



Abschlussbericht zum Vorhaben

Universeller dynamischer Prüfstand für große Lager

KfW-Aktenzeichen: NKa3 - 003044

Fördernehmer/-in	SKF GmbH Gunnar-Wester-Str. 12 97421 Schweinfurt
Umweltbereich	Ressourcen
Laufzeit des Vorhabens	12.02.2015 – 31.01.2022
Autor	Matthias Happ Test Engineer Andreas Büchner Test Engineer Dr. Martin Göbel Global Manager Wind Engineering
Fertigstellung	30.05.2023

Gefördert durch



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz



Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen UBA:	Vorhaben-Nr. Nka3 – 003044
Titel des Vorhabens: Universeller dynamischer Prüfstand für große Lager	
Autoren (Namen, Vornamen) Happ, Matthias Büchner, Andreas Dr. Göbel, Martin	Vorhabensbeginn: 12.02.2015
	Vorhabensende (Abschlussdatum): 31.01.2022
Fördernehmer / -in (Name, Anschrift) SKF GmbH Gunnar-Wester-Str. 12 97421 Schweinfurt	Veröffentlichungsdatum: 30.05.2023
	Seitenzahl: 32 (ohne Berichts-Kennblatt, Verzeichnisse und Anhang)
Gefördert im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz	
Kurzfassung Ausgangssituation: Großlager mit einem Außendurchmesser bis 2,5 m z. B. für Anwendungen der Schwerindustrie werden individuell für den spezifischen Einsatzzweck gefertigt und konnten zum Zeitpunkt der Antragstellung branchenüblich erst in der Anwendung getestet werden. Geeignete Prüfstände und wissenschaftlich fundierte, belastungsgerechte Berechnungs- und Simulationsmodelle für ihre konstruktive Auslegung auf solche Belastungsszenarien waren nicht verfügbar. Daraus resultieren Prozessunsicherheit und das Risiko des Versagens der Lager, das mit Produktionsmehrkosten für den Austausch fehlerhafter Lager zu Lasten des Lagerherstellers und drohenden Stillstands- und Folgekosten in der Anwendung verbunden ist. Um dieses Risiko zu minimieren, werden Großlager branchenüblich zu Lasten der Energie- und Materialeffizienz im Fertigungsprozess mit erheblichen Sicherheitszuschlägen hinsichtlich z. B. Materialeinsatz und Einhärtetiefe beaufschlagt. Lösungsansatz / Ziele / Umwelteffekte: Im Rahmen der Errichtung eines neuen Testzentrums für große Wälzlager hat die SKF GmbH in Schweinfurt den großtechnischen Ersteinsatz eines neuartigen universellen dynamischen Großlagerprüfstands umgesetzt. Der Prüfstand ermöglicht erstmals die empirische Ermittlung realitätsnaher Belastungsdaten als Inputgröße für eine wissenschaftlich fundierte Berechnung und Simulation (Digitaler Zwilling) als Basis für die belastungskonforme Auslegung und Fertigung von Großlagern für verschiedensten industrielle Anwendungen, in denen sie hohen Drehzahlen in Kombination mit hohen statischen und dynamischen Radial- und / oder Axiallasten ausgesetzt sind. Die Lebens- bzw. Gebrauchsdauer von Großlagern soll mit Hilfe der neuen in den Produktions- und Entwicklungsprozess integrierten Testmöglichkeiten und bisher nicht gekannten Messgenauigkeiten signifikant verlängert, die Betriebssicherheit der Lager erhöht und die Ausfallquote reduziert werden. Durch den Prüfstand wird eine an den realen Belastungsbedingungen orientierte, ressourcenschonende Auslegung und Entwicklung von Großlagern und Großlagerkomponenten möglich, die erhebliche Energie- und Materialeinsparungen erlaubt. Weiterhin wird die Abwärme aus dem Prüfstandsbetrieb zurückgewonnen und im werkseigenen Wärmenetz genutzt. Durch die hohe Prüfstandseffizienz, insbesondere hohe aufbringbare Lasten und Drehzahlen, kann gegenüber dem Stand der Technik je nach Testbedingungen im Rahmen eines L10 Lebendauertests eine Energieeinsparung von 27.500-28.500 MWh erreicht werden. Die Prüfzeit kann um mehr als 95 Prozent auf etwa ein halbes Jahr verkürzt werden. Dies geht unter Nutzung des aktuellen CO₂-Emissionsfaktors (Quelle: UBA, Emissionsfaktor Strommix Deutschland für 2021) mit einer Minderung des CO₂-Ausstoßes um 11.500-12.000 t einher. Erste Testreihen zeigen bereits auf, dass die Validierungsmöglichkeiten des Prüfstands, wie vorgesehen, darüber hinaus mittelfristig zu weiteren Energie- und Materialeinsparungen bei der Lagerherstellung führen werden. So wurden Bauteile in Testreihen validiert, die Einsparungen in Höhe von rd. 1.100 MWh Energie durch den Einsatz energieeffizienterer Härteverfahren sowie die Materialsstitutionen von Stahl zu hochfestem Kunststoff mit sich bringen. Weiterhin können durch den Einsatz niedriglegierter Stähle für einzelne Bauteile 75 % der Legierungselemente und durch Substitution von Stahl durch hochfesten Kunststoff 100 % Stahl eingespart	

werden. Letzteres bringt zudem eine Gewichtsreduzierung des Käfigs um 88 % mit sich. SKF wird alles daransetzen, u. a. mit Hilfe des Teststandes die Energie- und Ressourceneffizienz seiner Produkte, aber auch seiner Produktion, auf ein Minimum zu reduzieren, um einen wirksamen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.

Schlagwörter

Energieeinsparung, Energieeffizienz, Ressourceneffizienz, Wälzlager, Großlager, Prüfstand, Digitaler Zwillling

Anzahl der gelieferten Berichte

Papierform: 1

Elektronischer Datenträger: 1

Sonstige Medien: keine

Veröffentlichung im Internet: https://www.youtube.com/watch?v=T4L4gAn_oYQ

Report-Coversheet

Reference-No. UBA:	Project-No. Nka3 – 003044
Project title: Universal test rig for large bearings	
Autors Happ, Matthias Büchner, Andreas Dr. Göbel, Martin	Start of project: February 12, 2015
	End of project: January 31, 2022
Fördernehmer / -in (Name, Anschrift) SKF GmbH Gunnar-Wester-Str. 12 97421 Schweinfurt	Publication date: Mai 30, 2023
	No. of pages: 32
Funded by the Environmental Innovation Program of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection	
Summary Initial Situation: Large bearings with an outer diameter up to 2.5 meters, for example, for heavy industry applications, are individually manufactured for the specific purpose and could only be tested in the final application, which is common practice in the industry at the time. Suitable testing facilities and scientifically verified and load-appropriate calculation models for their constructive design for such load scenarios were not available. This results in process uncertainty and the risk of bearing failure, which is associated with additional production costs for the replacement of faulty bearings, to the detriment of the bearing manufacturer, and the risk of downtime and consequential costs in the application for the customer. To minimize this risk, large bearings are typically subjected to significant safety margins in terms of material usage and hardening depth at the expense of energy and material efficiency in the manufacturing process. Approach / Goals / Environmental Effects: As part of the establishment of a new test center for large bearings, SKF GmbH in Schweinfurt has implemented the large-scale initial use of a novel universal dynamic large bearing test rig. For the first time, the test rig enables the empirical determination of realistically applicable load data as an input parameter for a scientifically based calculation and simulation (Digital Twin) as a basis for the load-compliant design and manufacture of large bearings for a wide range of industrial applications in which they are subjected to high speeds in combination with high static and dynamic radial and/or axial loads. The service life of large bearings is to be significantly extended with the help of the new test possibilities integrated into the production and development process and previously unknown measurement accuracy, the operational safety of the bearings increased, and the failure rate reduced. The test stand enables a resource-efficient design and development of large bearings and components that is oriented to real load conditions, allowing for significant energy and material savings. Furthermore, waste heat from the test stand operation is recovered and used in the company's own heating network. Due to the high test rig efficiency, especially high applicable loads and speeds, energy savings of 27,500-28,500 MWh can be achieved compared to the state of the art depending on the test conditions within an L10 life test. The test time can be shortened by more than 95 percent to about half a year. This results in a reduction of CO2 emissions of 11,500-12,000 t using the current CO2 emission factor (source: UBA, emission factor electricity mix Germany for 2021). Initial test series already show that the validation possibilities of the test rig, as intended, will lead to further energy and material savings in bearing production in the medium term. For example, components were validated in test series, which bring energy savings of approximately 1,100 MWh through the use of more energy-efficient hardening processes and material substitutions from steel to high-strength plastic. Furthermore, by using low-alloyed steels for individual components, 75% of the alloying elements can be saved, and by substituting steel with high-strength plastic, 100% steel can be saved. The latter also brings an 88% weight reduction of the cage. SKF will make every effort to minimize the energy and resource efficiency	

of its products and production, among other things, using the test stand to make an effective contribution to climate protection.

Keywords

energy savings, energy efficiency, resource efficiency, roller bearings, large size bearings, test rig, digital twin

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
1.1	Kurzbeschreibung des Unternehmens	2
1.2	Ausgangssituation zum Zeitpunkt der Antragstellung	2
1.2.1	Stand der Technik.....	2
1.2.2	Umweltrelevante und ökonomische Konsequenzen	4
2	Vorhabensumsetzung.....	6
2.1	Ziel des Vorhabens	6
2.2	Darstellung der technischen Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)	8
2.3	Darstellung der Umsetzung des Vorhabens	8
2.3.1	Darstellung der Arbeitsschritte	8
2.3.2	Darstellung aufgetretener Hemmnisse.....	14
2.4	Behördliche Anforderungen (Genehmigungen).....	15
2.5	Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten.....	15
2.5.1	Messdatenauswertung SKF.....	17
2.5.2	Validierung der Datenbasis für die Berechnung der Umweltbelastungspotenziale...	18
3	Ergebnisse.....	21
3.1	Bewertung der Vorhabensdurchführung.....	21
3.2	Stoff-, Energie- und Umweltbilanz	22
3.2.1	Kurzfristige Umweltentlastungen.....	22
3.2.2	Mittelfristige Umweltentlastungen.....	23
3.3	Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	26
3.4	Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren	28
4	Empfehlungen	29
4.1	Erfahrungen aus der Praxiseinführung	29
4.2	Modellcharakter (Verbreitung und weitere Anwendung)	29
4.3	Zusammenfassung	30
5	Veröffentlichungen zum Vorhaben.....	32

1 Einleitung

1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens

SKF (*Aktiebolaget Svenska Kullagerfabriken – AB SKF, Schweden*) wurde 1907 von Sven Winqvist, einem schwedischen Ingenieur, gegründet und wuchs schnell zu einem weltweit operierenden Unternehmen heran. Die erste Fabrik entstand in Göteborg (Schweden), an dem sich heute nach wie vor der internationale Hauptsitz der SKF-Gruppe befindet. Bereits 1920 hat sich das Unternehmen auf allen fünf Kontinenten etabliert und ist heute in mehr als 130 Ländern präsent. Die Unternehmensgruppe beschäftigt rund 44.400 Mitarbeiter, hat 15 Technologiezentren, 103 Produktionsstandorte und arbeitet mit rund 17.000 Vertragshändlern zusammen.

In Deutschland beschäftigt die SKF-Gruppe rund 6.600 Mitarbeiter. Den größten Produktionsstandort der SKF-Gruppe und Hauptsitz der SKF GmbH in Deutschland stellt hierbei Schweinfurt mit seinen ca. 4.100 Mitarbeiter dar. In Schweinfurt entwickelt und produziert die SKF GmbH (im Folgenden SKF) Kegelrollen-, Zylinderrollen-, Groß- und Gleitlager sowie Sonderprodukte für die Windindustrie, den allgemeinen Maschinenbau und für die Automobilindustrie.

Das Vorhaben wurde unter Beauftragung der Renk Test System GmbH, Augsburg durchgeführt. Die Renk Test System GmbH (im Folgenden RENK) entwickelt und fertigt seit 1960 hochwertige Prüfanlagen für Getriebe, Antriebstechnikkomponenten und Gesamtsysteme im Sondermaschinenbau. Weltweit nutzen namhafte OEMs die langjährige Erfahrung des Unternehmens in der Antriebstechnik, der Messtechnik, der Elektronik und dem Anlagenbau und vertrauen auf RENK-Prüfstände in Forschung, Entwicklung sowie in der Qualitätssicherung. RENK-Prüfstände kommen weltweit zum Einsatz. Beispielsweise wurden die Gondelprüfstände für die Windindustrie bzw. wesentliche Komponenten des WTDTF der Clemson University in South Carolina (USA) von RENK entwickelt und gefertigt, die Prüfstandtechnik des Fraunhofer-Instituts für Windenergie und Energiesystem (IWES) in Bremerhaven konzipiert. Als Tochtergesellschaft der Renk GmbH gehört das Unternehmen seit 2020 zur internationalen Beteiligungsgesellschaft Triton.

1.2 Ausgangssituation zum Zeitpunkt der Antragstellung

1.2.1 Stand der Technik

Rund 20 % aller weltweit produzierten Energie wird aufgewendet, um Reibung zu überwinden.¹ Durch Reibung und Verschleiß entstehen in Deutschland lt. verschiedener Untersuchungen jährliche Verluste in der Größenordnung von 35 bis 100 Milliarden Euro.² Unter Verschleiß ist dabei ein fortschreitender Materialverlust an der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers, zu verstehen (= tribologische Beanspruchung). Verschleiß ändert die Geometrie von Bauteilen, sodass diese ihre Funktion verändern. Bauteilschädigung, Reparaturen und Maschinenausfälle sind die Folge. Lager als Bauelemente zur Führung von Achsen und Wellen, die Bewegungen übertragen und radiale und / oder axiale Kräfte aufnehmen, unterliegen ständigen Reibungs- und Verschleißbelastungen.

¹ Quelle: Kenneth Holmberg – University of Belgrade - Global Impact of Friction on Energy Consumption, Economy and Environment, 2015, S.4

² Quelle: Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung, Politikbericht beauftragt vom BMWi, Mai 2009, S.125

Besonders bedeutend sind diese Belastungen bei großen Wälzlagern (ab einem Außendurchmesser von 0,5 m), die in der Schwerindustrie (z. B. in Stahlwalzwerken, Papiermaschinen, Mühlen) und in der Antriebstechnik (z. B. Windkraftanlagen) zum Einsatz kommen. Diese sind regelmäßig sehr hohen, je nach Anwendung stark wechselnden Belastungen und zusätzlich häufig sehr rauen Umgebungsbedingungen hinsichtlich Temperaturen und Schmutz ausgesetzt. Defekte an Großlagern gefährden die Betriebssicherheit und verursachen hohe Kosten für Ersatzteile und aufwendiges Handling zusätzlich zu fehlenden Einnahmen durch den reparaturbedingten Anlagen- bzw. Produktionsausfall. Die hauptsächlichen Fehler- und Versagensursachen solcher Großlager sind die zu konservative Dimensionierung und eine auf fehlerhaften Annahmen beruhende Bauteilauslegung. Die grundsätzlichen Ursachen waren zum Zeitpunkt der Antragstellung:

- **Fehlende Berechnungs- und Simulationsmodelle**

Zur konstruktiven Auslegung von Großlagern gab es keine ausreichend wissenschaftlich fundierten Berechnungs- und Simulationsmodelle. Die Berechnung erfolgte durch Extrapolation von Berechnungsmodellen für Lager mit kleinen Abmessungen (ca. 200 mm Außendurchmesser) und Wälzkörpergewichten (< 500 g) unter Verwendung der für kleine Lager vorgesehenen ISO 281 (mit den Parametern Lagerbelastung, Drehzahl, Tragzahl und Lagerart) auf Großlager und unter Rückgriff auf Erfahrungswerte und herstellerspezifisches Know-how und Erfahrung, durch Beaufschlagung der theoretisch ermittelten Ergebnisse mit „Sicherheitszuschlägen“. Konkretes Wissen zu wesentlichen Einflussgrößen fehlte, z. B.

- tribologische Beanspruchung unter gegebenem Belastungskollektiv (Reibung, Verschleiß, Schmierung);
- erforderlichen Mindestbelastungen für Großlager (Zusammenhang von Lagergröße, Belastung, Schmierfilm, Beschleunigung, Massenträgheit von Wälzkörpern und Käfigen);
- dynamisches Verhalten von großen schweren Wälzkörpern (bis zu 30 kg) bei hoher Beschleunigung/Verzögerung;
- Reibungswärmeentwicklung in großen Lagern bei Drehzahlkennwerten³ ($n \times d_m$) > 500.000 bei unterschiedlicher Schmierung;
- Schmierfilmdicke unter stark variierenden Last- und Drehzahlverhältnissen;
- Betriebsverhalten von Schmierstoffen bei konstant niedrigen Drehzahlen und extremen Betriebstemperaturen;
- Einfluss von Wasser im Schmierstoff.

Zur anwendungsspezifischen und zuverlässigen konstruktiven Auslegung und prozesssicheren Fertigung von Großlagern kommt validen Berechnungs- und Simulationsmodellen eine besonders hohe Bedeutung zur Entlastung der Umwelt zu. Mangels fehlender Testmöglichkeiten in der Großlagerentwicklung und -fertigung und daher fehlender valider Daten zur realen Funktion und Belastung des Lagers entsprachen solche Berechnungs- und Simulationsmodelle zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht dem Stand der Technik.

³ Umdrehungen pro Minute x mittlerem Durchmesser in Millimeter, branchenüblicher Kennwert

- **Fehlende Simulations- und Testmöglichkeiten**

Großlager werden grundsätzlich kundenspezifisch entwickelt, in Einzel- bis Kleinserienfertigung produziert und gingen zum Zeitpunkt der Antragstellung im Wesentlichen ohne wissenschaftlich fundierte Simulation und ohne valide Versuche aus dem Entwicklungs- und Fertigungsprozess hervor. Die Validierung bzw. Versuchsphase fand und findet auch heute noch weitestgehend mittels Feldtests in Prototypenanlagen statt.

Großlagerprüfstände sind in den Produktentwicklungs- und Fertigungsprozess integrierte Teststände, mit denen die Festigkeit / Langlebigkeit und Eignung für die Betriebsbedingungen ermittelt und konstruktive Schwachstellen aufgedeckt werden sollen. Idealtypisch simulieren die eingebrachten Kräfte die unter realen Bedingungen auf das Lager einwirkenden statischen und dynamischen Lasten, damit die am Prüfkörper erfassten Messergebnisse Aufschluss über Beanspruchung, Verformung, Ermüdungsverhalten (Lebensdauer), Temperatur, Kinematik, Reibungsverhalten, Schmierstoffverteilung, Dichtheit, etc. geben. Dazu werden die Komponenten im Entwicklungsstadium über definierte Zyklen auf Lebensdauer und / oder auf mechanische Festigkeit bei Vibration und anderen mechanischen Belastungen getestet. Ziel ist die Gewinnung empirischer Daten zur anforderungsgerechten Auslegung der Lager insbesondere hinsichtlich Ermüdungslebensdauer (im Wesentlichen Materialfragen) und Kinematikverhalten (z. B. Wälzkörperkontakt mit Laufbahn, Wälzkörper-/Käfigdynamik). Weiterhin sollen unter Nutzung solcher Prüfstände Berechnungs- und Simulationsmodelle zur Lagerauslegung durch die gewonnenen Daten überprüft bzw. weiter verbessert werden.

Die Entwicklung und Etablierung von Großlagertestständen hat in der ersten Dekade der 2000er Jahre im Bereich der Windenergieanlagen begonnen, wobei zum Zeitpunkt der Antragstellung verfügbare Großlagerteststände entweder nur auf statische Krafteinbringung (z. B. vorhandenes Testequipment bei SKF) oder nur in limitierten Umfang auch auf dynamische Krafteinbringung (z. B. ASTRAIOS-Teststand der Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG) ausgelegt waren. Für Großlager in Industriebereichen jenseits der Windindustrie bestand zum Zeitpunkt der Antragstellung und besteht nach wie vor ein hoher Bedarf an Testmöglichkeiten und realitätsnahen, wissenschaftlich fundierten tribologischen Inputgrößen für Berechnungs- und Simulationsmodelle als Basis für eine anforderungsgerechte, zuverlässige, langlebige konstruktive Auslegung und Fertigung. Entsprechende Testmöglichkeiten fehlen jedoch nach wie vor.

Aufgrund anderer Anforderungen insbesondere hinsichtlich erforderlicher Drehzahlen sind die existierenden und entstehenden "Windkraftteststände" nicht auf andere Industriebereiche übertragbar. Die ersten Praxistests fanden bzw. finden auch nach wie vor weitestgehend in der Anwendung im Feld statt.

1.2.2 Umweltrelevante und ökonomische Konsequenzen

Zur Sicherstellung der geforderten Lebens- bzw. Gebrauchsdauer und Reduzierung des Fehler- und Versagensrisikos der Großlager wird herstellerseitig mit überdimensionierten Großlagern reagiert, wofür ein überhöhter Materialeinsatz und Energieverbrauch im Fertigungsprozess in Kauf genommen werden muss. Dennoch treten infolge fehlerhafter Dimensionierung und auf fehlerhaften Annahmen beruhender Bauteilauslegung weiterhin Schadensfälle auf, die bei Komponentenherstellern und Anlagenbetreibern zu hohen Folgekosten für Reparatur und Ausfällen führen.

Um die wesentlichen mechanischen Ausfallursachen von Großlagern bei weiter steigenden Anforderungen bewältigen zu können und gleichzeitig den Material- und Energieeinsatz zu reduzieren, ist die Komplementarität geeigneter Großlagerprüfstände und valider Berechnungs- und Simulationsmodelle unabdingbar.

Vor dem Hintergrund dieser umweltrelevanten und ökologischen Nachteile plante die SKF GmbH das vorliegende Vorhaben eines universellen dynamischen Großlagerprüfstands.

2 Vorhabensumsetzung

2.1 Ziel des Vorhabens

Im Rahmen des Entwicklungs- / Herstellungsprozesses neuer anwendungsspezifischer Lager soll der neuartige Prüfstand der Fertigung unmittelbar vorgelagerte Prototypentests ermöglichen, um oft langwierige und vor allem material- und energieintensive „Kundentests“ und gleichzeitig ein Over-Engineering durch Sicherheitszuschläge zu vermeiden. Weiterhin sollen mit Hilfe des neuen Prüfstands im Rahmen von beschleunigten Validierungs- und Funktionsprüfungen realitätsnahe Belastungsdaten ermittelt werden, die als valide Inputgrößen für eine anforderungsgerechte Simulation, Berechnung und Auslegung im Rahmen der Entwicklung neuer anwendungsspezifischer Lager dienen. Der bisherige Entwicklungs- und Produktionsprozess wird dazu um die Simulation sowie um die Prozessschritte Prototypenfertigung und Prüfstandtest unmittelbar vor der Fertigung erweitert. Idealerweise sind keine Iterations Schleifen mehr notwendig. Falls notwendig, erfolgen diese auf Basis von Prüfstandtests und angepasster Konstruktion, an die sich die Fertigung direkt anschließen kann. Material- und energieintensive Fertigungsschritte zur Nachbesserung der bereits an den Kunden gelieferten Lager können vermieden werden.

Der universelle dynamische Prüfstand für Großlager soll bisher nicht vorhandene Testmöglichkeiten und nicht gekannte Messgenauigkeiten ermöglichen durch:

- ein breites Anwendungsspektrum für Großlager verschiedenster Industrieanwendungen und -anforderungen mit Lager-Außendurchmessern bis 2,5 m,
- die Beaufschlagung mit, je nach Anwendung, real auf die Lager wirkenden statischen und dynamischen Radial- und/oder Axiallasten bei gleichzeitig hohen Drehzahlen,
- die Aufbringung von Überlast und Überdrehzahl im Rahmen beschleunigter Validierungstests (Highly Accelerated Life Test = HALT oder 5 Mio. Überrollungen) und zeitunabhängige Funktionstests,
- eine enge Einbindung der Produktentwicklung in den Herstellungsprozess durch Validierungs- und Funktionstests als Ausgangspunkt neuer anwendungsspezifischer Großlagertypen.

Ein hinsichtlich seiner technischen Merkmale und seines Leistungsspektrums vergleichbarer Teststand ist am Markt weder bekannt noch verfügbar.

Der neuartige Großlagerprüfstand soll im Rahmen des Vorhabens in Deutschland erstmalig großtechnisch angewendet werden und

- reale tribologische Eingangsparameter für wissenschaftlich fundierte Berechnungs- und Simulationsmodelle zur Auslegung und Lebensdauerberechnung von Großlagern liefern,
- die Weiterentwicklung und Validierung von Berechnungs- und Simulationsmodellen durch realitätsnahe Prüfstandsläufe und die Weiterentwicklung der Prüfmethodik zur realitätsnahen Nachstellung der Echanwendung in deren Vorfeld ermöglichen,
- eine anforderungsgerechte, d. h. von der realen Belastungssituation abgeleitete, konstruktive Auslegung von Großlagern erlauben.

Die Umweltschutzwirkung durch den neuen universellen dynamischen Großlagerprüfstand besteht

kurzfristig darin, dass

- beschleunigte Validierungstests mit deutlich reduziertem Energieeinsatz gegenüber heutigen Testmöglichkeiten durchführbar sind;
- durch die Nutzung der entstehenden Abwärme zusätzlich Energie eingespart wird;

mittel- bis langfristig darin, dass

- auf material- und energieaufwendige Iterationsschleifen im Rahmen von „Kundentests“ verzichtet werden kann;
- Material- und Energieeffizienz im Fertigungsprozess von Großlagern durch Auslegungs-, Prozess- oder Verfahrensänderungen deutlich erhöht werden können;
- die Lebens- bzw. Gebrauchsdauer von Großlagern durch eine reibungsreduzierte Auslegung deutlich verlängert werden kann (Effekt in der Anwendung der Großlager);
- die Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit von Anlagen bzw. Produktionsprozessen mithilfe einer Reduzierung von Reibungsverlusten und der Verlängerung der Lagerlebens- bzw. Gebrauchsdauer erhöht werden kann (Effekt in der Anwendung der Großlager).

Im Einzelnen sollen durch den Prüfstand kurzfristig und mittel- bis langfristig folgende Umweltentlastungen (ohne Energierückgewinnung) pro Jahr erzielt werden:

Erwartete Umweltentlastung pro Jahr	Material (Stahl)	Energie	CO ₂ -Ausstoß*
Kurzfristig		9.119 MWh	5.125 t
• Prüfstandseffizienz (repräs. Testszenario)			
Mittel- bis langfristig	156 t	1.591 MWh	626 t
• Reduzierung der Einhärtetiefe • Materialeinsparung (Auslegung) • Reduzierung der Ausfallquote			
GESAMT	156 t	10.710 MWh	5.751 t

CO₂-Umrechnungsfaktoren gemäß Umweltbundesamt 2012 (Datenbasis Antragstellung)

Die kurzfristigen Umwelteffekte ergeben sich insbesondere aus der angestrebten Prüfstandseffizienz bei einem repräsentativen Jahrestestprogramm.

Darüber hinaus werden Effekte aus dem Einsatz von wassergekühlter Leistungselektronik im Prüfstand sowie von wassergekühlten Hydraulikaggregaten (technische Umsetzung nicht im Förderumfang enthalten) erwartet, die es ermöglichen, die bei Prüfläufen anfallende Abwärme effizient in das werkseigene Wärmenetz zurückzuspeisen. Diese würde ansonsten ungenutzt über Kühltürme in die Atmosphäre entweichen. Die Energierückgewinnung ist jedoch nicht Bestandteil der Förderung.

Der aus den kurzfristigen Effekten resultierende, deutlich reduzierte Energieverbrauch sollte im ersten Jahr nach Inbetriebnahme des Prüfstands umsetzbar sein. Im folgenden Kapitel 3 werden die dahingehenden Vorhabensergebnisse bewertet.

Die darüber hinaus angestrebten Ziele einer belastungs- und anforderungsgerechten Bauteilauslegung und einer daraus resultierend reduzierten Ausfallquote.

2.2 Darstellung der technischen Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)

Der geplante dynamische Großlagerprüfstand soll für Prüflager mit Außendurchmessern bis 2,5 m geeignet sein. Nachfolgend sind die quantitativen Leistungsparameter des neuartigen universellen dynamischen Großlagerprüfstands dargestellt, die im Vorhaben umgesetzt wurden:

Leistungsdaten	
Max. Biegemoment	10 MNm
Max. Radiallast	7 MNn
Max. Axiallast	3 MNn
Max. Drehzahl	250 rpm
Max. Antriebsmoment	150 kNm

Das geplante Leistungsprofil ist sehr breit angelegt und v. a. durch hohe abbildbare Radiallasten und hohe darstellbare Drehzahlen auf die Anforderungsspezifikation typischer Anwendungen in der Schwerindustrie ausgelegt.

2.3 Darstellung der Umsetzung des Vorhabens

2.3.1 Darstellung der Arbeitsschritte

Das Vorhaben wurde vom mit der Bestellung des Prüfstands nach Genehmigung der Förderung begonnen.

Die baulichen Maßnahmen begannen mit dem Spatenstich für das neue Großlager-Testzentrums in Schweinfurt (nicht Bestandteil der Förderung), das den geförderten Prüfstand und einen weiteren Großlagerprüfstand heute beherbergt. Der Bau wurde 2017 abgeschlossen (Zeitraffervideo der Bauarbeiten: https://www.youtube.com/watch?v=Kme5Y_Cl0qU). Die baulichen und infrastrukturellen Arbeiten im Zusammenhang mit der Installation des Prüfstands bei SKF umfassten den Bau des Schwingungsfundaments, die Installation der Hydraulikaggregate, der Rohrleitungen und Schläuche für die Hydraulikversorgung und die elektrische Versorgungs- und Sensorleitungen.



Abb. 1: Prüfstandsfundament



Abb. 2: Fertig montierte Hydraulikanlage im Testzentrum (nicht Bestandteil der Förderung)

Parallel dazu begannen nach der Detailkonstruktion und jeweiligen Einzelfreigaben der Bau der Prüfstandskomponenten beim Lieferanten Renk Test System GmbH in Augsburg. Anschließend erfolgte sukzessive der Aufbau und die Installation des Prüfstands bei der SKF.

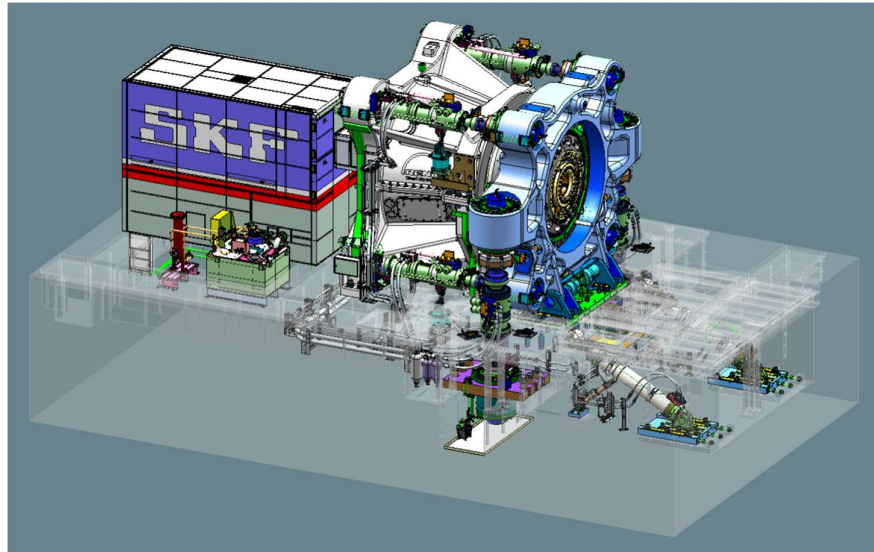


Abb. 3: Prüfstandsmodell



Abb. 4: Montage der Gehäuseteile des Prüfstands (links), Montage der Antriebswelle (rechts)

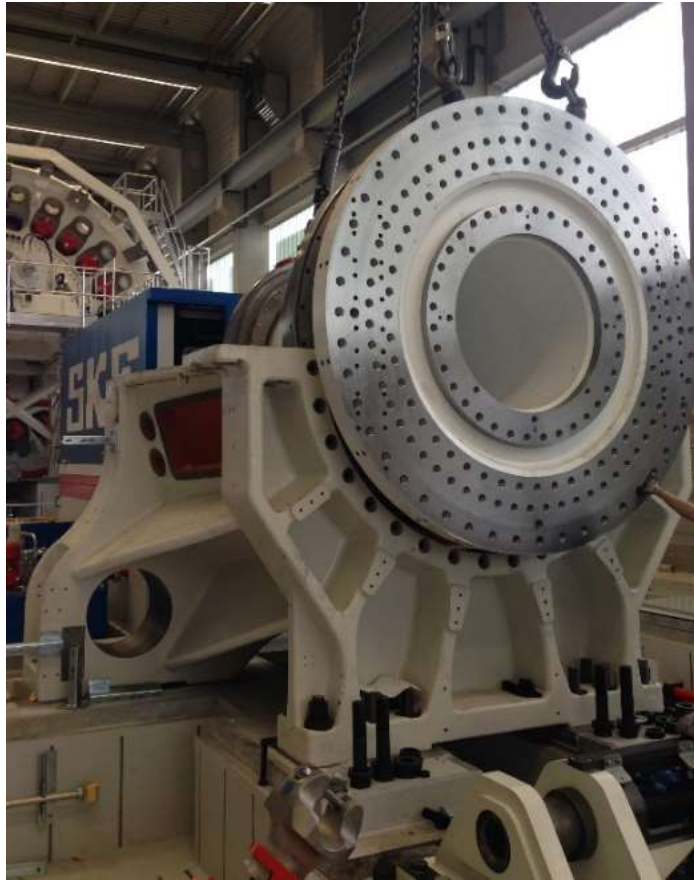


Abb. 5: Montage der Antriebswelle im Prüfstandsgehäuse

Neben dem Prüfstand selbst wurde ein erstes Testlagerpaket bestehend aus Lager, Lageradapter, Messeinrichtungen und Dichtungspaket für die zweite Inbetriebnahmestufe mit Testlager (Abnahmetests) montiert und schließlich mit dem Prüfstand verbunden („Hochzeit“).



Abb. 6: Montage des „Testlagerpaketes“



Abb. 7: Anbindung des „Testlagerpaketes“ mit dem Prüfstand

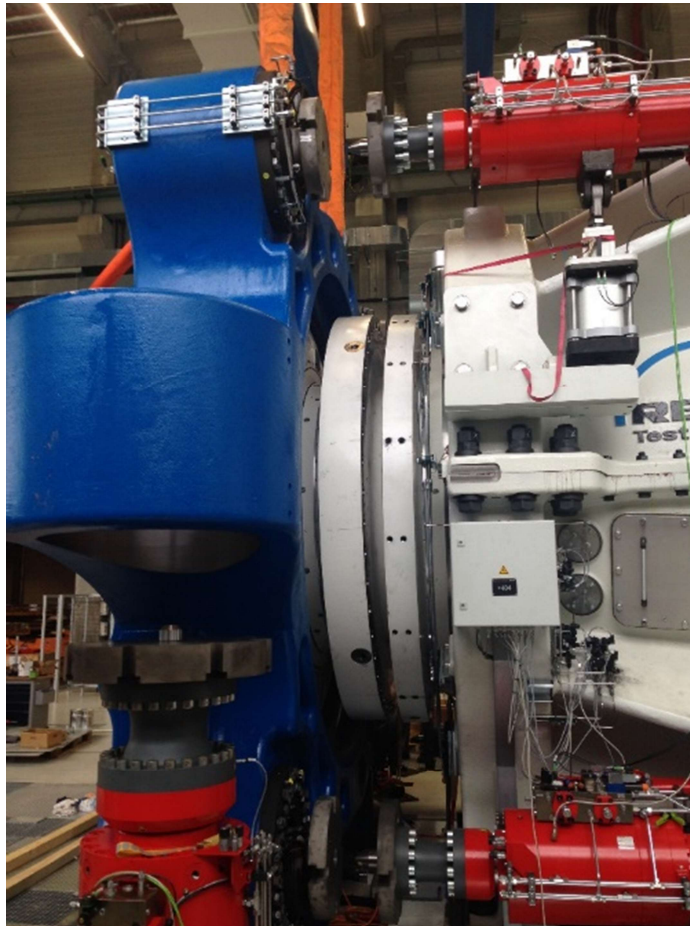


Abb. 8: Installation der Hydraulikzylinder

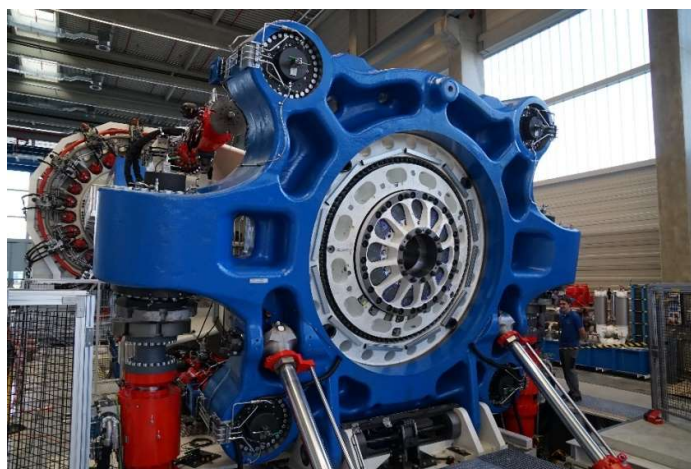


Abb. 9: Abschluss der mechanischen Inbetriebnahme

Die Betriebsübergabe erfolgte nach einer detaillierten und erfolgreichen Inbetriebnahmephase und Betriebsübergabe (zunächst ohne und dann mit Prüflager) im September 2019. Die

verschiedenen technischen Problemstellungen und Verzögerungen, die die Inbetriebnahme und Endabnahme im Dezember 2019 begleiteten, werden im folgenden Kapitel 2.3.2) dargestellt.

Begleitend zum Aufbau des Prüfstands und des Testlagerpakets, beginnend bereits im Rahmen der Detailkonstruktion, erfolgte die Spezifikation der Testläufe, da die Berücksichtigung aller späteren Testanforderungen bereits in der Konstruktion sichergestellt sein musste. Weiterhin war die für die Testläufe vorzusehende Sensorik zu spezifizieren, da diese Sonderbohrungen etc. in der Konstruktion der zu fertigenden Testlager zu berücksichtigen war. Um dem aufgetretenen zeitlichen Verzug bei der Inbetriebnahme entgegenzuwirken, wurde früh eine Parallelisierung der Testaktivitäten entschieden. Somit wurde mit der Nachweisführung bereits im Rahmen der Inbetriebnahme begonnen, indem im Rahmen des Langzeitprüflaufs bereits einzelne Funktionstests durchgeführt wurden. Nach der Inbetriebnahme für den die Tests für die Nachweisführung weitergeführt, bis das Vorhaben am 31.01.2022 beendet wurde.

2.3.2 Darstellung aufgetretener Hemmnisse

Ein dem im Vorhaben umgesetzten universellen, dynamischen Prüfstand vergleichbarer Großlagerprüfstand wurde weltweit noch nie gebaut. Er beinhaltet eine Vielzahl innovativer Komponenten, die im Rahmen des Vorhabens erstmalig zusammenwirken sollten. Die dem Vorhaben vorangegangenen konzeptionellen Arbeiten waren vielversprechend. SKF setzte mit RENK auf einen erfahrenen Partner im Bereich der Prüfstandstechnologie, jedoch musste sich im Vorhaben erst zeigen, ob sich die komplexe Konzeption in die Tat umsetzen ließ und ob der Prüfstand den hohen an ihn gestellten Anforderungen an Messgenauigkeit und Performance gerecht werden konnte. Dies erforderte eine hochpräzise Anfertigung und Montage, uneingeschränkte Funktionsfähigkeit sowie das konzeptgemäße Zusammenspiel der Komponenten. Bereits zum Zeitpunkt der Antragstellung wurden zahlreiche Risiken benannt, die zum Scheitern des Vorhabens führen konnten. Die im Rahmen des Vorhabens aufgetretenen Hemmnisse lassen sich einteilen in:

1. Technische Problemstellungen, die zur Nichteinhaltung der erforderlichen Maßtoleranzen / Messgenauigkeit des Prüfstands führten / geführt hätten, insbesondere Umsetzung der geplanten innovativen Messtechnik zur differenzierten und störgrößenarmen Ermittlung des Reibmoments, hier wurde schließlich ein alternativer ebenfalls innovativer Lösungsansatz gefunden, um die hohen Leistungsanforderungen von SKF zu erfüllen
2. Technische Problemstellungen durch während der Prüfläufe aufgetretene Bauteildefekte, insbesondere Kupplung zwischen Getriebe und Lagerbock, Bauteil zur Spannungsversorgung, Funkmodul der Telemetrieinheit, gerissene Hochdruckleitung der Ölversorgung, Lufträder der Motoren der Hydraulikversorgung, Lagerschaden des Antriebsmotors, Risse in Kolbenstangen der Hydraulikzylinder, Zentrierung der Stützlagerwelle, Plastische Verformung von Verbindungsschrauben unter Last
3. Verzögerungen insbesondere durch
 - Zeitlichen Verzug bei der Montage der Prüfstandskomponenten
 - unvorhersehbar begrenzte Verfügbarkeit der zur Prüfstandsmontage erforderlichen Infrastruktur (v. a. Schwerlastkran) im Testzentrum
 - Beanstandungen in der Vorabnahme / notwendige Korrekturen / Neuanfertigung aufgrund von Spezifikationsabweichungen, nicht ausreichende Bauteilqualität
 - Lieferverzögerungen, verstärkt durch die weltweite Corona-Pandemie (z. B. spezielle Kunststofflufträder Hydraulikantriebe)

- Ungeplanter Zusatz-/ Mehraufwand (z. B. Parametrisierung der Kraftregelung, Fehlersuche / -behebung anomaler Geräusche und anomaler Vibrationen während der Testläufe)
- Ausfall des Testlagers und damit zusammenhängende Aufwände für Prüflagerwechsel, Ursachenanalyse und Anfertigung und Installation eines neuen Testlagers

Im Rahmen des Vorhabens konnte allen aufgetretenen technischen Problemstellungen erfolgreich begegnet werden. Jedoch musste die Projektlaufzeit im Zusammenhang mit den beschriebenen Hemmnissen gegenüber der ursprünglichen Planung deutlich verlängert werden.

2.4 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Die Einrichtung und der Betrieb des Prüfstands bedurften keiner behördlichen Genehmigungen.

2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Erfasst werden sämtliche, den Testbetrieb betreffende Daten, sowohl für den Prüfstand selbst als auch für die Gebäudeinfrastruktur und selbstverständlich die aus den Prüfläufen resultierenden Daten.

Die Messdatenerfassung der Nachweisführung erfolgt mit einem von Seiten der SKF erstellten Programm in „**L**aboratory **V**irtual **I**nstrumentation **E**ngineering **W**orkbench“, kurz LabVIEW genannt. LabVIEW ist ein grafisches Programmiersystem.

In der nachfolgenden Abbildung ist ein beispielhaftes Programm dargestellt:

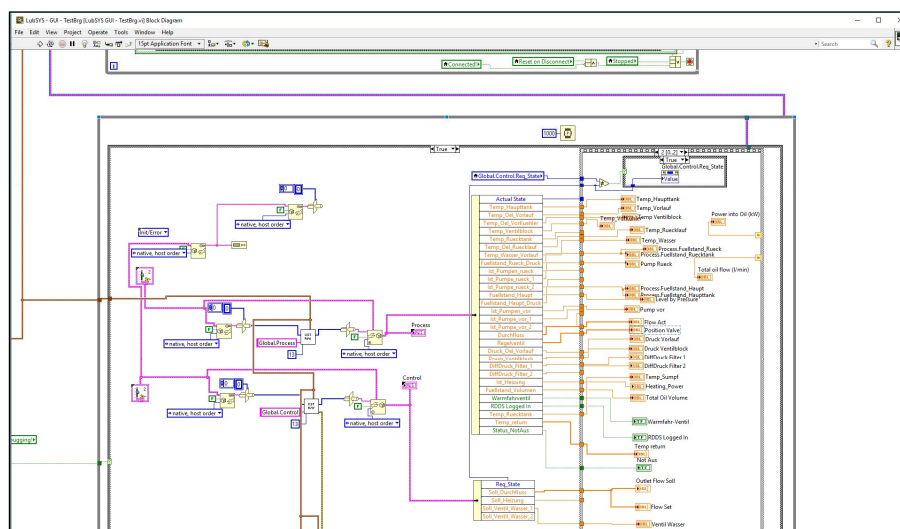


Abb. 10: LabView Programm

Von den mehr als 4.000 zur Verfügung stehenden Messstellen des Prüfstands findet permanent eine Aufzeichnung von mehr als 300 Sensoren statt. Innerhalb von drei Minuten werden somit mehr als 1 GB an Daten erzeugt.

Die Sensorik lässt sich dabei in drei Gruppen aufteilen:

- (1) Prüfstandssensorik
- (2) Prüflingssensorik
- (3) Gebäudesensorik

Im Bereich der **Prüfstandssensorik** werden vor allem die Messdaten erfasst und verarbeitet, die für den Betrieb des Teststandes erforderlich sind. Ausgewählte Sensoren wie Last, Drehzahl und das Biegemoment des Prüflings werden über eine Schnittstelle zu einem speziellen Messsystem, einem verfahrbaren Messschrank mit einer Vielzahl von Messkanälen, weitergeleitet und anschließend mit Hilfe, der LabView Software, visualisiert und gespeichert.

Die **Prüflingssensorik** liefert Daten über den Zustand des jeweiligen Testlagers (Prüfling). Es handelt sich unter anderem um Wirbelstrom-, Temperatur und Schwingungssensoren. Diese besitzen eine direkte Verbindung zum Messsystem.

Über eine Schnittstelle zwischen der Renk-Steuerung und der Technischen Gebäudeausrüstung werden Daten von ausgewählten Sensoren der installierten **Gebäudesensorik** an die Teststandssteuerung / -software übertragen. Dazu zählen beispielsweise die Vor- und Rücklauftemperatur des Kühlwasserkreislaufs. Von dort aus werden sie genauso weiterverarbeitet wie die Prüfstands- und Prüflingssensorik.

In dem nachfolgenden Flussdiagramm ist der Verlauf der Sensorsignale vereinfacht dargestellt.

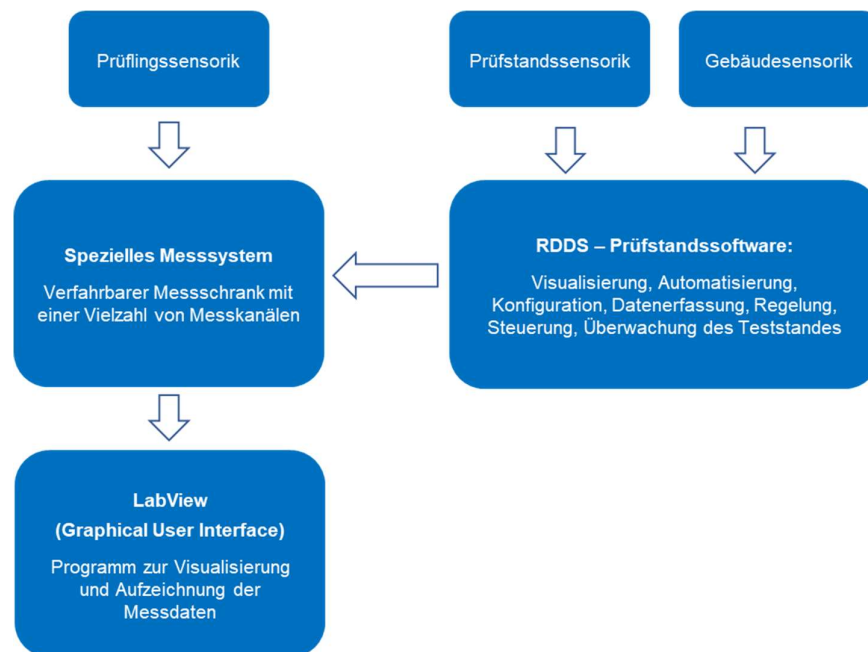


Abb. 11: Signalverlauf Sensorsignale Nachweisführung

Mit der in der nachfolgenden Abbildung dargestellten grafischen Bedienoberfläche können live die Sensorsignale (zum Beispiel der energetische Verbrauch des Teststands) betrachtet und falls erforderlich analysiert werden. Des Weiteren dient sie dazu Messaufzeichnungen der zuvor ausgewählten Sensorsignale zu starten und zu beenden. Sollwertvorgaben für den Prüfstand, aber auch Abschaltungen beim Überschreiten von unterschiedlichen Limits können hiermit generiert werden.

Die aufwendige Programmierung und Inbetriebnahme der Software nahm mehrere Monate in Anspruch und wurde durch SKF umgesetzt.

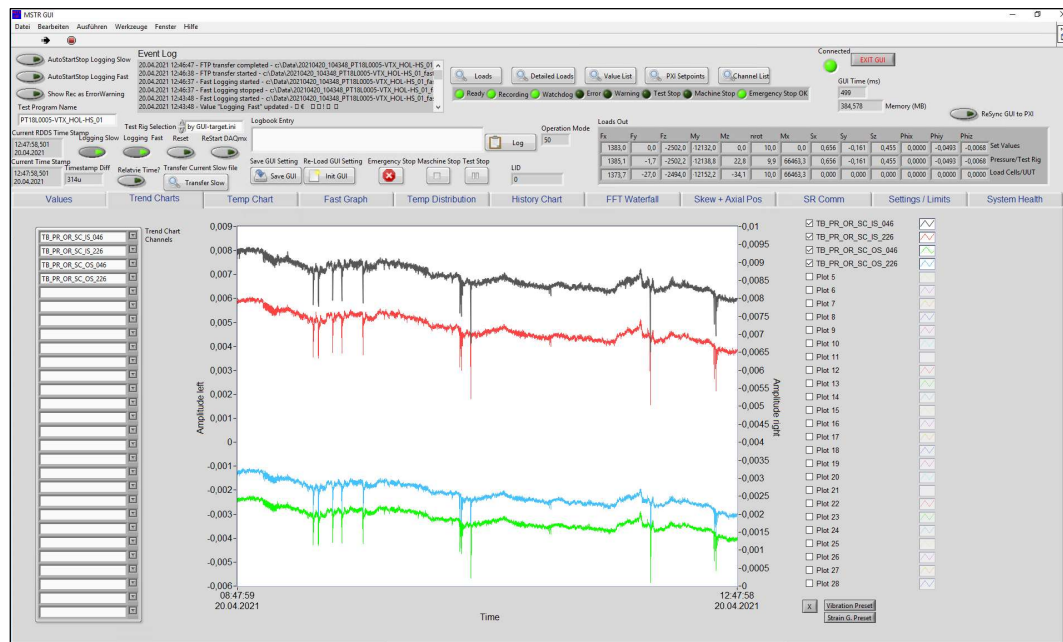


Abb. 12: Grafische Bedienoberfläche Messdatenerfassung

2.5.1 Messdatenauswertung SKF

Zur Auswertung der generierten Daten der Messdatenerfassung wurde ein spezielles Programm in LabVIEW entwickelt, in dem die einzelnen Sensorsignale grafisch dargestellt und analysiert werden. Fest eingestellte Auswertungskriterien für die Nachweisführung wurden gemeinsam mit der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm (im Folgenden THN) erarbeitet und in das Programm integriert. So können energetische Auswertungen entweder auf der Grundlage der unterschiedlichen Lastschritte erfolgen, welche eine eindeutige Identifikationsnummer besitzen oder durch die Festlegung eines bestimmten zu analysierenden Zeitintervalls. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, auf der Grundlage der damit gebildeten Testabschnitte die minimalen, mittleren und maximalen energetischen Verbräuche auszuwerten.

Eine Exportfunktion der Daten ermöglicht die Weitergabe der Daten in der Form einer Excel-Datei an die THN.

In der nachfolgenden Abbildung ist das Programm zur Messdatenauswertung dargestellt.

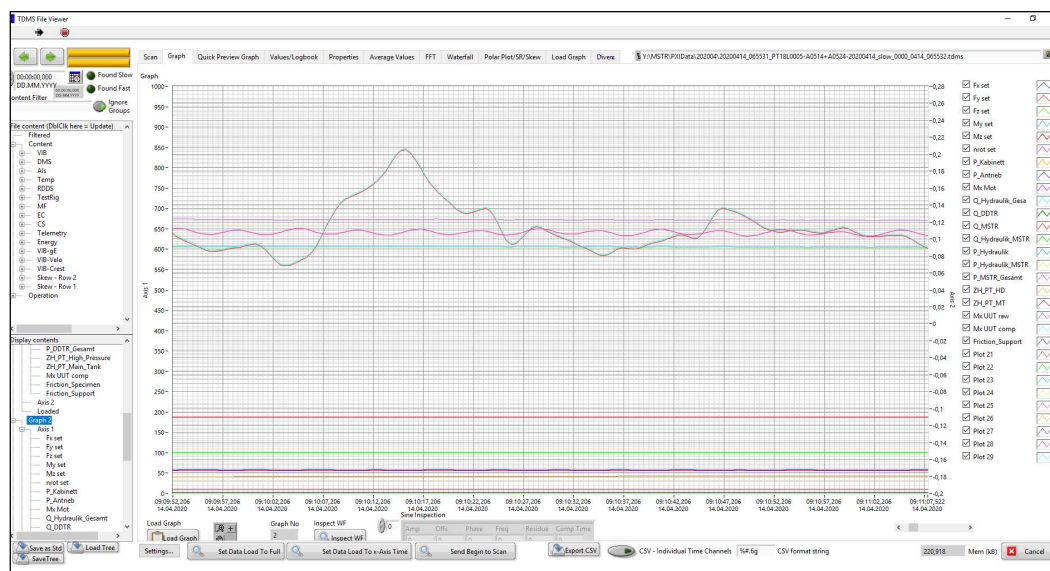


Abb. 13: Programm zur Messdatenauswertung

2.5.2 Validierung der Datenbasis für die Berechnung der Umweltbelastungspotenziale

2.5.2.1 Mess- und Zählerkonzept zur Validierung der Messdatenauswertung

Wie bereits beschrieben, findet permanent eine Aufzeichnung von mehr als 300 Sensoren statt, die es ermöglichen Messdaten auszuwerten. Im Zusammenarbeit mit der THN wurden die benötigten Messpunkte für die Nachweisführung definiert. Weiterhin wurde zur Plausibilitätsprüfung und Validierung der Messergebnisse der Prüfstandssensorik (Quelle: RDDS Prüfstandssoftware) deren Abgleich mit den Messergebnissen der Gebäudesensorik (Quelle: FlowChief) vorgenommen, über einen langen Zeitraum überwacht, Unstimmigkeiten diskutiert sowie Fehler behoben.

Nachfolgend ist exemplarisch das Mess- und Zählkonzept für den Kühlwasserkreis dargestellt, welches den Hochtemperatur- und Niedertemperaturkreislauf beinhaltet. Für die Nachweisführung sind vor allem die Messpunkte im Hochtemperaturnetz von Bedeutung. Mit Blick auf die energetische Nachweisführung wurden die Durchflüsse und Temperaturen berücksichtigt, da diese zur Berechnung der kurzfristigen Umweltentlastungseffekte notwendig sind. Weitere Schemas zur Planung und Dokumentation von Messpunkten wurden für den Kältekreis, den Heizkreis und die Stromverbräuche an Anlagen und Prüfständen erstellt.

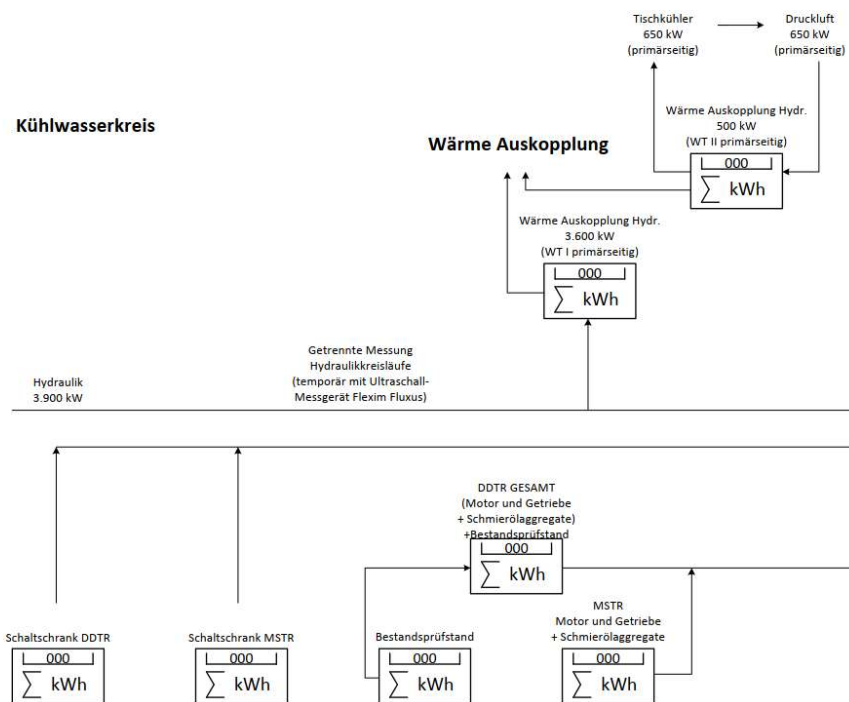


Abb. 14: Mess- und Zählerkonzept Kühlwasserkreis

Die im Gebäude integrierten Sensoren zur Nachweisführung werden, wie oben beschrieben, in einer Software namens FlowChief erfasst.

FlowChief ist ein auf Prozessleittechnik, Energiemanagement und Fernwirktechnik spezialisiertes IT-Unternehmen, welches durch eine datenbankstrukturierte Energiemanagementplattform eine Anlagensteuerung per Webbrowser ermöglicht. Hauptanwendung für die THN ist die Datensammlung und Strukturierung in der zugehörigen Datenbank. Dies ermöglicht einen direkten Zugriff auf die Messwerte und die Möglichkeit diese lokal aufzubereiten und zu analysieren. Das gesamte Konzept setzt sich aus drei Hauptbausteinen zusammen:

1. FlowChief-Bedienstation mit autarker Excel-Makro-Arbeitsmappe zur Konfiguration der Datenpunkte
2. Datenbank zur Strukturierung und Speicherung sowie der Bereitstellung von Daten
3. Webplattform für eine visuelle Live-Überwachung bzw. Steuerung der Anlage sowie zur zielgerichteten Aufbereitung bzw. Voranalyse der Daten mit Zugriff und Exportfunktion aus der Datenbank

Die Schachtelung der drei Systemkomponenten wird „FlowChief“ genannt.

Der von SKF beim FlowChief Prozessleitsystem eingerichtete Server wurde über einen permanenten VPN-Tunnel mit einem Rechner an der THN gekoppelt. Von diesem Client Arbeitsplatz werden die erforderlichen Daten im 24/7-Betrieb vom Server heruntergeladen, in einer eigenen Datenbank abgelegt und parallel gesichert.

Für die energetische Nachweisführung des Prüfstandes werden vor allem die Daten des Kühlwasserkreislaufes herangezogen.

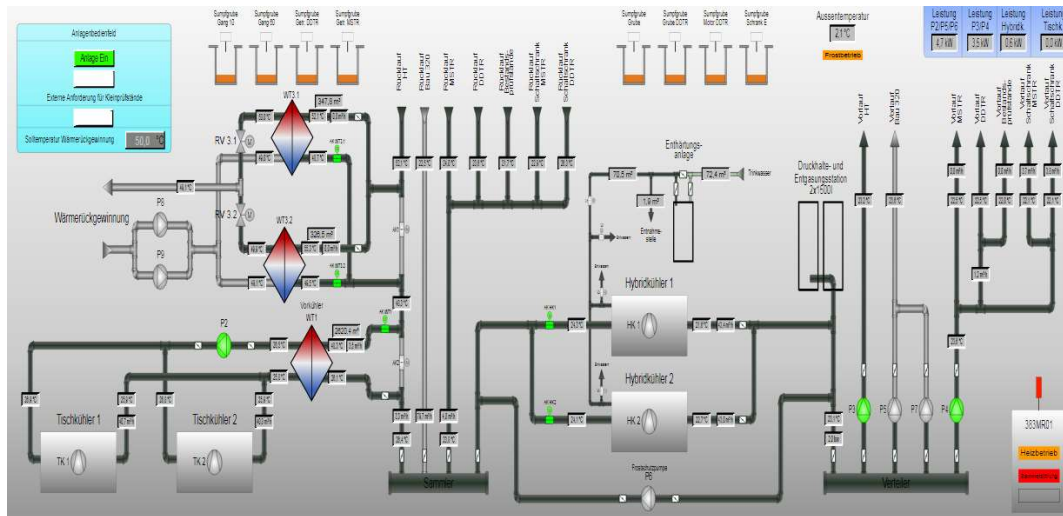


Abb. 15: Energetisches Schnittstellenprogramm FlowChief – Anzeige Kühlwasserkreislauf

Wie bereits beschrieben sind im Kühlwasserkreislauf die wesentlichen Datenpunkte des Prüfstandes wie zum Beispiel Temperaturen, Volumenströme, Leistungen und Anlagenzustände enthalten. Diese werden per Web-Browser visuell dargestellt und können von dort aus analysiert und bewertet werden.

3 Ergebnisse

3.1 Bewertung der Vorhabensdurchführung

Das Vorhaben wurde wie geplant umgesetzt. Wie bei komplexen Projekten des Sondermaschinenbaus die Regel mussten zeitliche Verzögerungen in Kauf genommen werden.

Die Leistungsdaten des Prüfstands wurden wie geplant erreicht:

Leistungsdaten		Zielerreichung
Max. Biegemoment	10 MNm	
Max. Radiallast	7 MNn	
Max. Axiallast	3 MNn	
Max. Drehzahl	250 rpm	
Max. Antriebsmoment	150 kNm	

Die geplanten Innovationen konnten erfolgreich umgesetzt werden, wenn auch für die angestrebte hohe Messgenauigkeit im Rahmen des Vorhabens teilweise nochmals neue Lösungswege beschritten werden mussten (vgl. Kapitel 2.3.2).

Im Einzelnen ermöglicht

- der Prüfstandaufbau eine hohe Varianz an Belastungen für ein breites Spektrum an Großlagern
- die dynamische Lastaufbringung das Testen mit realen Lastprofilen für ein breites Einsatzspektrum
- durch ein Adapterkonzept eine flexible Prüfkörperaufnahme verschiedener eines breiten Spektrums von Großlagern bis 2,5 m Außendurchmesser
- die umgesetzte Messtechnik die Messung der Verlustleistung unter dynamischer Belastung für eine energieeffiziente Auslegung von Lager- und Käfiggeometrien
- die kontinuierliche Zustandsüberwachung des Prüflings unter dynamischer Belastung die Auslegung von insgesamt reibungsoptimierten, energieeffizienten Lagern im Zusammenspiel von Belastung, Schmierung und Geometrie.

Der umgesetzte Großlagerprüfstand wird durch seiner Test- und Messmöglichkeiten

- reale tribologische Eingangsparameter für wissenschaftlich fundierte Berechnungs- und Simulationsmodelle zur Auslegung und Lebensdauerberechnung von Großlagern liefern,
- die Weiterentwicklung und Validierung von Berechnungs- und Simulationsmodellen durch realitätsnahe Prüfstandsläufe und die Weiterentwicklung der Prüfmethodik zur realitätsnahen Nachstellung der Echanwendung in deren Vorfeld ermöglichen,

Die Vorhabensergebnisse sind durchweg positiv zu bewerten. Die durchgeführten Tests führten bereits zu einigen Verbesserungen, die bei SKF und seinen Kunden für Energieeinsparungen mehr Verlässlichkeit sorgen. Auf die bereits kurzfristig ermittelbaren und zukünftigen Umweltentlastungen wird in den folgenden Kapiteln im Detail eingegangen.

3.2 Stoff-, Energie- und Umweltbilanz

Neben den innovativen Aspekten des Vorhabens sind für die Förderung im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms insbesondere die mit dem Vorhaben angestrebten Umweltentlastungspotentiale im Vordergrund.

Wie in Kapitel 2.1 bereits dargestellt wurde im Rahmen der Antragstellung erwartet, durch den Prüfstand kurz- und mittelfristig signifikante Umweltentlastungen pro Jahr erzielen zu können.

Kurzfristig erwartete SKF signifikante und dauerhafte Umweltentlastungspotentiale, durch die bei gleichem Prüfumfang mögliche signifikante Verkürzung der Prüfstandlaufzeit für Lebensdauertests gemäß ISO 281 / L10, um mehr als 90 % auf weniger als einen Monat. Mittelfristig wurden zusätzliche Umweltentlastungspotentiale erwartet, da der neuartige Prüfstand die Voraussetzung für eine Weiterentwicklung spezifischer Berechnungs- und Simulationsmodelle bildet und dadurch in der Zukunft eine an der realen Belastungssituation abgeleitete material- und energieoptimierte Entwicklung und Fertigung von Großlagern ermöglichen soll. In den folgenden Kapiteln wird im Einzelnen auf die Erreichung der Vorhabensziele eingegangen.

Die Effekte und Energieeinsparungen ergeben sich aus einem Jahres-Testprogramm, welches aus der Durchführung eines Überlasttestes und zwei Funktionstests pro Jahr besteht. Die kurzfristigen Einsparungen sind den Überlasttests zuzurechnen, während die mittelfristigen Einsparungen aus Entwicklungen durch Funktionstests resultieren.

3.2.1 Kurzfristige Umweltentlastungen

Die kurzfristigen Umweltentlastungen ergeben sich insbesondere durch die angestrebte Prüfstandseffizienz. Im Vordergrund steht dabei der Zeitraffereffekt der durch eine hohe Lastaufbringung bei der Durchführung von beschleunigten Validierungstests bei Überlast (HALT) bzw. Überdrehzahl (5 Mio. Überrollungen) erreicht werden kann.

Der Nachweis der Wirksamkeit der durchgeführten Maßnahmen erfolgt in Zusammenarbeit mit externer Unterstützung durch THN. Die THN wirkte unter wissenschaftlicher Leitung der Professoren von Großmann und Stephan, unterstützt durch wissenschaftliche studentische Hilfskräfte, an der Testentwicklung, Testdurchführung und Testauswertung mit. Bei der Erstellung der Testprozeduren wurde sich an den vorgegebenen Normen für Lager- und Werkstoffprüfung orientieren (z. B. DIN ISO 281, ISO / TS 16281:2008, DIN EN ISO 2639, DIN ISO 7905 und weiteren Normen). Weiterhin waren sie für die Objektivierung und Plausibilisierung der Nachweisführung der unmittelbar aus dem Vorhaben resultierenden Energieeinsparung (Funktionstests, Überlast- bzw. Lebensdauertests) verantwortlich.

Angestrebte jährliche Effekte ggü. Stand der Technik	Zielsetzung	Zielerreichung	
Energieeinsparung kurzfristig (ohne Wärmerückgewinnung)	9.119 MWh	27.474 MWh	✓
CO ₂ -Reduzierung (CO ₂ -Faktoren Antragstellung 2014)	5.125 t	15.414 t	✓
CO ₂ -Reduzierung (CO ₂ -Faktoren 2021)	3.504 t	11.519 t	✓

Detailberechnungen siehe Anlage 1 (vertraulich)

Zum Zeitpunkt der Abgabe des Abschlussberichts konnte noch kein vollständiger Überlasttest durchgeführt werden. Da jedoch konstante Prüfbedingungen und Energieverbräuche der Motoren und Hydraulikaggregate bestehen, ist eine Hochrechnung auf Basis der durchschnittlichen Energieverbräuche der durchgeführten Testläufe in Rücksprache mit dem Umweltbundesamt (UBA) zulässig. Die mit der Energieeinsparung einhergehenden Reduzierung von Treibhausgasemissionen (CO₂-Emissionen) wird mit Hilfe zwei verschiedener CO₂-Emissionsfaktoren bewertet:

1. Dem Antrag zugrunde liegender CO₂-Emissionsfaktor für den Strommix Deutschland veröffentlicht vom UBA 2014⁴, um eine Vergleichbarkeit zum Antrag zu erreichen.
2. Hochgerechneter CO₂-Emissionsfaktor für den Strommix Deutschland das Jahr 2021 veröffentlicht vom UBA 2022⁵, um eine aktuelle Bewertung zu erreichen.

Die spezifischen Treibhausgas-Emissionen im deutschen Strommix steigen nach sinkenden Zahlen bis 2020 aktuell wieder an. Das zeigen aktuelle Berechnungen des UBA. Für das Jahr 2020 lag der Emissionsfaktor auf Basis vorläufiger Daten bei 375 g CO₂/kWh. Hochgerechnete Werte für das Jahr 2021 ergeben bereits 420 g CO₂/kWh. Vor allem die wirtschaftliche Erholung und damit einhergehende höhere Stromnachfrage trotz anhaltender Pandemie und die geringere Stromerzeugung durch erneuerbare Energien im Vergleich zum Vorjahr führte im Jahr 2021 wieder zu höheren Emissionen. Verstärkt wird diese Entwicklung durch vermehrten Einsatz von Kohle zur Stromerzeugung aufgrund gestiegener Erdgaspreise.

Unter Berücksichtigung von notwendigen Wartungsintervallen und Montagezeiten für die Prüflager, wird davon ausgegangen, dass ein repräsentatives Jahrestestprogramm gestaltet sein kann:

Test	Testanzahl pro Jahr
Validierungstest Überlast (HALT, zeitabhängige Ermüdung) oder Überdrehzahl (5 Mio. Überrollungen, zeitabhängige Abnutzung)	1
Funktionstest (Standard, zeitunabhängige Funktionsprüfung)	2

Die bisherigen Erfahrungen aus der Wärmerückgewinnung (technische Umsetzung nicht Teil des Fördervorhabens) lassen erwarten, dass bei Validierungstests voraussichtlich etwa 15 % der eingesetzten Energie als Wärme aus den Prüfstandsläufen zurückgewonnen werden können. Da die Daten bei den meisten bisher durchgeführten Prüfläufen jedoch noch nicht auf den einzelnen Prüfstand bezogenen auswertbar waren, wurden sie in der Quantifizierung nicht berücksichtigt.

3.2.2 Mittelfristige Umweltentlastungen

Die mittelfristigen Umweltentlastungen durch eine veränderte Auslegung und Herstellung der Großlager können, wie bereits im Rahmen der Antragstellung dargelegt, nicht unmittelbar im Rahmen des Vorhabens nachgewiesen werden. Die angestrebten Veränderungen greifen in

⁴ 562 g/kWh (2012), https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/climate_change_23_2014_komplett.pdf

⁵ 420 g/kWh (2021) https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-04-13_cc_15-2022_strommix_2022_fin_bf.pdf

den Kern der Lagerentwicklung und -lebensdauer ein. Im Rahmen der Antragstellung wurden beispielsweise angeführt:

- die Reduzierung des Stahleinsatzes durch angepasste Auslegung (Antragsannahme: Reduzierungspotenzial 5 %)
- die Reduzierung der Einhärtetiefe (Antragsannahme: Reduzierungspotenzial 15 %)
- die Reduzierung der Ausfallquote (Antragsannahme: Reduzierungspotenzial um 50 % bei den relevanten Lagern)

Solche Veränderungen können bei Versagen der Lager sehr kritische und kostenintensive Folgen haben, die für SKF und deren Kunden nachhaltigen wirtschaftlichen Schaden bedeuten können. Deshalb werden detaillierte nachweisbare Untersuchungsreihen und Analysen des Lagerverhaltens benötigt, um Kundenakzeptanz und eine Änderung der „design rules“ für große Lager bei SKF zu erreichen. Dies ist im Rahmen des Vorhabens nicht zu leisten.

Jedoch konnten im Rahmen des Vorhabens bereits erste wichtige Schritte in Richtung mittelfristiger Umwelteffekte erreicht werden. Im Vordergrund stand dabei die Weiterentwicklung von Simulationsmodellen (Digitaler Zwilling) für die Auslegung.

Weiterentwicklung von Berechnungs- / Simulationsmodellen	
Gewinnung von Validierungsdaten zu wissenschaftlich fundierten Berechnungs- und Simulationsmodellen für die Auslegung und Lebensdauerberechnung von Großlagern	
Datenbasis zur Weiterentwicklung von Modellen für realitätsnahe Prüfstandläufe (Digitaler Zwilling), um einen Verzicht auf die üblichen Feldtests zu ermöglichen	
Datenbasis für an realen Belastungssituationen abgeleitete Bauteilauslegung von Großlagern	

Durch die Verquickung der Nachweisführung im Rahmen des Vorhabens mit „echten“ Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten und Anwendungsfällen im Rahmen des Vorhabens konnten, anders als noch in der Antragstellung angenommen, auch bereits erste Testläufe im Zusammenhang mit Bauteilen von Windkraftlagern durchgeführt werden, die beispielhaft aufzeigen, dass die mittelfristig erwarteten Umwelteffekte realistisch erreichbar sind. Beispielhaft anzuführen sind insbesondere:

(1) Verfahrensumstellung auch induktives Härteverfahren bei Wälzkörpern

Die Wälzkörper dienen dazu, dass sich Innen- und Außenring eines Lagers bei minimaler Reibung bewegen können. Dem bisherige Markt-Standard für mehrreihige Zylinderrollenlager für die Schwerindustrie entspricht es, durchbohrte Rollen als Wälzkörper einzusetzen, die in Bolzenkäfigen geführt werden. Um diese Rollen herzustellen, musste bislang ein Einsatzhärteverfahren angewendet werden, um eine Randschichthärte in ausreichender Tiefe sicherzustellen. Einsatzhärteverfahren sind unter mehreren Gesichtspunkten energieintensiv:

- es müssen verfahrensbedingt hochlegierte Stähle eingesetzt werden,
- es kommen fossile Prozessgase zum Einsatz,

- die Bauteile müssen über einen langen Zeitraum in einem Ofen verweilen, um die Randschicht zu erzeugen.

Die von SKF durchgeführte Neuentwicklung der Rollen setzt auf induktiv gehärtete Rollen. Für diese kann niedriglegierter Stahl zum Einsatz kommen, das zielgerichtete Induktivhärtungsverfahren benötigt eine signifikant kürzere Prozesszeit von mehreren Tagen auf wenige Minuten, weniger Energie und der Einsatz von fossilen Prozessgasen entfällt. Mit jeder induktiv gehärteten Rolle kann der Einsatz teurer und in der Herstellung energieintensiver Legierungselemente um 75 % und der kumulierte Energieeinsatz (KEA) um 55 % reduziert werden.

Um die zuverlässige Einsetzbarkeit dieser neuen Technologie über die erwartete Lebensdauer hinsichtlich Belastbarkeit und Dauerhaltbarkeit unter Beweis zu stellen und die damit verbundenen Umwelteffekte zu heben, wurden und werden verschiedene Versuchsreihen auf dem Prüfstand durchgeführt.

(2) Materialsubstitution von Stahl durch hochfeste Kunststoffe bei Käfigen

Die Aufgabe von Käfigen ist das Führen der Wälzkörper. Diese sind in einem Käfig gleichmäßig angeordnet und können sich gegenseitig nicht berühren. Zudem verhindern Käfige bei teilbaren Lösungen wie z. B. Kegelrollenlagern das Herausfallen der Wälzkörper. SKF hat neuartige Käfigvarianten auf hochfesten Kunststoffen für mehrreihigen Zylinderrollenlagern entwickelt, die beispielsweise die Windindustrie zum Einsatz kommen. Heute entsprechen gefräste Stahlkäfige dem Stand der Technik.

Die Windgetriebelager laufen in der Regel in der Anwendung mit einer geringeren Drehzahl. Diese Anforderungen ermöglichen eine von SKF bereits bei Windhauptlagern erfolgreich erprobte Verwendung von speziellen hochfesten Kunststoffen Segmentkäfigen, welche jeweils eine Rolle umschließen und führen. Diese Kunststoffkäfige wiegen lediglich ein Bruchteil des Stahlkäfigs und benötigen in der Herstellung weniger Material und sind energieeffizienter. Über die große Stückzahl an Windgetriebelagern können dadurch hohe Energieeinsparungen erzielt werden.

Auf dem Prüfstand durchgeführte Funktionstests bestätigte die Funktion des Käfigs unter allen Anwendungsbedingungen (z. B. Schockbelastung, Rollenkinematiken, Anlaufverhalten in belasteten und unbelasteten Zonen) und ebneten so den Weg für die Markteinführung und die damit verbundenen Umwelteffekte. Pro produziertem Lager können durch die Materialsubstitution im Durchschnitt rd. 90 kg Stahl und somit 88 % Gewicht eingespart werden. Der kumulierte Energieeinsatz (KEA) kann um 98 % reduziert werden.

Die nachfolgenden Darstellungen zeigen, dass der Prüfstand den wichtigen Zweck erfüllt, für den er vorgesehen ist: Er ermöglicht es Entwicklungen, mit denen teilweise technisches Neuland betreten wird und die signifikante Umwelteffekte versprechen, vorab dynamisch, unter anwendungsspezifisch realistischen Bedingungen zu testen. Durch dieses Vorgehen können mögliche Unwägbarkeiten und Schwachstellen vor einer Markteinführung im Detail untersucht und behoben werden. Teure Ausfälle und dadurch bedingte Imageschäden können vermieden werden. Auch ergeben sich weitere, sekundäre Effekte, da durch die Vermeidung von Lagerausfällen gleichzeitig weniger Material und Energie für die Lagerproduktion eingesetzt werden müssen.

Eine Reduzierung der Ausfallquote wurde in der folgenden Quantifizierung der mittelfristigen Umwelteffekte der o. g. Beispiele nicht berücksichtigt, da dies erst nach einer Markteinführung zu bewerten ist.

Beispiel 1: Verfahrensumstellung Einsatzhärten vs. Induktivhärten (Rollen)
Effekte pro Jahr (ohne Volumenanstieg)

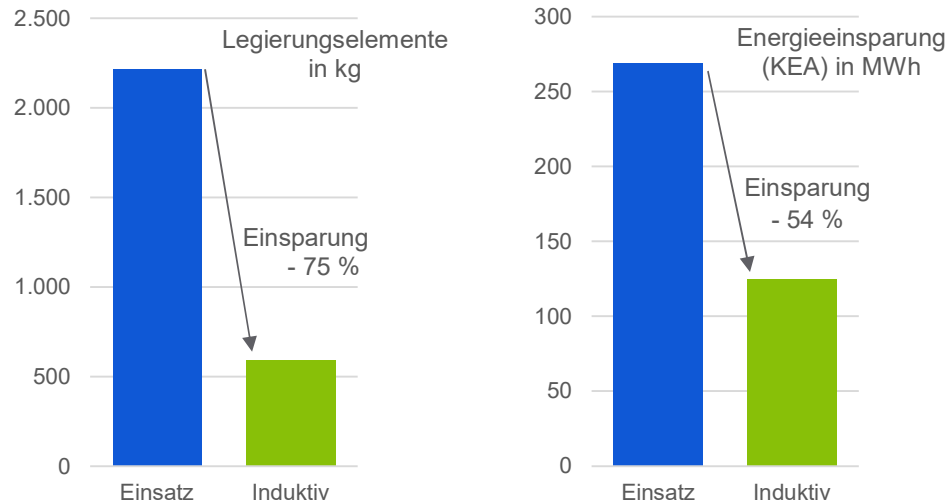


Abb. 16: Jährliche Effekte durch Verfahrensumstellung Einsatzhärten vs. Induktivhärten (Detailberechnungen siehe Anlage 2 (vertraulich))

Beispiel 2: Materialsubstitution: Stahl vs. Kunststoff (Käfige)
Effekte pro Jahr (ohne Volumenanstieg)

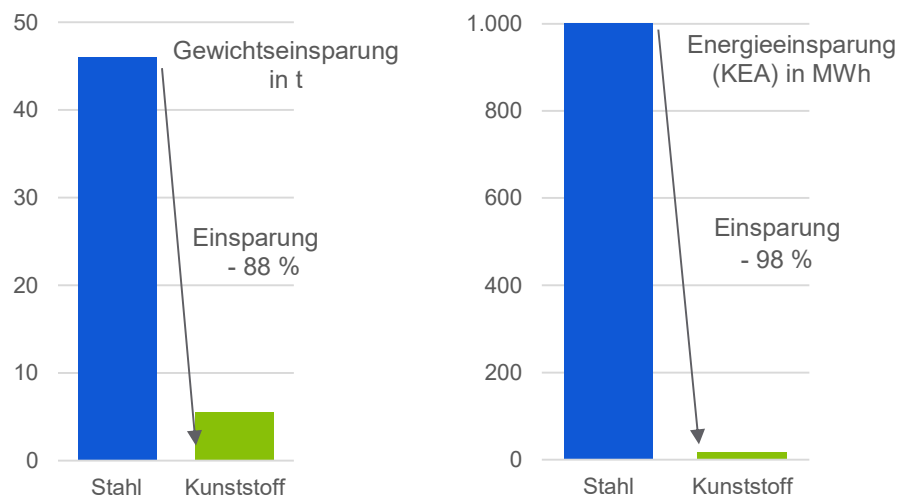


Abb. 17: Jährliche Effekte durch Materialsubstitution: Stahl vs. Kunststoff (Detailberechnungen siehe Anlage 2 (vertraulich))

3.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Investitionskosten für das Vorhaben beliefen sich auf insgesamt rd. 8 Mio. Euro und wurden gegenüber der Antragstellung mit 1,4 % überschritten. Die wesentliche Kostenpositionen waren die Kosten für den Prüfstand (87 % der Investitionskosten) sowie sein

Schwingungsfundament inklusive Montage und Inbetriebnahme des Prüfstands durch internes Personal und Zulieferer.

Es werden durchschnittliche jährliche Betriebskosten von rd. 2 Mio. Euro für Wartung, Personal, Equipment und Energie erwartet. Diese sind durch gestiegene Energiekosten gegenüber der Antragstellung deutlich angestiegen.

Diesen Kosten stehen durchschnittliche jährliche Erträge / Einsparungen durch

- Energieeinsparungen
- Materialeinsparungen
- Reduzierung der Ausfallquote
- Mehrabsatz

Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der Investition werden zwei Szenarien, ein Worst- und ein Best-Case-Szenario, unterschieden, die im prognostizierten Mehrabsatz, der Wirksamkeit der Reduzierung der Ausfallquote und der Höhe der Materialeinsparung, auf Basis der bereits erreichten und unmittelbar absehbarer Effekte voneinander abweichen (Detailberechnungen siehe Anlage 3 (vertraulich)).

Worse Case Szenario*	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Betriebskosten	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Summe erwarteter Erträge / Einsparungen	194	3.218	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593
Überschuss	-1.806	1.218	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593	1.593
Kumuliert	-9.905	-8.686	-7.093	-5.500	-3.906	-2.313	-720	873
Kumuliert mit Zuschuss	-8.308	-7.089	-5.496	-3.903	-2.309	-716	877	2.470

* Einheit Tausend Euro

Best Case Szenario*	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Betriebskosten	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Summe erwarteter Erträge / Einsparungen	319	3.918	4.543	4.543	4.543	4.543	4.543	4.543
Überschuss	-1.681	1.918	2.543	2.543	2.543	2.543	2.543	2.543
Kumuliert	-9.780	-7.861	-5.318	-2.775	-231	2.312	4.855	7.398
Kumuliert mit Zuschuss	-8.183	-6.264	3.721	-1.178	1.366	3.909	6.452	8.995

* Einheit Tausend Euro

Für die beiden Szenarien ergeben sich mit und ohne Berücksichtigung des erhaltenen UIP-Zuschusses folgende Amortisationszeiten:

	Best Case	Worst Case
Amortisationszeit ohne UIP-Zuschuss	5,09 Jahre	7,45 Jahre
Amortisationszeit mit UIP-Zuschuss	4,46 Jahre	6,45 Jahre

3.4 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, ist das Leistungsprofil des Großlagerprüfstands sehr breit angelegt und v. a. durch hohe abbildbare Radiallasten und hohe darstellbare Drehzahlen auf die Anforderungsspezifikation typischer Anwendungen in der Schwerindustrie ausgelegt. Der geplante SKF-Prüfstand steht damit im Gegensatz zum ASTRAIOS als zum Zeitpunkt der Antragstellung einzigem existierenden dynamischen Großlagerprüfstand weltweit, der als Stand der Technik betrachtet werden kann. Dieser ist mit seinem hohen darstellbaren Biegemoment, seinen im Vergleich

- geringeren darstellbaren Radiallast von 4 MN
- geringeren darstellbaren Drehzahl von 20 rpm (60 prm unter Lastreduzierung)

auf die Prüfung von windkraftspezifischen Lagern ausgelegt und für Prüfungen von Anwendungen der Schwerindustrie ungeeignet.

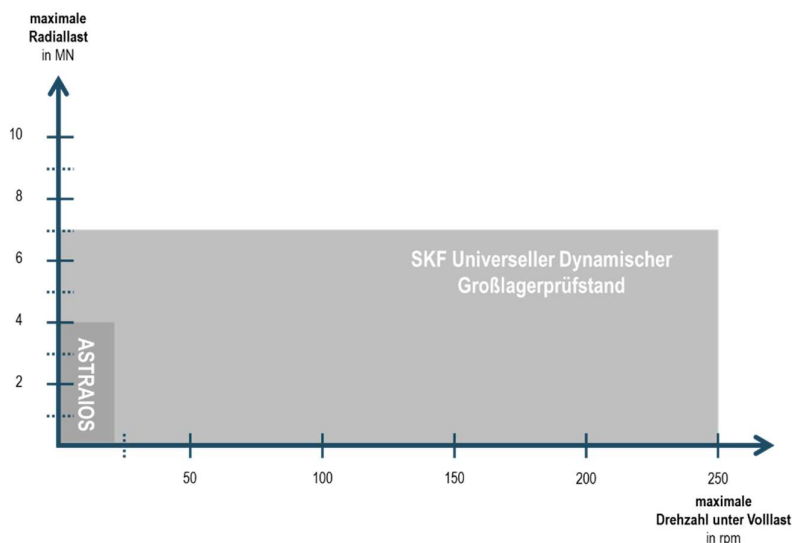


Abb. 18: Technischer Vergleich des Prüfstands mit konventionellen Verfahren

Der geplante dynamische Großlagerprüfstand ist mit seinem Leistungsprofil als Universalprüfstand zur Erprobung und Weiterentwicklung von Großwälzlager unterschiedlichster Industriebereiche ausgelegt und geeignet. Er kann sowohl zur Erprobung schnell-drehender und sehr niedrigbelasteter Lagerungen, z. B. Lagerungen für Aluminiumfolienwalzen, als auch schnell-drehender und hochbelasteter Lager, z. B. Arbeitswalzenlager in Stahlwalzwerken (kontinuierliche Tandemanlagen), eingesetzt werden.

Ein hinsichtlich seiner technischen Merkmale und seines Leistungsspektrums vergleichbarer Teststand ist am Markt nach wie vor weder bekannt noch verfügbar.

4 Empfehlungen

4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Der umgesetzte Prüfstand wurde von Beginn an als „Universeller dynamischer Prüfstand für große Lager“ für verschiedenste Anwendungsgebiete geplant. Es handelt sich um ein Projekt des Sondermaschinenbaus, diese und das breite darzustellende Leistungsspektrum ließen von Beginn an viele Unwägbarkeiten bis hin zu Risiken zu erwarten, die es zu beherrschen galt. Eine enge Zusammenarbeit und konsequente Steuerung der Lieferanten sowie eine kontinuierliche Qualitätssicherung sind in solchen Projekten eine Grundvoraussetzung, um diese zum Erfolg führen zu können. Als wesentliche Erfolgsfaktoren sind zu nennen:

- Eine universelle Auslegung ist wesentlich für eine breite Einsetzbarkeit und Zukunftsfähigkeit eines solchen Prüfstands.
- Die Prüfhalle sollte ausreichend Platz auch für mögliche spätere Erweiterungen aufweisen, um die Zukunftsfähigkeit sicherzustellen.
- Eine detaillierte technische Spezifikation, eine zuverlässiger, erfahrener Lieferant der seinerseits über ein breites und etabliertes Netzwerk an Lieferanten verfügt sowie eine regelmäßige, verbindliche Kommunikation zu Design Reviews, möglicherweise erforderlichen Change Requests, Zielen und Zeitplänen sind die Grundvoraussetzung für den Projekterfolg. Factory Acceptance Tests beim Lieferanten vor Auslieferung sind bei Großkomponenten/-systemen unerlässlich.
- Ein schneller und flexibler Montageprozess sollte von Beginn an eingeplant werden, um für Funktionstests ohne zeitliche Verzögerungen umbauen zu können.
- Es empfiehlt sich viel Sensorik und ausreichend Platz für Messtellen einzuplanen, um Daten zur Verfügung zu haben und auf Unvorhergesehenes schnell reagieren zu können. Testspezifikationen sollten sehr früh im Projekt definiert werden, um einsprechende Sensorik am Prüfstand aber auch entsprechende Vorbereitungen an den Prüflingen vorzusehen.
- Simulationsmodelle (Digitaler Zwilling) des Prüfstands ermöglichen eine schnelle Identifikation und Lösungsfindungen von Problemstellungen.
- Es sollte immer eine ausreichende Zahl Prüflinge vor Ort verfügbar sein, um bei Ausfällen schnell reagieren zu können.
- Ein entkoppeltes Fundament ist essenziell, um bei dynamischen Lasten Vibrationsemissionen, mögliche Fehlmessungen und Störeffekte auf andere Teststände oder Anlagen zu vermeiden.

4.2 Modellcharakter (Verbreitung und weitere Anwendung)

Der angestrebte Teststand ist für ein breites Anwendungsspektrum an großen Lagern für verschiedenste Industrien einsetzbar, insbesondere in der Schwerindustrie (z. B. in Stahlwalzwerken, Papiermaschinen, Mühlen) und in der Antriebstechnik (z. B. Windkraftanlagen). Die neuartige modulare Prüfstandstechnologie, die SKF ein energieeffizientes, flexibles Testen von Großkomponenten, eine anforderungsgerechte Auslegung und eine energie- und materialeffiziente Fertigung erlaubt, ist sowohl als Ganzes als auch hinsichtlich seiner innovativen Komponenten und Messtechnik auf jedes Unternehmen und auf jede Testeinrichtung übertragbar, die hochbelastete Großkomponenten (z. B. Hauptwellen von Windkraftanlagen) dynamisch

testen und eine hohe Messgenauigkeit erreichen wollen. Die Prüfstandstechnik ist überall dort von Interesse, wo eine Lasteinleitungen über mehrere Achsen mit hoher Kraft realisiert werden muss. Beispiele hierfür sind eine große Bandbreite an Prüfständen für z. B. komplette Windenergieanlagen, Großgetriebe (z. B. Windindustrie, Marine, Schwerindustrie, Sonderfahrzeuge), Bahn-Radsätze (Schienenindustrie), Wellenlagerungen großer Generatoren (Kraftwerksindustrie).

Jenseits der Prüfstandstechnologie können die innovativen Komponenten aber auch in Hexapoden (z. B. in Simulatoren oder der Robotik) zum Einsatz kommen. Die Messtechnik zur Verlustmessung kann in ähnlichen Anwendungen zum Einsatz kommen, in denen im Verhältnis zum Komponentengewicht kleine Verlustmomente zu messen sind. So kann z. B. der Wirkungsgrad von Großgetrieben genauer als heute bestimmt werden.

Vor diesem Hintergrund verfügt das Vorhaben über eine hohe Multiplikatorwirkung.

4.3 Zusammenfassung

Technisches Ziel des Projektes war es, mit Hilfe des geförderten Prüfstands, erstmals die empirische Ermittlung realitätsnaher Belastungsdaten als Inputgröße für eine wissenschaftlich fundierte Berechnung und Simulation (Digitaler Zwilling) zu erreichen. Diese sollen als Basis dienen für eine belastungskonforme Auslegung und Fertigung von Großlagern für verschiedensten industrielle Anwendungen, in denen sie hohen Drehzahlen in Kombination mit hohen statischen und dynamischen Radial- und oder Axiallasten ausgesetzt sind. Die Lebens- bzw. Gebrauchsdauer von Großlagern soll mit Hilfe der neuen Testmöglichkeiten und bisher nicht gekannten Messgenauigkeiten signifikant verlängert, die Betriebssicherheit der Lager erhöht und die Ausfallquote reduziert werden. Durch den Prüfstand wird eine an den realen Belastungsbedingungen orientierte, ressourcenschonende Auslegung und Entwicklung von Großlagern und Großlagerkomponenten möglich, die erhebliche Energie- und Materialeinsparungen erlaubt. Weiterhin sollte der Prüfstand durch seine hohen Drehzahlen und Lasten über eine hohe Testeffizienz erlauben.

Auch wenn den Projektlaufzeit aufgrund technischer Herausforderungen und zuletzt durch die Auswirkungen der weltweiten Corona-Pandemie gegenüber der ursprünglichen Planung verlängert werden musste, wertet SKF das Vorhaben als vollen Erfolg. Bereits während des Vorhabens wurde deutlich, dass der Prüfstand seine technischen Ziele erfüllt. Weiterhin wurden die erwarteten Energieeinsparungen gegenüber dem Stand der Technik durch die hohe Prüfstandeffizienz voll erfüllt bzw. sogar weit überschritten.

Die bisher durchgeführten Testreihen lieferten bereits neue Erkenntnisse in etlichen Anwendungsbereichen. Zuerst wurde die Funktion von Pendelrollenlagern validiert, die speziell für Windturbinenhauptlager entwickelt wurden. Diese führte im Feld bereits zu Einsparungen durch technische Verbesserungen (z. B. Bauteilreduzierung, Reibungsreduzierung). Weiterhin wurden, wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, innovative Bauteilvarianten von Zylinderrollenlagern für die Schwerindustrie getestet. Im Einzelnen handelte es sich dabei um mit neue Härteverfahren gehärtete Wälzkörper und speziell entwickelte Käfige, in denen eine Materialsubstitution von Stahl zu hochfesten Kunststoffen umgesetzt wurde. Diese wurden für ihre jeweiligen Anwendung mit speziell entwickelten Testverfahren getestet. Diese Ergebnisse zeigen eindrücklich, dass die erwarteten mittelfristigen Effekte durch die Nutzung des Teststands zur Validierung von Neuentwicklungen absolut realistisch sind.

Neben den vielfältigen Möglichkeiten bei Funktionstests überzeugt der Prüfstand ebenfalls bei Lebensdauertests, bei denen hohe Kontaktspannungen und viele Überrollungen die

Dauerfestigkeit der Testlager in kurzer Zeit validieren können. So führten in den bisher durchgeführten Lebensdauertests bereits rund 75 Millionen hochbelastete Überrollungen zu einem Testergebnis, welches in der Anwendung viele Jahre benötigen würde.

Auch die Weiterentwicklung von digitalen Zwillingen der Prüflager und die Verknüpfung von realen Testdaten mit simulierten Testszenarien wird die Entwicklung durch eine zielgerichtete Validierung verbesserter Lager weiter beschleunigen. Die Tests auf dem Prüfstand können mit Simulationsmodellen in hybriden Testverfahren verknüpft werden, wodurch beides effizienter und genauer wird.

5 Veröffentlichungen zum Vorhaben

Folgende Veröffentlichungen bzw. öffentlichkeitswirksame Aktivitäten im Zusammenhang mit dem Vorhaben wurden bereits getätigt (Links abgerufen am 16.05.2023):



Information im Rahmen der Internetpräsenz des Unternehmens, erfolgten insbesondere im Zusammenhang mit dem Bausbeginns und der Eröffnung des Testzentrums 2015 und 2017.

<https://www.skf.com/de/industries/wind-energy/large-size-bearing-test-centre-for-wind>

<https://windfarmmanagement.skf.com/taking-the-environmental-lead/>



Veröffentlichungen im Kundenmagazin „SKF InfoMagazin“ der SKF GmbH, worin Kunden über Neuigkeiten bei SKF informiert werden, <http://www.skf.com/de/news-and-media/InfoMagazin/index.html>

Veröffentlichungen erfolgten wie folgt:

- Ausgabe 03/2016
- Ausgabe 04/2016



<http://evolution.skf.com/de/>

Veröffentlichungen im Technik- und Wirtschaftsmagazin „Evolution“ der SKF Gruppe

Die Druckausgabe erscheint viermal im Jahr in 12 Sprachen. Die Onlineausgabe erscheint in acht Sprachen.

- <https://evolution.skf.com/de/staerkstes-grosslager-pruefzentrum-der-welt-nimmt-betrieb-auf/>
- https://www.skf.com/binaries/pub41/Images/0901d196806ea7bb-Worlids-most-powerful-large-size-bearing-test-centre-in-operation_2017_E4_DE_pdf_tcm_41-313232.pdf
- <https://evolution.skf.com/de/deutschlands-staerkstes-top-model/>
- <https://evolution.skf.com/de/kluger-koloss/>



Vorstellung des geplanten Testzentrums mit innovativen Testmöglichkeiten auf der HANNOVER MESSE 2015 (Übergabe Zuwendungsbescheid)



Veröffentlichungen in einschlägige Fachzeitschriften und Branchenmedien wie, MM MaschinenMarkt , Konstruktion und Entwicklung, Konstruktionspraxis, Antriebstechnik, Scope

- <https://www.konstruktion-entwicklung.de/skf-grosslager-pruefzentrum>
- <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/skf-eroeffnet-leistungsfahigstes-grosslager-pruefzentrum-der-welt-a-618657/>
- <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/skf-baut-leistungsfahigste-grosslager-pruefzentrum-der-welt-a-486643/>

- <https://www.industrial-production.de/zulieferer/skf-feiert-spatenstich-fuer-neues-grosslagerpruefzentrum.htm>
- <https://www.windbranche.de/news/nachrichten/artikel-29231-windenergie-skf-baut-weltgrsstes-prfzentrum-fr-grosslager>
- <https://www.windkraft-journal.de/2018/01/23/grosslager-pruefzentrum-von-skf-erhielt-das-leed-zertifikat-in-gold/116069>

MAIN  POST
Süddeutsche.de

Kommunikation rund um das neue Testzentrum und die neue Prüfstands-technologie in der regionalen und überregionalen Tagespresse, beispielsweise

- <https://www.br.de/nachricht/unterfranken/inhalt/skf-schweinfurt-testcenter-100.html>
- <https://www.mainpost.de/ueberregional/wirtschaft/mainpostwirtschaft/skf-macht-schweinfurt-zum-hightech-standort-art-8675923>
- <https://www.mainpost.de/neuesarchiv/skf-baut-superpruefstand-art-8675893>
- <https://www.mainpost.de/ueberregional/wirtschaft/mainpostwirtschaft/skf-eroeffnet-riesiges-pruefzentrum-art-9625422>
- <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/unternehmen-schweinfurt-das-kann-das-xxl-pruefzentrum-vom-waelzlagerhersteller-skf-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-170620-99-926139>
- <https://in-und-um-schweinfurt.de/lokales/skf-eroeffnet-leistungsfahigstes-grosslager-pruefzentrum-der-welt-der-sven-wingquist-test-center-offiziell-ingeweiht/>
- <https://www.schweinfurt.de/wirtschaft-bildung/aktuelles/5998.SKF-investiert-40-Millionen-am-Standort-und-in-Zukunftstechnologie.html>