

Gemeinsamer Abschlussbericht zum Projekt

Ressourceneffiziente Erzeugung haftklebender Formteile
durch generative Druckverfahren

- GenDru –

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

DBU-AZ 32912/01

Forschungsstelle 1:
Biolink GmbH
Brunnenweg 38
83666 Waakirchen

BIOLINK
tape solutions

Forschungsstelle 2:
IFS der TU Braunschweig
Langer Kamp 8
38106 Braunschweig

Institut für Füge- und
Schweißtechnik



Forschungsstelle 3:
IWF der TU Braunschweig
Langer Kamp 19b
38106 Braunschweig

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik **IWF**

06/02					
Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt					
Az	DBU-AZ 32912/01	Referat	Finanzielles Projektcontrolling	Fördersum- me	248.636 €
Antragstitel	Ressourceneffiziente Erzeugung haftklebender Formteile durch generative Druckverfahren				
Stichworte	Verfahren, Haftklebstoff, Drucktechnik				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
18 Monate	30.06.2017	30.01.2018	4		
Zwischenberichte	1				
Bewilligungsempfänger	Biolink GmbH		Tel 080215042913		
	Brunnenweg 38		Fa 080215042929 x		
	83666 Waakirchen		Projektleitung Dr.-Ing. Marcus Weber		
			Bearbeiter Dr.-Ing. Marcus Weber		
Kooperationspartner	IFS TU Braunschweig, Langer Kamp 8, 38106 Braunschweig IWF TU Braunschweig, Langer Kamp 19, 38106 Braunschweig				
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Ein Nachteil bei der Verwendung von Haftklebstoffen ist der häufig niedrige Materialnutzungsgrad bei vor konfektionierten Haft-/Klebebändern. Der Stanzvorgang des innerhalb des Projektes betrachteten, kreisrunden Bauteiles verursacht z.B. ca. 40% Verschnitt. Üblicherweise kann der Verschnitt nicht genutzt werden und wird entsorgt. Hier setzte das Projekt GenDru an und kombinierte durch die Entwicklung eines generativen Druckverfahrens zur Erzeugung haftklebriger Formteile die technischen und ökologischen Vorteile der Haftklebstoffe mit einem material- und ressourceneffizienten Herstellungsverfahren, für beinahe beliebige geometrische Formen: Im Niederdruck-Rotationsdruck wurde ein lösemittelfreies, vernetzungsfähiges Polymer konturgenau auf das Trägermaterial aufgetragen und mittels UV-LED-Strahlung zu einem einsatzfähigen haftklebrigen Formteil ohne weitere notwendige Bearbeitungsprozesse vernetzt. Durch diesen Prozess wurden die Formtei-</p>					

le in einem Endlosverfahren ohne Stanzvorgang erzeugt. Durch das Wegfallen des Stanzprozesses wurde der übliche Verschnitt vermieden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Innerhalb des Projektes wurde in sieben Arbeitspaketen erfolgreich eine Technologie zur generativen Fertigung haftklebriger Formteile entwickelt. Dabei wurden rheologische und thermodynamische Versuche zur Entwicklung einer geeigneten Klebstoffformulierung eingesetzt und ein Life-Cycle-Assessment zur ökologischen Bewertung der erzielten Ergebnisse durchgeführt.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt ● An der Bornau 2 ● 49090 Osnabrück ● Tel 0541/9633-0 ● Fax 0541/9633-190 ● <http://www.dbu.de>

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	II
Inhaltsverzeichnis	IV
Kurzzusammenfassung	VI
1 Einleitung.....	7
2 Motivation und Zielsetzung.....	8
3 Versuchsteil.....	9
3.1 Rohstoffe	9
3.1.1 Trennmaterialien, Liner, Walzenbeschichtungen	9
3.1.2 Unpolare Monomere	9
3.1.3 Polare Monomere	9
3.1.4 Vernetzer	9
3.1.5 Initiatoren	10
3.1.6 Harze	10
3.2 UV-Strahler.....	10
3.3 Substrate	10
3.3.1 Polyethylen (PE)	10
3.3.2 Polyethylenterephthalat (PET)	11
3.3.3 Edelstahl 1.4301 (V2A).....	11
3.4 Probenpräparation.....	11
3.5 Analytische Methoden	12
3.5.1 Rheologie.....	12
3.5.2 180° Schälversuch.....	12
3.5.3 SAFT – Shear Adhesion Failure Temperature	13
3.5.4 Zugscherversuche (DIN EN 1465).....	14
3.6 Alterung – Kataplasmatest	15
4 Ergebnisse	16
4.1 AP1 – Lastenheft.....	16
4.2 AP 1 Ökologische Bewertung – IWF	16
4.3 AP 2 - Entwicklung einer Basisrezeptur (removable).....	21
4.4 AP 3 - Anlagentechnik IFS	28
4.4.1 Anlagenkonzept	28
4.4.2 Manuelle Druckversuche	30
4.5 AP 4 - Optimierung der Rezeptur	32
4.6 AP 5 – Anlagentechnik II (ifs)	38

4.7	AP 6 - Anpassung einer industriellen Laboranlage unter fertigungstechnischen und wirtschaftlichen Aspekten.....	52
4.8	AP 7 – Life Cycle Assessment	53
4.8.1	Erhebung der Datenbasis und Modelbildung	53
4.8.2	Wirkungsabschätzung.....	61
4.8.3	Auswertung.....	62
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	64
6	Öffentlichkeitsarbeit	66
7	Literaturverzeichnis	67

Kurzzusammenfassung

Im vorliegenden Abschlussbericht werden die Ergebnisse des Projektes „GenDru“ abschließend dargestellt.

Die Herstellung von haftklebrigen Bauteilen wird herkömmlich über einen Stanzprozess realisiert. In dem Projekt „GenDru“ wurden diese Bauteile generativ hergestellt, anstatt sie aus vorgefertigten Bändern herauszuarbeiten. Dies stellte ein deutlich ressourcenschonenderes Fertigungsverfahren dar.

Als Grundlage dazu diente eine vollständig neuartige Art und Weise haftklebrige Bauteile zu produzieren. Bei der von Biolink als Patent angemeldeten Technik wird flüssiger Klebstoff in ein beliebig geformtes Werkzeug gefüllt. Nachfolgend wird ein Liner verwendet, welcher die Form luftdicht gegenüber der Umgebung abschließt. Eine nachgelagerte Strahlungshärtung des Klebstoffs kann dadurch ohne die Verwendung von Schutzgasen stattfinden. Zum Schluss kann der ausgehärtete Klebstoff, an dem Liner anhaftend, aus dem Werkzeug entformt werden.

Um das zu erreichen wurde im Projekt „GenDru“ eine Anlage auf Basis eines Rotations-Tiefdrucks ausgelegt und konstruiert. Ziel war es, einen kontinuierlichen Herstellungsprozess zu ermöglichen. Damit sich die hergestellten Drucklinge nach der Aushärtung problemlos entformen lassen, wurde im Rahmen der Bauteilauslegung ein spezielles Augenmerk auf die Materialwahl des Formwerkzeugs und des Liners gelegt. Darüber hinaus wurde eine Basisrezeptur eines passenden Klebstoffs entwickelt. Die Kombination dieser Parameter wurde durch Quell- und 180° Schälversuche evaluiert und aufeinander abgestimmt. Das Ziel dabei war es einen Haftklebstoff zu entwickeln, der aufgrund von thermodynamischer Inkompatibilität von Träger und Klebstoff als wiederlösbar eingestuft werden konnte. Um die geeignete Material- und Klebstoffauswahl ex-situ zu verifizieren wurden händische Versuche durchgeführt. Die dabei erzielten Ergebnisse wurden auf den Walzenprozess an der konstruierten Anlage übertragen. Der Wechsel von händischer auf automatische Produktion stellte an den Klebstoff neue Anforderungen in Form von Prozesstemperatur und Strahlungsdegradation des Walzenmaterials. Durch die veränderten Parameter musste auch der entwickelte Klebstoff weiter angepasst werden. Die auf der Anlage hergestellten Drucklinge wurden mechanisch hinsichtlich ihrer Klebeignung charakterisiert und mit den bei Biolink produzierten Mustern verglichen. Abschließend wurden alle prozessbedingten, messbaren Parameter der beiden Anlagen (Biolink, GenDru) miteinander verglichen und anhand eines Life-Cycle-Assessments bewertet.

Im Rahmen der vergleichenden Ökobilanz der beiden Fertigungsverfahren sind Energie- und Medienbedarf sowie Abfallentstehung im Produktionsprozess untersucht worden. Die Auswertung der ökologischen Auswirkungen des neuen Fertigungsverfahrens im Vergleich zum Referenzprozess erfolgte anhand der CML 2001 Methode für die Umweltwirkungskategorien Treibhauspotential, Versauerungspotential und Humantoxizitätspotential. Das untersuchte generative Druckverfahren im Labormaßstab zeigte ein erhebliches Umweltentlastungspotential durch Vermeidung von Klebstoffabfällen. Weiteres Umweltentlastungspotential wird durch das Hochskalieren der Technologie auf industriellen Serienmaßstab erwartet, in dem der Materialnutzungsgrad des eingesetzten Liners durch Optimierung der Formanordnung auf der Druckwalze erhöht wird.

1 Einleitung

Gestanzte Klebebänder sind von hoher ökologischer, technologischer und volkswirtschaftlicher Bedeutung. Im Gegensatz zu viskos applizierten Klebstoffen bieten Haftklebstoffe direkt nach dem Fügen eine Handlungsfestigkeit und die Möglichkeit der sofortigen Weiterverarbeitung.

Da das Mischen und die viskose Klebstoffapplikation entfallen, ist der Applikationsprozess vergleichsweise robust und fehlertolerant. Zusätzlich wird eine Gefährdung von Umwelt und Mensch durch austretenden Klebstoff bzw. abdampfende Lösemittel vermieden.

Die bezeichneten Vorteile führen dazu, dass der Umsatz mit Haftklebstoffen weltweit bei etwa 15 Milliarden Euro und etwa 1,2 Milliarden Euro in Europa liegt. Verschiedene Quellen sehen vor allem bei Dispersionen und UV-Systemen einen zukünftig stark wachsenden Markt.

Dabei spielen die ständig steigenden gesetzlichen Auflagen zum Umwelt- und Verbraucherschutz, aber auch ein wachsendes Verständnis auf Seiten der Verbraucher eine wichtige Rolle.

Die Einsatzbereiche für Haftklebstoffe können grob gemäß ihrer Klebkraft und Festigkeit wie folgt eingeteilt werden:

- Removable für wieder ablösbare Verbindungen
- Mittlere Festigkeit
- Hohe Festigkeit, z.B. für Anbauteile und Verkleidungen

Innerhalb des Projektes sollten Klebstoffe für generativ gefertigte Formteile mit hohen Festigkeiten entwickelt werden. Da die Anforderungen an die damit verbundene Prozesstechnik des generativen Druckens höher sind, wurden anfangs auch Haftklebstoffe mit „removable“ Eigenschaften betrachtet.

Auf den so gewonnen Erkenntnissen wird eine Formulierung entwickelt, welche höhere mechanische Festigkeiten generiert. Dies erfolgt mittels einer statistischen Versuchsplanung unter Berücksichtigung der für die Anwendung geeigneten Monomere, welche mittels Quellversuchen auf den Walzenmaterialien identifiziert werden.

Da sowohl aus der alternativen Monomerauswahl, als auch den geringeren Fertigungsgeschwindigkeiten und Anlageneigenschaften eine neue Abschätzung der wirtschaftlichen und ökologischen Eigenschaften erforderlich ist, führt das IWF am Ende des Projektes eine Life-Cycle-Assessment-Bewertung durch.

2 Motivation und Zielsetzung

Ein Nachteil bei der Verwendung von Haftklebstoffen ist der häufig niedrige Materialnutzungsgrad bei vorkonfektionierten Haft-/Klebebändern. Der Stanzvorgang des innerhalb des Projektes betrachteten, kreisrunden Bauteiles (Abbildung 1) verursacht z.B. ca. 40% Verschnitt. Üblicherweise kann der Verschnitt nicht genutzt werden und wird entsorgt.

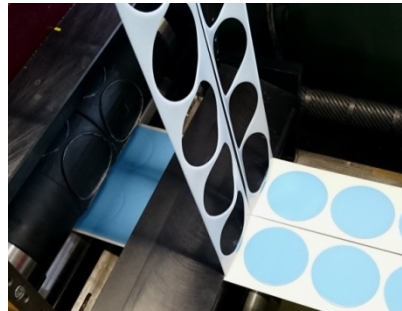


Abbildung 1 Herstellung und damit verbundener Verschnitt haftklebriger Stanzteile
Aktuelles Beispiel aus der Stanzerei der Firma BIOLINK
[Quelle: Biolink Gesellschaft für Verbindungstechnologien mbH]

Hier setzt das Projekt **GenDru** an und kombiniert durch die Entwicklung eines generativen Druckverfahrens zur Erzeugung haftklebriger Formteile die technischen und ökologischen Vorteile der Haftklebstoffe mit einem material- und ressourceneffizienten Herstellungsverfahren, für beinahe beliebige geometrische Formen: Im Niederdruck-Rotationsdruck wurde ein lösemittelfreies, vernetzungsfähiges Polymer konturgenau auf das Trägermaterial aufgetragen und mittels UV-LED-Strahlung zu einem einsatzfähigen haftklebrigen Formteil ohne weitere notwendige Bearbeitungsprozesse vernetzt. Durch diesen Prozess werden die Formteile in einem Endlosverfahren ohne Stanzvorgang erzeugt. Durch das Wegfallen des Stanzprozesses wurde der übliche Verschnitt vermieden.

Den zeitlichen Ablauf des Projektes stellt Abbildung 2 dar.

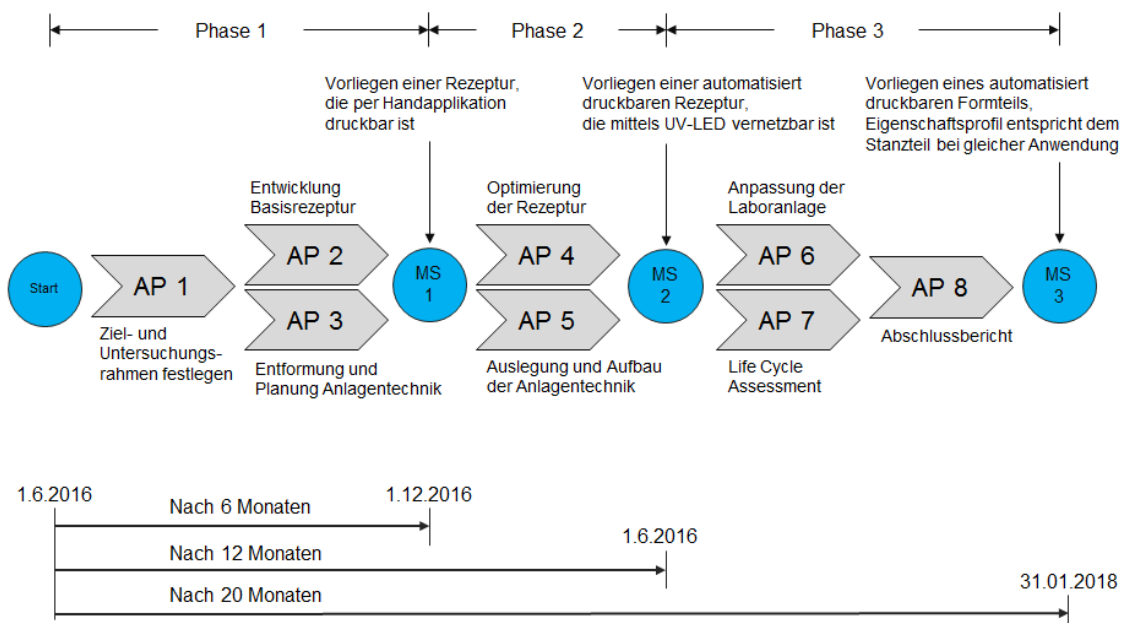


Abbildung 2: Zeitplan des Projektes

3 Versuchsteil

3.1 Rohstoffe

3.1.1 Trennmaterialien, Liner, Walzenbeschichtungen

Innerhalb des Projektes wurden verschiedene Trägermaterialien verwendet. Aufgrund der guten Verfügbarkeit und optischen Eigenschaften wurden ausschließlich silikonisierte Polyesterfolien als Träger eingesetzt. Hierbei kamen Materialien mit einer abgestuften Oberflächenenergie zum Einsatz, welche sich dadurch hinsichtlich der Trennkräfte unterscheiden.

Für die Walzenbeschichtungen wurden eine Vielzahl verschiedener Silikone und Fluorkunststoffe untersucht, wobei sich vor allem Silikone als besonders geeignet herausgestellt haben. Die Ergebnisse wurden aufgrund der engen Wechselwirkung mit dem verwendeten Klebstoff in Kapitel „AP 2 - Entwicklung einer Basisrezeptur (removable)“ dargestellt.

3.1.2 Unpolare Monomere

Unpolare Acrylatmonomere sind Ester der Acrylsäure mit unpolarem, zumeist aliphatischem Kohlenwasserstoffrest wie z.B. Ethyl- oder Butylrest. Sie haben zumeist eine geringe Glasübergangstemperatur und als Homopolymere eine intrinsische Oberflächenklebrigkeit. Als alleiniger Bestandteil für einen Haftklebstoff sind sie dennoch ungeeignet, da die mechanischen Eigenschaften zu sehr denen einer Flüssigkeit ähneln und die Übertragung mechanischer Beanspruchungen hierdurch stark eingeschränkt ist.

Diese Monomere sind innerhalb des Projektes problematisch, da die meisten Trägermaterialien ebenfalls unpolar und damit vergleichsweise gut thermodynamisch kompatibel sind, was zu verstärkter Adhäsion und Diffusion führt.

3.1.3 Polare Monomere

Bei den verwendeten polaren Monomeren handelt es sich ebenfalls um Ester der Acrylsäure (bzw. Acrylsäure selbst) mit einer polaren Funktion, welche die Kohäsion des Klebstoffes ebenso wie die Adhäsion positiv beeinflussen können. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese Monomere als Homopolymere selbst keine Oberflächenklebrigkeit aufweisen und somit für den alleinigen Einsatz in Haftklebstoffformulierungen ungeeignet sind.

Hinsichtlich der thermodynamischen und adhäsiven Wechselwirkungen auf niederenergetischen Linern oder Walzenbeschichtungen sind diese Materialien erheblich unkritischer als die unpolaren Monomere.

3.1.4 Vernetzer

Vernetzer werden bei Acrylaten eingesetzt, um die Polymerketten untereinander so zu verbinden, dass ein elastomeres Netzwerk entsteht, welches sich unter äußerer Beanspruchung ausbalanciert viskoelastisch verhält.

Vernetzer sorgen so für eine höhere Kohäsion der Klebstoffe und reduzieren, in geringem Umfang eingesetzt, die Klebrigkeit nur wenig.

Zumeist handelt es sich um difunktionelle Monomere oder Moleküle mit mindestens zwei reaktiven Gruppen.

3.1.5 Initiatoren

Innerhalb des Projektes wurden Photoinitiatoren als Starter der radikalischen Vernetzung verwendet. Die Emissionsbanden der verwendeten Emitter und Absorptionswellenlänge der Initiatoren müssen übereinstimmen um eine ausreichende Reaktionsgeschwindigkeit zu bieten. Die Auswahl der einsetzbaren Initiatoren ist durch die angestrebte Verwendung von LEDs daher stark eingeschränkt. Auf die so genannten H-Abstraktoren (Norrish Typ II) wurde verzichtet, da diese bekannterweise auf Silikonen zu einer negativen Veränderung der Trennkraft führen. Es kamen daher nur schnelle Norrish-Typ I Initiatoren zum Einsatz.

3.1.6 Harze

Werden Haftklebstoffe mit einem hohen Anteil polarer oder harter Monomere formuliert, steigen sowohl die Glasübergangstemperatur (T_g) als auch das gummielastische Plateau. Als Grundlage zur Berechnung der Änderungen kann die Flory-Fox-Gleichung verwendet werden. Erstrebenswert ist, dass der T_g etwa 20°C unter der Anwendungstemperatur liegt. Während ein hoher T_g für die Scherfestigkeit günstig ist, führt ein hohes gummielastisches Plateau zu reduzierter Klebrigkeit und oftmals auch geringerer Schälfestigkeit. Dies kann durch den Einsatz von Haftharzen vermieden werden, welche den T_g erhöhen und das gummielastische Plateau absenken.

3.2 UV-Strahler

Die Initiierung der radikalischen UV-Vernetzung benötigt zusätzlich zu einem Initiator auch einen geeigneten UV-Strahler. Die eingesetzten, langwellig absorbierenden Initiatoren benötigen einen Strahler, der einen Großteil der erforderlichen Strahlung auch im UV-A Bereich emittiert. Hierzu eignen sich vor allem LEDs mit einer Wellenlänge von 395 nm. Innerhalb des Projektes wurde ein Rundstrahler aufgebaut, welcher die eingesetzten Walzen ideal umschließt.

3.3 Substrate

Die Charakterisierung von Klebeverbindungen erfolgt immer bezogen auf eine Materialkombination und ist daher substratspezifisch. Für die mechanischen Versuche (siehe Kapitel 3.4) werden möglichst definierte Oberflächen benötigt, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Wegen besonderer technischer und wirtschaftlicher Relevanz werden die im Folgenden beschriebenen Substrate ausgewählt. Dabei wurde auf ein möglichst breites Spektrum hinsichtlich der Oberflächenenergien und möglichst geringer Unterschiede hinsichtlich der Oberflächenrauigkeit geachtet.

Die Substrate werden hinsichtlich dieser Größen im Vorfeld der Versuche charakterisiert, da (1) (2) (3) (4) beschreiben, dass der Oberflächenzustand der haftklebrig zu fügenden Substrate einen erheblichen Einfluss auf das Prüfergebnis aufweist.

3.3.1 Polyethylen (PE)

Polyolefine, wie z.B. PE, eignen sich vor allem für die Verarbeitung im Spritzgussverfahren. Durch die niedrige Oberflächenspannung und intern enthaltene Trennmittel ist das Entformen im Vergleich zu vielen anderen Kunststoffen problemlos möglich. Wegen der sehr geringen Oberflächenspannung ist PE mit vielen üblichen Haftklebstoffen nicht zu kleben. Kautschuksysteme zeigen auf PE ausreichende Festigkeiten und sind für den Einsatz auf diesen Oberflächen daher besonders geeignet. Acrylate hingegen haben auf diesen Oberflächen oftmals Schwierigkeiten, weshalb nur Ac-

rylate mit einem hohen Anteil unpolarer Monomere auf diesen Oberflächen gute Ergebnisse zeigen.

Geliefert wurden die zugeschnittenen Substrate von der Firma Rocholl GmbH. Die Oberflächenrauigkeit wurde mittels Tastschrittverfahren bestimmt und liegt für dieses Substrat bei $R_a = 0,05 \mu\text{m}$ und $R_z = 0,29 \mu\text{m}$.

3.3.2 Polyethylenterephthalat (PET)

Die Verarbeitung dieses thermoplastischen Kunststoffes kann mit den bekannten Techniken des Spritzgießens sowie des Schlauchblasens erfolgen, um Folien herzustellen. Es zeichnet sich durch hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit, mechanische und thermische Beständigkeit bis ca. 200°C sowie Diffusionssperre für Gase und Wasser aus. Das Material hat wegen seiner guten physikalischen Eigenschaften in vielen Bereichen technische Relevanz. Die Zugfestigkeit von PET Folien reicht zu meist aus, um direkt mit derartig beschichteten Folien z.B. Zugscher- und SAFT-Versuche durchzuführen. Es besitzt eine für Klebungen mit Acrylaten günstige Oberflächenenergie und kann durch Plasma oder Corona vorbehandelt werden.

Geliefert werden die zugeschnittenen Substrate von der Rocholl GmbH mit der Bezeichnung „A-PET – Makroform“.

Die Oberflächenrauigkeit wurde mittels Tastschrittverfahren bestimmt und liegt für dieses Substrat bei $R_a = 0,01 \mu\text{m}$ und $R_z = 0,12 \mu\text{m}$.

3.3.3 Edelstahl 1.4301 (V2A)

Edelstahl 1.4301 (V2A) besitzt eine hohe chemische Beständigkeit und lässt sich gut reinigen sowie polieren. Er dient als „Standardmaterial“ bei der Charakterisierung von Haftklebstoffen in den AFERA (Association des Fabricants Européens de Ruban Auto-Adhésifs)-Prüfvorschriften. Für die Prüfungen nach AFERA werden diese Substrate mehrfach verwendet und vor jeder erneuten Klebung mit feinem Schleifpapier (Körnung 600) abgeschliffen.

An der Oberfläche chromhaltiger Edelstähle befindet sich eine dichte Schicht aus Chromoxiden, die vor Korrosion schützt und eine ausreichend hohe Oberflächenspannung und Polarität aufweist, um mit vielen Haftklebstoffen hohe Verbindungsfestigkeiten zu erreichen. Die Oberflächenrauigkeit nach der Vorbehandlung wurde mittels Tastschrittverfahren bestimmt und liegt für dieses Substrat bei $R_a = 0,08 \mu\text{m}$ und $R_z = 0,51 \mu\text{m}$.

3.4 Probenpräparation

Die Herstellung von Proben mit Haftklebstoffen kann entweder als Folien/Bahnware oder als gedrucktes Formteil erfolgen. Zur Ermittlung von Kennwerten eignet sich die Herstellung und Verwendung von Folien, vor allem zu Beginn des Projektes, besser, da die im Folgenden beschriebenen Prüfmethode auf definierte Streifen der Materialien angewiesen sind.

Zur Herstellung werden die Klebstoffe daher mittels Rakel auf geeignete Liner beschichtet und mittels UV-Licht definiert ausgehärtet. Hierzu stehen bei Biolink verschiedene, mittels Stickstoff inertisierte, Anlagen zur Verfügung.

3.5 Analytische Methoden

3.5.1 Rheologie

Die Rheologie dient der Beschreibung der elastischen und viskosen Eigenschaften von Haftklebstoffen. Darüber hinaus sind die Möglichkeiten zur Applikation eines flüssigen Haftklebstoffs maßgeblich durch seine Viskosität gekennzeichnet. Zur Charakterisierung kommt eine 8 mm Platte-Platte Geometrie und ein Rheometer der Firma Malvern, Abbildung 3 zum Einsatz.

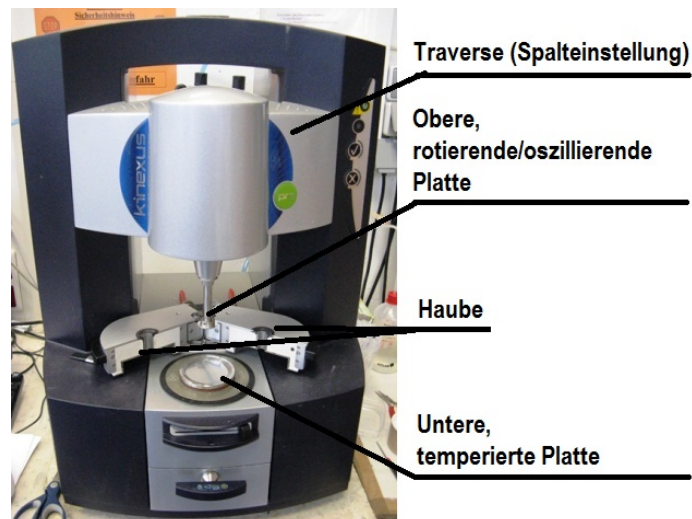


Abbildung 3: Rheometer Malvern Kinexus, ifs

Messungen an vernetzten Haftklebstoffen können am Rheometer nur oszillierend mit Platte-Platte Geometrien erfolgen, da hohe Dehnungen, wie diese in Rotationsmessungen notwendig sind, zu Messungen außerhalb des (linear viskoelastischen) LVE Bereiches und damit zur irreversiblen Strukturänderung im Haftklebstoff führen würden.

Auf Basis der Cox/Merz-Regel (5) lassen sich solche Messungen innerhalb des LVE in Scherraten-abhängige Messungen umrechnen. Die Amplitude (Dehnung) beträgt standardmäßig in allen Messungen 0,1 %. Frequenz und Temperatur werden je nach Verfahren variiert.

Messungen an unvernetzten Haftklebstoffen können hingegen auch rotierend durchgeführt werden. Innerhalb dieser Arbeit sind solche rotierenden Messungen zur Bestimmung der Verarbeitungsviskosität in Abhängigkeit von Temperatur bzw. Scherrate von Interesse. Als Scherrate wurde der für Rakelbeschichtungen mit 1 mm dicke und 2,4 m/min Bahngeschwindigkeit übliche Bereich von etwa 40 s^{-1} verwendet.

3.5.2 180° Schälversuch

Im 180° Schälversuch nach der Prüfvorschrift FTM1 bzw. AFERA 5012 wird ein Klebeband von einer Oberfläche durch einen annäherungsweise konstanten Schälwinkel von 180° und mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 300 mm/min abgezogen. Als Substrate kommen laut Norm eine Platte aus Edelstrahl (1.4301) und eine flexible PET-Folie ($0,5 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$) zum Einsatz. Die Substratdicken sind für Haftklebebander nicht von hoher Bedeutung, da die auftretenden Kräfte gering sind. Diese liegen nach (6) und (7) für „permanente“, also schwer lösbarer Haftklebstoffe

oberhalb von 350 - 500 N/m. Praktisch werden Schälfestigkeiten für hoch belastbare Haftklebstoffe um etwa 2500 N/m erreicht. Dennoch besteht ein Einfluss der verwendeten flexiblen Folien, weshalb in dieser Arbeit auf 50 µm starke, plasmageätzte PET-Folien zurückgegriffen wurde. Abbildung 4 verdeutlicht den Prüfaufbau sowie die Probekörper.

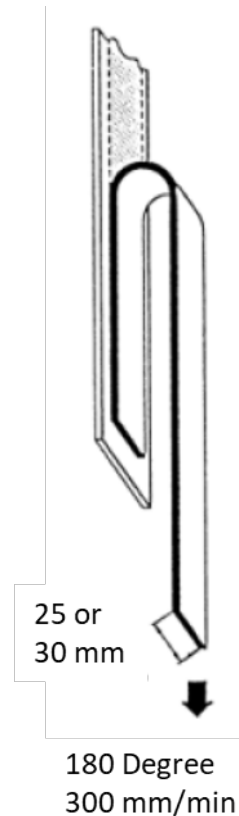


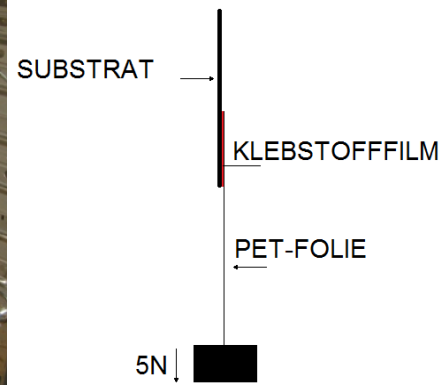
Abbildung 4: Aufbau 180° Schälversuch

3.5.3 SAFT – Shear Adhesion Failure Temperature

Verschiedene Normen und Prüfverfahren befassen sich mit der Charakterisierung des Temperatureinsatzverhaltens von Haftklebstoffen. Zu erwähnen sind die Normen FINAT FTM 5 (8) und ASTM D 4489-07 (9). Beide beschreiben einen Versuch zur Bestimmung der Wärmestandfestigkeit unter statischer Scherbelastung von 5 N. Die Klebfläche beträgt 25 x 25 mm², die Temperatur wird mit einer Aufheizrampe von 0,5 K/min gesteigert. Abbildung 5 verdeutlicht den Aufbau.



Abbildung 5: SAFT Versuch



Dokumentiert wird in diesem Versuch die Temperatur, die zum Versagen, d.h. der Trennung der beiden Fügeteile führt. Wichtig zu bemerken ist, dass sowohl Versagen aufgrund von unzureichender Kohäsion (Erweichen des Klebstoffs) als auch unzureichender Adhäsion, z.B. bei vernetzten Klebstoffen, beobachtet werden kann.

Ein Nachteil dieser Methoden ist, dass die Temperatur beim Versagen nur schlecht messtechnisch erfasst werden kann, weshalb eine kontinuierliche Beobachtung des mehrstündigen Versuches erforderlich ist. Biolink hat daher eine rheologische Methode entwickelt, welche mit den gleichen Spannungen (8 kPa) wie im SAFT-Versuch, allerdings unter Rotation die Versagenstemperatur bei einer Dehnung von mehr als 25 mm festlegt. Dies entspricht dem vollständigen Abrutschen von der Probe und hat in vergangenen Versuchen eine ausgezeichnete Korrelation zu den nach FTM 5 ermittelten SAFT-Werten gezeigt.

3.5.4 Zugscherversuche (DIN EN 1465)

Die Bewertung der Zugscherfestigkeit nach DIN EN 1465 (10) kann als vergleichende Kenngröße der adhäsiven und kohäsiven Eigenschaften eines Klebstoffs bzw. einer Klebstoff-Substrat-Kombination herangezogen werden.

Zugscherversuche versuchen einen idealisierten Belastungsfall für Klebungen darzustellen. Bei einer angenommenen, rein scherenden Belastung in der Klebfuge kommt es zu einer optimalen Spannungsverteilung im Klebstoff. Die unter dieser Annahme ermittelten Festigkeiten geben die maximal ertragbare Kraft für eine Klebstoff-Substrat-Kombination wieder. In der Realität sind die Fügeteile jedoch nicht ideal steif und deformieren sich unter dem Einfluss der äußeren Krafteinwirkung, was zu überlagerten Zug- und Schubspannungen und damit Spannungsspitzen im Randbereich führt. Ausgehend von diesen Spannungsspitzen erfolgt das Versagen der Klebung. Der ermittelte Kennwert stellt daher in der Realität nur den Mittelwert aus Randspannung und mittlerer Spannung dar. Versuche zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit werden mit der in Abbildung 6 dargestellten Universal-Zugprüfmaschine EZ20 (Fa. Lloyd) durchgeführt.

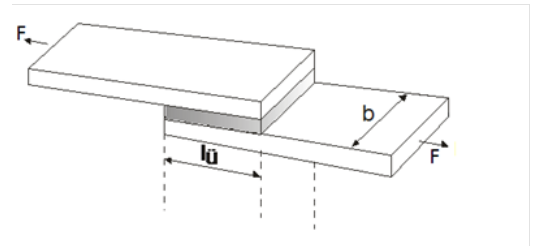
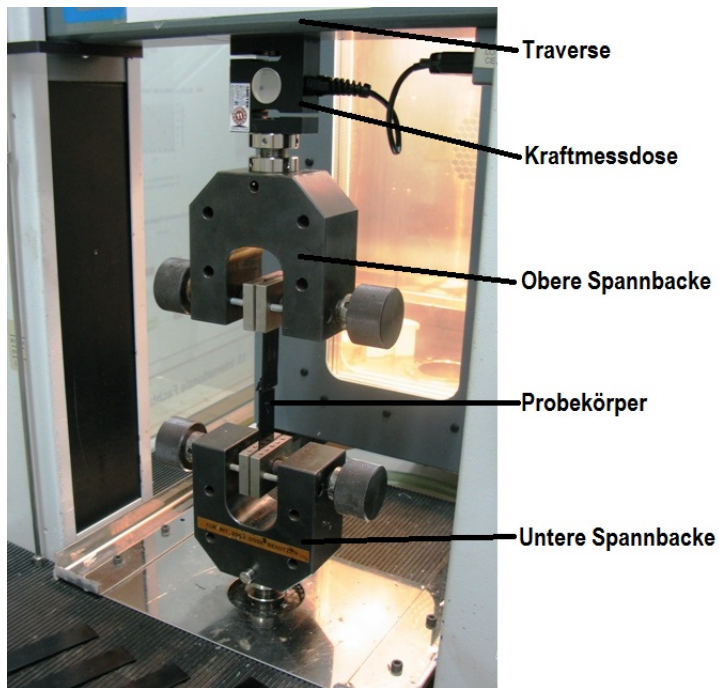


Abbildung 6: Aufbau einer Zugscherprüfung

Abweichend von der Norm wird mit einer Überlappungsfläche ($l_{Ü}=25$, $b=25$ mm) von 625 mm² geprüft. Je Klebstoff und Substratkombination werden fünf Probekörper hergestellt und geprüft. Verwendet wird eine Kraftmessdose mit 5 kN und $0,5$ % Toleranz bezogen auf den Messbereich.

Die Prüfungsgeschwindigkeit ist so zu wählen, dass die Prüfung innerhalb von 60 ± 20 Sekunden abgeschlossen ist. Für die meisten Haftklebstoffe bedeutet dies eine Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min.

3.6 Alterung – Kataplasmatest

Die Alterung der gefügten Proben läuft, eingeschlagen in feuchte Tücher und mit Gefrierbeuteln doppelt abgeschlossen, über 14 Tage (zwei Zyklen) in Anlehnung an EN ISO 9142 E2/ 7 Tage bei 70 °C, anschließend 15 Stunden bei -20 °C und abschließend Raumtemperatur zur Rekonditionierung (23 °C / 50% rel. Feuchte). Die Rekonditionierung bei Raumtemperatur beträgt beim ersten Zyklus normgemäß 24 h.

4 Ergebnisse

4.1 AP1 – Lastenheft

Das erste Arbeitspaket definiert die Ziele und den Untersuchungsrahmen des Projektes. Als Referenzgeometrie wird das Biolink Produkt „VP1659“ festgelegt, ein kreisrundes Stanzteil zur Montage von metallischen Trägerplatten unter der Decke von Innenräumen.

Stanzteil von Biolink „VP1659“
 Durchmesser: 65,0 mm
 Schichtdicke: 1,0 +/- 0,1 mm

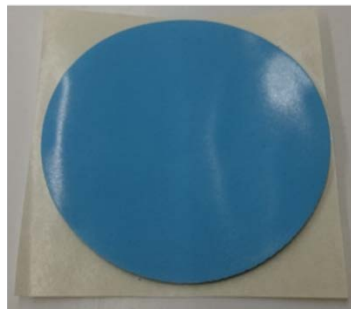


Abbildung 7: Referenzstanzteil von Biolink

Da dieses Stanzteil bereits in Serie gefertigt wird, kann für das generativ gefertigte Formteil ein Zielpreis von <0,18229 €/Stück festgelegt werden. Als Klebstoffe werden zwei Klassen festgelegt:

- Removable
- Permanent

Bei den Substraten werden für das Walzenmaterial hochvernetztes Silikone bevorzugt (Lieferanten DOW, Wacker, Momentive). Als Liner soll ein 75 µm silikonisierter PET Liner „PT 75 09“ verwendet werden. Als zu fügende Substrate kommen Stahl, PE und PET zum Einsatz.

Folgende Anforderungen werden an das Formteil gestellt, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Lastenheft für Formteile

Beschreibung	Anforderung
Statische Zugscherung Schälfestigkeit	4,5kg 4h >25 N/25mm
Alterungsbeständigkeit UV-Beständigkeit	-20 bis +70°C Nicht erforderlich
Kostenrahmen	< 0,18€/Formteil
Applikationsort	Baustelle
Reinigung	Erforderlich
Aktivator	Nein
Substrate	PE, PET, Stahl
Glasübergangstemperatur	< 0°C
Dicke	1mm +/- 0,1mm

4.2 AP 1 Ökologische Bewertung – IWF

Das IWF übernimmt im Projekt die ökologische Bewertung des neu entwickelten Fertigungsverfahrens und den Vergleich zum bestehenden Referenzverfahren. Vom Einsatz des neu entwickelten generativen Druckverfahrens zur Erzeugung haftklebri-

ger Formteile wird erhofft, dass es, über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, ökologische Vorteile aufweist. Vor diesem Hintergrund wird zur Bewertung des neuartigen Verfahrens, hinsichtlich ökologischer Aspekte im Vergleich zu einem konventionellen Verfahren, das herkömmlich zur Fertigung eines nutzgleichen Produkts verwendet wird, ein Screening-LifeCycleAssessment (LCA) vom IWF durchgeführt.

Gemäß dem Projektvorhaben ist das IWF vor allem an den Arbeitspaketen AP 1 und AP 7 beteiligt. Die Aufgaben des IWF im Arbeitspaket AP 1 umfassen die Definition der Einflussgrößen auf die Ökobilanz aus dem Herstellprozess. In dem Arbeitspaket AP 7 übernimmt das IWF die Durchführung des Life Cycle Assessment. Dies umfasst unter anderem die Erhebung der benötigten Daten über die gesamte Projektlaufzeit, die Erstellung des Lebenszyklusmodells in einem geeigneten Softwarewerkzeug sowie die Auswertung und den Vergleich der Technologien.

Für eine ganzheitliche Betrachtung des neu entwickelten Verfahrens sollen neben den technologischen auch die ökologischen Aspekte berücksichtigt werden. Für die lebenswegübergreifende Bewertung von Produkten und Dienstleistungen hat sich die Ökobilanz durchgesetzt. Sie ist international anerkannt und genormt (DIN EN ISO 14040ff) und betrachtet Umweltaspekte und potentielle Umweltwirkungen eines Produktes oder einer Dienstleistung von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung – also von der „Wiege bis zur Bahre“ (cradle to grave). Wie Abbildung 8 zeigt, gliedert sich die Durchführung der Ökobilanz in vier Schritte, die iterativ durchlaufen werden können: (1) Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen, (2) Sachbilanz, (3) Wirkungsabschätzung und (4) Auswertung.

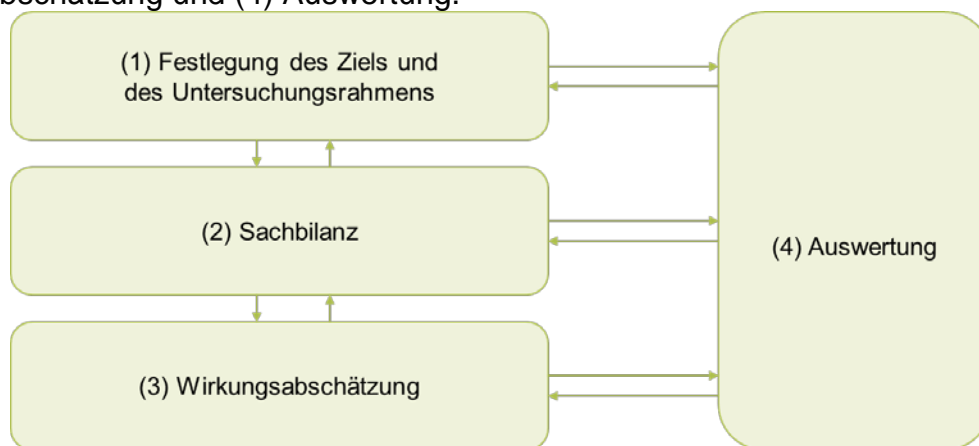


Abbildung 8: Rahmen einer Ökobilanz nach ISO 14040

Im ersten Schritt wird die Ausrichtung und Grundlage für die Ökobilanz abgestimmt und festgelegt. Von besonderer Bedeutung ist die Definition der „Funktionellen Einheit“, auf die sich die gesamte Analyse und Bewertung bezieht. In vergleichenden Ökobilanzen ist die Wahl der funktionellen Einheit eine besonders wichtige Aufgabe, da sie den Vergleich von mehreren unterschiedlichen Untersuchungsgegenständen ermöglichen soll. Aus diesem Grund muss die funktionelle Einheit die Funktion der zu vergleichenden Systeme darstellen. In vergleichenden Ökobilanzen kann es durchaus sein, dass die zu vergleichende Systeme mehr als eine Funktion aufweisen. Hierbei soll die funktionelle Einheit so gewählt werden, dass es quantitativ die Hauptfunktion der Untersuchungsgegenstände repräsentiert. Qualitative Unterschiede, falls relevant, müssen in Wort diskutiert und beschrieben werden (11) (12). Des Weiteren wird durch das Setzen von Systemgrenzen festgelegt, welche Prozesse in

die Betrachtung einbezogen werden sollen. Die betrachteten Produktsysteme werden anhand von Systemfließbildern veranschaulicht. Im Rahmen einer Stoffstromanalyse werden anschließend für alle einbezogenen Prozesse die relevanten ein- und ausgehenden Stoff- und Energieströme entlang des Produktlebensweges recherchiert und quantifiziert. Die erhobenen Daten dienen als Eingangsgröße für ein Stoffstrommodell und die Berechnung der Input-Output-Bilanz (Sachbilanz). Darauf aufbauend erfolgt die Wirkungsabschätzung, d.h. die Berücksichtigung der Umweltrelevanz der Energie- und Stoffströme. Dabei werden die Sachbilanzdaten den ausgewählten Wirkungskategorien (z.B. Treibhauseffekt, Ressourcenverbrauch) zugeordnet, mithilfe von Charakterisierungsmethoden bewertet und zu Indikatorwerten je Wirkungskategorie zusammengefasst (z.B. Treibhauspotential in kg CO₂-Äquivalente). Im Rahmen der Auswertung werden schließlich die Ergebnisse von Sach- und Wirkungsbilanz vor dem Hintergrund des Untersuchungsziels analysiert, verglichen und bewertet. Als Ergebnis der vergleichenden Ökobilanz kann das ökologische Profil eines haftklebrigen Formteils (hergestellt durch ein generatives Druckverfahren) im Vergleich zu einem haftklebrigen Stanzteil (hergestellt durch ein konventionelles Produktions- und Stanzverfahren) transparent und wissenschaftlich fundiert aufgezeigt werden.

Wesentliche Ergebnisse und Erkenntnisse aus AP 1:

Um Einflussgrößen über den gesamten Lebenszyklus erfassen zu können, ist es hilfreich, ein Lebenszyklusmodell zu erstellen. Zur Darstellung des Lebenszyklus von haftklebrigen Form- sowie Stanzteilen eignen sich insbesondere flussorientierte Lebensphasenkonzepte. Diese beschreiben Flüsse von Produkten, Material, Energie und Emissionen und sind in Sequenzen unterteilt. Die einzelnen Sequenzen orientieren sich in der Regel an dem zeitlich-logischen Lebensweg von Produkten (z.B. Rohstoffgewinnung, Produktentwicklung, Herstellung) (11). Das Grundmodell des Produktlebenszyklus von haftklebrigen Stanz- und Formteilen ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Umwelt dient sowohl als Quelle für erneuerbare, oder auch nicht erneuerbare Energien und Ressourcen als auch als Senke für Abfälle, Emissionen und Abwärme. Der Produktlebenszyklus ist als einfaches lineares Modell von der Rohstoffgewinnung, über die Produktion und Nutzung bis hin zur Verwertung modelliert. Zusätzlich ist die Schnittstelle zur Entwicklung und damit einhergehenden Abhängigkeiten und Einflüsse dargestellt. Beispielsweise bedingen neue Rezepturen anderen Fertigungstechnologien und haben einen Einfluss auf die Rohstoffe. Die hergestellten Produkte haben eine lange Lebensdauer, sie wird mit 10 Jahren pauschalisiert. Genauere Aussagen über die Lebensdauer sind nicht möglich, da dieser außer der Reichweite von BIOLINK sind und BIOLINK keinerlei Einfluss darauf hat. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Lebensdauer der Fügeverbindung eine längere Nutzung zulassen würde, aber das System, in dem die Klebeverbindung sich befindet, vorzeitig ausgetauscht wird. Da die Fügeverbindung nicht recycelt werden kann, wird dessen energetische Verwertung angenommen.

Da die Produkte, in denen die haftklebrigen Form- oder Stanzteile zum Einsatz kommen, keine aktiv bewegten Teile sind, entstehen in der Nutzungsphase keine Energieverbräuche und Emissionen. Dadurch bekommt die Nutzung einen stark reduzierten Stellenwert in der Ökobilanz. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass der wesentliche Unterschied zwischen haftklebrigen Form- und Stanzteilen in der Produktentstehungsphase zum Tragen kommen. Aus diesen Gründen liegt der Fokus der Screening-LCA auf der Produktion.

Als funktionelle Einheit ist die hergestellte nutzbare Klebefläche identifiziert worden. Dies erlaubt einen quantitativen Vergleich der zwei Produktionstechnologien. Aus Gründen der Komplexitätsreduktion und fehlenden mathematischen Berechnungsmodellen der Festigkeit von Klebeverbindungen wird darauf verzichtet, die Festigkeit von den Klebeverbindungen in die funktionelle Einheit aufzunehmen. Die Wahl auf die funktionelle Einheit beruht darüber hinaus auf der Annahme, dass sich mit den zwei Produktionsverfahren qualitativ gleichwertige (hinsichtlich Festigkeit, Alterungsbeständigkeit, Lebensdauer usw.) Produkte herstellen lassen.

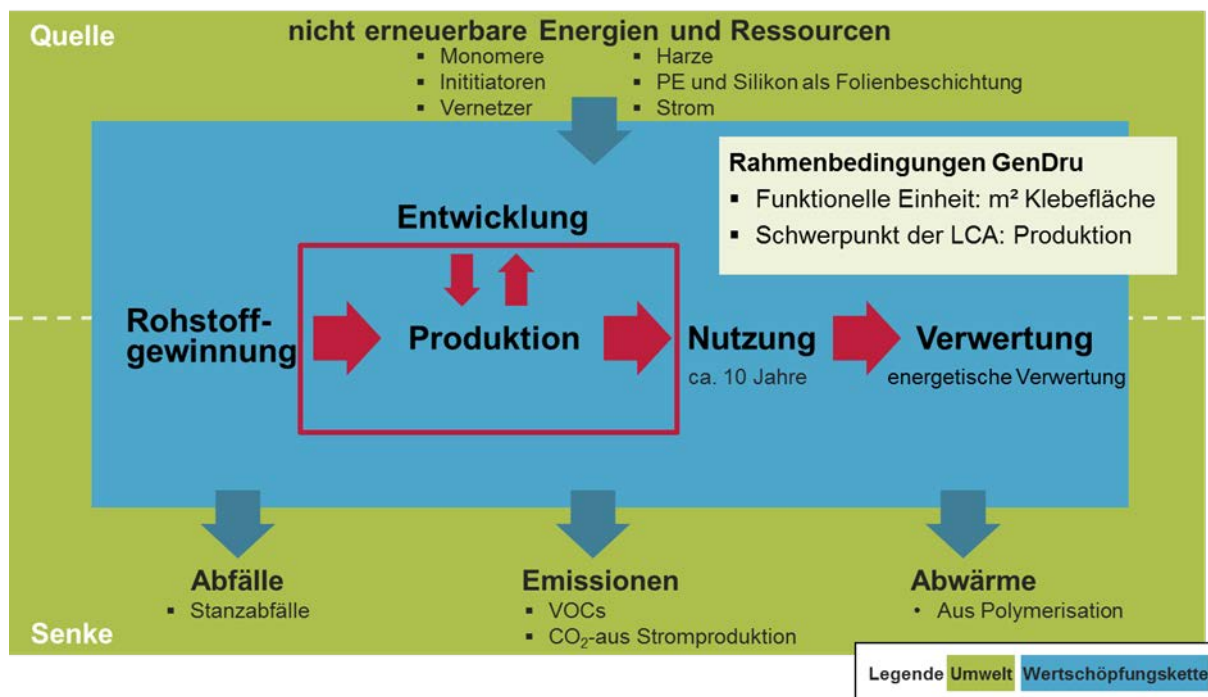


Abbildung 9: Grundmodell des Produktlebenszyklus von haftklebrigen Stanz- und Formteilen

Nachdem in den vergangenen Abschnitten die Vorgehensweise einer Ökobilanz und das Grundmodell des Produktlebenszyklus von haftklebrigen Form- und Stanzteilen vorgestellt und diskutiert wird, erfolgt in den folgenden Abschnitten die detaillierte Beschreibung und Modellierung des Referenzverfahrens und des neu entwickelten Verfahrens. Das Referenzverfahren dient der Herstellung von haftklebrigen Stanzteilen. Abbildung 10 zeigt schematisch den Produktionsfluss mit den zugehörigen Material- und Energieströmen innerhalb des Referenzverfahrens. Die Produktion beginnt mit der Polymerisation, in diesem Schritt wird der Klebstoff hergestellt. Im zweiten Schritt erfolgt die Applikation des Klebstoffs auf ein Trägermaterial. Danach erfolgt die Vernetzung des Klebstoffs. Hierzu werden UV-strahlende Quecksilberdampflampen eingesetzt. Nachdem der Klebstoff ausgehärtet ist, werden aus dem Klebstoffband Formteile ausgestanzt. Dabei entstehen Stanzabfälle, die entsorgt werden müssen.

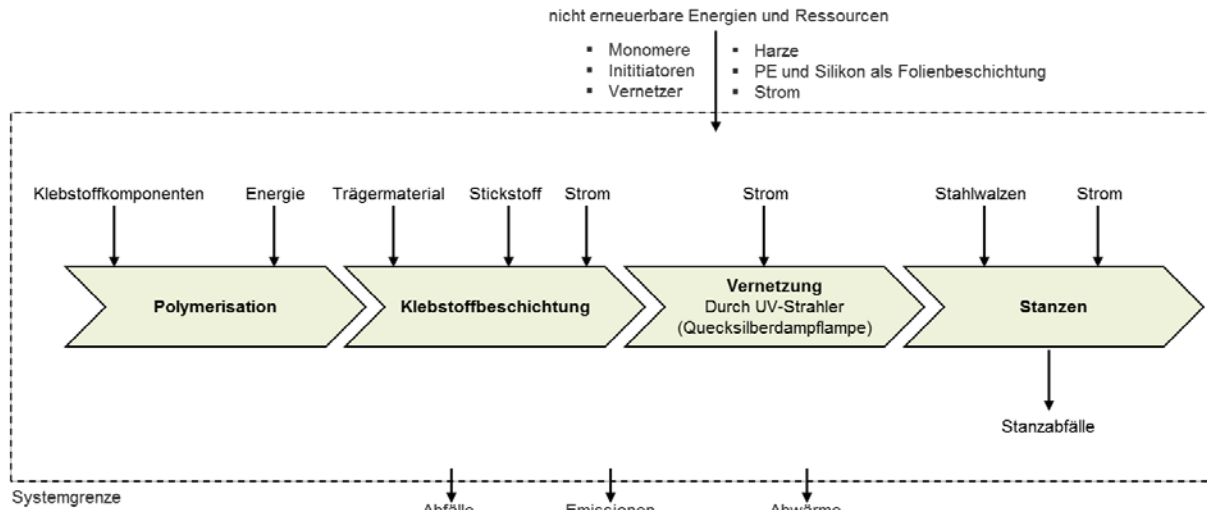


Abbildung 10: Modellhafte Abbildung des Referenzverfahrens

Abbildung 11 zeigt im Vergleich dazu den schematischen Fertigungsfluss des neu entwickelten Fertigungsverfahrens zur Herstellung von haftklebrigen Formteilen. Der wesentliche Unterschied zum Referenzverfahren ist der Wegfall des vierten Prozessschrittes, das Stanzen. Dadurch werden Abfälle vermieden. Die Vernetzung erfolgt auf gleiche Weise wie beim Referenzverfahren, es ist jedoch eine andere Rezeptur nötig, mit der die erforderlichen Eigenschaften des Klebstoffs für den nachfolgenden Produktionsschritt eingestellt werden kann. Im nachfolgenden Produktionsschritt trägt eine Silikonwalze, die die Form des herzustellenden Produktes bereits nachbildet, den Klebstoff auf das Trägermaterial auf. Der Produktionsprozess endet mit der Aushärtung des bereits in Form gebrachten Klebstoffes. Die Vernetzung wird im Unterschied zum Referenzverfahren durch UV-strahlende LEDs initiiert.

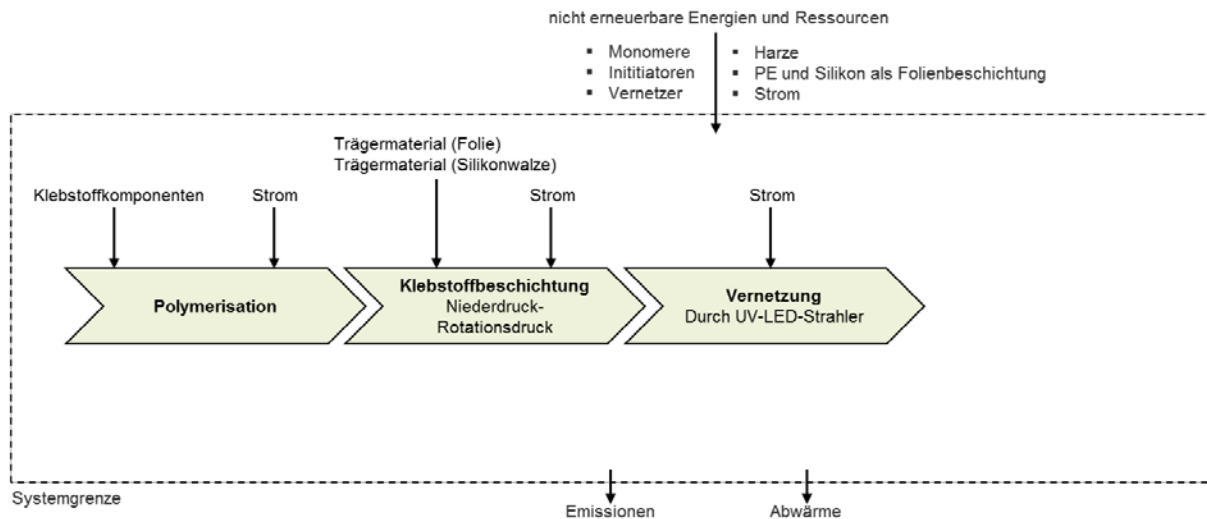


Abbildung 11: Modellhafte Abbildung des neuentwickelten Verfahrens

Nachdem die zu vergleichenden Fertigungsverfahren modellhaft abgebildet wurden, erfolgte in den Arbeitspaketen AP 5, AP 6 und AP 7 die Quantifizierung der Einflussgrößen und der Eingangsparameter. Diese umfassten Vor-Ort-Messungen, Recherche in einschlägigen Datenbanken und der Maschinendokumentation sowie Expertenbefragungen. Die auf dieser Basis ermittelten Daten fließen dann abschließend in

die Bilanzierung der Umweltwirkungen ein und dienen projektbegleitend der Optimierung des neuen Verfahrens aus ökologischer Sicht.

4.3 AP 2 - Entwicklung einer Basisrezeptur (removable)

Innerhalb des zweiten Arbeitspaketes sollen die Trennkräfte der Klebstoffe auf unterschiedlichen Substraten betrachtet und eine geeignete Basisformulierung entwickelt werden. Ziel ist eine möglichst gute Entformbarkeit des vernetzten Klebstoffes. Als in Frage kommende Formwerkstoffe werden Silikone, Fluorpolymere und Keramiken definiert. Zunächst wird die Herstellbarkeit der Werkzeugform aus den genannten Werkstoffen betrachtet. Silikone sind hierfür gut geeignet, da sich insbesondere mit 2K-Systemen Formen konturgenau abgießen lassen und sie kostengünstig am Markt verfügbar sind. Fluorpolymere sind preisintensiver als Silikone, jedoch mechanisch gut bearbeitbar. Keramiken werden hier ausgeschlossen, da sich die festgelegte Kreisgeometrie des Formteils nur unter großem Aufwand herstellen lässt. Trotz der erwartbar hohen Standzeit und der exzellenten chemischen Beständigkeit sind marktübliche Keramiken wie Bornitrid und Siliciumcarbid nur schwer zerspanbar, ein komplettes Werkzeug mit mehreren Formen würde sich zudem nur segmentiert herstellen lassen. Ferner sprechen der sehr hohe Preis und die mechanische Empfindlichkeit aufgrund des spröden Werkstoffverhaltens (Neigung zum Absplittern) gegen Keramiken als Werkzeugs substrat.

Im nächsten Schritt erfolgt die Bestimmung der Trennkräfte auf potentiell geeigneten Materialien für die Walzenherstellung. Folgende Abbildung 12 veranschaulicht die Messergebnisse auf den unterschiedlichen Substraten bei Verwendung eines PL130R als einseitiges Klebeband auf PET-Folie.

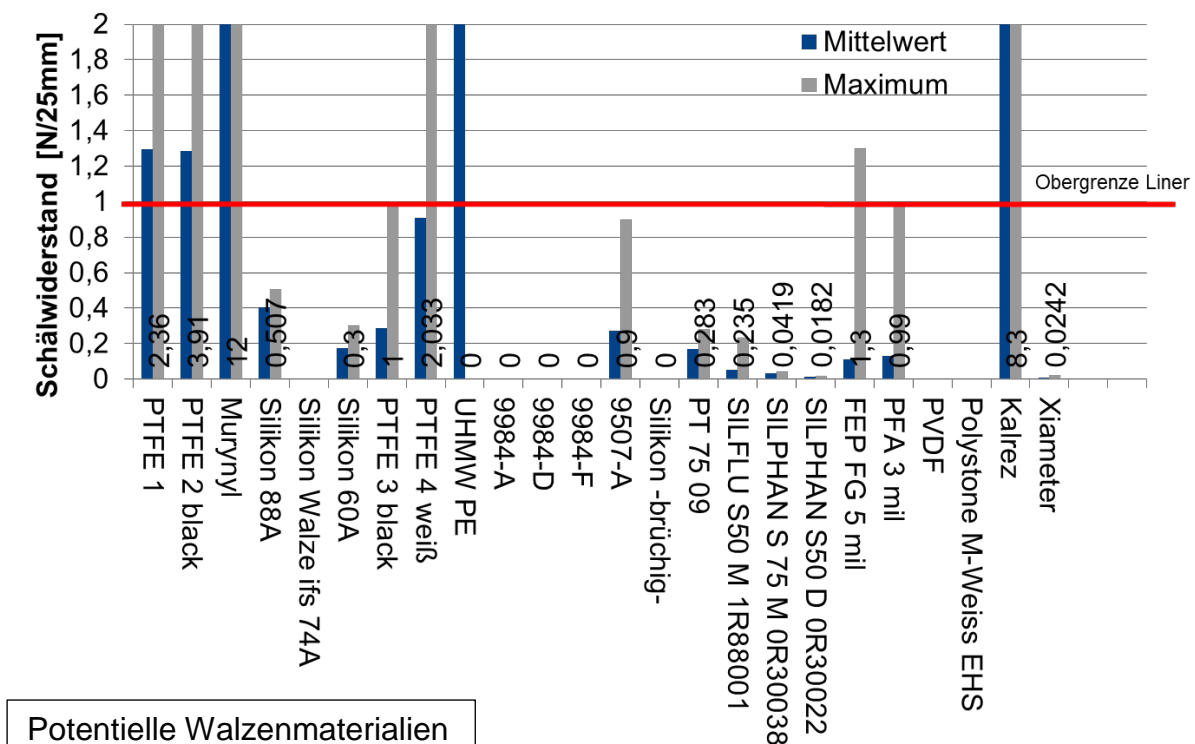


Abbildung 12: Validierung geeigneter Walzenmaterialien; Trennkräfte auf verschiedenen Substraten

Deutlich zu erkennen ist, dass vor allem die Silikone die gewünschten, niedrigen Trennkräfte gut erreichen. Die meisten weiteren Substrate wie Fluorelastomere und Thermoplaste zeigen hingegen höhere Trennkräfte und sind daher für die Entformung weniger geeignet.

Anschließend erfolgt die Untersuchung der Formbeständigkeit bei Klebstoffkontakt. Die Walze wird im geplanten Anwendungsfall ständig mit unvernetzten, acrylatbasierten Klebstoff in direkten Kontakt treten. Zur Sicherstellung einer reproduzierbaren Druckgeometrie muss die Formstabilität der in Frage kommenden Werkstoffe betrachtet werden. Zu diesem Zweck werden Benetzungsversuche durchgeführt. Hierfür wird eine kleine Materialprobe (5x12 cm) mit einer geringen Menge (ca. 3 ml) nicht ausgehärtetem Klebstoff benetzt. Im Anschluss erfolgt eine visuelle Bewertung der Formstabilität der Substrate im Zeitverlauf. Die Ergebnisse sind nachfolgend beispielhaft dargestellt (Abbildung 13).

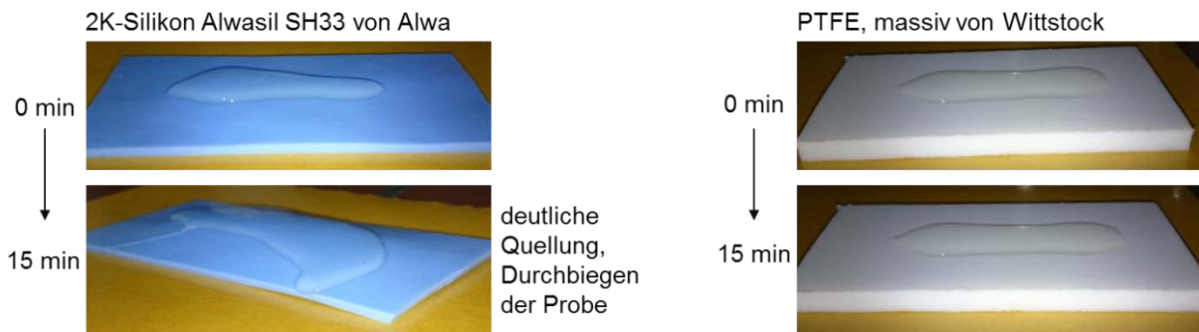


Abbildung 13: Quellversuche mit Klebstoffapplikation

Bei den Versuchen mit flüssig applizierten Haftklebstoffen stellt sich heraus, dass alle üblichen Silikone unter dem Einfluss der Standard-Acrylate aufquellen. Dies findet sich zudem stark in den ermittelten Trennkräften wieder, wie Abbildung 14 darstellt. Alle getesteten Fluorwerkstoffe zeigen keine Formänderung und bleiben stabil.

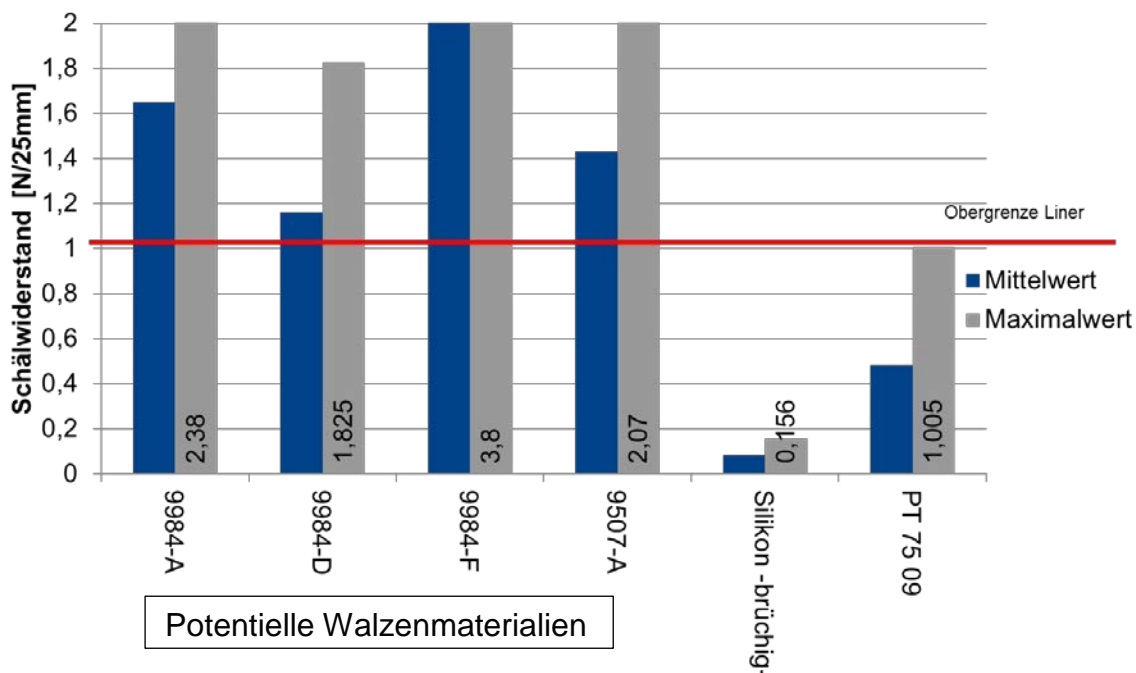


Abbildung 14: Validierung geeigneter Walzenmaterialien; Trennkräfte nach flüssiger Applikation eines Haftklebstoffes.

Dies ist ein primär thermodynamischer Effekt, welcher durch Konzepte wie OWRK (Methode nach Owens, Wendt, Rabel und Kaelble) bzw. HSPiP (Hansen Solubility Parameters in Practice) beschrieben werden kann. Grundsätzlich kann daraus abgeleitet werden, dass zwei Möglichkeiten bestehen, um die Quellung der Silikone zu reduzieren:

1. Einsatz thermodynamisch inkompatibler Monomere
2. Verzicht auf Monomere oder Erhöhung der Molekülgröße
3. Einsatz quellungsarmer Silikone

Der zweite Ansatz ist erheblich schwieriger bzw. mit aktueller Technik für Haftklebstoffe nicht umsetzbar. Aus diesem Grund werden Versuche mit verschiedenen Silikon- und oligomeren Acrylaten durchgeführt, die thermodynamisch inkompatibel sind. Das feuchtigkeitsvernetzende DOW Xiameter 3445 SLT Red Flow Silikon zeigt sich in Benetzungsversuchen als besonders quellungsarm. Das Silikonprodukt ist darüber hinaus gut verfügbar und wird daher für weitergehende Versuche genutzt, um den Einfluss der verschiedenen Monomere auf das Ausmaß der Quellung zu evaluieren. Folgende Tabelle 2 veranschaulicht die Ergebnisse der Quellversuche.

Tabelle 2: Quellung der Silikons (Dow, Xiameter acetox flow red, SLT3445) durch Monomere

Monomer	Ergebnis
M2AC (polares Monomer)	+
M4EH (unpolares Monomer)	++++
M1C (unpolares Monomer)	++
M5HB (polares Monomer)	0
M3AS (polares Monomer)	+
V1HD (Vernetzer)	0
M6ACE (Haftvermittler)	0
Essigsäureethylester	++

Versuch: 23°C, 15 Minuten Kontakt

0: keine Quellung
 +: leichte Kontur
 ++: deutliche Kontur
 ++++: sehr starke Quellung

Auf Basis der so ermittelten unkritischen Monomere wird eine neue Formulierung des Klebstoffes entwickelt, MC1611111. Hierdurch ergeben sich, im Vergleich zum PL130R, deutlich andere Eigenschaften:

Tabelle 3: Produkteigenschaften MC1611111

Eigenschaft	Ergebnis
Peel (Stahl)	3,4 N/25mm
Peel (PE)	5,29 N/25mm
Scherfestigkeit	110 N/312mm ²
Viskosität	0,2 Pas bis 10 Pas
Preis	6€/kg

Vor allem die niedrige Schälfestigkeit (Adhäsionsbruch) verdeutlicht, dass es sich hierbei um einen removable-Klebstoff handelt. Die MC1611111 Formulierung wird nun auf dem neuen Silikon beschichtet und die Entformbarkeit bewertet, siehe Abbildung 15.

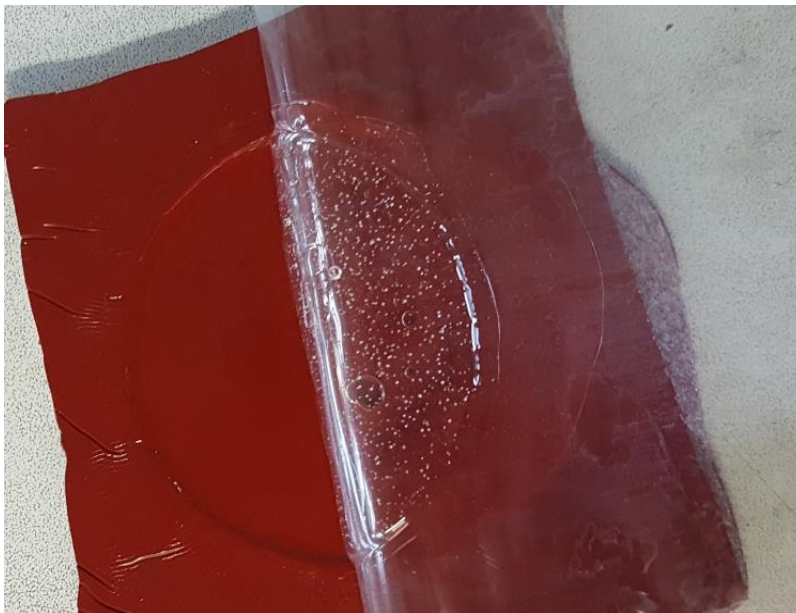


Abbildung 15: Gute Entformbarkeit aus einer Silikonform unter Verwendung quellungsarmer Monomere

Auch bei mehrfacher Verwendung der Form kam es zu keinen Problemen beim Entformen und es kann sogar ein konventioneller Liner mit geringer Abstufung der Silikonisierung (1/3) zwischen den beiden Seiten verwendet werden. Als Kontaktseite zum Klebstoff wird die tight (3er)-Seite verwendet, welche die höheren Trennkräfte aufweist. Diese liegen unter 1 N/25mm und sind damit für haftklebrige Produkte grundsätzlich geeignet.

Der neue Klebstoff wird anschließend in weiteren Versuchen charakterisiert. Der dargestellte Frequenzsweep (Abbildung 17) wie auch der Temperatursweep verdeutlicht die niedrigen Module im Vergleich zum Standard-Produkt „CP792“. Der Klebstoff ist auf Basis dieser Versuche und Verwendung des viskoelastischen Fensters nach E.P. Chang als ein „removable“ einzuordnen, siehe Abbildung 16.

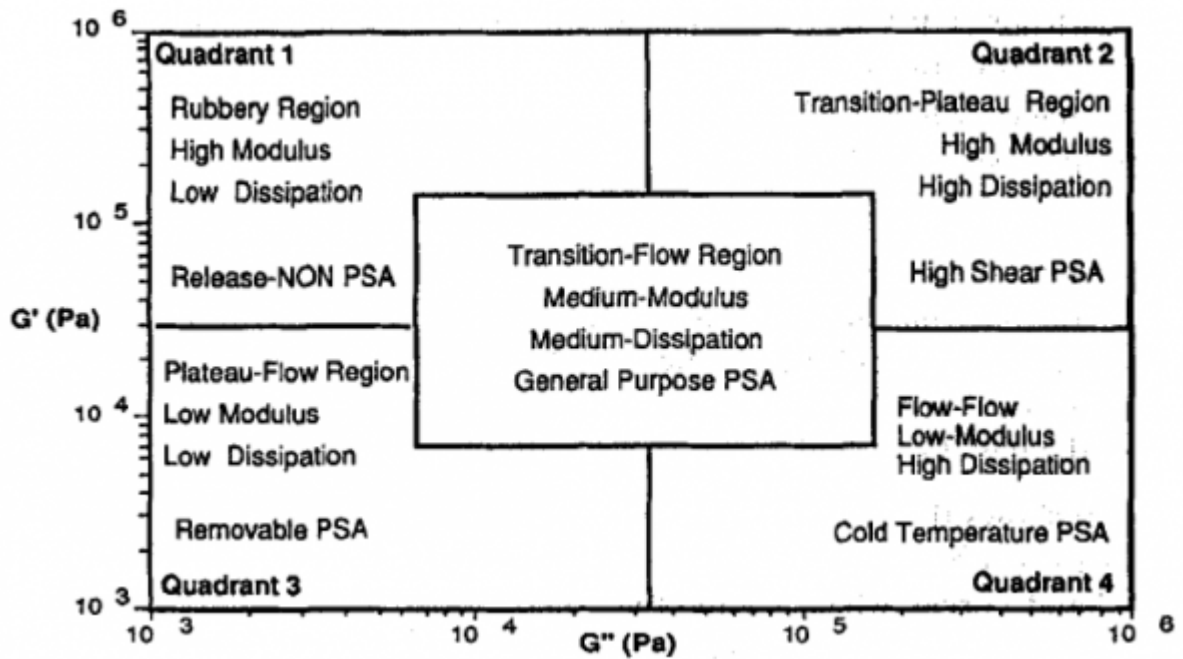


Abbildung 16: Viskoelastisches Fenster nach E.P. Chang

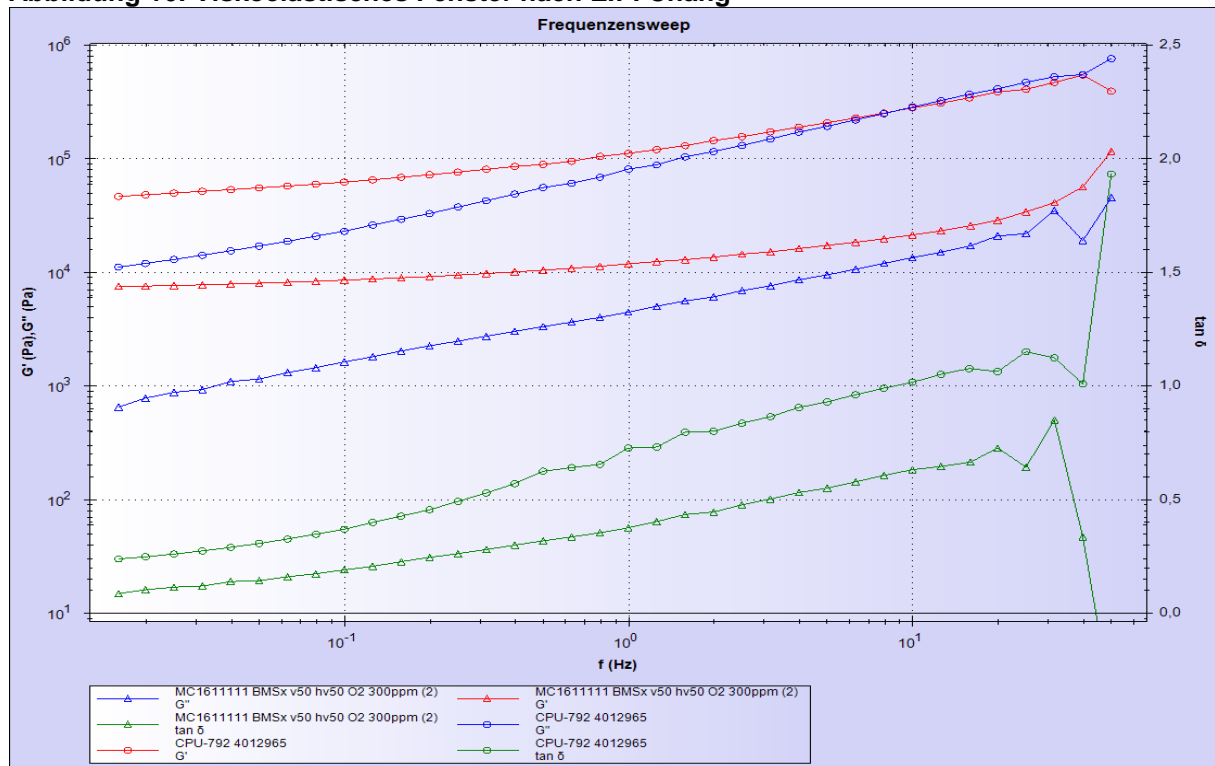


Abbildung 17: Frequenzsweep eines removable-Produktes aus quellungsarmen Monomeren

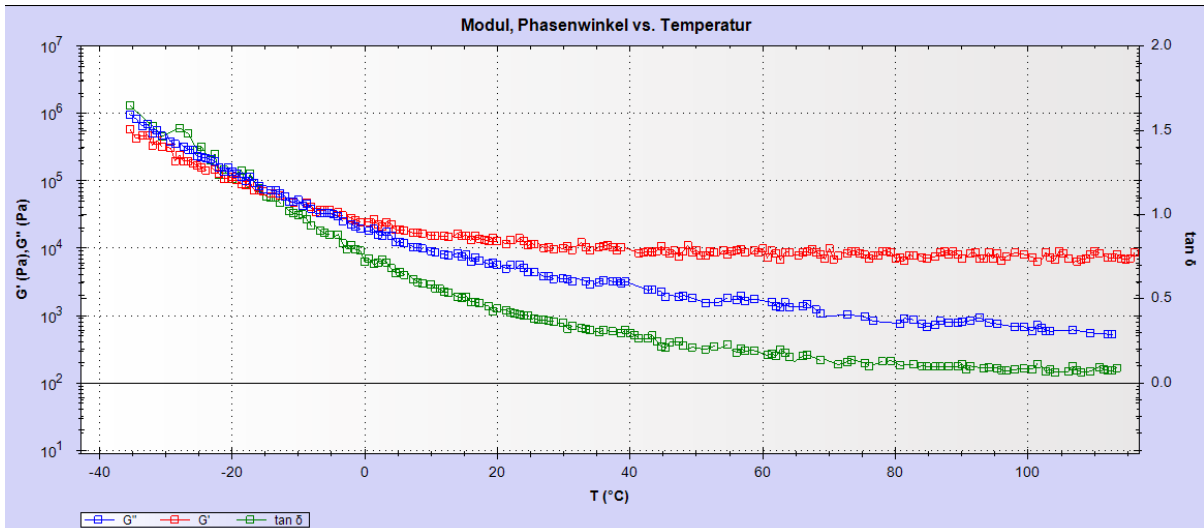


Abbildung 18: Temperatursweep eines removable-Klebstoffes aus quellungsarmen Monomeren

Als Alternative zur Silikonwalze und für die Verwendung der bei Biolink üblichen Monomere kann eine Reihe verschiedener Fluorkunststoffe in Erwägung gezogen werden. Da diese jedoch bei Raumtemperatur zu hohe Trennkräfte aufweisen, soll die Abhängigkeit von der Temperatur näher betrachtet werden.

Es werden daher zur Abschätzung der Klebstoffentformbarkeit bei verschiedenen Temperaturen Schälversuche auf unterschiedlich temperierten Fluorpolymeren durchgeführt (Prüfnorm AFERA 4001). Die betrachteten Fluorwerkstoffe sind:

- PTFE, massive Platte von Fa. Wittstock
- PTFE, 250µm-Folie von Fa. Wittstock
- FEP Rollover* von Fa. Wittstock
- FEP Rollover* von Fa. Polytetra
- Dyneon EFT von Fa. 3M

*Rollover bezeichnet einen aufschumpfbaren Walzenbezug

Hierfür werden Schälproben aus den Fluorwerkstoffen und dem Klebstoff Biolink Translink 130R (Serienprodukt auf Basis des CP792-Acrylat) hergestellt und nach 10 min Verweilzeit im 180°-Winkel abgeschält (300 mm/min Zuggeschwindigkeit der Traverse). Als Prüftemperaturen werden -20 °C, Raumtemperatur (20 °C) und 50 °C gewählt.

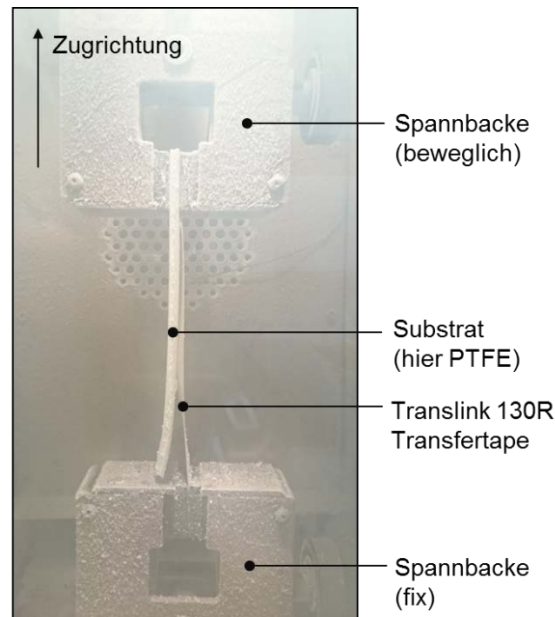


Abbildung 19: 180°-Schälversuch in Anlehnung an AFERA 4001 bei -20 °C

Die Ergebnisse für die Fluorpolymere sind in Abbildung 20 dargestellt und miteinander vergleichbar. Bei -20 °C und bei Raumtemperatur haftet der Klebstoff während des Schältests an der Linerfolie und löst sich unter adhäsivem Versagen vom Substrat. Niedrige Temperaturen (-20 °C) führen dabei zu einer Versprödung des Klebsystems und Verschlechterung der Anhaftung am Substrat, als Resultat sind die Trennkräfte in Relation geringer als bei Raumtemperatur. Bei erhöhten Temperaturen (+50 °C) steigt die Klebstoffhaftung auf dem Substrat, das Produkt Translink 130R haftet dabei an der Linerfolie und löst sich nicht mehr vom Substratwerkstoff ab. Für die spätere Druckanlage bedeutet dies, dass eine deutliche Erwärmung von Klebstoff und Werkzeug vermieden werden muss, um eine gute Entformung sicherzustellen. Umgekehrt könnte bei Einsatz eines fluorpolymerbasierten Werkzeugs eine Kühlung den Entformungsprozess vereinfachen. Die Schäl- und Entformungskräfte auf den Fluorwerkstoffen sind untereinander auf vergleichbar geringem Niveau. Aufgrund der einfachen mechanischen Bearbeitbarkeit, guten Verfügbarkeit und geringen Kosten wird massives PTFE als präferierter Fluorwerkstoff ausgewählt.

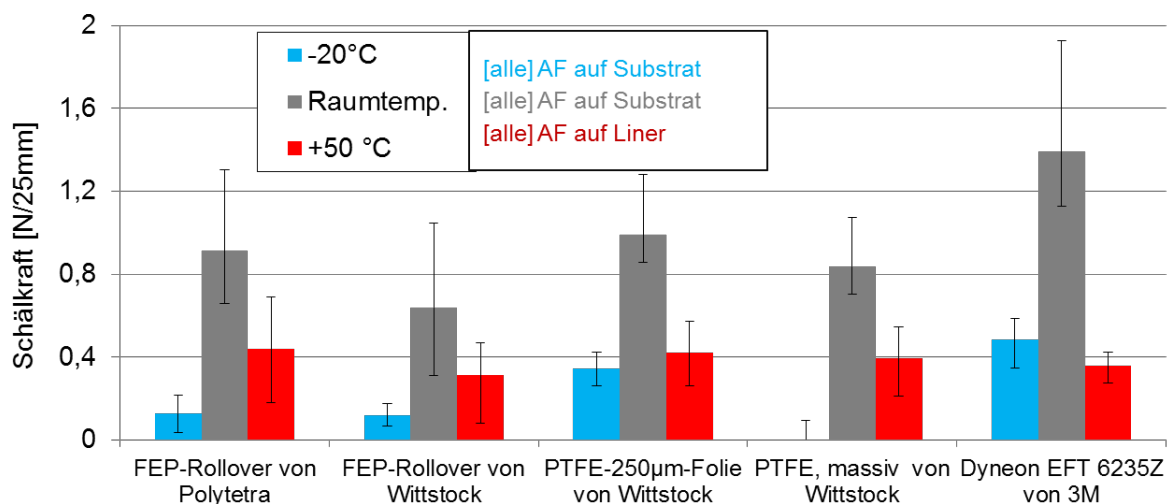


Abbildung 20: 180°-Schälversuche in Anlehnung an AFERA 4001

4.4 AP 3 - Anlagentechnik IFS

4.4.1 Anlagenkonzept

An den Fertigungsprozess werden diverse Anforderungen gestellt. Diese werden in Form eines Lastenhefts in Tabelle 1 zusammengefasst. Aufgrund dieser Punkte kann ein morphologischer Kasten zur Festlegung eines grundlegenden Anlagenkonzeptes erstellt werden (siehe Abbildung 21).

Werkstückform	rotationssymmetrisches Stanzteil (Ø65mm, 1mm dick)		
Klebstoff	haftklebriges, UV-vernetzbares Acrylatsystem von BIOLINK		
Herstellprozess	kontinuierlich	chargen-/batchweise	einzel/separat
UV-Klebstoffvernetzung	LED-Technologie		Quecksilberstrahler
Werkzeugform	rund (walzenartig)		prismatisch
Klebstoffdosierung und Formfüllung	schwerkraftbasiert	dispenst	pneumatisch/aufsprühen

gewählter Pfad

Abbildung 21: Morphologischer Kasten für die Auswahl des Anlagenkonzeptes

Allgemein betrachtet kann ein Herstellungsprozess kontinuierlich, chargen- oder batchweise, sowie einzeln ablaufen. Im Hinblick auf eine möglichst hohe Produktivität und zur Realisierung des geforderten Endlosverfahrens wird ein kontinuierlicher Fertigungsprozess präferiert. Die Aushärtung des hier betrachteten, viskosen UV-Klebsystems kann über jeden UV-A-Emitter erfolgen. In der Praxis stehen klassische, meist dotierte, Quecksilberstrahler und UV-LEDs zur Verfügung. Aufgrund der hohen Energieausbeute der UV-LEDs und den negativen Umweltaspekten der Strahler durch Verwendung von Quecksilber werden LEDs als Beleuchtungstechnologie ausgewählt. Ferner wird hier erwartet, dass eine negative Veränderung der Oberfläche unter dem Einfluss harter UV-Strahlung (UV-Alterung) unwahrscheinlicher ist, da es sich um weitgehend monochromatisches Licht mit vergleichsweise geringer Energie handelt. Das Werkzeug, welches die Formen für den Klebstoff enthält, kann dabei rund oder prismatisch ausgeführt werden. Prismatische Werkzeuge würden sich insbesondere für eine batchweise Verarbeitung oder Einzelfertigung eignen. Bedingt durch die einfach zu realisierende Rotation lässt sich mit einem runden/walzenartigen Werkzeug besonders gut ein kontinuierlicher Herstellungsprozess realisieren. Die Füllung der einzelnen Formen kann dabei schwerkraftunterstützt mit einem Rakel oder Dispenser erfolgen. Im Hinblick auf eine komplikationsarme Formfüllung wird eine Klebstoffapplikation mittels Rakel bevorzugt. Das gewählte Fertigungsverfahren ist demnach ein kontinuierlicher, UV-LED gestützter Vernetzungsprozess auf einem walzenartigen Werkzeug mit schwerkraftbasierter Formfüllung des Formwerkzeugs.

Das Druck- bzw. Fertigungsverfahren ist dem des konventionellen Rotationstiefdrucks ähnlich, nimmt aber Anleihen der entsprechenden Biolink-Patentschrift auf,

indem es haftklebrige Formlinge durch UV-Vernetzung generativ druckt. Für die erste Planung der Anlagentechnik werden verschiedene Grobkonzepte erstellt und miteinander verglichen (Abbildung 22). Der klassische Rotationstiefdruck als Ganzes ist hierfür ungeeignet, da nach Auflegen der Linerfolie zu wenig Zeit zur UV-Belichtung des noch flüssigen Acrylats verbleibt. Als Alternative bietet sich daher eine Anpassung des Verfahrens an.

Bei der ersten Modifikation in Abbildung 22 wird auf eine zweite Walze verzichtet, das Klebstoffreservoir verbleibt wie beim klassischen Rotationstiefdruck unterhalb des Werkzeugs. Vorteil dieses Konzeptes ist eine lange zur UV-Belichtung zur Verfügung stehende Strecke am Walzenumfang bei guter Zugänglichkeit. Nachteilig ist, dass der Klebstoff nach dem Abrakeln aus der gefüllten Werkzeugform laufen kann. Ebenso ist die Mitnahme einer ausreichenden Klebstoffmenge bei Eintauchen der Walze in das Reservoir nicht sichergestellt.

Bei Modifikationsvariante 2 in Abbildung 22 kommt eine zweite Walze als Andruckwerkzeug zum Einsatz. Oberhalb der eigentlichen Formwalze wird ein Rakelkasten angeordnet, der die Werkzeugformen mit Klebstoff füllt und überschüssiges Acrylat von der Werkzeugoberfläche entfernt. Nach dem Aufrakeln des noch unvernetzten Klebstoffes erfolgt das Aufspulen der Linerfolie und Anpressen derselben durch die Andruckwalze. Im Anschluss wird das Klebsystem durch UV-Belichtung ausgehärtet und am Ende entformt. Aufgrund des definierteren Klebstoffauftrags im Vergleich zum ersten Konzept wird für die Anlagenplanung dieses Konzept 2 präferiert.

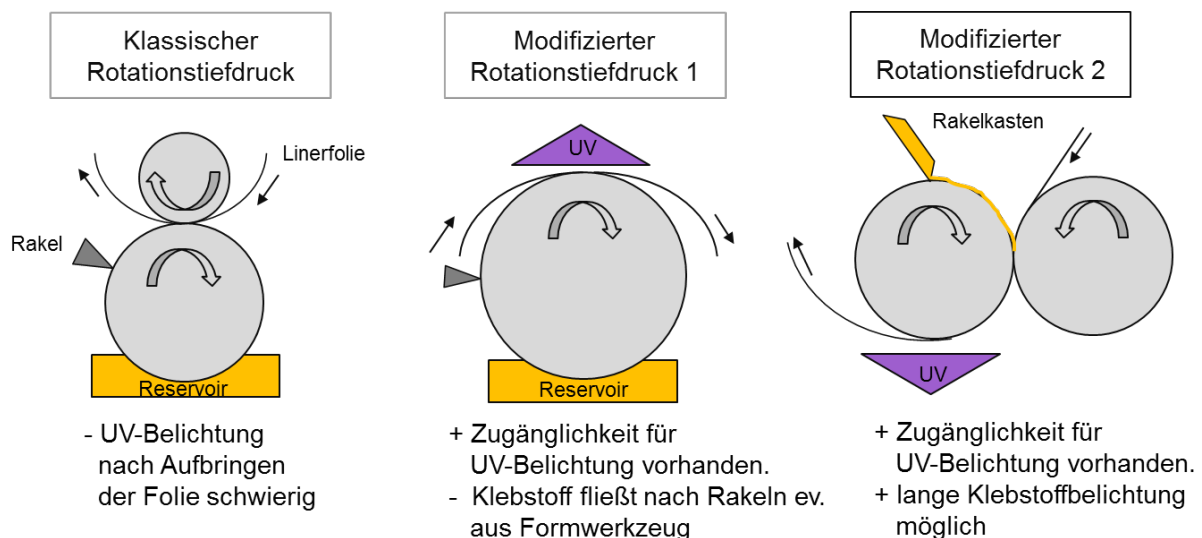


Abbildung 22: Mögliche Anlagenkonzepte zum Drucken von Formlingen über ein rotierendes Werkzeug

Für die Anordnung der UV-Beleuchtung stehen ebenfalls verschiedenen Konzepte zur Verfügung, wie in Abbildung 23 dargestellt. Eine einzelne, kostengünstige Punktquelle kann sowohl über Werkzeugumfang als auch –breite nur eine heterogene Intensitätsverteilung gewährleisten. Eine UV-Ebene würde ebenfalls keine Anpassung an die Werkzeuggeometrie erfordern, jedoch ebenso nur eine unregelmäßige Bestrahlungsintensität entlang des Werkzeugumfangs bereitstellen. Zur Sicherstellung einer homogenen UV-Intensität entlang des kompletten Vernetzungsvorgangs wird daher eine Ummantelung des Werkzeugs angestrebt. Hierfür ist eine Anpassung an den Durchmesser der Formwalze erforderlich.

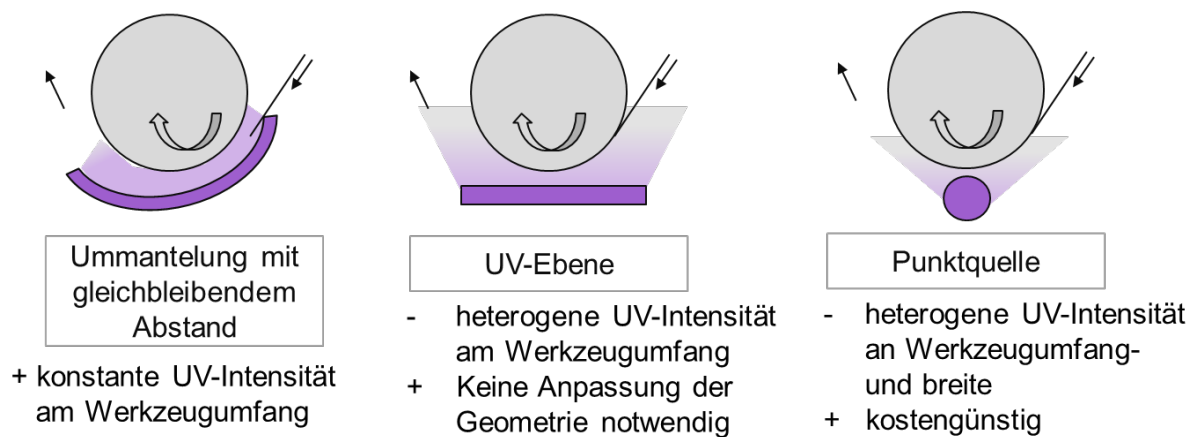


Abbildung 23: Mögliche LED-Anordnungskonzepte am Werkzeugumfang

4.4.2 Manuelle Druckversuche

Basierend auf den Ergebnissen zur Substrat- und Klebstoffauswahl werden Druckformen zur Handapplikation aus PTFE hergestellt und erprobt.



Abbildung 24: Druckformen zur Handapplikation aus PTFE

In Verbindung mit den Handversuchen werden Dosierversuche durchgeführt. Als geeignetes Gerät zur Einzeldosierung stellt sich der Nordson EFD 1200DV Dispenser heraus, der eine wiederholgenaue und reproduzierbare Applikation und Dosierung des Klebstoffvolumens in die Druckformen ermöglicht. Während der Versuche zeigt sich, dass der unvernetzte Klebstoff zum Unterwandern der Linerfolie neigt (Abbildung 25).

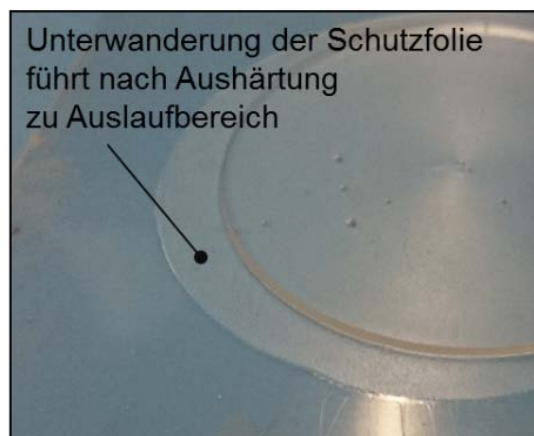


Abbildung 25: Handgedruckter Formling mit Auslaufbereich durch Unterwanderung des Liners

Bei Benutzung des Handrakels tritt ein ähnliches Verhalten auf. Hierbei bleibt ein dünner Klebfilm auf der Substratoberfläche außerhalb der Druckformen zurück, wie Abbildung 26 veranschaulicht. Durch Zugabe eines Thixotropiermittels (pyrogene Kieselsäure) kann das Problem vermindert werden. Diese Füllstoffe kommen auch bei den konventionellen Klebebändern zum Einsatz und führen zu keiner negativen Veränderung der Produkteigenschaften.

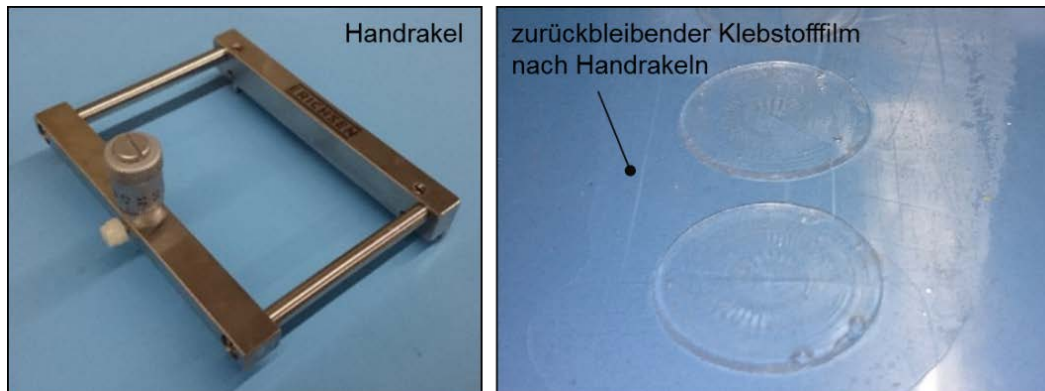


Abbildung 26: Handgedruckte Formlinge mit Auslaufbereich nach Applikation mit Handrakel

Die Aushärtung der Acrylatprodukte erfolgt mit den in Kapitel 3.2 dargestellten LED-Strahlern. Aufgrund der abgestimmten Photoinitiatoren liegt das Absorptionsmaximum des Klebstoffes bei 395nm, die Vernetzung ist daher bei allen aufgeführten Anordnungen erfolgreich. Die per Handdosierung und Aushärtung hergestellten Formlinge werden anschließend entformt und qualitativ beurteilt, Abbildung 27.

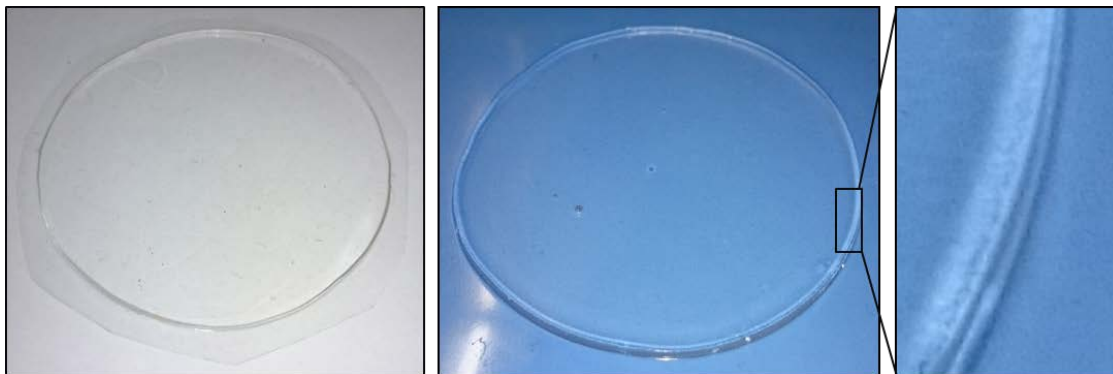


Abbildung 27: Per Handapplikation hergestellte, UV-vernetzte Formlinge

Die Formteildicke ist von besonderer Relevanz und unterliegt bei Biolink in der Bahnbeschichtung einer Toleranz von $\pm 10\%$. Die handgedruckten Formlinge werden daher einer Dickenmessung unterzogen, deren Ergebnis nachfolgend dargestellt ist (Abbildung 28). Nahezu alle handgefertigten Formteile liegen innerhalb des Toleranzfeldes von $1,0 \text{ mm} \pm 10\%$ (d.h. $\pm 0,1 \text{ mm}$) und erfüllen daher die geometrische Hauptanforderung an die Klebschichtstärke, Abbildung 28.

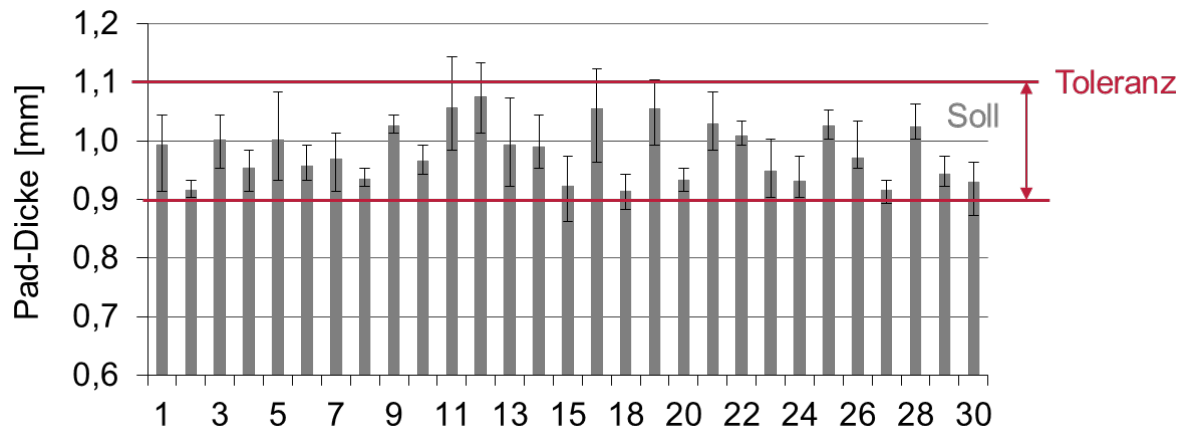


Abbildung 28: Klebschichtstärke der handgefertigten Formlinge

4.5 AP 4 - Optimierung der Rezeptur

Mit den in AP2 bereits definierten Monomeren soll unter Verwendung quellungsarmer Monomere eine Optimierung der Formulierung hinsichtlich der Schäl- und Scherfestigkeit erfolgen. Dies ist aufgrund der deutlich als „removable“ einzuordnenden Eigenschaften der ersten Formulierungen auch notwendig. Erste empirische Versuche zeigen vergleichsweise schlechte Ergebnisse, weshalb hierzu eine statistische Versuchsplanung durchgeführt wird.

Beim verwendeten Design der statistischen Versuchsplanung handelt es sich um eine Optimierung, welche ein Programm mit 39 Rezepturen zur Folge hat. Die Durchführung beinhaltet die Vernetzung, die Beschichtung, die Charakterisierung und Auswertung der Ergebnisse.

Folgende Abbildung 29 zeigt den Zusammenhang der Schälfestigkeit für die drei eingesetzten quellungsarmen Monomere.

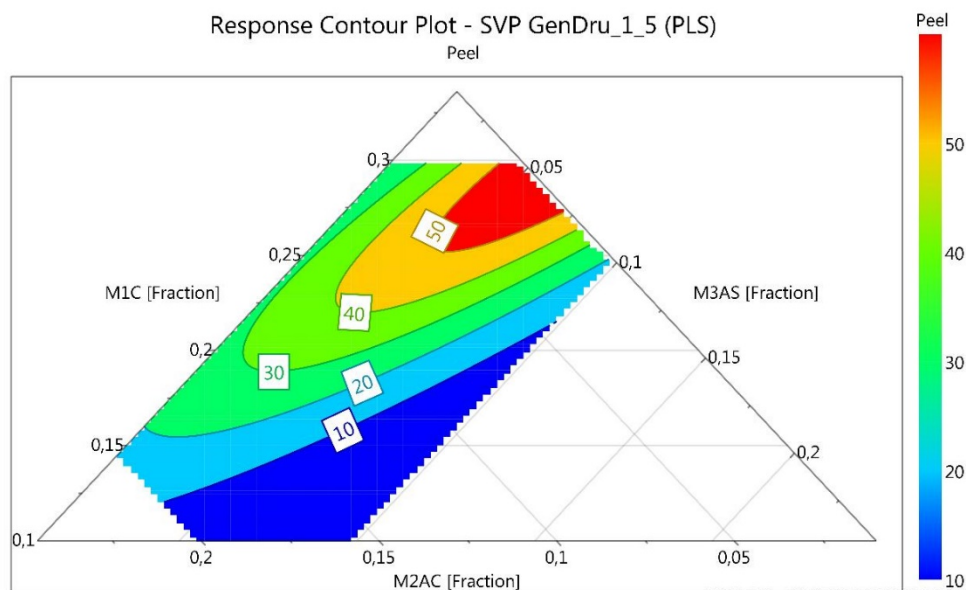


Abbildung 29: Schälfestigkeit auf Stahl in Abhängigkeit der Monomerzusammensetzung

Deutlich zu erkennen ist, dass die Schälfestigkeit auf Stahl vor allem im oberen rechten Bereich hoch ist. Dieser Bereich ist durch viel „M1C“ gekennzeichnet.

Der vergleichsweise geringe Anteil an M3AS (~5%) und M2AC (~5%) ist an dieser Stelle, da normalerweise wesentlich mehr „M3AS“ eingesetzt wird um hohe Schälfeigenschaften auf Stahl zu erreichen, unüblich.

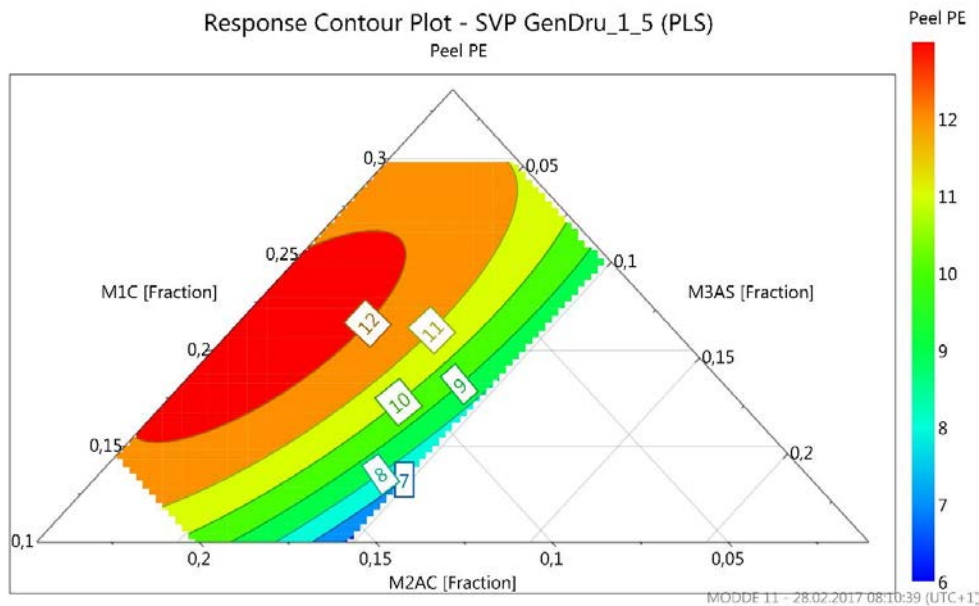


Abbildung 30: Schälfestigkeit auf PE in Abhängigkeit der Monomerzusammensetzung

Der Zusammenhang von Schälfestigkeit auf PE und der beobachteten Monomerzusammensetzung unterscheidet sich deutlich von der Zusammensetzung auf Stahl. Hier werden optimale Schälfeigenschaften im Bereich geringer M3AS und mittlerer Konzentrationen M2AC erreicht. Die Scherfestigkeit (Abbildung 31) ist für diese Produkte vor allem bei hohen Konzentrationen an M3AS und M2AC hoch.

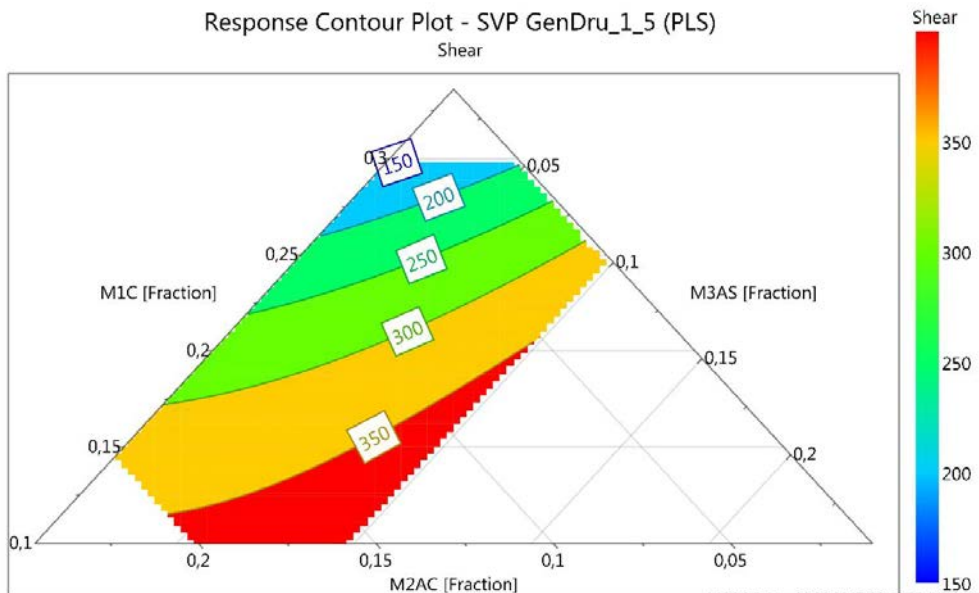


Abbildung 31: Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Monomerzusammensetzung

Zu erkennen ist, dass sich die Ziele teilweise widersprechen, es ist nicht möglich alle Ziele gleichermaßen zu erreichen. Es handelt sich um ein Optimierungsproblem. Da die Scherfestigkeit für alle berechneten Formulierungen in einem hohen Bereich liegt und relative hohe Schälfeigenschaften auf PE und Stahl im oberen linken Bereich des Mischungsdreieckes erreicht werden können, wird dieser Bereich als geeignet ange-

sehen. Eine laut „Modde-Optimizer“ geeignete Formulierung enthält folgende Bestandteile, Tabelle 4.

Tabelle 4: Formulierung MC1702271

Monomer	Anteil [%]
M1C (unpolares Monomer)	60-80
M2AC (polares Monomer)	10-20
M3AS (polares Monomer)	5
Harz	5
Initiator	ja
Vernetzer	ja

Das so formulierte Produkt ist deutlich „permanentere“, wie die mechanische Charakterisierung bestätigt.

Die Schälfestigkeit auf Stahl liegt bei ca. 30 N/25 mm und die Scherfestigkeit bei 70 N/312 mm². Auch die rheologischen Versuche zeigen eine deutliche Verbesserung, wie folgende Abbildung 32 verdeutlicht.

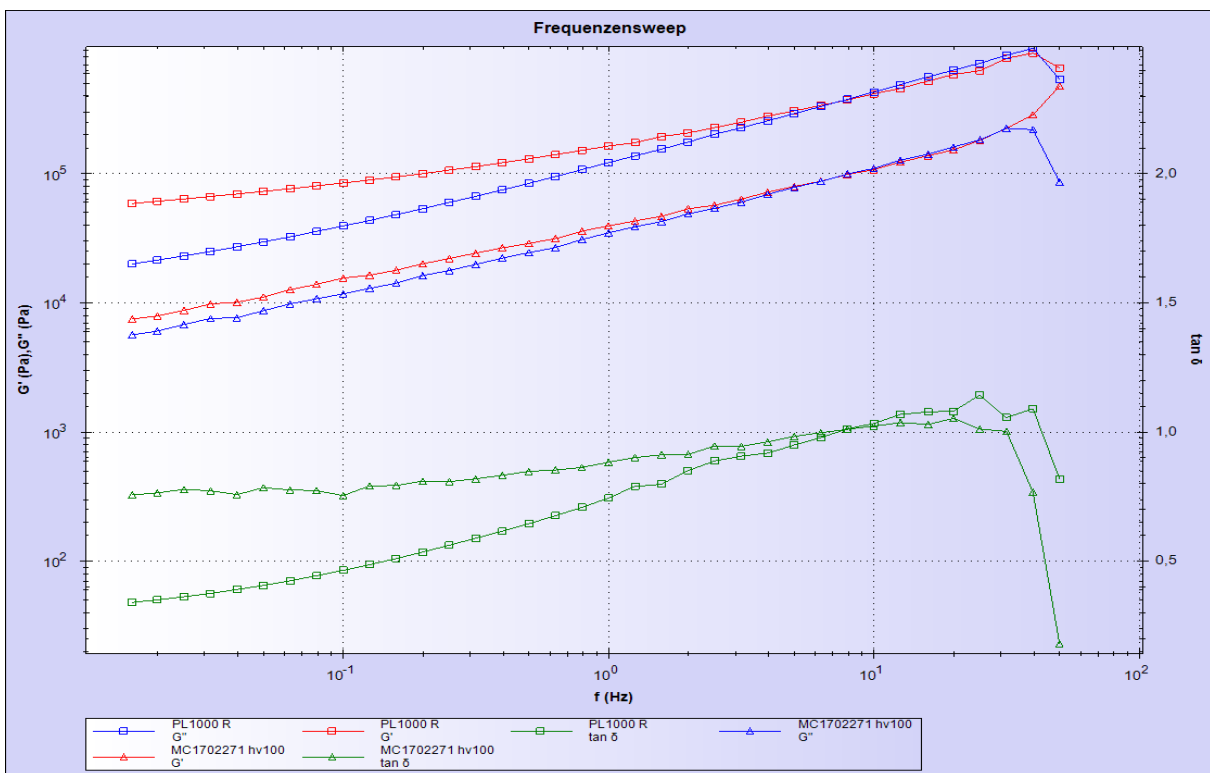


Abbildung 32: Frequenzsweep an der optimierten Formulierung MC1702271

Die Viskosität wird in der Prä-Vernetzung auf 1,9 Pas erhöht, um eine bessere Befüllung der Formen zu ermöglichen, wie folgende Abbildung 33 verdeutlicht.

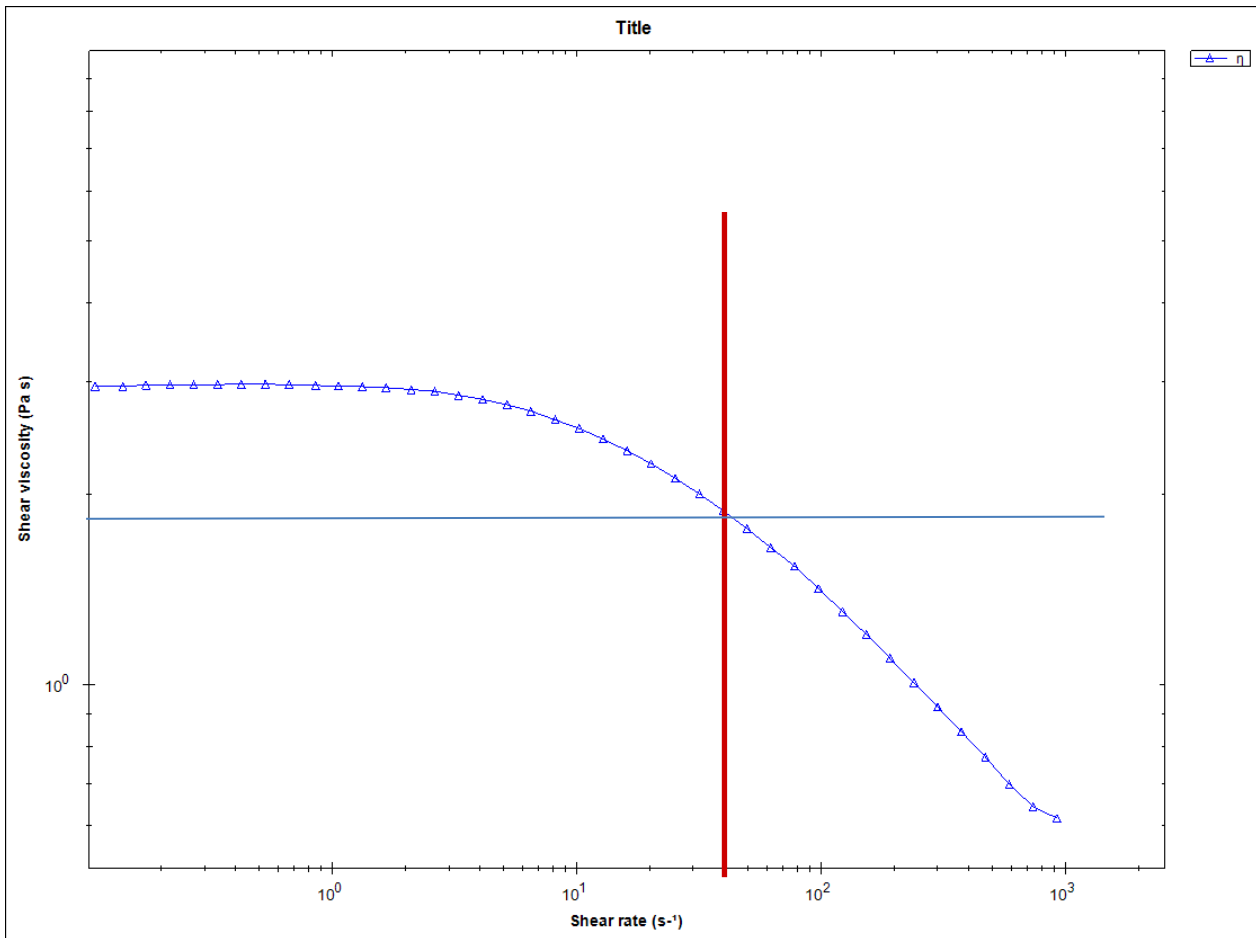


Abbildung 33: Viskosimetrie der Rezeptur MC1702271, rot 40s⁻¹, blau Viskosität von ca. 1,9 Pas

Der Temperatursweep zeigt auch eine bessere Eignung dieses Produktes für permanente Anwendungen, Abbildung 34.

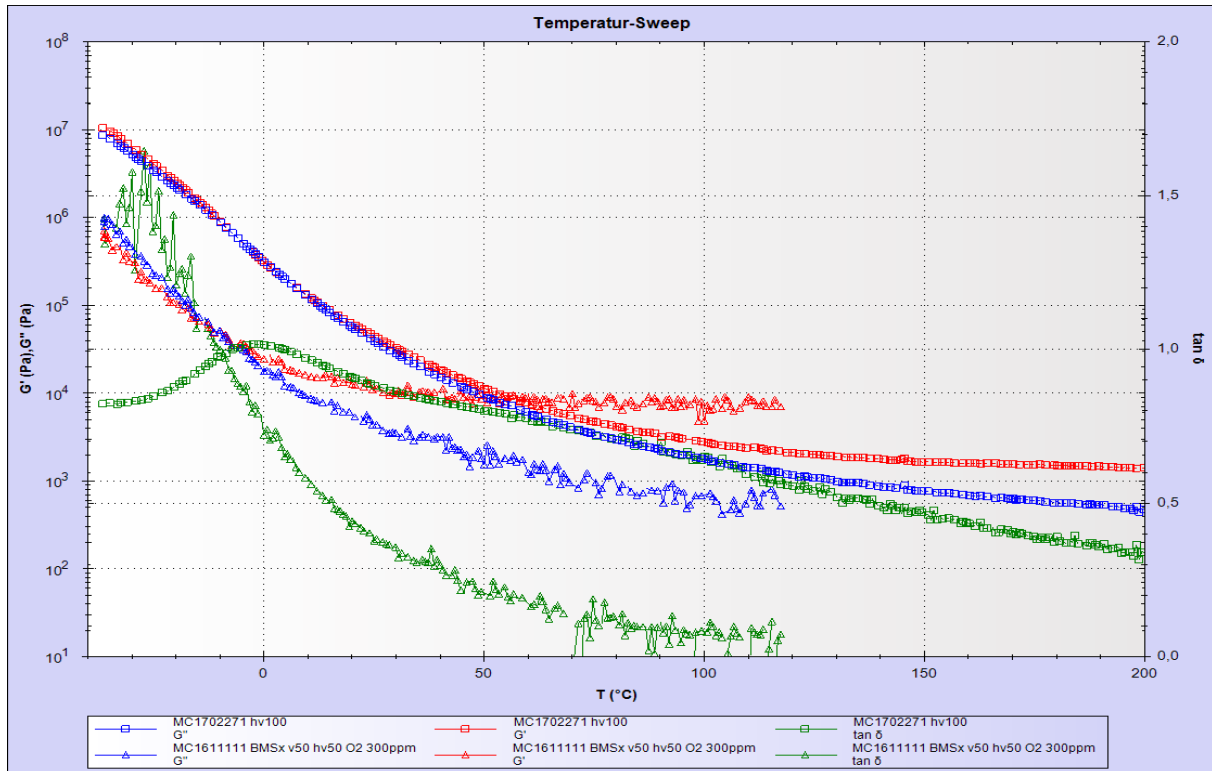


Abbildung 34: Temperatursweep der optimierten Formulierung MC1702271

Deutlich zu erkennen ist, dass der optimierte Klebstoff im Temperaturbereich bis etwa 50°C höhere Module und einen höheren T_g aufweist. Dies ist ein guter Indikator für höhere Schälfestigkeiten. Im Bereich der höheren Temperaturen nehmen die Module deutlich ab, was für eine reduzierte Temperaturbeständigkeit unter statischer Last spricht. Zur Bewertung dieser Eigenschaft werden rheologische SAFT-Versuche durchgeführt, Abbildung 35.

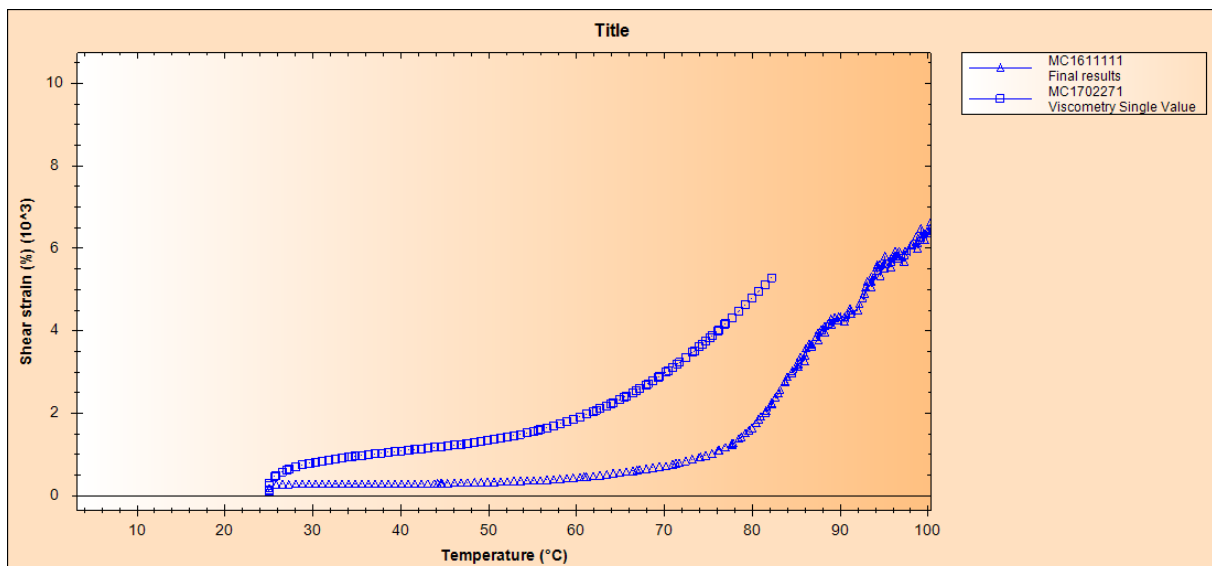


Abbildung 35: SAFT der removable Formulierung (MC1611111) und der Permanent-Formulierung MC1702271

Die beiden untersuchten Proben haben eine Schichtdicke von 500 μm . Wird dieser Klebstoff über die Kleblänge von 25 mm vollständig abgezogen, so ist die Dehnung zu diesem Zeitpunkt $25\text{mm}/0,5\text{mm} \cdot 100\% = 5000\%$.

Der SAFT-Wert kann daher gemäß folgender Tabelle 5 ermittelt werden.

Tabelle 5: SAFT-Werte

Klebstoff	SAFT [°C]
MC1611111	93
MC1702271	81

Da diese Werte oberhalb von 70°C liegen, genügen sie den Anforderungen hinsichtlich der thermischen Beständigkeit des Lastenheftes.

Ferner werden die Proben in einer beschleunigten Alterung (Kataplasmatetest) gealtert und anschließend mechanisch charakterisiert. Die folgende Abbildung 36 veranschaulicht die Ergebnisse.

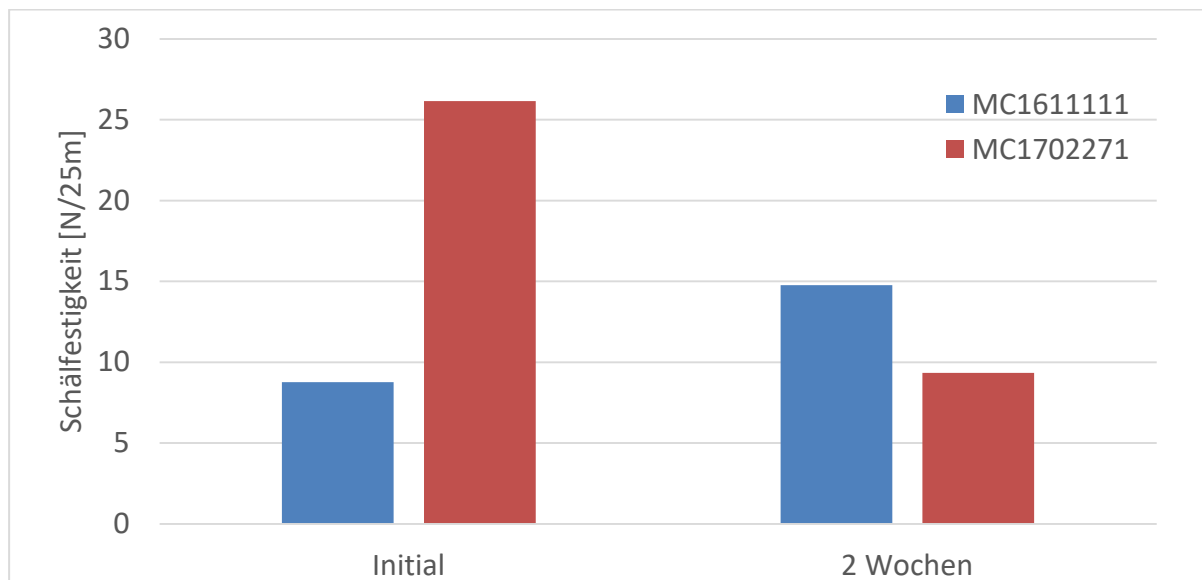


Abbildung 36: Ergebnisse der mechanischen Charakterisierung nach beschleunigter Alterung

Deutlich zu erkennen ist, dass der removable-Klebstoff MC1611111 Festigkeit aufbaut, während der kohäsivere und eigentlich schälfestere Klebstoff MC1702271 deutlich an Festigkeit einbüßt. Dies ist für beide Klebstoffe ein unerwünschtes Verhalten, weshalb eine Außenanwendung unter starker Feuchtigkeit und Temperaturbeanspruchung kritisch zu sehen ist. Für das angestrebte Bauteil ist dies wegen der reinen Anwendung im Innenraum hingegen als unkritisch zu bewerten.

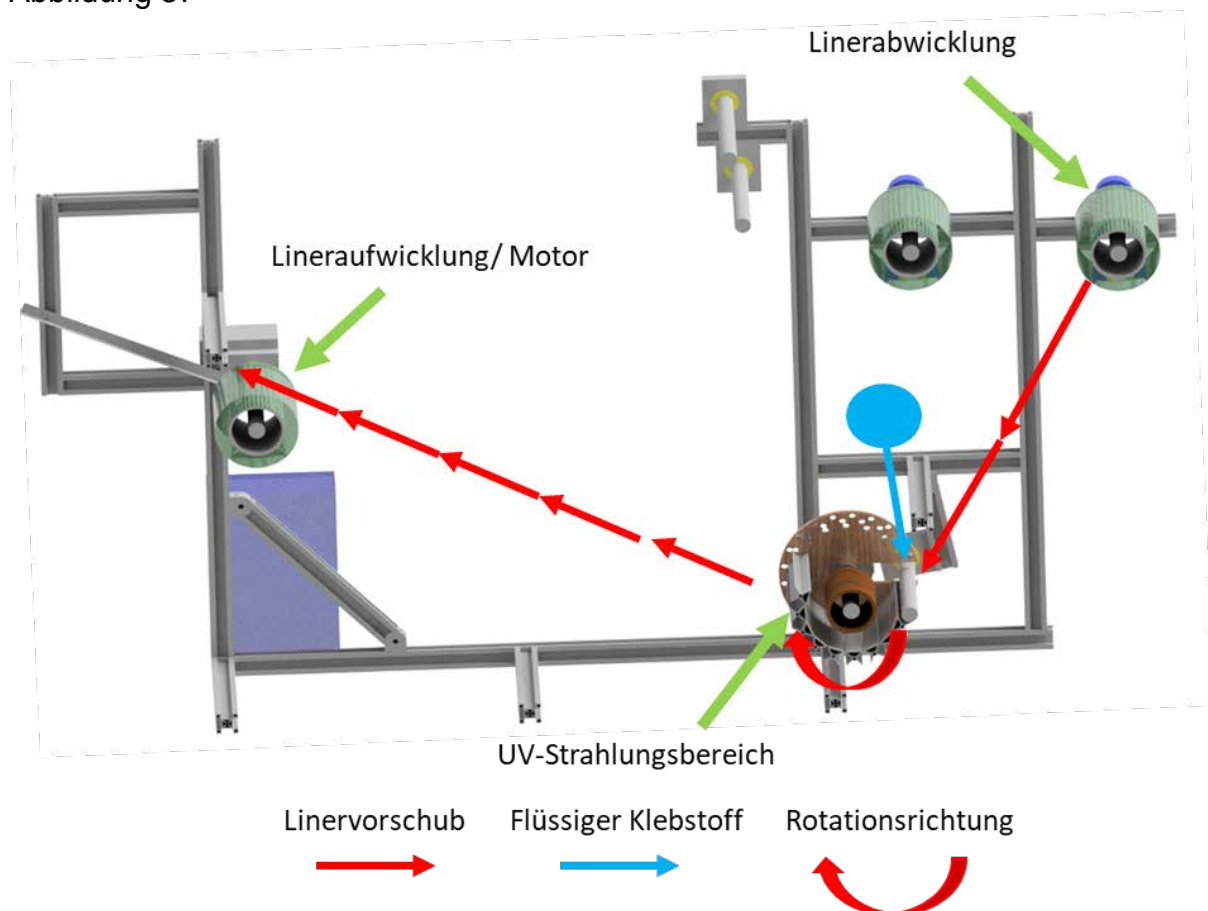
4.6 AP 5 – Anlagentechnik II (ifs)

Entsprechend AP 3 wird ein Anlagenprototyp konstruiert. Die Unterteilung der Konstruktion erfolgt in die Arbeitspunkte:

- Grundgerüst der Anlage
- Druckwalze
- Klebstoffbefüllung
- Beleuchtung/Aushärtung
- Liner
- Klebstoffdosierung
- Anlagensteuerung
- Beschichtungsversuche an der Anlage

Grundgerüst der Anlage

Das Grundkonzept der Anlage wird an einen Rotationstiefdruck angepasst und den Anforderungen entsprechend modifiziert ausgelegt (Abbildung 22, Modifikation 2). Die verwendete Linerbahn wird im laufenden Prozess von der Linerabwicklung über das Formwerkzeug zur Lineraufwicklung transportiert. Ein Getriebemotor sitzt auf der Welle der Lineraufwicklung und treibt diese an. Das Grundgerüst der Anlage zeigt Abbildung 37



Druckwalze

Die Druckwalze wird als Zylinder mit scheibenförmigen Aussparungen auf der Mantelfläche entworfen (Abbildung 38, links). Anlehnend an die Ergebnisse aus Arbeitspaket 4.3 werden zwei Walzen hergestellt; eine mit PTFE und eine mit Silikon Xiame-ter SLT 3445 als Walzenmaterial (Abbildung 38, rechts).



Abbildung 38: Formwalze CAD (links), gefertigte Ausführungen PTFE (rechts oben), Silikon (rechts unten)

Während das PTFE Werkzeug in der ifs-eigenen Werkstatt hergestellt werden kann, muss das Silikon-Werkzeug extern von der Firma Böttcher Systems in Köln gefertigt werden. Dabei wird das feuchtevernetzende Silikon schichtweise auf einen glasfaserverstärkten Kunststoffkern aufgespritzt und die entsprechende Form im Nachgang ausgelasert, wodurch eine strukturierte Oberfläche entsteht (Abbildung 39).



Abbildung 39: Ausgelaserte Form einer silikonbasierten Walze

Formbefüllung

Die Formfüllung wird durch volumetrische und pneumatische Dosiereinheiten, sowie durch gravimetrisches Befüllen getestet. Für das volumetrische Verfahren wird eine Exzenterrotationspumpe der Firma Viscotec verwendet. Dabei kann eingestellt werden, welche Menge Klebstoff zu welchem Zeitpunkt der Werkzeugposition appliziert wird, wie auch die Geschwindigkeit des Volumenstroms.

Die pneumatische Dosiereinheit besteht aus zwei Klebstoffkartuschen, welche gleichzeitig über eine Steuereinheit mit Druckluft beaufschlagt werden. Die Kartuschendüsen werden oberhalb der Werkzeugwalze und der Anpresswalze positioniert (Abbildung 40).

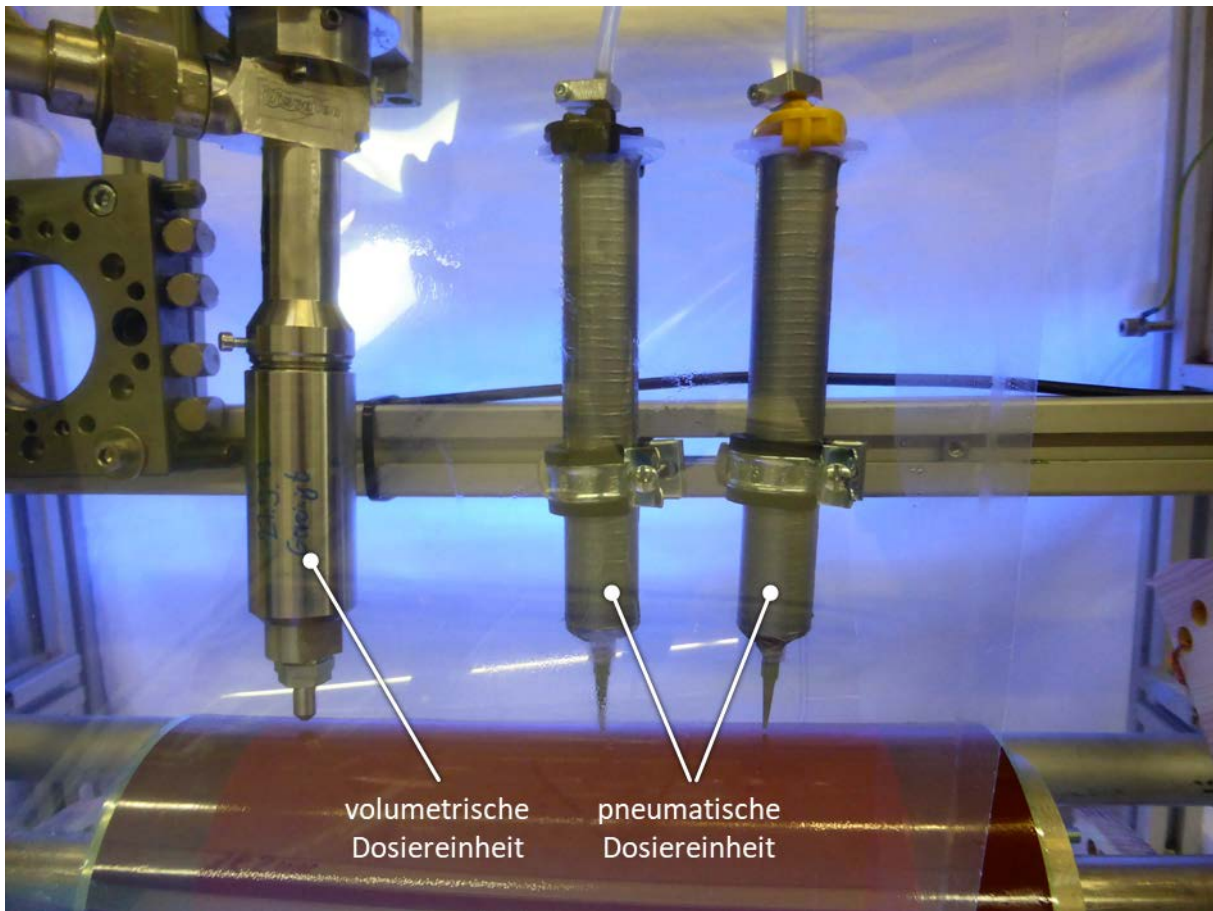


Abbildung 40: Aufbau der volumetrischen und pneumatischen Formbefüllung

Als dritte Option die Formen des Werkzeugs mit Klebstoff zu befüllen wird eine Reservoirlösung getestet. Dabei befindet sich immer ein Überschuss an Klebstoff zwischen der Anpresswalze und der Werkzeugwalze. Dieser Überschuss wird während des Betriebs durch die Walzenrotation permanent umgewälzt und die Formen werden durch gravimetrisch bedingtes Fließen gefüllt (Abbildung 41).

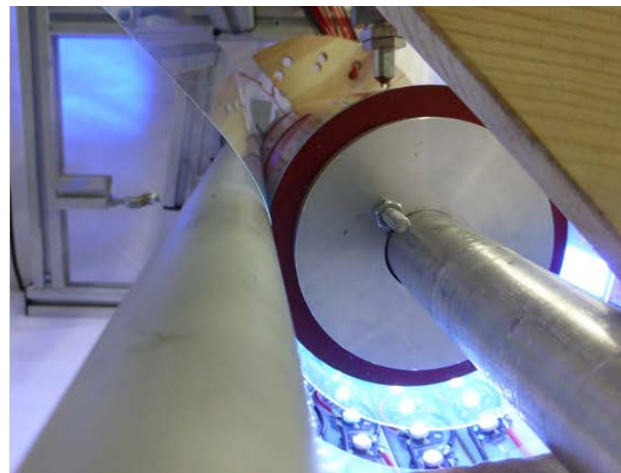
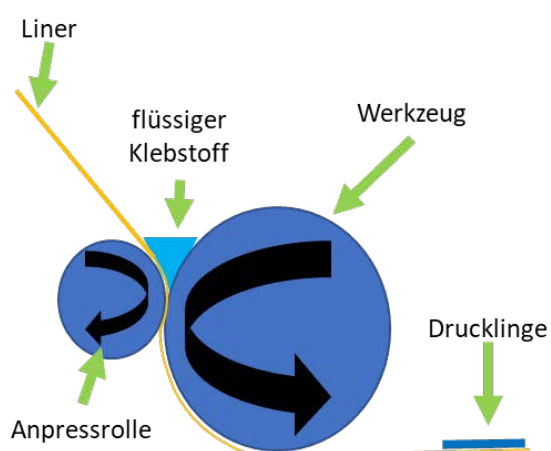


Abbildung 41: gravimetrische Formbefüllung durch konstantes Klebstoffreservoir

Bei allen Optionen kommt es während des Prozesses der zu einem Sauerstoffabschluss an der Klebstoffoberfläche, indem der Liner über das Werkzeug gespannt wird und somit die Klebstoffform abdichtet. In Verbindung mit der UV-Strahlung ist es somit möglich, die Vernetzung des Klebstoffs durchzuführen, ohne Schutzgas verwenden zu müssen.

Beleuchtung/Aushärtung

Der in dem Projekt verwendete Klebstoff wird so ausgelegt, dass die Vernetzung bei einer UV-Bestrahlung mit einer Wellenlänge von 395 nm stattfindet. Eine Voraussetzung war, dass LEDs als UV-Emitter verwendet werden. Aus diesem Grund werden 3 W High-Power-LEDs auf mehreren zirkulär angeordneten Aluminiumprofilen angebracht. Für die Rahmenstruktur werden Hohlprofile verwendet, welche die durch die LEDs entstehende Wärme aus dem Bestrahlungsvolumen abführen. Zudem werden Aluminium-Hohlprofile verwendet welche aktiv luftgekühlt werden können. Dies kann von Vorteil sein, wenn die Wärmestrahlung die Walze so sehr erhitzt, dass das Entformen des Klebstoffs erschwert wird. Durch diese geometrische Anpassung der Aluminiumprofile an die Walzengeometrie, umschließt die Leuchteinheit mit einem Abstand von 25 Millimetern die strukturierte Walze um 180° (Abbildung 43Abbildung 42).

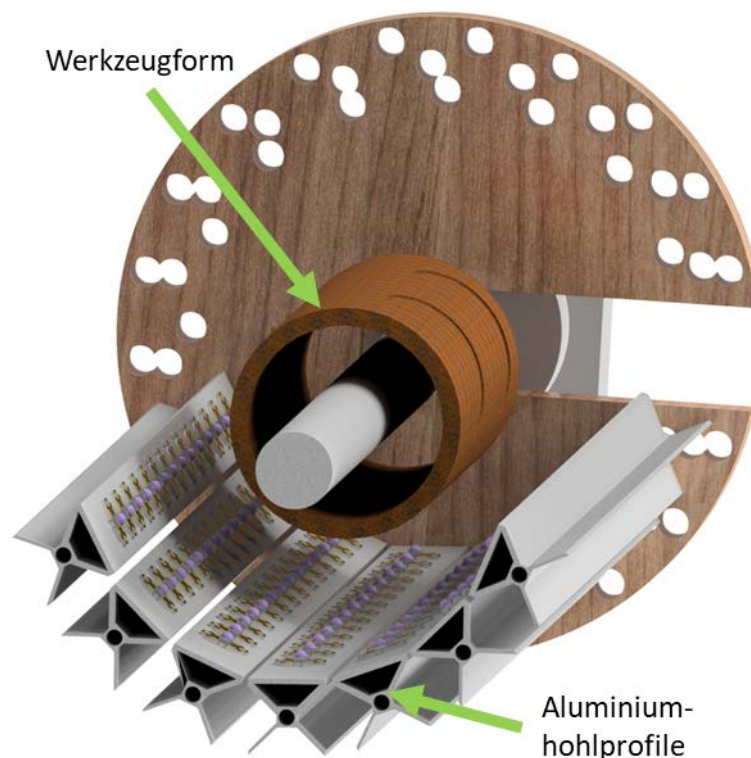


Abbildung 42: CAD Modell der LED-Batterie im Halbschnitt

Für jede LED-Leiste werden 14 High-Power LEDs verwendet (Abbildung 43, oben). Damit kann eine Breite von 500 mm mit UV-Licht bestrahlt werden. Die Werkzeugform kann zusätzlich bis zu dieser Länge beliebig hochskaliert werden. Die Ansteuerung der LEDs wird so ausgelegt, dass die Intensität der LEDs einstellbar ist. Es kann in sechs Stufen zwischen 0 % und 100 % der Leistung gesteuert werden. Für jede LED-Leiste werden zwei Netzteile verwendet, weshalb es neben der reinen Intensitätsregelung auch möglich ist, die LEDs einer Leiste alternierend anzusteuern (Abbildung 43, unten).

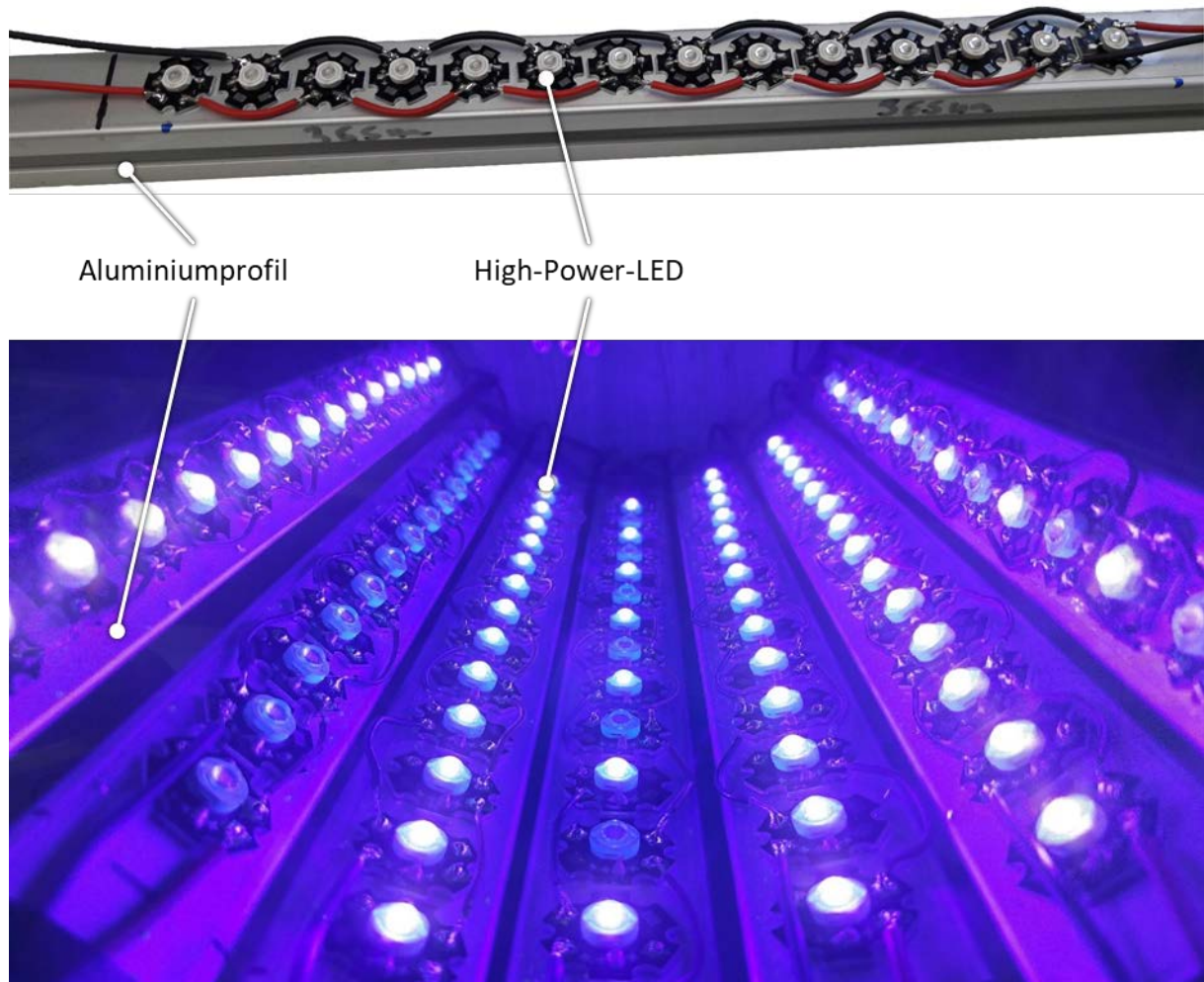


Abbildung 43: LED-Leiste (oben), gekrümmte LED-Batterie (unten)

Für die Arbeitssicherheit wird die UV-Batterie um einen Deckel erweitert. Dieser ist darauf ausgelegt, dass ein Arbeiten an der Anlage ohne permanente UV-Sicherheitsausrüstung für die Augen notwendig ist. Zusätzlich werden die rotierenden Teile Formwerkzeug und Applikationswelle abgedeckt, so dass dort keine Gefahr für die Anwender besteht. Im Bereich der Klebstoffapplikation wird ein Fenster eingearbeitet, durch welches die Klebstoffapplikation oder Klebstoffauffüllung stattfindet. In Abbildung 44 ist die Abdeckung dargestellt.

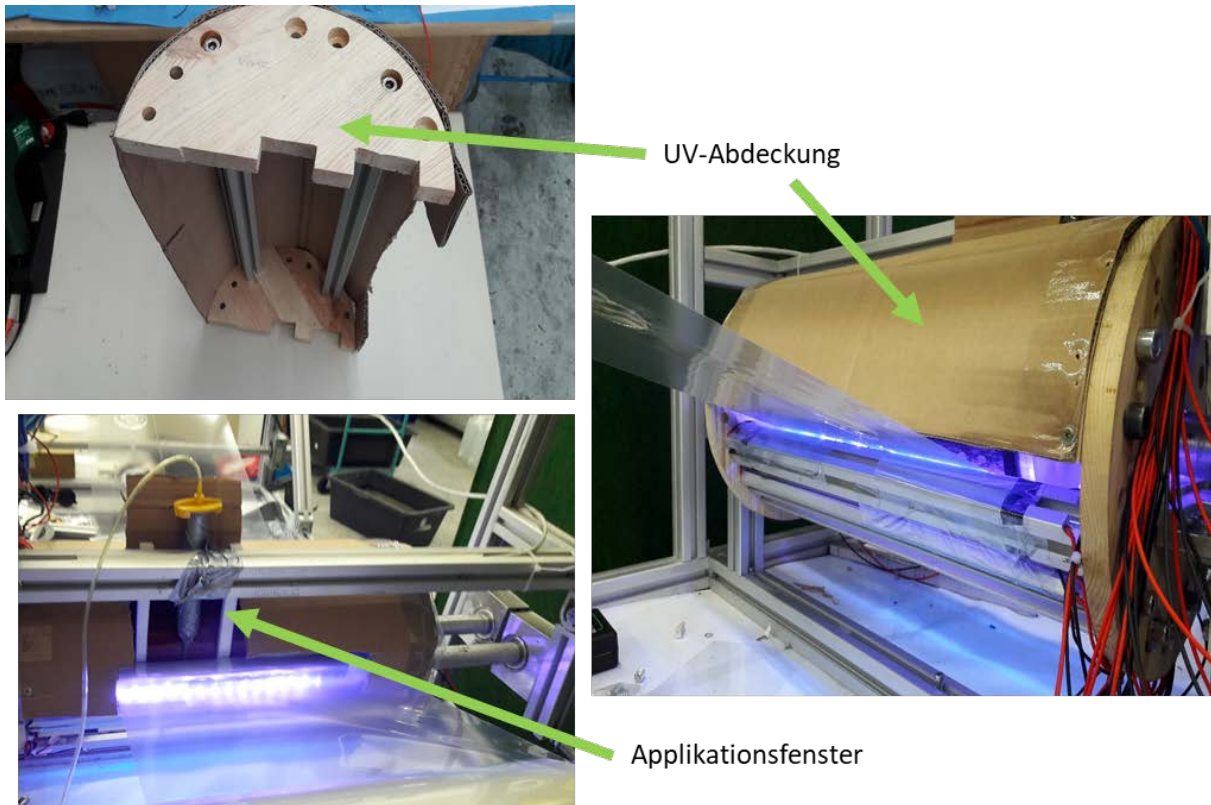
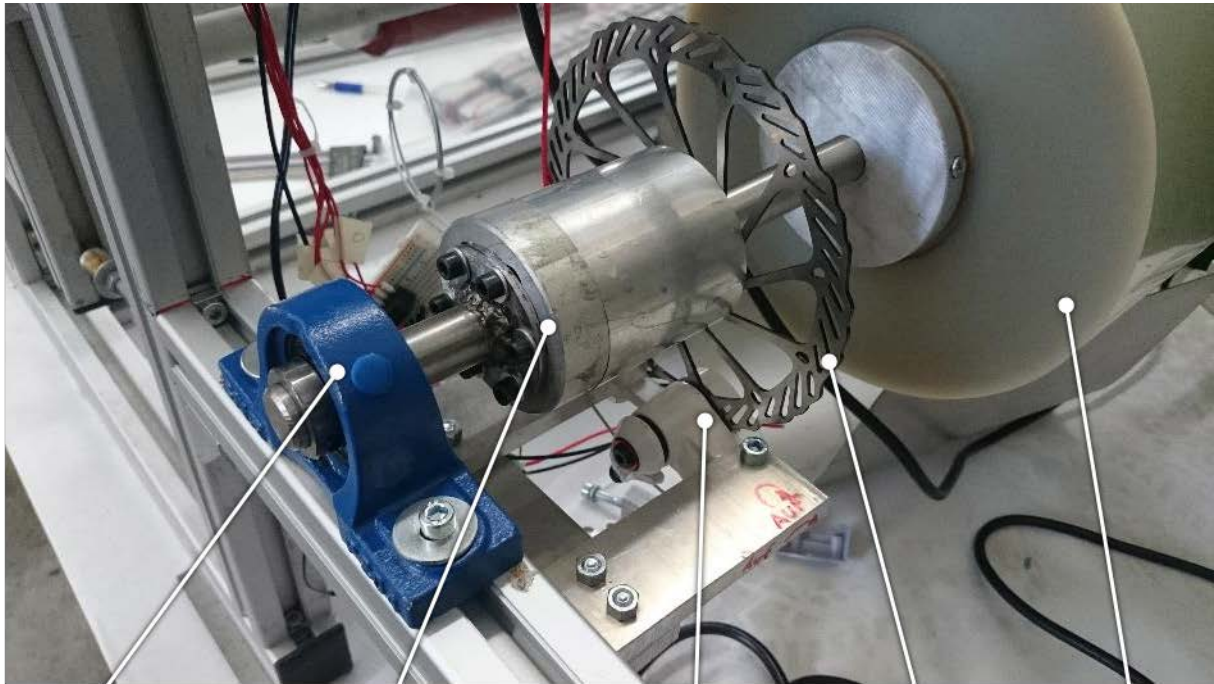


Abbildung 44: UV-Abdeckung der LED-Batterie

Liner

Die verwendeten PET-Folien sind hinsichtlich der Silikonisierung abgestuft und die Materialstärken liegen zwischen 50 μm und 175 μm . Nach Angaben von Biolink ist die Erzeugung einer Bahnspannung ein wesentlicher Punkt für einen sicheren Herstellungsprozess. Deswegen wird die Welle der Linerabwicklung mit einer Scheibenbremse versehen, deren Bremskraft manuell eingestellt werden kann (Abbildung 45). Daraus resultiert eine justierbare Bahnspannung über den gesamten Verlauf des Liners.



Flanschlager Bremsscheibenaufnahme Bremsbacken Bremsscheibe Linerrolle

Abbildung 45: montierte Bremsscheibe mit Lagerung der Linerrolle

Da der Getriebemotor mit der Welle der Lineraufwicklung verbunden ist, wird ein auf Reibung basierendes System entwickelt, damit die Drucklinge aufgerollt und anschließend auf einfache Weise ein Wellenwechsel durchgeführt werden kann. Dazu wird an das Anlagengestell motorseitig eine schiefe Ebene in Form von zwei Profilen gebaut, auf denen eine frei bewegliche Welle sitzt auf die der Liner aufgewickelt wird (Abbildung 46). Durch ihr Eigengewicht wird die Linerwelle auf die angetriebene Welle gedrückt und durch die vorherrschende Reibung gleichzeitig angetrieben. Ausschließlich durch diesen Linienkontakt wird der Liner mitsamt den Drucklingen aufgerollt und kann beliebig ausgetauscht werden.

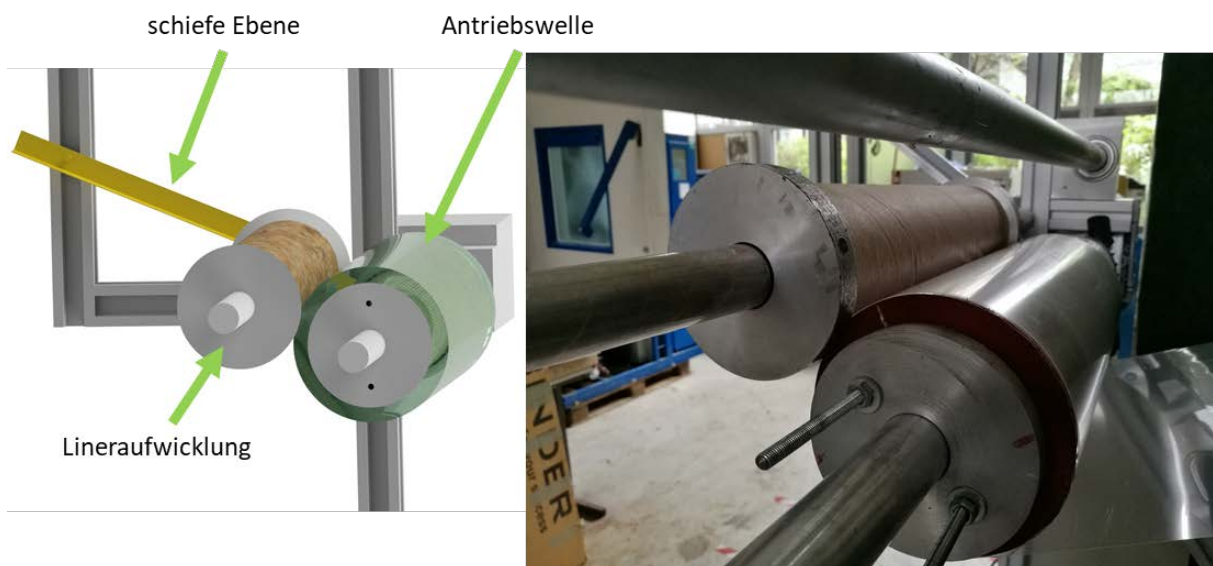


Abbildung 46: Planung und Umsetzung der reibungs-basierten Lineraufwicklung

Anlagensteuerung

Die Steuerung der gesamten Anlage wird über einen zentralen Schaltkasten realisiert. Dort ist es möglich, sowohl die Geschwindigkeit des Liners zu regeln, als auch die LEDs zu steuern. Dazu zählt die Auswahl der LED-Intensität in sechs Stufen zwischen 0% und 100%. Das Dimmen der LEDs ist für jede LED-Reihe separat möglich, wodurch einzelne Intensitätszonen und somit zum Beispiel ein Intensitätsgradient eingestellt werden kann.

Die Steuerung der LEDs erfolgt über einen Arduino-Mikrocontroller. Mit Hilfe von Pulsweitenmodulation (PWM) werden entsprechende Konstantstromquellen (Netzteile) angesteuert, die proportional zu der Steuerspannung eine Stromstärke für jede einzelne LED-Reihe bereitstellen. Die Versorgung der gesamten Anlage erfolgt über einen 230 V Anschluss.

Abbildung 47 zeigt die realisierte Anlage zur Herstellung von haftklebrigen Formbauteilen im Direktdruck.

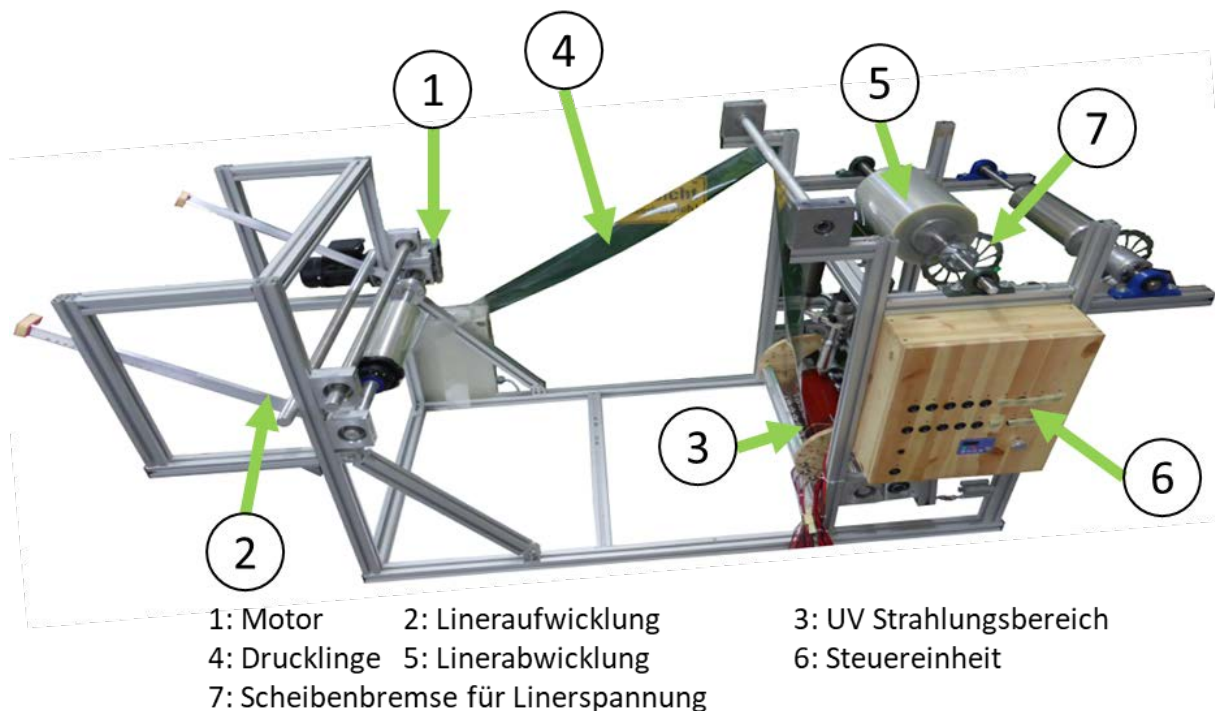


Abbildung 47: realisierte Prototypenanlage für das Drucken von haftklebrigen Formbauteilen

Parameterfindung

Im Anschluss an die Auslegung und Realisierung werden Versuche an der Anlage durchgeführt, um geeignete Parameter für den Direktdruck von haftklebrigen Formbauteilen zu finden.

Die Versuche werden mit einer 50 µm dicken PET Folie als Linermaterial durchgeführt. Die UV-Transmission wird dabei nicht messbar reduziert. Der verwendete Klebstoff lässt sich mit der zur Verfügung stehenden UV-Intensität sehr gut aushärten. Im Lastenheft ist eine UV-Intensität von 3 W/cm² angegeben um die Vernetzung durchzuführen. Aus diesem Grund werden Messungen an einzelnen LEDs und der LED-Batterie durchgeführt, um entsprechende Anlagenparameter zu finden. Die In-

Intensität einer einzelnen LED-Leiste (100 % Leistung) bei variierendem Abstand ist in Abbildung 48 dargestellt.

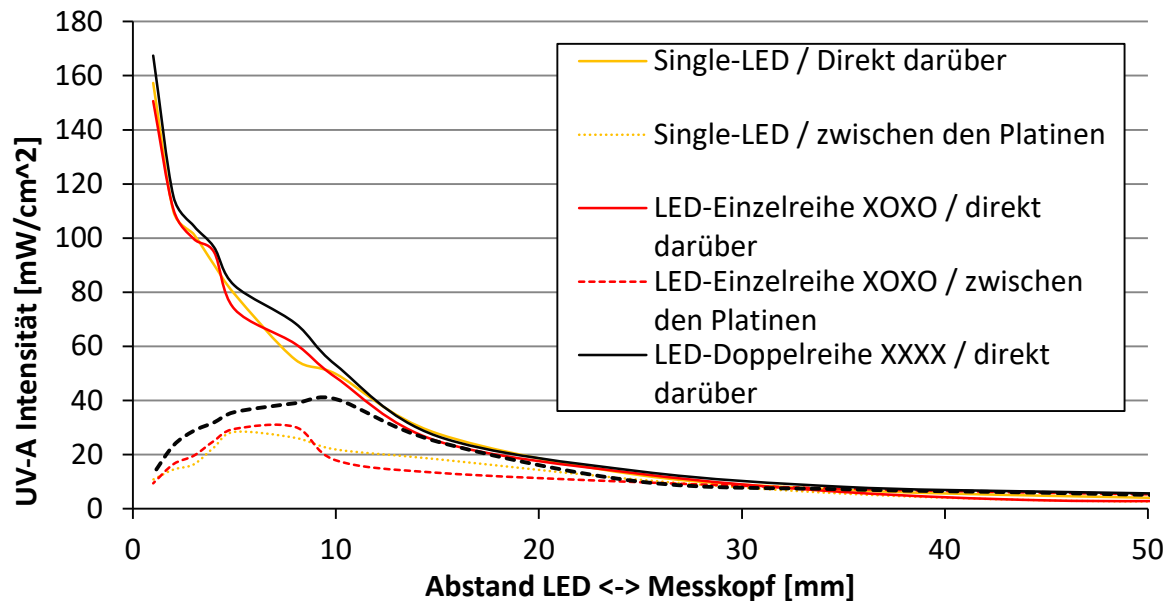


Abbildung 48: UVA-Intensitätsmessung einer einzelnen LED-Leiste

Der Abstand zwischen Werkzeugform und LEDs liegt nach der konstruktiven Auslegung bei 25 mm. Bei dieser Konfiguration wird eine mittlere UV-Intensität von 11 mW/cm² gemessen. Mit der zusätzlichen Möglichkeit die LED Intensitäten zu dimmen können die in Abbildung 49 dargestellten UV-Intensitäten gemessen werden.

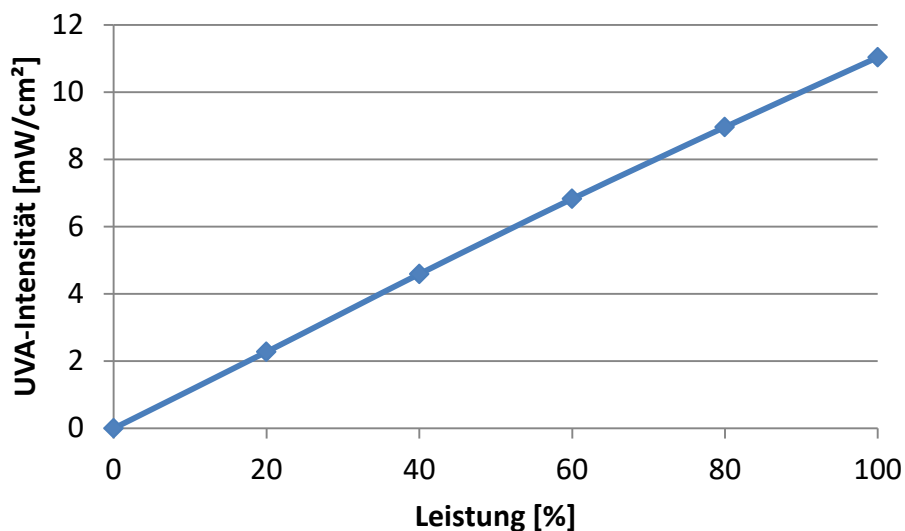


Abbildung 49: Intensitätsverlauf der LED-Leiste bei verändernden Leistungsraten

Die verwendete PTFE-Formwalze zeigt zu Beginn einer Versuchsreihe immer gute Ergebnisse. Die Walze erwärmt sich im Prozess aufgrund der Wärmestrahlung der LEDs und aufgrund der Reaktionswärme der Drucklinge auf ca. 75 °C (Abbildung 50). Durch den Temperaturanstieg steigt die Haftkraft der Drucklinge in dem Werkzeug an und die Drucklinge lassen sich nicht mehr aus diesem heraustrennen. Dieses temperaturabhängige Verhalten wird auch bei den Schälkraftversuchen in Kapitel

4.3 beobachtet. Bei dem Silikonwerkzeug tritt ein solches unerwünschtes Verhalten nicht auf, weshalb diese Form für weitere Versuche verwendet wird.

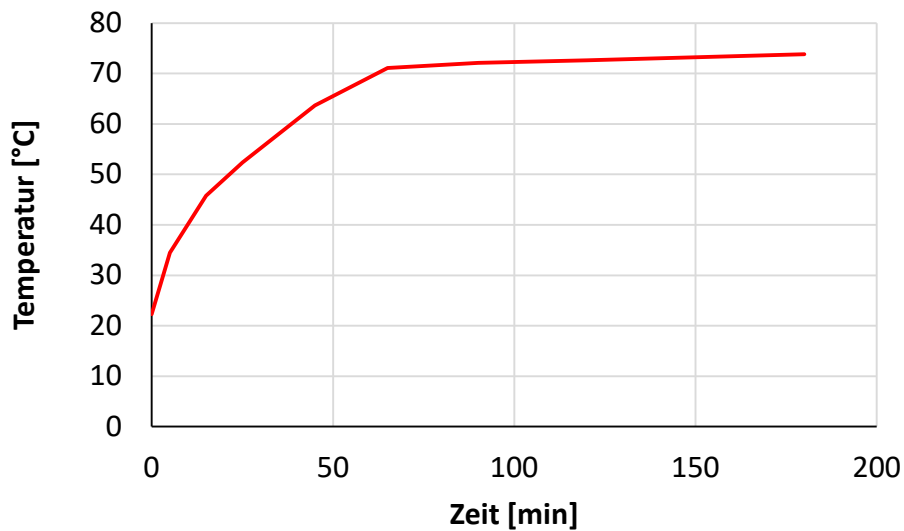


Abbildung 50: Temperaturverlauf der Walzenmantelfläche während dem Betrieb mit 365 nm LEDs

Aufgrund der Messergebnisse werden die Grundeinstellung der LED-Batterie auf 40 % der Leistung bei allen verfügbaren LEDs gestellt.

Beschichtungsversuche

Bei den Beschichtungsversuchen wird der Fokus neben der Entformbarkeit auch auf die Aushärtung und die Prozessgeschwindigkeit gelegt.

Dosiervarianten

Das Setup der Anlage ermöglicht die Durchführung der Versuche mit verschiedenen Dosiervarianten:

Für die *volumengesteuerte Befüllung* der Formen wird eine Exzenterrotationspumpe von Viscotec verwendet (Abbildung 51). Diese dosiert Klebstoff in vorgegebener Menge und mit einstellbaren Rampenverläufen Klebstoff genau in den Bereich zwischen Werkzeugform und Anpresswalze (Abbildung 41). In Kombination dazu wird die Welle des Formwerkzeugs um einen Lagepositionsschalter erweitert, damit die Befüllung vollautomatisch und wiederholbar durchgeführt werden kann.

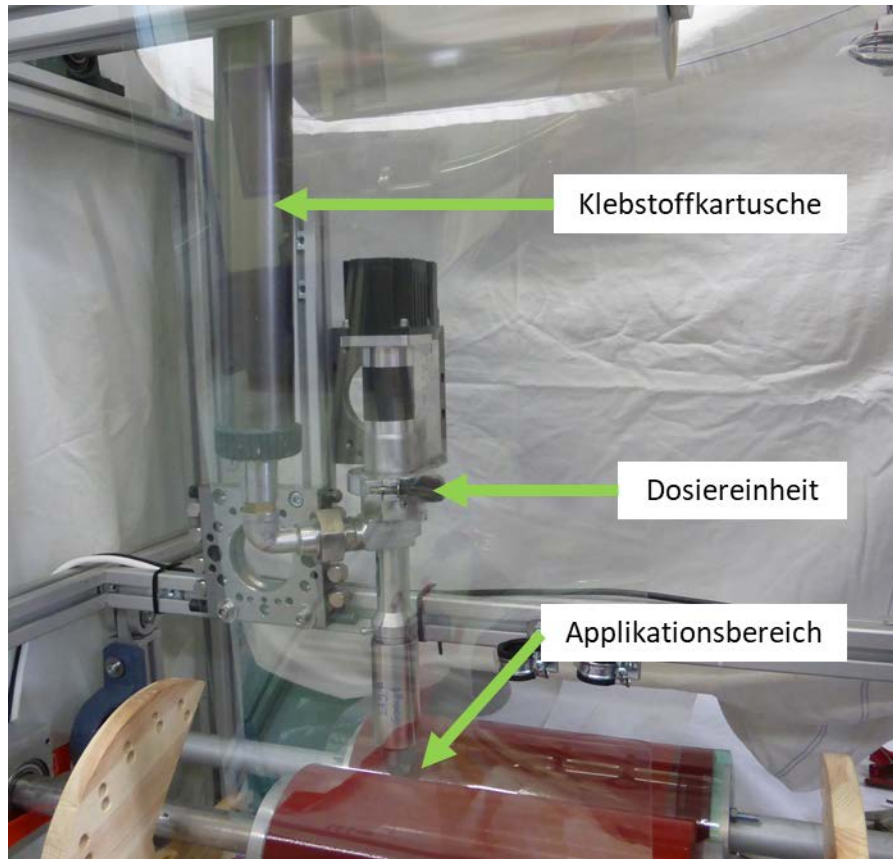


Abbildung 51: Aufbau zur volumengesteuerten Klebstoffdosierung

Durch die spezielle Pumpenart wird der Klebstoff ideal für die Befüllung der Werkzeugformen appliziert. Bei den hergestellten Drucklingen werden nur sehr geringe Verläufe festgestellt (Abbildung 52). Die Formbefüllung ist hingegen sehr gut.

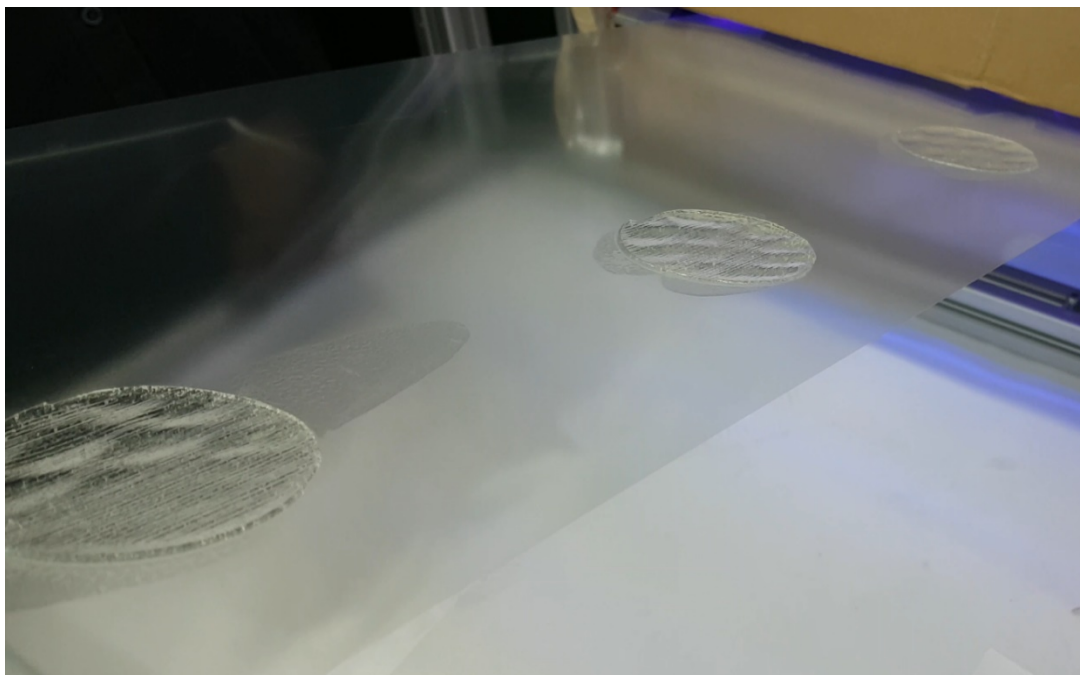


Abbildung 52: Klebstoffverlauf über die Form hinaus

Bei mehreren gleichzeitig zu befüllenden Formen werden mehrere dieser teuren Dosiergeräte benötigt, welche zusätzlich von einem Computer angesteuert werden. Für einen wirtschaftlichen Einsatz ist dieses Verfahren im produktiven Bereich nicht geeignet.

Bei der *pneumatischen Dosierung* des Klebstoffs werden zwei Kartuschen mit Kunststoffspitzen in einer vergleichbaren Position wie der volumetrische Dosierer an der Anlage angebracht (Abbildung 40). Die Steuerung der Dosiereinheit erfolgt ebenfalls über die Positionsgeber an der Seite der Werkzeugwalze.

Die generierten Drucklinge weisen eine vollflächige Formfüllung auf, jedoch zeigt sich ein starker Klebstoffverlauf zwischen den Formen. Das wird durch die benötigte niedrige Viskosität des Klebstoffs in Verbindung mit der gewählten Applikationsmethode verursacht. Die Klebstoffkartuschen bauen keinen Unterdruck auf, wodurch an der Spitze der Applikationseinheit permanent Klebstoff aus dem System tropft und zwischen den Formen auf dem Liner ausgehärtet wird (Abbildung 53).

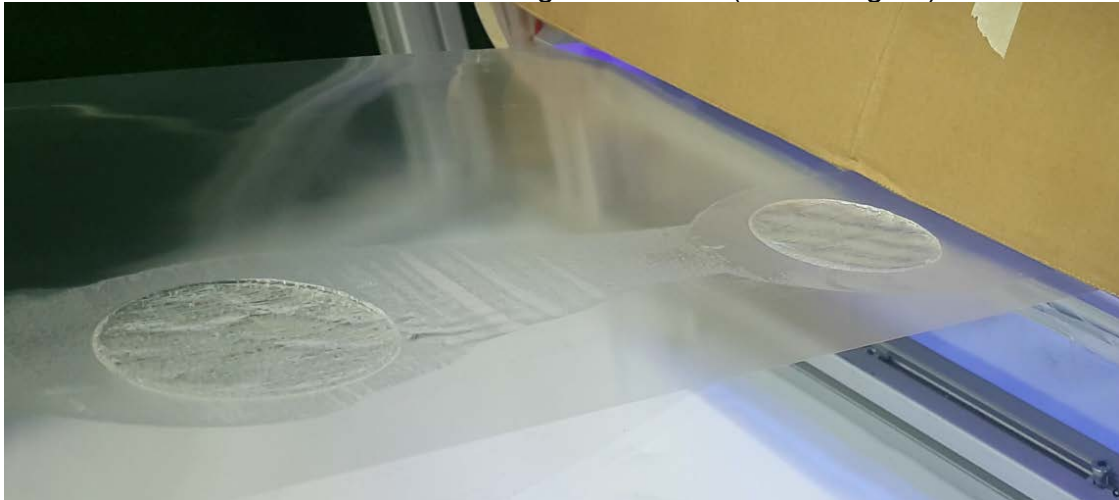


Abbildung 53: Drucklinge mit kontinuierlichem Klebstoffverlauf zwischen den Formen

Dazu gibt es einige Versuchsmuster, bei denen aufgrund der Dosierung die Form nur unzureichend gefüllt wird (Abbildung 54). Dennoch ist diese Variante der Klebstoffapplikation unter wirtschaftlichen Bedingungen wesentlich besser dazu geeignet, in einer Serienproduktion eingesetzt zu werden, da die gesamte Anlagentechnik der Applikation mit Druckluft funktioniert und ohne große Investitionen hochskaliert werden kann.



Abbildung 54: Druckling aus nicht ausgefüllter Form

Bei der *gravimetrischen Formbefüllung* wird ein permanenter Klebstoffvorrat zwischen den beiden Walzen gehalten, indem in kurzen Intervallen Klebstoff aus den pneumatischen Kartuschen dosiert wird. Dadurch kommt es auch, wie schon bei den anderen beiden Verfahren, zu einem permanenten Verlauf des Klebstoffs zwischen den Formen. Aus diesem Grund werden Variationen der Anpresswalzen von hart bis weich und auch Unterschiede bei den Anpresskräften der Anpresswalze unternommen. Dabei zeigt sich, dass ein hoher Anpressdruck den Klebstoffverlauf zwischen den Formen weiter begünstigt. Bei einem zu geringen Anpressdruck nimmt die Schichtdicke des verlaufenen Klebstoffs zu. Ein Mittelmaß bringt in Bezug auf den unerwünschten Klebstoffverlauf die besten Ergebnisse. Bei der Verwendung einer Anpresswalze aus Stahl (harte Oberfläche) wird die Werkzeugwalze aus Silikon bei der linienförmigen Belastung leicht deformiert. Daraus resultiert eine Spannung innerhalb des Klebstoffs, oder des Liners während der Aushärtung. Das zeigt sich in Form von wiederkehrenden Wellen in den Drucklingen (Abbildung 55).

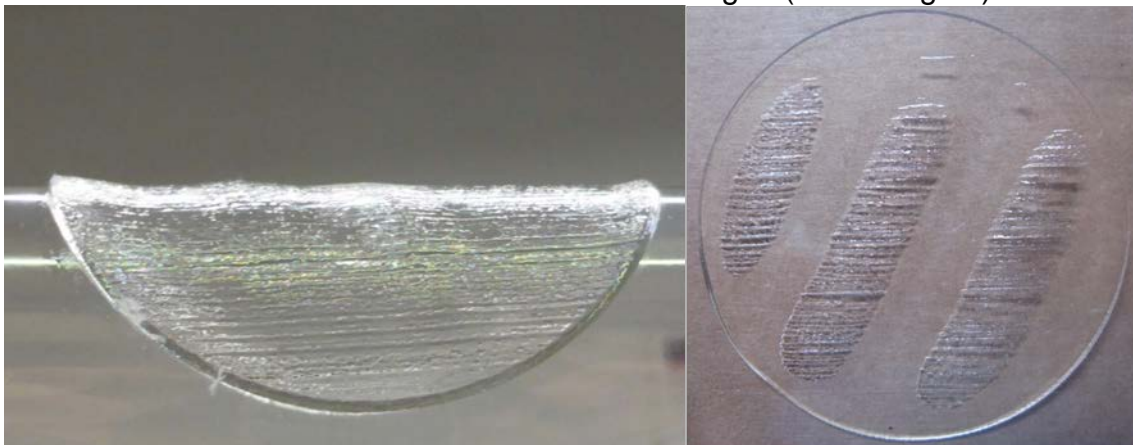


Abbildung 55: wellenartige Variation der Schichtstärke

Zur Vermeidung dieser unerwünschten Strukturen werden zwei Optimierungsschritte durchlaufen. Zum einen wird die Anpresswalze mit geringerer Kraft gegen die Werk-

zeugwalze gedrückt und zum anderen wird ein dickerer Liner (175 µm) verwendet. Aufgrund der Prozesswärme während der Vernetzung wird angenommen, dass in den dünnen Liner eine thermische Spannung eingebracht wird, welche sich nach dem Entformen in den beschriebenen Unebenheiten der Klebschicht äußert. Beide Veränderungen führen zu einer wesentlichen Verbesserung der Druckqualität. Der Druckling wird mit dieser Technik ohne sichtbare Wellenstrukturen aus dem Werkzeug entformt. Die Konturschärfe der Ränder ist sehr hoch, vergleichbar mit den manuell gedruckten Vergleichsmustern. Der bis dahin zu beobachtende Verlauf des Klebstoffs wird auf ein Minimum reduziert und ist optisch kaum noch auszumachen (Abbildung 56). Lediglich taktil kann eine dünne Klebstoffschicht ermittelt werden. Die durch das Werkzeug bedingten Riefen auf der Oberfläche des Produkts verschwinden, sobald ein Deckliner auf den Druckling gebracht wird (Abbildung 57).

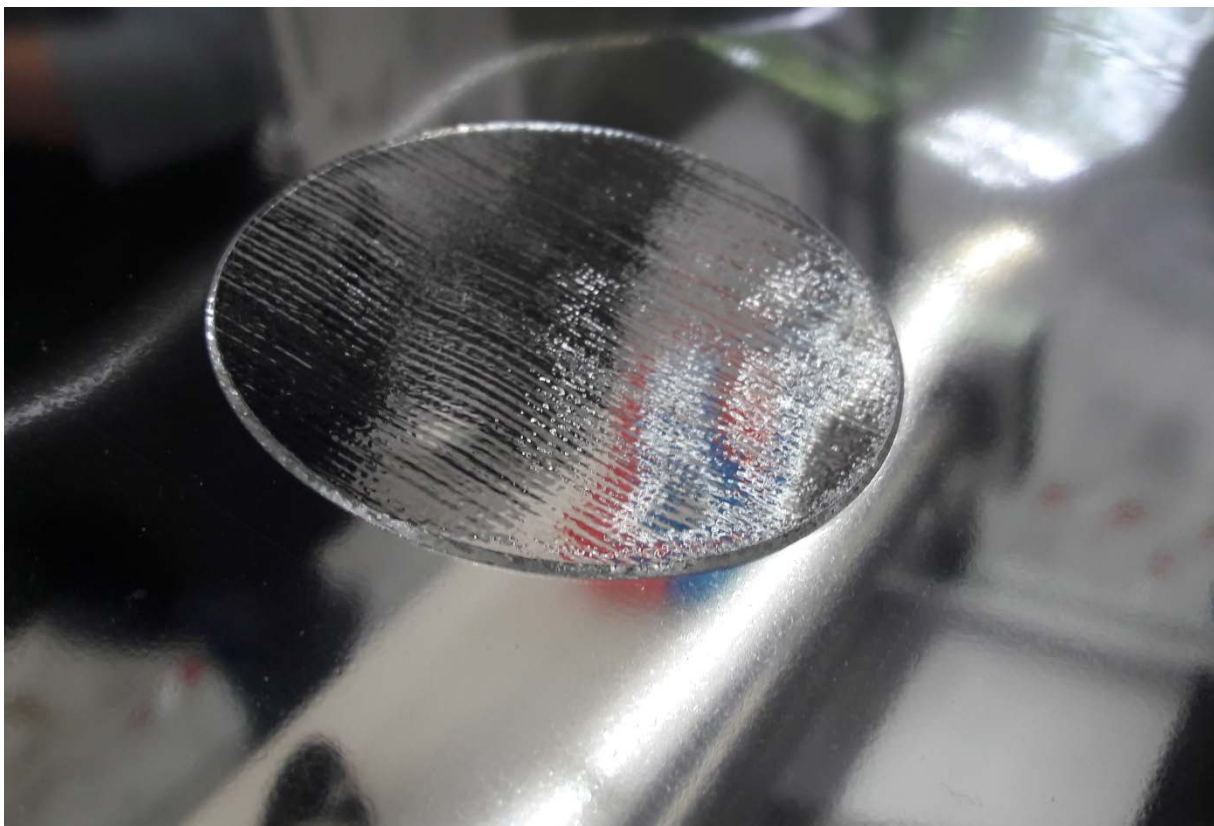


Abbildung 56: Druckling mit hoher Konturschärfe und keinem sichtbaren Verlaufen



Abbildung 57: Mit zweiter Folie abgedeckter, maschinell erstellter Druckling

4.7 AP 6 - Anpassung einer industriellen Laboranlage unter fertigungstechnischen und wirtschaftlichen Aspekten

Ein wesentlicher Aspekt der alternativen Technologie ist die Prozessgeschwindigkeit. Die herstellbare Menge an Drucklingen ist bei diesem Verfahren sehr stark von den Faktoren Werkzeuglänge, Werkzeugdicke und Anzahl der Formen auf der Mantelfläche abhängig. Aufgrund der geringen Anforderungen an zusätzlich benötigten Bauteilen (z.B. Dosierer) im Reservoirbetrieb, ist ein Hochskalieren auf Werkzeuglängen von ein bis zwei Meter gut realisierbar. In den Laborversuchen wird eine Walze verwendet, die insgesamt vier Formen beinhaltet, wovon jeweils zwei auf einer gedachten Mantellinie hintereinander liegen. Damit wird eine theoretische Stückzahl von 90 Drucklingen pro Stunde erreicht.

Bei diesen Einstellungen (Vorschub Stufe 2, LED Leistung 40 %) liegt der elektrische Verbrauch der gesamten Prototypenanlage bei etwa 290 W.

Die gemäß Lastenheft definierten mechanischen Eigenschaften können erreicht werden. Darüber hinaus werden unerwartete, negative Veränderungen bei einer Klimalagerung beobachtet, welche innerhalb des Projektes jedoch nicht weitergehend untersucht werden.

Ein weiterer Aspekt ist die Gleichmäßigkeit der erreichten Schichtdicken.

Die automatisiert hergestellten Drucklinge werden bezüglich ihrer Materialstärke vermessen. Dabei zeigt sich eine kontinuierliche Unterschreitung der geforderten Materialstärke von 1 mm. Offensichtlich findet während der Vernetzung ein starker Reaktionsschwund statt, der bei der Formherstellung bisher zu wenig berücksichtigt wird. Bezogen auf die tatsächlichen Schichtstärken bewegen sich die meisten Pro-

ben innerhalb der festgesetzten Toleranz von 10 % Schwankungsbreite (Abbildung 58).

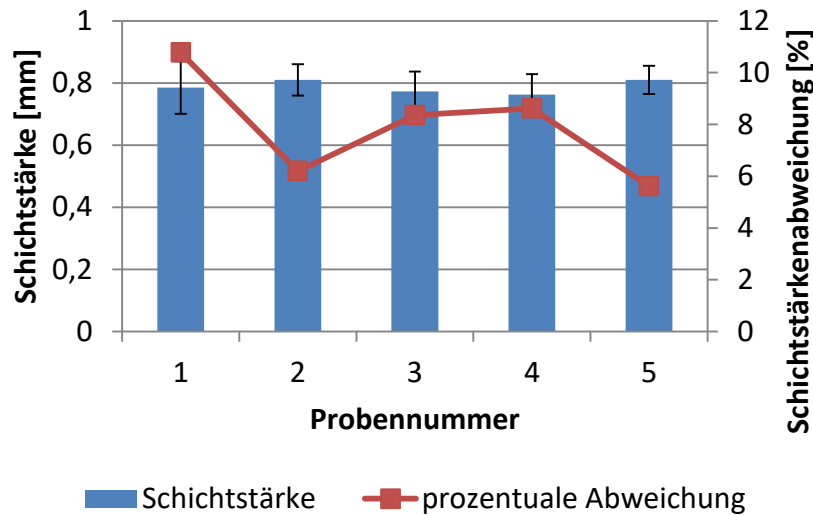


Abbildung 58: Messung Schichtstärke maschinell hergestellter Drucklinge

Die so erzeugten Informationen werden abschließend an das IWF transferiert und fließen in das Life Cycle Assessment ein.

4.8 AP 7 – Life Cycle Assessment

4.8.1 Erhebung der Datenbasis und Modelbildung

Aufbauend auf den Ergebnissen aus AP 2 und den Informationen von Biolink und IFS ist der nächste Schritt in dem standardisierten LCA-Vorgehen die Erstellung der Sachbilanz, die auf die Quantifizierung der Material und Energieströme im betrachteten Untersuchungsrahmen abzielt. Hierzu wird zwischen einem Vordergrund- und Hintergrundsystem unterschieden. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 59 dargestellt. Das Vordergrundsystem besteht aus den Prozessen, die zur der Herstellung des untersuchten Produktes spezifisch sind. Oft fallen darunter die Prozesse, die im eigenen Hause und bei Tier-1 Lieferanten stattfinden. Für diese Prozesse werden Primärdaten, die im Rahmen der LCA-Studie erhoben werden, verwendet. Das Hintergrundsystem umfasst im Gegensatz dazu Prozesse, die generisch sind und deswegen sehr oft in anderen Produktsystemen vorkommen, Hierzu zählen beispielsweise die Stromversorgung oder auch Abfallbehandlungsverfahren. Zur Modellierung des Hintergrundsystems werden gängige Life Cycle Inventory (LCI) Datenbanken herangezogen. LCI-Datenbanken beinhalten eine große Menge an Datensätzen aus der Industrie. (Hauschild et al. 2018) Für die Modellierung der Prozesse im Hintergrundsystem wurde im Rahmen des Projekts die ecoinvent Datenbank in der Version 3.3 ausgewählt. Ecoinvent ist eine der am umfassendsten LCI-Datenbanken, sie enthält über 13.000 Datensätze. Die Datensätze stammen aus der Industrie und durchlaufen vor Veröffentlichung eine Qualitätsprüfung. (Wernet et al. 2016).

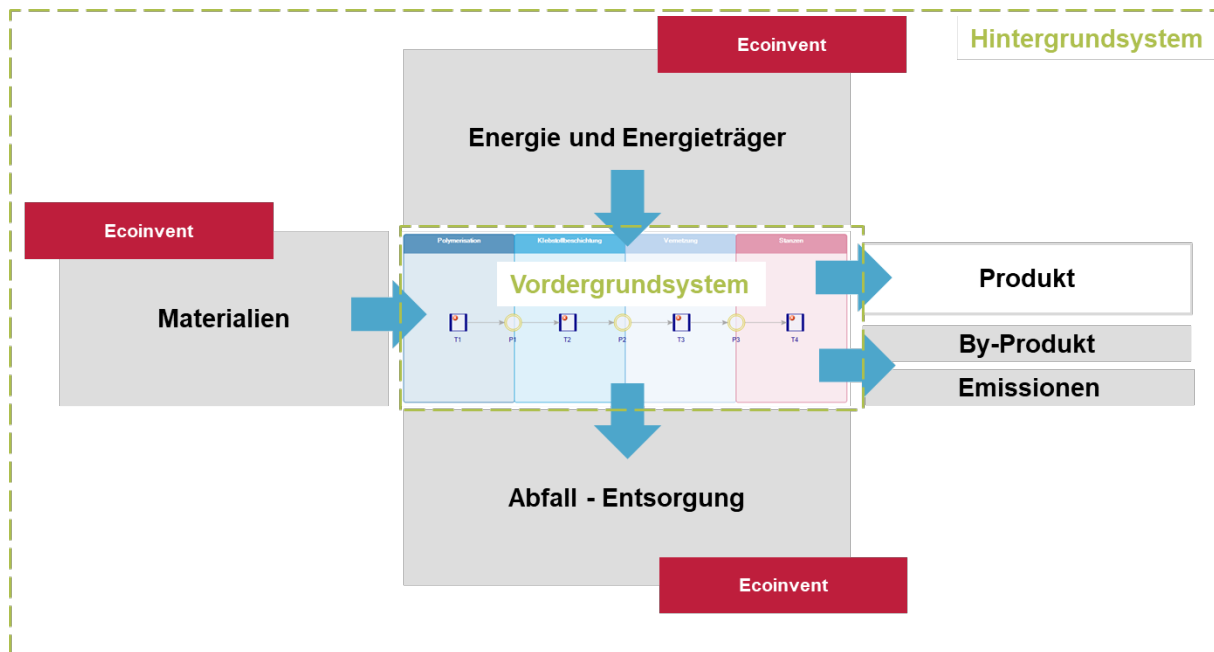


Abbildung 59: Vordergrund- und Hintergrundsystem zur Herstellung von haftklebrigen Stanz- und Formteilen

Um die Datenerfassung zu koordinieren und Primärdaten über den Referenzprozess bei Biolink und über die Laboranlage strukturiert abzulegen, wurde ein Datenerfassungsbogen entwickelt und im Laufe des Projekts angewendet. Abbildung 60 zeigt den schematischen Aufbau des Datenerfassungsbogens. Dieser Bogen dient zur Erfassung der In- und Outputströme der Produktionsprozesse zur Herstellung der Klebsysteme. Im Bereich A werden die Inputs definiert. Diese sind in Energie und Energieträger, Materialien und Betriebsstoffe unterteilt. Bereich B dient der Festhaltung des Produktionsprozesses und zur Definition der Bezugsgröße, auf die sich alle Angaben im Bereich A und Bereich C beziehen. Im Bereich C werden die Outputs des Produktionsprozesses festgehalten. Hier wurde zwischen dem Produkt, welches untersucht wird, und möglichen By-Produkten, Emissionen und Ausschüssen unterschieden. Der letzte Bereich D dient der Erfassung von Transportwegen und Transportmitteln sowie der Auslastung der Transportmittel. Das Tabellenblatt muss für jeden weiteren Prozess des Vordergrundsystems ausgefüllt werden.

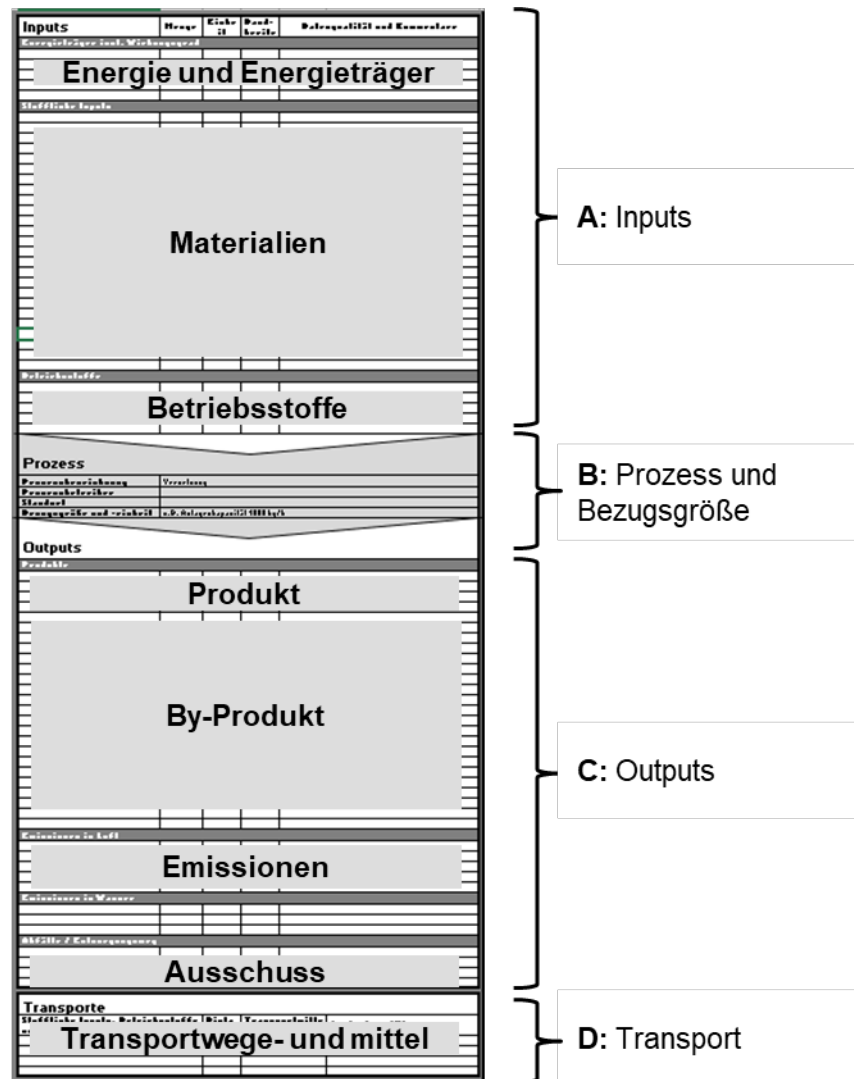


Abbildung 60: Schematischer Aufbau des Datenerfassungsbogens für einen Produktionsschritt

Die Modellierung der Produktsysteme erfolgte in umberto NXT LCA, einem Softwarewerkzeug zur grafischen Abbildung von Produktsystemen und Produktlebenszyklen. Umberto NXT LCA hat eine integrierte Schnittstelle zu der ecoinvent Datenbank, die die Grundlage für die Prozesse und Materialien im Hintergrundsystem bildete.

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Modelle (Haftklebrige Stanzteile und Haftklebrige Formteile) erstellt, die in unterschiedlichen Szenarien untersucht wurden. Ein Unterscheidungsmerkmal der Szenarien ist die Abfalldefinition der Trägerfolie. Eine Möglichkeit, den Trägerfolienabfall zu definieren, ist in Abbildung 61 links dargestellt. Im Rahmen dieser Abfalldefinition wird angenommen, dass die Anteile der Trägerfolie, die sich außerhalb der Kontur des Formteils befinden, als Abfall gelten. Dagegen betrachtet die Abfalldefinition 2 im rechten Teil von Abbildung 61 die Trägerfolie als Bestandteil des Endproduktes. Somit ist ein rechteckiger Streifen um den kreisförmigen Formteil herum Teil des Produktes und gilt nicht als Produktionsabfall. In dieser Definition ist der Liner Bestandteil des Produktes und erfüllt weitere Funktionen zur Handhabung, Lagerung und Montage.

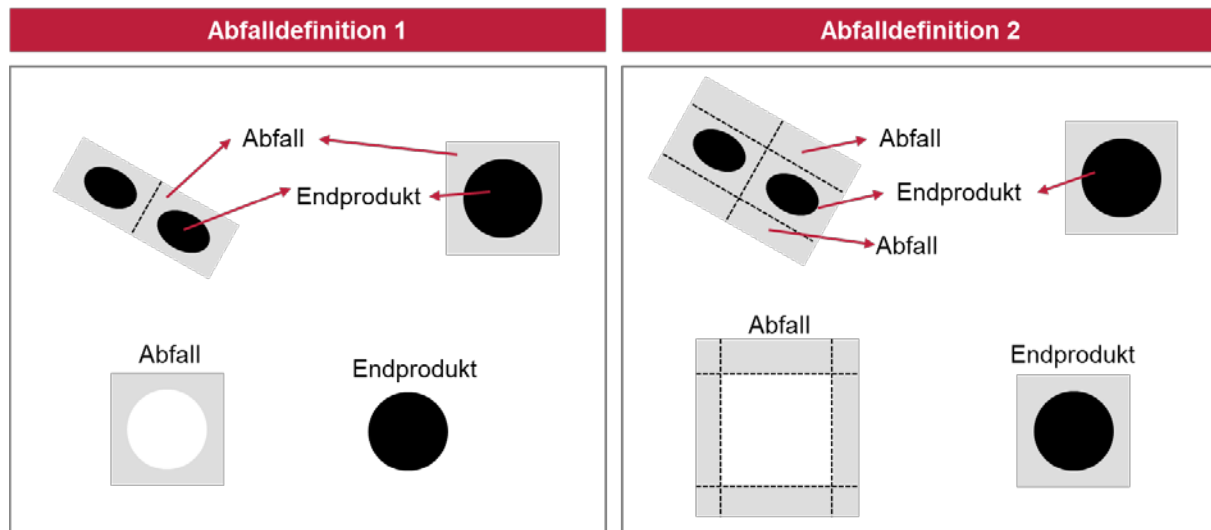


Abbildung 61: Abfalldefinitionen der Trägerfolie

Für die Produktionsabfälle in Form des Verschnitts im Falle der haftklebrigen Stanzteile wird in einem weiteren Szenario der End-of-Life-Weg modelliert. Die Entsorgung der Trägerfolie bei Montage der Stanz- und Formteile beim Kunden war laut Zieldefinition kein Bestandteil mehr in der Ökobilanz.

Da es sich bei der Bewertung des Herstellungsprozesses von haftklebrigen Formteilen um eine Laboranlage handelt, wurden weitere Annahmen getroffen. Darüber hinaus lassen sich weitere Szenarien definieren, die die ökologischen Auswirkungen des Produktionsprozesses beim Hochskalieren auf eine industrielle Anlage beeinflussen würden. Ein Beispiel hierfür ist die Anordnung der Formkavitäten auf der Druckwalze. Je nach Anordnung der Kavitäten und der Funktion der Trägerfolie bei der späteren Handhabung, erhöht oder verringert sich der Materialnutzungsgrad der Trägerfolie. Das Beispiel wird schematisch in Abbildung 62 dargestellt. Die linke Seite von Abbildung 62 veranschaulicht die bündige Anordnung der Formen, bei der der Materialnutzungsgrad für kreisförmige Formen höchstens 78,5 % erreichen kann. In der Praxis muss der Materialnutzungsgrad wegen Einhaltung eines Sicherheitsabstandes darunter liegen. Die rechteckige Anordnungsform ist jedoch erforderlich, sofern die Folie eine Handhabungsfunktion erfüllt und diese Funktion mit einer kreisförmigen Form nicht erreicht werden kann. Die rechte Seite von Abbildung 62 zeigt dagegen die versetzte Anordnung der Formen. In diesem Fall erhöht sich der theoretisch maximale Materialnutzungsgrad für kreisförmige Teile auf 93 % (ohne Sicherheitszuschlag an den Rändern). Diese Anordnung kann gewählt werden, wenn die Anforderungen auf die Handhabungsfunktion der Trägerfolie dies zulassen. Im Projekt wurde die rechteckige Formenordnung mit Sicherheitszuschlag als Grundlage gewählt.

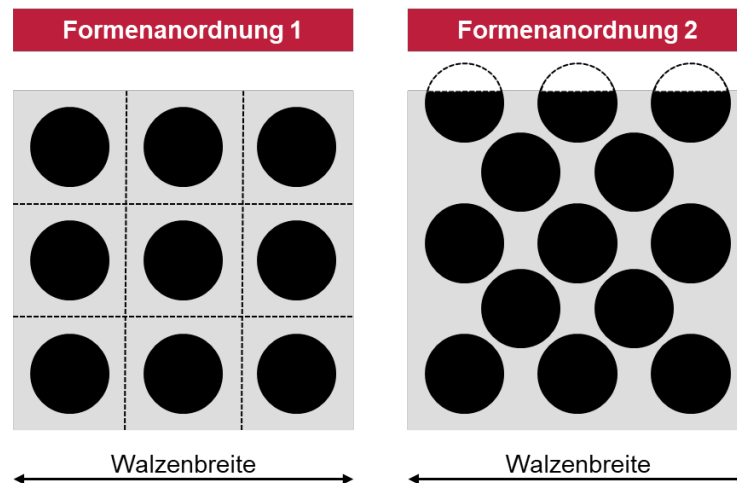


Abbildung 62: Einfluss der Formenordnung auf den Materialnutzungsgrad

Weitere Möglichkeiten zur Beeinflussung der Abfallbildung bzw. Materialnutzungsgrad entstehen durch die Variation der Anzahl an Kavitäten auf der Druckwalze. Die Kavitäten der Formen lassen sich axial (entlang der Walzenbreite) und radial (entlang des Umfangs der Walze) verteilen. Für den im Projekt zu untersuchenden Fall an der Laboranlage beträgt die maximale Anzahl an Formen pro Umdrehung 20. Dieser Fall wird als Best Case bezeichnet. Die minimale Anzahl ist dagegen eins, die mit Worst Case bezeichnet wird. Es ist anzumerken, dass der Fall mit einer einzigen Formanzahl je Walze lediglich im Labormaßstab auftreten kann und dadurch den schlechtesten, möglichen Extremwert repräsentiert. Tabelle 6 stellt zusammenfassend die Parametervariation mit zugehörigen Werten zur Modellierung dar. Die Tabelle gibt zurück, wie viele Formteile mit der derzeitigen Liniengeschwindigkeit in einer Stunde produziert werden können. Dies ist die Bezugsgröße zur Berechnung des Trägerfolienbedarfs sowie –abfalls. Die benötigte elektrische Energie ändert sich nicht zwischen Best und Worst Case, da die Linie und die LEDs zur Aushärtung des Klebstoffs in der Laboranlage unabhängig von der Anzahl an Teilen gesteuert werden. Der Input an Trägerfolie bleibt für alle Szenarien gleich, lediglich die Abfallmenge und Klebstoffmenge ändern sich in Abhängigkeit von der Anzahl an produzierten Teilen und der Anordnung der Formkavitäten auf der Druckwalze.

Tabelle 6: Sachbilanzdaten Beschichtung/Vernetzung zur Herstellung von Formteilen

	Funktionelle Einheit: 1 kg Formteil			
	Worst case		Best Case	
	Abfalldefinition 1	Abfalldefinition 2	Abfalldefinition 1	Abfalldefinition 2
Input Folie [kg]	1,654	1,654	1,654	1,654
Abfall Folie [kg]	1,607	1,573	0,699	0,069
Klebstoffmenge [ml]	298	298	5973	5973
Elektrizität [Wh]	454	454	454	454
Anzahl Teile [Stück/h]	90	90	1800	1800

Im Folgenden werden die Lebenszyklusmodelle in Umberto kurz vorgestellt. Abbildung 63 zeigt das Umberto-Modell über die Herstellung von haftklebrigen Formteilen im Best Case nach der Abfalldefinition eins gemäß Abbildung 63.

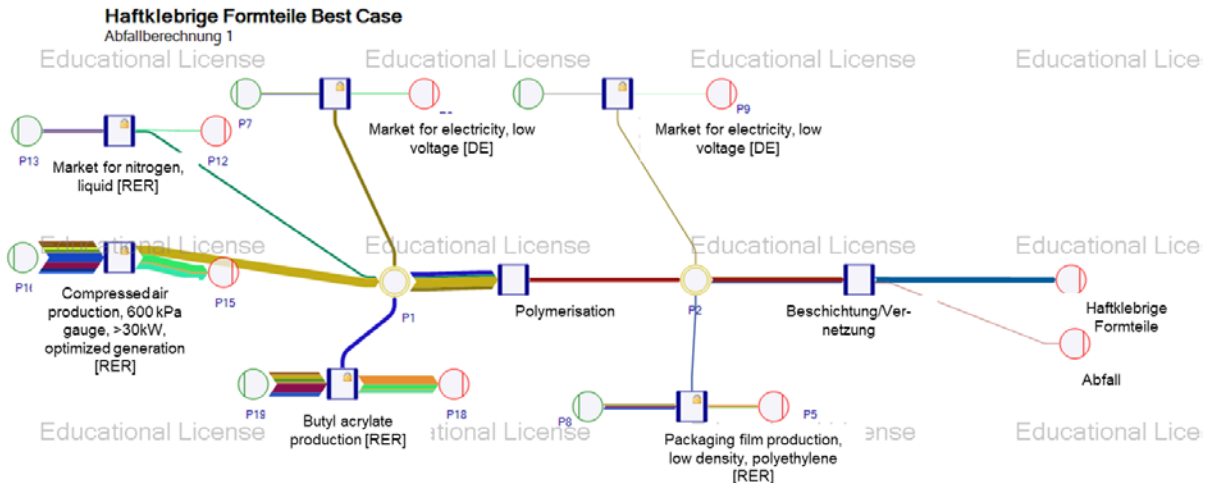


Abbildung 63: Umberto-Modell zur Herstellung von haftklebrigen Formteilen, Abfalldefinition 1, Best Case

Abbildung 64 zeigt das Umberto-Modell über die Herstellung von haftklebrigen Formteilen im Best Case nach der Abfalldefinition zwei gemäß Abbildung 62.

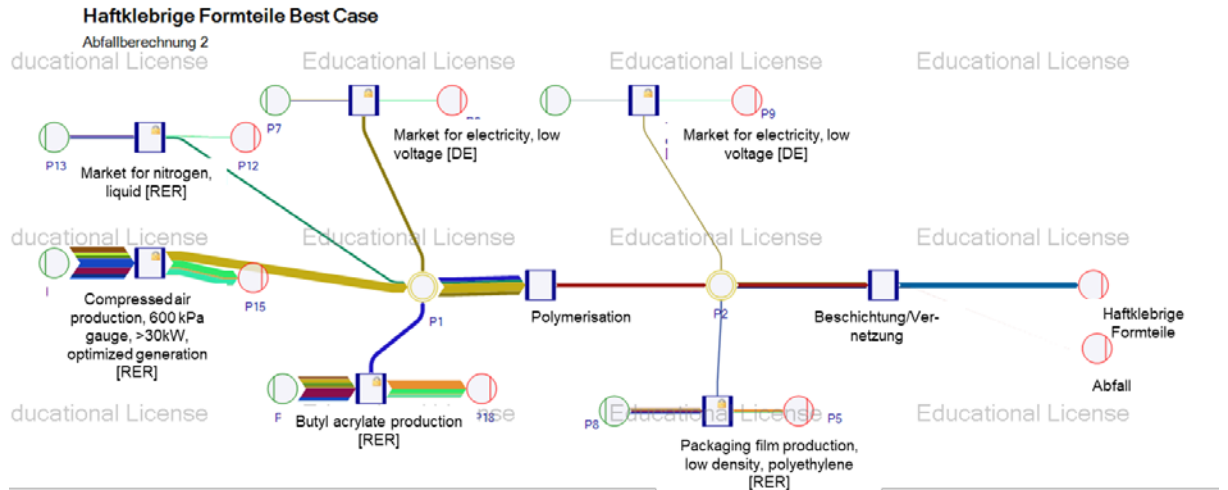


Abbildung 64: Umberto-Modell zur Herstellung von haftklebrigen Formteilen, Abfalldefinition 2, Best Case

Abbildung 65 zeigt das Umberto-Modell über die Herstellung von haftklebrigen Formteilen im Worst Case nach der Abfalldefinition eins gemäß Abbildung 62.

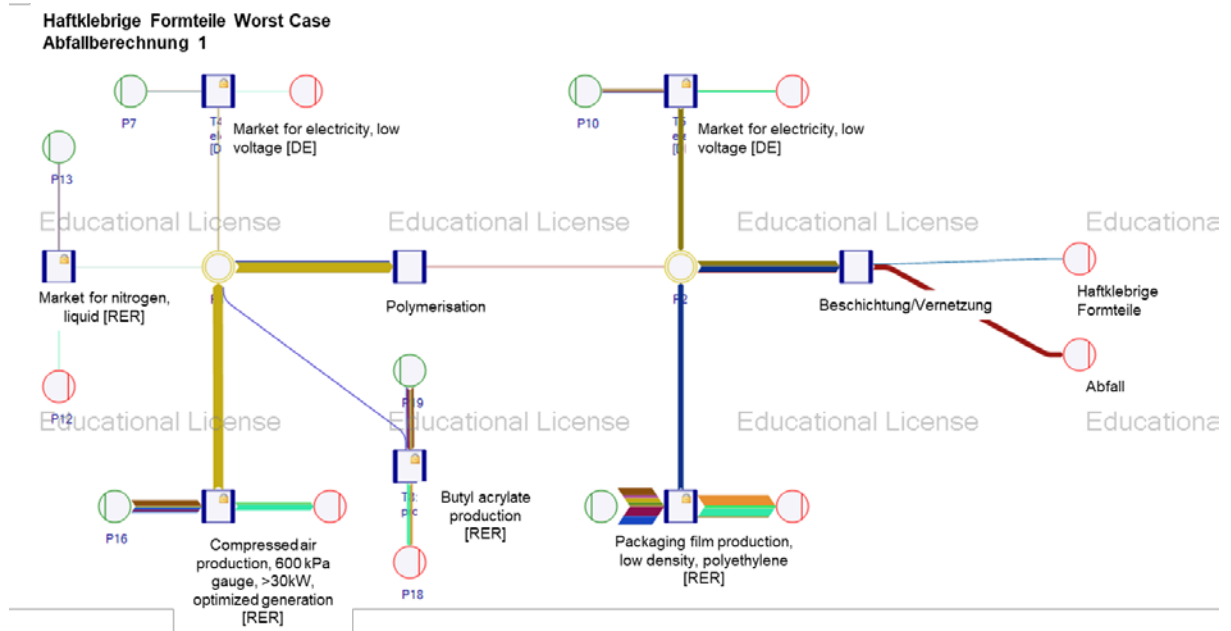


Abbildung 65 Abbildung IWF-11: Umberto-Modell zur Herstellung von haftklebrigen Formteilen, Abfalldefinition 1, Worst Case

Abbildung 66 zeigt das Umberto-Modell über die Herstellung von haftklebrigen Formteilen im „Worst-Case“ nach der Abfalldefinition zwei gemäß Abbildung 62.

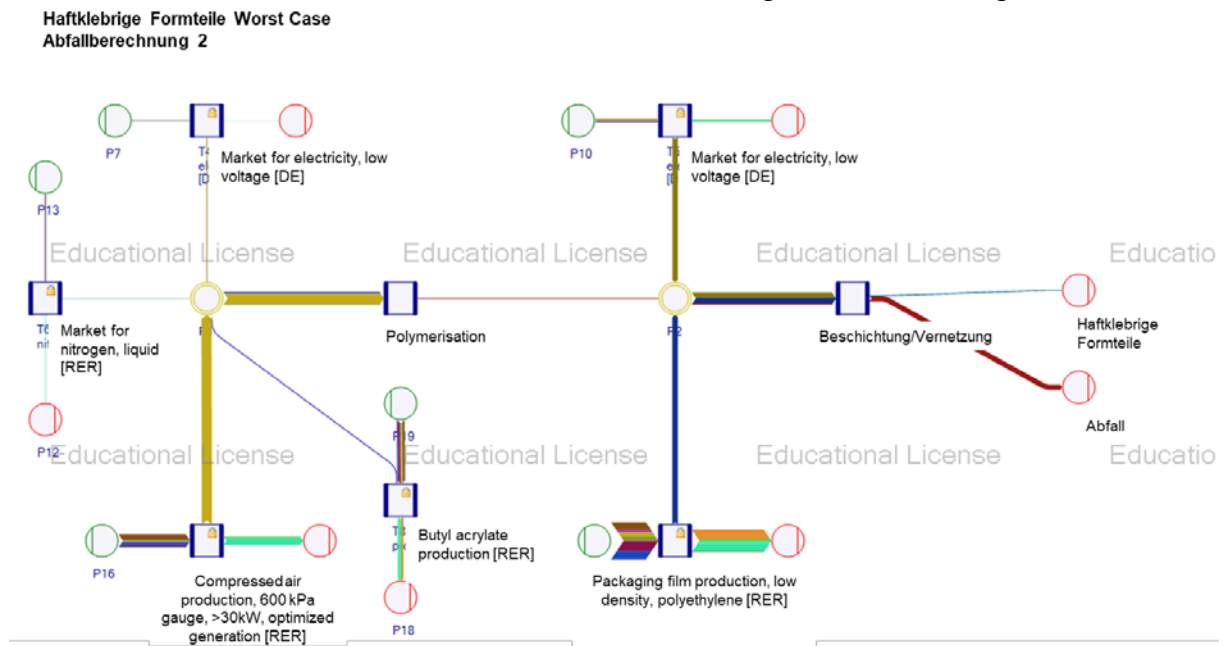


Abbildung 66 Abbildung IWF-12: Umberto-Modell zur Herstellung von haftklebrigen Formteilen, Abfalldefinition 2, Worst Case

Abbildung 67 zeigt das Umberto-Modell über die Herstellung von haftklebrigen Stanzteilen mit der Modellierung des End-of-Life Weges der Produktionsabfälle.

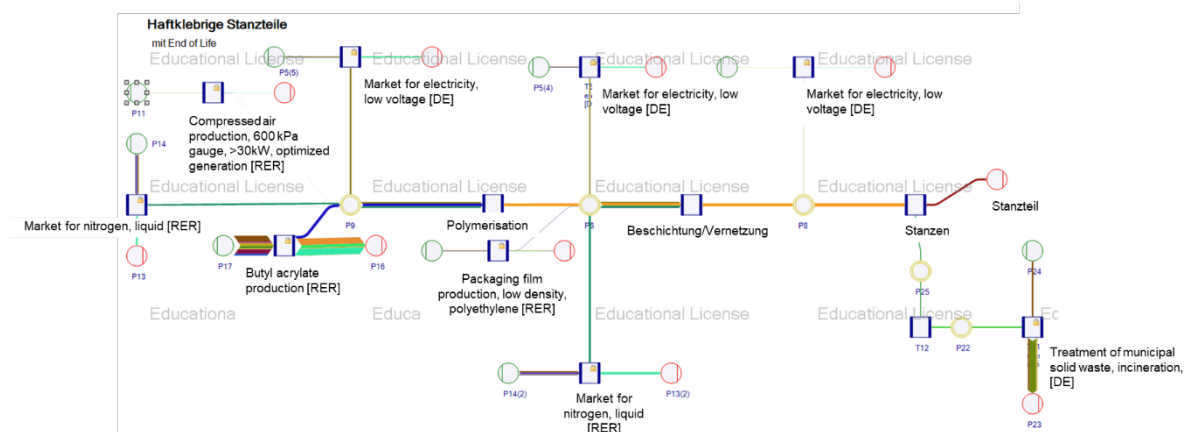


Abbildung 67 Abbildung IWF-13: Umberto-Modell zur Herstellung von haftklebrigen Stanzteilen, mit End of Life

Abbildung 68 zeigt das Umberto-Modell über die Herstellung von haftklebrigen Stanzteilen ohne Modellierung des End-of-Life Weges der Produktionsabfälle.

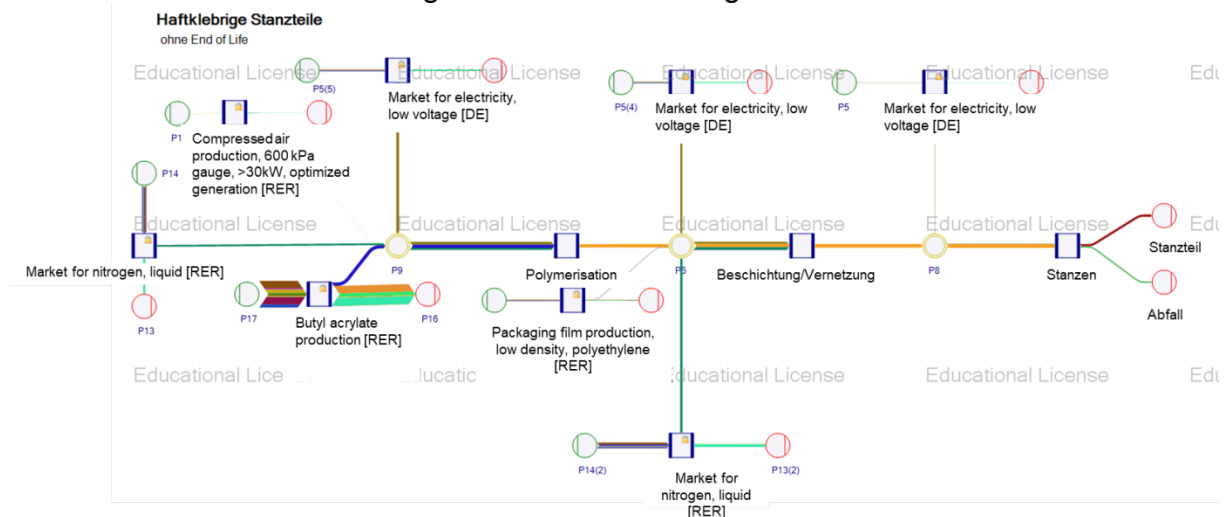


Abbildung 68: Umberto-Modell zur Herstellung von haftklebrigen Stanzteilen, ohne End of Life

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die entstehenden Abfallmengen zur Produktion von haftklebrigen Stanz- und Formteilen. In dieser Darstellung wird nochmal hervorgehoben, dass die Anordnung der Kavitäten auf der Walze einen hohen Einfluss auf den Materialnutzungsgrad und dementsprechend auf die entstehenden Abfälle hat. Zwischen dem besten und schlechtesten Szenario gibt es einen Unterschied mit Faktor 10.

Tabelle 7: Quantifizierung der entstehenden Abfälle in der Produktion von haftklebrigen Stanz- und Formteilen

Funktionelle Einheit	1 kg Klebstoff	Formteile		Stanzteile			
		Best Case (20 Formen je Umdrehung)	Worst Case (1 Form je Umdrehung)	mit EoL	ohne EoL		
Abfallmenge Trägerfolie	kg	0,699	0,069	1,607	1,573	0,00*	0,00*
Abfallmenge Klebstoff	kg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	0,58

* Die Abfallmenge der Trägerfolie ist in die Abfallmenge des Klebstoff eingerechnet.

4.8.2 Wirkungsabschätzung

Für die Untersuchung des Produktsystems wurden die Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Humantoxizität und Versauerung ausgewählt. Midpoint Indikatoren haben gegenüber Endpoint Indikatoren den Vorteil, dass sie auf wissenschaftlichen Erkenntnissen basieren und weniger Unsicherheiten und Subjektivität unterliegen. Endpoint Indikatoren bieten den Vorteil, dass diese intuitiver verständlich sind. So lässt sich beispielsweise die menschliche Gesundheit (Endpoint Indikator) besser erklären, als die photochemische Ozonbildung (Midpoint Indikator). Aus diesen Gründen wurde als Charakterisierungsmethode die Midpoint-Charakterisierung ausgewählt. Die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu Umweltwirkungskategorien erfolgte nach der CML 2001 Methode. Das Treibhauspotential, ausgedrückt in kg CO₂-Äquivalenten, beschreibt den Beitrag des Produktsystems, in dem er zur Veränderung des Erdklimas beiträgt. Das Versauerungspotential, ausgedrückt in kg SO₂-Äquivalenten, gibt an, inwieweit das Produktsystem zur Versauerung der Ökosphäre beiträgt. Das Humantoxizitätspotential, ausgedrückt in kg 1,4-Dichlorbezol-Äquivalenten, beschreibt das Ausmaß der Giftwirkung des Produktsystems auf Menschen. Tabelle 8 gibt einen Überblick über die untersuchten drei Wirkungskategorien für die betrachteten Szenarien. Die Diskussion der Ergebnisse befindet sich unter 4.8.3.

Tabelle 8: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung nach CML 2001

Funktionelle Einheit	1 kg Klebstoff	Formteile				Stanzteile	
		Best Case (20 Formen je Umdrehung)		Worst Case (1 Form je Umdrehung)		mit EoL	ohne EoL
	Einheit	Abfalldef. 1	Abfalldef. 2	Abfalldef. 1	Abfalldef. 2		
CML 2001 climate change, GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	5,29	5,29	23,69	23,69	7,25	6,95
CML 2001 acidification potential, generic	kg SO ₂ -Eq	0,02	0,02	0,10	0,10	0,03	0,03
CML 2001 human toxicity, HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	1,42	1,42	3,27	3,27	1,85	1,72

Abbildung 69 zeigt den relativen Beitrag der untersuchten Umweltauswirkungen von haftklebrigen Stanz- und Formteilen. Daraus wird ersichtlich, welche Prozessschritte in welchem Anteil an den Umweltauswirkungen beteiligt sind. Es wird aus der Abbildung ersichtlich, dass die Polymerisation den höchsten Stellenwert bei allen betrachteten Produktsystemen einnimmt. An zweiter Stelle steht die Beschichtung/ Vernetzung der Klebstoffe. Das Stanzen ist für einen vergleichsweise geringen Beitrag zu den Umweltauswirkungen verantwortlich, verursacht jedoch durch den geringen Materialnutzungsgrad bei der Polymerisation höhere Aufwände. Bei dem Verfahren zur Herstellung von Formteilen zeigt sich im Worst Case Szenario, das sich auf die Laboranlage bezieht, dass die Beschichtung einen deutlich größeren Stellenwert einnimmt. Dies ist auf den schlechten Materialnutzungsgrad der Trägerfolie im Labormaßstab zurückzuführen. Durch Anpassung von Prozess- und Maschinenparametern im Serienprozess, lässt sich der Materialnutzungsgrad der Trägerfolie steigern und somit die ökologischen Auswirkungen, bezogen auf die funktionelle Einheit, senken.

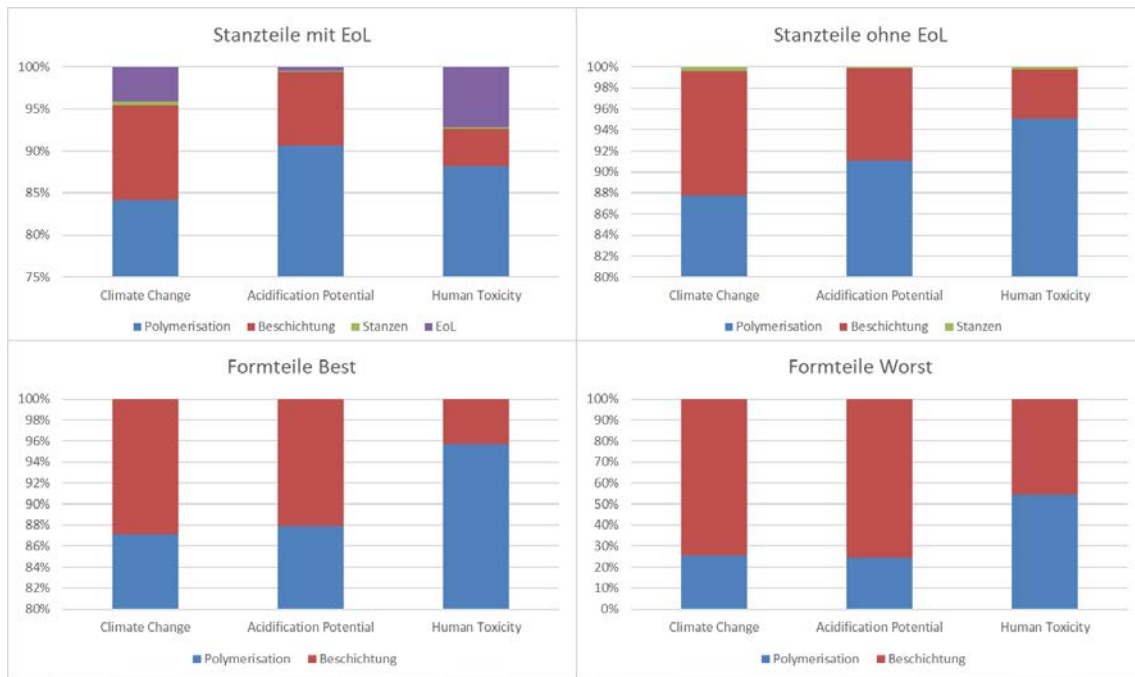


Abbildung 69: Beitragsanalyse der Umweltauswirkungen von haftklebrigen Stanz- und Formteilen

4.8.3 Auswertung

Das Formteil schneidet in den untersuchten drei Wirkungskategorien besser ab als das Stanzteil. Prozess- und Maschinenparameter in der Herstellung von Stanz- und Formteilen haben einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch sowie auf die in der Produktion entstehenden Abfälle. Die ökologische Vorteilhaftigkeit von Formteilen gegenüber den Stanzteilen unterliegt daher einer Schwankung und wird im Folgenden näher erläutert.

Wie bereits im ersten Schritt der Ökobilanz erwähnt, ist für den Vergleich angenommen worden, dass die Lebensdauer von haftklebrigen Teilen unabhängig von den eingesetzten Fertigungsverfahren ist. Würde die Lebensdauer eines Stanzteils die Lebensdauer eines Formteils übersteigen und dies zu einem erhöhten Bedarf an Formteilen führen, hätte das einen negativen Effekt auf die Vorteilhaftigkeit von Formteilen.

Der größte Hebel zur Erzielung einer Umweltentlastung durch das im Projekt entwickelte Verfahren, liegt in der Abfallvermeidung an Klebstoff. Das neue Verfahren zur Herstellung von Formteilen wandelt den eingesetzten Klebstoff zu 100% zu einem Formteil um. Es entstehen dabei im normalen Produktionsbetrieb keine Klebstoffabfälle (Störungen und Wartung der Anlage gehören nicht zum normalen Produktionsbetrieb). Im Gegensatz dazu werden die Stanzteile im Stanzverfahren aus einer mit Klebstoff beschichteten Folie ausgestanzt, wodurch notwendigerweise Klebstoffabfälle verursacht werden. Das Verhältnis von Abfallmenge zum eingesetzten Klebstoff ist von der Anordnung der Formen auf der Stanzwalze sowie Breite der mit Klebstoff beschichteten Folie abhängig.

Zusätzlich zum Klebstoff wird zur Herstellung der haftklebrigen Teile eine Trägerfolie gebraucht. Die Trägerfolie wird in beiden Verfahrensvarianten benötigt. Unter Annahme, dass das neue Verfahren für den Einsatz in Serienfertigung entwickelt wurde, sind die Fläche sowie die Menge an Liner mit dem alten Verfahren identisch. Verfahrensbedingt entsteht in der Produktion in beiden Verfahren ein Verschnitt an bei-

den Rändern der Folie. Obwohl der Liner nach der Klebung beim Kunden zwar entsorgt wird und in diesem Sinne eine weitere Abfallart darstellt, zählt er nicht zu den Produktionsabfällen, die in der Herstellung des Klebsystems entstehen. Der Liner erfüllt nach der Produktion zusätzliche Handhabungsfunktionen in der Lagerung, Transport und Montage und ist daher ein wesentlicher Bestandteil von Stanz- und Formteilen.

Abbildung 70 stellt die eingesetzten Klebstoffmengen sowie den Liner mit den Produktionsabfällen unter Idealbedingungen gegenüber. Die Idealbedingung bezieht sich darauf, dass kein Linerverschnitt an beiden Rändern der Folie entsteht und der Linerabfall durch optimierte Anordnung der Formkavitäten auf der Walze im Gegensatz zu den Gegebenheiten auf der Laboranlage minimal ist. Das Fertigprodukt umfasst das kreisförmige Stanz- oder Formteil sowie den zugehörigen rechteckigen Liner, der den Durchmesser des Stanz- oder Formteils um einen Sicherheitszuschlag übersteigt. Im Diagramm wird verdeutlicht, dass die Klebstoff- sowie die Linermenge im Fertigprodukt unabhängig vom Fertigungsverfahren identisch sind. Der Vorteil vom neu-entwickelten Verfahren wird in der Einsparung der Klebstoffmenge deutlich. Für den im Diagramm dargestellten Fall (65 mm Durchmesser, 1 mm Schichtdicke, 2 mm Zuschlag für Ränder) wird durch das neue Verfahren 0,35 kg Klebstoff eingespart.

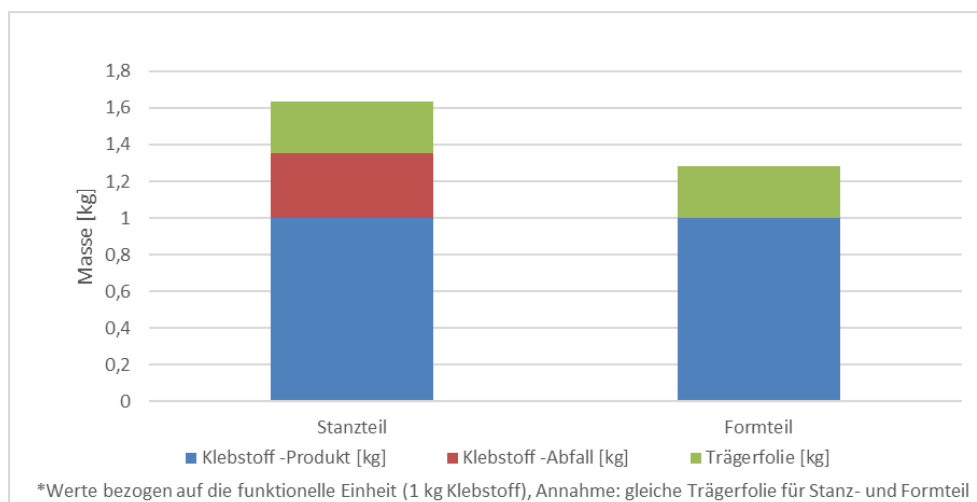


Abbildung 70: Gegenüberstellung der eingesetzten Klebstoffmengen sowie Liner mit den in der Produktion entstehenden Abfällen für haftklebrige Stanz- und Formteile

Wie erwartet, sind die Umweltwirkungen des Stanzteils geringer, wenn der End-of-Life Weg der Produktionsabfälle nicht modelliert wird. In diesem Fall sind die Umweltwirkungen in den untersuchten Wirkungskategorien jedoch immer noch größer, als zur Herstellung von haftklebrigen Formteilen. In dieser Diskussion muss abschließend erwähnt werden, dass die Daten zur Modellierung des Verfahrens zur Herstellung von haftklebrigen Formteilen auf Messungen an einer Laboranlage basierten. Erfahrungsgemäß verändern sich Prozess- sowie Maschinenparameter beim Hochskalieren auf eine industrielle Fertigung. Demzufolge sinken die spezifischen Energiebedarfe der Produkte (z. B. durch eine höhere Produktionsgeschwindigkeit verteilt sich die Grundlast der Anlage auf eine höhere Outputmenge) sowie die entstehenden Abfallmengen (z. B. optimierte Anordnung der Formkavitäten in Bezug auf Walzen- und Folienbreite). Die Senkung der Energiebedarfe und Vermeidung von Produktionsabfällen haben einen direkten, positiven Einfluss auf die ökologischen Auswirkungen des Produktionsprozesses. Es ist zu erwarten, dass Scale-up Effekte das Umweltentlastungspotenzial vom haftklebrigen Formteil weiter steigern werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Im Rahmen des GenDru-Projekts wurden die Anforderungen, welche an ein generativ gefertigtes Bauteil gestellt werden, als Ziel- und Untersuchungsrahmen definiert. Als Referenzgeometrie diente ein rotationssymmetrisches Stanzteil der Fa. Biolink mit 65,0 mm Durchmesser und einer Schichtdicke von 1,0 mm +/- 10%. Die genannte Geometrie sollte durch ein Druckverfahren bei Verzicht auf den bisherigen Stanzverschnitt generativ erzeugt werden.

Für die Klebstoffseite beinhaltete das Lastenheft sowohl die klebtechnischen Endeigenschaften des Produkts, wie auch die Interaktion (Trennkraft) mit der Werkzeugwalze während der Produktion. Dazu wurde von BIOLINK eine Basisrezeptur für einen UV-vernetzbaren Klebstoff entwickelt. Die Formulierung des Klebstoffes wurde bei BIOLINK durch eine statistische Versuchsplanung unterstützt und konnte erfolgreich in Kombination mit der Auswahl geeigneter Formwerkzeugmaterialien abgeschlossen werden. Konventionelle Monomere konnten nicht verwendet werden, da diese bei den meisten Silikonen nach erfolgter Benetzung zu starken Quellerscheinungen führten und daher eine spätere Formstabilität der Druck- und Werkzeugform nicht gewährleisten konnten. Die von Biolink neu entwickelte Removable-Formulierung führte zu deutlich geringeren Quellungen der verwendeten Silikone. Die alternativen Monomere zogen allerdings eine Kostensteigerung des Rohmaterials nach sich.

Als Formwerkstoff des Werkzeugs wurden ferner PTFE und ein feuchtevernetzendes Silikon vom Typ Xiameter SLT 3445 als geeignete Substrate identifiziert. Beide Werkstoffe zeichneten sich durch hohe Formstabilität bei Kontakt mit unvernetzten Acrylaten aus und zeigten keine signifikanten Quellerscheinungen bzw. eine mit der Zeit stark ansteigende Trennkraft.

Die Versuche zur Handapplikation und Entformung verliefen erfolgreich. Die handgedruckten Formlinge entsprachen der in Analogie zum Referenzstanzteil geforderten Schichtdickentoleranz.

Basierend auf den Erkenntnissen wurde eine Prototypenanlage für einen modifizierten Rotationstiefdruck konstruiert und aufgebaut. Erste Entformungsversuche mit einem PTFE-Formwerkzeug zeigten, dass der Klebstoff teilweise am Substrat anhaftete und sich nicht flächig ablöste. Mit einer Reduktion der Klebrigkeit der Formulierung konnte hierbei eine komplette Entformung der gedruckten Formlinge sichergestellt werden. Mit den weiteren, einstellbaren Parametern Bahnspannung, -geschwindigkeit und UV-Intensität der High Power LEDs war es möglich kontinuierliche Bauteile herzustellen.

Durch Anpassung der Anlagentechnik, Verwendung leistungstärkerer UV-LEDs zur schnelleren Vernetzung und Einbau der silikonbasierten Walzenwerkzeuge und einer Linerbremse wurde der Entformungs- und Druckprozess in Hinblick auf stärker klebrige Formulierungen weiter optimiert und eine Datenbasis für die Bewertung des neuen Verfahrens durch das IWF geschaffen.

Im Anschluss an die Entwicklung der Rezeptur und Aufbau der Versuchsanlage im Labormaßstab wurde eine vergleichende Ökobilanz der beiden Fertigungsverfahren

durchgeführt. Im Fokus der Ökobilanz standen die ökologischen Auswirkungen, die in der Produktion von haftklebrigen Stanz- und Formteilen entstehen. Die Untersuchung der Energie- und Medienbedarfe sowie die Unterschiede in den entstehenden Abfallmengen im Produktionsprozess waren ausschlaggebend für die Ökobilanz. Die Auswertung der ökologischen Auswirkungen erfolgte anhand der CML 2001 Methode für die Umweltwirkungskategorien Treibhauspotential, Versauerungspotential und Humantoxizitätspotential.

Bewertung auf das Projektziel inkl. Bewertung der Ökobilanz

Mit diesem Ergebnis war es möglich, die Einsatzfähigkeit des neuen Verfahrens zu bestätigen. Zusätzlich zeigte das untersuchte generative Druckverfahren im Labormaßstab ein erhebliches Umweltentlastungspotential durch Vermeidung von Klebstoffabfällen. Somit konnte der ökologisch bedeutende Anteil der Prozessabfälle von ca. 40 % auf fast 0 % gesenkt werden, welcher in dieser Bilanzierung den wesentlichen Faktor darstellt. Damit wurden statt 1,46 kg Klebstoff nur noch genau 1 kg Klebstoff verwendet, um 1 kg Formteile herzustellen, was einer Verbesserung um 30 % entspricht. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass durch die neue Technologie eine deutliche Einsparung hinsichtlich der eingesetzten Rohstoffmenge und der benötigten Primärenergie realisiert werden kann. Gleichzeitig fällt durch dieses Fertigungsverfahren die Notwendigkeit von Schutzgasen und Lösemitteln bei der Produktion weg. Die Vermeidung an Klebstoffabfällen fällt doppelt ins Gewicht, einerseits durch die eingesparte Menge an Klebstoff und zweitens durch den Verzicht auf Entsorgung von Produktionsabfällen.

Die Projektziele, die Entwicklung geeigneter Klebstoffformulierungen gemäß den gesetzten Vorgaben, wie auch die Verifikation der Einsatzfähigkeit des Verfahrens konnten somit innerhalb der Projektlaufzeit erfüllt werden. Es ist möglich eine generative Drucktechnik zur Erzeugung haftklebriger Formteile unter Anwendung geeigneter Silikone und Acrylatmonomere zu realisieren.

Ausblick

Die aufgezeigten ökologischen Vorteile im Vergleich zum Referenzverfahren können durch die Skalierung der Fertigungstechnologie vom Prototypendesign auf den Maßstab einer Produktionsanlage noch einmal verbessert werden. Durch das Hochskalieren ist die Erhöhung des Materialnutzungsgrades des eingesetzten Liners zu erwarten. Dies kann durch die optimierte Anordnung der Formkavitäten auf der Druckwalze erreicht werden. Weitere zu erwartende positive Effekte beim Hochskalieren entstehen durch die Erhöhung der Liniengeschwindigkeit. Dadurch verteilt sich die konstante Grundlast der Anlage auf ein höheres Output, was den spezifischen Energiebedarf der Produkte sinkt.

6 Öffentlichkeitsarbeit

Im Rahmen des Projektes wurden die Ergebnisse auf der Tagung „Münchener Kleb- und Veredelungs Symposium“ (MKVS) im Oktober 2017 sowohl als Präsentation, als auch im Tagungsband vorgestellt.

Die Veröffentlichung des Projekts in der Zeitschrift Adhäsion Kleben und Dichten wird zum Zeitpunkt der Abschlussberichtserstellung noch vorbereitet.

7 Literaturverzeichnis

1. *Einfluß des Oberflächenzustandes auf die Adhäsion von Haftklebstoffen.* **Brockmann, W. und Hüther, R.** Rapperswil: s.n., 1993. 7. Int. Symp. SWISSBONDING. S. 42-55.
2. **Kowalski, A., Czech, Z.** *The effects of substrate surface properties on tack performance of acrylic Pressure-Sensitive Adhesives (PSAs).* Elsevier Verlag : International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 60, p. 9-15, 2015.
3. **Sowa, D., Czech, Z., Byszanski, L.** *Peel adhesion of acrylic pressure-sensitive adhesives on selected substrates versus their surface energies.* Elsevier Verlag : International Journal of Adhesion & Adhesives, vol. 49, p. 38-43, 2014.
4. **Sun, S., Li, M. Liu, A.** *A review on mechanical properties of pressure sensitive adhesives.* Elsevier Verlag : International Journal of Adhesion & Adhesives, vol. 41, p. 98-106, 2013.
5. **Cox, W.P. und Merz, E.H.** Correlation of dynamic and steady flow viscosities. *Journal of Polymer Science.* 1958.
6. **Habenicht, G.** *Kleben, Grundlagen, Technologien, Anwendungen.* 6. Auflage. Wörthsee/Steinebach : Springer, 2006.
7. **Decker, C.** UV-Radiation Curing of Adhesives. [Buchverf.] E. M. Petrie. *Handbook of Adhesives and Sealants.* s.l. : Mcgraw-Hill Professional, 2006.
8. **FINAT.** FTM 5 Accelerated ageing - Extended storage.
9. **ASTM.** ASTM D 4498 - 07 Standard Test Method for Heat-Fail Temperature in Shear of Hot Melt Adhesives.
10. DIN EN 1465 - Adhesives - Determination of tensile lap-shear strength of bonded assemblies. 2009-07.
11. **Herrmann, C.** *Ganzheitliches Life Cycle Management: Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen.* Heidelberg, Berlin : Springer-Verlag, 2009.
12. **Tillman, A. M., Baumann, H.** *The Hitchhikes Guide zu LCA.* Lund, Schweden : Studentlitteratur AB, 2004.