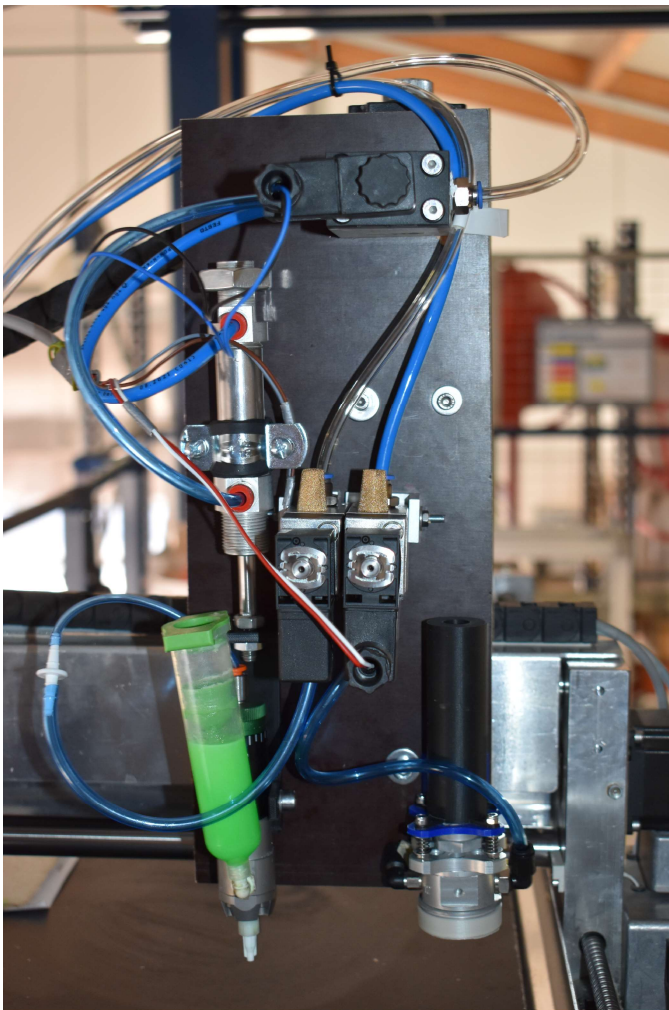


Entwicklung und Bewertung eines Endeffektors zur Handhabung und Laminierung additiv gefertigter Holzwerkstoffplatten

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades **Master of Science** an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München.



Lehrstuhl Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Betreuer M. Sc. Birger Buschmann

Eingereicht von Barbara Stamenitis

Eingereicht am 2. November 2022, in München

Kurzfassung „Entwicklung und Bewertung eines Endeffektors zur Handhabung und Laminierung additiv gefertigter Holzwerkstoffplatten“

Die Bauindustrie gilt als einer der größten Ressourcenverbraucher weltweit. Daher sind in den kommenden Jahren neue umweltfreundlichere Produktionsverfahren in der Baubranche für den Klimaschutz entscheidend. Eine vielversprechende Lösung bietet dabei die additive Fertigung mit Holz. Als ein neuartiges additives Fertigungsverfahren mit Holz gilt die Individual Layer Fabrication. Bei diesem Verfahren werden Objekte durch das Laminieren individuell konturierter Holzwerkstoffplatten aufgebaut. Die Herstellung der Holzwerkstoffplatten erfolgt automatisiert, allerdings werden die Platten manuell aufeinandergestapelt und verklebt. Dies ist fehleranfällig und auch zeitaufwendig. Um diese beiden Prozessschritte zu automatisieren, wird ein Endeffektor benötigt, der sowohl die Handhabungs- als auch die Laminierungsaufgabe übernehmen kann.

Ziel der hier vorliegenden Arbeit war es einen solchen Endeffektor zu entwickeln. Die einzelnen Aufgaben des Endeffektors wurden getrennt bearbeitet. Die Handhabung gilt als eine der Hauptaufgaben von Endeffektoren. Dementsprechend wird eine Vielzahl von Greifern in der Praxis angeboten. Für die Handhabung der Holzwerkstoffplatten, eignet sich ein Vakuumgreifsystem am besten. Bei der Entwicklung des Handhabungssystems wurden zunächst unterschiedliche Vakuumgreifsysteme hergestellt und untersucht. Auf Basis dieser Untersuchung wurde sich für einen Strömungsgreifer entschieden. Durch den hohen Volumenstrom des Strömungsgreifers können Platten individueller Geometrie, sowie Platten mit besonders rauer Oberfläche gehandhabt werden. Die Entwicklung der Ausbringvorrichtung für den automatisierten Klebstoffauftrag erfolgte in kurzen Iterationszyklen. Dazu wurde eine erste Ausbringvorrichtung mit der Zeit-Druck-Dosiermethode entwickelt, überprüft und anschließend optimiert. In der finalen Ausbringvorrichtung wurde ein Rückzugventil integriert, um einen reproduzierbaren Klebstoffauftrag zu ermöglichen. Anschließend wurde die Systemeigenschaften der Ausbringvorrichtung näher untersucht.

Die entwickelten Systeme für Handhabung und Laminierung wurden am Führungsgetriebe eines Portalroboters befestigt. Der dabei entstandene Endeffektor ermöglicht die automatisierte Handhabung und Laminierung. Die Anwendung des Endeffektors ist auf ausgerichtete vollflächige Platten beschränkt.

Abstract “Development and evaluation of an end effector for handling and laminating additively manufactured wood-based panels”

The construction industry is considered as one of the largest consumers of resources worldwide. Therefore, new environmental friendly production processes in the construction industry are crucial for climate protection in the coming years. Additive manufacturing with wood offers a promising solution. Individual Layer Fabrication is considered as a new additive manufacturing process with wood. In this process, objects are constructed by laminating individually contoured wood-based panels. The production of the wood-based panels is automated, but the panels are manually stacked and glued together. This causes potential errors and is time-consuming. In order to automate these two process steps, an end effector is needed that can take over the handling and the lamination task.

The aim of this thesis was to develop such an end effector. The individual tasks of the end effector were separately worked on. Handling is considered as one of the main tasks of end effectors. Accordingly, a large number of grippers are offered in practice. A vacuum gripping system is suited best for handling the wood-based panels. During the development of the handling system, different vacuum gripping systems were first developed and examined. Based on this investigation, a flow gripper was chosen. Due to the high volume flow of the flow gripper, plates of individual geometry as well as plates with particularly rough surfaces can be handled. The development of the application device for automated adhesive application was carried out in short iteration cycles. For this purpose, a first application device with the time-pressure dosing method was developed, tested and then optimised. A pull-back valve was integrated into the final application device to enable reproducible adhesive application. The system properties of the application device were then examined in more detail.

Both systems were attached to the guide gear of a gantry robot. The resulting end effector enables automated handling and lamination. The application of the end effector is limited to aligned full-surface panels.

Inhaltsverzeichnis

Glossar/Symbole und Abkürzungen	1
1 Einführung	2
1.1 Motivation	2
1.2 Ausgangssituation und Problemstellung	3
1.3 Ziel der Arbeit	4
1.4 Wissenschaftliche Vorgehensweise.....	5
1.4.1 Methode der Produktentwicklung	6
2 Grundlagen der Robotik.....	7
2.1 Definition Endeffektor	7
3 Grundlagen der Handhabungstechnik	8
3.1 Aufgaben des Greifers und Greifsystems	8
3.2 Einteilung der Greifer	8
3.2.1 Einteilung der Greifer nach Wirkstellen	9
3.2.2 Einteilung der Greifer nach Wirkpaarungen	9
3.2.3 Einteilung der Greifer nach physikalischen Wirkprinzipien	10
3.2.4 Beschreibung der physikalischen Wirkprinzipien.....	10
3.3 Grundlagen der Vakuumgreiftechnik	11
3.3.1 Definition Vakuum.....	11
3.3.2 Kraftübertragungsverhalten von Vakuumgreifsystemen.....	12
3.3.3 Aufbau von Vakuumgreifsystemen	14
3.3.4 Vakuumerzeuger	15
3.3.5 Vakuumsauger.....	18
3.3.6 Flächensauggreifsysteme	20
3.3.7 Vakuumgreifsysteme für spezielle Anwendungen.....	22

4	Grundlagen der Klebstoffverarbeitung	24
4.1	Grundlagen des industriellen Klebens	24
4.1.1	Auftragen der Klebstoffe	25
4.1.2	Klebstoffe in der industriellen Anwendung	26
4.1.3	Klebstoffe in der industriellen Anwendung mit Holz.....	27
4.2	Anlagenkomponenten zur automatisierten Klebstoffverarbeitung	27
4.2.1	Entnahmesysteme	28
4.2.2	Dosierventile.....	29
4.3	Anforderungen an den automatisierten Klebstoffauftrag.....	31
4.3.1	Form- und Lagegenauigkeit der Klebstoffraupen.....	32
4.3.2	Rheologische Randbedingungen	32
4.3.3	Anforderungen an die Auftragsmenge	33
4.3.4	Anforderungen an die Handhabungseinrichtung	33
4.3.5	Dosierfehler und Fehlerursachen	34
4.3.6	Qualitätssicherung.....	35
5	Entwicklung und Bewertung des Handhabungssystems.....	36
5.1	Allgemeines.....	36
5.1.1	Auswahl der Greifprinzips und Greifsystems	36
5.2	Entwicklung und Wahl des Handhabungssystems.....	37
5.2.1	Gasfördernde Vakuumpumpe	37
5.2.2	Venturi – Ejektor	42
5.2.3	Coanda – Ejektor.....	44
5.2.4	Zusammenfassung und Wahl des Vakuumgreifsystems	46
5.3	Optimierung und finale Untersuchung des Coanda-Vakuumgreifsystem	47
5.3.1	Gerätetechnisch Ausstattung	47

5.3.2	Weiterentwicklung und Optimierung des Vakuumgreifsystems	48
5.3.3	Untersuchung des weiterentwickelten Vakuumgreifsystems.....	50
5.4	Zusammenfassung	52
6	Entwicklung und Bewertung des Systems zum automatisierten Klebstoffauftrag.....	54
6.1	Allgemeines.....	54
6.1.1	Auswahl des Auftragsverfahrens und der Dosiermethode	54
6.1.2	Gerätetechnische Ausstattung	55
6.2	Entwicklung der Ausbringvorrichtung für den automatisierten Klebstoffauftrag	57
6.2.1	Ausbringvorrichtung 1.....	57
6.2.2	Schlussfolgerungen und Weiterentwicklung der Ausbringvorrichtung 1	63
6.2.3	Ausbringvorrichtung 2.....	64
6.2.4	Zusammenfassung und Fertigstellung der Ausbringvorrichtung 2	68
6.3	Ermittlung der Dosierparameter mit Ausbringvorrichtung 2	69
6.3.1	Ermittlung Auftragsmasse in Abhängigkeit des Materialdrucks	69
6.3.2	Ermittlung des Klebstoffraupenabstands für eine vollflächige Verklebung.....	73
6.4	Zusammenfassung	79
7	Gestaltung des finalen Endeffektors und finale Untersuchungen.....	80
7.1	Gestaltung des finalen Endeffektors	80
7.2	Experimentelle Untersuchungen	81
7.2.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	81
7.2.2	Ergebnisse und Diskussion	84
8	Fazit und Ausblick	85
9	Literaturverzeichnis.....	87
10	Abbildungsverzeichnis	91
11	Tabellenverzeichnis.....	95

12	Anhang	97
12.1	Anhang 1: Berechnung der theoretischen Haltekraft.....	97
12.2	Anhang 2: Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Venturi Ejektors in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit.....	98
12.3	Anhang 3: G-Code für Handhabungsversuche.....	103
12.4	Anhang 4: Ermittlung der Auftragsmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit mit Ausbringvorrichtung 1.....	104
12.5	Anhang 5: Ermittlung der Auftragsmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit mit Ausbringvorrichtung 2.....	110
12.6	Anhang 6: Ausbreitungsversuche	118

Glossar/Symbole und Abkürzungen

Griechische Buchstaben

η Wirkungsgrad, der Leckageverluste berücksichtigt /

Abkürzungen

PVAC Polyurethanvinylacetat

PU Polyurethan

Formelzeichen

p_n Normdruck bar

p_u Druck im abgedichteten Saugraum bar

S Sicherheitsfaktor gegen Abfallen /

A Wirkfläche des Saugers mm^2

n Anzahl der Sauger /

1 Einführung

1.1 Motivation

Die Bauindustrie steht in den kommenden Jahren vor mehreren zentralen Herausforderungen. Sie verantwortet nicht nur circa 10 Prozent aller CO₂-Emissionen weltweit (UNEP 2020), sondern gilt auch als der Wirtschaftszweig mit dem größten Ressourcenverbrauch (Pralle und Klotz 2021). Insgesamt werden 90 Prozent der in Deutschland geförderten mineralischen Rohstoffe verbaut (Blenkenfeld und Leber 2018). Gleichzeitig sind alleine in Deutschland circa 230 Millionen Tonnen Abfall und Schutt, das entspricht 60 Prozent des gesamten Abfallauskommens, auf den Bausektor zurückzuführen (Umwelt Bundesamt 2021). Hinzu kommt, dass das Baugewerbe im Vergleich zu anderen Branchen, seit Jahrzehnten unter einer bemerkenswert niedrigen Produktivität leidet (Barbosa et al. 2017). Grund dafür ist der mangelnde Digitalisierungs- sowie Automatisierungsgrad des Sektors (Barbosa et al. 2017). Verstärkt wird dieser Effekt durch den anhaltenden Fachkräftemangel, der seit Jahren zunimmt (Bauindustrie 2022). Eine Abkehr von dieser Entwicklung ist vorerst nicht abzusehen (Anger et al. 2022). Es gilt inzwischen als allgemeiner Konsens, dass ein Paradigmenwechsel im Bauwesen eingeläutet werden muss (Pralle und Klotz 2021). Als eine vielversprechende Entwicklung gilt dabei die Additive Fertigung mit Holz (Gardener und Wang 2019). Zum einen verbindet sie die Digitalisierung und Automatisierung der einzelnen Herstellungsprozesse, zum anderen ermöglicht sie eine ressourcenschonende Fertigung mit einem nachwachsenden Rohstoff (Tomec und Kariž 2022; Henke 2016; Gardener und Wang 2019). Es gibt inzwischen mehrere additive Fertigungsverfahren, die mit holzbasierten Ausgangsstoffen arbeiten (Henke 2016; Tomec und Kariž 2022). Grundsätzlich kann man diese Verfahren in Abhängigkeit des Bearbeitungsgrades der eingesetzten Holzwerkstoffe einteilen (Henke 2016). Als ein unkonventionelles additives Fertigungsverfahren gilt das maschinelle Fügen von diskreten Holzelementen zu einem Bauelement (Henke 2016). Dabei handelt es sich bei den Holzelementen unter anderem um stabförmige oder plattenförmige Elemente, wie Balken oder Platten (Henke 2016). Im Gegensatz dazu werden bei den konventionellen additiven Fertigungsverfahren formbare Ausgangsmaterialien eingesetzt (Henke 2016). Dazu zählen unter anderem Verfahren, die mit der Schüttung aus Holzpartikeln arbeiten (Henke 2016). So lassen sich mithilfe von Bindemitteln und Holzpartikeln sowohl die Extrusion, sowie das selektive Binden realisieren (Tomec und Kariž 2022; Hesse 2016). Zudem ist die additive Fertigung mit chemischen Bestandteilen des Holzes, wie Lignin oder Zellulose, möglich (Henke 2016; Tomec und Kariž 2022). Derzeit gelten Verfahren, die mit der Schüttung aus Holzpartikeln arbeiten, als Technologien mit großem Potential (Tomec und Kariž 2022). Dabei zählt das Fused Deposition Modeling (FDM), beziehungsweise die Fused Filament Fabrication (FFF), als das derzeit am besten erforschten Verfahren (Tomec und Kariž 2022). Ein hingegen neuartiger Ansatz ist die Individual Layer Fabrication (ILF), die an der Technischen Universität München entwickelt wurde (Henke et al. 2021).

1.2 Ausgangssituation und Problemstellung

Bei der Individual Layer Fabrication handelt es sich um ein neuartiges additives Fertigungsverfahren, welches für die Anwendung im Bauwesen entwickelt wurde. Bei diesem Verfahren werden dreidimensionale Objekte durch das Verkleben individuell konturierter Holzwerkstoffplatten hergestellt (vgl. *Abbildung 1-1*). Die Holzwerkstoffplatten entstehen durch das selektive Binden von Holzpartikeln. Dazu verteilt zunächst eine Streuvorrichtung die Holzpartikel in einer gleichmäßigen Deckschicht über eine horizontale Bauplattform (a). Auf diese Deckschicht wird der flüssige Klebstoff, entsprechend der gewünschten Plattengeometrie, durch ein Druckportal aufgetragen (b). Es folgt das Auftragen einer weiteren Deckschicht aus Holzpartikeln (c). Anschließend wird die Bauplattform mit den Schichten aus Holzpartikeln und Klebstoff unter eine beheizte Presse gefahren (d). Beim Pressen erhärtet der Klebstoff und es entsteht eine Platte aus ungebundenem und gebundenem Material (e). Die ungebundenen Holzpartikel werden im Anschluss entfernt (e). Dieser Vorgang (a)-(e) wird wiederholt, bis die gewünschte Anzahl an Platten hergestellt ist. Anschließend werden die einzelnen Platten manuell gestapelt und verklebt, sodass ein dreidimensionales Objekt entsteht. Um ein gegenseitiges Verschieben der Platten zu verhindern, wird mechanischer Druck auf das Objekt aufgebracht bis der Klebstoff vollständig ausgehärtet ist. (Buschmann et al. 2021)

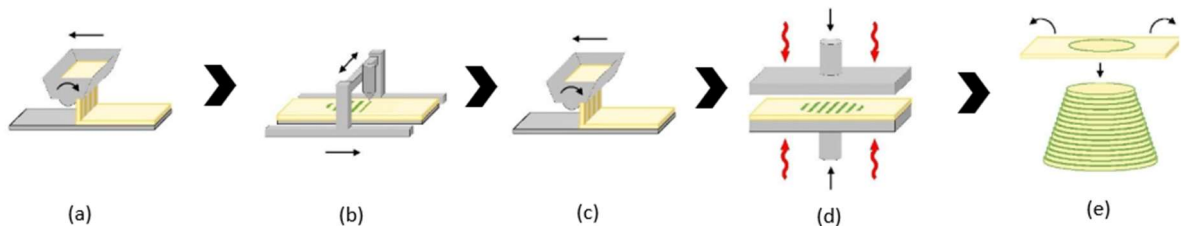


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung der Prozessschritte nach (Buschmann et al. 2021), Erklärung der Nummerierung im Text

Die Herstellung der Holzwerkstoffplatten erfolgt automatisiert (vgl. *Abbildung 1-1*, (a)-(d)). Allerdings werden die Platten bisher manuell gestapelt und verklebt (vgl. *Abbildung 1-1*, (e)). Dies ist nicht nur umständlich und zeitaufwendig, sondern auch aufgrund der unterschiedlichen Platten Geometrien sehr ungenau, da die Positionierung nur nach Augenmaß erfolgen kann. Hinzu kommt, dass das Auftragen des Klebstoffes auf die einzelnen Platten sehr unpräzise ist, da keine definierte Dosierung stattfindet.

1.3 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und Bewertung eines Endeffektors, der sowohl die automatisierte Handhabung der Platten als auch den automatisierten Klebstoffauftrag ermöglicht. Damit soll der Endeffektor zwei Hauptfunktionen erfüllen, die in der folgenden Tabelle definiert werden:

Tabelle 1-1: Definition der Hauptfunktionen des Endeffektors

Hauptfunktion	Beschreibung
Handhabung	Der Endeffektor soll eine ausgerichtete Holzwerkstoffplatte an einer definierten Position A in ihrem Schwerpunkt aufnehmen, halten und an einer definierten Position B ablegen. Die Platte soll von oben gegriffen werden. Das Umsetzen der Platte soll waagrecht-waagrecht erfolgen. Der Effektor soll Platten mit minimaler Geometrie einzeln greifen können.
Klebstoffauftrag	Der Endeffektor soll Klebstoff definiert auf eine Holzwerkstoffplatte auftragen, sodass die Holzwerkstoffplatten anschließend vollflächig und kraftschlüssig miteinander verklebt werden können. Der Klebstoffauftrag soll in Abhängigkeit der Geometrie der Platte erfolgen.

Da beide Hauptfunktionen mit einem Endeffektor erfüllt werden sollen, soll am Effektor ein Werkzeugwechselsystem (Hilfsfunktion) integriert werden. Der Endeffektor soll an einen Portalroboter befestigt werden. Die Anforderungen an den Effektor werden maßgeblich durch die Eigenschaften der Holzwerkstoffplatten beeinflusst (vgl. Tabelle 1-2).

Tabelle 1-2: Eigenschaften der Holzwerkstoffplatten

Objekteigenschaft	Beschreibung
Geometrie	Variabel; Individuell konturiert Maximale Abmessungen: L x B x D = 500 mm x 500 mm x 5 mm Minimale Abmessungen: L x B x D = 8 mm x 10 mm x 3 mm
Dichte	$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
Masse	Variabel Maximale Masse: $m = 1,25 \text{ kg}$
Zerbrechlichkeit	Nicht zerbrechlich
Oberflächenbeschaffenheit	Rau

1.4 Wissenschaftliche Vorgehensweise

Bei der Entwicklung des Endeffektors wurden die beiden Hauptfunktionen getrennt bearbeitet, wie in *Abbildung 1-2* zu erkennen ist. Für beide Funktionen wurde zunächst der theoretische Hintergrund zusammengestellt. Auf Basis dieser Zusammenstellung erfolgte die Entwicklung der Systeme und Produkte für die beiden Funktionen. Für die Handhabung wurden drei unterschiedliche Greifsysteme entwickelt und bewertet. Auf Grundlage der Bewertung wurde sich anschließend für ein finales Greifsystem entschieden, welches darauffolgend weiterentwickelt und optimiert wurde. Für die Laminierung orientierte man sich bei der Produktentwicklung an der Methode des Rapid Prototypings (vgl. Kapitel 1.4.1). Dabei wurde ein Prototyp hergestellt und optimiert bis er den Anforderungen an den Klebstoffauftrag entsprach. Anschließend wurden die Eigenschaften des finalen Systems untersucht. Zu guter Letzt wurden die beiden fertiggestellten Systeme zu einem Endeffektor zusammengefügt. Die Einsatzfähigkeit des Endeffektors wurde in finalen Untersuchungen überprüft.

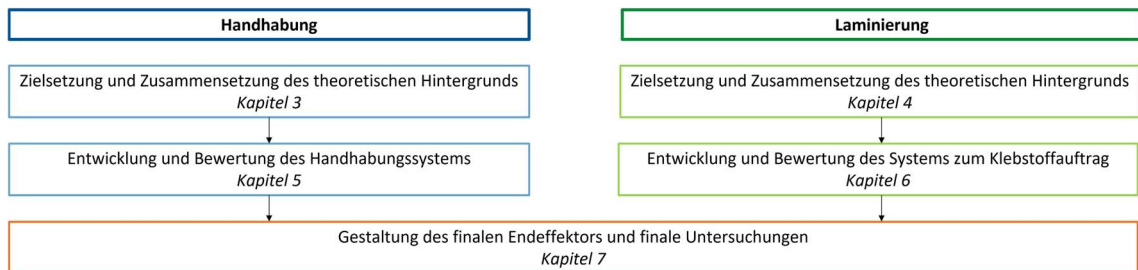


Abbildung 1-2: Flussdiagramm zum Vorgehen der Entwicklung des Endeffektors

1.4.1 Methode der Produktentwicklung

Für die Entwicklung des Laminierungssystems wurde sich an der Methode des Rapid Prototyping orientiert.

Der Begriff „Rapid Prototyping“ stammt ursprünglich aus der Fertigungsbranche und bezeichnete lange unterschiedliche additive Fertigungsverfahren. Inzwischen ist das Rapid Prototyping eine anerkannte Methode in der Produktentwicklung. Die grundlegende Idee ist die Erstellung von funktionsfähigen Prototypen, die während der Erstellungsphase validiert werden. So werden Schwachstellen frühzeitig erkannt und können behoben werden. Grundsätzlich erfolgt der Prozess des Rapid Prototypings in drei Phasen (vgl. *Abbildung 1-3*). In der ersten Phase erfolgt die Herstellung des Prototyps. Dabei wird möglichst schnell ein kostengünstiger Prototyp hergestellt. In der darauffolgenden Phase des Reviews erfolgt die Überprüfung und Bewertung des Prototyps. Auf Grundlage des Reviews erfolgt die Weiterentwicklung des Prototyps. Diese dritte Phase geht dann über in die erste und der Ablauf startet von Neuem. Der Prozess wird so lange wiederholt, bis alle Anforderungen an das Produkt erfüllt sind. (Liou 2019)

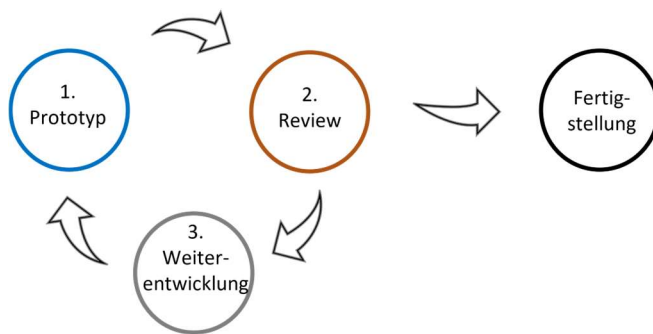


Abbildung 1-3: Ablaufschema des Rapid Prototypings nach (Liou 2019)

Für die Entwicklung der Prototypen wurde unter anderem der 3D-Drucker Ultimaker 2+ Connect, der Firma Ultimaker B.V., NL-3511 ED Utrecht eingesetzt.

2 Grundlagen der Robotik

2.1 Definition Endeffektor

Der Endeffektor ist das Arbeitsorgan, welches am Ende des Führungsgetriebes eines Roboters, dem Roboterflansch, angebracht wird (Hesse 1998). Seine Funktion ist es einen Effekt hervorzurufen, indem am Produkt oder der Umgebung etwas bewirkt wird (Hesse 1998). Dazu zählen das Greifen, Bearbeiten und Messen (Hesse 1998; Pott und Dietz 2019). Grundsätzlich ist der erforderliche Funktionsumfang eines Endeffektors je nach Anwendung unterschiedlich (Pott und Dietz 2019). Man unterscheidet die Haupt-, Hilfs- und Nebenfunktionen (Pott und Dietz 2019). Die Hauptfunktion wird vom Wirkelement in Form eines Greifers, Werkzeugs oder Messmittels übernommen (Pott und Dietz 2019). Der Endeffektor kann eine oder mehrere Hauptfunktionen haben (Pott und Dietz 2019). Die Hilfsfunktionen dienen zur Unterstützung des Prozesses und erfolgen beispielsweise durch Werkzeugwechselsysteme oder Messsysteme (Pott und Dietz 2019). Die Geräte für die Nebenfunktionen sind nicht direkt am Endeffektor befestigt, sondern innerhalb der Roboterzelle und ermöglichen den Betrieb (Pott und Dietz 2019). Betrachtet man all seine Funktionen, so wird oft von einem System statt einem einzelnen Effektor gesprochen (Hesse 1998).

3 Grundlagen der Handhabungstechnik

3.1 Aufgaben des Greifers und Greifsystems

Der Greifer ist die wichtigste und häufigste Art der Endeffektoren (Pott und Dietz 2019). Nach der VDI-Richtlinie 2740 sind seine Hauptaufgaben das Herstellen, Aufrechterhalten und Lösen der Verbindung zwischen dem Handhabungsobjekt und -gerät (VDI 2740: 1995). Dabei werden als Handhabungsgerät vor allem Industrieroboter eingesetzt, welche den Greifer durch eine räumliche Bewegung positionieren und orientieren (Pott und Dietz 2019). Je nach Anwendung können zu den Hauptaufgaben Sonderfunktionen hinzukommen, die laut VDI-Richtlinie wie folgt definiert werden:

- Änderung der Position des Greifobjektes
- Änderung der Orientierung des Greifobjektes
- Informationsaufnahme durch Sensoren
- Teilbereitstellung bei der Montage und Reinigungsfunktion in Fertigungsprozessen (VDI 2740: 1995).

Um seine Aufgabe zu erfüllen, muss der Greifer entsprechende Kräfte und Momente auf das Handhabungsobjekt ausüben. Die VDI-Richtlinie unterscheidet dabei folgende Belastungen:

- *Statische* Kräfte und Momente, die hauptsächlich durch die Gewichtskraft entstehen
- *Dynamische* Kräfte und Momente, die im Zusammenhang mit einer Bewegung auftreten, wie Trägheitskräfte und -momente
- *Prozessbedingte* Kräfte und Momente, die durch Bearbeitungsprozesse, wie beispielsweise Anpressen und Fügen, entstehen (VDI 2740: 1995).

Um einen Greifer auszuwählen oder auszulegen, müssen diese Kräfte und Momente bekannt sein oder zumindest abgeschätzt werden. Dabei ist die Ermittlung der statischen Kräfte und Momente relativ einfach. Die Bestimmung der dynamischen und prozessbedingten Belastungen ist häufig aufwendig und wird daher durch Abschätzungen abgekürzt. (Pott und Dietz 2019)

3.2 Einteilung der Greifer

Aufgrund der vielfältigen Anwendungen von Handhabungsgeräten wird ein breites Spektrum an Greifern angeboten, die hinsichtlich ihrer Größe, Bauart, Funktion und Einsatzmöglichkeiten variieren (Bartenschlager et al. 1998). Die Gliederung der Greifer kann dabei nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen (Hesse 2016; Bartenschlager et al. 1998). (Hesse 2016) teilt die Greifer beispielsweise in Abhängigkeit ihrer Wirkpaarung, Wirkstellen und Wirkprinzipien ein. (Bartenschlager et al. 1998) ziehen weitere Kategorien, wie die Anzahl der Wirkelemente oder Anzahl der gegriffenen Werkstücke hinzu. Dabei können mehrere Kriterien gleichzeitig zutreffen (Bartenschlager et al. 1998). Ein Kriterium schließt das andere nicht aus, sie existieren vielmehr nebeneinander und sind nicht abhängig voneinander (Bartenschlager et al. 1998). In folgenden

Abschnitten erfolgt die Gliederung der Greifer nach der Wirkstellen, Wirkpaarung und dem Wirkprinzip.

3.2.1 Einteilung der Greifer nach Wirkstellen

Als Wirkstelle wird der Punkt oder die Ebene bezeichnet, an dem der Greifer die Kräfte auf das Handhabungsobjekt überträgt (Hesse 2011; Pott und Dietz 2019). Die Anzahl der Wirkstellen und ihre Verteilung hängen dabei nicht nur von der Geometrie des Greifobjektes (Pott und Dietz 2019), sondern auch vom Reibbeiwert zwischen Greifer und Greifobjekt, der Druckempfindlichkeit des Greifobjektes, der Stabilität des Griffes und der Hauptbelastungsrichtung ab (VDI 2740: 1995). Nach (Bartenschlager et al. 1998) kann das Greifen durch zwei Prinzipien erfolgen:

- 1) Durch Herstellung einer Kontaktebene, d. h. es wird ein Kraftfeld beispielsweise durch Saugluft, Magnetfelder oder Adhäsivschichten erzeugt.
- 2) Durch Herstellung mehrerer Kontaktebenen, die mithilfe mehrerer örtlich wirkender Einzelkräfte erzeugt werden (vgl. *Abbildung 3-1*).

3.2.2 Einteilung der Greifer nach Wirkpaarungen

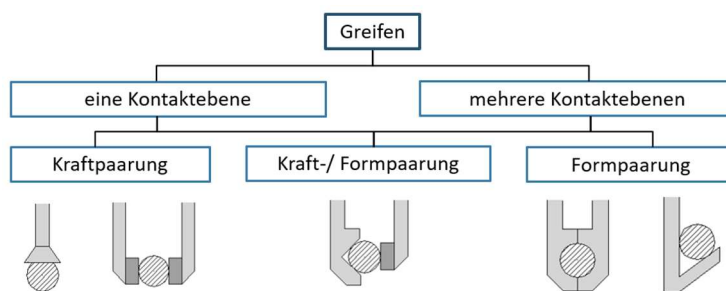


Abbildung 3-1: Gliederung des technischen Greifens nach (Hesse 1998)

Es wird zwischen kraftschlüssiges und formschlüssiges Greifen unterschieden. Neben der Kraft-, und Formpaarungen (vgl. *Abbildung 3-1*) gilt die Stoffpaarung als eine weitere Wirkpaarung. Bei der Kraftpaarung handelt es sich um eine reine Reibpaarung, die erhebliche Greifkräfte erzeugen kann. Bei der Formpaarung erfolgt das Greifen des Objektes entweder durch Paaren von Formelementen oder durch einen vollständigen Formgriff. Dabei wirken keinerlei Kräfte auf das Handhabungsobjekt, außer die Schwerkraft. Bei der Stoffpaarung werden die Objekte mit Hilfe von Adhäsivmitteln erfasst und gehalten. Die Stoffpaarung eignet sich besonders für die Mikro-montage, d. h. für die Handhabung von kleinen, leichten und sauberen Teilen. Oft werden die verschiedenen Wirkpaarungen miteinander kombiniert, sodass Mischformen entstehen, wie beispielsweise Kraft-/ Formpaarungen oder Stoff-/Formpaarungen. (Hesse 1998)

3.2.3 Einteilung der Greifer nach physikalischen Wirkprinzipien

Die Greifer können auch aufgrund ihrer physikalischen Wirkprinzipien unterschieden werden, wie die folgende Abbildung zeigt:

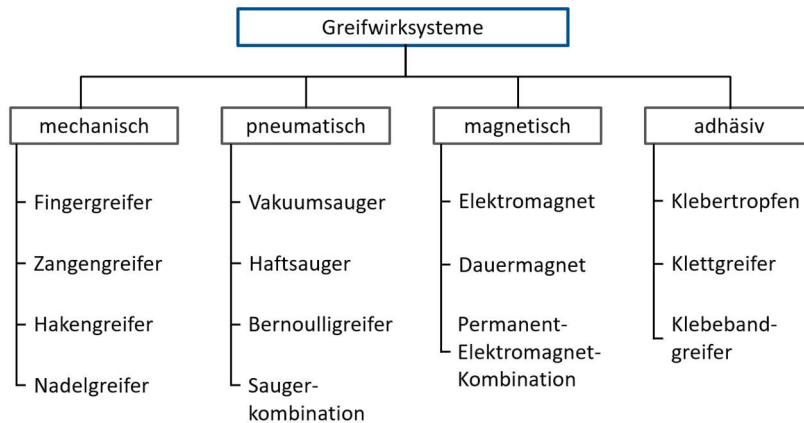


Abbildung 3-2: Physikalische Wirkprinzipien nach (Hesse 1998)

Dabei können auch mehrere Wirkprinzipien kombiniert werden, wie beispielsweise das Klemmen und Saugen. In diesem Fall wird auch von einem Kombinationsgreifer gesprochen. (Hesse 1998)

3.2.4 Beschreibung der physikalischen Wirkprinzipien

Mechanische Greifer

Das mechanische Greifen wird am häufigsten angewendet (Bartenschlager et al. 1998). Die Greifkraft kann durch die Form- oder Kraftpaarung oder durch die Kombination der beiden aufgebracht werden (Hesse 2016). Die Wirkstellen der mechanischen Greifer befinden sich an Fingern oder Greifbacken, welche bauteilspezifisch ausgeführt werden (Bartenschlager et al. 1998). Grundsätzlich wird zwischen Parallel- und Winkelgreifern unterschieden, welche mit zwei oder mehr Fingern versehen sind (Bartenschlager et al. 1998). Eine Alternative dazu bieten die flexiblen Greifer, bei denen die Finger sich an die Form des Greifobjektes anpassen können (Pott und Dietz 2019). Der Antrieb der mechanischen Greifer erfolgt elektrisch, pneumatisch oder hydraulisch (Bartenschlager et al. 1998). Aufgrund der sinkenden Kosten und der steigenden Leistungsfähigkeit werden vor allem elektrisch angetriebene Greifer eingesetzt (Pott und Dietz 2019).

Magnetische Greifer

Die Magnetgreifer gehören zu den kraftschlüssigen Greifern (Bartenschlager et al. 1998). Die Voraussetzung für den Einsatz eines solchen Greifers sind die ferromagnetischen Eigenschaften des Handhabungsobjektes (Bartenschlager et al. 1998). Daher werden Magnetgreifer überwiegend zur Handhabung von Blechen, Schmiede- oder Gussteilen herangezogen (Pott und Dietz 2019). Zur Übertragung der magnetischen Kraft werden für den Greifer Permanent- oder Elektromagneten eingesetzt (Bartenschlager et al. 1998). Dabei gelten die Permanentmagnetgreifer

als einfache und billige Lösung, die jedoch eine Zusatzvorrichtung zum Lösen des Handhabungsobjektes benötigen (Hesse 1998). Bei den Elektromagnetgreifer hingegen versagt die Greifkraft durch die Energieunterbrechung (Bartenschlager et al. 1998). Sie benötigen keine Antriebselemente (Bartenschlager et al. 1998). Der Einsatz von Magnetkräften bringt mehrere Nachteile mit sich, wie beispielsweise das hohe Eigengewicht des Magneten welches die Nutzlast des Roboters reduziert (Bartenschlager et al. 1998).

Adhäsionsgreifer

Der Adhäsionsgreifer stellt eine stoffschlüssige Verbindung mit dem Handhabungsobjekt her. Die dabei benötigten Adhäsionskräfte werden mit Hilfe einer klebrigen Masse, zum Beispiel über Klebebänder, klebrige Materialien oder Klebstoffe hergestellt. Der Adhäsionsgreifer wird meistens dort eingesetzt, wo die Handhabung mit anderen Greifarten nicht mehr möglich ist, wie zum Beispiel beim Handhaben dünner und zerbrechlicher Materialien oder bei der Mikromontage mit besonders kleinen Teilen, wie Schrauben und Muttern. Ein Nachteil der Adhäsionsgreifer ist die zeitliche begrenzte Nutzung, die unter anderem durch die Verschmutzungen weiter reduziert wird. Zudem wird für das Ablegen der zu greifenden Objekte eine zusätzliche Einrichtung benötigt. (Bartenschlager et al. 1998)

Pneumatische Greifer

Es wird zwischen Überdruck- und Unterdruckgreifern beziehungsweise Vakuumgreifern unterschieden. Dabei arbeiten pneumatische Überdruckgreifer mit Drücken, die über dem Umgebungsdruck liegen. Sie haben keine mechanischen Zwischengetriebe. Überdruckgreifer stellen form- oder kraftschlüssige Verbindungen mit dem Handhabungsobjekt her. Es handelt sich hier um Greifer, die entweder mit Membranen ausgestattet sind oder den Druck eines Luftstrahls ausnutzen. Als Überdruckgreifer gelten beispielsweise Lochgreifer, Zapfengreifer, Luftstrahlgreifer oder Membrangreifer. Da Überdruckgreifer deutlich seltener als Unterdruckgreifer eingesetzt werden, versteht man unter pneumatischen Greifern oft nur Letzteres. Für diese Arbeit sind die Überdruckgreifer nicht von Bedeutung, da sie nicht für die Handhabung von ebenflächigen Handhabungsobjekten geeignet sind. (Hesse et al. 2004)

3.3 Grundlagen der Vakuumgreiftechnik

3.3.1 Definition Vakuum

Als Vakuum oder auch Unterdruck bezeichnet man ein verdünntes Gas oder den entsprechenden Zustand, bei dem der Druck oder die Dichte kleiner ist im Vergleich zu der umgebenden Atmosphäre (ISO 3529: 2019-07). Der Umgebungsdruck, der etwa dem durchschnittlichen Atmosphärendruck auf Meereshöhe entspricht, wird als Normdruck wie folgt definiert (ISO 3529: 2019-07; DIN 1343: 1990):

$$p_n = 1.013 \text{ mbar} \quad (3-1)$$

Grundsätzlich unterscheidet man die Ausprägungen des Vakuums je nach Anwendungsgebiet. In der Vakuum-Handhabungstechnologie ist ein geringes Vakuum notwendig. Es wird als Grobvakuum bezeichnet (Jousten 2018). Dabei wird das Vakuum bzw. der Unterdruck als Relativwert zum Umgebungsdruck angegeben (Jousten 2018; Hesse et al. 2004). Bei einem beliebigen Druck p berechnet sich somit das relative Vakuum gemäß folgender Beziehung (ISO 3529: 2019-07):

$$relative\ Vakuum = \frac{p_n - p}{p_n} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3-2)$$

p_n	[bar]	Normdruck
p	[bar]	Beliebiger Druck

Allgemein gilt in der Vakuumtechnik, dass die Evaluierungszeit, die benötigte Zeit zum Aufbauen des Unterdrucks, überproportional zunimmt je höher der Unterdruck ist. Aus diesem Grund wird für eine wirtschaftliche Arbeitsweise in der Handhabungstechnik ein Vakuum von 60% angesetzt. In der folgenden Tabelle lässt sich die Umrechnungen der Vakuumprozentangaben entnehmen: (Hesse et al. 2004)

Tabelle 3-1: Vakuum-/Druck-Umrechnungstabelle nach (Hesse et al. 2004)

Umrechnungstabelle									
Restdruck absolut in mbar	900	800	700	600	500	400	300	200	100
relatives Vakuum in %	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Druck in bar	-0,101	-0,203	-0,304	-0,405	-0,507	-0,608	-0,709	-0,811	-0,912
Druck in N/cm ²	-1,01	-2,03	-3,04	-4,05	-5,07	-6,08	-7,09	-8,11	-9,12
Druck in kPa	-10,1	-20,3	-30,4	-40,7	-50,7	-60,8	-70,9	-81,1	-91,2

3.3.2 Kraftübertragungsverhalten von Vakuumgreifsystemen

Entscheidend für die Haltekräfte eines Vakuumgreifsystems sind die Druck- und Kraftverhältnisse, wie sie in *Abbildung 3-3* dargestellt sind. Der Sauger greift im Schwerpunkt des Handhabungsobjektes an. Im Raum zwischen Handhabungsobjekt und Sauger wird Unterdruck erzeugt. Dabei grenzen Dichtelemente den Innendruck des Saugers vom Umgebungsdruck ab. Sobald der Druck im geschlossenen Raum zwischen Sauger und Handhabungsobjekt unter den Umgebungsdruck fällt, presst der Umgebungsdruck das Greifobjekt gegen die Dichtlippen des Saugers. In diesem Fall resultiert eine konstante Streckenlast an der Saugerdichtlippe. (Hesse 2011)

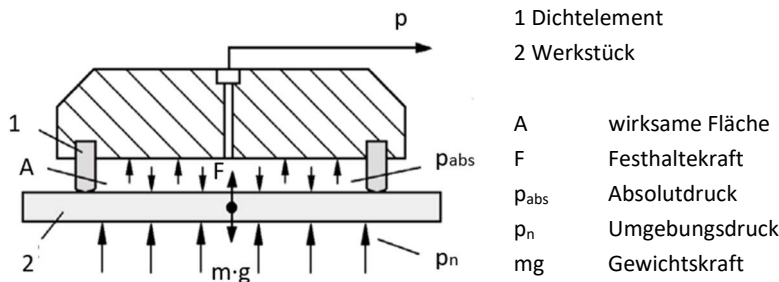


Abbildung 3-3: Kraftübertragung von Vakuumsaugern (Hesse 2011)

Bei den weichen Flachsaugern, auch Lippensauger genannt, schnürt sich bei Belastung die wirksame Greiffläche ein (vgl. *Abbildung 3-4, b*). Dies hängt in der Regel von der Konstruktion des Saugers, dem Unterdruck und dem Material ab (s. Kapitel 3.3.5). Zudem hängt die Saugerbelastung davon ab, in welchen Raumachsen die Handhabungseinrichtung das Greifobjekt bewegt. (Hesse 2011)

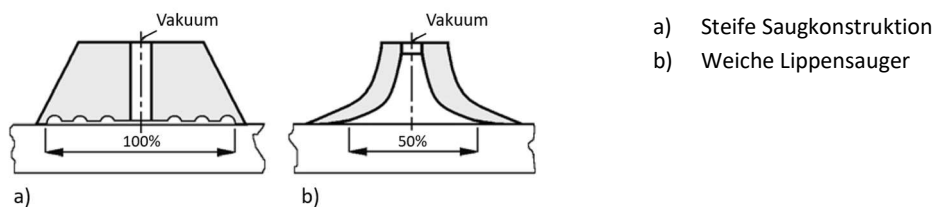


Abbildung 3-4: Saugflächenveränderung bei anliegendem Vakuum (Hesse 2011)

Die Haltekraft F eines Vakuumsaugers ist abhängig von der wirksamen Fläche und des erzeugten Unterdruckes. Alle auf das Greifobjekt wirkenden Kräfte, Bewegungsrichtungen und Reibkoeffizienten müssen berücksichtigt werden. Zur Berechnung der theoretischen Haltekraft werden nachfolgend die zwei wichtigsten Lastfälle dargestellt: (Hesse 2011)

- Fall 1: Saugfläche ist horizontal ausgerichtet (vorzugsweise verwenden)
- Fall 2: Saugfläche ist vertikal ausgerichtet (möglichst vermeiden)

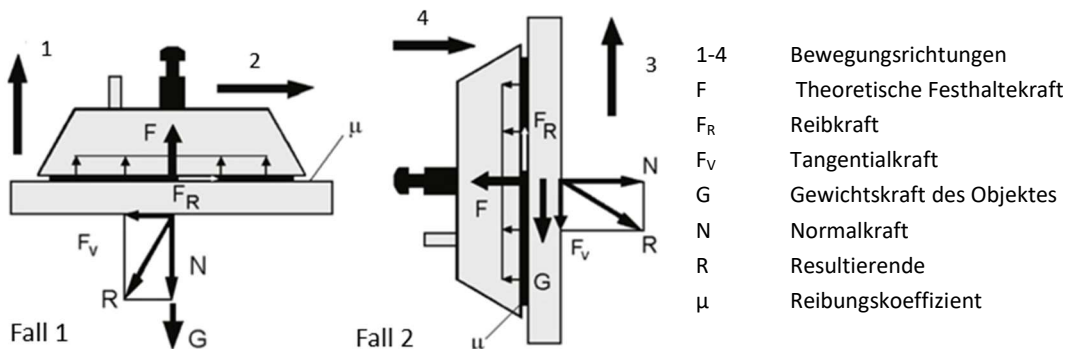


Abbildung 3-5: Lastfälle beim Halten, Heben und Verschieben (Hesse 2011)

$$F = (p_n - p_u) \cdot A \cdot y \cdot \eta \cdot n \cdot \frac{1}{S} \cdot \frac{1}{10} \quad [\text{N}] \quad (3-3)$$

—		
A	[mm ²]	Wirkfläche; theoretische Größe der Innenfläche des Saugers
p_n	[bar]	Normdruck/ Umgebungsdruck
p_u	[bar]	Druck im abgedichteten Saugraum
n	/	Anzahl der Sauger
S	/	Sicherheitsfaktor gegen Abfallen
η	/	Wirkungsgrad, der die Leckverluste berücksichtigt

Der Sicherheitsfaktor S wird je nach Beschaffenheit der Werkstückoberfläche angenommen. Für glatte und dichte Werkstücke wird ein Sicherheitsfaktor von mindestens 1,5 angesetzt. Bei kritischen, inhomogenen, porösen oder geölten Werkstücken wird für den Sicherheitsfaktor ein Mindestwert von 2,0 angesetzt. (J. Schmalz GmbH 2022c)

Der Reibungskoeffizient μ wird in den theoretischen Berechnungen erst berücksichtigt, wenn die Saugfläche vertikal ausgerichtet ist (vgl. *Abbildung 3-5*, Fall 2) (Hesse 2011). Aus der Praxis ist allerdings bekannt, dass aufgrund der falschen Annahmen des Reibungskoeffizienten, die theoretisch berechneten Kräfte nicht erreicht werden (Kern 2016). In der Regel werden für diesen Fall die übertragbaren Kräfte von den Herstellern empirisch ermittelt (J. Schmalz GmbH 2022c).

3.3.3 Aufbau von Vakuumgreifsystemen

Ein Vakuumgreifer setzt sich aus einem oder mehreren Vakuumgreifsystemen zusammen. Ein Vakuumgreifsystem umfasst einen Vakuumerzeuger mit optional integrierter Sensorik, einen oder mehrere Sauger bzw. Saugnäpfe und die fluidischen Verbindungen. Ein weiterer Bestandteil des Systems ist die Tragstruktur. Sie stellt die Verbindung zwischen Vakuumsaugern und Handhabungsgerät, beispielsweise einem Roboter, her (vgl. *Abbildung 3-6*). (Straub 2020)

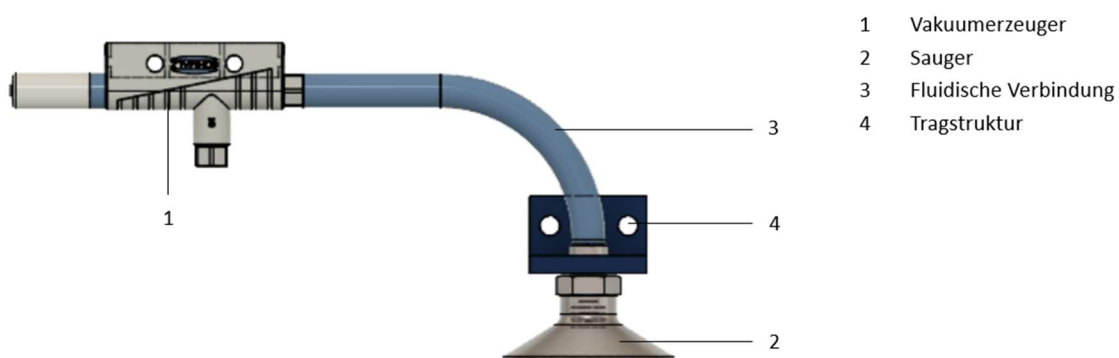


Abbildung 3-6: Beispielhafter Aufbau eines Vakuumgreifsystems

3.3.4 Vakuumerzeuger

Ein Vakuum wird erzeugt, wenn in einem geschlossenen Raum der Luftdruck gesenkt wird (vgl. Kapitel 3.3.1). Dazu muss der Anteil der Gasteilchen im geschlossenen Raum verringert werden. Der Unterdruck, der zum Betrieb der Vakuumbreifsystemen benötigt wird, kann auf verschiedene Weisen erzeugt werden. Im Folgenden soll auf eine Auswahl von Vakuumerzeugern eingegangen werden. (Hesse et al. 2004)

Vakuumpumpen

Vakuumpumpen werden in Abhängigkeit ihrer Wirkungsweise eingeteilt (vgl. *Abbildung 3-7*) (Jousten 2018).

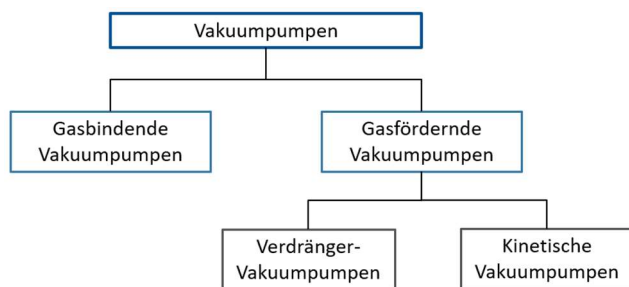


Abbildung 3-7: Einteilung der Funktionsprinzipien von Vakuumpumpen nach (Jousten 2018)

Es wird zwischen den gasbindenden und gasfördernden Vakuumpumpen unterschieden. Dabei werden bei den gasbindenden Vakuumpumpen die Gasteilchen nicht nach außen gefördert, sondern im Inneren der Anlage in einen flüssigen, festen oder sorptiven Zustand überführt. (Jousten 2018)

Die gasfördernden Vakuumpumpen werden eingeteilt in die Verdrängerpumpen und die kinetischen Pumpen (vgl. *Abbildung 3-7*). Bei Verdrängerpumpen strömt die Luft über ein Einlassventil in einen sich vergrößernden Raum ein, wie in *Abbildung 3-8* (links) zu entnehmen ist. Dort wird sie mit Hilfe eines Kolbens verdichtet und über ein Auslassventil an der Druckseite ausgestoßen. Verdrängervakuumpumpen erzeugen ein sehr hohes Vakuum bei nur geringem Volumenstrom. (Jousten 2018)

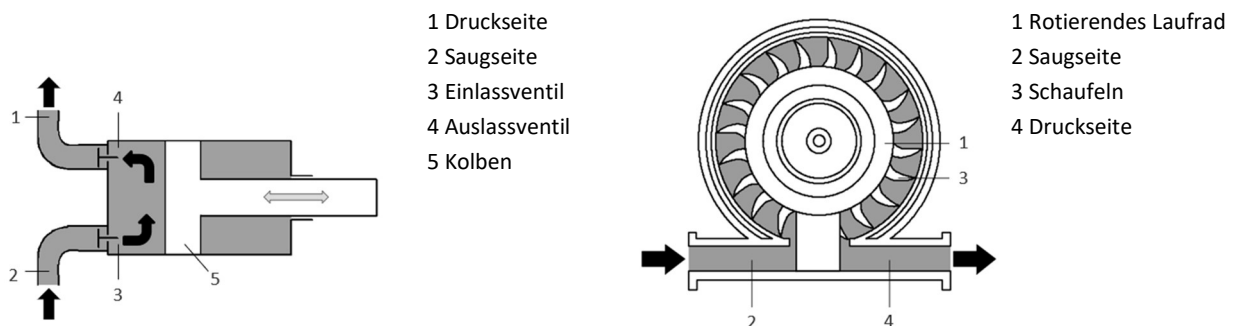


Abbildung 3-8: Schematischer Aufbau der Verdrängervakuumpumpe (links) und der kinetischen Vakuumpumpe (rechts) (FESTO SE & Co.KG 2022)

Die kinetischen Vakuumpumpen evakuieren die Gasteilchen, indem sie mit einer geeigneten Einrichtung auf die Strömung einwirken. Das Wirkprinzip dieser Pumpen soll am Beispiel eines Vakuumgebläses beschrieben werden (vgl. *Abbildung 3-8*, rechts). Das Vakuumgebläse überträgt kinetische Energie durch ein rotierendes Laufrad auf die Luft. Die Luft wird auf der Saugseite durch die Schaufeln des Rades mitgerissen, verdichtet und in der Atmosphäre abgegeben. Neben dem Vakuumgebläse zählt der Vakuumverdichter zu den kinetischen Vakuumpumpen. Kinetische Vakuumpumpen erzeugen einen geringeren Unterdruck, aber einen höheren Volumenstrom. (Jousten 2018)

Durch das hohe Saugvermögen der kinetischen Vakuumpumpen sind sie vor allem für poröse Werkstücke geeignet, da sie deren Luftdurchlässigkeit gut ausgleichen können. (Hesse et al. 2004)

Venturi-Ejektor

Ein einstufiger Ejektor besteht aus einer Strahldüse, auch Treib-, Laval- oder Venturidüse genannt, und einer Empfängerdüse (vgl. *Abbildung 3-9*). Die Strahldüse hat die Form eines kegelig eingeschnürten Rohres. Sobald die Druckluft den engsten Querschnitt der Strahldüse passiert, wird ihre Strömungsgeschwindigkeit erhöht. Dabei wird die eingeschlossene Luft, die sich im Luftraum des Saugers befindet, mitgerissen. Es entsteht ein Unterdruck im Sauger. In der Regel wird die Druckluft mit der angesaugten Umgebungsluft direkt nach der Empfängerdüse über einen Schalldämpfer in die Atmosphäre geleitet. Mit dem Abschalten der Druckluft, wird der Sauger entlüftet. (Hesse et al. 2004)

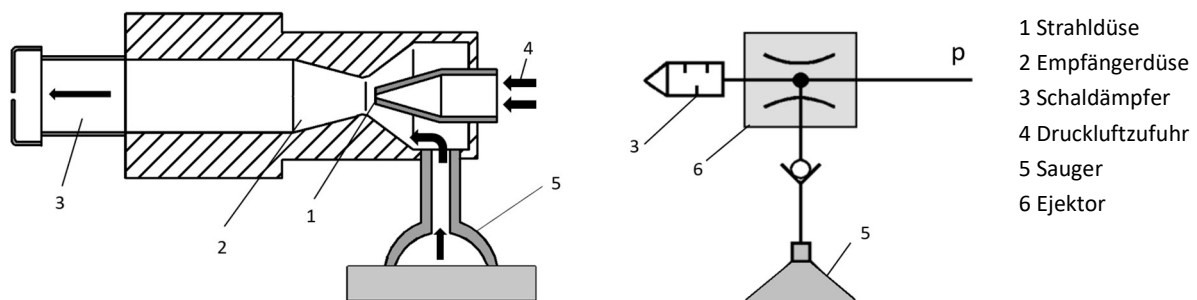


Abbildung 3-9: Aufbau eines Einstufenejektors (links) und das dazugehörige Schaltbild (rechts) (Hesse et al. 2004)

Ejektoren haben durch ihren einfachen Aufbau geringe Anschaffungskosten. Sie können direkt im Greifer integriert werden und sind weitgehend störungsfrei. Allerdings erfordern sie erhöhte Betriebskosten im Vergleich zu Vakuumgebläsen durch ihren Druckluftverbrauch. Zudem haben Ejektoren im Vergleich zu Vakuumgebläsen eine sehr geringes Saugvermögen (vgl. *Abbildung 3-10*). Beim Einsatz von Venturi-Ejektoren wird ein Schalldämpfer empfohlen. (Hesse et al. 2004)

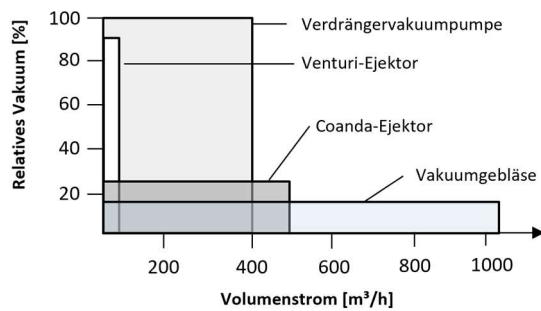


Abbildung 3-10: Leistungsvergleich typischer Vakuumerzeuger nach (Lien und Davis 2008)

Das Saugvermögen eines einstufigen Ejektors lässt sich kurzfristig durch einen Druckspeicher erhöhen. Damit ist ein zusätzliches Vakuum „reserviert“. Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung des Saugvermögens ist das Anschließen mehrerer die Ejektoren. Die Ejektoren können dabei parallel oder mehrstufig angelegt werden. Ein mehrstufiger Ejektor besteht ebenfalls aus einer Strahldüse und einer Empfängerdüse (vgl. *Abbildung 3-11*). Allerdings sind hinter der ersten Empfängerdüse noch weitere Düsenstufen angebracht. Die angesaugte Luft aus der ersten Kammer wird mit der Druckluft vermischt und dient als Treibstrahl für die weiteren Kammern. Aufgrund des abnehmenden Luftdrucks haben diese Düsen einen größeren Durchmesser. Nach der letzte Empfängerdüse wird die Abluft, wie bei den einstufigen Ejektoren, in die Atmosphäre geleitet. (Hesse et al. 2004)

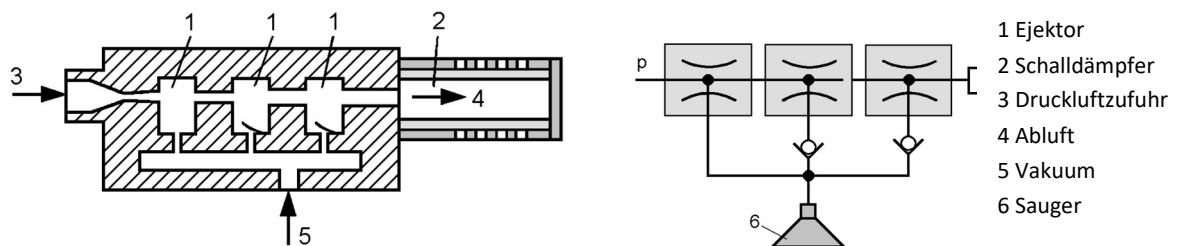


Abbildung 3-11: Aufbau eines Mehrstufenejektors (links) und das dazugehörige Schaltbild (rechts) (Hesse et al. 2004)

Ein erhöhtes Saugvermögen ist besonders wichtig, wenn zwischen Handhabungsobjekt und Sauger die Wirkfläche nicht abgedichtet werden kann (vgl. *Abbildung 3-3*). Das ist zum Beispiel bei Handhabungsobjekten aus porösem oder luftdurchlässigem Material der Fall oder auch wenn aufgrund der Geometrie des Objektes nur eine Teilbelegung des Saugers möglich ist.

Coanda-Prinzip

Eine weitere Möglichkeit das Saugvermögen zu verbessern, ist der Einsatz von Coanda-Ejekto- ren. Vakuumbreifer, die auf dem Coanda-Prinzip beruhen, werden mit Druckluft beaufschlagt. Die Druckluft wird beschleunigt, indem sie durch einen schmalen Ringspalt geführt wird. Durch die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit kommt es zum sogenannten „Coanda-Effekt“ in dem die beschleunigte Luft aus dem Ringspalt austritt und einer konvexen Oberfläche folgt. Durch das Entlangströmen der Luft an der Oberfläche wird die Umgebungsluft im Sauger mitge- rissen und es entsteht ein Unterdruck. Die mit der Umgebungsluft vermischte Druckluft wird über ein Abluftrohr an die Atmosphäre abgegeben. Der Vorteil der Coanda-Greifer liegt in ihrem hohen Saugvermögen und ihrem geringen Luftverbrauch. Durch den hohen Volumenstrom ist eine Teilbelegung der Saugfläche möglich. (Lien und Davis 2008)

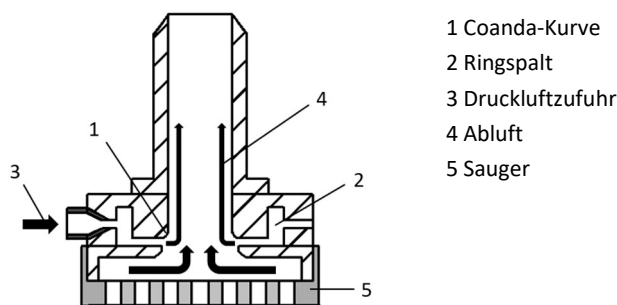


Abbildung 3-12: Aufbau eines Greifers mit Coanda-Prinzip nach (Fleischer et al. 2016)

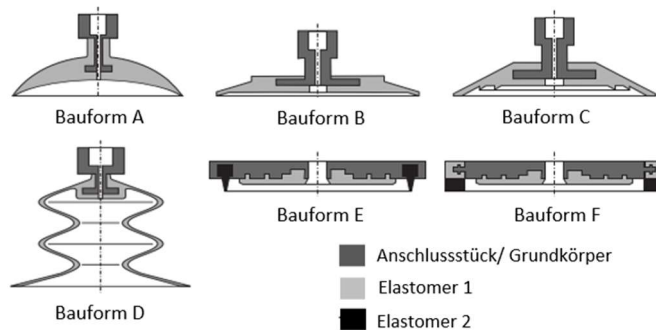
3.3.5 Vakuumsauger

Ausführungsvarianten und Bauformen von Saugern

Vakuumsauger werden in den verschiedensten Varianten in der Praxis eingesetzt (Hesse et al. 2004; Kern 2016). Ihre Vorteile sind die technische Einfachheit, das Aufbringen großer Kräfte, der schonende Kontakt mit dem Greifobjekt und eine gute steuer- und regelbare Haltekraft (Kern 2016). Vakuumsauger lassen sich in Flach-, Balgsauger oder in Saugplatten mit Dichtlippen einteilen (Kern 2016), wie in

Abbildung 3-13 zu erkennen ist. Balgsauger gelten als besonders flexibel und anpassungsfähig, da sie am Werkstück leichte Höhenunterschiede ausgleichen können (Hesse et al. 2004). Sie werden häufig für biegeschlaffe Werkstücke eingesetzt, wie beispielsweise bei folienverpackten Produkten (J. Schmalz GmbH 2022a). Flach- und Balgsauger werden rund oder oval ausgeführt (Kern 2016). In der Regel werden letztere vor allem bei länglichen und schmalen Handhabungs- objekten eingesetzt (Kern 2016). Vakuumsauger haben einen einfachen Aufbau (Kern 2016). Die Eigenstabilität der Sauger wird durch das metallische Anschlussstück erzeugt, welches kraft- und formschlüssig von mit dem elastischen Teil des Sauglements ummantelt wird (Kern 2016). Zur zusätzlichen Stabilisierung werden in einigen Saugern auch Platten installiert (Braun 1989). Je nach Anwendungsfall ist in Saugern eine Dichtlippe und Reibeinlage integriert (Kern 2016). Die Dichtlippe dichtet das zu evakuierende Volumen unterhalb des Saugers ab und verhindert somit

das Auftreten von Leckagen (Kern 2016). Die Reibeinlagen werden zur Aufnahme von Abscherkräften im Vakuumsauger integriert (Kern 2016). Die Dichtlippe und Reibeinlage können aus demselben Werkstoff oder aus verschiedenen Werkstoffen hergestellt werden (Kern 2016).



Bauform	Typbezeichnung	Besonderheit	Dichtlippe
A	Flachsauggreifer	ohne Metallverstärkung	integriert
B	Flachsauggreifer	mit Metallverstärkung	integriert
C	Flachsauggreifer	mit Metallverstärkung	mehrfach integriert
D	Balgsauggreifer	ohne Metallverstärkung	integriert
E	Saugplatte	Elastomerreibeinlage	steckbare 1-Komponenten-Dichtlippe aus Moosgummi
F	Saugplatte	Elastomerreibeinlage	steckbare 2-Komponenten-Dichtlippe aus Moosgummi

Abbildung 3-13: Bauformen von Vakuumsaugern nach (Braun 1989) und (Kern 2016)

Werkstoff für Vakuumsauger

In der Regel werden Vakuumsauger aus Elastomeren hergestellt. Diese werden auf Basis von Naturkautschuk oder Kunstkautschuk hergestellt. Elastomere sind visko-elastisch, d.h. in Abhängigkeit der Temperatur weisen sie unterschiedlichen Materialeigenschaften auf. Beim Einsatz von Vakuumsaugern muss daher auf die Arbeitstemperatur geachtet werden. Zudem ermöglicht die Elastizität der Elastomere eine gute Anpassung an die geometrische Form des Handhabungsobjektes. In *Abbildung 3-13* sind die dargestellten Bauformen A bis D aus einem Elastomer hergestellt. Bei den Bauformen E und F besteht die Dichtlippe in Regel aus Moosgummi (z. B. EPDM, CR, NR). Die Bauformen E und F kommen bei Handhabungsobjekten zum Einsatz, die entweder inhomogene Oberflächen oder große Rauheiten aufweisen. (Kern 2016)

In der folgenden Tabelle findet man eine Materialübersicht für Vakuumsauger in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften.

Tabelle 3-2: Materialübersicht für Vakuumsauger (Hesse et al. 2004)

Materialart	Temperatur in °C	Verschleiß- festigkeit	Beständigkeit gegen		Bemerkungen
			Öl und Fett	Wetter, Ozon	
Nitrilkaut- schuk	-40 bis 70	gut	sehr gut	genügend	kälteflexibel, wasserbe- ständig bis 70 °C
Silikonkaut- schuk	-70 bis 200	genügend	gut	sehr gut	abdruckarm wenn farblos, weiß, beige
Naturkaut- schuk	-40 bis 80	sehr gut	nicht empfoh- len	genügend	hohe Standzeit, abdruck- arm wenn farblos
Polyu- rethan	-25 bis 80	sehr gut	sehr gut	sehr gut	hohe Standzeit, sehr ab- druckarm
Fluorkaut- schuk	-20 bis 200	gut	sehr gut	sehr gut	hoch chemikalienbeständig, sehr abdruckarm
Chloropren	-40 bis 90	sehr gut	gut	gut	besonders witterungsbe- ständig
Polyvinyl- chlorid	-20 bis 85	sehr gut	genügend	genügend	sehr hohe Standzeit
Äthylen/ Propylen/ Dien-Kaut- schuk	-40 bis 130	genügend	genügend	sehr gut	heißdampf- und chemika- lienbeständig

3.3.6 Flächensauggreifsysteme

Zur Handhabung großflächiger Bauteile sind meistens mehrere Sauger notwendig. Die Sauger können dazu an unterschiedlichen Stellen platziert und über eine Tragstruktur verbunden werden. Das Vakuum muss auf die verschiedenen Stellen der Sauger verteilt werden. Dabei gilt zu beachten, dass der Durchmesser der Leitungen zu den unterschiedlichen Saugern nicht zu klein sein darf, da sonst der Strömungswiderstand steigt. Zudem dürfen die Leitungen nicht zu lang sein, da sonst die Ansaugzeit steigt. Eine Alternative zu den individuell platzierten Saugern bieten Verteiler. Verteiler sind Blöcke, die mit vielen abgehenden Anschlüssen ausgestattet sind. (Hesse et al. 2004)

Wenn in einer Gruppe von Saugern einer oder mehrere nicht belegt sind, bieten Strömungsventile eine zusätzliche Sicherheit. Strömungsventile können entweder mit Schwimmern oder Verschlusskugeln ausgeführt werden. Sobald ein Vakuumsauger nicht belegt oder defekt ist, wird der Schwimmer oder die Verschlusskugel infolge der größeren Strömungsgeschwindigkeit an den Anschluss des Saugers gepresst, sodass dieser vom Vakuumkreislauf abgetrennt wird. (Hesse et al. 2004)

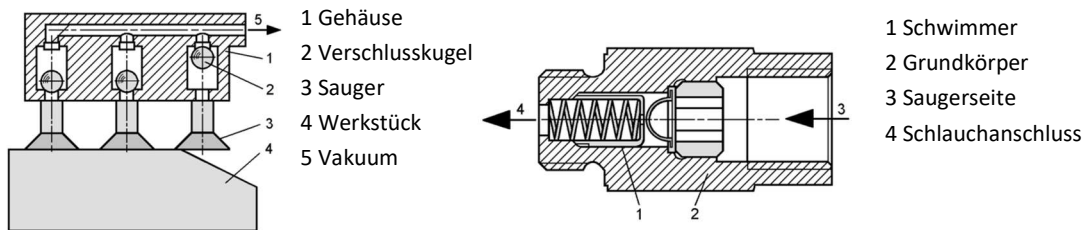


Abbildung 3-14: Strömungswiderstand mit Verschlusskegeln (links) und mit Schwimmer (rechts) (Hesse et al. 2004)

Strömungswiderstände können auch in Form von Sacklöchern (J. Schmalz GmbH 2022b) oder Ventildfolien ausgebildet werden (J. Schmalz GmbH 2022d).

3.3.7 Vakuumgreifsysteme für spezielle Anwendungen

Bernoulli-Greifer

Vakuumgreifer, die nach dem Bernoulli-Prinzip funktionieren, werden Druckluft- oder Bernoulli-Greifer genannt. Das Funktionsprinzip dieser Greifer basiert auf dem aerodynamischen Paradoxon. Dabei wird der Greifer mit Druckluft beaufschlagt, die über eine Düse an der Unterseite des Greifers austritt (vgl. *Abbildung 3-15*). Zwischen Handhabungsobjekt und Unterseite des Greifers strömt die Luft entlang. Durch die Stromlinienverengung in diesem Bereich wird die Luft beschleunigt und der Druck fällt unter den Umgebungsdruck. Durch den Unterdruck entsteht eine aerodynamische Auftriebskraft, wodurch das Handhabungsobjekt gehalten wird. Dieser Effekt bildet sich nur aus, wenn eine Gegenplatte vorhanden ist, sodass sich ein Spalt zwischen Handhabungsobjekt und Greifer ausbilden kann. Je kleiner dieser Spalt ist, desto größer ist die Haltekraft. Druckluftgreifer eignen sich besonders für die Handhabung von fragilen Greifobjekten, da kein direkter Kontakt zwischen Handhabungsobjekt und Greifer entsteht. (Hesse et al. 2004)

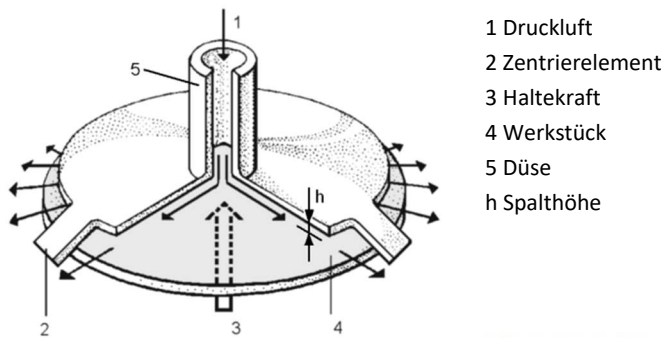
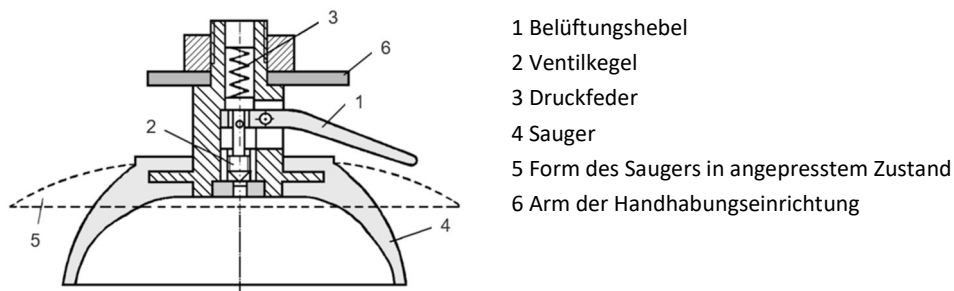


Abbildung 3-15: Schematischer Aufbau eines Druckluftsaugers (Hesse et al. 2004)

In der Praxis werden die Greifer allerdings aufgrund ihrer vergleichbar geringen Haltekraft selten eingesetzt (Kern 2016).

Haftsauggreifer

Der Haftsauger gilt als ein passiver Vakuumbreifer, da er an keinen Vakuumerzeuger angeschlossen werden muss. Der Unterdruck wird erzeugt, indem ein Scheibensauger mit weichen Dichtlippen gegen eine glatte Fläche gepresst wird (vgl. *Abbildung 3-16*). Dieses Anpressen kann durch die Gewichtskraft des Handhabungsobjektes oder durch eine externe Krafteinwirkung geschehen. Neben dem Auspressen der Luft können Haftsauger auch durch die Volumenvergrößerung des Saugraumes ein Vakuum erzeugen. Bei diesen Saugern ist ein Kolben im Greifer integriert. Sobald der Kolben mit einer Hubkraft F_H gezogen wird, vergrößert sich das Volumen unter dem Sauger und es entsteht ein Unterdruck zwischen Dichtlippe und Werkstück. Solange das Lüften der Sauger nicht fernbetätigt über einen Elektromagneten erfolgt, sind die Greifer vom Ausfall des Energienetzes unabhängig und somit sicher. Haftsauger können auch bei leicht gewölbten Flächen eingesetzt werden. Leckageverluste können allerdings nicht ausgeglichen werden, so dass ihr Einsatz stark von der Oberflächenbeschaffenheit der Handhabungsobjekte abhängt. Der Unterdruck kann dementsprechend nur über einen bestimmten Zeitraum aufrecht gehalten werden. Haftsauggreifer werden üblicherweise zum Transport von Glasscheiben oder Kunststoffplatten genutzt. (Hesse et al. 2004)



- 1 Belüftungshebel
- 2 Ventilkegel
- 3 Druckfeder
- 4 Sauger
- 5 Form des Saugers in angepresstem Zustand
- 6 Arm der Handhabungseinrichtung

Abbildung 3-16: Schematischer Aufbau eines Haftsaugers mit Belüftungshebel (Hesse et al. 2004)

4 Grundlagen der Klebstoffverarbeitung

4.1 Grundlagen des industriellen Klebens

Grundsätzlich gehört das Kleben zu den stoffschlüssigen Fügeverfahren (Habenicht 2016). Die DIN 8593 definiert Kleben als das Fügen unter Verwendung eines Klebstoffes, der die Fügeile durch Flächenhaftung (Adhäsion) und innere Festigkeit (Kohäsion) verbindet (DIN 8593-8: 2003-09). Als Klebstoff gilt ein nichtmetallischer Werkstoff (DIN EN 923: 2016-03). Die Festigkeit einer Klebung hängt vom Verhältnis der Kohäsionsfestigkeit in der Klebschicht und der Adhäsionsfestigkeit in den Grenzschichten ab (vgl. *Abbildung 4-1*) (Habenicht 2009).

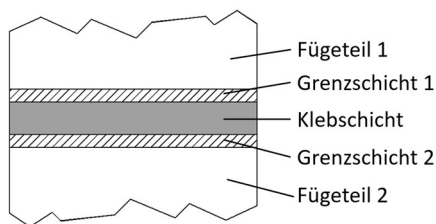


Abbildung 4-1: Aufbau einer Klebung nach (Habenicht 2009)

Nur durch eine qualitativ hochwertige Herstellung der Klebung, kann die Ausbildung der adhäsiven und kohäsiven Festigkeiten sichergestellt werden. Daher muss auf die Qualität der Prozessschritte während des Klebens geachtet werden. Im ersten Schritt wird der Klebstoff bevorratet oder im Fall von mehrkomponentigen Klebstoffen deren Einzelkomponenten. Im letzteren Fall erfolgt anschließend das Mischen der Komponenten. Im nächsten Schritt wird, sofern erforderlich, die Werkstückoberfläche der Fügeile vorbehandelt. Es folgt die Klebstoffverarbeitung. Dabei wird nach der Bereitstellung der Werkstoffe, zunächst der Klebstoff an die Fügeile gefördert und über das Auftragssystem appliziert. Diesen Vorgang bezeichnet man als Dosieren. Nachdem die Bauteile zusammengefügt wurden, werden sie in der Fügeposition fixiert bis der Klebstoff ausgehärtet ist. Abschließend erfolgt die Qualitätskontrolle der Klebung. (Habenicht 2016)

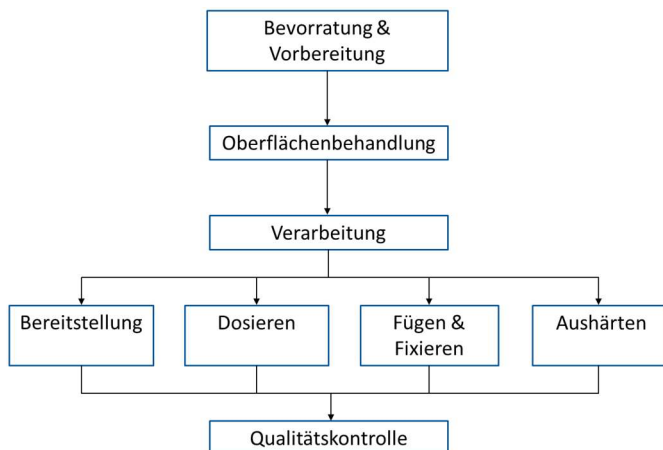


Abbildung 4-2: Prozessschritte bei der Herstellung einer Klebung nach (Habenicht 2016)

Darüber hinaus können die notwendigen Maßnahmen zur Herstellung in drei Phasen untergliedert werden, die Pre-, In- und Post-Prozess-Phase. In der Pre-Prozess-Phase werden verschiedene planerische Entscheidungen getroffen. Dazu gehören unter anderem die verschiedenen konstruktiven Merkmale zur Erfüllung des Anforderungsprofils, die Auswahl des Klebstoffsystems und der dazugehörigen Systemtechnik sowie das Festlegen einer grundsätzlichen Qualitätssicherungsstrategie. Die darauffolgende In-Prozess-Phase umfasst das Vorbehandeln und Fördern, das Dosieren und den Auftrag des Mediums, das Fügen und Fixieren der Bauteile, sowie den Aushärtvorgang. In der Post-Prozess-Phase wird die Qualität der Fügeverbindung kontrolliert. Dazu werden einige Verbindungen strichprobenartig durch zerstörende oder zerstörungsfreie Prüfverfahren überprüft. (Schuller 1998)

4.1.1 Auftragen der Klebstoffe

Das Auftragen von Klebstoff erfolgt je nach Anwendung in Form von Punkten, Linien, Raupen oder als Fläche. Bei der Wahl des Auftragsverfahrens sind folgende Kriterien zu beachten:

- Art des Klebstoffes
(ein- oder zweikomponentiger Klebstoff, Verarbeitungszeit, Viskosität, Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit)
- Aufzutragende Klebstoffmenge
- Gewünschter Automatisierungsgrad, Auftragsgeschwindigkeit
- Wahl des Auftragsbildes zwischen Punkt- Linien- oder Flächenauftrag
- Form der Fügefläche
- Genauigkeit der zu dosierenden Menge (Habenicht 2016).

Es gibt eine Vielzahl von Auftragsverfahren. In der folgenden Abbildung sind die Verfahren dargestellt, die mit zunehmender Klebstoffviskosität zur Verfügung stehen. Allerdings sind bei der Anwendung eines entsprechend hohen Druckes ebenfalls Klebstoffe mit sehr hohen Viskositäten durch Spritzen verarbeitbar. (Habenicht 2016)

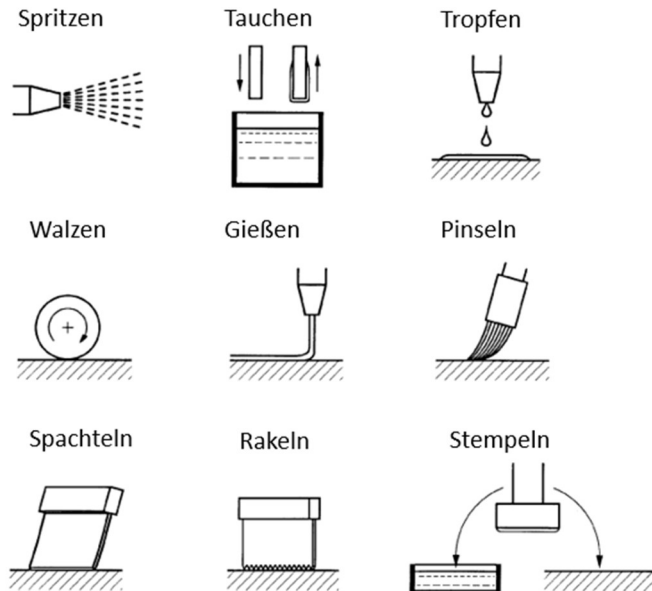


Abbildung 4-3: Auftragsverfahren für Klebstoffe (Habenicht 2016)

4.1.2 Klebstoffe in der industriellen Anwendung

Die zuvor beschriebenen Maßnahmen zur Herstellung einer Klebung hängen direkt vom eingesetzten Klebstoff ab (Habenicht 2016). Grundsätzlich lassen sich Klebstoffe in Abhängigkeit ihrer chemischen Basis und nach ihrem Abbindemechanismus einteilen (Habenicht 2009). Für die anwendungsorientierte Betrachtung eignet sich die Klassifizierung nach Letzterem (Mosandl 2004; Schlickerrieder 2007). Der Abbindemechanismus wird in die folgenden Kategorien unterteilt:

- Chemisch reagierende Klebstoffe
- Physikalisch abbindende Klebstoffe
- Reaktive Schmelzklebstoffe (Habenicht 2009).

Aufgrund der hohen Feistigkeitswerte haben die chemisch reagierenden Klebstoffe die größte Bedeutung in der industriellen Fertigung (Schlickerrieder 2007). Sie bestehen aus reaktionsbereiten Monomeren, die aufgrund ihrer geringen Größe meistens in flüssiger Form vorliegen (Habenicht 2016). Zur Klebung wird der flüssige Klebstoff auf ein Bauteil aufgetragen (Habenicht 2016). Nach dem Fügen und Fixieren der Bauteile findet eine chemische Reaktion in der Klebefuge statt (Habenicht 2016). Aus den ursprünglich flüssigen Monomeren bildet sich eine feste Klebschicht (Habenicht 2016). Dieser zeitabhängige Vorgang wird als Härten, Aushärten oder auch Abbinden bezeichnet (Habenicht 2016). Da er über eine chemische Reaktion abläuft, spricht man von chemisch reagierenden Klebstoffen oder von Reaktionsklebstoffen (Habenicht 2016).

4.1.3 Klebstoffe in der industriellen Anwendung mit Holz

In der holzverarbeitenden Industrie hat sich die Bezeichnung „Leim“ statt „Klebstoff“ trotz der normenmäßigen Bestrebungen durchgesetzt. Dennoch soll in den folgenden Ausführungen der Begriff „Klebstoff“ gewählt werden. Das Kleben zählt zum am meisten eingesetzten Fügeverfahren in der Holzverarbeitung. Die dabei eingesetzten Klebstoffarten basieren im Wesentlichen auf Dispersionen, gefüllten und ungefüllten Schmelzklebstoffen sowie Folienklebstoffen. Die wichtigsten Grundstoffe sind Ethylen-Vinylacetat, Polyamide, Polyvinylacetat-Polyvinylalkohol-Copolymere und Polyurethane. Insgesamt stehen Auftragsverfahren im Vordergrund, die für die vorwiegend durchgeführten Flächenverklebungen ausreichend große Verarbeitungszeiten aufweisen und über Gießen, Walzen oder Sprühen verarbeitet werden können. (Habenicht 2009)

Polyurethanklebstoffe

Polyurethanklebstoffe zählen zu den duroplastischen Klebstoffen. Sie erhärten durch Feuchtigkeit, die entweder der Umgebungsluft (ca. 30-70% relative Feuchtigkeit) oder den zu verklebenden Bauteilen entnommen wird. Der Klebstoffauftrag erfolgt in der Regel in Wellen- oder Raupenform. Polyurethanklebstoffe verfügen über eine hohe Festigkeit und eignen sich für sogenannte „elastische Klebungen“, bei denen die Klebschichten über ein ausreichendes Verformungsvermögen verfügen, um Unebenheiten in den Fügeteilen auszugleichen. (Habenicht 2016)

Polyvinylacetat-Dispersionen

Polyvinylacetat-Dispersionen bilden die chemische Basis für die sogenannten „Weißleime“. Sie zählen zu den thermoplastischen Klebstoffen. Dispersionsklebstoffe beinhalten Wasser als Lösungsmittel und Polymerteilchen. Während dem Aushärten verdampft das Lösungsmittel, sodass die Polymerteilchen zusammenschmelzen und eine Klebschicht bilden. Sie zeichnen sich ebenfalls durch hohe Festigkeiten aus. (Habenicht 2016)

4.2 Anlagenkomponenten zur automatisierten Klebstoffverarbeitung

Klebstoffe können manuell, teilautomatisiert oder vollautomatisiert durch eine Dosierstation auf ein Werkstück aufgetragen werden (Endlich 1995). Dabei hat der automatisierte Klebstoffauftrag den Vorteil eine höhere Reproduzierbarkeit der Raupenform und Positionierung auf dem Bauteil erzeugen zu können (Mosandl 2004). Grundsätzlich lässt sich der Auftragsprozess in Fördern und Bewegen unterteilen (Schuller 1998). Das Fördern und Dosieren erfolgt durch ein Dosiersystem (Schuller 1998). Ein Dosiersystem besteht in Abhängigkeit seiner Anwendung aus mehreren Funktionseinheiten (vgl. *Abbildung 4-4*) (Habenicht 2009). Das Bewegen erfolgt beim automatisierten Klebstoffauftrag durch ein Handhabungsgerät (Schuller 1998).

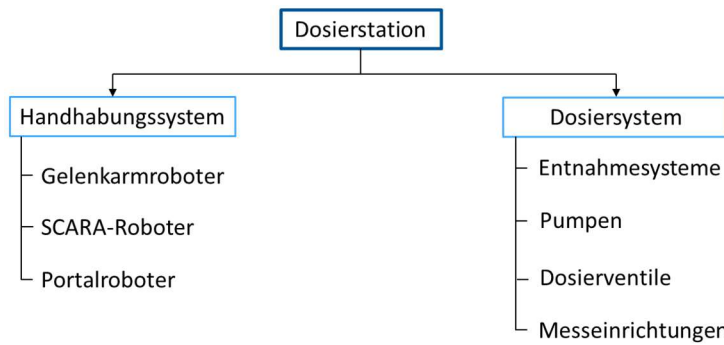


Abbildung 4-4: Auswahl an Komponenten zum Aufbau einer automatisierten Dosierstation nach (Schuller 1998) und (Habenicht 2009)

Verbindlichen Richtlinien und Anhaltswerte zur Anlagengestaltung von Dosierstationen gibt es nicht (Schuller 1998). Daher muss die Auswahl des Klebstoffsystems und der dazugehörigen anlagentechnischen Ausstattung in Abhängigkeit der anwendungsspezifischen Anforderungen erfolgen (Mosandl 2004).

4.2.1 Entnahmesysteme

Entnahmesysteme sind der Ausgangspunkt jeder Dosierung. In Abhängigkeit der zu verarbeitenden Stoffes haben sie unterschiedliche Formen. In der Regel werden sie mit Druckluft beaufschlagt. Zudem wird meistens versucht das Liefergebinde direkt als Vorratsbehälter zu nutzen. Allerdings kommt es vor, dass Umfüllvorgänge aufgrund der kontinuierlichen Stoffversorgung kaum zu vermeiden sind. In der folgenden Abbildung sind wichtige Formen von Entnahmesystemen und ihre Anwendung beschrieben. (Endlich 1995)

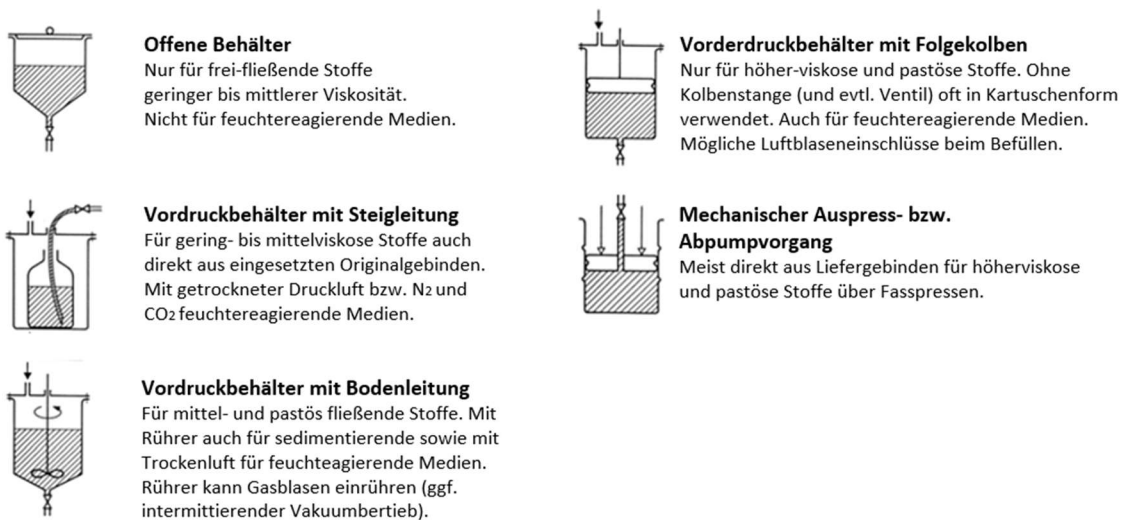


Abbildung 4-5: Wichtige Formen von Entnahmesystemen nach (Endlich 1995)

4.2.2 Dosierventile

Die Funktion von Dosierventilen besteht darin, kleine Dosiervolumina ($> 1\text{mm}^3$) reproduzierbar auszustößen. Die Dosierung kann durch folgende Methoden erfolgen: (Habenicht 2009)

- Druck/ Zeit Dosierung:
Die Dosierung geht von einem unter Druck stehenden Dosiermaterial aus. Die Abgabemenge wird von Druck im Behälter und der Öffnungszeit des Ventils bestimmt.
- Volumetrische Dosierung:
Die volumetrische Dosierung erfolgt nach Volumenmengen. Sie gilt als das am häufigsten eingesetzte Verfahren und kann zeitabhängig oder zeitunabhängig erfolgen.
- Gravimetrische Dosierung:
Die Dosierung erfolgt nach Gewichtsmengen. Sie wird bei überdurchschnittlichen Anforderungen an die Dosiergenauigkeit eingesetzt.

Dosierventile gibt es in verschiedenen Bauweisen. Im Folgenden werden einige mit ihren typischen Anwendungen genannt.

Quetschventile

Bei Quetschventilen erfolgt die Dosierung durch das Zusammendrücken des Materialschlauches (vgl. *Abbildung 4-6*) (VIEWEG GmbH 2021). Sie werden meistens nur für dünnflüssig bis mittelviskose Stoffe eingesetzt und sind bei Drücken $< 3\text{bar}$ geeignet (Endlich 1995). Ihre Dosier- und Wiederholungsgenauigkeit ist gering mit ± 7 bis 10% (Endlich 1995). In der Regel muss der Schlauch regelmäßig gewechselt werden, da sonst die Quetschstelle im Schlauch aufgrund von Übermüdung bricht (VIEWEG GmbH 2021). Quetschventile werden in der Regel als Notlösung bei schwierigen Klebstoffen eingesetzt (VIEWEG GmbH 2021).

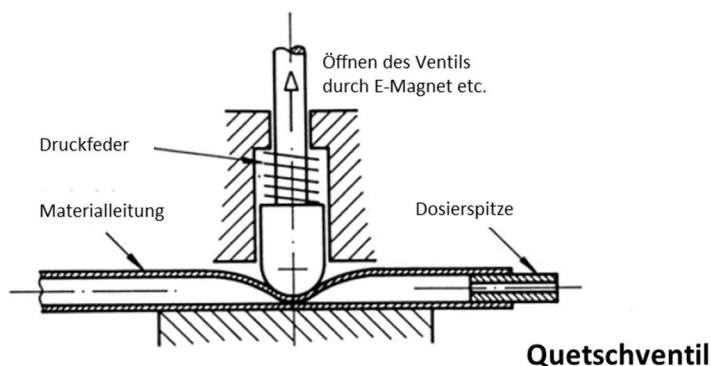


Abbildung 4-6: Schematischer Aufbau eines Quetschventils nach (Endlich 1995)

Nadeldosierventile

Nadeldosierventile sind selbstzentrierende Kegelventile, die aus zwei Funktionseinheiten bestehen: dem Antrieb und dem Dosiersystem (Habenicht 2009). Der Antrieb erfolgt entweder pneumatisch oder elektrisch (Habenicht 2009). Das Dosiersystem besteht aus Dosierspitze und Dosiernadel, sowie einem Rückschlagventil (vgl. *Abbildung 4-7*) (Habenicht 2009). Nadeldosierventile sind in Ruhestellung geschlossen (VIEWEG GmbH 2021). Beim Öffnen des Ventils wird die Dosiernadel über eine definierte Länge aus dem Nadelsitz zurückgezogen und ermöglicht so einen exakten und wiederholbaren Materialfluss (VIEWEG GmbH 2021). Das Schließen des Ventils erfolgt über die Federkraft des Rückschlagventils (VIEWEG GmbH 2021). Nadelventile werden für sehr genaue Dosierungen eingesetzt ($\pm 2\%$) (Endlich 1995). Abhängig vom Hersteller eignen sie sich für nieder- bis hochviskose (DOPAG 2022) oder für nieder- bis mittelviskose Medien (VIEWEG GmbH 2021).

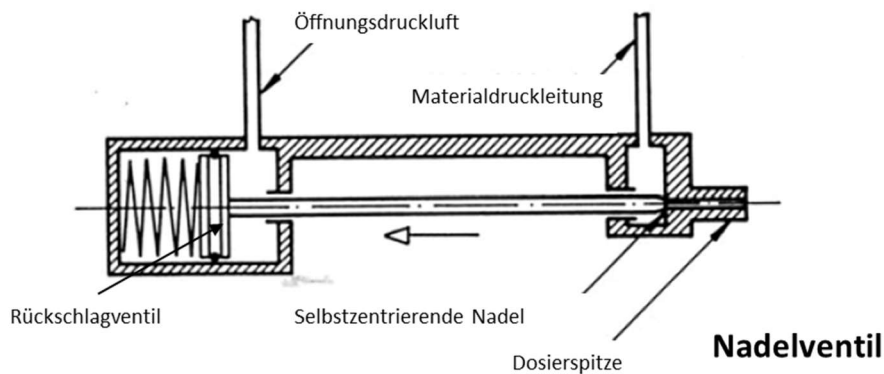


Abbildung 4-7: Schematischer Aufbau eines pneumatischen Nadeldosierventils nach (Endlich 1995)

Rückzugventile

Rückzugventile (VIEWEG GmbH 2021), auch Snuffback-Ventile (Industrieverband Klebstoffe e.V. 2022) oder Dosierventile mit Differenzialkolben genannt, bestehen aus einer Dosierkammer mit Differenzialkolben, einem Pneumatikzylinder und einem Steuerteil (vgl. *Abbildung 4-8*) (Habenicht 2009). Sie sind im Ruhezustand geschlossen (VIEWEG GmbH 2021). Das Öffnen erfolgt über Steuerluft (VIEWEG GmbH 2021). Dabei fährt der Differenzialkolben nach unten und das Material fließt über den Materialeingang zum Materialausgang (VIEWEG GmbH 2021). Beim Schließen des Ventils wird der Kolben zurückgefahren und es entsteht ein Rücksaugeffekt, sodass ein sauberer Abriss des Klebstoffes an der Auslassdüse unterstützt wird (Habenicht 2009; VIEWEG GmbH 2021; Industrieverband Klebstoffe e.V. 2022). Dosierventile mit Differenzialkolben sind für mittel- bis hochviskose Medien geeignet (VIEWEG GmbH 2021).

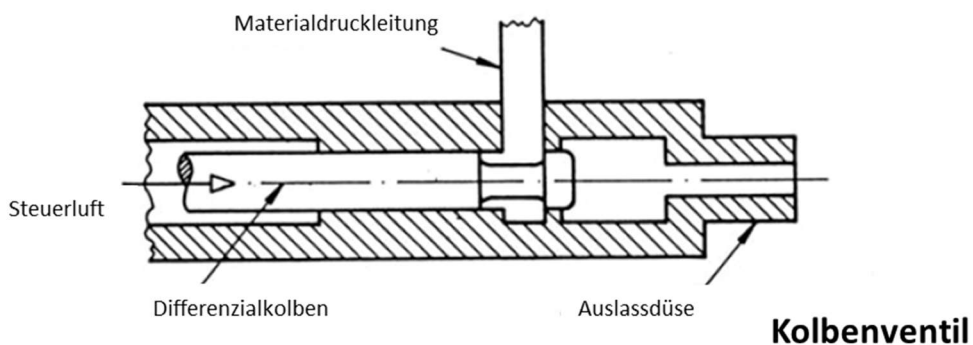


Abbildung 4-8: Schematischer Aufbau eines Rückzugventils nach (Endlich 1995)

4.3 Anforderungen an den automatisierten Klebstoffauftrag

Beim automatisierten Klebstoffauftrag werden hohe Ansprüche an die erreichbare Qualität der Klebeverbindung gestellt (Mosandl 2004). Daher soll in den folgenden Abschnitten die Anforderungen an die Genauigkeit des Klebstoffauftrags dargestellt werden. Dabei wird sich auf das Auftragsverfahren „Gießen“ (vgl. *Abbildung 4-3*) beschränkt. Es wird auf die Genauigkeit der aufzutragenden Klebstoffraupen, sowie deren physikalischen Materialeigenschaften eingegangen. Daraus werden die grundlegenden Anforderungen an die Handhabungseinrichtung abgeleitet. Abschließend wird auf die Maßnahmen zur Qualitätssicherung der Klebung eingegangen.

4.3.1 Form- und Lagegenauigkeit der Klebstoffraupen

Die Form und Lage der Klebstoffraupe tragen maßgeblich zur Qualität der Klebverbindung bei (Mosandl 2004). Nach (Mosandl 2004) müssen dazu folgenden Mindestanforderungen an die Klebstoffraupe gestellt werden:

- Formgenauigkeit der Raupe:
Darunter wird das Verhältnis von Raupenhöhe zu Raupenbreite verstanden. Die Formgenauigkeit beeinflusst im Fügeprozess die Verformung der Raupe. Bei unzulässigen Formabweichungen der Raupe kann keine ausreichende Klebung sichergestellt werden.
- Lagegenauigkeit der Raupe:
Darunter wird die relative Lage der Klebstoffraupe zum Bauteil verstanden. Bei unzulässigen Abweichungen kann auch hier keine ausreichende Klebung sichergestellt werden.

Grundsätzlich hängt die Dimensionierung der Klebstoffraupe von der geforderten Schichtdicke der Klebefuge ab.

4.3.2 Rheologische Randbedingungen

Das Auftragsergebnis ist insbesondere von den rheologischen Eigenschaften des eingesetzten Klebstoffes abhängig (Schuller 1998). Dabei werden Klebstoffe in niedrig-, mittel- und hochviskose Medien eingeteilt, wie in *Abbildung 4-9* dargestellt ist (Habenicht 2016). Wenn die Viskosität eines Mediums über 20.000 [mPa s] liegt, wird dieses als pastös bezeichnet (Habenicht 2016).



Abbildung 4-9: Viskositätsbereiche nach (Habenicht 2016)

Die Viskosität eines Klebstoffes muss unter anderem auch auf die Oberfläche der Fügeteile abgestimmt werden. In der Regel erfordern raue Oberflächen niedrigere Viskositäten als glatte Oberflächen, um eine gleichmäßige Benetzung sicherzustellen. Für die Herstellung dicker Klebschichten eignen sich Klebstoffe mit sehr hohen Viskositäten. (Habenicht 2016)

4.3.3 Anforderungen an die Auftragsmenge

Im Wesentlichen ist die aufzutragende Klebstoffmenge von der Rauheit der Fügeteile abhängig. Dieser Zusammenhang wird in der folgenden Abbildung beispielhaft an Fügeteilen mit einer Rauheit von $50\mu\text{m}$ ($0,05\text{ mm}$) aufgezeigt. Wie in

Abbildung 4-10 a dargestellt, kann die verbindende Klebschicht lediglich die Tiefpunkte ausfüllen, während die Oberflächen sich ihren Spitzen berühren. Eine gleichmäßig ausgebildete Klebschicht ist daher nicht vorhanden. Erst eine Erhöhung des Klebstoffauftragsmenge, wie in

Abbildung 4-10 b zu erkennen ist, führt zu einer Klebschicht, die nicht mehr durch die Rauheitsspitzen beeinträchtigt ist. Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Klebschichtdicke zwischen den Rauheitsspitzen mindestens dem Wert der maximalen Rauheit entspricht. (Habenicht 2016)

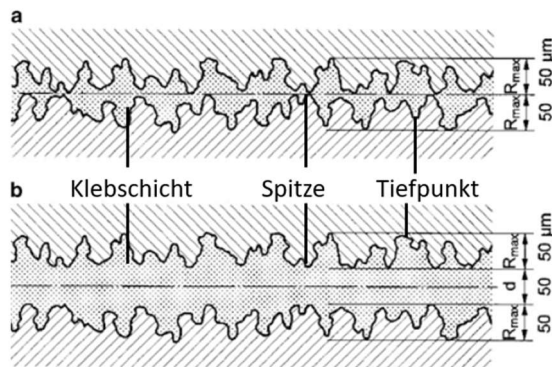


Abbildung 4-10: Zusammenhang von Klebschichtdicke und Oberflächenrauheit (Habenicht 2016)

4.3.4 Anforderungen an die Handhabungseinrichtung

Beim automatisierten Klebstoffauftrag kommt der Handhabungseinrichtung eine hohe Bedeutung zu (Mosandl 2004). Basierend auf den Qualitätsanforderungen bezüglich der Form- und Lagegenauigkeit der Klebstoffraupen, leitet (Schuller 1998) folgende Anforderungen für Handhabungsgeräte ab:

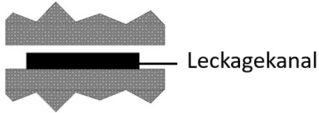

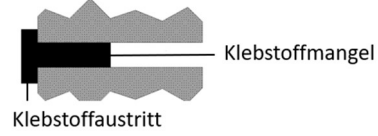
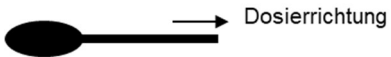


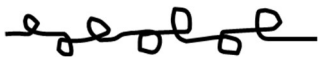
- Hohe Positioniergenauigkeit und Bahntreue
- Ausreichender Arbeitsraum mit frei programmierbaren Achsen
- Ausreichende Tragkraft
- Hohe Eigensteifigkeit bei geringen Massen
- Hohe konstante Geschwindigkeit und Beschleunigungen

In der Regel erfüllen moderne Handhabungsgeräte und deren Steuerung die oben genannten Anforderungen (Mosandl 2004).

4.3.5 Dosierfehler und Fehlerursachen

Dosierfehler können durch die falsche Form und falsche Lage der Klebstoffraupen hervorgerufen werden (Mosandl 2004). Während die falsche Form vielfältige Ursachen haben kann (Mosandl 2004; Schlickerrieder 2007), tritt die falsche Lage oft aufgrund fehlerhaft abgestimmten Steuerungsparametern des Handhabungsgeräts auf (Mosandl 2004). In der folgenden Tabelle sind typische Auftragsfehler und ihre Ursache dargestellt:

Tabelle 4-1: Dosierfehler und Ursachen nach (Mosandl 2004) und (Schlickerrieder 2007)

DOSIERFEHLER	URSACHE
Unterdosierung 	- Verfließen - fehlerhafte Förder-/Bewegungs-/Dosierparameter
Überdosierung 	- fehlerhafte Förder-/Bewegungs-/Dosierparameter
Falsche Lage 	- fehlerhafte Steuerung
Anfangsklecks 	- Erhöhter Materialdruck beim Öffnen des Ventils - Fehlerhafte Steuerung
Einschnürung 	- System-Dichtigkeit - fehlerhafte Förder-/Bewegungs-/Dosierparameter
Fadenbildung 	- Materialeigenschaften - bei Schließbewegung wird kein Vakuum erzeugt
Schwingende Raupe 	- Abstand der Dosierspitze-Bauteil zu groß - evtl. Dosierspitze verschmutzt

4.3.6 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung beim Kleben kann zu unterschiedlichen Einsatzzeitpunkten erfolgen (Mosandl 2004). Dabei können qualitätssichernde Maßnahmen präventiv in der Pre-Prozess-Phase, direkt in der In-Prozess-Phase oder ergebnisorientiert in der Post-Prozess-Phase erfolgen (Schuller 1998). Die ergebnisorientierte Qualitätssicherung findet entweder zerstörend oder zerstörungsfrei statt (Schuller 1998). Sie beinhaltet die Prüfung qualitätsrelevanter Produktmerkmale, wie der Geometrie, Oberfläche oder Aussehen der Klebung (Schuller 1998). Durch die ergebnisorientierte Prüfung lassen sich Aussagen hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens, sowie Auftreten von Fehlstellen in der Klebung treffen (Schuller 1998).

5 Entwicklung und Bewertung des Handhabungssystems

5.1 Allgemeines

5.1.1 Auswahl der Greifprinzipis und Greifsystems

Da die Platten von oben gegriffen werden und das Umsetzen der Platten waagrecht-waagrecht erfolgen soll, bietet es sich an eine Kontakteben, d.h. ein Kraftfeld, zwischen Greifer und Platte herzustellen. Dieses Kraftfeld kann entweder mit Hilfe von Unterdruck, einem Magnetfeld oder einer Adhäsivschicht erzeugt werden (vgl. Kapitel 3.2). Aufgrund der fehlenden ferromagnetischen Eigenschaften der Holzwerkstoffplatten scheidet der Einsatz eines magnetischen Greifers aus. Der Einsatz von Adhäsionsgreifern wäre nur unter hohem Verschleiß der Adhäsivschicht möglich, da die Platten trotz Reinigung nicht vollständig von Holzspänen befreit werden können. Aus diesen Gründen bietet sich für die Handhabung der Platten ein Vakuumgreifsystem an.

Bei der Entwicklung des Handhabungssystems sollten zunächst unterschiedliche Vakuumgreifsysteme entwickelt und bewertet werden. Für die Vakuumgreifsysteme wurden unterschiedliche Vakuumerzeuger ausgewählt, die näher untersucht werden sollten. Da die Anschaffung eines Vakuumbergebläses sich erst bei einer hohen Betriebsleistung lohnt, wurde dieses im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht betrachtet. Insgesamt wurden eine Doppelvakuumpumpe, ein Venturi- und Coanda-Ejektor näher untersucht.

Der Einsatz von Bernoulli-Greifern und Haftsauggreifern wurde von Anfang an ausgeschlossen. Der Bernoulligreifer eignet sich aufgrund seiner geringen Haltkraft nicht. Die Haftsauggreifer sind nur bei Handhabungsobjekten mit glatter Oberfläche einsetzbar.

5.2 Entwicklung und Wahl des Handhabungssystems

Für die Entwicklung des Handhabungssystems wurden in kurzen Entwicklungszyklen drei verschiedene Vakuumgreifsysteme entwickelt, überprüft und bewertet. Die Überprüfung und Bewertung erfolgten nach den folgenden Kriterien:

- Maximal mögliche Haltekraft
- Anwendung mit individuell konturierten Holzwerkstoffplatten
- Anwendung bei unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit der Holzwerkstoffplatten

Im Folgenden werden die entwickelten Vakuumgreifsysteme in Abhängigkeit des gewählten Vakuumerzeugers beschrieben.

5.2.1 Gasfördernde Vakuumpumpe

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Für die Voruntersuchungen mit der gasfördernden Vakuumpumpe wurde das in der folgenden *Abbildung 5-1* dargestellte Vakuumgreifsystem entwickelt.

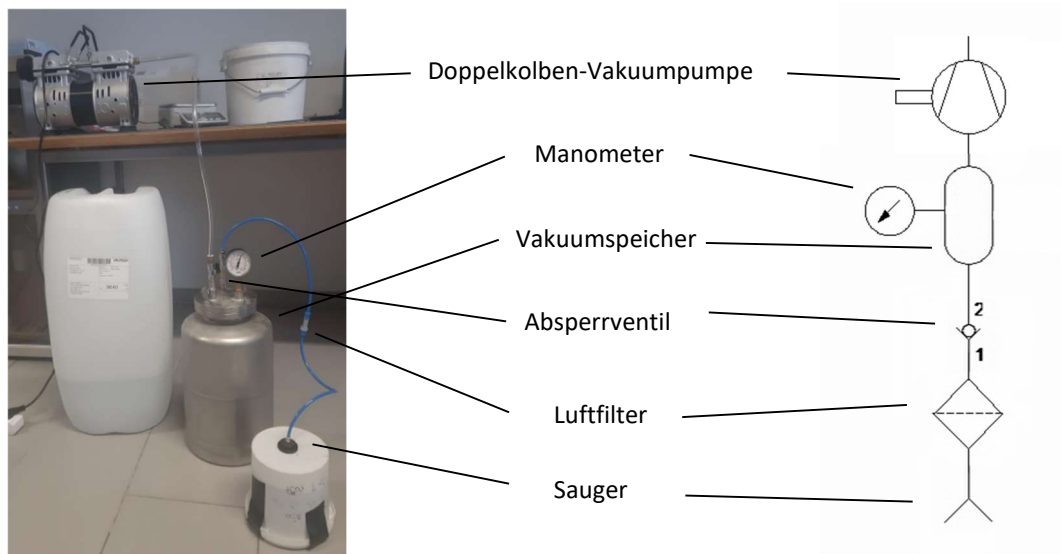


Abbildung 5-1: Vakuumgreifsystem (links) und dazugehöriger Schaltplan (rechts)

Für die Versuche wurde der Unterdruck durch eine Doppelkolben-Vakuumpumpe erzeugt. Der maximal erzeugte Unterdruck lag bei -0,9 bar. Anschließend wurde der Unterdruck in einen Vakuumspeicher geleitet. Zum Lösen des Handhabungsobjektes wurde manuell das Absperrventil zwischen Speicher und Sauger geschlossen (vgl. *Abbildung 5-1*). In der folgenden Tabelle sind die Komponenten des Vakuumgreifsystems dargestellt.

Tabelle 5-1: Komponenten des Vakuumgreifsystems mit gasfördernder Vakuumpumpe

Komponente des Vakuumgreifsystems	Beschreibung	Hersteller
Vakuumerzeuger	Gasfördernde Vakuumpumpe – Doppelkolben-Vakuumpumpe	Structio International
Vakuumspeicher	/	/
Sauger	Bauformen variierend	Herstellung mit Ultimaker 2+
Fluidische Verbindung	Kunststoffschlauch Ø6 mm mit Vakuumfilter	Festo SE & Co. KG
Tragstruktur	Keine Tragstruktur, da Versuche manuell durchgeführt wurden	/

Für die Versuchsreihe wurden Vakuumsauger unterschiedlicher Bauformen mit Hilfe des 3D-Druckers Ultimaker 2+ hergestellt:

Tabelle 5-2: Vakuumsauger für Versuche mit gasfördernder Vakuumpumpe

Bauform	Beschreibung	Material
Flachsauggreifer	 Ø40 mm	TPU 95A
Saugplattengreifer	 Ø30 mm	Grundkörper: PLA Dichtungsring: Rundschnur aus EPDM-Moosgummi (Ø3 mm)

Zunächst wurden die Einsatzfähigkeit der beiden Vakuumsauger an Holzwerkstoffplatten untersucht. Dazu wurden die Sauger auf einer vollflächigen Platte manuell platziert und die maximale statische Haltekraft ermittelt. Im Anschluss wurde dieser Wert, falls möglich, mit der theoretisch berechneten Haltekraft (vgl. *Gleichung (3-3)*) verglichen. Da die Doppelkolbenvakuumpumpen nur über ein geringes Saugvermögen (vgl. *Abbildung 3-10*) verfügen, ist das Greifen nur möglich, wenn die Unterseite des Saugers vollständig vom Handhabungsobjekt abgedeckt wird. Bei individuell konturierten Platten müssen daher Strömungswiderstände an der Unterseite des Saugers installiert werden. Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurde die Einsatzfähigkeit

unterschiedlicher Strömungswiderstände untersucht. Dazu wurden diese an der Unterseite der Saugplattensauger platziert.

Um die Leistungsfähigkeit der Strömungswiderstände zu bestimmen, wurde der Unterdruck vor und während dem Greifen ermittelt. Dabei wurde die Saugerunterseite vollständig mit der Holzwerkstoffplatte bedeckt. Zudem wurde untersucht, ob das Greifen auch bei einer Teilflächenbelegung der Saugerunterseite möglich ist (vgl. *Abbildung 5-2*).



Abbildung 5-2: Saugplattengreifer mit MDF-Platte bei Teilflächenbelegung

Ergebnisse und Diskussion

Die theoretische Haltekraft der Flachsauggreifer wurde nicht berechnet, da sich die wirksame Greiffläche des Saugers in Abhängigkeit des Materials verkleinert (vgl. Kapitel 3.3.2). In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse zur Ermittlung der maximal statischen Haltekraft dargestellt.

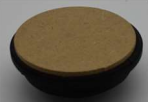
Tabelle 5-3: Ergebnisse der max. stat. Haltekraft mit gasfördernder Vakuumpumpe

Bauform	max. Stat. Haltekraft	Theoretisch stat. Haltekraft
Flachsauggreifer (Ø40 mm)	Greifen nur kurz möglich	/
Saugplattengreifer mit Dichtungsring EPDM (Ø30mm)	40 N (= 4 kg)	67 N (= 6,7 kg)
Saugplattengreifer mit Dichtungsring TPU 95A (Ø30mm)	Greifen nicht möglich	67 N (= 6,7 kg)

Mit Flachsauggreifern war das Anheben der Platten nur kurzzeitig möglich. Dies ist auf die Herstellungsmethode der Sauger zurückzuführen. Durch den 3D-Druck kann keine vollkommen glatte Oberfläche hergestellt werden, sodass der Sauger die Greiffläche an der Holzwerkstoffplatte nicht abdichten kann. Die Saugplattengreifer mit einer Dichtlippe aus EPDM-Moosgummi können die Greiffläche gut abdichten, sodass das Greifen ohne weiteres möglich ist. Grundsätzlich wird die Leistungsfähigkeit von Flachsauggreifern mit integrierter Randabdichtung als niedriger eingestuft, als die von Saugplattengreifern (Götz 1991). Die maximal mögliche Haltekraft der Saugplattengreifer entspricht 40 N und liegt damit deutlich unter der theoretisch ermittelten Haltekraft von 67 N. Einer der Gründe dafür, liegt womöglich am Druckluftanschluss des Saugers, der nicht dicht am Saugplattengreifer befestigt werden konnte. Zudem wurden Leckageverluste in der Berechnung nicht berücksichtigt.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Untersuchungen mit den Strömungswiderständen aufgelistet.

Tabelle 5-4: Ergebnisse der Strömungswiderstände mit gasfördernder Vakuumpumpe

Strömungswiderstand-Material	Messung bei vollflächiger Belegung der Saugerunterseite		Untersuchung bei teilflächiger Belegung
	Unterdruck vor dem Greifen	Unterdruck während dem Greifen	Greifen möglich? (Ja/ Nein)
MDF-Platte (d=3mm) 	-0,6 bar	-0,675 bar	Ja
MDF-Platte (d=3mm) mit Zeitungspapier 	-0,61 bar	-0,7 bar	Ja
MDF-Platte (d=3mm) mit Löchern (Ø1 mm x 20Stk.) 	-0,2 bar	-0,675 bar	Ja
MDF-Platte (d=3mm) mit Löchern (Ø1 mm x 20 Stk.) mit Zeitungspapier 	-0,58 bar	-0,58 bar	Ja
MDF-Platte (d=3mm) mit Löchern (Ø1 mm x 20 Stk.) mit Lochgummimatte 	-0,6 bar	/	Nein
3d-gedruckter Adapter Schalung (PLA) Dichtlippe (EPDM-Rundschnur Ø3 mm) 	-0,21 bar	/	Nein

Der ermittelte Unterdruck vor dem Greifen ist durchschnittlich niedriger als während des Greifens. Das zeigt, dass die Strömungswiderstände luftdurchlässig sind. Mit dem Abdecken der Saugerunterseite durch eine Holzwerkstoffplatte wird die Wirkfläche besser abgedichtet und es baut sich ein höherer Unterdruck auf. Bei Betrachtung der Ergebnisse stellt man fest, dass aus der Kombination von MDF-Platte und Zeitungspapier der höchste Unterdruck im Sauger erzeugt wird. Dies ist vermutlich auf die Struktur des Zeitungspapiers zurückzuführen. Ähnlich wie bei der Fräsunterlage Vilmill des Herstellers PORTATEC GmbH könnte das Zeitungspapier als Vakuumdifusor dienen (PORTATEC GmbH 2022). Dabei wird der Unterdruck gleichmäßig auf das Handhabungsobjekt verteilt. In diesem Versuch wurde eine besonders glatte

Holzwerkstoffplatte eingesetzt, da die steife MDF-Platte bei rauen Platten die Wirkfläche nicht abdichten konnte. Um die Anwendung der Strömungswiderstände auch bei rauen Platten zu ermöglichen, wurde eine Lochgummimatte auf die MDF-Platte gelegt. Allerdings war die Lochgummimatte nicht elastisch genug, um die Wirkfläche abzudichten. Auch der gedruckte Adapter konnte nicht den gewünschten Effekt erzielen. Dies ist auf den zu geringen Unterdruck zurückzuführen, der an der Oberfläche der Holzwerkstoffplatte erzeugt wurde. Eine leistungsstärkere Vakuumpumpe oder eine Vergrößerung der Löcher im Adapter könnten möglicherweise die Leistungsfähigkeit verbessern.

Zusammenfassend konnten die Flachplattensauger mit EPDM-Moosgummi eine hohe statische Haltekraft aufbauen. Die theoretische berechnete Haltekraft ist höher als die praktisch ermittelte, sodass bei einer Optimierung des Saugers möglicherweise eine höhere Haltekraft erzielt werden könnte. Durch die Strömungswiderstände war es möglich die Platten zu greifen, obwohl sie nur teilweise die Unterseite der Sauger bedeckten. Allerdings ist der erzeugte Unterdruck mit Strömungswiderständen zu gering, um Platten mit höherem Gewicht zu halten. Zudem ist das Greifen mit den Strömungswiderständen nur bei glatten Platten möglich. Aus diesen Gründen ist ein Vakuumgreifsystem mit Doppelkolbenvakuumpumpe für die Anwendung mit den Holzwerkstoffplatten nicht geeignet.

5.2.2 Venturi – Ejektor

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Für die Voruntersuchungen mit dem Venturi-Ejektor wurden die folgenden Komponenten für das Vakuumgreifsystem eingesetzt.

Tabelle 5-5: Komponenten des Vakuumgreifsystems mit Venturi-Ejektor

Komponente des Vakuumgreifsystems	Beschreibung	Hersteller
Vakuumerzeuger	Venturi-Ejektor - SEG-15-HS-SDA	J. Schmalz GmbH
Sauger	Flächengreifer – FMxSW 38x22 mm	J. Schmalz GmbH
Fluidische Verbindung	Kunststoffschlauch $\varnothing 6$ mm & $\varnothing 10$ mm	Festo SE & Co. KG
Tragstruktur	Keine Tragstruktur, da Versuche manuell durchgeführt wurden	/
Vakuumregler mit Manometer	Präzisionsdruckregler	k. A.

Der Flächengreifer hat insgesamt 11 Saugzellen (vgl. *Abbildung 5-3*). Jede Saugzelle ist mit einem Strömungswiderstand in Form eines Sackloches ausgestattet. Zur Abdichtung der einzelnen Saugzellen ist ein EPDM-Dichtschaumplatte mit der Höhe von 10 mm auf der Saugerunterseite angebracht. Die maximale Haltkraft des Flächengreifers wird vom Hersteller nicht angegeben. Der Vakuumerzeuger wurde extern an den Flächengreifer angeschlossen. Dieser kann laut Hersteller bei einem Betriebsdruck von 3 - 6 bar eingesetzt werden, allerdings liegt der optimale Betriebsdruck bei 5 bar. In der folgenden *Abbildung 5-3* ist der Flächengreifer, sowie der Schaltplan des Versuchsaufbaus dargestellt:

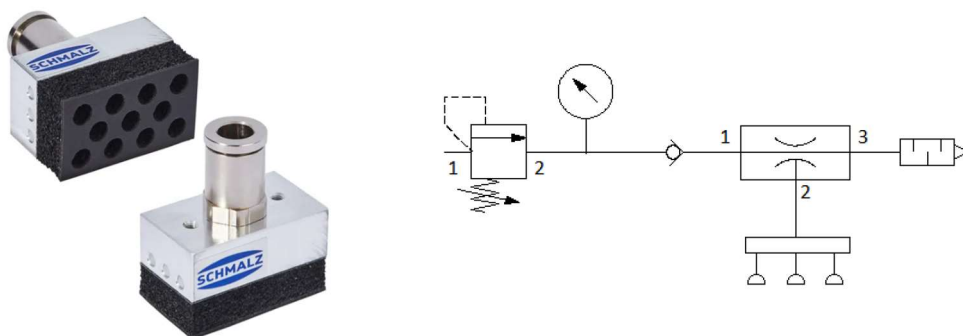


Abbildung 5-3: Flächengreifer FMxSW (links) (J. Schmalz GmbH 2022b) und Schaltplan der experimentellen Untersuchung (rechts)

Zur Untersuchung der Einsatzfähigkeit des Saugers wurde der Flächengreifer manuell im Schwerpunkt der Holzwerkstoffplatten platziert und angehoben. Das Lösen des Flächensaugers erfolgte über das manuelle Schließen eines Absperrventils. Die Holzwerkstoffplatten der Versuchsreihe unterschieden sich hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit. Es wurden Platten mit drei unterschiedlichen Rauheitsgraden untersucht, die in rau, mittel-rau und glatt unterteilt

wurden. Um eventuelle Einschränkungen aufgrund der Plattengeometrie feststellen zu können, wurden sie rechteckig oder rund ausgeführt und hatten unterschiedliche Breiten (vgl. *Abbildung 5-4*). Jede Platte wurde mit einer zugeführten Druckluft von 1 bar, 4 bar und 6 bar angehoben. Zudem wurde die maximale Haltekraft bei einer Druckluftzufuhr von 5 bar ermittelt.



Abbildung 5-4: Versuchsplatten mit glatter Oberflächenbeschaffenheit

Ergebnisse und Diskussion

In der folgenden Tabelle werden die Ergebnisse einer Versuchsreihe in reduzierter Form präsentiert. Die vollständigen und ausführlichen Ergebnisse sind im Anhang dargestellt.

Tabelle 5-6: Versuchsergebnisse mit Venturi-Ejektor für raue Platten

Oberflächenbeschaffenheit „rau“				
		1 bar	4 bar	6 bar
Form	Breite [mm]	Greifen möglich? (✓/x)	Greifen möglich? (✓/x)	Greifen möglich? (✓/x)
Rechteckig	10	x	x	x
	20	x	✓	✓
	30	✓	✓	✓
Rund	10	x	x	x
	20	x	✓	✓
	30	✓	✓	✓

Bei dem Vergleich der Ergebnisse mit 1 bar und 4 bar fällt auf, dass die Leistungsfähigkeit des Greifsystems mit steigender Plattenbreite zunimmt. Die Erhöhung von 4 bar auf 6 bar lässt keine Verbesserung der Leistung erkennen. Die Platten können erst ab einer Breite von 20 mm mit einem minimalen Druck von 4 bar angehoben werden. Dabei ändert die Form der Platten nicht die Ergebnisse. Die maximale Haltekraft betrug 5 N (= 500 g).

Insgesamt wurden für die Platten mit einer glatten Oberflächenbeschaffenheit die besten Ergebnisse erzielt (vgl. Anhang 2). Grundsätzlich verbesserte sich bei allen Versuchen die Leistungsfähigkeit ab 4 bar. Eine Erhöhung des Drucks auf 6 bar erzielte in keiner der Versuchsreihen eine Verbesserung. (Hesse 1991) schreibt dazu, dass sich das Saugverhalten von Venturi-Ejekto- ren durch Erhöhung der zugeführten Druckluft nur bis zu einem bestimmten maximalen Wert steigern lässt. Bei einer weiteren Erhöhung der zugeführten Druckluft nimmt die Saugleistung wieder ab. Das Greifen war bei einer Teilflächenbelegung des Saugers möglich, trotz des geringen Volumenstroms. Dies ist auf die integrierten Strömungswiderstände im Sauger zurückzuführen.

5.2.3 Coanda – Ejektor

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

In der folgenden Tabelle sind die Komponenten für das Vakuumgreifsystem mit dem Coanda - Ejektor aufgelistet.

Tabelle 5-7: Komponenten des Vakuumgreifsystems mit Coanda-Ejektor

Komponente des Vakuumgreifsystems	Beschreibung	Hersteller
Vakuumerzeuger	Strömungsgreifer SCG (mit Schalldämpfer)	J. Schmalz GmbH
Sauger	Saugnapf Ø60 mm	J. Schmalz GmbH
Fluidische Verbindung	Kunststoffschlauch Ø6 mm	Festo SE & Co. KG
Tragstruktur	Keine Tragstruktur, da Versuche manuell durchgeführt wurden	/
Vakuumregler	Präzisionsdruckregler	k. A.

Der Strömungsgreifer besteht aus einem Aluminiumgrundkörper mit integriertem Vakuumerzeuger (vgl. *Abbildung 5-5*). An der Unterseite des Grundkörpers wird der Unterdruck auf einer Kreisfläche (Ø 40 mm) erzeugt. Über einen Gewindeanschluss können Saugnapfe an der Greiferunterseite angebracht werden. Der Betriebsdruck liegt zwischen 1 bis 5 bar. Der Hersteller empfiehlt den Einsatz des Greifers bei einem Betriebsdruck von 5 bar. Laut Hersteller beträgt die maximale Haltekraft 34 N (= 3,4 kg). Diese Angabe gilt für einen Sauger-Durchmesser von 60 mm mit 5 bar bei Greifen eines saugdichten Werkstücks. Bei einem Sauger-Durchmesser von 40 mm reduziert sich die maximale Haltekraft auf 17 N (=1.7 kg).

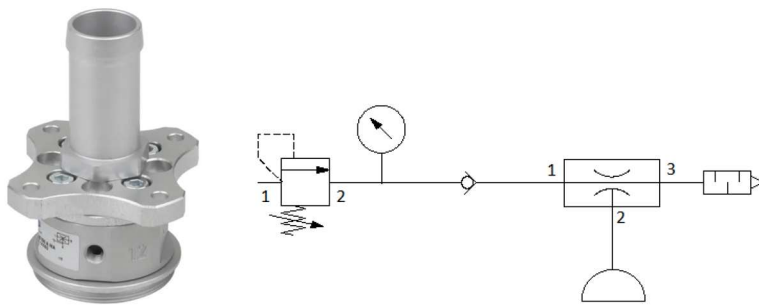


Abbildung 5-5: Strömungsgreifer SCG ohne Saugnapf (links) Schaltplan der experimentellen Untersuchung (rechts)

Die Versuche wurden wie im vorherigen Kapitel 5.2.2 durchgeführt. Zusätzlich wurde die maximale Haltekraft in Abhängigkeit des Betriebsdruckes an einer mittel-rauen Werkstoffplatte ermittelt.

Ergebnisse und Diskussion

Der Strömungsgreifer konnte jede Platte unabhängig von Form und Oberflächenbeschaffenheit greifen. Beim exzentrischen Greifen schmalen Platten fiel auf, dass die Platten in Richtung des Mittelpunktes des Saugnapfes gezogen wurden (vgl. *Abbildung 5-6*).



Abbildung 5-6: Aufnahme der Platte am Rand des Saugnapfes (rechts) Verschieben der Platte nach Anheben in Richtung Mittelpunkt des Saugnapfes (links)

Für die maximale Haltekraft konnten die folgenden Ergebnisse ermittelt werden:

Tabelle 5-8: Ergebnisse max. Haltekraft mit Coanda-Ejektor

Betriebsdruck	Max. Haltekraft
5 bar	5N (=500 g)
7 bar	1,5 N (=1500 g)

Der Strömungsgreifer hat einen hohen Volumenstrom, der es ihm ermöglicht Platten unterschiedlicher Geometrien zu greifen, auch wenn nur eine Teilbelegung der Saugfläche möglich ist. Zudem gleicht der Volumenstrom auch Leckageverluste aus, die durch die raue Oberflächenbeschaffenheit der Platten entstehen. Trotzdem steigert sich die Leistungsfähigkeit des Saugers bei glatteren Platten. Das Ziehen der Platten in den Mittelpunkt des Saugnapfes während dem Anheben, liegt am gewählten Saugnapf. Der Saugnapf mit einem Durchmesser von 60 mm hat einen auskragenden Rand von 10 mm an der Unterseite des Strömungsgreifers. An diesen auskragenden Stellen ist der Unterdruck geringer als an den Stellen, die direkt an der Unterseite des Strömungsgreifers liegen. Dadurch werden die Platten, solange sie leicht und schmal genug sind, in den Mittelpunkt des Saugnapfes gezogen. Die ermittelte maximale Haltekraft weicht stark von der Angabe des Herstellers ab. Dies ist, womöglich auf die Beschaffenheit der Holzwerkstoffplatten zurückzuführen, da durch ihre raue Oberflächenbeschaffenheit Leckageverluste auftreten. Zudem steigt mit einer Erhöhung des Betriebsdruckes auf 7 bar die Leistungsfähigkeit des Greifers. Der empfohlene optimale Betriebsdruck wird mit maximal 5 bar vom Hersteller angegeben. Allerdings erfolgen vom Hersteller keine genaueren Angaben, sodass die Ursache für diese Abweichung nicht eindeutig identifizierbar ist.

5.2.4 Zusammenfassung und Wahl des Vakuumgreifsystems

Tabelle 5-9: Zusammenfassung der Ergebnisse aus Voruntersuchung für die Handhabung

	Doppelkolben-Vakuumpumpe	Venturi-Ejektor	Coanda-Ejektor
max. stat. Haltekraft	40 N (=4 kg)	5N (=500 g)	15N (=1,5 kg)
max. stat. Haltekraft in Abhängigkeit der Wirkfläche	0,056 N/mm ²	0,023 N/mm ²	0,027 N/mm ²
Anwendung mit individuell konturierten Platten möglich? (Ja/Nein)	Nein, Greifen ist nur mit Strömungswiderständen möglich. Allerdings ist die dabei erzeugte Haltekraft gering.	Ja, aber Greifen ist erst möglich ab einer Plattenbreite von 20 mm.	Ja, unabhängig von Geometrie der Platten möglich.
Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit der Platten (Hoch/Gering)	Hoch, besonders bei der Anwendung mit Strömungswiderständen.	Hoch, Leistungsfähigkeit reduziert sich erheblich bei rauen Platten.	Gering, Leistungsfähigkeit reduziert sich kaum.

Mit der gasfördernden Vakuumpumpe wurde in den gesamten Vorversuchen die maximale statische Haltekraft von 40 N (= 4 kg) erreicht. Zur Handhabung von individuell konturierten Platten müssen Strömungswiderstände an der Unterseite der Sauger installiert werden. Durch die Strömungswiderstände konnte nur ein geringer Unterdruck aufgebaut werden. Das Vakuumgreifsystem mit der Doppelkolben-Vakuumpumpe eignet sich daher nicht für die Handhabung der Holzwerkstoffplatten. Der Venturi-Ejektor mit angeschlossenem Flächensauger kann Platten mit unterschiedlichen Geometrien handhaben. Allerdings nimmt seine Leistungsfähigkeit bei rauen oder kleineren Holzwerkstoffplatten stark ab. Die Vakuumpumpe und Venturi-Ejektor erzeugen Vakuum mit geringem Volumenstrom. Die Leckageverluste, die durch eine Teilflächenbelegung der Sauger oder durch eine raue Oberflächenbeschaffenheit entstehen, können daher gar nicht oder nur schlecht ausgeglichen werden. Der Coanda-Greifer kann eine hohe statische Haltekraft aufbauen und ist gleichzeitig für das Greifen von Platten mit flexibler Geometrie geeignet. Seine Leistungsfähigkeit reduziert sich bei der Anwendung von rauen Platten, allerdings im Vergleich zu den anderen Systemen nur in einem geringen Ausmaß. Durch seinen hohen Volumenstrom kann der Coanda-Ejektor Leckageverluste gut ausgleichen. Zudem erzeugt der Coanda-Greifer mit Druckluft den Unterdruck, sodass die Ansteuerung des Greifers mit einem herkömmlichen pneumatischen Ventil möglich ist. Aus diesen Gründen wird das Coanda-Greifsystem für die Handhabung der Platten gewählt.

5.3 Optimierung und finale Untersuchung des Coanda-Vakuumgreifsystem

5.3.1 Gerätetechnisch Ausstattung

Portalroboter

Für die finalen Handhabungsversuche wurde das Coanda-Vakuumgreifsystem am Portalroboter befestigt. Dafür stand eine 3-Achsen CNC-Portalfräse vom Typ HIGH-2 S-1000 T des Herstellers CNC-STEP GmbH & Co. KG, D-47608 Geldern zur Verfügung. Der Verfahrensweg beträgt 1000 mm x 600 mm x 110 mm (X, Y, Z) und wird über drei Hybrid-Motoren angetrieben. Für die Versuche wurden die Handhabungsvorrichtungen direkt an der Werkzeugaufnahme des Portals befestigt und über die Bauplattform bewegt. Dabei wurde das Vakuumgreifsystem an einer hölzernen Montageplatte an die Werkzeugaufnahme des Portals geschraubt. Durch die Montageplatte und einer Unterlage aus MDF-Platten auf der Bauplattform ergab sich eine Verkleinerung des verfügbaren Bauraumes von ca. 985 mm x 600 mm x 45 mm. Die Steuerung des Portals erfolgte über die KINETIC-NC Steuerungssoftware des oben genannten Herstellers. Mittels KINETIC-NC wurden die einzelnen Achsen angesteuert. Dies erfolgte nach den gängigen Maschinensteuerbefehlen nach DIN 66025-1:1983-01 bzw. ISO 6983-1:2009 dem sogenannten „G-Code“. Der Code wird Zeile für Zeile an den Microcontroller gesendet, der die einzelnen Motorimpulse umwandelt. Die Ansteuerung des Vakuumgreifsystems erfolgte ebenfalls mit Hilfe des G-Codes. Dazu wurde an einem Port der Fräse die Steuerungselektronik für das Druckluftventil zur Ansteuerung Vakuumgreifsystems angeschlossen.

5.3.2 Weiterentwicklung und Optimierung des Vakuumgreifsystems

Die Befestigung des Greifers am Handhabungsgerät erfolgte, über eine 8 mm dicke hölzerne Montageplatte. An dieser Montageplatte wurde eine 3D-gedruckte Halterung aus PLA-Kunststoff starr befestigt. Zur optimalen Aufnahme der Platten muss der Strömungsgreifer gelenkig am Handhabungsgerät befestigt sein. Dazu wurde der Greifer über Druckfedern mit Schrauben an der Halterung montiert (vgl. *Abbildung 5-7*).

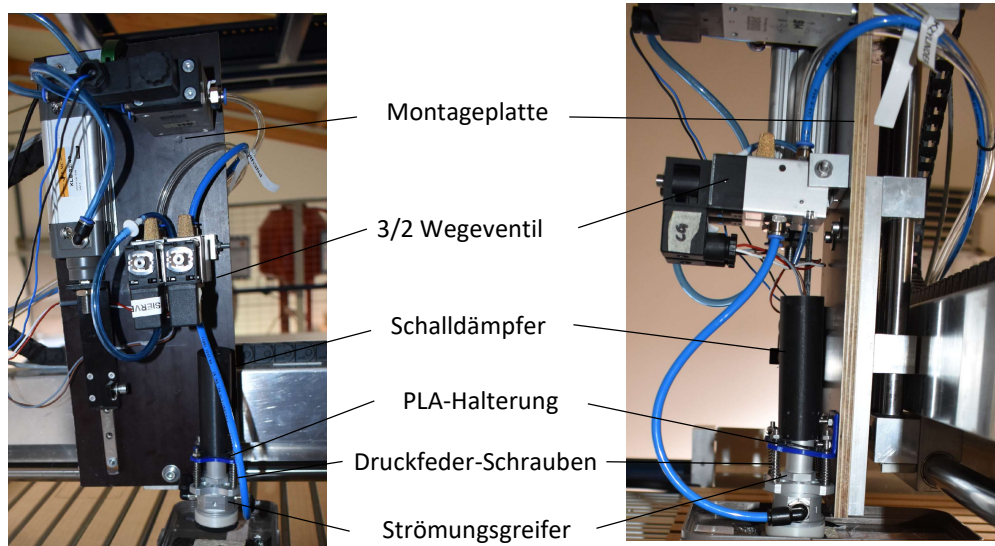



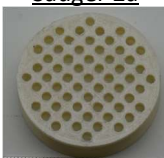






Abbildung 5-7: Composite Greifer mit Befestigung am Handhabungsgerät Vorderansicht (links) Seitenansicht (rechts)

Zudem wurde ein Schalldämpfer für den Strömungsgreifer hergestellt. Dazu wurde zunächst die Schalung des Schalldämpfers mit PLA-Kunststoff gedruckt. Anschließend wurde die Innenseite mit einem Dichtungsband für Fenster und Türen verklebt.

Zusätzlich wurden die Saugnapfe für den Strömungsgreifer weiterentwickelt. Dabei wurde zunächst der Saugerdurchmesser auf 40 mm reduziert, sodass ein Verschieben der Platten aufgrund des ausragenden Saugnapfes vermieden wurde (vgl. Kapitel 5.2.3). Insgesamt wurden zwei neue Geometrien für die Sauger hergestellt. Die Geometrien wurden so gewählt, dass eine Holzwerkstoffplatte mit minimalen Abmessungen (minimale Breite = 8 mm) gegriffen werden kann. Folgende Sauger Varianten wurden hergestellt:

Tabelle 5-10: Sauger Varianten für Strömungsgreifer

Sauger 1 (Schlitze)		Sauger 2 (Löcher)	
	Allgemeines: Ø40 mm Wirkfläche = 826,8 mm ²		Allgemeines: Ø40 mm Wirkfläche = 565,6 mm ²
Beschreibung	Material	Beschreibung	Material
<u>Sauger 1a</u> 	PLA	<u>Sauger 2a</u> 	PLA
<u>Sauger 1b</u> 	PLA mit EPDM-Moosgummiplatte (d= 3mm)	<u>Sauger 2b</u> 	PLA mit EPDM-Moosgummiplatte (d= 3mm)
<u>Sauger 1c</u> 	PLA mit EPDM-Moosgummiplatte (d= 5mm)	<u>Sauger 2c</u> 	PLA mit EPDM-Moosgummiplatte (d= 6mm)

Die in der Tabelle angegebene Wirkfläche der Sauger entspricht der Gesamtfläche der Aussparungen im Sauger. In dieser Wirkfläche kann der Unterdruck zwischen Sauger und Holzwerkstoffplatte aufgebaut werden.

5.3.3 Untersuchung des weiterentwickelten Vakuumgreifsystems

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

In der folgenden Tabelle sind die Komponenten des Vakuumgreifsystem aufgelistet.

Tabelle 5-11: Komponenten des finalen Vakuumgreifsystems

Komponente des Vakuumgreifsystems	Beschreibung	Hersteller
Vakuumerzeuger	Strömungsgreifer SCG (mit Schalldämpfer)	J. Schmalz GmbH
Sauger (variabel)	Saugnapf Ø40 mm aus PLA	Herstellung durch Rapid Prototyping
Fluidische Verbindung	Kunststoffschlauch Ø6 mm	Festo SE & Co. KG
Tragstruktur	Halterung aus PLA	Herstellung durch Rapid Prototyping
Vakuumregler	Präzisionsdruckregler	k. A.
3/2-Wegeventil	VUVS-LK25_M32C-AD-G14_1B2-S	Festo SE & Co. KG

Ziel der experimentellen Untersuchung war es, die maximal statische Haltekraft sowie das maximal aufnehmbare statische Moment zu ermitteln. Dazu wurden die Holzwerkstoffplatten beschwert, mit Hilfe einer herkömmliche Brotzeitbox. Diese wurde zunächst mit Kieselsteinen befüllt. Auf den Deckel der Brotzeitbox wurde eine Holzwerkstoffplatte zentral befestigt (vgl. *Abbildung 5-8*). Um die statische Haltekraft zu ermitteln, wurde die beschwerte Holzwerkstoffplatte vom Vakuumgreifsystem angehoben und nach 50 cm geradliniger Fahrt wieder abgelegt. Zur Ermittlung des maximal aufnehmbaren Moments wurde die Holzwerkstoffplatte auf dem Deckel der Box versetzt.

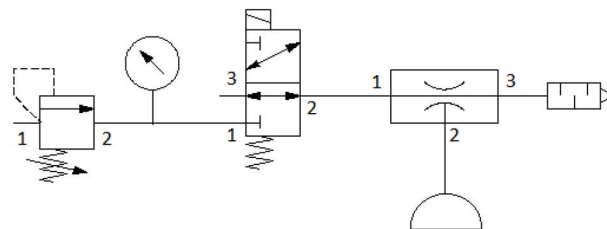
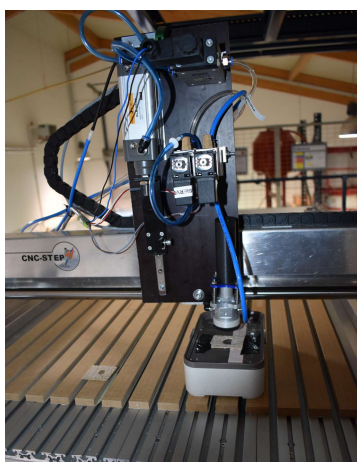


Abbildung 5-8: Versuchsaufbau (rechts) und dazugehöriger Schaltplan (links)

Um die Leistungsfähigkeit der Sauger für Holzwerkstoffplatten mit flexibler Geometrie bewerten zu können, wurde die Sauger in Abhängigkeit von ihrer Wirkfläche bemessen, d.h. in Abhängigkeit der Teilbelegung der Saugerunterseite. Dazu wurden die Versuche mit insgesamt drei

unterschiedlichen Holzwerkstoffplatten durchgeführt. Neben einer vollflächigen Platte kamen, Platten mit Aussparungen zum Einsatz. Diese Platten hatten ein mittiges Loch vom Durchmesser $\varnothing 10\text{mm}$ oder $\varnothing 20\text{mm}$. Für die Versuche wurde der Strömungsgreifer mittig auf den Löchern platziert.

Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 5-12: Ergebnisse zur maximal aufnehmbaren Haltkraft und zum maximal aufnehmbaren Moment

Platte ohne Loch					
100% Wirkfläche			100% Wirkfläche		
Sauger	Max. Halte- kraft	Max. Moment	Sauger	Max. Halte- kraft	Max. Moment
Sauger 1a)	4 N (=400 g)	$4 \times 10^{-3} \text{ Nm}$	Sauger 2a)	2,5 N (=250 g)	$2,5 \times 10^{-3} \text{ Nm}$
Sauger 1b)	5 N (=500 g)	$5 \times 10^{-3} \text{ Nm}$	Sauger 2b)	4,5 N (=450 g)	$4,5 \times 10^{-3} \text{ Nm}$
Sauger 1c)	5,5 N (=550 g)	$5,5 \times 10^{-3} \text{ Nm}$	Sauger 2c)	5 N (=500 g)	$5 \times 10^{-3} \text{ Nm}$
Platte mit Loch ($\varnothing 10 \text{ mm}$)					
90,5 % Wirkfläche			86,1% Wirkfläche		
Sauger 1a)	1,6 N (=160 g)	$3,2 \times 10^{-2} \text{ Nm}$	Sauger 2a)	1,6 N (=160 g)	$1,6 \times 10^{-2} \text{ Nm}$
Sauger 1b)	3,5 N (=350 g)	$7 \times 10^{-2} \text{ Nm}$	Sauger 2b)	2,5 N (=250 g)	$2,5 \times 10^{-2} \text{ Nm}$
Sauger 1c)	4,5 N (=450 g)	$9 \times 10^{-2} \text{ Nm}$	Sauger 2c)	3,5 N (=350 g)	$3,5 \times 10^{-3} \text{ Nm}$
Platte mit Loch ($\varnothing 20 \text{ mm}$)					
62 % Wirkfläche			44,45% Wirkfläche		
Sauger 1a)	1,6 N (=160 g)	$1,6 \times 10^{-2} \text{ Nm}$	Sauger 2a)	1,6 N (=160 g)	$1,6 \times 10^{-3} \text{ Nm}$
Sauger 1b)	3,5 N (=350 g)	$3,5 \times 10^{-2} \text{ Nm}$	Sauger 2b)	2,5 N (=250 g)	$2,5 \times 10^{-2} \text{ Nm}$
Sauger 1c)	4,5 N (=450 g)	$4,5 \times 10^{-2} \text{ Nm}$	Sauger 2c)	3 N (=300 g)	$3 \times 10^{-2} \text{ Nm}$

Bei Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass die Leistungsfähigkeit der Sauger durch die EPDM-Dichtschaumplatte gesteigert werden konnte. Die Sauger mit einer 5 mm oder 6 mm dicken EPDM-Schicht (Sauger 1c) und Sauger 2c)) erzielten unabhängig von der Wirkfläche die besten Ergebnisse. Die Sauger mit den Schlitzten (Sauger 1) erzielten durchschnittlich die besseren Ergebnisse als die Sauger mit den Löchern (Sauger 2). Eine Ausnahme stellten die Sauger ohne EPDM-Schicht (Sauger 1a) und Sauger 2a)) dar. Ihre Leistungsfähigkeit blieb gleich, trotz der unterschiedlichen Wirkflächen. Betrachtet man die Ergebnisse für Sauger 1 mit der reduzierten Wirkfläche von 90,5 % und 62% so fällt auf, dass die maximale Haltekraft sich nicht ändert. Das maximale statische Moment halbiert sich bei einer Reduktion der Wirkfläche von 90,5% auf 62%. Bei Betrachtung der Ergebnisse für die Sauger 2 bleiben die maximale Haltekraft, sowie das

maximal statische Moment trotz der Reduktion der Wirkfläche gleich. Zudem ergab sich im Laufe der Versuche, dass sich die PLA-Halterung für den Strömungsgreifer während der Aufnahme der Platten durchbog. Dadurch war der Strömungsgreifer nicht nur über die Druckfedern gelenkig gelagert, sondern auch über die Halterung (vgl. *Abbildung 5-9*).

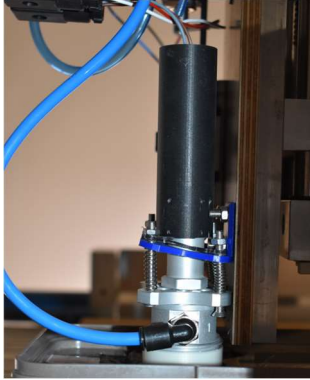


Abbildung 5-9: Durchgebogene Halterung (blau) des Strömungsgreifers

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die EPDM-Schicht grundsätzlich die Wirkfläche auf den rauen Holzwerkstoffplatten besser abgedichtet werden kann. Der Unterdruck lässt sich dort besser aufbauen. Die Sauger 1 schnitten durchschnittlich besser ab, da ihre Wirkfläche größer war und somit größere Kraftfelder aufgebaut werden konnten. Eine Reduzierung der Wirkfläche und damit des Kraftfeldes auf der Holzwerkstoffplatte änderte für die Sauger nichts an der maximalen Haltekraft. Allerdings konnte bei der Handhabung der Platte mit einem Loch von $\varnothing 10$ mm ein größeres Moment aufgenommen werden. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei einer Teilflächenbelegung des Saugers die Leistungsfähigkeit erheblich reduziert wird. Dabei nimmt die Leistungsfähigkeit nicht proportional ab, sobald die Wirkfläche weiter reduziert wird. Vielmehr stagniert die Leistungsfähigkeit, sobald eine Teilflächenbelegung des Saugers auftritt. Insgesamt wurde die besten Ergebnisse mit Sauger 1c) erzielt. Dabei gilt zu beachten, dass die ermittelte maximale Haltekraft von 5,5 N beim Greifen einer vollflächigen Platte noch höher sein könnte, da die in den Versuchen benutzte Brotzeitbox, aufgrund ihrer Abmessungen nur mit maximal 550 g Gewicht beschwert werden konnte. Zudem ist zu erwähnen, dass die Ergebnisse durch den Versuchsaufbau nur bedingt repräsentativ sind. Da die Kieselsteine sich teilweise unregelmäßig in der Box verteilen, kann es bei weiteren Untersuchungen zu stärkeren Abweichungen kommen. Dies gilt vor allem für die Ermittlung des statischen Momentes, aber auch für die maximal aufnehmbare Haltekraft.

5.4 Zusammenfassung

Für die Entwicklung des Handhabungssystems wurden zunächst in kurzen Entwicklungszyklen drei unterschiedliche Vakuumgreifsysteme hergestellt. Dabei wurden eine Doppelkolben-Vakuumpumpe, ein Venturi-Ejektor und ein Coanda-Ejektor als Vakuumerzeuger näher untersucht. Insgesamt konnte nur das Vakuumgreifsystem mit dem Coanda-Ejektor die Anforderungen der Handhabungsaufgabe erfüllen, sodass dieses System weiterentwickelt wurde. Im Rahmen der Weiterentwicklung wurden primär unterschiedliche Sauger untersucht und bewertet. Auf

Grundlage dieser Bewertung wurde das Vakuumgreifsystem für den finalen Endeffektor fertiggestellt.

6 Entwicklung und Bewertung des Systems zum automatisierten Klebstoffauftrag

6.1 Allgemeines

6.1.1 Auswahl des Auftragsverfahrens und der Dosiermethode

Auswahl des Auftragsverfahrens

Für die Entwicklung des automatisierten Dosiergeräts stand eine maximale Druckluftzufuhr von 7 bar und folgende Klebstoffe (vgl. *Tabelle 6-1*) zur Verfügung:

Tabelle 6-1: Klebstoff für die experimentellen Untersuchungen

Bezeichnung	Hersteller	Klebstoffart	Viskosität
Jowapur 686.60	Jowat SE	Polyurethan	10.200 ± 2.500 [mPa s]
Ponal-Fix und Fest	Henkel AG & Co. KGaA	Polyvinylacetat	10.000-16.000 [mPa s]

Diese Klebstoffe wurden gewählt, da sie ein hohes Verformungsvermögen haben, sodass die Unebenheiten der rauen Plattenoberflächen ausgeglichen werden. Zudem verfügen die Klebstoffe über hohe Festigkeiten (vgl. Kapitel 4.1.2).

Ziel des automatisierten Klebstoffauftrags war die reproduzierbare Dosierung hochviskoser Klebstoffe auf individuell konturierten Holzwerkstoffplatten. Dementsprechend musste ein geeignetes Auftragsverfahren gewählt werden. Hierbei standen zunächst die Eigenschaften des polyurethanbasierten Klebstoffes im Vordergrund. Da dieser unter anderem mit der Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft reagiert, kann der Klebstoff nur für einen geringen Zeitraum der Luft ausgesetzt werden (vgl. Kapitel 4.1.2). Daher kamen als Auftragsverfahren nur das Spritzen, Tropfen oder Gießen in Frage (vgl. *Abbildung 4-3*). Da aufgrund der hohen Viskosität beider Klebstoffe die Auftragsmethoden Spritzen und Tropfen ungeeignet sind, erfüllte nur das Auftragsverfahren Gießen die gestellten Anforderungen.

Auswahl der Dosiermethode

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben wird, stehen für die Dosierung unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Bei der Verklebung der Holzwerkstoffplatten bestehen keine überdurchschnittlich hohen Anforderungen an die Dosiergenauigkeit. Daher bietet sich die Methode der Zeit-Druck Dosierung an. Dazu wurden zwei unterschiedliche Ausbringvorrichtungen entwickelt (vgl. Kapitel 6.2.1 und Kapitel 6.2.3).

6.1.2 Gerätetechnische Ausstattung

Die Voruntersuchungen, sowie die finalen Untersuchungen fanden mit der zuvor beschriebenen Portalfräse (vgl. Kapitel 5.3.1) statt. Zuvor wurden die Anforderungen an das Handhabungsgerät für den Klebstoffauftrag überprüft.

Überprüfung der Anforderungen für den Klebstoffauftrag

Wie in Kapitel 4.3.4 beschrieben, muss das Handhabungsgerät konstante Geschwindigkeiten aufbringen, damit der Klebstoff reproduzierbar ausgebracht werden kann. Die Geschwindigkeit zum Auftragen des Klebstoffes wird im Steuerungsprogramm der Fräse angegeben. Um diese angegebene, konstante Geschwindigkeit zu erreichen und anschließend aufrecht zu erhalten, muss der Roboter zunächst über eine bestimmte Strecke und Zeit beschleunigt und später abgebremst werden. Da in diesen Beschleunigungsphasen wird der Klebstoff unregelmäßig ausgebracht wird, ist es wichtig, diese Phasen möglichst kurz zu halten. Der Hersteller des Portalroboters gibt an, dass der Roboter bei der manuellen oder automatisierten Fahrt zunächst auf eine bestimmte Arbeitsbeschleunigung hochfährt (CNC-STEP GmbH & Co. KG 2018). Die Arbeitsbeschleunigung wird dabei als die maximal zulässige Beschleunigung und Verzögerung der Achse im normalen Betrieb bezeichnet (CNC-STEP GmbH & Co. KG 2018). Die maximale Geschwindigkeit wurde auf $v_{\max} = 9000 \text{ mm/min}$ und die maximale Beschleunigung auf $a_{\max} = 500 \text{ mm/s}^2$ festgelegt. Die Beschleunigungszeit wird mit der folgenden Formel berechnet:

$$t = \frac{v}{a_{\max}} \quad [\text{s}] \quad (6-1)$$

t	[s]	Beschleunigungszeit
v	[mm/s]	Geschwindigkeit
a	[mm/s ²]	Beschleunigung

Der Beschleunigungs- bzw. Bremsweg berechnet sich wie folgt:

$$s = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{a_{\max}} \quad [\text{mm}] \quad (6-2)$$

s	[mm]	Beschleunigungsweg
v	[mm/s]	Geschwindigkeit
a	[mm/s ²]	Beschleunigung

In den experimentellen Untersuchungen wurde eine maximale Geschwindigkeit von $v_{\max,U} = 46,7 \text{ mm/s}$ gewählt. Mit einer maximalen Beschleunigung von $a_{\max} = 500 \text{ mm/s}^2$ ergibt sich somit eine Beschleunigungs- und Bremszeit von $t = 0,09 \text{ s}$ mit einem Weg von $s = 2,2 \text{ mm}$. Damit sind der Beschleunigungsweg und die Beschleunigungszeit vernachlässigbar. Es wird angenommen, dass der Roboter für das regelmäßige Ausbringen des Klebstoffes geeignet ist.

Zudem können die Ausbringvorrichtungen nicht während der Fahrbewegung angesteuert werden. Die Steuerung erfolgt dadurch kurz vor oder nach der Fahrt. Aus diesem Grund sind beim Klebstoffauftrag Anfangs- und Endkleckse unvermeidbar.

6.2 Entwicklung der Ausbringvorrichtung für den automatisierten Klebstoffauftrag

Bei der Entwicklung der Ausbringvorrichtung wurde sich an der Methode des Rapid Prototypings orientiert (vgl. Kapitel 1.4.1). Die Überprüfung und Bewertung der beiden Prototypen erfolgte im sogenannten „Review“ (vgl. *Abbildung 6-1*). Dabei wurde in Rahmen experimenteller Untersuchungen überprüft, ob das Dosieren der hochviskosen Klebstoffe mit den jeweiligen Prototypen, reproduzierbar möglich ist. Zudem wurde ermittelt, welche Dosierfehler beim Klebstoffauftrag auftraten. Insgesamt wurden zwei Prototypen in zwei Iterationszyklen hergestellt, die im Folgenden mit Ausbringvorrichtung 1 und Ausbringvorrichtung 2 bezeichnet werden.

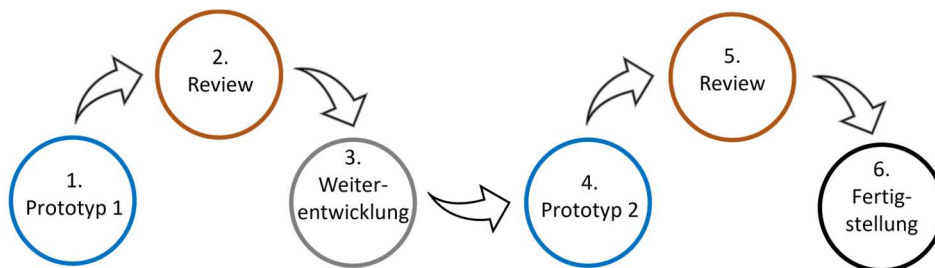


Abbildung 6-1: Ablauf der Entwicklung der Ausbringvorrichtung

6.2.1 Ausbringvorrichtung 1

Allgemeines zur Ausbringvorrichtung 1

In der folgenden Tabelle werden die verbauten Komponenten der Ausbringvorrichtung 1 dargestellt:

Tabelle 6-2: Komponenten der Ausbringvorrichtung 1

Komponente der Dosiervorrichtung	Beschreibung	Hersteller
3/2 Wegeventil	MS-18-310-24 V	AIRTEC Pneumatic GmbH
Kartuschen Adapter	Aus Aluminium für 50 ml Kartusche	VIEWEG GmbH
Kartusche	Kartusche 10 cc (transparent)	VIEWEG GmbH
Dosiernadel	Ø1,37 mm	VIEWEG GmbH
Fluidische Verbindung	Ø4 mm & Ø6 mm	FESTO SE & Co.KG
Druckregler	Präzisionsdruckregler	k. A.

Die Ansteuerung der Ausbringvorrichtung erfolgte über das 3/2-Wegeventil. Beim Öffnen des Ventils wurde die regulierte Druckluft auf den Klebstoff in der Kartusche weitergegeben, sodass der Klebstoff über die Dosiernadel aufgetragen wurde. Durch das Schließen des Ventils wurde der Überdruck in der Kartusche an die Umgebung abgelassen, sodass der Klebstoff nicht mehr unter Druck stand. Der Klebstoffauftrag wurde somit gestoppt. Die Ausbringvorrichtung wurde am Führungsgetriebe der oben beschriebenen Portalfräse montiert. In der folgenden Abbildung wird der Aufbau der Ausbringvorrichtung 1 und der dazugehörige Schaltplan dargestellt:

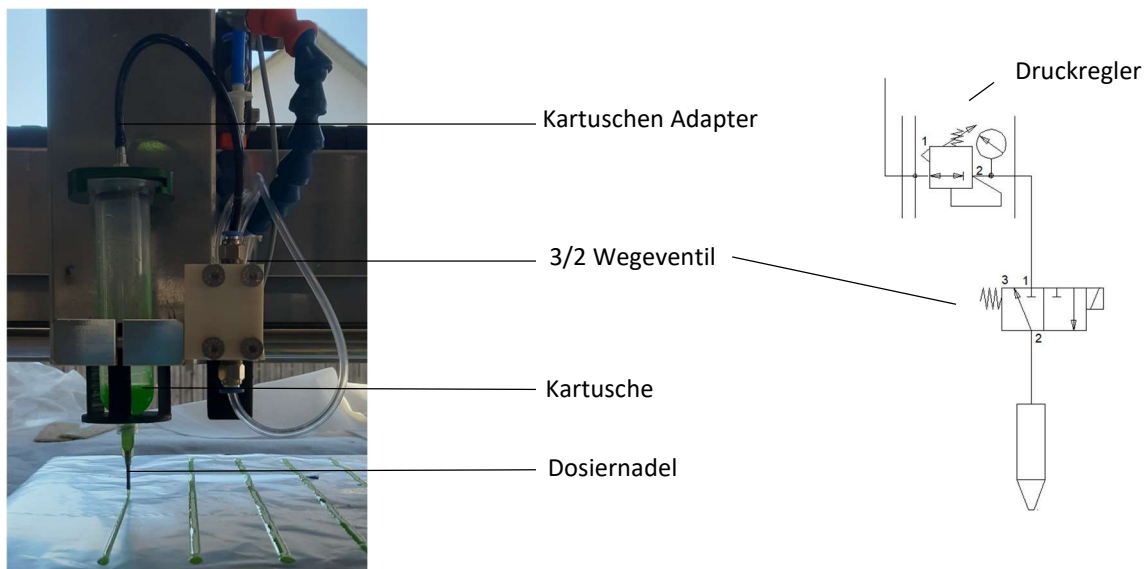


Abbildung 6-2: Aufbau der Ausbringvorrichtung 1 (links) mit Schaltplan (rechts)

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Zur Überprüfung und Bewertung der Ausbringvorrichtung 1 sollte im Rahmen von experimentellen Untersuchungen der Zusammenhang zwischen der Auftragsmenge und der Auftragsgeschwindigkeit ermittelt werden. Dazu wurden Klebstoffraupen mit unterschiedlichen Auftragsgeschwindigkeiten hergestellt und später ihre Masse ermittelt. Für diese Untersuchung wurden Papierstreifen auf der Arbeitsfläche der CNC-Fräse befestigt. Diese Papierstreifen wurden zuvor abgewogen und beschriftet. Auf jeden Papierstreifen wurde eine Klebstoffraupe mit der Länge von 100 mm in einer bestimmten Auftragsgeschwindigkeit appliziert. Nach Schuller (1998) wurde der Dosiernadel-Bauteilabstand entsprechend des Dosiernadeldurchmessers gewählt. Durch die Eigenwölbung der befestigten Papierstreifen variierte der Dosiernadel-Bauteilabstand. Diese Tatsache wurde hingenommen, da die Holzwerkstoffplatten über eine raue Oberfläche verfügen und daher der Dosiernadel-Bauteilabstand auch variiert (vgl. *Abbildung 6-3*). Je Versuchsreihe wurden mehrere Klebstoffraupen mit jeweils unterschiedlicher Geschwindigkeit aufgebracht. Dazu wurde zunächst ein lokaler Nullpunkt für den Portalroboter festgelegt. Von diesem Nullpunkt aus wurde jede Klebstoffraupenbahn angefahren. Nach dem Klebstoffauftrag wurde die Dosiernadel am Nullpunkt auf einer Moosgummiunterlage platziert. Dadurch wurde ein Aushärten der Klebstoffruckstände in der Dosiernadel vermieden. Zur Ermittlung der Auftragsmasse wurde jeder einzelne Papierstreifen mit der Klebstoffraupe gewogen. Anschließend wurde das Eigengewicht der Papierstreifen von der Gesamtmasse abgezogen.

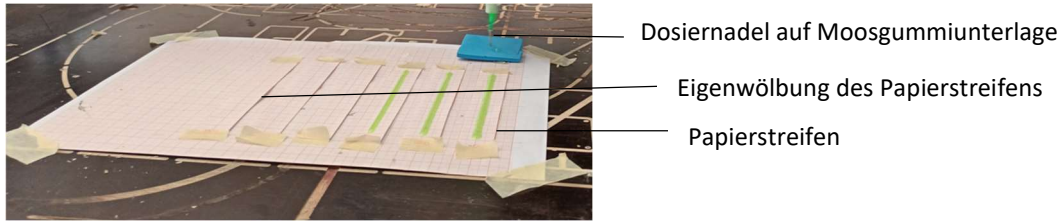


Abbildung 6-3: Versuchsaufbau für die Ermittlung der Auftragsmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Die Untersuchungen mit Polyvinylacetat und Polyurethan-Klebstoff erfolgten getrennt. Um die Klebstoffraupen des Polyurethan-Klebstoffes zuerkennen, wurden ca. 0,2 g fluoreszierendes Farbstoffpulver mit ca. 200 g Klebstoff in der Kartusche vermischt. Es wurden mehrere Durchgänge je Versuchsreihe durchgeführt. Die Parameter der einzelnen Versuchsreihen variieren. In der folgenden Tabelle 6-3 und Tabelle 6-4 ist eine Übersicht der Versuchsreihen in Abhängigkeit des eingesetzten Klebstoffes dargestellt:

Tabelle 6-3: Durchgeführte Versuchsreihen mit Polyvinylacetat mit Ausbringvorrichtung 1

Versuchsreihe	Durchgang	Druck [bar]	Geschwindigkeiten [mm/min]
1	Durchgang 1	0,8	500 - 1400
	Durchgang 2	0,8	500 - 1400
	Durchgang 3	0,8	500 - 1400
	Durchgang 4	0,8	500 - 1400
2	Durchgang 1	0,8	500 - 700
	Durchgang 2	0,8	500 - 700
	Durchgang 3	0,8	500 - 700
3	Durchgang 1	0,8	1500 - 2400
	Durchgang 2	0,8	1500 - 2400
	Durchgang 3	0,8	1500 - 2400

Tabelle 6-4: Durchgeführte Versuchsreihen mit Polyurethan mit Ausbringvorrichtung 1

Versuchsreihe	Durchgang	Druck [bar]	Geschwindigkeiten [mm/min]
1	Durchgang 1	0,4	500 - 1400
2	Durchgang 1	0,4	100 - 500

Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden soll auf eine Auswahl der Ergebnisse eingegangen werden. Die ausführliche und vollständige Darstellung der Ergebnisse ist im Anhang dargestellt.

Polyvinylacetat

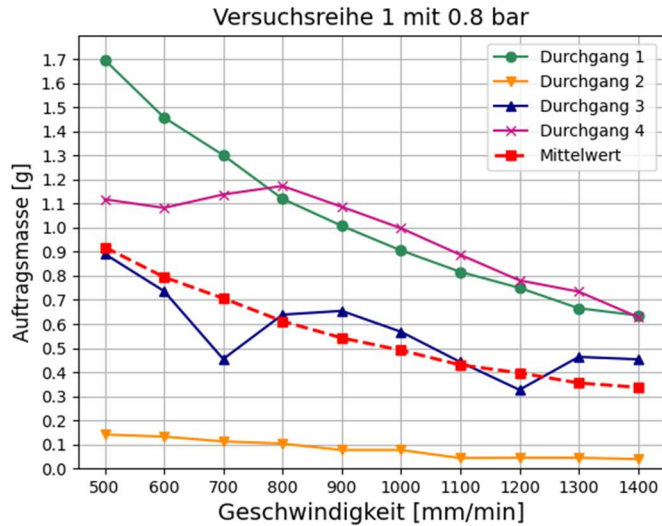


Abbildung 6-4: Auftragsmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für Versuchreihe 1 mit PVAC

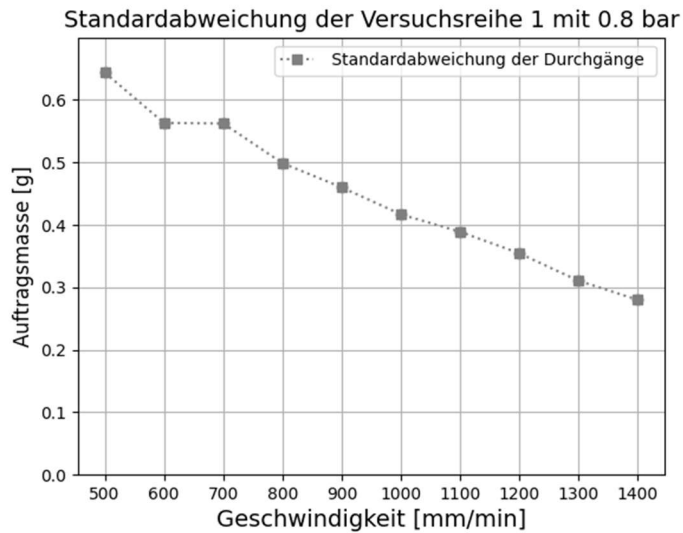


Abbildung 6-5: Standardabweichung der Versuchreihe 1 mit PVAC

Die Versuchreihe 1 besteht aus insgesamt vier Durchgängen. Die einzelnen Durchgänge weichen stark von der Mittelwertkurve ab. Dies ist zum einen in *Abbildung 6-4* zu erkennen, aber auch bei Betrachtung der Standardabweichung der Durchgänge in *Abbildung 6-5*. Der Verlauf des Durchgangs 3 fällt besonders auf (vgl. *Abbildung 6-4*). Bei einer Geschwindigkeit von 800 mm/min tritt ein plötzlicher Sprung auf. Trotz zunehmender Auftragsgeschwindigkeit nimmt die

Auftragsmasse kurzzeitig zu. Bei 1300 mm/min ist ein erneuter Anstieg der Auftragsmasse zu erkennen.

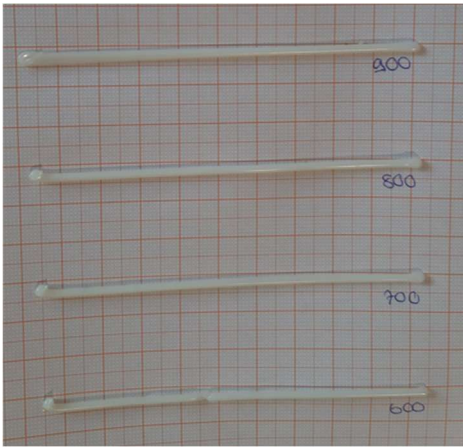


Abbildung 6-6: Klebstoffraupen mit Polyvinylacetat aus Ausbringvorrichtung 1

Wie in der *Abbildung 6-6* dargestellt ist, endeten die Klebstoffraupen an den vorgegebenen Punkten. Die Breite der Klebstoffraupen war bis auf einige Ausnahmen über die Länge konstant. Die Klebstoffraupe, die mit 600 mm/min aufgetragen wurde, hatte eine Einschnürung. Weitere Dosierfehler wie Anfangs- und Endkleckse waren an allen Klebstoffraupen zu erkennen. Zudem waren die überhängenden Klebstofffäden am Endpunkt der Raupen auffällig.

Die Ausbringvorrichtung 1 ermöglichte einen weitgehenden sauberen Klebstoffauftrag. Da das Polyvinylacetat eine hohe Viskosität besitzt, fließt der Klebstoff erst beim Öffnen des Ventils durch die Ausbringvorrichtung. Trotzdem sind die Ergebnisse nicht reproduzierbar. Die Werte der einzelnen Durchgänge weichen zu stark voneinander ab. Im Durchgang 4 nimmt die Auftragsmasse trotz erhöhter Auftragsgeschwindigkeit abschnittsweise zu. Dies ist möglicherweise auf das eingesetzte 3/2-Wegeventil zurückzuführen. Nach den Versuchen stellte sich heraus, dass die zuvor regulierte Druckluft mit deutlich geringerem Druck durch das Ventil floss. Ein weiterer Grund für den nicht reproduzierbaren Klebstoffauftrag ist der geringe Materialdruck von 0,8 bar, der auf den Klebstoff wirkt. Durch seine hohe Viskosität hat der Klebstoff einen hohen Widerstand gegen das Ausbringen. Der Druck von 0,8 bar ist für den hohen Materialwiderstand des Klebstoffes nicht hoch genug, sodass der Klebstoff nicht reproduzierbar ausgebracht wird. Die Überhänge der Klebstoffraupen sind hingegen auf den Schließmechanismus der Ausbringvorrichtung zurückzuführen. Da der Klebstoffauftrag nur durch das Schließen des Ventils gestoppt wird, fließt eine kleine Menge des Klebstoffes auch nach dem Schließen aus der Dosiernadel nach. In einigen Ausnahmefällen waren die Klebstoffraupen stellenweise eingeschnürt. Dies ist ebenfalls auf die hohe Viskosität des Klebstoffs zurückzuführen, da beim Umfüllen des Klebstoffes in die Kartusche Luftporen eingeschlossen wurden. Diese Luftporen wurden mit dem Klebstoff später ausgebracht.

Polyurethan

Die Durchführung der Versuche mit Polyurethan-Klebstoff war nur begrenzt möglich. So musste beachtet werden, dass die Kartusche nur mit wenig Klebstoff befüllt war, da ansonsten der Klebstoff auch ohne Druckluftzufuhr aus der Ausbringvorrichtung austrat. Insgesamt konnte je Versuchsreihe nur ein Durchgang durchgeführt werden. Ein sauberer Klebstoffauftrag fand in keinem der beiden Durchgänge statt.

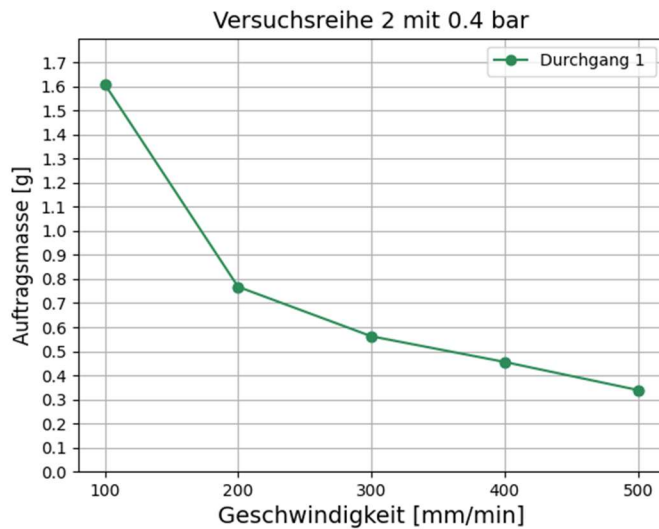


Abbildung 6-7: Auftragsmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für Versuchsreihe 2 mit PU



Abbildung 6-8: Auftragsbild der Klebstoffraupen nach dem Aushärten

Die Auftragsmasse nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit ab (vgl. *Abbildung 6-7*). Bei der Betrachtung der *Abbildung 6-8* wird deutlich, dass ein sauberer Klebstoffauftrag nicht möglich war. Die Klebstoffraupen begannen und endeten selten am definierten Punkt, da der Klebstoff auch ohne Druckluftzufuhr aus der Ausbringvorrichtung austrat. Die Breite variiert über die Länge der Klebstoffraupe. Dies ist besonders deutlich bei den Klebstoffraupen, die mit einer Geschwindigkeit von 100mm/min und 200 mm/min aufgetragen wurden (vgl. *Abbildung 6-8*).

Die Anwendung der Ausbringvorrichtung 1 mit Polyurethan-Klebstoff ist nicht möglich. Der Klebstoff fließt aufgrund seiner niedrigen Viskosität auch ohne Druckluftzufuhr aus der Ausbringvorrichtung und verhindert somit einen sauberen Klebstoffauftrag.

6.2.2 Schlussfolgerungen und Weiterentwicklung der Ausbringvorrichtung 1

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die Ausbringvorrichtung 1 weder für die Anwendung mit Polyvinylacetat noch für Polyurethan-Klebstoff eignet. Der Polyvinylacetat Klebstoff lässt sich ausbringen, allerdings ist der Klebstoffauftrag nicht reproduzierbar. Dies ist unter anderem, auf die geringe Druckluftzufuhr von 0,8 bar zurückzuführen. Durch die hohe Viskosität des Klebstoffes ist der Materialwiderstand gegen das Ausbringen hoch. Der gewählte Druck von 0,8 bar ist zu gering, um diesen Materialwiderstand entgegenzuwirken damit der Klebstoffauftrag reproduzierbar wird. Ein Erhöhen der Druckluftzufuhr würde dazu führen, dass der Klebstoffauftrag auch nach dem Schließen des Ventils nicht ausreichend gestoppt wird. Zudem stellte sich heraus, dass das eingesetzte 3/2-Wegenventil nicht für die Anwendung geeignet ist. Zusätzlich traten bei der Anwendung der Ausbringvorrichtung 1 mit dem Polyvinylacetat-Klebstoff mehrere Dosierfehler, wie Anfangs- und Endkleckse, sowie überhängende Klebstoffäden auf. Die Anwendung der Ausbringvorrichtung 1 mit einem Polyurethan-Klebstoff war unter keinen Umständen möglich, da der Klebstoff durch seine niedrigere Viskosität nicht dosiert werden konnte. Aus diesen Gründen war der Einsatz eines Dosierventils notwendig.

Auswahl des Dosierventils

In Kapitel 4.2 werden verschiedenen Dosierventile beschrieben. Die Anwendung von Quetschventilen wurde aufgrund der schlechten Wiederholungsgenauigkeit und des hohen Verschleißes des Materialschlauches ausgeschlossen. Nadeldosierventile eignen sich aufgrund ihrer überdurchschnittlichen genauen Dosier- und Wiederholungsgenauigkeit nicht, sodass sich für ein Rückzugventil entschieden wurde. Das Rückzugventil bietet nicht nur eine genaue Dosierung an, sondern ermöglicht auch durch seinen Rücksaugeffekt beim Schließen des Ventils, dass Dosierfehler wie überhängende Klebstoffäden vermieden werden. Zudem kann durch den Schließmechanismus des Ventils der Materialdruck auf den Klebstoff erhöht werden.

6.2.3 Ausbringvorrichtung 2

In der Ausbringvorrichtung 2 wurde aus den zuvor genannten Gründen ein Rückzugventil eingebaut. Das Rückzugventil wurde über ein 3/2-Wegeventil angesteuert. Dazu wurde das 3/2-Wegeventil aus der Ausbringvorrichtung 1 ersetzt. Die Druckluftzufuhr für das Rückzugventil betrug 7 bar. Für die Kartusche wurde die Druckluft über einen Präzisionsdruckregler auf 5 bar reguliert. Die regulierte Druckluft wurde durchgehend auf den Klebstoff in der Kartusche geleitet. In der folgenden Tabelle ist eine Auflistung und Beschreibung der einzelnen Komponenten zu finden.

Tabelle 6-5: Komponenten der Ausbringvorrichtung 2

Komponente der Dosiervorrichtung	Beschreibung	Hersteller
3/2 Wegeventil	MS-18-310-24 V	AIRTEC Pneumatic GmbH
Kartuschen Adapter	Aus Aluminium für 50 ml Kartusche	VIEWEG GmbH
Kartusche	Kartusche 10 cc (transparent)	VIEWEG GmbH
Dosiernadel	Ø1,37 mm	VIEWEG GmbH
Fluidische Verbindung	Ø4 mm & Ø6 mm	FESTO SE & Co.KG
Druckregler	Präzisionsdruckregler	k. A.

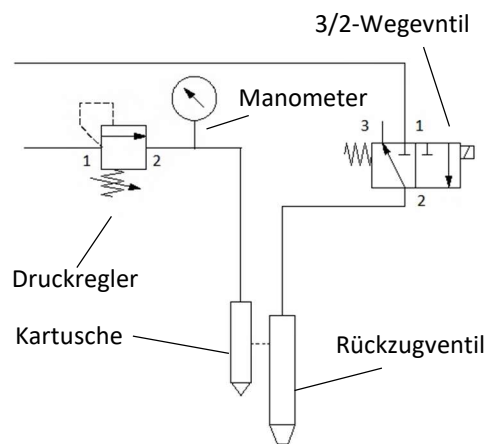
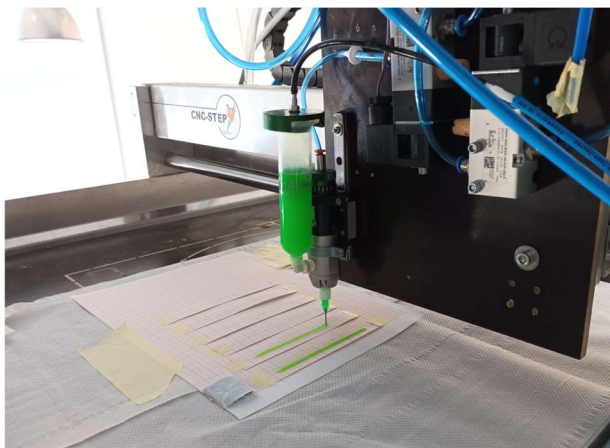


Abbildung 6-9: Ausbringvorrichtung 2

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung zur Bewertung der Ausbringvorrichtung fand wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben statt.

Die Untersuchungen zum Polyvinylacetat und Polyurethan Klebstoff erfolgten getrennt. Für die Versuche wurde fluoreszierendes Farbstoffpulver in einem Verhältnis von 1:1000 mit den jeweiligen Klebstoffen in der Kartusche vermischt. Für die Bewertung der Ausbringvorrichtung 2 wurden zunächst Versuche mit einem Materialdruck von 5 bar durchgeführt. Die folgenden Tabellen geben eine Übersicht der Versuchsreihen und Durchgänge.

Tabelle 6-6: Versuchsreihe für Polyvinylacetat mit Ausbringvorrichtung 2

Versuchsreihe	Durchgang	Druck [bar]	Geschwindigkeiten [mm/min]
1	Durchgang 1	5	500 -1000
	Durchgang 2	5	500 -1000
	Durchgang 3	5	500 -1000

Tabelle 6-7: Versuchsreihen für Polyurethan Ausbringvorrichtung 2

Versuchsreihe	Durchgang	Druck [bar]	Geschwindigkeiten [mm/min]
1	Durchgang 1	5	1200-1500
	Durchgang 2	5	1100-1600
	Durchgang 3	5	1100-1600
2	Durchgang 1	5	1800-2300
	Durchgang 2	5	1800-2300
	Durchgang 3	5	1800-2300

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse des Klebstoffauftrags mit Polyvinylacetat und Polyurethan werden in reduzierter Form dargestellt. Eine vollständige Übersicht der Ergebnisse ist im Anhang zu finden. Um die Einsatzfähigkeit der Ausbringvorrichtung 2 zu bewerten, soll im Folgenden exemplarisch auf die Versuchsreihen 1 der jeweiligen Klebstoffe eingegangen werden.

Polyvinylacetat

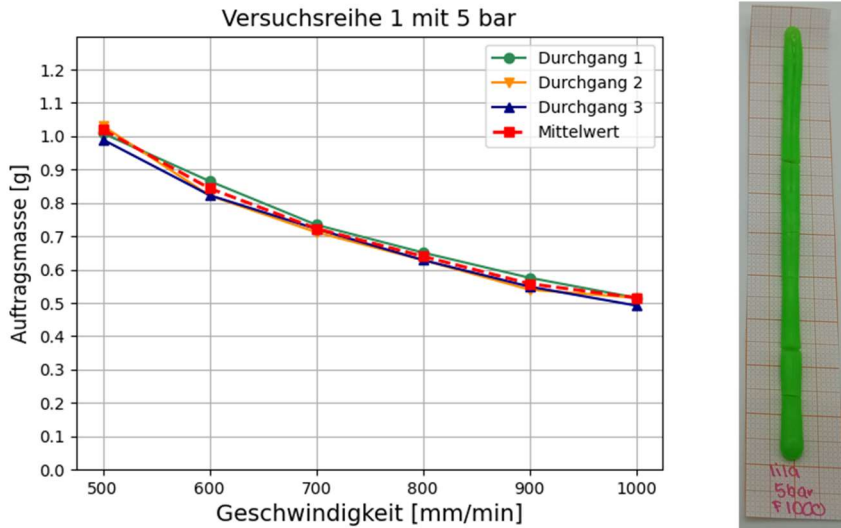


Abbildung 6-10: Auftragsmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für Versuchsreihe 1 mit PVAC (links) Auftragsbild der Klebstoffraupe nach Aushärten mit 1000 mm/min (rechts)

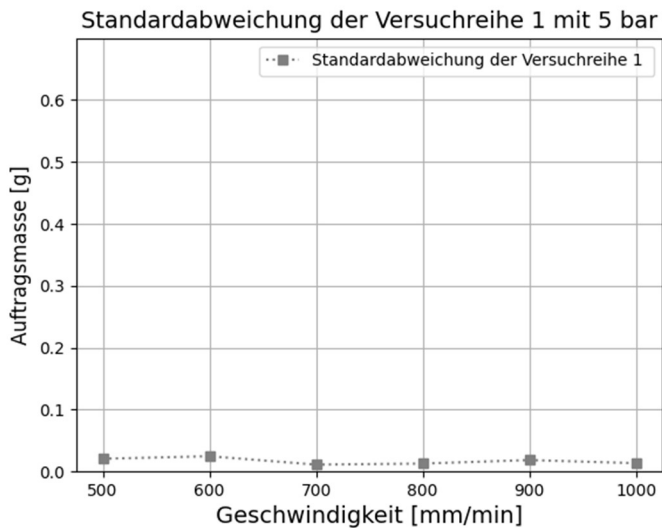


Abbildung 6-11: Standardabweichung der Versuchsreihe 1 mit PVAC

Bei der Versuchsreihe 1 mit 5 bar fällt auf, dass die einzelnen Durchgänge von der Mittelwertkurve kaum abweichen (vgl. *Abbildung 6-10*). Dies wird bei der Betrachtung der Standardabweichung *Abbildung 6-11* bestätigt. Die geringe Standardabweichung der Durchgänge zeigt, dass

der Klebstoffauftrag mit der Ausbringvorrichtung 2 reproduzierbar möglich ist. Das Auftragsbild der Klebstoffraupen erscheint weitgehend gleichmäßig. Die Klebstoffraupen haben eine konstante Breite über ihre Länge. Überhängende Klebstofffäden treten nicht auf. Am Anfang und am Ende der Klebstoffraupen sind kleinere Anfangs- und Endkleckse erkennbar. Diese Dosierfehler sind allerdings nicht zu vermeiden, wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben wird. Zudem sind kleinere Einschnürungen an der Klebstoffraupe zu erkennen. Dies ist auf die hohe Viskosität des Klebstoffes zurückzuführen, da beim Umfüllen und Untermischen der Farbpartikel, Luftporen eingeschlossen werden. Diese Luftporen werden mit dem Klebstoff ausgebracht.

Polyurethan

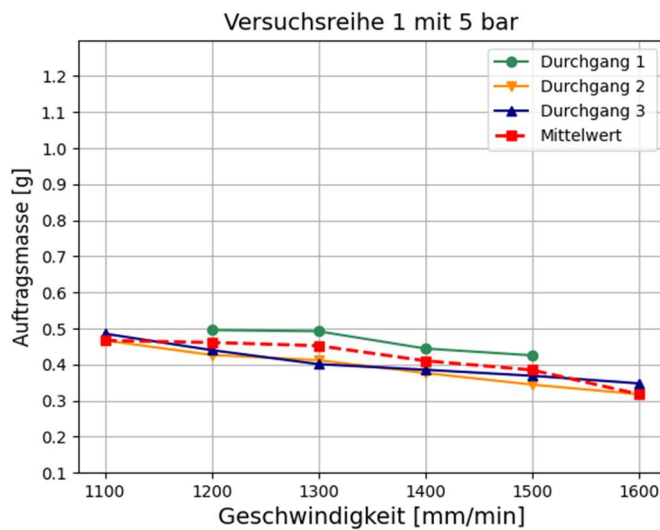


Abbildung 6-12: Auftragsmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für Versuchreihe 1 mit PU

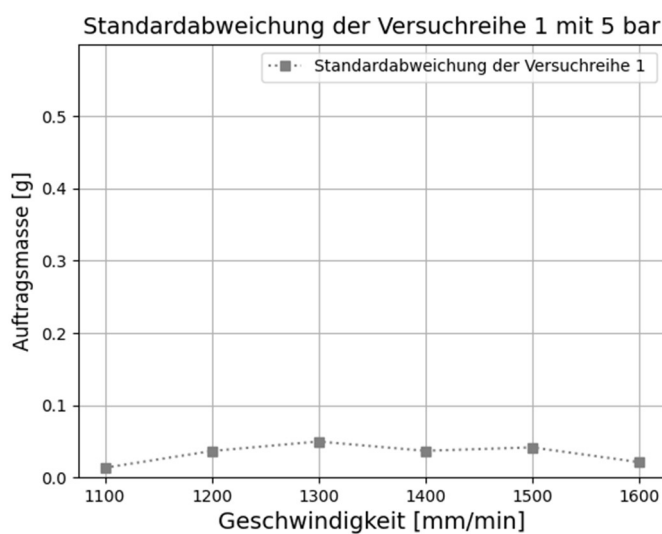


Abbildung 6-13: Standardabweichung der Versuchreihe 1 mit PU

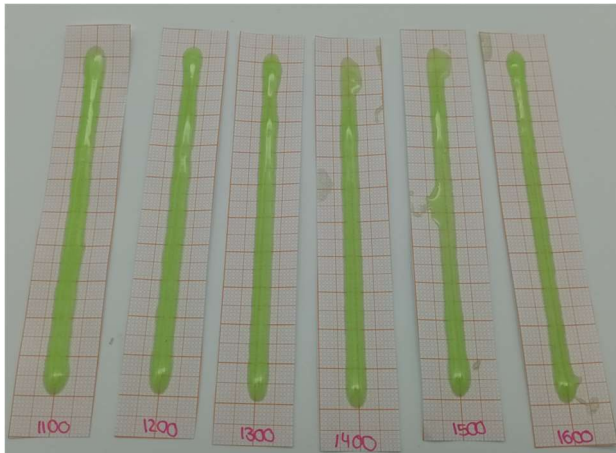


Abbildung 6-14: Auftragsbild des Durchgangs 3 der Versuchsreihe 1

Bei Betrachtung der Versuchsreihe 1 fällt auf, dass die einzelnen Durchgänge kaum von der Mittelwerts-Kurve abweichen (vgl. *Abbildung 6-12*). Dies wird bestätigt bei der Betrachtung der Standardabweichung, die in *Abbildung 6-13* dargestellt ist. Die Standardabweichung geht gegen null, sodass angenommen werden kann, dass die Ausbringvorrichtung 2 eine reproduzierbare Dosierung des Polyurethan-Klebstoff ermöglicht. In *Abbildung 6-14* ist zu erkennen, dass die Klebstoffraupen eine konstante Breite über ihre Länge haben. Es sind kleinere Anfangs- und Endkleckse zu erkennen. Die Breite der drei Klebstoffraupen, die mit einer Geschwindigkeit von 1400 mm/min und 1500 mm/min aufgetragen wurden, nimmt an einigen Stellen zu. Dies ist allerdings nicht auf den Klebstoffauftrag zurückzuführen, sondern auf das Umsetzen der Proben kurz nach dem Auftrag. Insgesamt wurden diese Beobachtungen in der Versuchsreihe 2 bestätigt.

6.2.4 Zusammenfassung und Fertigstellung der Ausbringvorrichtung 2

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Ausbringvorrichtung 2 sich sowohl für den Klebstoffauftrag mit Polyvinylacetat, sowie auch für den Polyurethan-Klebstoff eignet. Im Gegensatz zur Ausbringvorrichtung 1 kann sie beide Klebstoffe reproduzierbar ausbringen. Dies ist nicht zuletzt auf den höheren Materialdruck zurückzuführen, der dank des Rückzugventils auf die Kartusche aufgebracht werden kann. Dosierfehler, wie überhängende Klebstoffäden, können mit ihr vermieden werden. Weitere Dosierfehler, wie Anfangs- und Endkleckse sind aufgrund des eingesetzten Handhabungsgerät (vgl. 6.1.2) nicht zu vermeiden. Auch die Einschnürungen der PVAC-Klebstoffraupen durch eingeschlossene Luftporen müssen akzeptiert werden, da für das eingesetzte Rückzugventil ein Umfüllen des Klebstoffes in eine Kartusche zwingend notwendig ist.

Grundsätzlich erfüllt die zuvor beschriebene Ausbringvorrichtung 2 alle Anforderungen an die Laminierungsaufgabe (vgl. Kapitel 1.3). Eine weitere Optimierung der Ausbringvorrichtung war im Rahmen der Forschungsarbeit nicht notwendig, sodass für alle weitere Untersuchungen, die Ausbringvorrichtung 2 unverändert eingesetzt wurde.

6.3 Ermittlung der Dosierparameter mit Ausbringvorrichtung 2

Nachdem mit der Ausbringvorrichtung 2 das System für die Laminierungsaufgabe gefunden war, sollten die Systemeigenschaften näher untersucht werden. Dazu sollte in weiteren Versuchen die Korrelation zwischen Auftragsmasse und Auftragsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Materialdruckes näher betrachtet werden. Auf Basis dieser Untersuchungen wurde der Klebstoffraupenabstand bestimmt, der benötigt wird, um später die Holzwerkstoffplatten vollflächig miteinander zu verkleben. Ziel der Untersuchungen war es Richtwerte für den automatisierten Klebstoffauftrag zu finden. Dabei wurde versucht die Dosierparameter zu bestimmen, die für die Verklebung einer Platte mit minimalen Abmessungen (minimale Breite = 8 mm) notwendig sind.

6.3.1 Ermittlung Auftragsmasse in Abhängigkeit des Materialdrucks

Durch die gewählte Druck-Zeit Dosierung (vgl. Kapitel 6.1.1), hängt die Dosierung zum einen von der Öffnungszeit des Ventils, zum anderen von dem Materialdruck des Klebstoffes in der Kartusche ab. Die Öffnungszeit des Ventils wird durch die gewählte Auftragsgeschwindigkeit gesteuert. Der Materialdruck kann durch die Druckluftzufuhr auf die Kartusche variiert werden. Um den Einfluss dieser Parameter auf den Klebstoffauftrag bestimmen zu können, wurden zusätzliche Untersuchungen mit jeweils 3 bar und 7 bar durchgeführt. Es wurden beliebige Auftragsgeschwindigkeiten für die Versuche gewählt, die für die Verklebung von Platten minimaler Geometrie in Frage kommen. Die Auftragsgeschwindigkeit wurde im Gegensatz zu den vorangegangenen Untersuchungen um 200 mm/min gesteigert.

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung erfolgten, wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben. In den folgenden Tabellen sind ist eine Übersicht der zusätzlichen Versuchsreihen in Abhängigkeit der eingesetzte Klebstoff dargestellt.

Tabelle 6-8: Zusätzliche Versuchsreihen für Polyvinylacetat mit Ausbringvorrichtung 2

Versuchsreihe	Durchgang	Druck [bar]	Geschwindigkeiten [mm/min]
2	Durchgang 1	3	600 -1600
	Durchgang 2	3	600 -1600
	Durchgang 3	3	600 -1600
3	Durchgang 1	7	1800 - 2800
	Durchgang 2	7	1800 - 2800
	Durchgang 3	7	1800 - 2800

Tabelle 6-9: Zusätzliche Versuchsreihen für Polyurethan mit Ausbringvorrichtung 2

Versuchsreihe	Durchgang	Druck [bar]	Geschwindigkeiten [mm/min]
3	Durchgang 1	3	600-1800
	Durchgang 2	3	600-1800
	Durchgang 3	3	600-1800
4	Durchgang 1	7	600-1600
	Durchgang 2	7	600-1600
	Durchgang 3	7	600-1600
5	Durchgang 1	7	1800-2800
	Durchgang 2	7	1800-2800
	Durchgang 3	7	1800-2800

Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse vorgestellt. Dazu werden die Mittelwerte und die dazugehörige Standardabweichung der einzelnen Versuchsreihen in den folgenden Diagrammen abgebildet. Zu den zusätzlichen Versuchsreihen mit 3 bar und 7 bar, werden die Mittelwertkurven der Versuchsreihen mit 5 bar, die während der Überprüfung der Ausbringvorrichtung 2 durchgeführt wurden, dargestellt. Eine ausführliche Darstellung der einzelnen Ergebnisse findet sich im Anhang.

Polyvinylacetat

Zusammenfassung der Ergebnisse mit Polyvinylacetat und der Ausbringvorrichtung 2

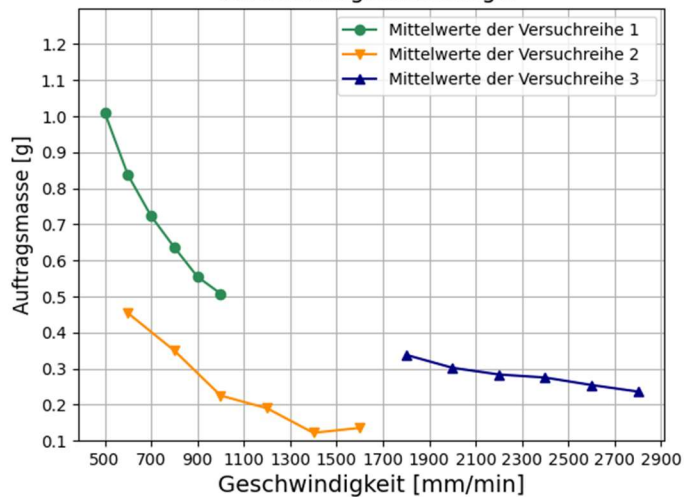


Abbildung 6-15: Zusammenfassung der Ergebnisse mit PVAC und Ausbringvorrichtung 2

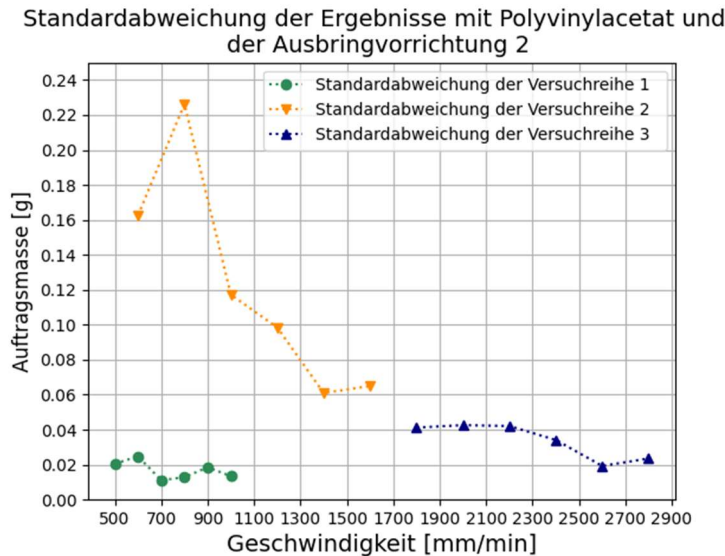


Abbildung 6-16: Standardabweichung der Ergebnisse mit PVAC und Ausbringvorrichtung 2

Beim Vergleich der Mittelwerte der drei Versuchsreihen fällt auf, dass die Auftragsmasse der Versuchsreihe 1 und Versuchsreihe 3 mit zunehmender Auftragsgeschwindigkeit durchgehend abnimmt (vgl. *Abbildung 6-15*). Dabei nimmt bei Versuchsreihe 1 die negative Steigung der Kurve mit zunehmender Auftragsgeschwindigkeit ab. Dies ist bei Versuchsreihe 3 nicht der Fall. Die Kurve hat eine annähernd konstante negative Steigung. Die Versuchsreihe 2 verzeichnet hingegen bei einer Geschwindigkeit von 1600 mm/min einen Anstieg der Auftragsmasse. Die Steigung nimmt mit unregelmäßigen Abständen ab, wie es zwischen 800mm/min und 1200 mm/min zu erkennen ist. In *Abbildung 6-16* ist Standardabweichung der Durchgänge der einzelnen Versuchsreihen abgebildet. Während die Standardabweichung der Versuchsreihen 1 und 3 annähernd gegen null geht, ist die Standardabweichung der Versuchsreihe 2 sehr hoch und stark variierend. Die Versuchsreihe 2 mit 3 bar liefert somit keine reproduzierbaren Ergebnisse.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der reproduzierbare Klebstoffauftrag bei einem Materialdruck von 5 bar und 7 bar mit der Ausbringvorrichtung 2 ohne weitere Probleme möglich ist. Das Dosieren des Klebstoffes bei 3 bar führt hingegen zu Abweichungen. Die Auftragsmasse nimmt nicht in regelmäßigen Abständen ab, teilweise nimmt sie trotz zunehmender Geschwindigkeit zu. Die ermittelte Auftragsmasse der einzelnen Durchgänge weicht stark voneinander ab. Dies ist auf die hohe Viskosität des Klebstoffes zurückzuführen. Wie in Kapitel 6.2.1 und 6.2.2 erläutert wird, nimmt mit zunehmender Viskosität des Klebstoffes der Materialwiderstand gegen das Ausbringen zu. Der gewählte Materialdruck scheint zu gering zu sein für die Ausbringvorrichtung 2, in der der Klebstoff durch das Rückzugventil einen längeren Weg überwinden muss als bei der Ausbringvorrichtung 1. Insgesamt fällt auf, dass die Auftragsmasse mit zunehmender Geschwindigkeit weniger stark abnimmt. Dies liegt an den hohen Auftragsgeschwindigkeiten. Je höher die Auftragsgeschwindigkeit, desto geringer die Öffnungszeit des Ventils, sodass weniger Klebstoff ausgebracht wird. Somit geht mit zunehmender Auftragsgeschwindigkeit die Auftragsmasse gegen null.

Polyurethan

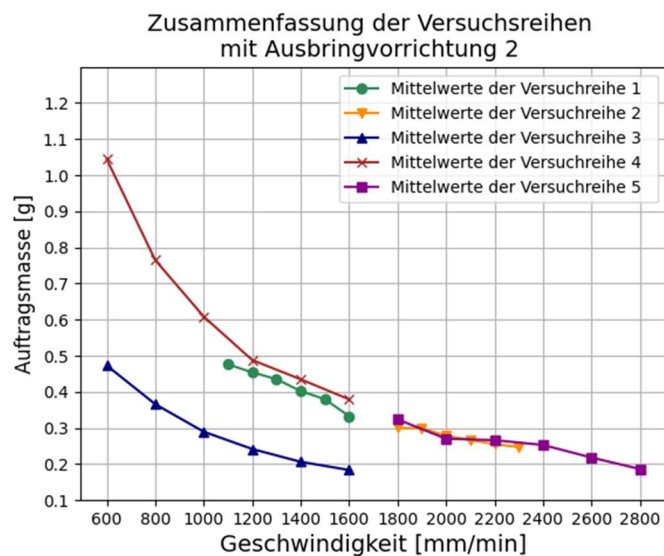


Abbildung 6-17: Zusammenfassung der Ergebnisse mit PU und Ausbringvorrichtung 2

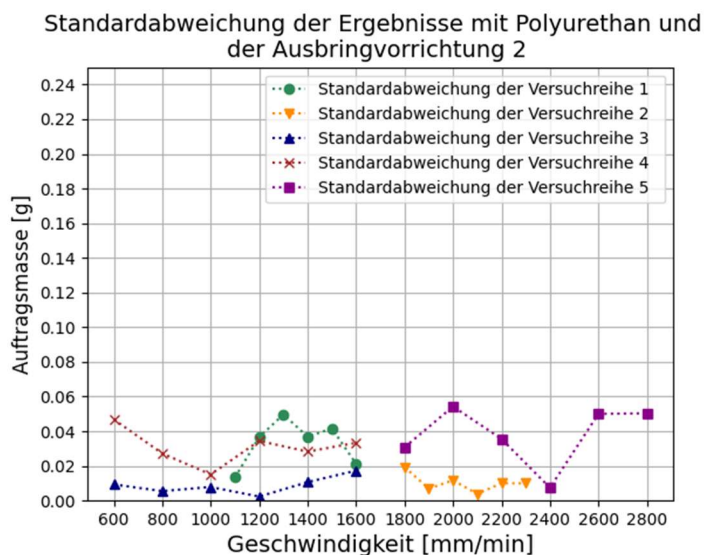


Abbildung 6-18: Standardabweichung der Ergebnisse mit PU und Ausbringvorrichtung 2

Insgesamt ist festzustellen, dass in jeder Versuchsreihe die Auftragsmasse mit zunehmender Auftragsgeschwindigkeit abnimmt (vgl. *Abbildung 6-21*). Wie bei den Versuchen mit der Polyvinylacetat-Dispersion, nimmt die Auftragsmasse bei niedrigeren Auftragsgeschwindigkeiten (600 mm/min-1600 mm/min) stärker ab. Auffallend sind hierbei die Unterschiede der Steigungen der Versuchsreihe 3 und 4. In der Versuchsreihe 3 mit 3 bar wurde quantitativ nur weniger Klebstoff ausgebracht als in der Versuchsreihe 4 mit 7 bar. Zudem nimmt die Auftragsmasse bei Versuchsreihe 4 mit 7 bar zunächst viel stärker ab als bei Versuchsreihe 3. Durch den deutlich höheren Druck von 7 bar wird der Materialwiderstand des Klebstoffes, der unter andere auf die Viskosität zurückzuführen ist, besser überwunden. Es wird deutlich mehr Klebstoff ausgebracht. Bei Betrachtung der Versuchsreihe 5 ist beobachten, dass die Auftragsmasse deutlich weniger stark

abnimmt. Dies ist wie oben beschrieben auf die kurze Öffnungszeit des Ventils zurückzuführen. Zudem fällt auf, dass die Verläufe der Versuchsreihen mit 5 bar (Versuchsreihe 1 und 2) sehr nah an den Verläufen der Versuchsreihen mit 7 bar liegen (Versuchsreihe 4 und 5). Der Materialdruck von 5 bar scheint den Widerstand des Klebstoffes genauso entgegenzuwirken, wie ein Materialdruck von 7 bar. Grundsätzlich war das Dosieren des Klebstoffes mit allen gewählten Materialdrücken reproduzierbar möglich. Die Standardabweichungen der einzelnen Durchgänge weichen kaum vom Mittelwert ab (vgl. *Abbildung 6-18*).

6.3.2 Ermittlung des Klebstoffraupenabstands für eine vollflächige Verklebung

Für eine vollflächige Verklebung der Holzwerkstoffplatten ist es von Bedeutung wie sich die Klebstoffraupen nach dem Fügen und Fixieren ausbreiten (Schuller 1998; Mosandl 2004). In Kapitel 4.3 wird der Zusammenhang zwischen der Oberflächenrauheit der Bauteile und der benötigten Auftragsmenge beschrieben. Es fanden keine näheren Untersuchungen zur Oberflächenrauheit der Holzwerkstoffplatten statt. Daher erfolgte die Bestimmung der idealen Auftragsmenge iterativ. Zusätzlich wurde die Ausbreitung der Klebstoffraupen für den Polyvinylacetat- und Polyurethan-Klebstoff untersucht, sowie die maximalen Abstände zwischen den einzelnen Klebstoffraupen. Wie zuvor beschrieben (vgl. Kapitel 6.3), sollten dabei die Parameter bestimmt werden, die zu Verklebung einer Platte mit minimalen Abmessungen notwendig sind.

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Für die Ermittlung der maximalen Abstände wurden insgesamt fünf Probekörper hergestellt. In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der Probekörper, sowie ihre Herstellungsparameter in Abhängigkeit des eingesetzten Klebstoffs angegeben:

Tabelle 6-10: Probekörper zur Ermittlung der Ausbreitung von PVAC- Klebstoffraupen

Probekörper-Nr.:	Materialdruck	Auftragungsgeschwindigkeit	Abstand Dosiernadel-Platte
1	5 bar	1000 mm/min	3 mm
2	7 bar	2200 mm/min	3 mm

Tabelle 6-11: Probekörper zur Ermittlung der Ausbreitung von PU-Klebstoffraupen

Probekörper-Nr.:	Materialdruck	Auftragungsgeschwindigkeit	Abstand Dosiernadel-Platte
1	3 bar	1000 mm/min	3 mm
2	5 bar	1800 mm/min	3 mm
3	7 bar	1800 mm/min	3 mm

Jeder Probekörper besteht aus jeweils zwei verklebten Holzwerkstoffplatten. Zur Herstellung wurde eine der Platten manuell auf der Arbeitsfläche des Portalroboters platziert. Anschließend wurde mit der aus Kapitel 6.2.3 beschriebenen Ausbringvorrichtung 2 der Klebstoff auf die Platte aufgetragen. Dazu wurden die Klebstoffraupen in vier Bereichen mit jeweils unterschiedlichen Abständen appliziert (vgl. *Abbildung 6-19* und *Abbildung 6-20*). Die Abstände in den einzelnen Bereichen variieren für die Probekörper mit PU und PVAC. Diese wurden in Abhängigkeit von Voruntersuchungen gewählt, die ergaben, dass sich die Klebstoffraupen um ihre doppelte Ursprungsbreite ausbreiten. Im letzten Bereich wurde eine einzelne Klebstoffraupe isoliert

aufgetragen. Nach dem Klebstoffauftrag wurden die Platten gefügt und unter einer Stahlplatte fixiert. Insgesamt lagen die Probekörper 24 Stunden unter der Stahlplatte. Zur Ermittlung der Raupenausbreitung wurden die Probekörper mit dem ausgehärteten Klebstoff mit vier Schnitten, orthogonal zur Klebstoffaufbringungsrichtung, im Abstand von ca. 10 mm geteilt (vgl. *Abbildung 6-21c*). Anschließend wurde bestimmt in welchen Bereichen sich die Klebstoffschicht durchgehend ausgebildet hatte. Zudem wurde untersucht, ob und in welchem Bereich der Klebstoff aus der Fuge austrat.

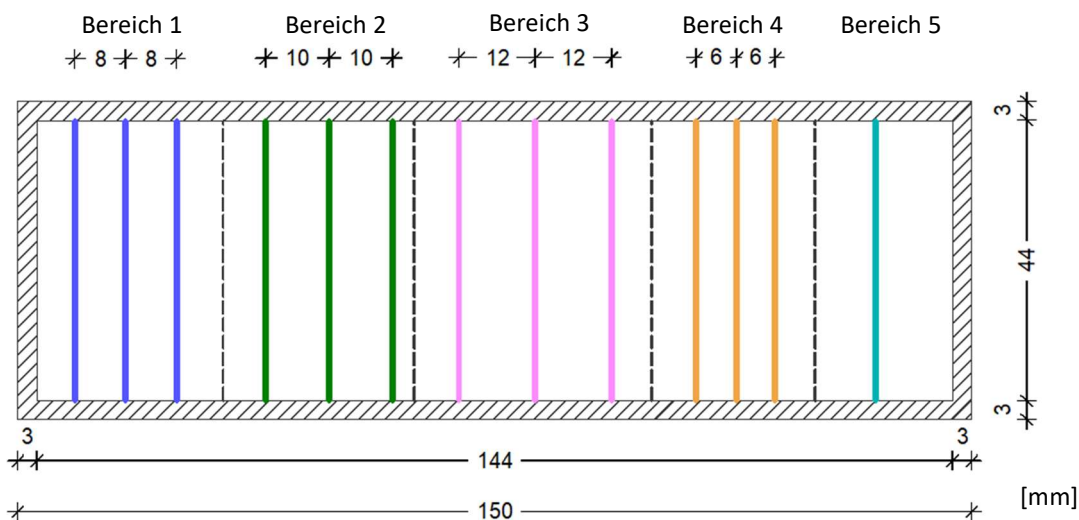


Abbildung 6-19: Skizze des Klebstoffauftrags für die Probekörper für PVAC

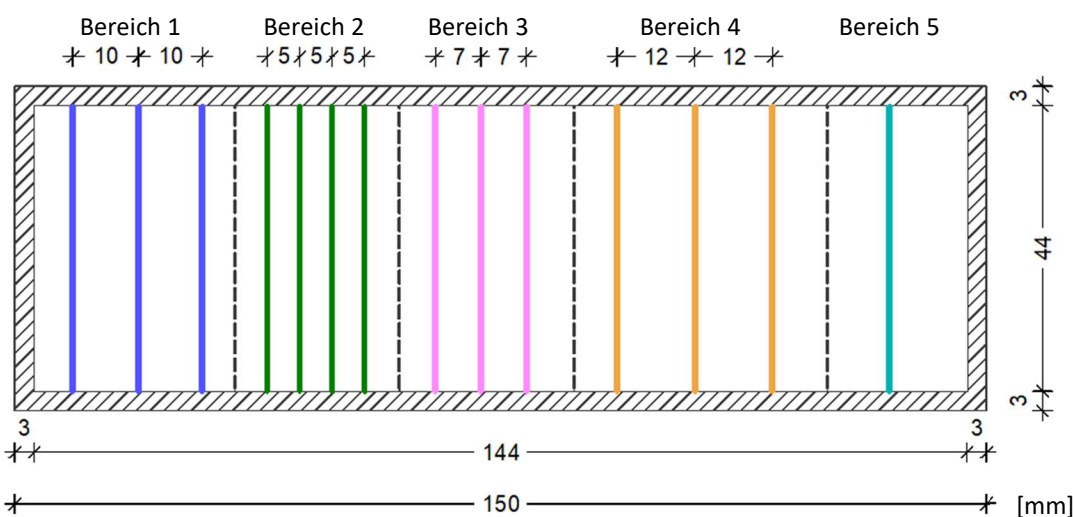


Abbildung 6-20: Skizze des Klebstoffauftrags für die Probekörper für PU

In der folgenden Tabelle lassen sich die Angaben zu dem verwendeten Material entnehmen:

Tabelle 6-12: Verwendetes Material zur Herstellung der Probekörper

Bezeichnung	Material	Abmessungen/ Masse
Holzwerkstoffplatte	Lignocel Maschinell gereinigt	L X B X D = 150 x 50 x 3 mm
Klebstoff mit Farbpartikeln	Jowapur vermischt mit fluoreszierendem Farbstoffpulver	/
	Ponal Fix und Fest vermischt mit fluoreszierendem Farbstoffpulver	/ [mm]
Stahlplatte	/	m = 6,8 kg Druck pro Holzwerkstoffplatte: $\rho = 0,9 \text{ kN/m}^2$

Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden wird nur auf zwei Probekörper detailliert eingegangen. Eine ausführliche Darstellung aller Probekörper befindet sich im Anhang.

Polyvinylacetatdispersion: Probekörper 1: 5 bar – 1000 mm/min

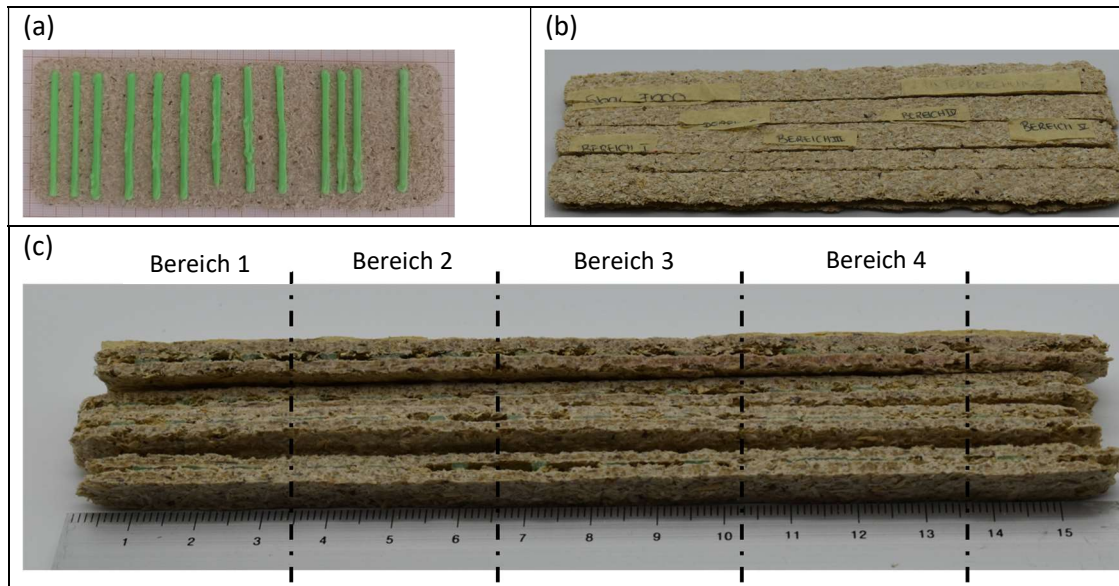


Abbildung 6-21: Abbildung des Probekörpers 1 vor dem Fügen (a), nach dem Aushärten (b), mit Schnittansicht (c)

Tabelle 6-13: Analyse der Klebstoffausbreitung für PVAC mit 5 bar und 1000 [mm/min]

	Klebstoffschicht durchgehend? ✓/x			
	Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3	Bereich 4
Schnitt 1	x	x	x	x
Schnitt 2	x	x	x	x
Schnitt 3	x	x	x	✓
Schnitt 4	x	x	x	✓

Bei Betrachtung der *Abbildung 6-21 a)* ist zu erkennen, dass die einzelnen Klebstoffraupen unterschiedliche Abstände zum Rand der Platte aufweisen. Zudem scheinen die drei Klebstoffraupen im Bereich 3 unregelmäßig zu sein. Insgesamt sind in fast jedem Bereich leichte Einschnürungen der Raupen zu erkennen. Ein Klebstoffaustritt hat nicht stattgefunden (vgl. *Abbildung 6-21 b)*). Eine durchgehende Klebstoffschicht hat sich nur im Bereich 4 in den Schichten 3 und 4 ausgebildet (vgl. *Abbildung 6-21 c)*). Im Bereich 5 breitete sich die Klebstoffraupe durchschnittlich um 0,5 cm aus.

Die unterschiedlichen Randabstände der Klebstoffraupen des Probekörpers resultieren aus dem manuellen Platzieren der Holzwerkstoffplatten auf der Arbeitsfläche der Portalfräse. Die Einschnürungen der Klebstoffraupen sind womöglich auf die Luftblasen in der Kartusche zurückzuführen, die beim Untermischen der Farbpartikel entstanden. Insgesamt konnte nur im Bereich 4 in der Schicht 3 und 4 eine annähernd durchgehende Klebstoffschicht hergestellt werden. Bei

einer durchschnittlichen Ausbreitung von 0,5 cm war der Abstand von 0,6 cm, der im Bereich 4 gewählt wurde, zu klein. Der geringe Abstand zwischen den Klebstoffraupen ist notwendig, da der Klebstoff hochviskos ist. Dadurch breitet sich der Klebstoff weniger auf der rauen Plattenoberfläche weniger aus. Aus diesem Grund werden Klebstoffe mit niedrigerer Viskosität für rauen Oberflächen empfohlen (Habenicht 2016). Zusätzlich können die Einschnürungen der Klebstoffraupen ein unregelmäßiges Ausbreiten vermieden haben. Zudem wurden alle Probekörper der Versuchsreihe unter eine Stahlplatte gelegt, sodass davon ausgegangen werden muss, dass der Druck auf die Probekörper unregelmäßig appliziert wurde. Dies könnte eine mögliche Erklärung sein, warum sich der Klebstoff nur in Schicht 3 und 4 wie vorgesehen ausbreiten konnte. Insgesamt lassen sich folgende Empfehlungen für Raupenabstände aus den Versuchen ableiten:

Tabelle 6-14: Empfehlungen für Raupenabstand mit PVAC

Probekörper-Nr.:	Materialdruck	Auftragungsgeschwindigkeit	Abstand Dosiernadel-Platte	Raupenabstand
1	5 bar	1000 mm/min	3 mm	a = 0,5 cm
2	7 bar	2200 mm/min	3 mm	a = 0,5 cm

Polyurethan: Probekörper 3: 7 bar - 1800 mm/min

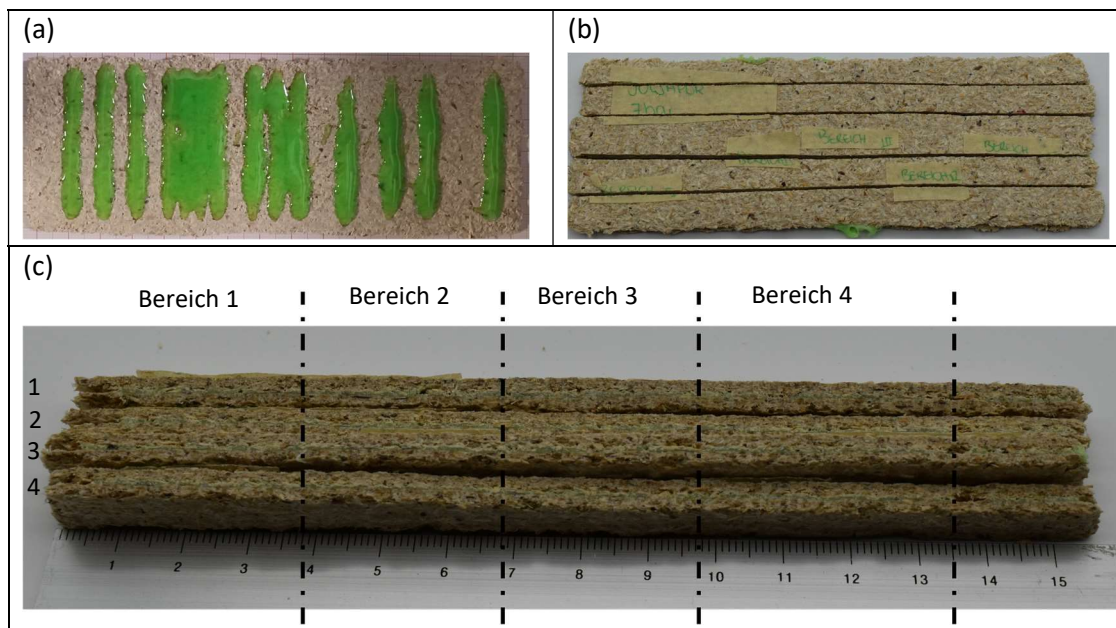


Abbildung 6-22: Abbildung des Probekörpers 3 vor dem Fügen (a), nach dem Aushärten (b), mit Schnittansicht (c)

Tabelle 6-15: Analyse der Klebstoff Ausbreitung für PU mit 7 bar und 1800 [mm/min]

	Klebstoffschicht durchgehend? ✓/x			
	Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3	Bereich 4
Schnitt 1	✓	✓	✓	✓
Schnitt 2	✓	✓	✓	✓
Schnitt 3	✓	✓	✓	✓
Schnitt 4	✓	✓	✓	✓

Die Klebstoffraupen haben ungefähr denselben Randabstand (vgl. *Abbildung 6-22 a*). Im Bereich 4 und 5 haben die Klebstoffraupen eine unregelmäßige Form. Dort sind die Klebstoffraupen am Anfangspunkt schmaler als am Endpunkt. In *Abbildung 6-22 b*) ist erkennen, dass der Klebstoff in Bereich 2 und 3 an den Plattenrändern ausgetreten ist. Insgesamt hat sich in allen Bereichen eine durchgehende Klebstoffschicht ausgebildet (vgl. *Abbildung 6-22 c*). In Bereich 5 bildete sich die Klebstoffraupe mit einer durchschnittlichen Breite von ca. 1,5 cm aus.

Die unterschiedlichen Randabstände der Klebstoffraupen lassen sich ebenfalls auf das manuelle Platzieren der Holzwerkstoffplatten zurückführen. Der Randabstand der Klebstoffraupen ist mit 3 mm zu klein für die gewählte Abständen von 0,5 cm und 0,7 cm. Das unregelmäßige Auftragsbild der Raupen im Bereich 3 kann mehrere Ursachen haben. Zum einen kann der unregelmäßige Dosiernadel-Bauteilabstand in diesem Bereich stark variiert haben. Das unregelmäßige Ausbreiten der Klebstoffraupe kann aber auch an der Oberflächenbeschaffenheit liegen. Möglicherweise war die Oberfläche im schmalen Bereich der Raupe rauer, sodass der Klebstoff sich nur eingeschränkt ausbreiten konnte. Insgesamt können aufgrund der niedrigeren Viskosität die

Klebstoffabstände zwischen den Raupen größer gewählt werden als die des PVAC. Es lassen sich folgende Empfehlungen für den Klebstoffauftrag aus der Untersuchung ableiten:

Tabelle 6-16: Empfehlungen für Raupenabstand mit PU

Probekörper-Nr.:	Materialdruck	Auftragungsgeschwindigkeit	Abstand Dosiernadel-Platte	Raupenabstand
1	3 bar	1000 mm/min	3 mm	a = 0,7 cm
2	5 bar	1800 mm/min	3 mm	a = 0,7 cm
3	7 bar	1800 mm/min	3 mm	a = 1,2 cm

6.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Entwicklung der Ausbringvorrichtung beschrieben, welche die Anforderungen an die Laminierungsaufgabe erfüllt. Dazu wurden mit Hilfe der Methode des Rapid Prototypings zwei Prototypen erstellt. Die Einsatzfähigkeit der Prototypen wurde anhand der Reproduzierbarkeit der Dosierung und dem Auftragsbild der Klebstoffraupen bewertet. Da der erste Prototyp (Ausbringvorrichtung 1) diese Kriterien nicht erfüllte, wurde dieser in einem zusätzlichen Iterationsschritt weiterentwickelt und optimiert. Der optimierte Prototyp (die Ausbringvorrichtung 2) erfüllte die Anforderungen, sodass dieser als finales System für den automatisierten Klebstoffauftrag gewählt wurde. Die Systemeigenschaften der Ausbringvorrichtung 2 wurden daraufhin näher untersucht. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden Richtwerte ermittelt, die es ermöglichen Platten mit minimaler Geometrie zu verkleben.

7 Gestaltung des finalen Endeffektors und finale Untersuchungen

7.1 Gestaltung des finalen Endeffektors

Die Handhabungs- und Laminierungsaufgabe sollte mit einem Endeffektor erfolgen. Dazu wurden das Coanda-Greifsystem sowie die entwickelte Ausbringvorrichtung 2 über eine 8 mm dicke Montageplatte am Führungsgetriebe des Portalroboters befestigt (vgl. *Abbildung 7-1*). Da zwischen Handhabungs- und Laminierungsaufgabe ein Werkzeugwechsel erfolgen musste, sollte die Ausbringvorrichtung in einer linearen Bewegung am Endeffektor ein- und ausgefahren werden. Dazu wurde diese an einer Linearachse befestigt (vgl. *Abbildung 7-1*). Der Antrieb der linearen Bewegung erfolgte dabei über einen Pneumatikzylinder. Um ein rückartiges Ausfahren des Pneumatikzylinders zu vermeiden, wurde die Druckluft für den Zylinder auf 1 bar reguliert. Der Pneumatikzylinder wurde über ein 5/2-Wegeventil angesteuert. Folgende Komponenten wurden für das Werkzeugwechselsystem verbaut:

Komponente der Dosiervorrichtung	Beschreibung	Hersteller
5/2 Wegeventil	M-07-510-HN	AIRTEC Pneumatic GmbH
Pneumatikzylinder	27291025	KUHNKE
Druckregler	Präzisionsdruckregler	k. A.

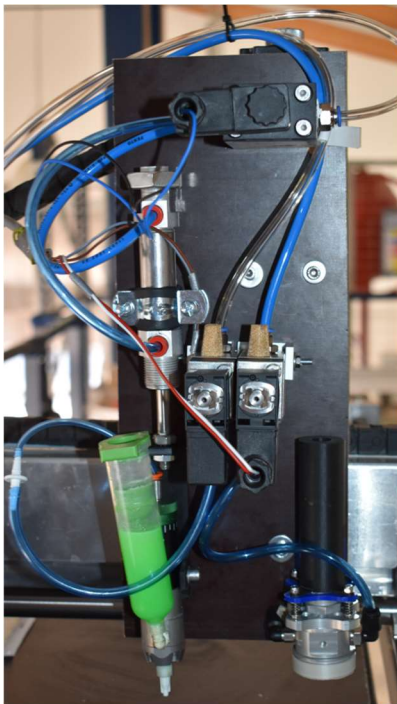


Abbildung 7-1: Abbildung des finalen Endeffektors

7.2 Experimentelle Untersuchungen

7.2.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

In den finalen experimentellen Untersuchungen sollte die Einsatzfähigkeit des Endeffektors überprüft werden. Dazu sollte der Endeffektor die Platten automatisiert handhaben und verkleben. Für die Versuche wurden die zu verklebenden Platten gestapelt und an einer definierten Position A auf der Arbeitsfläche des Portalroboters platziert. Die Versuche selbst erfolgten nach einem bestimmten Prinzip. Zu Beginn erfolgte die Handhabungsaufgabe durch das Greifsystem am Endeffektor (vgl. *Abbildung 7-2*). Dabei wurde die oberste Platte des Stapels an der definierten Position A aufgenommen, gehalten und an einer definierten Position B wieder abgelegt. Nach der abgeschlossenen Handhabung erfolgte die Laminierung der Platten. Dazu wurde zunächst die Ausbringvorrichtung ausgefahren, sodass der automatisierte Klebstoffauftrag auf der zuvor abgelegten Platte erfolgen konnte. Nach dem Beenden der Laminierung wurde die Ausbringvorrichtung wieder eingefahren. Anschließend erfolgte erneut die zuvor beschriebene Handhabungsaufgabe.

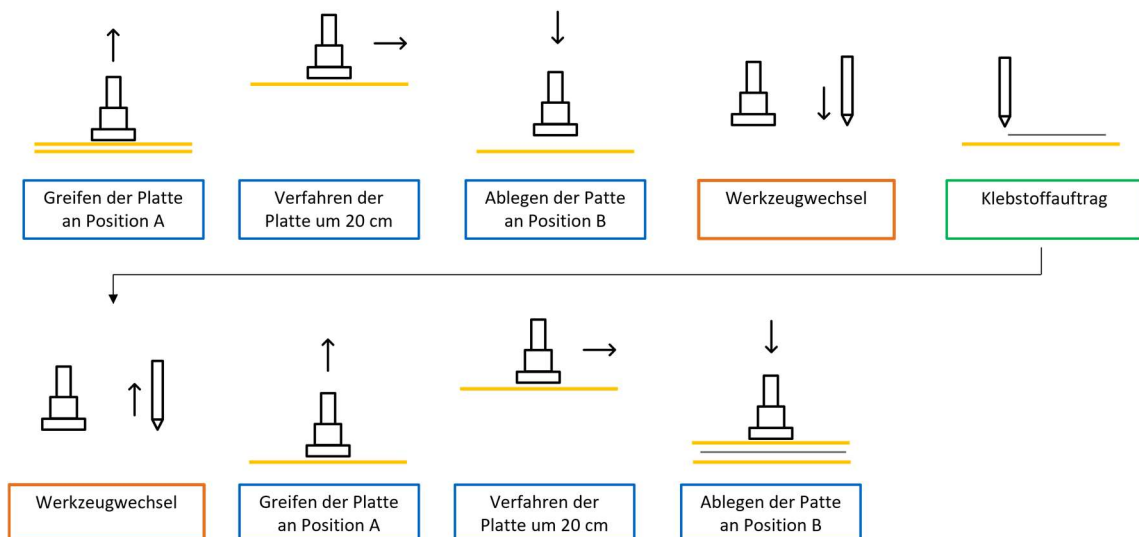


Abbildung 7-2: Schematische Darstellung des Ablaufs des finalen Versuchs

Die Handhabung und Laminierung der Platten sollte in den finalen Versuchen für eine beliebige Anzahl von vollflächigen Platten gleicher Geometrie erfolgen. Dazu wurde zunächst ein lokaler Nullpunkt auf der Arbeitsfläche der Portalfräse definiert. In Abhängigkeit dieses Nullpunktes wurde die Position A und B auf der Arbeitsfläche der Portalfräse festgelegt. Um die Bearbeitung für flexible rechteckige Geometrien zu ermöglichen, wurde ein parametrisiertes Programm geschrieben. Vor Programmstart wurden die folgenden Parameter abgefragt:

- Plattendicke
- Anzahl der zu verklebenden Platten
- Länge der Platten
- Breite der Platten
- Abstand der Klebstoffraupen (5 mm oder 10 mm)

Die Eingaben wurden im Programm als Variablen abgespeichert. In Abhängigkeit dieser Variablen konnten im Programm die wichtigen Koordinaten für die Handhabung und Laminierung der Platten berechnet werden.

Das Programm selbst enthielt zwei Schleifen: eine für die Handhabung und eine für die Laminierung der Platten (vgl. *Abbildung 7-3*). Dabei war die Schleife für die Laminierung in der Schleife der Handhabung integriert. In der Handhabungsschleife fuhr der Greifer zunächst die berechneten Koordinaten des Schwerpunktes (X,Y) der Platten in Position A an. Durch die Plattendicke und Anzahl der zu verklebenden Platten war die Z-Koordinate der obersten Platte bekannt. Die Platte wurde gegriffen, verfahren und in Position B abgelegt. Es erfolgte der Werkzeugwechsel, die Ausbringrichtung wurde ausgefahren. Die Ausbringvorrichtung wurde in Abhängigkeit der Plattendicke in Z-Richtung positioniert. Es erfolgte der Beginn Laminierungsschleife. Diese wurde zur Übersicht in einem Unterprogramm gespeichert. Dabei wurde die Ausbringvorrichtung zum Anfangspunkt der ersten Klebstoffraupe gefahren. In Abhängigkeit des Klebstoffraupenabstands wurde die Ausbringvorrichtung zum nächsten Anfangspunkt gefahren. Die Schleife wiederholte sich in Abhängigkeit des zuvor eingegebenen Klebstoffraupenabstands und der Plattenbreite. Mit dem Ende der Laminierungsschleife wurde auch die Handhabungsschleife beendet. Vor Beginn der nächsten Schleife wurden die neuen Z-Koordinaten der Platten in Position A und B ermittelt. Die zuvor beschriebenen Handhabungsschleifen wiederholten sich in Abhängigkeit der zu verklebenden Platten. Die letzte Platte wurde außerhalb der Schleife in Position A gegriffen und in Position B abgelegt.

The image shows a GCode-Editor window with a CNC program. The program is divided into several sections, each annotated with a callout box:

- Berechnung der Variablen:** Lines 1-25 show the initial setup, including parameter definitions and calculations for layer height, width, and hatch distance.
- Beginn Handhabungsschleife:** Line 49 marks the start of a main loop that repeats the lamination process.
- Handhabung der letzten Platte:** Lines 70-94 show the handling of the final plate, including specific G-code for positioning and lamination.
- Öffnen Unterprogramm mit Laminierungsschleife:** Line 66 shows a call to a subprogram (M99) that contains the lamination loop.
- Beginn Laminierungsschleife:** Line 99 marks the start of the lamination loop within the subprogram.

The GCode includes various commands such as `ASKINT` for user input, `REPEAT` and `NEXT` for loops, `CALL` for subprograms, and standard G-code for movement and lamination.

Abbildung 7-3: Programm der finalen Versuchsreihe

7.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Eine ausführliche Dokumentation des finalen Versuchs findet sich im digitalen Anhang. In den folgenden Abbildungen sind Ausschnitte des Versuchs dargestellt.

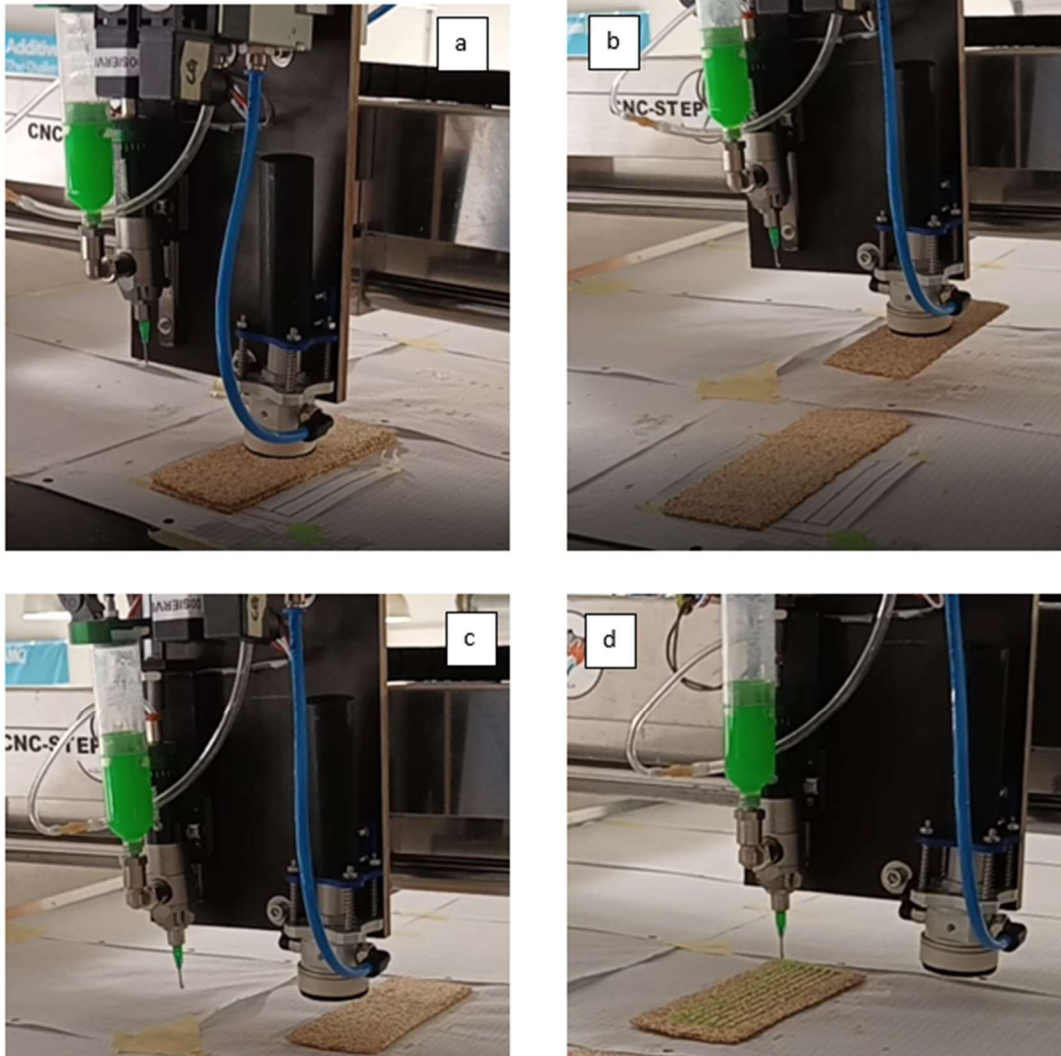


Abbildung 7-4: Endeffektor beim Aufnehmen der Platte a) beim Halten der Platte b) beim Werkzeugwechsel c) beim Klebstoffauftrag mit PU d)

Grundsätzlich war das Verkleben der Platten möglich. Allerdings entsprach die Auftragsmasse nicht den ermittelten Werten aus den Vorversuchen, sodass der Abstand zwischen den Klebstoffraupen zu klein war (vgl. *Abbildung 7-4 d*). Eine vollflächige Verklebung fand daher nicht statt. Zudem wurden in der finalen Versuchsreihe große Anfangs- und Endkleckse von der Ausbringvorrichtung produziert. Nach den Versuchen stellte sich heraus, dass einige Dichtungsringe im Rückzugventil beschädigt waren. Daher konnte der Klebstoff nicht in seiner Form ausgebracht werden.

8 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit wurde ein Endeffektor hergestellt, mit dem die Handhabung sowie die Laminierung additiv gefertigter Holzwerkstoffplatten möglich ist. Die Bearbeitung der Handhabungs- und Laminierungsaufgabe erfolgte getrennt.

Bei der Entwicklung des Handhabungssystems wurden zunächst drei unterschiedliche Vakuumgreifsysteme entwickelt. Dabei wurden eine Doppelkolbenvakuumpumpe, eine Venturi-Ejektor und ein Coanda-Ejektor als Vakuumerzeuger näher untersucht. Insgesamt konnte nur das Greifsystem mit dem Coanda-Ejektor die Anforderungen an die Handhabungsaufgabe erfüllen, sodass dieses System weiterentwickelt wurde. Im Rahmen dieser Optimierung wurden unterschiedliche Saugnäpfe für den Greifer hergestellt und untersucht. Dabei ermöglichten nur die Saugnäpfe mit einem Durchmesser von 40 mm die präzise Handhabung von kleinen und schmalen Platten. Die höchste Leistung erbrachten die Saugnäpfe, die mit einer 5 mm dicken EPDM-Moosgummischicht versehen wurden. Durch die Moosgummischicht konnte die Wirkfläche, auf der der Unterdruck erzeugt wurde, am besten abgedichtet werden. Die Saugnäpfe mit der Moosgummischicht konnten vollflächige Platten bis zu einem Gewicht von 550 g anheben. Das maximal aufnehmbare Moment lag bei $5,5 \times 10^{-3}$ Nm. Dabei gilt zu beachten, dass es weiterer Untersuchungen bedarf, da die Methodik der Versuche in der hier vorgestellten Arbeit ausbaufähig ist. Zudem wurden die Versuche nur mit dem vom Hersteller empfohlenen Betriebsdruck von 5 bar durchgeführt. Im Rahmen der Forschungsarbeit konnte allerdings festgestellt werden, dass eine Erhöhung des Druckes auf 7 bar die Leistungsfähigkeit steigert. Zusätzlich muss das Greifsystem gelenkig am Führungsgetriebe des Roboters befestigt werden. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde zwar eine gelenkige Lagerung konstruiert, allerdings bedarf es weiterer Optimierung an der Halterung für das Greifsystem.

Die Entwicklung des Systems zum automatisierten Klebstoffauftrag erfolgte nach der Methode des Rapid Prototypings. Dabei wurden in kurzen Iterationszyklen zwei Ausbringvorrichtungen entwickelt. Die zweite und finale Ausbringvorrichtung erfüllte die Anforderungen der Laminierungsaufgabe. In dieser Ausbringvorrichtung erfolgt die Dosierung nach der Zeit-Druck-Methode. In der Vorrichtung ist ein Rückzugventil integriert mit dem der Klebstoffauftrag von Polyvinylacetat-Dispersionen sowie Polyurethan-Klebstoffen genau dosierbar ist. Durch den Rückzugeffekt des Ventils wird ein exakter Klebstoffabriss erreicht. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden erste Richtwerte für die Dosierparameter ermittelt. Um die Systemeigenschaften genauer einschätzen zu können, bedarf es weiterer Untersuchungen. Der Klebstoffauftrag erfolgte mit der Ausbringvorrichtung sauber. Einige Dosierfehler, wie Anfangs- und Endkleckse waren aufgrund des gewählten Handhabungsgeräts unvermeidbar.

Das entwickelte Handhabungssystem und die entwickelte Ausbringvorrichtung wurden gemeinsam im finalen Endeffektor verbaut. Der Endeffektor kann eine beliebige Anzahl an Platten handhaben und verkleben, solange die Geometrie der Platten bekannt ist und die Platten zuvor ausgerichtet wurden. Der Endeffektor wurde für die Anwendung mit kleineren Platten konzipiert. Für die Handhabung großflächiger Platten müssen sein Handhabungs- und Laminierungssystem erweitert werden. Das Handhabungssystem kann dafür beispielsweise mit weiteren Coanda-

Greifern ausgestattet werden. Auch die Anschaffung eines Vakuumbelüfters kann bei einer höheren Betriebsleistung in Betracht gezogen werden. Das gewählte Auftragsverfahren der Ausbringvorrichtung eignet sich hingegen nicht für das Verkleben großflächiger Platten. In diesem Fall müsste ein neues Auftragsverfahren gewählt und eine neue Ausbringvorrichtung entwickelt werden.

9 Literaturverzeichnis

Anger, Heike et al. (2022): Baustellen ohne Bauarbeiter? Personalmangel bringt Wohnungsbau- und Klimaziele in Gefahr. Für die Wohnungsbauoffensive und die energetische Sanierung braucht es zusätzliche Arbeitskräfte. Doch die sind auf dem Bau heute schon Mangelware. In: *Handelsblatt*, 26.05.2022. Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/fachkraeftemangel-baustellen-ohne-bauarbeiter-personalmangel-bringt-wohnungsbau-und-klimaziele-in-gefahr/28375640.html>, zuletzt geprüft am 15.07.2022.

Barbosa et al. (2017): Reinventing construction: A route to higher productivity. Unter Mitarbeit von Barbosa, Woetzel, Mischke, Ribeirinho, Sridhar, Parsons et al. Hg. v. McKinsey Global Institute. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.de/~ /media/mckinsey/business%20functions/operations/our%20insights/reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/mgi-reinventing-construction-a-route-to-higher-productivity-full-report.pdf>, zuletzt geprüft am 08.05.2022.

Bartenschlager, Jörg; Hebel, Hans; Schmidt, Georg (1998): Handhabungstechnik mit Robotertechnik. Funktion, Arbeitsweise, Programmierung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag; Imprint (Viewegs Fachbücher der Technik).

Bauindustrie (Hg.) (2022): Fachkräftesituation im Bauhauptgewerbe. Online verfügbar unter <https://www.bauindustrie.de/themen/news-detail/fachkraeftesituation-im-bauhauptgewerbe>, zuletzt geprüft am 08.05.2022.

Blenkenfeld, Ulrike et al. (2018): Ressourcenschonendes Bauen. Besonders beim Bauen sollen Umwelt- und Ressourcenschutz eine größere Rolle spielen. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Monatsbericht/Monatsbericht-Themen/2018-09-bauen.pdf?__blob=publication-file&v=6, zuletzt geprüft am 08.05.2022.

Braun, Detlev (1989): Industrieroboter. Auslegung von pneumatischen Flächengreifern. Köln: Verl. TÜV Rheinland (Logistik-Leitfaden).

Buschmann, Birger et al. (2021): Additive Manufacturing of Wood Composite Panels for Individual Layer Fabrication (ILF). In: *Polymers* 13 (19). DOI: 10.3390/polym13193423.

CNC-STEP GmbH & Co. KG (2018): KinetiC-NC Referenzhandbuch, 10.11.2018.

DOPAG (Hg.) (2022): Nadeldosierventile. Online verfügbar unter <https://www.dopag.de/produkte/dosierkomponenten-pumpen/dosierventile/nadeldosierventile/>, zuletzt geprüft am 15.08.2022.

Endlich (1995): Fertigungstechnik mit Kleb- und Dichtstoffen: Vieweg+Teubner Verlag.

DIN 8593-8, 2003-09: Fertigungsverfahren Fügen-Teil 8: Kleben; Einordnung, Unterteilung, Begriffe.

FESTO SE & Co.KG (2022): Grundlagen der Vakuumtechnik, Kurzübersicht. Hg. v. FESTO SE & Co.KG. Online verfügbar unter https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/9916/Grundlagen_Vakuumtechnik.pdf, zuletzt aktualisiert am 13.09.2022, zuletzt geprüft am 13.09.2022.

Fleischer, Jürgen et al. (2016): Sustainable Manufacturing Through Energy Efficient Handling Processes. In: *Procedia CIRP* 40, S. 574–579. DOI: 10.1016/j.procir.2016.01.136.

Gardener, Douglas J.; Wang, Lu (Hg.) (2019): Additive Manufacturing of Wood-based Materials for Composite Applications. 2019 SPE Automotive Composites Conference & Exhibition. Novi, Michigan, September 2019.

Götz, Robert (1991): Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile. Berlin, New York: Springer (IWB Forschungsberichte, Bd. 39).

VDI 2740, 1995: Greifer für Handhabungsgeräte und Industrieroboter.

Habenicht, Gerd (2009): Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen: Springer Berlin Heidelberg.

Habenicht, Gerd (2016): Kleben - erfolgreich und fehlerfrei. Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie. Seventh edition. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Henke, Klaudius (2016): Additive Fertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Holz und Baukonstruktion. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/1307185>, zuletzt geprüft am 15.07.2022.

Henke, Klaudius et al. (2021): Individual layer fabrication (ILF): a novel approach to additive manufacturing by the use of wood. In: *Eur. J. Wood Prod.* 79 (3), S. 745–748. DOI: 10.1007/s00107-020-01646-2.

Hesse, Stefan (1991): Greifer-Praxis. Greifer in der Handhabungstechnik. 1. Aufl. Würzburg: Vogel (Vogel-Fachbuch).

Hesse, Stefan (1998): Industrieroboterpraxis. Automatisierte Handhabung in der Fertigung. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.

Hesse, Stefan (2011): Greifertechnik. Effektoren für Roboter und Automaten. München: Hanser.

Hesse, Stefan (2016): Grundlagen der Handhabungstechnik. 4 Aufl. [Erscheinungsort nicht ermittelbar]: Carl Hanser.

Hesse, Stefan; Monkman, Gareth; Steinmann, Ralf; Schunk, Henrik (2004): Robotergreifer. Funktion, Gestaltung und Anwendung industrieller Greiftechnik. [Online-ausg.]. München [u.a.]: Hanser.

Industrieverband Klebstoffe e.V. (Hg.) (2022): 8.3.3 Dosierventile. Online verfügbar unter <https://leitfaden.klebstoffe.com/8-3-3-dosierventile/>, zuletzt geprüft am 15.08.2022.

J. Schmalz GmbH (Hg.) (2022a): Balgsauger. Online verfügbar unter [https://www.schmalz.com/de-de/glossar/balgsauger/#:~:text=Balgsauger%20sind%20Sauger%20\(Elastomerteil\)%20mit,auf%20Grund%20ihres%20Faltenbalgs%20ausgew%C3%A4hlt.,](https://www.schmalz.com/de-de/glossar/balgsauger/#:~:text=Balgsauger%20sind%20Sauger%20(Elastomerteil)%20mit,auf%20Grund%20ihres%20Faltenbalgs%20ausgew%C3%A4hlt.,) zuletzt geprüft am 05.08.2022.

J. Schmalz GmbH (Hg.) (2022b): FM-SW 38x22 N10. Online verfügbar unter <https://www.schmalz.com/de-de/vakuumtechnik-fuer-die-automation/vakuum-komponenten/flaechengreifsysteme-und-endeffektoren/vakuum-flaechengreifsysteme-fx-fm/flaechengreifsysteme-fm-sw-306896/10.01.10.00841/>, zuletzt geprüft am 13.09.2022.

J. Schmalz GmbH (Hg.) (2022c): Theoretische Haltekraft eines Sauggreifers. Online verfügbar unter <https://www.schmalz.com/de-de/vakuum-wissen/vakuumsystem-und-seine-bauteile/systemauslegung-berechnungsbeispiel/theoretische-haltekraft-eines-sauggreifers/>, zuletzt geprüft am 05.08.2022.

J. Schmalz GmbH (Hg.) (2022d): Vakuum-Flächengreifsysteme FXP/FMP. Online verfügbar unter <https://www.schmalz.com/de-de/vakuumtechnik-fuer-die-automation/vakuum-komponenten/flaechengreifsysteme-und-endeffektoren/vakuum-flaechengreifsysteme-fxp-fmp/>, zuletzt aktualisiert am 14.09.2022.

Jousten, Karl (Hg.) (2018): Handbuch Vakuumtechnik. 12., neu bearbeitete Auflage. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg.

Kern, Patrick (2016): Elastomerreibung und Kraftübertragung beim Abscheren von aktiv betriebenen Vakuumgreifern auf rauen Oberflächen. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

DIN EN 923, 2016-03: Klebstoffe-Benennung und Definitionen; Deutsche Fassung EN 923: 2015.

Lien, T. K. et al. (2008): A novel gripper for limp materials based on lateral Coanda ejectors. In: *CIRP Annals* 57 (1), S. 33–36. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.119.

Liou, Fwewen Frank (2019): Rapid Prototyping and Engineering Applications. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Mosandl, Thomas (2004): Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme. Dissertation. Technische Hochschule München, München. Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik der Technischen Universität München. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/116100537-Qualitaetssteigerung-bei-automatisiertem-klebstoffauftrag-durch-den-einsatz-optischer-konturfolgesysteme.html>.

PORTATEC GmbH (Hg.) (2022): Eine Fräsunterlage - Viele Vorteile. Online verfügbar unter <https://portatec.de/funktionsweise-vilmill/>, zuletzt geprüft am 15.10.2022.

Pott, Andreas; Dietz, Thomas (2019): Industrielle Robotersysteme. Entscheiderwissen für die Planung und Umsetzung wirtschaftlicher Roboterlösungen. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Pralle, Norbert et al. (2021): Die Aufgaben und Chancen der Baubranche. Hg. v. ingenieur.de. Online verfügbar unter <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bauingenieur/innovationen-in-der-baubranche/die-aufgaben-und-chancen-der-baubranche/>, zuletzt geprüft am 08.05.2021.

DIN 1343, 1990: Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen; Begriffe und Werte.

Schlickerieder, Klaus Peter (2007): Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile. Forschungsbericht. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik der Technischen Universität München.

Schuller, Richard W. (1998): Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik.

Straub, David (2020): Methode zur technischen Auslegung von Vakuumgreifsystemen mit einer Mindesthaltedauer auf Basis fluidischer Untersuchungen. Dissertation.

Tomec, Daša Krapez et al. (2022): Use of Wood in Additive Manufacturing: Review and Future Prospects. In: *Polymers* 14 (6). DOI: 10.3390/polym14061174.

Umwelt Bundesamt (2021): Abfallaufkommen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall>, zuletzt aktualisiert am 08.05.2022.

UNEP (2020): 2020 Global status report for buildings and construction. Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. Online verfügbar unter <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/34572>, zuletzt geprüft am 08.05.2020.

ISO 3529, 2019-07: Vacuum technology - Vocabulary - Part 1: General terms.

VIEWEG GmbH (Hg.) (2021): Dosierventil - Quetschventil. Online verfügbar unter <https://www.dosieren.de/produkte/dosierventile/quetschventil/>, zuletzt geprüft am 14.08.2022.

10 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1-1: Schematische Darstellung der Prozessschritte nach (Buschmann et al. 2021) , Erklärung der Nummerierung im Text.....</i>	3
<i>Abbildung 1-2: Flussdiagramm zum Vorgehen der Entwicklung des Endeffektors.....</i>	5
<i>Abbildung 1-3: Ablaufschema des Rapid Prototypings nach (Liou 2019)</i>	6
<i>Abbildung 3-1: Gliederung des technischen Greifens nach (Hesse 1998)</i>	9
<i>Abbildung 3-2: Physikalische Wirkprinzipien nach (Hesse 1998)</i>	10
<i>Abbildung 3-3: Kraftübertragung von Vakuumgreifsystemen (Hesse 2011)</i>	13
<i>Abbildung 3-4: Saugflächenveränderung bei anliegendem Vakuum(Hesse 2011)</i>	13
<i>Abbildung 3-5: Lastfälle beim Halten, Heben und Verschieben(Hesse 2011)</i>	13
<i>Abbildung 3-6: Beispielhafter Aufbau eines Vakuumgreifsystems</i>	14
<i>Abbildung 3-7: Einteilung der Funktionsprinzipien von Vakuumpumpen nach (Jousten 2018)..</i>	15
<i>Abbildung 3-8: Schematischer Aufbau der Verdrängervakuumpumpe (links) und der kinetischen Vakuumpumpe (rechts) (FESTO SE & Co.KG 2022).....</i>	15
<i>Abbildung 3-9: Aufbau eines Einstufenejektors (links) und das dazugehörige Schaltbild (rechts) (Hesse et al. 2004).....</i>	16
<i>Abbildung 3-10: Leistungsvergleich typischer Vakuumerzeuger nach (Lien und Davis 2008)</i>	17
<i>Abbildung 3-11: Aufbau eines Mehrstufenejektors (links) und das dazugehörige Schaltbild (rechts) (Hesse et al. 2004).....</i>	17
<i>Abbildung 3-12: Aufbau eines Greifers mit Coanda-Prinzip nach (Fleischer et al. 2016)</i>	18
<i>Abbildung 3-13: Bauformen von Vakuumgreifern nach (Braun 1989) und (Kern 2016).....</i>	19
<i>Abbildung 3-14: Strömungswiderstand mit Verschlusskegeln (links) und mit Schwimmer (rechts) (Hesse et al. 2004)</i>	21
<i>Abbildung 3-15: Schematischer Aufbau eines Druckluftsaugers (Hesse et al. 2004).....</i>	22
<i>Abbildung 3-16: Schematischer Aufbau eines Haftsaugers mit Belüftungshebel (Hesse et al. 2004)</i>	23
<i>Abbildung 4-1: Aufbau einer Klebung nach (Habenicht 2009).....</i>	24

<i>Abbildung 4-2: Prozessschritte bei der Herstellung einer Klebung nach (Habenicht 2016)</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 4-3: Auftragsverfahren für Klebstoffe (Habenicht 2016)</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 4-4: Auswahl an Komponenten zum Aufbau einer automatisieren Dosierstation nach (Schuller 1998) und (Habenicht 2009).....</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 4-5: Wichtige Formen von Entnahmesysteme nach (Endlich 1995).....</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 4-6: Schematischer Aufbau eines Quetschventils nach (Endlich 1995).....</i>	<i>29</i>
<i>Abbildung 4-7: Schematischer Aufbau eines pneumatischen Nadeldosierventils nach (Endlich 1995).....</i>	<i>30</i>
<i>Abbildung 4-8: Schematischer Aufbau eines Rückzugventils nach (Endlich 1995).....</i>	<i>31</i>
<i>Abbildung 4-9: Viskositätsbereiche nach (Habenicht 2016).....</i>	<i>32</i>
<i>Abbildung 4-10: Zusammenhang von Klebschichtdicke und Oberflächenrauheit (Habenicht 2016)</i>	<i>33</i>
<i>Abbildung 5-1: Vakuumgreifsystem (links) und dazugehöriger Schaltplan (rechts)</i>	<i>37</i>
<i>Abbildung 5-2: Saugplattengreifer mit MDF-Platte bei Teilflächenbelegung</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 5-3: Flächengreifer FMxSW (links) (J. Schmalz GmbH 2022b) und Schaltplan der experimentellen Untersuchung (rechts)</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 5-4: Versuchsplatten mit glatter Oberflächenbeschaffenheit.....</i>	<i>43</i>
<i>Abbildung 5-5: Strömungsgreifer SCG ohne Saugnapf (links) Schaltplan der experimentellen Untersuchung (rechts)</i>	<i>44</i>
<i>Abbildung 5-6: Aufnahme der Platte am Rand des Saugnapfes (rechts) Verschieben der Platte nach Anheben in Richtung Mittelpunkt des Saugnapfes (links)</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 5-7: Composite Greifer mit Befestigung am Handhabungsgerät Vorderansicht (links) Seitenansicht (rechts)</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 5-8: Versuchsaufbau (rechts) und dazugehöriger Schaltplan (links).....</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 5-9: Durchgebogene Halterung (blau) des Strömungsgreifers</i>	<i>52</i>
<i>Abbildung 6-1: Ablauf der Entwicklung der Ausbringvorrichtung</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 6-2: Aufbau der Ausbringvorrichtung 1 (links) mit Schaltplan (rechts).....</i>	<i>58</i>

<i>Abbildung 6-3: Versuchsaufbau für die Ermittlung der Auftragsmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit</i>	59
<i>Abbildung 6-4: Auftragsmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für Versuchsreihe 1 mit PVAC</i>	60
<i>Abbildung 6-5: Standardabweichung der Versuchsreihe 1 mit PVAC</i>	60
<i>Abbildung 6-6: Klebstoffraupen mit Polyvinylacetat aus Ausbringvorrichtung 1</i>	61
<i>Abbildung 6-7: Auftragsmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für Versuchsreihe 2 mit PU</i>	62
<i>Abbildung 6-8: Auftragsbild der Klebstoffraupen nach dem Aushärten</i>	62
<i>Abbildung 6-9: Ausbringvorrichtung 2</i>	64
<i>Abbildung 6-10: Auftragsmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für Versuchsreihe 1 mit PVAC (links) Auftragsbild der Klebstoffraupe nach Aushärten mit 1000 mm/min (rechts)</i>	66
<i>Abbildung 6-11: Standardabweichung der Versuchsreihe 1 mit PVAC</i>	66
<i>Abbildung 6-12: Auftragsmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für Versuchsreihe 1 mit PU</i>	67
<i>Abbildung 6-13: Standardabweichung der Versuchsreihe 1 mit PU</i>	67
<i>Abbildung 6-14: Auftragsbild des Durchgangs 3 der Versuchsreihe 1</i>	68
<i>Abbildung 6-15: Zusammenfassung der Ergebnisse mit PVAC und Ausbringvorrichtung 2</i>	70
<i>Abbildung 6-16: Standardabweichung der Ergebnisse mit PVAC und Ausbringvorrichtung 2</i> ...	71
<i>Abbildung 6-17: Zusammenfassung der Ergebnisse mit PU und Ausbringvorrichtung 2</i>	72
<i>Abbildung 6-18: Standardabweichung der Ergebnisse mit PU und Ausbringvorrichtung 2</i>	72
<i>Abbildung 6-19: Skizze des Klebstoffauftrags für die Probekörper für PVAC</i>	74
<i>Abbildung 6-20: Skizze des Klebstoffauftrags für die Probekörper für PU</i>	74
<i>Abbildung 6-21: Abbildung des Probekörpers 1 vor dem Fügen (a), nach dem Aushärten (b), mit Schnittansicht (c)</i>	76
<i>Abbildung 6-22: Abbildung des Probekörpers 3 vor dem Fügen (a), nach dem Aushärten (b), mit Schnittansicht (c)</i>	78
<i>Abbildung 7-1: Abbildung des finalen Endeffektors</i>	80

<i>Abbildung 7-2: Schematische Darstellung des Ablaufs des finalen Versuchs.....</i>	<i>81</i>
<i>Abbildung 7-3: Programm der finalen Versuchsreihe.....</i>	<i>83</i>
<i>Abbildung 7-4: Endeffektor beim Aufnehmen der Platte a) beim Halten der Platte b) beim Werkzeugwechsel c) beim Klebstoffauftrag mit PU d).....</i>	<i>84</i>

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Definition der Hauptfunktionen des Endeffektors.....	4
Tabelle 1-2: Eigenschaften der Holzwerkstoffplatten.....	4
Tabelle 3-1: Vakuum-/Druck-Umrechnungstabelle nach (Hesse et al. 2004).....	12
Tabelle 3-2: Materialübersicht für Vakuumsauger (Hesse et al. 2004)	20
Tabelle 4-1: Dosierfehler und Ursachen nach (Mosandl 2004) und (Schlickerrieder 2007)	34
Tabelle 5-1: Komponenten des Vakuumgreifsystems mit gasfördernder Vakuumpumpe.....	38
Tabelle 5-2: Vakuumsauger für Versuche mit gasfördernder Vakuumpumpe	38
Tabelle 5-3: Ergebnisse der max. stat. Haltekraft mit gasfördernder Vakuumpumpe	39
Tabelle 5-4: Ergebnisse der Strömungswiderstände mit gasfördernder Vakuumpumpe	40
Tabelle 5-5: Komponenten des Vakuumgreifsystems mit Venturi-Ejektor	42
<i>Tabelle 5-6: Versuchsergebnisse mit Venturi-Ejektor für raue Platten</i>	<i>43</i>
<i>Tabelle 5-7: Komponenten des Vakuumgreifsystems mit Coanda-Ejektor</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 5-8: Ergebnisse max. Haltekraft mit Coanda-Ejektor</i>	<i>45</i>
<i>Tabelle 5-9: Zusammenfassung der Ergebnisse aus Voruntersuchung für die Handhabung</i>	<i>46</i>
<i>Tabelle 5-10: Sauger Varianten für Strömungsreifer</i>	<i>49</i>
<i>Tabelle 5-11: Komponenten des finalen Vakuumgreifsystems</i>	<i>50</i>
<i>Tabelle 5-12: Ergebnisse zur maximal aufnehmbaren Haltekraft und zum maximal aufnehmbaren Moment.....</i>	<i>51</i>
Tabelle 6-1: Klebstoff für die experimentellen Untersuchungen.....	54
Tabelle 6-2: Komponenten der Ausbringvorrichtung 1	57
Tabelle 6-3: Durchgeführte Versuchsreihen mit Polyvinylacetat mit Ausbringvorrichtung 1	59
Tabelle 6-4: Durchgeführte Versuchsreihen mit Polyurethan mit Ausbringvorrichtung 1.....	59
Tabelle 6-5: Komponenten der Ausbringvorrichtung 2	64
Tabelle 6-6: Versuchsreihe für Polyvinylacetat mit Ausbringvorrichtung 2.....	65

Tabelle 6-7: Versuchsreihen für Polyurethan Ausbringvorrichtung 2.....	65
Tabelle 6-8: Zusätzliche Versuchsreihen für Polyvinylacetat mit Ausbringvorrichtung 2.....	69
Tabelle 6-9: Zusätzliche Versuchsreihen für Polyurethan mit Ausbringvorrichtung 2.....	70
Tabelle 6-10: Probekörper zur Ermittlung der Ausbreitung von PVAC- Klebstoffraupen	73
Tabelle 6-11: Probekörper zur Ermittlung der Ausbreitung von PU-Klebstoffraupen	73
Tabelle 6-12: Verwendetes Material zur Herstellung der Probekörper.....	75
Tabelle 6-13: Analyse der Klebstoffausbreitung für PVAC mit 5 bar und 1000 [mm/min]	76
Tabelle 6-14: Empfehlungen für Raupenabstand mit PVAC.....	77
Tabelle 6-15: Analyse der Klebstoff Ausbreitung für PU mit 7 bar und 1800 [mm/min]	78
Tabelle 6-16: Empfehlungen für Raupenabstand mit PU.....	79

12 Anhang

12.1 Anhang 1: Berechnung der theoretischen Haltekraft

$$F = (p_n - p_u) \cdot A \cdot y \cdot \eta \cdot n \cdot \frac{1}{S} \quad [\text{N}]$$

$$F = (1 \text{ bar} + 0,9 \text{ bar}) \cdot \pi \cdot (15\text{mm})^2 \cdot \frac{1}{2} = 67,1 \text{ N}$$

Mit

$$A = \pi \cdot (15\text{mm})^2 \quad \text{Wirkfläche bei } \varnothing 30 \text{ mm}$$

$$p_n = 1 \text{ bar} \quad \text{Umgebungsdruck}$$

$$p_u = -0,9 \text{ bar} \quad \text{Druck im abgedichteten Sauger}$$

$$S = 2 \quad \text{Sicherheitsbeiwert für raue Oberflächen}$$

12.2 Anhang 2: Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Venturi Ejektors in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit

Oberflächenbeschaffenheit der Platten: „rau“

Druckluftzufuhr: 1 bar

Späne: mittel Oberfläche: mittel - rau				
Form	Breite [mm]	Ja	Nein	Anmerkung
Rechteckig	13		x	
	20		x	
	25		x	Kurzes Anheben mit zwei freien Löchern
	30	x		langes Anheben bei Abdecken aller Löcher
Rund	13		x	nicht alle Löcher abgedeckt
	20		x	nicht alle Löcher abgedeckt
	25		x	Abdeckung aller Löcher
	30		x	Abdeckung aller Löcher

Druckluftzufuhr: 2 bar

Späne: mittel Oberfläche: rau				
Form	Breite [mm]	Ja	Nein	Anmerkung
Rechteckig	13		x	
	20		x	Kurzes Anheben bei Abdeckung aller Löcher
	25	x		Kurzes Anheben mit zwei freien Löchern
	30	x		langes Anheben mit drei freien Löchern
Rund	13		x	
	20		x	
	25		x	
	30	x		alle Löcher abgedeckt in der Mitte angesetzt

Druckluftzufuhr: 4 bar

Späne: mittel Oberfläche: rau				
Form	Breite [mm]	Ja	Nein	Anmerkung
Rechteckig	13		x	
	20	x		5 freie Löcher mittig
	25	x		6 freie Löcher mittig; gute Haltekraft bei Abdeckung aller Löcher
	30	x		6 freie Löcher mittig; gute Haltekraft bei Abdeckung aller Löcher
Rund	13		x	
	20		x	kurzes Anheben möglich
	25	x		kurzes Anheben mit drei freien Löchern
	30	x		nur bei Abdeckung aller Löcher Anheben mgl.

Druckluftzufuhr: 6 bar

Späne: mittel Oberfläche: rau				
Form	Breite [mm]	Ja	Nein	Anmerkung
Rechteckig	13		x	
	20	x		4 freie Löcher
	25	x		gute Haltekraft; 5 frei Löcher möglich
	30	x		6 freie löcher möglich
Rund	13		x	
	20		x	kurzes anheben mit 1 loch frei
	25	x		3 freie löcher mgl
	30	x		3 freie löcher mgl

Oberflächenbeschaffenheit der Platten: „mittel-rau“

Druckluftzufuhr: 1 bar

Späne: mittel Oberfläche: glatt				
Form	Breite [mm]	Ja	Nein	Anmerkung
Rechteckig	25	x		kurzes Anheben mit 4 freien Löchern
	30	x		kurzes Anheben mit 4 freien Löchern
	35	x		kurzes Anheben mit 4-5 freien Löchern
Rund	14		x	
	25	x		5 freie Löcher mit mittigem Anheben mgl
	30	x		5 freie Löcher mit mittigem Anheben mgl
	35	x		5 freie Löcher mit mittigem Anheben mgl

Druckluftzufuhr: 2 bar

Späne: mittel Oberfläche: glatt				
Form	Breite [mm]	Ja	Nein	Anmerkung
Rechteckig	25	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
	30	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
	35	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
Rund	14		x	kurzes Anheben bei Schrägstellung möglich
	25	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
	30	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
	35	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl

Druckluftzufuhr: 4 bar

Späne: mittel Oberfläche: glatt				
Form	Breite [mm]	Ja	Nein	Anmerkung
Rechteckig	25	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
	30	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
	35	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
Rund	14	x		7 freie Löcher nur vier zu; nicht an jeder Stelle
	25	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
	30	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
	35	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl

Druckluftzufuhr: 6 bar

Späne: mittel Oberfläche: glatt				
Form	Breite [mm]	Ja	Nein	Anmerkung
Rechteckig	25	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
	30	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
	35	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
Rund	14	x		gute Haltekraft 7 freie Löcher nur vier zu; nicht an jeder Stelle
	25	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
	30	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl
	35	x		mit 6 freie Löchern gute Haltekraft; bis zu acht freie Löcher mgl

Oberflächenbeschaffenheit der Platten: „lignocel-rau“

Druckluftzufuhr: 1 bar

Späne: Lignocel Oberfläche: glatt				
Form	Breite [mm]	Ja	Nein	Anmerkung
Rechteckig	8		x	
	10		x	
	12		x	
	18		x	
	25	x		nur gute Haltekraft wenn alle Löcher verdeckt sind; bei 3 freie Löchern ganz kurzes Anheben mgl
	30	x		nur gute Haltekraft wenn alle Löcher verdeckt sind; bei 3 freie Löchern kurzes Anheben mgl
Rund	11		x	
	20		x	nur kurzes Anheben mgl
	30	x		aber schlecht

Druckluftzufuhr: 2 bar

Späne: lignocel Oberfläche: glatt				
Form	Breite [mm]	Ja	Nein	Anmerkung
Rechteckig	8		x	
	10		x	
	12		x	
	18		x	
	25	x		5 Löcher frei; aber auch nicht an jeder Stelle
	30	x		5 Löcher frei; an jeder Stelle; Oberfläche sehr ebenmäßig
Rund	11		x	
	20	x		6 Löcher frei, dann nur leichtes Anheben mgl
	30	x		6 Löcher frei, dann nur leichtes Anheben mgl

Druckluftzufuhr: 4 bar

Späne: lignocel Oberfläche: glatt				
Form	Breite [mm]	Ja	Nein	Anmerkung
Rechteckig	8		x	
	10		x	
	12	x		4 freie Löcher möglich
	18	x		4 freie Löcher möglich
	25	x		6 freie Löcher möglich
	30	x		6 freie Löcher möglich
Rund	11		x	
	20	x		6 freie Löcher möglich
	30	x		6 freie Löcher möglich

Druckluftzufuhr: 4 bar

Späne: lignocel Oberfläche: glatt				
Form	Breite [mm]	Ja	Nein	Anmerkung
Rechteckig	8		x	
	10		x	
	12	x		4 freie Löcher möglich
	18	x		4 freie Löcher möglich
	25	x		6 freie Löcher möglich
	30	x		6 freie Löcher möglich
Rund	11		x	
	20	x		6 freie Löcher möglich
	30	x		6 freie Löcher möglich

12.3 Anhang 3: G-Code für Handhabungsversuche



```
1 #NAME User05.txt #LABEL "PWM-TEST"
2 Parameters: S=nominal RPM
3 #0 = actual RPM (before)
4 #1 = dwell time (RPM independent)
5 #2 = RPM dependent dwell time (ramp, s/(1000/min))
6 #O3 (Spindel vorwärts)
7 #O4 (Spindel rückwärts)
8 %
9 G90
10 G54
11 G0 X0 Y0 Z-2
12 M3 S12000
13 G4 H3 UNTIL #5=1
14 G1 Z20 F300
15 G91
16 G1 X500 F5000
17 G90
18 G0 Z0
19 M5
20 G0 Z40
21 G0 X0 Y0
22
23
```

Speichern Abbruch

12.4 Anhang 4: Ermittlung der Auftragsmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit mit Ausbringvorrichtung 1

G-Code für Ausbringversuche

GCode-Editor X

```

1  #NAME Adhesive #LABEL "Adhesive"
2  Parameters:
3      #0 = nominal flags (after)
4      #1 = actual flags (before)
5      #2 = resume mode 0=direct, 1=safeZ
6      #3..#11 = destination coordinates
7      #12 = safeZ
8
9  G90
10 GO Z0
11 GO X-40 Y0
12 CALL "O100@User01.txt"
13 GO X-40 Y30 Z0
14 CALL "O100@User01.txt"
15 GO X-40 Y60 Z0
16 CALL "O100@User01.txt"
17 GO X-40 Y90 Z0
18 CALL "O100@User01.txt"
19 GO X-40 Y120 Z0
20 CALL "O100@User01.txt"
21 GO X-40 Y150 Z0
22 CALL "O100@User01.txt"
23 #100=#105
24 GO Z-8
25

```

Speichern Abbruch

GCode-Editor X

```

18 CALL "O100@User01.txt"
19 GO X-40 Y120 Z0
20 CALL "O100@User01.txt"
21 GO X-40 Y150 Z0
22 CALL "O100@User01.txt"
23 #100=#105
24 GO Z-8
25
26 RETURN
27 O100
28 PRINT "Current Speed: "; #100
29 GO Z-7
30 #O116=1
31 #O114=1
32 G91
33 G1 X-100 F=#100
34 #O116=0
35 #O114=0
36 G90
37 GO Z0
38 GO X0 Y0
39 #100=#100+#101
40 M99
41
42

```

Speichern Abbruch

Ausbringvorrichtung 1 mit Polyvinylacetat

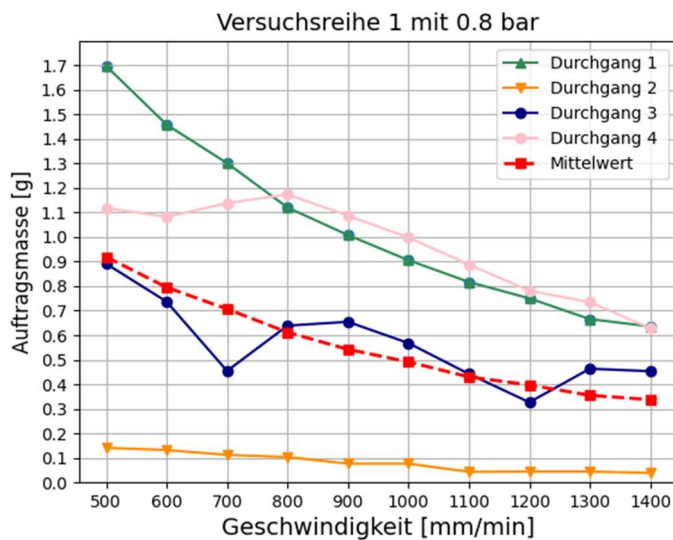
Versuchsreihe 1: Druck von 0.8 bar mit Geschwindigkeiten von 500-1400 mm/min

Allgemeines:

Name:	Ponal Fix und Fest (alte Flasche)
Datum:	11.05.2022
Temperatur:	22,7°C
Feuchtigkeit:	51%
Druck:	0,8 bar
Abstand Dosiernadel:	3 mm
Dosiernadeldurchmesser:	1,37

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Zusammenfassung der Ergebnisse				
	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3	Durchgang 4
Geschwindigkeit [mm/min]	Auftragsmasse [g]			
500	1,70	0,14	0,89	1,12
600	1,46	0,13	0,74	1,08
700	1,30	0,11	0,45	1,14
800	1,12	0,10	0,64	1,17
900	1,01	0,08	0,65	1,09
1000	0,91	0,08	0,57	1,00
1100	0,82	0,04	0,44	0,89
1200	0,75	0,04	0,33	0,78
1300	0,67	0,04	0,46	0,73
1400	0,64	0,04	0,45	0,63



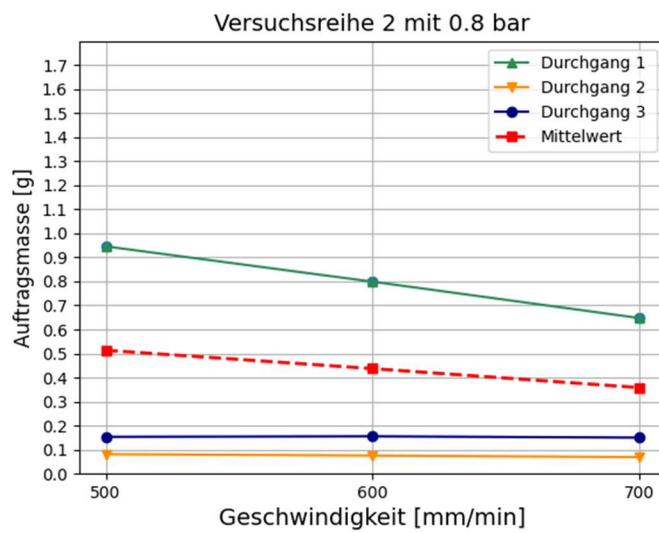
Versuchsreihe 2: Druck von 0.8 bar mit Geschwindigkeiten von 500-700 mm/min

Allgemeines:

Name:	Ponal Fix und Fest (alte Flasche)
Datum:	12.05.2022
Temperatur:	23,2°C
Feuchtigkeit:	45%
Druck:	0,8 bar
Abstand Dosiernadel:	3 mm
Dosiernadeldurchmesser:	1,37

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Zusammenfassung der Ergebnisse			
	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3
Geschwindigkeit [mm/min]	Auftragsmasse [g]		
500	0,95	0,08	0,15
600	0,80	0,08	0,16
700	0,65	0,07	0,15



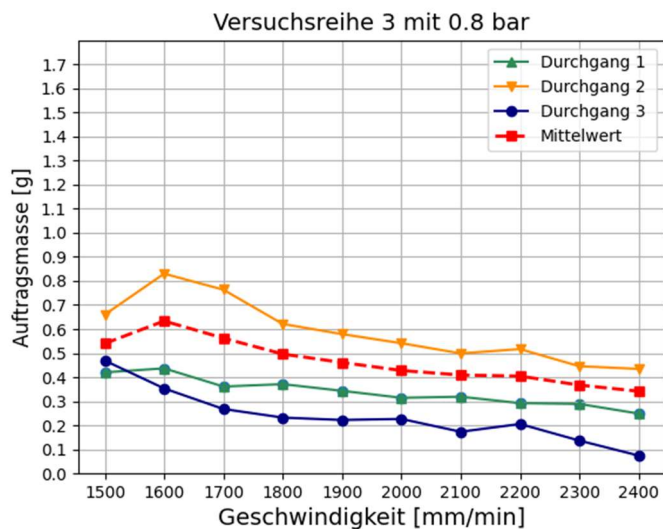
Versuchsreihe 3: Druck von 0.8 bar mit Geschwindigkeiten von 1500-2400 mm/min

Allgemeines:

Name:	Ponal Fix und Fest (alte Flasche)
Datum:	11.05.2022
Temperatur:	22,7°C
Feuchtigkeit:	51%
Druck:	0,8 bar
Abstand Dosiernadel:	3 mm
Dosiernadeldurchmesser:	1,37

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Zusammenfassung der Ergebnisse			
	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3
Geschwindigkeit [mm/min]	Auftragsmasse [g]		
1500	0,42	0,66	0,47
1600	0,44	0,83	0,35
1700	0,36	0,76	0,27
1800	0,37	0,62	0,23
1900	0,34	0,58	0,22
2000	0,31	0,54	0,23
2100	0,32	0,50	0,17
2200	0,29	0,52	0,21
2300	0,29	0,45	0,14
2400	0,25	0,43	0,07



Ausbringvorrichtung 1 mit Polyurethan

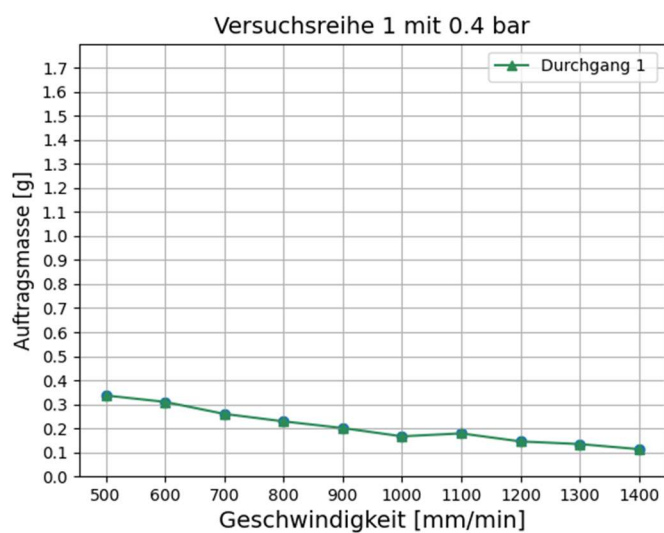
Versuchsreihe 1: Druck von 0.4 bar mit Geschwindigkeiten von 500-1400 mm/min

Allgemeines:

Name:	Ponal Fix und Fest (alte Flasche)
Datum:	13.05.2022
Temperatur:	21,3°C
Feuchtigkeit:	63%
Druck:	0,4 bar
Abstand Dosiernadel:	3 mm
Dosiernadeldurchmesser:	1,37

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Zusammenfassung	
Geschwindigkeit [mm/min]	Auftragsmasse [g]
500	0,34
600	0,31
700	0,26
800	0,23
900	0,20
1000	0,17
1100	0,18
1200	0,15
1300	0,13
1400	0,11



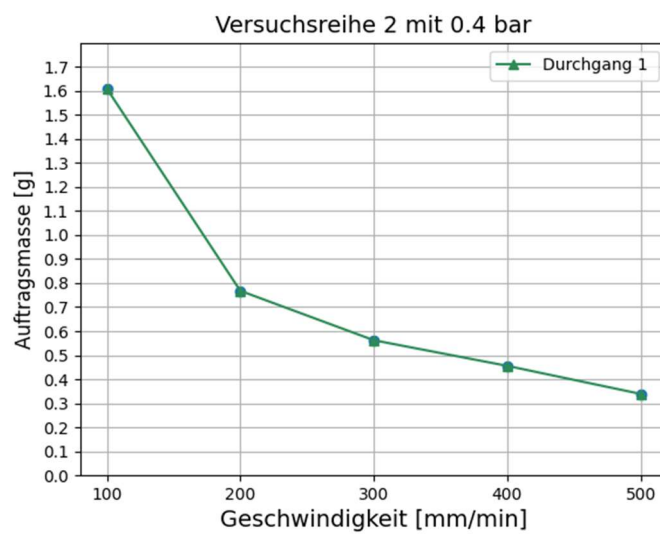
Versuchsreihe 2: Druck von 0.4 bar mit Geschwindigkeiten von 100-500 mm/min

Allgemeines:

Name:	Ponal Fix und Fest (alte Flasche)
Datum:	13.05.2022
Temperatur:	21,3°C
Feuchtigkeit:	63%
Druck:	0,4 bar
Abstand Dosiernadel:	3 mm
Dosiernadeldurchmesser:	1,37

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Zusammenfassung	
Geschwindigkeit [mm/min]	Auftragsmasse [g]
100	1,61
200	0,77
300	0,56
400	0,46
500	0,34



12.5 Anhang 5: Ermittlung der Auftragsmasse in Abhängigkeit der Geschwindigkeit mit Ausbringvorrichtung 2

G-Code für Ausbringversuche s. Kapitel 12.4

Ausbringvorrichtung 2 mit Polyvinylacetat

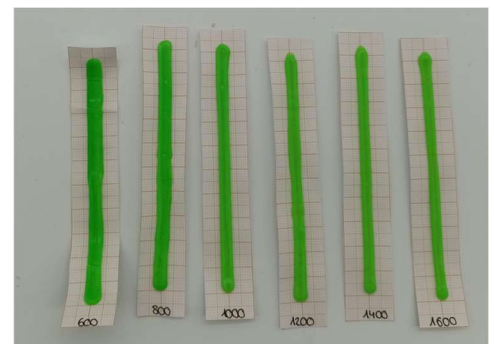
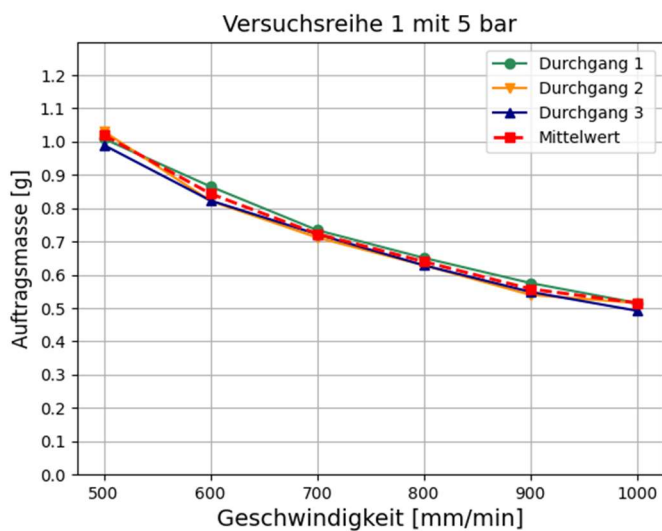
Versuchsreihe 1: Druck von 5 bar mit Geschwindigkeiten von 500-1000 mm/min

Allgemeines:

Name:	Ponal Fix und Fest (alte Flasche)
Datum:	18.05.2022
Temperatur:	28,7°C
Feuchtigkeit:	29%
Druck:	3 bar
Abstand Dosiernadel:	3 mm
Dosiernadeldurchmesser:	0,82

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Zusammenfassung der Ergebnisse						
	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3	Mittelwerte	Standardabweichung	Klebstoffraupenbreite
Geschwindigkeit [mm/min]	Auftragsmasse [g]					[mm]
500	1,01	1,03	0,99	1,01	0,02	9,50
600	0,87	0,82	0,82	0,84	0,02	8,00
700	0,73	0,71	0,72	0,72	0,01	7,00
800	0,65	0,63	0,63	0,64	0,01	7,00
900	0,58	0,54	0,55	0,55	0,02	6,50
1000	0,52	0,52	0,49	0,51	0,01	6,00



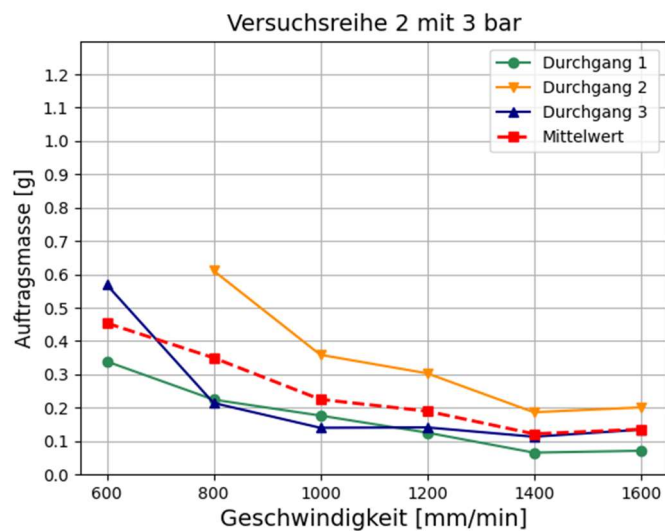
Versuchsreihe 2: Druck von 3 bar mit Geschwindigkeiten von 500-1000 mm/min

Allgemeines:

Name:	Ponal Fix und Fest (alte Flasche)
Datum:	20.05.2022
Temperatur:	27,5°C
Feuchtigkeit:	43%
Druck:	7 bar
Abstand Dosiernadel:	3 mm
Dosiernadeldurchmesser:	0,82

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Zusammenfassung der Ergebnisse					
	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3	Mittelwerte	Standardabweichung
Geschwindigkeit [mm/min]	Auftragsmasse [g]				
600	0,34	/	0,57	0,45	0,16
800	0,22	0,61	0,21	0,35	0,23
1000	0,18	0,36	0,14	0,23	0,12
1200	0,13	0,30	0,14	0,19	0,10
1400	0,07	0,19	0,11	0,12	0,06
1600	0,07	0,20	0,13	0,14	0,07



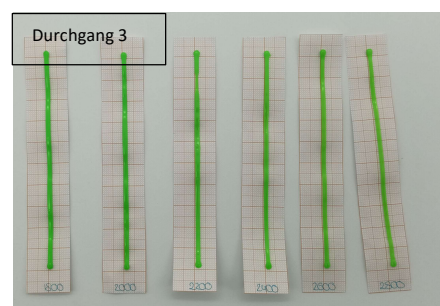
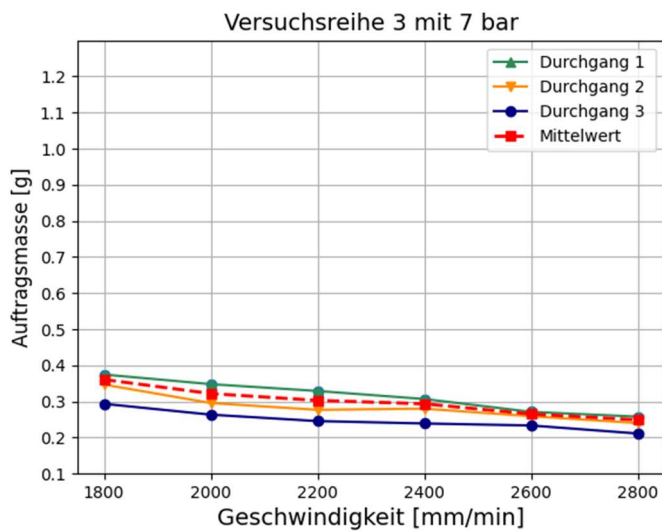
Versuchsreihe 3: Druck von 7 bar mit Geschwindigkeiten von 1800-2800 mm/min

Allgemeines:

Name:	Ponal Fix und Fest (alte Flasche)
Datum:	20.05.2022
Temperatur:	27,5°C
Feuchtigkeit:	43%
Druck:	7 bar
Abstand Dosiernadel:	3 mm
Dosiernadeldurchmesser:	0,82

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Zusammenfassung der Ergebnisse						
	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3	Mittelwerte	Standardabweichung	Klebstoffraupenbreite
Geschwindigkeit [mm/min]	Auftragsmasse [g]					[mm]
1800	0,37	0,35	0,29	0,34	0,04	2,50
2000	0,35	0,30	0,26	0,30	0,04	2,50
2200	0,33	0,28	0,25	0,28	0,04	2,00
2400	0,31	0,28	0,24	0,28	0,03	1,50
2600	0,27	0,26	0,23	0,25	0,02	1,50
2800	0,26	0,24	0,21	0,24	0,02	1,50



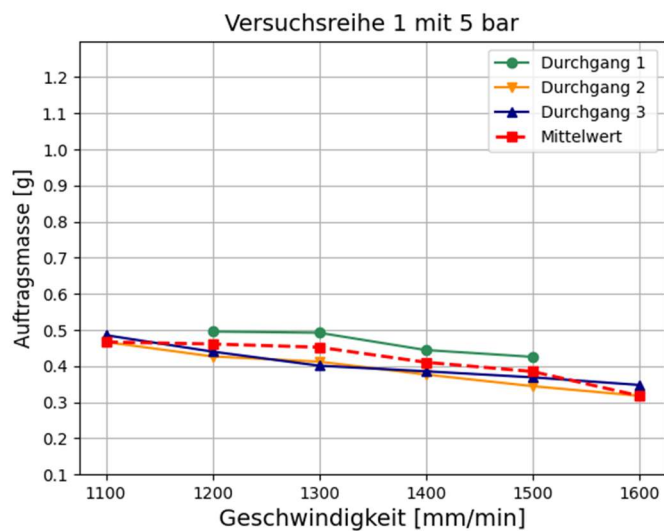
Ausbringvorrichtung 2 mit Polyurethan

Versuchsreihe 1: Druck von 5 bar mit Geschwindigkeiten von 1100-1600 mm/min

Name: Jowat
 Datum: 05.07.2022
 Temperatur: 27°C
 Feuchtigkeit: 47%
 Druck: 5 bar
 Abstand Dosiernadel: Variabel
 Dosiernadeldurchmesser: 0,82

Zusammenfassung der Ergebnisse						
	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3	Mittelwert	Standardabweichung	Klebstoffraupenbreite
Geschwindigkeit [mm/min]	Auftragsmasse [g]					[mm]
1100	*	0,47	0,49	0,48	0,01	5,5
1200	0,50	0,43	0,44	0,45	0,04	5,5
1300	0,49	0,41	0,40	0,44	0,05	5
1400	0,44	0,38	0,39	0,40	0,04	5
1500	0,43	0,34	0,37	0,38	0,04	5
1600	*	0,32	0,35	0,33	0,02	4,5

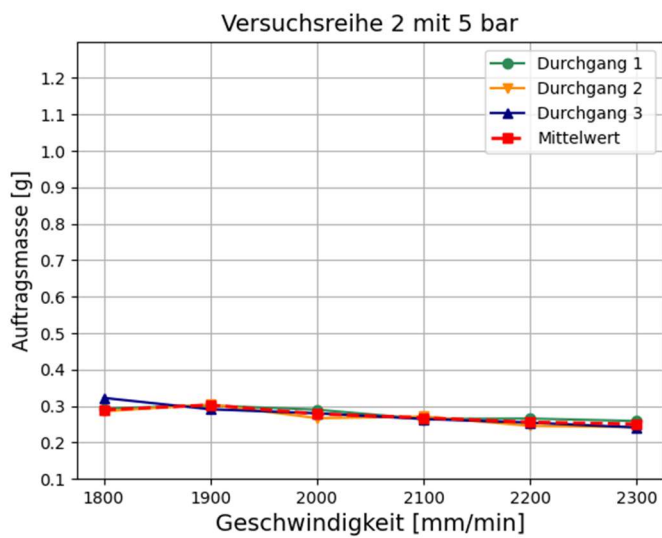
*Beschädigung der Proben vor dem Wiegen



Versuchsreihe 2: Druck von 5 bar mit Geschwindigkeiten von 1800-2300 mm/min

Name: Jowat
 Datum: 05.07.2022
 Temperatur: 27°C
 Feuchtigkeit: 47%
 Druck: 5 bar
 Abstand Dosiernadel: Variabel
 Dosiernadeldurchmesser: 0,82

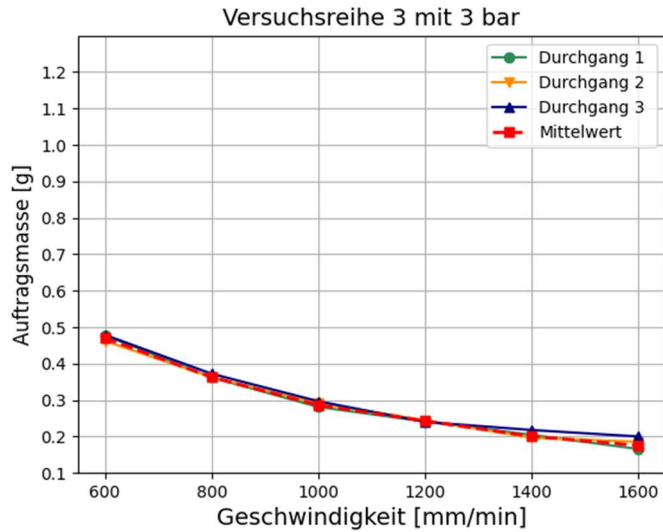
Zusammenfassung der Ergebnisse						
	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3	Mittelwert	Standardabweichung	Klebstoffraupenbreite
Geschwindigkeit [mm/min]	Auftragsmasse [g]					[mm]
1800	0,29	0,29	0,32	0,30	0,02	4,00
1900	0,30	0,30	0,29	0,30	0,01	4,00
2000	0,29	0,27	0,28	0,28	0,01	4,00
2100	0,26	0,27	0,26	0,27	0,00	4,00
2200	0,27	0,25	0,25	0,26	0,01	4,00
2300	0,26	0,24	0,24	0,25	0,01	3,50



Versuchsreihe 3: Druck von 3 bar mit Geschwindigkeiten von 600-1600 mm/min

Name: Jowat
 Datum: 06.07.2022
 Temperatur: 25,8°C
 Feuchtigkeit: 42%
 Druck: 3 bar
 Abstand Dosiernadel: 3 mm
 Dosiernadeldurchmesser: 0,82

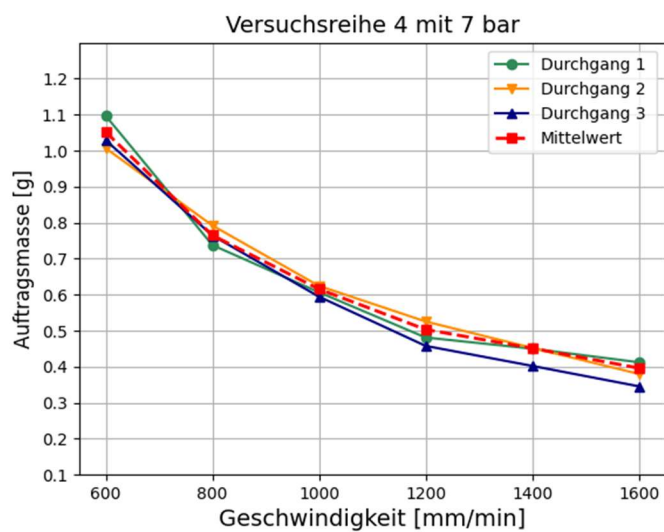
Zusammenfassung der Ergebnisse						
	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3	Mittelwert	Standardabweichung	Klebstoffraupenbreite
Geschwindigkeit [mm/min]	Auftragsmasse [g]					[mm]
600	0,48	0,46	0,48	0,47	0,01	5,5
800	0,36	0,36	0,37	0,37	0,01	4
1000	0,28	0,29	0,30	0,29	0,01	4
1200	0,24	0,24	0,24	0,24	0,00	4
1400	0,20	0,20	0,22	0,21	0,01	4
1600	0,17	0,19	0,20	0,18	0,02	3,5



Versuchsreihe 4: Druck von 7 bar mit Geschwindigkeiten von 600-1800 mm/min

Name: Jowat
 Datum: 05.07.2022
 Temperatur: 27°C
 Feuchtigkeit: 47%
 Druck: 5 bar
 Abstand Dosiernadel: Variabel
 Dosiernadeldurchmesser: 0,82

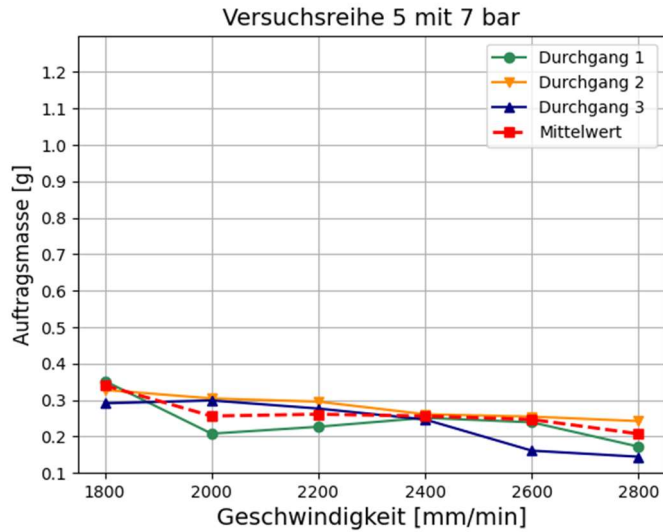
Zusammenfassung der Ergebnisse						
	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3	Mittelwert	Standardabweichung	Klebstoffraupenbreite
Geschwindigkeit [mm/min]	Auftragsmasse [g]					[mm]
600	1,10	1,01	1,03	1,04	0,05	7
800	0,74	0,79	0,76	0,76	0,03	7
1000	0,61	0,62	0,59	0,61	0,02	6
1200	0,48	0,53	0,46	0,49	0,03	5
1400	0,45	0,45	0,40	0,43	0,03	5
1600	0,41	0,38	0,35	0,38	0,03	5



Versuchsreihe 5: Druck von 7 bar mit Geschwindigkeiten von 1800-2800 mm/min

Name: Jowat
 Datum: 05.07.2022
 Temperatur: 27°C
 Feuchtigkeit: 47%
 Druck: 5 bar
 Abstand Dosiernadel: Variabel
 Dosiernadeldurchmesser: 0,82

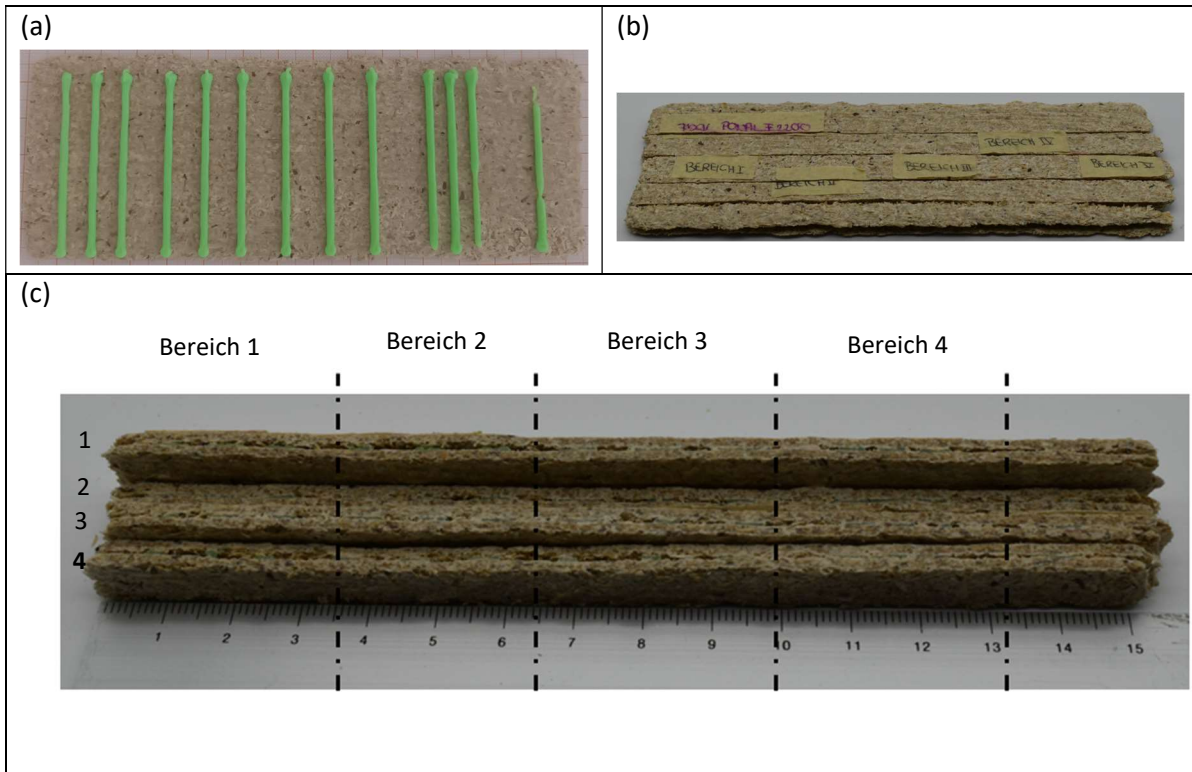
Zusammenfassung der Ergebnisse						
	Durchgang 1	Durchgang 2	Durchgang 3	Mittelwert	Standardabweichung	Klebstoffraupenbreite
Geschwindigkeit [mm/min]	Auftragsmasse [g]					[mm]
1800	0,35	0,33	0,29	0,32	0,03	5,00
2000	0,21	0,30	0,30	0,27	0,05	5,00
2200	0,23	0,30	0,28	0,27	0,04	4,50
2400	0,25	0,26	0,25	0,25	0,01	4,50
2600	0,24	0,25	0,16	0,22	0,05	4,50
2800	0,17	0,24	0,14	0,19	0,05	4,00



12.6 Anhang 6: Ausbreitungsversuche

Polyvinylacetat-Dispersion

Probekörper 2: 7 bar – 2200 mm/min

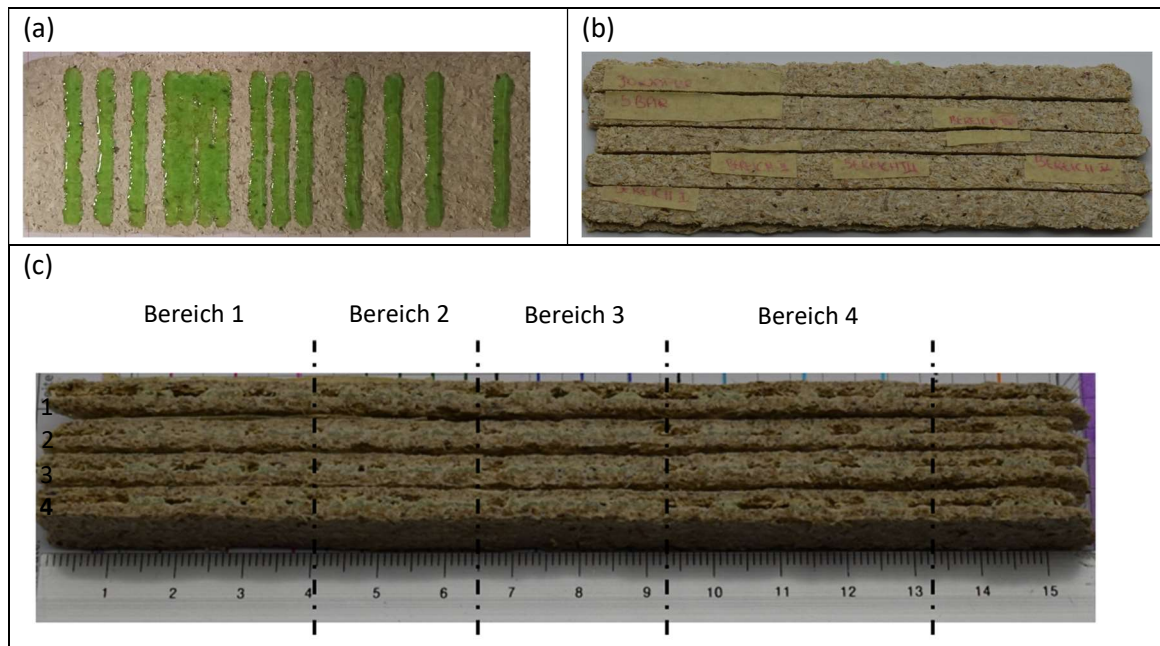


	Klebstoffschicht durchgehend? ✓/x			
	Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3	Bereich 4
Schnitt 1	x	x	✓	x
Schnitt 2	x	x	✓	x
Schnitt 3	x	x	✓	x
Schnitt 4	x	x	✓	x

Durchschnittliche Ausbreitungsbreite der Klebstoffraupe in Bereich 5: **0,4 mm**

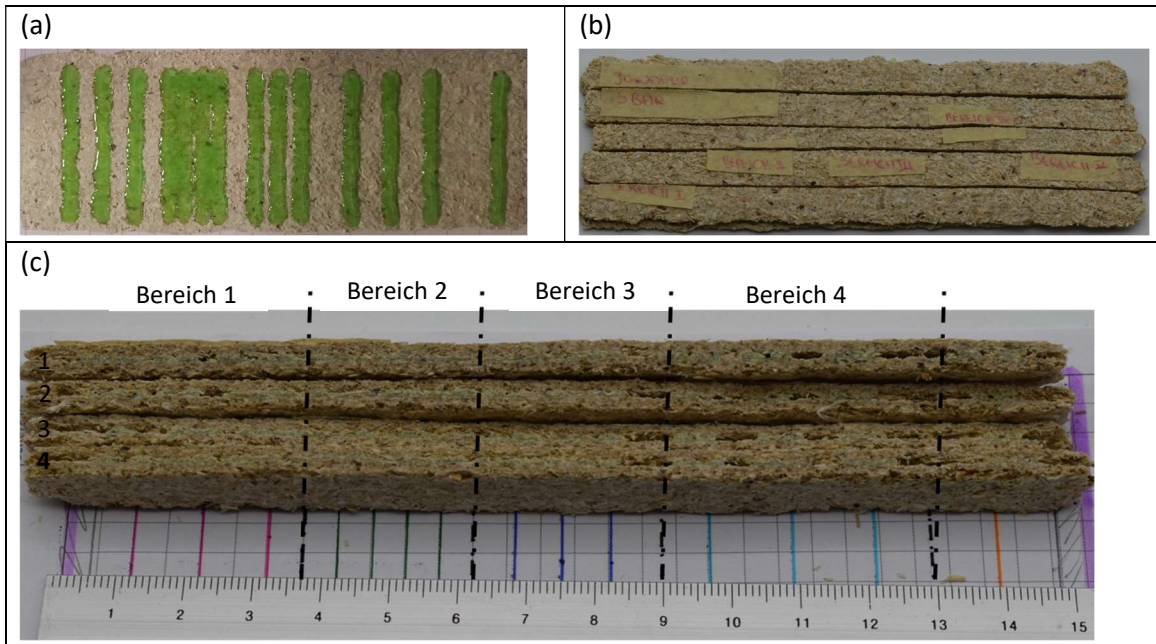
Polyurethan

Probekörper 1: 3bar – 1000 mm/min



	Klebstoffschicht durchgehend? ✓/x			
	Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3	Bereich 4
Schnitt 1	x	x	x	x
Schnitt 2	x	✓	✓	x
Schnitt 3	x	✓	✓	x
Schnitt 4	x	✓	✓	x

Durchschnittliche Ausbreitungsbreite der Klebstoffraupe in Bereich 5: **0,65 mm**

Probekörper 2: 5bar – 1800 mm/min


	Klebstoffschicht durchgehend? ✓/x			
	Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3	Bereich 4
Schnitt 1	x	✓	✓	x
Schnitt 2	x	✓	✓	x
Schnitt 3	x	✓	✓	x
Schnitt 4	✓	✓	✓	x

Durchschnittliche Ausbreitungsbreite der Klebstoffraupe in Bereich 5: **0,8 m**

