# Abschlussbericht

UMWELT INNOVATIONS PROGRAMM

**Förderkennzeichen: NKa3 - 003495**

## „AutoKasch“
Vollautomatische Anlage zur Kaschierung von PVC-Profilen komplexer Geometrie mit PVC-Folien

**Schüco PWS Kaschierungs KG**
Selauer Straße 155a | 06667 Weißenfels
www.schueco.de

SCHÜCO

**BMU-Umweltinnovationsprogramm**

# ABSCHLUSSBERICHT

**zum Vorhaben**

„AutoKasch“

Vollautomatische Anlage zur Kaschierung von PVC-Profilen komplexer Geometrie mit PVC-Folien

**Zuwendungsempfänger**

Schüco PWS Kaschierungs KG

**Umweltbereich**

Ressourceneffizienz und Energieeinsparung

**Laufzeit des Vorhabens**

1. November 2019 bis zum 30. Juni 2022

**Autor/Ansprechpartner**

Michael Hoffmann

Tel. +49 3443 342-1426

mihoffmann@schueco.com

**Datum der Erstellung**

27. Oktober 2022

# Berichts-Kennblatt

| | |
|---|---|
| Aktenzeichen UBA: | **Projekt-Nr.:** NKa3 - 003495 |
| Titel des Vorhabens:<br>*„AutoKasch“*<br>Vollautomatische Anlage zur Kaschierung von PVC-Profilen komplexer Geometrie mit PVC-Folien | |
| Autor:<br>Michael Hoffmann<br>mihoffmann@schueco.com | Vorhabenbeginn:<br>1. November 2019<br>Vorhabenende:<br>30. Juni 2022 |
| Zuwendungsempfänger:<br>Schüco PWS Kaschierungs KG<br>Selauer Straße 155a<br>06667 Weißenfels | Veröffentlichungsdatum:<br>Seitenzahl: |
| Gefördert im BMU-Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit | |


Kurzfassung

Auf der Grundlage eines zuvor durchgeführten FuE-Projektes plante und setzte die Schüco PWS Kaschierungs KG an ihrem Standort in Weißenfels eine innovative, vollautomatisierte Anlage zur Kaschierung von PVC-Profilen um. Durch die Automatisierung sollte der bisher händisch bzw. teilautomatisiert durchgeführte Prozess optimiert und der Ausschuss erheblich reduziert werden. Das Vorhaben trägt mithin dazu bei die Ressourcen- und Energieeffizienz in der Produktion erheblich zu verbessern und besitzt Demonstrationscharakter für die gesamte Branche.

Der Innovationscharakter des Vorhabens zeigte sich insbesondere durch:

- die erstmalige Automatisierung eines bislang branchenweit händisch durchgeführten Prozesses;
- die Vermeidung bzw. Reduzierung von Abfall in der Produktion;
- die Steigerung der Ressourceneffizienz in der Produktion von PVC-Profilen.

Der aus vorhergehendem Projekt entwickelte prototypische Demonstrator wurde in geplanter Anlage erstmalig in großtechnischem Maßstab umgesetzt.

Durch die Umsetzung der Maßnahme kann zunächst eine Reduktion der $CO_2$-Emissionen i.H.v. 105 t $CO_2$ pro Jahr erreicht und erhebliche Umweltentlastungspotentiale gehoben werden.

Die erfolgreiche Überführung der Technologie in den großtechnischen Maßstab legt die Grundlage für die zukünftige Ausweitung auf elf weitere Produktionslinien am Standort, wodurch auf aktueller Basis insgesamt eine $CO_2$-Reduktion i.H.v. bis zu 2.292 t $CO_2$ pro Jahr erreicht werden könnte.

| | |
|---|---|
| Schlagwörter:<br>Kunststoffindustrie, PVC, Kaschierung, Ressourceneffizienz, Automatisierung | |
| Anzahl der gelieferten Berichte:<br>• Papierform<br>• Elektronischer Datenträger | Sonstige Medien:<br>Mitteldeutsche Zeitung (siehe Literatur)<br>Veröffentlichung im Internet geplant auf der Webseite:<br>Unternehmenswebseite der Schüco-Gruppe |

## Report Coversheet

| | |
|---|---|
| Reference-No. Federal Environment Agency: | Project-Nr.: NKa3 - 003495 |
| Report Title: | |
| Author/Authors:<br>Hoffmann, Michael<br>mihoffmann@schueco.com | Start of project:<br>November 1st, 2019<br>End of project:<br>June 30th, 2022 |
| Performing Organisation:<br>Schüco PWS Kaschierungs KG<br>Selauer Straße 155a<br>06667 Weißenfels | Publication Date:<br>No. of Pages: |
| Funded in the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. | |


Based on a previously conducted R&D project, Schüco PWS Kaschierungs KG planned and implemented an innovative, fully automated system for laminating PVC profiles at its site in Weißenfels. The automation was intended to optimise the process, which had previously been carried out manually or semi-automatically, and to significantly reduce the number of rejects. The project thus contributes to a considerable improvement in resource and energy efficiency in production and has a demonstration character for the entire industry.

The innovative character of the project was demonstrated in particular by:

- the first-time automation of a process that was previously carried out manually throughout the industry;
- the avoidance or reduction of waste in production;
- the increase in resource efficiency in the production of PVC profiles.

The prototype demonstrator developed in the previous project was implemented for the first time on an industrial scale in the planned plant. Through the implementation of the measure, a reduction of $CO_2$ emissions in the amount of 105 t $CO_2$ per year can initially be achieved and considerable environmental relief potentials can be raised.

The successful transfer of the technology to an industrial scale lays the foundation for the future expansion to eleven further production lines at the site, which could achieve a total $CO_2$ reduction of up to 2,292 t $CO_2$ per year on the current basis.



Keywords

Plastics industry, PVC, lamination, resource efficiency, automation

# Inhaltsverzeichnis


Berichts-Kennblatt ..... 2
Report Coversheet ..... 4
1. Einleitung ..... 6
1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner ..... 6
1.2 Ausgangssituation ..... 6
2. Vorhabenumsetzung ..... 10
2.1 Ziel des Vorhabens ..... 10
2.2 Technische Lösung ..... 14
2.3 Umsetzung des Vorhabens ..... 17
2.4 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen) ..... 18
2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten ..... 18
2.6 Konzeption und Durchführung des Messprogramms ..... 19
3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung ..... 20
3.1 Bewertung der Vorhabendurchführung ..... 20
3.2 Stoff- und Energiebilanz ..... 23
3.3 Umweltbilanz ..... 28
3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse ..... 29
3.5 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren ..... 29
4. Übertragbarkeit ..... 31
4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung ..... 31
4.2 Modellcharakter/Übertragbarkeit ..... 32
5. Zusammenfassung ..... 34
6. Summary ..... 35
7. Literatur ..... 36
8. Anhang ..... 37

# 1. Einleitung

## 1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner

**Kurzbeschreibung der Geschäftstätigkeit**

Die Schüco PWS Kaschierungs KG (Schüco PWS) ist Teil der international tätigen Schüco-Gruppe mit Hauptsitz in Bielefeld, Deutschland. Die Unternehmen der Schüco-Gruppe haben sich insbesondere auf die Entwicklung und den Vertrieb von Produkten für die Baubranche spezialisiert, wozu unter anderem Profil- und Zubehörsysteme zum Bau von Fenstern, Türen und Fassaden, Produkte zur Gebäudeautomation sowie auch bauwerksintegrierte Photovoltaiksysteme zählen.

In Deutschland ist die Schüco-Gruppe neben der Zentrale in Bielefeld an insgesamt fünf Standorten vertreten. Dies betrifft unter anderem:

- Borgholzhausen (Nordrhein-Westfalen);
- Frankfurt am Main (Hessen);
- Hamburg;
- Weißenfels (Sachsen-Anhalt);
- Wertingen (Bayern).

Die Schüco PWS Kaschierungs KG hat ihren Sitz am Standort Weißenfels und fertigt dort zusammen mit den weiteren Unternehmen der Schüco-Gruppe insbesondere PVC-Kunststoffprofile, welche beispielsweise in der Fenster- und Rollladenherstellung zum Einsatz kommen. Das Unternehmen ist somit im Branchenumfeld der Kunststoffindustrie (Bereich Baubedarfsartikel, Bauelemente) tätig und produziert mit circa 200 Beschäftigten rund 500 verschiedene PVC-Profilsorten in unterschiedlichen Farbgebungen im Extrusionsverfahren. Die Profile werden zu einem Großteil mit Dekorfolien veredelt (sog. Kaschierung).

## 1.2 Ausgangssituation

### 1.2.1 Hintergrund/Motivation

Die Herstellung und Be-/Verarbeitung von PVC-Profilen ist geprägt von einer Reihe energie- und emissionsintensiver Prozessschritte. Insbesondere durch die Verwendung von erdölbasiertem PVC als Ausgangs- bzw. Rohstoff, ist der $CO_2$-Fußabdruck der Produktion besonders hoch. Eine Steigerung der Energie- und insbesondere der Ressourceneffizienz ist daher von zentraler Bedeutung zur Verringerung des $CO_2$-Fußabdrucks des Unternehmens.

Vor diesem Hintergrund ist das Unternehmen sowie die gesamte Branche stets an einer Verbesserung der eigenen Ökobilanz interessiert. Daher wird bei den Unternehmen der Schüco-Gruppe auf den Einsatz innovativer Produktionstechnologien sowie die Investition in energieeffiziente Anlagentechnik ein besonderes Augenmerk gelegt.

Viele der am Standort Weißenfels produzierten Profilsorten werden in unterschiedlichen Formen und Farbgebungen extrudiert und anschließend mit Dekorfolien veredelt, bspw. mit einem Holzdekor (siehe Abbildung 1). Dieser Prozessschritt der Profilummantelung wird als sog. Kaschierung bezeichnet.

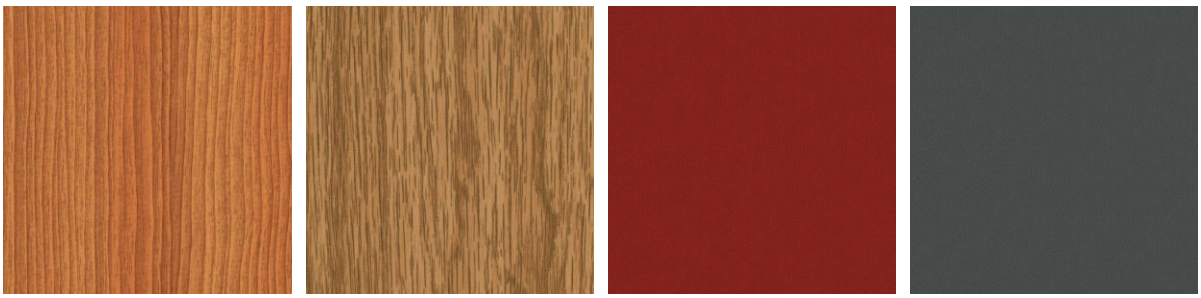

Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung verschiedener Dekore für die Kaschierung von PVC-Profilen für den Fensterbau, u.a. Douglasie, Eiche, Dunkelrot und Anthrazit.

Der Anteil der kaschierten PVC-Profile an den insgesamt produzierten PVC-Profilen betrug vor Umsetzung der Maßnahme im Jahr 2018 rund 30% der gesamten Produktion. In der Vergangenheit konnte jedoch ein Trend zu einer verstärkten individualisierten Fertigung bzw. Kaschierung der PVC-Profile in unterschiedlichen Farben oder Dekoren beobachtet werden. Vor diesem Hintergrund war ein Anstieg des Anteils der kaschierten PVC-Profile an der Gesamtproduktion bereits damals zu erkennen und ist auch mittelfristig weiterhin gegeben.

Der Kaschierprozess gliedert sich grundsätzlich in die folgend aufgeführten Schritte, welche nachfolgend auch schematisch gezeigt sind:

1. Profilvorbereitung (PV)
2. Folienzuführung (FZ)
3. Folienauftrag (DR)
4. Auftrag Schutzfolie (SF)

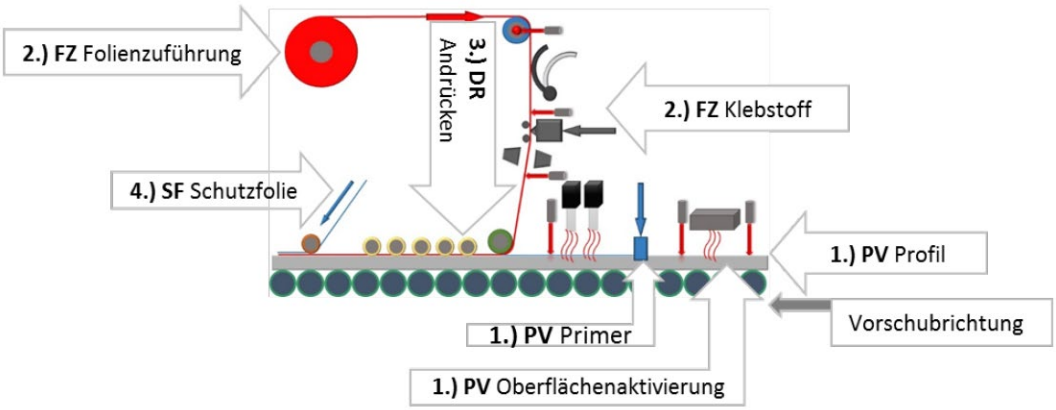


Abbildung 2: Schematische Darstellung der einzelnen Prozessschritte in der Kaschierung von PVC-Profilen.

### 1.2.2 Darstellung des Prozesses im Ausgangszustand

Das Kaschieren von Kunststoffprofilen erfolgte vor Umsetzung der Maßnahme bzw. an den weiterhin betriebenen konventionellen Kaschierlinien am Standort Weißenfels der Schüco PWS im Wesentlichen in Hand-/Manufakturarbeit bzw. teilautomatisiert. Dabei wird lediglich der Vorschub und die Fixierung des Kunststoffprofils durch ein Maschinensystem umgesetzt.

Das Aufbringen bzw. Aufdrücken der Folien (Prozessschritt Nr. 3, siehe Abbildung 2) erfolgte händisch durch Unterstützung, z.B. mit Andruckrollen, und erforderte aufgrund einer Vielzahl an unterschiedlichen Profilgeometrien eine hohe Arbeitskrafterfahrung. Ebenso war der Umrüstvorgang zwischen den Profiltypen ein händischer Prozess, welcher in der folgenden Abbildung 3 exemplarisch dargestellt ist. Die ebenfalls nachfolgend dargestellte Abbildung 4 verdeutlicht noch einmal die betreffenden Folierungsflächen an einem PVC-Fensterprofil.

Abbildung 3: Darstellung eines üblichen Umrüstvorgangs des Kaschierprozesses in der Produktion im Ausgangszustand am Standort Weißenfels. Der Umrüstvorgang umfasst nahezu ausschließlich manuelle Arbeitsschritte, eine Automatisierung war nicht vorhanden.

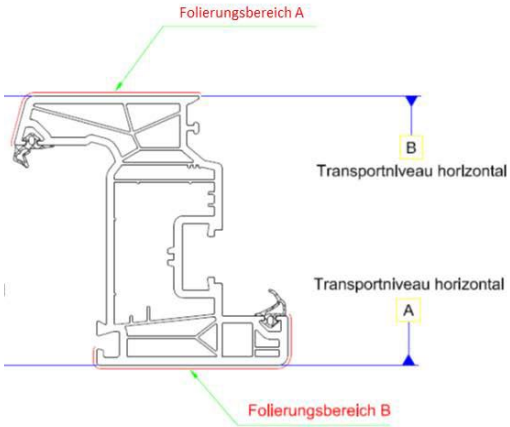


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines PVC-Fensterprofils im Querschnitt mit Indikation der Folierungsflächen.

Im Allgemeinen bedurfte es im Ausgangszustand während des Prozesses des Kaschierens einer kontinuierlichen Prozessbeobachtung sowie einer händischen Nachjustage der Parameter. Aufgrund dieser manuellen Ausführung war der Kaschierprozess mit einer reduzierbaren Fehler- bzw. Ausschussquote behaftet. Die üblichen Fehlerbilder, wie z.B. Blasen- und Riefenbildung in der Folie, konnten zum Teil konkreten Prozessparametern zugeordnet werden, bspw. der Andruckkraft der Rollen, welche durch die manuelle Ausführung variieren konnte.

### 1.2.3 Stand der Technik im Ausgangszustand und Vorarbeiten

Die Umsetzung des Prozessschrittes der Kaschierung von PVC-Profilen in einem nahezu vollständig manuellen bzw. lediglich teilautomatisierten Verfahren spiegelte bei Planung des Vorhabens branchenweit den Stand der Technik wider. Dies meint dabei nicht nur den Stand der Technik in Deutschland, sondern auch den weltweiten Produktionsstandard.

Im Bereich des Sondermaschinenbaus waren und sind einzelne Anlagen zur automatisierten Kaschierung im Flachbettsystem bekannt. Diese sind aufgrund ihres Funktionsprinzips (Rolle-zu-Rolle-Verfahren) jedoch für den vorliegenden Anwendungsfall ungeeignet und können nicht auf komplexe, dreidimensionale Strukturen adaptiert werden (vgl. Abbildung 4).

Für die Kaschierung komplexer Geometrien, wie sie in entsprechender Weise bei PVC-Fensterprofilen regelmäßig auftreten, bspw. mit einer Vielzahl unterschiedlicher sowie gegenläufiger Kurvenradien, existierten im Ausgangszustand mithin keine marktverfügbaren

technischen Lösungen, die direkt ab Werk voll funktionsfähig und einsatzbereit für die Kaschierung von Profilen jeglicher Komplexität und Geometrie einsetzbar gewesen wären.

Vor diesem Hintergrund fanden bei der Schüco PWS im Vorfeld zu dem hier durchgeführten Projekt eigenständige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Kooperation mit einem Industriepartner zur Entwicklung einer prototypischen Demonstrationsanlage zur vollautomatischen Kaschierung statt. Diese Entwicklung sollte im Rahmen des hier durchgeführten Projektes nunmehr erstmalig in den großtechnischen Maßstab skaliert und in der Produktion unter realen Bedingungen eingesetzt werden.

Bei einer erfolgreichen Einführung der vollautomatischen Kaschierung von PVC-Profilen würde das Vorhaben für die gesamte Branche erheblichen Demonstrationscharakter besitzen sowie den Stand der Technik signifikant erweitern und damit zu einer deutlichen Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz in der Produktion beitragen.

# 2. Vorhabenumsetzung

## 2.1 Ziel des Vorhabens

Die bisher fehler- und ausschussanfällige Hand- bzw. Manufakturarbeit im Prozessschritt des Kaschierens sollte im vorliegenden Projekt branchenweit erstmalig in einen vollautomatisierten Prozess im großtechnischen Maßstab überführt und unter realen Produktionsbedingungen demonstriert werden.

Die dem vorliegenden Vorhaben zugrunde liegende Umweltschutzwirkung resultiert dabei insbesondere aus einer Steigerung der Ressourceneffizienz durch Reduktion des Produktionsausschusses und somit einer Erhöhung des Gutwarenanteils in der Produktion.

### 2.1.1 Betrachtung des Ausschusses und diesbezüglicher Effizienzpotentiale in der Ausgangssituation

Die Betrachtung des Ausschusses und der diesbezüglichen Effizienzpotentiale in der Ausgangssituation differenziert sich in die nachfolgend aufgeführten primären und sekundären Effekte. Die primären Effekte umfassen dabei die direkten Ausschüsse an PVC-Profilen innerhalb der Kaschierung; die sekundären Effekte betreffen insbesondere mit dem Ausschuss an PVC-Profilen analog einhergehende Ausschüsse an weiteren Materialien/Ressourcen sowie auch vermeidbare Energieeinsätze. Im Einzelnen betrifft dies mithin:

- Primäre Ausschüsse/Effekte
  - Ausschuss an PVC-Profilen im Kaschierprozess
  - Ausschuss an PVC-Profilen beim Wechseln der Kaschierfolie
- Sekundäre Ausschüsse/Effekte
  - Ausschuss an Kaschierfolie
  - Ausschuss an Klebstoff
  - Vermeidung von Energieeinsätzen

**Ausschuss an PVC-Profilen im Kaschierprozess**

Am Standort Weißenfels wurden innerhalb der Kaschierung vor Umsetzung der Maßnahme insgesamt 12 Produktionslinien betrieben, welche im laufenden Betrieb Ausschüsse an PVC-Profil verursacht haben. Die Ausschüsse betrugen dabei rund 1,1 Mio. Meter an PVC-Profil, wobei die Ausschussgründe vielfältig waren und sich grundsätzlich nicht vollständig durch eine Automatisierung des Prozesses verhindern lassen würden.

Ungeachtet dessen konnten aus den erhobenen Produktionsdaten der einzelnen Kaschierlinien jedoch Ausschüsse i.H.v. rund 15% bzw. rund 165.000 Meter jeweils Fehlerkategorien zugeordnet werden, die durch eine Automatisierung als vermeidbar identifiziert werden konnten. Hierbei handelte es sich um Ausschuss u.a. aufgrund von Blasenbildung unter der Folie, durch falsche Ausrichtung von Folie und Profil, durch Beschädigungen der Folie aufgrund falscher Rollenpositionierung oder Andruckkräfte sowie durch eine mangelhafte Haftung zwischen Folie und Profil. Grundsätzlich waren die Ausschüsse weitestgehend gleichverteilt und ließen sich nicht einer einzelnen Kaschieranlage zuordnen; sie waren mithin prozessimmanent dem Hand-/Manufakturbetrieb zuzuordnen und nicht anlagenspezifisch.

**Ausschuss an PVC-Profilen beim Wechseln der Kaschierfolie**

Auf jeder Produktionslinie zum Kaschieren von PVC-Profilen werden im Sinne einer optimierten Auslastung der gesamten Produktion jeweils unterschiedlichste Aufträge in Bezug auf Profilgeometrien sowie auch Arten/Dekor der Kaschierfolie abgewickelt. Bei jedem Profil- sowie Folienwechsel mussten im Ausgangszustand dabei die Prozessparameter jeweils von Hand auf das neue Profil bzw. die neue Kaschierfolie angepasst werden, wobei die Parameter grundsätzlich bekannt sind, im Sinne einer maximalen Produktqualität jedoch trotzdem jeweils ein Test der veränderten Prozessparameter notwendig ist. Die hierbei eingesetzten Testprofile müssen als Ausschuss entsorgt werden.

Im Bezugszeitraum vor Umsetzung der Maßnahme wurden circa 250.000 Folienwechsel an den Kaschieranlage erfasst. Jedes Testprofil weist dabei eine Standardlänge von 6 m auf, wodurch sich theoretisch ein Ausschuss von 1.500.000 m ergeben würde. Im Sinne der Ressourceneffizienz wurde bereits zum damaligen Zeitpunkt jedes Testprofil durchschnittlich dreimal wiederverwendet, sodass sich der diesbezügliche Ausschuss auf 500.000 m reduziert.

Durch eine Automatisierung ließe sich der vorgenannte Ausschuss an PVC-Profilen beim Wechseln der Kaschierfolie grundsätzlich reduzieren.

**Ausschuss an Kaschierfolie**

Parallel mit dem Ausschuss an PVC-Profilen entsteht jeweils auch ein Ausschuss an Kaschierfolie im Kaschierprozess, welcher im Sinne der Ressourceneinsätze in entsprechender Weise ebenfalls berücksichtigt werden muss, d.h. für jeden Meter an reduziertem Ausschuss von PVC-Profil kann im Wesentlichen auch eine entsprechende Menge an Kaschierfolie eingespart werden.

**Ausschuss an Klebstoff**

Analog zu den Einsparungen an Kaschierfolie (siehe zuvor) können durch die Vermeidung an Ausschuss bei den PVC-Profilen in der Kaschierung ebenfalls Einsparungen im Klebstoffverbrauch realisiert werden.

**Vermeidung von Energieeinsätzen**

Neben den vorgenannten Aspekten zur Vermeidung von Ausschuss und der Realisierung von ressourcenbedingten Effizienzpotentialen sind im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung der Umweltentlastungspotentiale ebenfalls Energieeffizienzpotentiale zu berücksichtigen.

Die im Sinne des Vorhabens zu berücksichtigenden Energieeffizienzpotentiale resultieren dabei insbesondere aus der Vermeidung von Ausschuss und der Erhöhung des Gutwarenanteils in der Produktion. Somit können die Energieeinsätze in der Extrusion der PVC-Profile vermieden und entsprechende Effizienzpotentiale gehoben werden.

### 2.1.2 Quantifizierbare Umweltentlastungspotenziale

Durch die Umsetzung der geplanten Maßnahme zur Automatisierung der Kaschierung bei der Schüco PWS soll ein erhebliches Umweltentlastungspotential bzw. eine Vermeidung von Ausschuss realisiert werden.

**Avisierte Auslastung im Zielsystem**

Zur Quantifizierung des Umweltentlastungspotentials bedarf es zunächst einer Abschätzung, welche Produktionskapazitäten/-mengen von einer automatisierten Kaschieranlage grundsätzlich übernommen werden könnten, da das Effizienzpotential naturgemäß mit dieser Menge skaliert. Hierzu hatten bereits vor Antragstellung entsprechende Abschätzungen und Simulationen durch die Schüco PWS auf Basis von realen, historischen Produktionsdaten stattgefunden. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass bei einer optimalen Auslastung bis zu 10% der Fertigung auf der automatisierten Kaschieranlage abgebildet werden können.

Die Annahme einer Produktionsverlagerung von bis zu 10% von den konventionellen Kaschierlinien auf die vollautomatisierte Anlage legte dabei eine Vollauslastung des Neusystems (durchgängiger Betrieb ohne häufige Rüstvorgänge/Folienwechsel) zugrunde.

**$CO_2$-Faktoren der eingesetzten Materialien**

Weiterhin bedarf es für eine belastbare Quantifizierung der Umweltentlastungspotentiale einer Angabe der relevanten $CO_2$-Faktoren der eingesetzten Materialien bzw. Energien. Hierbei ist zwischen den folgenden Materialien/Energien zu unterscheiden:

- PVC-Materialmix für Profilproduktion
- Kaschierfolie
- Klebstoff
- Elektrische Energie/Strom aus dem Netz der allgemeinen Versorgung

*PVC-Materialmix für Profilproduktion*

Für die Produktion der PVC-Fensterprofile wird ein Gemisch aus Primär-PVC sowie aufbereitetem PVC eingesetzt, welche durch jeweils andere $CO_2$-Faktoren gekennzeichnet sind. Das Primär-PVC wird aufgrund der Farbreinheit des Granulates dabei insbesondere für den Außenmantel der Profile eingesetzt, wohingegen das aufbereitete PVC im Innenkern der Profile zum Einsatz kommt. Die $CO_2$-Faktoren der bei Schüco PWS eingesetzten PVC-Sorten sind in nachfolgender Tabelle 1 zusammen mit dem entsprechenden Anteil an der Gesamtproduktionsmenge im Ausgangszustand dargestellt.

Die am Standort Weißenfels auftretenden Ausschüsse der Produktion werden entweder direkt am Standort oder durch externe Dienstleister aufbereitet und dem Wertstoffkreislauf erneut zugeführt. Die höheren $CO_2$-Faktoren für dieses recycelte PVC-Granulat sowie -Mahlgut resultieren aus der notwendigen Aufbereitung des Primär-PVC im Recycling-Prozess und den damit verknüpften Energieverbräuchen.

In Summe ergibt sich für den in der Profilproduktion eingesetzten Materialmix entsprechend der jeweiligen relativen Anteile ein gewichteter $CO_2$-Faktor i.H.v. rund 2.140 kg $CO_2$/t (entsprechend 2,7 kg $CO_2$/m, bei einem durchschnittlichen Metergewicht von 1,3 kg/m), welcher für die Quantifizierung der Umweltentlastungspotentiale zu berücksichtigen ist.

Tabelle 1: Rohstoffbezogene $CO_2$-Faktoren und relativer Anteil der Materialien in den PVC-Fensterprofilen.

| PVC-Sorte | $CO_2$-Faktoren[1] | rel. Anteil im Materialmix |
|---|---|---|
| Primär-PVC | 2.100 kg $CO_2$/t | ca. 80% |
| PVC-Regranulat | 2.331 kg $CO_2$/t | ca. 15% |
| PVC-Mahlgut | 2.236 kg $CO_2$/t | ca. 5% |

*Kaschierfolie*

Die für die Kaschierung eingesetzten Dekorfolien bestehen entsprechend der kaschierten Profile ebenfalls aus Primär-PVC. Dies resultiert direkt aus der Anforderung, dass Folie und Profil grundsätzlich äquivalente thermische Ausdehnungskoeffizienten aufweisen müssen, sodass eine lange Haltbarkeit der Kaschierfolie auf dem Profil gewährleistet werden kann.

Vor diesem Hintergrund ist der $CO_2$-Faktor der Kaschierfolie mit dem oben genannten Wert i.H.v 2.100 kg $CO_2$/t in der Quantifizierung der Umweltentlastungspotentiale zu berücksichtigen.

*Klebstoff*

Für den in der Kaschierung eingesetzten Klebstoff wurde durch den Zulieferer ein $CO_2$-Emissionsfaktor von 4 bis 10 t $CO_2$ pro Tonne genannt. Im Sinne einer konservativen Quantifizierung der Umweltentlastungspotentiale wird im Folgenden der geringere Wert des angegebenen Intervalls zugrunde gelegt, d.h. ein $CO_2$-Faktor von 4 t $CO_2$ pro Tonne.

*Elektrische Energie/Strom aus dem Netz der allgemeinen Versorgung*

Für den $CO_2$-Faktor des Strombezugs aus dem Netz der allgemeinen Versorgung wird der zum Zeitpunkt der Antragstellung von Seiten einschlägiger Förderprogramme des Bundes vorgegebene Wert i.H.v. 537 kg $CO_2$/MWh zugrunde gelegt.

**Quantifizierung der Umweltentlastungspotentiale**

Im Rahmen des dem vorliegenden Vorhaben vorausgegangenen Forschungs- und Entwicklungsvorhabens der Schüco PWS wurde, wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, bereits eine prototypische Lösung zur automatisierten Kaschierung umgesetzt. Unter den idealisierten Betriebsbedingungen des Prototypen konnte eine Reduktion des Ausschusses, entsprechend der relevanten Fehlerkategorien, auf nahezu Null ermittelt werden.

Die Reduktion des Ausschusses auf Null soll im Folgenden im Sinne einer Maximalabschätzung des Umweltentlastungspotentials genutzt werden, auch wenn dieser Wert nur unter idealisierten Bedingungen und nicht im realen Produktionsumfeld erreicht werden konnte. Ungeachtet dessen stellt er jedoch einen anzustrebenden Wert dar.

[1] Vergleichender Emissionsbericht von PVC-Granulat & PVC-Mahlgut, RE|CARBON Deutschland GmbH, 04/2011
Die höheren $CO_2$-Faktoren für das recycelte PVC-Granulat resultieren aus der notwendigen Aufbereitung des Materials im Recycling-Prozess und der damit verknüpften Energieverbräuche.

Unter Berücksichtigung einer Produktionsverlagerung von bis zu 10% von den konventionellen Kaschierlinien auf die vollautomatisierte Anlage sowie einer Reduktion des Ausschusses auf nahezu Null wurde zum Zeitpunkt der Antragstellung ein Umweltentlastungspotential i.H.v. insgesamt 328,6 t $CO_2$ pro Jahr abgeschätzt. Dieses setzte sich in nachfolgender Weise zusammen.

Tabelle 2: Erwartete Ressourcen- und Energieeffizienzpotentiale sowie $CO_2$-Reduktionen bei Antragstellung.

| Einsparung | Umweltentlastung | Quantität | $CO_2$-Reduktion |
|---|---|---|---|
| PVC-Profil | Ressourceneffizienz | 100.000 m/a | 278,3 t $CO_2$ p.a. |
| Kaschierfolie | Ressourceneffizienz | 2,7 t/a | 5,7 t $CO_2$ p.a. |
| Klebstoff | Ressourceneffizienz | 500 kg/a | 2,0 t $CO_2$ p.a. |
| Elektrische Energie | Energieeffizienz | 79,3 MWh/a | 42,6 t $CO_2$ p.a. |
| | | | **328,6 t $CO_2$ p.a.** |

## 2.2 Technische Lösung

Für die Überführung des nahezu ausschließlich manuellen bzw. bislang lediglich teilautomatisierten Prozesses der Kaschierung in einen vollautomatischen Prozess wurden die im vorherigen FuE-Projekt der Schüco PWS gesammelten Erkenntnisse zugrunde gelegt. Hierbei wurde ein Lösungsansatz entwickelt, der im Kern in dem Einsatz von Robotertechnik mit multiplen Roboterarmen besteht; der Prototyp war dabei mit insgesamt acht Roboterarmen ausgestattet.

Für die nunmehr angestrebte Skalierung in den großtechnischen Maßstab und den Einsatz unter realen Produktionsbedingungen wurde eine Erweiterung auf insgesamt zwölf Roboterarme vorgesehen. Die vollautomatisierte Lösung ist dabei als wesentlicher Hebel zur Steigerung der Ressourceneffizienz und zur Verringerung des Ausschusses zu betrachten.

Durch den Einsatz von nunmehr zwölf Roboterarmen stehen dem System grundsätzlich eine höhere Zahl an Freiheitsgraden zur Verfügung, um eine flexible und reproduzierbare Anpassung der Fertigungsmittel auf die jeweiligen PVC-Profile zu ermöglichen. Durch die konsequente Nutzung dieser Freiheitsgrade lassen sich auch komplexeste Profilgeometrien mit hoher Qualität kaschieren und selbst kleinste Biegeradien der Kaschierfolie realisieren. Im Ergebnis sollte eine prozesssichere und reproduzierbare Kaschierung nahezu jeglicher Profilgeometrien und eine erhebliche Reduktion des Ausschusses erreicht werden.

Der gewählte technologische Lösungsansatz ist in Abbildung 5 schematisch für das Teilsystem zum Folienauftrag dargestellt. Es wird bereits in dieser schematischen Darstellung deutlich, dass das Robotersystem durch eine beliebige Positionierung der Andruckrollen am Profil sowie auch die geeignete Wahl der Rollen mit spezifischen Rollendurchmessern/-breiten auf nahezu jedes PVC-Fensterprofil flexibel angepasst werden kann. Die hohe Flexibilität des Systems geht jedoch naturgemäß auch mit einer hohen Komplexität in der Ansteuerung und Prozessführung sowie in Bezug auf die Reproduzierbarkeit einher.

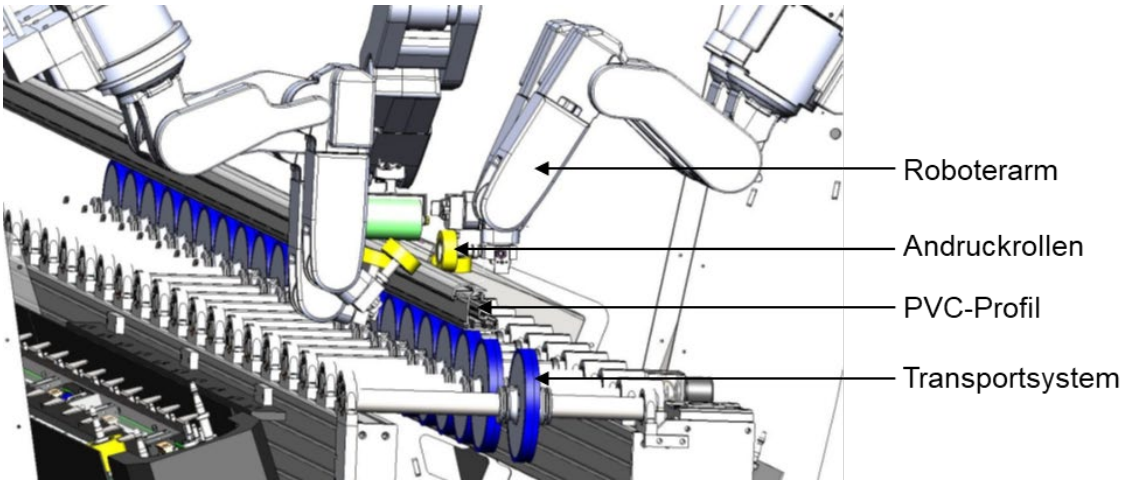


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Kaschierprozesses mit Hilfe des Robotersystems.

Durch die Automatisierung der Kaschierung der PVC-Profile mittels der dargestellten Robotertechnik sollte auch die Kaschierung komplexer Profilgeometrien sowie die Bedienung kleiner Losgrößen für Nischenmärkte erfolgen. Da der Ausschuss beim Kaschieren i.d.R. mit der Komplexität der Profile korreliert, war die Kaschierung komplexer Geometrien aufgrund der hohen Ausschusszahlen bislang nicht sinnvoll darstellbar. Darüber hinaus sollten durch die angestrebte technische Lösung nunmehr auch Produktionen von kleinen Losgrößen bedient werden können, da Umrüstzeiten durch die Automatisierung deutlich gesenkt und im Weiteren die bei einer Umrüstung entstehenden Ausschüsse reduziert werden können.

Im Sinne einer systemischen Optimierung des gesamten Kaschierprozesses wurden neben der Automatisierung des Folienauftrags auch die vorgelagerten Prozesse der Profilvorbehandlung sowie der Folienzuführung (Prozessschritte Nr.1/2, vgl. Abbildung 2) automatisiert. Insbesondere die Einbindung eines automatischen Folienwechslers weist weitere Ressourceneffizienzpotentiale auf, da bei jedem Profil- oder Folienwechsel im Ausgangszustand Kaschierfolie für die Einstellung der Prozessparameter notwendig waren und somit für die Produktion verloren gegangen sind. Integraler Teil des Folienwechslers ist dabei die sog. Spleißbox, welche aufeinanderfolgende Kaschier-/Dekorfolien winkelgetreu und formschlüssig verschweißen soll und somit eine automatisierte Zuführung auch wechselnder Folien zum Kaschierprozess erlaubt.

Die vollautomatische Kaschieranlage sowie der vollautomatische Folienwechsler sind dabei grundsätzlich zwei Komponenten eines integrierten Anlagensystems, welche erst in Kombination miteinander das volle Potential zur Reduzierung des Ausschusses sowie zur Hebung der Umweltentlastungspotentiale entfalten können. Ein getrennter Einsatz der beiden Komponenten ist grundsätzlich möglich, jedoch im Hinblick auf die Automatisierung des Prozesses und die Realisierung der Umweltentlastungspotentialen nicht sinnvoll.

Die vollautomatische Anlagentechnik ermöglicht nunmehr das Speichern sowie Laden profilspezifischer Parametersätze und bedarf daher zukünftig keiner Testversuche beim Wechsel der Kaschierfolie. Die Parametersätze wurden dabei in umfangreichen, produktionsnahen Feldtests im Rahmen des FuE-Projektes sowie auch im laufenden Betrieb mit dem Neusystem ermittelt. Bei einem Wechsel der Kaschierfolie und/oder des PVC-Profils können die hinterlegten Prozessparameter reproduzierbar geladen und eingesetzt werden.

Die optimalen Prozessparameter werden somit einmalig ermittelt und stehen im Folgenden direkt zu Beginn einer Kaschierung zur Verfügung. Im Gegensatz zum bisherigen Verfahren in Hand- bzw. Manufakturarbeit bedürfen sie i.A. keiner weiteren Optimierung zu Beginn der Kaschierung bzw. im laufenden Betrieb. Der optimale Satz an Prozessparametern steht somit direkt zu Beginn zur Verfügung und es entsteht, entgegen des bisherigen Verfahrens, kein Ausschuss bis zum Erreichen eines Optimums.

Darüber hinaus können durch den Einsatz der vollautomatischen Kaschieranlage auch ggf. auftretende Drifts der Prozessparameter, bspw. durch minimale Abnutzung der Fertigungsmittel oder durch leichte Abweichungen/Schwankungen im eingesetzten Ausgangsmaterial, im laufenden Betrieb kompensiert werden.

**Leistungsdaten der Neuanlage**

Die vollautomatische Kaschieranlage in Kombination mit dem vollautomatischen Folienwechsler ist im Regelbetrieb durch die folgenden Leistungsdaten zu beschreiben:

Tabelle 3: Tabellarische Aufstellung der wesentlichen Leistungsdaten der Neuanlage.

| Parameter | Leistungsdaten |
|---|---|
| Produktionsfaktor[2] | ~ 80% |
| Kaschierleistung bei Zielauslastung | ~ 90.000 Meter pro Monat |
| Zeit pro Rüstvorgang | < 30 min |
| Ausschussquote (optimierter Betrieb) | < 1,5% |

**Zusammenfassung**

Die für das vorliegende Vorhaben zugrunde gelegte technische Lösung zur Reduktion des Ausschusses in der Kaschierung besteht in einer nahezu vollständigen Automatisierung des Prozesses. Dies betrifft sowohl eine automatisierte Zuführung der Folie sowie auch eine vollautomatisierte Parameterkontrolle durch die gezielte und reproduzierbare Ansteuerung der Roboterarme. In Summe sollte durch die Vollautomatisierung des Prozesses eine erhebliche Steigerung der Prozessstabilität und eine Reduktion des Ausschusses erreicht werden.

Vor dem Hintergrund der zuvor beschriebenen Potentiale der Prozessautomatisierung sollten perspektivisch vor allem kleinvolumige Aufträge mit häufigen Folienwechseln auf der neuen Kaschieranlage inkl. des vollautomatischen Folienwechslers bearbeitet werden.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die vollautomatische Kaschieranlage inklusive des vollautomatischen Systems zur Zuführung der Kaschierfolie (Folienwechsler) am Standort Weißenfels der Schüco PWS und sollen einen ersten Eindruck von der Komplexität der Anlagentechnik geben. Aufgrund der Vielzahl der Anlagenkomponenten und Freiheitsgrade der Robotertechnik ist eine laufende Prozessoptimierung und -anpassung erforderlich.

[2] Verhältnis aus Produktionszeit plus Rüstzeit und Gesamtzeit pro Monat

Abbildung 6: Darstellung der vollautomatischen Kaschiermaschine in der Produktion der Schüco PWS am Standort Weißenfels.

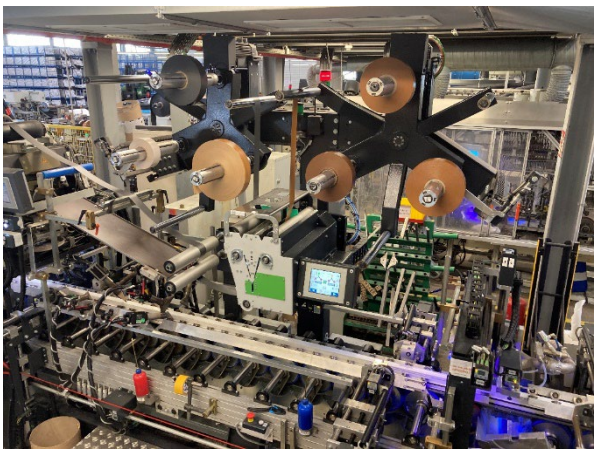

Abbildung 7: Darstellung der Zuführung der Kaschierfolie zur vollautomatischen Kaschiermaschine (Folienwechsler).

Abbildung 8: Darstellung der Robotertechnik in der vollautomatischen Kaschiermaschine.

Abbildung 9: Darstellung der Robotertechnik mit einem geführten PVC-Profil in den Rollen der Roboterarme.

## 2.3 Umsetzung des Vorhabens

Das vorhergehend dargestellte Vorhaben wurde in folgendem Zeitraum durchgeführt:

05. Mai 2020 bis 30. Juni 2022.

In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die Arbeitsschritte des Vorhabens sowie die Zeitpunkte ihrer Umsetzung dargestellt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass aufgrund des hohen Innovationsgrades die Umsetzung einer kontinuierlichen Optimierung bis über den Projektzeitraum hinaus unterliegt. Weiterführend unterlag das Projekt verschiedenen Verzögerungen, die primär auf die technische Auslegung bzw. die Entwicklung neuer Komponenten auf Seiten der Zulieferer bzw. des Anlagenlieferanten zurückzuführen sind. Eine vertiefende Darstellung der Herausforderungen ist dem Kapitel 3.1 zu entnehmen.

Tabelle 4: Tabellarische Aufstellung der Meilensteine in der Umsetzung des Vorhabens „AutoKasch“.

| Arbeitsschritte | Umsetzungszeitpunkt |
|---|---|
| Planungsphase | Q1 2019 |
| Auslösen von Liefer- und Leistungsverträgen | Q3 2019 |
| Anlieferung der Systemtechnik | Q1 2020 |
| Installation und Montage der Anlagentechnik | Q1 2020 bis Q1 2021 |
| Beginn der Inbetriebnahme | Q4 2020 |
| Testversuche und sukzessive Überführung in Regelbetrieb | ab Q1 2021 |
| Projektabschluss | Q2 2022 |
| Optimierung der Betriebsparameter | fortlaufend |

## 2.4 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Für die Errichtung und den Betrieb der Anlage waren behördliche Genehmigungen nicht erforderlich.

## 2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Für die Erfolgskontrolle des Vorhabens werden unterschiedlichste Betriebsdaten der involvierten Anlagentechnik bzw. des Prozesses erfasst. Dies betrifft zum einen die Betriebsdaten direkt in der Anlagentechnik der Kaschieranlage und des Folienwechslers sowie auch eine Erfassung der Ausschüsse und der Ausschussgründe durch das Betriebspersonal der Kaschieranlage.

Die Erfassung der Anlagenbetriebsdaten erfolgt automatisiert und fortlaufend über die Anlagensteuerung. Die Datenerfassung erfolgt dabei kontinuierlich über den gesamten Betriebszeitraum und betrifft unter anderem die folgenden Daten:

- Betriebszeit;
- Durchsatz (in Meter Profil);
- Eingesetztes Folienmaterial (Menge und Art);
- Profiltyp/-geometrie;
- Klebstoffauftrag;
- Anzahl Rüstvorgänge und Folienwechsel.

Die Erfassung der Ausschüsse erfolgt fortlaufend durch das Betriebspersonal bzw. den Maschinenführer direkt an der Kaschieranlage durch optische Inspektion, wobei die einzelnen Ausschüsse vorab definierten Fehler-/Ausschusskategorien zugeordnet werden.

Hierbei werden unter anderem die folgenden Fehlerkategorien berücksichtigt:

- Rolle nicht i.O.;
- Kleber-/Primerrückstände auf der Folie;
- Blasenbildung;
- Folie läuft weg.

Die jeweiligen Daten werden nachfolgend ihrer Erfassung in Datenbanken aggregiert und stehen schließlich für eine Fehleranalyse und die Rückkopplung in den Prozess im Sinne einer stetigen Prozessoptimierung zur Verfügung. Eine weitergehende Verarbeitung der Daten im Sinne einer Filterung oder sonstigen Aufbereitung findet nicht statt; es erfolgt lediglich eine Aggregierung der Daten auf Monats- und Maschinenebene.

## 2.6 Konzeption und Durchführung des Messprogramms

Das Messprogramm wurde derart konzipiert, dass eine belastbare Quantifizierung der Umweltentlastungspotentiale nach Umsetzung der Maßnahme und eine möglichst eindeutige Identifikation der Mehrwerte durch die vollständige Prozessautomatisierung erfolgen kann.

Vor diesem Hintergrund wurde eine Erfassung der Ausschussmengen und -kategorien in Abhängigkeit der Produktionsmengen sowie der Anzahl an Rüstvorgängen und Folienwechseln geplant. Darüber hinaus wurde die Anzahl der verworfenen Farbwechselstangen sowie auch der Klebstoffauftrag im laufenden Betrieb erfasst.

Der messtechnisch erfasste und ausgewertete Betrachtungszeitraum erstreckt sich von Februar 2021 bis zum Projektabschluss im Juni 2022. Als Referenzzeitraum werden die Daten der konventionellen Kaschiermaschinen vor Installation des Neusystems im November 2020 zugrunde gelegt.

# 3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung

## 3.1 Bewertung der Vorhabendurchführung

Das Vorhaben „AutoKasch“ der Schüco PWS konnte grundsätzlich erfolgreich umgesetzt werden. Die vollautomatische Kaschieranlage wird gegenwärtig in der regulären Produktion parallel zu den sonstigen, konventionellen Kaschiermaschinen eingesetzt, wenngleich sie noch nicht mit voller Kapazität betrieben werden kann.

Ungeachtet der erfolgreichen Umsetzung des Vorhabens sah sich die Schüco PWS bei der Einführung der automatisierten Lösung jedoch verschiedenen Herausforderungen gegenübergestellt; dies betraf sowohl technische sowie auch nichttechnische Herausforderungen bei der Inbetriebnahme sowie im laufenden Betrieb der neuen Kaschieranlage.

Die aufgetretenen technischen Herausforderungen konnten jedoch jeweils in enger Abstimmung mit dem Lieferanten behoben werden. Hierzu bedurfte es zum einen einer fortlaufenden Optimierung/Anpassung der Anlagentechnik sowie zum anderen teilweise auch der Neuentwicklung einzelner Systemkomponenten bis zum Erreichen der erforderlichen Prozessstabilität.

Es ist dabei ergänzend festzuhalten, dass eine Optimierung der Prozessabläufe und der Feinabstimmung des Systems auch über das Projektende hinaus kontinuierlich vorgenommen wird bzw. vorgenommen werden muss, bspw. beim Anlernen neuer Profile durch die Software.

### 3.1.1 Schwierigkeiten in der Projektumsetzung sowie deren Behebung

Bei der Umsetzung des Vorhabens traten jeweils Herausforderungen auf, die zum einen die vollautomatische Kaschieranlage sowie auch zum anderen den vollautomatischen Folienwechsler betrafen. Vor dem Hintergrund einer grundsätzlich auch separaten Umsetzung der beiden Teilsysteme findet im Folgenden auch eine jeweilige separate Darstellung der Probleme bei der Projektumsetzung sowie auch der Maßnahmen zu deren Behebung statt.

**Teilprojekt „Vollautomatische Kaschieranlage“**

Bei der Inbetriebnahme der vollautomatischen Kaschieranlage durch den Lieferanten sind technische Schwierigkeiten aufgetreten, die einen Abschluss der Arbeiten verzögerten.

Die technischen Schwierigkeiten betrafen insbesondere das Überführen der bereits im vorausgegangenen FuE-Projekt ermittelten, profilspezifischen Prozessgrößen für die vollautomatische Kaschierung auf die neue großtechnische Anlage. Hierbei war zu berücksichtigen, dass die Prozessgrößen für den FuE-Demonstrator grundsätzlich einen $n$-dimensionalen Parameterraum bilden, wobei $n$ die Anzahl aller Freiheitsgrade der Roboterarme des Demonstrators darstellt. Diese Prozessgrößen mussten für die großtechnische Anlage jedoch auf einen $m$-dimensionalen Parameterraum transformiert werden, wobei hier $m >> n$ gilt, da die Anzahl der Roboterarme und somit auch die Anzahl der Freiheitsgrade erhöht wurden. Durch höhere Anzahl an Freiheitsgraden kann eine flexible Anpassung der Fertigungsmittel auf die jeweiligen PVC-Profile ermöglicht werden, jedoch geht damit auch eine Komplexitätssteigerung in der Prozesssteuerung einher.

Im Rahmen der technischen Inbetriebnahme wurde dabei nunmehr festgestellt, dass eine

simple Adaption der zuvor ermittelten Prozessgrößen auf die neue Anlage mitunter zu einer unpräzisen Positionierung und Ansteuerung der Roboterarme an die komplexen PVC-Profile führte. In der Folge sind im Testbetrieb der Anlage Kaschierfehler aufgetreten und der Ausschuss wurde nicht im erwarteten Maße reduziert.

Dem vorgenannten Problem wurde mit einem erhöhten Programmier- und Anpassungsaufwand seitens des Anlagenlieferanten zur Adaption der Prozessgrößen Rechnung getragen. Hierbei bedurfte es der Definition einer mathematischen Funktion zur Parametertransformation. Diese Entwicklung wurde beim Anlagenlieferanten durchgeführt und konnte schließlich erfolgreich abgeschlossen werden.

Im folgenden Testbetrieb der vollautomatischen Kaschieranlage wurden dann wiederum jedoch wiederholt Abweichungen bei der Positionierung der Andruckrollen festgestellt, die in der Folge bspw. zu einem zu geringen oder zu großen Anpressdruck der Kaschierfolie auf die Profile und somit mitunter zu Produktionsfehlern führten. Nach intensiver Fehlersuche sowie Abstimmung mit dem Lieferanten konnte die Fehlerquelle schließlich auf die interne Kalibrierung der Roboterarme zurückgeführt werden.

Zur Positionskalibrierung fahren die Roboter mit dem Werkzeugkopf regelmäßig auf spezielle Positionssensoren an definierten Positionen am Maschinenrahmen, sodass ein Abgleich der Positionsparameter der Arme mit den absoluten Positionen der Anlage erfolgen kann. Dieser Abgleich zur internen Kalibrierung wies dabei in Bezug auf die Position des Roboters ein Spiel auf, welches sich aufgrund der vielen Freiheitsgrade des Systems in Summe auf bis zu 2 mm Positionsabweichung addieren konnte. Nach Identifikation dieses Problems wurden spielfreie Führungen und Fixierungen der Roboterarme installiert, welche in der Folge erfolgreich getestet wurden.

Darüber hinaus konnte im Testbetrieb mitunter beobachtet werden, dass die Anlage Rollen eines falschen Materials für die Kaschierung gewählt hatte. Auch dies führt zu veränderten Anpressdrücken im Vergleich zu den vorgegebenen Prozessparametern, was während des Testbetriebes einen Anteil von teilweise bis zu 80% der Gesamtfehler des Systems ausmachte. Das Material der Andruckrollen war bislang mittels mehrerer Nuten auf der Halterung der Rollen kodiert und wurde optisch mittels Triangulation detektiert. Durch Reflexionen auf dem metallischen Material kam es dabei jedoch zu Fehlern bei der optischen Erfassung der Nut-Muster, sodass bei der automatisierten Rollenwahl mitunter falsche Rollen gewählt oder durch das System keine Rollen gefunden wurden. Daraufhin wurde die Kodierung der Rollen in einen Matrixcode abgeändert, welcher auf die Halterung der Rollen mittels Laser geschrieben wurde und nunmehr eine zuverlässige Identifikation der Rollen ermöglicht. Dies verminderte den negativen Einfluss von optischen Reflexionen auf den metallischen Halterungen und ermöglicht somit eine verbesserte bzw. eineindeutige Zuordnung der Rollen.

Neben den technischen Herausforderungen traten im Teilprojekt Herausforderungen aufgrund von Lieferschwierigkeiten eines Lieferanten auf. Dies betraf die Messer in der Kaschieranlage, die anschließend auf ein alternatives Messer umgestellt werden mussten. Dies führte temporär zu einem gesteigerten Ausschuss.

**Teilprojekt „Folienwechsler“**

Im Teilprojekt „Folienwechsler“ traten Probleme hinsichtlich der Aussteuerung der Bahnkanten von aufeinander folgenden Dekorfolien in der vollautomatischen Kaschierung auf, wobei die

Fehlerbilder sich insbesondere auf die automatische Zuführung und die Ausrichtung der Dekorfolien in/oberhalb der sog. „Spleißbox“ (Systemkomponente zum Verschweißen der Dekorfolien) bezogen.

Für die Realisierung eines vollautomatischen Prozesses mit hoher Prozesssicherheit und minimalen Ausschüssen ist die hochgenaue Positionierung und Ausrichtung der Folien essentiell, sodass bei aufeinanderfolgenden Folienabschnitten kein Versatz in transversaler Richtung oder eine Winkelabweichung zwischen den Bahnkanten entsteht und nachfolgend zu Produktionsfehlern bei der Kaschierung führt. Um derartige Positionierungs-/Ausrichtungsabweichungen zu kompensieren, war die Spleißbox mit einem seitlich positionierten Folienanschlag ausgerüstet. Innerhalb der Testversuche wurde jedoch deutlich, dass die Bahnkanten der jeweils in Nutzung befindlichen Folie nicht exakt am Folienanschlag entlang laufen und somit im Spleißprozess zu einem Versatz führen. Dieser Versatz verursacht auf den jeweils nachfolgenden PVC-Profilen Produktionsfehler in der Kaschierung. Die Gründe für diese Abweichungen konnten auf Grundlage der Testversuche insbesondere in unterschiedlichen Spannungen in der Folienrolle, z.B. durch leichte Schwankungen der Materialstärke sowie durch induzierte Spannungen beim Schneiden der Folien, gefunden werden.

Vor diesem Hintergrund entwickelte der Anlagenlieferant eine neue Spleißbox mit einer permanent automatisch ausgesteuerten Ausrichtung der Bahnkanten. Die neue Spleißbox konnte schließlich erfolgreich in den vollautomatischen Folienwechsler implementiert werden. Darüber hinaus konnte der Spleißprozess auch dahingehend optimiert werden, dass bei fast allen kaschierten PVC-Profilen auf die bislang erforderliche Farbwechselstange beim Wechsel der Kaschierfolie verzichtet werden kann. Hierzu bedarf es einer reproduzierbaren Positionierung der Spleißstelle in dem Zwischenraum zweier aufeinander folgender PVC-Profile. Die Positionierung der Spleißstelle und die Größe des Zwischenraums konnten im Zusammenspiel zwischen Kaschieranlage und Folienwechsler schließlich dahingehend optimiert werden, dass nur noch ein Spalt von wenigen Zentimetern Breite existiert und der sonst entstehende Ausschuss von mind. 6 Metern PVC-Profil vermieden wird. Die folgenden Abbildungen 10 und 11 zeigen die Positionierung einer Spleißstelle innerhalb des Spaltes zwischen zwei PVC-Profilen.

Abbildung 10: Ansicht zur Positionierung der Spleißstelle zwischen zwei PVC-Profilen.

Abbildung 11: Nahansicht der Spleißstelle zwischen zwei aufeinander folgenden Dekorfolien.

## 3.2 Stoff- und Energiebilanz

Wie bereits zuvor in den Abschnitten 2.5 und 2.6 dieses Abschlussberichtes beschrieben, wurden die prozessrelevanten Betriebsparameter sowie auch die Ausschüsse nach Art und Höhe auf der vollautomatischen Kaschieranlage fortlaufend zwischen dem Februar 2021 und dem Juni 2022 erfasst.

Die entsprechenden Daten sind in Abbildung 12 in ausführlicher Form dargestellt und betreffen im Wesentlichen die Art der Fehler (oben), den relativen Anteil des Ausschusses an der Produktion (mittig) sowie auch die absolute Produktion auf der vollautomatischen Kaschierung (unten). Die nachfolgende Diskussion findet analog zu diesen drei Kategorien statt.

Ergänzend zu den Daten für die vollautomatische Kaschieranlage in Abbildung 12 ist jeweils zu Beginn auch ein Referenzwert der konventionellen Kaschiermaschinen dargestellt. Dieser Referenzwert wird für die Bestimmung der Stoff- und Energiebilanz als Ausgangswert zugrunde gelegt, d.h. die nachfolgend dargestellten Einsparungen werden gegenüber diesem Wert ermittelt.

Es ist in Bezug auf die dargestellten Werte anzumerken, dass die Auslastung des Neusystems in keinem der dargestellten Monate den Erwartungswert von rund 80% erreichen konnte, was insbesondere an den fortlaufenden Optimierungen der einzelnen Anlagenkomponenten und jeweiligen Testversuchen lag. So betrug die durchschnittliche Auslastung zwischen Januar 2022 und Juni 2022 rund 44%. Im Regelbetrieb ohne fortwährende Testversuche ist noch einmal von einer deutlichen Verbesserung der Ausschussreduktion auszugehen. Zum Aufzeigen der grundsätzlichen Potentiale der vollautomatischen Kaschiermaschine wird im Folgenden jedoch in konservativer Weise von einer linearen Skalierung ausgegangen.

**Veränderung der Art der Ausschussgründe**

In der zeitlichen Entwicklung der Ausschussgründe sowie insbesondere im Vergleich zu den Referenzsystemen (konventionelle Kaschiermaschinen) kann eine deutliche Veränderung erkannt werden.

Im Referenzsystem der konventionellen Kaschiermaschinen sind die Ausschüsse im Wesentlichen fünf Hauptkategorien zuzuordnen; diese sind im Einzelnen „nachträgliche Ablösung“; „Leimknubbel unter der Folie“, „Kleberauftrag“, „Folie läuft weg“ und „Blasen“.

Im Vergleich dazu konnten durch die Automatisierung des Kaschierprozesses einzelne Fehler nahezu vollständig reduziert werden, sodass sich die Fehler im Wesentlichen nur noch auf die zwei Hauptkategorien „Folie läuft weg“ und „Blasen“ beziehen; die übrigen Fehler machen gesamtheitlich einen Anteil von weniger als 20% aus und erscheinen damit für den insgesamten Ausschuss nicht mehr von besonderer Relevanz.

Die verbleibenden Fehlerkategorien „Folie läuft weg“ und „Blasen“ resultieren aus einer fortlaufenden Optimierung des Folienwechslers sowie insbesondere auch den bereits zuvor beschriebenen Schwierigkeiten bzgl. der Ausrichtung der Bahnkanten bei der Verschweißung von aufeinander folgenden Kaschierfolien. Die nunmehr im Einsatz befindliche Spleißbox erlaubt eine permanente automatische Aussteuerung der Bahnkanten, wodurch die Fehler zukünftig zu reduzieren sind. Bis zum Ende des Berichtszeitraumes bzw. Projektabschlusses fanden jedoch weiterhin auch Testversuche zur weiteren Optimierung statt, sodass das volle Potential zu Projektende noch nicht realisiert werden konnte.

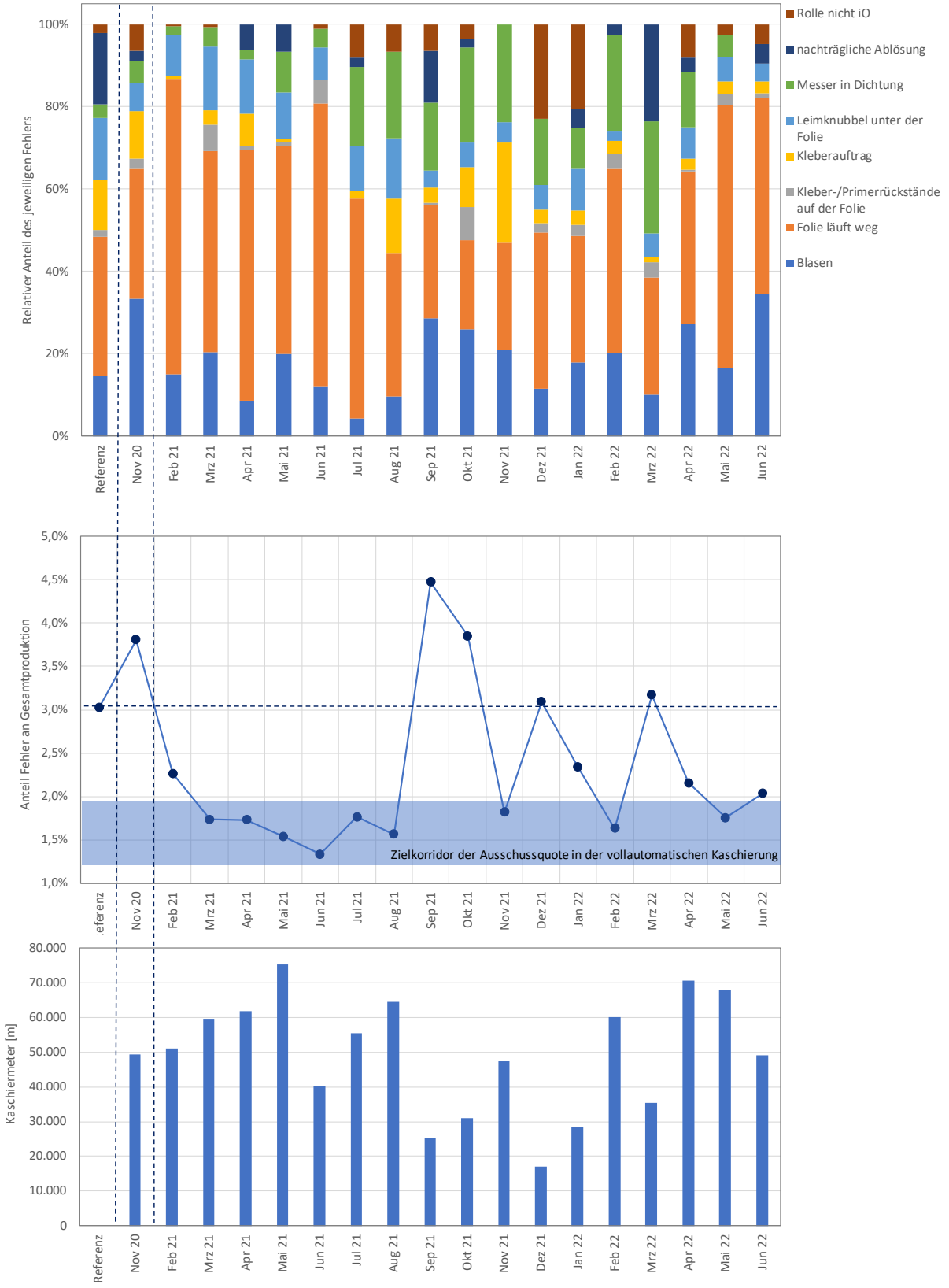


Abbildung 12: Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Fehlerverteilung auf die einzelnen Fehlerarten, der Entwicklung des Anteils der Fehler an der Gesamtproduktion seit Inbetriebnahme sowie der insgesamt je Monat auf der vollautomatischen Kaschiermaschine kaschierten Profilmeter.

**Relativer Anteil des Ausschusses an der Produktion**

Für die konventionellen Kaschiermaschinen (Referenz) wurde innerhalb des berücksichtigten Zeitraums ein relativer Anteil des Ausschusses an der Produktion i.H.v. 3,02% erfasst. Dieser Wert stellt mithin die Ausgangsbasis dar gegenüber welcher im Folgenden die Einsparungen durch die vollautomatische Kaschierung darzustellen sind.

Nachfolgend der Inbetriebnahme der neuen Kaschieranlage ist zu erkennen, dass die Ausschüsse der vollautomatischen Kaschierung mit ca. 3,8% zu Beginn höher als die Referenzwerte der übrigen, nicht automatisierten Kaschieranlagen lagen (ca. 3,0%). Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei Inbetriebnahme der neuen Anlage zunächst erhebliche Anstrengungen zur Optimierung sowie zur Behebung von anfänglich aufgetretenen Fehlern erfolgen mussten. Nachfolgend der Einregulierung des Neusystem konnte jedoch eine kontinuierliche Reduktion des Ausschusses in der Kaschierung auf Werte von rund 1,3% im Juni 2021 erreicht werden.

Bei der Betrachtung der Ausschüsse im nachfolgenden Zeitraum (August 2021 bis November 2021) musste jedoch ein gegenläufiger Effekt erkannt werden. Hierbei war ein Anstieg des relativen Fehlers an der Gesamtproduktion auf das Niveau vor Implementierung der vollautomatischen Kaschierung (bzw. teilweise darüber hinaus) zu erkennen. Diese Entwicklung wurde jedoch im Vorfeld erwartet und war insbesondere ausgiebigen Testversuchen mit dem Folienwechselsystem bzw. einer neuen Spleißbox geschuldet. Die Integration einer neuen Spleißbox wurde erforderlich, da beim ursprünglichen Modell Schwierigkeiten hinsichtlich Positionierungs-/Ausrichtungsschwankungen bei der Verbindung von jeweils aufeinander folgenden Kaschierfolien (laterale Abweichungen, Winkelabweichungen) auftraten, welche eine Neuentwicklung erforderten.

Eine kontinuierliche Reduktion der Ausschüsse konnte in der Folge (ab November 2021) durch die Berücksichtigung der in den Testläufen generierten Erfahrungen sowie durch die Integration der neuen Spleißbox erreicht werden.

In Summe lässt sich grundsätzlich zusammenfassen, dass die vollautomatische Kaschieranlage dazu geeignet ist, die Ausschüsse in der Produktion signifikant zu reduzieren. Aufgrund der erforderlichen Testversuche innerhalb des Betrachtungszeitraums konnte das Optimum der Ausschussreduktion vermutlich noch nicht erreicht werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine Ausschussquote von rund 1,65% dauerhaft erreichbar ist (Durchschnittswert der Datenpunkte im farblich hellblau hinterlegten Bereich).

Die Reduktion des Ausschusses auf 1,65% durch die Automatisierung stellt eine Verbesserung ggü. den konventionellen Kaschiermaschinen von nahezu 50% dar; eine weitere Verbesserung in der Zukunft nach Abschluss aller Optimierungsmaßnahmen erscheint naheliegend. Ungeachtet dessen findet im Folgenden die Darstellung der Energie- und Ressourcenbilanz auf der Grundlage einer Ausschussquote von 1,65% statt.

**Absolute Produktion auf der vollautomatischen Kaschierung**

Wie bereits zuvor dargestellt, fanden bis zum Projektabschluss sowie auch darüber hinaus weiterhin Testversuche auf der vollautomatischen Kaschieranlage statt, sodass diese nicht mit voller Kapazität für die reguläre Produktion zur Verfügung steht.

Aus den ausgezeichneten Daten kann insbesondere erkannt werden, dass die Ausschussquote in den Monaten besonders hoch ist, in denen eine geringe absolute Produktion auf der vollautomatischen Kaschiermaschine realisiert werden konnte. Dies ist in

den entsprechenden Testversuchen, welche konsequenterweise auch als Ausschuss im System erfasst werden, begründet. Bei hohen Produktionsmengen, siehe bspw. das zweite Quartal 2021, kann auch eine niedrige Ausschussquote erreicht werden.

Im Schnitt der letzten sechs Monate vor Projektabschluss erreichte die vollautomatische Kaschiermaschine eine Auslastung von rund 44%. Dies liegt unterhalb der angestrebten Anlagenauslastung von ca. 80%.

**Stoff- und Energiebilanz der vollautomatischen Kaschierung**

Es sei zunächst angemerkt, dass die ursprüngliche Berechnung des Umweltentlastungspotentials im Zuge der Projektplanung auf der Annahme beruhte, dass zukünftig bis zu 10% der Produktion auf der vollautomatischen Kaschierung erfolgen kann. Dieses Ziel konnte innerhalb des Zeitraumes bis zum Projektabschluss noch nicht erreicht werden. Ungeachtet dessen soll im Folgenden ein Vergleich der geplanten sowie auch der erreichten Ressourcen- und Energieeinsparung erfolgen. Dabei wird auch eine Skalierung der Einsparungen auf die nunmehr geplante Auslastung der Kaschieranlage von 80% aufgezeigt.

Es sei weiterhin angemerkt, dass der nachfolgende Vergleich sowohl auf das Szenario „Ausgangssituation versus Innovation“ sowie auch „Stand der Technik versus Innovation“ abstellt, da die gewählte Referenz sowohl die Ausgangssituation sowie auch den Stand der Technik in der Branche widerspiegelt (manuelles Kaschieren).

*Einsparung an PVC-Profilen durch verminderten Ausschuss*

Entsprechend der zuvor dargestellten Daten kann ein Unterschied im Ausschuss zwischen der konventionellen Kaschierung (ca. 3,02%) und der vollautomatischen Kaschierung (ca. 1,65%) von nahezu 50% erkannt werden.

Innerhalb des Betrachtungszeitraums von Januar 2022 bis Juni 2022 konnten somit bei einer insgesamt auf der vollautomatischen Kaschieranlage kaschierten Profilmenge/-länge von rund 311.700 Metern (44% Auslastung) Einsparungen bei den Ausschüssen i.H.v. 4.270 m realisiert werden. Bei einer angestrebten Auslastung von 80% erhöht sich die potentielle Einsparung dementsprechend auf rund 7.760 m. Beide Werte basieren auf einer halbjährlichen Betrachtung. Bei einer jahresweisen Betrachtung analog zur Antragstellung erhöhen sich die Werte auf 8.540 m (44% Auslastung) bzw. 15.520 m (80% Auslastung).

*Einsparung an Farbwechselstangen*

Die oben dargestellten Werten zu den Ausschüssen und Produktionsmengen schließen nicht die Betrachtung der Farbwechselstangen mit ein. Der Ausschuss an Farbwechselstangen wird separat erfasst und muss dabei jeweils in Bezug auf die Anzahl der Farbwechsel sowie die insgesamte Menge/Länge der kaschierten PVC-Profile betrachtet werden.

Betrachtet man beispielsweise erneut den Zeitraum der letzten sechs Monate vor Projektabschluss, mithin Januar 2022 bis Juni 2022, so wurden innerhalb dieses Zeitraums auf der vollautomatischen Kaschieranlage insgesamt rund 311.700 Meter PVC-Profil kaschiert (vgl. Abbildung 12) und hierfür bei rund 6.500 Farbwechseln ein Ausschuss i.H.v. 1.250 Metern an Farbwechselstangen erzeugt.

Vergleicht man dies mit dem konventionellen Kaschierprozess, so wird für jeden Farbwechsel ein PVC-Profil von 6 Meter Länge eingesetzt, welches jedoch ca. dreimal wiederverwendet werden kann (siehe Beschreibung in den Abschnitten 1 und 2 des Abschlussberichtes). Bei 6.500 Farbwechseln ergäbe sich somit ein Ausschuss von 13.000 Metern, was mehr als den Faktor 10 oberhalb des Ausschusses der vollautomatischen Kaschierung liegt.

Es ergibt sich somit also ein verminderter Ausschuss an Farbwechselstangen i.H.v. ca. 11.750 m bei einer Anlagenauslastung von 44% bzw. 21.360 m bei einer Auslastung von 80% bezogen auf ein halbes Jahr. Bei einer jahresweisen Betrachtung analog zur Antragstellung erhöhen sich die Werte auf 23.500 m (44% Auslastung) bzw. 42.720 m (80% Auslastung).

*Einsparungen an Kaschierfolie und Klebstoff*

Die Einsparungen an Kaschierfolie und Klebstoff werden analog des eingangs beschriebenen Ansatzes ermittelt, d.h. als sekundärer Effekt über den vermiedenen Ausschuss an PVC-Profilen. In Bezug auf den Klebstoff wird dabei der reale und messtechnisch erfasste Klebstoffauftrag zugrunde gelegt, welcher im Betrachtungszeitraum (siehe oben) bei durchschnittlich rund 53,9 g/m² lag.

Bei der im Betrachtungszeitraum vorliegenden Auslastung von 44% konnten Einsparungen i.H.v. insgesamt 32.040 m PVC-Profil erreicht werden. Bei einer üblichen Breite der Kaschierfolie von 0,1 m, einer Dicke von durchschnittlich 200 µm und der vorgenannten Länge ergibt sich bei einer Materialdichte von ca. 1.350 kg/m³ eine Gesamtmasse von 0,865 t Kaschierfolie bzw. PVC als Einsparung. In analoger Weise ergäbe sich bei einer Anlagenauslastung von 80% eine Einsparung von Kaschierfolie i.H.v. 1,572 t PVC.

Zur Bestimmung der Einsparungen an Klebstoff wird erneut die Einsparung von PVC-Profil von insgesamt 32.040 m (44% Auslastung) sowie die übliche Breite der Kaschierfolien von 0,1 m zugrunde gelegt. Es ergibt sich somit eine Fläche von 3.204 m² Kaschierfolie und in Kombination mit dem oben dargestellten, messtechnisch erfassten Klebstoffauftrag eine Einsparung an Klebstoff i.H.v. 172 kg. In analoger Weise ergäbe sich bei einer Anlagenauslastung von 80% eine Einsparung von Klebstoff i.H.v. 312 kg.

*Einsparungen an elektrischer Energie*

Zur Bestimmung der Einsparungen an elektrischer Energie werden, im Sinne der Konsistenz und besseren Vergleichbarkeit, die ursprünglichen spezifischen Energiebedarfe zum Zeitpunkt der Antragstellung zugrunde gelegt. Auf dieser Grundlage ergeben sich jährliche Stromeinsparungen aus dem vermiedenen Ausschuss i.H.v. 25,4 MWh bei einer Anlagenauslastung von 44% bzw. 46,1 MWh bei einer Auslastung von 80%.

**Gegenüberstellung der geplanten und erreichten Einsparungen**

Im Folgenden sollen die erwarteten und bei einer Anlagenauslastung von gegenwärtig 44% erreichten Einsparungen gegenübergestellt werden. Darüber hinaus werden ebenfalls die Potentiale bei einer Anlagenauslastung von 80% aufgezeigt.

Im Ergebnis konnten die ursprünglich erwarteten Ressourceneffizienzpotentiale nicht in voller Höhe erreicht werden. Ungeachtet dessen stellt die Einführung der vollautomatischen Kaschierung eine erhebliche Verbesserung i.S. Ressourceneffizienz dar.

Tabelle 5: Gegenüberstellung der geplanten und erreichten Einsparungen.

| Einsparung | Erwartet | Erreicht | Potential |
|---|---|---|---|
| PVC-Profil | 100.000 m/a | 32.040 m/a | 58.240 m/a |
| Kaschierfolie | 2,7 t/a | 0,865 t/a | 1,572 t/a |
| Klebstoff | 500 kg/a | 172 kg/a | 312 kg/a |
| Elektrische Energie | 79,3 MWh/a | 25,4 MWh/a | 46,1 MWh/a |

## 3.3 Umweltbilanz

Auf Basis der zuvor dargestellten Stoff- und Energiebilanzen für den Zustand zum Projektabschluss können unter Berücksichtigung der bereits zuvor dargestellten CO2-Faktoren für die einzelnen Materialien die nachfolgenden CO2-Reduktionspotentiale rechnerisch ermittelt werden. Es wird hierbei wieder zwischen den ursprünglich erwarteten, den zum Projektabschluss erreichten (44% Auslastung) sowie dem Potential bei 80% Auslastung unterschieden.

Tabelle 6: Gegenüberstellung der erwarteten und erreichten $CO_2$-Einsparungen sowie des Potentials.

| Einsparung | Erwartet | Erreicht | Potential |
|---|---|---|---|
| PVC-Profil | 278,3 t $CO_2$ p.a. | 89,2 t $CO_2$ p.a. | 162,1 t $CO_2$ p.a. |
| Kaschierfolie | 5,7 t $CO_2$ p.a. | 1,8 t $CO_2$ p.a. | 3,3 t $CO_2$ p.a. |
| Klebstoff | 2,0 t $CO_2$ p.a. | 0,7 t $CO_2$ p.a. | 1,2 t $CO_2$ p.a. |
| Elektrische Energie | 42,6 t $CO_2$ p.a. | 13,6 t $CO_2$ p.a. | 24,8 t $CO_2$ p.a. |
| | **328,6 t $CO_2$ p.a.** | **105,3 t $CO_2$ p.a.** | **191,4 t $CO_2$ p.a.** |

Analog zu der Darstellung im vorherigen Abschnitt bleibt festzustellen, dass die ursprünglich erwarteten $CO_2$-Reduktionen nicht in voller Höhe erreicht werden konnten. Dies liegt zum einen in der geringeren Auslastung der Anlage (lediglich 44%) begründet sowie zum anderen in der Tatsache, dass die Ausschussquote noch nicht auf den Optimalwert reduziert werden konnte. Hierzu sind weitere Optimierungen an der Anlagentechnik und insbesondere im Teilsystem des Folienwechslers erforderlich.

Ungeachtet dessen trägt das Vorhaben zu deutlichen Umweltentlastungspotentialen bei und ist als Demonstrationsvorhaben in der Branche der Kunststoffindustrie zu verstehen, welches insbesondere über die Skalierung und Multiplizierbarkeit auf andere Unternehmen sein volles Umweltentlastungspotential entfalten kann.

Durch die erfolgreiche Demonstration der Technologie im vorliegenden Projekt entfaltet sich nunmehr insbesondere ein Potential die Automatisierung auch auf die elf weiteren Produktionslinien am Standort Weißenfels der Schüco PWS zu übertragen. Auf Grundlage der

oben dargestellten Werte würde sich dann bei einer avisierten Auslastung der Anlage von 80% eine insgesamte $CO_2$-Reduktion i.H.v. bis zu 2.297 t $CO_2$ pro Jahr ergeben. In der Tat werden aktuell Überlegungen zur Investition in ein zweites Maschinensystem, bestehend aus vollautomatischer Kaschierung und vollautomatischem Folienwechsler, angestrengt.

## 3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Wirtschaftlichkeit des vorliegenden Vorhabens ist eng an die Umweltentlastungspotentiale im Zusammenhang mit der Automatisierung des Kaschierprozesses geknüpft, d.h. die Einsparungen i.S. Ressourceneffizienz sind auch im Sinne der Wirtschaftlichkeit positiv zu bewerten. Das vorliegende Vorhaben ist mithin ein mustergültiges Beispiel dafür, dass Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz grundsätzlich Hand in Hand gehen können.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse wird nachfolgend vereinfacht dargestellt, wobei die zentrale Fragestellung für die Wirtschaftlichkeit der Investition ist, ob sich die Mehrkosten für die Automatisierung des Prozesses (Kaschieranlage und Folienwechsler) über die eingesparten Ressourcen- und Energiekosten gegenüber einem Weiterbetrieb von konventionellen Anlagen ohne Automatisierung (Status Quo) darstellen lässt.

Für die Umsetzung des Vorhabens wurden ursprünglich Investitionskosten i.H.v. 1,35 Mio. Euro kalkuliert, welche sich während der Projektlaufzeit geringfügig auf 1,38 Mio. Euro erhöht haben. Die internen Kosten zur Herstellung eines betriebsbereiten Zustandes (Montage, Installation, laufende Optimierung der Prozessparameter, etc.) sollen in dieser Betrachtung zunächst außen vor bleiben.

Bereits vor der Umsetzung des Vorhabens hatte die Schüco PWS eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Durchführung des Vorhabens und die erstmalige großtechnische Automatisierung des Kaschierprozesses durchgeführt. Zum damaligen Zeitpunkt wurde eine Amortisationszeit der Investitionskosten auf Grundlage der Ressourcen- und Energiekosteneinsparungen i.H.v. rund 8 Jahren ermittelt. Die wirtschaftlichen Effekte der Maßnahme waren mithin nicht ausschlaggebendes Kriterium bei der Investitionsentscheidung, vielmehr standen die umweltbezogenen Effekte im Fokus.

Die in der Projektplanung prognostizierte Rentabilität konnte zum Projektabschluss, aufgrund der noch nicht den Planungen entsprechenden Auslastung der vollautomatischen Kaschieranlage, jedoch noch nicht erreicht werden. Grundsätzlich ist aber weiterhin davon auszugehen, dass durch eine zukünftige Verbesserung der Auslastung sowie eine stetige Optimierung der Ausschussquoten eine Rentabilität entsprechend der ursprünglichen Planungen erreicht werden kann.

## 3.5 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Entsprechend der bereits in den vorherigen Abschnitten dargestellten Situation, wird die Kaschierung von PVC-Profilen nach aktuellem Stand branchenweit bislang vollständig manuell bzw. lediglich teilautomatisiert ausgeführt. Dies spiegelt dabei nicht nur den Stand der Technik in Deutschland wider, sondern beschreibt den weltweiten Produktionsstandard.

Es existieren zwar einzelne Anlagen aus dem Sektor des Sondermaschinenbaus, welche die Kaschierung im Flachbettsystem automatisiert haben. Die Systeme sind jedoch für die Kaschierung komplexer Geometrien, wie sie bei PVC-Profilen existieren, gänzlich ungeeignet

und können aufgrund des Funktionsprinzips (Rolle-zu-Rolle-Verfahren) auch nicht auf dreidimensionale Strukturen adaptiert werden.

Darüber hinaus existieren Berichte über Anlagen, welche ebenfalls eine automatisierte Kaschierung für 3D-Strukturen versprechen. Diese als innovativ beschriebenen Systeme sind als Tunnelsystem für die Andruckrollen zum Fixieren der Folien aufgebaut und können nur bedingt mit vorliegendem System verglichen werden. Schüco PWS verfügt über ein solches Maschinensystem, jedoch konnte die Anlage in der realen Produktion die skizzierten Erwartungen nicht erfüllen. Ein Einsatz im großtechnischen Maßstab ist nicht möglich.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bis zur Durchführung des vorliegenden Vorhabens branchenweit keine Anlagen zur vollautomatischen Kaschierung von geometrisch komplexen PVC-Profilen im Einsatz waren. Der Stand der Technik wurde mithin durch ein nahezu vollständig manuelles Verfahren zur Kaschierung der Profile dargestellt.

**Modellhafter Neuheitswert / fortschrittlicher Stand der Technik**

Die weitestgehende Automatisierung des Kaschierprozesses und die damit einhergehende Reduktion fehleranfälliger händischer Prozesseingriffe stellt den wesentlichen Hebel und Lösungsansatz zur Steigerung der Ressourceneffizienz und zur Verringerung des Ausschusses im vorliegenden Vorhaben dar. Zugleich ist diese Automatisierung auch als wesentliche Innovation im vorliegenden Vorhaben zu betrachten.

Die Automatisierung des Kaschierprozesses ist dabei so innovativ, dass vor der Durchführung des vorliegenden Vorhabens ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt erforderlich war, um die grundlegenden technischen Konzepte zu entwickeln, welche dann in den nun demonstrierten erstmaligen großtechnischen Einsatz einer automatisierten Kaschieranlage mündeten. Eine entsprechende Automatisierung wird bereits seit vielen Jahren von unterschiedlichen Akteuren am Markt angestrebt, konnte jedoch erst in dem vorgenannten FuE-Projekt erstmalig erfolgreich umgesetzt werden.

Ein besonderes Augenmerk sowohl bei der prototypischen Entwicklung sowie auch bei der großtechnischen Implementierung der automatisierten Kaschieranlage lag auf einer möglichst vollumfänglichen Abbildung der existierenden Prozesserfahrungen aus dem manuellen Verfahren auf die ansteuerbaren Stellgrößen der neuen Anlage. Im Rahmen von Vorversuchen und im Zuge der laufenden Optimierung wurden daher umfangreiche Parameterfeldbestimmungen durchgeführt und die entsprechenden Grenzwerte für ein optimales Kaschierergebnis ermittelt.

Die quantitative Bestimmung von oftmals nur in Form von persönlicher Prozesserfahrung der beteiligten Maschinenführer vorliegenden Regelungsgrößen stellt für die Automatisierung von Prozessen eine erhebliche Hürde dar. Umso höher ist der Innovationsgrad, wenn diese Überführung tatsächlich gelingt und das Maschinensystem diese Prozesserfahrung abbilden kann. Dies ist im vorliegenden Projekt gelungen, sodass die Gesamtheit der Anlagentechnik erheblichen Neuheitswert für die Branche aufweist und den Stand der Technik signifikant erweitert.

# 4. Übertragbarkeit

## 4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Im Rahmen der Praxiseinführung der vollautomatischen Kaschieranlage konnte die Schüco PWS umfangreiche Erfahrungen mit der Inbetriebnahme sowie auch dem laufenden Betrieb des Neusystems sammeln.

Die positiven Erfahrungen betreffen hierbei grundsätzlich die nunmehr erreichbare Reduktion der Ausschüsse durch die Automatisierung des bislang nahezu ausschließlich manuell bzw. lediglich teilautomatisiert durchgeführten Prozesses. Die Erwartungen, welche seitens der Schüco PWS an das hochmoderne Neusystem gestellt wurden, wurden dabei im Wesentlichen erfüllt. So konnten die Ausschussquoten um nahezu 50% reduziert und die Anzahl der verworfenen PVC-Profile bei einem Folienwechsel erheblich verringert werden.

Die negativen Erfahrungen aus der Praxiseinführung der vollautomatischen Kaschierung betreffen insbesondere die erheblichen zeitlichen Verzögerungen bei der Inbetriebnahme und der Überführung in den Regelbetrieb sowie auch die Prozessstabilität der einzelnen Systemkomponenten im Zusammenspiel. Hierzu beispielhaft im Einzelnen (vgl. Abschnitt 3.1):

- Bei der Überführung der vollautomatischen Kaschieranlage vom Demonstrator in den großtechnischen Maßstab traten Probleme hinsichtlich der Ansteuerung der Roboterarme und der Gewährleistung einer reproduzierbaren Positionierung der Andruckrollen auf. Durch die höhere Anzahl der Roboterarme der neuen Kaschieranlage im Vergleich zu dem zuvor entwickelten Demonstrator stehen dem Maschinensystem eine Vielzahl an Freiheitsgraden zur Verfügung. Dies ermöglicht zum einen eine flexible Anpassung der Fertigungsmittel auf die jeweiligen PVC-Profile, führt jedoch zum anderen auch zu einem exponentiellen Anstieg von Toleranzen.

  Im Testbetrieb der vollautomatischen Kaschieranlage wurden wiederholt Abweichungen bei der Positionierung der Andruckrollen festgestellt, die in der Folge bspw. zu einem zu geringen oder zu großen Anpressdruck der Kaschierfolie auf die Profile und somit mitunter zu Produktionsfehlern führten. Nach intensiver Fehlersuche sowie Abstimmung mit dem Anlagenlieferanten konnte die Fehlerquelle schließlich auf die interne Kalibrierung der Roboterarme zurückgeführt werden. Zur Positionskalibrierung fahren die Roboterarme regelmäßig auf definierte Positionen auf ihrer Führungsschiene, sodass ein Abgleich der Positionsparameter der Arme mit den absoluten Positionen der Anlage erfolgen kann. Dieser Abgleich zur internen Kalibrierung wies dabei in Bezug auf die Position des Roboters ein Spiel auf, welches sich aufgrund der vielen Freiheitsgrade des Systems in Summe auf bis zu 2 mm Positionsabweichung addieren konnte. Nach Identifikation dieses Problems wurden spielfreie Führungen und Fixierungen der Roboterarme installiert.

- Im Testbetrieb der vollautomatischen Kaschieranlage konnte mitunter beobachtet werden, dass die Anlage Rollen eines falschen Materials für die Kaschierung gewählt hatte. Dies führt zu veränderten Anpressdrücken im Vergleich zu den vorgegebenen Prozessparametern. Das Material der Andruckrollen war bislang mittels mehrerer Nuten auf der Halterung der Rollen kodiert und wurde optisch mittels Triangulation detektiert.

  Durch Reflexionen auf dem metallischen Material kam es dabei jedoch zu Fehlern bei der optischen Erfassung der Nut-Muster, sodass bei der automatisierten Rollenwahl

mitunter falsche Rollen gewählt oder durch das System keine Rollen gefunden wurden. Daraufhin wurde die Kodierung der Rollen in einen Matrixcode abgeändert, welcher auf die Halterung der Rollen mittels Laser geschrieben wurde und nunmehr eine zuverlässige Identifikation der Rollen ermöglicht.

- Einen integralen Teil des Gesamtsystems bzw. insbesondere des Folienwechslers stellt die sog. Spleißbox dar. In dieser werden die jeweiligen Dekorfolien für die Kaschierung vollautomatisch miteinander verschweißt, sodass der Wechsel von Folien zum einen im laufenden Prozess erfolgen sowie zum anderen insbesondere die bislang erforderliche Farbwechselstange entfallen kann. Der Folienwechsler bzw. die Spleißbox sind somit ein wesentlicher Teil zur Realisierung der Automatisierung und zur Hebung der umfänglichen Ressourceneffizienzpotentiale aus der Automatisierung.

  Im Projekt traten dabei Probleme hinsichtlich der Aussteuerung der Bahnkanten von aufeinander folgenden Dekorfolien in der vollautomatischen Kaschierung auf. Hierbei konnte sowohl ein Querversatz der Folien sowie eine Winkelabweichung zwischen den Bahnkanten beobachtet werden; die seitens des Anlagenlieferanten zugesicherten Prozessparameter wurden nicht eingehalten. Diese Abweichungen führten in der Kaschierung nachfolgend zu Produktionsfehlern sowie entsprechendem Ausschuss an PVC-Profilen, sodass im laufenden Vorhaben eine neue Spleißbox mit einer permanent automatisch ausgesteuerten Ausrichtung der Bahnkanten entwickelt werden musste. Hierdurch können die materialbedingt auftretenden Spannungen in den Dekorfolien kontinuierlich nachgeregelt und im Ergebnis eine stoffschlüssige und exakt ausgerichtete Verbindung der Dekorfolien erreicht werden.

Abschließend lässt sich aus den Erfahrungen aus der Praxiseinführung ableiten, dass die branchenweit erstmalige Automatisierung eines bislang nahezu ausschließlich manuell bzw. lediglich teilautomatisiert durchgeführten Prozesses mit erheblichen Herausforderungen verbunden ist. Ein wesentlicher Schlüssel diese Herausforderungen zu überwinden ist eine laufende und sehr enge Abstimmung mit dem Anlagenlieferanten und den technischen Projektverantwortlichen. Diese Abstimmung würde bei der Umsetzung eines Folgevorhabens noch intensiviert werden.

## 4.2 Modellcharakter/Übertragbarkeit

Die im Vorhaben erstmalig demonstrierte Technologie ist als übertragbar einzustufen, wobei die Multiplizierbarkeit insbesondere im Hinblick auf weitere kunststoffverarbeitende Unternehmen zu sehen ist. Der Anteil der Produktion von PVC-Profilen an der gesamten PVC-Produktion in Deutschland macht gemäß einer Studie aus dem Jahr 2014 einen Anteil von deutlich mehr als einem Drittel aus[3]. Auch vor dem Hintergrund, dass im Allgemeinen nicht alle produzierten PVC-Profile kaschiert werden, ist grundsätzlich von einem sehr hohen Potential für die Technologie auszugehen.

Entsprechend einer Analyse der DF Deutsche Fensterbau GmbH sind in Deutschland die nachfolgend aufgeführten Marken im Bereich der Produktion von Kunststofffenster operativ tätig[4]:

---

[3] PlasticsEurope/AGPU/BKV – Consultic PVC Studie 2014

[4] https://www.deutsche-fensterbau.de/fensterhersteller/

Tabelle 7: Tabellarische Übersicht zu Firmen/Marken im Bereich der Produktion von Kunststofffenster.

| Marke | Produktangebot (Auswahl) |
|---|---|
| SCHÜCO | Fassadenfenster und Türen aus Aluminium, Kunststoff oder Stahl |
| VEKA | Fassadenfenster, Türen, Rollläden aus Kunststoff |
| REHAU | Fassadenfenster und Balkontüren aus Kunststoff |
| ALUPLAST | Fassadenfenster und Türen aus Kunststoff sowie Rollladensysteme |
| VELUX | Dachfenster und Oberlichtsysteme aus Kunststoff |
| ROTO FRANK AG | Dachfenster aus Holz und Kunststoff |
| GEALAN | Fassadenfenster, Haustüren und Schiebesysteme aus Kunststoff |
| KÖMMERLING | Fassadenfenster und Schiebetüren aus Kunststoff und Aluminium |
| WERU | Fassadenfenster und Türen aus Kunststoff, Aluminium und Holz |
| BAYERWALD | Fassadenfenster und Haustüren aus Holz, Kunststoff und Aluminium |
| INTERNORM | Fassadenfenster aus Holz, Aluminium und Kunststoff |

Für alle oben genannten Hersteller von Fenstersystemen aus kaschierten PVC-Profilen kann der Einsatz einer vollautomatisierten Kaschieranlage zur Reduktion von Ausschüssen und zur Steigerung der Ressourcen- sowie Energieeffizienz grundsätzlich von Interesse sein.

Eine vergleichbare Anlage könnte dabei problemlos an anderen Standorten sowohl in einem geringeren als auch größeren Umfang umgesetzt werden. Die Anlage bei der Schüco PWS wurde als erste Anlage ihrer Art umgesetzt und zeigt eine zukunftsfähige Lösung für die gesamte Branche auf; sie besitzt damit entsprechenden Demonstrationscharakter.

Nach Aussage des Lieferanten der vollautomatischen Kaschieranlage hat zum Ende der Projektlaufzeit ein weiterer deutscher Hersteller von Kunststofffenstern eine entsprechende Anlage bestellt. Hierbei handelt es sich informationsgemäß um ein deutsches Unternehmen, welches sowohl eine vollautomatische Kaschieranlage sowie auch den vollautomatischen Folienwechsler erworben hat. Das Unternehmen profitiert dabei direkt von den Erkenntnissen aus dem vorliegenden Vorhaben, insbesondere in Bezug auf die technische Auslegung der Spleißbox.

Das marktseitige Interesse von Wettbewerbern zeigt grundsätzlich den Bedarf zur Einführung automatisierter Lösungen in der Kaschierung, wobei davon auszugehen ist, dass mit steigender Nachfrage auch die Marktreife der Technologie steigt und mithin der Zeitraum zur Implementierung reduziert werden kann (im Vergleich zum vorliegenden Projekt bei der Schüco PWS).

Als Hemmnis zur Einführung der automatisierten Kaschierung ist grundsätzlich die hohe technische Komplexität der Lösung zu nennen. Dies wird insbesondere bei Unternehmen/Herstellern, die nur einzelne bzw. wenige Kaschiermaschinen betreiben, eine entsprechende Investitionsentscheidung hemmen, da die vorhandenen Anlagen jeweils im gesamten Maße zur Produktion zur Verfügung stehen müssen und langwierige Optimierungen nicht akzeptabel sind. Mit zunehmender Marktreife der Technologie wird dieses Hemmnis jedoch voraussichtlich überwunden werden können.

# 5. Zusammenfassung

Das vorliegende Vorhaben zur erstmaligen großtechnischen Demonstration einer vollautomatischen Kaschierung wurde von der Schüco PWS Kaschierungs KG am Standort Weißenfels umgesetzt. Das Unternehmen ist im Bereich der Kunststoffindustrie tätig und produziert insbesondere PVC-Profile in verschiedenen Farben/Dekoren für den Fensterbau. Die Farben/Dekore der Profile werden dabei i.d.R. durch Aufbringen von Dekorfolien erzeugt. Dieser Prozessschritt der Profilummantelung wird als sog. Kaschierung bezeichnet.

Der Prozessschritt der Kaschierung wird branchenweit in der Kunststoffindustrie im Wesentlichen ausschließlich manuell bzw. lediglich teilautomatisiert durchgeführt. Hierdurch entstehen regelmäßig hohe Ausschüsse, welche grundsätzlich durch eine Automatisierung in Teilen vermeidbar wären. Aufgrund der Komplexität des Prozesses fand bislang jedoch keine Automatisierung statt, sodass der Prozess in Hand-/Manufakturarbeit den Stand der Technik dargestellt.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes sollte nunmehr erstmalig ein vollautomatisierter Kaschierungsprozess inklusive einer Automatisierung der vorgelagerten Zuführung der Kaschierfolie erfolgen. Hierzu wurde ein Robotersystem mit insgesamt zwölf Armen eingesetzt, welches aufgrund der vielen Freiheitsgrade der Roboterarme flexibel an nahezu jedes PVC-Profil angepasst werden kann. Im Ergebnis sollte eine vollständige Automatisierung erreicht werden.

Bei Durchführung des Vorhabens traten verschiedentliche Herausforderungen und Schwierigkeiten auf, welche aus den technischen Risiken bei der erstmaligen großtechnischen Implementierung einer Automatisierung des Kaschierprozesses resultierten. Ungeachtet dessen konnte jedoch eine automatisierte Lösung erfolgreich in Betrieb genommen und der positive Einfluss auf die Vermeidung von Ausschüssen gezeigt werden. Vor dem Hintergrund einer zum Projektabschluss immer noch in der Optimierung befindlichen Anlagenkonfiguration konnten die ursprünglich erwarteten Einsparpotentiale bzw. Umweltentlastungspotentiale nicht in voller Höhe erreicht werden. Trotz dessen trägt das Vorhaben ganz maßgeblich zur Erweiterung des Standes der Technik in der Branche bei und zeigt auf, welche innovativen Ansätze zur Erzielung von $CO_2$-Einsparungen zukünftig verfolgt werden können.

Im Ergebnis konnte durch das Vorhaben bei einer gegenwärtigen Anlagenauslastung von 44% ein $CO_2$-Reduktionspotential von 105,3 t $CO_2$ p.a. erreicht werden. Bei einer perspektivischen Auslastung des Systems von 80% wird damit zukünftig eine $CO_2$-Einsparung durch das ressourcen- und energieeffiziente Kaschieren von PVC-Profilen i.H.v. bis zu 191,4 t $CO_2$ p.a. erwartet.

Das Vorhaben besitzt Demonstrationscharakter und die Technik kann dem Grunde nach auch in anderen Unternehmen der Branche oder in anderen Unternehmen mit äquivalenten Anwendungsszenarien zum Einsatz kommen. Eine Übertragbarkeit ist mithin gegeben. Darüber hinaus kann das System auch in größerer oder kleinerer Ausführung bei weiteren Unternehmen implementiert werden, sodass auch eine entsprechende Skalierbarkeit gegeben ist.

# 6. Summary

The present project for the first large-scale demonstration of fully automatic lamination process was implemented by Schüco PWS Kaschierungs KG at the Weißenfels site. The company is active in the plastics industry and produces PVC profiles in various colours/decors for window construction. The colours/decors of the profiles are usually created by applying decorative foils. This process step of profile wrapping is called lamination.

In the plastics industry, the lamination process step is mainly carried out manually or only partially automated. This regularly results in high rejects rates, which could in principle be avoided in part through automation. Due to the complexity of the process, however, no automation has taken place so far, so that the state of the art is represented by a manual process.

Within the scope of the present project, a fully automated lamination process including automation of the upstream feeding of the lamination foil was to be implemented for the first time. For this purpose, a robot system with a total of twelve arms was used, which can be flexibly adapted to almost any PVC profile due to the many degrees of freedom of the robot arms. As a result, complete automation was to be achieved.

During the implementation of the project, various challenges and difficulties arose, which resulted from the technical risks of the first large-scale implementation of an automation of the laminating process. Despite this, however, an automated solution was successfully put into operation and the positive influence on the avoidance of rejects was demonstrated. Against the background of a system configuration that was still being optimised at the end of the project, the originally expected saving potentials or environmental relief potentials could not be fully achieved. Despite this, the project contributes significantly to the expansion of the state of the art in the sector and shows which innovative approaches can be pursued in the future to achieve $CO_2$ savings.

As a result, the project achieved a $CO_2$ reduction potential of 105.3 t $CO_2$ p.a. at a current plant utilisation of 44%. With a prospective utilisation of the system of 80%, a $CO_2$ saving of up to 191.4 t $CO_2$ p.a. is expected in the future through the resource- and energy-efficient lamination of PVC profiles.

The project has a demonstration character and can basically also be used in other companies in the sector or in other companies with equivalent application scenarios. Transferability is therefore given. Furthermore, the system can also be implemented in larger or smaller versions at other companies, so that a corresponding scalability is also given.

# 7. Literatur

https://www.mz.de/lokal/weissenfels/klimafreundlichere-produktion-umweltministerium-unterstutzt-weissenfelser-firma-1678477

# 8. Anhang

N/A