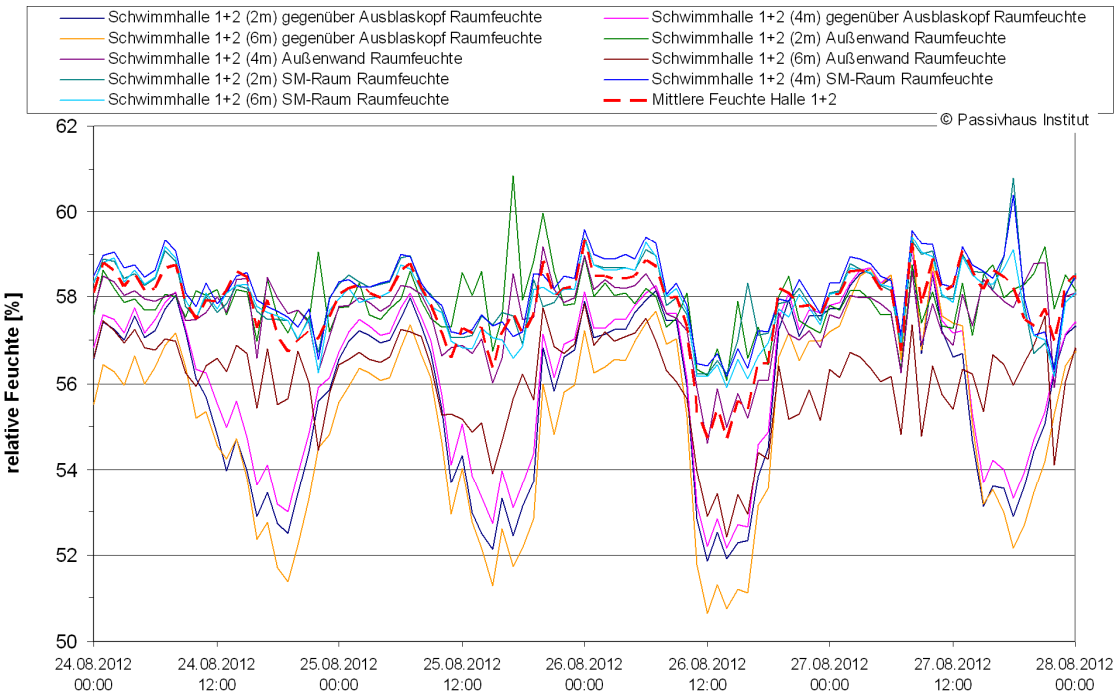


Abbildung 29: Relative Raumluftfeuchten der neun Sensoren in Halle 1+2 und die „mittlere rel. Hallenfeuchte“ (siehe Text) vom 24. bis zum 27. August 2012 (Stundenmittelwerte).

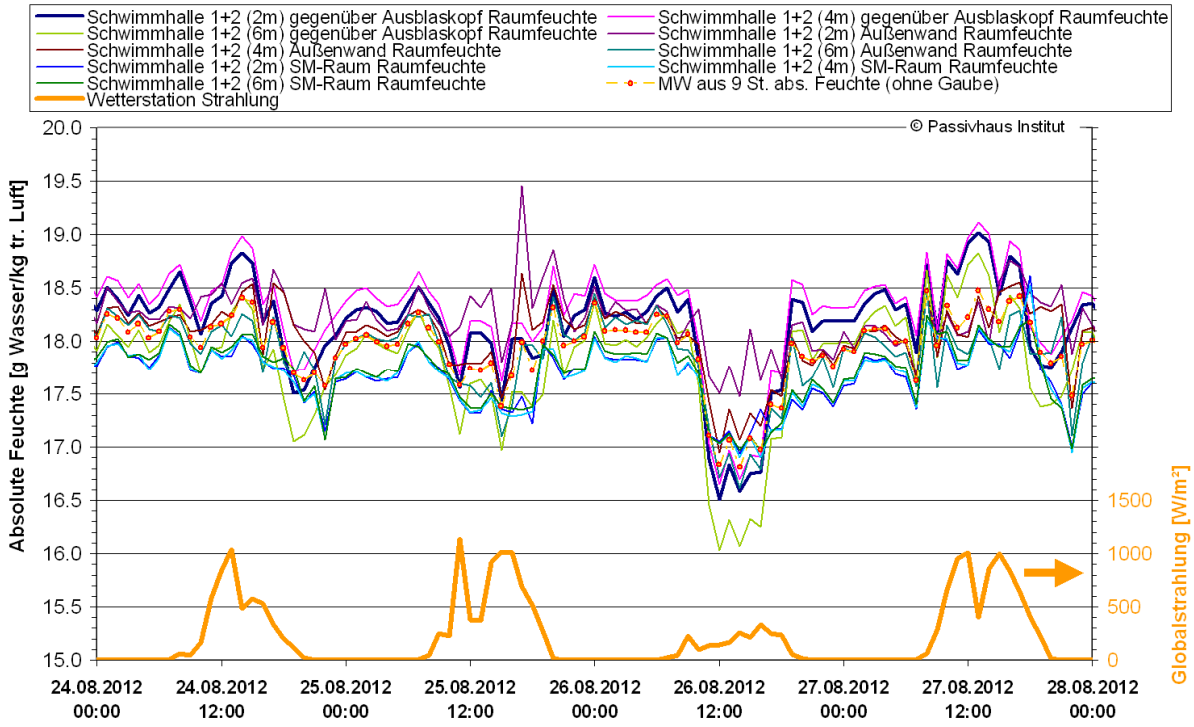


Abbildung 30: Absolute Raumluftfeuchten der neun Sensoren in Halle 1+2 und die „mittlere absolute Hallenfeuchte“ (siehe Text) sowie die Globalstrahlung vom 24. bis zum 27. August 2012 (Stundenmittelwerte).

3.2 Beckenwassertemperatur

Zur Messung der chemischen Parameter der Beckenwasserkreisläufe sind drei Messzellen vom Typ „Topax DX“ der Firma Jesco eingesetzt. Diese werden dauerhaft mit Beckenwasser durchströmt. Sie enthalten neben den Sensoren für Chlor, Redox-Potential, Salzgehalt und pH-Wert auch eine Temperaturmessung mittels Widerstandsmessung (Pt100). Diese wird für die dauerhafte Messung der Beckenwassertemperatur verwendet.

3.3 Lüftungsgeräte

In den Lüftungsgeräten sowie den zugehörigen Kanälen sind Sensoren für Volumenstrom (Berechnung aus Druckdifferenzmessung), Temperatur und Feuchte durch den Hersteller verbaut. Die Messdaten werden an die GLT weitergegeben und aufgezeichnet. Zusätzlich werden auch die Stellungen der Lüftungsklappen und die Ventilstellungen vom Heizregister aufgezeichnet. Für das Monitoring wurden nach der Klärung mit dem Hersteller zusätzliche Datenpunkte und Berechnungen aus den Geräten geliefert. Dabei ist insbesondere die Volumenstrommessung über den Wärmeübertrager (WRG) zu nennen. Standardmäßig werden nur die Volumenströme des Zu- und des Abluftvolumenstroms der hallenseitigen Ventilatoren ausgegeben (Druckdifferenzmessung). Zur energetischen Beurteilung fehlen damit der Außen- und Fortluftvolumenstrom über die Gebäudehülle. Durch eine weitere Druckdifferenzmessung über die Wärmerückgewinnungseinheit wird im Gerät der Außen-Zuluft-Volumenstrom berechnet. Bei geschlossener Bypassklappe („Klappe Entfeuchten“) zwischen dem Außen- und dem Fortluftbereich des Gerätes entspricht dieser Volumenstrom dem Außenluftvolumenstrom.

In der folgenden Tabelle sind die in den Geräten vorhandenen Messpunkte, welche für das Monitoring ausgelesen werden, aufgelistet.

Tabelle 5: Liste der Messpunkte (Beispielhaft von Gerät Halle 1+2 mit Wärmepumpe)

1	AB Feuchte
2	AB Temp
3	ZU Temp hinter Heizregister (PWW)
4	AU Temp intern
5	AU Temp extern
6	AU Klappe
7	FO Klappe
8	Umluftklappe Heizen
9	Umluftklappe Entfeuchten
10	Ventil Heizregister (PWW)
11	ZU Volumenstrom
12	AB Volumenstrom
13	Wärmemenge Rekuperator

14	Leistung Rekuperator
15	Wärmemenge Kondensator + PWW
16	Leistung Kondensator + PWW
17	ZU Temp extern
18	ZU Feuchte extern
19	ZU Enthalpie extern
20	ZU Temp v. WRG
21	ZU Feuchte v WRG
22	ZU Enthalpie v WRG
23	ZU Temp h. WRG
24	ZU Feuchte h. WRG
25	ZU Enthalpie h. WRG
26	AB Temp h. AB-Ventilator
27	AB Feuchte h. AB-Ventilator
28	AB Enthalpie h. AB-Ventilator
29	AB Temp h. Verdampfer
30	AB Feuchte h. Verdampfer
31	AB Enthalpie h. Verdampfer
32	Volumenstrom über WRG (AU-ZU)

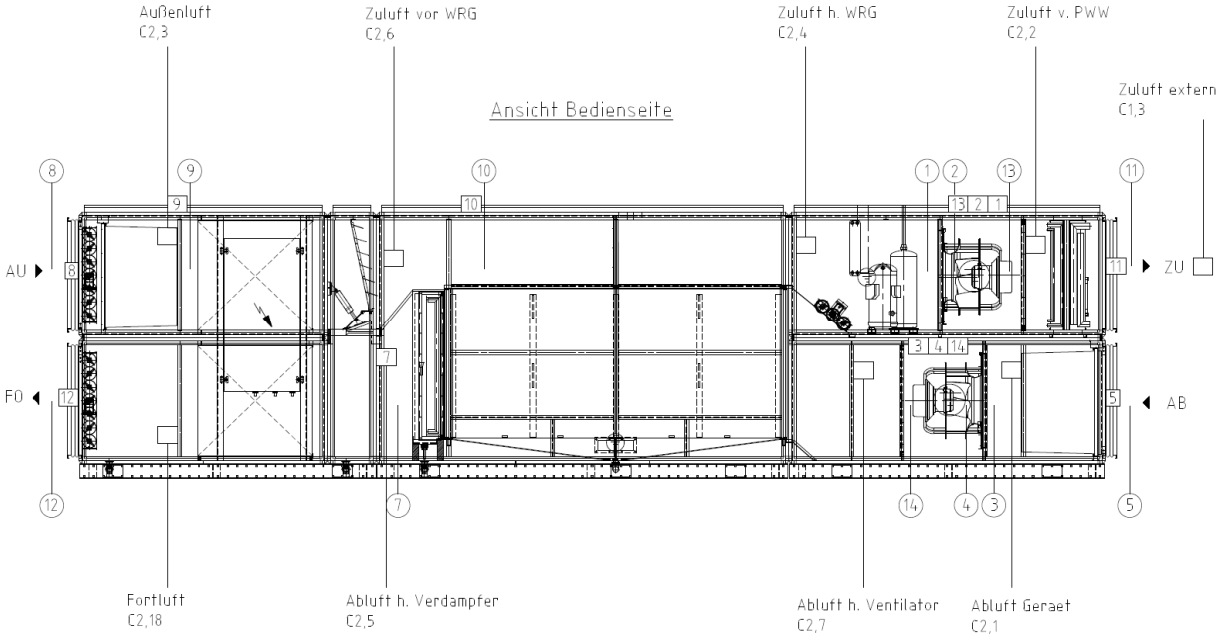


Abbildung 31: Anordnung der Sensoren im Gerät von Halle 1+2 mit Wärmepumpe (Quelle: Menerga).

Bei der Auswertung der Temperatur- und Feuchtemesswerte aus den Lüftungsanlagen wurden zum Teil unplausible Werte festgestellt. Es erfolgte daher am 20.09.2012 eine Kalibrierung einiger Sensoren durch den Hersteller. Die Messdaten zum Außen-Zuluft-Volumenstrom über die Wärmerückgewinnung zeigten immer wieder einen auffälligen Versatz der Minimalwerte (Abbildung 32). Es konnte ermittelt

werden, dass diese im Zusammenhang mit der immer montags um 6:00 Uhr durchgeführten Autokalibrierung des Gerätes standen. Aus diesem Grund wurde die Autokalibrierung später täglich bzw. zweitägig durchgeführt, womit dieser Effekt beseitigt wurde und der Außenluftvolumenstrom verlässlich für die energetische Datenauswertung verwendet werden konnte.

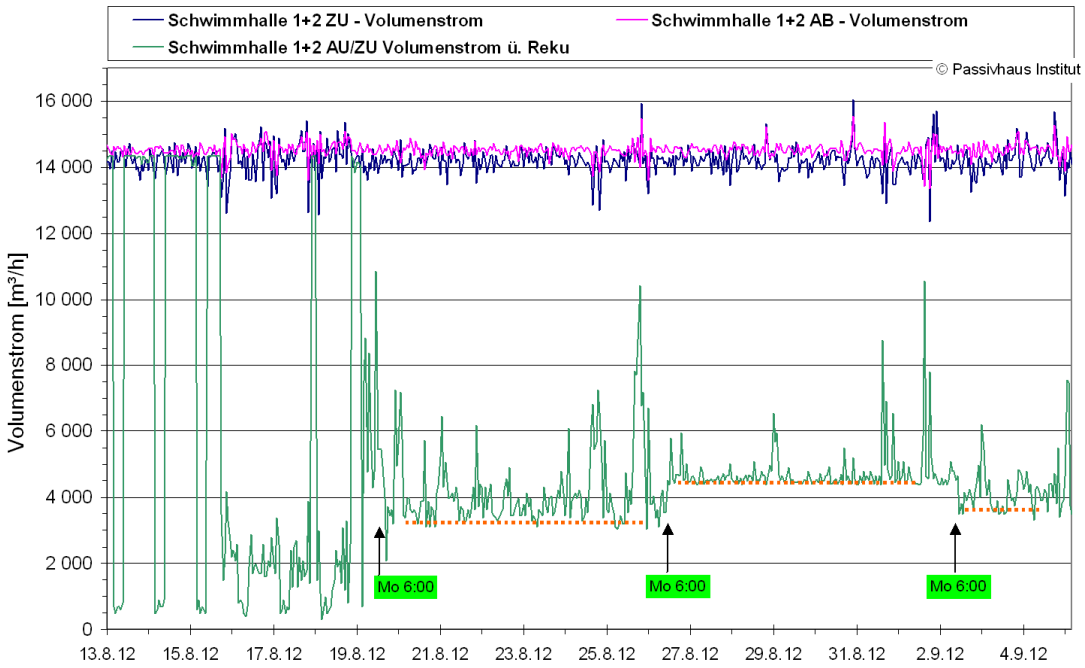


Abbildung 32: Volumenströme des Lüftungsgerätes von Halle 1+2 vom 13.08. bis zum 05.09. 2012 (Stundendaten). Es wurde ein Versatz der minimalen Volumenströme über die Wärmerückgewinnung („Reku“) immer Montags um 6:00 Uhr festgestellt.

3.4 Stromverbrauchsmessungen

Zur Messung der Stromverbräuche sind handelsübliche Stromzähler eingesetzt worden. Die Versorgung erfolgt über den Bezug aus dem öffentlichen Stromnetz und durch die Eigennutzung des durch die PV-Anlage auf dem Dach des Gebäudes erzeugten Solarstroms (siehe nächster Abschnitt).

Aufgrund der Zähleranorderungen können fünf Verbrauchs-Hauptbereiche unterschieden werden (siehe auch Abbildung 33):

- Strom **Lüftung** (sechs Lüftungsgeräte einzeln sowie getrennt Unterzähler für die Wärmepumpe von Lüftung 1+2)
- Strom der drei **Doppel-Umwälzpumpen** der drei Wasserkreisläufe (zusätzlich vier weitere Pumpen der Abwasseraufbereitung; z.Z. nicht in Betrieb)
- Strom **Beleuchtung** und Steckdosen (acht Unterzähler)

- Strom für **Sanitär und Heizung** (Heizung: Heizungspumpen, Pumpen an sechs Heizregistern, Umwälzpumpen Abgaswärmetauscher / Sanitär: Dosierpumpen der Chemikalien und Hebeanlagen)
- Strom „Diverse“: **Schwimmbadtechnik** ohne Umwälzpumpen sowie **alle restlichen Verbraucher** des Bades (UV-Brenner, Elektrolysezellen, Hebeanlagen, Haarföhne, Messwasser-, Dosier- und Druckerhöhungs- und Tauchpumpen, Datenschrank, Lautsprecheranlage (ELA), Sicherheitslicht, Kassensystem, Schranke, E-Herd, Mikrowelle etc.)

Beim letzten Verbrauchsbereich „Diverse“ (alle „restlichen“ Verbraucher inkl. Schwimmbadtechnik ohne Großpumpen) handelt es sich um keinen direkt gemessenen Wert, sondern um die Differenz der vier gemessenen Teilbereiche zum Gesamtverbrauch.

Die Messungen aller für das Monitoring interessanten Verbrauchsbereiche (z.B. vollständige Schwimmbadtechnik) bzw. Einzelverbraucher konnte aus Aufwandsgründen nicht vollständig realisiert werden.

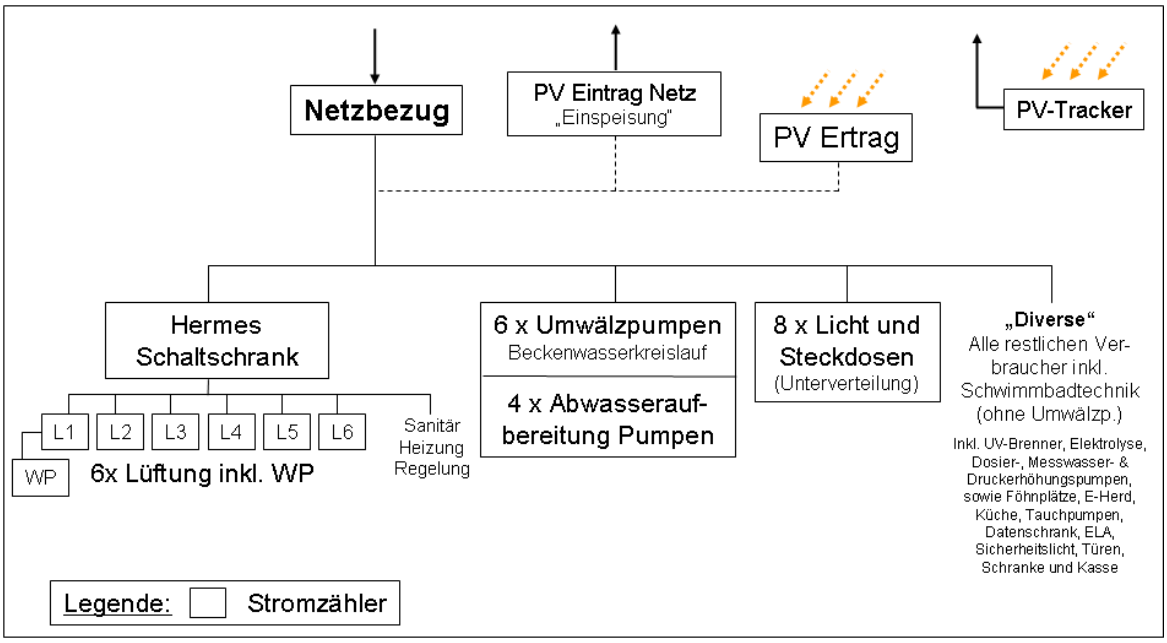


Abbildung 33: Anordnung und Verbrauchsbereiche der eingesetzten Stromzähler

3.4.1 Erzeugung Solarstrom (PV)

Die PV-Anlage auf dem Dach des Gebäudes hat eine Leistung von 91 kWp. Diese besteht aus insgesamt 387 Modulen mit je 235 Wp. Der PV-Strom wird bei Bedarf vollständig im Gebäude genutzt, momentane Überschüsse werden in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Dazu sind ein Ertrags- und ein Einspeisezähler installiert. Bei der Differenz handelt es sich um den im Bad direkt verbrauchten PV-Strom.

Zusätzlich sind auf dem Gelände des Lippe-Bades noch zwei „Solartracker“-Anlagen errichtet worden. Bei den frei im Gelände aufgestellten Anlagen handelt es sich um bewegliche PV-Flächen die sich nach der Sonne ausrichten. Die zwei Tracker verfügen insgesamt über 84 PV-Module je 235 Wp (Gesamtanlage: 19,7 kWp). Der PV-Strom der Tracker wird vollständig direkt in das öffentliche Stromnetz eingespeist, weil im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) für bodenstehende Anlagen keine Eigenverbrauchsregelung vorgesehen ist. Die Messung erfolgt über einen gesonderten Einspeisezähler.

Zur Beurteilung des Stromverbrauchs bzw. der Stromeinspeisung sind damit die folgenden Größen zu unterscheiden:

- Netzbezug
- PV-Strom Eigenverbrauch
- PV-Strom Netzeinspeisung (Überschuss)
- PV-Strom Tracker (vollständige Einspeisung)

Der Gesamtverbrauch des Bades setzt sich zusammen aus dem Netzbezug zuzüglich dem Eigenverbrauch des PV-Stroms der Solaranlage auf dem Dach des Gebäudes.

3.5 Weitere Sensoren

Für den Betrieb der Schwimmbadtechnik gibt es noch diverse Temperatursensoren in den Beckenwasserkreisläufen, Lufterhitzern und Wärmeübertagern. Außerdem ist eine Wetterstation auf dem Dach des Altbaubereichs montiert, die u.a. Außentemperatur-, Feuchte- und Globalstrahlungsdaten liefern. Zusätzlich gibt es diverse Betriebsstundenzähler, welche die Laufzeiten von Pumpen und der Lüftungsanlagen aufzeichnen. Die Anordnung der eingesetzten Wärmezähler ist in 2.2 bereits beschrieben. Außerdem ist ein Beckenscanner in Halle 1+2 montiert, der die Anzahl der Personen im Becken zählt (siehe dazu nächster Abschnitt). Alle erwähnten Sensoren sind auf die GLT-Anlage aufgeschaltet und werden hier bei gesonderten Untersuchungen zum Teil verwendet und ausgewertet.

4 Messdatenauswertung

Für die Auswertung der Daten sind die Messdaten überwiegend ab Februar 2012 nutzbar; zum Teil liegen vollständig nutzbare Daten durch z.B. Umbauten und Ergänzungen bei den Wärmezählern auch erst etwas später vor. Für die Auswertungen in diesem Bericht werden die Daten bis zum 31. März 2013 genutzt. Wenn Jahreswerte ermittelt werden, beziehen diese sich im Regelfall auf den Zeitraum 01.04.2012 bis 31.03.2013. Einzelne Abweichungen von diesem Jahreszeitraum sind ansonsten jeweils angegeben. Im Sommer 2012 wurde das Bad vom 09.07. bis zum 21.08.2012 für Revisionsarbeiten geschlossen. Die zentrale Datenerfassung war vom 17.7. bis zum 2.8.2012 komplett abgeschaltet.

4.1 Besucherzahlen

Aus dem Kassensystem des Bades liegen Daten zu den täglichen Besucherzahlen vor. Die Monatssummen zeigen in den regulären Betriebsmonaten Besucherzahlen zwischen 14.281 und 22.980 Personen pro Monat, durchschnittlich 19.751 Personen/ Monat. Im gesamten Jahr 2012 besuchten 210.006 Personen die Schwimmhalle (47,6 % Öffentlichkeit, 23,3 % Schulen und 29,1 % Vereine).

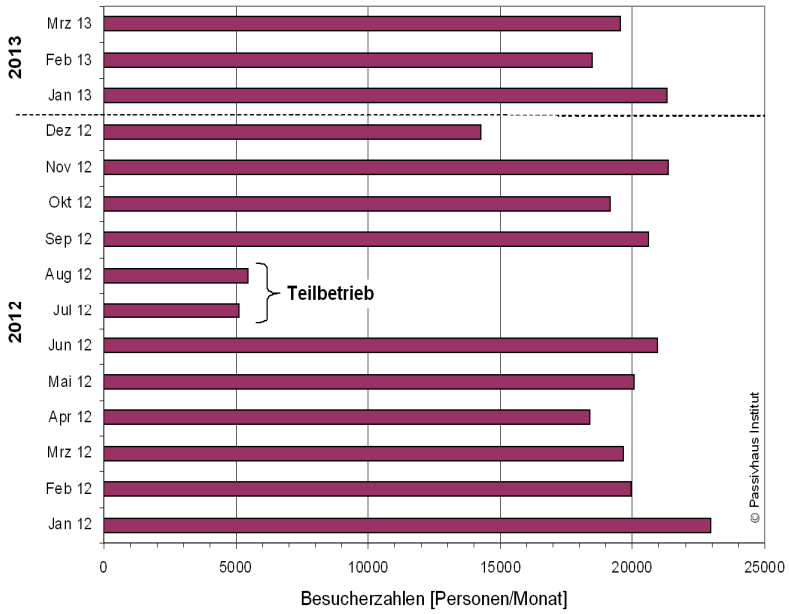


Abbildung 34: Monatliche Besucherzahlen vom Januar 2012 bis zum März 2013

Die Tagesbesucherzahlen zeigen, dass die Auslastung des Bades nach Wochentagen unterschiedlich ist. Im Januar 2013 zum Beispiel lagen die Besucherzahlen an Öffnungstagen zwischen 503 und 999 Personen. Dabei sind die Samstage die Tage mit den geringsten Besucherzahlen.

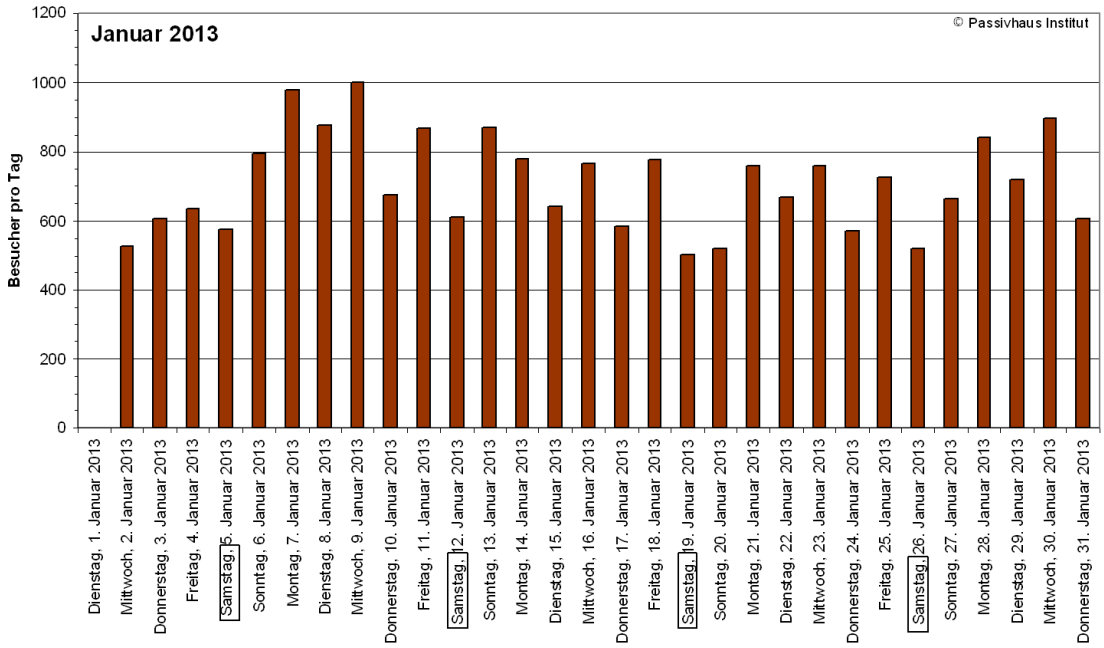


Abbildung 35: Tagesbesucherzahlen im Januar 2013. Am 1. Januar 2013 war die Schwimmhalle geschlossen.

Weitere Informationen zu Personenzahlen werden mittels eines Beckenscanners erfasst. Das speziell für diese Aufgabe angepasste Gerät zählt die Personen, welche sich im Becken 1+2 befinden (ohne Berücksichtigung der Beckenumläufe). Stichprobenhafte Überprüfungen bei Ortsterminen haben ergeben, dass die Personenanzahl auf ein bis drei Personen übereinstimmt. Mittels dieser Informationen können z.B. Energieverbrauchs- und Verdunstungsdaten in Abhängigkeit von den Personen im Becken ausgewertet werden (vgl. Abschnitt 5.1.1.1). In Abbildung 37 sind für Daten der Beckennutzer vom 1. November 2012 bis Ende April 2013 als Mittelwerte zu einem Verlauf einer durchschnittlichen Woche („Durchschnittswoche“) dargestellt. An dieser Darstellung ist die typische Wochentagsverteilung der Beckennutzung zu erkennen: Sonntags ist die stärkste Nutzung in diesem Bereich zu verzeichnen, montags die geringste.

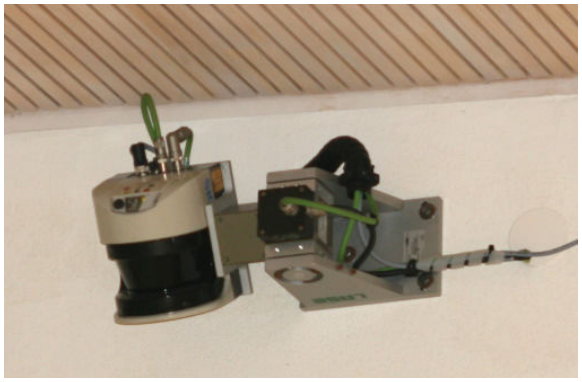


Abbildung 36: Beckenscanner unter der Hallendecke zur Personenzählung in Becken 1+2.

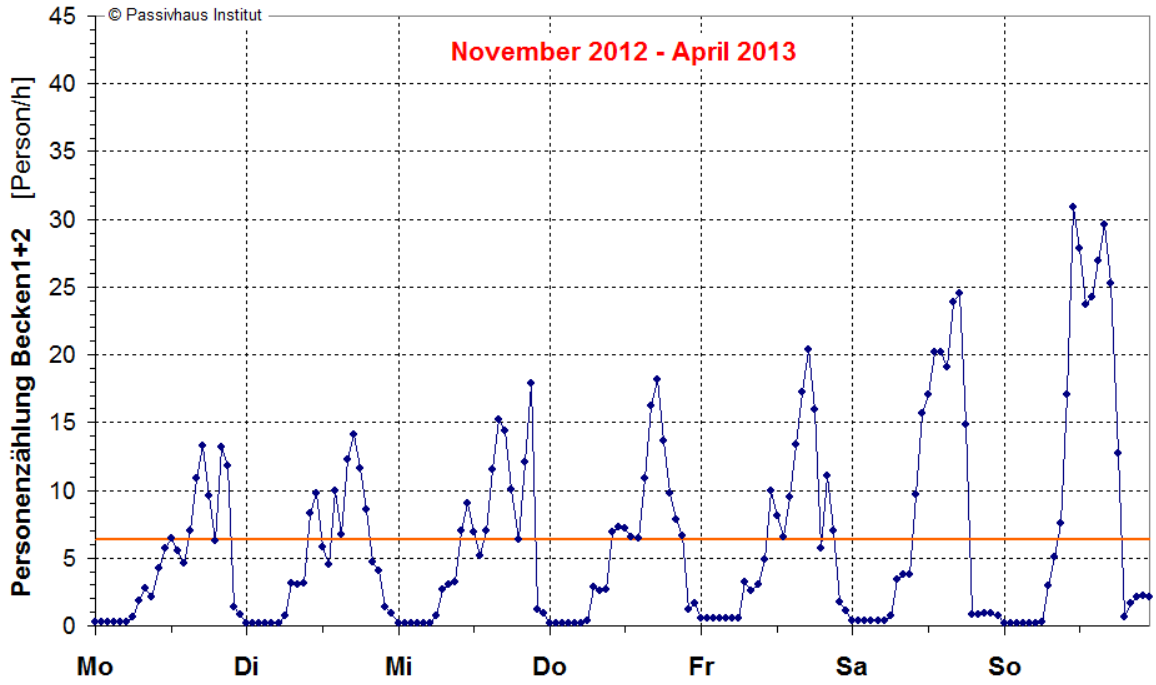


Abbildung 37: Personenbelegung von Becken 1+2 der „Durchschnittswoche“ nach der Zählung des Beckenscanners vom 01. November 2012 bis zum 30. April 2013 (aus Stundenmittelwerten). Dargestellt sind die Mittelwerte über den gesamten Zeitraum. Die horizontale orangene Linie stellt den Gesamtmittelwert dar.

4.2 Wetterdaten

Zur Wetterdatenmessung wird die auf dem Dach des ehemaligen Heizwerkes montierte Wetterstation genutzt. Die Daten werden - wie alle anderen Messdaten - auf der GLT erfasst. Es werden die Messgrößen Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Niederschlagsmenge sowie die horizontale Globalstrahlung erfasst (Messhöhe ca. 15 m über Geländehöhe). Die für die Auswertung relevanten Parameter werden hier als Verlauf der Tageswerte sowie als Monatsmittelwerte bzw. -summen dargestellt.

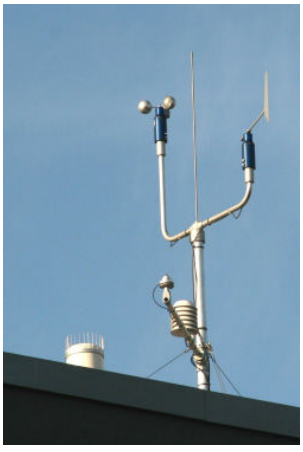


Abbildung 38: Wetterstation auf dem Dach des Altbaubereichs des Bades.

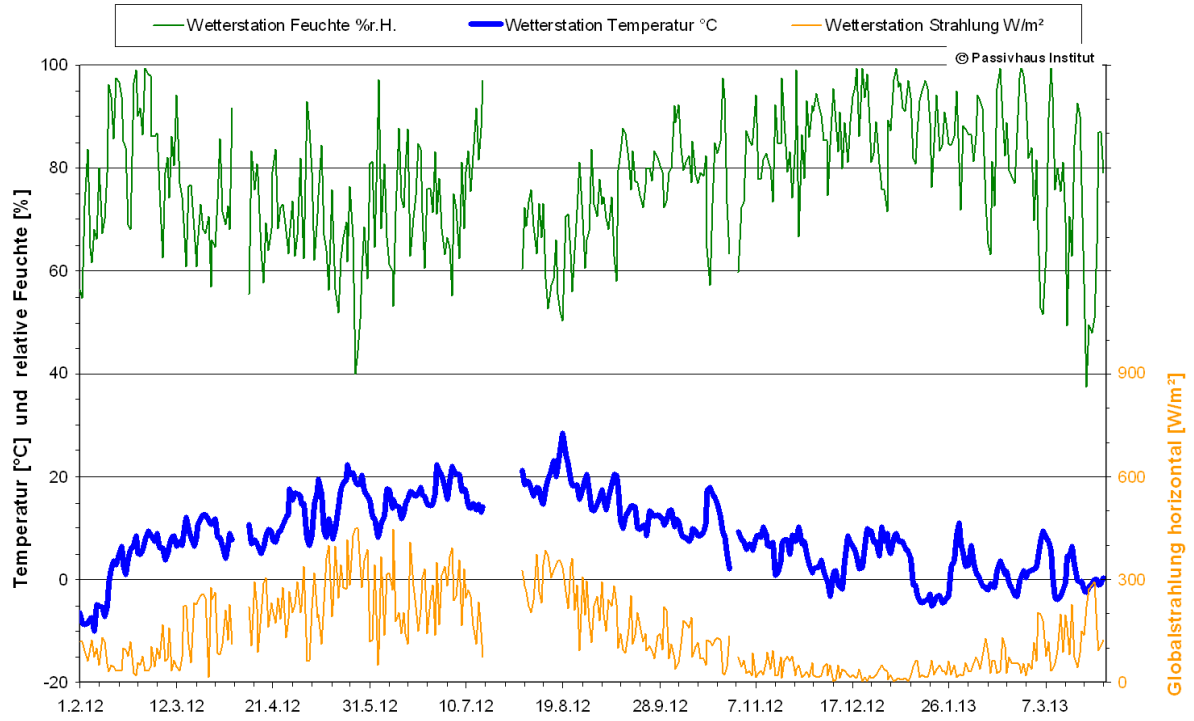


Abbildung 39: Gemessene tagesmittlere Wetterdaten der Außenlufttemperatur, relativen Luftfeuchte und horizontalen Globalstrahlung (01.02.2012 bis 31.03.2013).

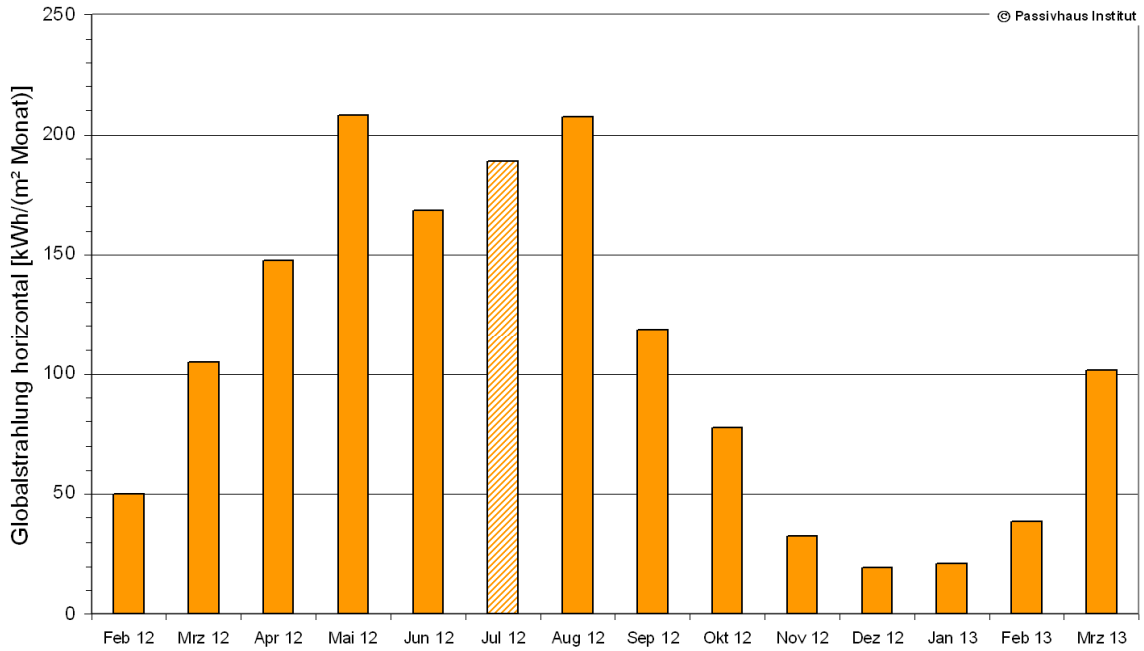


Abbildung 40: Gemessene Monatssummen der horizontalen Globalstrahlung (Februar 2012 bis März 2013). Aufgrund der Abschaltung der Datenerfassung an mehreren Tagen im Juli 2012 wurden aus der gemessenen mittleren Einstrahlung hochgerechnet auf den Monatswert.

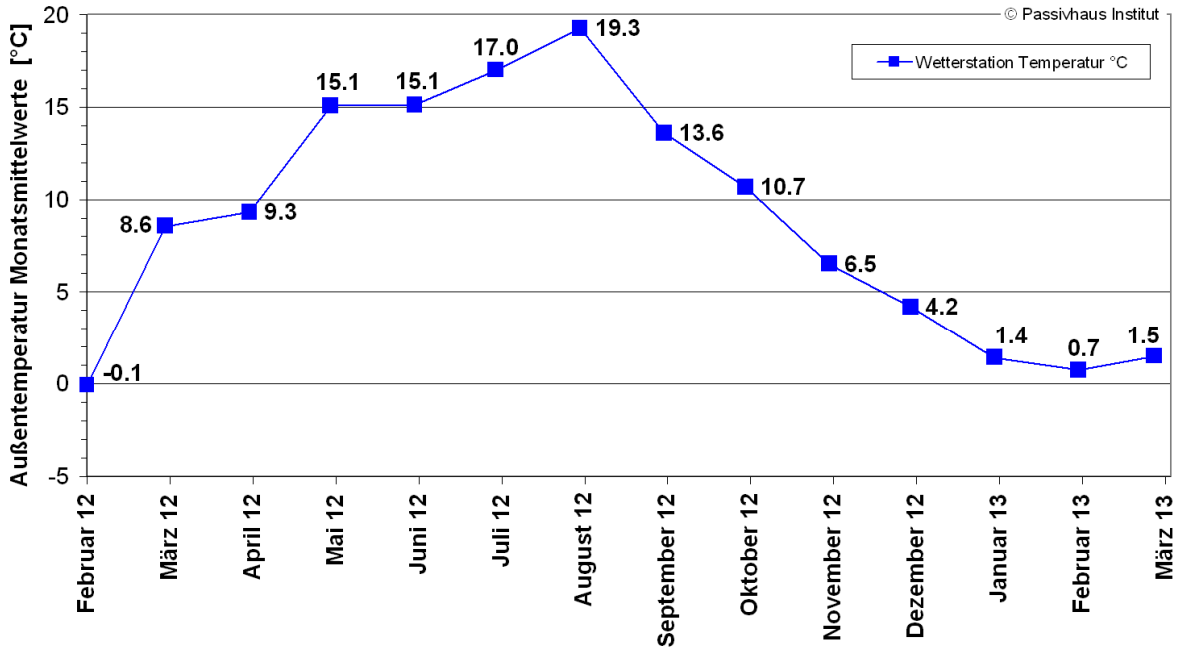


Abbildung 41: Gemessene Monatsmittelwerte der Außentemperatur (Februar 2012 bis März 2013). Aufgrund der Abschaltung der Datenerfassung an mehreren Tagen im Juli 2012 wurde der Mittelwert dieses Monats nur aus den Messwerten des gemessen Zeitraums berechnet.

4.3 Lufttemperaturen und Luftfeuchten im Gebäude

Die Auswertung der Lufttemperaturen und Luftfeuchten im Gebäude erfolgt mit den kalibrierten Messdaten (siehe Abschnitt 3.1.1). Beispielhaft sind in Abbildung 42 die Verläufe der Hallentemperaturen in Halle 1+2 sowie die der Außenlufttemperatur in der Zeit vom 15.11.2012 bis zum 15.02.2013 als Stundenmittelwerte dargestellt. Insgesamt zeigt sich in der Halle ein Temperaturband von etwa 1 bis 1,5 K (ohne einzelne Ausreißer) in der Halle. Als Ausnahme ist der Sensor in der Gaube zu erkennen. Diese Lufttemperatur sinkt bei niedrigeren Außentemperaturen geringfügig ab (um etwa 1 K bei einem Außentemperaturabfall um 10 K). Der Gaubenbereich wird nicht gesondert mit Zuluft angeströmt, womit diese geringe und unkritische Temperaturreduktion begründet ist.

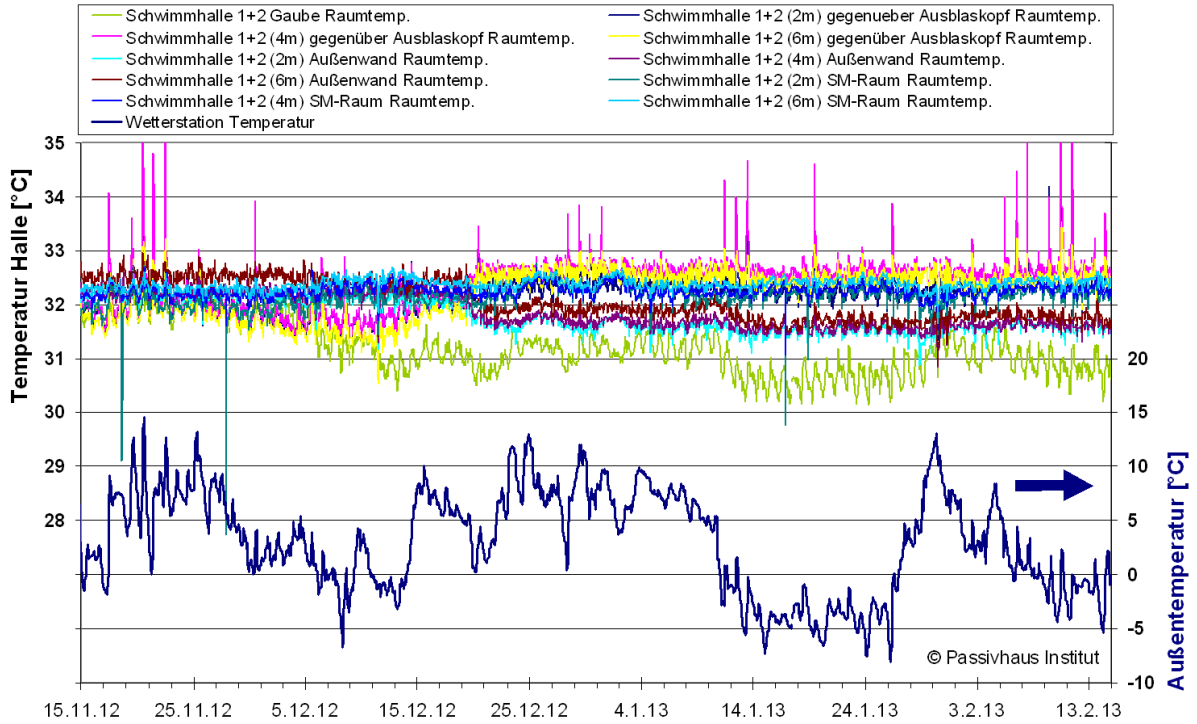


Abbildung 42: Verlauf aller zehn Hallentemperaturen in Halle 1+2 sowie der Außenluft-temperatur im Zeitraum vom 15.11.2012 bis zum 15.02.2013 (Stundendaten)

Aus den Lufttemperatur- und Feuchtesensoren wird durch Mittelswertsbildung (vgl. 3.1.2) der Verlauf der mittleren Hallenfeuchten (relativ und absolut) sowie der Temperaturen für die Zeit vom 01. Februar 2012 bis zum 31. März 2013 für Hallen 1+2 erstellt (Abbildung 43). Im Zeitverlauf sind damit die Änderungen der Betriebsbedingungen zu erkennen: Während die Hallentemperatur in der gesamten Zeit relativ konstant bleibt, sind in der Hallenfeuchte deutliche Änderungen zu erkennen. Da in dieser Halle die Änderungen der Betriebsbedingungen untersucht wurden, handelt es sich bei einigen der Änderungen um Versuchsanforderungen. Bei den beiden Zeiträumen vor der Revision mit deutlich erhöhten Feuchtewerten handelt es sich um unbeabsichtigte Änderungen bzw. Regelungsfehler.

Nach der sommerlichen Revisionszeit wurde am 18.09.2012 eine sprunghafte Reduktion der Hallenfeuchte durchgeführt. Die eigentlich angestrebten erhöhten Feuchtewerte wurden - nach der Anhebung am 07.12.2012 (um etwa 10 %) - schrittweise, mit Werten bis um 60 % erreicht.

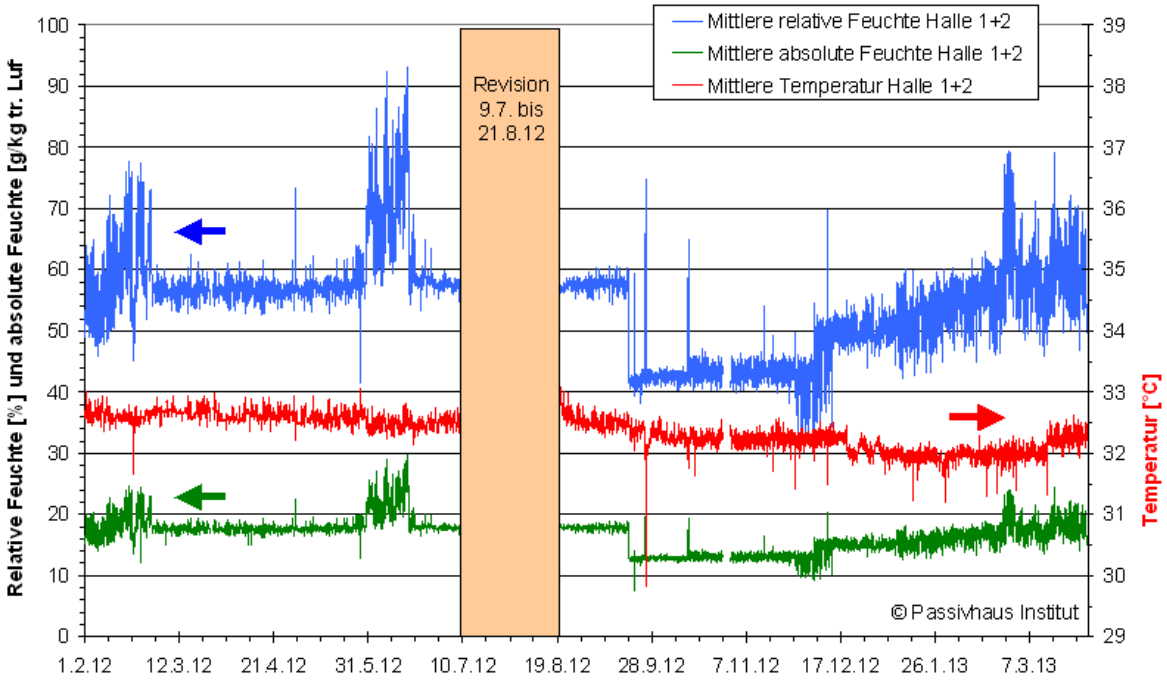


Abbildung 43: Verlauf der mittleren Hallentemperatur, der relativen sowie absoluten Feuchte in Halle 1+2 vom 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten)

Die Raumluftbedingungen der anderen drei Hallen im gleichen Zeitraum sind in den folgenden drei Grafiken dargestellt:

In Halle 3 wurde die Raumlufttemperatur über mehr als sechs Monate im Frühling und Sommer 2012 um bis zu etwa 2 K abgesenkt. Bei der Hallenfeuchte zeigen sich ähnliche sprunghafte Änderungen wie in Halle 1+2, allerdings bis zu 20 %. Bei den deutlichen Stufen der Hallenfeuchte am 05.12.2012 und 09.01.2013 handelt es sich um gewollte Anhebungen der Hallenfeuchte im Rahmen der vom PHI durchgeführten Versuchsreihe (vgl. dazu auch Abschnitt 4.6).

Ab dem 13.02.2013 sind starke Schwankungen in der Hallenfeuchte von Halle 3 zu beobachten. Die Ursache liegt in der Anpassung der Regelparameter des Lüftungsgerätes durch die Herstellerfirma mit unbeabsichtigten Folgen. Die Anpassung erfolgte auch bei den Geräten für Halle 1+2, 4 und 5, wodurch dort ebenfalls ab dem 13.02.2013 viel stärkere Schwankungen der Feuchte zu beobachten sind.

Seit der Reduktion am 18.09.2012 liegen in Halle 4 und 5 die relativen Feuchten im Mittel unter 50 % (Abbildung 46 und Abbildung 47). Aufgrund der noch vorhandenen Restleckage im Altbaubereich sollen in Halle 4 und 5 zunächst niedrige Luftfeuchten realisiert werden. Bei Halle 5 fällt insbesondere die sprunghafte Temperaturanhebung von Mitte Dezember 2012 bis Ende Januar 2013 auf.

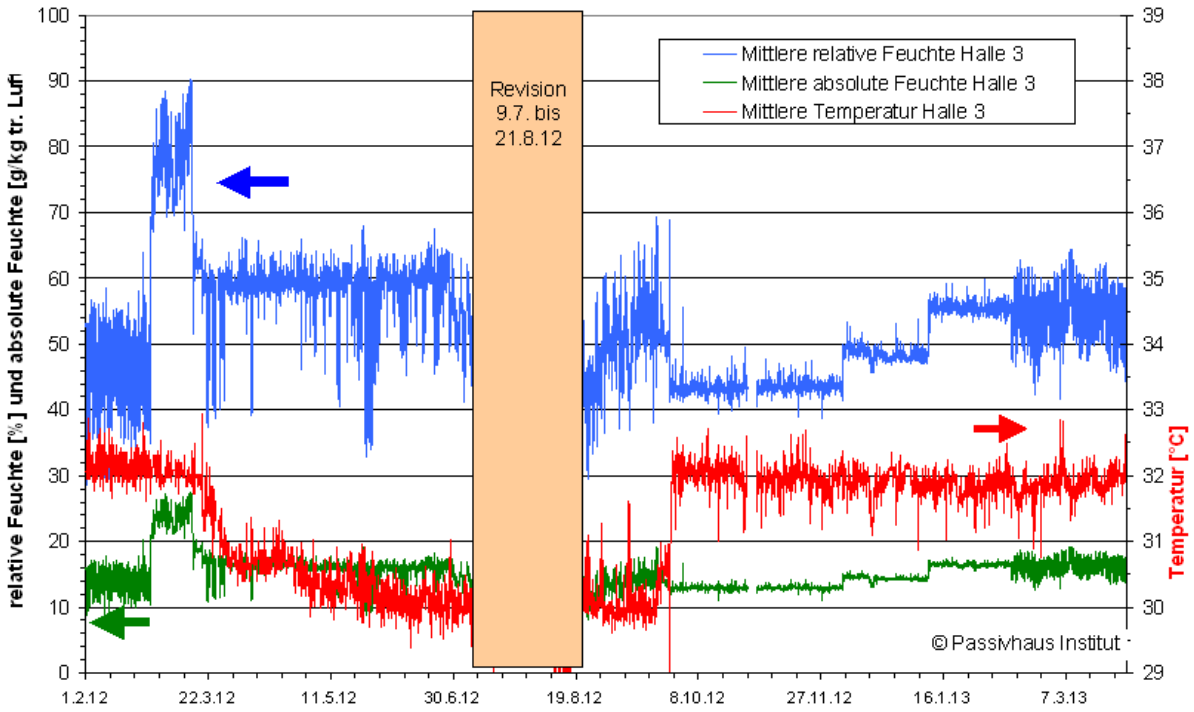


Abbildung 44: Verlauf der mittleren Hallentemperatur, der relativen sowie absoluten Feuchte in Halle 3 vom 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten)

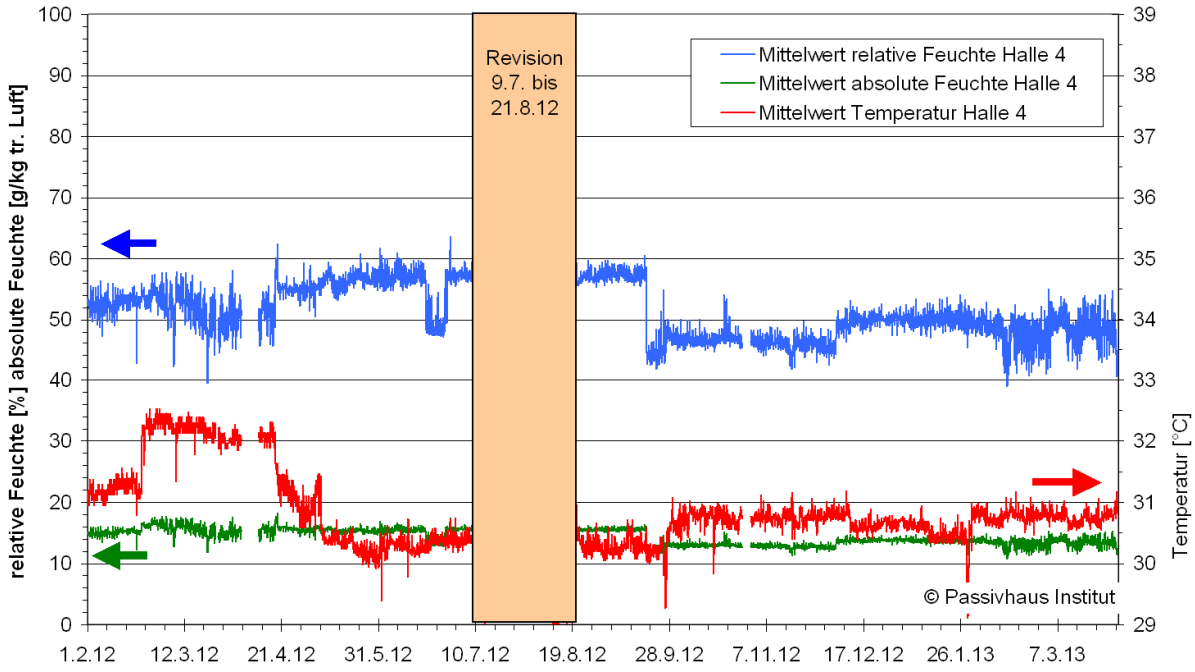


Abbildung 45: Verlauf der mittleren Hallentemperatur, der relativen sowie absoluten Feuchte in Halle 4 vom 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten)

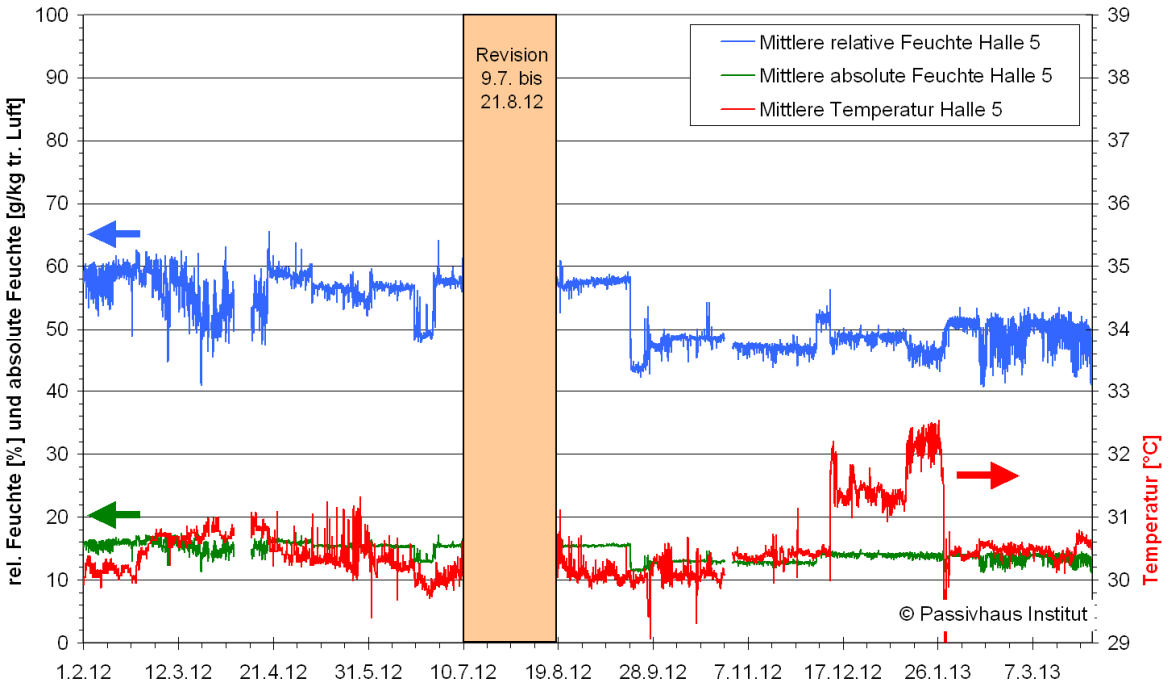


Abbildung 46: Verlauf der mittleren Hallentemperatur, der relativen sowie absoluten Feuchte in Halle 5 vom 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten)

In den Nebenzonen sind insbesondere die Raumlufttemperaturen – weniger die Feuchten – von Interesse. Erwartungsgemäß zeigt sich dabei eine größere Streuung der Temperaturniveaus und ganz unterschiedliche große Abhängigkeiten von der Außenlufttemperatur je nach Lage der Räume bzw. Bereiche.

Die Achsen sind bei den folgenden drei Abbildungen unterschiedlich eingestellt, um die unterschiedlichen Temperaturniveaus besser darstellen zu können.

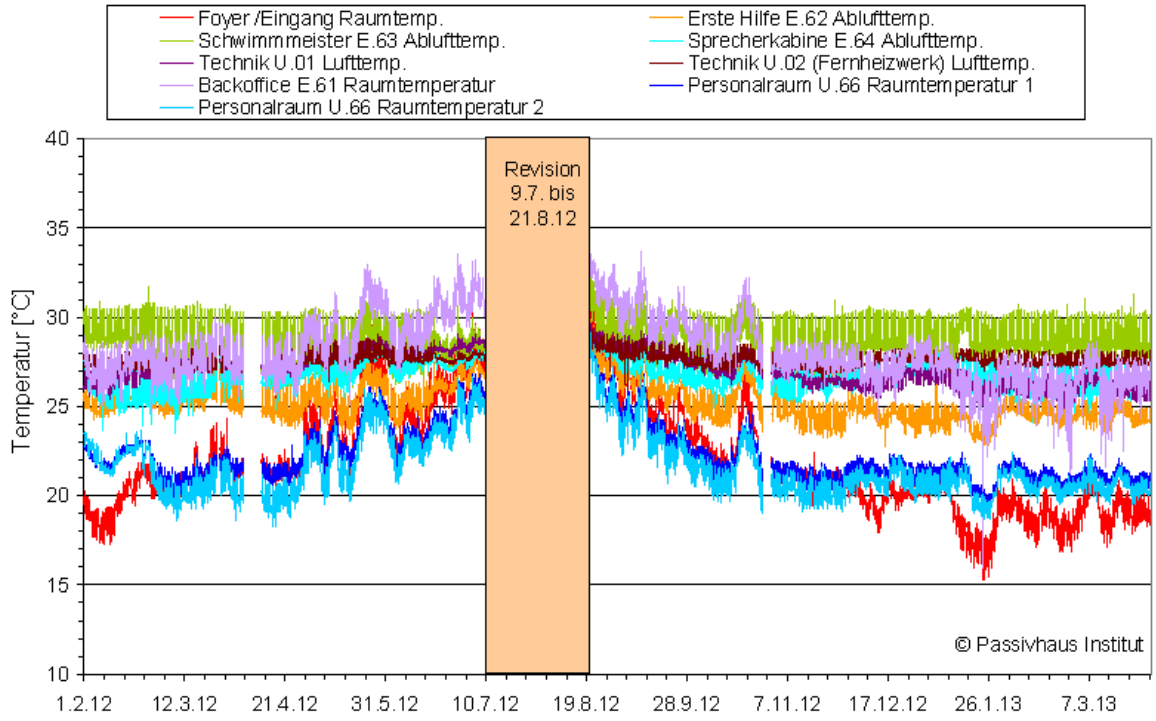


Abbildung 47: Verlauf der Raumlufttemperaturen der Nebenräume vom 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten)

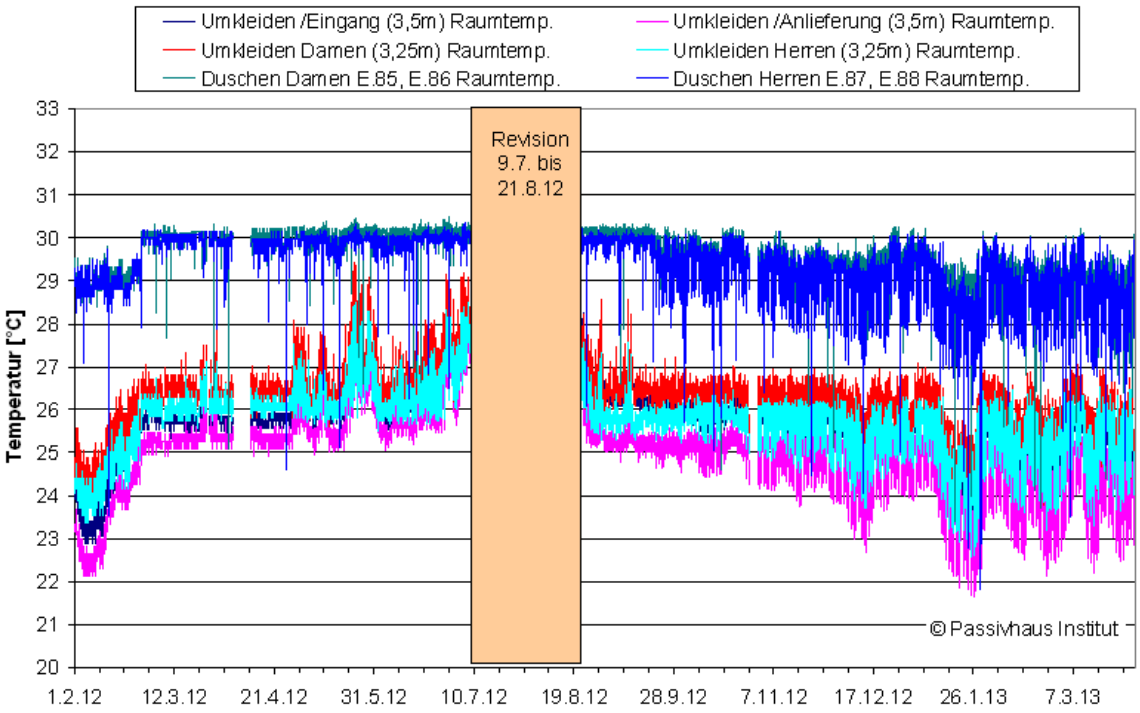


Abbildung 48: Verlauf der Raumlufttemperaturen vom Umkleidebereich und der Duschen vom 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten)

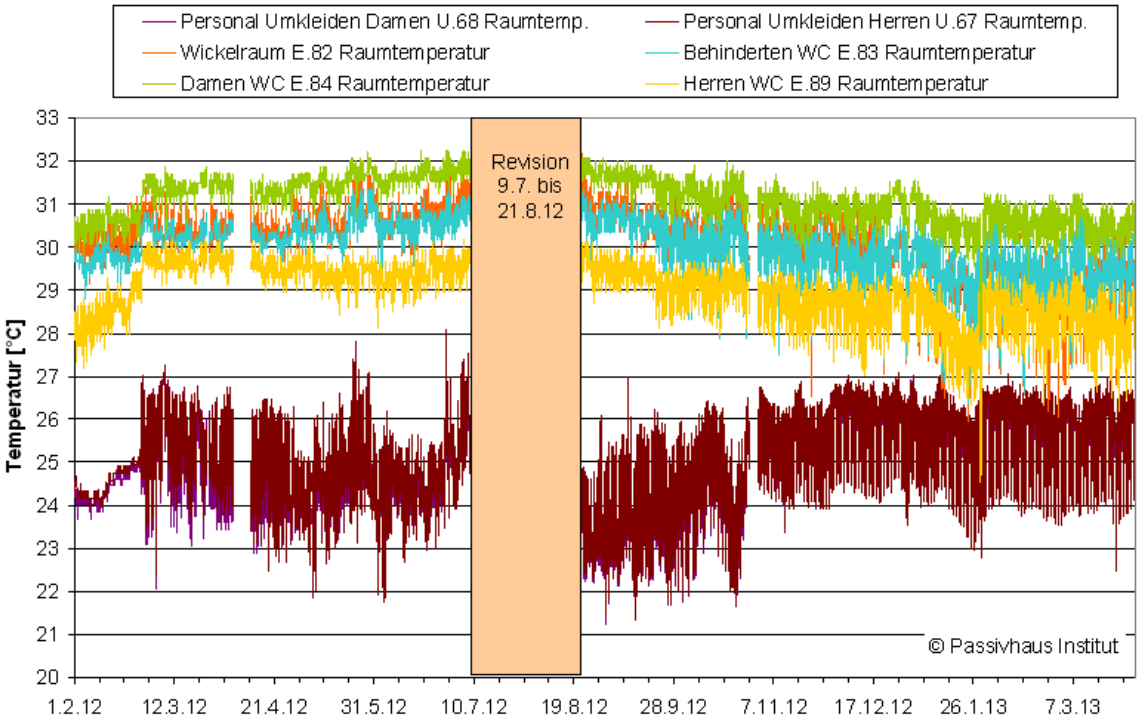


Abbildung 49: Verlauf der Raumlufttemperaturen der WCs sowie der Personalräume im UG vom 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten)

Die Regelung des Lüftungsgerätes „Umkleiden“ erfolgt nach der Luftfeuchte in den Duschbereichen: Die Luft aus dem Umkleidebereich wird nach einer weiteren Aufheizung in die Duschen transportiert. Wenn dort die Luftfeuchtigkeit einen Schwellenwert überschreitet, soll der Außenluftvolumenstrom des Gerätes erhöht werden. Um einen Überblick der mittleren relativen Feuchte der Duschen zu erhalten, wurden die Stundenwerte der beiden Sensoren (Damen- und Herrendusche) gemittelt und in Abbildung 50 dargestellt. In der Darstellung sind die Tag- und Nachtstunden abgebildet. Die Schwankungen ergeben sich zum einen durch die unterschiedliche Nutzung (Tag/Nacht) sowie den Einfluss der jahreszeitlich unterschiedlichen Außenfeuchte.

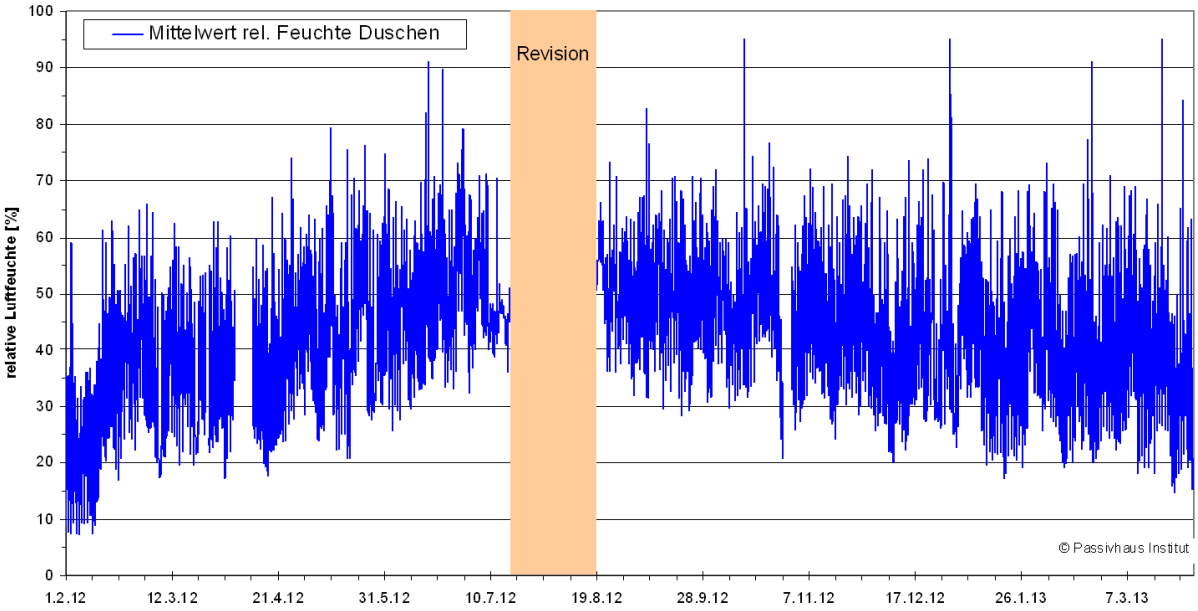


Abbildung 50: Verlauf der mittleren relativen Raumluftfeuchte der Duschen (Herren und Damen) 01.02.2012 bis zum 01.04.2013 (Stundendaten). Erläuterungen siehe Text.

4.3.1 Oberflächentemperatur Verglasung

Die Messung der sechs Oberflächentemperaturen der Verglasung dicht am Glasrand wird dauerhaft durchgeführt. Die niedrigste gemessene stundenmittlere Außenlufttemperatur während des Monitorings wurde am 07.02.2012 mit -14,3 °C aufgezeichnet. Die Oberflächentemperaturen der Verglasung in Halle 1+2 zeigen zu dieser Zeit ebenfalls die niedrigsten Werte. Auf der Verglasung der Pfosten-Riegel-Fassade wurden minimal 18,8 °C gemessen. In der Halle wurden zur gleichen Zeit 32,7 °C Lufttemperatur und ein Feuchtegehalt von 15,0 g/kg tr. Luft gemessen. An den Messwerten der Oberflächentemperatur zeigt sich der deutliche Einfluss der Solarstrahlung an diesen kalten, aber sonnenreichen Tagen (Abbildung 51): Tagsüber liegen die Werte deutlich höher als in den Nachtstunden. Bei den Randbedingungen der Hallenluft darf eine Oberflächentemperatur von 20,4 °C (Taupunkt) nicht unterschritten werden, um Kondensatausfall zu verhindern. Dieser wurde mehrfach an den Verglasungsrändern im unteren Bereich beobachtet. Hier scheint die beabsichtigte und notwendige thermische Qualität nicht vorhanden zu sein. Die Ursachen dazu müssen noch ermittelt werden.

Bei den Messungen in Halle 3 und 4 gibt es die gleichen Beobachtungen. In Abbildung 52 zeigt sich für Halle 4 an den gleichen Tagen der niedrigsten Außentemperatur aufgrund der Scheibenposition auf der Nordseite kein großer solarer Einfluss; die Oberflächentemperaturen verlaufen deutlich ruhiger. Auch in dieser Halle werden mehrfach Oberflächentemperaturen von 20 °C deutlich unterschritten; minimal werden 18,0 °C erreicht. Bei den Luftkonditionen der Halle dürfen Oberflächentemperaturen von 19,3 °C nicht unterschritten werden, um Kondensat auszu-

schließen. Auch hier deckt sich die Beobachtung von zeitweiligem Kondensat mit diesen Berechnungen.

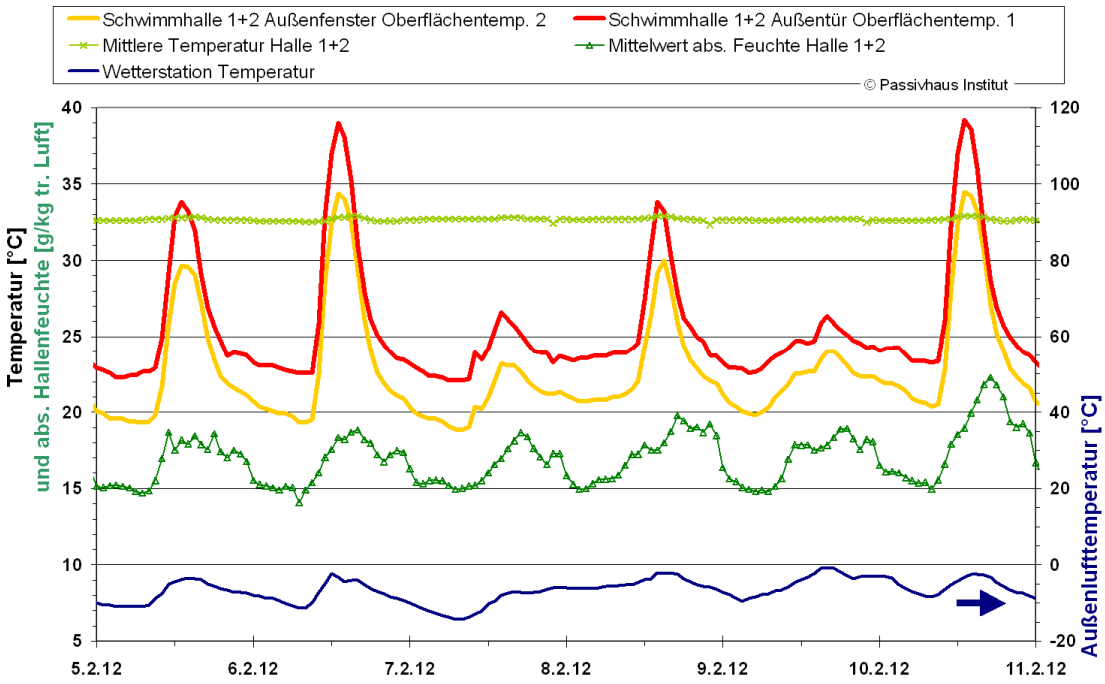


Abbildung 51: Verlauf der Oberflächentemperaturen der Verglasung in Halle 1+2 sowie der zugehörigen mittleren Hallenfeuchte und Hallentemperatur sowie der Außenlufttemperatur vom 07.02. bis zum 11.02.2012 (Stundendaten)

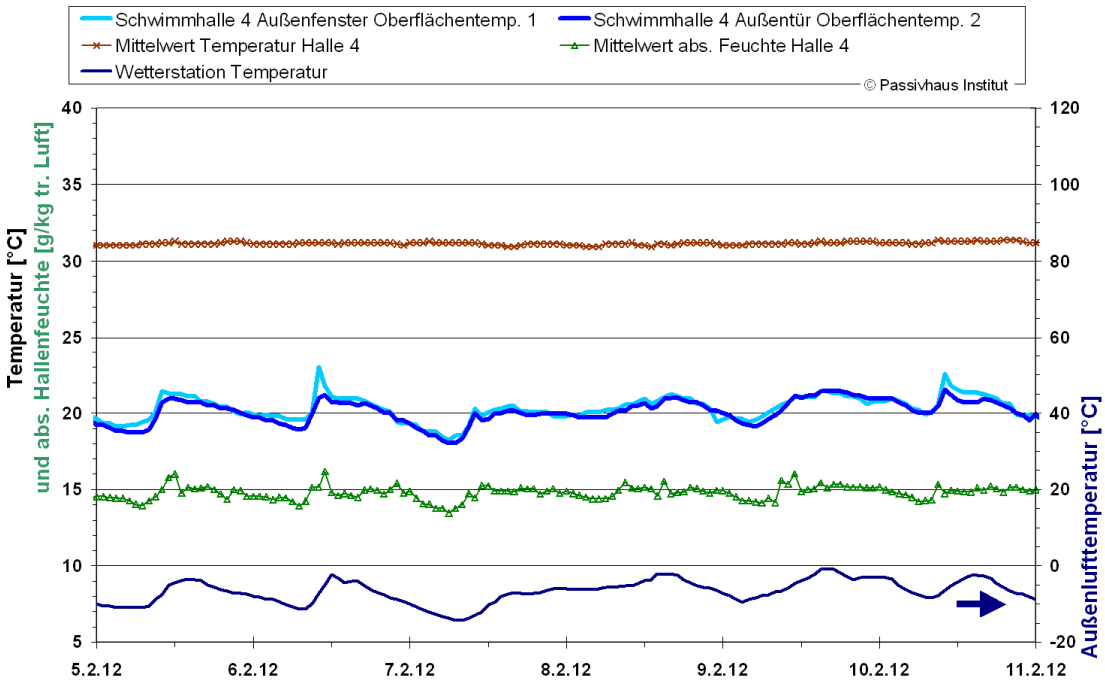


Abbildung 52: Verlauf der Oberflächentemperaturen der Verglasung in Halle 4 sowie der zugehörigen mittleren Hallenfeuchte und Hallentemperatur sowie der Außenlufttemperatur vom 07.02. bis zum 11.02.2012 (Stundendaten)

4.4 Wassertemperaturen

Die Wassertemperaturen in den vier Becken sind aufgrund der gewünschten Nutzung unterschiedlich hoch. Die Temperatur in den 25-Meter-Becken 4 und 5 liegen konstant zwischen 27,5 und 27,8 °C (siehe Abbildung 53). Die Wassertemperatur im Lehrschwimmbecken (Becken 3) liegt nach der Revisionszeit überwiegend zwischen 29,4 bis 29,8 °C und damit deutlich höher als in den beiden 25-Meter-Becken. Vor der Revisionszeit lag sie noch etwas höher.

Becken 1+2 mit dem Eltern-Kind-Bereich verfügt mit 30,5 bis fast 33 °C über die höchste Beckentemperatur. Am 06.12.2012 ist die Wassertemperatur deutlich angehoben worden; zuvor ist sie um den 26.09.2012 etwas reduziert worden. Insgesamt sind deutliche Schwankungen der Wassertemperatur in diesem Becken festzustellen. In der Detailansicht von nur zehn Tagen in Abbildung 54 zeigt sich, dass es sich bei den Schwankungen in Becken 1+2 um Tagesgänge handelt: Die niedrigsten Wassertemperaturen sind immer am Morgen um 6:00 bzw. 7:00 Uhr festzustellen, die Spitzen am Abend um 22:00 Uhr. Diese Betriebsweise ist so nicht beabsichtigt und hat ihre Ursache in den Regelparametern für die Beheizung durch den NT- und den HT-Kreislauf im Zusammenspiel mit dem intermittierendem Umwälzbetrieb der Ultrafiltration. Die Regelung wurde nach Auswertung der hier gezeigten Daten angepasst - im aktuellen Betrieb treten nun keine Temperaturschwankungen mehr auf.

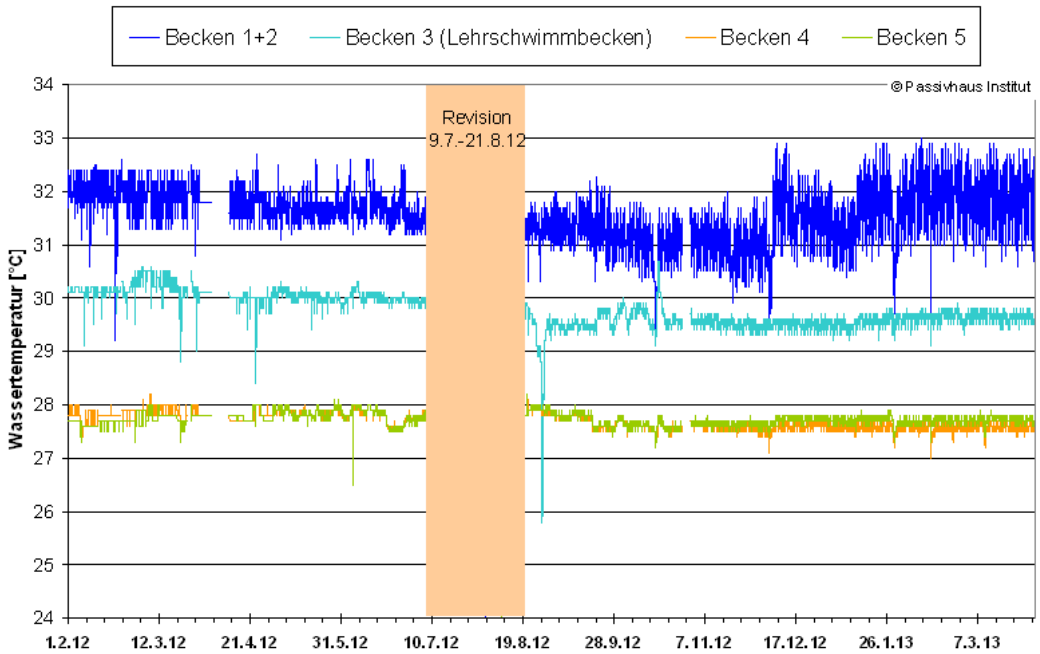


Abbildung 53: Verlauf der Wassertemperaturen der vier Becken (Februar 2012 bis März 2013, Stundendaten). Darstellung mit unterdrücktem Nullpunkt.

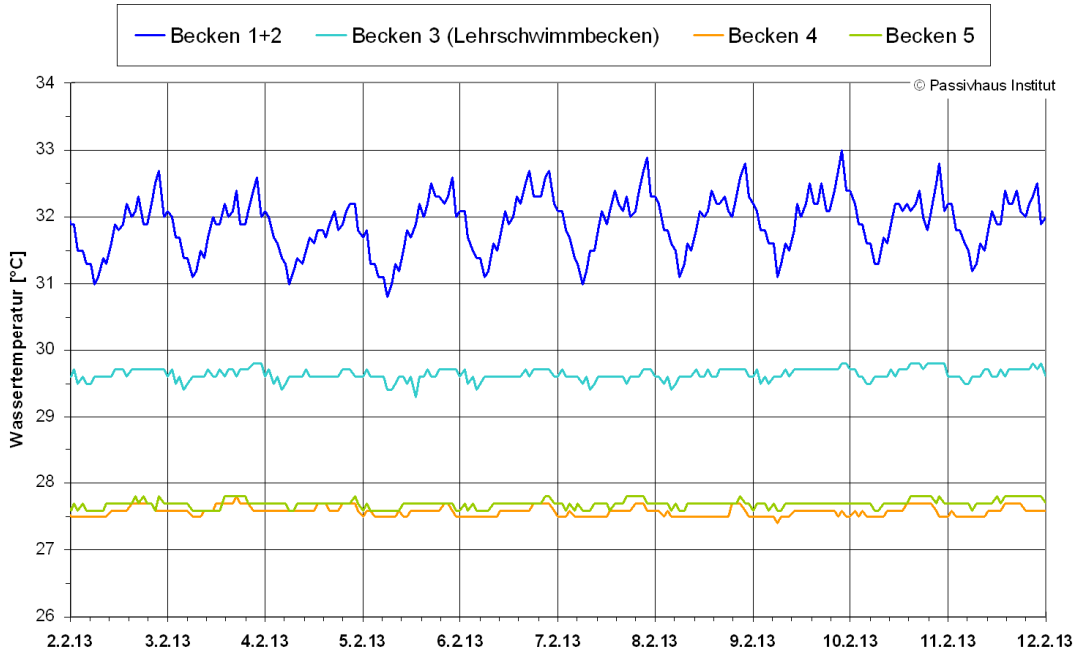


Abbildung 54: Detail der Wassertemperaturen der vier Becken (02.02. bis 11.2.2013, Stundendaten). Darstellung mit unterdrücktem Nullpunkt.

Die Monatsmittelwerte der Beckenwassertemperaturen sind in der nächsten Abbildung dargestellt. Aufgrund der Beckenentleerung während der Revisionszeit sind die Temperaturen im Juli und August 2012 nicht aussagekräftig.

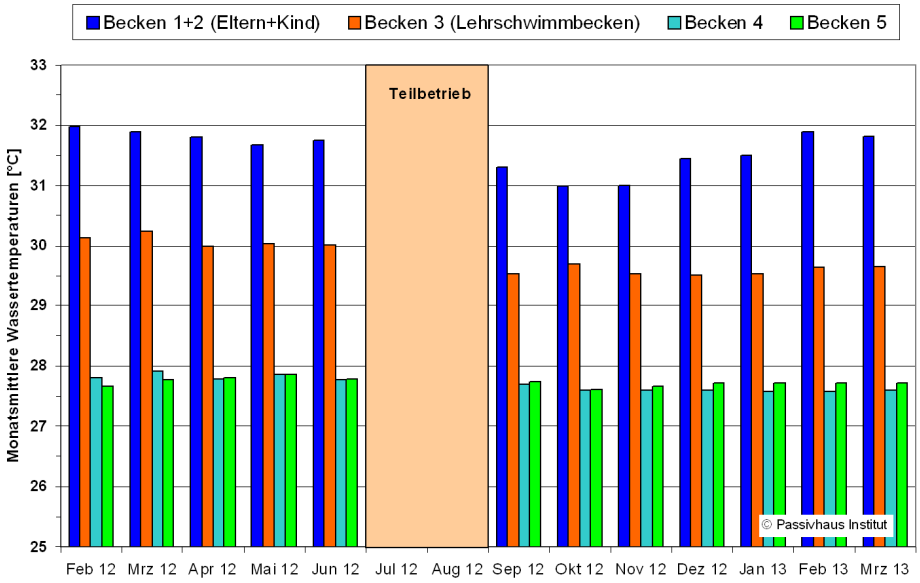


Abbildung 55: Mittelwerte der Wassertemperaturen in den vier Becken (Februar 2012 bis März 2013). Darstellung mit unterdrücktem Nullpunkt.

4.5 Lüftung

Nach Eröffnung des Bades wurden die Lüftungsgeräte zunächst im Normalbetrieb mit den Auslegungsvolumenströmen gefahren. Die Reduktion der Umluftvolumenströme und die Anhebung der Hallenfeuchten nach dem Konzept eines Passivhaus-Schwimmbades sollten schrittweise erfolgen. In den ersten Betriebsmonaten erfolgte zunächst die Einregulierung der Anlagen, dann folgten einige technische Verbesserungen (u.a. Korrektur Einbau der WMZ). In der Revisionszeit während der Sommerpause wurden interne Luft- und Kondensatleckagen in den Geräten nachgearbeitet. Durch den Optimierungsbedarf bei der Wasserqualität und noch vorhandenen Undichtheiten in der Gebäudehülle im Altbaubereich (Halle 5) konnten Versuche mit erhöhten Hallenfeuchten und Reduktion des Umluftvolumenstroms nur in Halle 1+2 und 3 durchgeführt werden.

4.5.1 Volumenstrom Hallengeräte

Für den Betrieb eines Hallenbades ist insbesondere der Außenluftvolumenstrom (für die Luftqualität) und der Umluftvolumenstrom von Interesse. Zur Verdeutlichung der beiden Betriebsweisen sind diese in Abbildung 56 schematisch dargestellt.

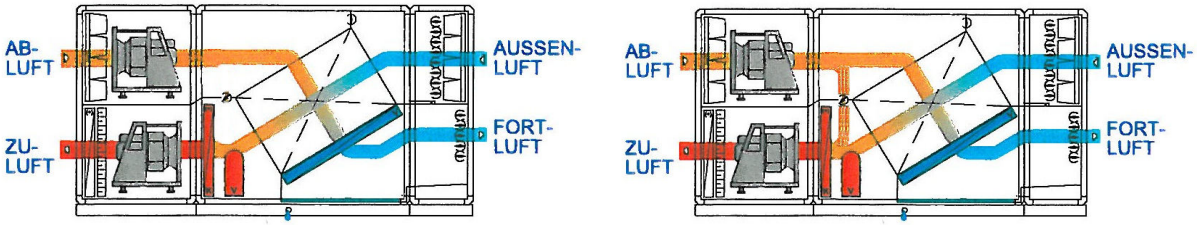


Abbildung 56: Schematische Darstellung eines Hallenlüftungsgerätes mit Wärmepumpe, mit (links) und ohne (rechts) Umluftanteil (Quelle: Menerga, ergänzt)

Der Umluftvolumenstrom wird in den Geräten nicht direkt gemessen; er kann als Differenz aus Zu- oder Abluftvolumenstrom und Außenluftstrom gebildet werden. Für die folgenden Grafiken ergibt sich damit:

- Außenluftvolumenstrom: „AU/ZU Volumenstrom über Reku“ (= Rekuperator)
- Umluftvolumenstrom: Differenz zwischen AU/ZU-Volumenstrom und ZU- bzw. AB-Volumenstrom

Zur Gesamtübersicht sind die Zu- und Abluftvolumenströme sowie der Volumenstrom über die Wärmerückgewinnungseinheit (Außen/Zuluftvolumenstrom) der vier Hallengeräte dargestellt (Abbildung 57 und Abbildung 58).

Beim Volumenstromverlauf vom Gerät für Halle 1+2 ist erkennbar, dass es deutliche Änderungen im Regelverhalten und im Umluftvolumenstrom gab. In dieser Halle sind u.a. Versuche vom PHI durchgeführt worden. Diese werden weiter unten be-

schrieben und analysiert. Der Auslegungsvolumenstrom von 14.500 m³/h wurde ab dem 19.12.2012 für etwa zwei Monate dauerhaft auf 8.300 m³/h abgesenkt. Danach gab es Zeiträume mit hohen und niedrigen Umluftvolumenströmen.

In Halle 3 wurden noch keine Reduktionen des Umluftvolumenstroms (also der Zu-/Abluftmenge) durchgeführt. Der Volumenstrom liegt - zumindest nach den Revisonsarbeiten - im Mittel dauerhaft bei etwa 8.000 m³/h. Am Verlauf des Außenluftvolumenstroms („AU/ZU über Reku“) ist der erhöhte Bedarf an Außenluft zur Entfeuchtung im Sommer im Gegensatz zum Winterzeitraum ablesbar.

Dieser Effekt ist bei Halle 4 und Halle 5 ebenfalls vorhanden, aber nicht so deutlich ausgeprägt. Das Gerät von Halle 4 wird dauerhaft zu-/abluftseitig mit etwa 12.000 m³/h betrieben. In Halle 5 liegen die Werte mit zunächst 15.500 m³/h etwas höher. Ab Ende November 2012 erfolgt eine Reduktion auf knapp 15.000 m³/h. Diese Volumenstromreduktion führt zu einer Reduktion des Stromverbrauchs der Anlage von etwa 23 kWh/Tag, was 690 kWh/Monat entspricht.

Alle vier Hallengeräte werden mit leicht höherem Abluft- als Zuluftvolumenstrom betrieben, um in der Halle zum Bauteilschutz geringe Unterdruckbedingungen zu erhalten (Herstellerstandard).

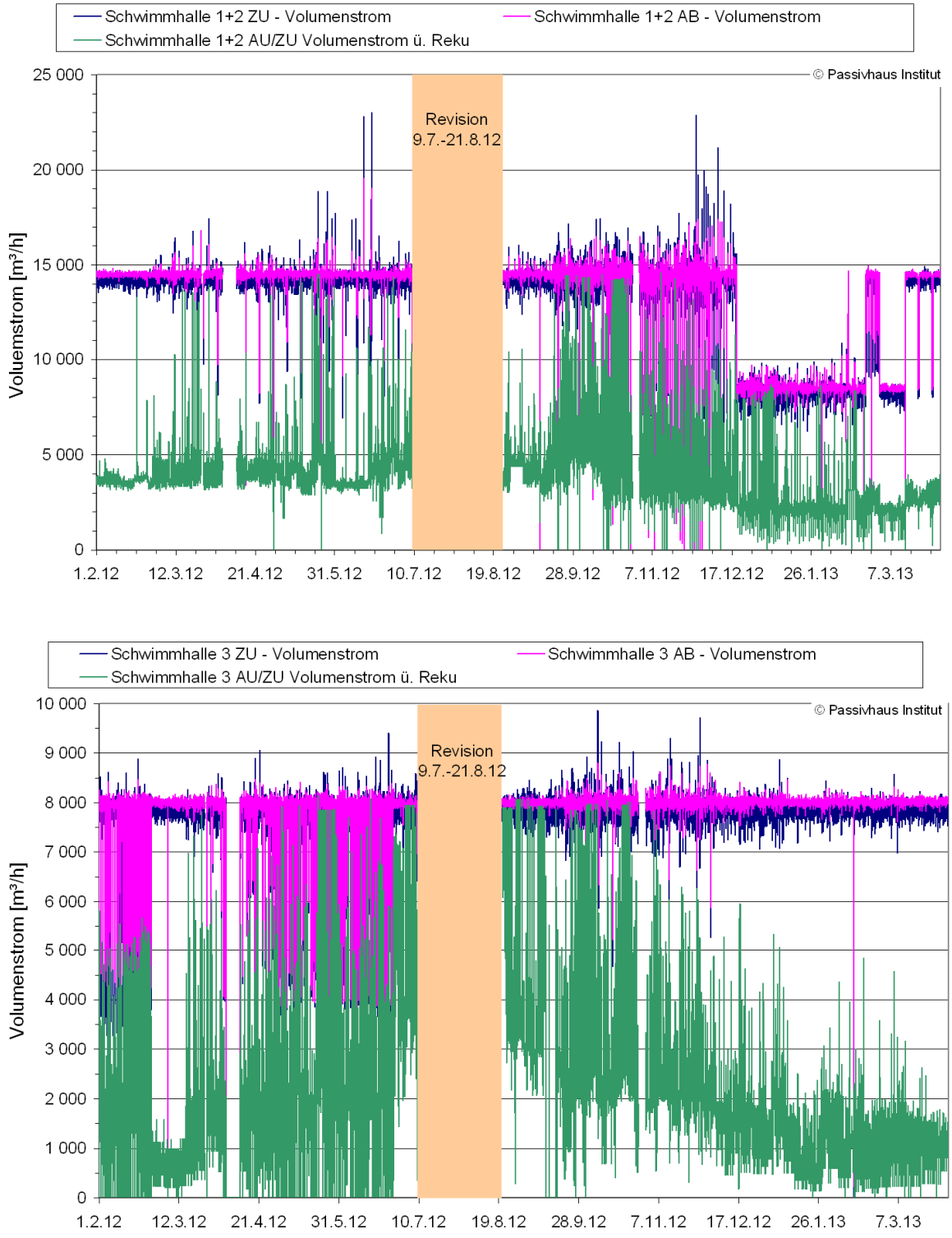


Abbildung 57: Volumenströme der Lüftungsanlagen von Halle 1+2 und Halle 3 vom 01.02.2012 bis zum 31.3.2013 (Tageswerte)

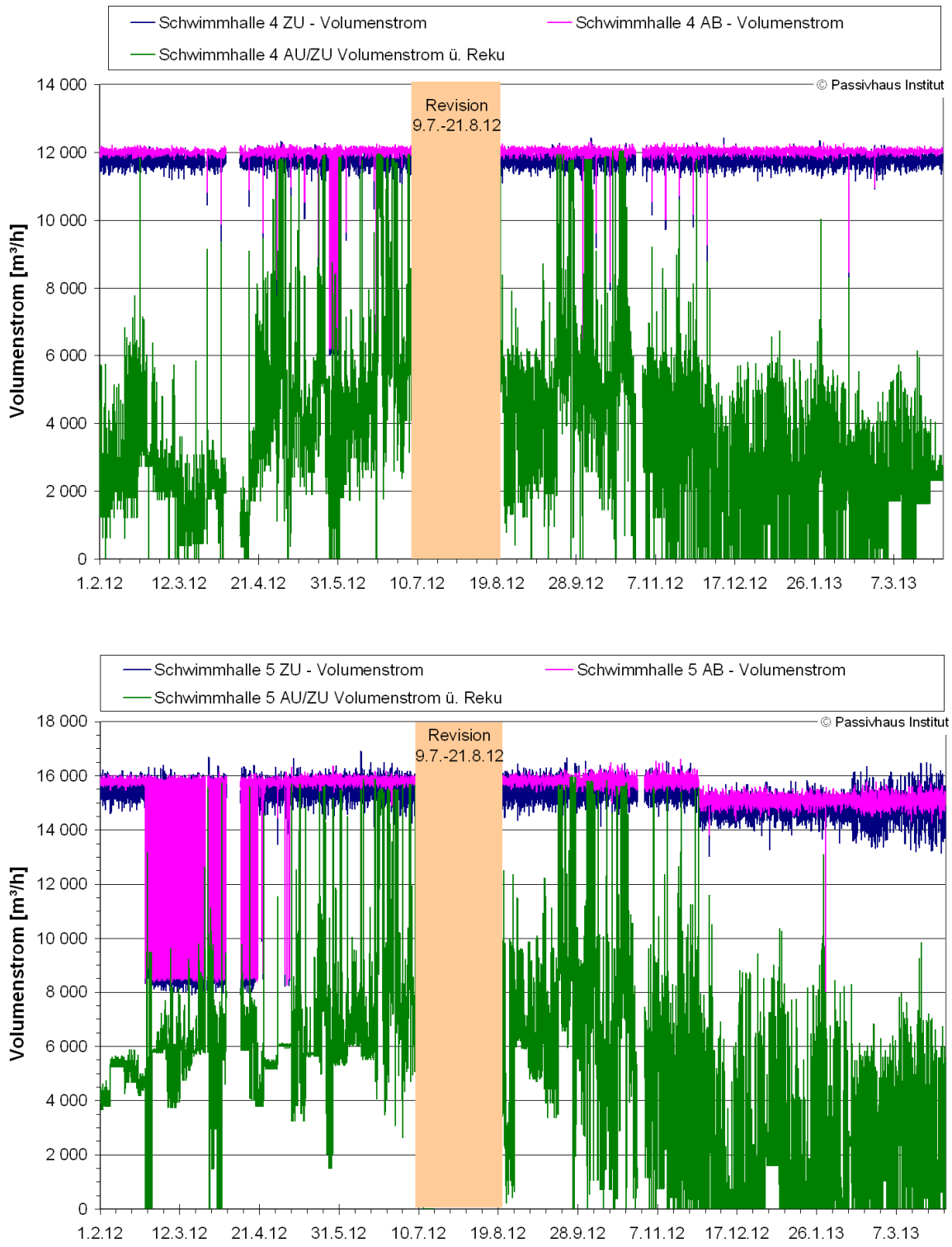


Abbildung 58: Volumenströme der Lüftungsanlagen von Halle 4 und 5 vom 01.02.2012 bis zum 31.3.2013 (Tageswerte)

4.5.2 Volumenstrom Geräte der Nebenzonen

Die Regelstrategie der beiden Lüftungsanlagen der Nebenzonen ist vollständig anders als das der Hallengeräte. Es handelt sich um andere Gerätetypen, welche

ohne Umluft arbeiten. Hier entspricht der Volumenstrom der Zuluft dem Außenluftvolumenstrom und der Abluftvolumenstrom dem der Fortluft.

4.5.2.1 Gerät "Umkleide/Duschen"

In Abbildung 59 ist zu erkennen, dass der Zuluft- und Abluft-Volumenstrom vom Gerät Umkleide/Duschen zwischen der Betriebsweise mit etwa 6.000 und 10.000 m³/h schwankt. Nachts erfolgt ab dem 20.09.2012 fast durchgehend eine Nachtabschaltung von 23:00 bis 06:00 Uhr. Die Volumenstromschwankungen ab dem 11.04.2012 ergeben sich zum Teil durch die Steuerung des Luftbedarfs nach der Feuchtesteuerung vom Duschbereich: Wenn dort die relative Feuchte den Maximalwert von 80 % übersteigt, wird der Außenluftstrom erhöht. Zusätzlich ist eine CO_2-Überwachung des Umkleidebereichs vorhanden, welche bei Überschreitung des Grenzwertes den Volumenstrom zusätzlich erhöht.

Im Regelfall würde das Gerät mit dem Auslegungsvolumenstrom von 10.000 m³/h dauerhaft betrieben werden, ggf. wäre eine Nachtabschaltung realisiert. Durch die realisierte Betriebsweise liegt der mittlere Volumenstrom inkl. der Nachtabschaltung bei nur 4.800 m³/h (01.11.2012 bis 31.3.2013). Dieser Unterschied erzeugt eine deutliche Einsparung durch die reduzierten Lüftungswärmeverluste sowie beim Stromverbrauch des Gerätes.

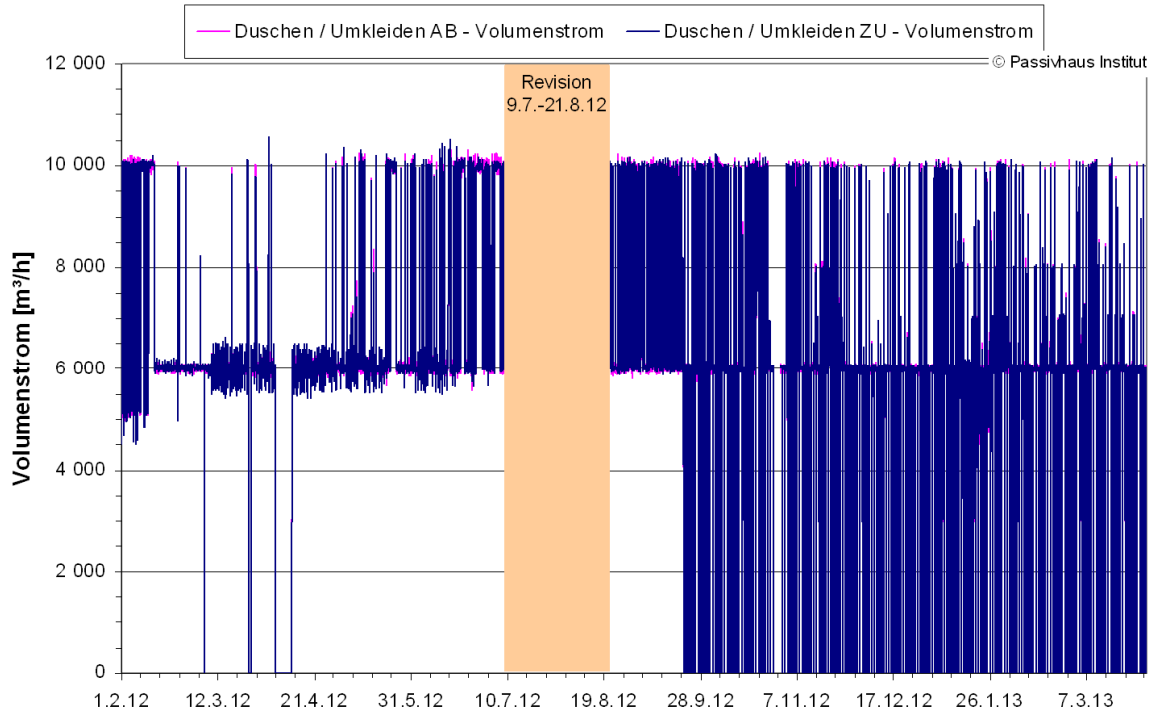


Abbildung 59: Volumenströme der Lüftungsanlagen Umkleiden/Duschen vom 01.02.2012 bis zum 31.3.2013 (Tageswerte)

4.5.2.2 Gerät “Nebenräume”

Das Gerät „Nebenräume“ versorgt den Foyer- und Eingangsbereich, den gesamten Keller sowie diverse Neben- und Technikräume. In Abbildung 60 zeigt sich, dass das Gerät wie beabsichtigt fast durchgehend mit einer aktiven Nachtabschaltung betrieben wird. Während der täglichen Betriebszeit läuft es üblicherweise mit etwa 8.000 m³/h. Die unbeabsichtigten, deutlich höheren Luftmengen in der Zeit vor und nach der Revision werden im Abschnitt 4.5.3.2 betrachtet.

Im Foyer wird mittels eines CO_2-Sensors die Luftqualität überwacht. Wenn die CO_2-Konzentration die Schwelle von 900 ppm überschreitet, öffnet die Klappe für den Foyer-Bereich weiter, um die Luftqualität dort zu verbessern. Die CO_2-Messwerte liegen daher nur als Spitzenwerte, kurzzeitig über dem Schwellenwert (siehe Abbildung 61). Insgesamt zeigen die CO_2-Messwerte eine sehr gute Luftqualität im Foyer.

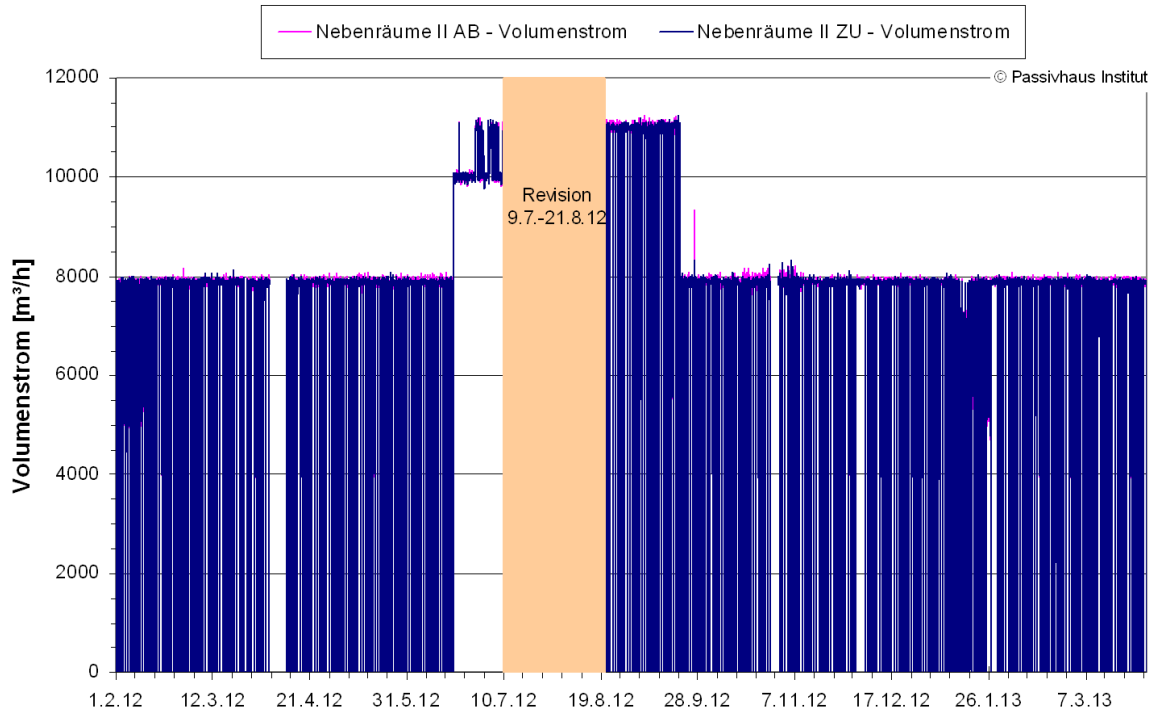


Abbildung 60: Volumenströme der Lüftungsanlagen Nebenräume vom 01.02.2012 bis zum 31.3.2013 (Tageswerte)

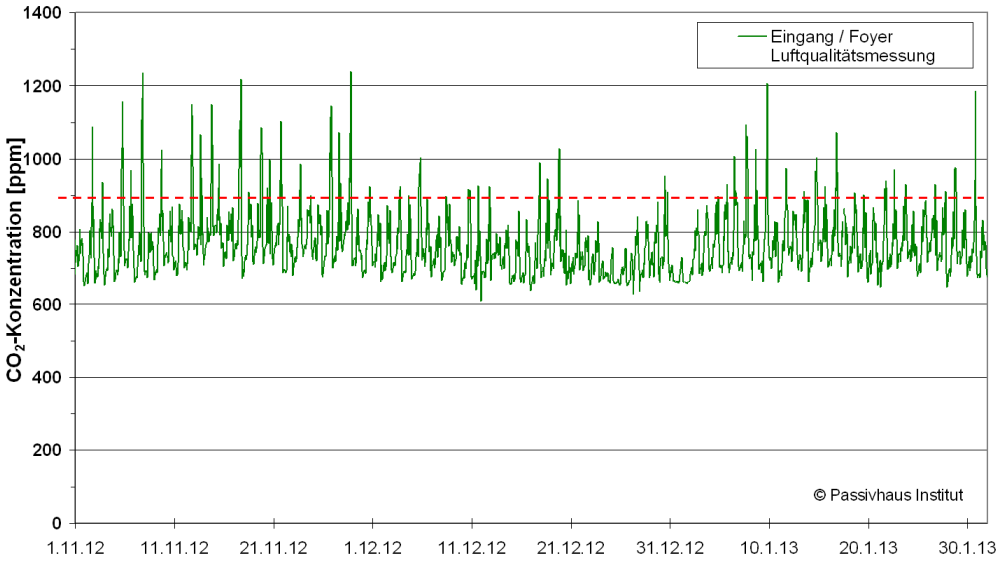


Abbildung 61: Die CO_2-Messwerte der Luftqualitätsüberwachung im Foyer vom 01.11.2012 bis zum 31.1.2013 (Tageswerte) zeigen hohe Luftqualität mit seltenen Überschreitungen der hier gewählten 900 ppm Grenze.

4.5.3 Auswirkungen der Volumenstromänderungen (Geräte Nebenzonen)

Beispielhaft werden einige Änderungen der Volumenströme an den beiden Lüftungsgeräten der Nebenzonen untersucht. Der Einfluss der Änderungen auf den Stromverbrauch ist durch die Veränderungen der Betriebsweise der Geräte deutlich erkennbar. Durch gezielte Veränderungen sowie durch ungewollte Bedienungseingriffe wurden die Luftvolumenströme z.B. bei den Geräten „Nebenräume“ und „Umkleide“ mehrfach deutlich verändert.

4.5.3.1 Gerät “Umkleiden/Duschen”

Am Gerät „Umkleiden/Duschen“ wurden am 21.08.2012 bei der Wiedereröffnung nach der Sommerpause vom konstanten Volumenstrom von 6.000 m³/h auf einen zeitweise erhöhten Betrieb mit 10.000 m³/h geschaltet. Dabei war gleichzeitig keine Nachtabschaltung aktiviert. Dies hat erwartungsgemäß einen deutlich höheren Stromverbrauch erzeugt (etwa plus 20 kWh/Tag). In Abbildung 62 sind die Zu- und Abluftvolumenströme sowie die Stromverbräuche dargestellt. Erst am 20.09.2012 nach einem Ortstermin durch Mitarbeiter des PHI wurde die geplante Nachtabschaltung des Gerätes erstmalig aktiviert. Diese Maßnahme reduzierte den Stromverbrauch deutlich, wird in den Tagen nach dem 23.09.2012 aber durch längeren Betrieb auf der erhöhten Stufe mit 10.000 m³/h zum Teil überlagert. Auch beim Wärmeverbrauch macht sich die Änderung durch die geringeren Lüftungswärmeverlust bemerkbar: An den drei Tagen vor der Änderung vom 20.09.2012 verbrauchten die Heizregister des Lüftungsgerätes und der beiden Nacherhitzer der Duschen 89 kWh/Tag, an den drei Tagen nach der Änderung waren es nur noch 66 kWh/Tag (Reduktion um 23 kWh/ Tag, entsprechend 26 %).

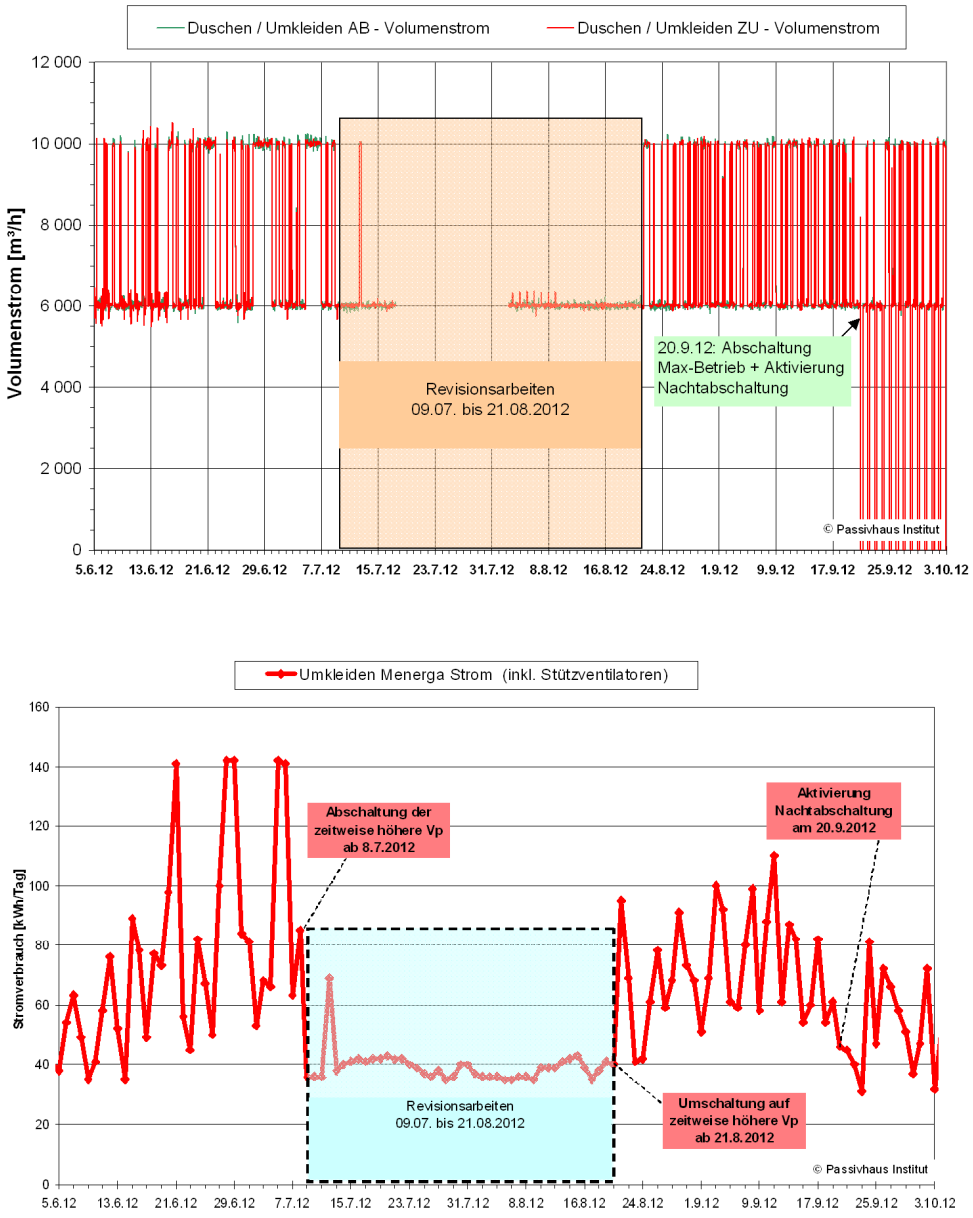


Abbildung 62: Veränderungen im Luftvolumenstrom des Lüftungsgerätes "Umkleide" mit den zugehörigern Stromverbrauchswerten der Anlagen (Tageswerte 05.06. bis 03.10.2012).

4.5.3.2 Gerät "Nebenräume"

Beim Lüftungsgerät „Nebenräume" ist Ähnliches zu beobachten (siehe Abbildung 63): Der Stromverbrauch steigt ab dem 18.06.2012 durch die Anhebung des Volumenstroms von ca. 8.000 auf 10.000 m³/h und Verhinderung der Nachtabschaltung drastisch an (plus 54 kWh/Tag). Bereits vor den Revisionsarbeiten an dem Gerät (17.07. bis 02.08.2012) wurde versehentlich die Taste „Handbedienung" aktiviert (12.07.2012), bzw. diese nicht wieder aufgehoben. Damit wurde das Gerät

mit maximaler Luftförderleistung (12.000 m³/h) betrieben, gleichzeitig wurde aber die geplante Nachtabschaltung aktiviert. Insgesamt sank der Stromverbrauch dadurch um etwa 16 kWh/Tag. Der eigentlich gewünschte Betrieb wurde dann wieder ab dem 20.09.2012 (Ortstermin PHI Mitarbeiter) realisiert: Volumenstrom von 8.000 m³/h im Tagbetrieb sowie eine Nachtabschaltung von 23:00 bis 06:00 Uhr. Diese Maßnahme bedingte eine Reduktion des Stromverbrauchs von 40 kWh/Tag auf nur noch etwa 30 kWh/Tag. Die Wärmeversorgung verändert sich in der Tagessumme durch die Veränderungen des Luftvolumenstroms nicht merklich.

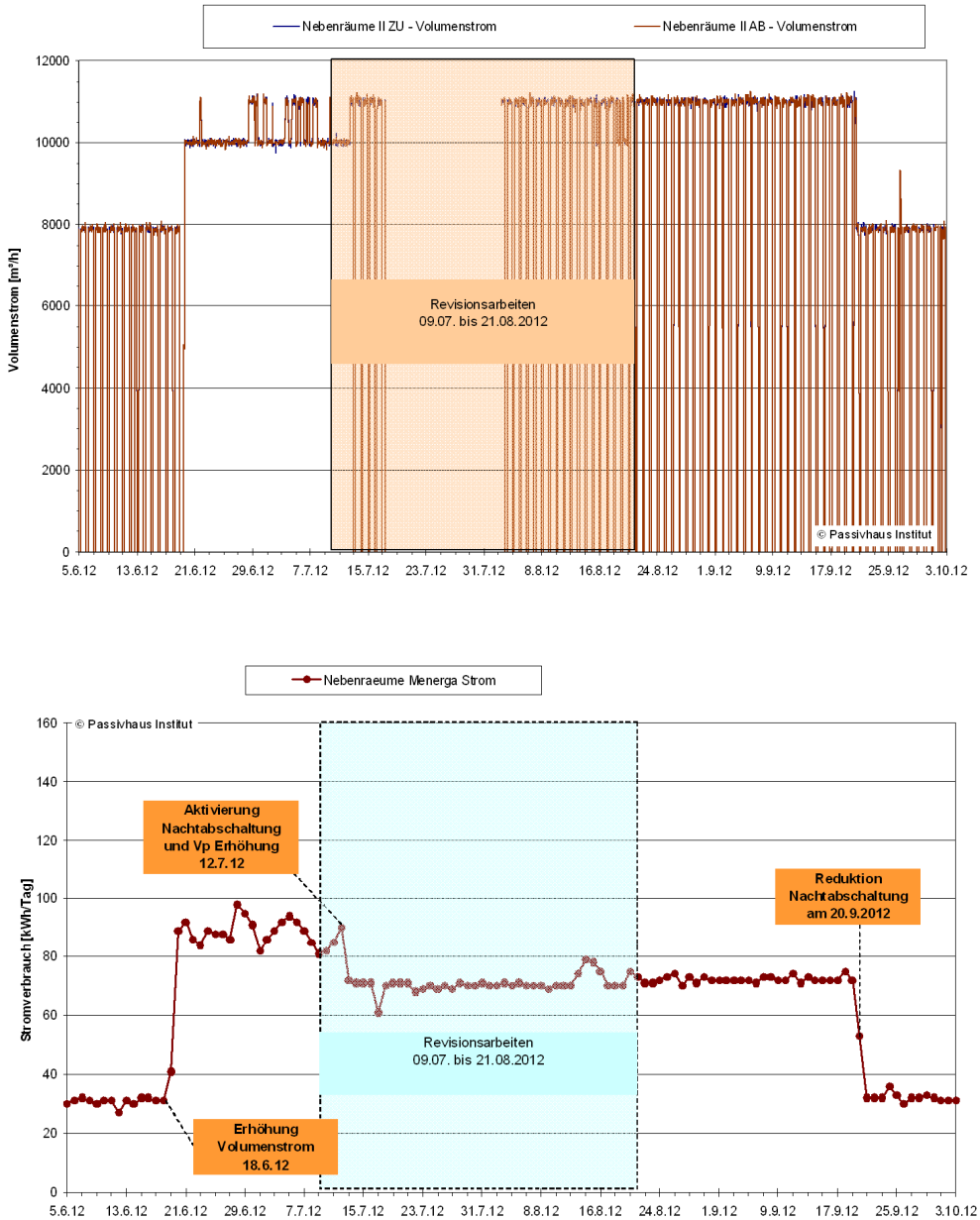


Abbildung 63: Veränderungen im Luftvolumenstrom des Lüftungsgerätes “Nebenräume” mit den zugehörigen Stromverbrauchswerten der Anlagen (Tageswerte 05.06. bis 03.10.2012).

4.5.4 Stromeffizienz der Lüftungsgeräte

Zur Beurteilung der Stromeffizienz der Lüftungsgeräte wurden an vier beispielhaften Tagen der Stromverbrauch des Tages der Lüftungsanlage inkl. Regelung auf den Mittelwert des Zu-/Abluftvolumenstroms des gesamten Tages bezogen. Bei Gerät 1+2 wurde dafür der Stromverbrauch der Wärmepumpe vom Geräteverbrauch abgezogen (mit Ausnahme des 15.09.2012; zu dieser Zeit war noch keine separate Messung des Stromverbrauchs der Wärmepumpe vorhanden).

Beim Gerät „Umkleiden“ ist abweichend zu berücksichtigen, dass der Ventilatorstrom der beiden Zusatzventilatoren zum Lufttransport durch die beiden Nachheizregister und Kanäle zu den Duschbereichen im Messwert enthalten ist.

Tabelle 6: Tagesmittlere Luftvolumenströme und Stromeffizienz der sechs Lüftungsgeräte an vier beispielhaften Tagen.

	Halle 1+2		**Halle 3**		**Halle 4**		**Halle 5**	
	m³/h	W/m³/h	m³/h	W/m³/h	m³/h	W/m³/h	m³/h	W/m³/h
15.09.2012	14322	**---**	7930	**0,40**	11893	**0,43**	15656	**0,35**
22.12.2012	8433	**0,22**	7956	**0,36**	11921	**0,39**	14878	**0,31**
07.01.2013	8388	**0,22**	7965	**0,38**	11895	**0,40**	14939	**0,32**
16.01.2013	8317	**0,21**	7938	**0,34**	11916	**0,39**	14917	**0,30**

	Umkleiden *		**Nebenräume**	
	m³/h	W/m³/h	m³/h	W/m³/h
15.09.2012	6494	**0,35**	7486	**0,40**
22.12.2012	4354	**0,38**	5696	**0,29**
07.01.2013	4725	**0,44**	5372	**0,28**
16.01.2013	4240	**0,34**	2425	**0,24**

* inkl. Stützventilatoren für die Duschbereiche

Die Messwerte zeigen gute bis sehr gute Ergebnisse, was auf gute Stromeffizienzen der Geräte und niedrige Druckverluste des Kanalnetzes schließen lässt.

4.5.4.1 Standby-Stromverbrauch

Aufgrund der schlechten Auflösung der Elektrozähler von einer Kilowattstunde kann die Standby-Leistung der Geräte nur grob eingegrenzt werden. Dies ist auch nur bei Geräten möglich, welche über ausreichende Stillstandszeiten verfügen. Die Geräte „Umkleide“ und „Nebenräume“ werden im Regelbetrieb in der Nacht mehr als 6 Stunden komplett abgeschaltet. In den Nachtstunden werden regelmäßig 1 bzw. 2 kWh Strom verbraucht, was einer elektrischen Leistung von etwa 150 bzw. 300 W entspricht. Damit liegen die Standby-Leistungen deutlich zu hoch. Die Hallengeräte im Lippe-Bad werden bei der gewählten Betriebsweise dauerhaft betrieben, wodurch keine Messungen des Standby-Verbrauchs der Geräte erfolgen kann.

4.5.5 Durchströmung der Halle / Nebelversuche

Es sollte untersucht werden, ob die Hallen auch mit dem geplanten, deutlich reduzierten Zu- bzw. Umluftvolumenstrom betrieben werden können, ohne dass sich Beeinträchtigungen für die Badegäste einstellen. Insbesondere ist dabei von Interesse, ob es Bereiche in einer Halle gibt, welche nicht oder nur unzureichend von der Luft durchströmt werden (sog. „Totecken“). Das Ziel ist bei gleichem Außenluftvolumenstrom den Zuluftvolumenstrom zu senken.

Aus diesem Grund wurden in der Nacht vom 05. auf den 06.12.2012 nach dem Ende des öffentlichen Badebetriebes ab 22:00 Uhr Nebelversuche in Halle 1+2 durchgeführt. Dazu wurden im zugehörigen Lüftungsgerät zwei Nebelgeräte positioniert und bei unterschiedlichen Zuluftvolumenströmen durch die Zuluftdüsen Nebel in die Halle eingebracht. Mittels Filmkameras an drei Positionen in der Halle und zusätzlichen Fotos wurde die Nebelverteilung in der Halle untersucht.

Abbildung 64: Nebelversuche in Halle 1+2 in der Nacht vom 05. auf den 06.12.2012. Blick auf die Außenwand (links) und die Wand zu den Umkleidebereichen (rechts). Im Bild sind zwei Zuluftdüsen (Kreise) und das Abluftgitter (Pfeil) gekennzeichnet.

Die Zu- und Abluftluftmenge wurde für den Versuch von 14.300 m³/h auf 8.300 m³/h reduziert, was einer Reduktion um 42 % entspricht. Durch das Schließen etwa der Hälfte der Zuluftdüsen mittels Stellmotoren bleibt der notwendige Druck an den Düsen bestehen.

Es zeigte sich, dass sich der Nebel auch bei reduziertem Zu-/Abluftvolumenstrom sehr schnell und gleichmäßig in der Halle verteilte. Nach etwa 40 Sekunden war die gesamte Halle 1+2 gleichmäßig eingenebelt (Abbildung 65). Daher wurde mit dem Fachplaner und dem Betreiber entschieden, dass der reduzierte Umluftvolumenstrom vollständig ausreichend für den Betrieb ist und die Anlagen mit reduziertem Umluftvolumenstrom betrieben werden können. Das dadurch ermöglichte, erhebliche Einsparpotential durch niedrigeren Stromaufwand für das Lüftungsgerät ist in Abschnitt 4.6.2 beschrieben.

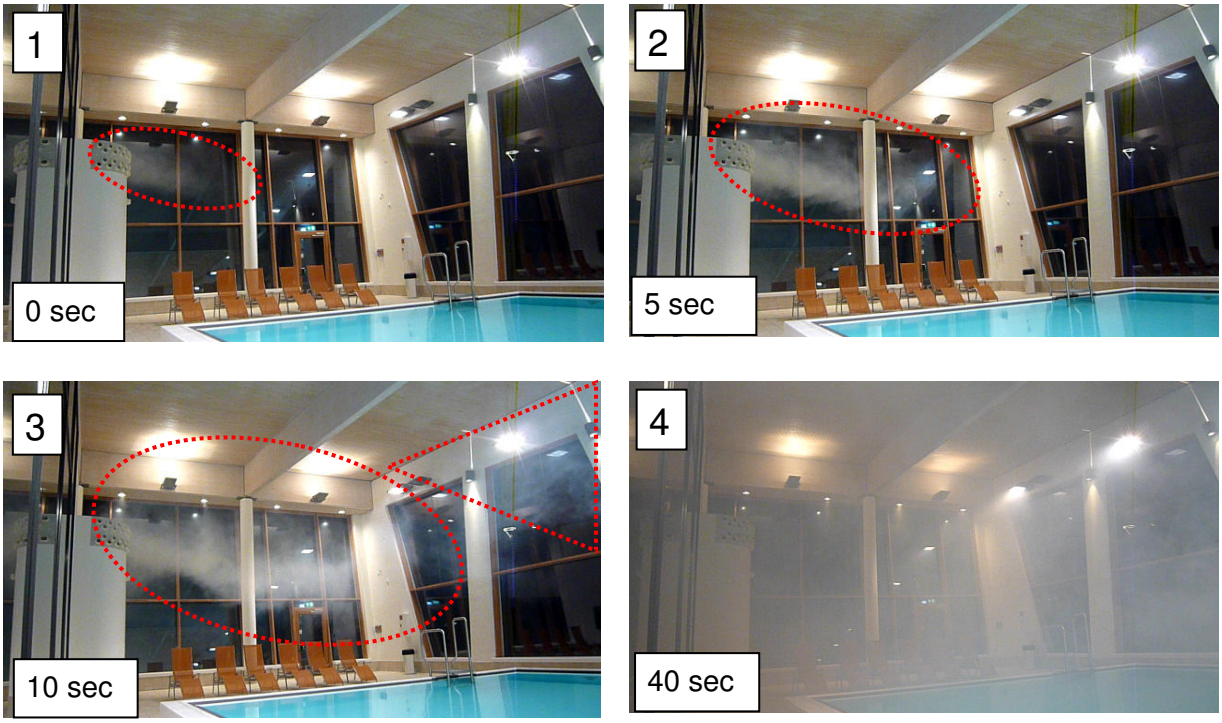


Abbildung 65: Fotostrecke zur Nebelausbreitung auf der Fassadenseite der Halle 1+2 bei Nebelaustritt aus dem Lüftungsturm (reduzierter Volumenstrom). Bei Bild 3 ist bereits der Nebel aus den Zuluftdüsen an der Innenwand in dem dargestellten Hallenbereich angekommen (rotes Dreieck). Bereits nach ca. 40 Sekunden ist die Halle gleichmäßig vernebelt.

4.5.6 Außenluftanteil

In jedem Lüftungsgerät werden der Zu- und der Abluftvolumenluftstrom der Ventilatoren geräteintern gemessen. Der energetisch interessante Außenluftanteil wird bei den Hallengeräten über eine geräteinterne Druckdifferenzmessung über die Wärmerückgewinnungseinheit (Rekuperator) bestimmt. Diese Messungen werden durch regelmäßige, automatische, nächtliche Kalibrierungen justiert, um die Druckverluständerung der Wärmeübertragereinheit zu kompensieren. Zunächst wurde dieser Abgleich wöchentlich durchgeführt, was aber zu relevanten Abweichungen im Volumenstrom führte. Daher wurden die Hallengeräte auf eine tägliche Kalibrierung umgestellt.

Der Mindestaußenluftanteil ist nach der [VDI 2089], unabhängig von der Hallenfeuchte auf ≥ 30 % des Außenluft-Auslegungsmassenstroms festgelegt. Bei dauerhafter Unterschreitung des Rechenwertes für die THM-Konzentration (Trihalogenmethane) im Beckenwasser kann der Außenluftmassenstrom laut der Richtlinie [VDI 2089] auf ≥ 15 % reduziert werden.

Bei der Reduktion der Zu-/Abluftvolumenströme sollte der Mindest-Außenluftvolumenstrom nicht beeinflusst werden. Bei der Umsetzung der - durch den Nebelver-

such (vgl. vorheriger Abschnitt) ermöglichten - Zuluftreduktion am 19.12.2012 zeigte sich allerdings unerwartet ein deutlicher Einfluss auf den Außenluftvolumenstrom. In Abbildung 66 markieren die beiden gestrichelten horizontalen Linien jeweils etwa den minimalen Außenluftvolumenstrom vor und nach der Umluftvolumenstromreduktion (ca. 2.300 und 1.200 m³/h). Diese Außenluftvolumenströme entsprechen etwa 16 % bzw. 8 % des Auslegungsvolumenstroms. Die Klärung der technischen Ursachen erfolgt zurzeit noch. Eine Ursache liegt in der begrenzten Genauigkeit der Druckmessdosen bei niedrigen Volumenströmen. Die Druckdosen wurden mittlerweile gegen verbesserte getauscht; eine weitere Testmessung steht noch aus.

Zur Sicherstellung der gleichbleibend guten Hallenluftqualität muss zunächst so lange auf die Zu- bzw. Umluftvolumenstromreduktion verzichtet werden, bis der Mindestaußenvolumenstrom dauerhaft sichergestellt werden kann.

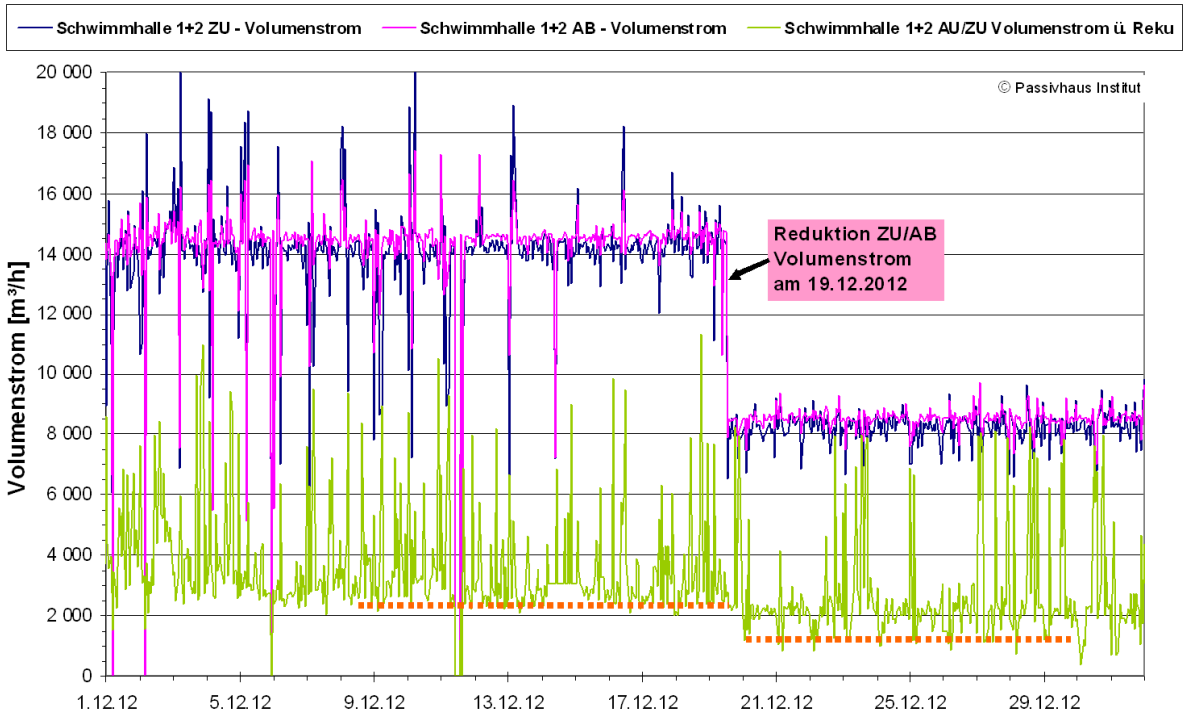


Abbildung 66: Verlauf der Volumenströme um den 19.12.2012. Erläuterungen siehe Text.

Eine erste orientierende Luftqualitätsmessung wurde am 26.02.2013 in der Zeit von 9:30 bis 13:00 Uhr durch die LVHT GmbH in drei Hallen durchgeführt [Funcke 2013]. Zu dieser Zeit (3,5 Stunden) wurde im Gerät 1+2 ein Außenluftvolumenstrom von im Mittel 3.000 m³/h gemessen (entspricht 21 % des Auslegungsvolumenstroms). In Halle 3 waren es 1.330 m³/h Außenluft (entspricht 16,9 %), in Halle 5 nur 1.281 m³/h (entspricht 8,6%). Die Hallenfeuchten lagen zwischen 57,4 und 58,4 % im Zeitraum der Probennahme (20 cm über dem Wasserspiegel) relativ hoch.

Zur Untersuchung der Luftproben auf THM wurde u.a. das Verfahren der Anreicherung auf Aktivkohle, Flüssigdesorption und anschließender gaschromatischer Ana-

lyse angewendet. Der Kurzbericht der Messung zeigt an, dass alle Messwerte in der Hallenluft unterhalb der Nachweisgrenze (5,0 bzw. 1,3 µg/m³ Luft) liegen. Eine erhöhte Belastung der Hallenluft mit Trihalogenmethanen konnte damit - sogar bei den sehr niedrigen Außenluftvolumenströmen - nicht festgestellt werden. Weitere Untersuchungen dazu bei gezielt unterschiedlichen Hallenluftfeuchten bzw. Außenluftvolumenströmen im Lippe-Bad können helfen, den Wissensstand zu diesem Thema nachhaltig zu verbessern.

4.5.7 Änderung des Regelverhaltens

Durch Änderungen an der Programmierung der Lüftungsanlagen durch die Herstellerfirma ergaben sich Veränderungen im Regelverhalten der Anlagen. Gab es bei der Datenkontrolle Auffälligkeiten, musste zunächst anhand der Messwerte geklärt werden, ob es sich um Sensordefekte, Störungen, Sollwertanpassungen durch den Betreiber oder Regelungsänderungen durch den Hersteller handelte. Durch mehrfach auftretende Auffälligkeiten und dem Zeitraum bis zur Behebung der Ursachen, zeigen die Messdaten z.T. über längere Zeiträume unerwünschte Effekte bzw. Betriebsweisen. Diese Zeiträume sind für eine repräsentative Auswertung nur bedingt nutzbar.

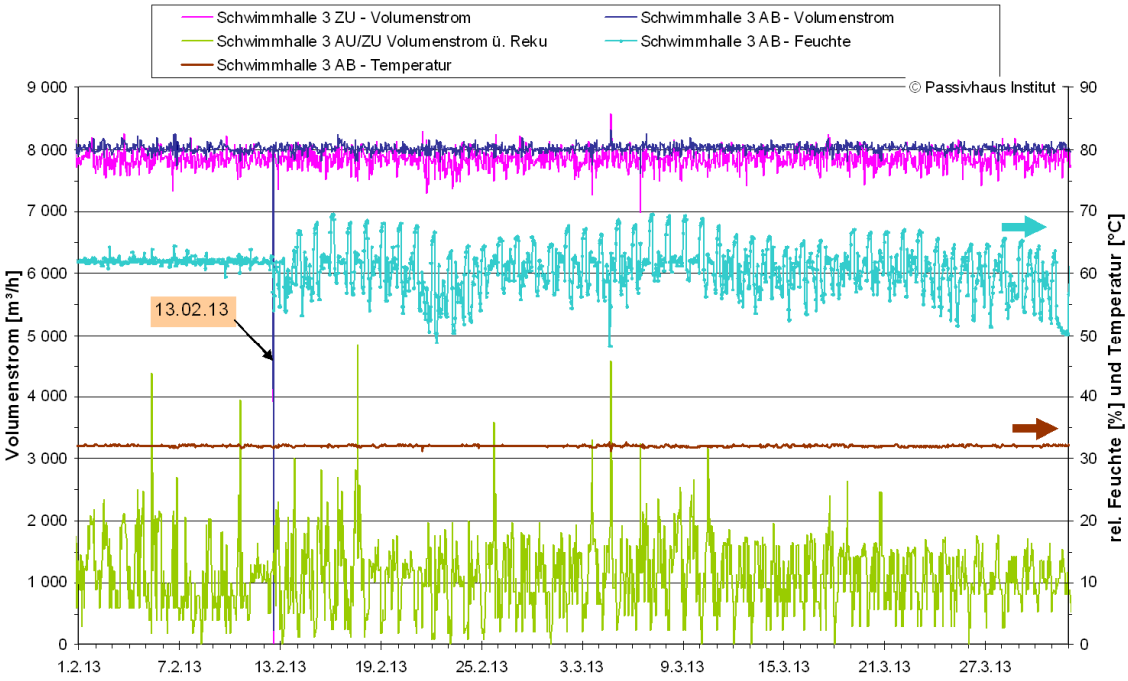


Abbildung 67: Auswirkungen auf die Hallenfeuchte durch Änderung des Regelverhaltens (Aktivierung Tag-/Nachtbetrieb) vom Lüftungsgerät Halle 3 am 13.02.2013 (Stundendaten vom 01.02. bis zum 31.03.2013).

In Abbildung 67 sind die Auswirkungen eines Eingriffs vom 13.02.2013 durch die Herstellerfirma dokumentiert. Durch Anpassungen der Regelparameter und der gleichzeitigen Aktivierung einer unterschiedlichen Tag-/Nacht-Fahrweise (Sollwert-

vorgabe) gibt es deutliche Tag-/ Nacht-Schwankung der Hallenfeuchte von über 10 % welche erst nach einiger Recherche erklärt werden konnten.

4.5.8 Luftgeschwindigkeit über der Wasseroberfläche

Es ist von Interesse, ob die Änderung des Zuluftvolumenstroms einen nennenswerten Einfluss auf die Luftgeschwindigkeit über der Wasseroberfläche hat. Dadurch könnten sich Einflüsse auf die Verdunstung des Beckenwassers ergeben. Aus diesem Grund wurden am 05.12.2012 Luftgeschwindigkeitsmessungen über der Wasseroberfläche von Becken 1+2 bei den beiden unterschiedlichen Umluftvolumenströmen durchgeführt.

Es wurden vier Messpunkte 35 cm über der Wasseroberfläche nahe dem Beckenrand gewählt. In der Skizze (Abbildung 68) sind die Messpositionen und die Zu- und die Abluftpositionen eingetragen. Die Positionen unterscheiden sich durch unterschiedliche Einflüsse der Zu- und Abluftöffnungen.

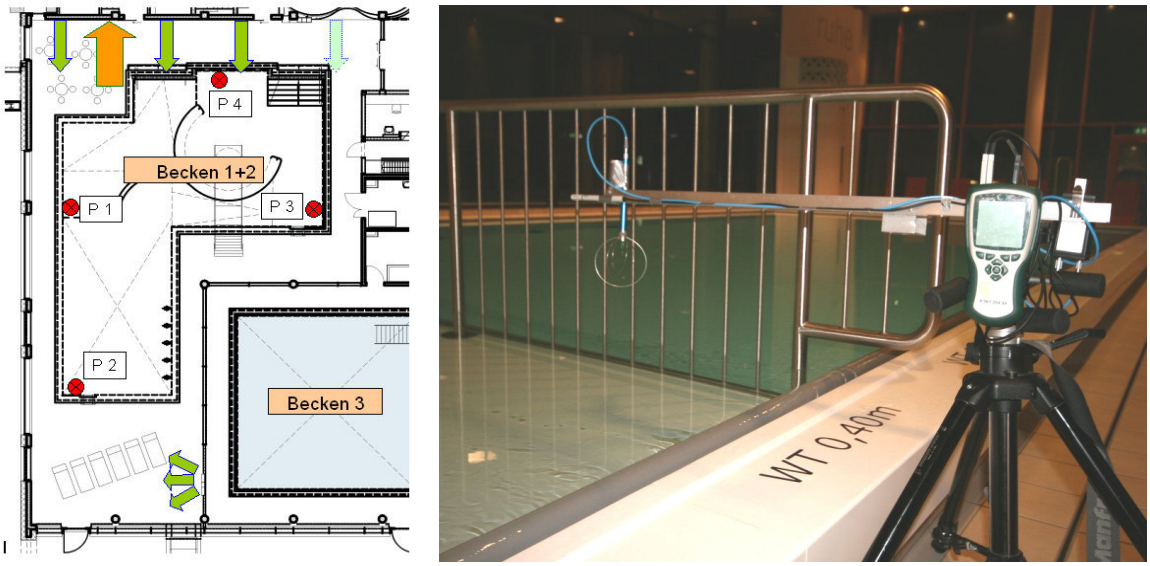


Abbildung 68: Links: Die vier Messpositionen P1 bis P4 über der Wasseroberfläche von Becken 1+2. Mit den grünen Pfeilen sind die Zuluftpositionen und mit dem orangenen Pfeil ist die Abluftposition markiert. Rechts: Foto von Messposition P1.

Zeitweise wurde das Becken während der Messungen noch genutzt. Durch die Nutzung haben sich Störungen in den Messungen ergeben. Daher wurden nur die Messdaten verwendet, bei denen keine Beckennutzung vorhanden war.

Die Auswertung der Luftgeschwindigkeitsmessung über der Wasseroberfläche von Becken 1+2 an den vier unterschiedlichen Positionen zeigt, dass:

- der Unterschied zwischen reduziertem und vollem Lüftungsvolumenstrom über der Wasseroberfläche kaum messtechnisch nachweisbar ist,

- für Aussagen zum Turbulenzgrad nach EN ISO 7730 zu viele Störungen während der Messung bestanden.

Ob sich durch die Unterschiede in der mittleren Strömungsgeschwindigkeit relevante Auswirkungen auf die Wasserverdunstung ergeben, konnte auf diesem Weg nicht festgestellt werden.

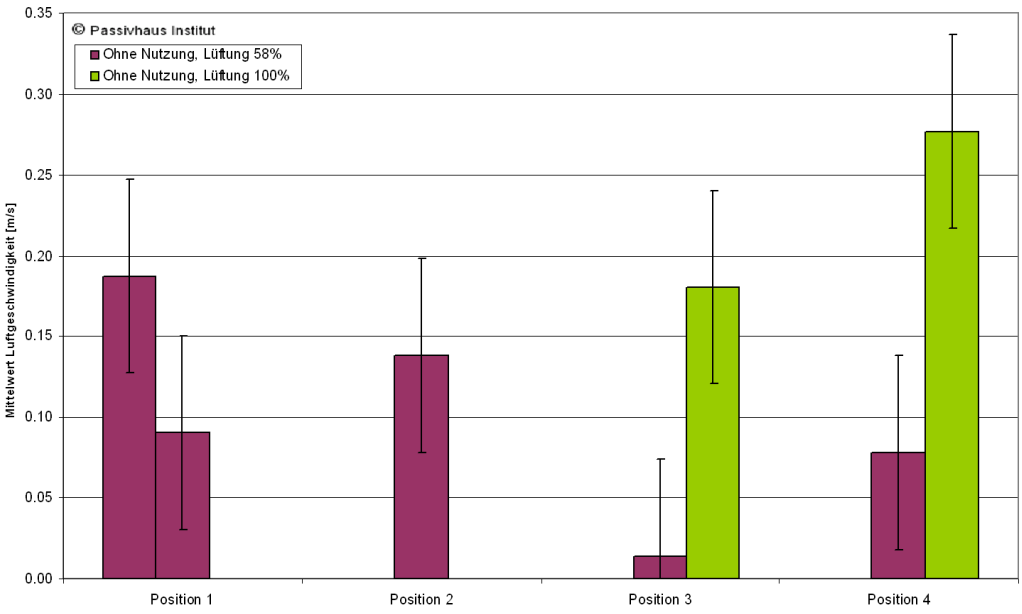


Abbildung 69: Luftgeschwindigkeiten 35 cm über der Wasseroberfläche von Becken 1+2 an vier Messpositionen bei unterschiedlichem Zu-/Abluftvolumenstrom. An Position 1 konnten zwei Messungen bei 58 % Lüftungsvolumenstrom ausgewertet werden. Im Diagramm sind zusätzlich die Messabweichungen eingetragen.

4.6 Versuchsreihen und geänderte Betriebsbedingungen

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Hallenfeuchten, Umluft- und Außenluftvolumenströme auf den Energieverbrauch wurden im Rahmen des Monitorings untersucht, um die Ansätze der Passivhaus Schwimmbad Grundlagenstudie [Schulz et al. 2009] zu überprüfen. Dazu wurden gezielt verschiedene Variationen dieser Parameter durchgeführt und die Auswirkungen untersucht. Einige beispielhafte Änderungen der Betriebsparameter können der folgenden Tabelle entnommen werden:

Tabelle 7: Auszug aus dem Plan zu den Versuchsreihen zur Veränderung der Betriebsweise der Sollwerte bzw. der Hallenlüftungsgeräte

#	Start	Ende	Maßnahmen	Hallen			
				1+2	3	4	5
1	05.12.12	dauerhaft	Anhebung Feuchte um 5%	x	x	x	x
2	19.12.12	dauerhaft	Luftmenge Zu/Ab reduzieren.	x			
3	09.01.13	dauerhaft	Anhebung Feuchte + 5% (Halle 1+2) bzw. +7% (Halle 3)	x	x		

Auch durch Änderungen der Betriebsbedingungen (z.B. Hallenfeuchte) außerhalb dieses gezielten Untersuchungsprogramms gab es einige abrupte Anpassungen, welche ebenfalls auf ihre Auswirkungen hin untersucht werden können (siehe dazu auch 4.5.3).

4.6.1 Variation der Hallenfeuchte

Die Regelung der Lüftungsgeräte erfolgt nach der Sollwertvorgabe der Raumluftfeuchte. Niedrigere Raumluftfeuchten erfordern höhere Außenluftwechsel zur Trocknung der Luft, was einen höheren Wärmeverbrauch - verursacht durch Lüftungswärmeverluste - zur Folge hat. Am 18.09.2012 wurden - wie bereits erwähnt - die Hallenfeuchten in drei Hallen deutlich gesenkt (ca. -15 %-Punkte bzw. 4,4 g/kg), was zu einer erheblichen Erhöhung des Wärmeverbrauchs geführt hat. Die Absenkung der relativen und der absoluten Feuchte bei gleichbleibendem Temperaturniveau ist im linken Teil von Abbildung 70 beispielhaft für Halle 5 dargestellt. Im rechten Teil der Abbildung ist die Erhöhung des Wärmeverbrauchs durch die Feuchtereduktion anhand der Messdaten der Luftheizregister der drei betroffenen Hallen dargestellt.

Die Verbräuche von Halle 4 und 5 zeigen deutliche Anstiege der Heizwärme. In Halle 1+2 wurde vorher gar nicht über das Heizregister nacherwärmt, da die Wärmepumpe des Gerätes zur Beheizung ausreichte. Durch die Änderung wird nun auch in dieser Halle eine Nachheizung über das Heizregister notwendig. Der Mehrverbrauch durch die Reduktion der Feuchte der drei Hallen beträgt in Summe ca. plus 410 kWh/Tag. Dabei sind die Wärmeeinträge der Wärmepumpe noch nicht berücksichtigt,

da zu dieser Zeit noch keine gesonderte Strommessung der WP aktiv war. Damit bestätigen sich die theoretischen Ansätze aus der Grundlagenstudie [Schulz et al. 2009].

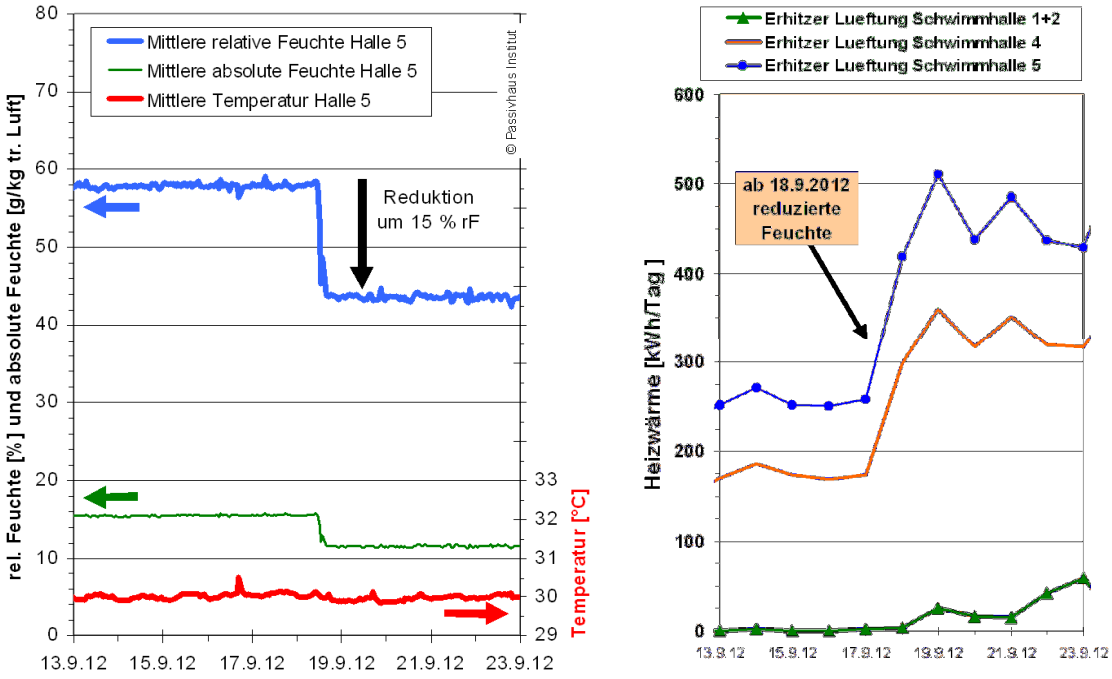


Abbildung 70: Änderung der Hallenfeuchte am 18.09.2012 (Links exemplarisch für Halle 5 abgebildet). Rechts: Auswirkungen der Veränderungen der Hallenfeuchte auf den Heizwärmeverbrauch der Lüftungsgeräte in drei Hallen (Tageswerte; 13. bis 22.09.2012).

Bei der niedrigeren Hallenfeuchte ist - für den dann höheren Abtransport der Feuchtelasten aus den Hallen - ein größerer Außen-/Fortluftstrom notwendig. Die Erhöhung des Außenluftvolumenstroms bei gleichbleibendem Zu-/Abluftvolumenstrom zum Zeitpunkt der Feuchtereduzierung am 18.09.2012 ist in Abbildung 71 dargestellt. Da dieser Volumenstrom über die Wärmerückgewinnung des Lüftungsgerätes geführt wird, steigt der Druckverlust und damit zwangsläufig auch der Stromverbrauch des Gerätes. Wie oben bereits erwähnt, ist bei Gerät 1+2 die Wärmepumpe zu berücksichtigen: Steigt die notwendige Heizenergie an, um das größere Volumen an Außenluft zu beheizen, wird die Wärmepumpe länger bzw. stärker betrieben; damit steigt ihr Stromverbrauch. Durch diese beiden Effekte steigt der Stromverbrauch der drei Lüftungsgeräte um 94 kWh/Tag an.

Damit wird deutlich, dass sich die Reduzierung der Hallenfeuchte energetisch doppelt auswirkt: Der Heizwärmeverbrauch und der Stromverbrauch steigen deutlich an. In Summe wird durch diese Änderungen im September 2012 in den drei Hallen eine Verbrauchserhöhung von 410 kWh/Tag + 94 kWh/Tag = 504 kWh/Tag verursacht.

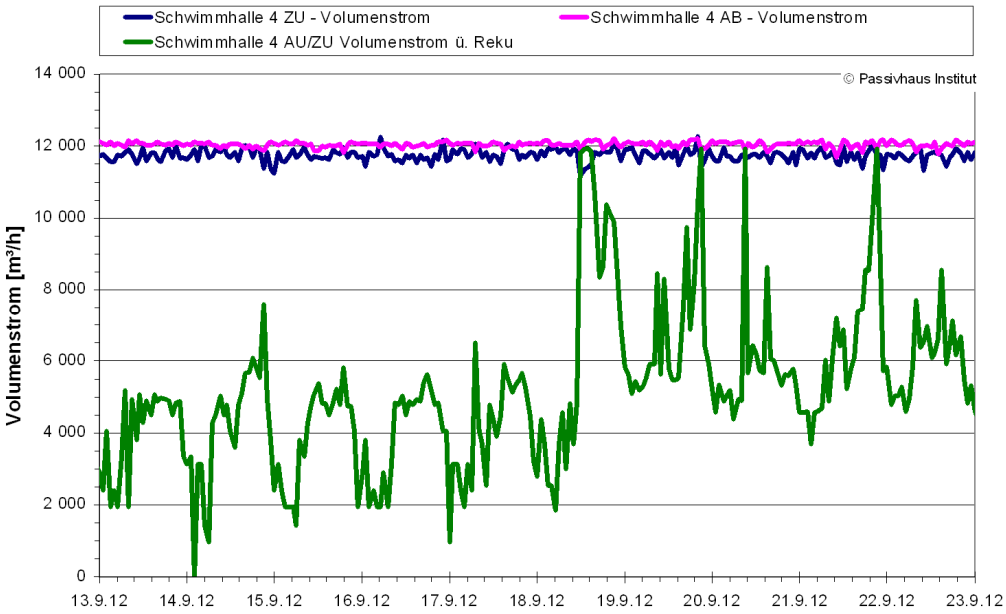


Abbildung 71: Erhöhung des Außenluftvolumenstroms durch die Reduzierung der Hallenfeuchte am 18.09.2012 bei Halle 4 (Stundenwerte; 13. bis 22.09.2012).

Die reduzierte Verdunstung des Beckenwassers bei höherer Hallenfeuchte ist auch aus den Messdaten direkt ablesbar. Aus den Temperatur- und Feuchtemessungen der Zu- und Abluftvolumenströme einer Halle kann die Entfeuchtungsleistung berechnet werden. Diese entspricht in etwa dem in der Halle verdunsteten Wasser pro Zeiteinheit (vgl. Abschnitt 5.1.1.1). In Abbildung 72 sind diese Werte gemeinsam mit der relativen Hallenfeuchte beispielhaft von Halle 4 dargestellt. Dabei handelt es sich ebenfalls um den Zeitraum der Feuchtereduktion um den 18.09.2012. Bei der erhöhten Feuchte wurden im Mittel 30,7 kg/h Wasser abgeführt, bei der niedrigerer Feuchte (minus 13,3 % rF) waren es 41,1 kg/h. Für diese höhere Verdunstungsmenge treten erhöhte Wärmeverluste durch die benötigte Verdunstungsenthalpie auf, wodurch der Heizwärmeverbrauch ansteigt.

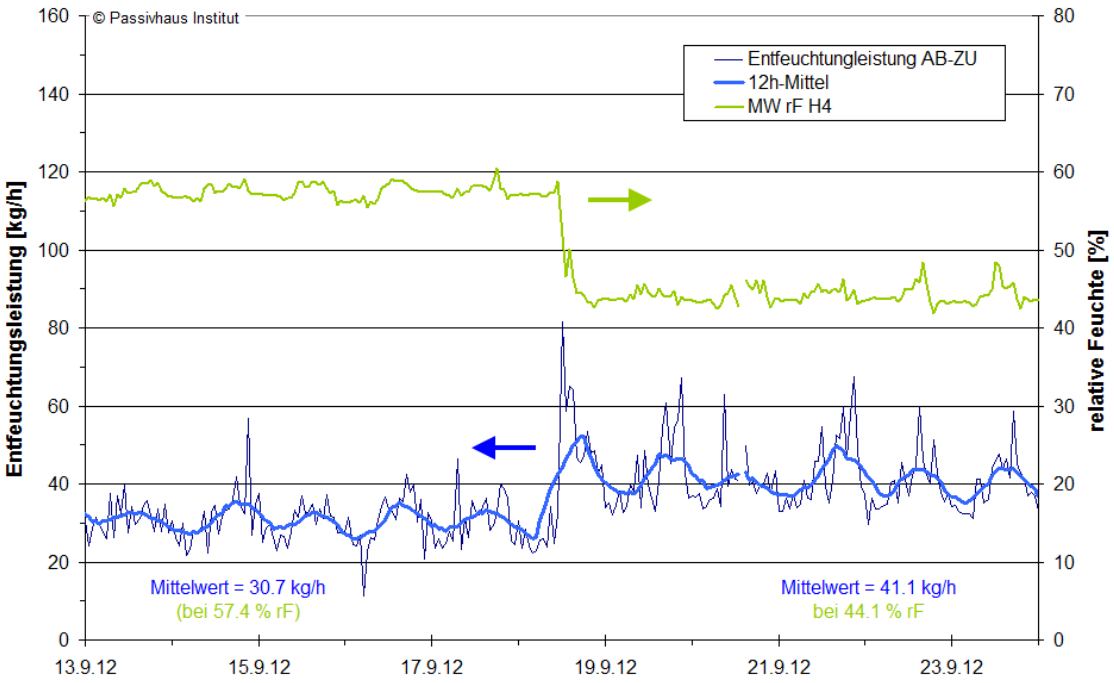


Abbildung 72: Entfeuchtungsleistung (berechnet aus der Differenz der Zu- und Abluftfeuchte) sowie relative Hallenfeuchte in Halle 4 (Stundenwerte, 13. bis 23.09.2012)

4.6.1.1 Erhöhung der Feuchte am 09. Januar 2013

Im Rahmen der Versuchsreihen wurden am 09. Januar 2013 in Halle 1+2 sowie 3 die Sollwerte der Hallenfeuchte angehoben. Die Auswirkungen werden hier zur Absicherung der oben berechneten energetischen Veränderungen ausgewertet.

In Halle 3 wurde die Feuchte von durchschnittlich 48 % auf 55,5 %, also um 7,5 % angehoben. Die Außentemperatur betrug am 09.01.2013 durchschnittlich 5,3 °C, vom 06.01 bis zum 12.01.2013 durchschnittlich 4,1 °C. Der Wärmeverbrauch hat sich durch die Feuchteanhebung um 21,4 kWh/Tag reduziert. Der Stromverbrauch sinkt - wie oben beschrieben - durch den geringeren notwendigen Außenluftanteil ebenfalls ab. Bei dieser Feuchterhöhung wurden beim Stromverbrauch 6,3 kWh/Tag eingespart. In Summe werden damit in dieser kleinsten Halle 21,4 kWh/Tag + 6,3 kWh/Tag = 27,7 kWh/Tag Endenergie eingespart.

Wie erwartet werden damit die gleichen Effekte beobachtet wie bei dem weiter oben ausgeführten Beispiel der drei anderen Hallen.

4.6.2 Reduktion der Zuluftmenge

Bei der bereits in Abbildung 66 (Abschnitt 4.5.6) beschriebenen Reduzierung des Zuluft-/Abluftvolumenstroms in Halle 1+2 kann die Auswirkung auf den Stromverbrauch des Lüftungsgerätes untersucht werden. Durch den Nebelversuch zur Visualisierung der Raumluftströmung vom 05.12.2012 wurde festgestellt, dass auch

bei deutlich verringertem Zuluft-Volumenstrom (bei gleicher Feuchte) in der Halle keine Probleme mit der Durchströmung auftraten (vgl. Abschnitt 4.5.5). Aus diesem Grund wurde am 19.12.12 in Halle 1+2 die Luftmenge von der Auslegung nach VDI 2089 mit ca. 14.500 auf nur noch ca. 8.500 m³/h reduziert (um 41 %). Dabei muss der Außenluftvolumenstrom aus Gründen der Luftqualität unverändert bleiben, was allerdings real nicht erfolgte (siehe dazu die Ausführungen in 4.5.6). Der Stromverbrauch des Lüftungsgerätes ist allein durch diese Maßnahme um etwa 74 kWh/Tag (entspricht 63 %) gesunken (Abbildung 73). Das entspricht einer Einsparung von 2200 kWh pro Monat durch diese Veränderung in nur einer Halle. Diese Messdaten bestätigen die Überlegungen der vorausgegangenen Untersuchungen, dass durch eine geschickte Lüftungsplanung und eine dadurch ermöglichte Reduzierung des Umluftanteils erhebliche Stromeinsparungen erzielt werden können. Voraussetzung ist dabei immer, dass der Mindest-Außenluftvolumenstrom dabei nicht unterschritten wird und es somit keine Einschränkung der Luftqualität geben kann.

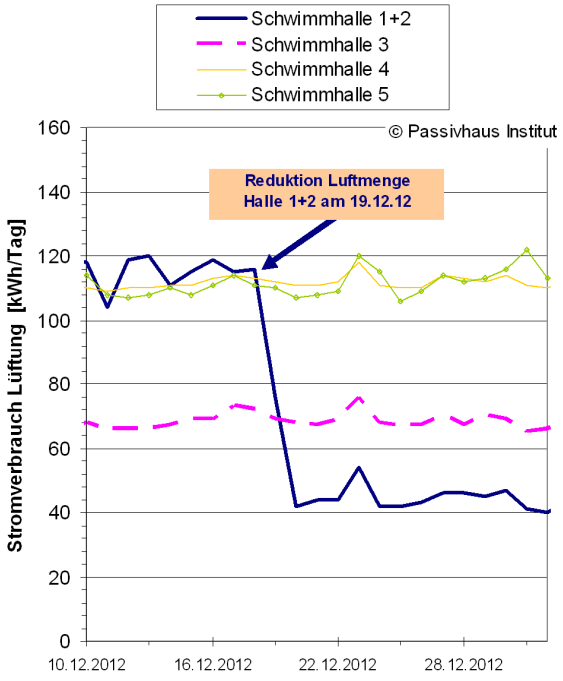


Abbildung 73: Auswirkungen der Veränderungen des Zu-/Abluftvolumestroms vom 19.12.2012 auf den Stromverbrauch des Lüftungsgerätes in Hallen 1+2 (Tageswerte; 13. bis 22.09.2012). Der Stromverbrauch der anderen Geräte bleibt unverändert.

4.7 Wasserverbrauch

Der Frischwasserverbrauch des Bades wird für die größten Verbrauchsbereiche gesondert gemessen oder kann als Differenzwerte aus den Zählerständen der Unterzählern berechnet werden. Eingesetzt sind handelsübliche Wasserzähler. Die schematische Anordnung der Versorgungsleitungen mit den Wasserzählern kann der folgenden Grafik entnommen werden:

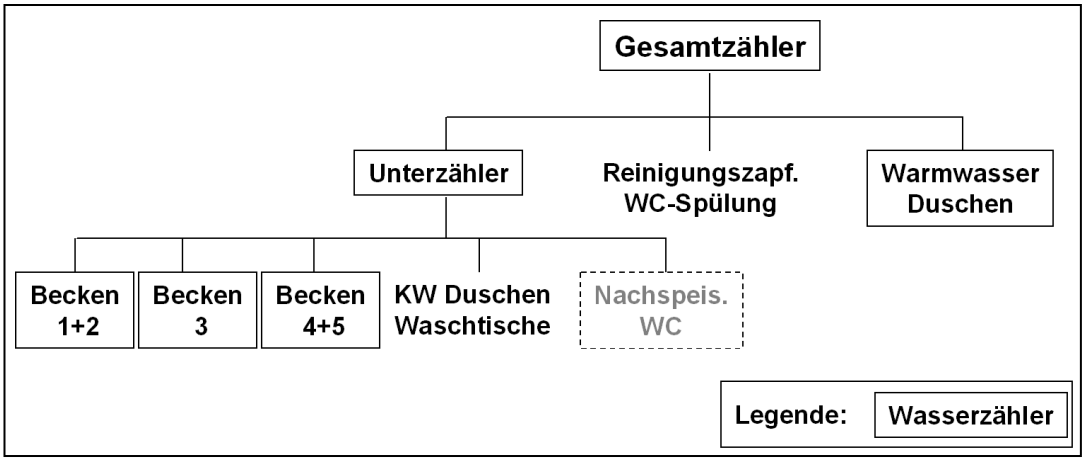


Abbildung 74: Anordnung der Wasserzähler ohne den Bereich der Wasseraufbereitung. Verbrauchsbereiche ohne Zähler (ohne Rahmen in der Skizze) werden als Differenzwerte berechnet. Die „Nachspeisung WC“ wird nur benötigt, wenn die Abwasseraufbereitung in Betrieb ist und das Grauwasser für die WCs nicht ausreicht (nur bis März 2012 in Betrieb).

Monatlich werden vom Hallenbad in Betriebsmonaten zwischen **2.093 und 3.107 m³** Frischwasser benötigt (535 bis 794 Liter/(m^2_{EBF} Monat)). Das entspricht durchschnittlichen Tagesverbräuchen zwischen **72 bis 104 m³/Tag**. Die größten Wassermengen werden in den Beckenkreisläufen bei der Filterrückspülung verworfen und müssen dann durch Frischwasser ersetzt werden. Das Rückspülwasser sollte eigentlich zu etwa 70 % aufbereitet und wiederverwendet werden. Da die gesamte Aufbereitungsanlage z.Z. nicht in Betreib ist, muss das Rückspülwasser seit etwa Februar 2012 komplett mit Frischwasser ersetzt werden. Die Anlage soll in naher Zukunft wieder in Betrieb genommen werden. Damit wird dann nicht nur ein erheblicher Teil Frischwasser eingespart, sondern auch die benötigte Energie zur Wassererwärmung deutlich reduziert. Weitere Ausführungen dazu finden sich in Abschnitt 5.2.

In Abbildung 75 ist zu erkennen, dass sich im August 2012 – bedingt durch die Wiederbefüllung der Becken – der höchste Verbrauchswert von 3.168 m³ eingestellt hat. Die Befüllung erfolgte vom Teilbereich „Reinigungszapfstellen + WC Spülung“ und nicht durch die übliche Frischwassernachspeisung der drei Beckenkreisläufe.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Umrüstungen und Vergrößerungen der Filtertechnik in den Beckenwasserkreisläufen zu einem höheren Rückspülwasserver-

brauch geführt haben. Nach der Revisionszeit ist der Verbrauch der drei Beckenkreisläufe in Summe von 1.450 m³/Monat auf etwa 2.200 m³/Monat angestiegen. Die anderen Verbrauchsbereiche sind nahezu unverändert geblieben.

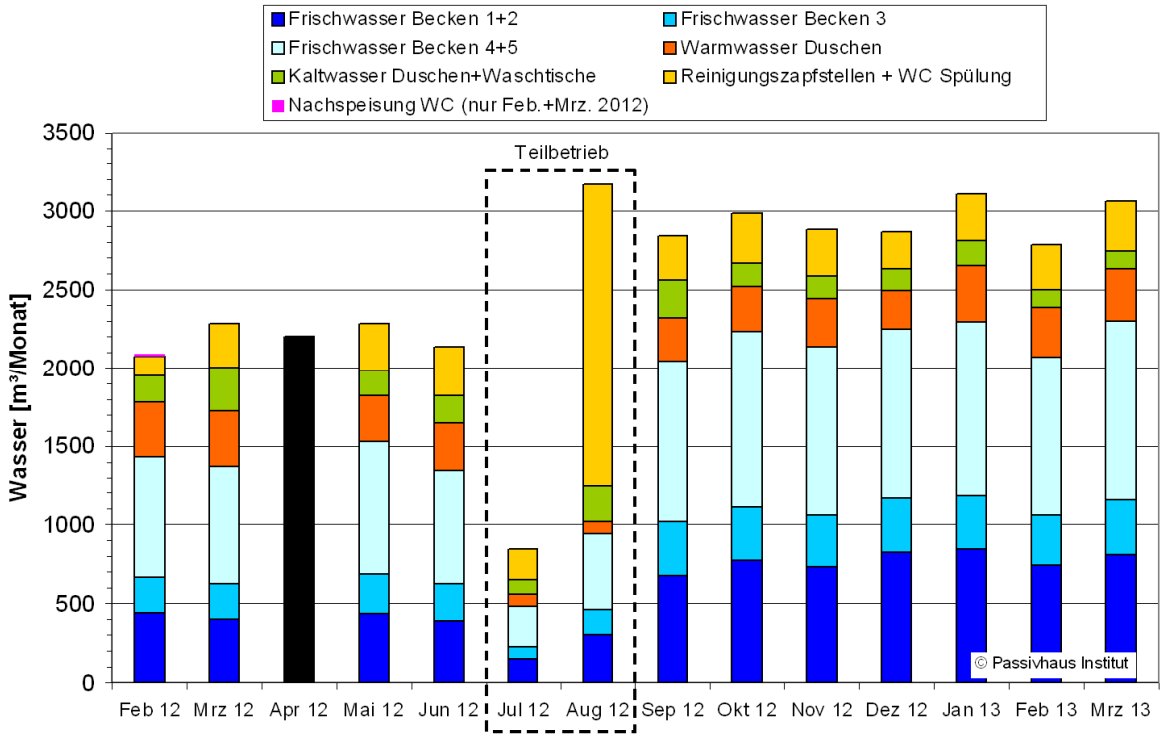


Abbildung 75: Monatliche Wasserverbrauchswerte der unterschiedlichen Teilbereiche vom Februar 2012 bis zum März 2013. Im April 2012 kann wg. Teilausfällen der Datenerfassung nur die Gesamtmenge angegeben werden.

4.8 Energieverbrauch

Von Interesse bei der energetischen Gesamtbeurteilung des Bades sind zunächst die Endenergieverbrauchswerte, die vom Gebäude insgesamt bezogen wurden. Aufgrund der Montagefehler der ausführenden Firma und der Nachrüstung von einigen Wärmezählern müssen die ersten Monate bis Mai 2012 mit Hochrechnungen ergänzt werden (Abbildung 76). Während der sommerlichen Badschließung wurden Revisionsarbeiten durchgeführt (09.07. bis 21.08.2012). In dieser Zeit wurde allerdings auch Energie benötigt: fast dauerhaft wurden die Lüftungsanlagen betrieben, das Wasser wurde komplett abgelassen und die Becken erneut befüllt und aufgeheizt.

Als spezifische Jahresverbrauchswerte des Lippe-Bades ergibt sich für den Jahreszeitraum April 2012 bis einschließlich März 2013 mit einigen Hochrechnungen bei Zählerausfall oder Umbau sowie inkl. des Zeitraumes mit den Revisionsarbeiten im Juli/August:

Wärmebezug: 258,1 kWh/(m^2_{EBF} a)
Strombezug: 155,9 kWh/(m^2_{EBF} a)

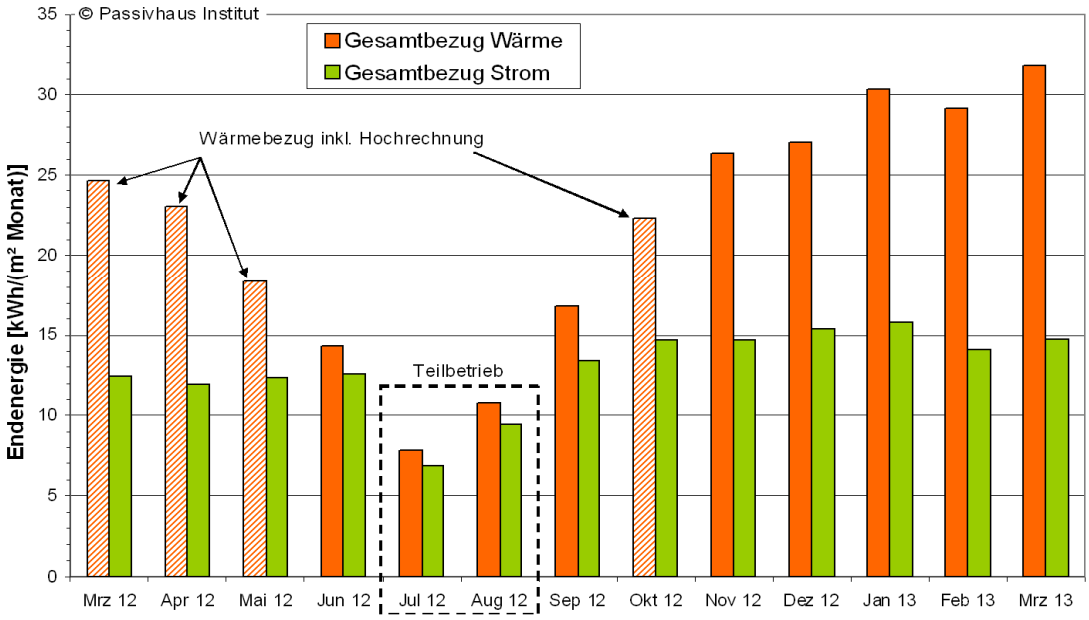


Abbildung 76: Gesamter spezifischer Wärme- und Strombezug (Endenergie) des Hallenbades von März 2012 bis März 2013.

Bezieht man diese gesamten Jahresverbrauchswerte auf die **Beckenfläche** von 850 m² ergeben sich die folgenden spezifischen Verbrauchswerte:

Wärmebezug: 1.189 kWh/(m^2_{Becken} a)
Strombezug: 718 kWh/(m^2_{Becken} a)

Mit den auf die Beckenflächen bezogenen Verbrauchswerten für den Gesamtverbrauch von Wärme und Strom können Vergleiche mit anderen Bädern aufgestellt werden. Es gibt nur wenige den Autoren bekannte veröffentlichte Messwerte von anderen Bädern, welche zu einem Vergleich herangezogen werden können. Die Schwankungsbreite der wenigen Literaturangaben ist dabei sehr groß. Bei den verwendeten Quellen handelt es sich um keine einzelnen Bäder, sondern um Mittelwerte oder Bandbreiten von ganz unterschiedlichen Bädern [ages 2007], [DGfdB R 60.04], [Schlesiger 2001] und [VDI 2089-Blatt 2]. Nicht jedes dieser Bäder wird sich einzeln zu einem Vergleich eignen; so sind ggf. Freizeitbäder mit Rutschen und Wellnessbereichen vertreten wie auch reine Sportbäder. Um dennoch einen Eindruck von den Verbrauchsgrößen zu erhalten und eine erste Einordnung des Lippe-Bades vornehmen zu können, wurden die Angaben aus der Literatur gemittelt und soweit möglich deren Schwankungsbreite (Größt- und Kleinstwert) angegeben (Abbildung 77). Schon diese erste Orientierung zeigt deutlich, dass die Verbrauchswerte in Lünen bereits im ersten Betriebsjahr deutlich unter den Mittelwerten der Literatur liegen: Im Wärmebereich liegt der Messwert fast 70 % unter dem Literaturmittelwert, beim Strom sind es mehr als 40 %. Das erste Betriebsjahr im Lippe-Bad war gekennzeichnet durch die Einregulierung der komplexen Gebäudetechnik. Im Betrieb ist noch weiteres Optimierungspotential vorhanden. Deshalb können in der Zukunft noch niedrigere Verbrauchswerte erwartet werden.

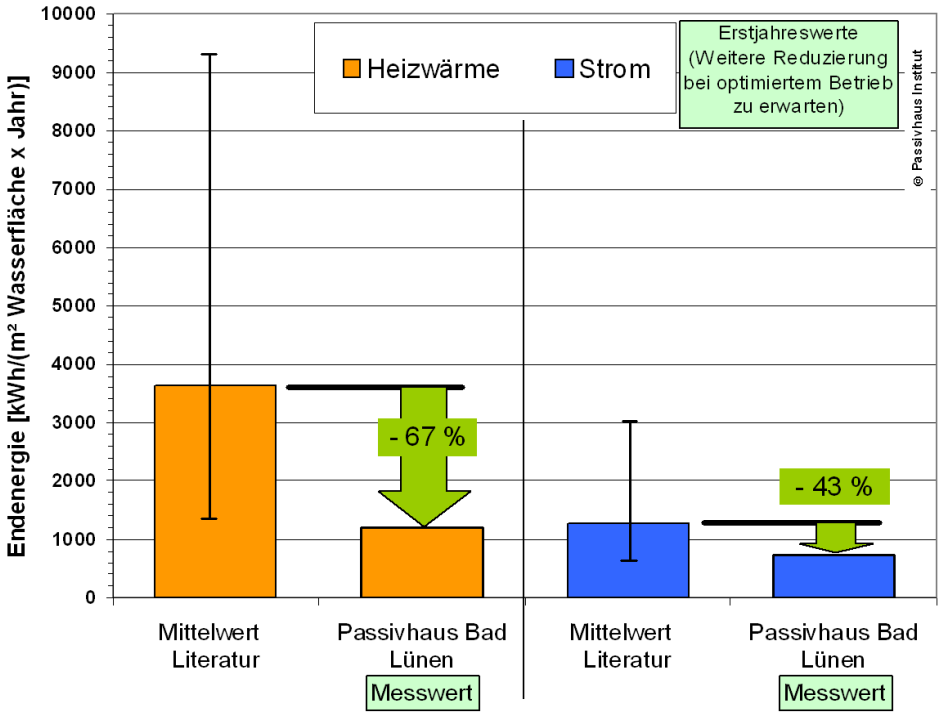


Abbildung 77: Vergleich der gemessenen Verbrauchswerte für den gesamten Wärme- und Strombezug (Endenergie) des Hallenbades Lünen mit Werten aus der Literatur (siehe Text). Die Schwankungsbreite der Literaturwerte ist durch die Größt- und Kleinstwerte (schwarze vertikale Linien) angegeben.

4.8.1 Wärmelieferung

Die Wärmeversorgung des Bades erfolgt - wie in Abschnitt 2.2 beschrieben - aus fünf unterschiedlichen Quellen. Aufgrund der Anordnung der Wärmezähler werden die Bereiche separat erfasst. Die direkte Versorgung mit Wärme des Biogas-BHKWs erfolgt erst nach einem Umbau ab Juni 2012. Die Monatssummen der fünf Bereiche zeigen im Jahresverlauf die Veränderung in Höhe der unterschiedlichen Energiebezugsquellen (Abbildung 78). Zunächst dominiert der Bezug aus dem Fernwärmenetz, später wird der direkte Bezug vom Biogas BHKW dominant.

Der Abgaswärmetauscher des Biogas-BHKWs hat einen deutlich höheren Anteil an der Versorgung als der des Erdgas-BHKWs.

Tabelle 8: Spezifische Endenergiemengen und Anteile der Wärmelieferung nach den unterschiedlichen Quellen im Jahreszeitraum 01.04.1012 bis 31.03.2013.

	Fernwärme	**Abgaswärmetauscher**		**HT-Wärme BHKW Biogas**	**Gehäuseabwärme BHKWs (NT-Kreis)**
		BHKW Biogas	BHKW Erdgas		
Endenergie [kWh/(m²a)]	41,3	61,9	24,6	87,5	42,8
Anteil [%]	16,0%	24,0%	9,5%	33,9%	16,6%

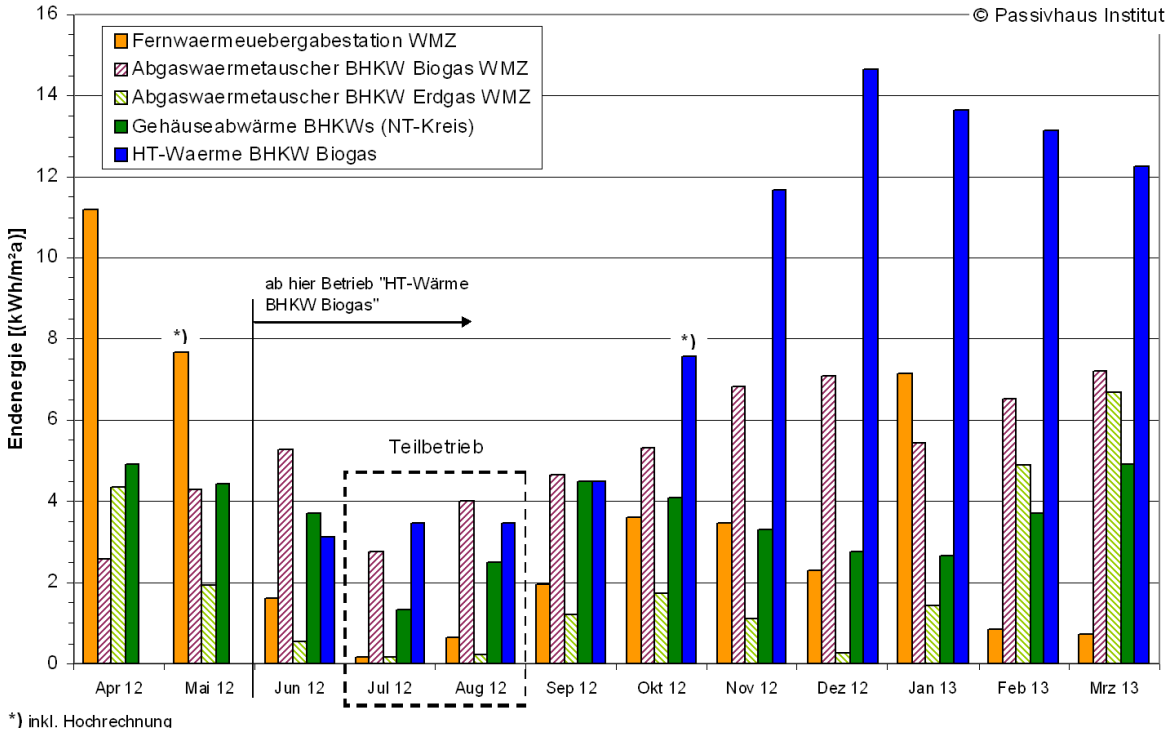


Abbildung 78: Wärmeversorgung aus den unterschiedlichen Quellen im Monatsverlauf von April 2012 bis März 2013.

4.8.2 Wärmeverbrauch

Die Wärmeversorgung der Einzelverbraucher im Hallenbad ist durch die beiden getrennten hydraulischen Versorgungsnetze „HT“ und „NT“ organisiert (vgl. Abbildung 16 in Abschnitt 2.2). Bei der Analyse sind diese beiden Bereiche zu berücksichtigen. Die im vorherigen Abschnitt dargestellten Monatssummen der Wärmeverbrauchswerte (Lieferung) können - aufgrund der Zähleranordnung - den unterschiedlichen Verbrauchsbereichen zugeordnet werden. Unterschieden wird in die drei folgenden Bereiche:

- Beckenwassererwärmung (123,4 kWh/(m²a))
- Nachheizung Lüftung (Luftbeheizung) (93,7 kWh/(m²a) / inkl. Hochrechnung)
- Warmwasserbereitung (Duschen/Reinigung) (35,0 kWh/(m²a))

Die Jahressumme des Energieverbrauchs zur Luftnachheizung in den Lüftungsgeräten kann für August und September 2012 nicht ermittelt werden, da am Gerät „Nebenräume“ ein Drahtbruch am VL-Sensor des Wärmezählers vorhanden war. Eine Abschätzung lässt sich mit Hilfe der gesamten gelieferten Wärmemenge durch Differenzbildung erstellen [2].

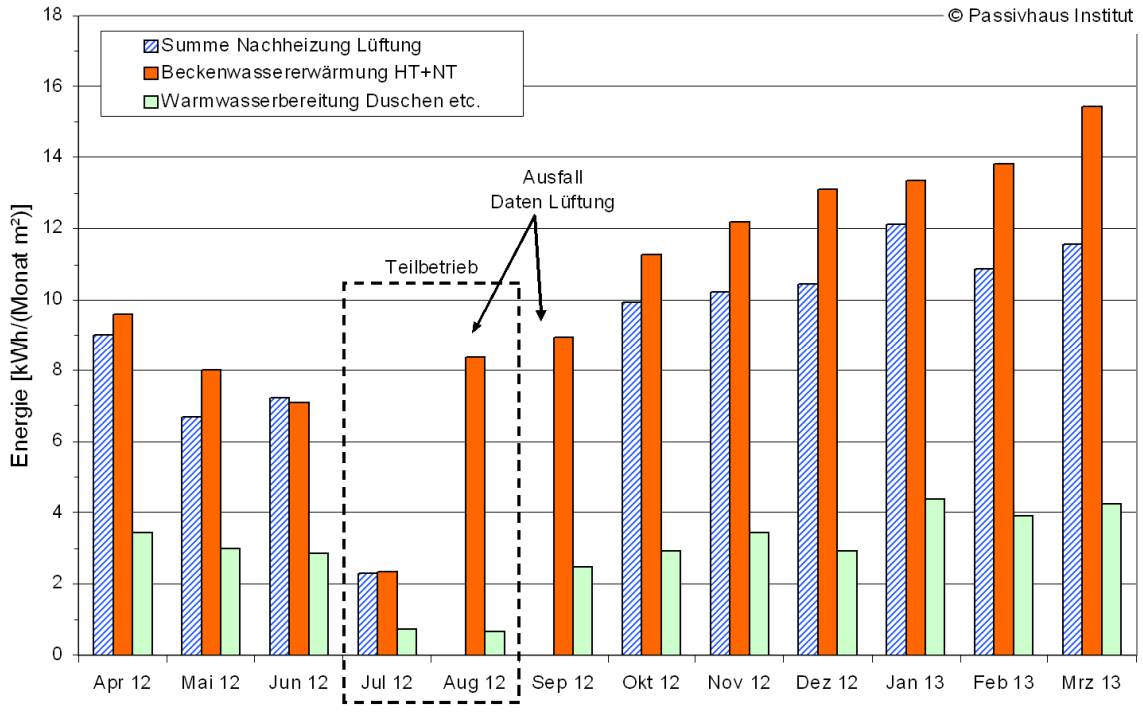


Abbildung 79: Aufteilung der Wärmeverbräuche (Endenergie) nach den drei Nutzungsbereichen Lüftung, Beckenwasser und Duschwasser (April 2012 bis März 2013).

[2] Dabei muss der Anteil der Verteilverluste der Wärmelieferung gegenüber der Summe der Wärmeverbraucher berücksichtigt werden. Dieser wird im nächsten Abschnitt zu 2,3 % berechnet.

Es zeigt sich, dass die Beckenwassererwärmung den größten Anteil am Wärmeverbrauch hat. Betrachtet man alle Monate (April 2012 bis März 2013) ohne August und September 2012 ergibt nur für die Beckenwassererwärmung ein Anteil von 47 % an der Gesamtsumme der drei Bereiche. Die Nacherhitzung der Luft folgt mit wenig Abstand mit einem Anteil von 39 %. Dagegen benötigt die Warmwassererwärmung für das Brauchwasser (Duschen / Reinigung) nur 14 %.

4.8.2.1 Bilanz HT-Netz

Im HT-Versorgungsnetz kann aufgrund der Zähleranordnung die Differenz zwischen der Wärmelieferung in das Netz und der Entnahme aus dem Netz berechnet werden. Diese Berechnung dient unter anderem zur Kontrolle der Wärmezähler. Die Übereinstimmung zwischen den beiden Größen liegt prozentual zwischen 95 und 99 % (berechnet aus Tageswerten), die Abweichung für den Winter 2012/2013 ergibt sich zu 2,3 %. Absolut entspricht dies einer Differenz von 72 kWh/Tag. Diese Energiemenge ergibt sich aus der Messgenauigkeit der Wärmezähler sowie der Wärmeabgabe der Rohrleitungen an den Keller.

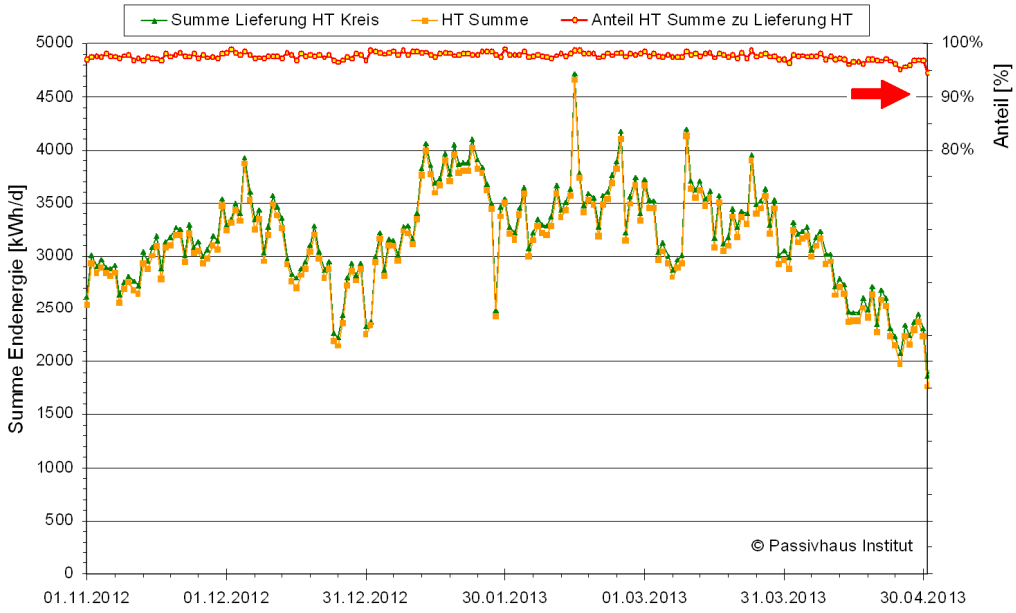


Abbildung 80: Vergleich der Energielieferung und der Entnahme des HT-Netzes im Winterzeitraum vom 01. November 2012 bis zum 30. April 2013 (Tageswerte)

4.8.2.2 Luftheizregister

Die Lufterhitzung ist die einzige aktive Heizquelle im Hallenbad Lünen; auf Fußbodenheizflächen und Wärmebänke konnte vollständig verzichtet werden. Alle sechs Lüftungsgeräte sind mit Luftheizregistern zur Nacherwärmung der Luft ausgestattet. Wie beschrieben sind für die Nacherhitzung der Luft aus dem Umkleidebereich vor dem Einblasen in die beiden Duschbereiche zwei weitere Nachheizregister installiert. Die monatlichen Energiemengen dieser insgesamt acht Luft-

Wasser-Register sind in Abbildung 81 dargestellt. Aufgrund der Ausfälle einzelner Wärmezähler sind die Daten ab Oktober 2012 dargestellt.

Ins Auge fällt zunächst der sehr hohe Verbrauch für die Nachheizung von Halle 5 im Dezember 2012 und Januar 2013. Gleichzeitig ist der Verbrauch von Halle 4 entsprechend geringer. Die Ursache liegt in einer fehlerhaft geänderten Regelung der beiden Lüftungsanlagen. Wie sich herausstellte wurde das Gerät für Halle 5 bezüglich der Nachheizung zu dieser Zeit als Hauptgerät betrieben, das Heizregister von Gerät 4 wurde nur ergänzend zugeschaltet. Durch den Luftverbund der beiden Hallen ergaben sich keine Auswirkungen für die Hallenkonditionen. Die Verbrauchswerte für die Nebenräume sind aufgrund von Regelungsfehlern im Oktober und November 2012 deutlich zu hoch ausgefallen.

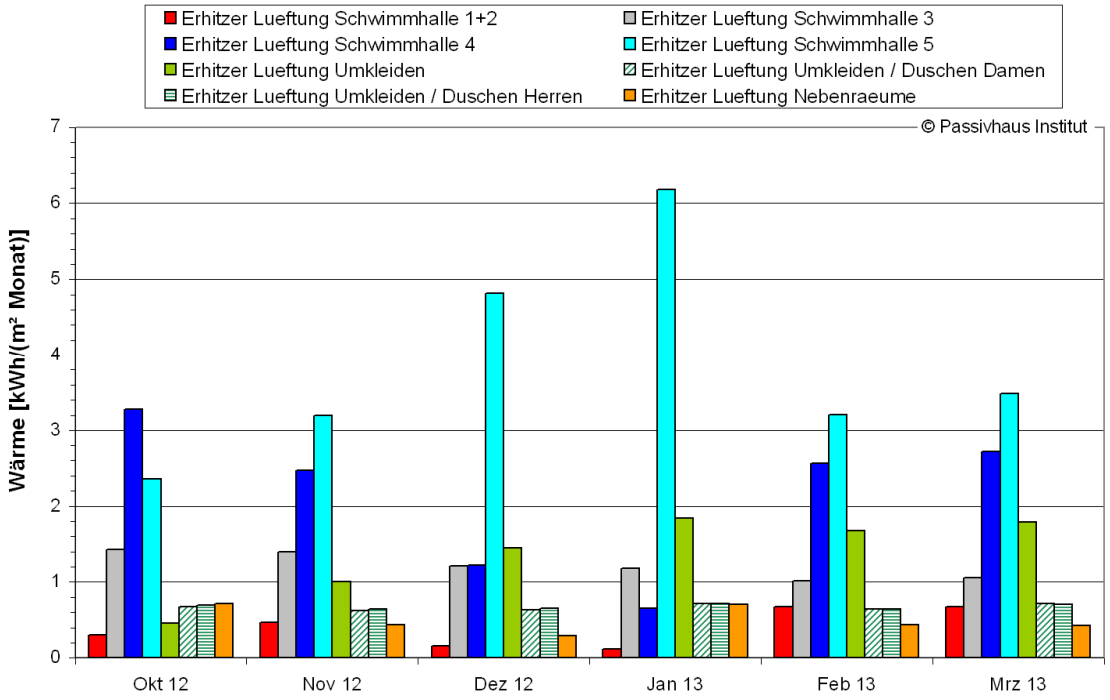


Abbildung 81: Energieverbrauch für die Luftheizregister der Lüftungsgeräte (Monatssummen vom Oktober 2012 bis zum März 2013. Erläuterungen siehe Text.

Erwartungsgemäß ist der Heizwärmeverbrauch der vier Hallen dominant gegenüber den niedriger temperierten Bereichen Nebenräume und Umkleide. Der scheinbar niedrige Verbrauch zur Beheizung von Halle 1+2 wird durch den Heizwärmebeitrag der Wärmepumpe verursacht. In der Gesamtbilanz des Bades wird der Stromverbrauch der WP vollständig auf der Stromseite berücksichtigt. Wie im Abschnitt 4.8.3.1 später ausgeführt wird, kann der Wärmeeintrag durch den Betrieb der Wärmepumpe auf durchschnittlich 220 kWh/Tag (01. Januar bis 30. März. 2013) abgeschätzt werden. Betrachtet man die Summen der einzelnen Monate – wieder bezogen auf die gesamte Energiebezugsfläche des Bades – müssen von Januar bis März 2013 zwischen 1,5 und 2,1 kWh/(m² Monat) Wärme für Halle 1+2 berücksichtigt

werden. Die Wärmeverbrauchswerte in Halle 1+2 erhöhen sich damit in Summe im Januar bis März 2013 auf Werte von 2,2 bzw. 2,3 kWh/(m²a). Sie liegen damit erwartungsgemäß höher als in der kleineren Halle 3 und etwas niedriger als in den deutlich größeren, aber etwas weniger stark aufgeheizten Hallen 4 und 5.

Aufgrund des begrenzten Zeitraumes und der Einregulierungsphase können keine Jahressummen angegeben werden. In den Monaten Februar und März 2013 war die Nachheizung in Halle 4 und 5 wieder richtig eingestellt. Wird in dieser Zeit der Wärmeverbrauch der Hallen inkl. des Wärmeeintrags der Wärmepumpe betrachtet, ergibt sich die folgende Verteilung:

Tabelle 9: Spezifische Endenergiemengen und Anteile der Wärmelieferung für die Luftheizregister der unterschiedlichen Zonen für Februar und März 2013. Anders als in Abbildung 81 ist der Heizwärmeeintrag durch die Wärmepumpe hier gesondert aufgeführt. Bezugsfläche ist auch hier die Energiebezugsfläche von 3912 m².

Heizwärme	Halle 1+2 Luftheiz-register	Halle 1+2 Wärme-pumpe	Halle 3	Halle 4	Halle 5	Um-kleide	Duschen	Neben-räume
[kWh/m²] für zwei Monate	1,35	3,10	2,07	5,29	6,70	3,46	2,70	0,87
Anteil [%]	5,3	12,1	8,1	20,7	26,2	13,6	10,6	3,4

Aus der Tabelle ergibt sich als Summe des Heizwärmeverbrauchs aller vier Hallen ein Anteil von 72,4 % gegenüber den restlichen Bereichen des Bades mit 27,6 %. Das bedeutet, dass über 2/3 der Heizwärme des Bades im Februar und März 2013 für die Hallenbereiche benötigt wurden. Außerdem ist zu erkennen, dass der Wärmeeintrag der Wärmepumpe den Großteil des Heizwärmeverbrauchs von Halle 1+2 abdeckt.

4.8.2.3 Becken- und Duschwassererwärmung

Die differenzierte Betrachtung der Beckenwassererwärmung erfolgt durch die drei HT- und die drei NT-Wärmezähler der Beckenwasserwärmetauscher. Diese werden hier jeweils in Summe je Kreislauf betrachtet. Zusätzlich wird der Energieeinsatz für die Warmwasserbereitung der Duschen (inkl. Reinigungszapfstellen) bilanziert.

Der Wärmeverbrauch für Becken 1+2 mit seinen nur 230 m³ Wasserinhalt ist deutlich dominant. Der gemeinsame Kreislauf für Becken 4 und 5 mit einem gesamten Beckenvolumen von 1.231 m³ liegt im Verbrauch deutlich niedriger. Becken 3 (240 m³) hat den geringsten Wärmeverbrauch.

Für die Beurteilung der Verbrauchswerte muss berücksichtigt werden, dass insbesondere die folgenden Einflussfaktoren den Wärmeverbrauch beeinflussen: Wassertemperatur, Wassermenge, Verdunstung in Abhängigkeit der Hallenfeuchte und -temperatur sowie die Wärmequellen im Wasser (Personen) bzw. im Wasserkreislauf (Pumpen, Unterwasserbeleuchtung). Der Versuch der Berücksichtigung dieser unterschiedlichen Einflüsse und damit die Analyse der dargestellten Verbrauchswerte erfolgt im Detail weiter unten im Abschnitt 5.1.1.

Die Jahressummen der spezifischen Verbrauchswerte zur Erwärmung der drei Beckenkreisläufe und der Warmwassererwärmung des Duschwassers erfolgt hier inkl. der Revisionszeit im Sommer. In Tabelle 10 sind die Summen sowie die Anteile zusammengestellt.

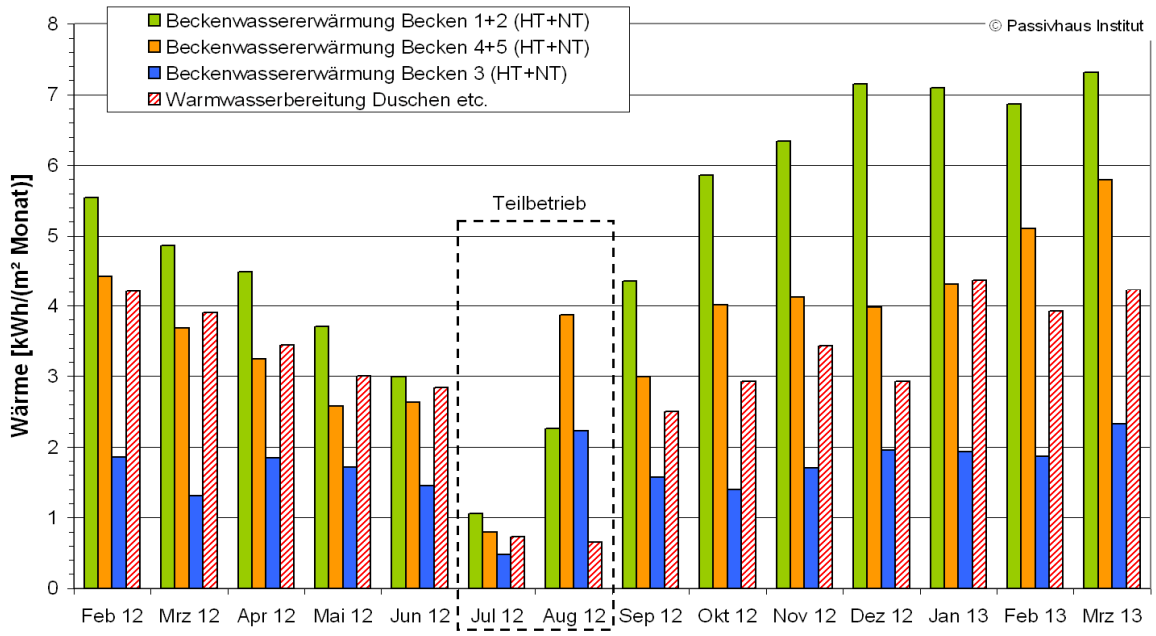


Abbildung 82: Monatliche Wärmemengen zur Becken- und Duschwassererwärmung vom Februar 2012 bis zum März 2013

Tabelle 10: Spezifische Jahres-Endenergiemengen und Anteile am Wärmeverbrauch für die Beckenwassererwärmung sowie der Warmwasserbereitung (Duschen etc.) für den Zeitraum April 2012 bis März 2013. Bezugsfläche ist auch hier die Energiebezugsfläche von 3912 m².

	Becken 1+2	Becken 3	Becken 4+5	Warmwasser Duschen
Wärmeverbrauch [kWh/(m²a)]	59,5	20,5	43,5	35,0
Anteil	37,6 %	12,9 %	27,4 %	22,1 %
Anteil	77,9 %			22,1 %

4.8.3 Stromverbrauch

Wie weiter oben beschrieben wird die Stromversorgung des Bades durch Netzbezug sowie Solarstrom sichergestellt. Die beiden im Außenbereich zusätzlich aufgestellten PV-Tracker liefern ausschließlich an das öffentliche Stromnetz.

In Abbildung 83 sind die spezifischen monatlichen Stromverbrauchswerte dargestellt. Die Monatswerte schwanken in Monaten mit vollständigem Badebetrieb zwischen knapp 12 und knapp 16 kWh/(m²a). Das entspricht absoluten Verbrauchswerten zwischen 46.575 und 61.808 kWh/Monat.

Der Jahresstromverbrauch (April 2012 bis März 2013) des gesamten Bades summiert sich auf insgesamt 155,9 kWh/(m²a), entsprechend absolut 609.873 kWh/a. Davon waren im gleichen Zeitraum 18,6 kWh/(m²a) selbstgenutzter PV-Strom; 1,2 kWh/(m²a) Solarstrom wurden ins öffentliche Netz eingespeist. Die Tracker haben 19.459 kWh/a eingespeist (bezogen auf die Energiebezugsfläche entspricht das 5,0 kWh/(m²a)).

Der monatlich veränderte Ertrag an PV-Strom zeigt den zu erwarteten geringen Solarstromertrag im Winter („Winterloch“) und die maximale sommerliche Solarstromproduktion. Die Solarstromproduktion der PV-Anlage und der Tracker ist gesondert in Abbildung 84 dargestellt. Die Jahressummen des Stromverbrauchs und der Einspeisung sind in Abbildung 85 zusammengestellt.

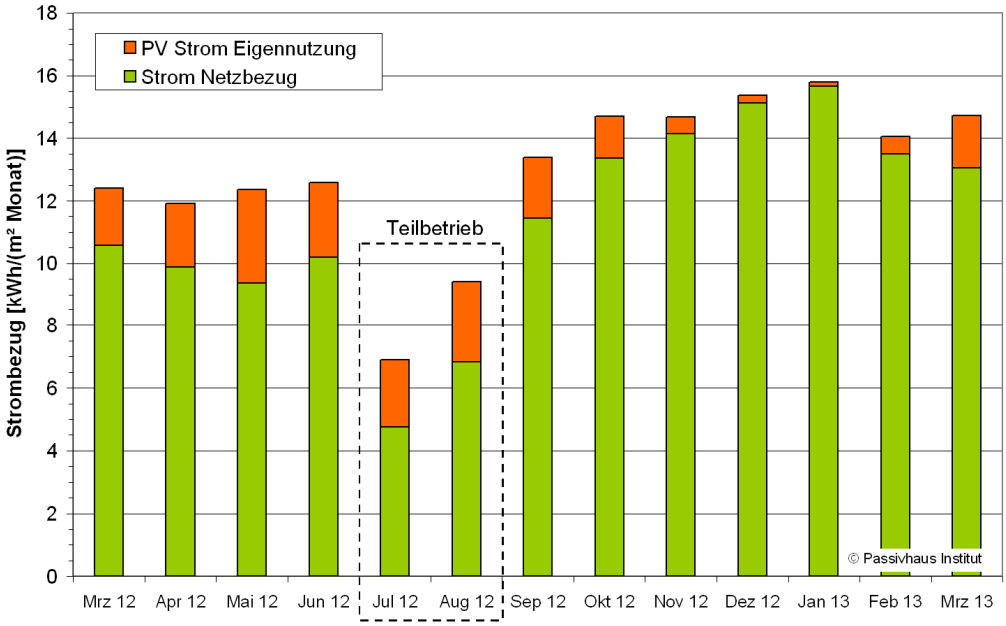


Abbildung 83: Monatliche spezifische Gesamtstromverbräuche des Bades von März 2012 bis März 2013 nach Stromherkunft (Netz und PV)

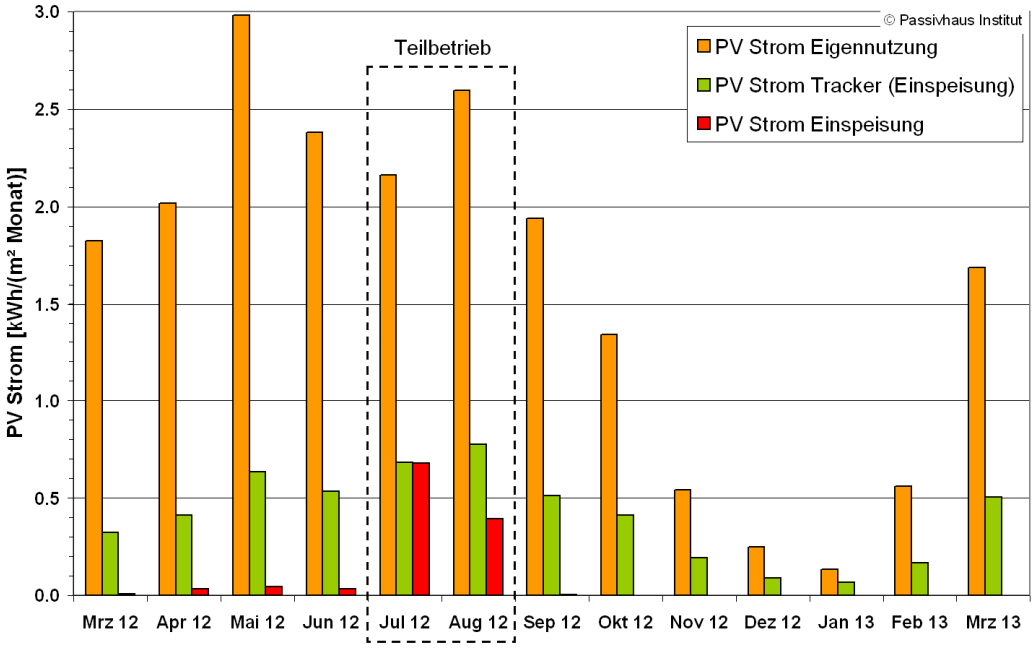


Abbildung 84: Spezifische monatliche Solarstromerträge aufgeteilt nach Quelle und Eigennutzung bzw. Einspeisung

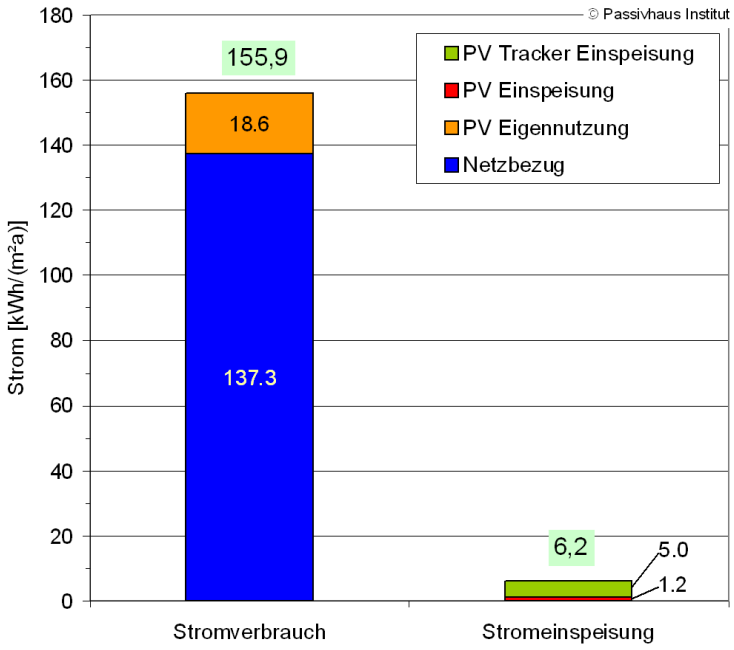


Abbildung 85: Jahressummen der spezifischen Stromverbräuche und der Einspeisung

4.8.3.1 Stromverbrauch nach Teilbereichen

Die einzeln vermessenen Teilbereiche der Stromverbrauchsmessung sind weiter oben in Abschnitt 3.4 erläutert; sie werden hier ausgewertet.

Die Datenaufzeichnung des Teilbereichs „Licht + Steckdosen“ erfolgte vollständig erst ab September 2012 (Aufschaltung auf die GLT). Daher sind die Messwerte für diesen Verbrauchsbereich von April bis Juni 2012 mit den Mittelwerten der Betriebszeit (Sep. 2012 bis März 2013) ergänzt (Abbildung 86). Während der Teilbetriebszeit im Juli und August 2012 wurde der halbe Verbrauchswert angenommen.

Bedingt durch die Änderungen in der Wassertechnik (Filtervergrößerung etc.) sowie an der Betriebsweise einiger Lüftungsanlagen ergeben sich für diese Teilbereiche deutliche Änderungen: Der Bereich „Diverse“ (Schwimmbadtechnik (ohne Umwälzpumpen) sowie alle restlichen Verbraucher des Bades) wächst nach der Revisionszeit bis zum Januar deutlich an; die Lüftungsverbräuche sinken deutlich ab. Durch die Änderungen bei der Durchflussmenge und den Um- bzw. Ergänzungsbauten in den Wasserkreisläufen steigt der Stromeinsatz für die Umwälzpumpen der Wasserkreisläufe ebenfalls deutlich an, von durchschnittlich 2,5 kWh/(m² Monat) auf 4,2 kWh/(m² Monat) nach der Sommerschließung.

Die Beleuchtung hat den entscheidenden Anteil am Stromverbrauch für „Licht + Steckdosen“. Es sind nur einige Steckdosen enthalten, welche u.a. für Reinigungsgeräte genutzt werden, die Beleuchtungssteuerung sowie zwei Uhren und Türensteuerungen. Das Potential der Beleuchtungssteuerung kann im Zusammenhang mit den eingesetzten Leuchtmitteln nicht ausgenutzt werden. Zum Teil wird die Beleuch-

tung manuell geschaltet. Die Verbrauchsdaten zeigen daher auch nicht die erhoffte Reduktion während der helleren Sommermonate. Insgesamt zeigt sich bei Ortsterminen eine gute Tagslichtausnutzung: Viele Stunden ist keine Hallenbeleuchtung notwendig. Die bei dem Bad sehr langen Öffnungszeiten (6:15 Uhr bis zum Teil 21:45 Uhr) führt im Vergleich zu einem höheren Beleuchtungsbedarf. Für Details wären weitere Messungen notwendig.

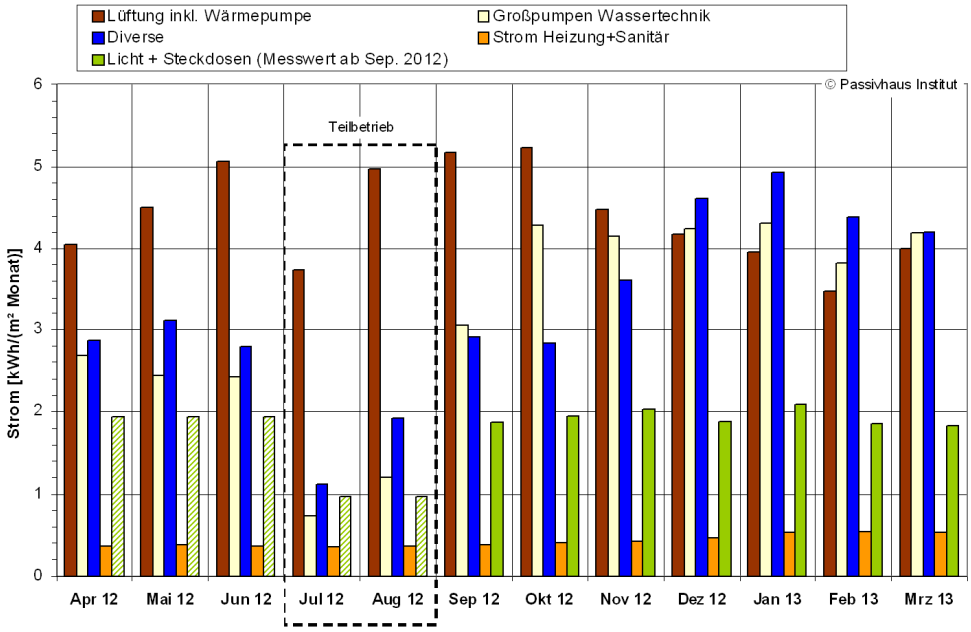


Abbildung 86: Monatliche spezifische Stromverbräuche der Teilbereiche im Hallenbad (April 2012 bis März 2013)

Die Stromverbrauchswerte für ein gesamtes Jahr (April 2012 bis März 2013) in Abbildung 87 zeigen, dass den mit Abstand größten elektrischen Hauptverbraucher die Lüftungstechnik darstellt (34 %). Auch die Umwälzpumpen der Wassertechnik verbrauchen mit 24 % des Gesamtverbrauchs einen großen Teil der elektrischen Energie.

Während der Berechnung aus der Planungszeit wurde vom Fachplaner für den Bereich Heizung/Sanitär ein Erwartungswert von 5,8 kWh/(m²a) angesetzt. Die Messdaten zeigen mit etwas abweichender Technik und inkl. dem Minderverbrauch während der Revisionszeit einen etwas geringeren Wert von 5,1 kWh/(m²a). Für die sechs Umwälzpumpen wurde dagegen ein Planungswert von 29,7 kWh/(m²a) angesetzt, real wurden 37,6 kWh/(m²a) verbraucht. Mit den zusätzlichen Filtertechniken in den Beckenwasserkreisläufen ist der Druckverlust und damit der Stromverbrauch deutlich gegenüber der Planung angestiegen. Würde der gemessene Pumpenstromverbrauch der ersten drei Monate für das ganze Jahr hochgerechnet werden, ergäbe sich trotz aller Änderungen mit nur 29,6 kWh/(m²a) der Planungswert. Weitere Ausführungen zum Vergleich der Stromverbräuche mit den Planungsdaten finden sich in Abschnitt 5.1.4.

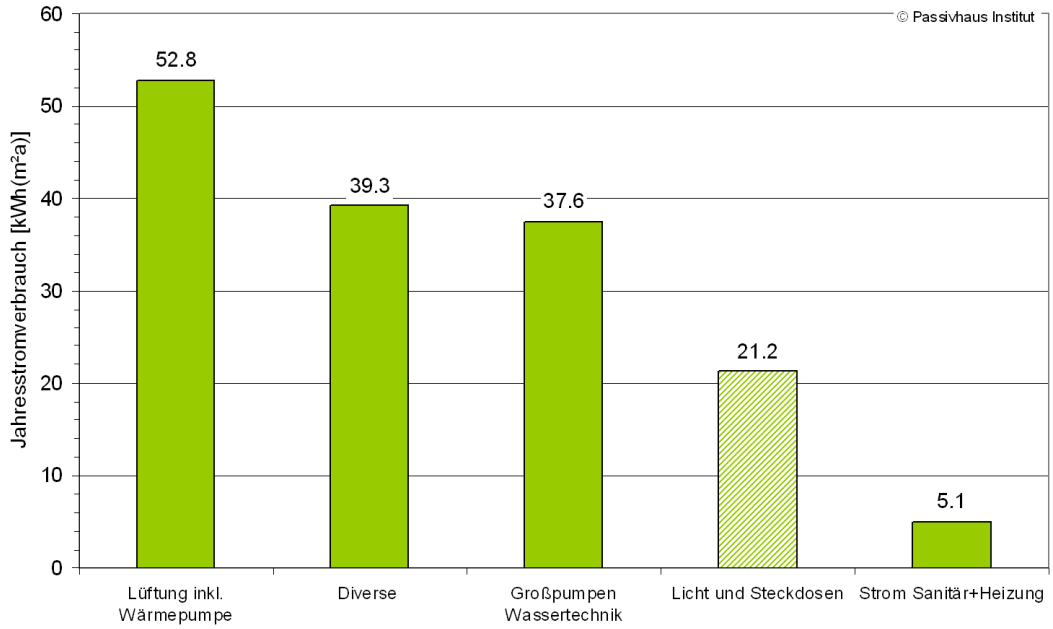


Abbildung 87: Spezifische Jahresstromverbrauchswerte der fünf Hauptbereiche (April 2012 bis März 2013). Die Messung vom Bereich „Licht und Steckdosen“ wurde für die Gesamtjahresberechnung mit Daten ergänzt (vgl. Abbildung 86).

Lüftung

Der Stromverbrauch der sechs Lüftungsanlagen des Bades wird getrennt je Anlage gemessen. In Anlage 1+2 ist eine Wärmepumpe montiert, welche der Fortluft (nach der Wärmerückgewinnungseinheit) Energie entnimmt und diese an den Zuluftvolumenstrom vor dem Nachheizregister überträgt.

Die Stromverbräuche der Anlagen werden hier zur einheitlichen Darstellung und dem besseren Vergleich jeweils auch immer auf die gesamte Fläche (EBF = 3.912 m²) des Gebäudes bezogen.

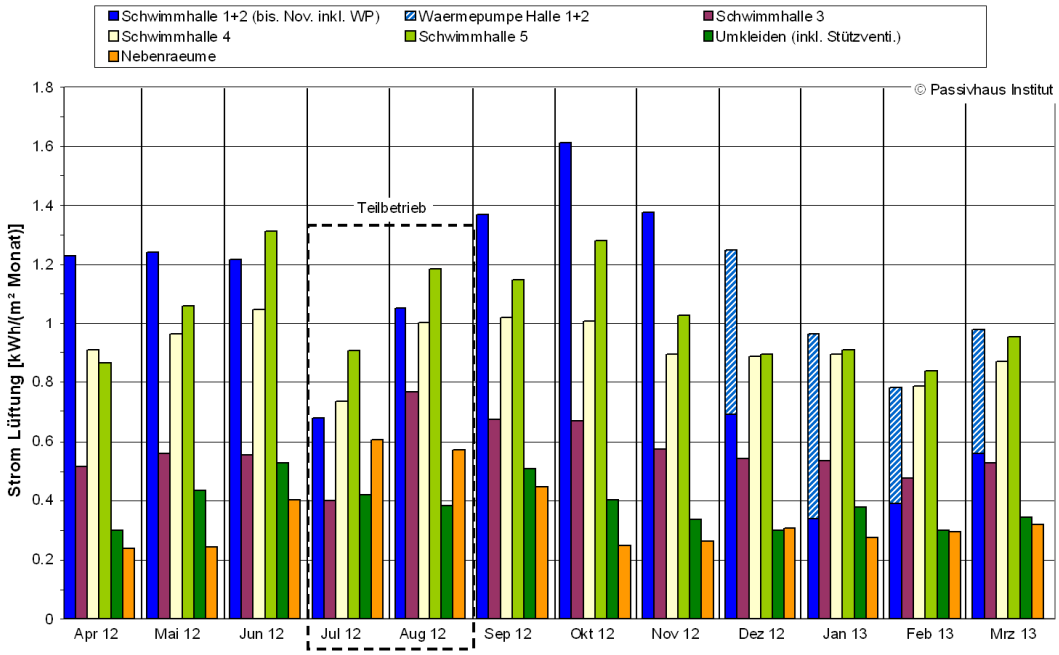


Abbildung 88: Monatliche spezifische Stromverbräuche aller sechs Lüftungsanlagen (April 2012 bis März 2013)

Betrachtet man die Größe des Außenluftvolumenstroms im Vergleich zum Umluftvolumenstrom als Summe aller sechs Lüftungsgeräte des Bades ergibt sich das folgende Bild:

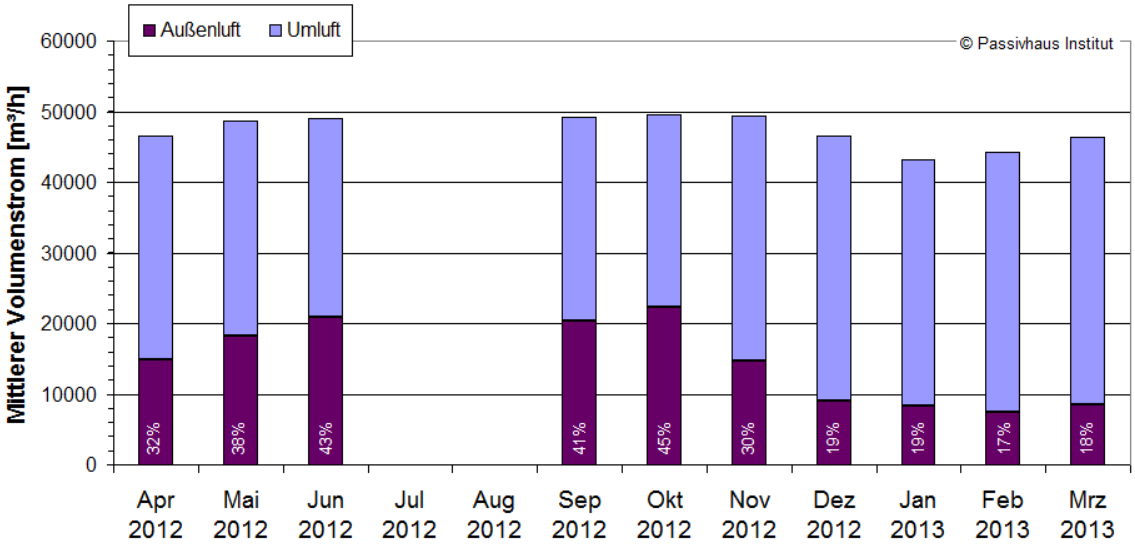


Abbildung 89: Summe der gemessenen monatsmittleren Außen- und Umluftvolumenströme aller sechs Lüftungsgeräte. Der Außenluftanteil beträgt im Mittel 30% der Umluftanteil 70 %. Hier besteht ein erhebliches Stromeinsparpotential.

In Abbildung 89 ist zu erkennen, dass der Umluftvolumenstrom aller Geräte des Hallenbades im Mittel etwa 70 % beträgt, der Außenluftvolumenstrom nur 30 % der

Gesamtzuluftmenge. Nur Letzterer ist für den Feuchteabtransport aus den Hallen und für die Einhaltung der Luftqualität notwendig. Der Umluftvolumenstrom dagegen, ist weder für den Abtransport der Feuchte noch für den Abtransport der Schadstoffe (z.B. THM und Trichloramin) notwendig. Er soll die Durchmischung der Hallenluft sicherstellen, wozu auch geringere Umluftvolumenströme bei entsprechenden Lüftungssystemen ausreichend sind (vgl. Auswertung der Nebelversuche in Abschnitt 4.5.5). Damit zeigt sich, dass noch ein großes Potential bei der Einsparung von Strom für die Lüftungsgeräte vorhanden ist. Ziel des Passivhaus Konzeptes für Hallenbäder ist eine Betriebsweise vollständig ohne Umluftanteil [Schulz et al. 2009].

Wärmepumpe

Aufgrund der hohen Enthalpie der Fortluft bei einem Schwimmbadlüftungsgerät hat der Einsatz einer Fortluftwärmepumpe (WP) zur Erwärmung der Zuluft bzw. des Beckenwassers energetisch hohes Potential (vgl. [Schulz et al. 2009]). Mit geringem Stromeinsatz kann auf diesem Weg die Fortluftenthalphie „rückgewonnen“ werden, anstatt die benötigte Wärme aus einer anderen Quelle direkt zu beziehen. Ob eine WP energetisch vorteilhaft ist, hängt von ihrer Arbeitszahl und der Effizienz des alternativen Heizsystems ab. Ziel ist es dabei durch den Einsatz einer WP Primärenergie einzusparen. Wenn eine WP die Arbeitszahl von z.B. 5 erreicht und für elektrischen Strom eine Primärenergiekennzahl von üblichen 2,6 angesetzt wird, müsste das alternative Heizsystem einen PE-Kennwert von maximal 2,6 / 5 = 0,52 erreichen. Das bedeutet, dass bei z.B. dem Einsatz von konventionellem Erdgas (PE-Faktor 1,1) der Einsatz einer WP energetisch vorteilhaft ist.

Im Lippe-Bad Lünen ist im Lüftungsgerät der Halle 1+2 eine Fortluftwärmepumpe integriert. Der Stromverbrauch dieser Wärmepumpe wird seit 15.11.2012 separat aufgezeichnet und weist Tagesverbrauchswerte zwischen 36 und 84 kWh/Tag auf. In Abbildung 90 ist die Abhängigkeit des Stromverbrauchs von der Außentemperatur und vom Außenluftvolumenstrom erkennbar. Auf Basis der vorhandenen Messdaten können dennoch bisher keine belastbaren Berechnungen zur Arbeitszahl der Wärmepumpe gemacht werden, da sich die mit der WP erzeugten Wärmemenge unter den vorhandenen Randbedingungen nicht verlässlich ermitteln lässt. Im Rahmen des Monitorings wurden erste überschlägige Abschätzungen gemacht: Hierfür wurde die Wärmabgabe an die Zuluft mittels der Temperaturdifferenz vor und hinter dem Kondensator, sowie dem gemessenen Zuluftvolumenstrom berechnet. Da die Temperaturmessungen jedoch mit Unsicherheiten behaftet ist (unvollständige Kalibrierung der Sensoren im Lüftungsgerät, Störung durch Abstrahlung des Nachheizregisters bzw. des Kondensators sowie ungleichmäßiger Durchströmung des Lüftungsrohres etc.), musste der Temperaturmesswert manuell korrigiert werden um ein plausibles Ergebnis zu erhalten. Die auf diese Weise überschlägig abgeschätzte mittlere Arbeitszahl der WP liegt im Mittel (Januar bis April 2013) in der Größenordnung um 3, wobei auf Grund der Betriebsweise Schwankungen der Tagesmittel zwischen ca. 1 und 6 auftraten. Der Erwartungswert einer Jahresarbeits-

zahl zwischen 5 bis 7 wird damit deutlich unterschritten. Genauere Analysen zum Thema stehen noch aus. Zunächst sollen Versuchsreihen durchgeführt werden um die Wärmeerzeugung der WP genauer bestimmen zu können. Falls sich die bisherige Auswertung bestätigen sollte, sind in Zusammenarbeit mit dem Hersteller Verbesserungspotentiale auszuarbeiten und umzusetzen, damit die Enthalpie-rückgewinnung mittels WP, sowohl im Lippe-Bad als auch in zukünftigen Projekten effizienter erfolgen kann.

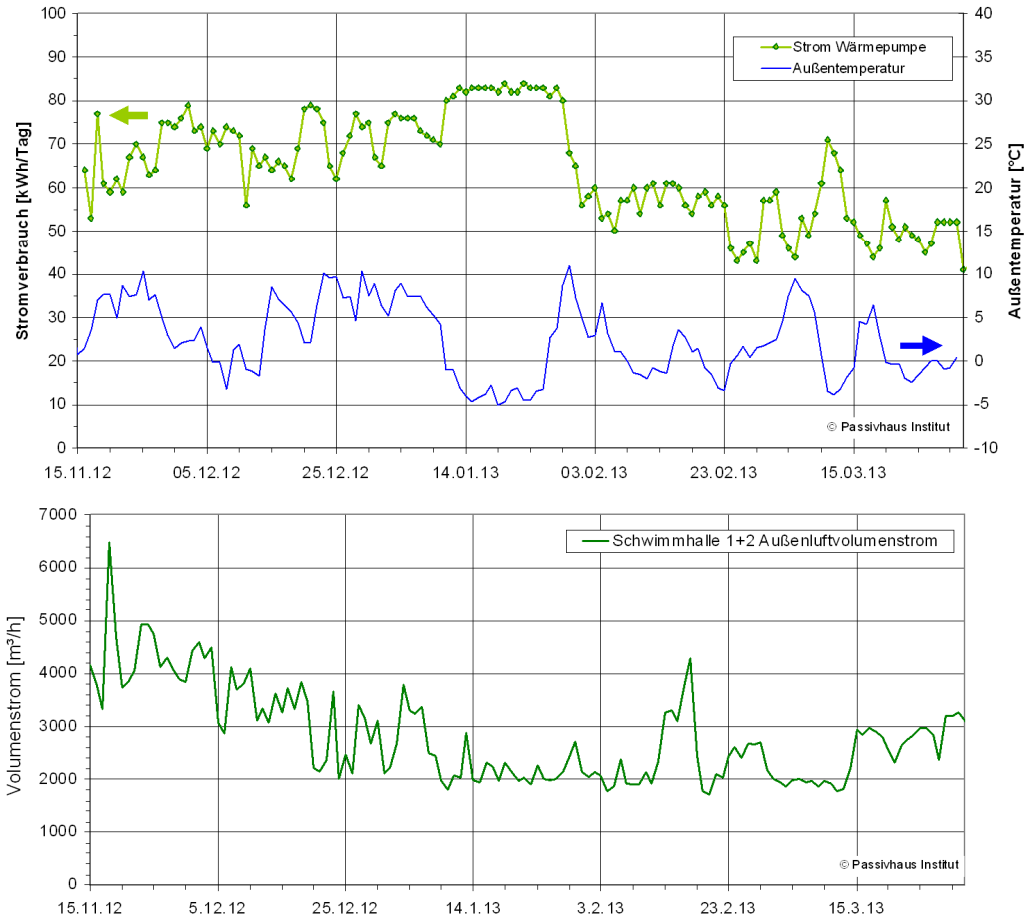


Abbildung 90: Stromverbrauch der Wärmepumpe im Lüftungsgerät von Halle 1+2 und Außenlufttemperatur sowie (unten) der Außenluftvolumenstrom des Gerätes vom 15.11.2012 bis zum 30.3.2013 (Tageswerte)

4.8.4 Stromverbrauch und Durchfluss Beckenwasserkreisläufe

Die sechs Umwälzpumpen der Beckenwasserkreisläufe werden dauerhaft betrieben. Nur für die Filterrückspülung wird der Volumenstrom regelmäßig unterbrochen. An der Durchflussmessung der Beckenwasserkreisläufe ist das Betriebsverhalten ablesbar, und erkennbar wann Filterrückspülungen durchgeführt wurden (Abbildung 91).

Der elektrische Stromverbrauch für diese sechs Umwälzpumpen wird - wie beschrieben - gesondert gemessen. Er ist abhängig vom Druckverlust des Systems mit den Rohrleitungen und unterschiedlichen Wasserfiltern sowie vom Volumen-

strom. Mit den Messdaten kann der spezifische elektrische Aufwand pro Kubikmeter Wasser für den Betrieb der Kreisläufe berechnet werden. Die Ergebnisse liegen je nach Wasserkreislauf und Betrachtungszeitraum zwischen 0,048 und 0,070 kWh/m³ (Tabelle 11). Aufgrund der gegenüber der Planung erhöhten Umwälzleistungen bei unveränderter Pumpentechnik, können die Pumpen nicht im optimalen Betriebspunkt betrieben werden. Daher sind die spezifischen Werte nicht optimal und würden bei erneuter Auslegung noch besser ausfallen.

Tabelle 11: Spezifischer Stromverbrauch[3] zur Beckenwasserumwälzung in unterschiedlichen Zeiträumen und Volumenstrom bei Normalbetrieb (inkl. Rückspülunterbrechung)

Spez. Stromverbrauch Umwälzung			
[kW pro m³/h]	**Becken 1+2**	**Becken 3**	**Becken 4+5**
26.03.2013	0,067	0,068	0,050
27.03.2013	0,068	0,066	0,051
28.03.2013	0,067	0,068	0,048
24.3. bis 01.05.2013	0,067	0,070	0,049
Volumenstrom bei Normalbetrieb (ohne Rückspülung)			
[m³/h]	124	54	217

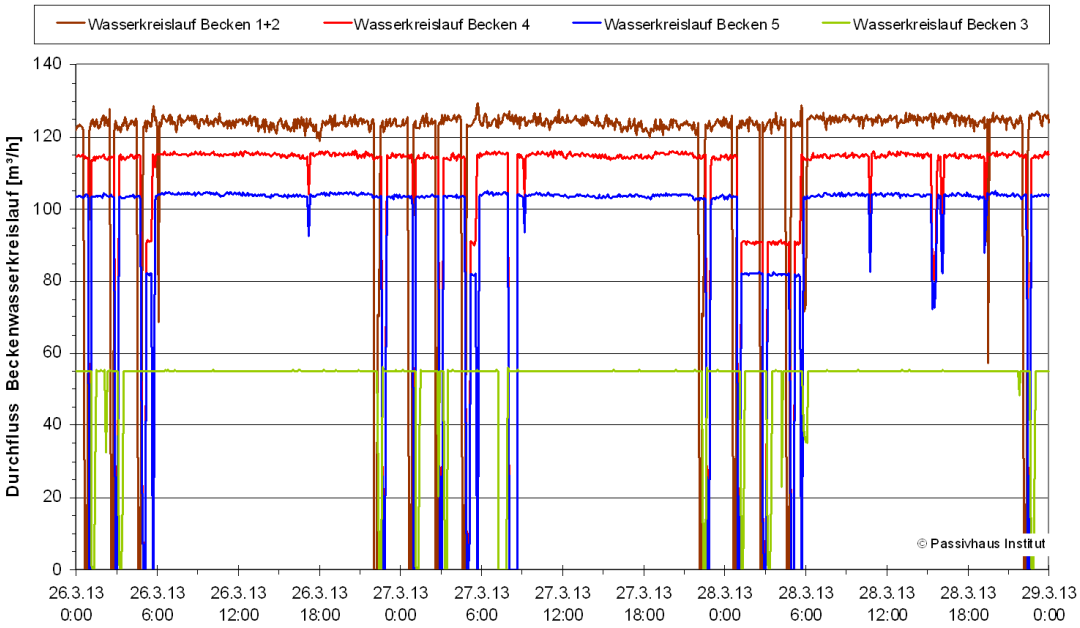


Abbildung 91: Durchfluss der 4 Wasserkreisläufe vom 26. bis zum 28.03.2013 (5-Minuten Daten)

[3] Nachträglich wurden in den Beckenwasserkreisläufen zusätzliche Kornkohlefilter nachgerüstet, womit zusätzliche Druckerhöhungspumpen notwendig wurden. Der Stromverbrauch dieser Druckerhöhungspumpen sowie der Pumpen im Nebenstrom der Wärmeübertrager zur Beheizung der Kreisläufe konnten bei dem Stromverbrauch nicht berücksichtigt werden.

Um Energieeffizienz bewerten zu können, ist es sinnvoll, die benötigte Energie auf die angebotene Dienstleistung zu beziehen. Die Dienstleistung im Bereich der Badewasseraufbereitung ist die Bereitstellung von sauberem Wasser für z.B. ein 50 m-Sportbecken. Für eine Bewertung der Energieeffizienz ist es hilfreich eine geeignete Bezugsgröße auszuwählen:

Sauberes Wasser bereit zu stellen kann auf unterschiedlichem Wege geschehen. Mittels der Norm DIN 19643 wird ein bestimmtes Umwälzvolumen zur Wasserreinigung festgelegt. Dabei werden Beckenart und -größe berücksichtigt. Zusätzlich geht in die Berechnung des Umwälzvolumens die realisierte Filterart mittels des sogenannten „k-Faktor“ ein. Allen Filterarten wird der k-Faktor 0,5 zugeordnet; eine Ausnahme stellt nur die Ultrafiltration (UF) mit dem k-Faktor von 1 dar. Da der k-Faktor in der entsprechenden Formel im Nenner steht wird bei der UF nur die Hälfte des Umwälzvolumens benötigt. Die im Betrieb eines Bades tatsächlich gefahrenen Umwälzmengen können von diesen Rechenwerten abweichen. Gerade bei der UF liegen Erfahrungen vor, welche zeigen dass das berechnete Umwälzvolumen zu gering ist. Der k-Faktor sollte bei diesen Anlagen eher bei 0,7 als bei 1 liegen. Der k-Faktor ist in der Norm [DIN 19643] erläutert.

Um die Stromverbrauchswerte der Umwälzpumpen von Beckenwasserkreisläufen unterschiedlicher Bädern – unabhängig von der Filtertechnik und dem tatsächlich gefahrenen Umwälzvolumenstrom – miteinander vergleichen zu können, schlägt das PHI folgendes vor: Der Stromverbrauch zum Betrieb der Umwälzpumpen (oder auch der gesamte Stromverbrauch für die hygienisch notwendige Wasseraufbereitung) sollte immer auf das mit dem k-Faktor von 0,5 berechnete Umwälzvolumen bezogen werden. Die Ermittlung ist also recht einfach: Der Stromverbrauch wird geteilt durch die Anzahl der Stunden (Messzeit) und durch den für das Becken mit k = 0,5 berechneten Umwälzvolumenstrom. Es ergeben sich Vergleichswerte in der Einheit kW pro m³/h.

Tabelle 12: Spezifischer Stromverbrauch[4] zur Beckenwasserumwälzung an zwei Beispieltagen bezogen auf das berechnete Umwälzvolumen mit dem k-Faktor 0,5 bei Normalbetrieb.

Spez. Stromverbrauch Umwälzung			
[kW pro m³/h]	**Becken 1+2**	**Becken 3**	**Becken 4+5**
Bezugsgröße: Berechneter Umwälzvolumenstrom mit k-Faktor = 0,5	130 m³/h *	75 m³/h	290 m³/h
26.03.2013	0,061	0,048	0,036
27.03.2013	0,062	0,046	0,035

*) Ohne Zuschläge für Attraktionen und Massagedüsen

[4] Siehe Fußnote Nr. 3 auf der vorherigen Seite.

4.9 End- und Primärenergie

Für die endgültige energetische Bewertung des Gebäudes ist es notwendig, eine Primärenergiebilanz zu erstellen, d.h. die Art der Wärmebereitstellung zu berücksichtigen. Dazu wird der Endenergiebedarf mit Primärenergiefaktoren (PE-Faktoren) gewichtet. Die PE-Faktoren wurden bereits für den vorausgehenden Projektbericht [BGL 2011] festgelegt; sie werden unverändert übernommen. Zur Erläuterung wird im Folgenden ein Abschnitt aus dem Bericht zitiert:

„Im Gebäude des Schwimmbades befinden sich zwei Blockheizkraftwerke, von denen eines mit Biogas und eines mit Erdgas betrieben wird. Die BHKWs sind Teil des Fernwärmenetzes der Stadt Lünen, für welches aufgrund eines hohen Anteils regenerativer Energien ein sehr niedriger Primärenergiefaktor von 0,17 ermittelt wurde (vgl. [Wibera 2010]). Das Bad bezieht einen Teil der benötigten Wärme aus dem Fernwärmenetz.

Da im Bad ein hoher Bedarf an Niedertemperaturwärme besteht, kann sowohl Kondensationsabwärme der BHKWs (Brennwertnutzung) als auch Abwärme aus dem Aufstellraum der BHKWs genutzt werden. Die Nutzung dieser Abwärme ist ausschließlich in Verbindung mit dem Bad möglich. Daher wird der Primärenergiefaktor für diese Abwärme zu Null angesetzt. Der Primärenergiefaktor für Strom wird den Regelungen der aktuellen Energie-Einsparverordnung (EnEV) entsprechend mit 2,6 angenommen.“

Da bei dieser Berechnung des PE-Faktors die notwendige elektrische Hilfsenergie für z.B. die Pumpen des NT-Kreislaufs nicht berücksichtigt wurde, wird die Energie bei dieser Auswertung beim Gesamtstromverbrauch bilanziert. Werden der gesamte jährliche Strom und Wärmeverbrauch summiert, ergibt sich ein Endenergieverbrauch des Hallenbades von 414,0 kWh/(m²a) (Abbildung 92). Aufgrund der extrem günstigen PE-Faktoren reduziert sich der Wärmeverbrauch auf einen minimalen Wert (21,9 $kWh_{PE}/(m^2a)$). Dominant ist der Stromverbrauch, welcher vom Endenergiewert 155,9 $kWh_{End}/(m^2a)$ auf primärenergetisch 405,3 $kWh_{PE}/(m^2a)$ ansteigt. Dabei ist der gesamte im Gebäude verbrauchte Strom bilanziert - unabhängig von seiner Herkunft. Insgesamt ergibt sich damit ein Primärenergieverbrauch von **427,2 $kWh_{PE}/(m^2a)$** für das Hallenbad. Während der Planung wurde ein Primärenergiebedarf von 391 $kWh_{PE}/(m^2a)$ – allerdings ohne den realisierten Umluftbetrieb der Lüftungsanlagen – abgeschätzt (siehe [BGL 2011] Seite 104). Die Ansätze während der Planung unterschieden sich an vielen Punkten von der realisierten technischen Ausstattung und insbesondere der Betriebsweise. Daher sind zur Zeit der Primärenergiebedarf und der Primärenergieverbrauch NICHT direkt mit einander vergleichbar. Es besteht noch Potential durch weitere Optimierung der Betriebsweise den Energieverbrauch zu senken (Ausführungen im Bericht).

Der auf dem Gelände des Hallenbades produzierte PV-Strom kann vollständig mit dem verbrauchten Strom verrechnet werden: Der auf dem Haus bzw. Grundstück produzierte PV-Strom verdrängt konventionellen Strom aus dem Netz. Dem nicht

erneuerbaren Anteil von Solarstrom wird nach [Gemis] ein PE-Faktor von 0,3 angerechnet. Eine Möglichkeit der primärenergetischen Berücksichtigung für den im Netz verdrängten Strom ist den anrechenbarer PE-Faktor für den erzeugten PV-Strom wie folgt zu berechnen: 2,6 - 0,3 = 2,3. Nach Abbildung 93 werden die insgesamt erzeugten 24,8 $kWh_{End}/(m^2a)$ PV-Strom damit primärenergetisch zu 56,9 $kWh_{PE}/(m^2a)$. Diese erzeugte Menge kann vom Primärenergie-Gesamtverbrauch abgezogen werden. Dieser reduziert sich damit auf 427,2 - 56,9 = **370,3 kWh/ (m²a).**

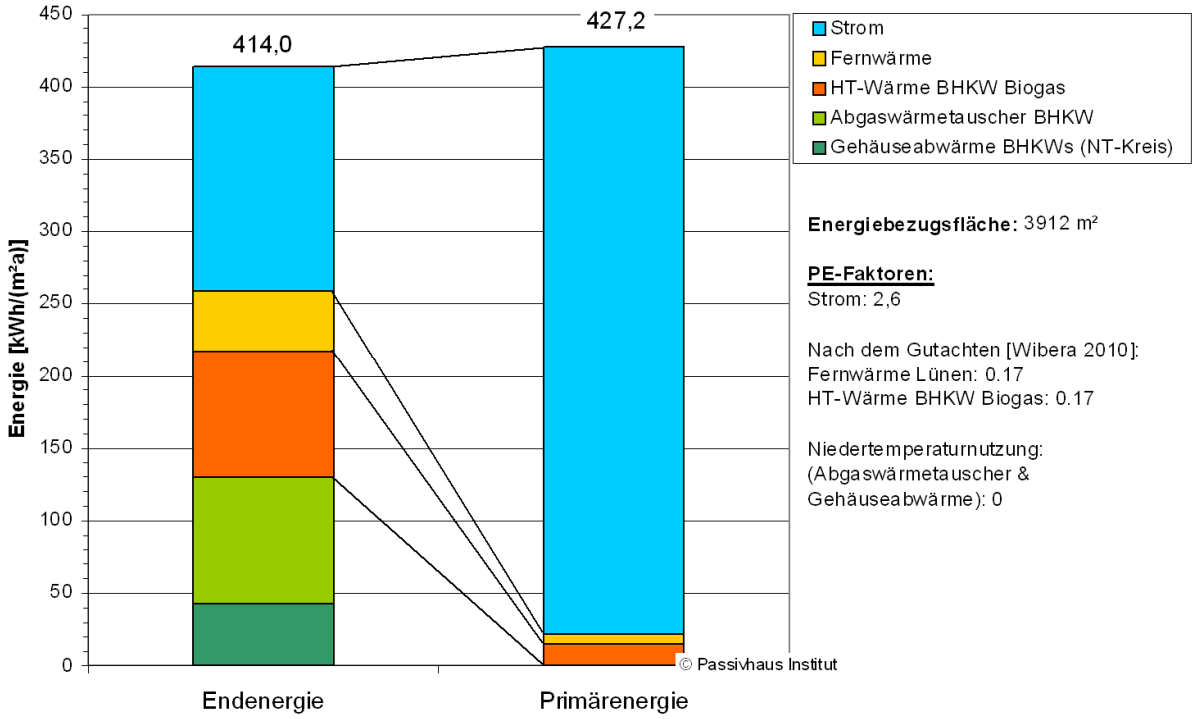


Abbildung 92: Endenergieverbrauch und daraus berechneter Primärenergieverbrauch aller Energieaufwendungen des Lippe-Bades im Bilanzjahr April 2012 bis März 2013. Informationen zu den PE-Faktoren sind dem Text zu entnehmen. Der erzeugte PV-Strom wird in dieser Verbrauchsdarstellung nicht berücksichtigt.

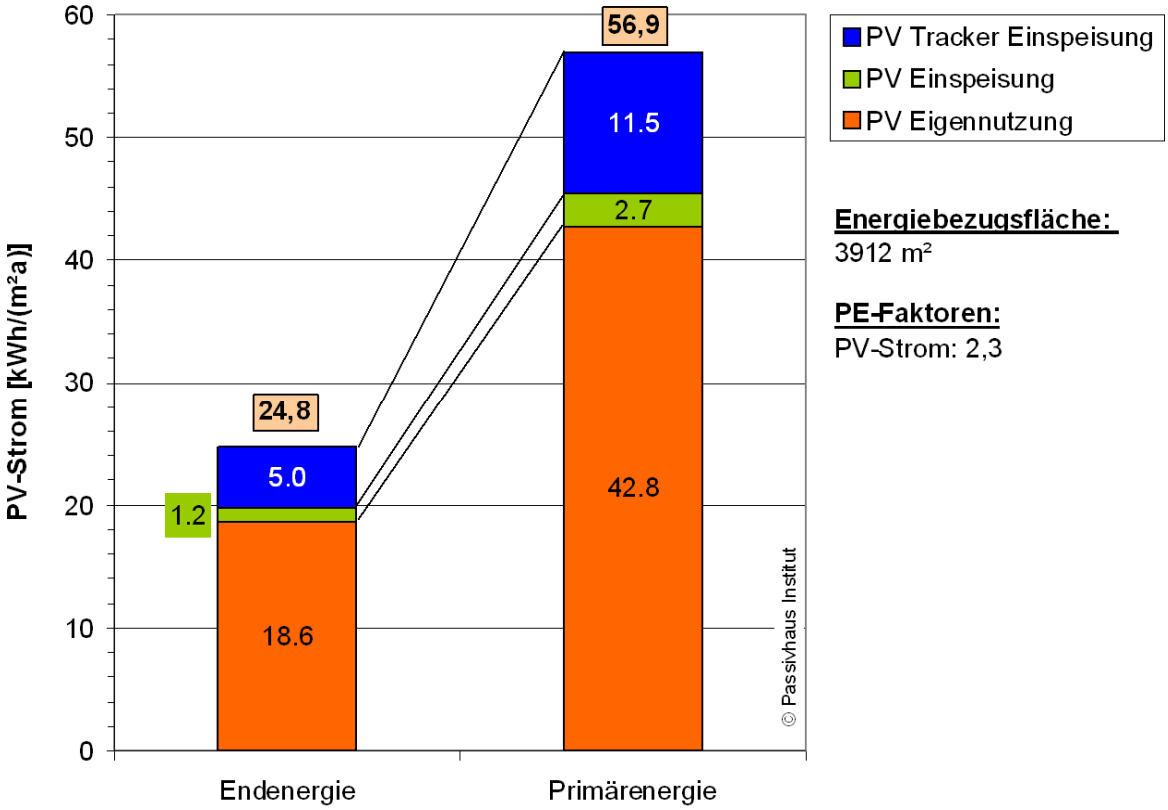


Abbildung 93: Jährliche Solarstromproduktion auf dem Gebäude bzw. mit den PV-Trackern auf dem Gelände (Bilanzjahr April 2012 bis März 2013). Die Werte sind zur Vergleichbarkeit wieder auf die Energiebezugsfläche des Hallenbades bezogen.

5 Optimierung durch Energiebilanzierung

Die Möglichkeit, bereits während der Planungsphase den Energiebedarf eines Gebäudes verlässlich voraussagen zu können, ist eine grundlegende Voraussetzung um hohe Energieeffizienz erreichen zu können. Sie ermöglicht die Optimierung einzelner Komponenten sowie des ganzheitlichen Gebäudekonzeptes. Die Energieströme in einem Hallenbad sind auf Grund vieler Wechselwirkungen und Regelungen sehr komplex und daher nur schwer erfassbar. Um die Energieeffizienz einschätzen und verbessern zu können, war ein wesentlicher Bestandteil der Forschungs- und Beratungsleistungen während der Planung des Lippe-Bades die Erstellung einer Energiebedarfsrechnung (vgl. [Schulz et al. 2009] und [BGL 2011]). Hierzu wurde im Wesentlichen das Passivhaus Projektiergunspaket (PHPP) für die Energieströme in einem Bad angepasst und erweitert, inklusive mehrerer Temperaturzonen, verschiedener Lüftungsstrategien und Becken- sowie Warmwassererwärmung. Die Berechnungen dieser stationären Energiebilanz auf Monatsbasis wurden für spezifische Fragestellungen mit dynamischen Simulationen auf Stundenbasis verglichen und ergänzt. Verwendet wurde hierfür die vom PHI eigens entwickelte Software [DYNBIL]. Dynamische Simulationen sind zeitaufwändig und auf Grund der vielen Eingabeparameter oft fehleranfällig. Prinzipiell ermöglichen sie eine detaillierte Aussage zum thermischen und auch dem hygrischen Verhalten und Energiekennwerten von Gebäuden, jedoch sind sie vor dem Hintergrund ihrer Komplexität wenig für den alltäglichen Planungs- und Optimierungsprozess geeignet. Im Falle des Lippe-Bades stimmen die Ergebnisse der dynamischen Simulation und des angepassten PHPP gut überein, womit sich das vereinfachte stationäre Berechnungsverfahren prinzipiell für die Energiebedarfsberechnung auch von komplexen Schwimmbädern qualifiziert. Jedoch sind weitere Validierung und Aufarbeitung der Dateneingabe für den ungeschulten Nutzer notwendig, bevor das Tool verbreitet eingesetzt werden kann.

Das PHPP ist im Wesentlichen eine stationäre Energiebilanz auf Monatsbasis in der monatlich angepasste Randbedingungen (Außenklima) angesetzt werden. Die Dateneingabe erfolgt möglichst vereinfacht, so dass Parameter für die eine monatliche Aufschlüsselung nicht notwendig sind mit Mittelwerten als konstant angenommen werden (z.B. die internen Wärmequellen und der Luftwechsel). Im speziell entwickelten Schwimmbad-PHPP wurden die Berechnungen erweitert und ein Verfahren entwickelt mit dem die Zusammenhänge in der Schwimmhalle besser abbilden zu können. Je nach Außenfeuchte und Feuchtequellen im Raum wird ein mittlerer Luftwechsel zur Entfeuchtung berechnet. Es kann zudem zwischen unterschiedlichen Betriebsweisen während und außerhalb der Öffnungszeiten unterschieden werden. Weitere Ergänzungen wurden im PHPP durchgeführt um die Beckenwassererwärmung unter den eingegebenen Randbedingungen berechnen zu können. Es wird davon ausgegangen, dass im Bad über das ganze Jahr hinweg nur eine Betriebsweise realisiert wird.

Allen in [BGL 2011] veröffentlichen Berechnungen des Lippe-Bades liegen Annahmen für verschiedene Teilbereiche zu Grunde. Für manche Aspekte mussten Abschätzungen getroffen werden, da zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch nicht alle Planungsdetails feststanden (z.B. Strombedarf der Schwimmbadtechnik). Bei anderen Aspekten hingegen war eine genaue Parameterbestimmung schlicht nur beschränkt möglich, da keine verlässlichen Messwerte aus anderen Projekten vorlagen (z.B. die zu erwartenden Verdunstungsmengen und Enthalpieverluste). Ein detaillierter Vergleich der aus dem Monitoring vorliegenden Verbrauchsdaten mit der Energiebilanz ermöglicht nun eine Überprüfung und somit Bestätigung/Präzisierung der getroffenen Annahmen. Auf diese Weise kann das angepasste PHPP als Projektierungswerkzeug für Schwimmbäder validiert und erweitert werden und dann verlässlich für die Beurteilung weiterer Energieeinsparpotentiale im Lippe-Bad sowie in zukünftigen Projekten verwendet werden.

5.1 Vergleich: Messdaten und berechneter Endenergiebedarf

Die Energieströme in einem Hallenbad hängen stark von der realisierten Betriebsweise ab. Für die Projektierung des Bades wurde eine energiesparende Nutzung angenommen, die bisher aus unterschiedlichsten Gründen nur zum Teil umgesetzt werden konnte. Eine Übereinstimmung der in [BGL 2011] vorausgesagten und erreichten Energiekennwerte ist daher nicht zu erwarten. Dennoch ist der direkte Vergleich von Interesse, da er aufzeigt, an welcher Stelle Abweichungen aufgetreten sind. Der vorab berechnete Gesamtendenergiebedarf (Wärme + Strom) wurde mit 550 kWh/(m^2_{EBF}a) bilanziert. Die Messungen des ersten Jahres ergeben trotz abweichender (tendenziell ungünstigerer) Betriebsbedingungen einen Verbrauchswert von nur 412 kWh/(m^2_{EBF}a). Die bilanzierten und gemessenen Werte (März 2012 bis einschließlich April 2013) sind in Abbildung 94 im Vergleich dargestellt, unterteilt in drei Teilbereiche – Raumheizung, Wassererwärmung und Strom. Der größte Unterschied ist unverkennbar im Bereich der Wassererwärmung, während die Verbrauchswerte für die Raumbeheizung und die Stromverbraucher gut zu den projektierten Werten passen.

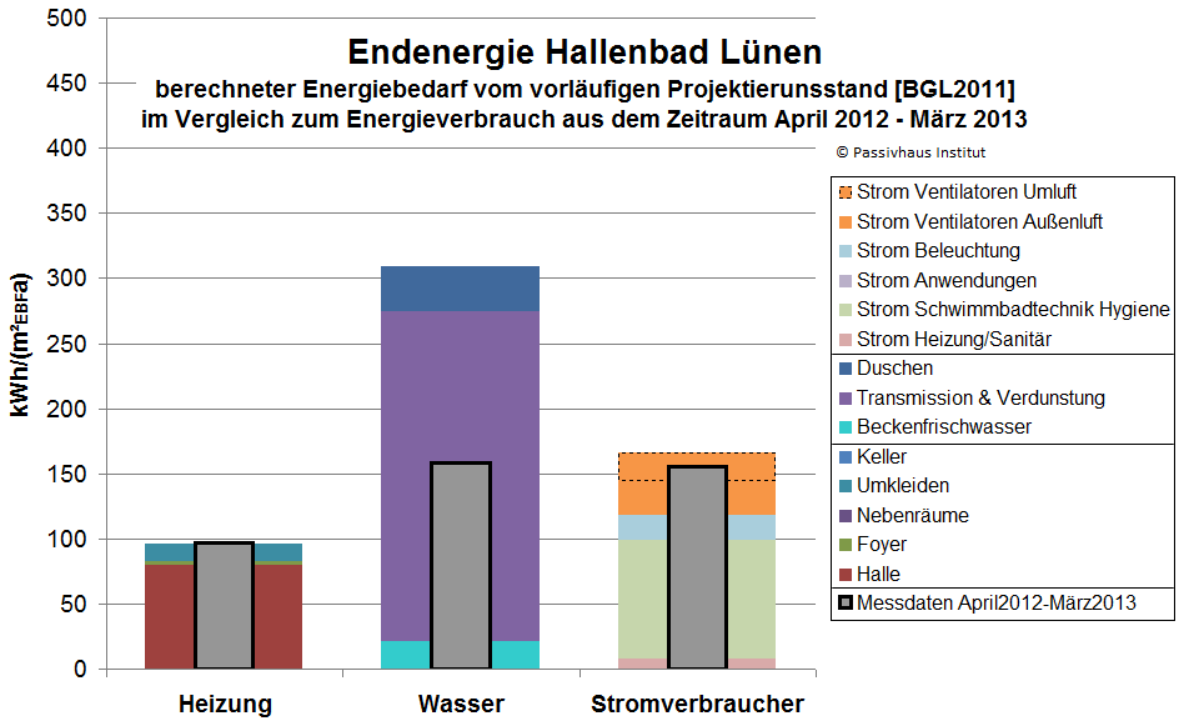


Abbildung 94: Die berechnete Endenergie aus der ursprünglichen Energiebilanz des Lippe-Bades (Stand: September 2011. Quelle: [BGL 2011]) im direkten Vergleich mit den Messwerten (abweichende Betriebsbedingungen) aus dem Zeitraum April 2012 bis einschließlich März 2013. Es handelt sich um spezifische Werte mit Bezug auf die Energiebezugsfläche.

Da die Betriebsweise des Lippe-Bades während des Monitorings nicht konstant war, ist ein Vergleich der berechneten und gemessenen Jahreswerte für eine weiterführende Analyse der Abweichungen nicht zielführend. Stattdessen wurden Teilbereiche aus Zeiträumen mit verlässlichen Daten und konstanter Betriebsweise ausgewählt und die entsprechend gemessenen Randbedingungen in der Energiebilanz nachgeführt. Die entsprechende Auswertung der Messdaten und die daraus folgenden Erkenntnisse sind in den folgenden Textabschnitten im Einzelnen für die Teilbereiche Beckenwassererwärmung, Raumheizung, Strom und Trinkwarmwasser erläutert.

5.1.1 Beckenwassererwärmung

Nach den Bedarfsrechnungen während der Planungsphase des Bades ist die Beheizung des Beckenwassers der größte Endenergieverbraucher (siehe Abbildung 94). Diese Voraussage wurde vom Monitoring bestätigt (vgl. Abschnitt 4.8.2 zum gemessenen Energieverbrauch der verschiedenen Teilbereiche) zur Aufteilung des gemessenen Wärmeverbrauchs), wenn auch nicht im selben Ausmaß. Die Messwerte liegen deutlich niedriger als erwartet, daher ist eine genaue Betrachtung der Energieströme für die Beckenwassererwärmung von besonderem Interesse.

Die Beckenwassererwärmung wird durch folgende Einflussfaktoren bestimmt:

- Erwärmung der benötigten **Frischwassernachspeisung**:
  30 Liter pro Badegast hygienischer Bedarf nach Norm bzw. Wasserverluste durch notwendige Filterrückspülungen und sonstige Wasseraustäge z.B. durch Verdunstung oder nasse Badegäste
- Nacherhitzung der **Netto-Wärmeverluste**:
  Wärmeverluste durch z.B. Verdunstung, Transmission und Konvektion
  abzüglich Wärmegewinne durch z.B. Schwimmer, Pumpentechnik und Transmission und Konvektion

Die einzelnen Faktoren der entsprechenden Energiebilanz enthalten viele Unsicherheiten, die den berechneten Heizwärmebedarf erheblich beeinflussen. Insbesondere die Wärmeverluste auf Grund der Verdunstung sowie die Wärmegewinne durch Personen und Schwimmbadtechnik sind schwer abschätzbar. Beide Parameter hängen stark vom Nutzerverhalten und der Betriebsweise des Bades ab (Badezeit, Schwimmstil, Beckenwasser- und Hallenluftbedingungen etc.), die nur zum Teil durch das Monitoring erfasst werden können. Bei einigen wesentlichen Einflussfaktoren besteht Unklarheit bezüglich der anzusetzenden Annahmen, so z.B. für die Verdunstungsmengen und den entsprechenden, dem Wasser zuzuordnenden Wärmeverlust. Auch die typische mittlere Wärmeabgabe von Schwimmern bzw. Badegästen an das Wasser ist nicht genau bekannt.

Aus dem Monitoring sind die Frischwassermengen und der Heizwärmeverbrauch pro Beckenkreislauf bekannt, sowie Wassertemperaturen an verschiedenen Punkten in den jeweiligen Kreisläufen, die Umwälzmengen sowie die Frischwassertemperatur am Eintritt in das Gebäude. Für die Wasserbilanz wird außerdem die Wassermenge der Filterspülwasseraufbereitung separat aufgezeichnet. Eine Auswertung dieser Daten soll, soweit möglich, Aufschluss über die Eignung der getroffenen Annahmen in der Energiebilanz geben.

Der **Frischwasserbedarf** (Nachspeisung im laufenden Badbetrieb) wird üblicherweise durch die benötigten Wassermengen für die regelmäßige Filterspülung dominiert. Ein im Vergleich kleiner Zusatzbedarf entsteht durch Wasserverluste wie z.B. Verdunstung oder Austrag durch Badegäste. Um die benötigten Wassermengen im Badbetrieb zu reduzieren und gleichzeitig auch an Heizbedarf zu sparen, wurde im Lippe-Bad eine Aufbereitung des Filterspülwassers geplant, mit der ca. 70 % des benötigten Filterspülwassers dem Beckenkreislauf erhalten bleiben und nur ca. 30 % durch kaltes Frischwasser nachgespeist werden müssen. Nach [VDI 2089] müssen aus hygienischen Gründen im Mittel 30 Liter Frischwasser pro Badegast bereit gestellt werden – eine Filterwasseraufbereitung bringt nur einen energetischen Vorteil, solange dieser Wert nicht unterschritten wird. Abbildung 95 zeigt die gemessenen monatlichen Frischwassermengen im Vergleich zu den projektierten Werten. Die geplante Filterspülwasser*aufbereitung* war im betrachteten Zeitraum aus

technischen Gründen nicht in Betrieb. Die Übereinstimmung der monatlichen Frischwassermengen bis Juni 2012 mit der Bedarfsabschätzung ohne Filterwasseraufbereitung ist akzeptabel (der Verbrauch liegt im Mittel ca. 19 % höher). Während der temporären Teilschließung für Revisionszwecke im Juli und August sinken die Werte nachvollziehbar ab. Danach ist der Frischwasserverbrauch für alle drei Kreisläufe höher als zuvor und liegt nun im Mittel 76 % über der Erwartung. Die Erhöhung ist auf eine Umrüstung der Filtertechnik zurück zu führen, bei der unter Anderem die Filtertechnik angepasst und die Filterflächen vergrößert wurden. Es ist geplant, die Filtertechnik zukünftig zu optimieren und auch die Filterspülwasseraufbereitung in Betrieb zu nehmen. Ausgehend von der ursprünglichen Projektierung liegt das Einsparpotential bei ca. 1.700 m³/Monat, also 80 % Reduktion gegenüber den aktuellen Verbrauchswerten. Reduzierte Frischwassermengen sind nicht nur im Sinne der Wassereinsparung erstrebenswert, sondern auch wegen der einhergehenden Reduktion der Heizenergie zur Erwärmung bis auf Beckenwassertemperatur.

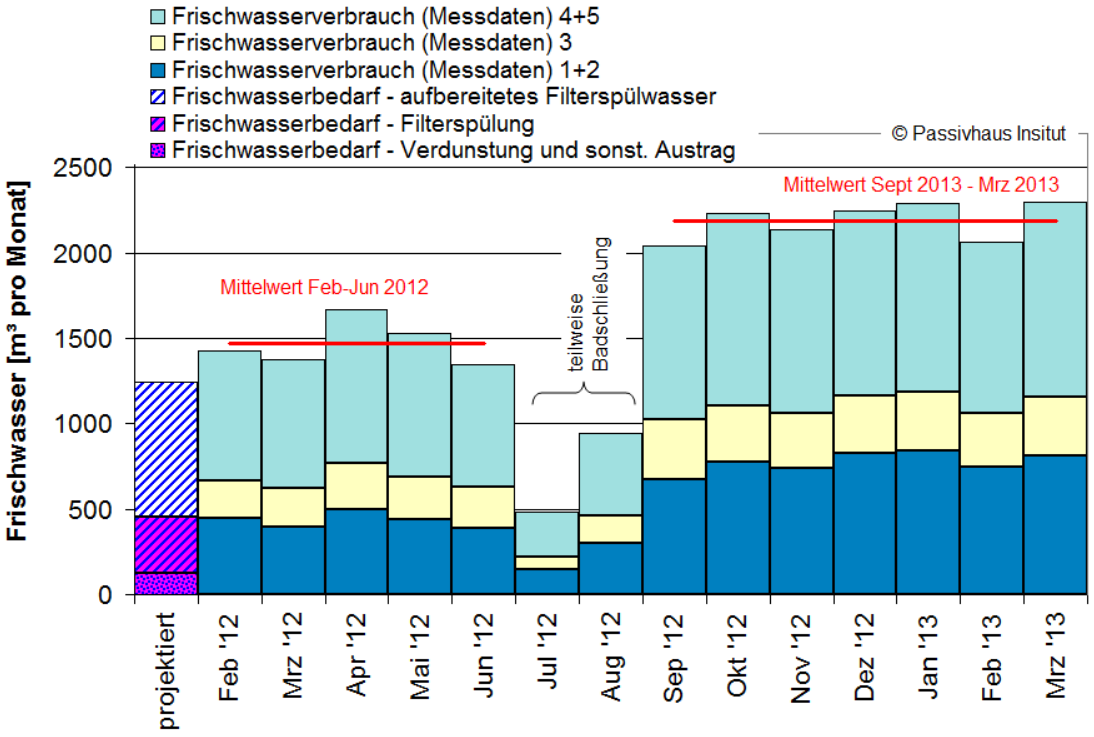


Abbildung 95: Frischwassermenge – Der angesetzte Bedarfswert für die Summe aller Kreisläufe im Vergleich zu den gemessenen monatlichen Verbräuchen der drei Kreisläufe seit Februar 2012.

Den Erwartungen zu Folge müsste bei einem real erhöhten Wasserverbrauch auch der **Heizenergieverbrauch** höher liegen, jedoch entspricht dies nicht den Beobachtungen. Wie in Abbildung 96 erkennbar, liegt der Heizwärmeverbrauch im Mittel des Messzeitraums deutlich niedriger als ursprünglich projektiert. Auch sind die Verbrauchsanteile der Beckenkreisläufe am Gesamtheizverbrauch anders als erwartet. Trotz höchstem Frischwasserverbrauch und größten Wasseroberflächen ist der Heizwärmeverbrauch für die beiden Sportbecken (4+5) in der Praxis niedriger als

für das viel kleinere und wärmere Eltern-Kind-Becken (1+2). Die hier gezeigten Zahlen sind *nicht* direkt vergleichbar, da die realisierten Temperaturen und Luftfeuchten in der Halle nicht den geplanten Randbedingungen entsprachen. Zur näheren Betrachtung der Heizwärme für die Beckenwassererwärmung und Ursachenanalyse der Abweichungen zwischen den projektierten und gemessenen Werten wurden die verschiedenen Einflussfaktoren bei gegebenen Randbedingungen näher betrachtet.

Hinweis: Für die Temperatur des Frischwassers liegen erst ab Mitte August 2012 verlässliche Daten vor. Temperaturen für die restlichen Monate des ausgewerteten Jahres wurden mittels Anpassung einer Sinuskurve an die vorhandenen Messdaten abgeschätzt. Es ergibt sich eine jahresmittlere Temperatur von 13,3 °C, also ca. 3 °C über der angesetzten Frischwassertemperatur der Projektierung für das Referenzklima.

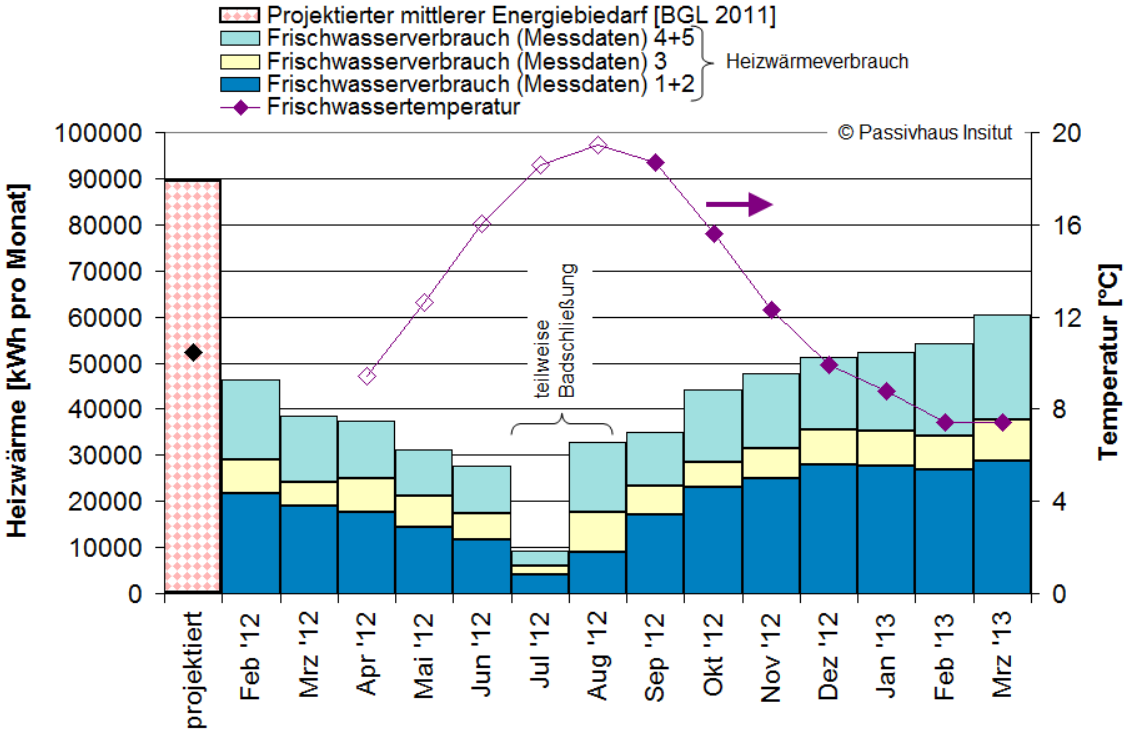


Abbildung 96: Monatlicher Heizwärmebedarf und –verbrauch für die drei Beckenkreisläufe, sowie die monatlich gemessene Frischwassertemperatur (leere Rauten = Hochrechnung). Der Verbrauch ist deutlich niedriger als erwartet, *trotz* höherem Frischwasserverbrauch. Allerdings liegen andere Randbedingungen vor, als bei der Projektierung.

5.1.1.1 Verdunstung

Den Erwartungen zufolge machen die Wärmeverluste durch Verdunstung den Großteil der notwendigen Beckenwassererwärmung aus. Die zu erwartende Verdunstungsmenge $M_{D,B,u/b}$ in kg/h entspricht nach [VDI 2089]:

$$M_{D,B,u/b} = \frac{\beta}{R_D \cdot \overline{T}} \cdot \left(p_{D,W} - p_{D,L}\right) \cdot A_B$$

β	Stoffübergangskoeffizient [m/h]
R_D	spezifische Gaskonstante für Wasserdampf [J/(kgK)]
$\overline{T}$	Mittelwert der Beckenwasser- und Lufttemperatur [K]
$p_{D,W}$	Sättigungsdruck bei Beckenwassertemperatur [Pa]
$p_{D,L}$	Dampfdruck der Hallenluft [Pa]
A_B	Beckenwasseroberfläche [m²]

Die Höhe der tatsächlichen Verdunstung wird maßgeblich durch den Stoffübergang β bestimmt, welcher jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Für die Auslegung der Lüftungsgeräte (Spitzenlast) wurden in der Energiebilanz während der Planungsphase auf Basis der [VDI 2089] Stoffübergangskoeffizienten angesetzt. Diese Kennwerte wurden in der ursprünglichen Energiebilanz übernommen, auch wenn es sich hierbei um Spitzenwerte handelt, nicht um Mittelwerte im Badbetrieb – damit liegen die Berechnungen auf der sicheren Seite. Wie bereits in [Schulz et al. 2009] (Seite 23) beschrieben, sind in der Praxis mittlere Verdunstungsmengen von ca. 50 % des nach VDI berechneten Wertes zu erwarten. Auf Basis der Messdaten können diese Kennwerte nun pro Becken überprüft und in der Energiebilanz angepasst werden. Eine direkte Messung der Verdunstung aus dem Beckenwasser ist im laufenden Betrieb nicht möglich. Die Größenordnung kann jedoch über die erbrachte Entfeuchtungsleistung der Hallenbelüftung berechnet werden: Bei konstanter Innenraumfeuchte entspricht die Differenz der zugeführten Feuchte (Zuluft) und der entnommenen Feuchte (Abluft) den Feuchtequellen im Raum. Es wird zunächst davon ausgegangen, dass die gesamte berechnete Entfeuchtungsleistung ihren Ursprung in Verdunstung von Beckenwasser hat. Für die Energiebilanz wird zudem davon ausgegangen, dass die entsprechende Verdunstungsenthalpie zu 100% dem Beckenwasser entnommen wird und nicht der Hallenluft. In der Praxis tritt ein Teil der Verdunstung sicherlich außerhalb der Becken auf z.B. von Wassertropfen/-pfützen, die sich durch Wasseraustrag der Badegäste auf dem Boden bilden, durch Verdunstung auf der Haut von nassen Gästen oder von Handtüchern, Schwimmequipment etc. Insbesondere bei starker Wasserbewegung und Tropfenbildung ist auch davon auszugehen, dass die benötigte Verdunstungsenthalpie der umgebenden Luft entnommen wird anstelle dem Beckenwasser. Weitere Unsicherheiten entstehen durch Feuchteein- und -austräge in der jeweiligen

Halle z.B. während der Bodenreinigung oder bei Luftaustausch mit anderen Räumen (Türöffnungen) sowie durch Regelungen der Luftmenge, die nicht für die Entfeuchtung benötigt werden (z.B. regelmäßige Kalibrierung der Lüftungsgeräte, bei welcher kurzzeitig 100 % Außenluft in die Halle eingebracht wird). Auch die Unsicherheiten in der Messung selbst können an dieser Stelle zu einer Verschiebung der Ergebnisse führen[5]. Um den Effekt berücksichtigen zu können, dass nicht die gesamte aus den Lüftungsdaten berechnete Entfeuchtungsleistung ihren Ursprung in der Beckenwasserverdunstung hat, wird der Rechenwert pro Becken mit einem pauschalen Korrekturfaktor reduziert. Wie hoch der tatsächliche Anteil in der Praxis ist, lässt sich nicht genau bestimmen und kann von Halle zu Halle abweichen. Als Annahme wurden in den Vergleichsrechnungen für die Beckenwassererwärmung Reduktionsfaktoren zwischen 0,5 und 1 angesetzt (siehe 5.1.1.5). Für den verbleibenden Verdunstungsanteil, welcher nicht dem Beckenwasser angerechnet wird, muss die notwendige Verdunstungsenthalpie ihren Ursprung an anderer Stelle haben z.B. der Hallenluft. Dieser Effekt sollte sich in den Messdaten der Heizwärme der einzelnen Hallen widerspiegeln. Die entsprechende Analyse erfolgt in Kapitel 5.1.2.

In Tabelle 13 sind die in der ursprünglichen Energiebilanz angesetzten Werte den aus dem Monitoring berechneten mittleren Stoffübergangskoeffizienten gegenübergestellt. Während der Ruhezeiten liegen die Messwerte im Bereich von 60 bis 100 % von den Werten nach dem Ansatz in Anlehnung an die VDI, also in vertretbarer Übereinstimmung in Anbetracht der Unsicherheit der Berechnung. Tagsüber entspricht die berechnete Verdunstungsmenge im Mittel je nach Becken 20 bis 40 % der Auslegung. Die berechneten Stoffübergänge liegen zwischen 7 und 11 m/h. Die Korrelation der VDI von stärkerer Verdunstung bei tieferen Becken kann mit den vorliegenden Daten nicht bestätigt werden. Schwankungen des Stoffübergangs können durch verschiedenste Einflussfaktoren verursacht werden, insbesondere durch die Beckennutzung, Hallenfeuchte und das Temperaturniveau (Hallenluft zu Beckenwasser). Abbildung 97 zeigt ein Beispiel für die berechnete stundenmittlere Entfeuchtungsleistung im Tagesverlauf im Vergleich zur Beckenbelegung. Zusätzliche Grafiken mit der berechneten Entfeuchtungsleistung im Zeitverlauf sind im Abschnitt 8 (Anhang) aufgeführt.

Für ein besseres Verständnis wurden für alle Becken die Daten von Zeiträumen mit möglichst konstanten Randbedingungen (Hallenfeuchte, Luft- und Beckenwassertemperatur) ausgewertet und der Einfluss auf die Verdunstung untersucht. Die berechneten mittleren Stoffübergänge aller Becken sowie die berechnete spezifische Entfeuchtungsleistung (= Verdunstung) pro Quadratmeter Beckenoberfläche unter verschiedenen Randbedingungen sind in Abbildung 98 und Abbildung 99 dargestellt. Die berechneten Entfeuchtungsleistungen liegen im Bereich von 0,07 bis

[5] Es werden an dieser Stelle Daten von Standard-Sensoren der Hersteller im Lüftungsgerät verwendet, die vom PHI zwar auf Plausibilität geprüft, aber nicht abschließend kalibriert wurden. Eine solche Kalibrierung ist für die Fortsetzung der Messung geplant.

0,19 kg/($m^2_{Beckenfläche}$h). Tendenziell ist, wie zu erwarten, eine Absenkung bei höheren Temperaturdifferenzen zwischen Hallenluft und Beckenwasser, sowie bei höheren Hallenfeuchten erkennbar.

Tabelle 13: Übersicht der Stoffübergangskoeffizienten ß [m/h] für die Berechnung der Verdunstung. Die Werte nach Lüftungsauslegung der VDI 2089 sind den Werten gegenübergestellt, die im Mittel aus dem Monitoring hervorgehen.

Stoffübergangskoeffizient β [m/h]	Energiebilanz Planungsphase		Berechnung aus mittlerer Entfeuchtungsleistung über die Hallenlüftung	
	Badebetrieb	Nacht	Badebetrieb	Nacht
Eltern-Kind & Warmbecken	40	6,3	9,7 [24%]	5,7 [92%]
Lehrschwimmbecken (mit Hubboden)	28	6,3	7,6 [27%]	4,0 [64%]
Sportbecken 4 (Nichtschwimmer)	34,5	6,3	7,0 [20%]	4,7 [74%]
Sportbecken 5 (Altbau)	28	6,3	11 [39%]	6,4 [101%]

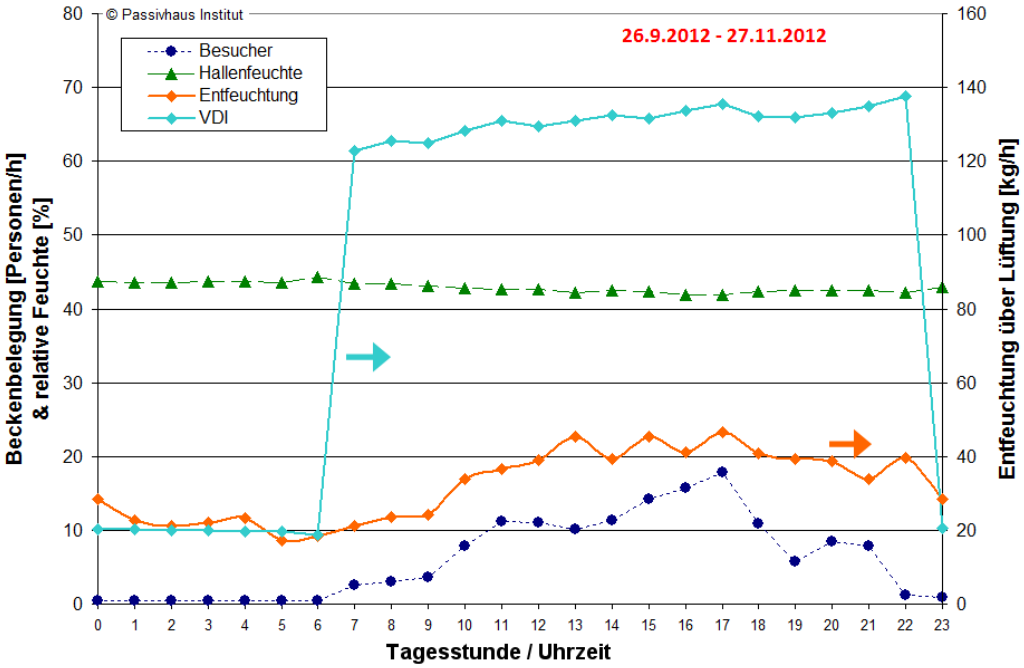


Abbildung 97: Mittleres Tagesprofil der Beckenbelegung (LASE Scanner) und der erbrachten Entfeuchtungsleistung über die Lüftung in Halle 1+2 über ca. 8 Wochen. Die Entfeuchtungsleistung steigt wie erwartet tendenziell bei höherer Beckennutzung an. Außerhalb der Öffnungszeiten ist die Entfeuchtung von ähnlicher Größenordnung wie projektiert, tagsüber jedoch deutlich niedriger.

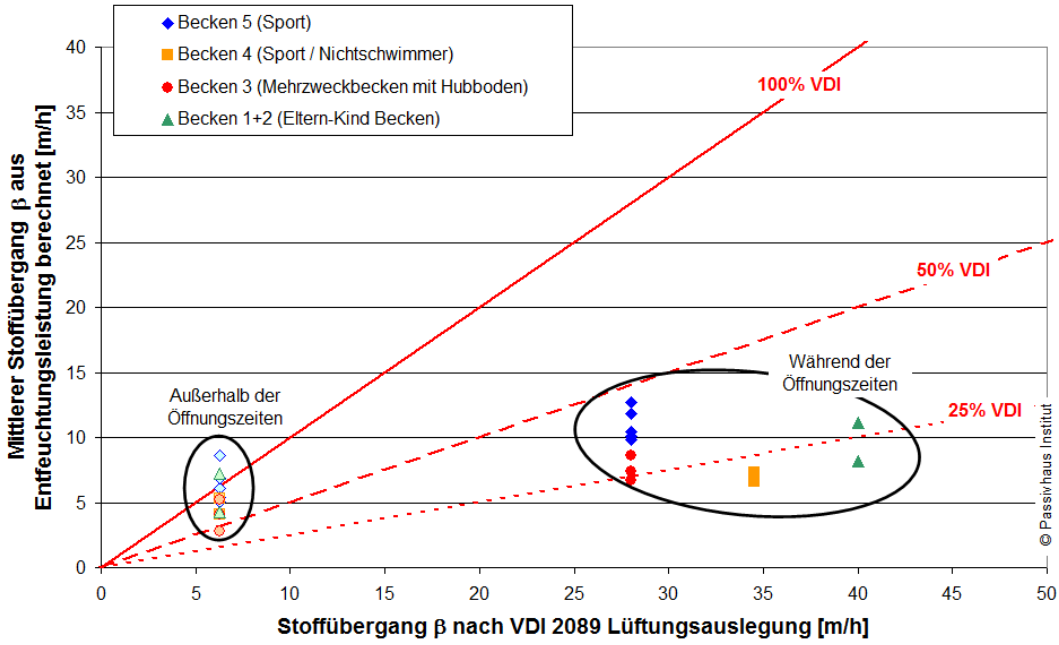


Abbildung 98: Die aus der Entfeuchtungsleistung berechneten Stoffübergänge für die Verdunstung der einzelnen Becken aus jeweils mehreren repräsentativen Zeiträumen mit unterschiedlichen Randbedingungen. Während der Öffnungszeiten liegen die Mittelwerte immer unter 50% der Kennwerte für die Spitzenlastauslegung der Lüftung nach [VDI 2089].

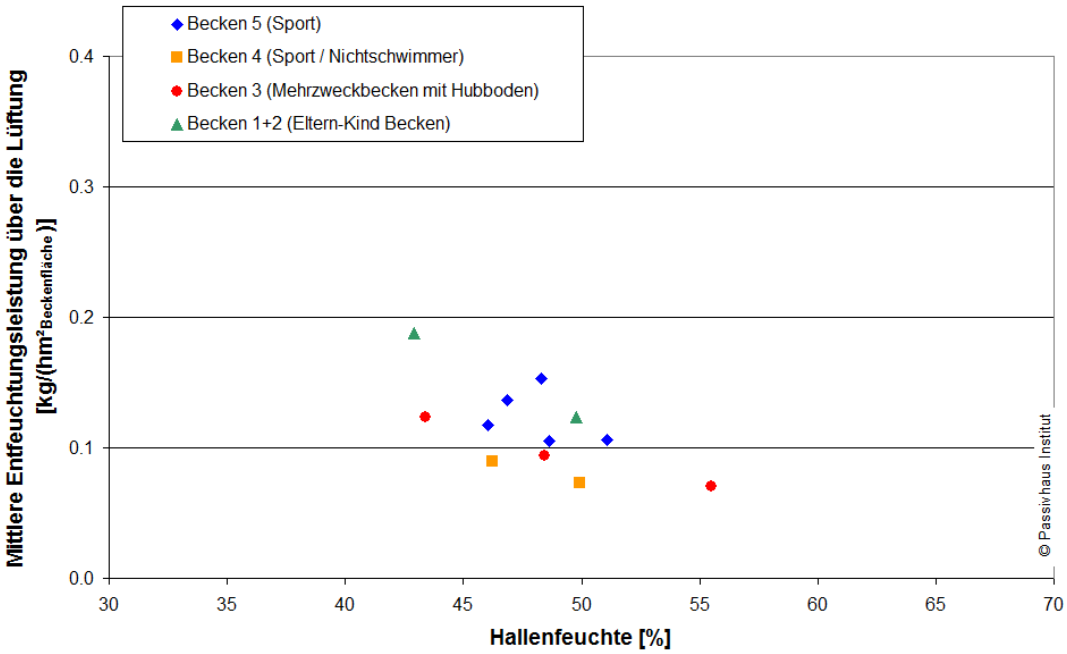


Abbildung 99: Die berechnete mittlere Entfeuchtungsleistung der einzelnen Hallen aus mehreren repräsentativen Zeiträumen mit konstanten Randbedingungen, aufgezeigt bei der jeweiligen Hallenfeuchte. Tendenziell bestätigt sich die Erwartung einer reduzierten Verdunstung bei erhöhter Luftfeuchte.

5.1.1.2 Frischwassererwärmung

Neben der notwendigen Nacherhitzung der Wärmeverluste auf Grund der Verdunstungsenthalpie zur Erhaltung der gewünschten Beckenwassertemperatur macht die Erwärmung des nachgespeisten Frischwassers einen wesentlichen Anteil am Heizbedarf des Beckenwassers aus. Dieser Heizenergiebedarf für die Frischwassererwärmung lässt sich theoretisch leicht aus der Wassermenge, der spezifischen Wärmekapazität des Wassers und dem Temperaturhub (Frischwasser- auf Beckenwassertemperatur) berechnen. Alle drei Parameter sind aus dem Monitoring bekannt.

Unsicherheiten entstehen jedoch dadurch, dass sich das Beckenwasser in ständiger Umwälzung über das Becken, die Überlaufrinnen, den Schwallwasserbehälter, die Rohrleitungen und Filter etc. im warmen Keller befindet. Das benötigte Frischwasser wird in den jeweiligen Schwallwasserbehälter nachgespeist, wo es sich sofort mit dem bereits warmen Wasser vermischt. Bevor es auf der Zuleitung zum Becken über die HT- und NT-Wärmetauscher aktiv erhitzt wird, erfolgt ein Wärmeaustausch mit dem Keller. Wie viel Wärme das Frisch-/Beckenwassergemisch dem Keller entzieht und somit nicht mehr aktiv nachgeheizt werden muss, lässt sich schwer abschätzen und schwer messtechnisch nachvollziehen. In einem Zusatzversuch wurden über mehrere Stunden die Temperaturen an verschiedenen Stellen in den einzelnen Beckenkreisläufen gemessen. Auf Grund der hohen Durchflussmengen, dem geringen prozentualen Frischwasseranteil und der hohen Wärmespeicherkapazität von Wasser, lassen sich jedoch keine Temperaturdifferenzen messen, aus denen eine

Wärmeaufnahme aus dem Keller abgeschätzt werden könnte. In den Vergleichsrechnungen von berechnetem Energiebedarf und gemessenem Energieverbrauch unter gleichen Randbedingungen werden verschiedene Varianten untersucht. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass sich das Frischwasser gar nicht oder bis zu 30 % auf Kellertemperatur erwärmt (siehe 5.1.1.5).

Die vorgesehene Wärmerückgewinnung aus dem Filterspülabwasser zur passiven Vorerwärmung des Frischwassers wurde bisher nicht in Betrieb genommen und darf daher bei der Nachführung der Energiebilanz nicht berücksichtigt werden.

5.1.1.3 Wärmequellen im Wasser

Wärmequellen im Beckenwasserkreislauf tragen dazu bei, das Wasser zu erwärmen und senken daher den Nachheizbedarf. In der Energiebilanz werden zwei wesentliche Wärmequellen berücksichtigt. Potentielle solare Gewinne werden in der Energiebilanz vernachlässigt.

(a) Schwimmbadtechnik (SBT): Die Wassermengen werden durch Umwälzpumpen dauerhaft in Bewegung gehalten, durch weitere SBT wird die Wasserhygiene sichergestellt. Der benötigte Strom für diese Umwälzung und Wasseraufbereitung ist erheblich; ein Großteil dieser Energie kommt dem Wasser letztendlich in Form von Wärme zu Gute. Die Stromaufnahme der Umwälzpumpen der einzelnen Beckenkreisläufe wurde im Zuge des Monitorings einzeln erfasst während die restlichen Elemente der SBT im Beckenkreislauf die als Wärmequelle relevant sein könnten (z.B. Beckenbeleuchtung, Chlorelektrolyse, UV Desinfektion) nicht dauerhaft separat gemessen wurden. Für die Vergleichsrechnungen wurde 70 bis 100 % des gemessenen Stromverbrauchs der Umwälzpumpen plus den mittleren vorhergesagten Strombedarf der zusätzlichen SBT-Hauptverbraucher je Beckenkreislauf (ca. 18 kW in Summe für alle Beckenkreisläufe) als Wärmequelle für das Wasser angerechnet. Diese Bandbreite wird auf Basis der bisherigen Datenauswertung und Erfahrungen als plausible Wärmequelle für das Beckenwasser erachtet. Nähere Untersuchungen in diesem Bereich stehen noch aus.

(b) Personen: Je nach Tätigkeit und Umgebungstemperatur geben Personen Wärme an die Umgebung ab. Typische Kennwerte für die Wärmeabgabe an Luft sind 80 W für eine sitzende und 100 W für eine stehende, leicht aktive Person. Bei Schwimmern gelten jedoch andere Randbedingungen, da sie sich zum Großteil unter Wasser befinden. In Anbetracht der physikalisch höheren Wärmeübergabe an Wasser als an Luft und der meist sportlichen Aktivität von Badenden ist davon auszugehen, dass die Wärmeabgabe beim Baden tendenziell höher liegt als bei einem typischen Raumaufenthalt, verlässliche Kennwerte sind den Autoren jedoch nicht bekannt. In [Mareés 2003] werden 11,5 W pro kg Körpergewicht bei einer Schwimmgeschwindigkeit von 3 km/h (25 m in 30 Sekunden) zitiert. Dies

entspricht umgerechnet für 50 kg Körpergewicht ca. 570 W, für 80 kg um 900 W. Mareés schreibt jedoch auch, dass der Energieumsatz von verschiedensten Einflüssen stark beeinflusst wird, so z.B. vom Schwimmstil und -geschwindigkeit, dem Trainingsgrad des einzelnen Schwimmers und auch vom Geschlecht. Eine Abschätzung der Autoren zur Wärmeabgabe des Körpers aus typischen mittleren Kalorienverbrauchswerten beim Schwimmen führt zu Leistungen zwischen ca. 400 und 700 W/Person. Sportschwimmer produzieren dabei mehr Wärme als Badegäste mit einem ruhigen Schwimmstil. Für Nichtschwimmer, wie z.B. spielende Kinder im Warmbecken oder Gäste, die Schwimmgymnastik betreiben, gelten diese Werte nicht. Für die ursprüngliche Energiebilanz wurde mit 100 W/Person im Mittel auf der sicheren Seite gerechnet. Für den Abgleich der Verbrauchswerte wurden bis zu 500 W/Person als Mittelwert angesetzt. Neben der Unsicherheit der mittleren Wärmeabgabe pro Person ist die Belegung nicht von allen Becken bekannt. Als Annahme wurde stark vereinfacht davon ausgegangen, dass sich die Besucher gleichmäßig auf die vier Becken verteilen und jeweils im Durchschnitt eine Stunde im Wasser aufhalten. Bei einer Besucherzahl von 220.000 Personen im Jahr entspräche dies im Mittel 9,4 Badegästen pro Becken während der Öffnungszeiten. Für Becken 1+2 liegen die Belegungsdaten durch die Auswertung der automatischen Zählung mit einem Beckenscanner vor. Diese Daten zeigen, dass die ursprüngliche Abschätzung zumindest für dieses sehr gut passt. Die Differenz der Entfeuchtungsleistung für die einzelnen Hallen, während der Öffnungszeiten gegenüber nachts, weisen auf eine niedrigere Belegung von Becken 3 und eine höhere Nutzung der beiden Sportbecken 4+5 hin.

5.1.1.4 Beckenwände & Wasseroberfläche

An allen Wasseroberflächen entsteht ein Wärmeaustausch mit der Umgebung. Die Transmission durch die Beckenwände und -böden kann auf Basis der Bauteil-U-Werte berechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass durch die Eigenschaften von Wasser der Wärmeübergangswiderstand an Oberflächen nahezu null ist. Der Wärmeübergang an der Wasseroberfläche wurde in der ursprünglichen Energiebilanz zunächst nicht ausreichend berücksichtigt. Wie die nachfolgenden Vergleichsrechnungen zeigen, kann dieser Faktor aber durchaus einen Einfluss auf das Endergebnis haben. Als orientierende Größe kann der nach [DIN EN ISO 6946] anzusetzende Wärmeübergangswiderstand in Innenräumen bei abwärts gerichtetem Wärmestrom von 0,17 m²K/W herangezogen werden, was einem Wärmeübergang von 5,88 W/(m²K) entspricht. Ist der Stoffübergangskoeffizient ß der Verdunstung bekannt, so kann der Wärmeübergang α auf Basis der Analogie zwischen Wärme- und Stoffübertragung an der verdunstenden Oberfläche mit Hilfe der Lewis-Zahl *Le* und der Wärmekapazität der feuchten Luft c_{Lm} leicht berechnet werden: $\alpha = Le \cdot \beta \cdot c_{Lm}$. Dabei gilt für verdunstendes Wasser Le ≈ 1 [Dubbel 1997]. Tabelle 14

gibt eine Übersicht von Wärmeübergangskoeffizienten unter einer Bandbreite von Randbedingungen typisch für Hallenbäder.

Tabelle 14: Übersicht der Wärmeübergangskoeffizienten berechnet auf Basis der Lewis Relation.

Stoffübergang β [m/h]	Lufttemperatur [°C]	Relative Luftfeuchte	Wärmeübergangskoeffizient α [W/(m²K)]
7	32	48% / 64%	2,31 / 2,32
	28	48% / 64%	2,34 / 2,36
15	32	48% / 64%	4,95 / 4,98
	28	48% / 64%	5,02 / 5,05
28	32	48% / 64%	9,24 / 9,30
	28	48% / 64%	9,37 / 9,42
40	32	48% / 64%	13,21 / 13,29
	28	48% / 64%	13,38 / 13,46

5.1.1.5 Energiebilanz für die Beckenwassererwärmung

Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, ist die Energiebilanz für die Beckenwassererwärmung mit vielen Unsicherheiten behaftet. Im November 2012 waren die Randbedingungen in allen Becken/Hallen relativ konstant. Dieser Monat wird daher als Basis für den Vergleich des monatlichen Verbrauchs und des berechneten Energiebedarfs unter unterschiedlichen Annahmen herangezogen. In Abbildung 100 bis Abbildung 102 sind die Ergebnisse einzeln für die drei Beckenkreisläufe grafisch dargestellt (Hinweis: Unterschiedliche Skalen). Als Randbedingung für Temperaturen (Beckenwasser und Hallenluft) und die Hallenfeuchte wurden die entsprechenden Monatsmittelwerte verwendet. Für den Frischwasserverbrauch und den Pumpenstrom wurden ebenfalls die Messdaten in die Berechnung eingepflegt.

Zur Erläuterung der acht gerechneten Varianten mit schrittweise angepassten Parametern:

- Berechnung der Verdunstungsenthalpie wie in der ursprünglichen Energiebilanz auf Basis der Stoffübergangskoeffizienten β in Anlehnung an die [VDI 2089]
- Verdunstungsenthalpie entsprechend 100% der berechneten Entfeuchtungsleistung über die Lüftung im November (siehe Kapitel 5.1.1.1)

- Annahme, dass nur 75 % der berechneten Entfeuchtungsleistung als Verdunstungsenthalpie dem Beckenwasser zugerechnet werden können (siehe Kapitel 5.1.1.1)
- Annahme, dass sich das zu erwärmende Frischwasser bereits bis zu 30% auf Kellertemperatur erwärmt, bevor es aktiv nachgeheizt wird (siehe Kapitel 5.1.1.2)
- Erhöhte Wärmeabgabe der Schwimmer von durchschnittlich 500 W/Person (siehe Kapitel 5.1.1.3)
- Annahme, dass 100 % der Stromaufnahme der Umwälzpumpen und SBT-Hauptverbraucher an den entsprechenden Beckenkreislauf abgegeben wird (siehe Kapitel 5.1.1.3)
- Angepasste Beckenbelegung auf Basis der Personenzählung in Becken 1+2
- 5,88 W/(m²K) Wärmeübergangskoeffizient an der Wasseroberfläche, entsprechend den Angaben für abwärts gerichteten Wärmestrom im Innenraum nach [DIN EN ISO 6946] (siehe Kapitel 5.1.1.4)

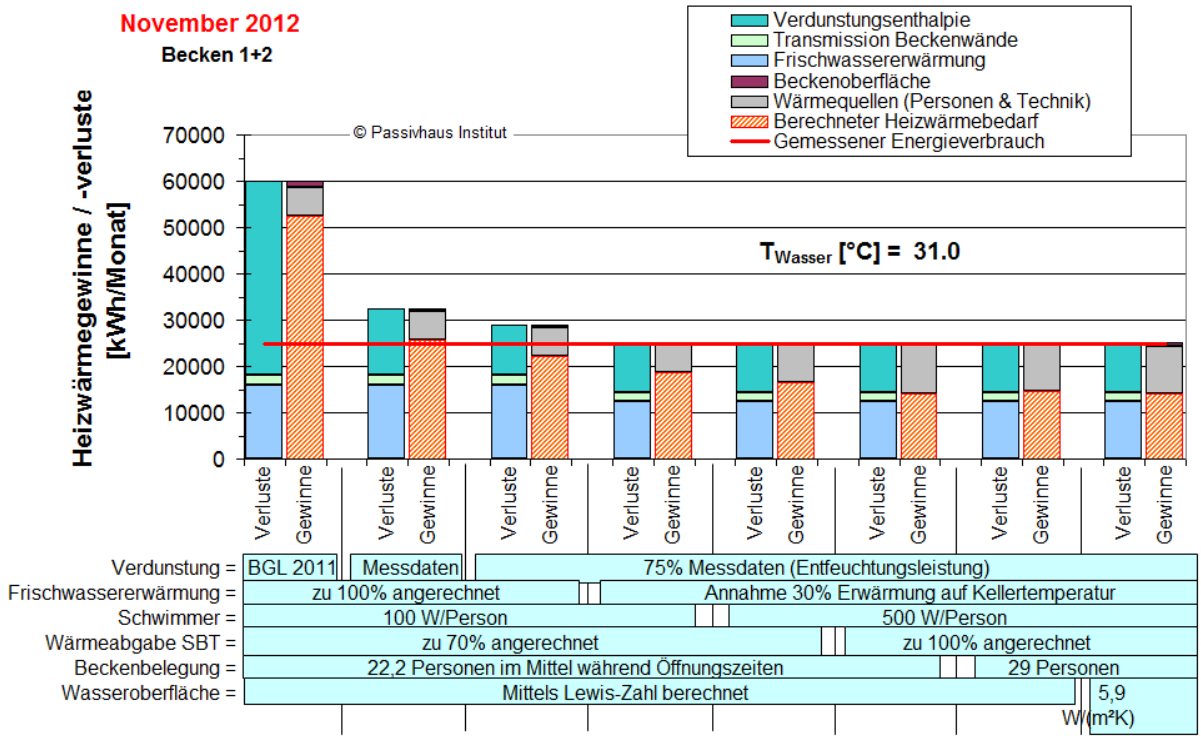


Abbildung 100: Der gemessene Heizwärmeverbrauch für Becken 1+2 im November 2012 im Vergleich zum berechneten Energiebedarf unter verschiedenen inkrementell angepassten Annahmen.

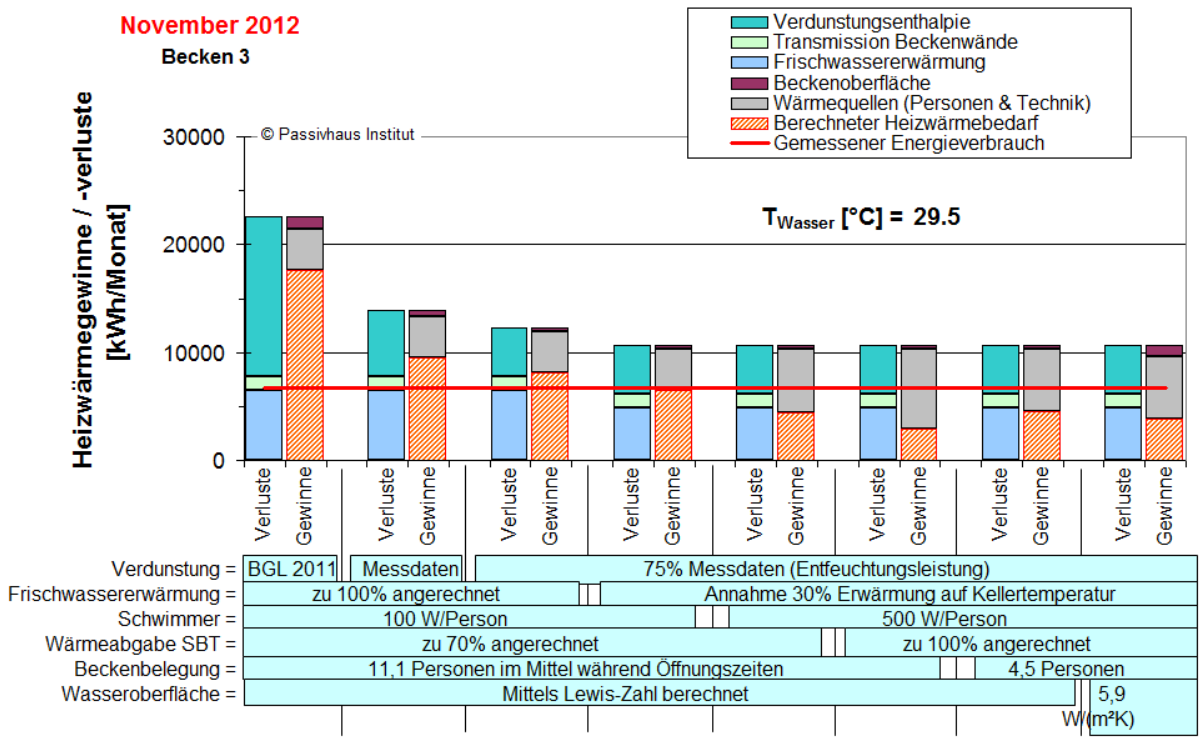


Abbildung 101: Der gemessene Heizwärmeverbrauch für Becken 3 im November 2012 im Vergleich zum berechneten Energiebedarf unter verschiedenen inkrementell angepassten Annahmen.

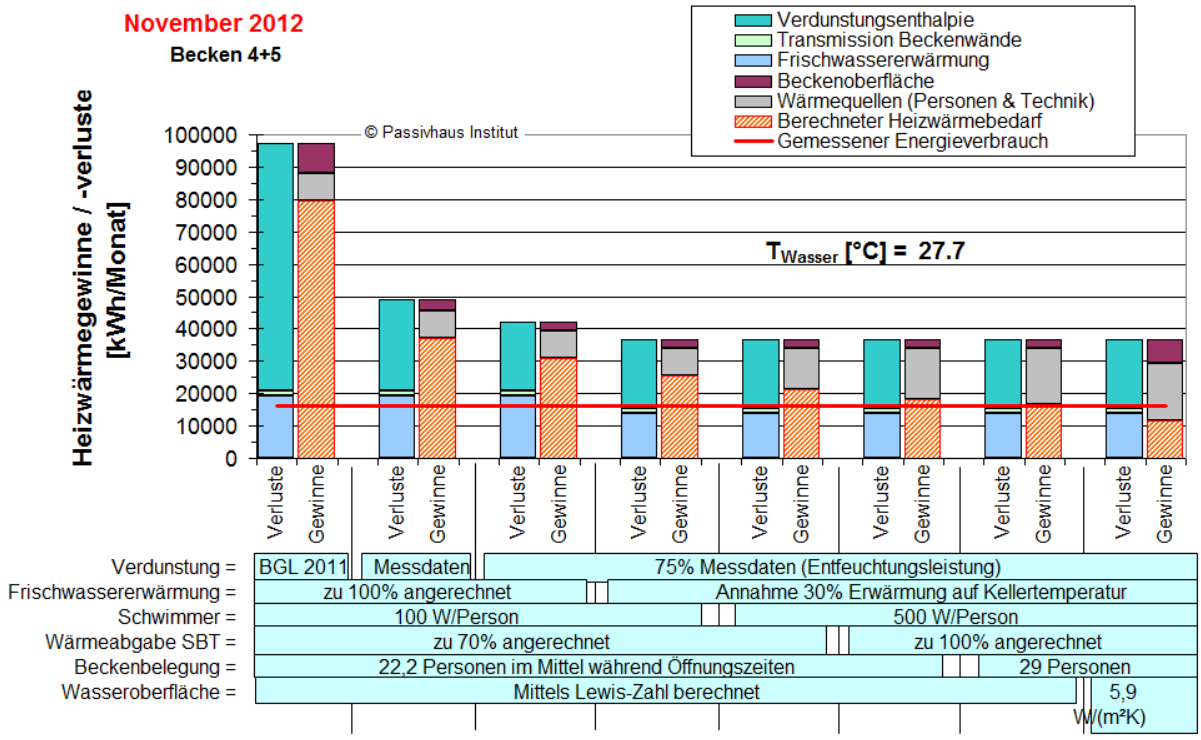


Abbildung 102: Der gemessene Heizwärmeverbrauch für Becken 4+5 im November 2012 im Vergleich zum berechneten Energiebedarf unter verschiedenen verschiedenen inkrementell angepassten Annahmen.

Unter Variation der Annahmen kann für alle Kreisläufe eine Übereinstimmung mit dem Messwert erreicht werden. Auffällig ist, dass sowohl beim Lehrschwimmbecken (3) als auch beim Sportbeckenkreislauf (4+5) der gemessene Energieverbrauch in etwa der Größenordnung des berechneten Energiebedarfs allein für die Frischwassermenge liegt. Demnach muss es in diesen Beckenkreisläufen signifikante Wärmequellen geben die dazu beitragen den Heizwärmebedarf zu senken. Insbesondere in den Sportbecken ist der Energiebedarf deutlich niedriger als erwartet – die genauen Zusammenhänge sollten zukünftig noch detaillierter untersucht werden.

In Abbildung 103 sind die projektierten Energiebiedarfswerte für die Beckenwassererwärmung im Jahresverlauf den Messdaten und dem Energiebedarf der nachgeführten Energiebilanz gegenübergestellt. Dieser Vergleich verdeutlicht, dass die ursprüngliche Energiebilanz deutlich zu pessimistisch angesetzt war. Für die nachgeführte Berechnung wurden als Randbedingung die gemessenen Werte aus dem Winter 2012/2013 verwendet (Temperaturen, Verdunstungsmenge, Frischwasserverbrauch). Im Mittel sind die Ergebnisse in relativ guter Übereinstimmung mit den Messdaten. Wie in der Grafik erkennbar, spiegelt sich der Jahresgang des Heizwärmeverbrauchs auf Grund der monatlich unterschiedlichen Frischwassertemperatur nicht in den Ergebnissen der Energiebilanz wider. Für den Jahresheizwärmebedarf sind die monatlichen Unterschiede nicht relevant, aus Gründen der Vereinfachung wird in der Energiebilanz daher mit einer Jahresmitteltemperatur für das Frischwasser gerechnet.

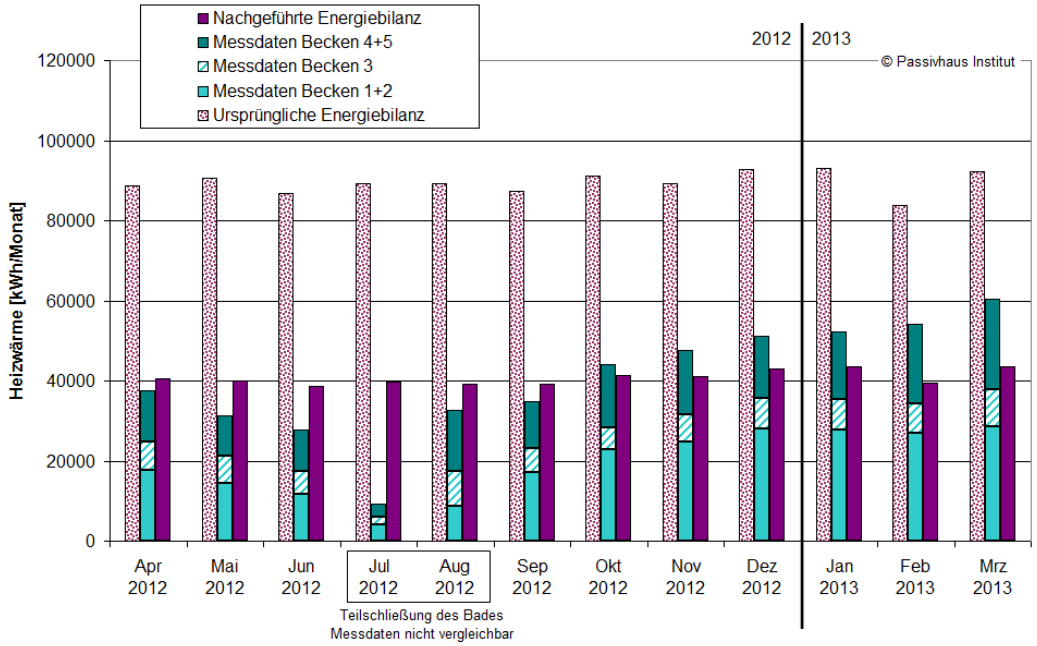


Abbildung 103: Vergleich des monatlichen Energiebedarfs der Beckenwassererwärmung vom Planungsstand [BGL 2011] mit dem gemessenen Heizenergieverbrauch und den Bedarfswerten der nachgeführten Energiebilanz im Jahresverlauf.

Wichtig ist die Erkenntnis, dass im Gegensatz zur Annahme der ursprünglichen Energiebilanzierung für die Beckenwassererwärmung nicht die Verdunstung dominant ist. Der Energiebedarf der Frischwassererwärmung macht in allen Kreisläufen im Vergleich zur Verdunstung einen vergleichbaren Anteil aus. Es ist demnach energetisch durchaus lohnenswert die Frischwassermengen zu reduzieren, wobei selbstverständlich die Beckenwasserhygiene zwingend zu berücksichtigen ist. Die Analysen zeigen außerdem, dass es für die Energiebilanz von großer Relevanz ist, auch die Wärmequellen im Beckenwasser näher zu betrachten.

Weitere Eingrenzungen bzw. Hinweise für allgemein geeignete Annahmen und Kennwerte für die Bilanzierung von Hallenbädern konnten im Rahmen der bisher durchgeführten Untersuchungen nicht erstellt werden. Die Zusammenhänge müssten dazu bei kontrollierten und bewusst unterschiedlichen Randbedingungen tiefer gehend untersucht werden. Dies ist ggf. in einem Folgeprojekt möglich.

5.1.2 Raumheizung

Der zweitgrößte Wärmeverbraucher nach der Beckenwassererwärmung ist die Raumbeheizung (vgl. 4.8.2). Zum Überprüfen und ggf. Verbessern der Energiebilanz in diesem wichtigen Teilbereich werden die entsprechenden Messdaten analysiert und mit den Rechenwerten abgeglichen. Der Heizwärmebedarf der Raumluft wird von verschiedensten Faktoren beeinflusst. Die folgenden gemessenen Parameter aus dem Monitoring wurden in der Energiebilanz nachgeführt, um festzustellen, ob der gemessene Heizwärmeverbrauch der einzelnen Bereiche mit der angesetzten Berechnungsmethode des Schwimmbad-PHPP nachvollzogen werden kann:

- Außenbedingungen: Temperatur, Solarstrahlung und relative Feuchte (siehe Abschnitt 4.2)
- Mittelwerte der gemessenen Raumtemperaturen als Temperaturanforderung der verschiedenen Temperaturzonen in der Energiebilanz
- Luftmengen: Mittlerer Außenluft- und Umluftvolumenstrom
- Reduktion der internen Wärmequellen in den Nebenräumen von pauschal 3,5 W/m² auf 2,1 W/m²

Die Qualität der Gebäudehülle wurde (abgesehen von der Luftdichtheit) in der Energiebilanz nicht angepasst. Die Transmissionsverluste und solaren Gewinne verändern sich gegenüber der ursprünglichen Energiebilanz demnach nur entsprechend der angepassten Innen- und Außentemperaturen. Bei den hohen Luftmengen spielen die Lüftungswärmeverluste für die Gesamtenergiebilanz eine nicht unerhebliche Rolle. Hierfür wiederum sind die Effizienz der Wärmetauscher und die erzielte Wärmerückgewinnung ausschlaggebend. Auf Basis der vorhandenen Mess-

daten in den Lüftungsgeräten konnte zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung noch keine verlässliche Auswertung zur Effizienz der Wärmetauscher gemacht werden. Die Berechnung wird gegenüber dem Normalfall in Wohn- oder Bürogebäuden durch die hohen Abluftfeuchten mit Kondensatbildung in der Fortluft und durch absichtliche Disbalance (zum Bauteilschutz) der Luftmengen erheblich komplexer. Die ersten Auswertungen bestätigen, dass die Effizienz im Bereich der erwarteten Kennwerte liegt (70 bis 80 % je nach Gerät), genauere Analysen zu diesem Thema stehen jedoch noch aus.

5.1.2.1 Schwimmhallen

Da der Außenluftwechsel der Schwimmhallen vom Entfeuchtungsbedarf abhängt, ist das Schwimmbad-PHPP so adaptiert, dass an dieser Stelle keine Volumenströme vom Nutzer vorgegeben werden (wie sonst üblich), sondern diese aus den eingestellten Randbedingungen berechnet werden. Entsprechend der Feuchtequellen in den Hallen, werden vom PHPP der benötigte Außenluftwechsel und die entsprechenden Lüftungswärmeverluste auf monatlicher Basis berechnet. Um nicht in die Algorithmen einzugreifen, sondern statt dessen zu überprüfen, ob die Berechnung bei vorgegebenen Randbedingungen korrekt rechnet, wurden bei der Nachführung der Energiebilanz daher nicht die gemessenen Außenluftmengen übernommen, sondern die aus dem Monitoring hervor gehende mittlere Verdunstungsmenge. In Abbildung 104 sind die aus den Messwerten berechneten monatsmittleren Entfeuchtungsleistungen (= Abschätzung der Feuchtequellen / Verdunstung in der Halle, vgl. Anschnitt 5.1.1.1) der einzelnen Hallengeräte abgebildet. In der Energiebilanz wird von einer ganzjährlich konstanten Betriebsweise ausgegangen, für die nachgeführte Energiebilanz wurde hierfür der Mittelwert von November 2012 bis einschließlich Februar 2013 verwendet (Zeitraum mit verlässlichen und relativ stabilen Betriebsbedingungen). Abbildung 105 zeigt die monatlich gemessenen mittleren Außenluftvolumenströme im Vergleich zu dem mit dem PHPP berechneten Außenluftbedarf auf Basis der vorgegebenen Verdunstungsmengen. Vor Dezember 2012 sind die gemessenen Volumenströme deutlich höher als die mit dem PHPP berechneten, was sich mit den in diesen Monaten höheren tatsächlichen Feuchtequellen als in der Energiebilanz angesetzt erklären lässt. Selbst in den folgenden Monaten sind die berechneten Außenluftmengen etwas niedriger (ca. 10 bis 15 %) als die realisierten. Mit zu niedrig berechneten Außenluftmengen werden mit der Energiebilanz auch die Lüftungswärmeverluste unterschätzt. Die wahrscheinlichste Ursache für diese Abweichung sind regelungstechnische Einflüsse, die in der Praxis zu höheren Luftwechseln führen, so z.B. die regelmäßige Kalibrierung der Geräte. Diese Beobachtung soll weiterhin bei konstanteren Betriebsbedingungen des Bades beobachtet werden, um zukünftig zu entscheiden, ob an dieser Stelle eine Anpassung der Energiebilanz notwenig ist.

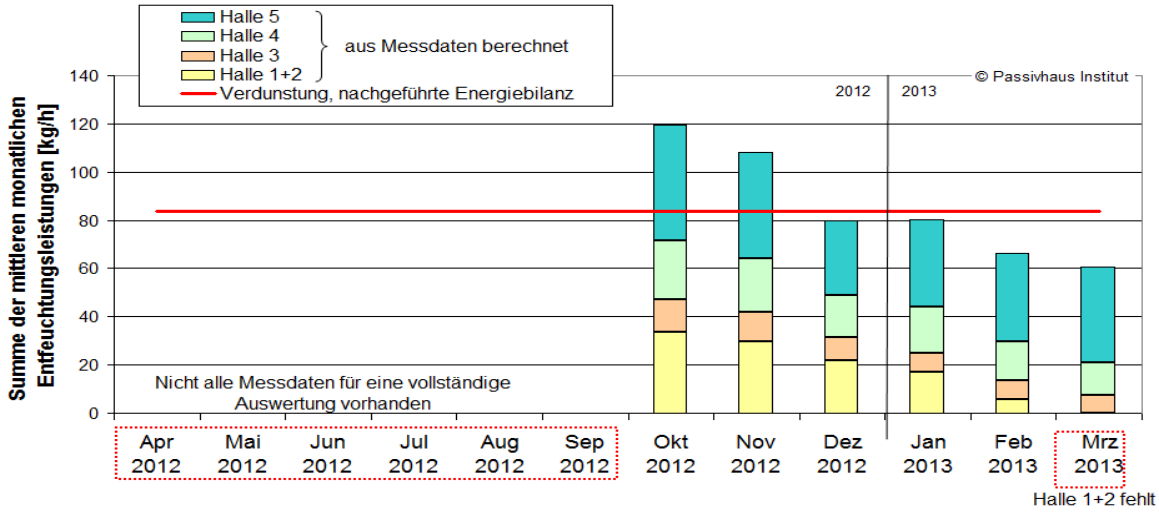


Abbildung 104: Aus den Messdaten berechnete Entfeuchtungsleistung über die Lüftung im jeweiligen Monatsmittel für die einzelnen Hallen. Für die nachgeführte Energiebilanz wurde der Mittelwert von Oktober 2012 bis Februar 2013 verwendet.

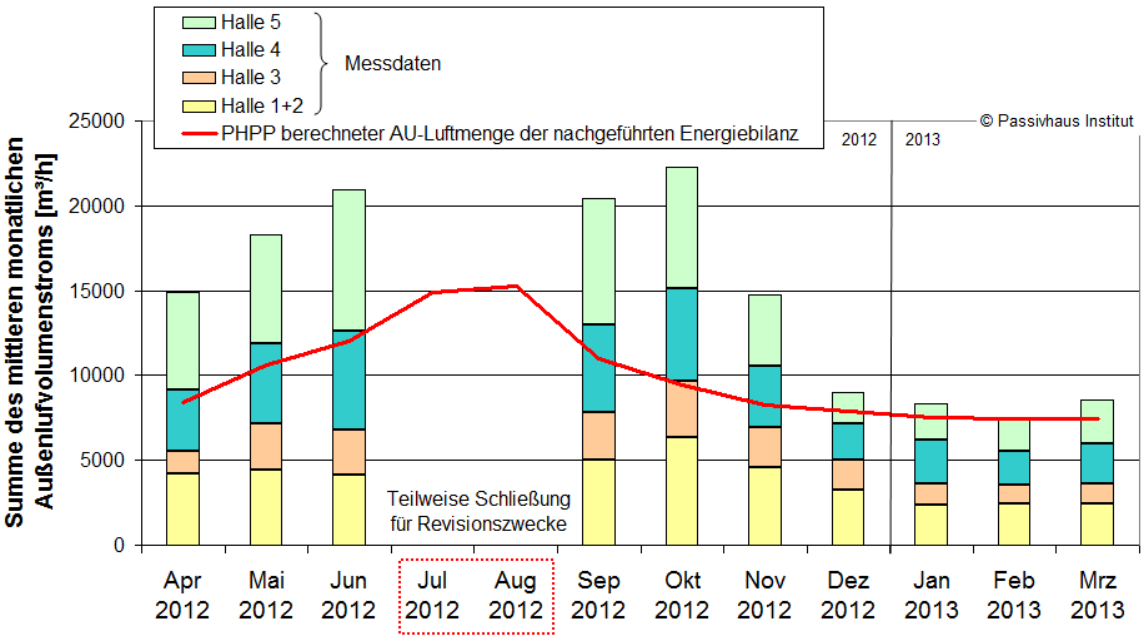


Abbildung 105: Der gemessene mittlere monatliche Außenluftvolumenstrom der einzelnen Hallen (aufsummiert) im Vergleich zum berechneten Außenluftbedarf aus der nachgeführten Energiebilanz. Selbst in den Monaten mit weniger Verdunstung als rechnerisch angesetzt (ab Dezember 2012, siehe Abbildung 104) sind die mit dem PHPP berechneten Außenluftmengen etwas niedriger als die realisierten. In den Monaten mit höher gemessener Verdunstung (vor Dez 2012) sind die gemessenen Volumenströme deutlich höher als berechnet.

Abbildung 106 zeigt den monatlich gemessenen Energieverbrauch der einzelnen Hallen im Vergleich zur Energiebilanz (Stand [BGL 2011]) und der nachgeführten Berechnung. (Hinweis: In diesem Vergleich wird auch die Enthalpierückgewinnung über die Wärmepumpe als Heizenergieverbrauch dargestellt, da die Wärmepumpe im Energiebilanzmodell *nicht* abgebildet wurde.) Die Größenordnung der Mess- und Rechenwerte ist in guter Übereinstimmung; Die berechneten Werte liegen jedoch in allen Monaten unter dem gemessenen Heizwärmeverbrauch. Die Ursache konnte nicht endgültig geklärt werden, es gibt verschiedene Erklärungsmöglichkeiten wie z.B. höhere Lüftungswärmeverluste durch höhere Außenluftmengen oder eine schlechtere Effizienz der Wärmerückgewinnung, oder andere nicht vollständig berücksichtigte Wärmeverluste z.B. durch Verdunstung in der Hallenluft. Wie in Abschnitt 5.1.1.1 zum Thema Verdunstung des Beckenwassers beschrieben, ist es durchaus möglich, dass ein Teil der Verdunstungenthalpie aus der Hallenluft stammt und somit über die Lüftungsgeräte nachgeheizt werden muss. In Abbildung 106 ist ein zusätzlicher Balken eingezeichnet, der die mögliche Erhöhung des Heizwärmebedarfs unter der Annahme, dass 20 % der Verdunstungsenthalpie als Wärmesenken in den Hallen anzurechnen sind, beziffert.

Zur näheren Untersuchung wäre ein Vergleich mit der dynamischen Simulation hilfreich, in welcher die Hallen einzeln abgebildet werden.

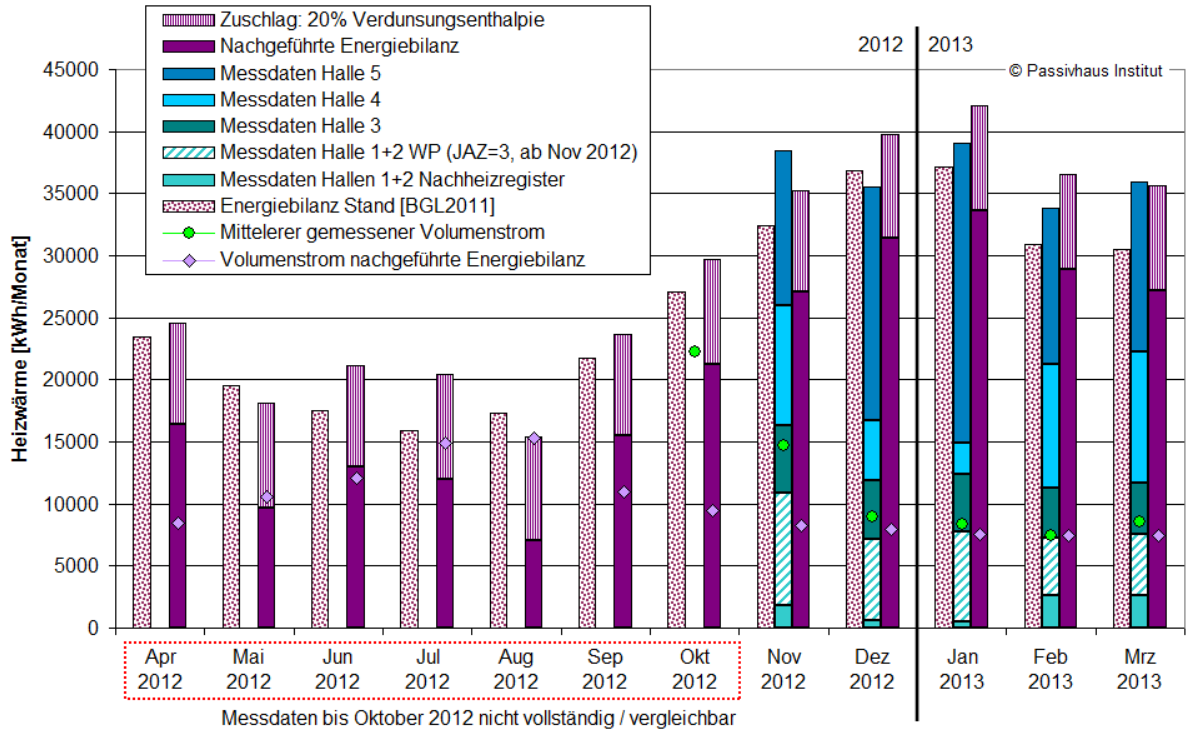


Abbildung 106: Vergleich des monatlichen Energiebedarfs vom Planungsstand [BGL 2011] mit dem gemessenen Heizenergieverbrauch (inkl. Enthalpierückgewinnung über die WP) und den Bedarfswerten der nachgeführten Energiebilanz für die Schwimmhallen.

5.1.2.2 Umkleiden / Duschen

In der ursprünglichen Energiebilanz wurden für den Umkleidebereich 26 °C Solltemperatur angesetzt und für die Duschen 28 °C. Die realisierten Temperaturen der Umkleiden lagen im Winter 2012/2013 etwa 1 K niedriger als geplant, dafür in den Duschräumen ca. 1 K höher. Die Temperaturen in der Berechnung wurden entsprechend der Mittelwerte seit Oktober 2012 mit 25,2 °C und 29,4 °C angesetzt.

Eine Nachheizung, wie sie in dieser Zone zwischen den Umkleideräumen und der Duschzone erfolgt, ist in dem PHPP nicht vorgesehen und musste manuell in die Energiebilanz eingepflegt werden. Hierfür gibt es prinzipiell verschiedene Möglichkeiten mit verschiedenen Vor- und Nachteilen. Die gewählte Methode aus der Planungsphase führte insgesamt zu zu niedrigen Heizbedarfswerten und wurde daher überarbeitet.

Zusätzlich zu den Solltemperaturen und Berechnungsmethoden für die Nacherhitzung wurde gegenüber der Energiebilanz aus der Planung auch der Luftwechsel aktualisiert. Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben wird die Luftmenge nach der Feuchte in den Duschräumen geregelt, dabei ergibt sich in den Wintermonaten ein mittlerer Volumenstrom von 4.885 m³/h (6.000 m³/h während der Öffnungszeiten). Dieser Wert liegt deutlich niedriger als die Annahmen aus der Planungsphase, die bewusst auf der sicheren Seite lagen. Da die Regelung zum Zeitpunkt der Veröffentlichung [BGL 2011] noch nicht endgültig geklärt war, wurde damals davon ausgegangen, dass das Gerät während den Öffnungszeiten durchgängig den Nennvolumenstrom von 10.000 m³/h befördert. Die damals zu hoch angesetzten Lüftungswärmeverluste kompensierten zum Teil die zuvor beschriebenen zu optimistischen Annahmen für die Duschluft-Nacherhitzung. Das hatte zur Folge, dass die Energiebilanz nach Planungsstand und die aktualisierte Version zu ähnlichen Ergebnissen im Jahresheizwärmebedarf führen.

In Abbildung 107 ist der gemessene Heizwärmeverbrauch für das ausgewertete Messjahr im Vergleich zum Energiebedarf Stand [BGL 2011] und der nachgeführten Energiebilanz mit den Randbedingungen aus dem Monitoring dargestellt. Die Werte vor Oktober 2012 sind wegen unterschiedlicher Randbedingungen in der Berechnung und der Praxis nicht belastbar. Die Werte der aktuellen Energiebilanz ab Oktober 2012 liegen im Mittel 25 % unter den Messwerten. Diese Diskrepanz entspricht in den Wintermonaten ca. 2.500 kWh/Monat bzw. 0,6 kWh/(m^2_{EBF}Monat) und ist somit für die Gesamtenergiebilanz nicht ausschlaggebend. Die Ursachen für die Abweichungen konnten bisher nicht endgültig geklärt werden. Mögliche Gründe sind ein schlechterer effektiver Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlage, weniger interne Wärmequellen bzw. höhere Wärmesenken (Verdunstung).

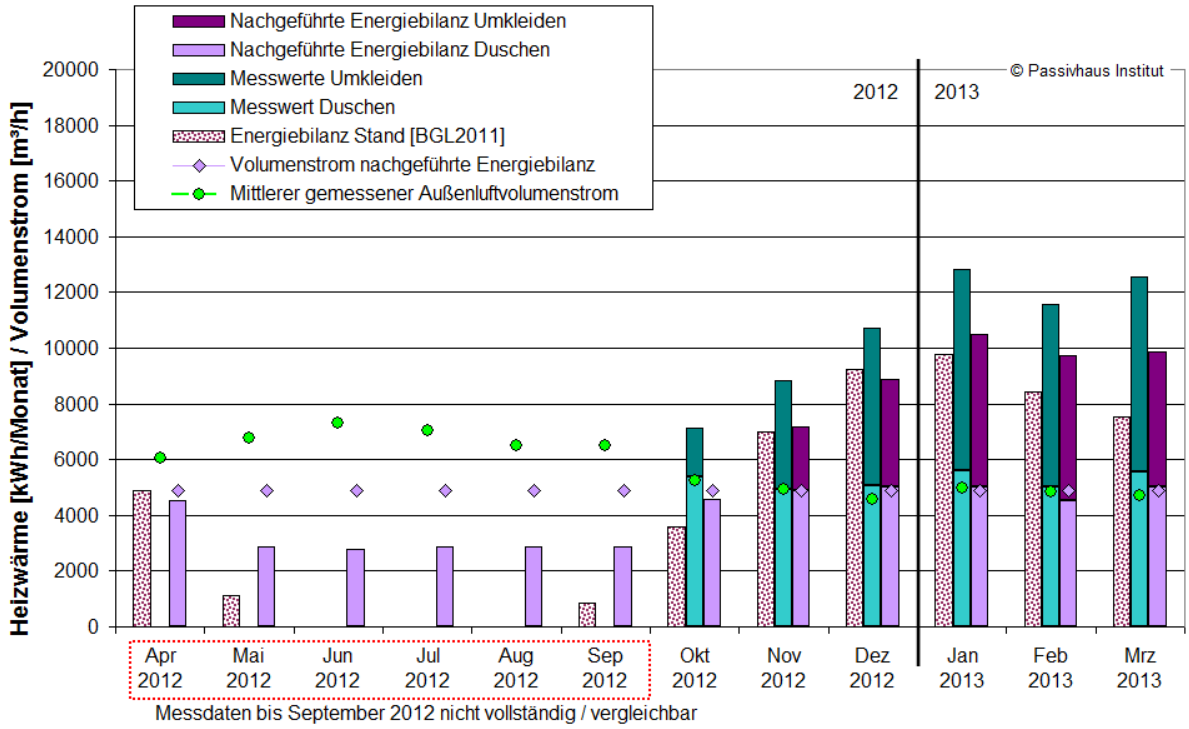


Abbildung 107: Vergleich des monatlichen Energiebedarfs vom Planungsstand [BGL 2011] mit dem gemessenen Energieverbrauch und den Bedarfswerten der nachgeführten Energiebilanz für die Umkleideräume und Duschbereiche. Die Energiebilanz mit angepassten Randbedingungen führt weiterhin zu Ergebnissen, die im Mittel ca. 25 % unter den Messwerten liegen.

5.1.2.3 Foyer, Keller und Nebenräume

Der Heizwärmebedarf bzw. -verbrauch der Nebenräume macht den geringsten Anteil der Gesamtraumheizwärme aus. Die verschiedenen Bereiche im Hallenbad die alle über das Lüftungsgerät „Nebenräume“ versorgt werden, wurden in der Energiebilanz als drei unterschiedliche Temperaturzonen abgebildet: Foyer, Keller und sonstige Nebenräume. Die Räume sind in verschiedenen Bereichen des Bades mit unterschiedlich warmen Nebenräumen angeordnet, daher sind abweichende Temperaturen trotz gemeinsamer Luftversorgung zu erwarten und wurden auch gemessen.

In der Energiebilanz (Stand [BGL 2011]) aus der Planungsphase wurde mit einer Solltemperatur von 22 °C gerechnet. Die meisten Räume weisen höhere Temperaturen auf, allerdings sind diese alle von wärmeren Zonen umgeben. Im Foyer und in den Personalräumen im Untergeschoss traten im Winter 2012/2013 niedrigere Werte bis zu 18,8 °C auf. Der Sollwert für die Heizwärmebilanz wurde entsprechend des Mittelwertes Dezember 2012 bis März 2013 auf 19,2 °C abgesenkt. Zudem wurde der mittlere Volumenstrom an den gemessenen Mittelwert von Oktober 2012 bis Januar 2013 angepasst.

Die Mess- und Rechenergebnisse sind in Abbildung 108 abgebildet. Auch in diesem Bereich sind die Messwerte höher als die berechneten Bedarfswerte. Wie auch in

den zuvor beschriebenen Abschnitten gibt es hierfür verschiedene mögliche Ursachen. Für die Gesamtenergiebilanz des Bades ist die Beheizung der Nebenzonen nebensächlich, die erzielte Übereinstimmung ist daher ausreichend.

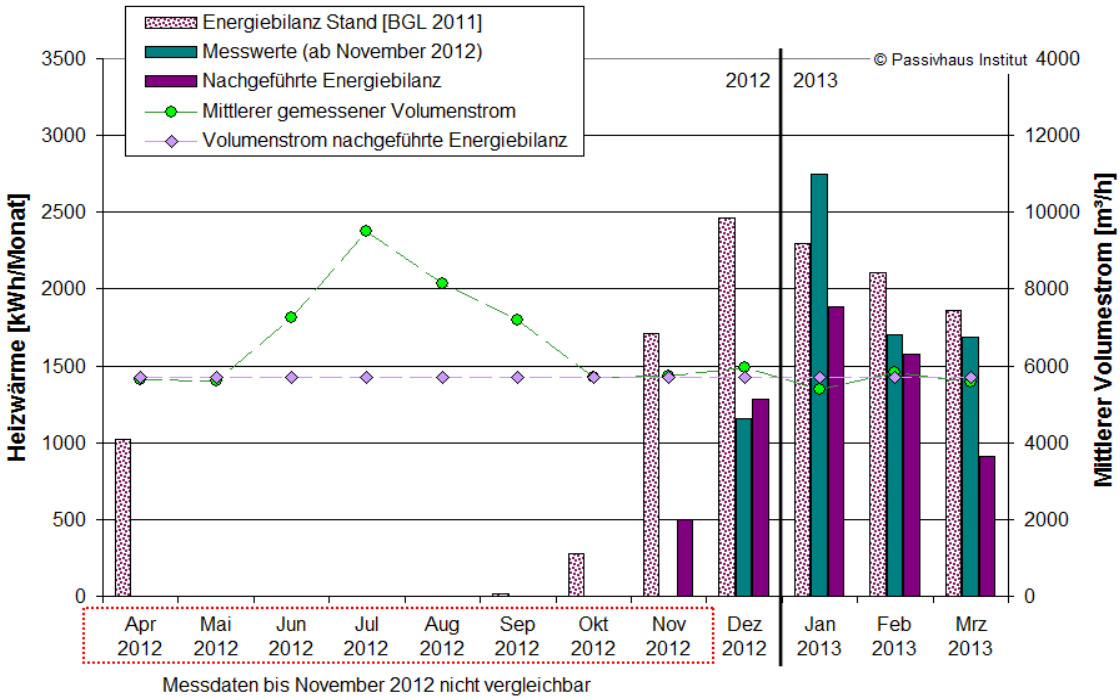


Abbildung 108: Vergleich des monatlichen Energiebedarfs vom Planungsstand [BGL 2011] mit dem gemessenen Energieverbrauch und den Bedarfswerten der nachgeführten Energiebilanz für das Foyer, den Keller und sonstige Nebenräume. Von Mai bis September besteht nach der Energiebilanz kein Heizbedarf.

5.1.3 Trinkwarmwasser

Den dritten Anteil der Heizwärme macht die Trinkwarmwassererwärmung (TWW) aus. Der Energiebedarf für die Erwärmung des Trinkwarmwassers (Duschen etc.) wird in der Energiebilanz über die angenommene monatliche Personenzahl, den jeweiligen Duschwasserbedarf pro Person und den Temperaturhub von der jahresmittleren Kaltwassertemperatur auf Duschtemperatur von 40 °C berechnet. Die Speicher- und Verteilverluste werden separat berechnet und auf den Energiebedarf für die Trinkwassererwärmung aufgeschlagen. In der ursprünglichen Energiebilanz (Stand [BGL 2011]) sind keine Verteilverluste enthalten, da zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung diesbezüglich noch nicht ausreichend Informationen vorlagen. In der nachgeführten/aktualisierten Energiebilanz wurden die Verteilverluste auf Basis der Rohrleitungslängen und Dämmqualitäten vom Stand der Ausführungsplanung berechnet.

In der Energiebilanz werden zur Berechnung des Energiebedarfs 18 Liter/Person bei 40 °C (Duschtemperatur) angesetzt, berechnet aus drei Minuten Duschzeit bei einem Durchfluss von 6 Liter/Minute der wassersparenden Duschköpfe. Der gemessene

Warmwasserverbrauch im ausgewerteten Messzeitraum liegt bei durchschnittlich 15,6 Liter/Person bei 45 °C (Temperatur bei der Zapfung am TWW-Speicher). Der äquivalente Warmwasserverbrauch bei der angesetzten Duschtemperatur von 40 °C wird zu ca. 18,5 Liter/Person berechnet und ist somit nur leicht erhöht gegenüber der Annahme der Energiebilanz (+ 3 %). Diese Auswertung weist auf eine gute Qualität der gewählten wassersparenden Armaturen hin, da sich trotz reduzierter Durchflussmenge keine erheblich längeren Duschzeiten auftreten. Die Armaturen haben somit effektiv zu einer Wasser- und Energieeinsparung beigetragen.

Im Vergleich sind der gemessene Heizwärmeverbrauch im Auswertungszeitraum April 2012 bis März 2013 für die TWW-Bereitung mit 136.800 kWh/Jahr in sehr guter Übereinstimmung mit dem ursprünglich projektierten Wert von 136.138 kWh/Jahr (Abweichung < 1 %). Bei genauerer Betrachtung wird jedoch deutlich, dass sich unterschiedliche Effekte kompensieren und so zu einem übereinstimmenden Ergebnis führen – denn der Energieverbrauch entspricht der Projektierung, trotz niedrigerer Besucherzahlen und höherer mittlerer Frischwassertemperatur. Um die Ursache der Abweichungen zwischen Messung und Energiebedarfsrechnung eingrenzen zu können, wurde die Energiebedarfsrechnung für das TWW mit den bekannten Parametern aus dem Monitoring (monatliche Frischwassertemperaturen und Besucherzahlen) angepasst. Eine solche Anpassung (siehe Abbildung 109) führt zu monatlichen Bedarfswerten, die im Mittel 9 % *unter* den Verbrauchswerten liegen. Demzufolge waren die ursprünglichen Annahmen zur Berechnung des Energiebedarfs etwas zu optimistisch – entweder bezüglich des Duschwasserverbrauchs pro Badegast oder bezüglich der Wärmeverluste. Für den vorliegenden Bericht wurden an dieser Stelle keine weiterführenden Analysen durchgeführt. Der Energiebedarf für das TWW und die identifizierten Abweichungen zwischen Messung und Energiebilanz sind ein vergleichbar kleiner Anteil der Gesamtenergieströme des Bades. Eine Optimierung ist daher nicht von bedeutender Priorität. Mit einer pauschalen Erhöhung der Annahme für die Duschzeit pro Badegast um eine halbe Minute sind die Berechnungen in besserer Übereinstimmung mit den Messdaten.

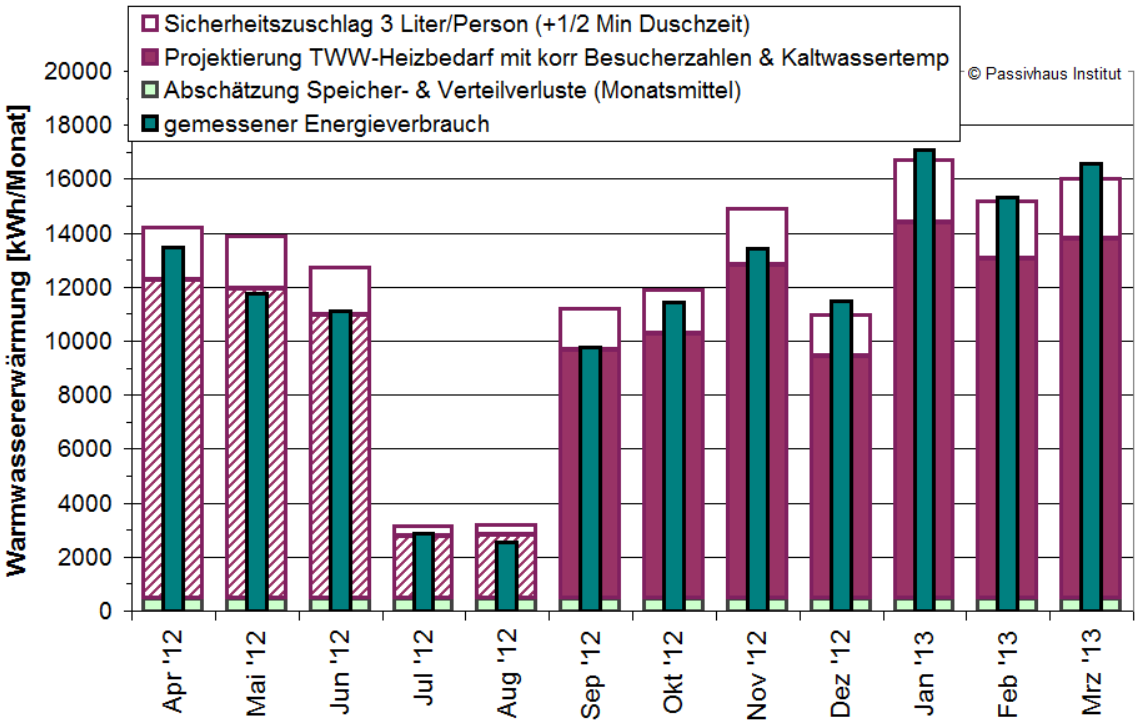


Abbildung 109: Der monatlich gemessene Heizwärmeverbrauch zur TWW-Erwärmung im Vergleich zur Bedarfsrechnung nach Anpassung der Besucherzahlen und Frischwassertemperaturen. (Hinweis: Die schraffierten Balken basieren auf Hochrechnungen der Frischwassertemperatur.) Die Annahmen der Projektierung sind tendenziell zu optimistisch, daher wird für die nachgeführte/aktualisierte Energiebilanz ein Sicherheitszuschlag für den Duschwasserverbrauch pro Person angerechnet.

Hinweis zu Speicher- und Verteilverlusten

Die berechneten Speicher- und Verteilverluste in der aktualisierten Energiebilanz des Lippe-Bades machen einen sehr geringen Anteil des Heizbedarfs für die TWW-Erwärmung aus. Im Lippe-Bad wird die Wasserhygiene durch eine Ultrafiltration und Chlordioxidanlage direkt am Hauseingang des Trinkwasserhauptanschlusses (vgl. [BGL 2011], S.72 ff) sichergestellt, so dass die Warmwasserspeicherung und -verteilung auf einem niedrigeren Temperaturniveau erfolgen kann. Das Monitoring zeigt Speichertemperaturen zwischen 40 °C und 45 °C. Diese Optimierung führt zu einer Einsparung von ca. 50 % der Speicher- und Verteilverluste gegenüber einer konventionellen Herangehensweise mit Beheizung des TWW auf 60 °C. Es wurde zudem während der Planung darauf geachtet eine dauerhafte Zirkulation zu vermeiden, um Verteilverluste zu reduzieren.

5.1.4 Strom

Die Ermittlung des Strombedarfs ist nicht der primäre Bestandteil des PHPPs, insbesondere im Kontext der sehr speziellen Verbraucher eines Schwimmbades. Einzelne Bereiche können mit diesem Tool recht genau berechnet werden, so z.B. der Strombedarf für die Lüftung und die Beleuchtung. Der jährliche Gesamtstrombedarf der restlichen Verbraucher wird pauschal in der Energiebilanz eingetragen. Die Ermittlung dieses jährlichen Strombedarfs erfolgt bei einer so speziellen Gebäudenutzung unabhängig vom PHPP. Vor dem Hintergrund des bedeutenden Anteils an der Energieeffizienz eines Bades wird bei Folgeprojekten dringend empfohlen diese Berechnungen möglichst genau durchzuführen. Diese Aufstellung kann als Basis dienen, um Optimierungspotentiale zu identifizieren und soweit wie möglich auszuschöpfen. Es empfiehlt sich z.B. alle Pumpen aufzulisten und deren jährlichen Strombedarf auf Basis von erwarteten Laufzeiten und Stromaufnahme im Betriebspunkt abzuschätzen. Es sollten in jedem Fall möglichst effiziente Geräte ausgewählt werden.

Aus den Messdaten geht hervor (vgl. Abschnitt 4.8.3.1), dass die Hauptstromverbraucher im Hallenbad Lünen die Lüftungsgeräte darstellen, gefolgt von den Umwälzpumpen der drei Beckenkreisläufe („Großpumpen“) und der Summe aller restlichen Verbraucher („Diverse“), sowie Licht und Steckdosen. Mit der Energiebilanz aus der Planungsphase wurde eine ähnliche Gewichtung vorhergesagt (die Umwälzpumpen der Beckenkreisläufe waren damals jedoch nicht separat von der restlichen Schwimmbadtechnik aufgeführt). Ein Vergleich der Strombedarfsdaten in der ursprünglichen Energiebilanz mit den Verbrauchswerten ist nur bedingt möglich, da die Umsetzung an verschiedensten Stellen von der Planung abweicht. Dennoch wird in Abbildung 110 der ursprünglich angesetzte Strombedarf mit dem gemessenen Stromverbrauch für die verschiedenen Teilbereiche im Vergleich gezeigt. In Anbetracht der abweichenden Randbedingungen ist die Übereinstimmung der einzelnen Bereiche besser als erwartet. Für die Lüftung ist der gemessene Stromverbrauch etwas höher als der erwartete Bedarf. Dies ist plausibel, da der Messwert zusätzlich den in der Energiebilanz nicht explizit abgebildeten Stromverbrauch der Wärmepumpe enthält. Im Bereich der Schwimmbadtechnik waren zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des Berichts [BGL 2011] noch relativ wenige Informationen bekannt, diese Berechnungen lagen daher bewusst auf der sicheren Seite. Vor diesem Hintergrund ist nachvollziehbar, dass die Messwerte in einer ähnlichen Größenordnung liegen, trotz der erhöhten Umwälzmengen. Für die restlichen Bereiche (Licht, Steckdosen, Sanitär und Heizung) ist die Übereinstimmung im Rahmen der möglichen Genauigkeit sehr gut. Dies setzt allerdings – wie im ersten Absatz erwähnt – eine sehr detaillierte Aufarbeitung der gesamten Ausstattung in der Planungsphase voraus.

Es bestehen in diesem Bereich des Endenergieverbrauchs in Lünen weiterhin Einsparmöglichkeiten gegenüber dem aktuellen Betrieb, die zum Teil mittels der Ener-

giebilanz aus der Planungsphase identifiziert werden konnten. Als Beispiel ist insbesondere der Strombedarf der Lüftung zu nennen, der stark von der realisierten Umluftmenge beeinflusst ist.

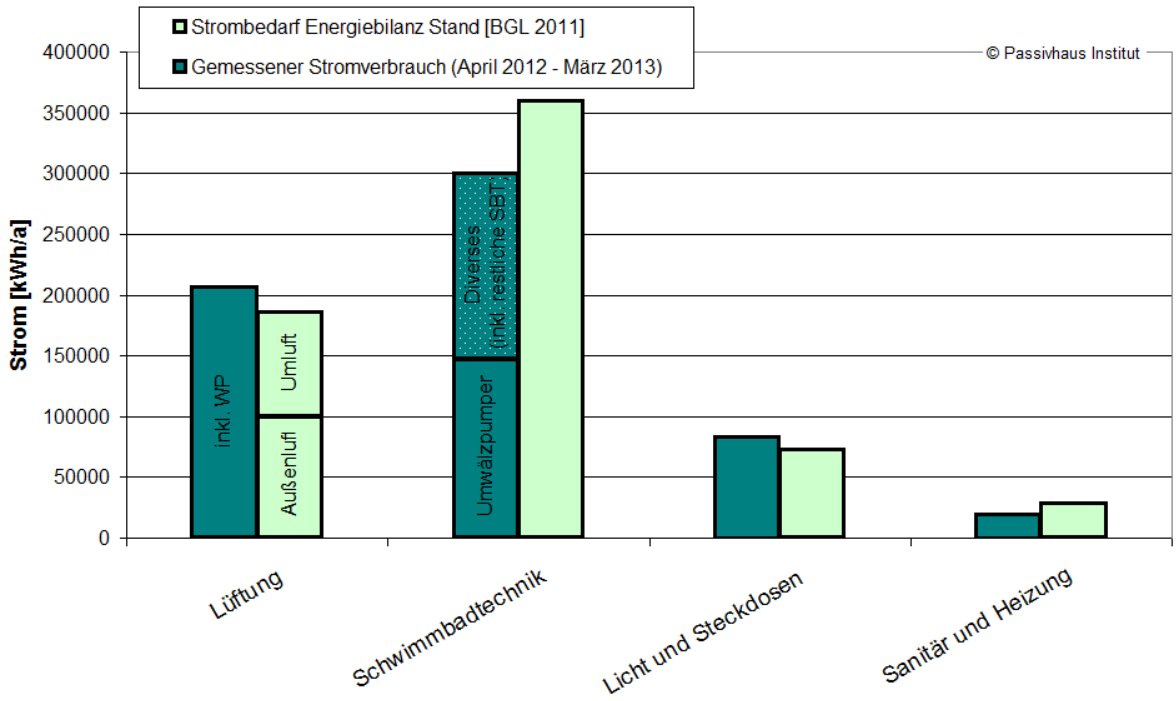


Abbildung 110: Gegenüberstellung des projektierten Strombedarfs während der Planungsphase mit den Messdaten aus dem Jahr April 2012 – März 2013 nach verschiedenen Teilbereichen.

5.2 Energiebilanzierung: Zusammenfassung & Aussichten

Die in diesem Kapitel aufgeführten Vergleiche zwischen den gemessenen Energieverbräuchen im Lünener Hallenbad und den berechneten Bedarfswerten der einzelnen Bereiche geben einen Einblick in die Komplexität der Energiebilanz eines Schwimmbades. Trotz der unumgänglichen Herausforderungen und Unsicherheiten konnte erfolgreich gezeigt werden, dass das speziell entwickelte Mehrzonen-PHPP für Hallenbäder für die Projektierung und Optimierung der Hauptenergieverbraucher sehr gut geeignet ist.

Das Tool wurde während der Planungsphase des Bades für die entstehenden Anforderungen angepasst und befindet sich auch weiterhin in der Entwicklungsphase. Die vorliegenden Messdaten aus dem Monitoring wurden verwendet, um die Annahmen, Ansätze und Berechnungsmethoden der Energiebilanz zu überprüfen und weiter zu verbessern. Lediglich eine größere Anpassung der Berechnungsannahmen war notwendig und zwar im Bereich der Beckenwassererwärmung (vgl.

Abschnitt 5.1.1). An dieser Stelle lagen die Messdaten deutlich unter den prognostizierten Werten. Die Hauptursache für diese Abweichung waren die während der Planungsphase bewusst zu hoch angesetzten Verdunstungsmengen, da keine verlässlichen Daten für eine plausible Einschätzung vorlagen. Da die Verdunstung einen großen Einfluss auf die Gesamtenergiebilanz des Bades hat (Nachheizung der Verdunstungswärmeverluste sowie die erforderlichen Außenluftmengen zur Entfeuchtung), ist eine möglichst genaue Bestimmung dieser Größe besonders wichtig. Aus den vorliegenden Daten konnte die Größenordnung der Verdunstung ermittelt werden, genauere Analysen stehen jedoch noch aus. Die vorgestellten Messdaten bestätigen, dass die mittleren Stoffübergangskoeffizienten für die Verdunstung in der Praxis während den Nutzungsstunden deutlich niedriger ausfallen als in der [VDI 2089] zur Auslegung der Lüftungsgeräte (Spitzenlast) angegeben. Die ermittelte Größenordnung liegt zwischen ca. 20 % und 40 % der VDI-Auslegung, je nach betrachtetem Beckenkreislauf und gegebenen Randbedingungen. Das Monitoring hat zudem aufgezeigt, dass es weitere Einflussfaktoren gibt, die den Heizwärmebedarf der Beckenkreisläufe beeinflussen und in der Planungsphase nicht ausreichend berücksichtigt werden konnten, so z.B. die Abwärme der Schwimmer und Wärmeübergabe an der Wasseroberfläche.

Abgesehen von der Beckenwassererwärmung sind die Rechenergebnisse der Energiebilanz tendenziell niedriger als der gemessene Verbrauch. Der Jahresverlauf des Raumheizwärmebedarfs der verschiedenen Temperaturzonen sowie auch die Größenordnung der einzelnen Hauptverbraucher (Raumheizung, Wassererwärmung und Strom) werden korrekt abgebildet. Da sich die Messdaten auf einen Zeitraum beziehen, in dem das Bad in verschiedenen Bereichen noch einreguliert wurde und dadurch verschiedene Betriebsweisen realisiert wurden, lässt sich der Jahresverbrauch nicht vollständig mit den berechneten Bedarfswerten vergleichen. Abbildung 111 zeigt dennoch einen Vergleich der nachgeführten Energiebilanz, angepasst mit den beschriebenen Erkenntnissen aus dem Monitoring und den tatsächlichen Messwerten. Die Übereinstimmung ist gut, womit der Rechenansatz bestätigt wird.

Das Hallenbad hat trotz typischer Einregulierungszeit einen sehr guten Energiekennwert im ersten Messjahr erreicht. Die Maßnahmen aus der Planung haben den beabsichtigten Erfolg erzielt. Wie an verschiedenen Stellen in diesem Bericht analysiert, ist die energetische Optimierung hinsichtlich der Betriebsweise trotzdem noch nicht ausgeschöpft. In Abbildung 112 ist eine aktualisierte Energiebilanz für das Bad unter den angestrebten Randbedingungen (z.B. 64 % Hallenfeuchte, reduzierte Umluftvolumenströme, 70 % Filterspülwasseraufbereitung) aufgeführt. Da in einigen Bereichen noch Unklarheit für die Annahmen besteht, handelt sich auch hier um eine *orientierende* Berechnung. Für den Strombedarf der Schwimmbadtechnik (SBT), Beleuchtung und sonstigen Verbrauchern wurden an dieser Stelle die Messwerte aus dem Monitoring übernommen. Der Strombedarf der Lüftung wurde mit dem PHPP berechnet. Gegenüber den Messergebnissen aus dem Zeitraum April 2012 bis März

2013 ist laut dieser Abschätzung eine weitere Reduktion des Endenergiebedarfs um ca. 100 kWh/(m²a) möglich. Den größten Anteil macht hierbei die Einsparung durch die Filterspülwasseraufbereitung aus. Auch der Strombedarf kann durch Reduktion der Umluftmenge deutlich reduziert werden, was bei der primärenergetischen Betrachtung von hoher Relevanz ist.

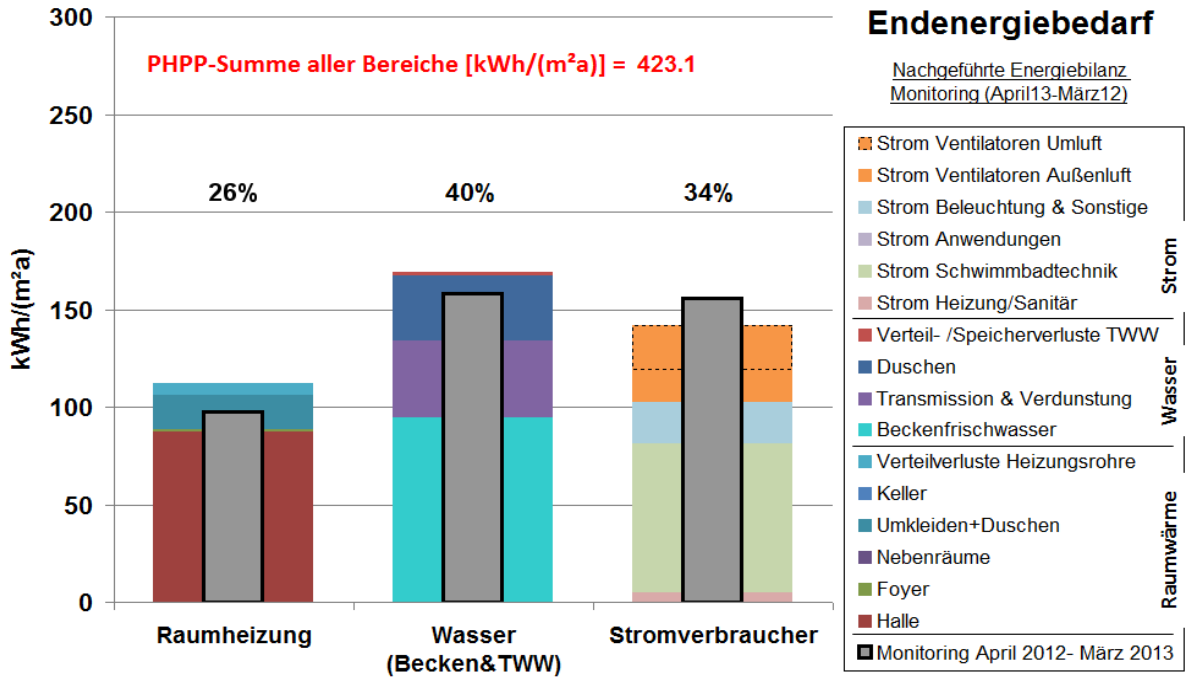


Abbildung 111: Nachgeführte Energiebilanz unter den gemessenen Randbedingungen des Winters 2012/2013 und weiteren Messdaten aus April 2012 bis März 2013. Eine genauere Übereinstimmung mit den Messdaten ist aufgrund der unstetigen Betriebsweise und verbleibenden Unsicherheiten einiger Annahmen nicht zu erwarten. Die Größenordnungen werden korrekt berechnet. Es handelt sich um spezifische Werte mit Bezug auf die Energiebezugsfläche.

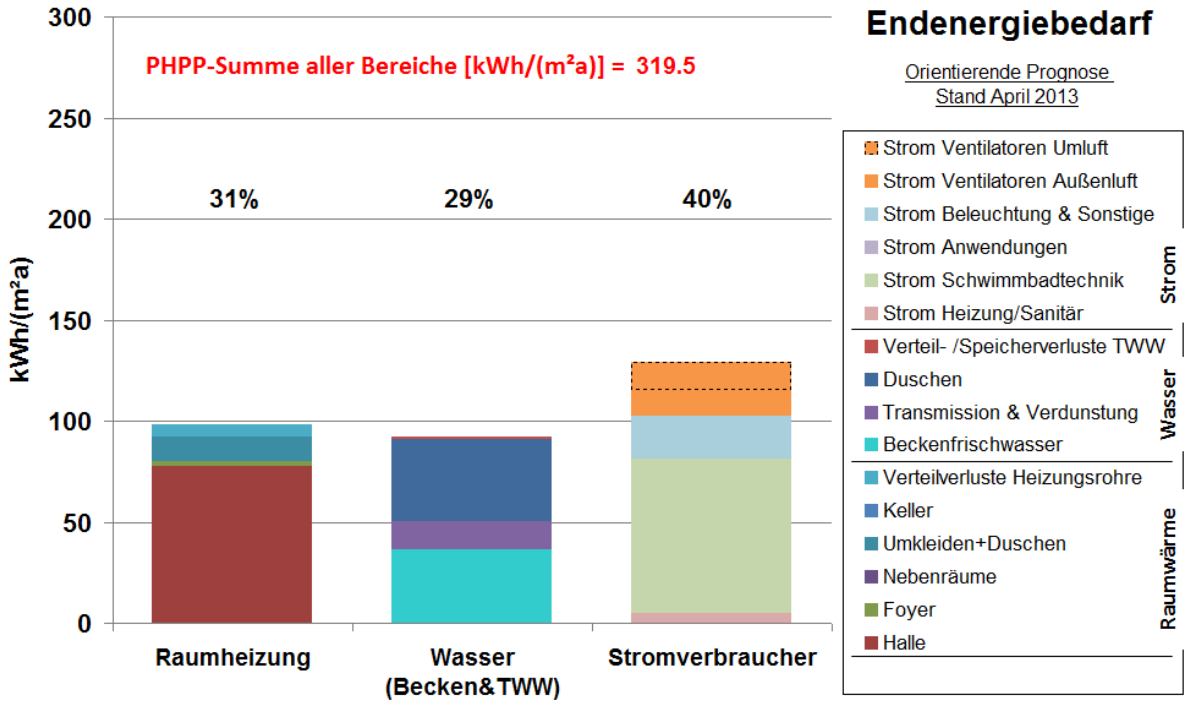


Abbildung 112: Prognose der Energiebilanz mit der empfohlenen Betriebsweise (zukünftiger Betrieb). Gegenüber der aktuellen Betriebsweise besteht weiteres Einsparpotential von ca. 100 kWh/(m^2_{EBF}a), verursacht hauptsächlich durch die Wieder-Inbetriebnahme der Filterspülwasseraufbereitung.

Primärenergiebilanz

Wie bereits in Abschnitt 4.9 beschrieben, ist für eine abschließende energetische Bewertung der Primärenergiebedarf von Interesse. Die in diesem Abschnitt ausführlich beschriebene Endenergiebilanz ist hierfür die Grundlage. Als weiteren Schritt müssen die Energieerzeuger für die verschiedenen Verbraucher und die entsprechenden Primärenergiefaktoren angesetzt werden. Dass hierbei eine Verschiebung der Schwerpunkte auf den Strom gegenüber der Heizenergie eintritt wurde bereits in der Planungsphase erkannt und betont (vgl. [Schulz et. al. 2009] und [BGL 2011]). Die größte Unsicherheit bezüglich einer Berechnung des Primärenergiebedarfs besteht darin, vorherzusagen wie viel Energie von den unterschiedlichen Energieversorgern bereitgestellt wird. Hierfür wurden in der Planungsphase Abschätzungen getroffen, die sich in den Messdaten widerspiegeln.

6 Perspektiven

Das Lippe-Bad in Lünen ist eines der beiden ersten Pilotprojekte zur Umsetzung des Passivhauskonzeptes bei Hallenbädern. In gemeinschaftlicher Arbeit wurden bis zum jetzigen Standpunkt über mehrere Jahre die Grundlagen zum Energiekonzept entwickelt, diese dann im Planungsprozess angewendet und letztendlich im laufenden Badbetrieb Schritt für Schritt realisiert. Wie in diesem Bericht aufgezeigt, wurden die ersten wesentlichen Meilensteine erreicht und wichtige Erkenntnisse zum Betrieb eines energieoptimierten Hallenbades gewonnen.

Die umfangreichen Messdaten aus dem Untersuchungszeitraum wurden im Detail ausgewertet, um grundlegende Fragestellungen zu betrachten. An einigen Punkten konnte weiterer Forschungsbedarf festgestellt werden. Das Potential der energetischen Optimierungsmaßnahmen des Bades ist nach diesem ersten Monitoringzeitraum noch nicht endgültig ausgeschöpft. Aufgrund der vorhandenen umfangreichen Messtechnik, dem guten Verständnis der komplexen Gebäudetechnik und deren Regelung bietet das Lippe-Bad jetzt ideale Voraussetzungen für die systematische Klärung weiterer Fragestellungen zum Betrieb energiesparender Hallenbäder. Zukünftige Versuchsreihen bieten ein hohes Potential weitere Perspektiven der Energieeffizienz in Hallenbädern voranzutreiben. Einige beispielhafte Vorhaben für Versuche und weiterführende Analysen im Lippe-Bad sind:

- Dauerhafte Umsetzung der reduzierten Zuluftvolumenströme für die Hallenbereiche zur Reduktion des Stromverbrauchs. Test zum Nachtbetrieb der Lüftungsanlagen ausschließlich zum Feuchteschutz (erhöhte Feuchte / reduzierte Temperatur).
- Untersuchung des energetischen Einflusses der alternativen Lüftungsregelungsstrategie „Entfeuchtung über Umluft mit WP“ für die Hallen.
- Weiterführung der systematischen Untersuchungen zur Verdunstung (z.B. Einfluss der Hallenfeuchte, der Schwimmer etc.)
- Erarbeitung von Optimierungsempfehlungen für die Belüftung der Duschen und Umkleiden.
- Weiterführende Analyse und Optimierungsmöglichkeiten beim Einsatz einer Wärmepumpe zur Nutzung der Fortluftenthalpie.
- Potentiale durch Optimierung der Beckenwasserumwälzung (z.B. Nachtabsenkung, Umwälzung unter Wasser) – Einfluss auf die Verdunstung und den Stromverbrauch der Pumpen.
- Weiterführende Betrachtungen zur Energiebilanz der Beckenwasserkreisläufe (z.B. Wärmeabgabe der Schwimmer, Wärmeübergang an der Wasseroberfläche). Die verschiedenen Einflussparameter wurden im Rahmen dieses Berichts erläutert, konnten jedoch nicht präzisiert werden.

- Weiterentwicklung des Passivhaus Projektierungs-Paket (PHPP) für zukünftige Energiebilanzierung bei der Planung von Hallenbädern. Ein solches Werkzeug ist bisher nicht vorhanden und ist unabdingbar zur Beurteilung von Energieeinsparmaßnahmen. Zur Zeit befindet sich die PHPP-Mehrzonenversion in der Entwicklungsphase.
- Luftqualität: Weiterführung der Untersuchung zu Auswirkung unterschiedlicher Lüftungsstrategien auf die Luftqualität (Desinfektionsnebenprodukte).
- Untersuchung des Warmwasserverbrauchs an den Zapfstellen (Duschköpfen) zur Bewertung und Optimierung der Wärmeverluste und Auslastung der Duschplätze.

Wie bereits weiter oben geschildert, ist gegenüber den aktuellen Messergebnissen dieser Untersuchung eine weitere Reduktion des Endenergiebedarfs in der Größenordnung von etwa 100 kWh/(m²a) möglich. Das entspricht einer potentiellen Reduktion von etwa nochmals 25 % der jetzt bilanzierten Endenergie.

7 Literaturangaben

[ages 2007] Zeine, Carl (Projektleiter): **Verbrauchskennwerte 2005**, Energie- und Wasserverbrauchskennwerte in der Bundesrepublik Deutschland. Ages GmbH, Münster 2007

[BGL 2011] Ahrens, Olaf; Beckert, Stefan; Franke, Thomas; Grove-Smith, Jessica; Hitz, Andreas; Horstmann, Wolfgang; Kah, Oliver; Koch, Gerd; Krick, Benjamin; Ostermann, Uwe; Peper, Søren; Pöter, Markus; Schulz, Tanja; Bramey, Frank: **Integrale Planung für die Realisierung eines öffentlichen Hallenbades mit Konzepten der Passivhaustechnologie**, Bädergesellschaft Lünen, Lünen 2011, www.baeder-luenen.de

[DGfdB R 60.04] DGfdB R 60.04: **Einsparung natürlicher Ressourcen in Bädern**. Deutsche Gesellschaft für das Badewesen, 2002

[DIN 19643] DIN 19643 – Teil 1: Aufbereitung von Schwimm- und Badebeckenwasser Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin April 1997

[DIN EN ISO 6946] DIN EN ISO 6946: **Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient.** Berechnungsverfahren, Beuth Verlag, November 1996.

[Dubbel 1997] Begr. Von H.Dubbel, Hrsg. Beitz, Wolfgang & Grote, Karl-Heinrich: **Dubbel Taschenhandbuch für den Maschinenbau**; 19. Auflage, Springer-Verlag, 1997.

[DYNBIL] Feist, Wolfgang: Dynbil, Programm zur hygrothermischen, dynamischen Simulation von Gebauden. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2011.

[Funcke 2013] Funcke, Markus: **Prüfbericht zur Untersuchung von Trihalogenmethanen (THM) in Luft- und Badewasserproben**. Lehr- und Versuchsgesellschaft für innovative Hygienetechnik GmbH (LVHT GmbH). 15.05.2013, Mühlheim a.d. Ruhr

[Gemis] Fritsche, U.; Leuchtner, J.; Matthes, F.C.: **Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)**, Version 4.6, Öko-Institut, Darmstadt September 2005

[Heiden/Meyrahn 2012] Heiden, I.; Meyrahn, F.: **Wirtschaftsfaktor Sportstätte** - Präsentation der Ergebnisse „Bäder“. Teilergebnisse zum Satellitenkonto Sport (Deutschland). Zugrundeliegende Basisstudie im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2hm, Stuttgart, Oktober 2012

[Marées] de Marées, Horst: **Sportphysiologie**; Sportverlag Strauß, Köln, 2003. ISBN: 3-939390-00-3

[PHPP] W. Feist, R. Pfluger, J. Schnieders, O. Kah; B. Kaufmann; B. Krick; Z. Bastian und W. Ebel: ***PHPP Passivhaus Projektierungs Paket Version 7 (2012).*** Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser; Passivhaus Institut; Darmstadt 2012

[Schlesiger 2001] Schlesiger, G.: Energie- und wassersparende Maßnahmen in Bädern. In: Bundesinstitut für Sportwissenschaft, 2001

[Schulz et al. 2009] Schulz, Tanja; Pfluger,Rainer; Grove-Smith, Jessica; Kah, Oliver; Krick, Benjamin: **Grundlagenuntersuchung der bauphysikalischen und technischen Bedingungen zur Umsetzung des Passivhauskonzepts im öffentlichen Hallenbad**, Passivhaus Institut Darmstadt, 2009 www.passiv.de

[VDI 2089] VDI 2089, Blatt 1: **Technische Gebäudeausrüstung von Schwimmbädern**, Hallenbäder. Entwurf, September 2008

[VDI 2089- Blatt 2]. VDI 2089, Blatt 2: **Technische Gebäudeausrüstung von Schwimmbädern - Effizienter Einsatz von Energie und Wasser in Schwimmbädern**; Verbrauchskennzahlen, 2008

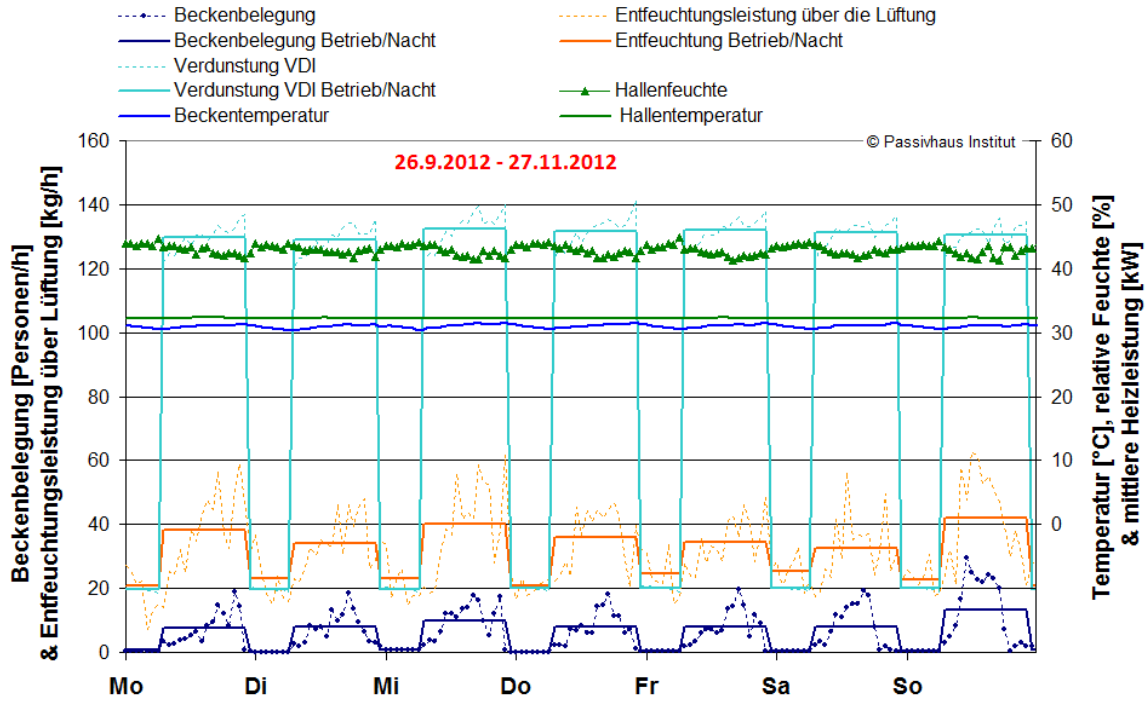
[Wibera 2010] Wibera Wirtschaftsberatung Aktiengesellschaft Wirtschaftsprüfgesellschaft: „Gutachten zur Bestimmung des Primärenergiefaktors der Fernwärmeversorgung der Stadtwerke Lünen GmbH für das Jahr 2010“, Düsseldorf, 11.01.2010

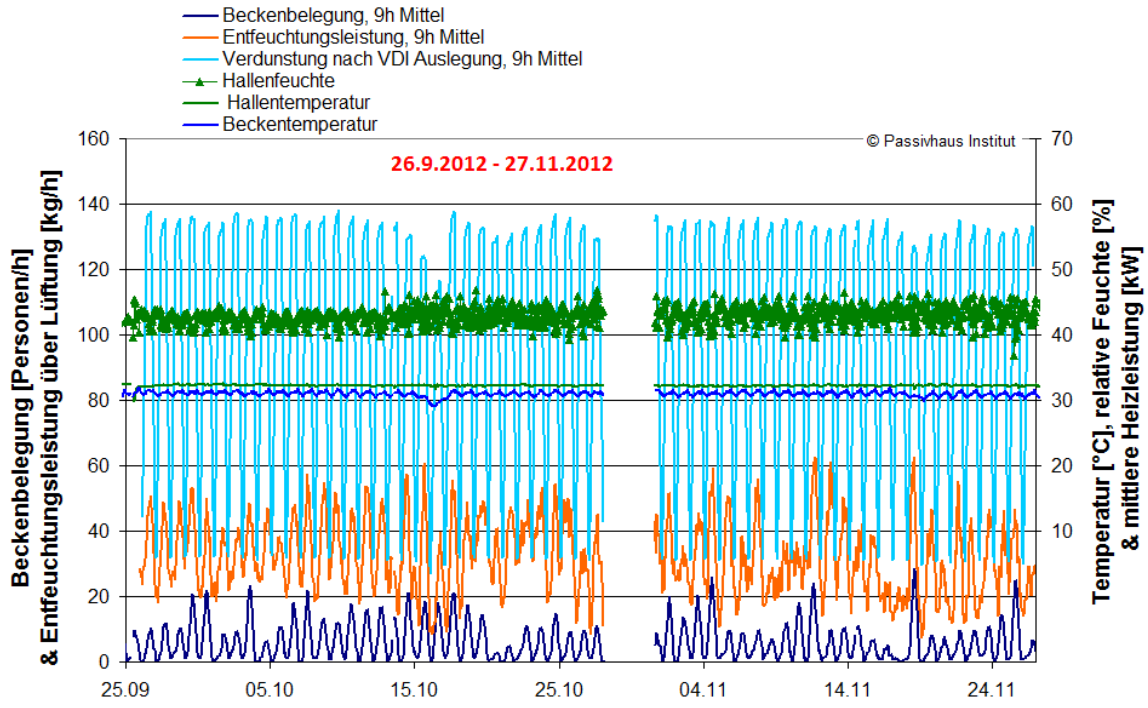
Spritz-Robbe im Eltern-Kind-Becken

8 Anhang: Entfeuchtungsleistung im Verlauf

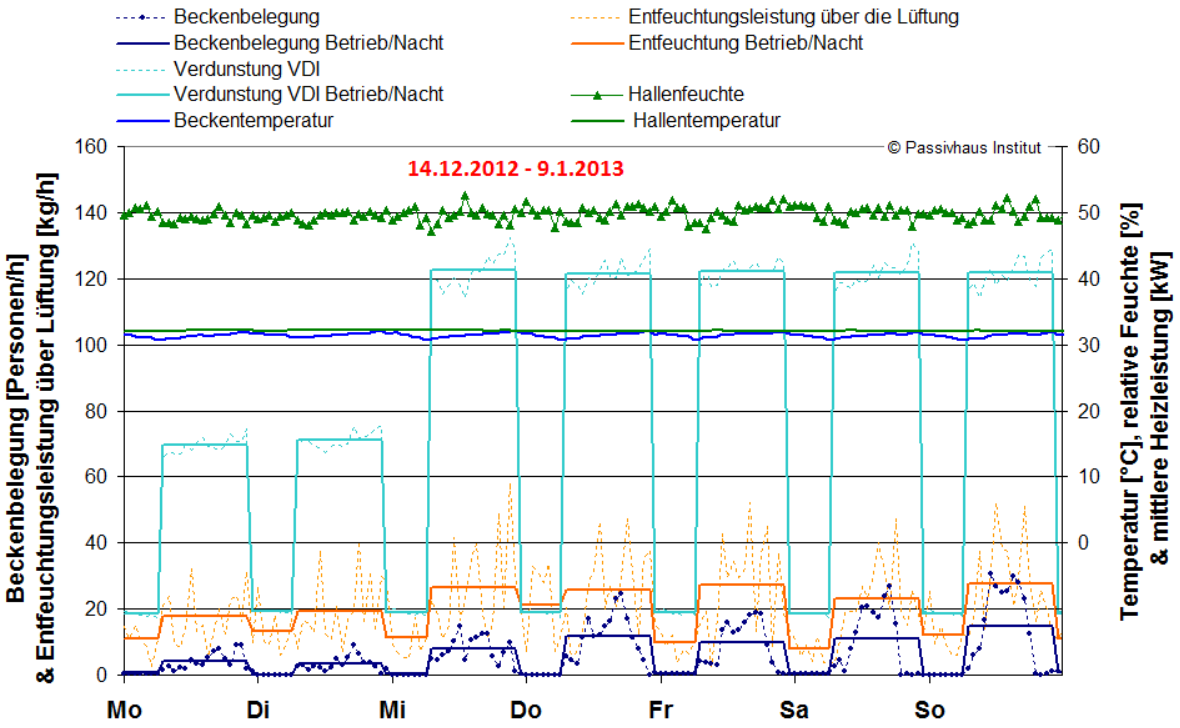
In den folgenden Darstellungen sind je Halle zwei Zeiträume mit jeweils unterschiedlichen Randbedingungen (Hallenfeuchten, Temperaturen) als Durchschnittswerte der Wochenstunden (Mittelwerte aller Messwerte einer Größe je Wochentag und Stunde gemittelt) und im Zeitverlauf (Stundendaten) dargestellt. Hiermit ist der Vergleich zwischen den Entfeuchtungsleistungen (berechnet aus Messdaten) und den maximalen Verdunstungsmengen nach VDI 2089 möglich.

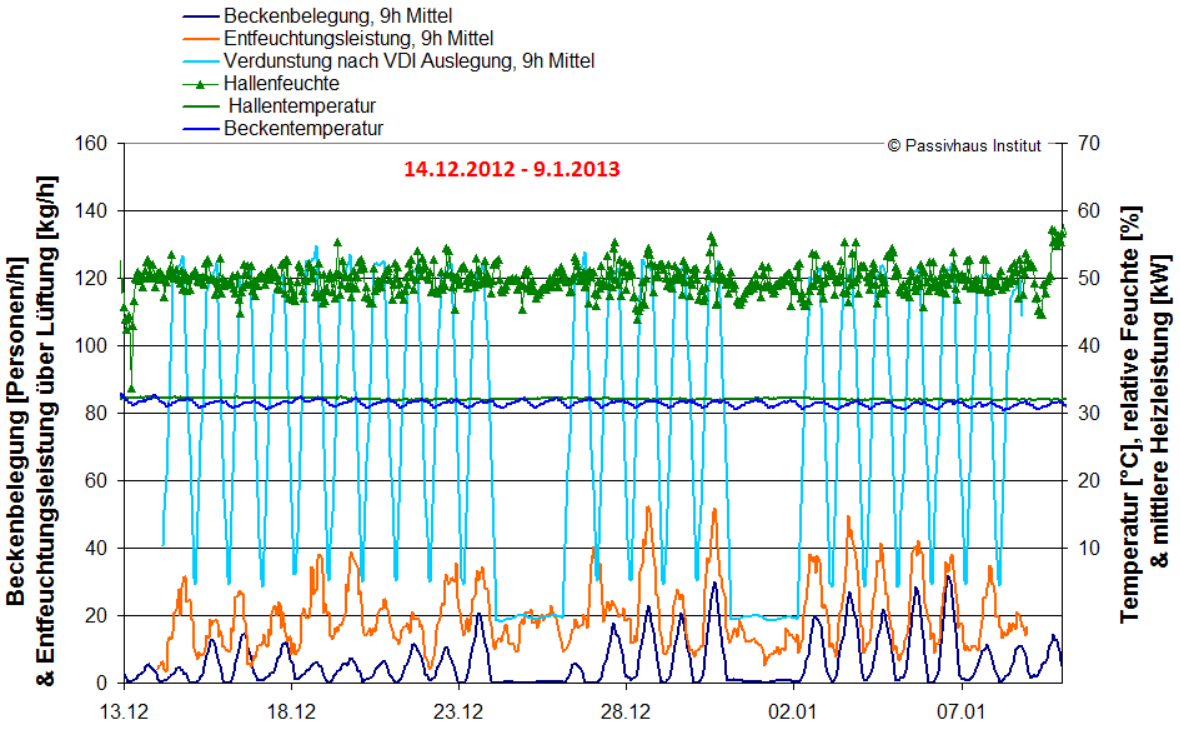
Halle 1+2



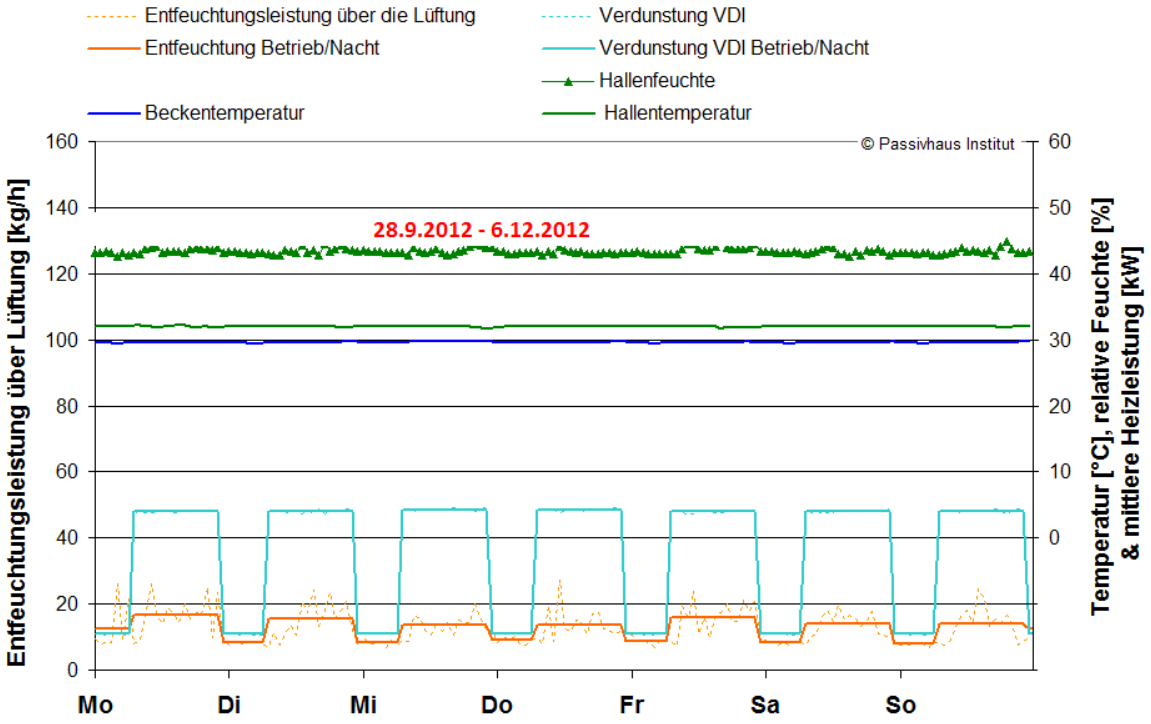


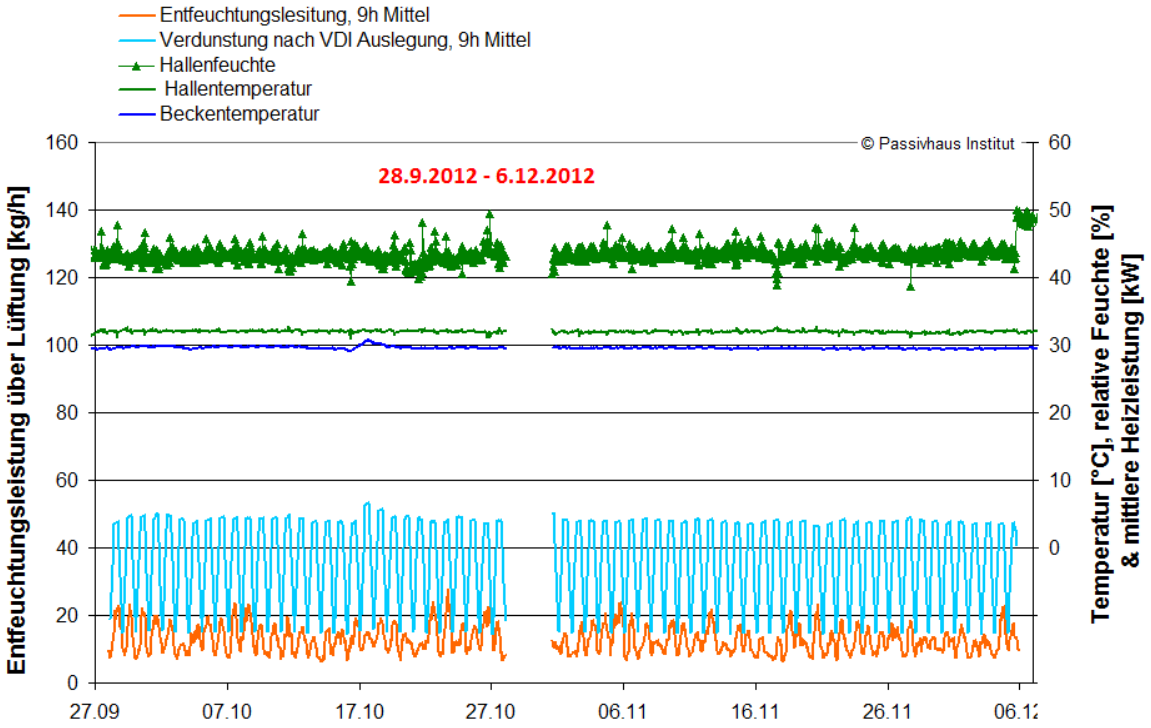
Fortsetzung **Halle 1+2**



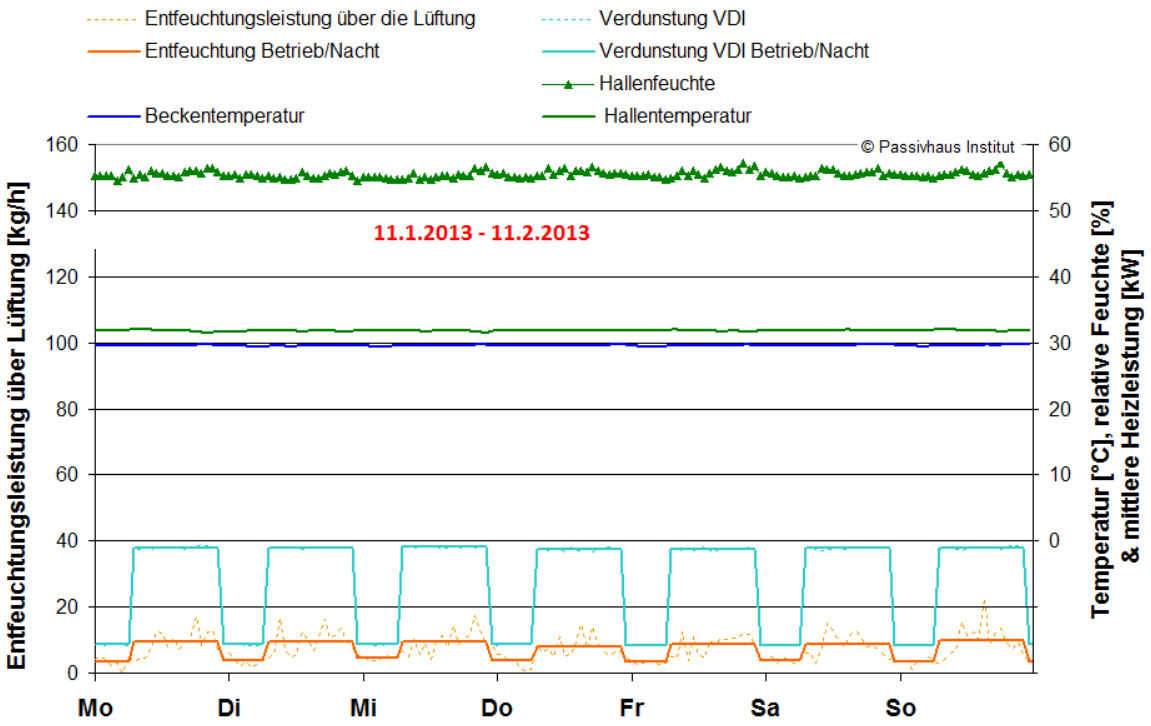


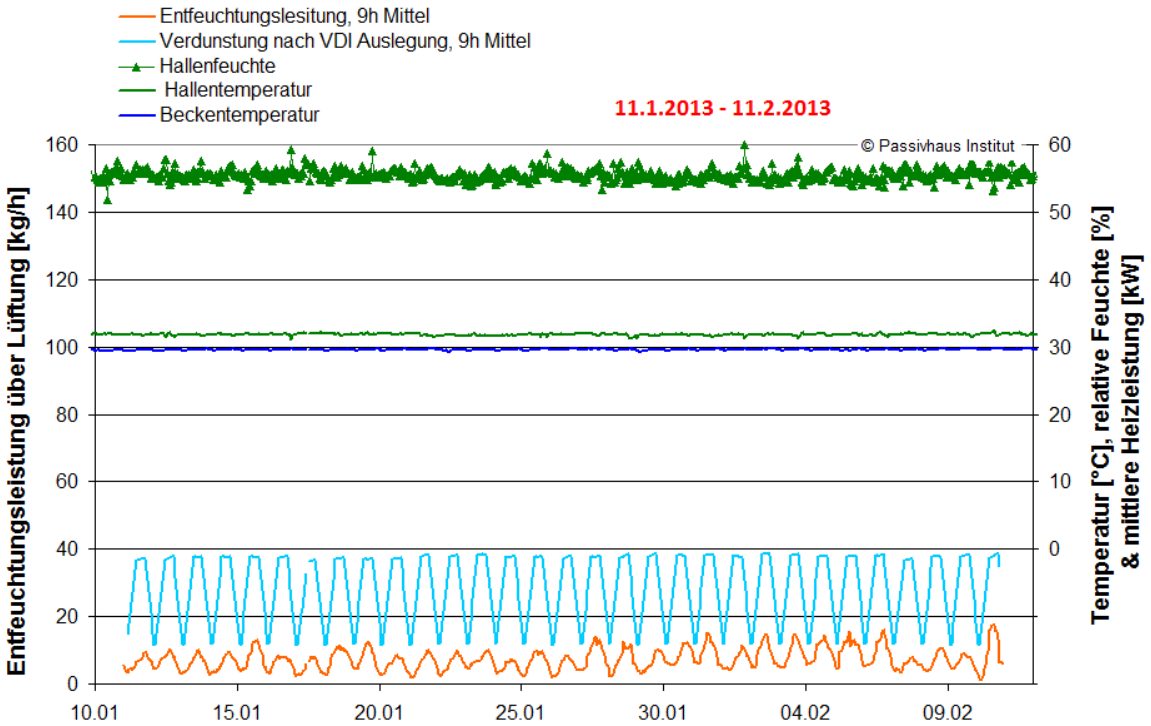
Halle 3


Entfeuchtungsleistung über die Lüftung
Verdunstung VDI
Entfeuchtung Betrieb/Nacht
Verdunstung VDI Betrieb/Nacht
Hallenfeuchte
Beckentemperatur
Hallentemperatur
© Passivhaus Institut
28.9.2012 - 6.12.2012
Entfeuchtungsleistung über Lüftung [kg/h]
Temperatur [°C], relative Feuchte [%] & mittlere Heizleistung [kW]
Mo
Di
Mi
Do
Fr
Sa
So

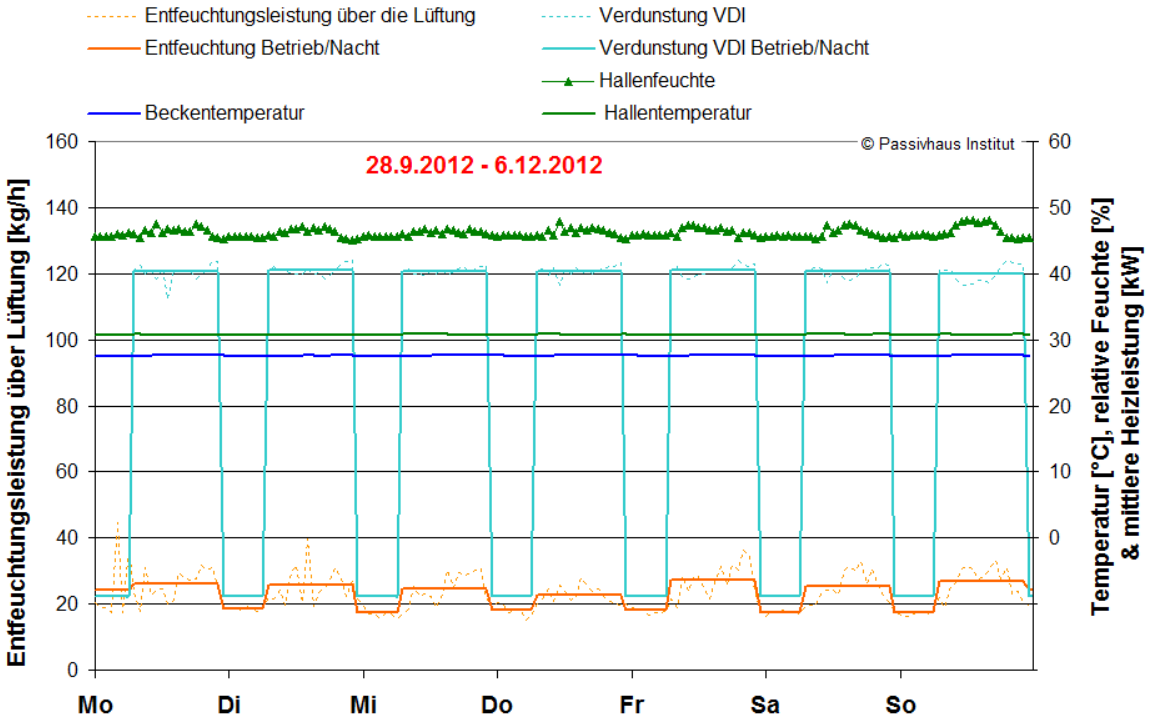

Entfeuchtungslesitung, 9h Mittel
Verdunstung nach VDI Auslegung, 9h Mittel
Hallenfeuchte
Hallentemperatur
Beckentemperatur
© Passivhaus Institut
28.9.2012 - 6.12.2012
Entfeuchtungsleistung über Lüftung [kg/h]
Temperatur [°C], relative Feuchte [%] & mittlere Heizleistung [kW]
27.09
07.10
17.10
27.10
06.11
16.11
26.11

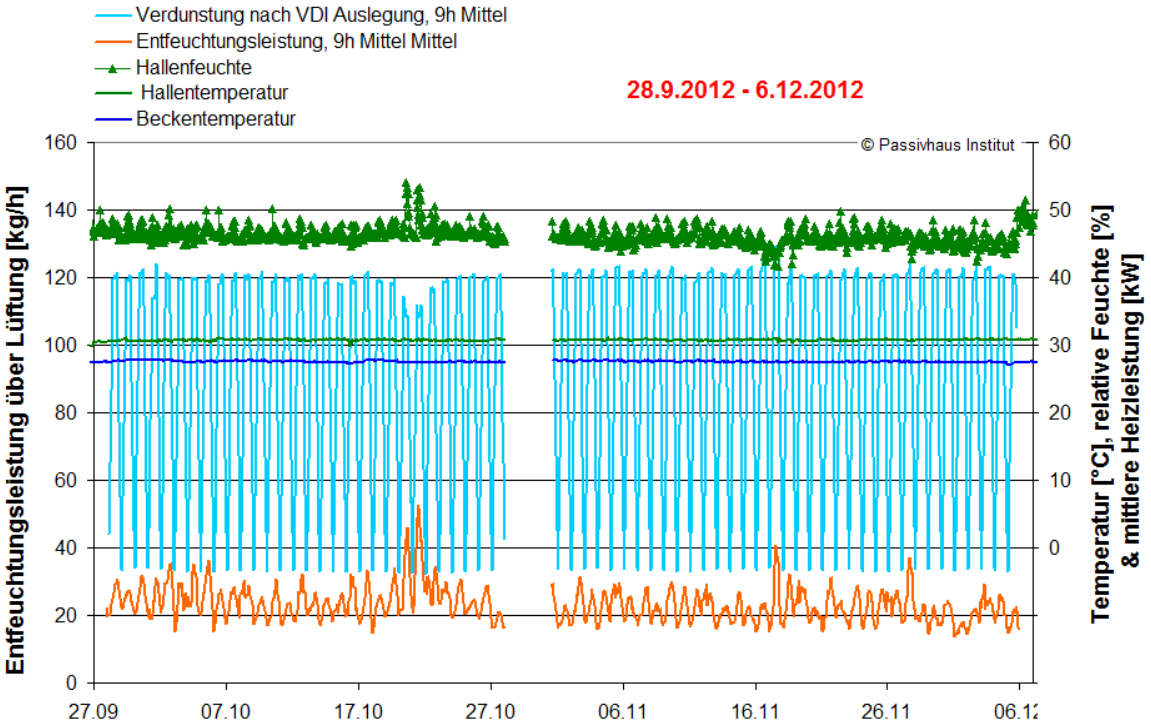
Fortsetzung **Halle 3**



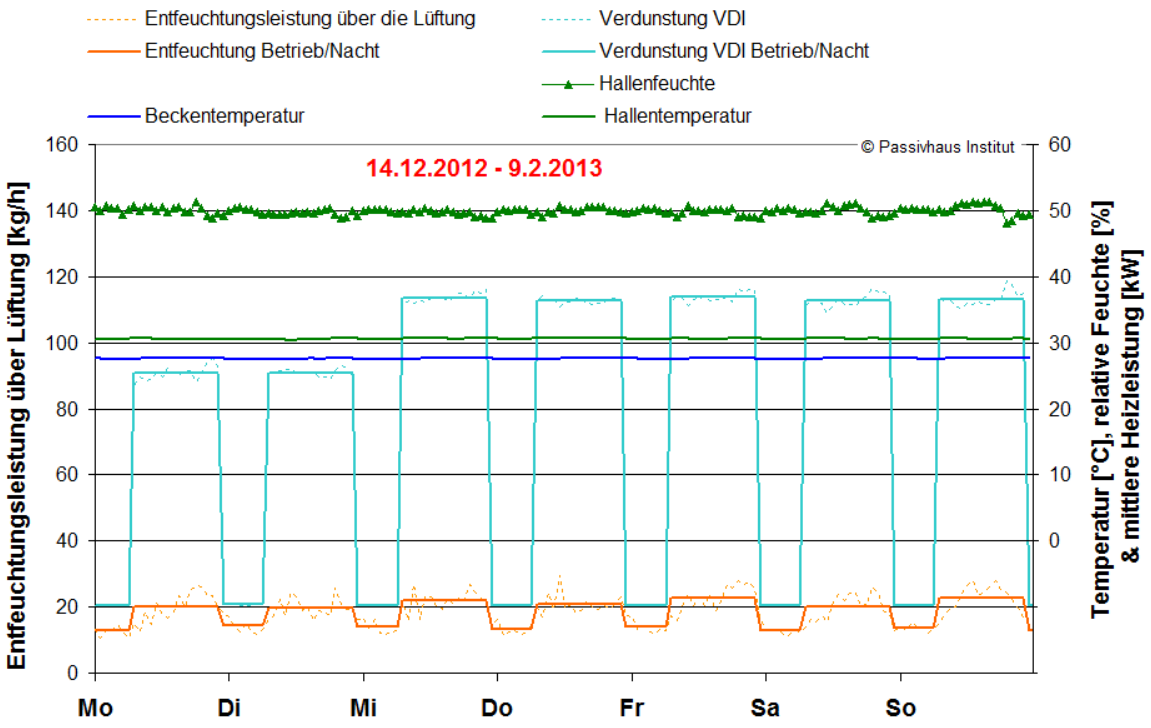


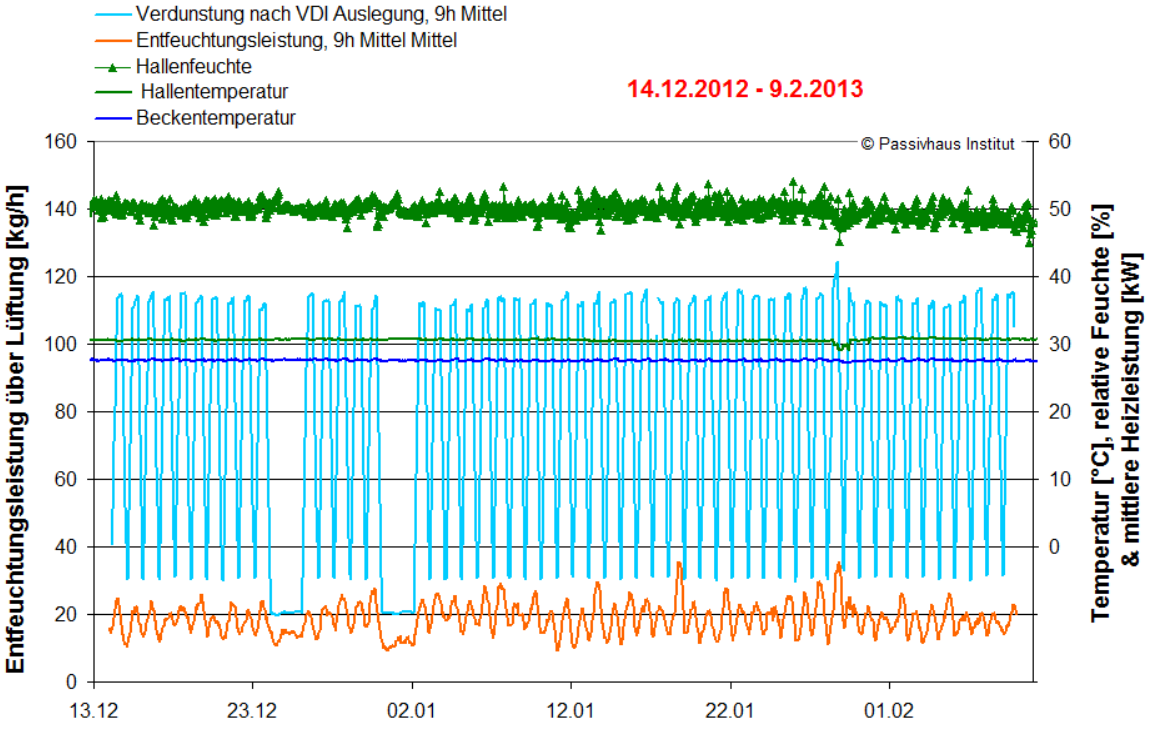
Halle 4


Entfeuchtungsleistung über die Lüftung
Verdunstung VDI
Entfeuchtung Betrieb/Nacht
Verdunstung VDI Betrieb/Nacht
Hallenfeuchte
Beckentemperatur
Hallentemperatur
© Passivhaus Institut
28.9.2012 - 6.12.2012
Entfeuchtungsleistung über Lüftung [kg/h]
Temperatur [°C], relative Feuchte [%] & mittlere Heizleistung [kW]
Mo
Di
Mi
Do
Fr
Sa
So

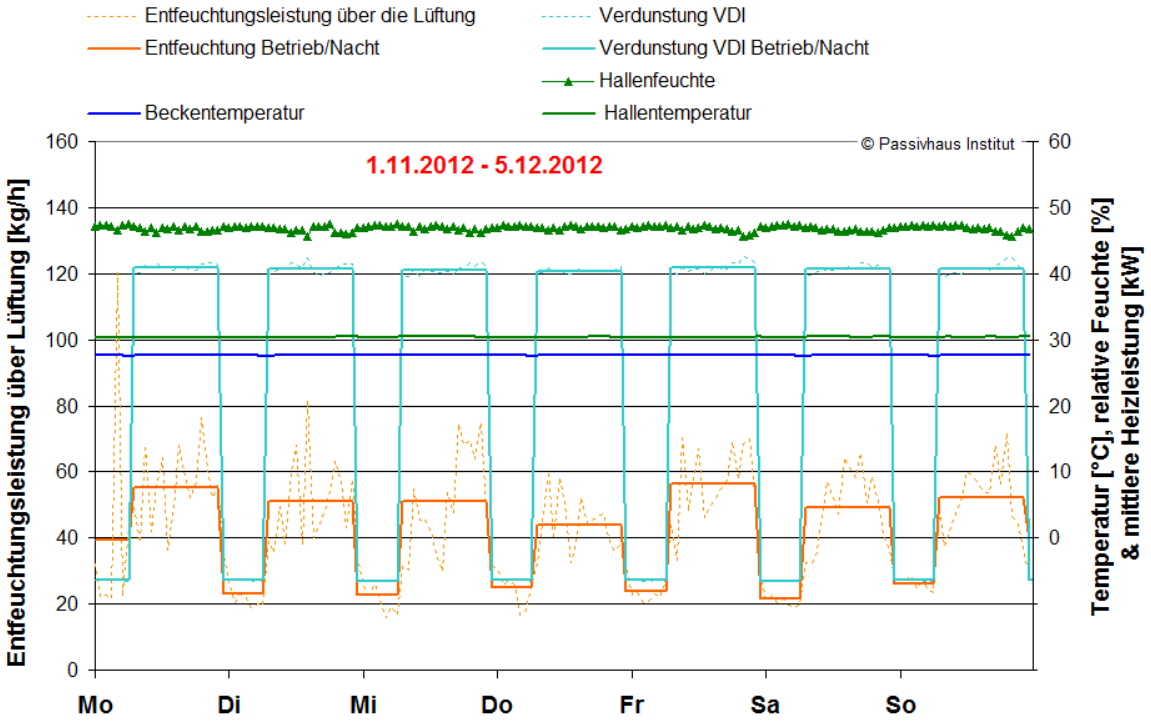

Verdunstung nach VDI Auslegung, 9h Mittel
Entfeuchtungsleistung, 9h Mittel Mittel
Hallenfeuchte
Hallentemperatur
Beckentemperatur
28.9.2012 - 6.12.2012
© Passivhaus Institut
Entfeuchtungsleistung über Lüftung [kg/h]
Temperatur [°C], relative Feuchte [%] & mittlere Heizleistung [kW]
27.09
07.10
17.10
27.10
06.11
16.11
26.11
06.12

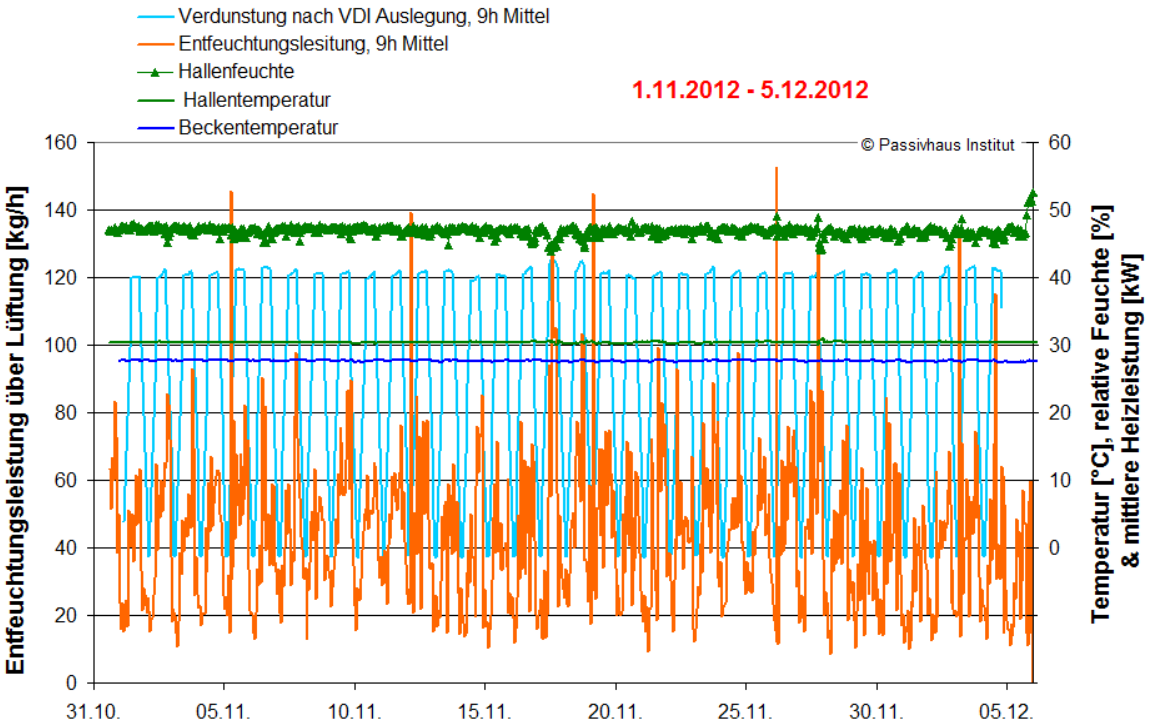
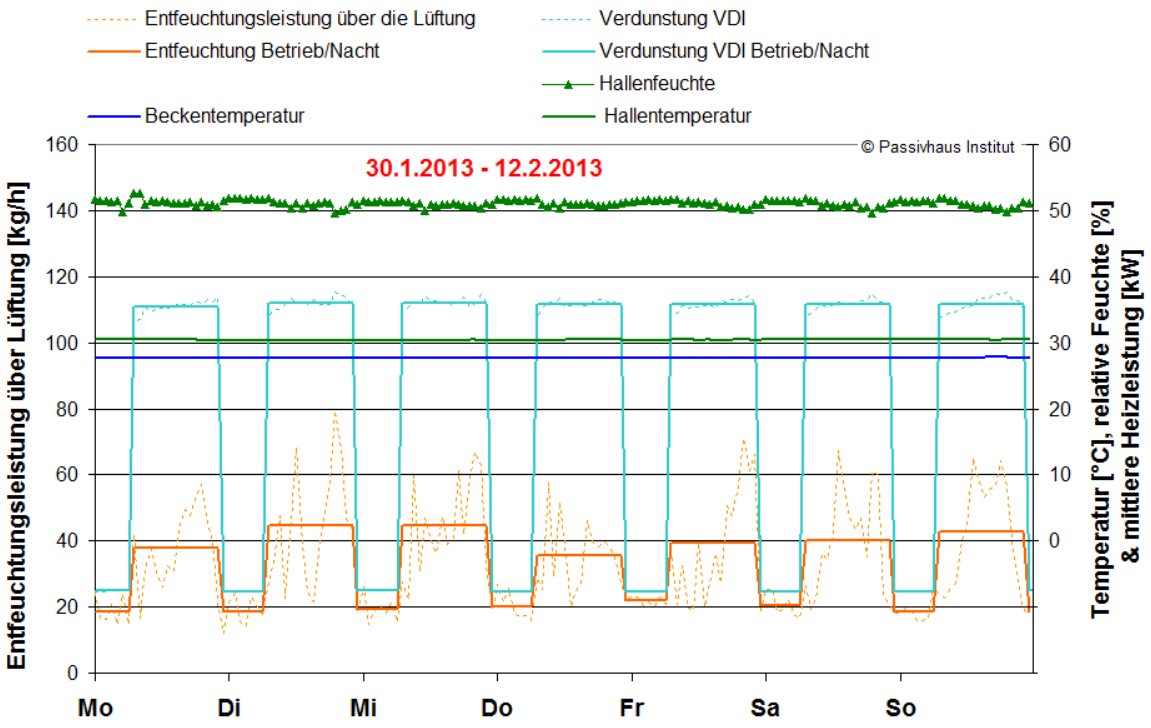
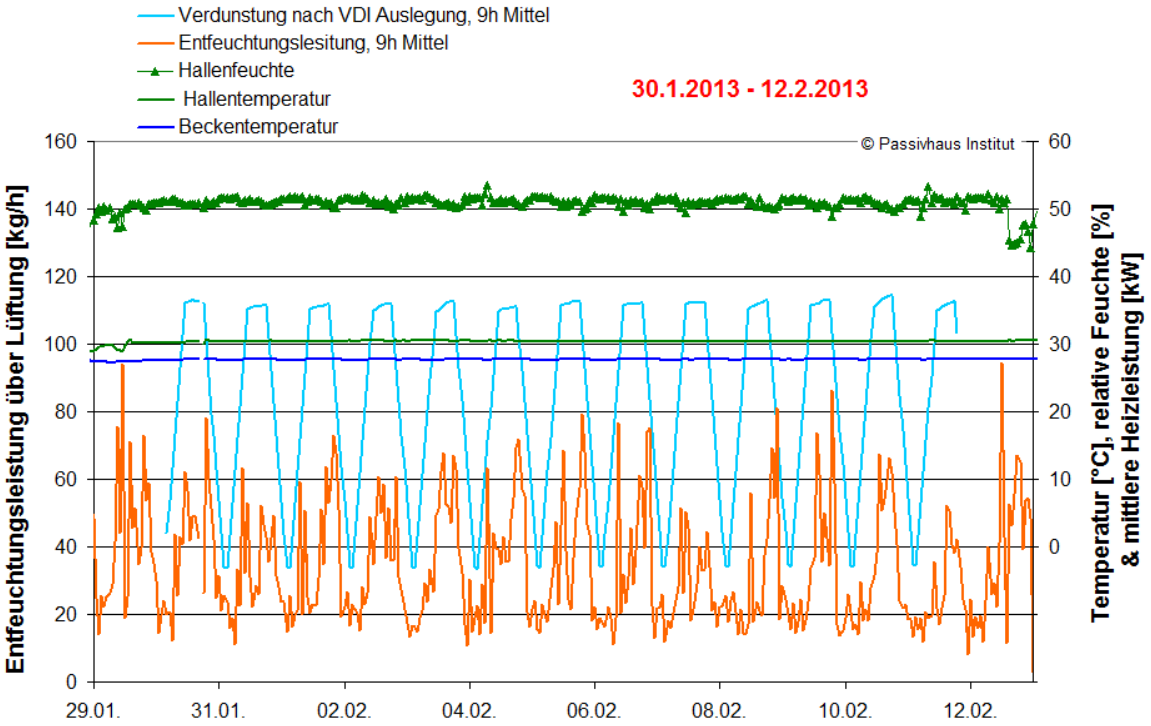
Fortsetzung **Halle 4**





Halle 5


Entfeuchtungsleistung über die Lüftung
Verdunstung VDI
Entfeuchtung Betrieb/Nacht
Verdunstung VDI Betrieb/Nacht
Hallenfeuchte
Beckentemperatur
Hallentemperatur
© Passivhaus Institut
1.11.2012 - 5.12.2012
Entfeuchtungsleistung über Lüftung [kg/h]
Temperatur [°C], relative Feuchte [%] & mittlere Heizleistung [kW]
0
20
40
60
80
100
120
140
160
0
10
20
30
40
50
60
Mo
Di
Mi
Do
Fr
Sa
So


Verdunstung nach VDI Auslegung, 9h Mittel
Entfeuchtungslesitung, 9h Mittel
Hallenfeuchte
Hallentemperatur
Beckentemperatur
1.11.2012 - 5.12.2012
© Passivhaus Institut
Entfeuchtungsleistung über Lüftung [kg/h]
Temperatur [°C], relative Feuchte [%] & mittlere Heizleistung [kW]
0
20
40
60
80
100
120
140
160
0
10
20
30
40
50
60
31.10.
05.11.
10.11.
15.11.
20.11.
25.11.
30.11.
05.12.

Fortsetzung **Halle 5**