

Automatisierung des Kernfüllmasseneintrags bei der Produktion von Sandwichpaneelen

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Martin Harnisch


aus
Möln

2022

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl
Prof. Dr.-Ing. Bodo Fiedler

Tag der mündlichen Prüfung: 08.07.2022

DOI: doi.org/10.15480/882.4569

 orcid.org/0000-0003-4131-3727

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons „Namensnennung 4.0 International“ Lizenz.



Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeug-Produktionstechnik der Technischen Universität Hamburg entstanden. Ich bedanke mich bei allen, die mich auf dem Weg zur Promotion unterstützt haben. An dieser Stelle möchte ich jedoch einige besonders hervorheben.

Meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl, bin ich sowohl für die fachliche Betreuung wie für persönlichen Rat sehr dankbar. Mit dem Blick fürs Ganze hat er stets wertvolle Diskussionen angestoßen. Ebenfalls möchte ich Prof. Dr.-Ing. Bodo Fiedler für die Zweitbegutachtung meiner Dissertation und Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danken.

Bei meinen Kollegen am Institut bedanke ich mich herzlich für die kollegiale und lebendige Arbeitsatmosphäre. Die konstruktiven Diskussionen und der themenübergreifende Austausch waren stets eine Bereicherung. Ein ganz besonderer Dank geht an Henrik für die wertvollen Anmerkungen zu meiner Arbeit. Ebenfalls hervorzuheben sind Doran und Johann, die das Projekt mit Leben gefüllt und mit ihrer tatkräftigen Unterstützung zum Erfolg beigetragen haben.

Meinen Freunden und meiner Familie bin ich ganz besonders dankbar - für beständige Unterstützung und den Rückenwind, der mich überhaupt bis hier gebracht hat. Ein ganz herzliches Dankeschön geht an Amelie, für das Korrekturlesen, insbesondere aber für die drei Monate Kinderbetreuung sowie die motivierenden Worte zum richtigen Zeitpunkt. Unschätzbar dankbar bin ich auch Asita und Samuel für die emotionale und seelische Unterstützung, dank derer ich das Ziel nicht aus den Augen verloren habe.

Kurzfassung

Nicht erst seit der COVID-19 Pandemie lastet ein hoher Druck auf der Luftfahrtbranche. Hersteller von Kabineninterieur sehen sich den technologisch schwer vereinbaren Forderungen nach gesteigerter Produktivität sowie Individualität gegenüber. Diese Ziele lassen sich nur mit einer durchgängigen Betrachtung und Optimierung der Fertigungsprozesse erreichen. Die Befüllung von Wabenkernen zeigt sich dabei als Schlüsseltechnologie zur automatisierten Fertigung individueller Sandwichpaneele in geringer Losgröße.

Der Arbeit vorangestellte Marktanalysen und Vorversuche verdeutlichen, dass die Potenziale mit verfügbaren Befüllsystemen nicht ausgereizt werden. Relevante Defizite sind dabei oberflächliche Materialrückstände, nicht tolerable Luft einschüsse sowie aufwendige Programmgenerierung. Offensichtlich folgen die Probleme aus einer mangelnden wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit dem hochkomplexen Befüllprozess. Entsprechend ist das Ziel dieser Arbeit, mit umfangreichen Analysen die Lücken im Prozessverständnis zu schließen und darauf aufbauend eine optimierte, automatisierte Befüllung zu entwickeln. Als Zielgrößen werden dazu die Begriffe *Qualität*, *Robustheit* und *Flexibilität* definiert.

In der Prozessanalyse werden zunächst die geometrischen Zusammenhänge untersucht. Mit den aufgestellten mathematischen Modellen können erforderliche Volumenströme abgeschätzt und Düsengeometrien bewertet werden. Die anschließende rheometrische Untersuchung der Kernfüllmasse bestätigt das stark nichtlineare Verhalten der Dosierströmung. Die Ergebnisse unterstreichen den Bedarf robuster Regelungsansätze und liefern Prozessgrenzen und Handlungsanweisungen. Mit der erstmaligen Bestimmung von Luftströmen durch die Grenzschicht zwischen Prepreg und Wabenkern wird der Einfluss von Anpresskraft, Dosierdruck und Prepreg-Tack analysiert. Die Erkenntnisse sind elementar zur Vermeidung von Lufteinschlüssen und effizienten Parametrisierung.

Der erste technische Schwerpunkt der Prozessentwicklung liegt in der Anlage und dabei insbesondere dem Dosierwerkzeug. Die integrierte Anpressaktorik führt zu einer deutlichen Steigerung der *Qualität* und *Robustheit* der Befüllung. Der implementierte Regler als zweite technische Komponente fördert die Fähigkeit auf Änderungen in den Prozessbedingungen zu reagieren. Dies wirkt sich weiterhin positiv auf die *Flexibilität* aus: Die Prozessqualität wird durch Schwankungen in der Bahnüberlappung nicht beeinträchtigt. Der speziell auf den KFM-Eintrag zugeschnittene Algorithmus zur Pfadplanung maximiert die *Flexibilität* des Gesamtsystems. Aus jeder beliebigen Befüllgeometrie können automatisch Pfade ohne Absetzbewegung und mit garantiertem Luftauslass generiert werden. In der zusammenfassenden Verifikation wird das Gesamtsystem abschließend bewertet und das Erreichen der Ziele nachgewiesen.

Inhaltsverzeichnis

Abbreviations	iv
Symbole	v
1. Einleitung	1
2. Stand von Wissenschaft und Technik	7
2.1. Sandwichkonstruktionen und Materialien	7
2.1.1. Decklagen	8
2.1.2. Kern	10
2.1.3. Verbundaufbau	13
2.1.4. Besondere Bedeutung der Kernfüllmasse	18
2.2. Fertigung von Sandwichbauteilen	19
2.2.1. Materialbereitstellung	19
2.2.2. Legeprozess	20
2.2.3. Modifikation des Kerns	21
2.2.4. Aushärtung	22
2.2.5. Nachbearbeitung	23
2.2.6. Montage	24
2.3. Analyse des KFM-Eintrags	24
2.3.1. Prozessbeschreibung der automatisierten Befüllung	25
2.3.2. Konzeptionelle Voruntersuchungen	26
2.3.3. Kernanforderungen an den Befüllprozess	27
2.3.4. Defizite bisheriger Lösungen	28
2.3.5. Technische Schwerpunkte beim optimierten, automatisierten KFM-Eintrag	29
2.4. Wissenschaftliche Ergebnisse mit Bezug zum KFM-Eintrag	30
2.4.1. Auftreten und Detektieren von Luft einschläüssen	31
2.4.2. Prozessbedingte Luftströme durch Sandwichmaterialien	33
2.4.3. Eigenschaften syntaktischer Schäume	35
2.4.4. Rheologie	36
2.4.5. Rheometrie	38
2.4.6. Regelung von Fördervolumen	40
2.4.7. Automatisierte Programmgenerierung	44

2.5.	Zusammenfassung Stand der Wissenschaft und Technik	46
2.6.	Konkretisierte Zielsetzung und Vorgehen	48
3.	Analytische und experimentelle Untersuchung des KFM-Eintrags	53
3.1.	Geometrische Zusammenhänge	53
3.1.1.	Konventionen	54
3.1.2.	Analyse geometrischer Einflussgrößen und Randbedingungen	55
3.1.3.	Geometrische Modellierung zur Bestimmung des Förder Volumens	61
3.1.4.	Implementierung des Modells in einer Simulationsumgebung	65
3.1.5.	Simulation und Auswertung einer geometrischen Parameterstudie	70
3.1.6.	Diskussion der Ergebnisse	77
3.2.	Rheologisches Verhalten der KFM	80
3.2.1.	Versuchsaufbau	80
3.2.2.	Versuchsplanung und -durchführung	85
3.2.3.	Auswertung	86
3.2.4.	Diskussion der Ergebnisse	93
3.3.	Luftaustritt während der Befüllung	95
3.3.1.	Versuchsaufbau	96
3.3.2.	Versuchsplanung und -durchführung	102
3.3.3.	Luftströme aus der Ruhelage	104
3.3.4.	Luftströme bei komprimiertem Prepreg	106
3.3.5.	Übergang zur Undurchlässigkeit von T2-Prepreg	110
3.3.6.	Diskussion der Ergebnisse	111
3.4.	Zusammenfassung der Prozessanalyse	112
4.	Entwicklung des optimierten, automatisierten KFM-Eintrags	115
4.1.	Entwicklung des Befüllsystems	115
4.1.1.	Anforderungen	116
4.1.2.	Anlagenkonzept	118
4.1.3.	Entwicklung des Dosierwerkzeuges	121
4.1.4.	Entwicklung und Implementierung des Steuerungssystems	125
4.1.5.	Praktische Validierung	128
4.2.	Flexible Regelung des Fördervolumens	135
4.2.1.	Regelstreckenanalyse	135
4.2.2.	Regelungskonzept	139
4.2.3.	Implementierung und Validierung	142

4.2.4.	Diskussion der Ergebnisse	147
4.3.	Automatisierte Generierung von Bearbeitungsprogrammen . . .	151
4.3.1.	Grundlagen	151
4.3.2.	Anforderungsanalyse	154
4.3.3.	Konzeptentwicklung	158
4.3.4.	Implementierung	168
4.3.5.	Praktische Validierung	173
4.3.6.	Diskussion der Ergebnisse	179
4.4.	Gesamtsystemvalidierung	181
4.4.1.	Qualität	182
4.4.2.	Robustheit	183
4.4.3.	Flexibilität	184
5.	Zusammenfassung und Ausblick	185
A.	Anhang	189
A.1.	Abschätzung theoretisch erforderlicher Prepreg-Permeabilität .	189
Literatur		191

Abbreviations

AFP	Automated Fiber Placement
AM	Additive Manufacturing
ATL	Automated Tape Laying
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CFK	kohlefaserverstärkter Kunststoff
CNC	Computerized Numerical Control
DOF	Degrees of Freedom
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
EVaC	Engineered Vacuum Channel
FDM	Fused Deposition Modeling
FISO	Fast In, Smooth Out (Pfadstrategie)
FST	Flamability, Smoke, Toxicity
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
HSC	High Speed Cutting
KFM	Kernfüllmasse
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
KP	konturparallel (Pfadstrategie)
LTI-System	lineares zeitinvariantes System
MRT	Magnetresonanztomographie
OEM	Original Equipment Manufacturer (deutsch: Erstausrüster)
OOA	out of autoclave
OX	Überexpandierte (englisch: <i>overexpanded</i>) Wabe
PCP	progressive cavity pump (deutsch: Exzentrerschneckenpumpe)
Prepreg	preimpregnated fibers; mit Reaktionsharzen vorimprägnierte textile Faser-Matrix-Halbzeuge
PTFE	Polytetrafluorethylen
RP	richtungsparell (Pfadstrategie)
RSI	Robot Sensor Interface

SLA	Stereolithografie
SLS	selektives Lasersintern
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Tool Center Point (deutsch: Werkzeugmittelpunkt)
TPU	thermoplastisches Polyurethan
VBO	vacuum-bag only

Symbole

Zeichen	Beschreibung	Einheit
p	Druck	mPa
A	Fläche	mm ²
\ddot{x}	kartesischer Beschleunigungstensor	mm s ⁻²
\dot{x}	kartesischer Geschwindigkeitstensor	mm s ⁻¹
x	kartesischer Koordinatentensor	mm
\bullet_x	Koordinatentensor im hexagonalen Raum	
\circ_x	Koordinatentensor im kubischen Raum	
F	Kraft	N
Σ	Menge der Einströmwaben	
T	Posen- oder Transformationsmatrix	
β	Überlappung	%
V	Volumen	ml
Q	Volumenstrom	ml min ⁻¹
w	Wabengröße	mm

1. Einleitung

Sandwichstrukturen werden aufgrund des hohen Leichtbaupotenzials in vielen technischen Bereichen eingesetzt. Vorreiter ist die Luftfahrtindustrie, welche besonders von Treibstoffeinsparungen profitiert und somit zu größeren Investitionen zur Gewichtsreduktion bereit ist [92]. Einsatzbereiche im Außen- beziehungsweise Strukturbereich sind in Abb. 1.1 auf der nächsten Seite dargestellt. Es werden meist Decklagen aus Aluminium oder kohlefaserverstärkten Kunststoffen (kurz CFK) sowie wabenförmige Kerne aus Aluminium genutzt. Der Einsatz von Sandwichstrukturen im Flugzeuginterieur ist noch umfangreicher und erstreckt sich über die Verkleidung (lining), Trennwände (partitions), Fußböden (floor), Bordküchen (galley) und Waschräume / Toiletten (lavatory) [56, 103].

Verglichen mit dem Strukturbereich treten im Interieur geringere Lasten auf. Es existieren jedoch strenge Vorschriften bezüglich Entflammbarkeit, Rauchentwicklung und -toxizität (auch FST-Anforderungen, für *Flamability*, *Smoke*, *Toxicity*) [88]. In der Flugzeugkabine kommen aufgrund der hervorragenden Eigenschaften hinsichtlich Leichtbau sowie Entflammbarkeit nahezu ausschließlich Sandwichaufbauten mit Decklagen aus glasfaserverstärktem Phenolharz und einem wabenförmigen Kern aus Aramidfaser-Papier zum Einsatz [6, 48, 97, 116]. Ein bezeichnender Entwicklungsansatz der Branche ist die Risikominimierung durch Verwendung erprobter Materialien [59]. Deshalb spielen neue Tendenzen der Materialwissenschaft wie Schaumkerne und Thermoplast-Decklagen in der Luftfahrt nur eine untergeordnete Rolle.

Ein wesentlicher Vorteil von Verbundstrukturen ist die Anpassungsfähigkeit an spezifische Anforderungen durch entsprechende Wahl der Komponenten. Insbesondere die Modifikation des Kerns, etwa durch lokale Verstärkungen oder Einbringung zusätzlicher Elemente, ermöglicht eine hohe Variabilität. Dies wird auch zunehmend vonseiten der Kunden gefordert, um sich durch die Individualisierung der Kabine von der Konkurrenz abheben zu können [93]. Die steigende Produktvielfalt bedingt allerdings häufigere Änderungen in der Produktion.

In Abb. 1.2 auf Seite 3 ist exemplarisch der Aufbau eines Sandwichpaneels dargestellt. Der gesamte Gestaltungsfreiraum kann an dieser Stelle nicht wiedergegeben werden, die Komplexität des Aufbaus ist jedoch offensichtlich: Die Decklagen können aus mehreren Lagen faserverstärktem Kunststoff mit spezifischer Faserausrichtung, Zuschnitt und Position bestehen. Der Kern kann aus

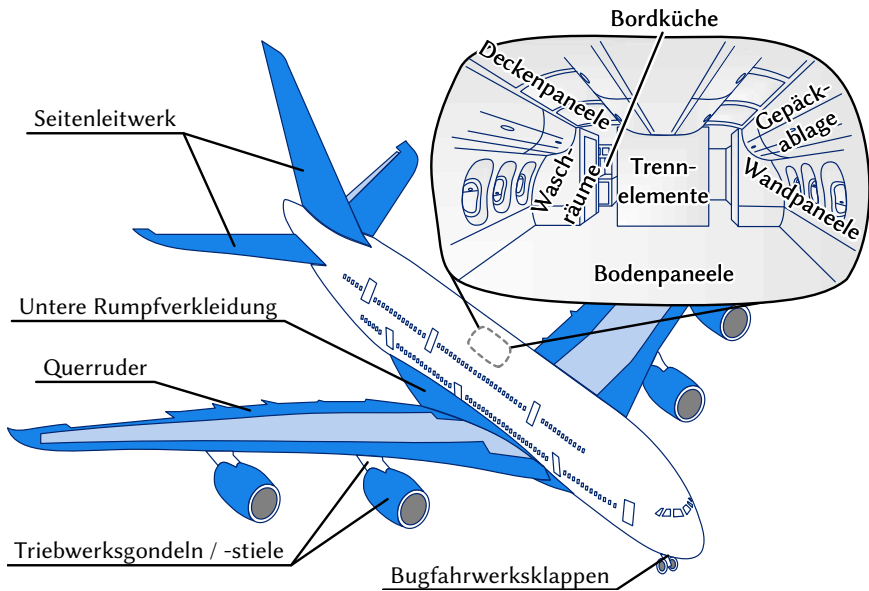


Abb. 1.1.: Einsatzgebiete von Sandwichstrukturen am Beispiel der A380 [56, 103]

verschiedenen Segmenten unterschiedlicher Struktur aufgebaut werden. Die Wabenzellen der Kernschicht können wiederum lokal mit Harz aufgefüllt werden. Eingeklebte Gewindeeinsätze erlauben die Anbindung weiterer Elemente und können je nach Belastungsfall entsprechend ausgeführt sein. Gefräste Taschen oder Durchbrüche dienen der optischen Individualisierung oder zum Platzieren weiterer, nahezu beliebiger Komponenten wie Spiegeln oder Türverriegelungen.

Aufgrund der notwendigen Flexibilität ist die Herstellung der Sandwichpaneele für das Flugzeuginterieur durch manuelle Arbeit geprägt. Zur Bereitstellung müssen zunächst die Segmente der Deck- und Kernlagen zugeschnitten sowie Werkzeugschalen vorbereitet werden. Die Segmente werden anschließend schichtweise in die Schalen gelegt. Bevor die obere Decklage gelegt wird, können Modifikationen in den Kern eingebracht werden. Sobald der Legeprozess abgeschlossen ist, wird das Werkstück unter Druck und Temperatur ausgehärtet. Nach dem Abkühlen und Entformen werden Nacharbeiten wie beispielsweise Fräsen, Schleifen oder Einkleben zusätzlicher Elemente durchgeführt. Je nach Ausrichtung des Betriebes werden auch Baugruppen und Kabinenelemente vor Auslieferung vormontiert.

Eine manuelle Fertigung ist in westlichen Industrienationen meist nicht wirtschaftlich. Verstärkt durch die Corona-Krise wurde zudem auf globaler Ebene die

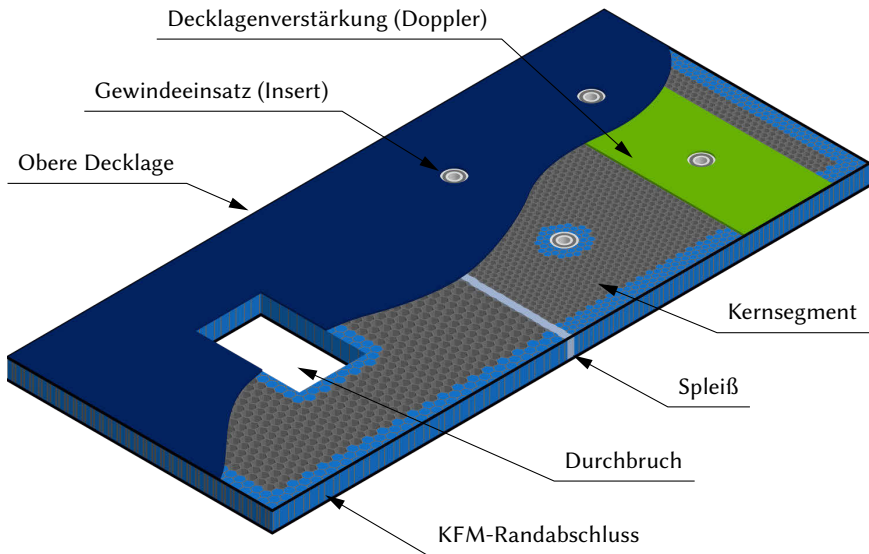


Abb. 1.2.: Exemplarischer Sandwichaufbau für Kabinenelemente

Relevanz kurzer Lieferketten und -wege verdeutlicht. Ein effektives Werkzeug, um lokale Produktionsstandorte halten zu können, ist die Automatisierung der Prozesse. Bei Sandwichpaneelen ist dies jedoch aufgrund der hohen Individualisierung und geringen Losgrößen nicht trivial und erfordert besonders flexible Lösungen. Eine erste, durchgängige Analyse der Sandwichfertigung hat den Bedarf einer optimierten Bauweise aufgezeigt, wodurch die Prozessvielfalt reduziert werden kann, ohne die Produktvielfalt einzuschränken [28, 29]. Alternativ oder ergänzend dazu kann eine modulare und moderne Bauweise Vorteile aufweisen, wie erst kürzlich mit „Skypax“ von Diehl Aviation aufgezeigt wurde [34]. Durch das Vereinen von Lavatory und Galley in einem Modul für die A320 kann der Platz effizienter genutzt und bis zu 12 weitere Sitze installiert werden. Die Kombinationsmöglichkeiten ermöglichen zudem eine individuelle Optik.

Das größte Potenzial der zur Optimierung und Automatisierung notwendigen Reduktion der Prozessvielfalt liegt im aufwendigen Schritt der Kernmodifikation. Eine Vielzahl der historisch gewachsenen konstruktiven Lösungsvarianten kann durch lokale Auffüllungen mit Kernfüllmasse (KFM) anforderungsgerecht realisiert werden. Markantestes Beispiel ist hierbei der Randabschluss, welcher der Versteifung des Panels sowie der Verhinderung von Feuchtigkeitseintritt dient. Während in Fertigungshandbüchern (z. B. [13, 116]) dutzende konstruktive Lösungsvarianten vorgestellt sind, können die wesentlichen Anforderungen mit

einer durchgängigen KFM-Bahn erfüllt werden [6]. Wesentlicher Vorteil ist hierbei, dass der KFM-Eintrag sowie das abschließend notwendige Fräsen einfacher zu automatisieren sind, als etwa das zusätzliche Laminieren von Randabschlüssen mit faserverstärkten Kunststoffen.

Wie im Detail in Abschnitt 2.2 dargestellt wird, bietet die Wissenschaft bereits einige Ansätze zu einzelnen Prozessschritten. So sind zur Materialbereitstellung, Aushärtung sowie Fräs-Nachbearbeitung bereits industriell ausgereifte Lösungen verfügbar. Der technisch anspruchsvolle Schritt des Legens formflexibler Zuschnitte wurde in den letzten Jahren umfangreich wissenschaftlich untersucht. Konzepte wie etwa das Pick-and-Place-System für Decklagenzuschnitte nach [7] sind hinreichend für eine industrielle Umsetzung erprobt. Spezielle Schlaufengreifer [98] ermöglichen auch die Handhabung großer, biegeschlaffer Wabenkerne. Unbeachtet ist bisher hingegen der Prozess des KFM-Eintrags [46]. Hinsichtlich der Relevanz bei der Sandwichfertigung ist dies verwunderlich. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens bei einem Hersteller von Kabinenelementen wurde eine Reihe direkt verwertbarer Potenziale identifiziert:

- **Höhere Produktivität:** Der manuelle Prozess ist mit einer Vielzahl von Hilfsprozessen verbunden (z. B. Vorarbeiten wie Maskieren und Nacharbeiten wie Abspachteln). Diese entfallen zu großen Teilen bei der Automatisierung, wodurch sich Zykluszeiten reduzieren.
- **Geringerer Materialeinsatz:** Mit präziser Regelung können einzelne Bahnen mit einer Breite von nur 8 mm befüllt werden, während im manuellen Prozess 15mm und mehr üblich sind. Zudem kann die oberflächliche Verschmierung eliminiert und der Materialausschuss weiter reduziert werden. So sind bereits durch die hohen Kosten der Kernfüllmasse geringe Amortisationsraten zu erwarten.
- **Geringere Werkzeugkosten:** Eine hochwertige manuelle Befüllung erfordert die Nutzung von Maskierschablonen. Bei geringen Stückzahlen, steigender Variantenvielfalt und insbesondere gekrümmten Strukturen haben sie einen erheblichen Anteil an den Fertigungskosten. Bei einer Automatisierung würden diese Ausgaben komplett entfallen.
- **Höhere Qualität und Reproduzierbarkeit:** Die Qualität der Befüllung hängt maßgeblich von der Erfahrung und den Fertigkeiten der Arbeitskräfte ab. Luft einschließen bei unzureichender Befüllung führen regelmäßig zu Ausschuss. Eine gezielte Kontrolle der Prozessparameter führt zu höherer Reproduzierbarkeit und geringeren Qualitätsschwankungen.
- **Arbeitsbedingungen:** Durch die Verwendung lösungsmittelhaltiger und kanzerogener Materialien sind die Mitarbeiter erhöhten Risiken ausgesetzt.

Insbesondere bei aufwendigen und größeren Teilen muss diesen durch weitere Maßnahmen wie spezieller Schutzkleidung Sorge getragen werden. Im Rahmen einer Automatisierung kann die Befüllung in geschlossenen Bereichen und so ohne Mitarbeiterbelastung durchgeführt werden.

Wie Abb. 1.3 auf der nächsten Seite zusammenfassend darstellt, handelt es sich beim automatisierten Kernfüllmasseneintrag um eine Schlüsseltechnologie in der optimierten Sandwich- und Kabinenfertigung. Entgegen der Bedeutung mangelt es einer wissenschaftlichen Untersuchung vollständig. Seit kurzem existieren industriell verfügbare Anlagen, jedoch scheinen diese die vorhandenen Potenziale nur ungenügend auszuschöpfen: Es kann zwar bereits eine starke Reduktion der Prozesszeit nachgewiesen werden, jedoch müssen Bearbeitungsprogramme aufwendig erstellt und qualitative Mängel (wie beispielsweise Verschmierungen) manuell nachgebessert werden. Diese Defizite deuten ebenfalls auf ein mangelhaftes Prozessverständnis hin.

Die abgeleitete übergeordnete Zielsetzung dieser Arbeit ist somit die Entwicklung eines automatisierten KFM-Eintrags. Entgegen bestehender Lösungen basiert das Konzept auf einer tiefergehenden Prozessanalyse, um bestehende Defizite abzubauen. Dazu wird im folgenden Kapitel der Stand von Wissenschaft und Technik näher beleuchtet. Aus der Analyse der Komponenten, der Rahmenbedingungen in der Gesamtkette sowie des Prozessschrittes selber werden die relevanten Forschungsfragen synthetisiert und der entsprechende Aufbau der Arbeit abgeleitet.

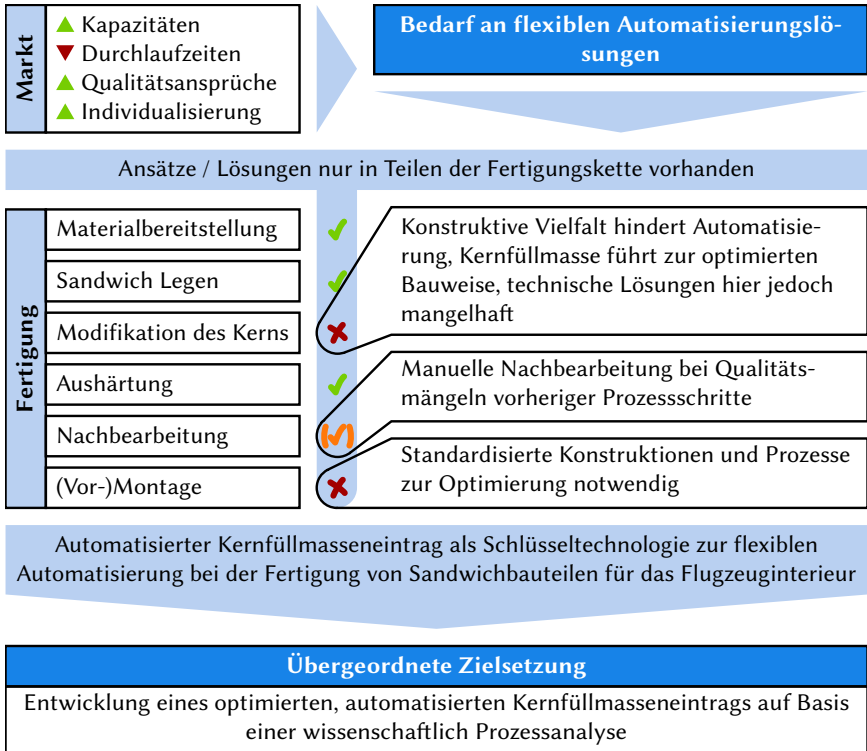


Abb. 1.3.: Zusammenfassung der Ausgangslage bei der Sandwichfertigung für das Kabineninterieur und daraus abgeleitete Zielsetzung der Arbeit

2. Stand von Wissenschaft und Technik

Die Vielfältigkeit der Sandwichmaterialien im Verbund sowie spezifische Charakteristika im Einzelnen stellen entsprechende Herausforderungen an die Fertigung. In diesem Kapitel werden zunächst die begrifflichen Grundlagen geschaffen und der Kontext der Problemstellung geklärt. Die Beleuchtung der im Flugzeuginterieur verwendeten Sandwichmaterialien in Abschnitt 2.1 sowie der Fertigungsprozesse in 2.2 liefert dazu Randbedingungen und Anforderungen an den KFM-Eintrag. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, zeigt sich bei den in Abb. 1.3 auf der vorherigen Seite genannten Fertigungsschritten ein unterschiedliches Maß an Handlungsbedarfen. Der KFM-Eintrag, welcher in der Wissenschaft bisher ignoriert wurde, wird in Abschnitt 2.3 zunächst oberflächlich analysiert und spezifiziert. Aus den Charakteristika des Prozesses folgen eine Reihe an Forschungsfragen, welche in Abschnitt 2.4 auf Basis bisheriger Erkenntnisse aus Wissenschaft und Technik diskutiert werden. Im Abschluss des Kapitels wird der Stand der Forschung zusammengefasst und aus den offenen Forschungsfragen der Aufbau der weiteren Arbeit abgeleitet.

2.1. Sandwichkonstruktionen und Materialien

Grundsätzlich besteht ein leichtbauoptimierter Sandwichaufbau aus dünnen, mechanisch hochbelastbaren Decklagen und einer dicken, möglichst leichten Kernschicht. Die für das Flugzeuginterieur relevantesten Materialien und deren Varianten werden in 2.1.1 und 2.1.2 vorgestellt. Die Adaptierbarkeit als wesentliche Stärke des Verbundes ergibt sich nicht nur aus den Kombinationsmöglichkeiten der Schichtkomponenten. Insbesondere die in 2.1.3 gezeigten Modifikationen ermöglichen individualisierte und anforderungsgerechte Sandwichpaneele. Die besondere Bedeutung der Kernfüllmasse hinsichtlich einer modernen, optimierten Bauweise wird abschließend in 2.1.4 diskutiert.

2.1.1. Decklagen

Bei Sandwichstrukturen im Flugzeuginterieur kommen als Decklagen fast ausschließlich faserverstärkte Kunststoffe zum Einsatz [97]. Aufgrund der Kombination aus hoher spezifischer Steifigkeit und Umweltbeständigkeit bei relativ geringem Preis machen Glasfasern mit etwa 65 % als Verstärkungsmaterial den größten Anteil aus, an zweiter Stelle stehen Kohlefasern. Diese kommen bei höheren mechanischen Anforderungen zum Einsatz, etwa großflächig bei Bodenpaneelen oder lokal als Verstärkung in Form von sogenannten Dopplern.

Während im Verbund die strukturellen und mechanischen Eigenschaften insbesondere durch die Wahl und Anordnung der Fasern bestimmt wird, dient das Matrixmaterial der Stabilisierung (Aufnahme von Scherkräften) und der Umweltbeständigkeit [100]. Allgemein steht eine große Vielfalt an Duro- und Thermoplasten zur Auswahl. In der Luftfahrt dominieren aufgrund der besseren mechanischen Eigenschaften erstere, hierbei insbesondere Epoxid- und Phenolharze. Phenolharze enthalten Volatile und gasen während der Aushärtung aus, sodass sie schwieriger in der Verarbeitung sind [13]. Die dabei entstehenden Gase beziehungsweise Dämpfe erhöhen das Risiko der Bläschenbildung, was wiederum die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigen und zum Eindringen von Feuchtigkeit während des Betriebes führen kann [92]. Dennoch werden nahezu ausschließlich diese Harze im Interieur verwendet, da sie die strengen Flamability, Smoke, Toxicity (FST) Richtlinien erfüllen und in diesem Bereich ein Feuchtigkeitseinzug von geringerer Wahrscheinlichkeit ist.

Weitere konstruktive Freiheitsgrade ergeben sich durch die Wahl der Faserausrichtung und Volumenanteile. Sind im Betrieb auftretende Kräfte hinreichend bekannt, kann so ein leichtbautechnisches Optimum erzielt werden. Ist dieses Wissen im Vorfeld nicht vorhanden oder wird ein möglichst isotropes Verhalten gewünscht, sind gewebte Fasermatten von Vorteil. Dies ist insbesondere bei Laminaten und Sandwichpaneelen der Fall. Entgegen unidirektionaler Faserbündel weisen die Gewebe eine strukturelle Integrität auf und können so in der Fertigung leichter gehandhabt werden. Positiv ist zudem, dass zwei Verstärkungsrichtungen in einem Fertigungsschritt gelegt werden können. Von Nachteil ist hingegen die sogenannte Ondulation, welche die Welligkeit der Fasern aufgrund der Kreuzung von Kett- und Schussfäden beschreibt. An den Kreuzungspunkten liegen die Fasern somit nicht belastungsoptimal in der Ebene des Laminats. Die Welligkeit führt zudem zu einer höheren Oberflächenrauigkeit, was wiederum Lufteinschlüsse begünstigt [44, 82]. Bei Faserhalbzeugen stehen verschiedene Webarten zur Auswahl. Diese beeinflussen maßgeblich die Gewebestabilität, Drapierbarkeit (Eignung zur Anpassung an gekrümmte Oberflächen) sowie Ondulation. In Abb. 2.1 auf der nächsten Seite sind einige der in der Luftfahrt gängigen Gewebe-

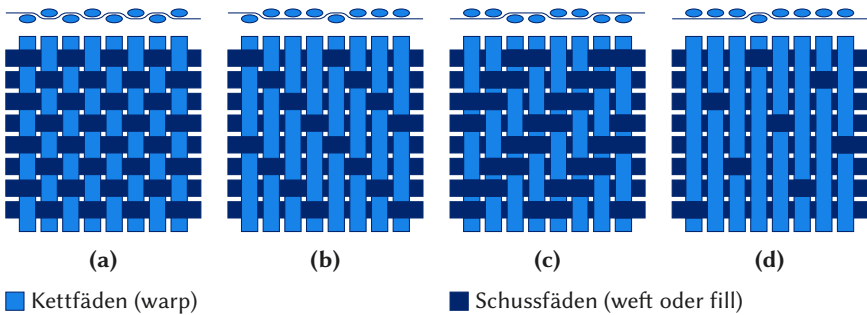


Abb. 2.1.: Beispiele gängiger Gewebemuster: (a) Leinwand (auch *plain*), (b) Atlas 4HS (*crowfoot*), (c) Köper (*twill*), (d) Atlas 8HS (*satin*)

muster dargestellt. Eine besonders hohe Verbreitung in der Flugzeugproduktion haben vorimprägnierte Fasermatten, sogenannte Prepregs. Durch den zusätzlichen Imprägnierungsschritt in der Herstellung sind diese mit höheren Kosten verbunden. Der finanzielle und technische Aufwand steigt auch bei Transport und Lagerung. Hier ist eine Kühlung notwendig, um die Aushärtung der Matrix zu verlangsamen. So erlauben Prepregs der gängigen Hersteller eine Lagerung unter Umgebungsbedingung von etwa 16 – 60 Tagen, bei Tiefkühlung unter 18 °C von bis zu einem Jahr [42, 57, 61]. Die Mehrkosten werden jedoch insbesondere dank der hiermit reproduzierbar erreichbaren hohen Qualität der Bauteile bei hohem Faser-Volumen-Anteil akzeptiert. Bei modernen Flugzeugen wie der Airbus A350 XWB und der Boeing 787 sind beispielsweise über 50 % der Kompositteile der Primärstruktur aus Prepregs [57]. In der Fertigung ergeben sich zudem weitere Vorteile. Durch die Verlagerung des Imprägnierprozesses ist eine höhere Produktivität bei der Fertigung von Sandwichpaneelen möglich. Bei den im Interieur gebräuchlichen „co-cure“-Prepregs sind keine weiteren Klebschichten notwendig, das enthaltene Harz benetzt während der Aushärtung den Wabenkern.

Wesentliche Produktmerkmale der Prepregs sind Fasertyp, -ausrichtung und -volumenanteil sowie Matrixmaterial. Zudem kann die Klebrigkeit (englisch: *tack*) je nach Bedarf der Fertigung gewählt werden. Es werden Prepregs mit Tack-Werten von 0 (gering) bis 2 (hoch) angeboten. Hierbei handelt es sich um subjektive Angaben, standardisierte Messmethoden zur Quantifizierung haben sich noch nicht durchgesetzt [18, 25, 96]. Die Klebrigkeit sollte ausreichend hoch sein, sodass sich die Lagen nach Positionierung nicht zueinander verschieben und ihre Form behalten. Deshalb benötigen gekrümmte Strukturen üblicherweise Prepregs mit höheren Tack-Werten. Sie sollten jedoch so niedrig wie möglich gewählt

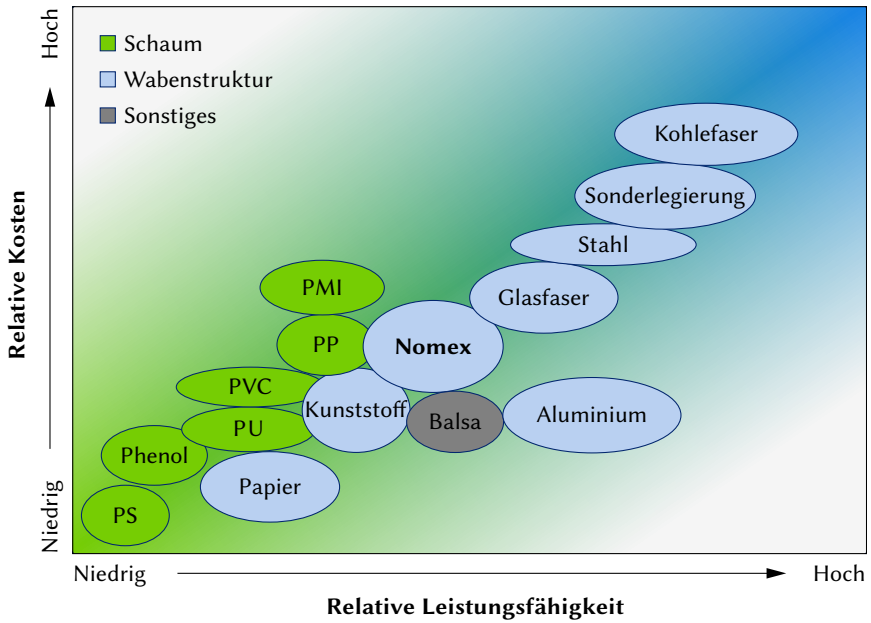


Abb. 2.2.: Klassifizierung von Kernmaterialien nach Kosten und Leistungsfähigkeit, nach [69]

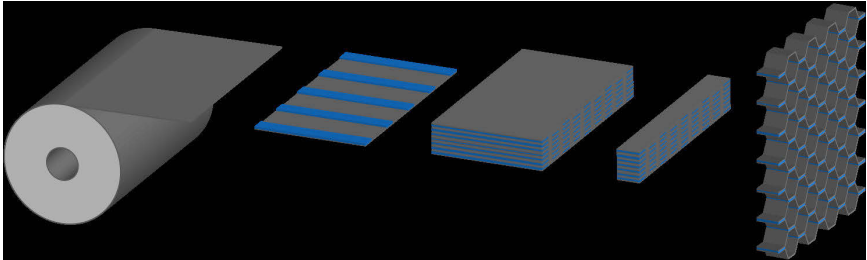
werden, sodass die Handhabung nicht übermäßig erschwert wird und mögliche Fehler beim Legen korrigiert werden können.

2.1.2. Kern

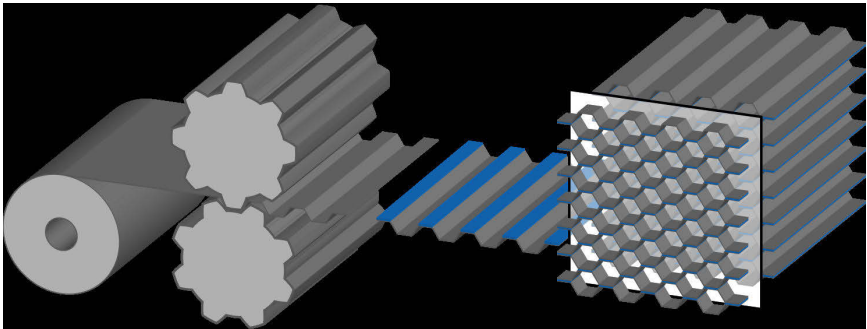
Nach Zenkert [116] ist das Kernmaterial die vermutlich bedeutendste Komponente im Sandwichverbund. Wie in Abb. 2.2 dargestellt, eignen sich insbesondere honigwabenähnliche Strukturen (englisch: *honeycomb*) hervorragend für Sandwichstrukturen. Verglichen mit alternativen Materialien wie Kunststoffschäumen sind sie kostenintensiver [69]. Aufgrund der erhöhten Leichtbauanforderungen und der hiermit verbundenen Investitionsbereitschaft haben Wabenstrukturen als Kernmaterial im Flugzeugbau dennoch die höchste Verbreitung erlangt [13].

Nahezu jedes Material lässt sich zu Wabenstrukturen verarbeiten, wenn es als dünnwandiges Halbzeug bereitgestellt werden kann. So wurden bereits über 500 verschiedene Varianten erfolgreich gefertigt [6]. Im Flugzeugbau sind insbesondere Aluminium und Nomex¹ als Wabenmaterialien gebräuchlich. Nomex

¹Eingetragener Markenname der Firma Dupont



(a) Expansion: abrollen → zuschneiden und alternierende Klebestreifen aufbringen → stapeln → schneiden → expandieren



(b) Wellenprägung: abrollen → Wellen einprägen → zuschneiden → stapeln und verkleben → schneiden

Abb. 2.3.: Verfahren zur Herstellung von Wabenkernen

ist ein mit Phenolharz imprägniertes Aramidfaserpapier, erfüllt als solches die FST-Anforderungen und ist das am weitesten verbreitete Wabenmaterial für Sandwichpaneele der Flugzeugkabine [49, 103].

In der Herstellung wird zwischen den Verfahren *Expansion* und *Wellenprägung* unterschieden [6, 58]. Bei der Expansion wird die Bogenware mit versetzten Klebestreifen gestapelt und anschließend auseinandergezogen. Bei nichtmetallischen Stoffen wie Nomex muss der expandierte Block zur Stabilisierung der Form in Harz getränkt werden. Die Kernschichten werden anschließend vom Block geschnitten. Bei der Wellenprägung werden die Schichten vorgeformt und dann verklebt. Dieses Verfahren ist üblicherweise kostenintensiver, jedoch bei metallischen Materialien hoher Dichte oder komplexer Zellgeometrie erforderlich.

Der hexagonale Wabenkern als gängigste Variante ist in Abb. 2.4 auf der nächsten Seite dargestellt. Aufgrund der Struktur und des Fertigungsverfahrens ist

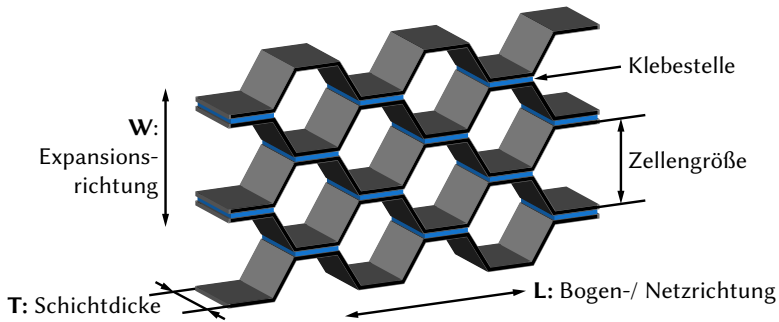


Abb. 2.4.: Terminologie und schematische Darstellung eines hexagonalen Wabenkerns

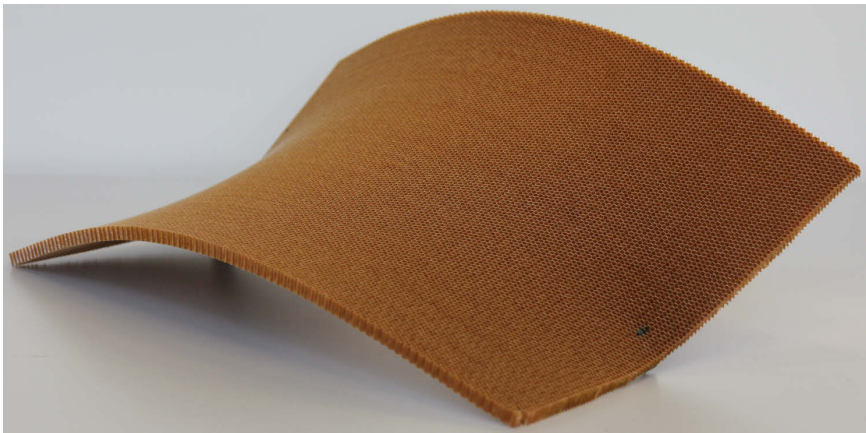


Abb. 2.5.: Zweiaxiale Verformung bei einachsiger Biegung hexagonaler Waben (*Sattelform*)

das Material anisotrop. Innerhalb der Ebene wird zwischen der Expansionsrichtung W und der Streifenrichtung L unterschieden. Hierbei sind in L -Richtung etwa doppelte so hohe Festigkeits- und Steifigkeitswerte zu erwarten [6]. Die hexagonalen Struktur ist aus mechanischen und kostentechnischen Gründen zu bevorzugen, jedoch nur bedingt für gekrümmte Paneele geeignet. Durch Querkontraktionseffekte bilden sie unter Biegung eine Sattelform, wie in Abb. 2.5 zu sehen.

In solchen Fällen können spezielle Wabenformen eingesetzt werden. Die überexpandierte Wabe (auch OX-Wabe, kurz für *overextended* – vgl. Abb. 2.6a) wird

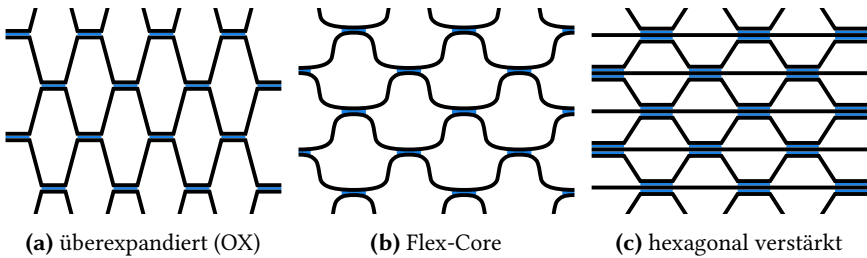


Abb. 2.6.: Alternative Wabenformen

durch eine weitere Streckung während der Fertigung realisiert und erleichtert die Biegung um die W -Achse. Der sogenannte Flex-Core² (vgl. Abb. 2.6b) ermöglicht sogar starke zweiachsige Krümmungen, ist jedoch durch die aufwendige Struktur entsprechend teurer. Bei höheren strukturellen Anforderungen kann eine in L-Richtung verstärkte Form der hexagonalen Wabe eingesetzt werden (vgl. Abb. 2.6c).

Neben verwendetem Grundmaterial und Zellform werden Wabenkerne nach Zellgröße sowie Flächengewicht spezifiziert. Letzteres dient der Anpassung der Steifigkeit bei definierter Zellgeometrie. Bei Nomex-Waben kann das Flächengewicht durch mehrfaches Beschichten mit Harz nach der Expansion erhöht werden, bei Aluminium wird nach Bedarf die Blechstärke des Rohmaterials variiert. Bei hexagonalen Waben wird die Zellgröße über den Abstand w der parallelen Flächen angegeben (vgl. Abb. 2.4), OX-Waben werden anhand der theoretischen Zellgröße vor der Überexpansion bemäßt.

Durch den schwer kontrollierbaren Prozess der Expansion entstehen häufig lokale Fehler in der Wabenstruktur [35]. In Abb. 2.7 sind einige dieser Irregularitäten dargestellt. Bei vereinzeltm Auftreten beeinträchtigen diese die mechanischen Eigenschaften des gesamten Panels kaum [111]. Die Unvermeidbarkeit dieser strukturellen Fehlstellen zeugt davon, dass beim Expansionsprozess nicht von einer ideal hexagonalen Form ausgegangen werden kann. Dies spiegelt sich auch in den hohen Fertigungstoleranzen wieder. Nach Airbus-Spezifikation [3] werden beispielsweise bei hexagonalen Waben Abweichungen von $\pm 10\%$ in der Zellgröße und $\pm 0,13$ mm in der Schichtdicke toleriert.

2.1.3. Verbundaufbau

Die leichtbautechnisch optimierte Grundstruktur besteht aus steifen Decklagen leichtem Kern, wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben. Der reale

²Eingetragener Markenname der Firma Hexcel

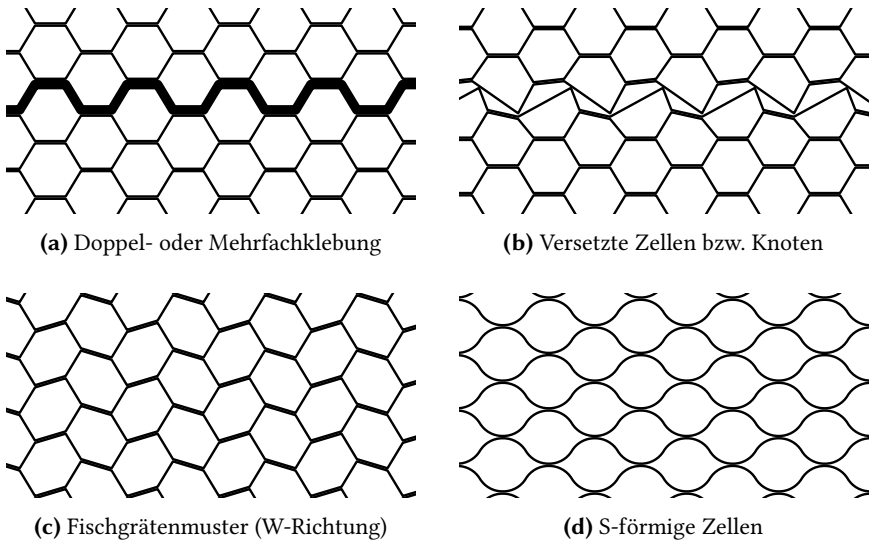


Abb. 2.7.: Beispiele möglicher Formfehler bei hexagonalen Waben

Einsatz erfordert jedoch meist spezifische Anpassungen. Der Sandwichaufbau ermöglicht durch Modifikation des Kerns nahezu beliebige Funktionsintegrationen. Dies kann zur Reduktion der Einzelteile und des Aufwandes in der Montage genutzt werden [108]. Anwendungsbeispiele sind das Einsetzen von Kabelkanälen oder schwingungsdämpfender Elemente zur Anpassung der akustischen Eigenschaften [58]. Die relevantesten konstruktiven sowie fertigungstechnischen Maßnahmen zur anforderungsspezifischen Modifikation eines Sandwichpaneels werden im Folgenden näher betrachtet.

Segmentierung Im klassischen Fertigungsprozess ist es je nach Anforderung üblich, den Kern in mehrere Segmente spezifischer Eigenschaften aufzuteilen. So kann nach Bedarf lokal die Steifigkeit (durch stärkere Kerne) oder Drapierbarkeit (durch andere Wabenformen) erhöht werden. Große Bauteile erfordern meist eine Aufteilung in mehrere Zuschnitte. Massive Kernsegmente wie etwa durch Hartgewebe-Einsätze vereinfachen das Fräsen von Taschen oder Durchbrüchen und sorgen für eine bessere Lasteinleitung.

Die verschiedenen Zuschnitte und Segmente werden über einen Spleiß miteinander verklebt. Hierfür werden meist dünne Polymerstreifen verwendet, welche im Aushärtprozess aufschäumen und so die Kavitäten ausfüllen [13]. In Abb. 2.8 auf der nächsten Seite ist ein Bauteil aus verschiedenen Nomex-Zuschnitten dar-

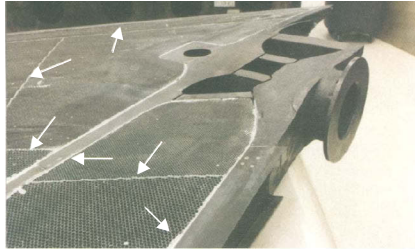


Abb. 2.8.: Sandwichpaneel mit verschiedenen, mittels Spleiß verbundenen Kernsegmenten [13]

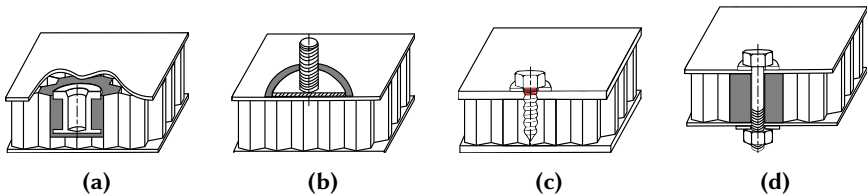


Abb. 2.9.: Beispiele gebräuchlicher Inserttypen [103]: (a) eingeklebter (Gewinde-)Einsatz, (b) mit Decklage verklebte / vernähte Gewindestützen (Onsert), (c) selbstschneidend / verschweißend, (d) gefüllte Waben

gestellt, die weißen Streifen sind jeweils Spleiß. Je nach Umsetzung fallen auch einige der in den folgenden Absätzen vorgestellten Modifikationen in die Klasse der Kernsegmente, welche im Legeprozess eingebracht und mit Spleiß verklebt werden.

Krafteinleitung Nach Zenkert [116] sind Inserts lokale Änderungen in Steifigkeit und Festigkeit des Sandwichpaneels, die der Aufnahme und Verteilung lokaler Lasten dienen. Bei der Anbindung weiterer Paneele oder sonstiger Bauelemente sind gängige Verfahren aus der Verarbeitung metallischer Bleche oder Holzmaterialien nur bedingt übertragbar. Bei Sandwichstrukturen sollten externe Lasten möglichst von den mechanisch leistungsfähigeren Decklagen getragen werden. Eine Anbindung ist hier schwieriger zu realisieren, da die Kräfte meist über den Kern in die Decklagen geleitet werden. Dies erfordert großflächige beziehungsweise lastpfadoptimierte Anbindungen. In Abb. 2.9 sind einige gängige Lösungen für Lasteinleitungen skizziert.

Im Kabinenbau werden insbesondere eingeklebte Inserts nach Abb. 2.9a verwendet. Die Inserts werden über eine Bohrung in das ausgehärtete Paneel eingesetzt und ein Klebstoff durch eine Einlassöffnung appliziert. Bei geringen Lasten können die Inserts direkt in die offene Wabe gesetzt werden. Durch die undefinierte Lage und Form der umliegenden Zellen ergeben sich jedoch Schwankungen in der Klebeanbindung. Für kritische Anwendungen werden die Waben somit vorher mit KFM ausgefüllt, was zu einer wiederholbaren und berechenbaren Anbindung führt [103]. Größere Befüllbereiche führen zu einer besseren Lasteinleitung in die Decklagen und somit höher belastbaren Anbindungspunkten. Dies geht jedoch mit einer weiteren Gewichtszunahme einher.

Bei einer lastpfadoptimierten Anbindung müsste ein stetiger Steifigkeitsübergang vom Insert zum unbearbeiteten Kern realisiert werden. Nach einem Ansatz von Schwenke et al. [101, 102] können dazu speziell konstruierte Inserts verwendet werden, die strukturell bereits einen Steifigkeitsgradienten aufweisen. Sie werden als alternative Kernsegmente additiv gefertigt und während des Legeprozesses in das Sandwich integriert. Eine bessere mechanische Auslastung der Anbindungen konnte dabei nachgewiesen werden, jedoch wird der fertigungstechnische Aufwand weiter erhöht. Ein anderer Ansatz zur Optimierung der Lastpfade wäre etwa das Befüllen des Kerns mit auslaufenden Formen, also beispielsweise stern- statt kreisförmigen KFM-Bereichen. Dies ist jedoch mit den aktuell gängigen Befüllprozessen (vgl. Abschnitt 2.2.3) nur schwer realisierbar, entsprechend sind zur Belastbarkeit keine wissenschaftlichen Arbeiten bekannt.

Türk et al. [108] schlagen ebenfalls den Einsatz von alternativen, additiv gefertigten Kernstrukturen zur Funktionsintegration und Lasteinleitung vor. Als Referenzbauteil dient eine Instrumententafel aus dem Flugzeugcockpit, bestehend aus Aluminiumblechen und einer Vielzahl zusätzlicher Elemente wie Niete, Nietmutter und Drehverschlüssen. Das optimierte Kompositbauteil aus CFK-Decklagen, Nomex-Wabekern, additiv gefertigtem Wabekern sowie additiv gefertigten Inserts ist ein gutes Beispiel für die Potenziale hinsichtlich des Leichtbaus (ca. 40 % Gewichtseinsparung) und der Funktionsintegration (ca. 50 % weniger Einzelteile). Die starke Individualisierung des gesamten Kerns führt jedoch auch hier zu einem erhöhten Aufwand sowohl in der Entwicklung als auch der Produktion.

Randabschlüsse Neben den Lasteinleitungen stellen Randabschlüsse die zweite große Gruppe häufig notwendiger Anpassungen der Grundstruktur dar. Zugrundeliegende Anforderungen sind etwa die Versteifung der Struktur (zum Beispiel für Türen), die Verhinderung von Feuchtigkeitseintritt in den Kern sowie geschlossene Kanten in sichtbaren Bereichen. Die Wasserabsorption ist aufgrund der Kavitäten des Kerns zu berücksichtigen, wobei diese Problematik in der Literatur kontrovers diskutiert wird. Campbell [13] und Fogarty [30] kommen nach Aus-

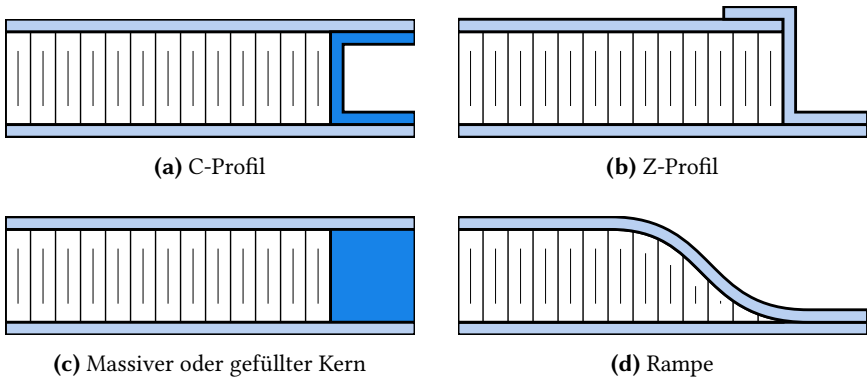


Abb. 2.10.: Beispiele gebräuchlicher Randabschlusstypen [30]

wertung derselben Studien zu diametral entgegengesetzten Ergebnissen: Nach Campbell ist die Wassermigration in einem Wabenkern „unvermeidbar“. Nach Fogarty handle es sich hierbei jedoch um dessen nicht als solche kenntlich gemachte persönliche Meinung. Eine der von beiden Autoren betrachtete Studie ist beispielsweise die von Shafizadeh et al. [104]. Dabei wurden an mehreren im Betrieb befindlichen Boeing 767 Sandwichpaneele aus dem äußeren Strukturbereich thermografisch untersucht. In der Veröffentlichung kommen Shafizadeh et al. zu dem Fazit, dass Wasseranreicherungen im Betrieb aus konstruktiven und fertigungstechnischen Mängeln resultieren und somit vermeidbar wären. Auf diesen Schluss geht Campbell jedoch nicht ein.

Historisch gewachsen sowie durch die gestalterische Freiheit im manuellen Prozess existieren eine Vielzahl an Umsetzungsmöglichkeiten für Randabschlüsse [6, 30]. Ein exemplarischer Auszug ist in Abb. 2.10 dargestellt. Viele hiervon sind mit erhöhtem Fertigungsaufwand verbunden, beispielsweise durch die notwendige Fräsbearbeitung des Kerns oder zusätzliche Prozessschritte nach der Aushärtung. Heutzutage häufig verwendete Lösungen sind 2.10c und 2.10d. Zweites kann besonders produktiv im sogenannten Crush-Core-Prozess hergestellt werden, wodurch der Kern nicht maschinell bearbeitet werden muss, sondern im Pressvorgang deformiert wird [9]. Dies kann jedoch zu Komplikationen führen, insbesondere durch Faltenbildung in den Decklagen und erfordert teurere Werkzeuge. Bei Variante 2.10c werden entweder Kerneinleger oder Füllmasse im Legeprozess eingebracht. Dies kann zu erhöhtem Gewicht führen, was jedoch in vielen Fällen tolerierbar und über konstruktive Optimierung kompensierbar ist [30]. Diese Form des Randabschlusses eignet sich insbesondere für innenliegende Bereiche, etwa bei Durchbrüchen oder Taschen.

2.1.4. Besondere Bedeutung der Kernfüllmasse

Die konstruktive Flexibilität ist wie bereits beschrieben eine wesentliche Stärke von Kompositstrukturen. Sie stellt die Fertigung jedoch vor große Herausforderungen. Einige konstruktive Lösungen sind zudem redundant. Die Wahl unterliegt dabei den subjektiven Präferenzen des Konstrukteurs, Richtlinien des Unternehmens oder Spezifikationen des Kunden beziehungsweise Anwenders. Ein Ansatz zur wirtschaftlichen Fertigung ist die Optimierung der Prozesskette [28]. Diese erfordert digital gestützte, flexible und automatisierbare Prozesse. Konkurrierend dazu sind konstruktive Maßnahmen im Sinne einer Modularisierung. Danach sollte es Ziel der Produktplanung sein, bei einer Maximierung der externen Varianz die interne Varianz zu minimieren [74].

Der Einsatz von Kernfüllmasse weist für beide Ansätze der Fertigungsoptimierung ein besonders hohes Potenzial auf. Im Sinne der Segmentierung können befüllte Kernbereiche zur Erhöhung der Steifigkeit und für Fräsarbeiten genutzt werden. Wie bereits erwähnt, können Kräfte über KFM direkt sowie in wiederholbarer, leicht auslegbarer Form in das Paneel eingeleitet werden. Der produktionstechnisch größte Nutzen liegt in der Verwendung als Randabschluss. Das Eintragen von Kernfüllmasse kann zusätzliche Prozessschritte (nachträgliches Laminieren / Leimen von Hartgewebestreifen), Aufwand manueller Arbeit (Legen zusätzlicher Prepregstreifen) und die Materialvielfalt (metallische Hohlprofile) reduzieren. Besonders vorteilhaft ist die Möglichkeit, bei ebenen Paneelen mehrere Produkte in einem Sandwich zu platzieren. Die Verschachtelung (englisch: *Nesting*) wird im anschließenden Fräsprozess aufgelöst. Der Aufwand zum Zuschneiden sowie Legen von Kern- und Decklagen reduziert sich dabei erheblich.

Der aktuell zurückhaltende Einsatz von KFM hat vermutlich verschiedene Ursachen. Bei der manuellen Fertigung ist etwa die gesundheitliche Gefährdung der Werkkräfte ein kritischer Faktor. Weiterhin nachteilig sind die hohen Kosten des Materials. Die Argumentation der Gewichtserhöhung des Gesamtbauteils durch Einsatz von KFM ist hingegen nur begrenzt valide. Die Unterschiede sind üblicherweise im Interieur zu vernachlässigen und generell konstruktiv zu lösen [30]. Wie in Kapitel 1 bereits erwähnt, lassen sich all diese Hindernisse mit einer Automatisierung lösen oder zumindest reduzieren. Durch die Ermöglichung kleinerer Bahnbreiten werden Material und so Kosten sowie Gewicht gespart. Die technische Umsetzung ist jedoch aufgrund der speziellen Fließeigenschaften nicht trivial, wie in Abschnitt 2.4 ausführlich diskutiert wird.

2.2. Fertigung von Sandwichbauteilen

Insbesondere für Kabinenelemente wird die Fertigung auch im Flugzeugbau zunehmend in kleine und mittlere Unternehmen (KMU) ausgegliedert [37]. Diese stehen mit der aktuellen Marktsituation vor besonderen Herausforderungen. So erfordert der zunehmende Wunsch zur Individualisierung der Kabine eine flexible Fertigung, während dem steigenden Kosten- und Konkurrenzdruck in den Industrienationen meist nur mithilfe von Automatisierung begegnet werden kann. Diese steht klassischerweise im Widerspruch mit der Produktion geringer Losgrößen. Auch die historisch gewachsene Prozessvielfalt und im Kompositbau verbreitete manuelle Fertigung erschwert den Wandel. Die in diesem Abschnitt vorgestellte Prozesskette erlaubt hingegen bei geringem Investitionsaufwand eine flexible und automatisierte Produktion von ebenen Sandwichpaneelen in geringen Losgrößen.

Bei der Sandwichfertigung kann die Systemgrenze so gezogen werden, dass auf materieller Ebene als Eingangsgrößen die einzelnen Materialien und Halbzeuge (vgl. Abschnitt 2.1) und als Ausgangsgrößen einzelne Sandwichpaneel sowie (vor-)montierte Baugruppen und Kabinenelemente definiert werden. Dies entspricht der Fertigung in den üblichen kleinen und mittleren Zulieferbetrieben. Wie in Abschnitt 2.1 bereits dargestellt, überwiegt in der Flugzeugkabine der Sandwichaufbau mit Prepregs (GFK sowie CFK) als Decklagen sowie Nomex-Waben als Kern. In dieser Arbeit werden deshalb die hierfür notwendigen Produktionsprozesse fokussiert, wobei sich der allgemeine Ablauf auch auf weitere Aufbauten übertragen lässt. In Abb. 2.11 auf der nächsten Seite ist die Prozesskette mit einigen der je Fertigungsschritt anfallenden Tätigkeiten dargestellt.

2.2.1. Materialbereitstellung

Die Grundmaterialien Prepreg, Wabe und Kernfüllmasse werden in meist herstellerübergreifend einheitlichen Dimensionen geliefert. Dies vereinfacht eine automatisierte Handhabung und Vorverarbeitung. In beiden Bereichen bieten Wissenschaft und Industrie Lösungsansätze. Zur Handhabung von biegeschlafenen, flächigen Körpern (hier: Kern- und Decklagen) sind Greiferkonzepte aus der Textilverarbeitung übertragbar. Mit aktuierten Greifern wie in [32] ist kontrolliertes, räumliches Ablegen möglich. Bei der Vorverarbeitung von Wabe und Prepreg haben sich in der Industrie bereits CNC-Schneidetische durchgesetzt [13]. Zur Förderung der KFM können volumetrische Pumpen (wie Exzentrerschnecken- oder Zahnradpumpe) genutzt oder Kartuschen in Gebindegrößen bis ca. 910 ml pneumatisch geleert werden. Weitere Hilfsprozesse, wie etwa die Reinigung von Werkzeugschalen und anschließende Beschichtung mit Trennmitteln, lassen sich



Abb. 2.11.: Übersicht über die allgemeine Prozesskette zur Fertigung von Sandwichpaneelen sowie exemplarischer Tätigkeiten

ebenfalls mit etablierter Technik lösen. Aufgrund des technischen Reifegrads und der geringen Optimierungspotenziale ist keine tiefere wissenschaftliche Betrachtung erforderlich.

2.2.2. Legeprozess

Im Legeprozess wird der schicht- und segmentweise Aufbau des Sandwichpanels realisiert. Hierzu werden die Zuschnitte der Decklagen und Kernsegmente nach Legeplan positioniert. Unter diesem Prozessschritt werden auch Hilfsprozesse zusammengefasst. Hierzu gehört etwa das Aufbringen der Trennfolie bei Werkzeugen für ebene Paneele. Um Verrutschen und Faltenbildung zu vermeiden, wird die Folie über Vakuum oder Klebestreifen auf dem Werkzeug fixiert. Bei Prepregs muss zudem die Schutzfolie entfernt werden.

Die wesentliche Herausforderung hinsichtlich einer Automatisierung ist die Handhabung biegeschlaffer Bauteile. Wie bereits in 2.2.1 dargestellt, existieren hierzu Lösungen im wissenschaftlichen Umfeld. Ein dem händischen Prozess identischer Ansatz ist die Verwendung von Pick-and-Place Systemen, wie etwa in [10] und [7] vorgestellt. Bei Decklagen von gekrümmten Strukturen eignen sich zudem die Verfahren Automated Tape Laying (ATL) und Automated Fiber Placement (AFP). Sie werden insbesondere bei der Fertigung von reinen CFK-Bauteilen bereits eingesetzt [13]. Hierbei werden einzelne Prepregstreifen abgerollt und zugeschnitten, die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale liegen in der Streifenbreite und den erreichbaren Krümmungsradien.

Bei den Hilfsprozessen sind lediglich Veröffentlichungen zum Entfernen der Schutzfolie von Prepregs sowie dem Platzieren und Sichern von Trennfolie bekannt [8, 10, 28]. Grundsätzlich ist dies vermutlich der recht trivialen technischen Umsetzung geschuldet (beispielsweise bei der Handhabung von starren Kernsegmenten wie Hartgewebeeinsätzen). Durchaus interessante Forschungsfragen ergeben sich hingegen beim Spleißen der Segmente. Als Klebstoff stehen verschiedene Optionen zur Verfügung und zu verbindende Kernmaterialien können im mechanischen Verhalten stark variieren. Die industrielle Forschung hat bisher hauptsächlich die Art und Ausführung der Klebeverbindung oder die manuell unterstützte Handhabung fokussiert, nicht jedoch deren automatisierte Umsetzung [4, 20, 33, 91].

2.2.3. Modifikation des Kerns

Wie in Abschnitt 2.1.3 dargestellt, ist der Kernfüllmasseneintrag bei einer optimierten Bauweise sowie Prozesskette die bedeutendste Modifikation der Kernschicht. Sie wird üblicherweise während des Legeprozesses durchgeführt, wenn das Harz zusammen mit dem Sandwichaufbau ausgehärtet wird (sogenanntes *Co-Curing*). Hierbei müssen zunächst die unteren Decklagen sowie alle Kernsegmente gelegt werden, damit die KFM in die gewünschten Bereiche der offenen Wabe gefüllt und abschließend die oberen Decklagen gelegt werden können.

Bei manueller Fertigung bedarf der KFM-Eintrag eigener Hilfsprozesse. Zur Vermeidung von Überbefüllung und zur Einhaltung der Spezifikationen wird der Wabenkern maskiert. Eine höhere Maßhaltigkeit und Produktivität wird mittels Blechschablonen erzielt. Bei kleinen Losgrößen und einfachen Geometrien können auch Klebestreifen zur Abdeckung verwendet werden. Einteilige Schablonen mit geschlossenen Bahnen (etwa für den Randabschluss) benötigen Stege, die unbefüllten Bereiche müssen abschließend händisch aufgefüllt werden. Einzelne Kreisformen, wie sie zum Verkleben von Inserts benötigt werden, können über Stempelformen oder pneumatische Dosiersysteme befüllt werden. Bei größeren Bereichen wird die KFM händisch und mittels Spachtel in die Kavitäten gepresst, exemplarisch dargestellt in Abb. 2.12 auf der nächsten Seite.

Wie bereits eingangs dargestellt, weist der manuelle Prozess etliche Nachteile auf, wohingegen eine Automatisierung große Potenziale beinhaltet. Industrielle Lösungen sind erst seit kurzem verfügbar, mit ersten öffentlichen Berichten in 2018 [2]. Diese Systeme sind der manuellen Fertigung partiell überlegen, allerdings werden die Potenziale nicht annähernd ausgeschöpft [46]. Eine manuelle Nacharbeit ist weiterhin nicht auszuschließen, Materialrückstände an der Oberseite müssen nach der Dosierung entfernt werden. Diese Rückstände können sich während des Prozesses am Eintragswerkzeug akkumulieren und zu Ver-

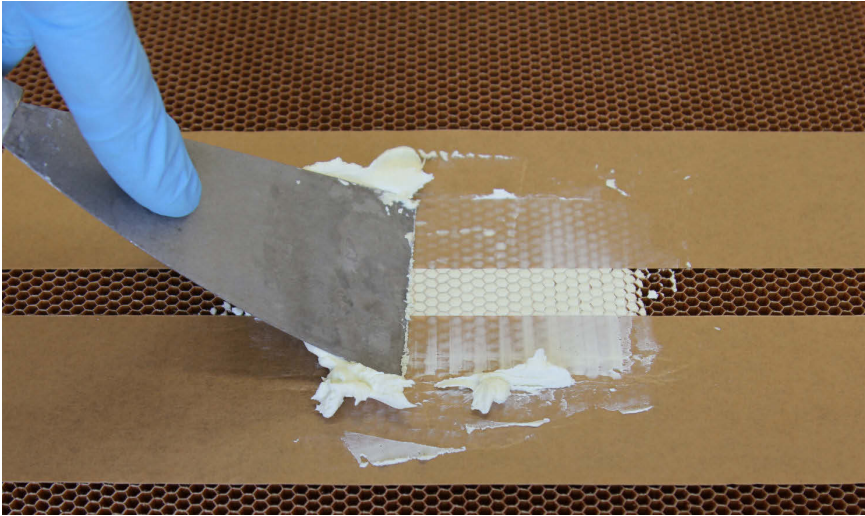


Abb. 2.12.: Manuelle Befüllung der Wabe mit Kernfüllmasse

schmierungen führen. Dies erschwert eine Referenzierung anhand der befüllten Bereiche wie etwa in [38], die im Rahmen einer durchgängigen Automatisierung von hoher Relevanz ist. Inbetriebnahme, Parametrisierung sowie Programmierung sind mit hohem Aufwand verbunden und können die geforderte Flexibilität kaum erfüllen. Offensichtlich ist dies etwa bei der Dosierregelung. Die eingesetzten Lösungen auf Basis der Werkzeuggeschwindigkeit sind fehleranfällig und erfordern langwierige, iterative Verfahren zur Bestimmung geeigneter Parameter. Diese sind an spezifische Befüllszenarios gekoppelt und das Vorgehen muss bei jeder Variation entsprechend wiederholt werden. Die notwendige Kenntnis der aktuellen Bahnüberlappung erschwert zudem die Bahnplanung und schränkt die Auswahl geeigneter Algorithmen stark ein. Zusammengefasst lässt sich folgern, dass die reine ingenieurtechnische Umsetzung der händischen Befüllung in einer automatisierten Anlage nicht ausreicht. Eine tiefgehende, wissenschaftliche Untersuchung ist aufgrund der Komplexität des Prozesses sowie des Materialverhaltens unabdingbar, um eine optimierte Lösung realisieren zu können.

2.2.4. Aushärtung

Die fertig gelegten Sandwichpakete werden unter Druck und Temperatur ausgehärtet. Als ökonomische und produktive Lösung haben sich beheizte Pressen durchgesetzt. Um eine uniforme Druckverteilung bei dreidimensional ausgepräg-

ten Strukturen zu realisieren, muss eine atmosphärische Druckdifferenz aufgebaut werden. Dafür wird das Sandwichpaket mit einer Folie versiegelt und Unterdruck aufgebaut. In den üblicherweise eingesetzten Autoklaven wird in einer geschlossenen Kammer zusätzlich ein Überdruck aufgebaut. Es wird eine hohe Bauteilqualität erzielt, wobei die Anlagen hohe Investitionen erfordern und ein Sicherheitsrisiko darstellen [6, 13, 116]. Aktuelle Forschungsarbeiten fokussieren deshalb den vacuum-bag only (VBO) oder auch out of autoclave (OOA) Prozess. Dank entsprechender Fortschritte in der Material- und Prozesswissenschaft kann der aufgebaute Unterdruck bereits ausreichen, sodass eine Aushärtung im Umluftofen möglich ist. Insbesondere die Arbeiten von Kratz et al. [71, 72, 73] haben dabei gezeigt, dass auch ein Sandwichaufbau mit Wabenkern in guter Qualität realisierbar ist. Der Umgang mit den OOA-Materialien erfordert eine höhere Qualifizierung der Arbeitskräfte, sodass der Einsatz bei vorhandenem Autoklaven nicht sinnvoll ist. Die geringen Anlageninvestitionen senken jedoch die Einstiegshürde für neue Unternehmen [14].

Sowohl Pressen wie Autoklaven und Öfen führen den Aushärteprozess geregelt und automatisch durch. Somit ist zur Integration in eine automatisierte Prozesskette nur die Handhabung der Sandwichpakete und Werkzeuge zu realisieren. Forschungsbedarf wäre lediglich bei der Versiegelung gekrümmter Strukturen denkbar, wobei hier wie beim Legeprozess auf den Ergebnissen hinsichtlich Handhabung biegeschlaffer Textilteile aufgebaut werden kann.

2.2.5. Nachbearbeitung

Zur Herstellung der finalen Geometrie und Montierbarkeit müssen ausgehärtete Sandwichpaneele nachbearbeitet werden. Dies beinhaltet etwa das Fräsen von Randabschlüssen, Taschen oder Durchbrüchen sowie das Verkleben von Inserts. Sichtflächen werden vor einer Lackierung oder Beschichtung zudem meist gespachtelt und geschliffen. Mögliche Arbeiten sind sehr vielfältig, sodass dieser Prozessschritt besonders von der Optimierung der Bauweise hin zu reduzierter interner Varianz profitiert.

Aufgrund der hohen Prozessvielfalt lässt sich der Automatisierungsgrad an dieser Stelle nicht vollständig aufzeigen. Den größten Anteil haben jedoch Fräsprozesse, die mithilfe von CNC-Maschinen leicht automatisierbar sind. Von ebenfalls großer Bedeutung ist das Einsetzen (und Verkleben) von Inserts. Auch hierzu existieren bereits technische Lösungen, sowohl als direkte Umsetzung des händischen Prozesses [99, 110] wie auch durch automatisierungsgerechte Neuentwicklungen [27]. Für eine automatisierte Prozesskette ist die Referenzierung des Bauteils nach dem Pressen unabdingbar. Hierfür eignet sich die eingebrachte Kernfüllmasse als natürliches sowie als künstliches Merkmal. Die gesamte Pro-

zessvielfalt wird demnach nicht unnötig erhöht. Auch bei lichtundurchlässiger CFK-Decklage können befüllte Bereiche etwa mittels Thermografie zuverlässig detektiert werden [38]. Dies erfordert jedoch eine fehlerfreie Befüllung möglichst ohne Verschmierungen. Generell lässt sich über eine reproduzierbar hohe Qualität des KFM-Eintrags der Aufwand bei der Nacharbeitung reduzieren, da korrigierenden Maßnahmen wie Spachteln und Schleifen verhindert werden.

2.2.6. Montage

Je nach Unternehmensausrichtung bieten die Original Equipment Manufacturers (OEMs) teils vormontierte Baugruppen oder komplette Kabinenelemente an. Aufgrund der Variantenvielfalt ist eine Automatisierung hier kaum wirtschaftlich zu realisieren. Die bereits mehrfach angesprochene mangelnde Standardisierung bei der Konstruktion von Sandwichpaneelen entspricht keiner modernen Produktentwicklung. Während der automatisierte Kernfüllmasseneintrag einen elementaren und notwendigen Beitrag zur Optimierung der Bauweise liefert, besteht hier weiterhin ein großer konstruktiver Forschungsbedarf. Eine Umsetzung von Konzepten wie modulare Baugruppen und einheitliche Montagepunkten unter Einhaltung der strengen Anforderungen der Luftfahrt sowie Beibehaltung der Individualität sprengt den Rahmen dieser Arbeit und erfordert eine eigenständige Auseinandersetzung.

2.3. Analyse des KFM-Eintrags

Sandwichmaterialien sowie die Herstellung von Sandwichbauteilen liefern ein breites, interdisziplinäres Forschungsfeld. Einige Fragestellungen sind in der Literatur jedoch unterrepräsentiert. So etwa beim Prozess des KFM-Eintrags, bei dem es bereits an einer fachlich präzisen Beschreibung mangelt. Die weitere, zielgerichtete Recherche erfordert somit eine vorgezogene, grobe Prozessanalyse.

Dafür wird zunächst in Abschnitt 2.3.1 das technische Grundkonzept zur automatisierten Befüllung beschrieben. Der zur groben Analyse entwickelte Versuchsaufbau wird in 2.3.2 vorgestellt. Bei der praktischen Umsetzung sind eine Reihe an qualitativen Anforderungen möglichst optimal einzuhalten. Diese Anforderungen werden in Abschnitt 2.3.3 analysiert und qualitativen, zu optimierenden Zielgrößen zugeordnet. In 2.3.4 wird geprüft, inwiefern verfügbare Anlagen diese Anforderungen erfüllen und wo die wesentlichen Defizite liegen. Darauf basierend werden in Abschnitt 2.3.5 die technischen Schwerpunkte zur Optimierung der formulierten Zielgrößen herausgearbeitet.

2.3.1. Prozessbeschreibung der automatisierten Befüllung

Beim KFM-Eintrag sollen spezifizierete Bereiche des Wabenkerns mit Kernfüllmasse ausgefüllt werden. Hierfür gibt es auf technischer Ebene einen großen Lösungsraum. Eine entsprechende Aufstellung ist in Form eines morphologischen Kastens erarbeitet worden. Besonders vielversprechend zur Automatisierung ist dabei das im händischen Prozess eingesetzte Befüllprinzip. Abstrahiert und funktional beschrieben handelt es sich um eine Dosierung über die Oberseite der Kernschicht bei bereits gelegter unterer Decklage. Eine Anpassung der vor- und nachgelagerten Prozessschritte ist nicht notwendig. Die Befüllung während des Legeprozesses vereinfacht die Handhabung und ist grundsätzlich zur Herstellung gekrümmter Paneele geeignet. Dieses Verfahren hat sich auch bei den industriell verfügbaren Anlagen durchgesetzt.

In Abb. 2.13 auf der nächsten Seite ist das im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Befüllkonzept mit den relevanten Komponenten schematisch dargestellt, ohne eine konkrete technische Umsetzung festzulegen. Die Kernfüllmasse (1) wird über eine Düse (2) in die Wabenzellen der Kernschicht (3) eingebracht. Der Kern liegt dabei auf der unteren Decklage (4, bestehend aus mindestens einer Prepreg-Schicht), die wiederum einen durchgängigen Kontakt zum starren Werkstückträger (5) hat. Beim KFM-Eintrag kann unter theoretischer Betrachtung von drei Phasen im Prozess ausgegangen werden:

1. *Befüllungsphase*: Zunächst wird das Material in die leere Zelle gefördert und die Luft über die Unterseite herausgedrückt. Solange die Oberseite der befüllten Zelle noch von der Düse abgedeckt ist, kann durch nachpressendes Material der Druck weiter erhöht werden.
2. *Haltephase*: Abhängig von Düsenkonstruktion sowie Prozesssteuerung ergibt sich ein Zeitfenster, in dem kein neues Material nachfließen und keines entweichen kann, der aufgebaute Druck also gehalten wird.
3. *Druckausgleichsphase*: Nach Entfernen der Düse gleicht sich der Druck in der Zelle wieder mit der Umgebung aus. Durch Elastizität sowie Trägheit kann Material in dieser Phase je nach Geometrie und Bewegung der Düse auch an der Oberseite wieder austreten.

Bei der näheren Beschreibung des Prozesses wird im weiteren Verlauf der Arbeit zwischen Prozessgrößen, Parametern und Einflussgrößen unterschieden. Die automatisierte Durchführung des Befüllprozesses findet über die gezielte Steuerung der *Prozessgrößen* statt. Diese beinhalten beispielsweise die Pose der Düse und deren zeitlichen Ableitungen sowie Dosierdruck und Fördervolumen. Als *Parameter* gelten von der Prozessplanung festgelegte Rahmenbedingungen,

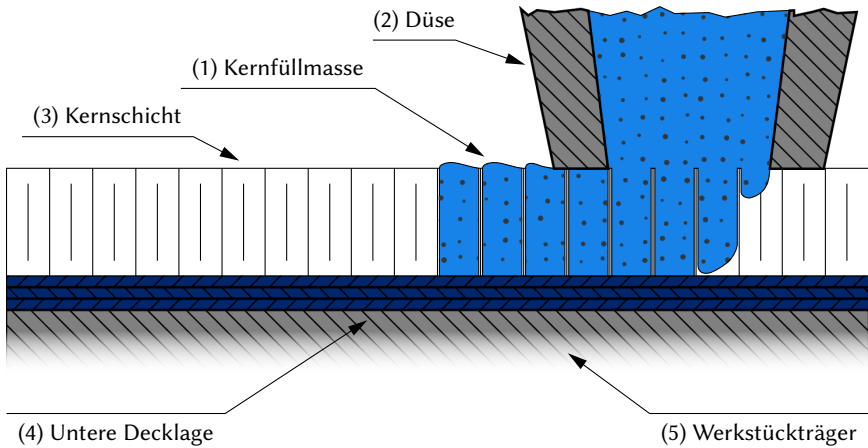


Abb. 2.13.: Schematische Darstellung des betrachteten Befüllprozesses und der relevanten Komponenten

wie etwa die Wahl der Komponenten oder eingestellte Reglerkennwerte. Die Gesamtheit der Parameter definiert das *Befüllszenario*, das über die Prozessdauer als konstant angesehen werden kann. Die Eigenschaften beziehungsweise Wirkungen der Rahmenbedingungen auf den realen Prozess sind jedoch nicht zwangsweise als starr anzusehen: Je nach Parameter können verschiedene *Einflussgrößen* zu einer Abweichung der Spezifikation führen. Ein Beispiel dafür ist etwa die Klebrigkeit des Prepregs, die nach einem bestimmten Tack-Wert von der Prozessplanung ausgewählt wird (vgl. Abschnitt 2.1.1, S. 8), jedoch unter den Umgebungsbedingungen Temperatur und Luftfeuchte variieren kann. Die Einflussgrößen sind nur partiell steuer- (z. B. Umgebungstemperatur) oder kontrollierbar (z. B. Fertigungstoleranzen). Komplexere Zusammenhänge, wie der Einfluss der Belastungshistorie auf die Fließigenschaften der Kernfüllmasse (vgl. Abschnitt 2.4.4), können meist nur in der theoretischen Betrachtung berücksichtigt werden.

2.3.2. Konzeptionelle Voruntersuchungen

Die interdisziplinäre Komplexität der KFM-Befüllung und ihrer einzigartigen Materialkombination erschwert die frühzeitige Identifikation von Herausforderungen und Forschungsschwerpunkten. Aus diesem Grund wurde ein Versuchstand mit minimalem Funktionsumfang entwickelt. Hiermit können Konzepte bereits im frühen Stadium einer ersten Validierung unterzogen werden. Der Ver-

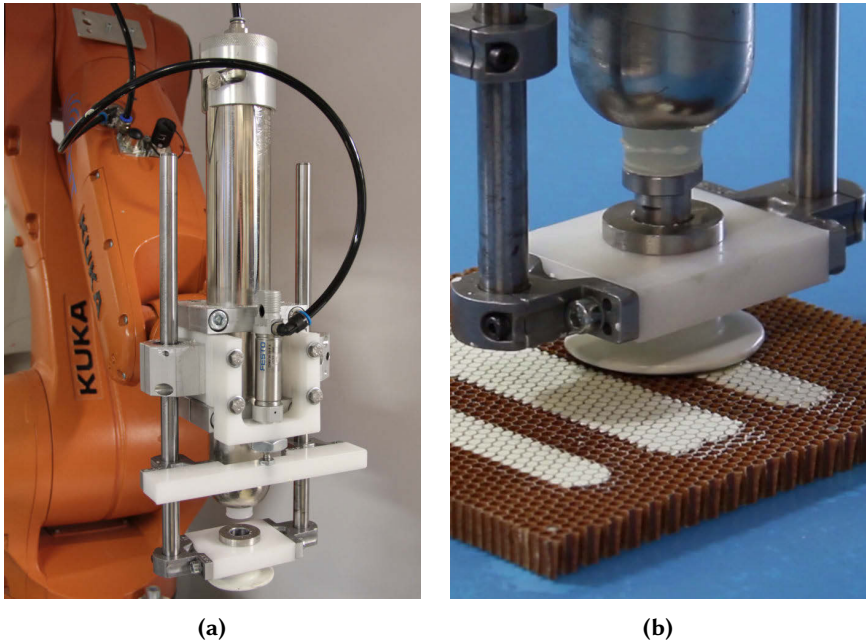


Abb. 2.14.: Aufbau für konzeptionelle Vorversuche; (a) KUKA KR6 mit Dosierwerkzeug, (b) experimentelle Befüllung

suchsstand besteht aus einem KUKA KR6 mit pneumatisch entleerter 910 ml Kartusche. Hiermit wurde beispielsweise frühzeitig die Anfälligkeit des Prozesses gegenüber der Positioniergenauigkeit in Normalenrichtung des Wabenkerns festgestellt. Der um eine entsprechende Ausgleichsaktorik erweiterte Versuchsstand ist in Abb. 2.14 dargestellt.

2.3.3. Kernanforderungen an den Befüllprozess

Auf höchster Abstraktionsebene lassen sich drei globale Anforderungen an den KFM-Eintrag ableiten. Sie gelten sowohl für den manuellen wie den automatisierten Prozess. Die Forderungen sind qualitativer Natur, sodass deren Optimierung die entsprechenden Zielgrößen der automatisierten Befüllung darstellen. Die Optimierung der Wirtschaftlichkeit als allgemeingültige Anforderung an nahezu jedes technische System ist selbstverständlich und wird im Folgenden nicht weiter konkret betrachtet. Hier hat sich zudem auch mit bereits verfügbaren An-

lagen gezeigt, dass der ökonomische Vorteil allein durch die Automatisierung der Befüllung sehr hoch ist.

Alle Waben in einem spezifizierten Bereich sind vollständig und ohne Lufteinschlüsse zu befüllen. Als besonderes Qualitätsmerkmal gilt ein „binäres“ Befüllergebnis, bei dem auch im Randbereich die Waben entweder vollständig oder gar nicht befüllt sind. Diese Forderung geht aus den Zielen der Verlust- und Toleranzminimierung hervor. Zur Vermeidung von Materialverlusten sind Rückstände jeglicher Art zu minimieren. Diese treten insbesondere bei fehlerhafter Dosierung auf, welche ein nachträgliches Abziehen des oberflächlich überschüssigen Materials erfordern. All diese Anforderungen lassen sich unter dem Stichpunkt der *qualitativ hochwertigen Befüllung* zusammenfassen. Wird im Folgenden von einer hohen (Prozess-)Qualität gesprochen, sind damit diese Aspekte gemeint.

In den vorangegangenen Abschnitten wurde bereits die Vielfältigkeit der Komponenten, Eigenschaften und gegenseitigen Beeinflussungen des Fertigungsprozesses verdeutlicht. Zum Teil sind die verschiedenen Faktoren kaum zu erfassen und deren Folgen für den Prozess schwer vorherzusagen. Sie variieren nicht nur im Ursprung und Einfluss, sondern auch in der Auftrettsfrequenz und Wirkungsdauer. Somit ist eine besondere Herausforderung die Einhaltung hoher Qualitätsstandards über viele Produktionszyklen hinweg. Das Verfahren muss entsprechend eine hohe *Robustheit* gegenüber Störgrößen aufweisen. Im Verlauf der Arbeit werden ebenfalls die Forderungen an eine hohe Prozessstabilität und Wiederholbarkeit mit dem Begriff der Robustheit adressiert.

Die hohe Vielfalt der konstruktiven Merkmale sowie der Produktionsprozesse bei gleichzeitig geringen Losgrößen stellt die Automatisierung vor große Herausforderungen. Eine Entspannung dieser Problematik ist aufgrund der aktuellen Marktentwicklung und dem steigenden Wunsch nach Individualisierung der Kabine nicht zu erwarten. Somit ist auch bei einer automatisierten Befüllung eine hohe *Flexibilität* gefordert. Dies beinhaltet insbesondere einen minimalen Aufwand bei der Einrichtung erforderlicher Programme für ein neues Bauteil. Prozessparameter sollten entweder über ein maximales Bauteilspektrum gültig sein oder automatisiert adaptiert werden.

2.3.4. Defizite bisheriger Lösungen

Aufgrund mangelnder Veröffentlichungen sind verfügbare Lösungen lediglich anhand von Pressetexten, Messeauftritten und industriellen Einblicken zu bewerten. Hier haben sich jedoch bereits in allen drei Aspekten Mängel gezeigt. Hinsichtlich der Qualität zeigt sich etwa Optimierungspotenzial bei oberflächlichen Rückständen und der binären Befüllung im Randbereich. Die unsaubereren Befüllkanten erschweren etwa die automatische Detektion der Kernfüllmasse mit Methoden

der Bildverarbeitung. Diese ist wiederum ein wichtiges Werkzeug zur Bauteilreferenzierung in der weiteren Fertigungskette. Die Robustheit verfügbarer Anlagen ist schwer zu beurteilen, jedoch auf konzeptioneller Basis als gering einzuschätzen. Insbesondere der gängige Ansatz der Steuerung der Dosierleistung über den Vorschub wurde in Vorversuchen als stark fehleranfällig identifiziert. Dieses Steuerungskonzept erfordert weiterhin einen hohen Einrichtungsaufwand und schränkt somit ebenfalls die Flexibilität ein. Aus den Produktpräsentationen kann auch geschlossen werden, dass die angebotenen Pfadplanungen mittels CAD Daten nur suboptimale Ergebnisse liefern. Die zulässigen Geometrien der Befüllbereiche sind entweder auf Primitive (Rechtecke, Kreise) eingeschränkt, oder erfordern häufige Umsetz- und Überschleifbewegungen. Hierbei treten vermehrt Verschmierungen und Materialrückstände auf, was sich negativ auf die Qualität auswirkt.

2.3.5. Technische Schwerpunkte beim optimierten, automatisierten KFM-Eintrag

Basierend auf der bisherigen Analyse können an dieser Stelle bereits Ansätze und Schwerpunkte für einen optimierten, automatisierten KFM-Eintrag abgeleitet werden. Wie in Abschnitt 2.3.3 dargestellt, ist die wesentliche Aufgabe die Optimierung der drei Zielgrößen *Qualität*, *Robustheit* und *Flexibilität*. Aus der Betrachtung der Mängel verfügbarer Anlagen können die Zielgrößen an drei individuelle Subsysteme gekoppelt werden, welche jeweils größtmöglichen Einfluss aufweisen: das Dosierwerkzeug, die Dosierregelung sowie die Pfadplanung. Die Umsetzung eines optimierten, automatisierten KFM-Eintrags erfordert somit die Setzung der Schwerpunkte bei diesen drei Subsystemen.

Das Dosierwerkzeug ist die Schnittstelle zwischen Prozess und Werkstück und hat den voraussichtlich stärksten Einfluss auf die *Qualität*. Mit dem Düsenquerschnitt kann die Materialströmung beeinflusst werden, um etwa eine gleichmäßige Befüllung im Randbereich zu erzielen. In den Vorversuchen hat sich auch gezeigt, dass die Positionierung relativ zur Bauteiloberfläche das Auftreten und das Ausmaß von Rückständen und Verschmierungen bestimmt.

Die Robustheit des automatisierten KFM-Eintrags ist in erheblichem Maße an die Regelung der Förderleistung gekoppelt. Die kontinuierliche Befüllung diskreter Kavitäten ist ein prozesstechnisches Alleinstellungsmerkmal. Dabei ist der erforderliche Volumenstrom nicht nur abhängig vom Vorschub des Dosierwerkzeugs, sondern auch von dessen relativen Lage sowie dem Zustand der einzelnen Wabenzellen. Die Problematik wird weiter durch die bei größeren Befüllbereichen unvermeidliche Überlappung von Dosierpfaden verschärft.

Ein wesentliches Hindernis bei der Einführung einer Automatisierung ist der Aufwand zur Erstellung der Bearbeitungsprogramme. Aus diesem Grund wird die Automatisierung vorwiegend bei stark standardisierten, repetitiven Abläufen (etwa in der Serienfertigung) eingesetzt. Ein Fokus in aktueller Forschung liegt entsprechend auf der Reduktion des Programmieraufwandes. Bei Bearbeitungsprozessen wie dem KFM-Eintrag bedeutet dies eine möglichst automatische Generierung von Bearbeitungspfaden und -parametern.

2.4. Wissenschaftliche Ergebnisse mit Bezug zum KFM-Eintrag

Aus den vorangegangenen Abschnitten lässt sich folgern, dass der KFM-Eintrag ein äußerst komplexer Prozess ist. Eine holistische Analyse und Modellbildung ist in der Literatur nicht zu finden. Die identifizierten Defizite bestehender Anlagen zeigen die Folgen der mangelhaften wissenschaftlichen Auseinandersetzung. Dem gegenüber soll die im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde automatisierte Befüllung auf einem fundierten Prozessverständnis aufbauen.

In den folgenden Abschnitten werden wissenschaftliche Arbeiten diskutiert, welche einen Bezug zum KFM-Eintrag aufweisen. Diese lassen sich grob in den Kontext der Entwicklung eines Prozessverständnisses sowie der technischen Umsetzung der relevanten Subsysteme unterteilen.

Prozessverständnis Bei der Modellierung des KFM-Eintrags existiert eine Vielzahl offener Fragen. Von offensichtlicher Relevanz ist die Untersuchung des Luftstroms zur Vermeidung von Lufteinschlüssen sowie des Materialverhaltens der KFM zur materialgerechten Dosierung. Das Auftreten von Lufteinschlüssen sowie dessen Detektion ist zunächst in Abschnitt 2.4.1 beschrieben. Maßgeblich zur Vermeidung ist der Luftstrom an der Waben-Prepreg-Grenzschicht. Gezielte Untersuchungen hierzu sind aktuell nicht existent. Dafür ist das Thema der Durchströmung von Prepregs in der wissenschaftlichen Literatur bereits ausführlich behandelt. In Abschnitt 2.4.2 werden die aktuellen Erkenntnisse präsentiert. Dabei ist zu klären, inwiefern die Ergebnisse auf den Befüllprozess übertragbar sind oder welcher experimentellen Analysen noch durchzuführen sind.

Bei den in der Luftfahrt verwendeten Kernfüllmassen handelt es sich um sogenannte syntaktische Schäume. Dessen Eigenschaften werden in Abschnitt 2.4.3 näher erläutert. Die Rheologie der Materialien wird herstellerseitig nicht weiter spezifiziert. Scheinbar grundlegende Kennwerte wie Viskosität werden aufgrund des komplexen Materialverhaltens nicht angegeben. Stattdessen werden bestenfalls Mindestwerte für praktische Hilfsgrößen, wie etwa eine *Extrusionsrate*, ga-

rantiert. Zum besseren Verständnis des Strömungsverhaltens werden deshalb in Abschnitt 2.4.4 die theoretischen Grundlagen zur Rheologie von syntaktischen Schäumen vorgestellt.

In der Literatur werden nicht nur verschiedene mathematische Modelle diskutiert, sondern auch unterschiedliche Verfahren zur experimentellen Bestimmung der Kennwerte. In Abschnitt 2.4.5 werden entsprechend Methoden der Rheometrie gesucht, welche sich zur gezielten Analyse der KFM eignen.

Technische Umsetzung Üblicherweise erfordert eine gezielte Recherche zu technischen Lösungsmöglichkeiten die präzise Beschreibung des Problems. Mit der bereits durchgeführten groben Analyse wurden in Abschnitt 2.3.5 dafür drei Subsysteme identifiziert, welche eine starke Kopplung an die Optimierungsgrößen aufweisen.

Das Dosierwerkzeug und die damit zusammenhängende Gesamtanlage sind sehr umfassend und aufgabenspezifisch. Entsprechend sind keine analogen Systeme bekannt, welche zur Lösungsfindung recherchiert werden können. Die Dosierregelung sowie die Programmgenerierung sind hingegen in der Aufgabe weiter eingegrenzt. Entsprechend wird in den Abschnitten 2.4.6 und 2.4.7 für jedes dieser Subsysteme die Literatur nach Anwendungen mit analogen Anforderungen sondiert. Hieraus können bereits konkretisierte Lösungsansätze abgeleitet werden.

2.4.1. Auftreten und Detektieren von Lufteinschlüssen

Eine Kernanforderung an den KFM-Eintrag ist die vollständige Befüllung der Wabenzellen ohne Lufteinschlüsse. Mangels geeigneter Prüfmethode ist die Anforderung jedoch rein qualitativ. Zur Kontrolle im händischen Prozess wird mit einem Spachtel das Material beim Abziehen in die Waben gepresst. Ist die Oberfläche plan oder sogar bei einzelnen Zellen konkav, liegt gegebenenfalls keine ausreichende Befüllung vor. Tritt hingegen etwas Material wieder aus den Zellen aus (konvexe Oberfläche im Bereich einzelner Waben), wird von einer vollständigen Befüllung ausgegangen. In Abb. 2.15 auf der nächsten Seite ist die manuelle Prüfung mit den möglichen Ergebnissen dargestellt. Visuell unterscheiden diese sich teils nur um Nuancen. Die explizite Bewertung unterliegt somit dem Erfahrungsschatz des inspizierenden Personals und deren subjektiven Einschätzung.

Quantitative Messmethoden zur Detektion der Fehlstellen sind in der Literatur nicht vorhanden. In der manuellen Fertigung wird eine optische Qualitätskontrolle durchgeführt, welche grundsätzlich auch automatisierbar ist: Einschlüsse nahe einer Deckschicht, wie sie etwa bei verindertem Luftstrom auftreten, sind dank der leichten Transluzenz von GFK sichtbar. Lufteinschlüsse innerhalb des

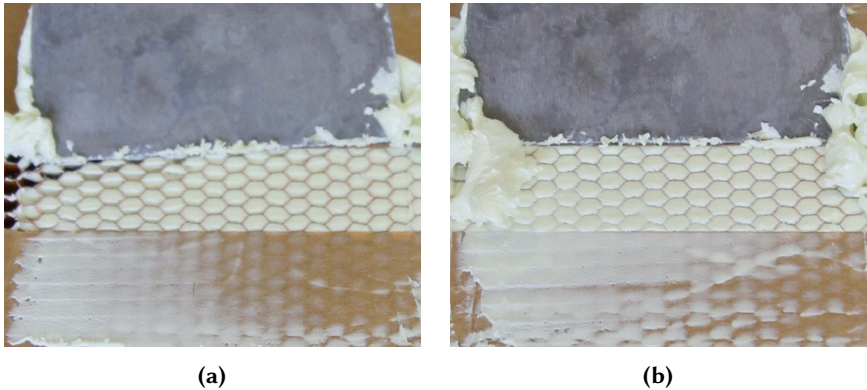


Abb. 2.15.: Optische Qualitätskontrolle bei der manuellen Befüllung; (a) plane oder gar konkave Oberfläche im Bereich einzelner Zellen: unzureichende Befüllung, (b) leichte Wölbungen: vollständige Befüllung

Materials können lediglich durch Freischnitt, beispielsweise im Bereich eines Randabschlusses, erkannt werden. Als zerstörungsfreie Messmethode eignet sich eine Ultraschalluntersuchung, womit auch automatisiert und bei blickdichten Decklagen Fehlstellen festgestellt werden können. Die genannten Verfahren sind jedoch meist erst nach dem Pressvorgang möglich, da das Sandwich aus der Werkzeugform entnommen werden muss. Zuverlässige, automatisierbare Verfahren für eine in-situ Qualitätskontrolle sind nicht bekannt. Nach dem Aushärten verursachen Fehlstellen einen hohen Aufwand zur Nachbearbeitung oder führen zum Ausschuss.

Zu den Ursachen von Lufteinschlüssen liegen keine wissenschaftlich fundierten Erkenntnisse vor. Die Wabenwände können als impermeabel angenommen werden [6] und die (auch im Verhältnis zum Prepreg-Harz) hohe Viskosität der KFM verhindert eine gegenläufige Strömung. Der Prozessaufbau legt somit nahe, dass während des Befüllens in der Zelle enthaltene Luft entweder durch die Kontaktstelle Wabe-Prepreg oder durch das Prepreg selber entweicht. Zum besseren Verständnis des Phänomens müssen somit die Grenzschicht und die Luftdurchlässigkeit von Prepregs näher untersucht werden.

2.4.2. Prozessbedingte Luftströme durch Sandwichmaterialien

Die Unterseite der Kernschicht ist in Kontakt mit einer Prepreg-Decklage. Die Zellwände der Nomex-Waben können aufgrund der Phenolharzbeschichtung im Rahmen des KFM-Eintrags als impermeabel angenommen werden [6]. Der Kontakt zwischen Prepreg und Wabenzellen verhindert ein Durchströmen der Kernfüllmasse. Diese Grenzschicht stellt zudem einen zustandsgrößenabhängigen Strömungswiderstand für die entweichende Luft dar. Ein Ziel der Prozesssteuerung ist es, diesen Widerstand auf ein zu vernachlässigendes Niveau einzustellen. Es ist keine Literatur zur Beschreibung des Luftstromverhaltens durch die Waben-Prepreg-Grenzschicht bekannt, die auf den Prozess des KFM-Eintrags direkt übertragbar ist.

Einige Autoren [14, 44, 71] haben sich mit der Untersuchung des Luftstroms bei der Evakuierung von OOA-Prepregs befasst. Diese Materialien weisen unimprägnierte Bereiche auf, sogenannte Engineered Vacuum Channels (EVaCs). Zur Modellierung kann somit das Gesetz nach Darcy genutzt werden, das den Strom von Fluiden durch poröse Materialien beschreibt. Eine wesentliche Erkenntnis der Arbeiten ist die starke Abhängigkeit von Umgebungs- und Prozesseinflüssen wie Druck, Temperatur, Gewebearart, Harztyp und -verteilung. Die generelle Unterscheidung zwischen Strömen „in-plane“ und „through-plane“ mit entsprechend richtungsabhängigen Permeabilitätskoeffizienten sollte auf klassische, vollimprägnierte Prepregs übertragbar sein. Auch hier sorgt die Faserausrichtung für eine ausgeprägte Anisotropie.

Ein Luftstrom durch das Prepreg beim KFM-Eintrag müsste zunächst in das Material eindringen (*through-plane*), unterhalb der Zellwand verlaufen (*in-plane*) und in der benachbarten, freien Wabe wieder entweichen (*through-plane*). In einer exemplarischen Anwendung mit einem Förderstrom von $Q_F \approx 300 \text{ ml min}^{-1}$ bei einem Druck $p_F \approx 2 \text{ bar}$, einer 3,2 mm hexagonalen Wabe und einer kreisförmigen Düse mit $D_D = 8 \text{ mm}$ wäre eine Permeabilität von $K > 10^{-14} \text{ m}^2$ erforderlich (vgl. Anhang A.1, S. 189). Eine solch hohe Permeabilität ist in der Literatur nicht gänzlich unrealistisch, wird jedoch lediglich unter Einsatz mehrerer Lagen OOA-Prepregs erreicht. Somit ist anzunehmen, dass der relevante Teil des Luftstroms durch die Kontaktstelle verläuft. Aus theoretischer Betrachtung sind als wesentliche materielle Einflussgrößen die Maßhaltigkeit und Rauigkeit der Schnittkanten der Kernschicht, sowie die Oberflächenstruktur und der Tack des Prepregs zu nennen.

Bei den exemplarischen Mikroskopaufnahmen der Schnittseiten von verschiedenen Nomex-Waben in Abb. 2.16 auf der nächsten Seite sind freien Fasern und Unregelmäßigkeiten erkennbar. Es ist offensichtlich, dass eine glatte Schnittkante

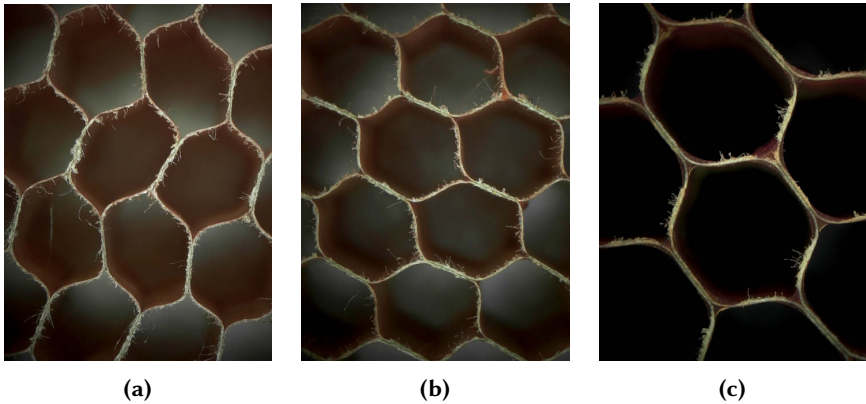


Abb. 2.16.: Mikroskopaufnahme der Schnittfläche mit erkennbaren losen Fasern bei Wabenkernen verschiedenen Typs; (a) A1: 3,6 mm, niedrige Steifigkeit, (b) A4: 3,6 mm, mittlere Steifigkeit, (c) C4: 4,8 mm, hohe Steifigkeit

in der Praxis unrealistisch ist. Ein grober Schnitt könnte vorteilhaft für einen Luftstrom sein, da so auch die Porosität an der Kontaktstelle erhöht wird. Dabei sind Unterschiede bei den Wabentypen zu berücksichtigen. So nimmt die Rauigkeit mit zunehmender Steifigkeit der Wabe ab.

Ein ähnlicher Einfluss auf die Luftdurchlässigkeit der Kontaktlinie könnte von der Rauigkeit gewebter Prepregs ausgehen. Hamill et al. [44] berichten von Höhenunterschieden zwischen Kett- und Schussfäden bei einer Atlasbindung von 100 – 200 μm . Die gemittelte Rauigkeit liegt mit 58,6 μm deutlich über den gemessenen 12,7 μm des im Vergleich verwendeten unidirektionalen Materials.

Insbesondere aus praktischen Erfahrungen ist bekannt, dass der Prepreg-Tack den größten Einfluss auf den Luftstrom hat. Budelmann et al. [11] geben einen umfangreichen Überblick über Forschungsergebnisse zur Beeinflussung, Bedeutung und Messung der Klebrigkeit im Kontext des automatisierten Legeprozesses. Hierbei zeigt sich die Komplexität des Phänomens durch die multidimensionalen, nichtlinearen Abhängigkeiten. Zudem sind trotz des steigenden Bedarfs einer quantitativen Beschreibung weiterhin keine standardisierten Messverfahren verfügbar. In der betrachteten Literatur wurden häufig aus der Fertigung von Haftklebern bekannte Messverfahren adaptiert. Eine Besonderheit stellt das in [18] vorgestellte hybride Verfahren dar, bei dem die Klebrigkeitsmessung identisch zum ATL durchgeführt wird. Solche anwendungsnahen Messungen sind insbesondere beim Tack sinnvoll, schließlich ist dessen Definition immer anwendungs-

spezifisch zu verstehen [96]. In der Literatur wird dabei die Klebrigkeit nahezu ausschließlich im Kontext des Legeprozesses ohne Wabenkern betrachtet. Wie bereits in Abschnitt 2.1.1 auf Seite 8 erwähnt, muss der Tack in manueller Handhabung zwei Anforderungen erfüllen: Zum einen sollte er niedrig genug sein, um Decklagen trennen und Fehler in der Positionierung ausgleichen zu können. Zum anderen muss er ausreichend hoch sein, damit sich die Lagen nicht unbeabsichtigt gegeneinander oder gegenüber dem Werkstückträger verschieben.

Das Verkleben von Prepreg an einem Wabenkern wurde bisher nicht näher untersucht. Da prinzipiell ein hoher Tack beim KFM-Eintrag zu vermeiden ist, lassen sich jedoch einige Erkenntnisse übertragen. So nimmt etwa insbesondere durch Feuchtigkeitsadsorption die Klebrigkeit zu [1]. Die Alterung (voranschreitende Aushärtereaktion) führt zur Abnahme des Tack und lässt sich durch tiefgekühlte Lagerung zwar stark verlangsamen, jedoch nicht vollständig verhindern [1, 39]. Oberflächliche Harzansammlungen, hervorgerufen durch raue Strukturen gewebter Prepregs oder geringere Imprägnierung, haben einen besonders großen Einfluss auf die Klebrigkeit [25, 44, 84]. Bei solch vielfältigen Abhängigkeiten ist es wenig verwunderlich, dass der Tack bereits innerhalb einer Charge starken lokalen Schwankungen unterliegt [18].

2.4.3. Eigenschaften syntaktischer Schäume

Den vermutlich größten Beitrag zur Komplexität des Prozesses liefern die Materialeigenschaften der unausgehärteten Kernfüllmasse. Hierbei handelt es sich üblicherweise um einkomponentige Epoxidharze, die mit Hohlkugeln im Durchmesser von 10 – 150 μm aus Silica-Glas angereichert sind [105]. Epoxid wird insbesondere aufgrund der guten mechanischen Eigenschaften gewählt [109]. Auch Glashohlkugeln sind in dieser Hinsicht vorteilhaft, zudem sind sie kostengünstig und haben gute Benetzungseigenschaften in Kombination mit Epoxid [105, 109].

Materialien mit beigemischten Hohlkugeln werden in der Literatur als syntaktische Schäume bezeichnet. Die gegenüber klassischen Schäumen geschlossenen Poren bringen dabei eine Reihe von Vorteilen, etwa eine geringere Feuchtigkeitsadsorption und höhere mechanische Belastbarkeit [95, 105]. Bei syntaktischen Schäumen handelt es sich durch die Kombination verschiedener Materialkomponenten um Komposite. Deren Eigenschaften können den Anforderungen entsprechend gezielt angepasst werden [68]. Dadurch hat sich das Anwendungsspektrum vom ursprünglichen Einsatz bei Auftriebskörpern in der Marinetechnik stark erweitert [41].

In der Flugzeugfertigung ist das Leichtbaupotenzial von besonderem Interesse, weshalb hier mit sehr hohen Anteilen an Hohlkugeln gearbeitet wird. Der pro-

zentuale Volumenanteil ϕ gibt das Verhältnis vom Volumen V_{HK} der Hohlkugeln zum Gesamtvolumen V_{ges} an:

$$\phi = \frac{V_{HK}}{V_{ges}}. \quad (2.1)$$

Oberhalb des praktisch maximalen Anteils von $\phi \approx 64\%$ ist keine vollständige Benetzung der Glaskugeln mehr möglich. Es entstehen dreiphasige Schäume mit Lufteinschlüssen, wodurch die Dichte zwar weiter reduziert werden kann, die mechanische Belastbarkeit aber stark nachlässt [40]. Dando et al. [19] berichten von zweiphasigen Schäumen mit Volumenanteilen bis $\phi = 95\%$ unter Einsatz von Thermoplast-Hohlkugeln, die sich beim Aushärten ausdehnen und das Volumen entsprechend ausfüllen. Solche Formulierungen sind mit einem großen Stauchungsvermögen bei geringer Festigkeit jedoch eher für Spezialanwendungen geeignet. Während die Werte zwischen den Herstellern variieren können und üblicherweise nicht preisgegeben werden, ist bei KFM mit hohen Packungsdichten von $\phi \approx 40 - 60\%$ zu rechnen. In diesem Bereich werden gute spezifische mechanische Eigenschaften erzielt und eine Herstellung sowie Verarbeitung ist noch ohne übermäßige Zugabe von Lösungsmitteln möglich [109].

Bereits ein geringer Anteil an Hohlkugeln in einem nicht ausgehärteten Polymer führt zu ausgeprägtem nicht-newtonschen Fließverhalten [105]. Die KFM besitzt aufgrund des hohen Volumenanteils eine Reihe komplexer Fließeigenschaften. Die resultierende hohe Viskosität ist im manuellen Prozess erwünscht. So kann das Material per Hand dem Gebinde entnommen werden und mit einem Spachtel oder dem Handballen in die Waben gedrückt werden. Bei der Automatisierung hingegen erschweren hochviskose, nicht-newtonsche Fluide eine präzise Dosierung. Die konkreten Phänomene und die Möglichkeiten zur Modellierung gilt es dabei jeweils zu prüfen. In Abschnitt 2.4.4 werden dazu die Rheologie (auch Fließkunde) und Rheometrie von syntaktischen Schäumen näher analysiert.

2.4.4. Rheologie

Nach Coussot [17] handelt es sich bei syntaktischen Schäumen um granuläre Pasten, deren Strömungsverhalten im Folgenden erläutert werden soll. Durch hydrodynamische Effekte wird bei kleinem ϕ zusätzliche Energie während des Fließens dissipiert, was im Verbund als erhöhte Viskosität wahrgenommen werden kann. Mit steigendem Festkörperanteil sinkt der Abstand der Partikel zueinander. Die hierdurch hervorgerufenen Wechselwirkungen führen schließlich zum nichtlinearen Verhalten. Wie in Abb. 2.17 auf der nächsten Seite schematisch dargestellt, ordnen sich die Partikel energetisch optimal in sogenannten Potenzialtöpfen an. Reicht die unter geringer Belastung eingebrachte Energie nicht aus, die Partikel

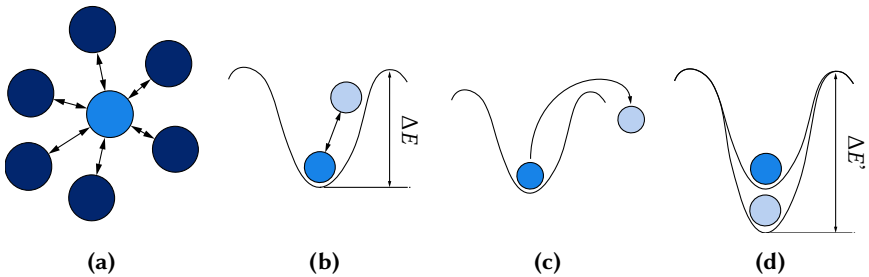


Abb. 2.17.: Potenzialtöpfe durch Festkörperinteraktion bei granulären Pasten und resultierende rheologische Charakteristika [17]; (a) energetisch optimale Ruhelage, (b) viskoelastischer Festkörper, (c) Fluid, (d) Thixotropie

aus den Potenzialtöpfen zu heben, verhält sich das Material ähnlich wie ein elastischer Festkörper. Es sind geringe Verformungen möglich, die mikroskopische Struktur bleibt jedoch grundsätzlich erhalten. Dieses Verhalten wird auch als viskoelastisch bezeichnet. Steigt die Belastung über die Fließspannung τ_c , wird die Struktur aufgebrochen. Das Material kann als hochviskoses Fluid fließen, bis es sich im anschließenden Ruhezustand erneut in einem energetischen Optimum anordnet. Ein weiterer Effekt, der bei pastösen Fluiden häufig auftritt, ist die Thixotropie. Sie beschreibt die zunehmende und reversible Abnahme der Viskosität bei anhaltender Scherung durch De- beziehungsweise Restrukturierung des Fluides. Eine stark ausgeprägte Thixotropie (wie etwa im Falle von KFM zu erwarten) erhöht die Komplexität bei der Beschreibung, Messung und Simulation des Fließverhaltens, da stets die Belastungshistorie berücksichtigt werden muss.

Für nicht-newtonsche Fluide existiert eine Vielzahl verschiedener Modelle. In allgemeiner Notation gilt für pastöse Fluide bei einfacher, eindimensionaler und quasi-stationärer Scherung oberhalb der Fließspannung $\tau > \tau_c$:

$$\tau = \tau_c + f(\dot{\gamma}) \quad (2.2)$$

Bei pastösen Fluiden haben sich drei verschiedene Modelle für $f(\dot{\gamma})$ durchgesetzt: [17]

$$f(\dot{\gamma}) = \begin{cases} m\dot{\gamma}^n & \text{Herschel-Bulkley} & (2.3) \\ \mu_B\dot{\gamma} & \text{Bingham} & (2.4) \\ \mu_C\dot{\gamma} + 2\sqrt{\mu_C\tau_c\dot{\gamma}} & \text{Casson} & (2.5) \end{cases}$$

Die allgemeinste Beschreibung des Fließverhaltens liefert das Herschel-Bulkley-Modell 2.3. Eine linearisierte Beschreibung nach Bingham 2.4 kann für Fluide

mit geringer Scherverdünnung sowie bei höheren Schergeschwindigkeiten ausreichen. Das Casson-Modell 2.5 ist insbesondere in der Industrie verbreitet, da es einen progressiveren Verlauf als 2.4 beschreibt, jedoch weniger Parameter als 2.3 benötigt. Welches Modell zur Beschreibung der Rheologie eines spezifischen Materials infrage kommt, ist jeweils im Einzelfall zu prüfen. Dabei spielt es auch eine Rolle, welcher Arbeitsbereich abgedeckt werden soll. Eine in der Literatur häufig anzutreffende Vereinfachung ergibt sich auch aus der Vernachlässigung der Fließspannung. Die entsprechende Formulierung $\tau = m\dot{\gamma}^n$ wird als Potenzgesetz (englisch: *power-law*) bezeichnet.

In realer Strömung resultieren die intrinsischen rheologischen Eigenschaften in einer Reihe weiterer, komplexer Phänomene. Für eine vollständige Diskussion möglicher Effekte wird an dieser Stelle auf weiterführende Literatur [15, 17] verwiesen. Im Kontext der KFM-Befüllung zu erwarten sind etwa Geschwindigkeitssprünge beziehungsweise Schlupf an Wänden (die *no slip* Bedingung wird somit nicht erfüllt), lokalisierte Scherung sowie Phasentrennung. Die Effekte sind üblicherweise von den Rahmenbedingungen der Strömung abhängig. Dies erschwert eine allgemeingültige Modellierung und erfordert entsprechende Berücksichtigung bei experimentellen Untersuchungen. Auch hier gilt die spezifische Prüfung des betrachteten Materials. Viele Phänomene können entweder durch Aufteilung der Modellierung in reduzierte Arbeitsbereiche abgebildet werden. Auch Anpassungen der Modelle sind möglich, erhöhen jedoch die Komplexität der numerischen Zustandsberechnung.

2.4.5. Rheometrie

Die experimentelle Bestimmung der Modellparameter im Allgemeinen wird als Rheometrie bezeichnet. In konventionellen Verfahren wird das Fluid in eine einfache, möglichst eindimensionale, stetige Strömung versetzt. Dabei wird entweder die Schergeschwindigkeit oder -spannung gesteuert und die jeweils andere Größe gemessen. Grundsätzlich gibt es verschiedene Versuchsaufbauten, die entsprechend unterschiedliche Strömungsbilder erzeugen und spezifische Vor- und Nachteile aufweisen (vgl. [15]).

Rotierende Viskosimeter haben etwa den Vorteil, dass die Probenmenge das Messvolumen nicht verlässt. Dies vereinfacht insbesondere Langzeitmessungen. Beim Aufbau kann zwischen konzentrischen Zylindern und parallelen Platten unterschieden werden. Erstere stellen die einfachste Möglichkeit dar, eine einfache und kontinuierliche Couette-Strömung aufzubauen. Das Prinzip erfordert jedoch schmale Spaltmaße, was durch die Hohlkugeln der KFM verhindert wird. Auch ist der Einsatz eher auf geringe Viskositäten ausgelegt.

Eine ähnliche Einschränkung ergibt sich bei einer Kegel-Platte-Geometrie. Diese ermöglichen unter entsprechenden Bedingungen (*no slip*, geringer Winkel) eine über den Radius konstante Schergeschwindigkeit. Dies ist bei zeitabhängigem Verhalten (wie Thixotropie) vorteilhaft, da das gesamte Strömungsfeld die gleiche Belastungshistorie erfährt. Die Spalthöhe wird durch die Geometrie vorgeschrieben und liegt meist im Bereich von etwa 50 μm . Gleichzeitig sollte sie mindestens das hundertfache der maximalen Partikelgröße betragen. Bei Glashohlkugeln mit Durchmessern über 10 μm ist dies entsprechend nicht möglich.

Als einzig valider Aufbau der rotierenden Viskosimeter bleibt die Platte-Platte-Geometrie zur Vermessung der KFM. Diese erlaubt höhere Spaltmaße und wird entsprechend nicht durch die Füllstoffe des syntaktischen Schaums behindert. In der Auswertung ist zu beachten, dass die Scherrate über den Radius variiert, was wiederum die Berücksichtigung der Thixotropie erschwert. Der Aufbau bietet demgegenüber einige operative Vorteile. Zum einen erfordert etwa ein Probenwechsel deutlich weniger Aufwand als bei sonstigen rotierenden Viskosimetern. Zum anderen existieren Ansätze zur Bestimmung des Schlupfverhaltens durch Variation der Spaltmaße [114, 115].

Eine Alternative zu rotierenden Versuchsaufbauten stellen die Kapillarviskosimeter dar. Das zu untersuchende Material wird dabei durch ein Rohr mit möglichst großem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis gefördert. Aus dem Zusammenhang von Druckabfall und Volumenstrom können die Modellparameter bestimmt werden. Der Aufbau ist besonders einfach, entsprechend kostengünstig und kann zur kontinuierlichen Qualitätskontrolle teilweise direkt in die Prozesse integriert werden. Die auftretende Rohrströmung ist jedoch inhomogen, da die Schergeschwindigkeit vom Rand in Richtung Mitte abnimmt. Um einige der möglichen Modellfehler vernachlässigen zu können, sollte ein großes Verhältnis der Länge zum Durchmesser von $L/D > 100$ gewählt werden. Aufgrund der hohen praktischen Relevanz des Verfahrens existieren in der Literatur jedoch umfangreiche Methoden zur Berücksichtigung oder Korrektur möglicher Strömungsphänomene [15]. Grundsätzlich erfordert dies umfangreichere Messreihen, was wiederum den Zeitaufwand und Materialbedarf stark erhöht.

Als Vergleichsgröße bei Materialien komplexerer Rheologie wird häufig eine *Extrusionsrate* angegeben [22]. Dieser Wert wird mit Kapillarviskosimetern bei genormten Geometrien und Versuchsabläufen ermittelt [23]. Dabei handelt es sich meist um einfache Kartuschensysteme mit vorgegebener Düsenform. Das Material wird üblicherweise unter konstantem (pneumatischen) Druck extrudiert. Rückschlüsse auf rheologische Kennwerte sind kaum möglich, da Einflüsse etwa der Thixotropie oder des Kartuschenfüllstands nur eingeschränkt berücksichtigt werden.

Besonders präzise Untersuchungen sind mit modernen Verfahren der lokalen Rheometrie möglich. Hierbei wird das tatsächliche Strömungsprofil erfasst. Besonders performant erweist sich dabei die Magnetresonanztomographie [17]. Sowohl der Messaufbau als auch die Auswertung weisen einen erheblich höheren Aufwand gegenüber konventionellen Methoden auf. Dafür können deutlich präzisere Aussagen über das Materialverhalten getroffen werden. Phänomene wie etwa Schlupf, welche andernfalls zusätzliche Messreihen und Kompensationen erfordern, können direkt erfasst werden.

In der Literatur sind bisher kaum Arbeiten zu finden, die sich mit der Untersuchung rheologischer Eigenschaften von Materialien ähnlich der KFM befassen. Ullas et al. [109] untersuchen etwa die Verarbeitungseigenschaften von syntaktischen Schäumen aus Epoxidharz und Glashohlkugeln. Die Autoren variieren dabei den Volumenanteil ϕ und messen den Verlauf der scheinbaren Viskosität in Abhängigkeit ansteigender Temperatur. Im Bereich der für KFM üblichen Volumenanteile ergeben sich bei Raumtemperatur etwa Viskositäten $\mu \approx 10^5 - 10^7$ mPa s. Als Messverfahren kommt dabei eine Platte-Platte-Geometrie mit festem Spaltmaß von 1 mm zum Einsatz. Aus der Veröffentlichung ist nicht ersichtlich, inwiefern eventuelle Effekte des im Verhältnis zum Durchmesser der Hohlkugeln kleinen Spalts berücksichtigt wurden. Auch der mögliche Einfluss beziehungsweise die Korrektur von Schlupf wird nicht diskutiert.

Ähnliche Ergebnisse liefert die Arbeit von Kang et al. [67]. Auch hier wurde eine starke Zunahme der scheinbaren Viskosität mit steigendem Volumenanteil verzeichnet. Es fehlen ebenfalls einige relevante Informationen zum Versuchsablauf beziehungsweise die Berücksichtigung komplexer rheologischer Phänomene. Kritisch ist hierbei insbesondere der Einsatz einer Kegel-Platte-Geometrie, dessen Spaltmaß kaum größer als einige der Glashohlkugeln ist. Insgesamt kann gefolgert werden, dass aus den in der Literatur präsentierten Daten keine allgemeinen Kennwerte für syntaktische Schäume ähnlich der KFM abgeleitet werden können.

2.4.6. Regelung von Fördervolumen

Ein prozesstechnisches Alleinstellungsmerkmal des KFM-Eintrags ist die kontinuierliche Befüllung diskreter Volumina. Diese Besonderheit ist in der Literatur präzedenzlos. Als Alternativen dienen im Rahmen der Recherche Anwendungen, welche sich mit der Dosierung nicht-newtonscher Materialien befassen.

Der Kunststoffspritzguss ist insofern interessant, als dass ähnlich wie beim KFM-Eintrag Luftschlüsse eine kritische Rolle spielen. Thermische Effekte, nicht-newtonsches Verhalten der Polymerschmelze und kurze Zykluszeiten erfordern eine präzise Beherrschung des Dosierprozesses. In Abbildung 2.18 sind die

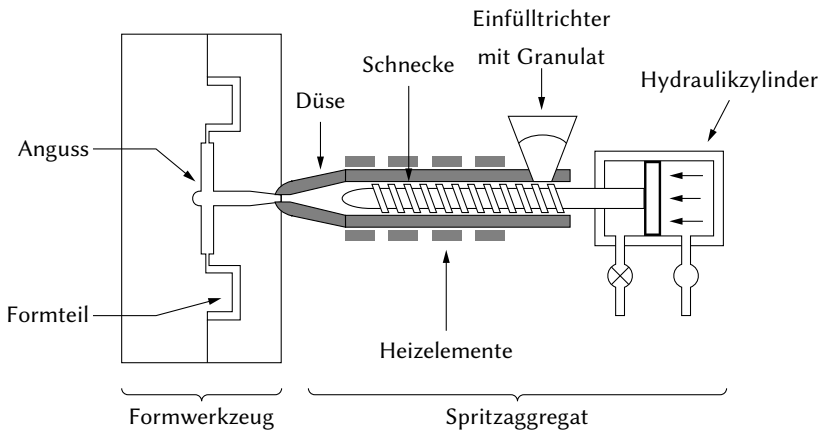


Abb. 2.18.: Schematischer Aufbau des Spritzgussprozesses [118]

Komponenten schematisch dargestellt. Zunächst wird das Thermoplast-Granulat plastifiziert. Dabei rieselt es in die Schnecke, wo es vorrangig durch die Scherkräfte und unterstützend durch Heizelemente aufgeschmolzen wird. Durch den sich aufbauenden Staudruck sowie axiale Kraftkomponenten der Scherung bewegt sich die Schnecke in negativer Hubrichtung. Sobald eine ausreichende Menge Material plastifiziert ist, wird die Schmelze in die Form gespritzt. Über den aktuierten Hub werden dabei hohe Drücke bei konstantem Fördervolumen aufgebaut. Die Luft kann während des Einfüllens grundsätzlich aus der Gussform entweichen. Einschlüsse treten hier vorwiegend durch Strömungseffekte und vorzeitiges Erstarren auf. Nach der Dosierung wird ein Druck aufrecht erhalten, um Schwindung auszugleichen. Noch während des Abkühlens und Erstarrens wird die Düse geschlossen und das Spritzaggregat zurückbewegt, um die nächste Plastifizierung zu starten. [118]

Durch die thermischen Effekte erlangt der Prozess eine hohe Komplexität. Aus Produktivitätsgründen ist ein frühes Abkühlen und Erstarren des Polymers erwünscht, jedoch behindern niedrige Temperaturen das Fließverhalten. Zur Optimierung der Prozesssteuerung wurden deshalb verschiedene Simulationsmodelle entwickelt. Nagy et al. [86] haben beispielsweise ein zwei-Phasen-Fluid-Modell mit polymer-spezifischen Beschreibungen in der Finite-Volumen Simulationsumgebung OpenFOAM implementiert. Hierbei werden Fluidynamik, rheologisches und thermisches Verhalten bei dynamischen Randbedingungen im Prozessverlauf simuliert. Solche Modelle helfen im Prozessverständnis und somit bei einer effizienten Parameterwahl und Werkzeugauslegung.

Ein weiteres Anwendungsfeld der Dosierung hochviskoser, nicht-newtonscher Fluide liegt in der Produktion von Elektronikbauteilen, etwa zum Verguss oder Klebeauftrag [65]. Bei der kontinuierlichen Materialförderung wird zwischen folgenden Prinzipien unterschieden:

- Zeit-Druck-Förderung (englisch: *time-pressure dispensing*): über einen mit Druckluft beaufschlagten Kolben wird das Material aus einer Kartusche oder Spritze gedrückt
- Kolbenförderung (englisch: *true positive displacement*): wie Zeit-Druck-Förderung, jedoch mit mechanischem Hub
- Schneckenförderung (englisch: *auger pump dispensing*): durch eine Schraube wird Scherung eingebracht, sodass über fluiddynamischen Effekte ein Volumenstrom entsteht

Die Zeit-Druck-Förderung weist sehr geringe Werkzeugkosten auf und ist entsprechend weit verbreitet [77, 78]. Gesteuert wird die Dosierung über den Luftdruck und die Druckzeit. Abhängigkeiten bestehen jedoch insbesondere mit dem Füllstand im Reservoir und der Umgebungstemperatur. Aufgrund nicht-newtonscher Eigenschaften kann sich zudem die Fließfähigkeit des Materials während des Prozesses ändern.

In der Literatur wurden verschiedene Ansätze verfolgt, um dennoch eine präzise Dosierung realisieren zu können. Eine direkte Regelung des Volumenstroms ist aufgrund der kurzen Zykluszeiten technisch kaum zu realisieren. Ein gängiger Ansatz (neben rein heuristischen Methoden in der Industrie) ist die Modellierung des Prozesses, um im Vorfeld der Dosierung geeignete Stellgrößen zu bestimmen. Der Prozess selber wird dann ohne direkte Ergebnisrückführung gesteuert. Li et al. [77] schlagen vor, einen äußeren Regelkreis einzusetzen, welcher den Prozess über mehrere Zyklen überwacht und die Stellgrößengenerierung anpasst. So kann auf Fehler durch nicht kontrollierbare Faktoren, unbekannte Dynamiken oder unzulässige Annahmen zeitnah reagiert werden.

Zur Konzeptionierung haben die Autoren einen speziellen, methodischen Ansatz gewählt. Abhängigkeiten konnten damit identifiziert und daraufhin entkoppelte Regelsysteme entwickelt werden, die wiederum mit vereinfachten Modellen arbeiten können. Hieraus folgten zwei Regelkreise, um Temperatur und Dosierdruck während des Prozesses konstant zu halten. Mit dem Einsatz eines Magnetventils am Auslass wird das Material dosiert, ohne den Luftdruck ständig schalten zu müssen.

Analytische Modelle erfordern häufig starke Vereinfachung, beispielsweise durch Annahme newtonschen Verhaltens. Wie in [60, 78] dargestellt, kann dies je nach Szenario zu großen Abweichungen führen. Als Lösungsvorschlag wird

in [78] ein vereinfachtes Modell abgeleitet. Es gilt konkret für die Zeit-Druck-Förderung und kann komplexes rheologisches Verhalten berücksichtigen. Hierbei wird der Volumenstrom durch den Luftdruck in der Kartusche geschätzt. Mit lediglich zwei bis vier Messungen (abhängig vom Fluid-Typ) kann eine präzise-Kalibrierung erzielt werden. Ein äußerer Regelkreis gleicht Fehler durch abnehmenden Füllstand der Kartusche aus. Im integrierenden Anteil wird das bereits dosierte Volumen über das Modell geschätzt und die Stellgröße für den inneren Steuerkreis angepasst.

Selbst unter Verwendung physikalischer Modelle, die das nicht-newtonsche Verhalten berücksichtigen, führen notwendige Vereinfachungen analytischer Modelle zu einem mit der Nichtlinearität zunehmenden Fehler [60]. Effekte wie instationäre Strömung, Druckabfall bei Querschnittsänderung, Schlupf und Thixotropie lassen sich nur in numerischer Berechnung abbilden. Von der präziseren Modellierung mittels Simulation können grundsätzlich alle Dosiersysteme profitieren. So konnte beispielsweise in [81] bei einer Schneckenpumpenförderung durch numerische Zusammenführung der mechanischen und strömungstechnischen Modelle eine präzise Vorhersage des Volumenstroms erzielt werden.

Ein weiterer, noch recht junger Forschungszweig widmet sich dem Einsatz von maschinellem Lernen zur Modellierung des Dosierprozesses. Wie in [80] gezeigt, lassen sich in solch einem Black-Box-Modell auch die auftretenden Nichtlinearitäten abbilden. Bei dieser Methodik wird jedoch besonderes Augenmerk auf das Anlernen der neuronalen Netze gerichtet. Relevante Faktoren (wie etwa Kartuschenfüllstand) sind bei der Konzeptionierung zu identifizieren und messtechnisch zu erfassen.

Die Vielfältigkeit von Prozessgrößen, Parametern und Einflussgrößen beim KFM-Eintrag sowie die Schwierigkeiten bei dessen sensorischer Erfassung sprechen gegen eine Regelung auf Basis maschinellen Lernens. Der zeitliche und monetäre Aufwand zur Schaffung der notwendigen Datenbasis ist schwer abzuschätzen und als inakzeptables Risiko einzuschätzen. Größere Erfolgsaussichten stellen hingegen die modellbasierten Ansätze dar. Ob hierbei eine numerisch umfangreiche Modellierung wie beim Kunststoffspritzguss notwendig beziehungsweise sinnvoll ist oder vereinfachende analytische Darstellungen wie beim Elektronikverguss ausreichende Ergebnisse liefern, lässt sich erst mit einer tiefgehenden Analyse des Strömungsprozesses beurteilen. Eine valide und einfache Alternative stellen klassische PID Regler dar [50, 83]. Sinnvoll ist auch dabei ein modellhaftes Verständnis der Regelstrecke. Die Regelung kann jedoch auch trotz hoher Ungenauigkeiten im Modell äußerst robust ausgelegt werden.

2.4.7. Automatisierte Programmgenerierung

Eine wesentliche Voraussetzung zur ökonomischen Einführung der Automatisierung in der Produktion individueller Güter mit geringer Stückzahl ist die Minimierung des Aufwandes zur Generierung der Bearbeitungsprogramme [70]. Dies ist auch eines der Hindernisse bei der Fertigung von Sandwichelementen im Flugzeuginterieur. Das Problem ist auf Ebene der gesamten Prozesskette sowie der einzelnen Prozessschritte zu lösen. Das bedeutet, dass bei der Konstruktion der Sandwichpaneele alle für die Produktion relevanten Daten in digitaler Form zu erstellen sind. Die durchgängige Bauteilbeschreibung bedarf einer genauen Analyse der gesamten Prozesskette, um alle informationellen Anforderungen berücksichtigen zu können. Eine solche Analyse wurde in der Literatur noch nicht durchgeführt. Einige Anbieter von CAD Software bieten bereits die Möglichkeit, Sandwichstrukturen umfangreicher zu beschreiben, wie etwa mit „CATIA Composites Design“ der Firma Dassault Systems. Anhand zusätzlicher Informationen wie Materialschichten und Faserrichtungen lassen sich Simulationen durchführen und Legepläne für die Fertigung erstellen. Aufgrund der Vielfältigkeit existiert jedoch kein industrieller Standard in der Beschreibung von Sandwichpaneelen und im Kabinenbau sind solche aufwendigen CAD Modelle nicht weit verbreitet.

Solange keine einheitliche Datenbasis existiert, sollte die Programmgenerierung auf Prozessebene anhand der garantiert verfügbaren Informationen konzipiert werden. Liefern nicht vorhandene Daten einen prozesstechnischen Mehrwert (beispielsweise das Wissen über die Wabenausrichtung bei Befüllung), können diese manuell eingetragen oder sensorisch erfasst werden. Beim KFM-Eintrag sind in jedem Fall die Position und Geometrie der Befüllbereiche zur Bahnplanung erforderlich. Diese können als gegeben vorausgesetzt werden; die Daten werden bereits aktuell zum Einsatz von Befüllschablonen benötigt. Nicht jedes Unternehmen beschreibt den Schichtaufbau in den CAD-Daten und die Lagen weisen hohe Fertigungstoleranzen auf (vgl. Abschnitt 2.1.2, S. 10). Die Positionierung in Normalenrichtung muss somit über den Prozess geregelt werden.

Die Anforderungen an die Bearbeitungsbahn beim KFM-Eintrag hängen im Wesentlichen von der Dosiersteuerung ab. Wie im vorigen Abschnitt dargestellt, herrscht dabei noch Forschungsbedarf. Unabhängig davon können jedoch auf Basis der bereits erfolgten Prozessanalyse qualitative Anforderungen formuliert werden [45]:

1. Vollständige Abdeckung: Der spezifizierter Bereich muss mit der Düsenfläche komplett abgedeckt werden. Dabei kann ein Übertreten gegebenenfalls toleriert werden, ist jedoch zu minimieren.

2. Gewährleistung des Luftaustrittes: Es müssen stets benachbarte, unbefüllte Bereiche vorhanden sein, damit die Luft aus den Zellen entweichen kann (kein „Einkreisen“).
3. Kontinuität: Rückzugs- und Absetzbewegungen sind zu vermeiden, da hierdurch Materialrückstände auftreten können.
4. Krümmung: Durch große Bahnradialen können hohe Beschleunigungen vermieden und so die Dosierregelung entlastet werden.
5. Düsenausnutzung: Der Anteil befüllter Waben unter der Düsenöffnung beziehungsweise die Bahnüberlappung sollte von Betrag und Variation möglichst gering sein.

Die hier aufgeführte Reihenfolge entspricht grundsätzlich der Relevanz, wobei dies konkret im Zusammenhang mit einer gegebenen Prozessregelung zu diskutieren ist.

Dem KFM-Eintrag vergleichbare Anwendungen bezüglich der Pfadplanung sind etwa CNC-Fräsen und additive Fertigung (englisch: *Additive Manufacturing*, kurz AM). Für die CNC Bearbeitung steht eine Vielzahl an CAD/CAM Programmen zur Verfügung. Mit ihnen können anhand der CAD-Daten die Bearbeitungspfade generiert werden. Komplexe Pfadstrategien wie etwa für das HSC-Fräsen basieren auf Anforderungen wie Minimierung der Werkzeugbelastung oder Maximierung des Spanvolumens. Dadurch werden teils geringe Querstellungen verwendet. Dies führt beim KFM-Eintrag zu mehrfachem Überfahren bereits befüllter Bereiche und kann mit richtungsparallelen (auch Zick-Zack-Pfade genannt) sowie konturparallelen Pfaden vermieden werden. Konturparallele Strategien weisen weniger starke Richtungsänderungen auf und können so zu höherer Fertigungsgenauigkeit beitragen [55].

Beim AM weisen extrusionsbasierte Verfahren wie das Fused Deposition Modeling (FDM) einige Analogien zum KFM-Eintrag auf. Auch hier wird ein begrenzt fließfähiges Material aus einer Düse auf einen Träger aufgebracht. Aufgrund der Gefahr des Nachfließens (englisch: *oozing*) werden in fortgeschritteneren Strategien Rückzugsbewegungen und Pfadkreuzungen vermieden [24, 53, 89]. Die Ansätze von Jin et al. [66] sowie Zhao et al. [117] zeigen die Flexibilität bei der Verknüpfung von Konturparallelen zur Generierung global zusammenhängender Pfade. Die Flächen werden in Bereiche segmentiert, für die kontinuierliche spiralartige Pfade generiert werden können. Diese Sub-Pfade werden anschließend über Konturparallelen miteinander verknüpft. In Abbildung 2.19 sind für die jeweiligen Konzepte Beispielpfade dargestellt.

Im Bereich der Bahnplanung existieren somit bereits eine Vielzahl an Lösungsansätzen, die grundsätzliche auf den Prozess des KFM-Eintrags übertragbar sind.

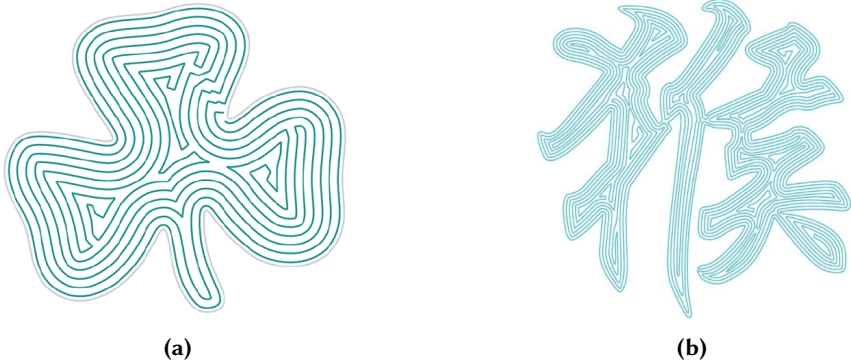


Abb. 2.19.: Kontinuierliche FDM-Pfade bei beliebigen Geometrien auf Basis spiralisierter Konturparallelen; (a) Verbundene Fermatspiralen [117], (b) „Go and Back“ Strategie [66]

Die konkrete Eignung sowie eventuell notwendige Anpassung der Algorithmen sind jedoch stets im Kontext des spezifischen Prozesses zu prüfen. Somit sind auch an dieser Stelle ein tieferes Prozessverständnis und die Umsetzung eines technischen Demonstrators notwendig, um verschiedene Ansätze praktisch zu evaluieren. Kritisch ist zudem die starke Bauteilvarianz, wodurch ein hoher Automatisierungsgrad auch bei der Bahnplanung notwendig ist. Insbesondere die proprietären CAD/CAM Programme sind als nachteilig zu bewerten.

2.5. Zusammenfassung Stand der Wissenschaft und Technik

Sandwichstrukturen aus faserverstärkten Kunststoffdecklagen und Wabenkernen sind aufgrund ihrer herausragenden Eigenschaften im Flugzeuginterieur aktuell sowie in naher Zukunft konkurrenzlos. Jedoch existiert bei der Fertigung ein großes Optimierungspotenzial. In der Forschung wurden bisher hauptsächlich die Prozessschritte Legen und Nachbearbeiten (Fräsen) betrachtet. Eine erstmals ganzheitliche Analyse wurde in [28] vorgestellt. Hierbei hat sich unter anderem die große Bedeutung des Kernfüllmasseneintrags gezeigt. Die Automatisierung dieses Prozessschrittes ist ein wesentlicher Baustein in der Optimierung der gesamten Kette. Ungeachtet der Relevanz ist jedoch noch keine wissenschaftliche Untersuchung verfügbar. Aktuell entwickelte industrielle Anlagen weisen noch eine Reihe an Defiziten auf, was die Notwendigkeit der wissenschaftlichen Aus-

einandersetzung weiter unterstreicht. Nur über ein umfangreiches Verständnis können die Potenziale der Automatisierung voll ausgeschöpft werden.

In der Analyse des Prozesses wird schnell deutlich, dass es sich um eine strömungstechnisch komplexe Aufgabe handelt. Die Schwierigkeit in der Modellierung ergibt sich durch nicht-newtonsches Verhalten der KFM, variierende geometrische Randbedingungen und die Behinderung des Luftaustrittes an der Waben-Prepreg-Grenzschicht. Forschungsergebnisse zur Rheologie von syntaktischen Schäumen können qualitativ auf Kernfüllmasse übertragen werden. Modifiziertes Epoxidharz mit einem hohen Volumenanteil an Glashohlkugeln lässt hohe Viskosität, Scherverdünnung, Fließspannung, Thixotropie und Schlupf erwarten. Ansätze zur experimentellen Bestimmung der charakteristischen Größen sind etwa in [15] gegeben. Eine anschließende Modellierung ist jedoch bei nicht trivialen Strömungsbedingungen nur numerisch zu lösen und entsprechend im Kontext des gegebenen Prozesses zu betrachten.

Das in der Literatur bereits untersuchte Luftstromverhalten bei OOA-Prepregs zeigt starke Abhängigkeiten von Umgebungs- und Prozesseinflüssen wie Druck, Temperatur, Gewebart, Harztyp und -verteilung. Die durchschnittlich ermittelten Porositätskennwerte lassen darauf schließen, dass ein Strom ausschließlich durch das Prepreg beim KFM-Eintrag nicht ausreicht. Eine Untersuchung des Luftstroms im Bereich der Grenzschicht Wabe-Prepreg ist jedoch in der Literatur nicht verfügbar. Es liegt dabei nahe, dass ähnliche Einflussgrößen zu berücksichtigen sind, wie etwa die Oberflächenbeschaffenheit der im Kontakt befindlichen Komponenten.

Trotz vieler offener Fragen in der Analyse und Modellierung des Befüllprozesses können bereits Parallelen zu anderen technischen Aufgabenstellungen identifiziert werden. Entsprechend können auch relevante Herausforderungen in der praktischen Umsetzung einer Automatisierung abgeschätzt werden. Diese liegen insbesondere in der Entwicklung des Werkzeugsystems, der Regelung der Förderleistung und der Prozess- beziehungsweise Pfadplanung. Das Werkzeugsystem stellt mit der sehr spezifischen Aufgabenstellung eine Sonderanfertigung dar. Der Einsatz moderner Lösungsansätze aus dem Bereich der Dosierregelung ist von der mathematischen Beschreibung der Strömungsverhältnisse abhängig. Inwiefern dies für die KFM anwendbar ist, ist im Rahmen der Arbeit noch zu klären. Als Alternative bieten sich robuste, klassische Methoden wie PID-Regler an. In wissenschaftlichen Arbeiten zur Pfadplanung beim AM existieren eine Reihe von Ansätzen, die teilweise die Anforderungen des KFM-Eintrags erfüllen können. Kontinuierliche Pfade ohne Absetzbewegung und mit geringen Krümmungen werden etwa durch konturparallele Spiralen wie in [66, 117] erzielt. Bei den konkreten Implementierungen ist die Gefahr des Einkreisens zu befüllender Bereiche gegeben, wodurch Luft eventuell nicht mehr entweichen kann.

Insgesamt liefert die wissenschaftliche Literatur somit erste technische Lösungsansätze zum automatisierten KFM-Eintrag. Diese basieren jedoch stets auf konkreten Prozessmodellen, die in dem hier betrachteten Fall noch nicht existent sind. Es ist aufgrund der zahlreichen Besonderheiten des KFM-Eintrags entsprechend davon auszugehen, dass eine technische Umsetzung die Entwicklung von Sonderlösungen erfordert.

2.6. Konkretisierte Zielsetzung und Vorgehen

Die wesentliche Aufgabe dieser Arbeit ist die Entwicklung eines automatisierten Kernfüllmasse-Eintrags, welcher die entsprechend Abschnitt 2.3.5 definierten Zielgrößen Qualität, Robustheit und Flexibilität maximiert. Die Entwicklung soll dabei auf einer wissenschaftlich fundierten Prozessanalyse aufbauen. Dies ermöglicht eine methodische Konzeptionierung sowie optimierte Auslegung der jeweiligen Subsysteme. Die Defizite der verfügbaren industriellen Anlagen werden so methodisch abgebaut. Die erforderlichen Arbeitspakete und der entsprechend weitere Aufbau dieser Arbeit sind in Abb. 2.20 auf der nächsten Seite zusammenfassend dargestellt.

Im ersten inhaltlichen Schwerpunkt in Kapitel 3 wird zunächst der Prozess einer wissenschaftlichen Analyse unterzogen. Die Forschungsfragen sind jeweils so zu stellen, dass aus den Ergebnissen Handlungsanweisungen zur Optimierung der drei Zielgrößen abgeleitet werden können. Dabei wird weiterhin ein umfangreiches Prozessverständnis aufgebaut. Dieses soll dazu dienen, die Anforderungen bei der Entwicklung technischer Lösungen konkretisieren sowie mögliche Lösungsansätze im Vorfeld sondieren zu können.

In Abschnitt 3.1 werden die geometrischen Zusammenhänge einer umfangreichen theoretischen Analyse unterzogen. Die kontinuierliche Befüllung diskreter Volumina ist bisher einmalig. Unabhängig von der tatsächlichen Strömung der KFM können wichtige Schlüsse aus der geometrischen Beschreibung gezogen werden. Aufgrund der hohen Dynamik gegenüber dem trägen Strömungsverhalten der KFM ist der Einsatz von Modellen in der Dosierregelung unrealistisch. Es ist jedoch zu erwarten, dass sie im Bereich der Steuerung genutzt werden können, um die mittleren, erforderlichen Volumenströme besser abschätzen zu können. Weiterhin können sie für umfangreiche Parameterstudien genutzt werden, um den Einfluss verschiedener Düsen- und Wabengeometrien zu beurteilen und entsprechend optimierte Werkzeuge zu konstruieren.

Materialbezogene Forschungsfragen sind experimentell zu klären. Das Vorgehen ist dabei jeweils identisch: Zuerst wird der erforderliche Versuchsaufbau entworfen. Hieraus gilt es in Kombination mit der Messaufgabe einen Versuchs-

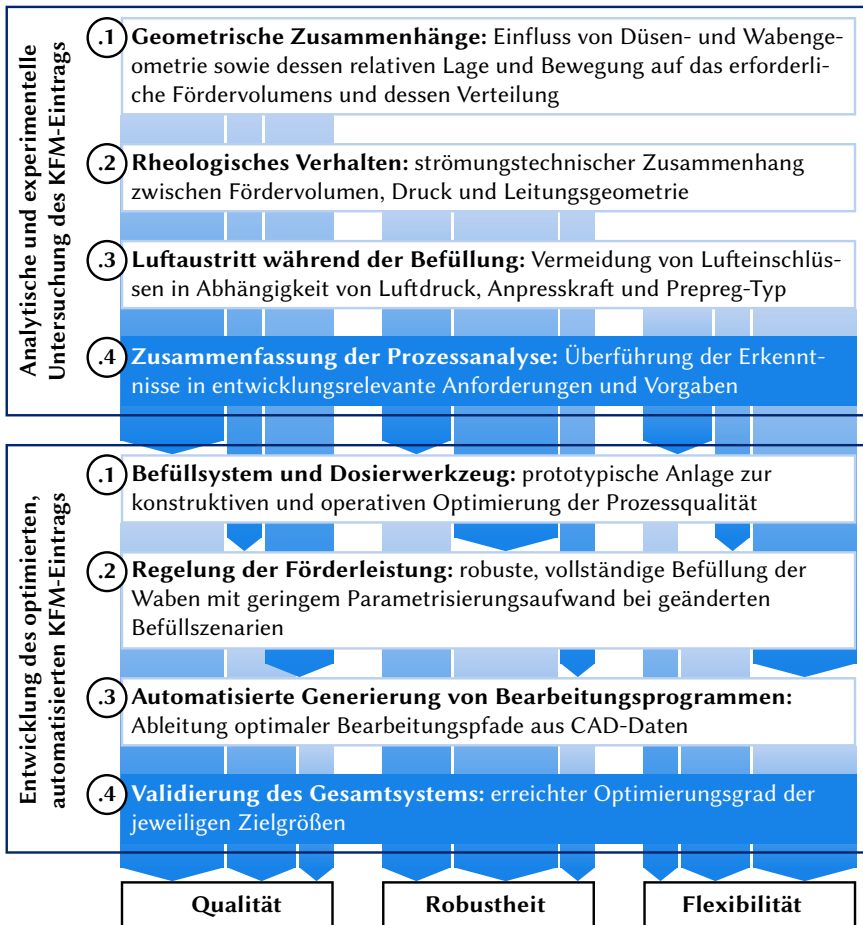


Abb. 2.20.: Aufbau der Arbeit zur Entwicklung des automatisierten, optimierten KFM-Eintrags

plan aufzustellen und die Durchführung zu spezifizieren. Die Ergebnisse werden zunächst in der Auswertung vorgestellt und abschließend im Kontext des Prozessverständnisses diskutiert.

Die erste experimentelle Aufgabe ist die Untersuchung des Strömungsverhaltens in Abschnitt 3.2. Diese ist insbesondere notwendig, um die Dimensionen von Strömungswegen auszulegen und Lösungsansätze zur Regelung des Fördervolumens zu diskutieren. Als geeignetes Messverfahren nach Abschnitt 2.4.5 wird

die Kapillarviskosimetrie gewählt. Diese kann mit vorhandener Messtechnik realisiert und gegebenenfalls in den zu entwickelnden Produktionsprozess integriert werden. Das Verfahren erfordert jedoch eine umfangreiche Versuchsplanung zur Berücksichtigung und Kompensation der rheologischen Effekte bei der Rohrströmung.

In Abschnitt 3.3 wird anschließend geklärt, auf welchem Wege die Luft aus den Zellen während der Befüllung entweicht. Das Ziel ist die Klärung der Frage, welche Prozessgrößen in welchem Maße das Entweichen der Luft beeinflussen. Hieraus können Schlüsse auf die Prozessgrenzen gezogen werden, um in der Praxis Lufteinschlüsse vermeiden zu können. Um den zu untersuchenden Luftstrom prozessstreu nachzubilden, muss ein spezieller Versuchsaufbau entwickelt werden. Besonders kritisch ist dabei der gezielte Lufteinlass in einzelne Wabenzellen und die entsprechende Abdichtung des Systems.

Der erste, analytische Teil wird in Abschnitt 3.4 zusammengefasst. Aus den Erkenntnissen der theoretischen und experimentellen Untersuchung des KFM-Eintrags gilt es, das Prozessverständnis zu konkretisieren. Die Ergebnisse bilden die Basis des zweiten inhaltlichen Schwerpunktes der Arbeit: der technischen Realisierung eines optimierten, automatisierten Befüllprozesses. Die Entwicklung wird dabei in die drei in Abschnitt 2.3.5 beschriebenen, relevanten Subsysteme unterteilt. Hierbei wird jeweils eine einheitliche Methodik verfolgt: Als erster Schritt steht immer die Analyse der jeweiligen Anforderungen. Diese ist die Basis der folgenden Konzeptionierung. Mit den konkretisierten Anforderungen können auch Teillösungen aus vergleichbaren Anwendungen geprüft und gegebenenfalls übernommen oder adaptiert werden. Die Umsetzung des Konzeptes wird zunächst in der Implementierung beschrieben und anschließend experimentell validiert. Die Ergebnisse werden je Subsystem im Abschluss zusammenfassend diskutiert.

Die Grundlage für alle weiteren praktischen Untersuchungen stellt die in Abschnitt 4.1 zu entwickelnde, prototypische Anlage. Die Anforderungen sollen eine industrielle Anwendung möglichst nah abbilden und gleichzeitig einen flexiblen, experimentellen Betrieb ermöglichen. Der Fokus liegt dabei auf dem Dosierwerkzeug, welches eine hohe Prozessqualität gewährleisten muss. Weitere Herausforderungen sind die Entwicklung geeigneter Lösungen zur Befüllung gekrümmter Strukturen sowie zur präzisen Positionierung der Düse in Normalenrichtung.

Die geforderte hohe Qualität muss auch unter variierenden Prozessbedingungen reproduzierbar eingehalten werden. Eine entsprechende Regelung der Dosierleistung wird hierfür in Abschnitt 4.2 erarbeitet. In der Literatur hat sich gezeigt, dass Regelungssysteme auch bei nicht-newtonschen Fluiden von modellbasierten Ansätzen profitieren. Die Prämisse ist dabei, dass vereinfachende Annahmen in dem betrachteten Arbeitsbereich valide sind. Entsprechende Untersuchungen

zur KFM stehen noch aus (vgl. Abschnitt 3.2), jedoch ist mit ausgeprägten nicht-linearen Eigenschaften zu rechnen. Somit müssen voraussichtlich alternative Systembeschreibungen gefunden werden, welche eine robuste Regelung ermöglichen.

Die Bearbeitungsprogramme müssen möglichst automatisch generiert werden, um eine hohe Produktivität auch bei der geforderten Produktindividualität erreichen zu können. Aufgrund der spezifischen Besonderheiten des Prozesses eignen sich verfügbare CAD/CAM Lösungen nur bedingt oder sind mit hohem Anpassungsaufwand verbunden. In Abschnitt 4.3 soll ein geeignetes Konzept entwickelt und umgesetzt werden. Grundlage ist auch hier die vorangegangene, umfangreiche experimentelle Untersuchung. Ziel ist dabei, prozesstechnisch optimale Befüllstrategien formulieren zu können.

In Abschnitt 4.4 werden die erarbeiteten Einzellösungen und Erkenntnisse in der Gesamtheit diskutiert und bewertet. Die Ergebnisse werden damit wieder in den Kontext des Prozessverständnisses gesetzt und dieses entsprechend erweitert. Die Validierung der Teillösungen sowie des Gesamtsystems in den vorangegangenen Kapiteln wird hinsichtlich des Ziels dieser Arbeit geprüft: der Entwicklung eines automatisierten KFM-Eintrags unter Optimierung der Zielgrößen Qualität, Robustheit und Flexibilität. Auf Basis der abschließenden Zusammenfassung in Kapitel 5 wird ein Ausblick über weitere Forschungsfragen gegeben, die im Rahmen der Arbeit ersichtlich wurden.

3. Analytische und experimentelle Untersuchung des KFM-Eintrags

In Kapitel 2 hat sich gezeigt, dass die Literatur keine direkt übertragbaren Ergebnisse zur Modellierung des Prozesses „Kernfüllmasse-Eintrag“ liefert. Die in Abschnitt 2.4 identifizierten Lücken im Prozessverständnis müssen zunächst geschlossen werden, bevor eine optimale Lösung in der Automatisierung gefunden werden kann. Dazu werden in Abschnitt 3.1 zunächst die geometrischen Besonderheiten und deren Einflüsse auf den Befüllprozess analysiert. Dabei werden zudem die im weiteren Verlauf der Arbeit relevanten Notationen und Konventionen vorgestellt. In Abschnitt 3.2 wird die Rheologie der Kernfüllmasse experimentell untersucht. Das Verständnis des Strömungsverhaltens dient der Abschätzung von Prozessgrenzen (beispielsweise beim Förderdruck) und ist bei der Auslegung von Düsengeometrien zu berücksichtigen. Die wesentliche Qualitätsanforderung an den Prozess ist die Befüllung ohne Lufteinschlüsse. Um diese einhalten zu können, wird in Abschnitt 3.3 das Luftstromverhalten während der Befüllung analysiert. Mit einem speziellen Versuchsstand wird hier erstmalig der Luftstrom im Bereich der Grenzschicht Wabe-Prepreg gemessen und in Bezug zu den Prozessgrößen gestellt. Das im Rahmen des Kapitels aufgebaute Prozessverständnis wird in Abschnitt 3.4 zusammengefasst und die Erkenntnisse in Bezug zur weiteren Systementwicklung gesetzt.

3.1. Geometrische Zusammenhänge

Der Volumenstrom oder auch das *Fördervolumen* Q_F ist aus Sicht der Produktivität die relevanteste Prozessgröße. Das Fördervolumen steht über geometrische Beziehungen im direkten Zusammenhang zu den Prozessgrößen der Werkzeugbewegung $\{\dot{x}, \dot{x}\}_D$ sowie den Parametern der Zell- und Düsengeometrien und der lokalen Überlappung zu bereits befüllten Bereichen. Das Ziel der folgenden Abschnitte ist es, Zusammenhänge zwischen diesen Größen zu identifizieren und qualitativ zu beschreiben.

Die in der Diskussion der geometrischen Einflussgrößen verwendeten Konventionen und Nomenklaturen werden in Abschnitt 3.1.1 kurz vorgestellt. Daraufhin werden in 3.1.2 die geometrischen Abhängigkeiten und Randbedingungen analysiert sowie die Gültigkeit von notwendigen Vereinfachungen diskutiert. In Abschnitt 3.1.3 werden geometrische Modelle entwickelt, die Fördervolumen, Wabengeometrie, Düsengeometrie und Werkzeugbewegung in Beziehung setzen. Mit der in Abschnitt 3.1.4 beschriebenen Implementierung in eine Simulationsumgebung können umfangreiche Parameterstudien durchgeführt werden. Entsprechende Ergebnisse sind in Abschnitt 3.1.5 vorgestellt. Eine abschließende Diskussion in Abschnitt 3.1.6 fasst die gewonnenen Erkenntnisse zusammen und schließt den Bogen zum realen Prozess.

3.1.1. Konventionen

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Kenngrößen sind insbesondere bei der Herleitung der geometrischen Modelle relevant. Es werden darüber hinaus die im weiteren Verlauf der Arbeit verwendeten sprachlichen und formellen Notationen definiert.

Tensornotation Tensorielle Größen werden im Folgenden in halbfetter Schrift hervorgehoben. Daten mit Rang 1 (beispielsweise Koordinaten \mathbf{x}) sind als Kleinbuchstaben notiert. Tensoren mit Rang 2 (beispielsweise Posen oder Transformationen \mathbf{T}) werden mit Großbuchstaben angegeben. Ist ein Tensor in Bezug auf ein spezifisches Koordinatensystem A angegeben, ist dies über eine vorangehende Hochstellung visualisiert. Bei einer Koordinatentransformation wird das Zielsystem in einer vorangehenden Tiefstellung angegeben. Eine Transformationskette ergibt sich somit zu:

$${}^C\mathbf{x} = {}^B\mathbf{T} {}^A\mathbf{T} {}^A\mathbf{x}. \quad (3.1)$$

Koordinatenreduktion Bei einer geometrischen Diskussion sind immer die zugrundeliegenden Koordinatensysteme anzugeben. Diese sind üblicherweise an physische Systeme gekoppelt. Für die Handhabung sind etwa die mit der Düse verknüpften Werkzeugkoordinaten D sowie die mit dem Werkstückträger verknüpften Basiskoordinaten W von Interesse¹. Beim KFM-Eintrag bewegt sich die Düse immer entlang der stetigen Oberfläche des Wabenkerns. Der Prozess lässt sich somit grundsätzlich auf 2D reduzieren. Dazu finden die folgenden, geometrischen Analysen und Modellierungen in *Kernkoordinaten* K statt. Dieses beschreibt ein auf die Oberfläche des Wabenkerns projiziertes Koordinatensystem, welches

¹entspricht dem in der Robotik üblichen Tool Center Point (TCP)

etwaigen Krümmungen folgt. Auf die mathematische Umsetzung einer solchen Projektion soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Ein Beispiel ist etwa die in [64] eingesetzte riemannsche Mannigfaltigkeit.

Mit Bezug auf einen Bearbeitungspfad kann das Problem weiter auf eine Dimension reduziert werden. Die *Bahnkoordinate* x_B gibt die Position entlang des Pfades an. Die *Vorschubgeschwindigkeit* v_B entspricht dem Betrag der Düsen- geschwindigkeit, während die *Vorschubrichtung* α_B den Winkel der Pfadtangente in *L*- oder *W*-Richtung beschreibt. Jedem Punkt kann ein Krümmungsradius R_p zugeordnet werden, der sich aus den umgebenden Punkten $x_{B,i-1}, x_{B,i+1}$ ergibt (bei gerader Bahn gilt $R_B \rightarrow \infty$).

3.1.2. Analyse geometrischer Einflussgrößen und Randbedingungen

Der Befüllprozess beinhaltet die drei wesentlichen, physischen Komponenten Wabenkern, Düse und Kernfüllmasse. Schematisch sind diese in Abb. 3.1 auf der nächsten Seite dargestellt. Durch die relative Lage von Wabe und Kern sowie dessen geometrischen Parameter werden die Strömungsquerschnitte vorgegeben. Informell wird der Prozess durch die Spezifikation der KFM-Sollgeometrie bestimmt. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten, dessen Kenngrößen sowie die jeweiligen Einflüsse auf den Befüllprozess eingehend analysiert.

Wabenkern Der mittlere Querschnitt einer Wabenzelle i wird mit $A_{Z,i}$ notiert. Die mittlere Ausdehnung einer Zelle senkrecht zur Oberfläche wird mit $h_{Z,i}$ beschrieben. Bei gekrümmter Kernschicht variiert der Querschnitt mit der Höhe. Grundsätzlich sind bei in der Praxis auftretenden Krümmungen von Wabenkernen keine massiven Deformationen oder Beschädigungen der Zellgeometrie zu erwarten. Somit liegt die neutrale Faser in der Mitte der Schicht und auch bei gekrümmtem Kern ist das Zellvolumen $V_{Z,i}$ über den einfachen Zusammenhang $V_{Z,i} = A_{Z,i} h_{Z,i}$ zu bestimmen.

Der Kerntyp wird durch die Form des Querschnitts der regulären Zellen beschrieben. Die größte Verbreitung haben die Waben mit regelmäßigem Hexagon der Zellweite w . Im Folgenden wird etwa ein hexagonaler Wabenkern der Weite $w = 3,2$ mm als „HEX-3,2“ abgekürzt angegeben. Bei gekrümmten Paneelen dominieren die überexpandierten Waben. Diese werden über die Zellweite w des regelmäßigen Hexagons vor der Expansion beschrieben. In abgekürzter Schreibweise ist eine überexpandierte Wabe mit $w_0 = 6,4$ mm als „OX-6,4“ notiert. Für die Fläche eines regelmäßigen Hexagons gilt etwa $A_{HEX} = \sqrt{3} w^2/2$.

Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, unterliegen die Wabengeometrien großen Toleranzen. Diese Schwankungen abzubilden, würde die Komplexität der

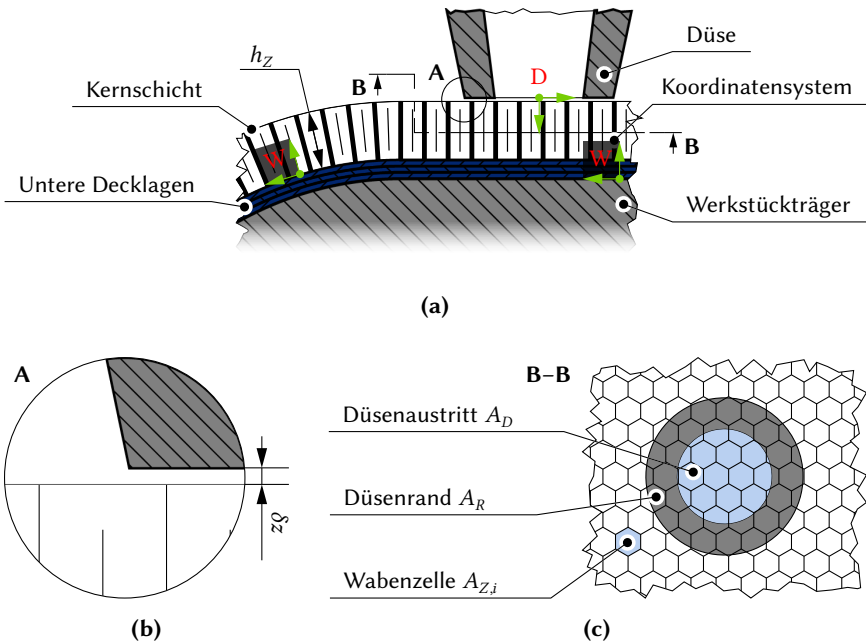


Abb. 3.1.: Geometrische Konventionen zur Beschreibung des Befüllprozesses

geometrischen Modelle enorm erhöhen. Grundsätzlich können die Toleranzen jedoch als stochastische Abweichung eines Mittelwertes gesehen werden. Deshalb basieren die hier entwickelten Modelle auf einer idealisierten Wabenform. Die Grundform bildet ein Hexagon mit einer normierten Seitenlänge von $s = 1$. Die Höhe (Dimension in L -Richtung) ist der Abstand zweier gegenüberliegender Spitzen und entsprechend $l = 2s$. Die Breite (Dimension in W -Richtung) als Abstand gegenüberliegender Seiten beträgt $w = \sqrt{3} s$. Diese idealisierte Beschreibung ist zur Abbildung der beiden gängigsten Kerntypen geeignet: Hexagonale und überexpandierte Waben verschiedener Größen können über eine affine Transformation abgebildet werden (vgl. Abschnitt 3.1.4).

Die Komplexität der numerischen Beschreibung kann mit der Vernachlässigung der Stegbreite b weiterhin stark reduziert werden. Das Interesse liegt zunächst auf der qualitativen Analyse des Prozesses und der geometrischen Einflüsse, was diese Vereinfachung entsprechend rechtfertigt. Der resultierende Fehler lässt sich bei bekannter Stegbreite quantifizieren und korrigieren. Die Abweichung beträgt dabei $err_A = 1 - A_{Z,red}/A_Z$, mit der angenommen idealen Wabenfläche A_Z und der entsprechend der Stegbreite reduzierten Fläche $A_{Z,red}$. Bei

einer hexagonalen Wabe mit $w = 3,2 \text{ mm}$ und einem Steg von $b = 0,1 \text{ mm}$ ergibt sich beispielsweise eine Abweichung von $err_A = 3,1 \%$. Die Stegbreite ist abhängig vom jeweiligen Wabentyp zu bestimmen.

Strömungsverhältnisse Über die Düsenaustrittsfläche A_D wird die Kernfüllmasse in die Zellen des Wabenkerns gefördert. Der Düsenrand mit der Fläche A_R dient der Vermeidung von Überdosierung und Überquellen. Dazu sollte möglichst ein Kontakt mit der Oberfläche der Kernschicht eingehalten werden. Das bedeutet, der Abstand δz ist so zu minimieren, dass keine Kernfüllmasse seitlich austritt. Dabei gibt δz den maximalen Abstand zwischen A_R und allen unter dem Rand befindlichen Wabenstegen an. Auch muss der Rand ausreichend groß sein, dass zu jedem Zeitpunkt alle Waben abgedeckt werden, in welche KFM einströmt. Mit der korrekten Gestaltung und Positionierung des Düsenrandes kann also davon ausgegangen werden, dass keine parasitären Ströme auftreten.

Im Bereich der Düse ist der Strömungsquerschnitt über den gesamten Prozess hinweg konstant. Für die Strömungsgeschwindigkeit v_F ergibt sich entsprechend der Rheologie ein spezifisches Vektorfeld am Düsenaustritt. Daraus folgt für den gesamten Volumenstrom Q_F :

$$Q_F = v^* A_D = \iint_{A_D} v_{F,z} dA, \quad (3.2)$$

mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit v^* .

Im Bereich des Kerns verteilt sich die Strömung hingegen über eine während des Prozesses variierende Menge an Zellen. Zur Bestimmung des Stroms für eine einzelne Wabenzelle i ist etwa Gleichung (3.2) über die jeweilige Zellöffnung zu lösen. Für das in eine Zelle eingeströmte Volumen $V_{F,i}$ zum Zeitpunkt t gilt folglich:

$$V_{F,i} = \int_0^t \iint_{A_{Z,i}} v_{F,z} dA dt \quad (3.3)$$

Mit dem Befüllungsgrad $V_{rel,i} = V_{F,i}/V_{Z,i}$ kann der Zustand einer einzelnen Zelle beschrieben werden. Ohne Deformation oder Zerstörung der Waben gilt $V_{rel,i} \in [0, 1]$. Auf dieser Basis kann die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Befüllung sowie die dazu notwendige Zeit analysiert werden. Die Zellgeometrie und entsprechend $A_{Z,i}$ ist über die Konstruktion im Vorfeld des Prozesses festgelegt. Somit ist die wesentliche Stellgröße die Durchströmung der Zellöffnung mit v_F . Das konkrete Strömungsfeld ist jedoch äußerst komplex zu ermitteln (vgl.

Abschnitt 3.2). Als statistische Hilfsgrößen werden deshalb die *Überlappung* β und die *Überlappungszeit* ω definiert:

$$\beta_i = \frac{A_{Z,i} \cap A_D}{A_{Z,i}}, \quad (3.4)$$

$$\omega_i = \int \beta_i dt. \quad (3.5)$$

Die Überlappung gibt den prozentualen Anteil der Zellöffnung an, die mit dem Düsenaustritt abgedeckt ist und durch welche KFM einströmen kann. Die Überlappungszeit beschreibt eine Relativierung der Zeit, in welcher eine Befüllung der Zelle stattfindet. In ihr zeigt sich insbesondere der Einfluss der Düsengeometrie auf den Prozess. Nehmen wir zunächst den rein theoretischen Fall eines homogenen Strömungsfeldes mit $v_{F,z} = v^*$ an. Dann gilt nach Gleichungen (3.3) und (3.5) für das eingeströmte Volumen $V_{F,i} = \omega_i v^* A_{Z,i}$. Erst wenn alle Zellen im Füllkörper die gleiche Überlappungszeit haben, kann sich ein entsprechendes Feld überhaupt ausbilden. Dies ist wiederum äußerst unrealistisch. Es ist davon auszugehen, dass die Zellen unterschiedlich schnell befüllt sind. Die Strömung müsste sich dabei regelmäßig neu aufteilen. Das Ausmaß dieser ständigen Umstrukturierung ist jedoch über eine gleichmäßige Überlappungszeit zu minimieren.

Aufgrund des Strömungswiderstandes und der hohen Viskosität der KFM wird angenommen, dass eine minimale Überlappung β_{min} notwendig ist, damit KFM in eine Zelle einströmen kann. Auch hinsichtlich der minimalen Überlappung ist eine Anisotropie zu erwarten, da der Strömungswiderstand üblicherweise stärker durch die charakteristische Länge als den Betrag der Fläche bestimmt wird: So unterscheidet sich etwa die Form der Überlappungsbereiche bei runder Düse und OX-Wabe signifikant, je nachdem aus welcher Richtung sich die Düse nähert.

Auf Basis der Überlappung β kann die Menge der *Einströmweben* Σ definiert werden. Diese beinhaltet alle Weben, die zu einem gegebenen Zeitpunkt t um mindestens β_{min} von der Düse überlappt sind:

$$\Sigma := \{i \mid (\beta_i \geq \beta_{min}) \wedge (V_{rel,i} < 1)\} \subset \mathbb{N}. \quad (3.6)$$

Anhand Σ lassen sich einige der Besonderheiten des Prozesses festmachen:

- zeitliche Änderungen $d\Sigma/dt$ sind diskret
- geringe Variationen der Form oder Lage von A_D können ohne Auswirkung auf Σ bleiben
- Änderung von Σ während des Prozesses, wenn einige Zellen vorzeitig befüllt sind

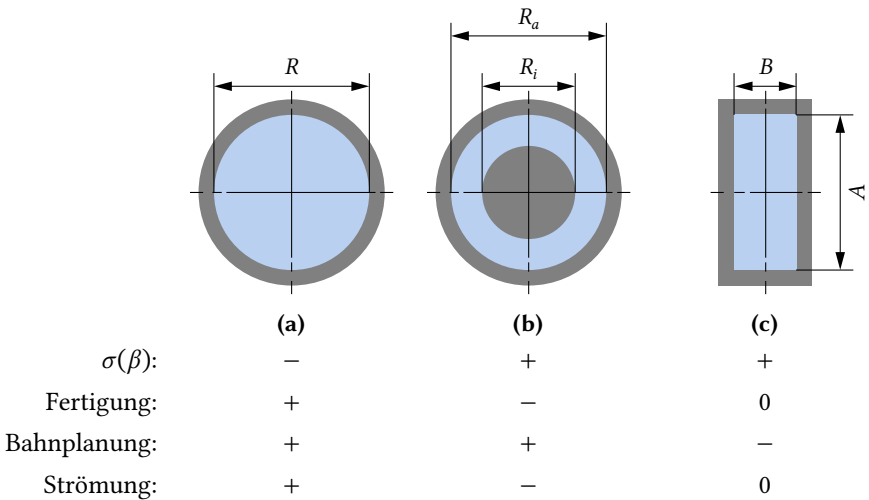


Abb. 3.2.: Beispiele möglicher Düsenaustrittsflächen und deren Vor- und Nachteile; (a) Kreis, (b) Ring, (c) Linie

Düse Aus der relativen Lage x_D der Düse zu den Waben sowie der Düsenaustrittsfläche A_D ergeben sich die Zellüberlappungen β und die Menge Σ der Zellen, welche zu einem gegebenen Zeitpunkt befüllt werden können. Die Düsengeometrie ist weiterhin maßgebend für das Geschwindigkeitsfeld v_F und somit für die Aufteilung des Volumenstroms Q_F auf Σ . Es gilt auch zu berücksichtigen, dass die Form einen wesentlichen Einfluss auf die Komplexität der Bahnplanung hat.

In Abb. 3.2 sind exemplarische Düsenaustrittsflächen skizziert. Rotationssymmetrische Düsenquerschnitte (vgl. Abb. 3.2a und 3.2b) haben den Vorteil, dass die Rotation um die Flächennormale n_z beliebig ist. Auch die Bestimmung des Strömungsprofils nach den in 2.4.4 vorgestellten Prinzipien vereinfacht sich bei solch einem Querschnitt. Bei einer kreisförmigen Düse (Abb. 3.2a) ist mit einer starken Variation von β zu rechnen. Dies kann bei einer Ringgeometrie (Abb. 3.2b) mit $dR \rightarrow 0$ vermieden werden. Eine entsprechende Austrittsfläche erfordert jedoch höheren fertigungstechnischen Aufwand. Alternativ ist bei einer rechteckigen Form (Abb. 3.2c) mit $B \ll A$ eine Minimierung der Variation von β zu erwarten. Die Richtungsabhängigkeit kann hier auch als Vorteil gewertet werden: Über die Rotation um n_z kann die Bahnbreite ohne Änderung des Werkzeugs und während des laufenden Prozesses variiert werden.

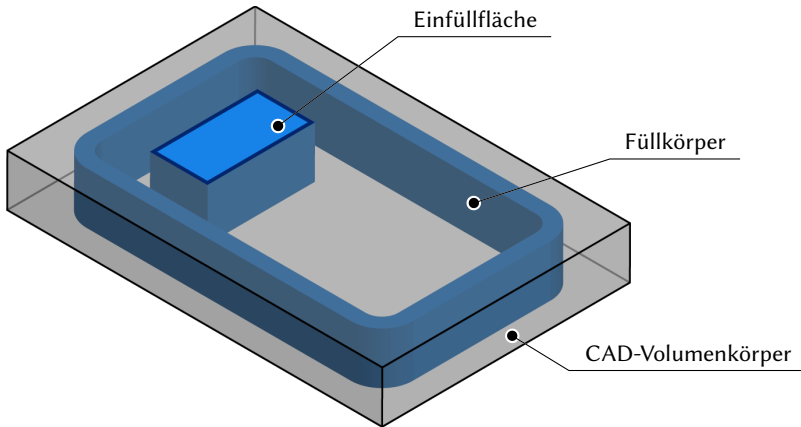


Abb. 3.3.: Ableitung der Einfüllflächen aus den in CAD spezifizierten Füllkörpern

Sollgeometrien In der CAD-Konstruktion wird meist in Form einfacher Volumina (ohne Berücksichtigung der konkreten Zellformen) spezifiziert, welche Bereiche im finalen Sandwichpaneel mit Kernfüllmasse ausgefüllt sein müssen. Exemplarisch ist dies in Abb. 3.3 dargestellt. Die spezifizierten Volumina werden im Folgenden als *Füllkörper* $V_{F,0}$ bezeichnet. Hieraus können die *Einfüllflächen* $A_{F,0}$ für den Kern bestimmt werden, also jene Bereiche, die mit der Düse abgedeckt werden sollen (analog zur klassischen Schablone). Im trivialen Fall entspricht dies den Oberflächen der Füllkörper. Der reale Prozess kann jedoch Abweichungen erfordern, etwa in Form eines Offsets, um trotz unsicherer Befüllungen am Düsenrand die Toleranzen einzuhalten. Das zu entwickelnde Modell soll künftig dabei helfen, entsprechende Adaptionen bestimmen zu können.

Auf Basis der Sollgeometrien und der Einströmwaben Σ können die Anforderungen an den Prozess mathematisch präzisiert werden. Dabei bezeichnet Σ_P die Gesamtheit aller Zellen, die während des Befüllprozesses der Gesamtdauer t_P von der Düse abgedeckt wurden:

$$\Sigma_P := \{i \mid \exists t (0 \leq t \leq t_P) : i \in \Sigma(t)\}. \quad (3.7)$$

Die erste wesentliche Anforderung lautet, dass alle Einströmwaben mit der spezifizierten Einfüllfläche überschneiden:

$$\forall i : \Sigma_P (A_{K,i} \cap A_{F,0} > 0). \quad (3.8)$$

Die zweite wesentliche Anforderung ist erfüllt, wenn nach Abschluss des Prozesses alle im Füllkörper liegenden Zellen den Zustand der vollständigen Befüllung erreicht haben:

$$\forall i : \Sigma_P (V_{rel,i} = 1). \quad (3.9)$$

Um Materialverbrauch und unnötiges Bauteilgewicht zu vermeiden, ist grundsätzlich ein *binäres Befüllergebnis* erwünscht. Das bedeutet, dass keine KFM in Zellen außerhalb der Sollgeometrien eintritt:

$$\forall i \in \mathbb{N} \setminus \Sigma_P (V_{rel,i} = 0). \quad (3.10)$$

Insbesondere im Randbereich der Einfüllfläche ist dies im realen Prozess nur schwer zu erreichen und stellt somit eher eine Zielgröße dar. Anhand der Anforderungen lässt sich mit dem mittleren Fördervolumen Q_F^* die Prozessdauer t_P abschätzen:

$$t_P \approx \frac{1}{Q_F^*} \sum_{i \in \Sigma_P} V_{Z,i} \quad (3.11)$$

3.1.3. Geometrische Modellierung zur Bestimmung des Fördervolumens

Die präzise Modellierung des Fördervolumens nach Gleichung (3.2) erfordert Kenntnis über das Vektorfeld der Strömungsgeschwindigkeiten. Dessen Simulation erweist sich bereits im statischen Fall aufgrund der Rheologie der KFM als äußerst komplex (vgl. Abschnitt 3.2). Eine Simulation der tatsächlichen Strömungsverhältnisse während des Befüllprozesses ist entsprechend unrealistisch. Stattdessen soll hier ein Ansatz vorgestellt werden, das erforderliche Fördervolumen auf Basis der geometrischen Analyse zu bestimmen. Die grundsätzliche Gültigkeit dieses Ansatzes folgt aus dem Gesetz der Massenerhaltung.

Aufgrund der Wabenstruktur und insbesondere des unsteten Verhaltens der Einströmwaben Σ ist bei der geometrischen Modellierung eine zeitliche Diskretisierung sinnvoll. Der Befüllprozess weist jedoch ein glättendes Verhalten auf, wodurch solche Unstetigkeiten ausgeglichen werden können. Diese Thematik wird im Folgenden unter dem Begriff des *Ausgleichsvermögens* diskutiert. Daraufhin werden drei Modelle zur Bestimmung des Fördervolumens in Abhängigkeit der Bewegungsstrategie (Punkt- oder Bahndosierung) entwickelt.

Ausgleichsvermögen Die zeitliche Diskretisierung der Modelle zur Bestimmung des Fördervolumens profitiert von einem systeminhärenten *Ausgleichsvermögen*. Dies ist als Puffer zu verstehen, der ein überschüssiges Fördervolumen aufnehmen und im Idealfall dem Förderstrom wieder zurückführen kann. Ohne

ein solches Ausgleichsvermögen wären die in Vorversuchen sowie industriell verfügbaren Anlagen beobachteten, erfolgreichen Befüllergebnisse nicht zu erklären. Die möglichen physikalischen Grundlagen für ein solches Verhalten sind vielfältig. Sie können etwa in der elastischen Verformung der Waben liegen. Bei granulären Pasten wie der KFM kann häufig auch ein pseudo-elastisches Verhalten beobachtet werden [15, 17], was sich ähnlich einer Kompressibilität äußert. Hierdurch können jedoch Verluste in Form von oberflächlichem Materialüberschuss nach der Entspannung auftreten.

Eine verlustfreie Pufferung ist bei Elastizitäten im Dosiersystem möglich und kann entsprechend konstruktiv gezielt eingebracht werden. Exemplarische Lösungsansätze sind flexible Leitungen oder Speichervolumen. Eine einfach zu realisierende, jedoch verlustbehaftete Alternative, ergibt sich durch Relativierung der Forderung nach *binärer Befüllung*. Bei einer Vergrößerung der Einfüllflächen sind im Randbereich Zellen enthalten, die außerhalb der spezifizierten Füllkörper liegen. Diese können entsprechend überschüssiges Material aufnehmen. Bei ungünstiger Verteilung von ω besteht jedoch die Gefahr, dass mehr Fördervolumen als zum Ausgleich erforderlich ist, aufgenommen wird. Im schlimmsten Fall stünde nicht ausreichend Material für die im Füllkörper befindlichen Zellen zur Verfügung.

Punkt dosierung Der hinsichtlich des Fördervolumens einfachere Fall ergibt sich bei der Punkt dosierung (also $\dot{x}_D, \ddot{x}_D = 0$). Hier gilt ein einfacher Zusammenhang:

$$\text{Modell 1:} \quad Q_1 = \frac{1}{t_i} \sum_{j \in \Sigma} V_{Z,j} \quad (3.12)$$

mit der lokalen Befüllzeit $t_i = f(x_p)$. Kritisch ist dabei die Einhaltung eines möglichst konstanten Fördervolumens während des gesamten Prozesses. Daraus folgt eine Umsetzbewegung mit $\Delta t \rightarrow 0$ beziehungsweise $\dot{x}_D \rightarrow \infty$. Die praktischen Grenzen dieses Verfahrens hängen somit vom Ausgleichsvermögen der Prozesskonfiguration und der Dynamik des Handhabungssystems ab und sind für jeden Anlagenaufbau spezifisch zu prüfen.

Bahndosierung Eine einfachere Steuerung der Werkzeugbewegung ergibt sich bei der Bahndosierung. Hieraus folgt jedoch eine nichttriviale, zeitliche Abhängigkeit $\Sigma = f(t)$. Theoretisch müsste somit auch das Fördervolumen Q_F permanent adaptiert werden. Entgegen der unendlichen Umsetzgeschwindigkeit zur Punkt dosierung ist dies physikalisch nicht unmöglich, jedoch in der Praxis kaum wirtschaftlich zu realisieren. Auch hier hängt der praktische Erfolg somit vom Ausgleichsvermögen ab.

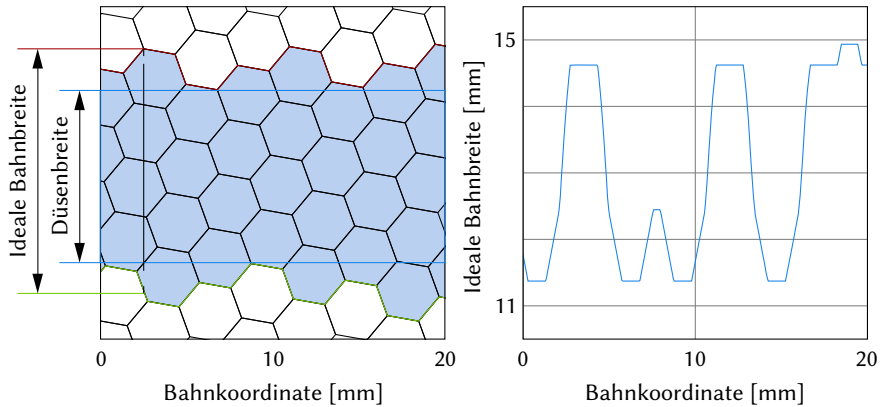


Abb. 3.4.: Bestimmung der idealen Bahnbreite über die Bahnkoordinate, modifizierte Darstellung nach [46]

Ohne das Ausgleichsvermögen weiter zu konkretisieren oder zu modellieren, kann daraus abgeleitet werden, dass eine zeitliche Glättung in der Steuerung des Fördervolumens bei der Bahndosierung zulässig ist. Welcher zeitliche Betrachtungsrahmen noch valide Ergebnisse liefert, hängt entsprechend vom System ab und ist im Zweifelsfall spezifisch zu validieren. Im Folgenden werden zwei Modelle mit unterschiedlicher zeitlicher Mittlung entwickelt.

Für das erste Modell wird eine Analogie zur Dosierung auf der freien Ebene, wie beispielsweise beim Kleberaupenauftrag, hergestellt. Hier wird der temporär erforderliche Volumenstrom an einer jeweiligen Bahnkoordinate aus dem Produkt vom Querschnitt der Kleberaupe und der Vorschubgeschwindigkeit bestimmt. Die Düsengeometrie spielt dabei über die resultierende Raupenform nur eine indirekte Rolle. Bei einem quadratischen Raupenquerschnitt der Höhe h und Breite b (wie beim KFM-Eintrag der Fall, $h = h_K$) folgt für den Volumenstrom:

$$\text{Modell 2:} \quad Q_2 = \frac{dV}{dt} = dA \frac{dx}{dt} = hbv_p \quad (3.13)$$

Beim KFM-Eintrag leitet sich die Bahnbreite aus Σ und der Vorschubrichtung α_p ab. Das entsprechende Prinzip ist in Abb. 3.4 für die ideale, hexagonale Wabe mit $w = 3,2$ mm dargestellt. Dabei zeigt sich bereits bei dieser geringen Wabengröße eine starke Variation in der Bahnbreite. Die Differenz der idealen Bahnbreite zur Düsenbreite kann bei hexagonaler Wabe im Bereich von $[0, 4w/\sqrt{3}]$ liegen. Es gilt dabei zu berücksichtigen, dass diese die geringste Anisotropie aufweist und die Variation bei anderen Geometrien entsprechend stärker ausfallen kann.

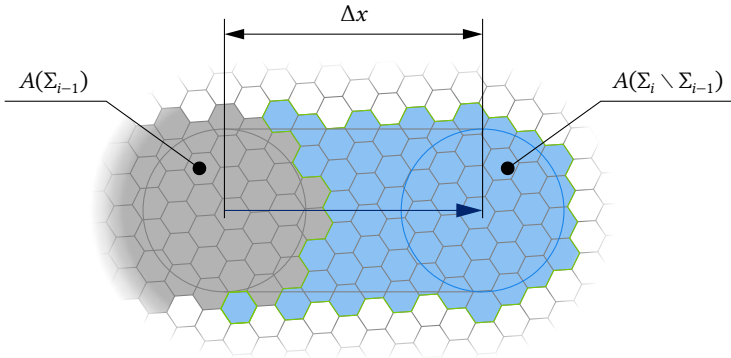


Abb. 3.5.: Bestimmung der sequentiellen Differenzfläche bei diskreter Schrittweite in Bahnkoordinaten

Diese Schwankungen in der Bahnbreite aufgrund der Diskretisierung führen grundsätzlich zu einem Modellfehler. Während eines Inkrements Δx_i beträgt beispielsweise bei linearem Verlauf der Bahnbreite das tatsächliche Volumen

$$dV_i = h \, dx_i \frac{b_i + b_{i-1}}{2}. \quad (3.14)$$

Eine noch stärkere Abweichung ist bei gekrümmten Pfaden zu erwarten, wo das inkrementelle Volumen einem Ringabschnitt entspricht. Aufgrund dieser Defizite ist ein möglichst geringes Δx zu wählen. Der Modellfehler kann als Abweichung des Füllvolumens angegeben werden:

$$err_Q = 1 - \frac{1}{V_F} \int Q_2 \, dt. \quad (3.15)$$

Eine näher am Prozess liegende, mit größerem zeitlichen Betrachtungsraum einhergehende Modellierung von dV/dt ergibt sich aus der Beschreibung der Änderung von Σ . In Abb. 3.5 ist die Bestimmung der sequentiellen Änderung schematisch dargestellt. Zur Befüllung der inkrementellen Volumina muss entsprechend jeweils ein abschnittsweiser, mittlerer Volumenstrom aufgebracht werden:

$$\text{Modell 3:} \quad Q_{3,i} = \frac{\Delta V_i}{\Delta t_i} = h \frac{A(\Sigma_i \setminus \Sigma_{i-1})}{\Delta t_i} \quad (3.16)$$

Das Modell ist global exakt, das heißt unabhängig von Bahn, Düsen und Wellen folgt aus dem Integral von $Q_{2,i}$ über die gesamte Prozesszeit das geforderte Füllvolumen. Kritisch ist hingegen die Wahl einer geeigneten Schrittweite. Die

minimal zu wählende Zeitspanne Δt entspricht der positionsabhängigen, notwendigen Dauer zur Bewegung der Düse um Δx_p , bei der sich ein neues Σ ergibt. Bei dieser minimalen Schrittweite können aufgrund des unsteten Verhaltens von dV_Σ/dt jedoch zu starke Schwankungen im Fördervolumen auftreten.

3.1.4. Implementierung des Modells in einer Simulationsumgebung

Anhand der Modellierung in Abschnitt 3.1.3 konnte bereits eine theoretische Diskussion des Einflusses von Wabengeometrie, Düsengeometrie und Werkzeugbewegung auf das notwendige Fördervolumen durchgeführt werden. Eine weitere Konkretisierung ist mit der Simulation von β und Σ möglich. Die umgesetzten Konzepte und Algorithmen werden in diesem Abschnitt vorgestellt.

Hexagonale Koordinaten Die Beschreibung von Σ lässt sich für hexagonale sowie überexpandierte Waben besonders effizient in *hexagonalen Koordinaten* realisieren. Mathematisch handelt es sich hierbei um einen Halbraum, der sich durch den Schnitt von \mathbb{R}^3 mit der Hyperebene $x_1 + x_2 + x_3 = 0$ ergibt. Das Prinzip ist in Abb. 3.6 auf der nächsten Seite veranschaulicht. Bei der Angabe der Koordinaten kann zwischen *kubischer* ($\circ\mathbf{x}$) oder *axialer* ($\sphericalangle\mathbf{x}$) Notation unterschieden werden:

$$\circ\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3], \quad \sphericalangle\mathbf{x} = [x_1, x_3], \quad (3.17)$$

Die reduzierte Schreibweise $\sphericalangle\mathbf{x}$ eignet sich zur Speicherung von Daten eines Wabenfeldes in einer zweidimensionalen Matrix, während mathematische Operationen mit $\circ\mathbf{x}$ durchgeführt werden. Das gleichmäßige Hexagon der Größe $s = 1$ stellt ein Permutaeder P_2 dar, die Mittelpunkte liegen bei $\bullet\mathbf{x} \equiv \circ\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^3$.

In der kubischen Notation können eine Reihe komparativer Funktionen einfach implementiert werden. Die Zuordnung eines beliebigen Punktes in kubischer Notation zu einem Hexagon kann nach Algorithmus 3.1 auf der nächsten Seite bestimmt werden. Bei der Parkettierung (auch Tessellation) ordnen sich die Hexagone mit steigendem Abstand wieder in Hexagonen an (vgl. Abb. 3.6). Die Zuordnung eines Hexagons zu einem solchen „Ring“ berechnet sich aus der Hälfte der Summennorm (auch 1-Norm) der Koordinaten. Daraus definieren wir die *kubische Distanz* δ_\circ zu:

$$\delta_\circ = \|\circ\mathbf{x}_i - \circ\mathbf{x}_j\|_1 / 2 \quad (3.18)$$

Eine weitere relationale Eigenschaft ist die Zuordnung einer Richtung zu einer der sechs Kanten, beziehungsweise einer hexagonalen Hauptrichtung. Im Folgenden wird dies als *kubischer Winkel* α_\circ bezeichnet. Ein mögliches Verfahren

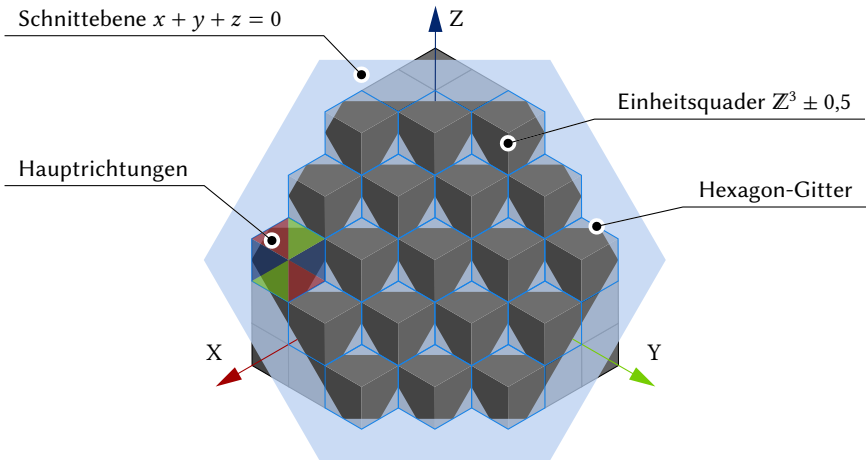


Abb. 3.6.: Prinzip der hexagonalen Koordinaten als Halbraum aus \mathbb{R}^3

Algorithmus 3.1 : Zuordnung kubisch notierter Koordinaten zum beinhaltenden Hexagon

input : $\circ \mathbf{x}$
output : $\bullet \mathbf{x}$

- 1 $\bullet \mathbf{x} \leftarrow \text{round}(\circ \mathbf{x})$ // Runde alle Koordinaten
- 2 $\Delta \mathbf{x} \leftarrow \text{abs}(\bullet \mathbf{x} - \circ \mathbf{x})$ // Berechne absolute Rundungsdifferenzen
- 3 $j \leftarrow (i, j) \in \{1, 2, 3\}^2 : i \neq j, \Delta x_j \geq \Delta x_i$ // Finde größte Differenz
- 4 $\bullet \mathbf{x}_{\bullet j} \leftarrow -\sum \bullet \mathbf{x}_{i \neq j}$ // Ersetze Koordinate der größten Differenz

zur Bestimmung ist in Algorithmus 3.2 auf der nächsten Seite dargestellt. Dabei werden paarweise Koordinatendifferenzen berechnet ($x_2 - x_1, x_3 - x_2, x_1 - x_3$). Aus dem maximalen Betrag folgt die Achse, aus dem Vorzeichen die Richtung.

Koordinatentransformation Über die Transformation von Kernkoordinaten in hexagonale Koordinaten kann eine schnelle Zuordnung zu einzelnen Waben realisiert werden. Entsprechend der Konventionen (vgl. Abschnitt 3.1.1) wird die Simulation auf \mathbb{R}^2 beschränkt. Über die Anwendung einer affinen Transformation

Algorithmus 3.2 : Bestimmung der hexagonalen Hauptrichtung eines Punktes in kubischer Notation

input : $\circ_{\mathbf{x}}$
output : $\alpha_{\circ} \in \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$

```

1  $\Delta \mathbf{x} \leftarrow [x_2 - x_1, x_3 - x_2, x_1 - x_3]$  // Berechne paarweise Differenzen
2 if  $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{0}$  then
3   |  $\alpha_{\circ} \leftarrow 0$  // Keine Richtung für Mittelpunkte
4 else
5   |  $j \leftarrow (i, j) \in \{1, 2, 3\}^2 : i \neq j, \text{abs}(\Delta x_j) \geq \text{abs}(\Delta x_i)$  // Finde größte
   |   Differenz
6   |  $\alpha_{\circ} \leftarrow \text{sign}(\Delta x_j) \cdot j$  // Winkel aus Vorzeichen und Index
7 end
```

werden Abweichungen der Zellformen vom idealen Sechseck mit $s = 1$ abgebildet. Die Transformationskette lautet entsprechend:

$$\circ_{\mathbf{x}} = \underbrace{\mathbb{K}_{\circ}^{\mathbf{T}} \mathbb{K}_{\mathbf{x}}}_{\text{Hex-Halbraum}} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/3 & -1/3 \\ -\sqrt{3}/3 & -1/3 \\ 0 & 2/3 \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} s_1 & h_2 \\ h_1 & s_2 \end{bmatrix}^{-1}}_{\text{Wabengeometrie}} \mathbb{K}_{\mathbf{x}}, \quad (3.19)$$

mit den Skalierungsfaktoren s_1, s_2 und Scherungsfaktoren h_1, h_2 zur Beschreibung der Wabengeometrie. Für eine hexagonale Wabe mit $w = 3,2 \text{ mm}$ gilt etwa $s_1 = s_2 = 3,2/\sqrt{3}, h_1 = h_2 = 0$.

Düsengeometrie Im Rahmen der Simulation werden Düsenaustrittsflächen A_D als Polygone beschrieben. Dies erlaubt ein allgemeines Vorgehen für beliebige Geometrien, kann jedoch bei grober Rasterung zu Ungenauigkeiten führen. Die Fläche kann aus mehreren Polygonen bestehen. Über die Reihenfolge der Eckpunkte ist die Fläche eines Polygons dabei additiv oder subtraktiv definiert. Hier wird die gängige Konvention übernommen, dass eine Anordnung entgegen dem Uhrzeigersinn eine positive beziehungsweise im Uhrzeigersinn eine negative Fläche ergibt.

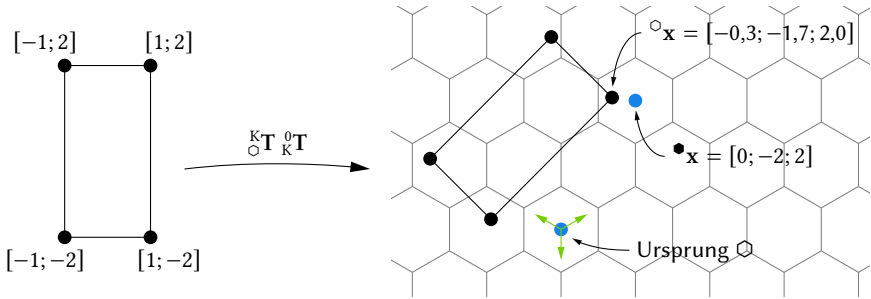


Abb. 3.7.: Erster Schritt zur Simulation der Überlappung: Transformation in hexagonale Koordinaten

Die Lage der Düse wird mit einem Verschiebungsvektor \mathbf{t} und einem Rotationswinkel α beschrieben. Ein Polygon \mathbf{P} mit n Eckpunkten kann in homogenen Koordinaten mit einer linearen Abbildung transformiert werden:

$$\mathbf{K}\mathbf{P} = \begin{matrix} \circlearrowleft \\ \mathbf{T} \\ \circlearrowright \end{matrix} \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & t_1 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & t_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,n} & x_{1,1} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,n} & x_{2,1} \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Simulation der Überlappung Die Berechnung von β und Σ folgt einem festen Schema. Zunächst werden die Punkte aller Düsen-Polygone mit $\begin{matrix} \circlearrowleft \\ \mathbf{T} \\ \circlearrowright \end{matrix}$ verschoben und rotiert, mit $\begin{matrix} \mathbf{K} \\ \circlearrowleft \mathbf{T} \\ \circlearrowright \mathbf{K} \end{matrix}$ in hexagonale Koordinaten überführt und mit `CubeRound()` (vgl. Algorithmus 3.1) den einzelnen Hexagonen zugeordnet. Der erste Schritt ist in Abb. 3.7 skizziert.

Für benachbarte Polygonpunkte, welche in verschiedenen Sechsecken liegen, müssen die Schnittpunkte mit allen unter der Verbindungsgeraden liegenden Zellen mit `GetHexLineIntersections()` berechnet werden. Das Vorgehen dazu ist in Abb. 3.8 auf der nächsten Seite dargestellt. Dazu werden $n = \text{round}(2\delta_{\circlearrowleft}) - 1$ äquidistante Zwischenpunkte interpoliert und erneut den Hexagonen zugeordnet. Über die Nachbarschaftsrichtungen $\alpha_{\circlearrowleft i} = \text{CubeGetDir}(\bullet \mathbf{x}_{i+1} - \bullet \mathbf{x}_i)$ werden jeweils die zu schneidenden Kanten ausgewählt. Die Schnittpunkte berechnen sich aus den Kreuzprodukten der Geraden in homogener Vektornotation. In einigen Fällen werden trotz Interpolation der Zwischenpunkte in Sub-Koordinaten nicht alle gekreuzten Hexagone entdeckt. Zur Kontrolle wird deshalb auch der kubische Winkel der Schnittpunkte bestimmt. Entspricht dieser nicht der erwarteten Nachbarschaftsrichtung, wird ein zusätzliches Hexagon eingefügt und der Vorgang wiederholt.

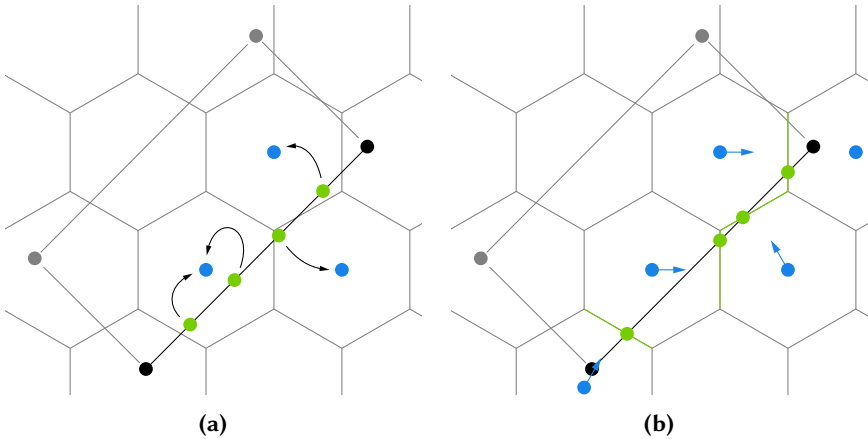


Abb. 3.8.: Zweiter Schritt zur Simulation der Überlappung: Bestimmung der Schnittpunkte mit überlappten Hexagonen; (a) Interpolation von Zwischenpunkten und hexagonale Zuordnung, (b) Schnittpunkte mit Kanten zwischen benachbarten Hexagonen

Im nächsten Schritt wird über alle gekreuzten Hexagone iteriert und die Überlappung berechnet. Dazu werden in `GetHexPolyOverlaps()` aus den kubischen Winkeln aufeinanderfolgender Schnittpunkte bestimmt, welche Eckpunkte des jeweiligen Sechsecks aufgenommen werden müssen, um das Polygon des geschnittenen Hexagons darzustellen. Dessen Fläche in Relation zur ungeschnittenen Fläche ergibt entsprechend die Überlappung. In Abb. 3.9 auf der nächsten Seite ist das Schema visualisiert. In einigen Fällen ergibt sich $\beta = 0$ (Schnittgerade liegt auf einer Sechsecksseite) oder $\beta < 0$ (fehlerhafte Zuordnung durch Interpolationspunkte nahe einem Eckpunkt). Hier wird stattdessen die Überlappung beim in Richtung der Schnittgerade liegenden Nachbarn zu $\beta_{+1} = 1 - \beta$ gesetzt.

Die Speicherung der Daten in einer zweidimensionalen Matrix $\beta_{k,l}$ ermöglicht den Einsatz von Algorithmen der Bildverarbeitung zum Ausfüllen der Zellen mit $\beta = 1$. Die vollständige Zuordnung lautet dabei:

$$k, l \in \mathbb{N} : k = k_0 + x_3, l = l_0 + x_1 + \text{floor}(x_1/2) \Rightarrow \beta_{k,l} = \beta(\bullet \mathbf{x}) \quad (3.21)$$

mit den jeweiligen Index-Offsets k_0, l_0 .

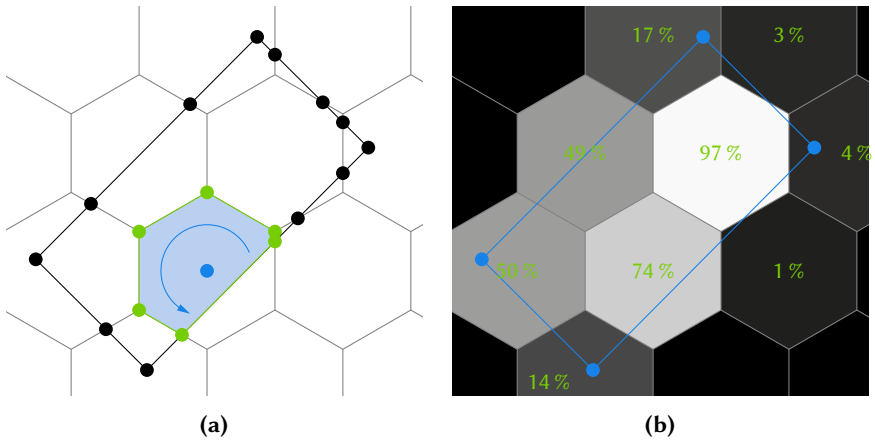


Abb. 3.9.: Dritter Schritt zur Simulation der Überlappung: Bestimmung der Schnitt-Polygone und deren Fläche; (a) Aufnahme eingeschlossener Hexagon-Eckpunkte, (b) relativer Flächeninhalt

3.1.5. Simulation und Auswertung einer geometrischen Parameterstudie

Die Simulation des geometrischen Modells soll hier im Rahmen einer Parameterstudie zur Düsengeometrie und Werkzeugbewegung vorgestellt und validiert werden. Dabei werden zunächst grundlegende Formen (vgl. Abb. 3.2, S. 59) und Pfade untersucht. Die verschiedenen Geometrieparameter sind in Tabelle 3.1 auf der nächsten Seite angegeben. Als Wabengeometrie werden die drei gängigsten Varianten untersucht: zwei hexagonale Waben mit $w = 3,2$ und $4,8$ mm sowie eine überexpandierte Wabe mit $w_0 = 4,8$ mm.

Punkt dosierung Bei der Bestimmung des Fördervolumens entsprechend dem zweiten Modell nach Gleichung (3.12) tritt keine Relativbewegung zwischen Waben und Düse auf. Die Strategie ist aufgrund der notwendigen hohen Dynamik bei den Umsetzbewegungen für die Praxis wenig relevant, liefert in der theoretischen Betrachtung jedoch wertvolle Kennzahlen zur geometrischen Konstellation. Zur Untersuchung werden zufällige Posen der Düse generiert und jeweils β und Σ berechnet. Dies wird so lange wiederholt, bis die Änderungen der Mittelwerte unter einen Schwellenwert fallen. Bei den gewählten Konstellationen resultiert dies in etwa 200 – 500 Iterationen.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Tabelle 3.2 auf Seite 72 dargestellt. Interessant sind hierbei insbesondere die jeweiligen Standardabweichungen, da

Tab. 3.1.: Parameter der simulierten Düsengeometrien

Ausgefüllte Geometrien			Schmalbandige Geometrien			
<i>Quadrat</i>	A	A^2	<i>Linie</i>	A	B	$A \times B$
Q1	8	64	L1	8	2	16
Q2	15	225	L2	15	1	15
Q3	20	400	L3	15	5	75
			L4	20	5	100
<i>Kreis</i>	D	$\frac{\pi}{4}D^2$	<i>Ring</i>	D_a	D_i	$\frac{\pi}{4}(D_a^2 - D_i^2)$
K1	8	50,3	R1	8	6	22,0
K2	15	176,7	R2	15	14	22,8
K3	20	314,2	R3	15	10	98,2
			R4	20	15	137,4

sie die im Prozess zu erwartenden, stochastischen Schwankungen widerspiegeln. Grundsätzlich steigt die Unsicherheit bei Σ mit Größe sowie Anisotropie der Wabe an. Die Ergebnisse bei der Variation der Überlappung β unterliegen keinem eindeutigen Trend. Unter Verwendung schmalbandiger Geometrien (wie Linie und Ring) kann lediglich eine leichte Abnahme bei steigender Wabengröße angenommen werden. Wie in Abschnitt 3.1.3 vermutet, kann die Unsicherheit bei diesen Düsengeometrien durchweg reduziert werden. Besonders stark ist dies bei $L2$ und $R2$ zu sehen. Die Breite im Strömungsquerschnitt von jeweils einem Millimeter ist jedoch sehr gering. Ohne rheologische Untersuchungen ist nicht gewiss, ob der Strömungswiderstand dabei zu stark ansteigt.

Bahndosierung Zur Analyse der Richtungsabhängigkeit der idealen Bahnbreite muss diese über einen geraden Pfad bei verschiedenen Bahnwinkeln gemittelt werden. Dies ist exemplarisch in Abb. 3.10 auf Seite 73 für eine kreisförmige Düse mit $D = 10$ mm bei hexagonaler Wabe mit $w = 3,2$ mm dargestellt. In dieser Konfiguration liegt die Differenz zwischen Bahnbreite und Düsenbreite offensichtlich bei $[1, 2/\sqrt{3}]w$.

Zur weiteren Untersuchung von Σ , β , ω sowie der vorhergesagten, notwendigen Volumenströme wird die Bewegung der Düse in verschiedenen Pfaden simuliert. Analysiert werden gerade Bahnen sowie Kreisbahnen. Die Abstände der Punkte in Pfadkoordinaten sind jeweils $dx = 0,1$ mm bei Pfadlängen von $l_p = 315$ mm. Die entsprechenden Parameter sind in Tabelle 3.3 auf Seite 73 zu-

Tab. 3.2.: Ergebnisse der Simulation der Punktdosierung mit verschiedenen Waben- und Düsengeometrien bei $n > 200$ zufälligen Werkzeugposen

	HEX-3,2		HEX-4,8		OX-4,8	
	V_{Σ} [mm ²]	β [%]	V_{Σ} [mm ²]	β [%]	V_{Σ} [mm ²]	β [%]
<i>Rechteck</i>						
Q1	129 ± 7	50 ± 38	169 ± 18	38 ± 35	167 ± 16	39 ± 33
Q2	340 ± 14	66 ± 38	400 ± 19	56 ± 39	407 ± 25	56 ± 38
Q3	549 ± 17	73 ± 36	630 ± 21	64 ± 38	638 ± 22	63 ± 38
<i>Linie</i>						
L1	60 ± 6	27 ± 24	86 ± 16	19 ± 17	86 ± 16	19 ± 17
L2	81 ± 11	19 ± 14	122 ± 21	13 ± 9	119 ± 28	13 ± 10
L3	155 ± 9	49 ± 37	199 ± 22	38 ± 32	201 ± 23	38 ± 31
L4	197 ± 10	51 ± 37	252 ± 24	40 ± 33	252 ± 32	40 ± 32
<i>Kreis</i>						
K1	103 ± 5	49 ± 38	135 ± 13	37 ± 35	134 ± 11	37 ± 32
K2	267 ± 11	66 ± 38	319 ± 18	55 ± 38	322 ± 14	55 ± 37
K3	431 ± 14	73 ± 36	496 ± 14	63 ± 38	499 ± 29	62 ± 38
<i>Ring</i>						
R1	97 ± 9	23 ± 14	135 ± 13	16 ± 10	134 ± 11	22 ± 22
R2	183 ± 20	13 ± 6	261 ± 23	9 ± 4	274 ± 17	8 ± 5
R3	236 ± 11	41 ± 29	302 ± 18	33 ± 22	312 ± 17	32 ± 23
R4	330 ± 15	42 ± 29	424 ± 21	32 ± 22	441 ± 19	31 ± 23

sammengefasst. Insgesamt ergeben sich acht verschiedene Pfade. Zusammen mit den in Tabelle 3.1 gelisteten Waben- und Düsengeometrien umfasst der vollständige Simulationsplan 336 Konfigurationen.

Bei der Simulation von ω wird eine Vorschubgeschwindigkeit v_p benötigt. Der maximale Vorschub ergibt sich wiederum aus dem tatsächlichen Σ , das in der Praxis a priori nicht bekannt ist. Ein praxistauglicher Ansatz ist etwa die Schätzung der mittleren Geschwindigkeit v_0^* aus der Düsenbreite und einem zu erreichenden Volumenstrom Q_0^* . Hierbei wird die reale Bahnbreite nach Gleichung (3.13)

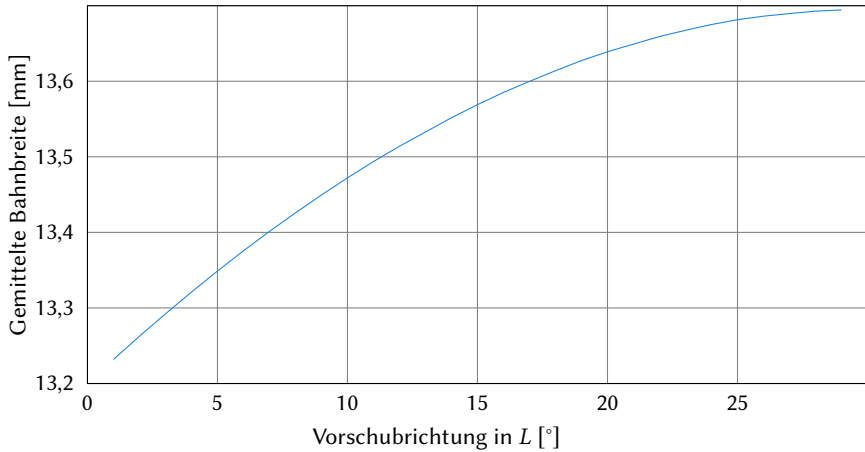


Abb. 3.10.: Abhängigkeit der Bahnbreite von der Vorschubrichtung bei $D = 10$ mm und HEX-3,2; modifizierte Darstellung nach [46]

Tab. 3.3.: Parameter der simulierten Pfade

Allgemeine Parameter:	gesamte Pfadlänge $l_p = 315$ mm Punktabstände $dx = 0,1$ mm
Gerade Bahn:	Vorschubrichtung in L: $\alpha_{pL} = 0; 26,6; 34,0; 41,3; 75,3$ und $82,6^\circ$
Kreisbahn:	Krümmungsradius: $R_p = 100$ und 200 mm

vernachlässigt, wodurch entsprechend reduzierte Volumenströme eingesetzt werden müssen. Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf eine Annahme von $Q_0^* = 200 \text{ ml min}^{-1}$. Zur Berechnung der tatsächlichen, durchschnittlichen, maximalen Geschwindigkeit v_{max}^* wird ein maximaler Volumenstrom von $Q_{max}^* = 300 \text{ ml min}^{-1}$ angenommen. Es gilt:

$$v_{max}^* = \frac{l_p Q_{max}^*}{V_F}, \quad (3.22)$$

wobei das Zellvolumen V_F in der Simulation bestimmt wird. Die Abweichung der einfachen Schätzung zur Maximalgeschwindigkeit lautet somit

$$err_v = 1 - v_0^*/v_{max}^*. \quad (3.23)$$

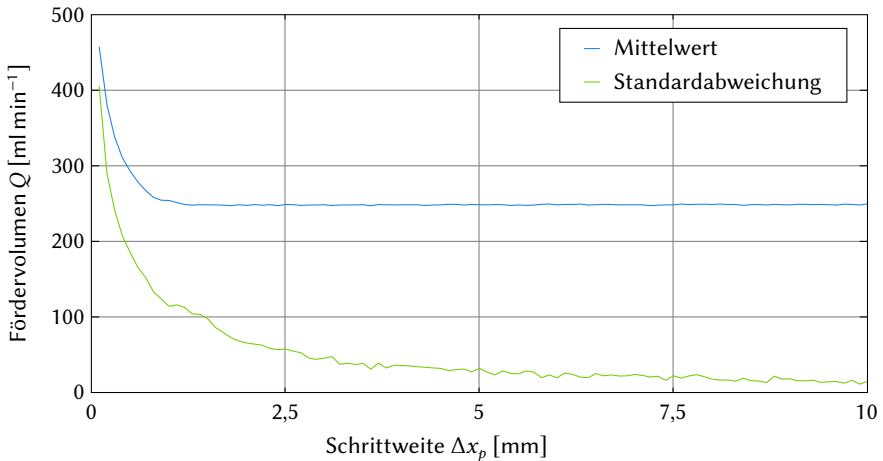


Abb. 3.11.: Abhängigkeit der Modellierung des Fördervolumens anhand des sequentiellen Differenzvolumens von der Schrittweite

Für die Modellierung des Fördervolumens nach Modell 3 entsprechend Gleichung (3.16) ist ein fester Betrachtungsraum von $\Delta t = \Delta x_p / v_0$ zu wählen. Ähnlich wie bei der Bahnweite sind die Ergebnisse abhängig von Vorschubrichtung und Wabengeometrie. In Abb. 3.11 ist das über die Pfadlänge $l_p = 315$ mm gemittelte Fördervolumen sowie dessen Standardabweichung bei verschiedenen Schrittweiten dargestellt. Um den Einfluss der Richtung in der Analyse auszuklammern, wird die Kreisbahn mit $R_p = 200$ mm gewählt. Als Wabengeometrie ist das gleichmäßige Hexagon mit $w = 3,2$ mm simuliert. Es zeigt sich, dass die Schrittweite möglichst über der maximalen Zellausdehnung liegen sollte. Mit einer Schrittweite größer als die maximale Wabenausdehnung ist garantiert, dass in jedem Inkrement eine Änderung im Füllvolumen stattfindet: $\Delta V_i > 0$. Zu geringe Werte für Δx resultieren in starken Schwankungen beim Fördervolumen. Für die weiteren Simulationen wird $\Delta x_p = 10$ mm gewählt.

Aus den gesamten Datensätzen lassen sich einige allgemeine Schlüsse ziehen. Grundsätzlich unterscheiden sich die Ergebnisse bei den gekrümmten Pfaden kaum. Lediglich bei rechteckigen Düsen folgt ein reziprok zum Bahnradius zunehmender Fehler bei der Bestimmung des Fördervolumens aus der Bahnweite. Entsprechend der Richtungsabhängigkeit von Sigma (vgl. Abb. 3.10) ist eine Mittlung der Ergebnisse bei geraden Pfaden sinnvoll. Eine größere Wabengeometrie wirkt sich im Wesentlichen auf die Streuung der Daten aus, scheint jedoch ansonsten kaum Einfluss zu haben. Eine entsprechend reduzierte beziehungsweise

Tab. 3.4.: Ergebnisse der Simulation der Bahndosierung mit verschiedenen Düsengeometrien bei geraden und gekrümmten Bahnen sowie hexagonaler Wabe mit $w = 3,2$ mm

	Q_1 [ml min ⁻¹]	Q_2 [ml min ⁻¹]	err_Q [%]	err_v [%]	ω [ms]	t_{fill} [ms]
<i>gemittelt über gerade Bahnen verschiedener Vorschubrichtung</i>						
Q2	245 ± 33	246 ± 21	0,7	22	542 ± 219	821 ± 27
L2	245 ± 30	246 ± 19	0,5	18	37 ± 15	192 ± 27
K2	242 ± 45	244 ± 43	1,9	20	418 ± 239	640 ± 198
R2	242 ± 45	250 ± 34	1,9	18	54 ± 22	435 ± 135
<i>Gekrümmte Bahn mit $R_p = 200$ mm</i>						
Q2	253 ± 31	264 ± 20	4,2	16	504 ± 229	765 ± 131
L2	245 ± 27	235 ± 24	-3,6	22	38 ± 15	202 ± 30
K2	243 ± 36	241 ± 41	0,4	21	422 ± 237	645 ± 194
R2	243 ± 36	248 ± 32	0,4	18	54 ± 22	437 ± 132

zusammengefasste Darstellung der Simulationsergebnisse ist in den Tabellen 3.4 und 3.5 gegeben. Der vollständige Datensatz ist im Anhang dargestellt.

Der Fehler err_v , der geschätzten Geschwindigkeit hängt wesentlich von der Düsengröße ab. Bei den Geometrien Q1, L1, K1 und R1 beträgt die gemittelte Abweichung -2 %; bei Q2, L2, K2 und R2 16 %; bei Q3, L4, K3 und R4 22 %.

Bei der Modellierung des Förderstroms zeigt sich trotz der geringen Schrittweite von $dx = 0,1$ mm ein großer Fehler des ersten Modells von bis zu $err_Q = 6,7$ %. Besonders starke Abweichungen sind bei überexpandierten Waben zu beobachten. Hier können Fehler von $err_Q > 10$ % bei allen Düsengeometrien auftreten. Bei hexagonalen Waben liegt der Fehler meist unter einem Prozent, wobei gekrümmte Bahnen insbesondere bei rechteckigen Düsengeometrien als kritisch zu bewerten sind. In Abb. 3.12 auf der nächsten Seite sind die simulierten Fördervolumen exemplarisch bei hexagonaler Wabe ($w = 3,2$ mm), kreisförmiger Düsengeometrie (K2) und gekrümmter Bahn ($R = 200$ mm) gegenübergestellt. Hier zeigt sich das glättende Verhalten des zweiten Modells, das durch größere Δx weiter verstärkt werden kann.

Neben der Überlappungszeit ω ist auch die gemittelte Einfüllzeit t_{fill} angegeben. Die Einfüllzeit beschreibt die gesamte Zeit je Zelle, in welcher sich die Düse mit

Tab. 3.5.: Ergebnisse der Simulation der Bahndosierung mit verschiedenen Düsengeometrien bei geraden und gekrümmten Bahnen sowie überexpandierter Wabe mit $w_0 = 4,8$ mm

	Q_1 [ml min ⁻¹]	Q_2 [ml min ⁻¹]	err_Q [%]	err_v [%]	ω [ms]	t_{fill} [ms]
<i>gemittelt über gerade Bahnen verschiedener Vorschubrichtung</i>						
Q2	156 ± 44	169 ± 25	4,8	20	347 ± 152	630 ± 46
L2	157 ± 42	170 ± 21	4,5	16	23 ± 10	210 ± 47
K2	155 ± 46	167 ± 32	4,2	19	271 ± 160	499 ± 149
R2	155 ± 46	168 ± 32	4,2	17	35 ± 15	422 ± 105
<i>Gekrümmte Bahn mit $R_p = 200$ mm</i>						
Q2	257 ± 74	267 ± 48	4,1	15	495 ± 259	908 ± 150
L2	255 ± 72	263 ± 43	3,6	13	34 ± 17	269 ± 96
K2	255 ± 70	264 ± 67	6,7	13	382 ± 242	699 ± 217
R2	255 ± 70	267 ± 63	6,7	12	50 ± 22	593 ± 172

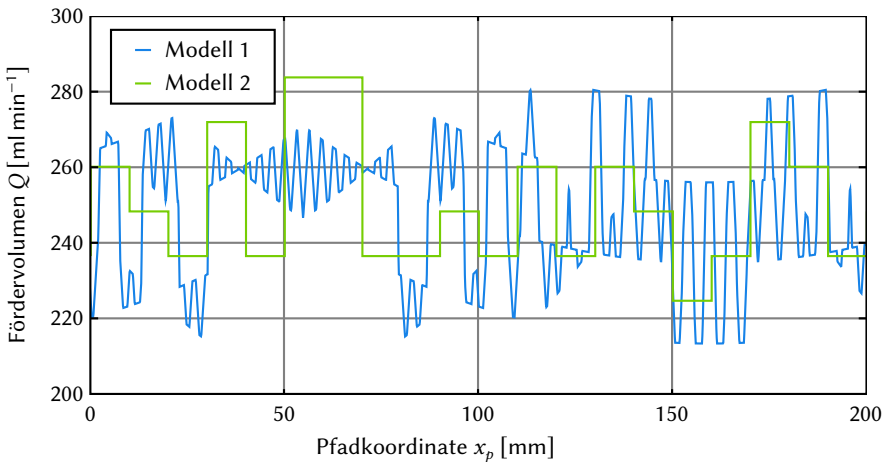


Abb. 3.12.: Exemplarischer Vergleich der Modelle zur Bestimmung des Förderolumens bei hexagonaler Wabe ($w = 3,2$ mm), kreisförmiger Düsengeometrie (K2) und gekrümmter Bahn ($R = 200$ mm)

$\beta > 0$ oberhalb einer Zelle befindet. Insbesondere bei der Betrachtung der Standardabweichungen zeigt sich eine deutliche Wirkung des Einsatzes schmalbandiger Düsengeometrien. Die durchschnittlich zur Befüllung einer Zelle verfügbare Zeit nimmt zwar stark ab, jedoch ist die Verteilung wesentlich homogener. Noch signifikanter ist die Variation von ω , welche gegenüber ausgefüllten Geometrien um eine Größenordnung geringer ausfällt.

Die Verteilung von $1 - \|\omega\|$ über die Einfüllfläche ist in Abb. 3.13 auf der nächsten Seite für verschiedene Düsengeometrien dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Werte der Überlappungszeit innerhalb einer Konfiguration normiert, sodass $\|\omega\| \in [0, 1]$. Helle Bereiche im Falschfarbenbild weisen somit die geringsten Überlappungszeiten auf, was wiederum die Wahrscheinlichkeit einer vollständigen Befüllung reduziert. Wie zu erwarten, treten bei allen Einfüllflächen am Rand die geringsten Überlappungszeiten auf. Am stärksten ist der Effekt bei der kreisförmigen Düse. Die beiden rechteckigen Geometrien weisen in dieser Hinsicht nur geringe Unterschiede auf. Ein auffällig abweichender Verlauf tritt bei der ringförmigen Düse auf. Hier kehrt sich der Effekt zudem teilweise um: in einem randnahen Bereich sind die höchsten kumulativen Überlappungen, welche zur Bahnmitte hin wieder abnehmen.

3.1.6. Diskussion der Ergebnisse

Anhand der geometrischen Modellierung des Prozesses können eine Reihe relevanter Schlüsse gezogen werden. Die erforderlichen Fördervolumen sind in hohem Maße von Form und relativer Lage der Waben und der Düse abhängig. Trotz Annahme idealer Wabengeometrien folgt eine breite Streuung der Simulationsergebnisse. Im realen Prozess kann die Ausrichtung des Wabenkerns je nach Spezifikation und Legeprozess auf einige Grad genau als bekannt angenommen werden. Hierüber lässt sich zumindest teilweise das anisotrope Verhalten ausgleichen. Die reale Wabenstruktur ist jedoch aufgrund der hohen Formflexibilität und Toleranzen nicht vorhersagbar. Solange sie nicht sensorisch erfasst wird, lassen sich nur stochastische Aussagen treffen.

Eine erste Schätzung des Fördervolumens oder respektive des Vorschubs ist über das Modell nach Gleichung (3.13) möglich. Dabei können Kennfelder der gemittelten Differenzen von Bahnbreite zu Düsenbreite (vgl. Abb. 3.10, S. 73) eingesetzt werden. Diese sind mit den hier vorgestellten Simulationswerkzeugen für verschiedene geometrische Kombinationen zu erstellen. Aufgrund der Vereinfachungen des Modells und den daraus folgenden Bestimmungsfehlern wird jedoch nicht das erforderliche Fördervolumen erreicht. Im Prozess kann sich dies etwa in Form von Unterdosierung im Randbereich äußern.

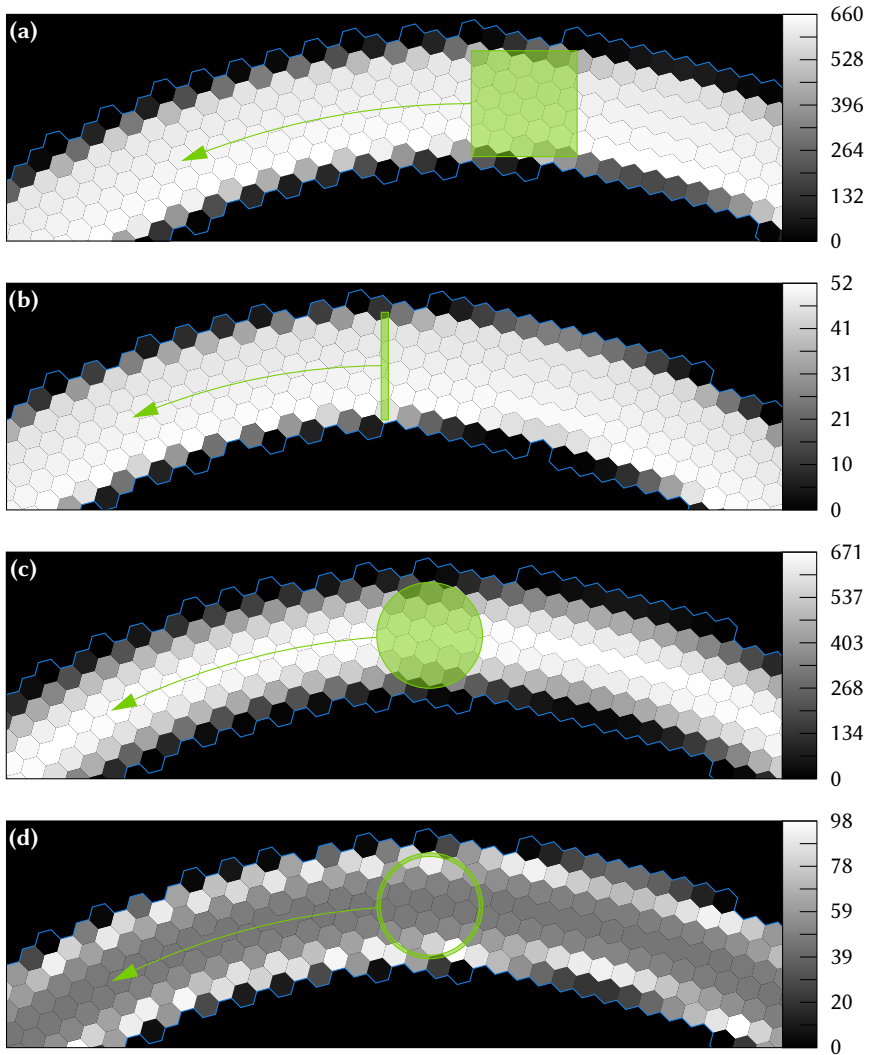


Abb. 3.13.: Verteilung der Überlappungszeit über die Einfüllfläche bei verschiedenen Düsengeometrien; (a) Quadrat Q2, (b) Linie L2, (c) Kreis K2, (d) Ring R2

Das zweite Modell entsprechend Gleichung (3.16) berechnet das Fördervolumen direkt aus der Anzahl der in einem Zeitintervall zu befüllenden Zellen. Somit ist es zwar global exakt, bringt jedoch unabdingbar eine zeitliche Glättung ein. Da grundsätzlich mit einem prozessspezifischen Ausgleichsvermögen zu rechnen ist, kann auch eine Glättung des Fördervolumens als akzeptabel angenommen werden. Welches Zeitfenster hierbei zu tolerieren ist, hängt von verschiedenen Prozesskennwerten ab und ist entsprechend im Einzelfall nachzuweisen.

Unabhängig von der tatsächlichen Bestimmung des Fördervolumens ist mit der Simulation von lokal zu befüllenden Zellen Σ , Überlappung β und Überlappungszeit ω ein wertvolles Werkzeug zur Entwicklung von Düsengeometrien geschaffen. Welches Strömungsfeld sich tatsächlich einstellt, ist aufgrund der komplexen Rheologie der KFM schwer vorhersagbar. Unter der Hypothese, dass sich bei starker Variation der Überlappung kein gleichmäßiges Strömungsbild ergeben kann, ist auch mit mangelhafter Befüllung zu rechnen. Abhilfe können etwa schmalbandige Düsengeometrien liefern. Diese weisen in der Simulation deutlich reduzierte Standardabweichungen bei β und ω auf. Die Potenziale einer gleichmäßigen Befüllung sowie einer reduzierten Komplexität der Prozessplanung vereinen sich dabei in ringförmigen Geometrien.

Die Ergebnisse der geometrischen Analyse liefern relevante Beiträge zur Entwicklung des Prozesses sowie der Optimierung der in Abschnitt 2.3.3 diskutierten Zielgrößen. Bei der Wahl der Düsengeometrie scheiden quadratische Querschnitte aus. Schmale (linienförmige) Rechtecke können zwar die randnahe Befüllung erleichtern, wirken sich jedoch negativ auf die Flexibilität aus: Die Pfadplanung muss die asymmetrische Geometrie berücksichtigen und die Handhabung eine Rotation um die Flächennormale ermöglichen. Insgesamt sind somit kreisförmige, punktsymmetrische Querschnittsflächen zu bevorzugen. Grundsätzlich sollten stets möglichst große Querschnitte gewählt werden, um die Varianz der Überlappungszeit zu reduzieren. Bei einem Bauteil mit schmaler KFM-Bahn als Randabschluss sowie flächigen Befüllbereichen sollte entsprechend ein Werkzeugwechsel möglich sein.

Die Modelle und Simulationsergebnisse bestätigen weiterhin die Vermutung, dass eine gezielte Steuerung des Fördervolumens nicht industrietauglich ist. Bereits mit der stark vereinfachenden Annahme einer idealen, fehlerfreien Waben-geometrie sind erforderliche Volumenströme schwer vorherzusagen und stark Richtungsabhängig. Die Simulation und folgende statistische Auswertung eines geplanten Fertigungspfades kann jedoch zur Schätzung des Fördervolumens genutzt werden. Auf Basis dieses Schätzwertes ist wiederum eine Vorsteuerung der Dosierregelung möglich. Zudem ist es mit der Simulation möglich, in Abhängigkeit der Waben- und Düsengeometrie die optimale Pfadüberlappung zu

bestimmen. Die Implementierung in Matlab / GNU Octave erlaubt die Einbindung der Simulation in die Pfadplanung zur automatischen Parameteroptimierung.

3.2. Rheologisches Verhalten der KFM

Das Strömungsverhalten von syntaktischen Schäumen wie der KFM ist äußerst komplex. Zur Entwicklung der automatisierten Befüllung ist der funktionale Zusammenhang zwischen Fördervolumen und Druckabfall entlang eines Strömungsweges von besonderem Interesse. Hieraus können etwa konstruktive Anforderungen an die Leitungen abgeleitet, geeignete Förder- beziehungsweise Dosiertechniken identifiziert und Regelungskonzepte erarbeitet werden. Das Ziel der folgenden Abschnitten ist entsprechend die experimentelle Untersuchung der Rheologie der Kernfüllmasse im Bezug der Prozessentwicklung.

Das gewählte Messverfahren und die zugrundeliegenden Strömungsgleichungen sind in Abschnitt 3.2.1 vorgestellt. Hieraus leitet sich der in 3.2.2 entwickelte Versuchsplan ab. In Abschnitt 3.2.3 werden die Ergebnisse der Messungen ausgewertet und rheologische Kenngrößen abgeleitet. Die abschließende Diskussion in 3.2.4 fasst die Ergebnisse zusammen. Daraus werden die notwendigen Schlüsse für den Befüllprozess gezogen.

3.2.1. Versuchsaufbau

Zur rheologischen Analyse der Kernfüllmasse bietet sich im Rahmen dieser Arbeit die Kapillarviskosimetrie an (vgl. Abschnitt 2.4.5). Ein wesentlicher Vorteil dabei ist die Ähnlichkeit des Messverfahrens zum realen Prozess. Das Verfahren lässt sich zudem nach Bedarf in den Prozess integrieren und erlaubt so eine kontinuierliche Kontrolle der Materialparameter. Zur Analyse wird das Material in eine stationäre, voll ausgebildete, laminare Rohrströmung versetzt. Dabei wird entweder der Volumenstrom oder der Druckabfall kontrolliert und die andere Größe gemessen. Im Folgenden wird zunächst der grundsätzliche Versuchsaufbau erläutert und danach die entsprechenden Grundgleichungen vorgestellt. Das Verfahren erfordert aufgrund der inhomogenen Scherrate im Strömungsquerschnitt die Berücksichtigung zusätzlicher rheologischer Effekte. Diese werden mitsamt möglicher Kompensationsmaßnahmen im Abschluss diskutiert.

Aufbau des Kapillarviskosimeters Ein ökonomischer Versuchsaufbau lässt sich etwa mit Kolbendosierung realisieren, wo der Volumenstrom über die Kolbenbewegung bestimmt wird. Prozessnahe Messungen sind hiermit jedoch nur bedingt möglich, da beim KFM-Eintrag Volumenströme bis etwa 300 ml min^{-1}

gefordert werden. Bei maximalen Kartuschenvolumina von etwa 920 ml ist die Messzeit gegebenenfalls nicht ausreichend, um den Einfluss der Thixotropie ausschließen zu können. Somit wird hier ein kontinuierliches Fördersystem eingesetzt (eine Exzentrerschneckenpumpe vom Modell 3MPV18 der Firma ViscoTec mit einem Entleersystem für 20 l-Eimer). Es eignet sich auch für weitere Untersuchungen im Rahmen der Prozessdemonstration. Weitergehende Spezifikationen und Informationen zur Wahl des Dosiersystems sind in Abschnitt 4.1.2 zu finden. Bezüglich der Viskosimetrie ist an dieser Stelle noch von Interesse, dass das Förderverfahren sehr geringe Scherbelastung einbringt und quasi schlupffrei dosiert. Somit ist der Volumenstrom mit einer Genauigkeit von $\Delta Q_F = \pm 0,1 \text{ ml min}^{-1}$ steuerbar. Als relevante Messgrößen werden der Druck sowie die Temperatur des Materials direkt vor der Kapillare erfasst. Die Kapillaren werden über ein TriClamp-Dichtungssystem angeschlossen und bestehen aus einzelnen Segmenten. Dies erlaubt Messungen bei verschiedenen Längen sowie Durchmessern.

Rheometrische Kennwerte bei der Kapillarviskosimetrie Rheologische Untersuchungen basieren im Wesentlichen auf der Diskussion der Relation zwischen der Scherrate $\dot{\gamma}$ und der Scherbelastung τ unter stationären, laminaren Bedingungen. Die Scherbelastung τ lässt sich bei einer Rohrströmung wie in Abb. 3.14 auf der nächsten Seite dargestellt aus dem Momentengleichgewicht bestimmen:

$$\tau_{rz} = \left(-\frac{\Delta p}{L} \right) \left(\frac{r}{2} \right), \quad (3.24)$$

mit der Druckdifferenz Δp , der Kapillarlänge L und dem Radius des Kontrollvolumens r . Im Gegensatz zur einfachen Couette-Strömung in konzentrischen Viskosimetern bildet sich bei der Kapillarviskosimetrie ein Geschwindigkeitsprofil $v_{F,z}$ höherer Ordnung aus. Somit ist die Scherrate mit $\dot{\gamma} = -dv_{F,z}/dr$ über den Querschnitt nicht konstant. Der allgemeine Zusammenhang zu dem Volumenstrom Q_F oder der mittleren Geschwindigkeit v_F^* lautet dabei:

$$Q_F = \pi R^2 v_F^* = 2\pi \left\{ \left(\frac{r^2}{2} v_{F,z} \right) \Big|_0^R + \int_0^R \frac{r^2}{2} \left(-\frac{dv_{F,z}}{dr} \right) dr \right\}, \quad (3.25)$$

mit dem Kapillarradius R . Die maximale Scherbelastung τ_w und Scherrate $\dot{\gamma}_w$ bilden sich dabei an der stationären Grenze (Kapillarwand, $r = R$) aus.

Unter einigen Annahmen lässt sich Gleichung (3.24) weiter vereinfachen. Für ein zeitunabhängiges Fluid und ohne Schlupf ($v_{F,z} = 0$ bei $r = R$) gilt etwa:

$$\left(-\frac{dv_{F,z}}{dr} \right)_w = \left(\frac{8v_F^*}{D} \right) \left\{ \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d \ln(8v_F^*/D)}{d \ln(\tau_w)} \right\}, \quad (3.26)$$

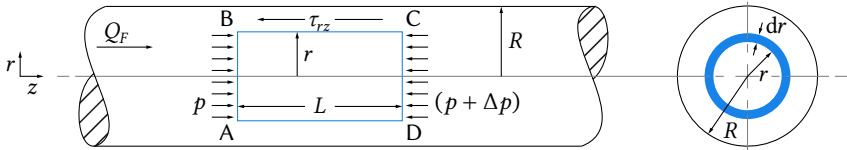


Abb. 3.14.: Schematische Darstellung der Rohrströmung, nach [15]

mit dem Kapillardurchmesser $D = R/2$. Über die Auflösung der Hagen-Poiseuille-Gleichung nach der Scherbelastung an der Rohrwand lässt sich eine Analogie zur voll ausgebildeten, stetigen, laminaren Rohrströmung newtonscher Fluide herstellen:

$$\tau_w = \mu \left(\frac{8v_F^*}{D} \right), \quad (3.27)$$

mit der scheinbaren Viskosität μ . Der Term $(8v_F^*/D)$ wird bei der Rheometrie nicht-newtonscher Fluide als nominale oder scheinbare Scherrate an der Kapillarwand $\dot{\gamma}_{wn}$ bezeichnet. Mit der Steigung n' der doppellogarithmischen Darstellung von τ_w gegenüber $\dot{\gamma}_{wn}$:

$$n' = \frac{d \ln(\tau_w)}{d \ln(8v_F^*/D)}, \quad (3.28)$$

folgt für die wahre Scherrate $\dot{\gamma}_w$ eines nicht-newtonschen Fluides:

$$\dot{\gamma}_w = \left(-\frac{dv_{F,z}}{dr} \right)_w = \left(\frac{8v_F^*}{D} \right) \left(\frac{3n' + 1}{4n'} \right) \quad (3.29)$$

Berücksichtigung von Strömungsübergängen Gegenüber den Vorteilen des einfachen und robusten Aufbaus weist die Kapillarviskosimetrie auch eine Reihe relevanter Nachteile auf. Im Wesentlichen sind dies die Inhomogenität der Strömung und die damit verbundenen Komplikationen in der rheologischen Auswertung. Auf der anderen Seite existieren dank der Vorteile umfangreiche wissenschaftliche Arbeiten zur Korrektur beziehungsweise Umrechnung der Messwerte, um die Effekte der Rohrströmung zu korrigieren. Eine umfassende Übersicht liefert Chhabra [15]. Im Folgenden werden die vorgeschlagenen Korrekturmethode erläutert und deren Notwendigkeit hinsichtlich der Rheometrie von KFM diskutiert.

Es ist technisch kaum möglich, die Druckdifferenz ausschließlich im Bereich der ausgebildeten Strömung zu messen. Üblicherweise ist ein Druckwandler vor der Kapillare und somit bei anderem Durchmesser sowie Strömungsbild positioniert. In der Fluidmechanik lassen sich diese Strömungsübergänge als Druckverluste $(-\Delta p_e)$ berücksichtigen. Zur Berechnung der Scherbelastung τ_w unter

Annahme einer vollständig ausgebildeten Strömung muss die gemessene Druckdifferenz ($-\Delta p$) somit korrigiert werden:

$$(-\Delta p_c) = (-\Delta p) - (-\Delta p_e) \quad (3.30)$$

Im Bereich der newtonschen Fluide gilt die vereinfachende Annahme, dass bei Verhältnissen von $L/D > 100$ die Druckverluste vernachlässigbar sind. Für nicht-newtonsche Fluide gibt es hier keine verlässlichen Grenzwerte. Zudem ist die Einhaltung dieser Faustregel für größere Durchmesser nicht praktikabel. Alternativ kann der Korrekturwert über den Vergleich von Messreihen bei konstantem Durchmesser und variierender Länge bestimmt werden. In der Darstellung der Druckdifferenz ($-\Delta p$) über die Kapillarlänge L für konstante nominale Scherraten $\dot{\gamma}_{wn}$ oder Volumenströme Q_F ergibt sich üblicherweise ein linearer Zusammenhang. Eine Extrapolation zu $L = 0$ ermöglicht damit eine Schätzung des zusätzlichen Druckverlustes ($-\Delta p_e$).

Berücksichtigung von Schlupf Die Bestimmung der Scherrate $\dot{\gamma}_w$ basiert auf der Annahme der Abwesenheit von Schlupf an der Kapillarwand, also $v_{F,z} = 0$ für $r = R$. Schlupf tritt üblicherweise durch die Bildung einer mikroskopischen, wandnahen Fluidschicht der Dicke $\delta \ll R$ mit abweichender Rheologie auf. Dies ist schematisch in Abb. 3.15 auf der nächsten Seite dargestellt. Bei großen Geschwindigkeitsgradienten kann dies makroskopisch betrachtet bei der Hauptströmung zu einer Schlupfgeschwindigkeit v_s bei $r \rightarrow R$ führen. Eine genaue physikalische Beschreibung des Phänomens wurde bisher nicht gefunden. Nach Coussot [17] ist ein Auftreten bei granulären Pasten beziehungsweise Suspensionen mit hohem ϕ (Volumenanteil der zweiten Phase) sehr wahrscheinlich. Dies liegt etwa darin begründet, dass im Randbereich eine geringere Packungsdichte herrscht und die Strömung von der geringeren Viskosität des interstitiellen Fluides dominiert wird.

Eine rheometrische Korrektur des Schlupfs ist ähnlich wie bei Strömungsübergängen möglich. In mehreren Studien hat sich eine Abhängigkeit von der Scherbelastung nach dem Potenzgesetz gezeigt [5, 16, 47, 85], sodass allgemein angenommen werden kann:

$$v_s = m\tau^n, \quad (3.31)$$

mit den Modellparametern m und n .

Zur experimentellen Bestimmung der Modellparameter muss somit die Schlupfgeschwindigkeit unter verschiedenen Scherbelastungen gemessen werden. Eine direkte Messung von v_s ist mit einfachen Mitteln nicht möglich. Es lässt sich jedoch über Gleichung (3.25) ein Zusammenhang zur nominalen Scherrate und der Reziproken des Kapillardurchmessers herstellen. Wird das Integral in die zwei

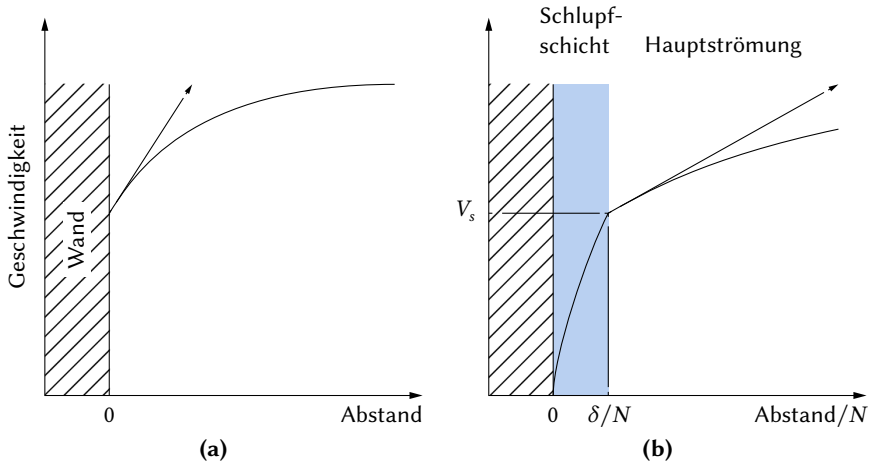


Abb. 3.15.: Schematische Darstellung von Schlupf in der Strömung in makroskopischem Maßstab (??), in kleinerem Betrachtungsmaßstab ist eine wandnahe Schicht mit eigenständiger Strömung erkennbar (??), nach [17]

Strömungsbereiche aufgeteilt und entsprechend Gleichung (3.31) von einer Unabhängigkeit zum Durchmesser ausgegangen, folgt für die Schlupfgeschwindigkeit:

$$v_s = \left[\frac{1}{8} \frac{d}{d} \frac{8v_F^*/D}{1/D} \right]_{\tau_w} \quad (3.32)$$

Die Einhaltung einer identischen Scherbelastung bei der Variation der Durchmesser ist in der Praxis allerdings kritisch. Eine elegante Lösung bietet das von Gleißle et al. [36] vorgeschlagene Verfahren. Dabei werden zwei Kapillare mit gleichem Verhältnis (R/L) parallel durchströmt. Da bei paralleler Strömung die Druckdifferenz identisch ist, gilt dies nach Gleichung (3.24) auch für die Scherbelastung. Alternativ können die für verschiedene Durchmesser aufgenommenen Schercurven bei diskreten τ_w interpoliert werden [15]. Sobald die Schlupfgeschwindigkeit bestimmt wurde, ist eine Korrektur der nominalen Scherrate möglich:

$$\dot{\gamma}_{wnc} = \frac{8(v_F^* - v_s)}{D} = \dot{\gamma}_{wn} - \frac{8V_s}{D} \quad (3.33)$$

3.2.2. Versuchsplanung und -durchführung

Bei der Erstellung des Versuchsplans wurden sowohl Aspekte des realen Prozesses als auch Besonderheiten der Kapillarviskosimetrie berücksichtigt. Die im Prozess höchste zu erwartende Scherrate ergibt sich bei maximalem Volumenstrom und minimalem Durchmesser. Diese liegen jeweils im Bereich von $Q_{max} \approx 300 \text{ ml min}^{-1}$ und $D_{min} \approx 8 \text{ mm}$, woraus eine maximale nominale Scherrate von $\dot{\gamma}_{wn,max} = 32Q_{max}/\pi D_{min}^3 \approx 100 \text{ s}^{-1}$ folgt. Wesentliche Materialcharakteristika ergeben sich aus der Analyse der doppellogarithmisch dargestellten Scherkurve. Somit wird der Messbereich $\dot{\gamma}_{wn} = 1 - 100 \text{ s}^{-1}$ auf der logarithmischen Skala äquidistant aufgeteilt.

Aufgrund des großen Materialverbrauchs bei der Kapillarviskosimetrie muss ein möglichst geringer Satz an Messpunkten bestimmt werden. Um die diskutierten Korrekturen durchführen zu können, werden drei verschiedene Durchmesser bei je drei Längen vermessen. Grundsätzlich sind lange Kapillare zu bevorzugen, um den Einfluss der Strömungsübergänge zu minimieren. Im vorhandenen Aufbau wurde als limitierender Faktor ein maximaler Systemdruck von 18 bar identifiziert. Die entsprechend $\dot{\gamma}_{wn,max}$ möglichen Kapillardimensionen wurden vorab experimentell bestimmt. Die Korrektur des Schlupfs profitiert von einem großen Messbereich über τ_w , weshalb mit jedem Durchmesser eine vollständige Messreihe gefahren wird. Für die Längenkorrektur sind nach Chhabra [15] fünf Messpunkte pro Länge ausreichend. Auch hier wird von der experimentell bestimmten maximalen Beanspruchung ausgegangen. Der gesamte Versuchsplan ist in Tabelle 3.6 auf der nächsten Seite aufgetragen.

Während der Versuche wird die Einflussgröße *Temperatur* kontrolliert, sodass $T_F = 19,5 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Grundsätzlich werden die Messreihen bei abnehmender Scherrate aufgenommen, da dies die Bestimmung der Fließspannung vereinfacht [17]. Das folgende Vorgehen wird zur Wahl der geeigneten Kapillaren verfolgt: Um für einen bestimmten Durchmesser die maximale Länge zu bestimmen, wird diese bei $\dot{\gamma}_{wn} = 100 \text{ s}^{-1}$ schrittweise erhöht. Nach der Durchführung der vollständigen Messreihe für dieses Kapillar wird die Länge um zwei Module je $\Delta L = 80 \text{ mm}$ verlängert. Wenn hierbei $\dot{\gamma}_{wn,max} \geq 7,7 \text{ s}^{-1}$, kann bei dieser sowie der intermediären Länge je eine Messreihe aufgezeichnet werden.

Bei jedem Messpunkt wird nach der Einstellung des Volumenstroms ein quasi-stationäres Verhalten bei der Druckdifferenz abgewartet. Sobald während einer Zeitspanne von drei Minuten die Schwankung innerhalb von $\Delta p = \pm 0,1 \text{ bar}$ liegt, wird ein neuer Messpunkt angefahren. Zur Bestimmung der Scherbeanspruchung wird der Druck über das Messintervall der geringsten Schwankung gemittelt. So kann der Einfluss der Thixotropie im Rahmen der Auswertung vernachlässigt werden.

Tab. 3.6.: Versuchsplan zur rheologischen Untersuchung der Kernfüllmasse

$\dot{\gamma}_{wn}$ [s ⁻¹]	D [mm]: 2			5			8		
	L [mm]: 100	180	260	340	420	500	340	420	500
1,0	x			x	x	x	x	x	x
1,7	x			x	x	x	x	x	x
2,8	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4,6	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7,7	x	x	x	x	x	x	x	x	x
12,7	x	x	x	x			x		
25,5	x	x	x	x			x		
38,2	x			x			x		
63,7	x			x			x		
100,0	x			x			x		

3.2.3. Auswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt und ausgewertet. Zunächst werden allgemeine Beobachtungen bezüglich des Materialverhaltens und des Versuchsablaufs dokumentiert. Nach der Anwendung der Strömungskorrekturen wird abschließend die Rheologie der Kernfüllmasse analysiert.

Allgemeine Beobachtungen Der große Einfluss der Thixotropie ist aufgrund der notwendigen, großen Wartezeiten bis zum quasi-stationären Zustand offensichtlich. Dies ist exemplarisch für $D = 8$ mm und $L = 420$ mm in Abb. 3.16 auf der nächsten Seite dargestellt. Aufgetragen ist die normierte Druckdifferenz:

$$\Delta p_{rel} = (\Delta p - \Delta p_{min}) / (\Delta p_{max} - \Delta p_{min}) \quad (3.34)$$

bei jeweiligem Wechsel zu einem Messpunkt niedrigerer Scherrate. Die Zeit bis zum Erreichen von $d\mu/dt = 0$ nimmt dabei reziprok zur Scherrate immer weiter zu. Im Vergleich der zeitlichen Entwicklung der Scherbelastung zeigt sich weiterhin eine besonders starke Abhängigkeit vom Kapillardurchmesser. So hat sich bei $D = 2$ mm der quasi-stationäre Zustand teilweise erst nach knapp einer Stunde eingestellt.

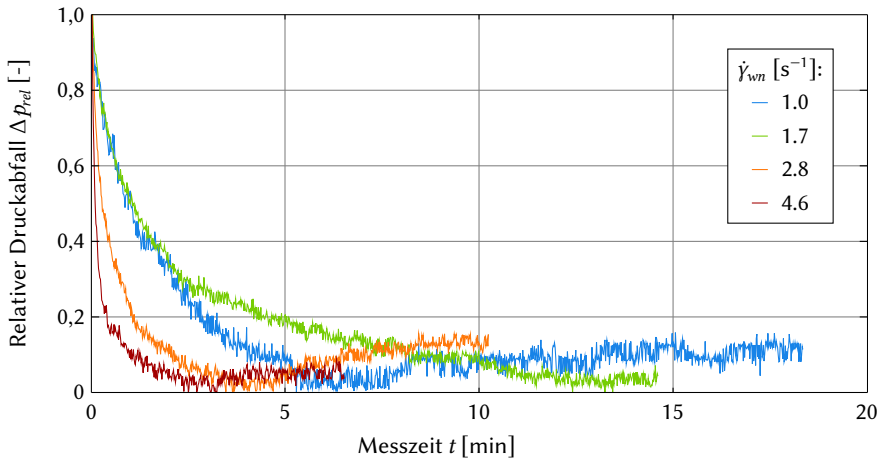


Abb. 3.16.: Zeitlich verzögerte Abnahme der normierten Druckdifferenz bei sprunghafter Abnahme des Volumenstroms aufgrund von Thixotropie

Die Fließkurven aller Messreihen sind in Abb. 3.17 auf der nächsten Seite dargestellt. Beim direkten Vergleich aller Daten zeigt sich ein grundsätzlich ähnlicher Kurvenverlauf, jedoch bei großer Abweichung der konkreten Werte für τ_w . Wie sich bei der Darstellung für geringe Scherraten in linearer Skala in Abb. 3.18 auf der nächsten Seite zeigt, scheinen die Abweichungen im Wesentlichen vom Kapillardurchmesser abzuhängen.

Unregelmäßigkeiten zeigen sich bei den Messreihen mit $D = 2$ mm. So liegen die gemessenen Belastungen bei $L = 180$ mm sogar teils über denen der Kapillare größeren Durchmessers. Eine weitere Auffälligkeit ist das teils chaotische Verhalten während der Messungen. Beispielsweise beim Messpunkt mit $\dot{\gamma}_{wn} = 12,7 \text{ s}^{-1}$ bei $L = 180$ mm hatte sich nach einer Stunde Haltezeit noch kein Gleichgewicht eingestellt. Stattdessen wies die gemessene Druckdifferenz eine starke Oszillation auf. Der Versuch wurde abgebrochen, der Bereich vor der Kapillare enthielt nicht mehr fließfähige KFM. Es wird vermutet, dass hier eine lokale Phasentrennung und Kompaktierung stattgefunden hat. Bei der Wiederholung am nächsten Tag war wieder ein ungestörter Messbetrieb möglich. Aufgrund der Irregularitäten sind auch abweichend vom Versuchsplan aus Tabelle 3.6 auf der vorherigen Seite einige Zwischenmessungen durchgeführt worden. Insgesamt liefern die Messreihen bei $D = 2$ mm keine verwertbaren Ergebnisse hinsichtlich des automatisierten KFM-Eintrags. Die Besonderheiten und deren mögliche Ursachen werden in Abschnitt 3.2.4 weiter diskutiert.

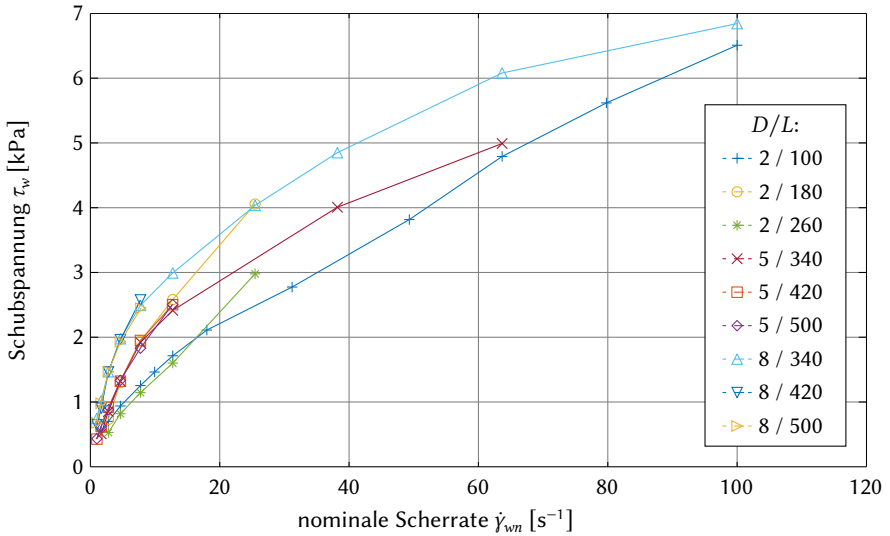


Abb. 3.17.: Fließkurven aller Messreihen zur Untersuchung der rheologischen Eigenschaften der KFM

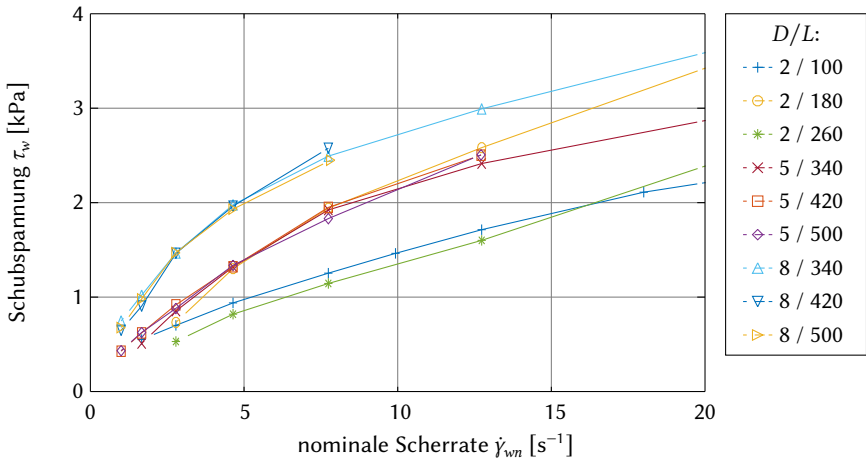


Abb. 3.18.: Auszug der Fließkurven bei niedrigen Scherraten zur Verdeutlichung des geringen Einflusses der Kapillarlänge sowie der hohen Abhängigkeit vom Durchmesser

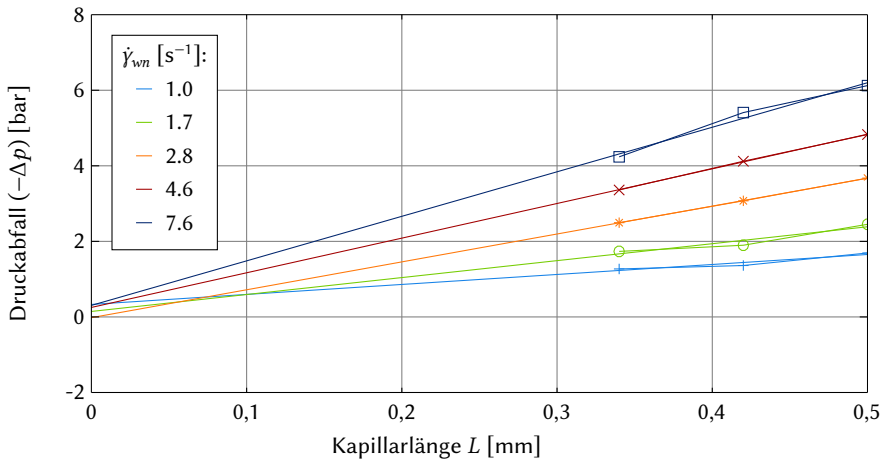


Abb. 3.19.: Interpolation der Druckdifferenz ($-\Delta p$) über Kapillarlänge L bei konstanter nominaler Scherrate $\dot{\gamma}_{wn}$ zur methodischen Korrektur der Strömungsübergänge

Längenkorrektur Der Einfluss der Kapillarlänge scheint insbesondere bei $D = 5$ und 8 mm hinsichtlich der gemessenen Scherbelastung vernachlässigbar zu sein (vgl. Abb. 3.18). Auch die in Abschnitt 3.2.1 beschriebene Methodik zur Untersuchung der Druckverluste aufgrund von Strömungsübergängen liefert keine signifikanten Ergebnisse. Exemplarisch ist dies in Abb. 3.19 für $D = 8$ mm dargestellt. Bei der Annahme eines linearen Verlaufs liefert die Interpolation nach $L = 0$ mm teilweise negative Druckverluste. Insgesamt liegen die Schnittpunkte offensichtlich im Bereich der Unsicherheit.

Schlupfkorrektur Wie bereits dargestellt, ist der Einfluss des Durchmessers signifikant. Die methodische Bestimmung der Schlupfgeschwindigkeiten als Korrekturmaßnahme ist jedoch aufgrund des abweichenden Verhaltens bei $D = 2$ mm nur eingeschränkt möglich. Das in Abschnitt 3.2.1 vorgeschlagene Vorgehen basiert wesentlich auf Interpolationen. Hierfür liegen teils nur zwei Datenpunkte vor, wenn die Messreihen der kleinsten Kapillare als Ausreißer bewertet werden. Ungeachtet dessen können aus den Korrekturen relevante Schlüsse gezogen werden.

Aus der (linearen) Interpolation der Fließkurven für diskrete τ_w wird der Zusammenhang zwischen der nominalen Scherrate und der Reziproken des Durchmessers untersucht. Das entsprechende Ergebnis ist in Abb. 3.20 auf der nächsten Seite dargestellt. Die Steigung der interpolierten Geraden entspricht nach

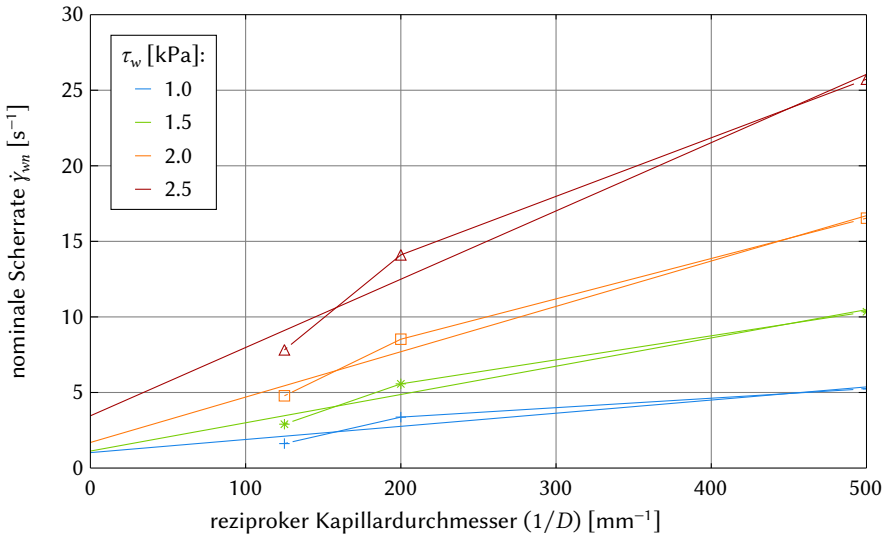


Abb. 3.20.: Interpolation der nominalen Scherrate $\dot{\gamma}_{wn}$ über reziproken Durchmesser $1/D$ bei konstanter Schubspannung τ_w zur Bestimmung der Schlupfgeschwindigkeit

Gleichung (3.32) dem Achtfachen der Schlupfgeschwindigkeit. Hieraus können anschließend Modellparameter nach Gleichung (3.31) bestimmt werden.

In Abb. 3.21 auf der nächsten Seite sind die Verläufe für die geschätzte Schlupfgeschwindigkeit mit sowie ohne Berücksichtigung der Messreihen bei $D = 2$ mm aufgetragen. Der irreguläre Einfluss der kleinsten Kapillare wird bei Schubspannungen $\tau_w > 2500$ Pa deutlich. Deshalb werden zur Modellierung lediglich die Schätzungen von v_s auf Basis der Daten bei $D = 5$ und 8 mm berücksichtigt. Nach der Anwendung der Korrektur, dargestellt in Abb. 3.22 auf der nächsten Seite, ergeben sich für die Daten bei $D = 2$ mm sowie $\tau_w < 4000$ Pa negative Schergeschwindigkeiten. Dies würde bedeuten, dass sich in dem Bereich keine Hauptströmung ausgebildet hat. Stattdessen bewegt sich das Material im Inneren der Kapillare wie ein elastischer Festkörper. Die Strömung wird lediglich durch eine Gleitschicht an der Kapillarwand getrieben.

Rheologische Charakteristika Nach der Schlupf-Korrektur liegen nur noch wenige Messpunkte vor, bei denen eine ausgebildete Strömung erwartet werden kann. Dementsprechend sind auch hier Modellregressionen mit größerer Unsicherheit behaftet. Zur Bestimmung der wahren Schergeschwindigkeit nach Gleichung (3.29) wird $n' = 0.12$ aus der linearen Regression von $\ln(\tau_w)$ über

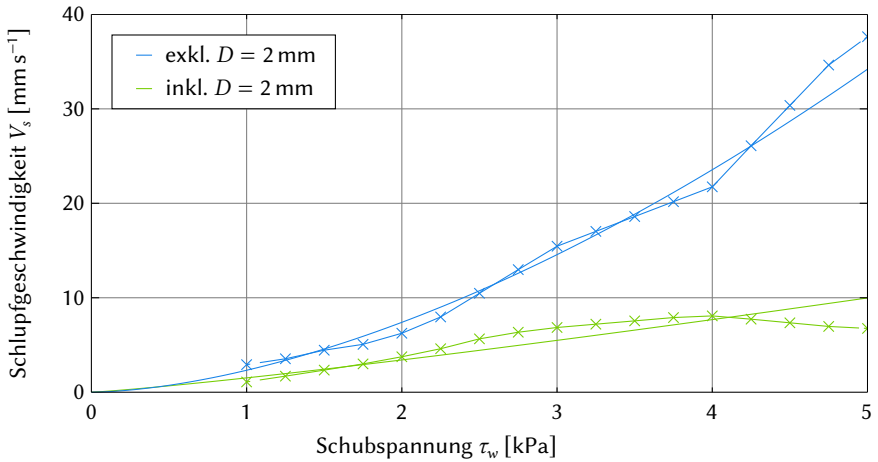


Abb. 3.21.: Abhängigkeit der Schlupfgeschwindigkeit v_s von der Schubspannung τ_w und Modellierung mit Potenzgesetz, jeweils mit und ohne Berücksichtigung der Messungen bei $D = 2$ mm

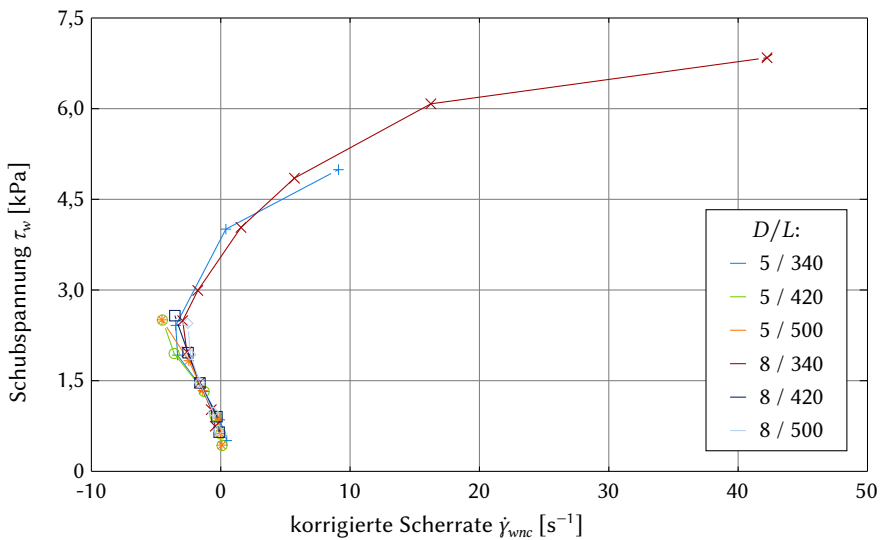


Abb. 3.22.: Fließkurven mit korrigierter nominaler Scherrate $\dot{\gamma}_{wnc}$

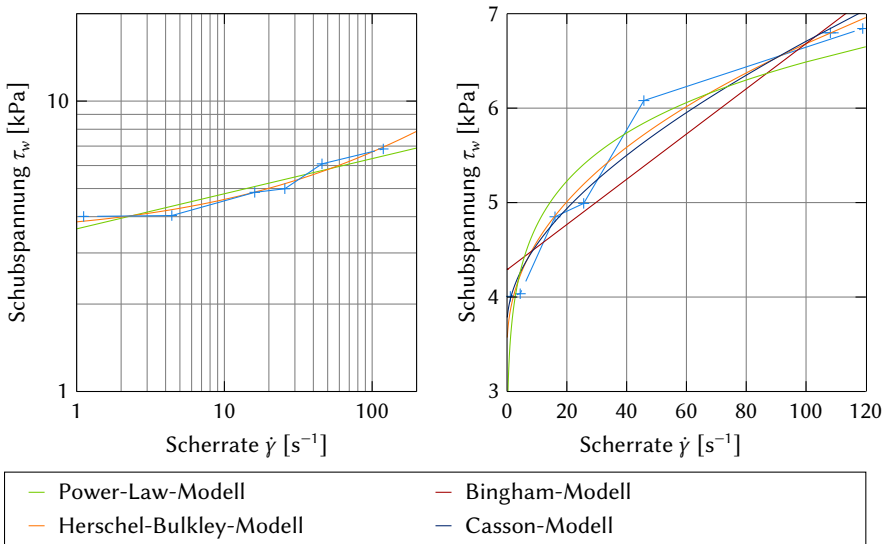


Abb. 3.23.: Fließkurve der korrigierten Hauptströmung mit verschiedenen Modellierungen

$\ln(\dot{\gamma}_{wnc})$ verwendet. Die entsprechende Fließkurve ist in Abb. 3.23 dargestellt. Zur Quantifizierung der Modellfehler wird das quadratische Mittel QM genutzt:

$$QM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (x_i^\dagger - x_i)^2}, \quad (3.35)$$

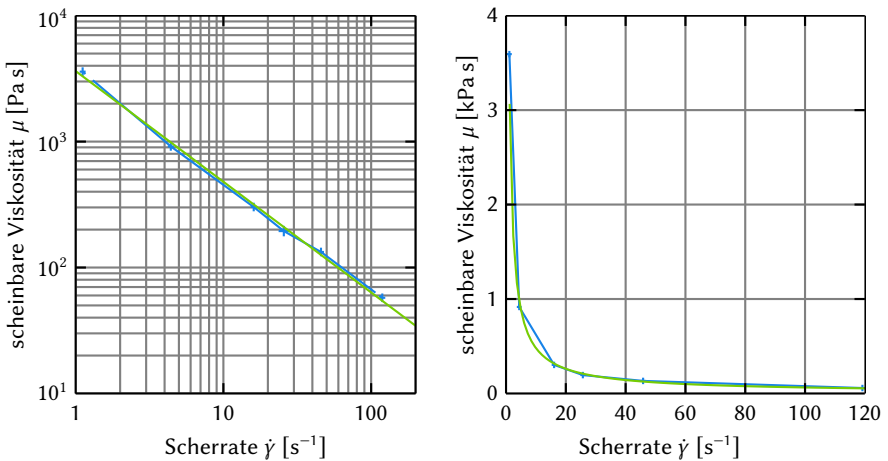
mit den N Messwerten x_i (hier: τ_w) als Referenz und den jeweils modellierten Werten x_i^\dagger .

Trotz der knappen Datengrundlage ist es eindeutig, dass das Material eine Fließspannung aufweist. Dementsprechend ist der Fehler bei einem Power-Law-Modell mit $QM = 312$ Pa hoch. Die beste Übereinstimmung liefert ein Herschel-Bulkley-Modell nach Gleichung (2.3). Die möglichen Modelle sowie deren Parameter und Fehler sind in Tabelle 3.7 auf der nächsten Seite dargestellt. Nach Abb. 3.23 kann davon ausgegangen werden, dass die Fließspannung im Bereich $\tau_c = 3 - 4$ kPa liegt.

Die in Abb. 3.24 auf der nächsten Seite dargestellte scheinbare Viskosität lässt sich gut mit einem Potenzgesetz $\mu = m(\dot{\gamma}_w^{n-1})$ modellieren. Sobald sich bei der KFM eine Strömung ausbildet, ist somit mit einer rasanten Abnahme der Viskosi-

Tab. 3.7.: Zusammenfassung der berechneten Modellparameter und den bleibenden Abweichungen

Modell	Parameter	Fehler QM [Pa]
Potenzgesetz	$m = 3495 \text{ Pa s}^n, n = 0,13$	312
Bingham	$\tau_c = 4289 \text{ Pa}, \mu_B = 23,94 \text{ Pa s}$	373
Casson	$\tau_c = 3702 \text{ Pa}, \mu_C = 4,43 \text{ Pa s}$	222
Herschel-Bulkley	$\tau_c = 3423 \text{ Pa}, m = 414 \text{ Pa s}^n, n = 0,45$	201

**Abb. 3.24.:** Scheinbare Viskosität μ in Abhängigkeit der Scherrate τ_w

tät zu rechnen. In dem hier betrachteten Messbereich liegt diese bereits bei zwei Zehnerpotenzen.

3.2.4. Diskussion der Ergebnisse

Ein wesentlicher Nachteil der Kapillarviskosimetrie ist der große zeitliche sowie materielle Aufwand zur Aufnahme umfangreicher Messreihen. Dies hat sich auch im Rahmen dieser Arbeit gezeigt. So erfordern beispielsweise Messungen bei $D = 8 \text{ mm}$ und $\dot{\gamma}_{wn} = 100 \text{ s}^{-1}$ einen Volumenstrom von $Q_F = 301,5 \text{ ml min}^{-1}$. Bei den geringen Strömungsgeschwindigkeiten unter $D = 2 \text{ mm}$ hingegen stellen sich die stationären Zustände teils erst nach einer Stunde ein. Diese Einschränkungen lassen nur einen beschränkten Versuchsplan zu.

Bei den klassischen Verfahren der Viskosimetrie wird eine mittlere Geschwindigkeit oder ein Volumenstrom über den gesamten Strömungsquerschnitt ermittelt. Die darauf aufbauende Schätzung der Scherrate bedingt einige Annahmen bezüglich des Materialverhaltens und des Geschwindigkeitsprofils. Wie auch hier bestätigt wird, weisen granuläre Pasten rheologische Effekte auf, welche zu heterogenen Strömungsfeldern führen. Diese schränken die Validität der Annahmen ein. Die durchgeführten Untersuchungen weisen für die KFM insbesondere eine starke Ausprägung von Thixotropie, Wandschlupf und Fließspannung nach.

Die beiden Ersteren lassen sich nur schwer modellieren, jedoch in der Auswertung berücksichtigen oder korrigieren. Um den Einfluss der Thixotropie auf die Ergebnisse zu minimieren, werden nur Daten nach Erreichen eines stationären Zustandes berücksichtigt. Wenn im realen Prozess eine starke Dynamik in der Steuerung des Volumenstroms auftritt, sind entsprechende Schwankungen in der Rheologie der KFM zu erwarten. Die signifikante Ausprägung der Thixotropie erfordert zudem die Berücksichtigung der Strömungshistorie im Bereich mehrerer Minuten. Eine Modellierung ist somit unter praktischen Aspekten auszuschließen.

Der Schlupf kann mit der in Abschnitt 3.2.1 vorgestellten Methodik bestimmt und die Messdaten entsprechend korrigiert werden. Dabei zeigt sich, dass nur bei wenigen Messpunkten die Bildung einer Hauptströmung erwartet werden kann. Der Schlupf kann aus Prozesssicht vorteilhaft sein, da dies eine Materialförderung unterhalb der Fließspannung ermöglicht. Die Gleitschicht mit effektivem Volumenanteil von $\phi_{eff} \rightarrow 0$ ist durch die Rheologie des interstitiellen Fluides bestimmt. Als Epoxidharz kann dieses mithilfe des Potenzgesetzes modelliert werden. Die Schichtdicke und somit die Schlupfgeschwindigkeit ist weiterhin stark von der Oberflächenbeschaffenheit der stationären Strömungsränder abhängig. Die Prozessströmung kann entsprechend durch Leitungen mit geringer Rauigkeit unterstützt werden.

Die Konzentration der Strömung in der Schlupfschicht während der Messungen erklärt weiterhin den geringen Einfluss der Kapillarlänge. Der effektive Strömungsdurchmesser ergibt sich lediglich aus der Querschnittsfläche dieser Grenzschicht und ist entsprechend wesentlich kleiner als der des gesamten Kapillares. Die Messungen zur Längenkorrektur sind alle in einem Bereich durchgeführt worden, in dem keine ausgebildete Hauptströmung festzustellen war. Somit kann bei der rheologischen Auswertung der tatsächliche Einfluss nicht weiter diskutiert werden.

Zusammenfassend bestätigen die Untersuchungen die in Kapitel 2 erwartete rheologische Komplexität der KFM. Aufgrund verschiedener, nichtlinearer Phänomene ergibt sich eine stark heterogene, schwer vorhersagbare Strömung. Thixotropie, Schlupf und Fließspannung stehen dabei im Wechselspiel. Dieses

soll hier anhand einer vereinfachten Kausalkette bei volumetrischer Dosierung verdeutlicht werden: Eine makroskopische Strömung setzt durch Ausbilden einer Schlupfschicht bereits weit vor Erreichen der Fließspannung ein. Sobald diese überschritten wird und eine Hauptströmung einsetzt, beginnt der Aufbruch der mikroskopischen Struktur (Thixotropie). Hierbei sinken Viskosität und entsprechend Schubspannung, wodurch die Hauptströmung in der Theorie sogar wieder zum Erliegen kommen kann. Auf der anderen Seite reduziert die abnehmende Schubspannung auch die Schlupfgeschwindigkeit, was wiederum die Hauptströmung verstärkt.

Ein tieferes Verständnis über das Materialverhalten könnte über die Aufnahme von realen Geschwindigkeitsprofilen mittels lokaler Rheometrie gewonnen werden. Besonders aufschlussreich ist hierbei die Magnetresonanztomographie (MRT). Aufgrund der aufgezeigten Komplexität der Rheologie ist jedoch zu bezweifeln, dass weitere Erkenntnisse eine Modellierung ermöglichen und so einen Mehrwert im Rahmen der Produktion liefern.

Aus der experimentellen Analyse können auch einige Schlussfolgerungen für den praktischen Betrieb abgeleitet werden. Es hat sich etwa gezeigt, dass Querschnitte unter $D_D < 8$ mm zu starken Druckverlusten sowie hohen Scherbelastungen führen. Damit sind auch die in Abschnitt 3.1 diskutierten, schmalbandigen Düsengeometrien als nicht praktikabel zu bewerten. Um Volumenströme von $Q_F \approx 300$ ml min⁻¹ erreichen zu können, sollten folglich einfache, kreisförmige Querschnitte mit Durchmessern von mindestens $D_D \geq 8$ mm verwendet werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Integration rheologischer Modelle in der Dosierregelung, wie sie in der Literatur häufig vorgeschlagen wird (vgl. Abschnitt 2.4.6), nicht praktikabel ist. Die unerwartet starke Ausprägung des Schlupfs und dessen komplexen Abhängigkeiten zu weiteren äußeren Einflüssen verhindern eine zuverlässige, vereinfachende oder linearisierte Beschreibung. Somit ist eine präzise volumetrische Dosierung auch nur mit einem volumetrischen Fördersystem (wie beispielsweise einer Kolbenpumpe) möglich. Für die Praxis folgt aus der Erkenntnis ein konstruktiver Hinweis: Eine Begünstigung des Schlupfes etwa durch geringe Rautiefen in den Strömungswegen wirkt sich positiv auf die Gesamtströmung aus. Insgesamt ist das rheologische Verhalten auch sehr träge und eine hohe Dynamik in der Dosierregelung somit zu vermeiden.

3.3. Luftaustritt während der Befüllung

Wie bereits in Abschnitt 2.4.2 dargestellt, fehlen aktuell Erkenntnisse zum Luftstrom beim KFM-Eintrag. Ein Verständnis ist zwingend notwendig, um die Gren-

zen der Prozessparameter zu bestimmen und so das Auftreten von Lufteinschlüssen vermeiden zu können. Zur Untersuchung wurde ein spezieller Versuchsaufbau entwickelt, der Strömungsverhältnisse unter Prozessbedingungen nachbildet. Die entsprechende Konstruktion ist in Abschnitt 3.3.1 hergeleitet. Bestandteil der Entwicklung ist zudem die Diskussion der Versuchsplanung und -durchführung in 3.3.2. Prozessgrößen, Parameter und Einflussgrößen sind entsprechend der betrieblichen Relevanz festzulegen und während der Versuche zu kontrollieren.

Eine wesentliche, bereits in Abschnitt 2.4.2 dargestellte Hypothese ist die Annahme, dass der Strömungsweg nicht ausschließlich durch das Prepreg verlaufen kann. Die entsprechend zu widerlegende Nullhypothese lautet somit, dass der Luftstrom der Gesetzmäßigkeit nach Darcy folgt. Des Weiteren soll der Luftstrom unter drei relevanten Bedingungen untersucht werden. In Abschnitt 3.3.3 wird das dynamische Verhalten analysiert, das heißt die Prozessgrößen werden sprunghaft verändert. Nach den Studien zum OOA-Prepreg ist zu erwarten, dass sich stetes Verhalten einstellt. Dieses zeitunabhängige Systemverhalten vereinfacht eine Diskussion der grundlegenden Einflüsse prozessrelevanter Variablen und wird in Abschnitt 3.3.4 betrachtet. Wie in Kapitel 2 unter verschiedenen Blickwinkeln dargestellt, unterliegen die verwendeten Materialien und deren Eigenschaften einer großen Variabilität. Daraus resultiert insbesondere bei T2-Prepreg eine große Streuung der Luftstromergebnisse, die in Abschnitt 3.3.5 genauer analysiert wird. Die abschließende Diskussion in 3.3.6 fasst die Ergebnisse der Untersuchungen zusammen und überträgt die Erkenntnisse auf den Prozess.

3.3.1. Versuchsaufbau

Die wesentliche Herausforderung bei der Messung der Luftströme ist die Schaffung prozessnaher Bedingungen. Daraus ergeben sich folgende Forderungen an den Versuchsaufbau:

1. Der Luftstrom wird gezielt in eine oder mehrere benachbarte Wabenzellen eingeleitet.
2. Alle nicht als Lufteinlass genutzten Wabenzellen unterliegen atmosphärischem Druck und stellen potentielle, ungehinderte Auslässe dar.
3. Am Einlass wird ein Überdruck erzeugt (Regelgröße p_L).
4. Das Prepreg wird mit einer über die Probenfläche konstanten Kraft gegen die Wabenunterseite gedrückt (Regelgröße F_p).
5. Der Luftstrom wird am Auslass unter atmosphärischem Druck gemessen.

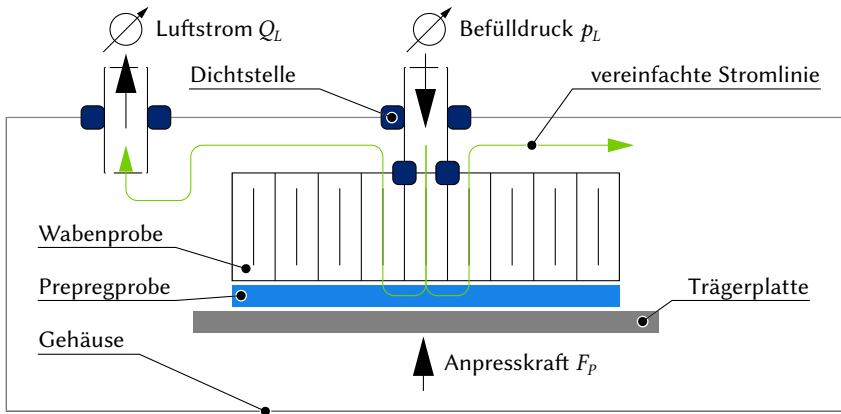


Abb. 3.25.: Konzeptionelle Darstellung des Luftstromversuchsstandes

Diese konzeptionellen Forderungen sind in der Prinzipskizze in 3.25 zusammengefasst. Insbesondere die Gewährleistung der Strömungswege und die entsprechend notwendige Abdichtung des Systems erfordert erhöhten Aufwand, der im Folgenden fokussiert wird.

Bei den in der Literatur vorgestellten Permeabilitätsuntersuchungen wird üblicherweise der Luftstrom durch das Prepreg bei negativem Druckgradienten gemessen. Dies entspricht dem dort berücksichtigten Prozess der Aushärtung unter Vakuum. Ein wesentlicher Vorteil beim Arbeiten mit Unterdruck ist die Möglichkeit zur Selbstabdichtung. Dies ist etwa in Abb. 3.26a auf der nächsten Seite zu erkennen. Über ein Entlüftungsmaterial (englisch: *breather*) kann die Luft ein- und austreten. Durch den vom Vakuumbeutel übertragenen Unterdruck werden die Dichtmaterialien wie Silikongummi gegen die Probe gepresst und verhindern unerwünschte Nebenströme. Untersuchungen im Verbund mit Wabenkern wurden insbesondere von Kratz et al. [71, 72, 73] durchgeführt. Ein entsprechender Versuchsstand ist in 3.26b dargestellt. Das Vakuum konnte auch hier zur Abdichtung genutzt werden.

Bei einer Messung des Luftstroms durch die Wabe-Prepreg-Kontaktstelle unter Überdruck ist die kritische Dichtstelle der Lufteinlass in die einzelnen Waben. Wesentliche Vorteile von kraftbasierten Dichtungen mittels Elastomeren sind die Wiederverwendbarkeit und der geringe operative Aufwand. Bei dem zu entwickelnden Versuchsstand behindert die Forderung nach unabhängig geregelter Anpresskraft jedoch den Einsatz einer axialen Dichtung. Eine radiale Dichtung wäre in dieser Hinsicht überlegen, die hohen Toleranzen der Wabengeometrie führen jedoch zu undefinierten Kontaktbedingungen und Dichtkräften.

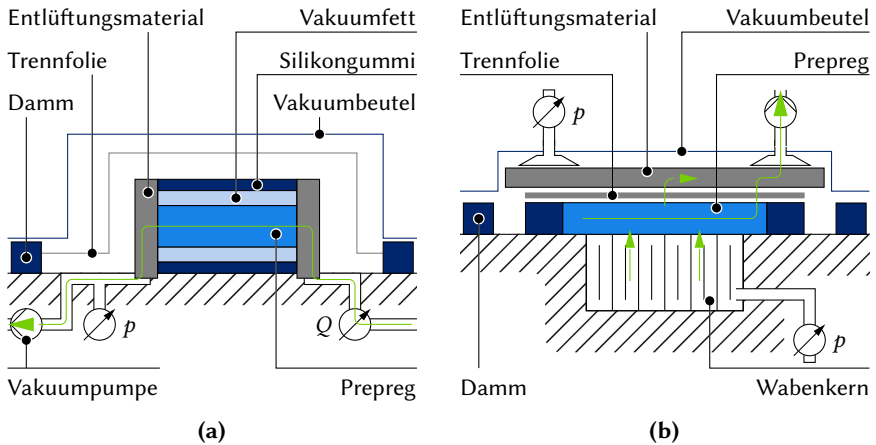


Abb. 3.26.: Beispiele verschiedener Versuchsaufbauten zur Messung von Prepreg-Permeabilitäten (grün: vereinfachte Annahme der Stromlinien): (a) Bestimmung der In-Plane-Permeabilität, nach Nam et al. [87], (b) Bestimmung des Druckes innerhalb der Wabenzellen während der Aushärtung, nach Kratz et al. [72]

Eine nicht lösbare Verbindung mit adhäsiven Polymeren kann ebenfalls als Dichtung genutzt werden. Hierbei erhöhen sich der operative Aufwand sowie die Kosten, da jede Probe zusätzlich präpariert werden muss. Aufgrund der hohen Dichtigkeit und der Unabhängigkeit von der Anpresskraft wurde diese Variante jedoch in der Entwicklung weiter verfolgt. Der Lufteinlass in die Wabe ist als einzelnes, funktionales Bauelement konzipiert. Neben der Klebeverbindung zur Wabe muss das Bauteil bis zu zwei weitere Dichtstellen gewährleisten: Zum einen am Anschluss der Versorgungsluft, zum anderen an der Verbindungsstelle zur geschlossenen Versuchskammer. Materialkosten, Fertigungszeit und operativer Aufwand können durch möglichst kompakte Bauweise und Funktionsintegration reduziert werden.

Additive Fertigungsverfahren bieten eine große Flexibilität und können auch kleinste Details darstellen. Der schichtweise Aufbau kann jedoch zu porösen Bauteilen führen. Somit muss die Dichtigkeit in einer Reihe von Vorversuchen validiert werden. Dazu werden verschiedene Fertigungsverfahren sowie Materialien verglichen. Neben der Porosität wird auch die Dichtigkeit unter Verwendung von O-Ringen sowie bei pneumatischen Steckadaptern geprüft.

In Tabelle 3.8 sind die Ergebnisse dargestellt. Mittels FDM gefertigte Teile weisen große Schwankungen in Qualität und Dichtigkeit auf. Grundsätzlich können

Tab. 3.8.: Eignung verschiedener additiver Fertigungsverfahren zur Herstellung von Lufteinlässen für einzelne Wabenzellen

Materialien	Verfahren	Beurteilung
PLA / ABS / PETG	FDM	Beste Ergebnisse mit PETG: gute Dichtigkeit, Mängel am Gewinde zum Pneumatikadapter erfordern teils Nacharbeit, allgemein Schwankungen in der Fertigungsqualität
Photopolymer [31]	SLA	Insgesamt beste Ergebnisse in Fertigungsgüte und Dichtigkeit, unregelmäßige Fertigungsfehler
PA12	SLS	Sehr gute Fertigungsgüte mit höchster Reproduzierbarkeit, hohe Porosität
PA12 + Nano-Seal [62]	SLS	Höchste Reproduzierbarkeit der Dichtigkeit bei guter Fertigungsgüte, erfordert zusätzlichen Prozessschritt

aber zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden, wenn entsprechender Aufwand in der Einstellung der Fertigungsparameter sowie der Qualitätskontrolle durchgeführt wird. Stereolithografie (SLA) liefert Bauteile reproduzierbar guter Dichtigkeit. In einigen Fällen kommt es jedoch durch die geringe Baugröße und geometrische Details zu Fertigungsfehlern. Die besten Ergebnisse erzielen Bauteile aus Nylon (PA12), hergestellt im SLS-Verfahren (selektives Lasersintern) und nachträglich mit Nano-Seal 180W der Firma JELN imprägniert [62]. Der zusätzliche Prozessschritt der Imprägnierung kann möglichst effizient durchgeführt werden, wenn eine Großzahl an Bauteilen gleichzeitig verarbeitet wird. Aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit wird somit dieses Verfahren für die weiteren Versuche gewählt.

Bei der Klebeverbindung ist neben der Dichtigkeit der manuelle Aufwand zu prüfen. Der Lufteinlass beinhaltet Rillen in Form der Waben als Montagehilfe. In diese Rillen wird der Klebstoff eingebracht, die Waben aufgesteckt und zur Aushärtung mit der Wabenunterseite nach oben gelagert. Der durchgeführte Vergleich beinhaltet ein schnell (5 min) und ein langsam härtendes (24 h) zweikomponentiges Harzsystem sowie Sekundenkleber verschiedener Viskosität. Eine dichte Verbindung kann mit allen Materialien realisiert werden. Den geringsten Aufwand bietet dabei ein viskoser, thixotroper Sekundenkleber.

Eine weitere Problematik bei der Entwicklung des Versuchsstandes ergibt sich durch den erforderlichen flächigen Kontakt der Trägerplatte. Diese muss streng parallel zur unteren Schnittfläche der Waben sein. Eine Schrägstellung könnte zum unkontrollierten Entweichen der Luft führen. Die Fertigungstoleranzen des Wabenkerns und die manuelle Klebefügung des Lufteinlasses erfordern einen Winkelausgleich (Abweichungen unterhalb 1°) in der Aktorik. Von einem Gelenk wird abgesehen, um Reibungsverluste und Stick-Slip-Effekte bei Dauerversuchen zu vermeiden. Eine geeignete Alternative stellen pneumatische Balgzylinder dar. Im Versuchsaufbau liegt die Variation des Hubs im Bereich von $\pm 0,1$ mm, was die Bestimmung der nichtlinearen Kraft-Druck-Kennlinie vereinfacht.

Der entwickelte Versuchsstand ist in Abbildung 3.27 dargestellt. Das Gehäuse (3, 8, 11) ist mittels O-Ringen abgedichtet. Dazu ist die Anpressaktorik (9) direkt integriert. Die pneumatischen Leitungen (Durchmesser 6 mm) werden über Standardsteckadapter (1, 2, 10) angeschlossen. Der Lufteinlass (4) für den Wabenkern wird wie bereits beschrieben additiv gefertigt, imprägniert und mit einer Probe (5) verklebt. Abb. 3.28 auf Seite 102 stellt den Lufteinlass für eine einzelne Zelle im Detail dar. Die Dichtung zum Gehäusedeckel (3) ist mittels O-Ring realisiert. Verschiedene Zellgeometrien sowie Einlassflächen können dank der Flexibilität von AM einfach realisiert werden. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wird der Gehäusedeckel abgenommen, die Prepregprobe (6) auf die Edelstahlscheibe (7) gelegt, die Wabenprobe mit dem Lufteinlass auf die Dichtung gesteckt, der Deckel wieder aufgesetzt und verschraubt.

Der Versuchsstand erlaubt mit anderem Lufteinlass auch eine Untersuchung der reinen Prepregpermeabilität. Bei der Auswertung muss jedoch darauf geachtet werden, dass kein eindimensionaler Strom zu erwarten ist. Angepasste Formeln für radiale Strömungen werden etwa in [12, 43, 76, 94] verwendet.

Zur Regelung des Anpress- sowie Lufteinlassdruckes werden zwei Proportional-Druckregelventile Typ VPPM der Firma Festo eingesetzt. Der Regelbereich liegt jeweils zwischen 0 – 9 bar. Der reale Druck wird über den analogen Ausgang der integrierten Drucksensoren zusätzlich erfasst. Luftströme bis 650 ml min^{-1} (Angabe in Normvolumen) werden mit einem Massendurchflussmessgerät Typ 8701 der Firma Bürkert gemessen. Darüber hinaus können mit geringerer Auflösung Ströme bis 2000 ml min^{-1} mit einem Durchflusssensor Typ SFTE von Festo aufgezeichnet werden. Um eine Überlastung der Sensoren zu verhindern und stets den optimalen Messbereich zu verwenden, ist eine automatisierte Ventilschaltung vorgelagert. Die gesamte Steuerung des Versuchsstandes ist in einer SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) umgesetzt. Dazu wird ein Industrie-PC der Firma Beckhoff mit der Soft-SPS TwinCAT 3 eingesetzt. So können automatisierte Langzeitversuche mit verschiedenen Abfolgen der Prozessgrößen durchgeführt werden.

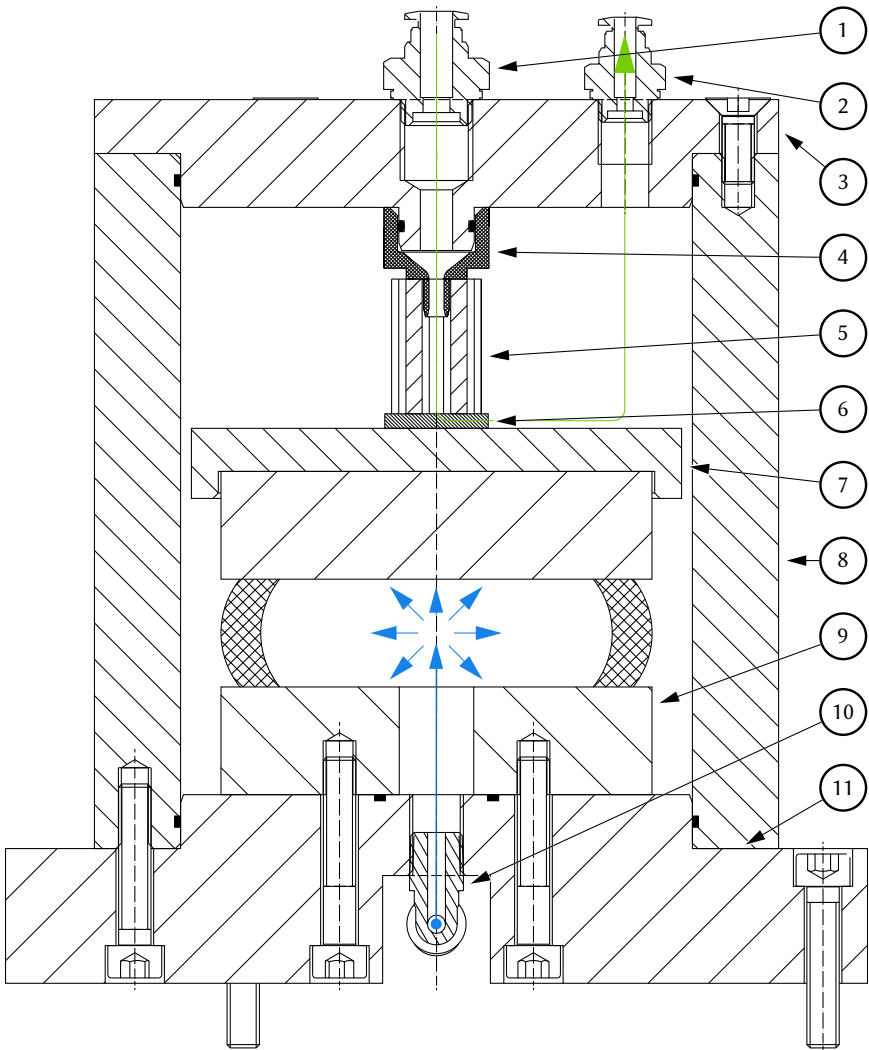


Abb. 3.27.: CAD Zeichnung des Luftstromversuchsstandes; blau: Pneumatik der Anpressaktorik, grün: vereinfachte Stromlinie durch Waben-Prepreg-Grenzschicht

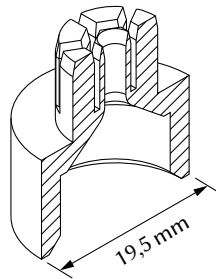


Abb. 3.28.: Lufteinlass für Durchstromversuche

3.3.2. Versuchsplanung und -durchführung

Untersucht werden ausschließlich in der Sandwichproduktion eingesetzte Materialien, um eine Übertragbarkeit auf den realen Befüllprozess ermöglichen zu können. Als Wabenkern werden Proben des Typs C4 verwendet. Diese haben eine Zellgröße von 4,8 mm, was den Lufteinlass in eine einzelne Zelle vereinfacht. Die Proben werden für die Versuche auf 40×40 mm zugeschnitten. Die relativ hohe Steifigkeit der C4-Wabe vereinfacht die Handhabung. Zudem treten weniger Fehler der Zellgeometrien auf, als bei kleineren, weniger steifen Varianten. Wie in 2.4.2 festgestellt, sind mit steigender Steifigkeit saubere Schnittkanten und weniger lose Faserenden zu beobachten (vgl. Abb. 2.16, S. 34). Somit liegt die Vermutung nahe, dass die Kontaktlinie von C4 einen höheren Strömungswiderstand aufweist.

Wie in Abschnitten 2.1.1 und 2.4.2 bereits hergeleitet, ist eine starke Beeinflussung des Luftstroms durch die Charakteristika des Prepregs zu erwarten. Diese werden jedoch größtenteils nicht herstellerseitig quantifiziert und unterliegen großen Schwankungen innerhalb einer Charge. Als wesentliche Einflussgröße auf den Luftstrom wird die Klebrigkeit beziehungsweise der Tack angenommen. Um dessen Einfluss besser herausarbeiten zu können, werden für die Versuche Proben mit Tack-Werten von T0 und T2, ansonsten jedoch identischer Spezifikation verwendet. Dabei handelt es sich um das industrieübliche Produkt PHG600-68-50 der Firma Gurit.

Die Atlaswebung des gewählten Prepregs sorgt für eine geringe Oberflächenrauigkeit. Zudem ist durch die Vollimprägnierung mit 58 % Faservolumenanteil eine geringe Permeabilität zu erwarten. Das Flächengewicht von 620 g m^{-3} führt zu einer relativ hohen Schichtdicke von etwa $50 \mu\text{m}$. Dies kann grundsätzlich zu einer höheren Komprimierbarkeit führen. Das Prepreg wurde somit nach Kriterien ausgewählt, die aufgrund des Datenblattes einen geringen Luftstrom durch

die Wabe-Prepreg-Grenzschicht vermuten lassen. Es handelt sich aus Sicht der Produktion um einen *worst case*.

Das Phenolharz des Prepreg reagiert bereits bei Raumtemperatur, was die Eigenschaften stark beeinflusst. In der Produktion wird eine bei -18 °C gelagerte Rolle zunächst für mindestens 24 h an der Umgebung aufgetaut. So wird die Bildung von Kondensat bei der anschließenden Entnahme aus dem Vakuumbbeutel verhindert. Eine Verarbeitung ist nach Spezifikation innerhalb von 60 h durchzuführen.

Um den Einfluss von Alterung und Feuchtigkeitsadsorption zu minimieren, werden die Prepregproben im Vorfeld zugeschnitten und wieder tiefgekühlt gelagert. Die Größe der Prepregs entspricht der Wabe mit $40 \times 40\text{ mm}$. Diese Vorarbeit wird in der klimatisierten Versuchsumgebung bei möglichst geringer Temperatur ($<17\text{ °C}$) und Luftfeuchte ($<30\text{ % rF}$) durchgeführt. Für die Versuche wird dann nur die Anzahl innerhalb eines Tages benötigter Proben versiegelt aufgetaut. Während der Experimente ist die Umgebung auf $20 \pm 1\text{ °C}$ und $36 \pm 3\text{ % rF}$ temperiert.

Ohne die Erkenntnisse aus Luftstromversuchen, Rheometrie der KFM sowie weiterer experimenteller Prozessanalysen ist der Raum der Prozessgrößen kaum eingrenzbar. Mithilfe der automatisierten Versuchssteuerung kann jedoch ein großes Messfeld abgedeckt werden. In Vorversuchen wurde bei Anpresskräften ab etwa 500 N kein Luftstrom mehr detektiert. Der Betrachtungsraum liegt somit bei 20 – 500 N, welcher mit einer minimalen Schrittgröße von etwa 20 N untersucht werden kann.

Schwieriger ist die Wahl des Luftdruckes auf der Einlassseite. Aus weiteren Vorversuchen kann bereits abgeschätzt werden, dass der Dosierdruck während der Befüllung etwa bei 1,5 – 2,5 bar liegt. Aufgrund weiterer Druckverluste ist innerhalb der Wabenzelle jedoch ein höherer Druck zu erwarten. Auch steigt der Luftdruck während der Befüllung zunächst kontinuierlich zu diesem Maximaldruck an. Auf Basis der Abschätzung werden die Versuche zum Luftstrom somit im Bereich 0,1 – 4 bar durchgeführt, mit einzelnen Messreihen bis 6 bar.

In Vorversuchen zur Untersuchung des reinen Prepreg-Stroms lag der Luftstrom unter der Messschwelle der verwendeten Sensorik. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Prepreg-Ströme im Befüllprozess von geringer Bedeutung sind. Wie in der Analyse der Ergebnisse eingehend dargestellt, wird zudem ein vom Law-of-Darcy abweichendes Verhalten beobachtet. Die Messung der reinen Prepregpermeabilität wird im weiteren Verlauf der Arbeit entsprechend nicht weiter betrachtet.

3.3.3. Luftströme aus der Ruhelage

Während des Befüllprozesses tritt ein sehr dynamischer Luftstrom auf. In Ruhelage befindet sich in der Wabenzelle Luft unter Umgebungsbedingungen. Auf das Prepreg wird im günstigsten Fall lediglich ein aus dem Eigengewicht der Kernschicht resultierender Druck ausgeübt. Bei gekrümmten Strukturen kommen teils die lokalen Beschwerden hinzu, welche ein steifigkeitsbedingtes Ablösen der Wabe verhindern sollen. Während der Befüllung wird die Luft von der KFM verdrängt, der Luftdruck steigt innerhalb kurzer Zeit an und kann maximal den Wert des Befülldrucks erreichen. Weiterhin wird durch Reibungskräfte zwischen einströmender Masse und Zellwänden sowie gegebenenfalls durch die Kontaktkraft der Düse ein Druck auf das Prepreg ausgeübt. Die Prozess- und Werkzeugkräfte übertragen sich je nach Steifigkeit der Wabe auf umgebende Bereiche.

Um das dynamische Verhalten zu untersuchen, wird zunächst aus der Ruhelage heraus ein sprunghafter Anstieg der Anpresskraft sowie des Befülldrucks geschaltet. Der unmittelbare Luftstrom liegt bei T_0 oberhalb des Messbereichs. Zum Schutz der Sensorik wird der Strom somit erst nach einer Verzögerung von etwa einer Sekunde erfasst. In Abb. 3.29 auf der nächsten Seite ist die charakteristische Sprungantwort von T_0 -Prepreg bei 1 bar Befülldruck und 350 N Anpresskraft dargestellt. Der Strom nimmt zunächst stark ab und nähert sich dann einem Grenzwert. Während die Abnahme nach zehn Sekunden etwa $-1,8 \text{ ml min}^{-1} \text{ s}^{-1}$ beträgt, ist nach einer Minute mit $-0,2 \text{ ml min}^{-1} \text{ s}^{-1}$ kaum noch eine Änderung erkennbar. Der Grenzwert von 57 ml min^{-1} stellt sich jedoch erst nach etwa neun Minuten ein.

Bei konstantem Befülldruck und einer sprunghaften Abnahme der Anpresskraft ist ebenfalls eine Verzögerung im Luftstrom zu beobachten. In Abb. 3.30 auf Seite 106 ist ein solcher Verlauf für T_0 zu sehen. Hier variiert die Anpresskraft in Intervallen von 20 min zwischen $F_p = 85 - 170 \text{ N}$. Der Luftstrom nimmt dabei nach einer Belastungsabnahme stetig zu und nähert sich ohne Überschwingen einem Grenzwert.

Der Einfluss der Anpresskraft ist dabei zumindest teilweise reversibel. Bei den Sprüngen in Abb. 3.30 sind nahezu identische Verläufe zu beobachten. Im direkten Vergleich zeigt sich dabei eine leichte Abnahme im Gesamtstrom. Durch diesen irreversiblen Anteil ist der Luftstrom somit stets von der gesamten Belastungshistorie abhängig.

Beim T_2 -Prepreg konnte grundsätzlich ein identisches, dynamisches Verhalten beobachtet werden. Ein entsprechender Verlauf bei 0,88 bar Befülldruck und 58 N Anpresskraft ist in Abb. 3.31 auf Seite 107 dargestellt. Hier ist eine deutlich stärkere Dynamik zu erkennen: Bereits nach $t = 6 \text{ s}$ scheint ein erster asymptotischer Grenzwert von $Q_L \approx 180 \text{ ml min}^{-1}$ erreicht zu sein. Tatsächlich ist hier ein

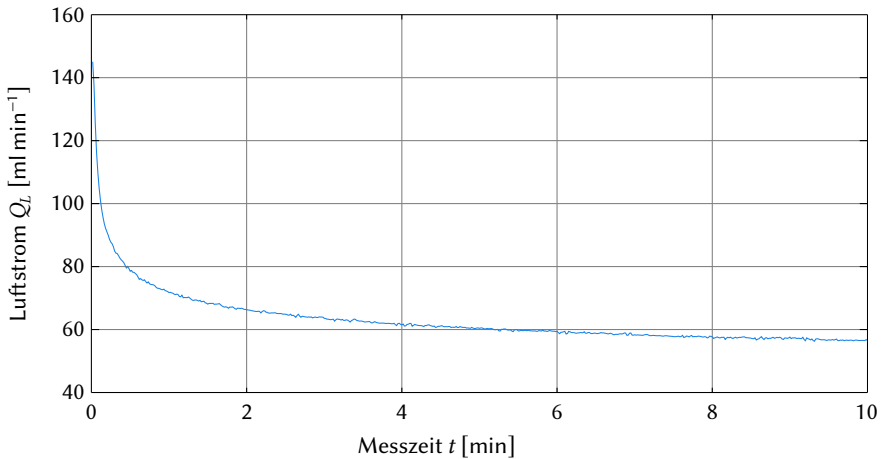


Abb. 3.29.: Luftstromverlauf nach sprunghafter Beaufschlagung mit Befülldruck und Anpresskraft bei T0: $p_L = 1 \text{ bar}$, $F_P = 350 \text{ N}$

Wendepunkt im Verlauf und der Strom fällt nahezu linear weiter ab, bis er nach $t = 92 \text{ s}$ nicht mehr detektierbar ist. Dieser kontinuierliche Abfall bis hin zur Undurchlässigkeit tritt bei geringen Belastungen und Befülldrücken häufig auf. Mit zunehmendem Befülldruck steigt hingegen die Wahrscheinlichkeit, einen stabilen Grenzwert zu erreichen. Grundsätzlich führen bei T2 bereits geringste Anpresskräfte zu einer starken Abnahme des Luftstroms. Bei Werten $F_P > 100 \text{ N}$ ist kein Strom mehr detektierbar.

Bei geringer Belastung und steigenden Befülldrücken treten bei T2 vermehrt irreguläre, teils unstete Luftstromverläufe auf. Dies ist etwa in einer Messreihe bei $p_L = 1,55 \text{ bar}$ und $F_P = 255 \text{ N}$ (vgl. Abb. 3.31, S. 107) besonders stark zu beobachten. Die Intensität der Sprünge variiert dabei zwischen 20 – 200 ml.

Sowohl bei T0 wie T2 zeigt sich, dass der dynamische Verlauf durch die Anpresskraft bestimmt wird. Um den Einfluss der Historie zu minimieren, kann eine für längere Zeit konstante Belastung aufgebracht werden. Nach einem Vorhalten der Anpresskraft für eine Stunde ist in dem gesamten untersuchten Parameterbereich bei T0 kein träges Verhalten mehr zu beobachten. Bei Sprüngen im Befülldruck wird der Grenzwert des Luftstroms also ohne messtechnisch auswertbare Verzögerung direkt erreicht. Eine Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf konnte bei T2 nach 15 min nicht mehr beobachtet werden. Unstetigkeiten können in Ausnahmefällen jedoch weiterhin auftreten.

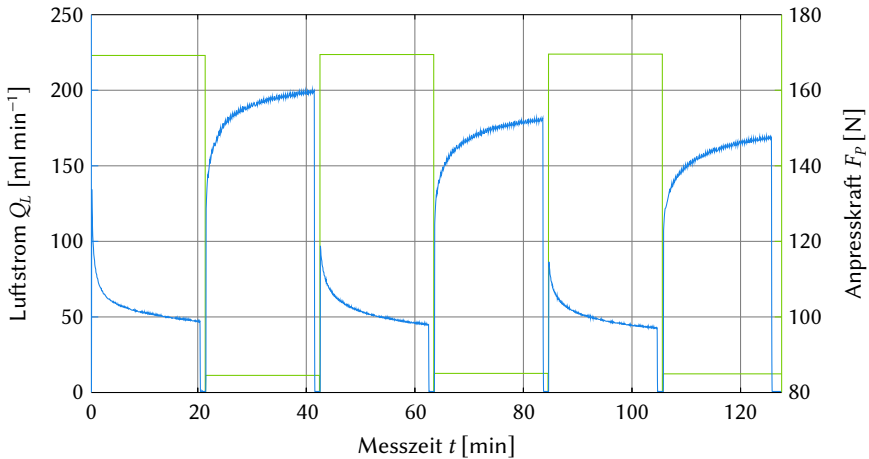


Abb. 3.30.: Luftstrom bei T0, $p_L = 2,4$ bar und alternierendem $F_P = 85 - 170$ N zur Verdeutlichung des verzögernden Verhaltens sowie teilweiser Reversibilität

3.3.4. Luftströme bei komprimiertem Prepreg

Wie bereits angedeutet, stellt der vollständig unbelastete Zustand (beziehungsweise lediglich durch das Eigengewicht) eher einen Sonderfall dar. Aufgrund der im vorigen Abschnitt festgestellten Bedeutung der Belastungshistorie ist es sinnvoll, die zeitlich invariante Domäne genauer zu analysieren. Diese kann hinsichtlich des Prozesses als *worst case* aufgefasst werden: Das Prepreg ist dabei für längere Zeit der maximalen Belastung ausgesetzt, während der Befüllung ist mit keiner weiteren Komprimierung zu rechnen. Bezüglich des Prozessverständnisses hat die Analyse des konstanten Bereiches einen wesentlichen Vorteil: Durch den geringeren Einfluss der Belastungshistorie lässt sich der Einfluss der Prozessgrößen deutlicher herausarbeiten.

Bei den Untersuchungen wird die Anpresskraft bei T0 für eine Stunde, bei T2 für 15 min vorgehalten. Anschließend wird der Befülldruck in kleinen Inkrementen ($\Delta p_L \approx 0,1 - 0,15$ bar) erhöht und jeweils für 4 s gehalten. Zur Beurteilung der Wiederholgenauigkeit werden diese Messungen mit T0 bei sieben Anpresskräften $F_P = 125 - 400$ N jeweils 15 mal durchgeführt. Die Standardabweichung des Luftstroms $\sigma(Q, i, j)$ bei einem Messpunkt mit $[p_{L,i}, F_{P,j}]$ liegt über alle Messpunkte gemittelt bei $\sigma(Q) = 3,3$ ml min⁻¹ und damit in der Dimension der Messgenauigkeit.

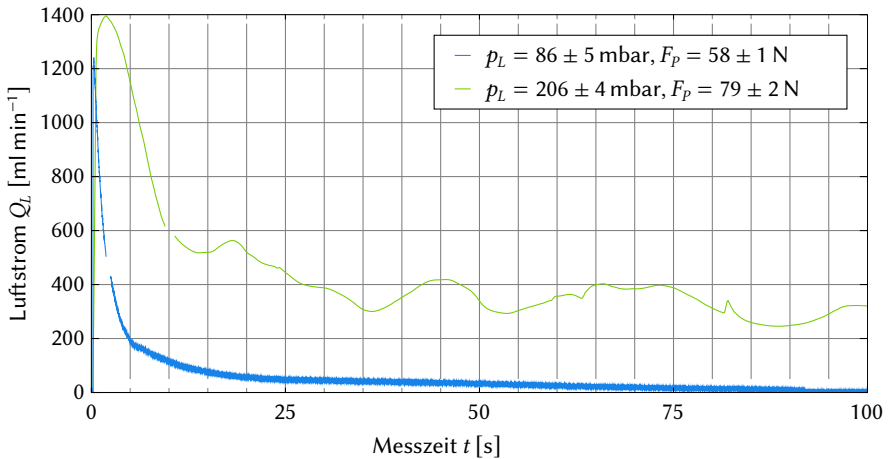


Abb. 3.31.: Luftstromverlauf nach sprunghafter Beaufschlagung mit Befülldruck und Anpresskraft bei T2

Die in Abb. 3.32 auf der nächsten Seite visualisierten Messreihen stellen den charakteristischen Verlauf des Luftstroms bei T0 innerhalb der zeitlich invarianten Domäne dar. Daraus können eine Reihe wesentlicher Zusammenhänge beobachtet werden:

1. Bei vorbelastetem Prepreg ist ein minimaler Befülldruck notwendig, um einen Luftstrom nachweisen zu können. Dieser steigt mit zunehmender Belastung.
2. Bei geringen Befülldrücken weist der Luftstrom zunächst einen degressiven Anstieg auf. Dieser Verlauf hält sich mit steigender Belastung auch bei zunehmend höheren Befülldrücken.
3. Nimmt der Befülldruck weiter zu, wechselt der Verlauf des Luftstroms zu einem progressiven Anstieg. Der entsprechende Wendepunkt wandert bei wachsender Belastung zu höheren Befülldrücken. Ab einer Anpresskraft von etwa $F_p = 300 - 350 \text{ N}$ ist dieser im Messbereich $p_L \leq 6 \text{ bar}$ nicht mehr erkennbar. Bei sehr geringer Belastung rückt der Wendepunkt hingegen zu so niedrigen Befülldrücken, dass der unter (2) beschriebene Verlauf nicht weiter messbar ist. Dies ist in Abb. 3.32b auf der nächsten Seite anhand einer Messreihe bei geringen Anpresskräften und Befülldrücken verdeutlicht.

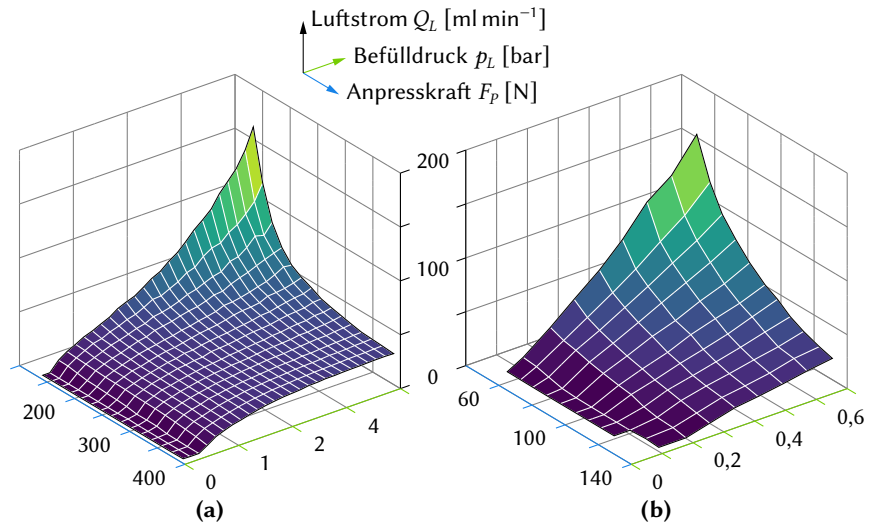


Abb. 3.32.: Luftstrom in Abhängigkeit von Befülldruck und vorgehaltener Anpresskraft bei T0; (a) $p_L = 70 - 3980$ mbar, $F_p = 135 - 390$ N, (b) $p_L = 70 - 1140$ mbar, $F_p = 70 - 155$ N

4. Im Bereich des progressiven Zusammenhangs zwischen Q_L und p_L verhält sich der Luftstrom zunehmend reziprok zur Belastung.

Eine vergleichbare Auswertung ist bei T2 nicht durchführbar. Die Messungen weisen hohe Standardabweichungen im Bereich von $\sigma_{Q_{i,j}} = 11 - 373$ ml min^{-1} auf. Aufgrund der hohen Klebrigkeit können Messungen nur bis zu einer Anpresskraft von etwa $F_p \approx 75$ N durchgeführt werden. Bei höheren Belastungen tritt häufig kein Luftstrom mehr auf.

Bei der Betrachtung der einzelnen Messreihen wie in Abb. 3.33 auf der nächsten Seite ist die Variabilität des T2-Prepregs deutlich zu erkennen. Insbesondere bei niedriger Anpresskraft (vgl. Abb. 3.33a) lässt sich der Luftstrom nach keinem der für T0 abgeleiteten Zusammenhänge einordnen. Es können bei gleicher Abfolge des Befülldruckes sowohl progressive, degressive als auch lineare Anstiege des Luftstroms beobachtet werden. Charakteristisch ist insbesondere das nicht vorhersagbare Auftreten von Unstetigkeiten. Hierbei handelt es sich stets um Sprünge positiven Vorzeichens. Dies kann zu einer Änderung im weiteren Verlauf des Luftstroms führen. Häufig ist nach einem Sprung auch eine Abnahme des Stroms zu verzeichnen. Mit steigender Anpresskraft nimmt die Wahrscheinlichkeit eines unsteten Verlaufs ab. In Abb. 3.33b ist beispielsweise der auch bei

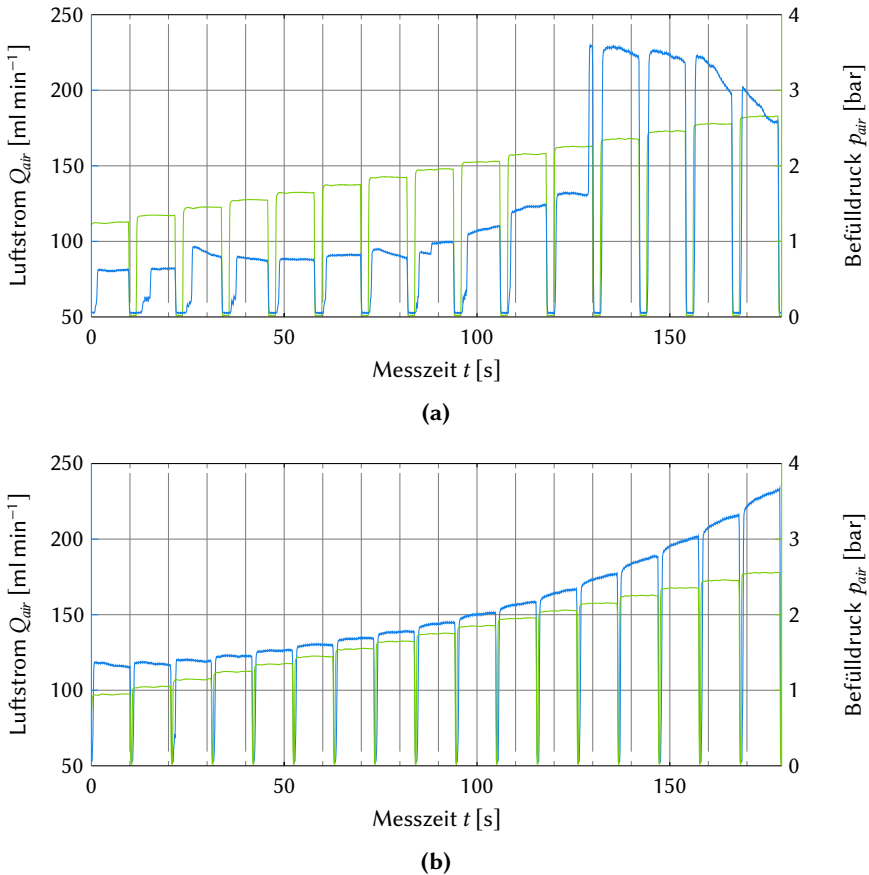


Abb. 3.33.: Luftstromverläufe bei vorgehaltener Anpresskraft und steigendem Befülldruck zur Analyse der zeitlich invarianten Domäne bei T2; (a) $F_P = 52 \pm 1$ N, (b) $F_P = 65 \pm 1$ N

T0 beobachtete progressive Verlauf (vgl. Zusammenhang 3) zu erkennen. Die Durchläufe bei identischer Probe und Belastung unterliegen quantitativ jedoch stärkeren Schwankungen, was zu den hohen Standardabweichungen in der Gesamtauswertung führt.

Aufgrund der zu beobachtenden Sprünge im Luftstrom liegt es nahe, den Messbereich auf Basis der maximal erreichten Ströme zu analysieren. Entgegen der Darstellungen für T0 sind in Abb. 3.34 auf der nächsten Seite somit nicht die

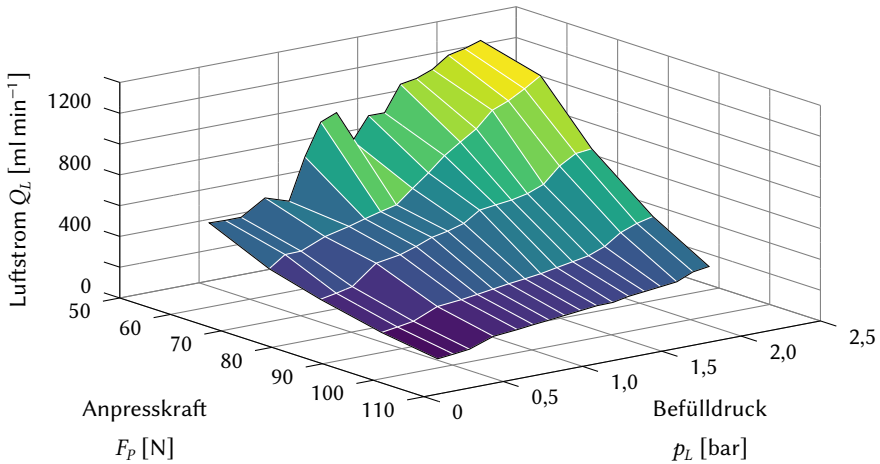


Abb. 3.34.: Maximal erreichter Luftstrom in Abhängigkeit von Befülldruck und vorgehaltener Anpresskraft bei T2, $p_L = 330 - 2050$ mbar, $F_P = 55 - 75$ N

Mittel-, sondern die Maximalwerte $Q_{max,i,j}$ visualisiert. Anhand dieser Darstellung lässt sich grundsätzlich ein ähnliches Verhalten wie bei T0 vermuten.

3.3.5. Übergang zur Undurchlässigkeit von T2-Prepreg

Das bisher analysierte Verhalten von T2-Prepreg weicht stark von T0 ab. Kritisch ist insbesondere die geringe Belastbarkeit. Bereits geringe Anpresskräfte verhindern einen (mit hier verwendeter Messtechnik detektierbaren) Luftstrom. Mit steigendem Befülldruck nimmt zudem die Wahrscheinlichkeit von Unstetigkeiten, also Sprüngen im Luftstrom, zu. Die Systemantwort bei wiederholter Impulsanregung durch kurze Luftstöße (Schalten eines Befülldrucks mit $p_L \geq 1$ bar für 400 ms) ist dabei quasi binär. Dies bedeutet, dass entweder ein relativ hoher ($Q_L > 1000$ ml min⁻¹) oder kein messbarer Luftstrom auftritt.

Mit solcher wiederholter Impulsanregung kann der Übergang zum undurchlässigen Arbeitsbereich näher analysiert werden. Die Belastung ist dabei analog zur vorangegangenen Untersuchung vorzuhalten. Die Luftstöße liegen jeweils 15 s auseinander. Abb. 3.35 auf der nächsten Seite zeigt die Häufigkeit des Auftretens eines Luftstroms jeweils bei zehnfacher Wiederholung pro Messpunkt. Hierbei ist deutlich ein stochastisches Verhalten erkennbar. Zum einen zeigt sich dies an der Unschärfe des Übergangs. Hier ist die Wahrscheinlichkeit einer Undurchlässigkeit teils ebenso hoch wie einer Durchlässigkeit. Zum anderen besteht selbst

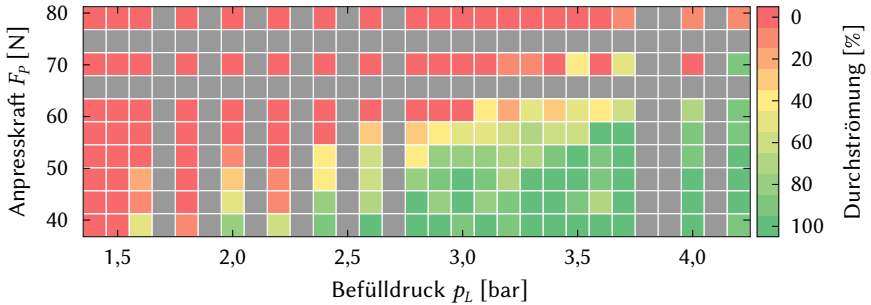


Abb. 3.35.: Häufigkeitsverteilung von hohen Luftströmen bei Befülldruckimpulsen und vorgehaltener Anpresskraft bei T2

unter günstigen Bedingungen eine geringe Wahrscheinlichkeit der Undurchlässigkeit (wie etwa in einem von zehn Fällen bei $p_L = 4,2$ bar und $F_P = 39$ N)

3.3.6. Diskussion der Ergebnisse

Bei einer sprunghaften Belastung und Durchströmung aus der Ruhelage heraus fällt der anfänglich hohe Luftstrom exponentiell ab. Dieses Verhalten ähnelt der kompressionsbedingten Abnahme der Permeabilität K bei reinen Prepreg-Luftströmen, wie etwa von Nam et al. [87] beobachtet. Dort wurde ein Modell auf Basis einer Deformation des Prepregs als „standard-linearer-Starrkörper“ entwickelt:

$$K(t) = K_\infty \left(1 + be^{-t/\tau_K}\right), \quad (3.36)$$

mit der finalen Permeabilität K_∞ , dem Durchgangskoeffizienten b und der Zeitkonstante τ_K . Weiterhin für eine Kompression sprechen die Unabhängigkeit vom Befülldruck sowie die teilweise Reversibilität. Letztere lässt sich mit einer elastischen Verformung erklären. Der irreversible Anteil deutet dabei auf eine Veränderung der Porenstruktur hin.

In allen betrachteten Szenarien weist der Luftstrom nichtlineare Abhängigkeiten zu dem Befülldruck und der Anpresskraft auf. Dies gilt grundsätzlich sowohl für T0 wie T2. Bei der Analyse des zeitlich invarianten Bereichs von T0 in Unterabschnitt 3.3.4 zeigt sich eine starke Abnahme des Gradienten $\delta Q/\delta p$ bei steigender Belastung und Befülldrücken $p_L > 2$ bar. Ob sich hier ein Plateau ausbildet oder der Luftstrom gegebenenfalls mit geringem, jedoch zunehmend konstantem Gradienten steigt, lässt sich mit der verfügbaren Messtechnik nicht beurteilen. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass in dem für den KFM-Eintrag relevanten Parameterraum der Prozessgrößen keine lineare Gesetzmäßigkeit nach Darcy für den Luftstrom angenommen werden kann. Die eingangs formulierte

Nullhypothese ist entsprechend widerlegt. Damit ist weiterhin bestätigt, dass der Strom hauptsächlich durch die Grenzschicht Wabe-Prepreg und nicht durch das Prepreg selbst verläuft. Für den Befüllprozess bedeutet dies, dass stets eine ausreichende Zahl benachbarter Zellen frei sein muss, um das Entweichen der Luft nicht zu verhindern.

Das abweichende Verhalten des T2-Prepregs kann weitestgehend mit der geringeren Viskosität des Harzes erklärt werden. Diese führt etwa zu einer geringeren Steifigkeit und somit stärkeren Kompressibilität. Die zeitlich invariante Domäne wird dadurch schneller erreicht. Eine mögliche Hypothese zur Erklärung des stochastischen Verhaltens und der Unstetigkeiten ist die Bildung von Klebenähten. Mit der geringeren Viskosität nehmen die Kapillarkräfte zu. Die Benetzung der Wabenstege ist bereits bei geringen Belastungen möglich. Eine Begünstigung ergibt sich durch das Eindringen der Stege in das Harz bei steigenden Anpresskräften. Mit zunehmendem Befülldruck können Klebenähte lokal wieder aufbrechen und so zu sprunghaften Anstiegen des Luftstroms führen.

Bei der Wahl von Prozessgrößen können die ermittelten Kennfelder wie etwa aus Abb. 3.32 auf Seite 108 genutzt werden. Grundsätzlich hat sich T0-Prepreg als geeignet erwiesen, um über einen großen Parameterraum hinweg eine vollständige Evakuierung der Luft während der Befüllung zu gewährleisten. Das klebrigere T2-Prepreg ist hingegen bei der Automatisierung zu vermeiden. Das Verhalten kann auf Basis der bisherigen Untersuchungen nicht mit ausreichender Sicherheit vorhergesagt werden. Eine hohe Robustheit wird entsprechend nur mit T0 erzielt.

3.4. Zusammenfassung der Prozessanalyse

In diesem Abschnitt soll das gewonnene Prozessverständnis aus den vorangegangenen Analysen auf die Zielsetzung der Arbeit bezogen werden: der Entwicklung eines optimierten, automatisierten KFM-Eintrags. Dementsprechend werden die relevantesten Ergebnisse im Kontext der drei in Abschnitt 2.3.5 auf Seite 29 identifizierten kritischen Subsysteme diskutiert.

Dosierwerkzeug Das Dosierwerkzeug mit der daran gekoppelten Prozessanlage hat den voraussichtlich größten Einfluss auf die Zielgröße *Qualität*. Aus der Prozessanalyse können einige der konstruktiven Anforderungen konkretisiert werden. Die relevanteste Erkenntnis aus der geometrischen Analyse ist etwa die Empfehlung von runden Düsenquerschnitten. Der in Abschnitt 3.2 identifizierte starke Einfluss der Schlupfströmung verhindert weiterhin den Einsatz der in der Theorie vorteilhaften schmalbandigen Düsengeometrien.

Entsprechend der rheometrischen Untersuchung sollte auch ein volumetrisches Fördersystem eingesetzt werden: Das Stellen eines Fördervolumens über einen regelbaren Pumpendruck ist aufgrund der stark nichtlinearen Strömung kaum zu realisieren. Die sensorische Erfassung des Materialdrucks ist zudem deutlich einfacher und präziser als dies für den Volumenstrom der Fall ist. Die Kombination aus volumetrischer Pumpe und Drucksensor ist entsprechend für den experimentellen, prototypischen Betrieb die flexibelste Lösung.

Die ermittelten Kennfelder zum Luftstrom durch die Grenzschicht zwischen Wabe und Prepreg zeigen, dass bei T_0 auch höhere Anpressdrücke noch zu ausreichenden Luftströmen führen. Entsprechend ergibt sich die Möglichkeit, die Positionierung des Dosierwerkzeugs in Richtung der Kernschicht-Normalen mit einer kraftgeregelten Aktorik zu realisieren. Auch in Hinblick auf die hohen Toleranzen in den Schichtdicken ist dies robuster als eine wegeregelte Positionierung.

Regelung der Förderleistung Das System zur Regelung der Dosierleistung ist im Kontext der *Robustheit* und *Flexibilität* von besonderer Relevanz. Wie aus dem Stand der Wissenschaft und Technik bereits vermutet, sind die Strömungsmodelle in höchstem Grade nichtlinear. Auch die Bestimmung des erforderlichen Volumenstroms mittels geometrischer Modelle ist lediglich zur groben Abschätzung oder Vorsteuerung sinnvoll. Entsprechend sollte der Dosierdruck als alternative Regelgröße geprüft werden.

Auch modellbasierte Regelungskonzepte sind mit den Erkenntnissen der Abschnitten 3.1 und 3.2 nicht realistisch. Stattdessen sollten robuste, klassische Ansätze wie PID-Regler verwendet werden. Dabei ist auf aufgrund des trägen Strömungsverhaltens der KFM auf eine reduzierte Dynamik zu achten.

Programmgenerierung Die automatische Generierung der Pfadparameter ist zwingend erforderlich, um eine hohe *Flexibilität* zu erzielen. Die bedeutendste Erkenntnis der Prozessanalyse in diesem Kontext ist die Notwendigkeit von freien Nachbarzellen. So wird der Luftstrom durch die Waben-Prepreg-Grenzschicht nicht behindert. Entsprechend müssen Flächen stets von innen nach außen befüllt werden.

Die bedingte reduzierte Dynamik der Dosierregelung sollte auch in der Pfadplanung berücksichtigt werden. Daraus folgt die Anforderung einer möglichst geringen Dynamik bei der Änderung des erforderlichen Fördervolumens. Für die Pfadparameter bedeutet dies etwa minimale Werkzeugbeschleunigung (etwa mithilfe geringer Pfadkrümmung) sowie konstante Pfadüberlappung.

Weiterer Forschungsbedarf Die Ergebnisse der Analysen in diesem Kapitel zeigen eindeutig, dass eine analytische Beschreibung des Kernfüllmasseneintrags nicht zielführend ist. Starke Abhängigkeiten zu derzeit nicht quantifizierbaren oder kontrollierbaren Größen verhindern ebenfalls eine vollumfängliche numerische Beschreibung. Die bereits in Abschnitt 2.3 erwartete Komplexität des Prozesses hat sich grundsätzlich bestätigt. Mit der hier erstmalig durchgeführten, theoretischen Auseinandersetzung mit dem Befüllprozess sind wesentliche Grundsteine zur Vertiefung des Prozessverständnisses gelegt. In den einzelnen Abschnitten wurden konkrete Handlungsanweisungen für den Prozess beziehungsweise dessen Konzeptionierung abgeleitet.

Vertiefende Forschung ist durch Ausweitung der Versuchsreihen zur Rheologie sowie der Luftströme möglich. Forschungsfragen ergeben sich aus der Klärung der möglichen Beeinflussung und Bestimmung der Schlupfströmung sowie der Untersuchung des Luftstroms bei T2-Prepreg. Dies bedeutet jedoch einen erheblichen Mehraufwand, dessen Nutzen hinsichtlich der Optimierung des industriellen Prozesses nicht gewiss ist. Die bisher gewonnenen Erkenntnisse werden somit zunächst genutzt, um eine industrietaugliche Befüllprozess zu konzeptionieren. Mithilfe des zu entwickelnden, produktionsnahen Prototypen sind wiederum weitere Untersuchungen möglich. Nur so können auch die fachlich stark divergenten Abhängigkeiten berücksichtigt werden.

4. Entwicklung des optimierten, automatisierten KFM-Eintrags

In diesem Kapitel soll der automatisierte KFM-Eintrag technisch realisiert werden. Die Entwicklung unterteilt sich in die drei in Abschnitt 2.3.5 auf Seite 29 identifizierten, kritischen Subsysteme. Jedes dieser Systeme hat starke Einflüsse auf die zu optimierenden Zielgrößen Qualität, Robustheit und Flexibilität.

Zunächst wird in Abschnitt 4.1 die technische Plattform in Form einer Demonstratoranlage geschaffen. Schwerpunkt ist dabei die Entwicklung eines speziellen Befüllwerkzeugs, welches eine maximale Prozessqualität gewährleisten soll. Die Stellung der erforderlichen Dosierleistung ist integraler Bestandteil des flexiblen und robusten Prozesses. Das entsprechende Regelungssystem für das Fördervolumen wird in Abschnitt 4.2 entwickelt. Zum flexiblen und wirtschaftlichen Einsatz der automatisierten Befüllung bei geringen Losgrößen ist ein geringer Planungsaufwand erforderlich. Der dazu notwendige Algorithmus zur automatischen Programmgenerierung aus CAD-Daten wird in Abschnitt 4.3 erarbeitet.

Die Entwicklung der Teilsysteme wird mit einer jeweils identischen Methodik durchgeführt: Auf Basis des im letzten Kapitel erarbeiteten Prozessverständnisses werden zunächst die Anforderungen diskutiert. Daraus werden Lösungsansätze abgeleitet und technisch umgesetzt. Die Erfüllung der Anforderungen wird daraufhin praktisch validiert. Im Abschluss jedes Unterkapitels werden die Ergebnisse zusammenfassend und im Hinblick auf die Zielgrößen diskutiert. Eine abschließende Diskussion des Gesamtsystems wird in Abschnitt 4.4 durchgeführt.

4.1. Entwicklung des Befüllsystems

Das Grundkonzept des KFM-Eintrags wurde bereits in Abschnitt 2.3.1 auf Seite 25 beschrieben. Dabei wird die Füllmasse bei bereits gelegter unterer Decklage und Kernschicht über die Wabenoberseite mit einer Düse eingepresst. In der konkreten technischen Umsetzung sind jedoch noch etliche Freiheitsgrade gegeben. Entsprechend wird in den folgenden Abschnitten ein prototypisches Befüllsystem entwickelt, wobei konzeptionelle und konstruktive Entscheidungen unter der Prämisse der maximalen Prozessqualität getroffen werden.

Dazu werden zunächst in Abschnitt 4.1.1 die technischen Anforderungen konkretisiert. Diese leiten sich aus den zu optimierenden Zielgrößen, dem Prozessverständnis sowie der industriellen Rahmenbedingungen ab. Zur Entwicklung des Befüllsystems wird in Abschnitt 4.1.2 zunächst das grundlegende Anlagenkonzept festgelegt. Die Konzeptionierung des Dosierwerkzeugs als Kernkomponente ist ausführlicher in 4.1.3 dargestellt. In Abschnitt 4.1.4 wird das Steuerungssystem entwickelt und implementiert. Es garantiert die korrekte Durchführung des Dosierprozesses und ist flexibel um verschiedene Regelungssysteme für das das Fördervolumen erweiterbar. Abschließend wird das Gesamtsystem in Abschnitt 4.1.5 in Betrieb genommen und einer praktischen Validierung unterzogen.

4.1.1. Anforderungen

Die Diskussion der Anforderungen an den Befüllprozess wurden bereits in den vorangegangenen Kapiteln angestoßen. Sie lassen sich im Wesentlichen auf die Optimierung der Zielgrößen Qualität, Robustheit und Flexibilität reduzieren (vgl. Abschnitt 2.3.3). Praktisch bedeutet dies etwa eine vollständige Befüllung und eine Minimierung von Materialverlust. Aufgabe der Fertigungsanlage ist es, den Befüllprozess anforderungsgerecht umzusetzen. Im Rahmen der Entwicklung ist die Anforderungsliste weiter zu spezifizieren. Die Grundlage dazu bilden die aus dem Prozessverständnis hervorgehenden Erkenntnisse entsprechend Abschnitt 3.4. Es ist noch nicht vollends geklärt, wie der optimale Befüllprozess realisiert werden kann. Somit erfordert der experimentelle Betrieb eine erhöhte Flexibilität, insbesondere in der Mess- und Regelungstechnik. In Tabelle 4.1 auf der nächsten Seite sind die wesentlichen technischen Anforderungen zusammengefasst. Diese werden in die drei Kategorien Gesamtsystem, Dosierwerkzeug und Messtechnik eingeteilt.

Gesamtsystem Die Anforderungen der Kategorie *Gesamtsystem* sind grundlegender Natur und orientieren sich besonders am industriellen Einsatz. Im Bereich ebener Paneele liegt das gebräuchliche Maximalmaß bei 2500×1500 mm, das dem Standardzuschnitt der Kernschicht entspricht. Der Demonstrator soll grundsätzlich in der Lage sein, gekrümmte Strukturen mit einem Praxis-üblichen Krümmungsradius $R \geq 200$ mm zu befüllen. Dementsprechend muss das Handhabungsgerät je nach Düsengeometrie mindestens fünf Freiheitsgrade (englisch: *Degrees of Freedom*, kurz DOF) aufweisen. Die Materialzuführung sollte aus größeren Gebinden (industriellüblich: 20l) erfolgen, um Produktionsstopps zu vermeiden und längere Versuchszeiten zu ermöglichen. Aufgrund der hohen Abhängigkeit der Materialeigenschaften (sowohl der KFM als auch der Prepregs)

Tab. 4.1.: Kernanforderungen an das prototypische Befüllsystem (mit F: Forderung, Z: Zielgröße, W: Wunsch)

#	Typ	Bezeichnung	Wert
<i>Gesamtsystem</i>			
1.	Z	Maximale Bearbeitungsfläche / Paneelgröße	$\geq 2500 \times 1500$ mm
2.	F	Eignung zur Bearbeitung gekrümmter Paneele	≥ 5 DOF, $R \geq 200$ mm
3.	W	Industrieübliche KFM	Cytec BR623P4 [107]
4.	W	Industrieübliches Prepreg mit T0	
5.	F	Beständigkeit der Material-führenden Komponenten	vgl. Datenblatt KFM; z. B. Edelstahl, EPDM
6.	W	Kontinuierliche Förderung	Gebindegröße 20 l
7.	Z	Klimatisierung der Arbeitsumgebung	20 ± 1 °C, 45 ± 10 % rF
<i>Dosierwerkzeug</i>			
8.	F	Volumetrische Dosierpumpe	
9.	Z	Maximales Fördervolumen	≥ 300 ml min ⁻¹
10.	F	minimale Dosiermenge (Zylinder $R = 25$ mm, $H = 10$ mm)	4,9 ml
11.	Z	Düsendurchmesser	8 – 25 mm
12.	W	Schneller Düsenwechsel	manuell ≤ 60 s
13.	Z	Reproduzierbarer TCP bei Wechsel	$\Delta R \leq 0,1$ mm
14.	Z	Steuerung der Kontaktkraft Düse-Wabe	0 – 100 N
15.	W	Geringe Reibung an Strömungswänden	$R_a \leq 1$ μ m
16.	W	Geringe Reibung zw. Düse-Wabe	$R_a \leq 1,5$ μ m
17.	W	Geringer Strömungswiderstand in Leitungswegen	Querschnittänderung nur bei Düse
<i>Mess- und Regelungstechnik</i>			
18.	F	Messung aller Prozessgrößen	p, Q_F, \mathbf{x}, T_F
19.	W	Messung der Umgebungsbedingungen	T, φ
20.	W	Erfassung Wabenstruktur	
21.	W	Modulare Dosierregelung zur flexiblen Erweiterung	

von Umgebungsbedingungen muss eine Klimatisierung in definierten Grenzen sichergestellt werden.

Dosierwerkzeug Das *Dosierwerkzeug* übernimmt die Dosierung beziehungsweise Stellung des Fördervolumens der KFM am Düsenauslass. Aus praktischen Vorversuchen (vgl. Abschnitt 2.3.2) ist bekannt, dass ein Volumenstrom von $Q_F = 300 \text{ ml min}^{-1}$ grundsätzlich erreicht werden kann. Inwiefern dieses Fördervolumen auch bei kleinen Auslassflächen aufrechterhalten werden kann und wann die Strömungswiderstände zu stark ansteigen, ist in der weiteren experimentellen Analyse zu klären. Aus der Auswertung von Sandwichkonstruktionen wird abgeleitet, dass mit einem minimalen Düsendurchmesser von $D_D = 8 \text{ mm}$ alle notwendigen Details abgebildet werden können. Dabei werden die Erkenntnisse aus Abschnitten 3.1 und 3.2 berücksichtigt: Bei diesem Durchmesser sind mit kreisförmiger Düse die erforderlichen Volumenströme noch zu erreichen. Soweit möglich, sollten größere Durchmesser eingesetzt werden, um den Strömungswiderstand gering zu halten. Bei $D > 25 \text{ mm}$ besteht jedoch die Gefahr eines zu beschränkten Einsatzbereiches und somit häufiger Werkzeugwechsel.

Messtechnik Um den Befüllprozess experimentell analysieren zu können, müssen einige Anforderungen an die *Messtechnik* erfüllt sein. Unbedingt erforderlich ist die Erfassung der Prozessgrößen Dosierdruck p , Fördervolumen Q_F , Werkzeugbewegung \mathbf{x} (inkl. zeitlicher Derivate) sowie Materialtemperatur T_F . Über die Messung der Umgebungsbedingungen können Änderungen im Materialverhalten festgestellt werden. Wird weiterhin der Materialeinsatz protokolliert (insbesondere Lagerzeiten und -temperaturen), können auch Alterungseffekte betrachtet werden. In einigen Anwendungen, etwa zur Integration der geometrischen Modelle nach Abschnitt 3.1, ist die Erfassung der tatsächlichen Wabenstruktur erforderlich. Die Entwicklung und Implementierung verschiedener Regelungskonzepte in Abschnitt 4.2 wird durch ein modulares Steuerungssystem vereinfacht. Dabei kann das Modul zur Regelung des Fördervolumens flexibel ausgetauscht werden.

4.1.2. Anlagenkonzept

Aus der Prozessbeschreibung nach Abschnitt 2.3.1 sowie 3.1 und den Anforderungen kann die technische Umsetzung abgeleitet werden. Hierbei ist kein großer Entwicklungsaufwand erforderlich: Die industriell verfügbaren Anlagen erfüllen die Anforderungen an das Gesamtsystem und dienen somit als valide konzeptionelle Grundlage. Entsprechend werden in diesem Abschnitt lediglich die gewählten Komponenten knapp begründet und beschrieben.

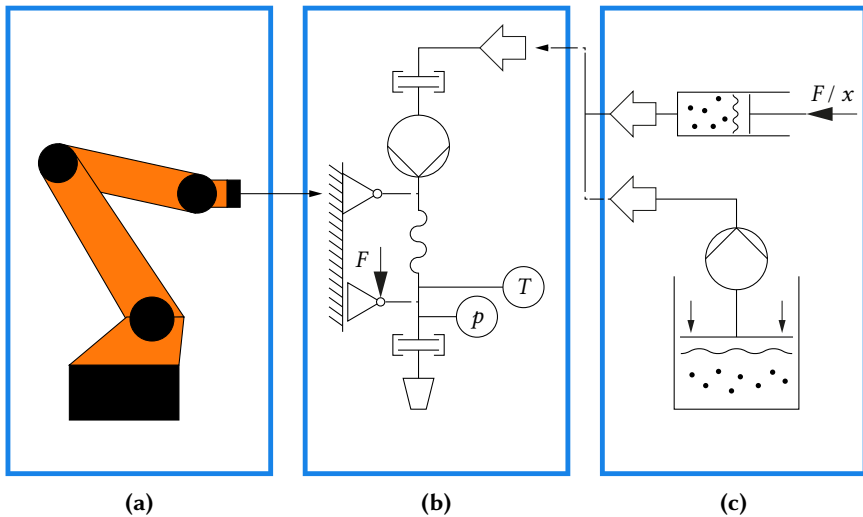


Abb. 4.1.: Konzeptioneller Aufbau des technischen Demonstrators zum Kernfüllmasse-Eintrag; aufgeteilt in Handhabungssystem (a), Dosierwerkzeug (b) und Systeme zur Materialzufuhr (c)

Das Grundkonzept des Befüllsystems ist in Abb. 4.1 skizziert. Aufgrund der geforderten Flexibilität bietet sich der Einsatz eines Industrieroboters als Handhabungsgerät an. Das Dosierwerkzeug wird hiermit positioniert und bewegt. In dem Werkzeug integriert und möglichst nah am Düsenauslass ist die Sensorik für Dosierdruck und Materialtemperatur. Über eine zusätzliche Z-Achse wird der Kontakt zwischen Düse und Kernschicht hergestellt und eine Anpresskraft aufgebracht. Die Materialzuführung sowie die Düse werden über dichtende, lösbare Verbindungselemente angeschlossen. So ist zum einen ein schneller Werkzeugwechsel gewährleistet. Zum anderen können bei der Zuführung Entleersysteme verschiedener Gebindegrößen eingesetzt werden.

Für den Großteil des Demonstrators (insbesondere Handhabung, vgl. Abb. 4.1a, und Materialzufuhr, vgl. Abb. 4.1c) können industrielle Standardkomponenten eingesetzt und so Entwicklungszeit gespart werden. Als Handhabungsgerät wird ein am Institut verfügbarer Knickarmroboter vom Typ KUKA KR300 R2500 ultra verwendet (Anforderung #2). Die hohe Steifigkeit und die Nenntaglast von 300 kg sind für den Kernfüllmasseneintrag überdimensioniert, jedoch nicht von Nachteil. Das System wird insbesondere aufgrund der maximalen Reichweite von 2500 mm gewählt, womit die geforderte Größe der Bearbeitungsfläche gegeben ist (#1). Zur Einhaltung der spezifizierten Umgebungsbedingungen (#7) wird eine

geschlossene Roboterzelle entworfen und mit einer handelsüblichen Klimaanlage (Daikin Inverter FTXM 50) versehen. Der finanzielle Mehraufwand zur gezielten Regelung der Luftfeuchte ist zum experimentellen Betrieb nicht gerechtfertigt, weshalb hier eine operative Lösung angestrebt wird: Über eine manuell gesteuerte Luftentfeuchtung wird die relative Feuchte auf einem niedrigen Niveau von $\varphi = 35 - 40\%$ rF gehalten. Sollte dies aufgrund der Umgebungsbedingungen nicht realisierbar sein, wird der Versuchsbetrieb eingestellt.

Im Rahmen der Experimente weist der Einsatz kleiner Gebinde, beispielsweise von Kartuschen, eine Reihe an Vorteilen auf. Bei geringerem Materialverbrauch als in der industriellen Produktion können kleinere Mengen nach Bedarf aufgetaut und die Alterung so besser kontrolliert werden. Eine Abweichung vom Standardgebilde mit 20 l erfordert jedoch meist eine Abfüllung durch einen externen Dienstleister, was mit erheblichen Mehrkosten verbunden ist. Aus diesem Grund verfügt der Demonstrator über ein Fassentleersystem mit Folgeplatte (im Folgenden als „Hobbock“ bezeichnet), dargestellt in Abb. 4.2a auf der nächsten Seite. Bei umfangreichem Versuchsplan oder hohen Volumenströmen kann die Materialzufuhr direkt aus 20 l Gebinden realisiert werden (erfüllt #3 und 6). Der Hobbock eignet sich weiterhin zur Kartuschenabfüllung. Wird eine geringere Materialmenge benötigt, können entsprechend Druckluft-beaufschlagte Kartuschen mit bis zu 910 ml (vgl. Abb. 4.2b) an das Dosierwerkzeug angeschlossen werden. Als Anschlussystem werden „TriClamp“-Klemmdichtungen nach DIN 32676 [21] eingesetzt. Diese erlauben einen schnellen Wechsel, sind leicht zu reinigen und beeinträchtigen den Strömungsverlauf nicht (#12, 17). Sie können auch zum Werkzeugwechsel genutzt werden, da eine präzise und wiederholbar konzentrische Verbindung erreicht wird (#13).

Im Rahmen der experimentellen Flexibilität wurden optische Messverfahren zur Erfassung der Wabengeometrie geprüft (#20). Aufgrund der strukturellen Besonderheiten des Wabenkerns mit dünnen Stegen in regelmäßiger Anordnung ist kein Messverfahren offensichtlich zu bevorzugen. Jiang et al. [63] schlagen etwa den Einsatz einer Stereokamera mit strukturiertem Licht vor. Das Verfahren erfordert jedoch längere Aufnahmezeiten und kann entsprechend während einer Messung nicht bewegt werden. Als geeignete Alternative wurde die Geometriebestimmung mittels Laserlichtschnittsensor identifiziert. Ein zur konzeptionellen Validierung aufgenommener Scan ist in Abb. 4.3 auf der nächsten Seite dargestellt. Der Messkopf kann an dem Dosierwerkzeug montiert werden und kontinuierlich während der Befüllung die Wabenstruktur abtasten.

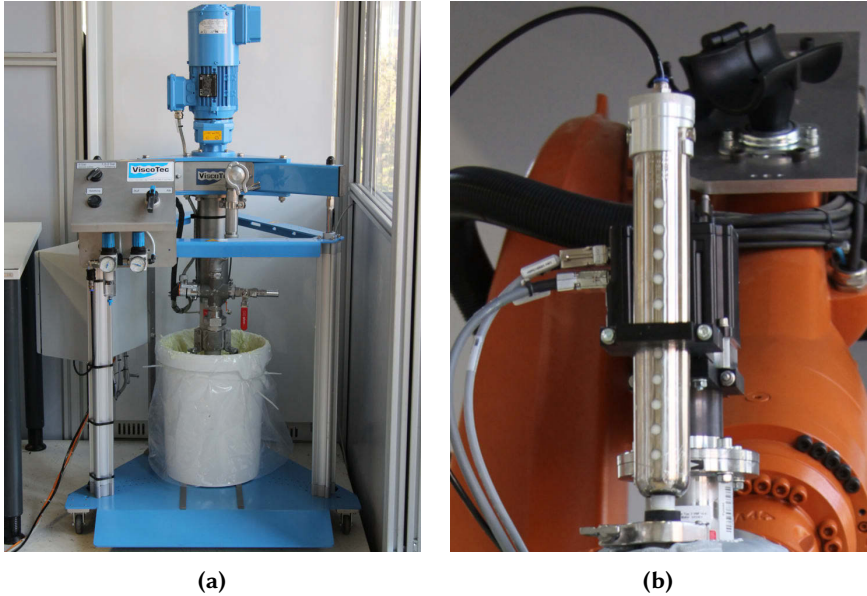


Abb. 4.2.: Eingesetzte Systeme zur Materialzufuhr; (a) Hobock, (b) Druckluft-beaufschlagte Kartusche

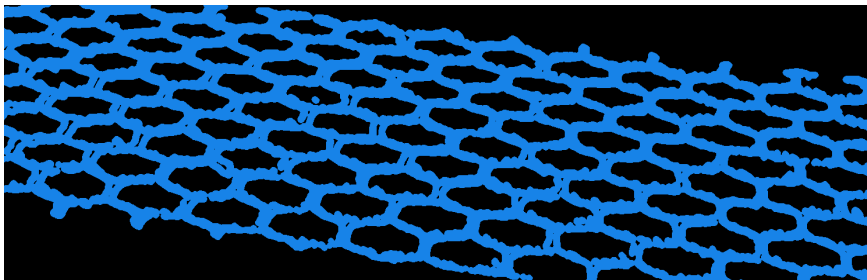


Abb. 4.3.: Exemplarische Punktwolke aus der Messung der Wabenstruktur mittels Laserlichtschnittsensor

4.1.3. Entwicklung des Dosierwerkzeuges

Das Dosierwerkzeug (vgl. Abb. 4.1, S. 119) ist das technische Kernelement des Befüllprozesses. Es muss das geforderte Fördervolumen *dosieren*, die Düse mit geregelter Kraft *anpressen*, das Material von der Pumpe zur Düse *leiten* und das

Einströmen in die Wabenzellen ohne Materialverluste gewährleisten. Die Lösungsansätze zu den jeweiligen Funktionen werden im Folgenden näher erläutert.

Dosieren Aufgrund der hohen Viskosität der KFM (#3) kommt praktisch nur eine hydrostatische Leistungsumsetzung nach dem Verdrängerprinzip infrage. Hierbei ist auch die Schersensitivität der beigemischten Glashohlkugeln zu beachten. Geeignete Verdrängermaschinen, die den erwarteten Arbeitsbereich von $p \approx 1 - 10 \text{ bar}$, $Q_F \approx 300 \text{ ml min}^{-1}$ (#9) abdecken können, sind etwa Zahnradpumpen und Exzentrerschneckenpumpen (englisch: *progressive cavity pump*, kurz PCP). Letztere verursacht geringe Scherkräfte und ist daher besonders geeignet. Eine weitere Fördermöglichkeit ergibt sich bei der direkten Entleerung von Kartuschen, was dem Hubkolbenprinzip entspricht.

Beim Verdrängerprinzip ist das geförderte Volumen vom Hub beziehungsweise dem Drehwinkel abhängig. Bei einer verschiebungsgeregelten Förderung kann unter Vernachlässigung von Schlupf somit direkt der Volumenstrom gesteuert und auf eine messtechnische Erfassung desselben verzichtet werden. Insbesondere bei Umfangsmaschinen (wie der PCP) ist dies das bevorzugte Verfahren. Bei der Kartuschendosierung bietet sich alternativ die besonders kostengünstige kraftgeregelte Förderung, etwa mit Druckluft, an. Eine präzise Dosierung erfordert hier jedoch den Einsatz fluidtechnischer Modelle (vgl. Abschnitt 2.4.6).

Für den Demonstrator fällt die Wahl auf den Einsatz einer PCP, deren Vorteile klar überwiegen. Aufbauend auf den hiermit gewonnenen Erkenntnissen kann bei der Entwicklung einer industriellen Anlage geprüft werden, ob auch kostengünstigere Lösung infrage kämen. Basierend auf den Anforderungen der industriellen Anwendung wird eine Exzentrerschneckenpumpe vom Modell 3MPV18 der Firma ViscoTec eingesetzt. Hiermit kann bei einem Dosiervolumen von $\Delta V \approx 7,5 \text{ ml/U}$ ein Volumenstrom von bis zu $Q_F = 937,5 \text{ ml min}^{-1}$ erreicht werden. Dabei ist zu beachten, dass laut Hersteller im Standardbetrieb die Förderung unter 50 % der Maximalleistung liegen sollte. Die minimale Dosiermenge von $V_{min} = 0,45 \text{ ml}$ liegt deutlich unter der spezifizierten Forderung (#10).

Anpressen Die Anpressaktorik wird in Form einer kraftgeregelten Linearachse in das Dosierwerkzeug integriert. Es wird erwartet, dass der Toleranzausgleich der Kernhöhe von einer geringen Steifigkeit der Aktorik profitiert. Dies erlaubt den kostengünstigen Einsatz von Pneumatikzylindern. Die Komplexität der integrierten Aktorik ergibt sich durch den erforderlichen Längenausgleich in der Leitung. Hierzu werden zwei Lösungen in praktischen Versuchen verglichen.

In einem ersten Werkzeugentwurf wird die Eignung platzsparender Gleitführungen geprüft. Eine entsprechende Passung erlaubt die axiale Relativbewegung

zweier konzentrischer Rohrleitungen. Die Strömungswiderstände der dabei auftretenden Spaltmaße sind ausreichend hoch, um ein Austreten der KFM zu verhindern. Bei längerer Standzeit zeigt sich jedoch, dass sich bereits unter geringem Druck Harz und Härter trennen. Der Härter kann dabei durch kleinste Öffnungen entweichen. Das zähflüssige Material verklebt daraufhin die Gleitpassung und erschwert die Relativbewegung.

Eine geeignete Alternative stellen Axialkompensatoren dar. Diese werden üblicherweise bei Rohrleitungen zum Ausgleich von Unsicherheiten in der Leitungslänge eingesetzt und sind entsprechend auf statische Beanspruchung ausgelegt. Die Anpressaktorik soll jedoch im Wesentlichen eine Kraft stellen und übt einen Hub von maximal $\Delta x = \pm 1$ mm aus. Damit sind weit über 1×10^5 Wechselspiele möglich. Dennoch gilt es zu beachten, dass es sich um ein Verschleißteil handelt, das entsprechend in Wartungsintervallen ausgetauscht werden muss. Für den Demonstrator wurde die kleinstmögliche Bauweise (Nenndurchmesser von $D_D = 25$ mm) gewählt. Der Balg aus Polytetrafluorethylen (PTFE) weist eine geringe axiale Steifigkeit sowie hohe chemische Beständigkeit auf.

Leiten Die Funktion *Leiten* betrifft grundsätzlich alle Material-führenden Komponenten. Dabei ist ein geringer Strömungswiderstand beziehungsweise geringe Scherbelastung einzuhalten (#15, 17). Dazu werden Querschnittübergänge vermieden. Entsprechend wird der Nenndurchmesser von $D = 25$ mm am Pumpenausgang bis zum Düsenwechselsystem beibehalten. Weiterhin sind möglichst kurze Strömungswege einzuhalten. Sowohl die Messtechnik sowie das Dosiersystem sollten möglichst nah am Prozess liegen, um Totzeiten zu vermeiden.

Einfüllen Die Schnittstelle zum Wabenkern stellt die Düse dar. Zur Untersuchung verschiedener Geometrien, muss der Auslass als eigenständiges Bauelement leicht zu wechseln sein. Ein Werkzeugwechsel darf weiterhin keinen Einfluss auf den eingemessenen TCP haben, ansonsten würde ein erheblicher Zusatzaufwand entstehen. Diese Einschränkung gilt für die konzentrische Ausrichtung, da die Anpressaktorik Abweichungen in axialer Richtung ausgleichen kann (#13). Als technisch robuste und preiswerte Lösung bietet sich das bereits zum Anschluss der Materialzuführung verwendete TriClamp-System an. Dieses garantiert eine koaxiale Verbindung, sodass kreisförmige Düsen ohne weiteres gewechselt werden können. Die radiale Ausrichtung kann entweder über Markierungen am Umfang unterstützt oder durch formschlüssige Elemente (wie Nut und Pin) sichergestellt werden. Für kreisförmige Düsen ist dies nicht notwendig. Grundsätzlich erfordert das System einen manuellen Werkzeugwechsel, was im Rahmen der Experimente unproblematisch ist.

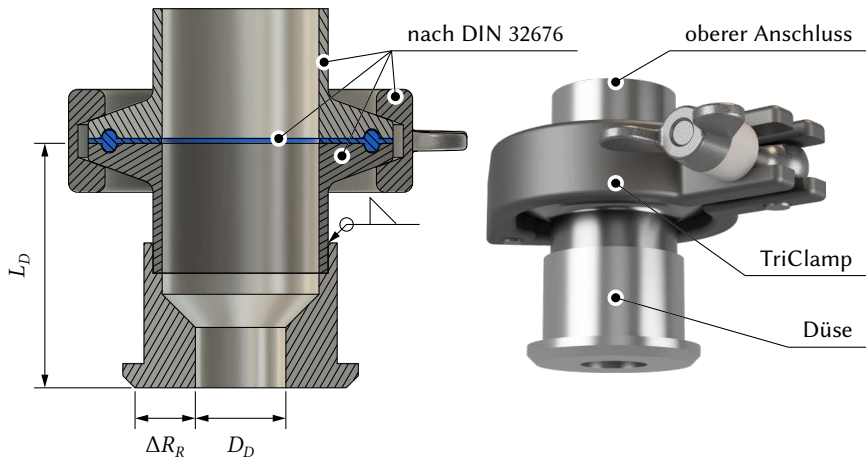


Abb. 4.4.: Werkzeugwechselsystem mit TriClamp-Klemmdichtung mit angeschlossener Düse

Zur praktischen Untersuchung des Befüllprozesses werden kreisförmige Düsen eingesetzt, insbesondere um die Vorteile in der Bahnplanung zu nutzen. Der TriClamp-Werkzeuganschluss mit exemplarischer Düse ist in Abb. 4.4 dargestellt. Die Varianten unterscheiden sich dabei in Durchmesser D_D der Auslassfläche und Breite δR_R des Kragens. Alle Varianten haben eine einheitliche Länge von $L_D = 40,5$ mm, entsprechend ist der TCP identisch. Die Düsenränder weisen für alle Werkzeuge einheitlich am Außendurchmesser eine Fase mit 45° und minimaler Länge von 2 mm auf. Bei ungebrochener Kante kann es zur Beschädigung des Wabenkerns sowie Behinderung der Düsenbewegung kommen. Aus Gründen der chemischen Beständigkeit und des geringen Reibungswiderstandes sind die verwendeten Düsen aus Edelstahl gedreht (#5, 15, 16).

Darstellung des Gesamtsystems Die gesamte Baugruppe des Dosierwerkzeugs ist in Abb. 4.5 dargestellt. Den größten Teil nimmt die Pumpe inklusive Heizmanschette ein. Der Einsatz eines Axialkompensators führt unweigerlich zu längeren Strömungswegen. Der resultierende Abstand vom Pumpenausgang zum Düsenanschluss beträgt dabei 185,5 mm. Die Messtechnik, bestehend aus Temperaturfühler und Druckwandler, ist im minimalen Abstand von 35,5 mm zur Düse integriert. Ein weiterer Druckwandler ist am Pumpeneingang angebracht, um den Eingangsdruck zu kontrollieren (erforderlich sind 1 – 10 bar absolut).

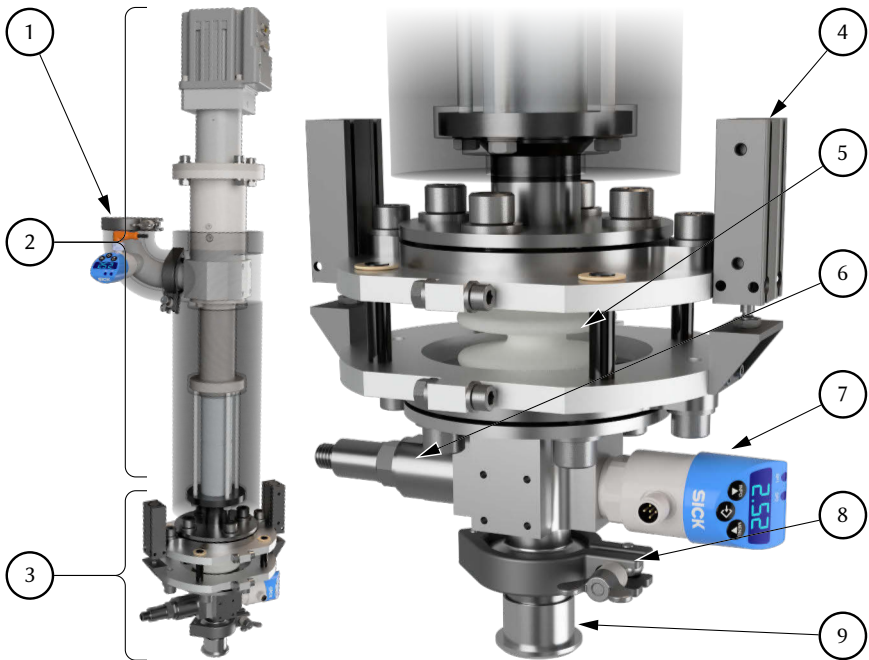


Abb. 4.5.: CAD Entwurf des finalen Dosierwerkzeugs; (1) Anschluss Materialzufuhr, (2) Exzentrerschneckenpumpe, (3) Materialleitungssystem, (4) Anpressaktorik, (5) Axialkompensator, (6) Temperaturfühler, (7) Drucksensor, (8) TriClamp-Düsenanschluss, (9) Düse

4.1.4. Entwicklung und Implementierung des Steuerungssystems

Grundsätzlich wäre die Prozesssteuerung in die Robotersteuerung integrierbar. Dieser Ansatz erfordert ein Minimum an Schnittstellen, hat jedoch einige prägnante Nachteile: Bei Industrierobotern haben sich herstellerübergreifend standardisierte Programmiersprachen nicht etablieren können, was die Übertragbarkeit entwickelter Lösungen stark einschränkt. Die Funktionalität der Sprachen ist meist sehr anwendungsspezifisch und Zusatzpakete sind mit weiteren Investitionen verbunden. Auch die Erweiterung um Schnittstellenmodule zum Anschluss der Peripherie ist prinzipiell teurer und weniger flexibel als bei offenen Standards. Somit wird die Prozesssteuerung des Demonstrators über eine zusätzliche speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) realisiert. Über die definierten Schnittstellen

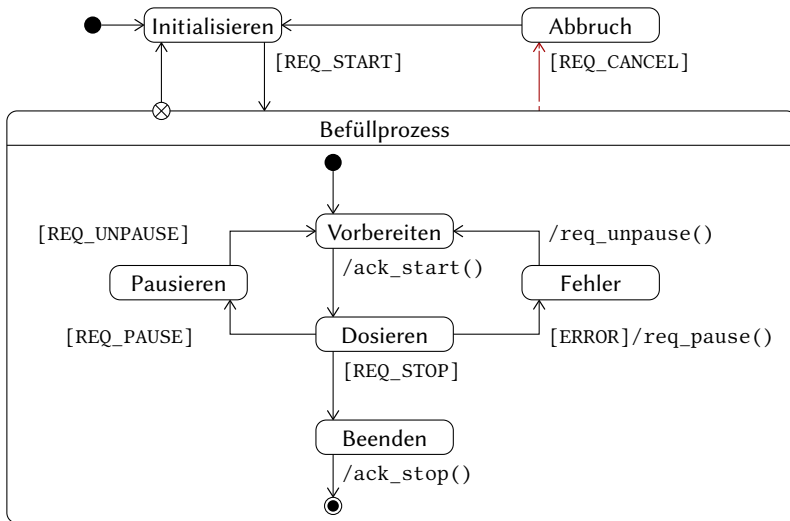


Abb. 4.6.: Zustandsdiagramm der Prozesssteuerung

len ist das System unabhängig vom Handhabungsgerät und kann mit geringem Aufwand etwa in ein Portalsystem integriert werden.

Die Kommunikation basiert auf einfachen Zustandsabfragen und Freigaben. Die Steuerung der Werkzeugbewegung übernimmt das hierfür optimierte Handhabungsgerät. Das dort abgelegte Bearbeitungsprogramm enthält die geplanten Pfade sowie die Information, in welchen Bereichen eine Dosierung aktiviert sein muss. Das Handhabungsgerät fragt entsprechend den Start der Dosierung bei der Prozesssteuerung an (REQ) und wartet auf Freigabe (ACK). Zu Beginn der Dosierung können somit Subroutinen gestartet werden, etwa um die ersten Zellen zu füllen und einen Anfangsdruck aufzubauen. Am Ende der Dosierung wird ebenfalls eine Freigabe abgewartet, um beispielsweise den Druck über einen Pumpenrückzug zu reduzieren und ein Überquellen des Materials beim Abheben der Düse zu vermeiden. Der Dosierprozess kann beidseitig sowohl pausiert als auch abgebrochen werden, um etwa auf Fehler reagieren zu können. Der Ablauf der Prozesssteuerung ist im Zustandsdiagramm in Abb. 4.6 skizziert.

Beim Verlassen des Zustands „Beenden“ kann von der Handhabung eine Ausgleichsbewegung zur Minimierung von Materialrückständen durchgeführt werden. Bei einem einfachen Absetzen werden in einigen Fällen durch die vertikale Bewegung sogar zusätzlich Material aus den Waben herausgezogen und es entstehen *nachträglich* Lufteinschlüsse. Im Rahmen der konzeptionellen Vorversuche (vgl. Abschnitt 2.3.2) wurden drei verschiedene Strategien, schematisch darge-

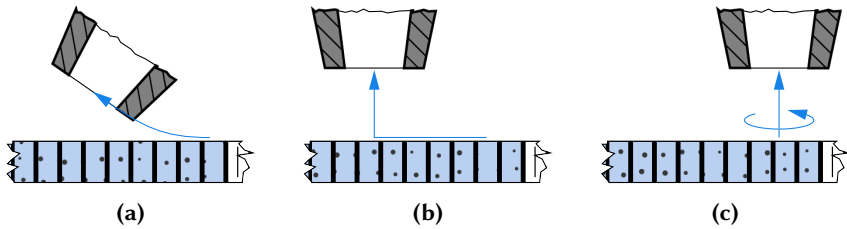


Abb. 4.7.: Verschiedene Strategien bei der Absetzbewegung zur Reduktion der Materialrückstände; (a) rückwärts tangential, (b) rückwärts gerade, (c) drehend

stellt in Abb. 4.7, gegenübergestellt. Die besten Ergebnisse liefert eine abscherende Rotation um z vor dem Absetzen. In allen Fällen werden Materialrückstände reduziert, wenn vor dem Bewegungsablauf über einen Pumpenrückzug der Druck am Düsenauslass gemindert wird. Unterbrechungen im Bearbeitungspfad sind dennoch grundsätzlich zu vermeiden, da ein Materialverlust nicht vollständig ausgeschlossen werden kann.

Für die Prozesssteuerung wird eine Soft-SPS TwinCAT 3 der Firma Beckhoff eingesetzt. Neben den in DIN EN 61131-3 spezifizierten Standardsprachen für SPS wird die Einbindung der Hochsprachen C++ und C# sowie der Skriptsprache Matlab unterstützt. In der Verbindung mit der Integration der Entwicklungsumgebung in VisualStudio von Microsoft ergibt sich somit eine hohe Flexibilität in der Programmierung.

Die Kommunikation mit der Robotersteuerung zur Zustandsabfrage erfordert nur wenige Bits und ist über ein EtherCAT-Kopplungsmodul geregelt. Im Bearbeitungsprogramm ist die maximale Robotergeschwindigkeit festgelegt. Die SPS hat jedoch die Möglichkeit, die Geschwindigkeit prozentual über ein Override-Signal anzupassen. Dies erlaubt die Berücksichtigung des Vorschubs in der Prozessregelung. Die tatsächliche, aktuelle Geschwindigkeit und Pose des TCP wird über das KUKA-spezifische Robot Sensor Interface (RSI) im Interpreter-Takt von 4 ms übermittelt. Technisch handelt es sich hier um ein Broadcast von UDP-Paketen ohne Handshake. Die Kommunikation zum Motor-Controller der Dosierpumpe erfolgt über binäre Ein-/Ausgangsmodule zur Zustandssteuerung und einen analogen Ausgang zur Steuerung des Förderstroms. Herstellerbedingt wird der Controller initial über eine serielle Schnittstelle (RS232) parametrisiert. Der Förderstrom kann entsprechend des maximal eingestellten Stroms nur prozentual adaptiert werden. Die zur Prozessdurchführung notwendige Kommunikation ist vollständig echtzeitfähig.

4.1.5. Praktische Validierung

Das entwickelte Befüllsystem wird hier auf seine praktische Eignung hin untersucht. Dazu wird zunächst geprüft, ob das Gesamtsystem einen industrienahen Prozess abbilden kann und im experimentellen Betrieb die geforderte Flexibilität liefert. Anschließend wird die Notwendigkeit der Anpressaktorik und deren Eignung, Materialverlust zu minimieren, diskutiert. Im Abschluss werden die Düsengrundformen validiert und ein Konzept zur Befüllung gekrümmter Paneele vorgestellt.

Gesamtsystem

Zur Inbetriebnahme und Validierung des Gesamtsystems werden Steuerungsparameter iterativ und manuell optimiert. Dies wird für eine Vielzahl an Kombination verschiedener geometrischer Parameter wiederholt. Die verwendeten Düsen weisen Durchmesser von $D_D = 8; 10; 15; 20$ und 25 mm auf, jeweils mit Randmaßen von $\Delta R_R = 5$ und 10 mm. Die Validierung wird zunächst mit hexagonalen Waben vom Typ A4 ($w = 3,2$ mm) mit einer Höhe $h_K = 9,8$ mm und T0-Prepreg durchgeführt. Mit der Düsengeometrie $D_D = 15$ mm, $\delta R_R = 10$ mm werden zudem Untersuchungen bei einer Höhe $h_K = 25,4$ mm mit den Wabentypen A4 und C4 ($w = 4,8$ mm) durchgeführt. In allen getesteten Befüllszenarios können grundsätzlich erfolgreiche Befüllungen realisiert werden.

Das gewählte Steuerungskonzept eignet sich dabei zur Durchführung des Befüllprozesses. Als Startbedingung zur Freigabe der Dosierbewegung erweist sich die Vorgabe eines Minimaldrucks als stabile Lösung. Im Rahmen der Validierung wird dazu bei Erreichen des ersten Punktes des Dosierpfades ein Fördervolumen von $Q_F = 150 \text{ ml min}^{-1}$ eingestellt. Ein Dosierdruck von $p_F = 100$ kPa zum Start der Bewegung ist für die betrachteten Szenarien ausreichend, um alle Zellen unter der initialen Düsenposition zu befüllen. Tendenziell zeigt sich, dass bei kleineren Düsendurchmessern aufgrund des Strömungswiderstandes höhere Dosierdrücke während des Prozesses auftreten. In einer weiteren Optimierung kann dies im Startkriterium berücksichtigt werden.

Während der Befüllung läuft in der SPS ein Unterprogramm zur Regelung des Fördervolumens. Zur Inbetriebnahme wird zunächst eine einfache Prozesssteuerung entsprechend dem Modell 2 nach Gleichung (3.13) implementiert. Dabei ist ein Multiplikator n manuell zu wählen. Der Förderstrom wird daraufhin zu $Q_F = n v_p$ eingestellt (mit der vom Roboter übermittelten Vorschubgeschwindigkeit v_p). Dieses zur Inbetriebnahme genutzte, einfache Modell zur Bestimmung des Fördervolumens ist valide, weist jedoch eine Reihe operativer Mängel auf. Die manuelle Parametrisierung des Multiplikators n ist mit hohem Aufwand verbunden. Es bestätigt sich zudem die Hypothese der Richtungsabhängigkeit aus

Abschnitt 3.1. Aus diesem Grund wird für die weitere Validierung ausschließlich bei linearen Pfaden in L -Richtung dosiert. Weiterhin wird der Volumenstrom zunächst auf einen Bereich von $Q_F \approx 180 - 200 \text{ ml min}^{-1}$ beschränkt, da dies zu einer höheren Toleranz und entsprechend geringerem Aufwand in der Parametrisierung führt.

Anpressaktorik

Grundsätzlich erweist sich die Anpressaktorik als effektive Maßnahme zur Reduktion von Materialverlusten. Das System wird dazu mit der Bearbeitung bei konstanten, in der Bahnsteuerung festgelegten Abstandswerten von $z = 0; 50$ und $100 \mu\text{m}$ verglichen. Zur Referenzierung wird die Düse zunächst händisch mithilfe einer Fühlerlehre auf den Abstand von $z = 100 \mu\text{m}$ zum Wabenkern positioniert. Um den Materialverlust zu quantifizieren, wird auf einer Strecke von $l = 100 \text{ mm}$ die oberflächliche KFM per Hand mit einem Spachtel abgezogen und gewogen. In Abb. 4.8 auf der nächsten Seite sind die Ergebnisse der Versuchsreihen bei drei verschiedenen Düsendurchmessern dargestellt. Mit jeder Düsenvariante werden drei gerade Pfade der Länge $l = 150 \text{ mm}$ befüllt, die Verlustmasse wird jeweils aus dem mittleren Bereich entnommen. Als Unsicherheit ist die Messgenauigkeit der verwendeten Waage eingezeichnet. Es zeigt sich eine eindeutige Abnahme des Verlustes mit sinkendem Abstand. Mit der Anpressaktorik sind in allen Szenarien die geringsten Verluste zu verzeichnen.

Das Ergebnis ist auch bei optischer Untersuchung offensichtlich. In Abb. 4.9 auf der nächsten Seite sind die Befüllergebnisse bei einem Düsendurchmesser $D_D = 10 \text{ mm}$ für verschiedene Abstände gegenübergestellt. Beim geringsten Abstand (4.9a) bildet sich die Wabenstruktur an der Oberfläche ab und es sind keine seitlichen Materialanhäufungen zu beobachten. Deren Häufigkeit nimmt mit steigendem Abstand zu (vgl. Abb. 4.9b). Bei einem Abstand von $z = 100 \mu\text{m}$ (4.9c) ist zudem die Wabenstruktur kaum mehr erkennbar, was eindeutig auf einen zu hohen Materialverlust hindeutet.

Beim Anpressdruck zeigt sich, dass mit höheren Kräften die Reproduzierbarkeit und Stabilität des Prozesses gesteigert werden kann. Dabei nimmt, wie in Abschnitt 3.3.6 vermutet, die Wahrscheinlichkeit von Lufteinschlüssen jedoch stark zu. Dies ist exemplarisch in Abb. 4.10 auf Seite 131 dargestellt. Bei zu hohem Anpressdruck kommt es zu Lufteinschlüssen, welche bei Entspannung nach Entfernen der Düse die KFM wieder aus den Zellen drücken können (vgl. Abb. 4.10c). Bei zu geringen Drücken, wie in Abb. 4.10a dargestellt, nehmen Verluste in Form von Schmiereffekten zu. Der optimale, über die Kontaktfläche verteilte Druck liegt bei den betrachteten Szenarien bei $p_P \approx 150 \pm 25 \text{ kPa}$. Für den praktischen Betrieb gilt die Faustformel „so hoch wie möglich, so niedrig wie nötig“.

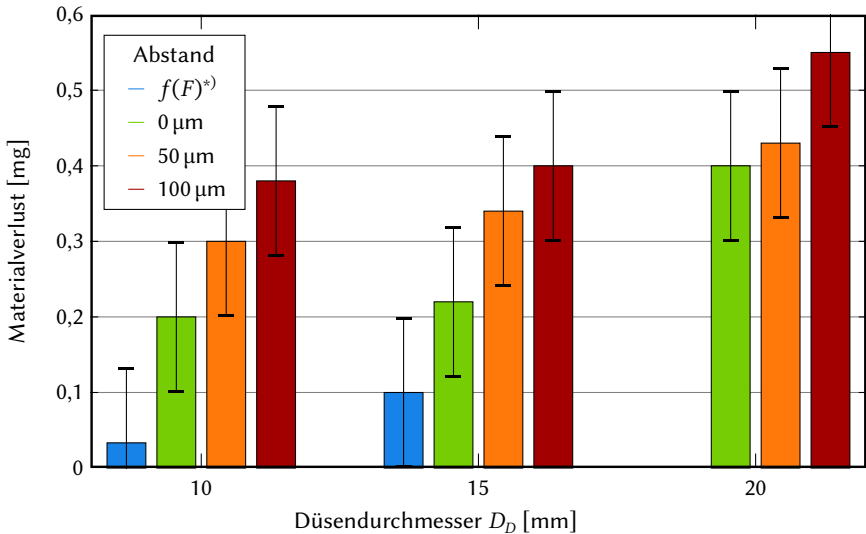


Abb. 4.8.: Vergleich des Materialverlustes in Form überschüssiger KFM bei $l_B = 100 \text{ mm}$ in Abhängigkeit des Düsenabstandes bei verschiedenen Düsendurchmessern ($f(F)$: kraft geregelter Kontakt)

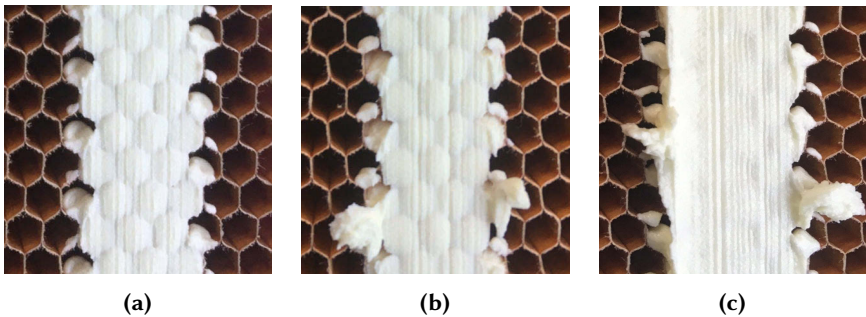


Abb. 4.9.: Optischer Vergleich des Materialverlustes in Form überschüssiger KFM in Abhängigkeit des Düsenabstandes z bei Düsendurchmesser $D_D = 10 \text{ mm}$; (a) $z = 0 \mu\text{m}$, (b) $z = 50 \mu\text{m}$, (c) $z = 100 \mu\text{m}$

Düsengeometrie

Der Fokus der Validierung der Düsengeometrien liegt auf dem Nachweis erfolgreicher Befüllungen bei ebenen Sandwichpaneelen. Der Demonstrator soll nach den Spezifikationen grundsätzlich in der Lage sein, gekrümmte Strukturen zu be-

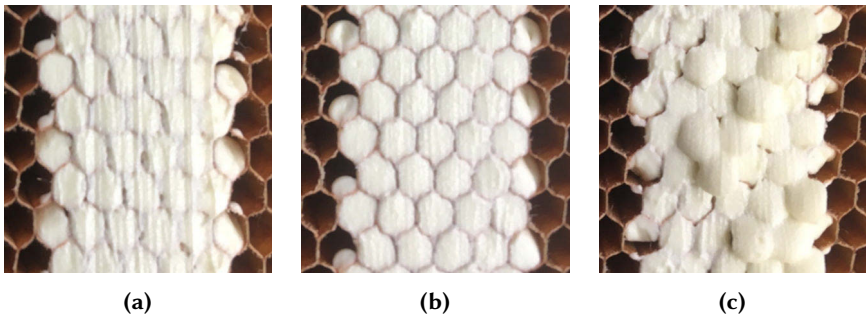


Abb. 4.10.: Optischer Vergleich des Materialverlustes in Form überschüssiger KFM in Abhängigkeit des Anpressdruckes bei einem Düsendurchmesser $D_D = 15$ mm; (a) Verschmierungen bei 115 kPa, (b) optimales Ergebnis bei 154 kPa, (c) Lufteinschlüsse und herausgedrückte KFM bei 192 kPa

füllen. Für dieses Anwendungsszenario werden entsprechende Untersuchungen im Abschluss des Abschnittes diskutiert.

Zweidimensionale Befüllung Wie eingangs dargestellt, können grundsätzlich mit allen untersuchten Düsengeometrien anforderungsgerechte Befüllergebnisse realisiert werden. Es sind abhängig vom Düsendurchmesser einige Tendenzen zu beobachten. Der mit reziprok zum Durchmesser zunehmende Dosierdruck (im Bereich der Messstelle) erschwert allgemein den Betrieb. Die Empfindlichkeit der Parametrisierung in der Regelung des Fördervolumens nimmt dabei zu. So können vermehrt Beschädigungen der Waben durch Überdruck auftreten. Die höhere Robustheit des Prozesses bei größeren Durchmessern zeigt sich auch bei der Betrachtung des Materialverlustes, wie in Abb. 4.11 auf der nächsten Seite dargestellt. Durch die bessere Verteilung des Verlustes über die Bahnbreite ist das Befüllergebnis beim Durchmesser $D_D = 20$ mm teils noch akzeptabel, in dem Beispiel mit $D_D = 10$ mm wäre hingegen eine manuelle Nachbearbeitung erforderlich.

Auch die Größe des Düsenrandes hat einen wesentlichen Einfluss auf die Robustheit der Prozesssteuerung. Deren Empfindlichkeit bezüglich der Anpresskraft ist umgekehrt proportional zur Kontaktfläche. Beim Einsatz der pneumatischen Aktorik hat sich bei den betrachteten Befüllszenarios gezeigt, dass der Düsenrand einen Durchmesser von mindestens $D_R = D_D + 2 \times 10$ mm betragen sollte. Grundsätzlich sollte der Rand so groß wie möglich gewählt werden. Limitierend

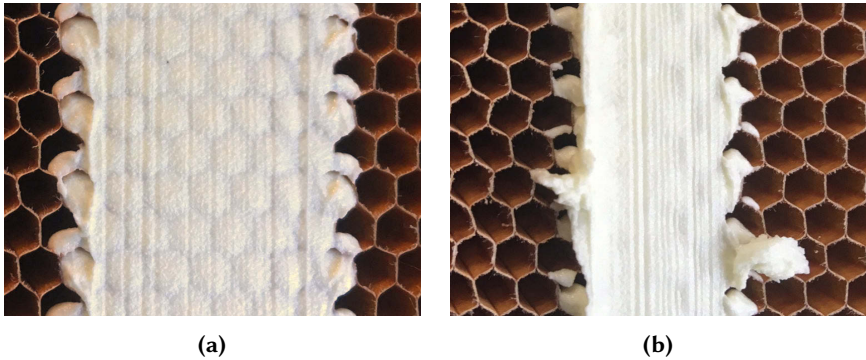


Abb. 4.11.: Optischer Vergleich des Materialverlustes in Form überschüssiger KFM in Abhängigkeit des Düsendurchmessers beim Düsenabstand $z = 100 \mu\text{m}$; (a) $D_D = 20 \text{ mm}$, (b) $D_D = 10 \text{ mm}$

ist hierbei die mögliche Kollision mit dem Werkstückträger bei Dosierpfaden am Rand des Sandwichpaneels.

Dreidimensionale Befüllung Im Rahmen der Validierung ist ebenfalls nachzuweisen, dass der Demonstrator zur Befüllung gekrümmter Strukturen geeignet ist. Hierzu wird eine überexpandierte Wabe mit $w_0 = 4,8 \text{ mm}$ über eine Halterung mit Krümmungsradius $R = 200 \text{ mm}$ gespannt. Wie in der Industrie für gekrümmte Strukturen üblich wird in den folgenden Versuchen T2-Prepreg eingesetzt. Dies erhöht die Lagestabilität der gelegten Sandwichschichten.

Aus den Untersuchungen zum Materialverlust ist bekannt, dass ein flächiger Kontakt erforderlich ist. Wie in Abb. 4.12 auf der nächsten Seite skizziert, ist dies bei einer steifen Düse mit planer Auslassfläche nicht realisierbar. Bei der Befüllung kann danach unterschieden werden, an welcher Stelle die Düse im Kontakt mit dem Wabenkern steht. Ein mittiger Kontakt weist einen geringeren maximalen Abstand der Auslassfläche zur Kernoberfläche auf ($63 \mu\text{m}$ bei $D_D = 10 \text{ mm}$). Beim gleichen Durchmesser beträgt dieser bei hinterem Kontakt entsprechend Abb. 4.12b $250 \mu\text{m}$. Dafür kann in diesem zweiten Konzept überschüssiges Material theoretisch über den Kontakt vermieden werden. In der praktischen Validierung sind jedoch beide Konzepte als mangelhaft zu bewerten. Aufgrund der hohen Abstände kann teils der erforderliche Volumenstrom nicht eingestellt werden, das Material quillt seitlich über. Die Einstellung des Anpressdruckes ist ebenfalls erheblich gestört, da sich der Kontakt theoretisch auf eine Linie beschränkt. Dies äußert sich in häufigen Beschädigungen der Waben.

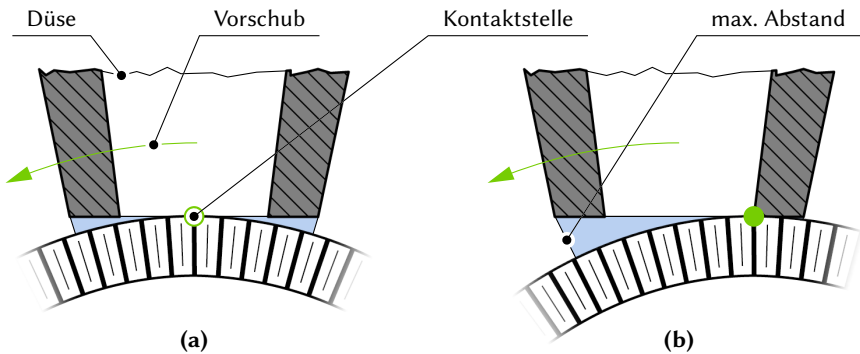


Abb. 4.12.: Kontaktkonzepte bei der Befüllung gekrümmter Strukturen mit starrer Düse; (a) mittlerer Kontakt, (b) hinterer Kontakt

Ein flächiger Kontakt kann etwa durch Abbildung des Krümmungsradius in der Düsengeometrie hergestellt werden. Dieser Ansatz ist jedoch kaum praktikabel. Es müssten Werkzeuge für jede Krümmung erstellt werden, zudem lassen sich Toleranzen schwer ausgleichen. Eine sinnvolle Lösung besteht somit in einer formflexiblen Düse, die sich an die Oberfläche anpassen kann. Ein erster, zur Validierung genutzter Entwurf, ist in Abb. 4.13a auf der nächsten Seite abgebildet. Der Übergang zum Düsenrand ist als Festkörpergelenk konstruiert. Die Innenwand ist als flexibler Faltenbalg gestaltet, der sich bei konkaver Fläche stauchen beziehungsweise bei konvexer Fläche ausdehnen kann. Ein dünnwandiges Schutzrohr ist integriert, um eine Behinderung der Ausgleichsbewegung durch KFM zu vermeiden. Der Prototyp wird im SLS-Verfahren aus TPU (thermoplastisches Polyurethan) gefertigt. Mit einer Bruchfestigkeit von 3,7 MPa und einer Bruchdehnung von 137 % handelt es sich um ein sehr flexibles Material [106]. Die Fähigkeit des gedruckten Bauteils, sich einer Krümmung anzupassen, ist in Abb. 4.13b auf der nächsten Seite veranschaulicht.

Im Vergleich zur starren Düse eignet sich der Prototyp zur Befüllung gekrümmter Wabenstrukturen. In der Validierung passt sich die flexible Bauweise der Oberfläche an und ermöglicht einen flächigen Kontakt. Das sauberere Befüllergebnis ist exemplarisch in Abb. 4.14 auf der nächsten Seite dargestellt. Im Rahmen der Untersuchungen zeigen sich jedoch die nach Abschnitt 3.3 erwarteten Schwierigkeiten in der Befüllung mit T2-Prepreg. Die mit $R = 200$ mm starke Krümmung erfordert eine höhere Fixierungs- sowie Anpresskraft, um die Wabe während der Befüllung in der gewünschten Form zu halten. Diese vergrößern wiederum die Wahrscheinlichkeit von Luft einschlüssen. Entsprechend sollte auch bei der automatisierten Befüllung von gekrümmten Strukturen bevorzugt T0-Prepreg

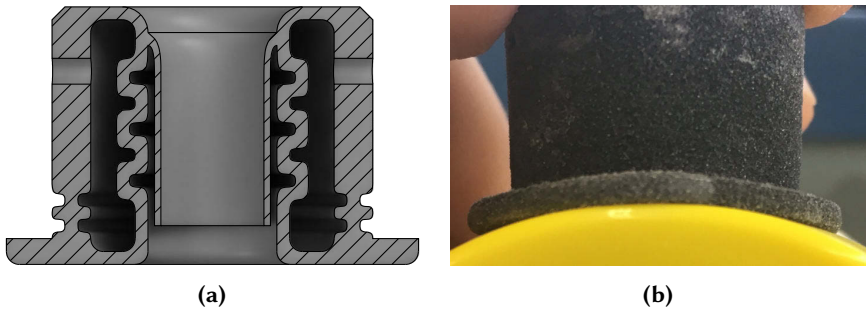


Abb. 4.13.: Prototyp einer formflexiblen Düse zur Anpassung an gekrümmte Strukturen; (a) CAD, (b) gedrucktes Bauteil



Abb. 4.14.: Vergleich der oberflächlichen Befüllergebnisse bei (a) flexibler und (b) starrer Düse

genutzt und neue Konzepte zur Lagefixierung erarbeitet werden. Eine weitere, notwendige Erhöhung des Dosierdruckes beziehungsweise Fördervolumens ist aufgrund der geringen Steifigkeit des Prototyps nicht möglich. Insgesamt kann die Befüllung gekrümmter Strukturen grundsätzlich erfolgreich nachgewiesen und konstruktiver Optimierungsbedarf identifiziert werden.

4.2. Flexible Regelung des Fördervolumens

Die Regelung der Dosierleistung der eingesetzten Förderpumpe hat von den drei kritischen Subsystemen den stärksten Einfluss auf die *Robustheit* des Prozesses. Eine wesentliche Erkenntnis aus Kapitel 3 lautet, dass bereits kleine Änderungen des Befüllszenarios (beispielsweise Pfadrichtung in Kernkoordinaten) das erforderliche Fördervolumen beeinflussen. Die in den folgenden Abschnitten zu entwickelnde Dosierregelung soll für ein möglichst breites Spektrum an Befüllszenarios sowie bei unvorhergesehenen Abweichungen eine gleichbleibend hohe *Qualität* erzielen.

Dazu wird zunächst in Abschnitt 4.2.1 die Regelstrecke genauer analysiert. Auf dieser Grundlage wird in Abschnitt 4.2.2 ein entsprechendes Konzept zur Steuerung der Dosierleistung entwickelt. Mit dem in Abschnitt 3.2 identifizierten, stark nichtlinearen Strömungsverhalten der KFM empfiehlt sich der Einsatz klassischer, robuster PID-Regelungskonzepte. Die Implementierung in das Steuerungssystem wird in Abschnitt 4.2.3 vorgestellt und validiert. Eine abschließende Diskussion der Ergebnisse wird in Abschnitt 4.2.4 durchgeführt.

4.2.1. Regelstreckenanalyse

Die Aufstellung eines Blockdiagramms der Regelstrecke kann sowohl für das Prozessverständnis als auch in der Konzeptionierung des Reglers hilfreich sein [50, 83]. Die Systemgrenzen für den betrachteten Befüllprozess werden an dieser Stelle in das Dosierwerkzeug gelegt. Eine physikalische Grenze ergibt sich durch die als vollständig dichtend angenommene Materialleitung. Die offene Grenze des Einlasses liegt direkt hinter dem Pumpenausgang. Der Auslass entspricht der Düsenauslassfläche.

Die relevanten Zustandsgrößen der KFM in einem Leitungsabschnitt der Länge dx und Querschnittfläche A sind der Volumenstrom Q_F und der Druck p_F (vgl. Abb. 3.14, S. 82). Diese Größen stehen entsprechend der Gleichungen aus Abschnitt 3.2 über Materialkennwerte und geometrische Parameter der Leitung in Wechselwirkung. Eine analytische Bestimmung der Zustände ist jedoch praktisch ausgeschlossen, denn:

- die Zustände sind von der Strömungshistorie abhängig,
- die Gleichungen gehen von einer ausgebildeten Strömung aus,
- die Gleichungen sind stark nichtlinear.

Mit dem in Abschnitt 3.2 nachgewiesenen, stark nichtlinearen Strömungsverhalten ist eine modellbasierte Regelung somit nicht praktikabel. Um das Übertragungsverhalten der Regelstrecke dennoch analysieren zu können, eignet sich

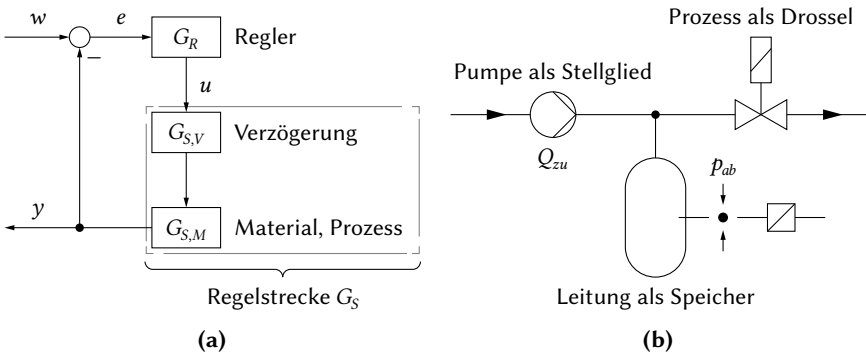


Abb. 4.15.: Darstellung der Regelstrecke als Blockschaltbild (a) und vereinfachendes, analoges Fließbild (b)

die vereinfachte Darstellung als lineares zeitinvariantes System (LTI-System). Eine solche Beschreibung gilt nur für jeweils eingegrenzte Wertebereiche der Prozessgrößen und bei stationären Arbeitspunkten mit $Q_{zu} = Q_{ab}$. Der stationäre Zustand ist spätestens bei einer ausgebildeten Strömung erreicht. Ein Tiefpass n -ter Ordnung (PT_n) ohne Verstärkung bietet sich etwa an, um die Verzögerung bis zum Erreichen des stationären Zustandes zu modellieren. Die Übertragungsfunktion $G_{S,V}$ mit den einzelnen Zeitkonstanten T_i ergibt sich zu:

$$G_{S,V}(s) = \prod_{i=1}^n (1 + T_i s)^{-1} \quad (4.1)$$

Die Überführung der Materialgleichung $Q_F = f(\Delta p_F)$ in ein LTI-System $G_{S,M}$ ist mittels Linearisierungen im Bereich fester Arbeitspunkte möglich. Das gesamte Übertragungsverhalten G_S der Strecke kann daraufhin als lineare Verkettung dargestellt werden:

$$G_S(s) = G_{S,M}(s) G_{S,V}(s) \quad (4.2)$$

Das Blockschaltbild der Regelstrecke ist in Abb. 4.15a dargestellt. Eine Analogie dazu stellt das Fließbild mit integriertem Speicher (\equiv Leitung) und zustandsabhängiger Drossel (\equiv Prozess) dar, skizziert in Abb. 4.15b: Solange $Q_{zu} = Q_{ab}$, stellt sich im Speicher ein konstanter Druck ein. Das konkrete Druckniveau ergibt sich durch die aktuelle Drosselwirkung. Stellt sich aufgrund zu starker Drosselung $Q_{zu} > Q_{ab}$ ein, nimmt der Druck kontinuierlich zu. Die Analogie des Speichers entspricht dem in Abschnitt 3.1 diskutierten Ausgleichsvermögen.

Eine Messung der Zustandsgrößen unmittelbar am Düsenauslass ist physikalisch bedingt nicht möglich. Entsprechend ist von der Messstelle bis zum Auslass

eine Verzögerung anzunehmen. Der Befüllprozess kann weiterhin eine Rückwirkung auf das System haben. Die Aufteilung der Strömung sowie die unstete Variation der Menge an Einströmwaben Σ erhöhen den Strömungswiderstand und entsprechend die Drosselwirkung von $G_{S,M}$. Bei Überschreiten des maximal zulässigen Fördervolumens Q_{max} ist ein sprunghafter Anstieg des Widerstands zu erwarten. Das überschüssige Material kann durch Σ nicht weiter aufgenommen werden. Der Rückstau führt zum weiteren Anstieg des Drucks und das vorher dominierende P-Verhalten der Strecke wechselt in partielles I-Verhalten. Ein neuer (instabiler) Beharrungszustand ergibt sich, sobald der Berstdruck der Zellen erreicht ist und über die Zerstörung der Waben ein höheres Fördervolumen aufgenommen werden kann.

Ziel einer Steuerung oder Regelung ist die Einstellung des Systems auf eben diesen transienten Zustand mit $Q_{ab} = Q_{max} = f(\Sigma)$. Eine Sensorik zur Messung des Volumenstroms Q_{ab} ist mit hohen Kosten sowie einer weiteren Vergrößerung des Dosierwerkzeuges verbunden. Eine Modellierung schließt sich aus den bereits genannten Gründen praktisch aus. Aus der praktischen Vertiefung des Prozessverständnisses in Abschnitt 4.1 wird die Hypothese aufgestellt, dass der Dosierdruck bei erfolgreicher Befüllung nahezu konstant bleibt. Entsprechend bietet sich der Ausgangsdruck p_{ab} als Regelgröße an. Je nach Pumpentyp kann am Eingang der Druck p_{zu} oder der Volumenstrom Q_{zu} gestellt werden. Als externe Störgröße ist die Temperatur T_F zu nennen. Diese beeinflusst die Rheologie und entsprechend das Übertragungsverhalten $G_{S,M}$. Mit der Umgebungsklimatisierung sowie Materialtemperierung wird die Störgröße jedoch in einem externen Regelkreis kontrolliert und entsprechend in den folgenden Betrachtungen vernachlässigt. Alle weiteren Störgrößen sind intrinsischer Natur und ergeben sich aus Modellfehlern. Diese beinhalten etwa:

1. Fehler in der Bestimmung von Q_{max} aufgrund von Abweichungen zwischen realer und idealer Wabenstruktur,
2. verändertes Materialverhalten durch Alterungseffekte,
3. Linearisierungsfehler.

Eine besondere Rolle bei den Störgrößen nimmt die Pfadüberlappung β_B ein, nicht zu verwechseln mit der Wabenüberlappung β . Wie in Abb. 4.16 auf der nächsten Seite skizziert, entspricht die Pfadüberlappung dem Anteil der Düsenbreite, der in durch benachbarte Pfade abgedeckte Bereiche fällt. Der Wert ist unabhängig von der Wabengeometrie und kann bereits während der Pfadplanung ermittelt werden. Eine Überlappung ist bei größeren Einfüllflächen kaum zu vermeiden. Als Folge steigt jedoch der zu erwartende Fehler der Modellierung

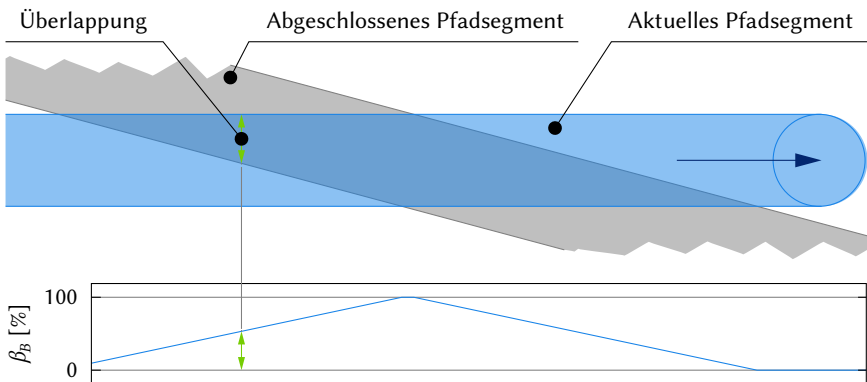


Abb. 4.16.: Pfadüberlappung zu bereits abgedeckten Befüllbereichen

nach Gleichung (3.13). Weiterhin können aufgrund der Überlappung Unstetigkeiten im geforderten Fördervolumen auftreten, im Extremfall etwa bei einer Pfadkreuzung.

Um das Verhalten der Regelstrecke weiter beurteilen zu können, wird das Stellverhalten analysiert. Dazu wird ein Eingangssprung aufgeprägt und das Antwortsignal aufgezeichnet. Mit der im Demonstrator eingesetzten PCP wird entsprechend ein Sprung in $Q_{zu} < Q_{max}$ eingestellt. Die Antwort in Form des Ausgangsdrucks p_{ab} ist in Abb. 4.17 auf der nächsten Seite dargestellt. Dabei zeigt sich ein entsprechendes Gleichung (4.1) vermutetes Verzögerungsverhalten. Aus dem Plot kann eine Verzugszeit $t_u \approx 297$ ms und eine Ausgleichszeit $t_a \approx 622$ ms abgelesen werden. Bei Modellierung der Verzögerung als PT_n -Glied mit identischen Zeitkonstanten T_n , sodass $V(s) = (1 + T_n s)^{-n}$, ergibt sich der minimale Fehler (als quadratisches Mittel, vgl. Gleichung (3.35) (S. 92)) mit $err = 2\%$ bei $n = 6$ und $T_n = 108$ ms. Der alternative Ansatz der Modellierung mit Totzeit in einem $PT_1 T_f$ -Glied zeigt mit $err = 5\%$ deutlich stärkere Abweichungen.

In Abb. 4.18 auf Seite 140 ist die Reaktion bei zu hohem Förderstrom $Q_{ab} \approx 1,5 \cdot Q_{max}$ visualisiert. Zunächst steigt der Druck nahezu linear an, bis die Wabenstruktur wie in Abb. 4.18c zu sehen, großflächig zerstört wird. Die KFM kann daraufhin hinter der Düse entweichen. Der Druck fällt schlagartig ab, stabilisiert sich und steigt anschließend wieder an. Dieser instabile Zustand ist über die Prozesssteuerung unbedingt zu vermeiden.

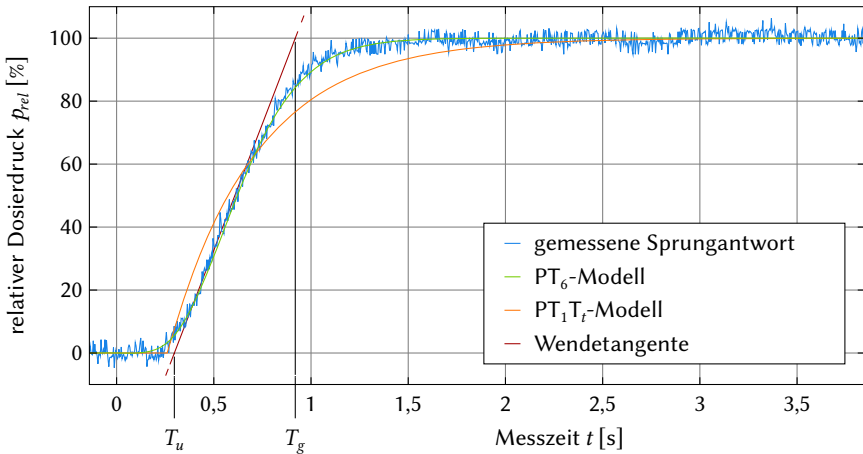


Abb. 4.17.: Normierte Sprungantwort des gemessenen Ausgangsdrucks p_{ab} mit deutlichem Verzögerungsverhalten

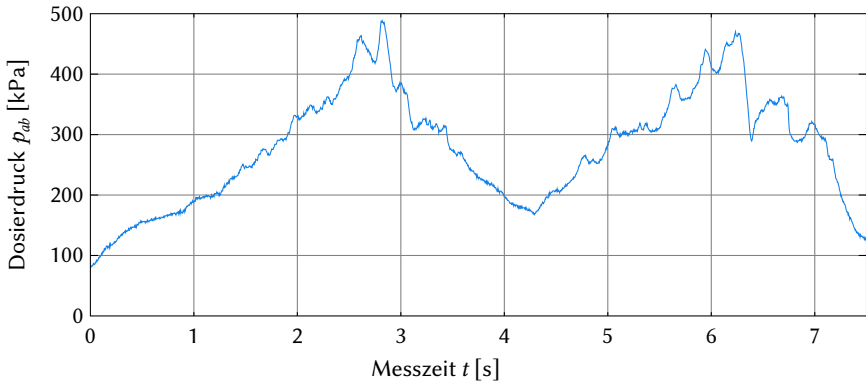
4.2.2. Regelungskonzept

Im Folgenden werden zwei Konzepte zur Stellung eines optimalen Fördervolumens entwickelt. Der erste orientiert sich an den bekannten Ansätzen der industriell verfügbaren Anlagen und ist besonders kostengünstig. Dabei wird der Regelkreis nicht geschlossen. Es handelt sich somit um eine Steuerung, die nicht auf unvorhergesehene Störungen reagieren kann. Der zweite Ansatz soll entsprechend die Defizite mit einer Regelung lösen.

Steuerung des Fördervolumens

Eine wesentliche Problematik in der Entwicklung einer geeigneten Steuerungs- oder Regelungsstrategie ist die Definition der Zielfunktion. Beim KFM-Eintrag liegt es nahe, diese als zu minimierende Kostenfunktion $C(s) = Q_{max}(s) - Q_{ab}(s)$ zu formulieren. Wie bereits erläutert, sind jedoch beide Größen praktisch nicht messbar und müssen entsprechend modelliert werden.

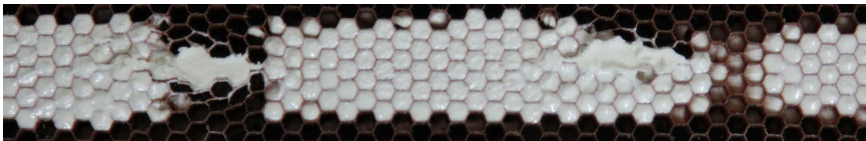
Bei einer volumetrischen Dosierung wie mit der verwendeten PCP vereinfacht sich das im vorigen Abschnitt aufgestellte Streckenmodell, da der Druck als Zustand nicht berücksichtigt werden muss. Die Bestimmung des Volumenstroms am Düsenaustritt ist entsprechend der Erhaltungsgesetze mit $Q_{ab} = Q_{zu}$ trivial. Das Übertragungsverhalten der Regelstrecke reduziert sich entsprechend zu $G_S(s) = G_{S,V}(s)$.



(a)



(b)



(c)

Abb. 4.18.: Instabiles, partiell integratives Verhalten bei $Q_{ab} \approx 1,25 \cdot Q_{max}$ mit ansteigendem Druck bis zur Zerstörung der Wabe; (a) Druckverlauf, (b) Oberseite, (c) Unterseite

Für Q_{max} gelten die Gleichungen nach Abschnitt 3.1. Unter der Annahme, dass die reale Wabenstruktur nicht bekannt ist und aus ökonomischen Gründen nicht gemessen wird, bietet sich eine Vereinfachung auf Basis von Gleichung (3.13) auf Seite 63 an. Dabei ist die Bahnbreite b_B als Parameter des Befüllszenarios im Vorfeld zu bestimmen. Eine Abschätzung kann anhand der Simulation bei idealisierter Wabengeometrie erfolgen. Die lokale Bahnbreite ist als weitere Dimension in der Pfadbeschreibung aufzunehmen. Zur Minimierung der Stützpunkte in der

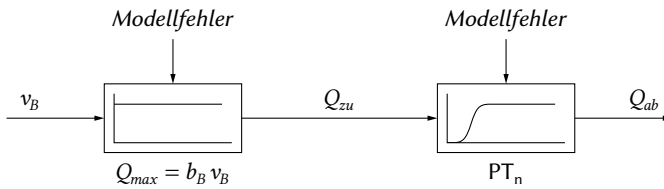


Abb. 4.19.: Blockschaltbild einer einfachen Steuerung des Förderstroms mit der Stellgröße $u = Q_{max} = b_B v_B$

Handhabungssteuerung ist es hilfreich, die Bahnbreite über längere Abschnitte mit konstanter Bahnüberlappung zu mitteln.

Durch den Verzicht auf sensorische Zustandsrückführung ergibt sich eine einfache und kostengünstige Steuerung. Das entsprechende Blockschaltbild ist in Abb. 4.19 dargestellt. Kritisch ist in diesem Ansatz die mangelnde Fähigkeit, auf Fehler in der Modellierung von Q_{max} zu reagieren. Materialeffekte und Linearisierungsfehler sind hingegen nicht relevant, da die rheologischen Materialgesetze $G_{S,M}(s)$ aus der Regelstrecke gestrichen werden.

Regelung des Dosierdrucks

Ein alternativer Ansatz zur Steuerung des Förderstroms basiert auf der sensorischen Zustandsrückführung des Drucks p_{ab} . Hierdurch ergibt sich ein geschlossener Regelkreis, der entsprechend auf Fehler und Ungenauigkeiten reagieren kann. Die Kostenfunktion ergibt sich entsprechend zu $C(s) = p_0(s) - p_{ab}(s)$, mit einem zu definierenden Zieldruck p_0 .

Kritisch sind dabei die stark nichtlinearen Abhängigkeiten des Drucks von den Zuständen Q_F und T sowie deren Historie. Gekoppelt mit der voraussichtlich stark fehlerbehafteten Modellierung von Q_{max} , ergibt sich eine hohe Unsicherheit. Entsprechend wird ein Konzept gewählt, welches nur indirekt den Volumenstrom berücksichtigt. Aus der bisherigen Streckenanalyse ist bekannt, dass das System im angestrebten Zustand ein rein proportional-zeitverzögertes Verhalten aufweist. Entsprechend ergibt sich eine einfache Arbeitspunktlinearisierung als Proportionalglied mit konstantem Zieldruck p_0 . Die im Rahmen von Abschnitt 4.1.5 durchgeführten Versuche zeigen bereits, dass zu erwartende Werte im Bereich $p_0 \approx 1 - 3$ bar liegen. Auf Basis der Ergebnisse wird hier die Hypothese aufgestellt, dass bereits aus der Untersuchung weniger Befüllszenarios weite Schätzungen für p_0 möglich sind. Somit kann der deutlich komplexere Weg der numerischen Simulation umgangen werden.

Mit dieser starken Vereinfachung des Streckenmodells entfällt auch der Bedarf komplexer Reglerkonzepte. Stattdessen wird der klassische Ansatz mit linearer

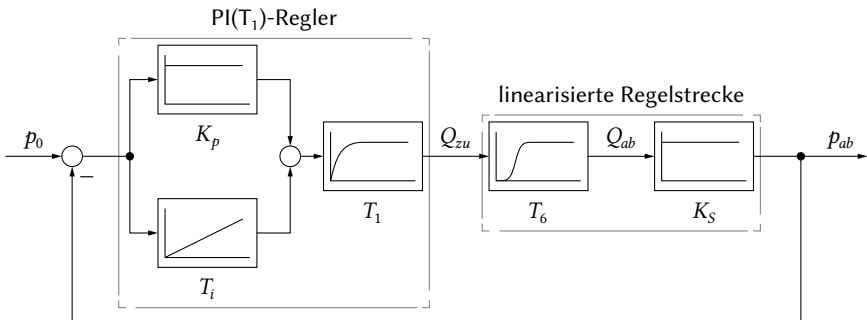


Abb. 4.20.: Blockschaltbild des Regelkreises zur Minimierung der Kostenfunktion $C(s) = p_0(s) - p_{ab}(s)$

Kombination von P, I, und D-Anteilen gewählt. Ein P-Anteil ist in der betrachteten Anwendung in jedem Fall erforderlich, da die physikalischen Einheiten der Stellgröße Q_{zu} und Regeldifferenz $e = p_0 - p_{ab}$ voneinander abweichen. Im einzustellenden Betriebszustand weist die Strecke keinen eigenen I-Anteil auf, somit ist dieser im Regler zu integrieren. Nur so kann eine bleibende Regelabweichung zuverlässig verhindert werden. Andernfalls besteht die Gefahr, den in der Streckenanalyse diskutierten, instabilen Zustand zu erreichen. Von einem D-Anteil ist aufgrund der trägen KFM abzusehen.

Grundsätzlich kann der Förderstrom Q_F nicht beliebig dynamisch gestellt werden: Zum einen besteht bei starken Sprüngen in der Pumpendrehzahl die Gefahr, dass der Strom am Eingang abreißt. Zum anderen wird durch starke Schwankungen im Förderstrom das Material höher beansprucht, was etwa zu unvorhergesehenen Änderungen der Viskosität oder Entmischung führen kann. Eine Begrenzung der Dynamik kann beispielsweise durch ein PT_1 -Glied als Tiefpassfilter realisiert werden. Alternativ kann bei der Motorsteuerung der Pumpe die Winkelbeschleunigung begrenzt werden. Das resultierende Blockschaltbild des gesamten Regelkreises ist in Abb. 4.20 dargestellt.

4.2.3. Implementierung und Validierung

In diesem Abschnitt werden die beiden vorgestellten Konzepte in der Steuerungsumgebung des Demonstrators integriert. Mit dem in Abschnitt 4.1.4 beschriebenen Steuerungssystem können verschiedene Funktionen zur Dosierregelung einfach umgesetzt und ausgetauscht werden. Die entsprechende Funktion wird zyklisch während des Zustandes „Dosieren“ (vgl. Abb. 4.6, S. 126) aufgerufen.

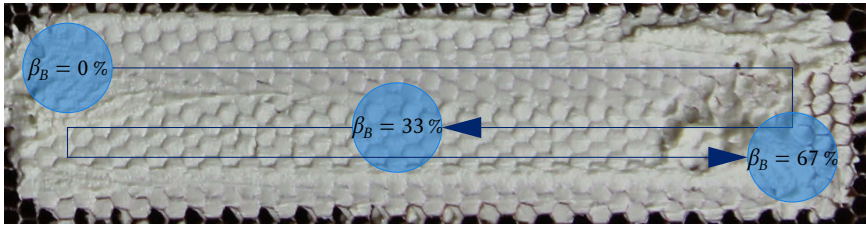


Abb. 4.21.: Exemplarischer Bearbeitungspfad zur Validierung, aufgeteilt in drei Segmente unterschiedlicher Überlappung

Der kritische Teil der Implementierung beider Konzepte ist die Bestimmung der Parameter in Abhängigkeit der Befüllszenarios.

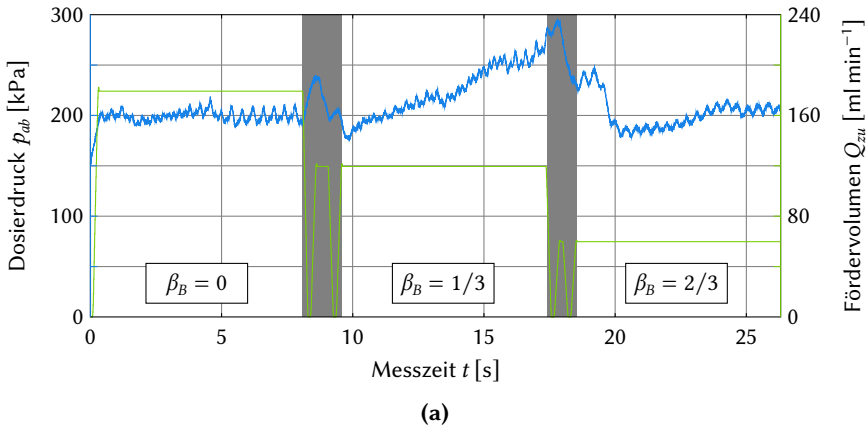
Zur Validierung werden je Befüllszenario drei gerade Pfade mit variierender Überlappung von $\beta_B = 0$; 33 und 67 % bei konstantem Vorschub gefahren. Der Versuchsplan wird auf Basis der vorhergegangenen, industriellen Machbarkeits- und Anforderungsanalysen folgendermaßen festgelegt: Drei verschiedene Vorschübe werden jeweils so eingestellt, dass sich bei dem ersten Pfadabschnitt ohne Überlappung ein maximaler Volumenstrom von etwa $Q_{ab} = 175$ und 250 ml min^{-1} ergibt. Als geometrische Parameter werden Düsendurchmesser von $D_D = 10$ und 15 mm mit $\Delta R = 10 \text{ mm}$ sowie hexagonale Waben der Breite $w = 3,2 \text{ mm}$ und Höhe $h_K = 9,8$ und $24,8 \text{ mm}$ gewählt. In Abb. 4.21 ist ein entsprechender Beispielpfad mit $D_D = 15 \text{ mm}$ dargestellt.

Steuerung des Fördervolumens

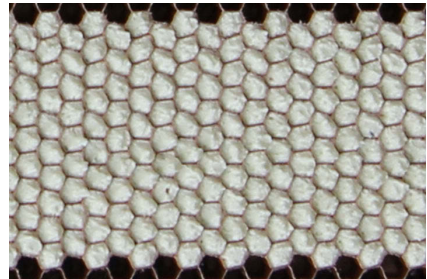
Beim Dosieren einzelner Bahnen zeigt sich die Steuerung des Förderstroms auf Basis der Vorschubgeschwindigkeit als valide und einfache Lösung. Kennlinien wie in Abb. 3.10 auf Seite 73 liefern im Rahmen der Validierung gute Startwerte für die angepasste Bahnbreite in Abhängigkeit von Düsendurchmesser, Waben-geometrie und Vorschubrichtung. Dabei sind jedoch meist kleinere, manuelle Anpassungen im Bereich von $\pm 0,5 \text{ mm}$ notwendig, um das Befüllergebnis zu optimieren.

Sobald eine Bearbeitung mit verschiedenen Pfadüberlappungen β_B durchgeführt wird, zeigt sich die Fehleranfälligkeit in der Modellierung des Förderstroms. Mit einer rein additiven Anpassung der Bahnbreite b_B um Δb_B sind die Ergebnisse nicht zuverlässig zufriedenstellend. Entsprechend wird die Modellierung um einen multiplikativen Term s_B erweitert:

$$b_B = s_B [D_D (1 - \beta_B) + \Delta b_B] \quad (4.3)$$



(b)



(c)

Abb. 4.22.: Exemplarisches Befüllergebnis bei Steuerung des Fördervolumens mit $D_D = 15$ mm, $h_K = 9,8$ mm und $Q_{ab} \leq 179$ ml min⁻¹; (a) Druckverlauf, (b) Oberseite, (c) Unterseite

Die händische Optimierung der zwei parametrischen Freiheitsgrade ist dabei mit erheblichem Aufwand versehen. Zur Verdeutlichung der Instabilität der Steuerung ist in Abb. 4.22 der Druckverlauf während einer Dosierung dargestellt. Im ersten Pfadsegment stellt sich rasch ein Gleichgewicht im Dosierdruck ein. Das Druckniveau steigt im zweiten Segment stetig an, was auf eine Überschätzung des erforderlichen Fördervolumens Q_{max} hindeutet. Im letzten Segment bleibt der Druck wieder auf einem stabilen Druckniveau. Das gesamte Befüllergebnis ist als akzeptabel zu bewerten, Luftsinschlüsse sind nicht zu erkennen (vgl. Abb. 4.22c). Es ist jedoch nicht eindeutig, ob im zweiten Segment ein längerer Pfad zu einem Gleichgewicht führen oder der Berstdruck der Zellen erreicht werden würde.

Zur Bestimmung optimaler Parametersätze für Gleichung (4.3) werden aus der Menge aller 76 Versuchsreihen je Szenario und je Pfadsegment die Förderströme mit möglichst stabilem Druckverlauf ausgewählt. Die Lösungen konvergieren nicht eindeutig, hierzu sind gegebenenfalls weitere Überlappungen zu untersuchen. Die bestimmten Modellparameter sind jeweils für ein spezifisches Szenario aus w , α_B und D_D gültig. Die Variation weiterer Parameter (h_K) und Prozessgrößen (v_B) beeinflusst das Prozessergebnis im Rahmen der Validierung nicht.

Regelung des Dosierdrucks

Bei der Parametrisierung eines Reglers können verschiedene Güteanforderungen an den gesamten Kreis gestellt werden [83]. Der Regler muss insbesondere Forderungen an Stabilität und Störkompensation beziehungsweise Sollwertfolge erfüllen. Das bedeutet, dass sich bei einem Stellwertsprung nach längerer Zeit ein stationärer Zustand ohne bleibende Regelabweichung einstellt. Hinsichtlich der Dynamik ist der stationäre Zustand möglichst schnell zu erreichen. Ein Überschreiten des Berstdrucks der Zellen ist dabei unbedingt zu vermeiden, weshalb die Übergangsfunktion des Regelkreises im üblichen Arbeitsbereich kein oder nur geringes Überschwingen aufweisen soll. Die Robustheitsforderungen besagen, dass bereits genannte Anforderungen auch bei unvermeidbaren Unsicherheiten in der Modellierung zu erfüllen sind.

Im Rahmen der Validierung soll die praxistaugliche, einfache Lösung durch einen PI(T_1)-Regler (vgl. Abschnitt 4.2.2) geprüft werden. Die Regelstrecke ist bereits umfangreich qualitativ analysiert. Aufgrund der komplexen, multidimensionalen Abhängigkeiten ist jedoch noch keine sichere, quantitative Beschreibung möglich. Die hierfür erforderlichen experimentellen Untersuchungen sind mit erheblichem Kosten- sowie Zeitaufwand verbunden und entsprechend nicht praktikabel. Dementsprechend wird ein heuristischer Ansatz zur Bestimmung geeigneter Reglerparameter verfolgt. Mit diesem Verfahren ist die grundsätzliche Eignung der Prozesssteuerung mit einem geschlossenen Regelkreis des Dosierdrucks zu bewerten.

Bei der Parameterbestimmung wird methodisch so vorgegangen, dass zunächst der Proportionalanteil schrittweise erhöht wird, bis sich eine hohe Dynamik ohne Überschwingen ergibt. Anschließend wird der integrative Anteil verstärkt, sodass die bleibende Regelabweichung mit ähnlicher Dynamik ausgeregelt werden kann. Die Proportionalverstärkung ist dabei gegebenenfalls iterativ wieder zu reduzieren, um einer Schwingungsneigung entgegenzuwirken. Abschließend wird eine leichte Dämpfung der Stellgröße eingebracht, indem das Verhalten bei dynamischen Änderungen des Vorschubs im Bereich von Richtungsänderungen untersucht wird.

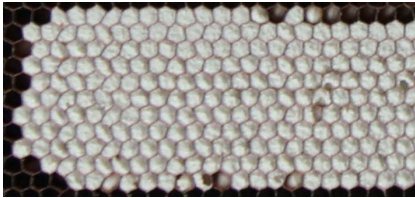
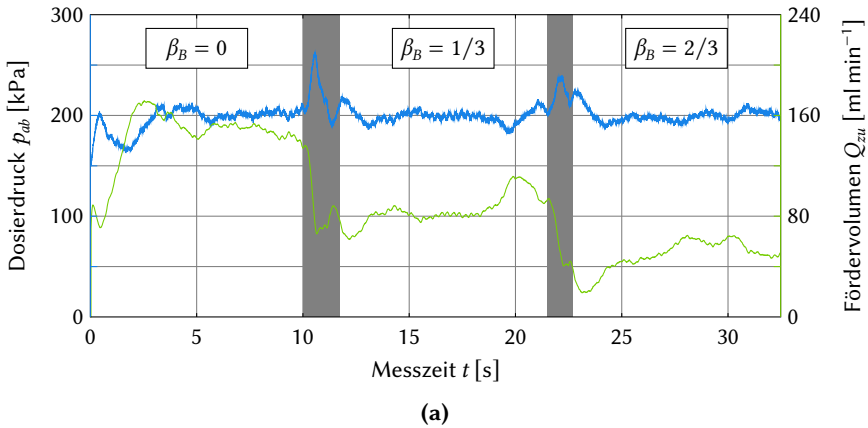


Abb. 4.23.: Exemplarisches Befüllergebnis bei Regelung des Dosierdrucks mit $D_D = 15$ mm, $h_K = 9,8$ mm und $Q_{ab} \leq 171$ ml min⁻¹; (a) Druckverlauf, (b) Oberseite, (c) Unterseite

Dieses Vorgehen ist für einen möglichst relevanten Arbeitsbereich durchzuführen. Im Rahmen der Validierung wird entsprechend ein Düsendurchmesser $D_D = 15$ mm, ein Fördervolumen $Q_{ab} \approx 250$ ml min⁻¹ und eine Kernhöhe $h_K = 9,8$ mm gewählt. Die Implementierung nach dieser Methodik erfordert einen Arbeitsaufwand von etwa drei bis vier Stunden. Die dabei gewählten Parameter erweisen sich als geeignet, in allen eingangs genannten Befüllszenarios gute Prozessresultate ohne Lufteinschlüsse zu erzielen. Ein exemplarisches Ergebnis mit $D_D = 15$ mm, $h_K = 9,8$ mm und $Q_{ab} \leq 171$ ml min⁻¹ ist in Abb. 4.23 dargestellt. Nach etwa 30 – 50 % des ersten Segmentes ist üblicherweise der Zieldruck erreicht. Rapide Änderungen im Vorschub wie etwa beim Richtungswechsel führen zu kurzzeitigen Druckerhöhungen, jedoch ohne den Berstdruck der Zellen zu erreichen. Mit Ausnahme einiger Waben mit geringer Überlappungszeit ω im Randbereich sind alle Zellen vollständig befüllt.

Zur Vermeidung eines Überschwingens im gesamten Spektrum der Befüllszenarios mit lediglich einem Parametersatz muss die Reglerdynamik entsprechend beschränkt werden. Im Rahmen der Validierung führt dies teilweise dazu, dass beim Durchmesser $D_D = 10$ mm Volumenströme von $Q_{ab} > 200 \text{ ml min}^{-1}$ nicht ausreichend schnell erreicht werden. Bei hohen positiven Sprüngen der Vorschubgeschwindigkeit können entsprechend Lufteinschlüsse auftreten, wie exemplarisch in Abb. 4.24 auf der nächsten Seite bei $D_D = 10$ mm, $h_K = 24,8$ mm und $Q_{ab} \leq 256 \text{ ml min}^{-1}$ dargestellt. Durch den langsamen Anstieg des Fördervolumens sind im Randbereich des ersten Segmentes die Waben nicht ausreichend befüllt. Bei den nur partiell gefüllten Waben des dritten Pfadsegmentes ist hingegen von einer zu geringen Zellüberlappung β auszugehen. Unabhängig von diesen Phänomenen tritt in der dargestellten Versuchsreihe kurzzeitig ein zu geringer Eingangsdruck an der PCP auf, weshalb der Prozess pausiert wird.

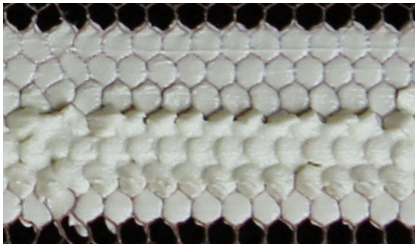
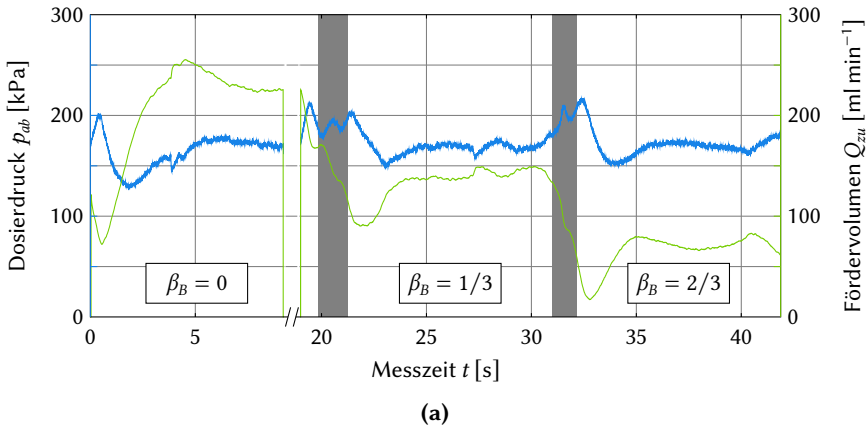
In einem weiteren dynamischen Extremfall mit $D_D = 10$ mm, $h_K = 9,8$ mm und $Q_{ab} \leq 254 \text{ ml min}^{-1}$, dargestellt in Abb. 4.25 auf Seite 149, zeigt sich ebenfalls ein grenzwertig träges Verhalten. In dem betrachteten Fall ist das Befüllerergebnis hingegen als erfolgreich zu bewerten. Um dies zu erreichen, ist ein überhöhtes Führungssignal ($p_0 = 150$ kPa) vorgegeben. Aufgrund der hohen Vorschubgeschwindigkeit und der kurzen Pfadlänge stellt sich kein stationärer Zustand ein.

Bei größerem Durchmesser mit $D_D = 15$ mm ist die dynamische Auslastung weniger kritisch. Bei der in Abb. 4.26 auf Seite 150 dargestellten Befüllung einer Wabe mit $h_K = 9,8$ mm liegt der maximale Volumenstrom bei $Q_{ab} \leq 293 \text{ ml min}^{-1}$. Dieses hohe Fördervolumen ist jedoch auf ein Überschwingen zurückzuführen. Kurz vor Abschluss des Pfadsegmentes stellt sich ein scheinbar stationärer Volumenstrom bei $Q_{ab} \approx 190 \text{ ml min}^{-1}$ ein.

4.2.4. Diskussion der Ergebnisse

Sowohl beim Konzept der Steuerung des Fördervolumens als auch der Regelung des Dosierdrucks sind Parameter in Abhängigkeit der Szenarien zu bestimmen. Das iterative Einstellen der Faktoren b_B und s_B bei der Steuerung des Fördervolumens ist wenig intuitiv und erfordert teils einen erheblichen Zeitaufwand. Dabei kann kaum Gewissheit herrschen, ob eine Befüllung bei beliebigen Pfadüberlappungen identische Ergebnisse liefert. Eine mögliche Optimierung liegt in der Erfassung der realen Wabenstruktur beziehungsweise von Σ . Der entstehende Mehraufwand bei Kosten und Entwicklung steht jedoch im Widerspruch zu dem ursprünglichen Ziel einer günstigen und einfachen Lösung.

Ungeachtet der dynamischen Probleme erweist sich die Prozesssteuerung mit einem geschlossenen Regelkreis für p_{ab} als deutlich performantere Lösung. Der aufwendige Part der Implementierung, die Bestimmung der Reglerparameter,



(b)



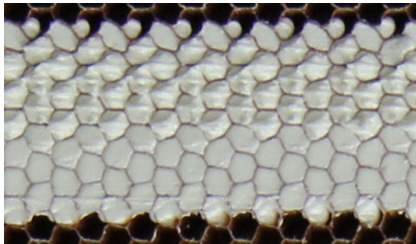
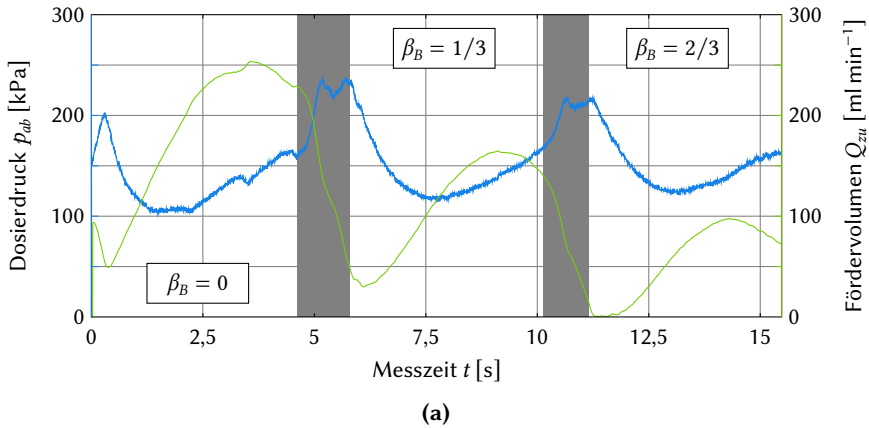
(c)

Abb. 4.24.: Exemplarisches Befüllergebnis bei Regelung des Dosierdrucks mit $D_D = 10$ mm, $h_K = 24,8$ mm und $Q_{ab} \leq 256$ ml min⁻¹; (a) Druckverlauf, (b) Oberseite, (c) Unterseite

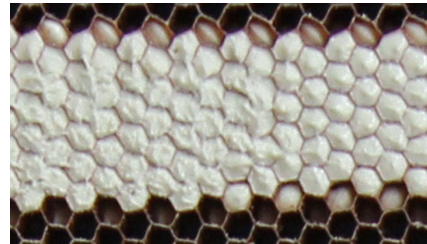
ist einmalig durchzuführen. Die gefundenen Parameter können für ein breites Spektrum an Befüllszenarios eingesetzt werden.

Die Definition eines Zieldrucks p_0 je Szenario ist wesentlich intuitiver und mit weniger Iterationen verbunden als die notwendige Parametrisierung der Förderstromsteuerung. Für die betrachteten Szenarios liegen die Regelwerte bei $p_0 = 120 - 200$ kPa. Als Ausgangsbasis kann $p_0 = 150$ kPa gewählt werden. Bei zu starken Materialverlusten ist der Druck schrittweise um $\Delta p = 10$ kPa zu senken. Sind unbefüllte Waben zu beobachten, kann der Druck um $\Delta p = 20$ kPa erhöht werden. Mit diesem Vorgehen sind maximal vier Iterationen je Szenario erforderlich.

Neben der einfacheren Parametrisierung erweist sich die Regelung als deutlich robuster gegenüber der Steuerung. Dies gilt insbesondere für Überlappun-



(b)

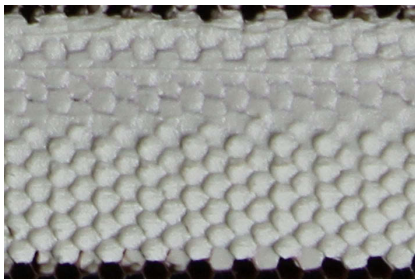
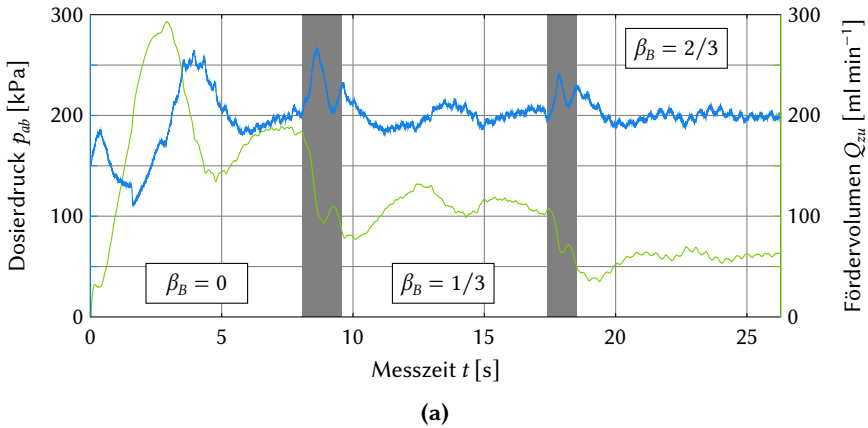


(c)

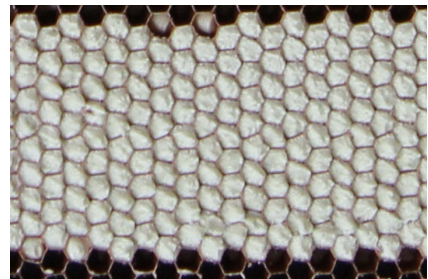
Abb. 4.25.: Exemplarisches Befüllergebnis bei Regelung des Dosierdrucks mit $D_D = 10 \text{ mm}$, $h_K = 9,8 \text{ mm}$ und $Q_{ab} \leq 254 \text{ ml min}^{-1}$; (a) Druckverlauf, (b) Oberseite, (c) Unterseite

gen. Diese können in einem Szenario beliebig variiert werden. Der erforderliche Dosierdruck scheint den experimentellen Ergebnissen nach allgemein gültig zu sein. Hinsichtlich der Vorschubgeschwindigkeit ist zu beachten, dass die geringe Dynamik teilweise überhöhte Führungssignale erfordert. Wird im gleichen Bearbeitungspfad über längere Strecken mit geringerem Vorschub gearbeitet, könnte dies zu stärkeren Materialverlusten führen. Das wesentliche Optimierungspotenzial des Konzeptes liegt somit in der Dynamik des Regelkreises. Entsprechend kann es hilfreich sein, verschiedene Parametersätze zu definieren. Alternativ ließe sich auch die Beschleunigung des Handhabungsgerätes reduzieren, um die Problematik zu entschärfen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Dosierdruck eine geeignete Zustandsgröße zur Prozesssteuerung ist. Das vorgeschlagene Konzept zur Rege-



(b)



(c)

Abb. 4.26.: Exemplarisches Befüllergebnis bei Regelung des Dosierdrucks mit $D_D = 15$ mm, $h_K = 9,8$ mm und $Q_{ab} \leq 293$ ml min⁻¹; (a) Druckverlauf, (b) Oberseite, (c) Unterseite

lung des Drucks mithilfe der Stellgröße Q_{zu} erweist sich als robuste und einfache Lösung. Zur Entwicklung und Implementierung ist kein präzises Modell erforderlich. Auch die positionsabhängige Pfadüberlappung muss nicht übermittelt werden, da sich der Regler automatisch adaptiert. Dadurch können Pfadplanung und Prozesssteuerung unabhängig voneinander entwickelt werden. Die entwickelte Regelung ist somit eine wesentliche Grundlage zur produktiven, automatisierten Befüllung von Sandwichpaneelen in geringer Losgröße und bei hoher Produktvielfalt. Das Konzept der Förderstromsteuerung hingegen bietet für eingeschränkte Aufgabenbereiche bei geringer Variation der Pfadüberlappung eine kostengünstige Alternative.

4.3. Automatisierte Generierung von Bearbeitungsprogrammen

Eine wesentliche Herausforderung in der ökonomischen Umsetzung eines automatisierten Kernfüllmasse-Eintrags ist die Prozessplanung. Die Produktentwicklung fordert eine große Flexibilität von der Fertigung. Ein hoher Automatisierungsgrad muss somit in der gesamten Prozesskette, auch in der Planung, erreicht werden.

Die Ausführungen und Diskussionen in diesem Kapitel bedienen sich einem Fachvokabular, das zum einheitlichen Verständnis in Abschnitt 4.3.1 vorgestellt wird. In 4.3.2 werden die Anforderungen an die Prozessplanung anhand des bereits gewonnenen Prozessverständnisses nochmals konkretisiert. Auf dieser Basis können auch in der Literatur vorgeschlagene Lösungen einer zielgerichteten Analyse unterzogen werden. Valide Teillösungen werden in Abschnitt 4.3.3 bei der Entwicklung eines prozessspezifischen Konzeptes berücksichtigt. Dessen in Abschnitt 4.3.4 beschriebene Implementierung wird in 4.3.5 validiert und mit verfügbaren Methoden der Prozessplanung verglichen. Eine abschließende Bewertung und Zusammenfassung der Ergebnisse gibt Abschnitt 4.3.6.

4.3.1. Grundlagen

Zur Diskussion geeigneter Pfadstrategien sowie bei der Entwicklung eines Algorithmus werden einige Begrifflichkeiten verwendet, auf die an dieser Stelle kurz eingegangen wird. In der Literatur gibt es dabei nicht immer einheitliche Definitionen. Die Erläuterungen dienen somit hauptsächlich dem Verständnis und erheben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

Konturparallelen Eine Grundoperation bei der Zerlegung einer begrenzenden Fläche in Bearbeitungspfade ist das Versetzen der Kontur. Der punktweise minimale Abstand zwischen Quell- und Zielkontur ist die *Schrittweite*. Der Großteil der geläufigen Algorithmen generiert Konturparallelen mit konstanter Schrittweite. Einige moderne Algorithmen erlauben weiterhin eine über die Kontur variable Schrittweite, um etwa beim High Speed Cutting (HSC) Absetzbewegungen zu vermeiden [55].

Besonders einfache und robuste Methoden stehen aus dem Bereich der Bildverarbeitung zur Verfügung. Mit morphologischen Operationen werden Konturen um ein „strukturierendes Element“ versetzt. Ein kreisförmiges Element sorgt für einen gleichmäßigen Versatz, die Schrittweite gleicht dem Durchmesser. Ein weiteres, gängiges Verfahren bei der Generation von Konturparallelen ist die Berechnung einer Distanztransformation. Dabei wird jedem Pixel des Vordergrunds

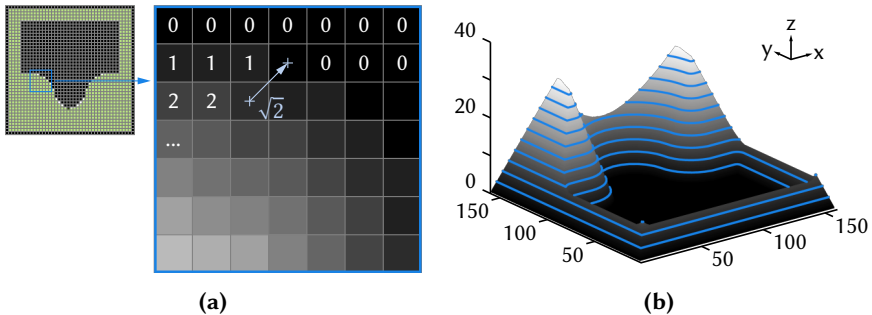


Abb. 4.27.: Bestimmung von Konturparallelen mittels Distanztransformation der gerasterten Darstellung

der Wert des (hier: euklidischen) Abstands z zum nächsten Konturpixel zugeordnet. Wie in Abb. 4.27b dargestellt, kann eine Konturparallele daraufhin einfach als Ebenenschnitt mit $z = \text{const.}$ bestimmt werden.

Distanztransformationen der parametrischen Repräsentationen können über Voronoi-Diagramme erzeugt werden. Die entsprechende Algorithmik ist deutlich komplexer, deshalb ist an dieser Stelle auf vertiefende Literatur verwiesen [26, 54]. Grundsätzlich ergeben sich einige Vorteile: Die generierten Konturparallelen liegen ohne Verlust an Genauigkeit in parametrischer Form vor. Über Erweiterungen, wie beispielsweise der Gewichtung von Ecken oder Kanten [52], können zudem variable Schrittweiten eingestellt werden. In Abb. 4.28 auf der nächsten Seite sind exemplarisch die Konturparallelen sowohl mit als auch ohne Gewichtung dargestellt. Eine Erweiterung für gekrümmte Oberflächen ist beispielsweise in [64] vorgestellt.

Backtracking & Rerouting Sobald ein Algorithmus eine Zerlegung in voneinander getrennte *Subpfade* erzeugt, ist auch eine Strategie zur Verknüpfung derselben erforderlich. In der Pfadplanung sind die Begriffe *Backtracking* (dt.: *Rücksetzen*) und *Rerouting* (dt.: *Umleiten*) gebräuchlich. Ersteres ist die deutlich einfachere Strategie. Hier wird lediglich ein Hilfspfad zwischen zu verbindenden Subpfaden eingefügt, ohne diese selbst zu modifizieren. Die genaue Gestaltung kann je nach Anwendung variieren. Im Additive Manufacturing ist etwa die Kombination mit einer Rückzugsbewegung gebräuchlich, um einen Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück zu vermeiden. Beim Fräsen von Konturparallelen wird hingegen meist der kürzeste, direkte Pfad gewählt.

Beim Rerouting werden die Subpfade so miteinander verknüpft, dass die Hilfspfade einen gleichwertigen Bestandteil der Bearbeitung darstellen. Dabei können

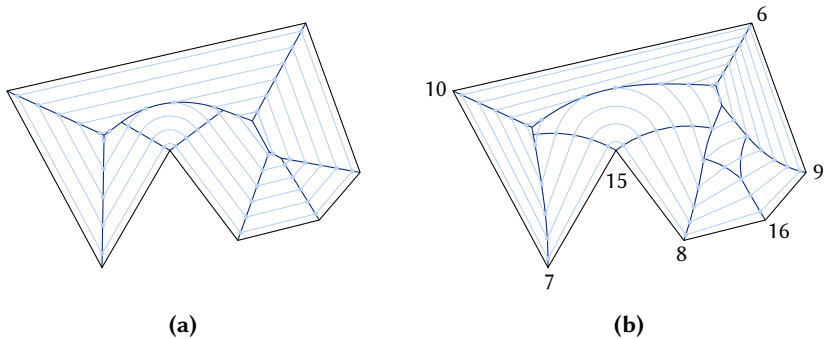


Abb. 4.28.: Bestimmung von Konturparallelen mittels Voronoi-Diagramm der parametrischen Repräsentation (a) sowie modifiziertem Polygon-Skelett bei gewichteten Eckpunkten (b) [52]

die Subpfade auch modifiziert werden, etwa beim Aufbrechen von Konturparallelen zur Generierung von Spiralen [66, 117]. Mittels Rerouting können kontinuierliche Pfade erzeugt und die Gesamtpfadlänge reduziert werden. Aufgrund der teils stärkeren Verzweigung ist jedoch nicht zwangswise eine kürzere Prozessdauer gegenüber Backtracking zu erwarten: Zum einen können die Modifikationen zu geringerer lokaler Kontinuität und entsprechend eingeschränkter Dynamik der Handhabung führen. Zum anderen kann beim Backtracking ohne Prozesseingriff die Dynamik der Handhabung im sogenannten *Eilgang* erhöht werden.

Mathematische Kontinuität Die mathematische Kontinuität wird über die Differentiationsklasse C^n einer Funktion beschrieben. Diese gibt an, wie häufig die Funktion stetig differenzierbar ist. Eine C^0 -Kontinuität ist erfüllt, solange die Kurve keine Unterbrechungen aufweist. Ein bewegtes Objekt muss an einem unsteten Richtungswechsel zum Stillstand kommen, um exakt entlang einer solchen Kurve zu fahren. Dieses Verhalten reduziert jedoch die mittlere Geschwindigkeit drastisch und kann zu weiteren unerwünschten Effekten wie Schwingungsanregung führen. Die Positionsregler der Handhabungsgeräte verwenden in solchen Fällen häufig sogenannte Überschleifbewegungen, um einen sanfteren Geschwindigkeitsverlauf zu realisieren. Die resultierende Abweichung von der geplanten Bahn kann jedoch zu schwer vorhersagbaren Qualitätseinbußen im Prozess führen.

Positionstreue und geschwindigkeitsoptimierte Pfade erfordern entsprechend eine höhere Differentiationsklasse. Bei geometrischer Betrachtung ergeben sich teilweise Vereinfachungen. So ist die geometrische Kontinuität \mathcal{G}^1 erreicht, wenn

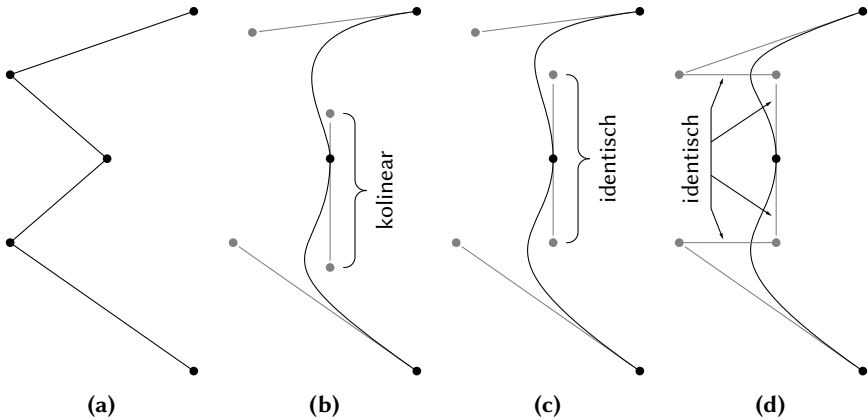


Abb. 4.29.: Exemplarische Gegenüberstellung verschiedener Kontinuitätsklassen; (a) C^0 mit vier Liniensegmenten, (b) G^1 , (c) C^1 und (d) C^2 mit je zwei kubischen Bézierkurven

die Tangente verbundener Pfadsegmente die gleiche Richtung aufweist. Erst bei gleichem Betrag kann auch von C^1 -Kontinuität gesprochen werden. In Abb. 4.29 sind die verschiedenen Kontinuitätsklassen exemplarisch gegenübergestellt. Optisch ist der Unterschied zwischen C^1 und C^2 beim Kurvenverlauf kaum wahrnehmbar. Bei der Handhabung kann diese jedoch zu einer starken Reduktion des „Rucks“ (englisch: *jerk*) führen.

4.3.2. Anforderungsanalyse

Zur Entwicklung einer Softwarelösung zur effizienten Generierung von Bearbeitungsprogrammen werden zunächst die bereits in Abschnitt 2.4.7 formulierten Anforderungen aufgegriffen. Mit dem in der bisherigen Arbeit gewonnenen Prozessverständnis können diese konkretisiert und erweitert werden. Dabei werden Bewertungsmerkmale aufgenommen, anhand welcher auch bestehende Lösungen besser klassifiziert und diskutiert werden können.

Vollständige Abdeckung Die wesentliche Anforderung ist die vollständige Abdeckung der Einfüllflächen mit der Düsenauslassfläche. Eine mögliche, alternative Formulierung, basierend auf den Erkenntnissen aus der geometrischen Analyse in Abschnitt 3.1, lautet: Die Varianz der Überlappungszeit ω ist über alle Waben der Einfüllfläche zu minimieren. Aus der Analyse folgt dabei, dass eine eventuell notwendige Pfadüberlappung β_B von der jeweiligen Düsengeome-

trie abhängt. Eine Düse mit nahezu einheitlicher Verteilung der Überlappung β (beispielsweise Liniengeometrie) entlang eines Befüllpfades, kann eine Pfadüberlappung überflüssig machen. Kreisförmige Düsen weisen hingegen eine hohe und mit dem Durchmesser zunehmende Varianz der Überlappung auf. Bei einem Durchmesser von $D_D = 15$ mm hat sich in den Vorversuchen etwa gezeigt, dass die Schrittweite zwischen benachbarten Pfaden unterhalb 90 % des Durchmessers liegen sollte. Dies bestätigt die Vorhersage entsprechend der Simulation der Überlappungszeiten in Abschnitt 3.1.

Gewährleistung des Luftaustrittes Die Untersuchungen in Abschnitt 3.3 zeigen, dass die Luft entlang der Kontaktlinie zwischen Wabensteg und Prepreg entweicht. Ein Luftstrom durch das Prepreg unterhalb bereits befüllter Waben ist, wie erwartet, auszuschließen. Während der Befüllung ist somit stets eine möglichst lange, freie Kontaktlinie sicherzustellen. Aus den Erfahrungen der bisherigen experimentellen Analyse kann für kreisförmige Düsen der Schluss gezogen werden, dass insbesondere ein seitlicher Auslass vorteilhaft ist. Somit sind „Talfahrten“ mit Pfadüberlappungen zu beiden Seiten unbedingt zu vermeiden. Solange eine Seite der Düse eine freie Kontaktlinie aufweist, sind hingegen auch hohe Pfadüberlappungen über 50 % unkritisch.

Durchgängigkeit Die Forderung nach Bearbeitungspfaden ohne Absetz- oder Rückzugsbewegung, also einer \mathcal{C}^0 -Kontinuität, kann auf Basis bisheriger Erkenntnisse relativiert werden (vgl. Abschnitt 4.1.4). Mit einer geeigneten Rückzugsstrategie lassen sich Materialrückstände signifikant reduzieren. Da sie jedoch nie vollständig auszuschließen sind, ist stets eine Minimierung der Absetzbewegungen anzustreben.

Krümmung Der erwartete starke Einfluss der Pfadkrümmung auf die erreichbare Produktivität der Befüllung wird durch die Versuche zur Regelung des Förderstroms in Abschnitt 4.2 bestätigt. Die Beschleunigung der Handhabung ist möglichst zu reduzieren, um den erforderlichen Dosierdruck aufrechterhalten zu können. Bei dynamischen Richtungsänderungen im Bearbeitungspfad führt dies jedoch insgesamt zu geringeren, mittleren Vorschubgeschwindigkeiten. Ähnlich wie bei der HSC-Bearbeitung ist es somit vorteilhaft, eine \mathcal{G}^1 -, besser noch \mathcal{C}^2 -Kontinuität zu erreichen.

Düsenausnutzung Als Störgröße betrachtet hat die Änderung der Pfadüberlappung nach aktueller Erkenntnis einen vergleichbaren Einfluss auf die Dosierregelung wie eine Richtungsänderung. Somit bestätigt sich die in Abschnitt 2.4.7

formulierte Forderung einer geringen Varianz. Auch die betragsmäßige Maximierung der Schrittweite ist weiterhin gültig, insgesamt sogar zu bekräftigen: Die Vorschubgeschwindigkeit muss entsprechend erhöht werden, um bei geringer Schrittweite ein hohes Fördervolumen fahren zu können. Dies erschwert die Forderung einer geringen Dynamik in der Handhabung und müsste entsprechend über höhere Krümmungsradien ausgeglichen werden. Weiterhin kann beobachtet werden, dass sich nicht vermeidbare, minimale Materialrückstände am Düsenrand akkumulieren können und kleine Schrittweiten entsprechend zu stärkeren Verschmierungen führen.

Repräsentationsraum In Abschnitt 3.1 wurde der Begriff der Einfüllfläche eingeführt. Für dessen Darstellung in CAD existieren verschiedene Werkzeuge. Bei Sandwichpaneelen kommen insbesondere erweiterte Polygone mit Linien- sowie Bogensegmenten zum Einsatz. Mit dieser Repräsentation kann lediglich C^0 - oder G^1 -Kontinuität erreicht werden. Bei ästhetisch anspruchsvolleren Anwendungen sowie gekrümmten Paneelen kann mittels Splines oder Bézierkurven (vgl. Abb. 4.29) eine C^2 -Kontinuität abgebildet werden.

Neben der bereits beschriebenen, parametrischen Repräsentation in CAD kann auch eine gerasterte Darstellung gewählt werden. Dabei wird die zweidimensionale Fläche in Pixel definierter Größe aufgeteilt. Der Befüllbereich wird als Vordergrund (weißer Bereich) „eingezeichnet“. Diese Form erlaubt den Einsatz von Algorithmen der Bildverarbeitung. Funktionen zur Überführung der parametrischen in eine gerasterte Repräsentation sind in allen gängigen Bildverarbeitungsbibliotheken enthalten. Die Rückführung ist hingegen mit höherem Aufwand verbunden, insbesondere wenn eine Kontinuität über C^0 gefordert wird.

Auch bei der Pfadplanung lassen sich die Ansätze nach einer Repräsentation im parametrischen oder gerasterten Raum unterscheiden. Grundsätzlich ist ersterer zu bevorzugen, da hier ein geringerer Genauigkeitsverlust zu erwarten ist. Bei einer gerasterten Repräsentation steigt hingegen der Speicherbedarf exponentiell mit der Auflösung. Aufgrund der hohen Toleranzen im Prozess ist aller Voraussicht nach eine Rasterung mit 0,1 mm akzeptabel. Die Überführung in gerasterte Darstellung ist somit nicht per se auszuschließen. Aus einem ebenen Sandwichpaneel der Größe $2,5 \times 1,5$ m würde etwa ein Bild mit 365 MP resultieren. Da Einfüllflächen jedoch nur einen kleinen Anteil ausmachen, können dünnbesetzte Matrizen eingesetzt werden. Kombiniert mit einer rein binären Darstellung (schwarz-weiß) kann der Rechenaufwand und Speicherbedarf weiter reduziert werden.

Konturtreue Je nach Algorithmus kann die Kontur der Einfüllfläche unterschiedlich berücksichtigt werden. Eine hohe Konturtreue ist meist hinsichtlich der Kontinuität von Vorteil. Die Abhängigkeit ist bei Verwendung der Kontur als reine Begrenzung gegeben. Entsprechende Verfahren werden insbesondere bei mobiler Robotik und unbekannter oder variabler Umgebung eingesetzt. Die Pfadplanung versucht vom Ausgangspunkt aus, die gesamte Fläche zu füllen und passt sich erst bei Annäherung an eine Begrenzung dieser an.

In einigen Ansätzen werden zumindest teilweise die geometrischen Aspekte der Kontur eingangs berücksichtigt. So kann es beispielsweise bei einem Bustraphedon-Pfad (auch als „Zick-Zack“ bekannt) sinnvoll sein, sich entlang einer dominanten Trägheitsachse oder dem längsten Liniensegment zu orientieren. Die Anzahl der Richtungswechsel kann zum Teil drastisch reduziert werden [24].

Die größte Konturtreue ergibt sich bei der Bearbeitung entlang von Konturparallelen. Dies ist etwa beim Fräsen von Taschen weit verbreitet. Die Bestimmung der Parallelen erhöht die Komplexität des Pfadplanungsalgorithmus, birgt jedoch eine Reihe an Vorteilen. So kommt es etwa zu weniger und allgemein schwächeren Richtungswechseln als beim Zick-Zack-Kurs. Auch bei der Pfadüberlappung kommt es zu weniger starken Ausreißern.

Start- und Endposition Bei den meisten Pfadplanungsalgorithmen muss die Wahl der Startpositionen unterschiedlichen Anforderungen genügen. Unterschieden werden kann nach der Lage in der Fläche oder auf der Kontur. Dies kann auch weiter konkretisiert werden. So sollte ein Zick-Zack-Pfad etwa auf dem Eckpunkt eines Polygons starten, eine konturparallele Bearbeitung wiederum an einem Maximum der Distanztransformation. Die Endposition ergibt sich wiederum aus dem Algorithmus und der Lage der Startposition.

Bei einer speziellen Klasse an Algorithmen werden vollständig geschlossene Pfade generiert. Das heißt, Start- und Endposition sind identisch. Daraus folgt, dass die Wahl des Startpunktes beliebig ist. Bei der Pfadplanung komplexer Flächen ergibt sich hierbei ein signifikanter Vorteil: Benachbarte Pfade können mit Übergangsbewegungen an der Kontur einfach verbunden werden. Somit kann eine Fläche auch bei Segmentierung mit einem durchgängig kontinuierlichen Pfad abgedeckt werden.

In der Bewertung sind entsprechend Algorithmen zu bevorzugen, bei welchen Start- und Endposition zusammenfallen und an eine beliebige Stelle der Kontur gelegt werden können. Ist dies nicht gegeben, kann die freie Wahl einer Endposition entlang der Kontur ebenso vorteilhaft sein. Auf dieser Basis sind etwa weitere Optimierung im Backtracking möglich. Mit Methoden wie dem Traveling Salesman Algorithmus können etwa Umsetzbewegungen und -zeiten minimiert werden.

Abdeckungsaufwand Die Herausforderung bei der Pfadplanung zum KFM-Eintrag lässt sich folgendermaßen zusammenfassen: Die spezifizierte Fläche ist mit einem Pfad minimaler Gesamtlänge (äquivalent zur maximalen Schrittweite) und möglichst hochklassiger Kontinuität abzudecken. Problematisch ist dies aufgrund der Zielkonflikte zwischen den einzelnen Forderungen. Ab einer G^1 -Kontinuität muss eine Richtungsänderung über ein gekrümmtes Pfadsegment verlaufen, wodurch die Abdeckung erschwert wird. In einer konturparallelen Strategie mit rechteckiger Begrenzung müssten die Radien von innen nach außen stetig zunehmen. Damit wachsen die Abweichung zur äußersten Kontur und die unbesetzten Bereiche in den Ecken.

Grundsätzlich sind bei konstanter, maximierter Schrittweite ohne Pfadüberlappung für alle bekannten Algorithmen Lücken in der Abdeckung zu erwarten. Der notwendige Aufwand, diese Lücken zu schließen, variiert stark. Dieser Aufwand kann entsprechend in der Bewertung berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass das Ziel der vollständigen Abdeckung bei maximierter Schrittweite stärker zu gewichten ist.

4.3.3. Konzeptentwicklung

Entsprechend der Anforderungen wird die Implementierung der Prozessplanung in zwei Ebenen betrachtet. Die obere Ebene bildet das *Front-End* mit allen notwendigen Bedienungs- und Visualisierungselementen. Der eigentliche Algorithmus zur Erstellung von Bearbeitungspfaden wird über das Front-End aufgerufen und bildet somit die untere Ebene. Im Folgenden werden die jeweiligen Konzepte erarbeitet. Dabei werden im Vorfeld Pfadplanungsalgorithmen aus dem Stand der Wissenschaft und Technik nach der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Metrik bewertet. Vielversprechende Lösungsansätze können entsprechend in die Entwicklung einfließen.

Bewertung gängiger Strategien

Das Problem der Pfadplanung ist nicht neu und entsprechend viel Literatur existiert in diesem Themenfeld. Anhand der Erkenntnisse der bisherigen Kapitel werden hier vielversprechende Lösungsansätze vorgestellt und die Hypothese aus Abschnitt 2.4.7 gefestigt, dass kein verfügbarer Algorithmus die Anforderungen des KFM-Eintrags ausreichend erfüllt. Vorweg sei gesagt, dass sowohl probabilistische Strategien als auch die Gruppe der raumfüllenden Muster (beispielsweise mit Hilbert-Kurven oder organischen Labyrinthen [90]) nicht berücksichtigt werden. Aufgrund deren begrenzter Kontrollierbarkeit kann ein Luftauslass nicht zuverlässig garantiert werden.

Richtungsparallel Besonders weite Verbreitung im AM haben richtungsparallele Pfade. Auch in der CNC-Bearbeitung gehört der „Zick-Zack-Pfad“ zu einer der ältesten Strategien. Der Algorithmus zur Erstellung solcher Pfade ist äußerst einfach: Entlang einer meist manuell definierten Hauptrichtung wird eine begrenzende Kontur mit fester Schrittweite in Linien unterteilt. Die Enden werden daraufhin alternierend verbunden. Start- und Endpunkt liegen jeweils auf den quer zur Hauptrichtung am weitesten auseinanderliegenden Linien.

Die richtungsparallele Bearbeitung hat neben der Einfachheit zwei weitere wesentliche Vorteile. Zum einen kann die Hauptrichtung an einer Linearachse eines Handhabungssystems ausgerichtet sein, was die Steuerung der Kinematik vereinfacht. Zum anderen können hohe Schrittweiten gewählt werden, da Lücken nur im Bereich der Begrenzung entstehen. Dieser „Treppeneffekt“ wird üblicherweise über einen zusätzlichen, abschließenden Pfad entlang der Kontur ausgeglichen. Dies ist beim KFM-Eintrag jedoch nur begrenzt möglich: Nach Abb. 4.30a auf der nächsten Seite ist es offensichtlich, dass das Risiko von Lufteinschlüssen bei maximaler Schrittweite mit steigendem Düsendurchmesser zunimmt.

Je nach Form der Kontur und Wahl der Hauptrichtung ist eine Segmentierung erforderlich, exemplarisch dargestellt in Abb. 4.30b auf der nächsten Seite. Offensichtlich hat die Hauptrichtung einen starken Einfluss auf die Anzahl der Richtungswechsel. Ding et al. [24] schlagen ein Verfahren zur Segmentierung mit automatischer Wahl der jeweils optimalen Hauptrichtung vor. Die Autoren haben den Algorithmus zudem erweitert, sodass jedes Segment einen vollständig geschlossenen Pfad ohne Treppeneffekt aufweist. Segmente können entsprechend kontinuierlich verbunden werden. Die generierten Pfade können beim KFM-Eintrag jedoch in einigen Fällen zu Talfahrten führen. Weitaus kritischer ist dies beim Ansatz von Jin et al. [66]. Die Autoren generieren je Segment einen zweiten, parallelen Zick-Zack-Pfad, um zurück zum Ausgangspunkt zu fahren. Neben einigen weiteren Defiziten ist dieser Pfad in der hier betrachteten Anwendung gänzlich ungeeignet, da bis zu 25 % der Pfade in Hauptrichtung einer Talfahrt entsprechen.

Es existiert kein Ansatz zur Generierung eines kontinuierlichen, richtungsparallelen Pfades mit garantiertem Luftauslass. Zum Einsatz beim KFM-Eintrag muss entsprechend die konventionelle Strategie genutzt werden. Die Schrittweite ist abhängig vom Düsendurchmesser zu reduzieren, damit eine finale Konturfahrt nicht zu Lufteinschlüssen führt. Die hohe Dynamik beim Richtungswechsel erfordert weitere Anpassung in der Positions- und Dosierregelung. Zusammenfassend ist eine richtungsparallele Strategie nicht auszuschließen, stellt jedoch offensichtlich kein Optimum dar.

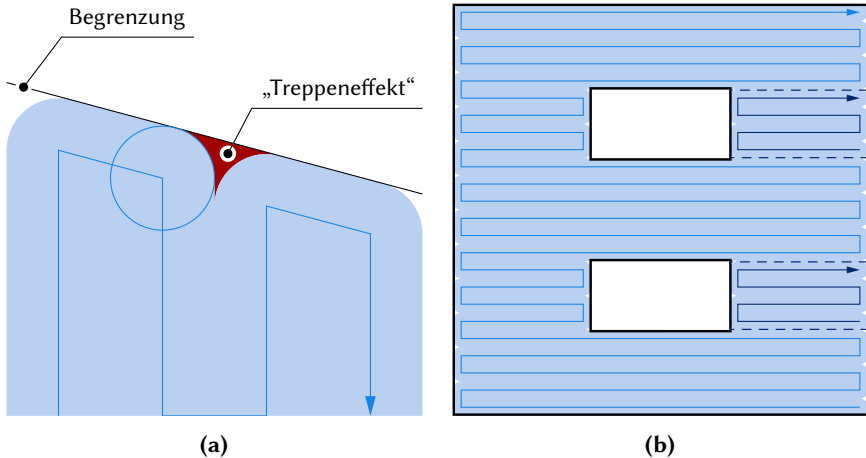


Abb. 4.30.: Exemplarische Darstellung der richtungsparallelen „Zick-Zack“-Strategie und dabei entstehender Treppeneffekte (a) sowie notwendiger Segmentierung (b)

Konturparallel Ähnlich fundamental und weit verbreitet sind konturparallele Strategien. Die Basis bildet die Generierung von Konturparallelen in konstanter Schrittweite, die von innen nach außen abgearbeitet werden. Dieses Verfahren wird insbesondere beim CNC-Fräsen eingesetzt, wo ein Zick-Zack-Pfad zur ständigen Umkehr der Schnittrichtung führen würde. Bei konkaven Flächen ergeben sich zudem weniger starke Richtungsänderungen. Dies erleichtert die Einführung weiterer Methoden zur Steigerung der Kontinuität.

Weist die Distanztransformation einer Fläche mehrere lokale Maxima auf, spalten sich die Konturparallelen auf. Die Nachbarschaftsbeziehungen können in einem minimal spannenden Graphen (englisch: *minimum spanning tree*) dargestellt werden. Pfad-bedingte Luftschlüsse beim KFM-Eintrag werden vermieden, wenn dieser Graph „bottom-up“ abgearbeitet wird. Die Strategie der einfachen Konturparallelen weist zwei charakteristische Nachteile auf: die minimal notwendige Überlappung im Bereich konvexer Ecken sowie die Diskontinuität des Gesamtpfades. In der Literatur existieren hierzu verschiedene Lösungsansätze, die im Folgenden genauer betrachtet werden sollen.

Die grundsätzliche Problematik der mangelnden Abdeckung ist in Abb. 4.31a auf der nächsten Seite skizziert. Konvexe Bereiche mit Krümmungsradien unterhalb des Werkzeugradius können bei maximaler Schrittweite nicht abgedeckt werden. Wie in Abb. 4.31b auf der nächsten Seite dargestellt, ergibt sich bei schar-

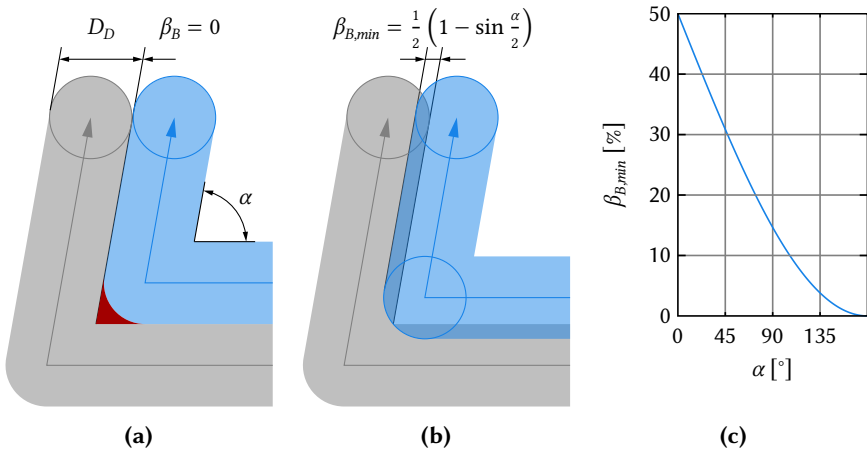


Abb. 4.31.: Unzureichende Abdeckung bei konturparallelen Pfaden in konvexen Bereichen mit geringer Krümmung (a) und theoretisch notwendige, minimale Pfadüberlappung (b) in Abhängigkeit eines Eckwinkels (c)

fen Ecken in Abhängigkeit des Winkels α folgende minimale Pfadüberlappung β_B :

$$\beta_B = 1 - \frac{S}{D} \geq \frac{1}{2} \left(1 - \sin \frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.4)$$

Held et al. [54] nutzen das Voronoi-Diagramm, um über die Gesamtfläche betrachtet die Schrittweite durch segmentweise Optimierung maximieren zu können. Künstliche Ausgleichsbewegungen, wie eine sogenannte Ω -Schleife, können ebenfalls Löcher füllen und gleichzeitig die Kontinuität erhöhen. Hierbei kommt es jedoch zum wiederholten Überfahren bereits befüllter Bereiche. Eine von Xu et al. [112] vorgeschlagene Lösung nutzt Methoden der Bildverarbeitung, sowohl um eine vollständige Abdeckung als auch eine Glättung des Pfades zu realisieren. Dabei werden sukzessive zwei Gauss-Filter eingesetzt. Der erste schärft das Bild der Distanztransformation, wodurch der Pfad tiefer in konvexe Ecken führt. Mit dem anschließenden, glättenden Filter wird die Krümmung des Pfades auf ein akzeptables Maß zurückgeführt. Das Prinzip ist in Abb. 4.32 auf der nächsten Seite veranschaulicht.

Forschung zu kontinuierlichen, konturparallelen Pfaden kommt insbesondere aus dem Bereich des AM. Das Problem kann durch Bildung Segment-weiser, Fermat-ähnlicher Spiralen gelöst werden [66, 117]. Im Graphen der Konturparallelen werden Äste ohne Verzweigung als „spiralisierbare Bereiche“ detektiert. Durch Aufbrechen und Verknüpfen der Kurven ergibt sich eine in sich geschlos-

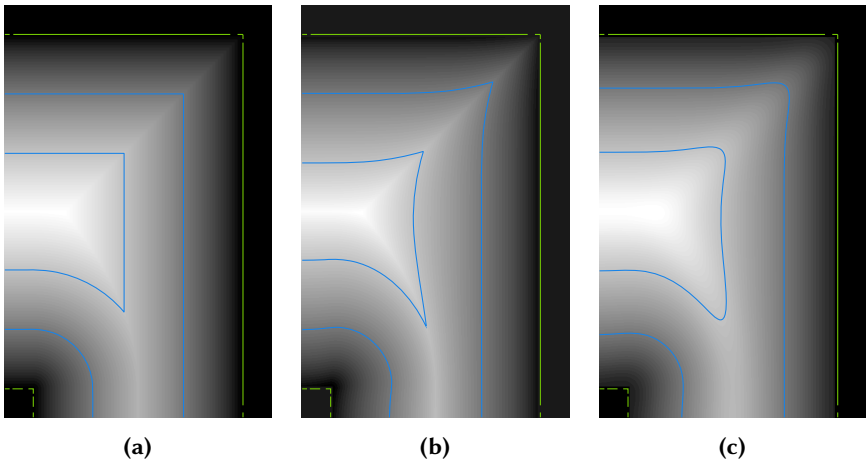


Abb. 4.32.: Generierung von Konturparallelen mit vollständiger Abdeckung mithilfe von Methoden der Bildverarbeitung [112]; (a) Ausgangsform, (b) Schärfung zur Abdeckung; (c) Glättung zur Reduktion der Pfadkrümmung

sene Spirale, exemplarisch dargestellt in Abb. 4.33 auf der nächsten Seite. Entlang der Kurven, die einen Knoten im Graphen darstellen, werden daraufhin geeignete Verknüpfungspunkte für die einzelnen Segmente gesucht. So kommen pro Segment lediglich zwei Richtungswechsel mit höherer Dynamik hinzu. Zum KFM-Eintrag ist dieses Vorgehen jedoch nicht geeignet, da jede zweite Kurve einer Talfahrt entspricht.

Konturparallele Ansätze sind aufgrund der geringen Krümmung für die KFM-Befüllung interessant, erfordern zur Abdeckung jedoch spezielle Lösungsansätze. In verschiedenen Arbeiten wurde zudem der hohe Lösungsraum beim Rerouting gezeigt. Entsprechend ist auch eine Sonderlösung vorstellbar, welche global kontinuierlich ist und dennoch einen Luftauslass gewährleisten kann.

Kontinuitätsoptimierte Spiralen Mit dem Aufkommen der Hochgeschwindigkeitszerspanung ist auch die Bedeutung der Kontinuität der Bearbeitungspfade gestiegen. Vielversprechende Ergebnisse konnten dabei mit optimierten Spiralen erzielt werden [55, 79]. Die Verfahren ähneln denen zur Generierung von Konturparallelen und basieren auf der Verwendung von Voronoi-Diagrammen der begrenzenden Flächen. Die Algorithmen sind jedoch numerisch wesentlich komplexer. An dieser Stelle sei insbesondere auf die umfassenden Arbeiten von Held et al. [52, 53, 55] verwiesen. Wie in Abb. 4.34 auf Seite 164 zu erkennen, kann

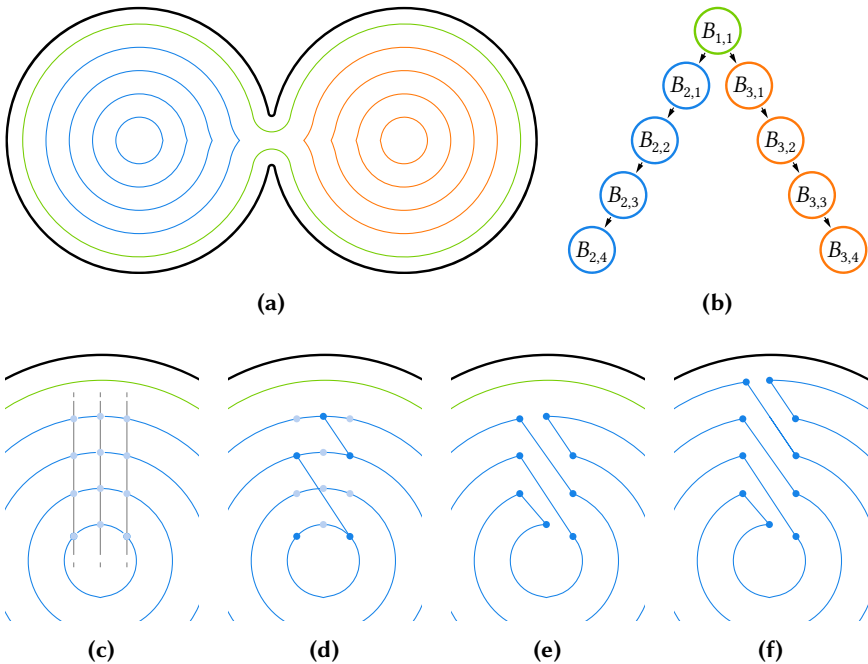


Abb. 4.33.: Prinzip der Bildung von Spiralen aus Konturparallelen zur Generierung eines kontinuierlichen Pfades; (a) Konturparallelen, (b) minimal spannender Baum, (c) Aufbrechen der Konturen eines Astes, (d) Verknüpfen zu rein führender Spirale, (e) Verknüpfen zu raus führender Spirale, (f) Verknüpfung über Knotenkurven

aus der Einhaltung einer hohen Kontinuität bei beliebigen Flächen eine starke Schwankung in der Schrittweite folgen. Der Vorschlag zur Reduktion mittels Segmentierung [53] basiert auch hier auf der Verwendung doppelter Spiralen, die wiederum zu Talfahrten führen.

Kontinuitätsoptimierte Spiralen können somit valide Lösungen für größtenteils konkave Einfüllflächen liefern. Die Eignung ist jedoch nicht offensichtlich und durch geschultes Personal der Prozessplanung zu bewerten. Es wäre auch zu klären, ob der Vorteil höherer Kontinuität im Pfad durch die stärkere Variation der Schrittweite zunichtegemacht würde.

Die betrachteten, infrage kommenden Algorithmen und Lösungsansätze sind zusammenfassend mit den jeweiligen Bewertungskriterien in Tabelle 4.2 auf Seite 165 dargestellt.

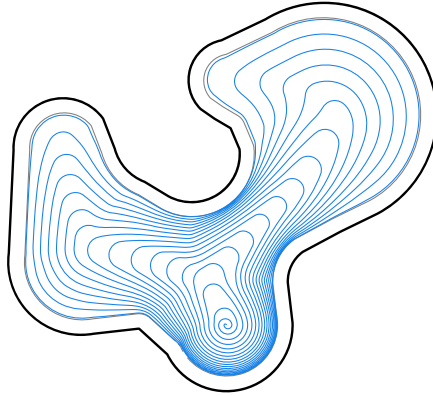


Abb. 4.34.: HSC-geeigneter Spiralfad für eine komplexe Begrenzungsfläche [55]

Algorithmus zur Pfadgenerierung

Bei der zielgerichteten Diskussion der Literatur im vorangegangenen Abschnitt zeigt sich, dass viele verfügbare Algorithmen grundsätzlich für den KFM-Eintrag eingesetzt werden können. Dabei ist immer ein Zielkonflikt zwischen unterschiedlichen Anforderungen zu lösen. Eine geschulte Prozessplanung kann vorhandene CAD/CAM-Systeme nutzen, je Einfüllfläche aus dem Portfolio der Lösungen auswählen und auf Basis eines Prozessverständnisses notwendige Adaptationen durchführen.

Das an dieser Stelle verfolgte Ziel ist die Entwicklung einer allgemeingültigen, einfach einzusetzenden Lösung. Für beliebige Flächen sollen Pfade generiert werden, die alle in Abschnitt 4.3.2 konkretisierten Anforderungen hinreichend erfüllen. Die notwendige Parametrisierung ist auf ein Minimum zu reduzieren, um eine intuitive Bedienung zu gewährleisten. Als minimal notwendige Eingaben sollen lediglich der Werkzeugdurchmesser D_D sowie die minimale Pfadüberlappung β_B erforderlich sein.

Von den in der Literatur verfügbaren Algorithmen erweisen sich insbesondere die Strategien mit hoher Konturtreue als vielversprechend hinsichtlich des KFM-Eintrags. Grundlegend eignen sich Konturparallelen zur Minimierung der Krümmungen. Im Bereich der äußeren Kontur gibt es keinen unklaren Luftauslass wie beim Treppeneffekt der Zick-Zack-Pfade. Hervorzuheben ist der größere Lösungsraum beim Backtracking und Rerouting, der zur Generierung eines geschlossenen Pfades hilfreich ist.

Tab. 4.2.: Übersicht und Bewertung der zum KFM-Eintrag infrage kommenden Lösungsansätze in der Literatur

	Richtungsparallel / Zick-Zack [51]	Variante: geschlossen [24, 66]	Konturparallel [54]	Variante: geschlossen [66, 117]	Variante: abdeckungs- optimiert [112, 113]	Kontinuitätsoptimierte Spiralen [55, 79]
<i>Kritische Anforderungen</i>						
Abdeckung	x	x	x	x	x	x
Luftauslass	x		x		x	x
<i>Zielforderungen</i>						
Kontinuität		x		x		
Krümmung	-	-	0	0	0	+
Düsenauslastung	+	+	0	0	+	-
<i>Erweiterte Merkmale</i>						
Repräsentation	P	P	P/R	P/R	P/R	P
Konturtreue	-	-	+	+	+	0
Start- / Endposition	-	0	0	+	0	0
Abdeckungsaufwand	+	+	0	0	-	-

Basierend auf bisherigen Erkenntnissen wird die Minimierung der Pfadlänge durch Maximierung der Schrittweite stärker gewichtet als eine hohe Kontinuität. Entsprechend wird hier der Ansatz von Xu et al. [112] verfolgt. Aus der Modifikation der Distanztransformation folgen ausladende Bewegungen in konvexen Ecken, die eine vollständige Abdeckung gewährleisten, während restliche Bereiche eine geringe Überlappung aufweisen.

Für den KFM-Eintrag wird eine Rerouting-Strategie entwickelt, die einen durchgängig geschlossenen Pfad liefert und dennoch in jedem Fall einen Luftauslass garantiert. Dazu wird zunächst der minimal spannende Baum der optimierten Konturparallelen aufgestellt. Die Bearbeitung kann auf jedem beliebigen Punkt

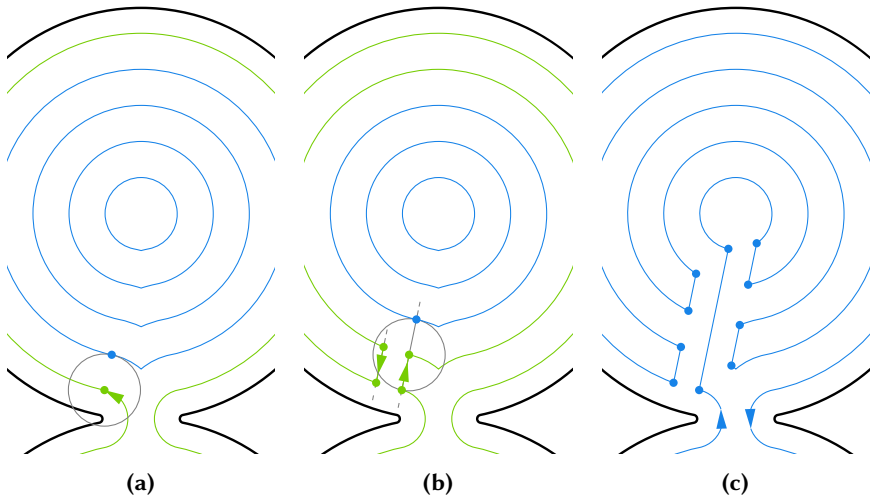


Abb. 4.35.: Spezielle Rerouting-Strategie für ungehinderten Luftauslass während des KFM-Eintrags; (a) Suchradius entlang der Pfadkoordinate, (b) Wechsel zur benachbarten Kurve, (c) resultierende, kontinuierliche Spirale

der äußersten Kontur beginnen. Von dort aus werden die Parallelen in „top-down“ Reihenfolge iterative mittels Rerouting verknüpft. Die aktuelle Kurve wird in Bearbeitungsrichtung so lange verfolgt, bis der Abstand zu einer laut Graphen benachbarten Kurve der aktuellen Schrittweite entspricht. An dieser Stelle werden die benachbarten Kurven aufgebrochen und Reroutingpfade eingefügt. Die Suche wird dann entsprechend in der inneren Kurve fortgesetzt. Die Anwendung des Schemas auf die in Abb. 4.33 auf Seite 163 dargestellte Fläche ist in Abb. 4.35 veranschaulicht.

Durch das schnellstmögliche Wechseln hin zu innen liegenden Konturparallelen werden die Blätter des Spannbaums ebenso schnell erreicht. Die bereits auf dem Weg gesetzten Reroutingpfade führen in einer Zick-Zack-ähnlichen Manier wieder auf den Ausgangsknoten. In Kombination mit der Glättung der Distanztransformation wird die Strategie im Folgenden als Fast In, Smooth Out (FISO) bezeichnet. Der resultierende Gesamtpfad ist für jede beliebige Fläche kontinuierlich. Er weist eine maximale Abdeckung bei minimaler Pfadüberlappung auf und führt in keinem Fall zu einer Talfahrt. Der einzige, nicht abbildbare Fall ist eine Einfüllfläche mit mehr als zwei losen Enden von Randabschlussbahnen. In der Analyse realer Bauteile in Kooperation mit einem Industriepartner konnte jedoch kein Sandwichpaneel mit einer solchen KFM-Geometrie identifiziert werden.

Front-End

Die Pfadgenerierung muss einige Rahmenbedingungen erfüllen, um den automatisierten KFM-Eintrag auch bei hoher Produktvielfalt sowie der Fertigung in kleinen Losgrößen produktiv und wertschöpfend einsetzen zu können. Diese Rahmenbedingungen ergeben sich durch die grafische Benutzerschnittstelle, im Folgenden als *Front-End* bezeichnet. Grundsätzlich ist eine möglichst automatische Generierung mit geringer Nutzereingabe wünschenswert. Das Ergebnis sollte entsprechend visualisiert werden, um durch die bedienenden Personen verifiziert werden zu können. Dies ist insbesondere beim Einsatz von Industrierobotern notwendig. Hier besteht bei ungünstiger Lage des Pfades die Gefahr von Singularitäten in der Bewegung. Eine Simulation der Kinematik kann genutzt werden, um die Positionierung des Bauteils im Arbeitsraum zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen. Eine einfache Bedienbarkeit reduziert Schulungskosten und erhöht die Reichweite des Programms zur Pfadgenerierung. Die dabei zu berücksichtigenden Zielgruppen sind das Personal von Konstruktionsabteilungen sowie der Fertigungsplanung.

Folgende, nach Arbeitsablauf sortierte Funktionen und Daten sind zur Pfadplanung vom KFM-Eintrag mindestens erforderlich:

1. Bauteil auswählen: CAD-Zeichnung importieren oder erstellen
2. Prozess definieren: Angabe der verfügbaren Werkzeuge, welche wiederum eine Düsengeometrie definieren
3. Bearbeitungsschritte hinzufügen: Einfüllflächen aus der CAD-Zeichnung auswählen, Parameter spezifizieren und Bearbeitungspfade generieren
4. Bearbeitung simulieren / verifizieren: generierte Pfade in korrekter Bearbeitungsreihenfolge abfahren und Abdeckung anzeigen
5. Handhabung simulieren / verifizieren: generierte Pfade in korrekter Bearbeitungsreihenfolge abfahren und Kollisionen oder Singularitäten anzeigen
6. Bearbeitungsprogramm exportieren: mittels Post-Prozessor die Pfadinformation in ein für das Handhabungssystem lesbares Programm überführen

Offensichtlich weisen Funktionen und Abläufe viele Parallelen zur Pfadplanung von Fräsbearbeitungen auf. Dort hat sich der Einsatz von CAD/CAM-Software durchgesetzt. Dabei integrieren die meisten modernen Konstruktionsprogramme auch CAM-Funktionen. Auf CAM spezialisierte Software liefert hingegen meist einen größeren Umfang an Pfadalgorithmen und deckt ein umfangreicheres Anwendungsspektrum ab. Die grundsätzliche Bedienung ist jedoch

identisch: Es wird ein Bauteil ausgewählt, der Prozess definiert und Bearbeitungsschritte hinzugefügt. Je nach Anwendung beinhaltet die Prozessdefinition etwa die Geometrie des Rohteils und Werkzeugparameter. Deutlich umfangreicher ist die Parametrisierung von Bearbeitungsschritten, wie beispielsweise zum Fräsen von Taschen oder Schichten einer Oberfläche. Grundlage dabei bilden immer geometrische Merkmale des Bauteils, etwa Form- und Flächenelemente.

Aufgrund der weiten Verbreitung von CAD/CAM-Software sowie der Analogie in der Prozessplanung bietet sich ein solches System auch beim KFM-Eintrag an. Der im vorigen Abschnitt entwickelte Algorithmus muss dazu in ein bestehendes System integriert werden. Kommerzielle Produkte bieten meist nur beschränkte Möglichkeiten zur Erweiterung um neue Prozess- oder Bearbeitungstypen. Als besonders vielversprechend erweist sich das Open-Source-Projekt „FreeCAD“. Nicht nur ist der gesamte Quellcode offen und nach Bedarf anpassbar, auch können Zusatzfunktion einfach als Module (genannt „Workbench“), hinzugeladen werden. In der aktuellen Version 0.19.1¹ sind bereits eine Vielzahl an Grundmodulen im Kernprogrammen enthalten. Für den betrachteten Anwendungsfall von Interesse sind insbesondere CAD (Part Design), CAM (Path) und Robotersimulation (Robot).

Der speziell zum KFM-Eintrag entwickelte Pfadplanungsalgorithmus kann auf verschiedene Weisen in FreeCAD integriert werden. Sinnvoll sind dabei entweder die Einbindung eines neuen Bearbeitungstypen in der Path Workbench oder die Programmierung einer externen Workbench. Letzteres beinhaltet einige Redundanzen zur Path Workbench, bietet dafür aber eine saubere Trennung der Prozesse und eine Unabhängigkeit vom Quellcode. Aufgrund der Vorteile wird die Implementierung als externe, spezialisierte Workbench bevorzugt. Diese kann einer bestehenden FreeCAD-Installation über den Add-on-Manager zugefügt werden.

4.3.4. Implementierung

In den zwei folgenden Abschnitten wird die Implementierung der erforderlichen Funktionen zur Pfadplanung beim KFM-Eintrag erläutert. Den ersten Teil bildet dabei die Implementierung des Algorithmus zur Pfadgenerierung als eigentlichen Kern der Prozessplanung. Die Programmierung der CoreFill Workbench für FreeCAD wird daraufhin im zweiten Teil vorgestellt.

¹Stand 14.05.2021

Algorithmus zur Pfadgenerierung

Zunächst soll hier ein Überblick über den allgemeinen Aufbau des Algorithmus gegeben werden, bevor auf die konkrete Umsetzung eingegangen wird. Der Ablauf zur Pfadgenerierung läuft folgendermaßen ab:

1. Binärbild aus den Polygonen der Einfüllfläche erstellen
2. Abzug der ersten Konturparallelen zur Berücksichtigung eines Randabschlusses
3. Berechnung der Distanztransformation
4. optimierter Algorithmus nach Xu et al. [112]: iteratives Schärfen & Glätten, bis vollständige Abdeckung mit spezifizierter Schrittweite erreicht ist
5. Extraktion der optimierten Konturparallelen
6. Bestimmung des minimal spannenden Baums
7. Bestimmung eines Startpunktes
8. FISO-Algorithmus zum anforderungsgerechten Rerouting

Die ersten drei Schritte können mit Grundfunktionen von Matlab / GNU Octave abgebildet werden. Mit der Funktion `poly2mask()` werden Binärbilder der einzelnen Polygone erzeugt und mit booleschen Operatoren vereint. Die Polygone werden vorher transformiert, womit sowohl die Auflösung der Rasterung eingestellt wie auch eine Minimierung des Speicherbedarfs erzielt wird: Über den ersten Eigenvektor der Kovarianzmatrix der Punkte des äußersten Polygons ergibt sich die Hauptträgheitsachse. Diese wird nach x ausgerichtet, wodurch sich insbesondere bei stark asymmetrischen Flächen die Größe des Begrenzungsrechtecks reduziert. Die Polygone werden anschließend zum Ursprung verschoben und entsprechend der geforderten Auflösung skaliert. Eine Kopie des Binärbildes des äußersten Polygons wird mittels `imerode()` morphologisch um die halbe Düsenbreite verkleinert. Dies liefert die erste Konturparallele und dient weiterhin als Maske zur Berücksichtigung eines Randabschlusses. Die Distanztransformation der gesamten Einfüllfläche wird mit der Funktion `bwdist()` berechnet.

Der Algorithmus zur Optimierung der Konturparallelen hinsichtlich vollständiger Abdeckung ist ausführlich in [112] erläutert. Dabei wird zunächst die lokale, mittlere Krümmung der Distanztransformation berechnet. Diese ergibt sich aus der Summe der Eigenwerte der Hesse-Matrix der einzelnen Pixel. Eine performante Implementierung in Matlab wird von Kroon [75] vorgeschlagen. Aus dem Maximum der lokalen Krümmung kann wiederum die erforderliche Breite σ_2 des

glättenden Gauss-Filters bestimmt werden. Der Multiplikator δ und die Breite σ_1 des schärfenden Filters werden ausgehend von $\sigma_1 = 2\sigma_2$ und $\delta = 0.5$ iterativ erhöht, bis eine vollständige Abdeckung erreicht ist. Das Bild der optimierten Distanztransformation J_{DST} ergibt sich dann zu:

$$J_{DST} = G_1 * (I_{DST} + (I_{DST} - G_2 * I_{DST}) \cdot \delta), \quad (4.5)$$

mit der ursprünglichen Distanztransformation I_{DST} und den Gauss-Filtern G_1 und G_2 , jeweils definiert durch σ_1 beziehungsweise σ_2 .

In dem ursprünglichen Algorithmus nach Xu et al. [112] erfordert die iterative Bestimmung von σ_1 , σ_2 und δ einen hohen Rechenaufwand. Die hier vorgestellte, optimierte Implementierung betrachtet hingegen nur die relevanten Bildbereiche: Mit den ursprünglichen Konturparallelen wird dazu die Befüllung simuliert und die Abschnitte mit unzureichender Abdeckung extrahiert.

Die optimierten Konturparallelen mit fester Schrittweite werden über die Funktion `contourc()` aus dem Bild der Distanztransformation bestimmt. Dabei bleibt die Information der Konturdistanz, jedoch nicht die Nachbarschaftsbeziehung erhalten. Entsprechend wird mit einer speziellen Unterfunktion der minimal spannende Baum generiert. Dafür wird von jeder Kontur der Schwerpunkt bestimmt – für Konturen desselben Astes liegen diese entsprechend nah beieinander. Der Startpunkt des Gesamtpfades kann grundsätzlich beliebig auf der äußersten Kontur gewählt werden. Besonders vorteilhaft ist es, einen Punkt mit hoher lokaler Krümmung zu verwenden. Dadurch wird im Gesamtpfad ein dynamischer Bereich weniger abgefahren. Zur Bestimmung wird die bereits berechnete Krümmungsmatrix verwendet und dort ein Maximum entlang der ersten Parallelen gewählt.

Zur Bestimmung der schnellsten Wege zu den lokalen Maxima der Distanztransformation entsprechend des FISO-Algorithmus werden von allen Konturpunkten die jeweils nächsten Nachbarn gesucht. Dazu werden die von der aktuellen, j -ten Kontur $K_{i,j}$ der Distanzebene i im Baum tiefer liegenden Subkonturen $K_{i+1,k}$ morphologisch mit `imdilate()` um den Suchradius erweitert. Das resultierende Binärbild dient als Maske, womit schnell geprüft werden kann, welche Konturpunkte Nachbarn mit Mindestabstand haben. Vom aktuellen Ausgangspunkt ausgehend wird in Pfadrichtung je Subkontur der erste Punkt $\mathbf{p}_{out,i,k}$ zum Konturübergang gesucht. Von diesem Punkt wird wiederum der nächste Nachbar $\mathbf{p}_{in,i,k}$ der entsprechenden Subkontur $K_{i+1,k}$ bestimmt.

Die Pfadrichtung wird bei der äußersten Kontur so festgelegt, dass die Distanz zum ersten Übergangspunkt minimal ist. Die Drehrichtung der Konturspiralen wechselt danach mit jedem Übergang. Ein Übergang wird durch die gerade Verbindung von $\mathbf{p}_{out,i,k}$ nach $\mathbf{p}_{in,i,k}$ hergestellt. Für den Rückweg wird die Geradengleichung parallel in Pfadrichtung von $K_{i,j}$ versetzt und die Schnittpunkte mit den

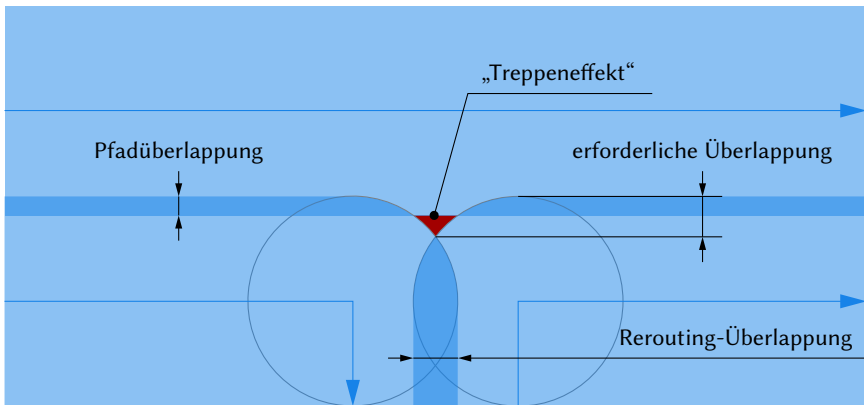


Abb. 4.36.: Geometrische Analyse der erforderlichen Überlappung beim FISO-Rerouting zur Vermeidung eines Treppeneffektes

Konturen bestimmt. Ähnlich wie beim Zick-Zack-Pfad besteht hier die Gefahr eines Treppeneffektes, siehe Abb. 4.36. Aus der geometrischen Betrachtung ergibt sich die erforderliche Überlappung β_R beim Rerouting aus der eingestellten Pfadüberlappung β_B :

$$\beta_R = \min\left(1 - 2\sqrt{\beta_B - \beta_B^2}; \beta_B\right) \quad (4.6)$$

Front-End

Als Programmiersprachen werden von FreeCAD Python sowie C++ unterstützt. Hier fällt die Wahl auf Python, das deutlich einfacher in der Implementierung ist und eine plattformübergreifende Lösung sicherstellt. Zur Implementierung des Pfadplanungsalgorithmus wird jedoch Matlab / GNU Octave als Entwicklungsumgebung gewählt. Der große Funktionsumfang etwa für numerischer Operationen, Bildverarbeitung sowie Ergebnisvisualisierung erlauben eine hohe Flexibilität während der Konzeptionierung sowie Programmierung. Das Python-Paket `runoctave` bietet sich an, um den Algorithmus aus FreeCAD heraus auszuführen. Dabei können Octave-kompatible Funktions- sowie Skriptdateien innerhalb von Python aufgerufen werden.

Viele der im Konzeptentwurf gelisteten, erforderlichen Funktionen werden bereits von FreeCAD zur Verfügung gestellt. Offensichtlich ist dies bei der Auswahl des Bauteils. Neue Zeichnungen können mit der Part Design Workbench angelegt werden. Alle CAD-Formate nach offenen Standards (z. B. IGES, STEP)

können direkt geladen werden. Über entsprechende Add-ons können zudem Import-Funktionen der meisten proprietären Formate integriert werden.

Die Path Workbench liefert einen Großteil der benötigten CAM-Funktionen. Insbesondere bei der Prozessdefinition übersteigt die Parametrisierung das zum KFM-Eintrag erforderliche Maß sehr stark. Die Zusatzfunktionen können jedoch einen optionalen Mehrwert generieren und ermöglichen etwa eine präzise Konfiguration des Post-Prozessors. Im Rahmen der Implementierung ist es von Vorteil, überladene Funktionen zu übernehmen, anstatt reduzierte Sonderlösungen zu generieren. In der Praxis können etwa Templates oder Scripte erstellt werden, um Standardwerte vorzugeben. Damit während der Arbeit nicht zwischen mehreren Workbenches gewechselt werden muss, sind die übernommenen Funktionen mit Verknüpfungen erreichbar. Die Path Workbench deckt entsprechend folgende Schritte ab: Prozess definieren, Bearbeitung simulieren und Bearbeitungsprogramm (in G-Code) exportieren. Zur Simulation der Handhabung kann entweder auf die Robot Workbench gewechselt oder der G-Code in ein externes Programm importiert werden.

Der Kern der CoreFill Workbench ist die neu entwickelte Funktion „Befülloperation aus Flächen erstellen“. Befülloperationen basieren in FreeCAD auf der PathOp-Klasse. Da der Pfad über das externe Matlabscrip generiert wird, bietet sich eine Vererbung von der PathEngraveBase-Klasse an. Diese implementiert Funktionen zur Konvertierung einfacher Kantenzüge in eine Bearbeitungsoperation. In einem grafischen Dialog werden die Einfüllflächen sowie die Düsengeometrie ausgewählt. Mit den Standardeinstellungen reicht dies bereits aus, um valide Befüllpfade zu generieren. Zur weiteren Konfiguration können folgende Parameter angepasst werden:

- Überlappung: die gewünschte Pfadüberlappung β_B in Prozent (bezogen auf Düsenbreite)
- Bearbeitungshöhe: Offset von der Einfüllfläche, um etwa mehr Spiel für die Anpressaktorik zu lassen
- Rückzugebene: Offset von der Einfüllfläche, bei welchem keine Kollisionen in lateraler Bewegung zu erwarten sind – auf dieser Höhe wird das Backtracking zwischen getrennten Einfüllflächen durchgeführt
- Sicherheitsabstand: Offset von der Bearbeitungshöhe, ab welchem alle Bewegungen im Eilgang durchgeführt werden können
- Kurvendiskretisierung: Punktabstand bei der Diskretisierung von Bogensegmenten, um die Einfüllfläche als einfaches Polygon zu repräsentieren

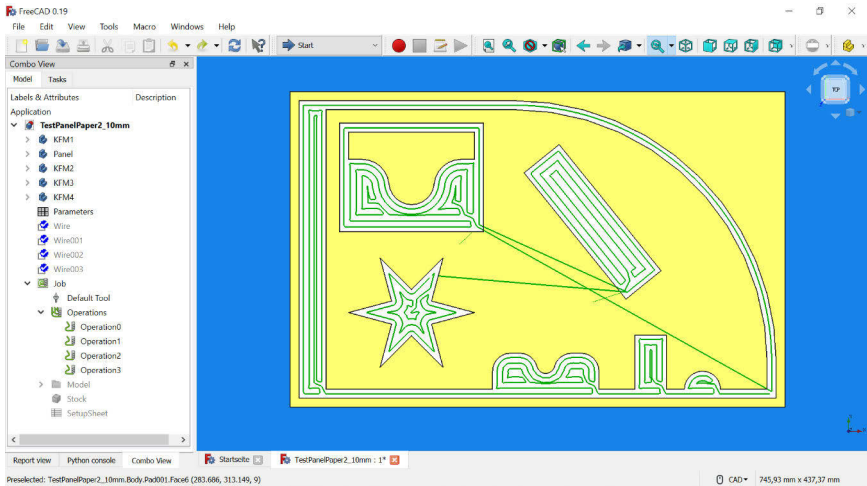


Abb. 4.37.: Implementierung der CoreFill Workbench in der grafischen Oberfläche von FreeCAD

- Rasterdiskretisierung: Auflösung der gerasterten Darstellung im Algorithmus zur Pfadplanung

Nach Abschluss der Parametrisierung wird je Fläche der Algorithmus zur Pfadgenerierung aufgerufen. Falls eine Einfüllfläche gekrümmte Kantensegmente enthält, werden diese zunächst diskretisiert. An das Matlabscript werden die Punktlisten der Kanten in einzelnen Matrizen übergeben. Die erste Matrix repräsentiert stets den äußersten Kantenzug, die nachfolgenden beschreiben die inneren Begrenzungen. Als Ergebnis wird eine Punkteliste zurückgeliefert, welche den Befüllpfad der jeweiligen Fläche repräsentiert. Die Erweiterung um Rückzugsbewegungen sowie alle weiteren CAM-Operationen werden über die PathEngraveBase-Klasse sowie die Path-Funktionsbibliothek abgewickelt. Die Implementierung in die grafische Oberfläche von FreeCAD ist in Abb. 4.37 dargestellt.

4.3.5. Praktische Validierung

Zur Validierung sowie Bewertung der entwickelten Lösung wird ein Vergleich zu konventionellen CAD/CAM-Systemen hergestellt. Der erste Teil beschäftigt sich mit dem tatsächlichen, praktischen Nachweis der Erfüllung der Anforderung an den Prozess. Im zweiten Teil der Validierung wird der operative Aufwand zur Generierung anforderungsgerechter Bearbeitungspfade geprüft.

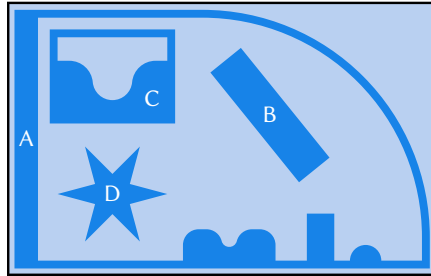


Abb. 4.38.: Exemplarisches Sandwichpaneel zur Validierung der Pfadplanung mit gebräuchlichen sowie fortgeschrittenen Flächenelementen

Um die Pfadplanung nicht nur rein theoretisch zu beurteilen, sondern auch die praktische Erfüllung der Anforderungen nachzuweisen, werden reale Befüllversuche mit den generierten Pfaden durchgeführt. Dazu wird ein speziell konstruiertes Testpaneel genutzt, dargestellt in Abb. 4.38. Dieses beinhaltet größtenteils klassische, in der Produktentwicklung gängige Formelemente. Folgende vier Einfüllflächen können unterschieden werden, sortiert nach abnehmender Verbreitung in der Praxis:

- A) Durchgängiger Randabschluss mit lokaler Verstärkung und einzelnen, primitiven Formelementen, etwa zum nachträglichen Einsetzen weiterer Konstruktionselemente wie Inserts, Scharnieren oder Schließern.
- B) Einfaches Rechteck, Verwendung etwa für Durchbrüche oder Taschen. Lage und Ausrichtung in der Kernebene ist grundsätzlich beliebig.
- C) Komplexere Geometrie, wie sie etwa für spezielle Designelemente zum Einsatz kommt. Hinsichtlich der Validierung ist dabei von Interesse, dass die Fläche mehrere lokale Maxima in der Distanztransformation aufweist.
- D) Die manuelle Fertigung hat bisher die konstruktiven Freiheiten in der Entwicklung stark eingeschränkt. Die sternförmige Fläche erlaubt eine exemplarische Prüfung der Potenziale einer automatischer Befüllung. Ein solches Element könnte etwa Lastpfad-optimierte Anbindungspunkte ermöglichen.

Ähnlich der Konstruktion des Testpaneels soll auch das weitere Befüllszenario den üblichen, industriellen Anforderungen entsprechen. Die Düse mit Durchmesser $D_D = 10$ mm und Randbreite $\Delta R_R = 5$ mm ist für dünne Randabschlüsse geeignet und erlaubt eine Befüllung nah am Übergang zum Werkstückträger. Eine hexagonale Wabe mit $w = 3,2$ mm und $h_K = 9,8$ mm hat die höchste praktische

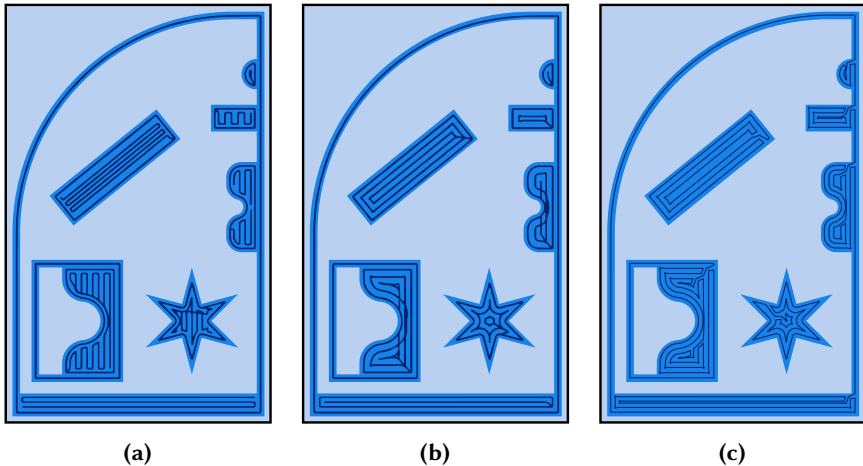


Abb. 4.39.: Verwendete Pfade zur praktischen Validierung; (a) RP, (b) KP, (c) FISO

Verbreitung. Als Vorschubgeschwindigkeit wird $v_B = 35 \text{ mm s}^{-1}$ gewählt, was bei überlappungsfreien Bereichen ein Fördervolumen von $Q_F \approx 300 \text{ ml min}^{-1}$ erfordert.

Als Referenz bei der Pfadgenerierung dient das in der Industrie weit verbreitete CAD/CAM System *Mastercam*. Hinsichtlich der in Abschnitt 4.3.2 gelisteten Anforderungen, können die besten Ergebnisse mit den klassischen Pfadstrategien „Zick-Zack“, kurz RP, und „Konturparallel mit konstanter Überlappung“, kurz KP erzielt werden. Zur Korrektur des Treppeneffektes wird beim Zick-Zack-Pfad eine abschließende Konturparallele hinzugefügt. Algorithmen für HSC-Pfade liefern für das Testbauteil keine zufriedenstellenden Ergebnisse; insbesondere die starke Schwankung in der Schrittweite führt zum Ausschluss. Die generierten und zur praktischen Validierung verwendeten Pfade sind in Abb. 4.39 dargestellt.

Prozessqualität

In der rein qualitativen Beurteilung sind alle im Vergleich stehenden Pfadstrategien grundsätzlich zum KFM-Eintrag geeignet. Dies zeigt sich auch im optischen Vergleich, siehe Abb. 4.40 auf der nächsten Seite. Hier gibt es kaum signifikanten Unterschiede. Lediglich bei der konturparallelen Strategie nach Mastercam sind Luftsinschlüsse erkennbar. Zudem kann hier auch ein erhöhter Materialverlust im Bereich der Fläche D festgestellt werden.

Der eigens entwickelte Algorithmus erfüllt konzeptbedingt die ersten drei Hauptanforderungen an Abdeckung, Luftauslass und C^0 -Kontinuität ohne weite-

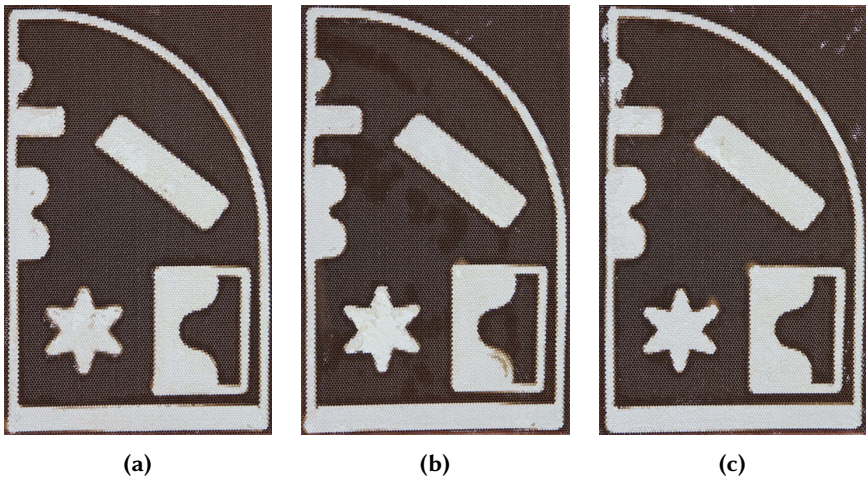


Abb. 4.40.: Unterseiten befüllter Paneele mit entferntem Prepreg zur optischen Validierung der verschiedenen Pfadplanungsstrategien; (a) RP, (b) KP, (c) FISO

re Anpassungen. Der neuartige Ansatz zum schnellen Erreichen der regionalen Maxima erfordert zusätzliche Richtungswechsel. Im Vergleich zur reinen konturparallelen Strategie steigt somit die mittlere Krümmung. Die Anzahl der Richtungswechsel bleibt jedoch unter der des Zick-Zack-Pfades.

Die Erfüllung der Hauptanforderungen mit den in Mastercam verfügbaren Algorithmen erfordert einen hohen manuellen Aufwand. Eine C^0 -Kontinuität kann bei Flächen mit mehreren Maxima nur mittels Backtracking erreicht werden. Sind wie bei der Fläche A die Maxima nur über die Einfüllfläche eines Randabschlusses verbunden, lässt sich eine Rückzugsbewegung nicht vermeiden. Dies folgt aus der notwendigen Aufteilung der Einfüllfläche und unabhängigen Behandlung der Teilflächen.

Bei C liegen die Maxima hingegen innerhalb einer Teilfläche. Entsprechend kann die Rückzughöhe auf null gesetzt werden; es wird ohne Abzuheben innerhalb der Fläche auf den neuen Pfad umgesetzt. In der praktischen Validierung sind jedoch zwei wesentliche Defizite zu beobachten. Zum einen nehmen Verschmierungen bei häufigem Passieren bereits befüllter Bereiche stark zu. Dabei kann sich auch Material an der Düse akkumulieren und zu größeren Rückständen an der Oberfläche führen. Zum anderen beanspruchen die teils kurzen Dosierzyklen und ein häufiges Umsetzen die Dosierregelung übermäßig. Dies wird insbesondere bei der konturparallelen Strategie weiter verstärkt, wo das Backtracking

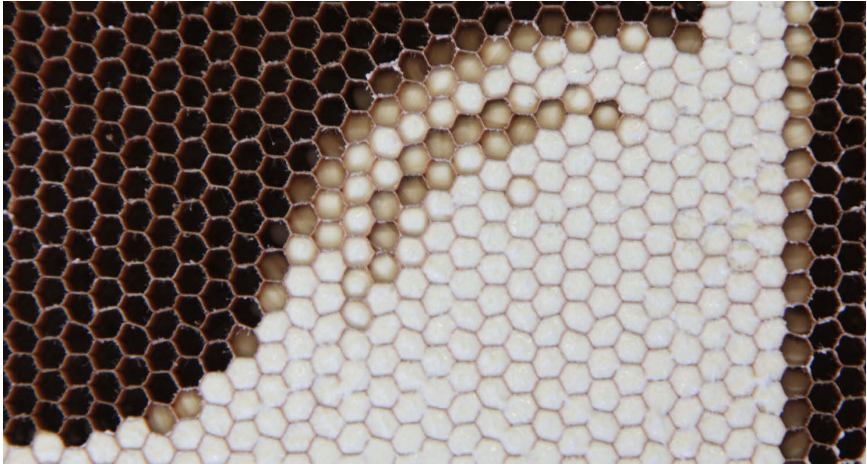


Abb. 4.41.: Luft einschlüsse bei der konturparallelen Strategie von Mastercam infolge erhöhter Belastung des Dosierreglers durch häufiges Backtracking

zwischen benachbarten Kurven bereits zu stärkeren Schwankungen in der Überlappung führt. In einem Bereich sind dadurch Luft einschlüsse zu beobachten, dargestellt in Abb. 4.41.

Zum quantitativen Vergleich der verschiedenen Strategien wird der Verlauf der Vorschubbeschleunigung, des Fördervolumens und des Dosierdrucks analysiert. In Tabelle 4.3 auf der nächsten Seite sind die Ergebnisse entsprechend zusammengefasst. Während der Versuchsreihe RP-D gab es einen Fehler in der Aufzeichnung, weshalb hier keine Daten vorliegen.

Anhand der Beschleunigung kann der Einfluss der Pfadkrümmung beurteilt werden. Hohe Beschleunigungen sind insbesondere bei konvexen Ecken erforderlich. Als repräsentative Größe wird dazu der Mittelwert des Betrags der Beschleunigung $\mu_{|\ddot{x}|}$ betrachtet. Dabei werden nur Bewegungen mit aktiver Dosierung berücksichtigt. Die FISO-Pfade weisen im Vergleich durchgängig niedrige Beschleunigungen auf. Das Rerouting weist somit gegenüber dem Backtracking der klassischen konturparallelen Strategie keine signifikanten Nachteile hinsichtlich der Kontinuitätsklasse auf. Demgegenüber ist offensichtlich die Glättung der Kurven nach der Methode von Xu et al. [112] geeignet, eine gleichmäßigere Bewegung zu gewährleisten.

Bei der Betrachtung der richtungsparallelen Strategie zeigt sich in RP-B, dass diese eine einfache und valide Lösung für geschlossene, rechteckige Einfüllflächen darstellen kann. In allen sonstigen Geometrien ergibt sich hingegen eine

Tab. 4.3.: Übersicht der charakteristischen Prozessgrößen zur Validierung der Befüllung verschiedener Regionen (A-D, vgl. Abb. 4.38) mit unterschiedlichen Strategien (KP: konturparallel, RP: richtungsparallel / „Zick-Zack“, FISO: Fast In, Smooth Out)

Region	$\mu_{ \bar{x} }$ [mm ² s ⁻¹]			QM_p [kPa]			μ_Q [ml min ⁻¹]		
	KP	RP	FISO	KP	RP	FISO	KP	RP	FISO
A	12	16	10	23	19	23	215	211	223
B	17	10	11	21	23	19	200	183	235
C	19	23	17	33	25	25	191	185	208
D	48	-	43	18	-	17	193	-	197

stärkere Dynamik im Vergleich zu den anderen Pfaden. Die Analyse der Fläche D zeigt jedoch auch, dass eine hohe Dynamik eine erfolgreiche Befüllung nicht ausschließt.

Eine Korrelation zum qualitativen Befüllergebnis ist über den Verlauf des Dosierdrucks p möglich. Quantifiziert wird dies durch das quadratische Mittel (vgl. Gleichung (3.35), S. 92) der Abweichung von Soll- zu Istwert des Drucks. Über den Großteil der Versuche hinweg liegen die Werte bei $QM_p \leq 25$ kPa. Die Probleme während der Befüllung KP-C spiegeln sich in dem hohen Wert $QM_p = 33$ kPa wider. Dies ist zudem die einzige Messreihe mit beobachteten Lufteinschlüssen (vgl. Abb. 4.41).

Bemerkenswert ist insbesondere das gute Ergebnis der Fläche D, die aufgrund der stark konvexen Form eine hohe Dynamik erfordert. Aus der Gegenüberstellung mit der Befüllung von C folgt, dass eine hohe Dynamik in der Handhabung deutlich weniger kritisch bezüglich der Prozessqualität ist, als starke Variationen in der Pfadüberlappung. Diese Erkenntnis bekräftigt die Eignung der entwickelten FISO-Strategie beim KFM-Eintrag.

Die Auslastung des Dosierwerkzeugs und der Düsenauslassfläche ist an das Fördervolumen Q_F gekoppelt. Zum Vergleich der Strategien bietet sich entsprechend der Mittelwert μ_{Q_F} an. Insgesamt wird mit FISO stets eine hohe Auslastung erreicht, gefolgt von KP und abschließend RP. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Pfaden sind jedoch eher gering und entsprechend wenig signifikant. Die auffällige Abweichung bei RP-B folgt aus einer überdurchschnittlich hohen Überlappung: Im Rahmen der manuellen Parametrisierung in Mastercam

führt hier eine Reduktion der Bahnen (obwohl geometrisch möglich) zu einem Fehler und einer unvollständigen Abdeckung.

Operativer Aufwand

Der Aufwand zur Pfadgenerierung mit Mastercam ist als sehr hoch einzustufen. Für jede Fläche, Pfadstrategie und Werkzeuggeometrie müssen die Einstellungen und Parameter spezifisch geprüft und angepasst werden. Insbesondere die in der Praxis sehr gebräuchlichen Randabschlüsse führen zu Komplikationen. Die Einfüllflächen A und C erfordern entsprechend die Generierung von Hilfsflächen im CAD/CAM-Programm. Dabei wird der Randabschluss von den weiteren Flächenelementen separiert. Für jede der (bei A z. B. fünf) entstandenen Teilflächen muss eine eigene Bearbeitung angelegt werden.

Die Anwendung des eigens zum KFM-Eintrag entwickelten Algorithmus mittels FreeCAD ist deutlich einfacher. Nach dem Importieren des Bauteils müssen lediglich die Einfüllflächen markiert und der minimale Parametersatz (Düsendurchmesser, gewünschte Schrittweite) spezifiziert werden. Die Software generiert daraufhin automatisch eine Prozessdefinition und je Fläche eine CAM-Bearbeitung.

Der Export erstellter Operationen als NC-Code ist bei FreeCAD wie Mastercam vergleichbar einfach. Beide Programme liefern eine rudimentäre Prozesssimulation, mit der die vollständige Abdeckung geprüft wird. Hinsichtlich der Kinematiksimulation bietet Mastercam mit *RobotMaster* ein deutlich professionelleres und ausgereifteres Zusatzpaket. Über entsprechende Lizenzen können 3D-Modelle und Post-Prozessoren für alle gängigen Industrieroboter erworben werden.

4.3.6. Diskussion der Ergebnisse

In Abschnitt 4.3.3 wurden Algorithmen aus dem Stand der Wissenschaft und Technik zur Pfadplanung auf Basis des erweiterten Prozessverständnisses zielgerichtet diskutiert. Bewertet wurde dabei die Eignung zur Erfüllung der Anforderungen des Befüllprozesses. Die Algorithmen sind jeweils für deutlich abweichende Prozesse entwickelt, entsprechend liegt es auf der Hand, dass die Anforderungen des KFM-Eintrags nicht optimal erfüllt werden können. Es lassen sich jedoch Vor- und Nachteile der verschiedenen Lösungsansätze identifizieren und eine Adaption auf den hier betrachteten Prozess ist nicht grundsätzlich auszuschließen.

Dies zeigt sich auch in der Validierung. Hier wurde die professionelle CAD/CAM Software Mastercam genutzt, um Bearbeitungspfade zum KFM-Eintrag zu generieren. Von den vielen integrierten Algorithmen wurden die klassischen Ansätze (konturparallel und richtungsparallel) zur praktischen Validierung aus-

gewählt. Diese haben in der Vorauswahl am ehesten die Anforderungen des Befüllprozesses erfüllen können. Der dabei erforderliche operative Aufwand ist jedoch enorm. Somit stellen verfügbare Systeme keine geeignete Lösung dar, um den automatisierten KFM-Eintrag auch bei hoher Produktvielfalt sowie der Fertigung in kleinen Losgrößen produktiv und wertschöpfend einsetzen zu können.

Als Lösung dieses Problems wurde ein spezieller Algorithmus entwickelt. Dieser generiert für beliebige Geometrien von Einfüllflächen einen vollständig C^0 -kontinuierlichen Pfad. Dabei ist nur ein minimaler Satz an Parametern erforderlich. Mit der vorgestellten Implementierung in FreeCAD reduziert sich der operative Aufwand erheblich.

Der Pfad ist nach der Methode von Xu et al. [112] geglättet. In der praktischen Validierung äußert sich dies in einer Reduktion der erforderlichen Vorschubbeschleunigung. Die notwendigen Richtungswechsel beeinträchtigen das Prozessergebnis nicht. Aufgrund der geringen Variation der Schrittweite wird die Regelung des Fördervolumens nicht übermäßig beansprucht und das Dosierwerkzeug kann entsprechend stärker ausgelastet werden. Mit dem FISO-Rerouting ist zu jeder Zeit ein ausreichender Luftauslass gewährleistet.

Das entwickelte System ist somit eine wesentliche Befähigungstechnologie des automatisierten KFM-Eintrags. Hierdurch wird der Planungsaufwand erheblich reduziert und so die wirtschaftliche Nutzung der Automatisierung bei kleinen Losgrößen bis hin zur Einzelteilmontage ermöglicht. Mit dem reduzierten Bedienungsaufwand ist das System besonders Werkstatt-nah und kann direkt vom Anlagenpersonal genutzt werden. Dadurch ist die Integration des automatisierten KFM-Eintrags in manuelle Prozessketten vereinfacht und der Einsatz auch für kleine Betriebe wirtschaftlich. Die vorgestellte Lösung führt entsprechend zu einer maßgeblichen Optimierung der *Flexibilität*.

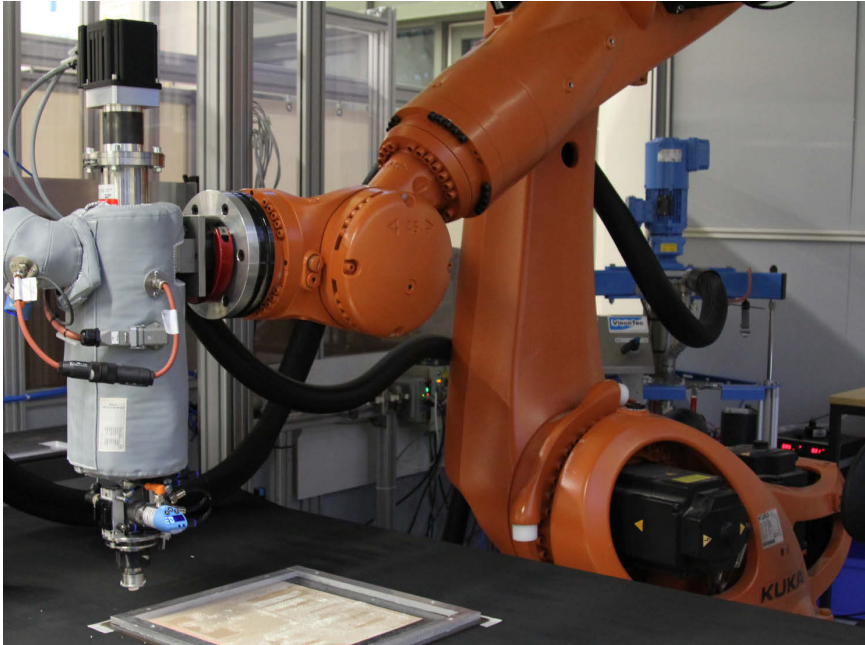


Abb. 4.42.: Entwickelte Roboteranlage zum automatisierten KFM-Eintrag bei beliebigen Befüllbereichen

4.4. Gesamtsystemvalidierung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines automatisierten Kernfüllmasseneintrags. Entgegen bereits verfügbaren, defizitären Anlagen soll das Konzept mit wissenschaftlich fundierten Methoden erarbeitet werden. Ein tiefgehendes Prozessverständnis dient der Optimierung der drei Zielgrößen *Qualität*, *Robustheit* und *Flexibilität*. In diesem Abschnitt werden die erzielten Ergebnisse auf die Aufgabenstellung reflektiert. Insbesondere die Versuche aus Abschnitt 4.3.5 dienen dabei als Bewertungsgrundlage. In der Diskussion der Ergebnisse lag der Fokus auf der Pfadplanung. Die Validierung lässt sich jedoch weiter fassen, da alle Subsysteme in der finalen Fassung integriert waren. Die entwickelte Gesamtanlage ist in Abb. 4.42 dargestellt.



Abb. 4.43.: Unterseite des Testbauteils nach Entfernen der unteren Decklage zur Validierung der vollständigen Befüllung ohne Lufteinschlüsse

4.4.1. Qualität

Das in Abb. 4.38 auf Seite 174 skizzierte Testbauteil eignet sich insbesondere, um die Qualitätsanforderung unter jeglichen geometrischen Rahmenbedingungen zu prüfen. Kritisch ist dabei die vollständige Befüllung ohne Lufteinschlüsse. Wie in Abb. 4.43 zu sehen, konnte diese Anforderung innerhalb der Flächen eingehalten werden. Der Erfolg ergibt sich aus der zielgerichteten Entwicklung der Anpressaktorik, der Druck-basierten Dosierregelung sowie der FISO Pfadplanung. Beispielsweise zur Vermeidung von Lufteinschlüssen wurden die Kennfelder aus Abschnitt 3.3 genutzt, um einen optimalen Anpressdruck zu wählen. Kritische Produktionsfehler wie geplatze Waben sind während der Validierung nicht aufgetreten.

Aufgrund des kleinen Düsendurchmessers von $D_D = 10$ mm und des hohen Vorschubs beim Volumenstrom von $Q_F \approx 200 - 300$ ml min⁻¹ war bei der praktischen Validierung keine vollständig binäre Befüllung an den Rändern möglich. Sollte dies in einer Anwendung als notwendig deklariert sein, ist das mit der entwickelten Anlage grundsätzlich umsetzbar. Bei $D_D = 10$ mm konnte dies etwa mit der Reduktion des Fördervolumens auf $Q_F \approx 100$ ml min⁻¹ erreicht werden. Anhand umfangreicher Versuchsreihen könnten in weiteren Forschungsarbeiten

Kennfelder aufgestellt werden, um eine Korrelation zwischen der Überlappungszeit und der Wahrscheinlichkeit vollständiger Befüllung herzustellen.

Bei der Befüllung größerer Flächen oder Bauteilen mit mehreren Segmenten hat sich ein Optimierungsbedarf bei der Reduktion oberflächlicher Rückstände gezeigt. Bei einzelnen Bahnen konnten diese mit gezielter Variation des Anpressdrucks minimiert werden. Sobald jedoch Pfadüberlappungen auftreten, werden bereits geringste Mengen von der Düse mitgenommen. Das überschüssige Material kann sich akkumulieren, zu Verschmierungen führen oder beim Umsetzen auf andere Bereiche als größere Ansammlung zurückbleiben. Eine vollständige Vermeidung der Materialverluste ist aufgrund der leichten Kompressibilität der KFM rein mit optimierten Prozessgrößen somit nicht realistisch.

4.4.2. Robustheit

Entsprechend der Erkenntnisse aus den Abschnitten 3.2 und 3.3 wird das Fördervolumen über eine robuste $PI(T_1)$ -Regelung des Dosierdrucks eingestellt. Bei der automatisierten Befüllung sollte weiterhin lediglich T0-Prepreg genutzt werden. Diese Maßnahmen haben sich als außerordentlich effektiv erwiesen, um eine größtmögliche Robustheit zu erlangen. Parameteranpassungen bei der Regelung sind lediglich in Abhängigkeit des Düsenquerschnittes sowie der Wabengeometrie notwendig. Die Anpassung beschränkt sich zudem auf eine Änderung des Zieldruckes. In der praktischen Validierung konnten keine kritischen Einschränkungen bei der Einhaltung der Qualitätsanforderungen unter anderem bei folgenden Änderungen / Einflüssen (jeweils innerhalb der erlaubten Spezifikation) festgestellt werden:

- Materialalterung, sowohl von Prepreg wie KFM
- Schwankung der Umgebungsbedingungen
- zufällige Fehler in der Wabengeometrie
- variierende Pfadüberlappungen

Lediglich bei der weniger kritischen Anforderung der Reduktion von Rückständen sind teils Einbußen in der Qualität hinzunehmen. Dies hängt mit der bereits erläuterten, unvermeidbaren Materialakkumulation zusammen.

Die bei industriell verfügbaren Anlagen verbreitete Methode der Steuerung des Fördervolumens über den Düsenvorschub hat im Vergleich deutliche Defizite aufgezeigt. Das Verfahren ist zunächst sehr aufwendig und wenig intuitiv in der Parametrisierung. Während der Befüllung führen bereits geringe, nicht antizipierte Variationen der Pfadüberlappung oder der Wabenausrichtung zur Abnahme der Prozessqualität.

4.4.3. Flexibilität

Ein breiter industrieller Einsatz der automatisierten Befüllung ist nur mit einer hohen Flexibilität möglich. Andernfalls beschränkt sich die ökonomische Anwendung auf die Serienfertigung, welche nur einen kleinen Teil der Sandwichproduktion für das Flugzeuginterieur ausmacht. Die entwickelte Lösung liefert im Gegensatz zu verfügbaren Anlagen bereits eine nahezu maximale Flexibilität.

Im vorangegangenen Abschnitt ist bereits der minimale Aufwand zur parametrischen Anpassung an verschiedene Befüllszenarios beschrieben. Den größten Beitrag liefert jedoch die automatische Programmgenerierung mit dem FISO-Algorithmus. Dabei müssen lediglich einfach zu bestimmende Parameter wie Düsendurchmesser und erwünschte Pfadüberlappung angegeben werden. In der praktischen Validierung hat sich die in Abschnitt 3.1 entwickelte Simulationsumgebung als hilfreich erwiesen. Hiermit können je nach Düsengeometrie optimale Pfadüberlappungen bestimmt werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Auf der Luftfahrtbranche lastet seit geraumer Zeit finanzieller Einsparungsdruck. Dieser wurde durch die Corona-Pandemie verstärkt, wobei die Prognosen stark divergieren. Für alle Szenarien gilt jedoch, dass die Fertigungsprozesse einen hohen Optimierungsbedarf aufweisen.

Die bedeutendsten Ansätze sind die Konsolidierung und Automatisierung der Prozesskette. Dabei hat sich der KFM-Eintrag als wesentliche Schlüsseltechnologie herauskristallisiert. Seit kurzem verfügbare industrielle Anlagen verdeutlichen die Potenziale in der Produktivitätssteigerung. Es wurden jedoch Defizite in der *Qualität*, *Robustheit* und *Flexibilität* des Prozesses identifiziert. Diese Mängel sind auf die fehlende, wissenschaftlich fundierte Prozessanalyse zurückzuführen.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines optimierten, automatisierten KFM-Eintrags. Konkret soll diese im Gegensatz zu bisherigen Lösungen auf einem tiefergehenden Prozessverständnis aufbauen.

Dazu wird der Prozess in Kapitel 3 einer umfangreichen Analyse unterzogen. Mit der entwickelten Simulation der geometrischen Zusammenhänge können verschiedene Düsengeometrien in ihrer Eignung zur randnahen Befüllung validiert werden. Unter Vorgabe der Düsen- und Wabengeometrie kann ebenfalls eine optimale Pfadüberlappung berechnet werden. Die Untersuchung der KFM-Strömung in Abschnitt 3.2 verdeutlicht das stark nichtlineare Verhalten. Das schließt wiederum eine modellbasierte Dosierregelung praktisch aus. Die in der Messung der prozessbedingten Luftströme aufgestellten Kennfelder (vgl. Abschnitt 3.3) helfen bei der Wahl von Prozessgrößen, bei welchen ein Entweichen der Luft gewährleistet ist. Es zeigt sich grundsätzlich, dass bei T0-Prepreg eine zusätzliche Anpresskraft aufgebracht werden kann. Demgegenüber weist T2 stark stochastisches Verhalten auf und ist bei der Automatisierung zu vermeiden.

Die im Rahmen der Analyse gewonnenen Erkenntnisse fließen insbesondere in die Anforderungen und Konzepte der Prozessentwicklung in Kapitel 4 ein. Mit der in das Dosierwerkzeug integrierten Anpressaktorik wird eine hohe *Qualität* erzielt. Mit einer prototypischen, formflexiblen Düse ist auch eine Befüllung gekrümmter Strukturen möglich. Der mit klassischer Methodik entwickelte $PI(T_1)$ -

Regler liefert eine sehr hohe *Robustheit*. Die Parameter sind intuitiv einzustellen und gelten für weite Arbeitsbereiche.

Den größten Beitrag zur Befähigung des KFM-Eintrags als Schlüsseltechnologie in der optimierten und automatisierten Sandwichfertigung liefert der entwickelte FISO-Algorithmus. Dieser ist die Grundlage der automatischen Pfadplanung für beliebige Einfüllflächen und bietet entsprechend eine maximale *Flexibilität*. Die Pfade weisen keine Absetzbewegungen auf und gewährleisten in jedem Fall das Entweichen der Luft über freie, benachbarte Zellen. Die Programmgenerierung ist nahezu trivial: Es muss lediglich eine CAD-Repräsentation der Einfüllflächen sowie ein minimaler Satz an Parametern (beispielsweise Pfadüberlappung) angegeben werden.

Zusätzlich zu den Erfolgen bei der Entwicklung eines optimierten, automatisierten KFM-Eintrags zeigen sich einige offene Forschungsfragen sowie weitere Optimierungsansätze. Mit den Unsicherheiten im Luftstrom lautet die aktuelle Empfehlung, bei der Automatisierung nur T0-Prepreg einzusetzen. Hier wären weitere Versuchsreihen sinnvoll, um die Zusammenhänge zwischen Luftstrom und Prozessgrößen bei höherem Tack besser nachvollziehen zu können. Alternativ müssten Fixierungskonzepte entwickelt werden, welche auch das Legen gekrümmter Strukturen mit T0-Prepreg ermöglichen.

In der Gesamtsystemvalidierung zeigt sich, dass oberflächliche Rückstände mit parametrischer Optimierung zu reduzieren, jedoch nicht gänzlich zu vermeiden sind. Entsprechend könnten in weiteren Arbeiten operative und konstruktive Maßnahmen geprüft werden. Das Abheben innerhalb einer Fläche, anstatt am Rand wie es aktuell beim FISO-Algorithmus der Fall ist, würde bereits das manuelle Entfernen der Rückstände erleichtern. Die Düsenkonstruktion könnte weiterhin um ein umlaufendes Blech erweitert werden, welches Rückstände bereits während der Befüllung entfernt. Dabei muss jedoch ein zusätzlicher, ebenfalls zu automatisierender Reinigungsprozess implementiert werden.

Um die erreichte Flexibilität weiter auszureizen, sind bereits Ansatzpunkte geliefert. Die Optimierung der Pfadplanung kann die Verknüpfung mit den Simulationsalgorithmen beinhalten, um möglichst viele Parameter automatisch zu bestimmen beziehungsweise zu empfehlen. Ein weiterer Nutzen kann mit der Vereinigung von Dosierregelung, Simulation und Pfadplanung generiert werden. Aus der Bestimmung der lokalen Vorschübe ließe sich in Kombination mit der geometrischen Simulation ein Stellwert für eine Vorsteuerung des Fördervolumens berechnen. Dies könnte für eine dynamische Optimierung der Dosierregelung genutzt werden.

Insgesamt sind die Optimierungspotenziale mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten KFM-Eintrag weitestgehend ausgeschöpft. Mögliche Weiterentwicklungen erfordern einen hohen Aufwand für voraussichtlich geringe Fort-

schritte in *Qualität*, *Robustheit* und *Flexibilität*. Die vorgestellte Lösung schließt somit eine große Lücke bei der optimierten, automatisierten Sandwichfertigung. Der Prozess ist so weit ausgearbeitet, implementiert und validiert, dass im nächsten logischen Schritt die Industrialisierung folgen kann.

A. Anhang

A.1. Abschätzung theoretischer erforderlicher Prepreg-Permeabilität

Ein Entweichen der Luft während der Kernbefüllung ausschließlich durch das Prepreg wäre nach dem Stand der Wissenschaft mit dem linearen Gesetz von Darcy beschreibbar. In diesem Abschnitt wird überschlägig abgeschätzt, welche Permeabilität dazu notwendig wäre. Dabei werden folgende, vereinfachende Annahmen getroffen:

- Das Fördervolumen Q_F verteilt sich gleichmäßig über den Düsenquerschnitt.
- Der Luftstrom verläuft aufgrund des geringeren Widerstands innerhalb der Prepreg-Ebene.
- Der Luftstrom verteilt sich gleichmäßig auf die Querschnittsflächen unter allen Stegen einer Wabe.
- Der Strömungsweg innerhalb des Prepregs ist ein Vielfaches (Faktor f) der Stegbreite b_K der Waben.

Um die notwendige Permeabilität zu schätzen, wird im Folgenden von dem *worst case* ausgegangen: dem maximalen Luftstrom Q_L bei minimalem Strömungsquerschnitt A_L . Dieser berechnet sich bei einer HEX-4,8 Wabe zu

$$A_L = n h_{Pr} l_K = 6 \cdot 0,5 \text{ mm} \cdot 2,8 \text{ mm} = 8,3 \text{ mm}^2, \quad (\text{A.1})$$

mit der Anzahl der Wabenstege n , der Prepreg-Schichtdicke h_{Pr} und der Steglänge $l_K = \frac{\sqrt{3}}{2} w^2$. Der Luftstrom wird vereinfachend dem Fördervolumen gleichgesetzt. Dieser erreicht sein Maximum, wenn sich $Q_F = 300 \text{ ml min}^{-1}$ anteilig über eine kleine Düse mit $D_D = 8 \text{ mm}$ auf eine ganze Wabe verteilt:

$$Q_L \approx Q_F \frac{A_Z}{A_D} = Q_F \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left(\frac{w}{d} \right)^2 = 119,1 \text{ ml min}^{-1}. \quad (\text{A.2})$$

Das Gesetz von Darcy kann wie folgt nach der Permeabilität K aufgelöst werden:

$$K = \frac{\mu_L s_L Q_L}{A_L \Delta p}, \quad (\text{A.3})$$

mit der dynamischen Viskosität der Luft μ_L , dem Strömungsweg $s_L \approx f b_K$ und der Druckdifferenz Δp . Unter den Annahmen $\mu_L = 1,82 \times 10^{-5}$ Pa s (Normbedingung), $f = 5$ und $\Delta p = 1$ bar (minimaler Förderdruck minus Umgebungsdruck) folgt eine Permeabilität von etwa $K = 5 \times 10^{-14}$ m².

Literatur

- [1] K. J. Ahn, L. Peterson, J. C. Seferis, D. Nowacki und H. G. Zachmann. „Prepreg aging in relation to tack“. In: *Journal of Applied Polymer Science* 45.3 (Mai 1992), S. 399–406. DOI: 10.1002/app.1992.070450304.
- [2] Airborne. *Automated laminating cell and automated honeycomb potting*. Hrsg. von JEC Group. 2018. URL: <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/automated-laminating-cell-and-automated-honeycomb-potting> (besucht am 19. 09. 2020).
- [3] Airbus S. A. S. Engineering Directorate. *ABS5035 - Aerospace series - Honeycomb cores, hexagonal of polyamide paper, phenolic resinbonded, cured*. Version 7. Blagnac, Frankreich, 2014.
- [4] E. Ayle und R. L. Burchett. „Splicing of curved acoustic honeycomb“. US-Pat. 8905189. Hexcel Corporation. 9. Dez. 2014.
- [5] V. Bertola, F. Bertrand, H. Tabuteau, D. Bonn und P. Coussot. „Wall slip and yielding in pasty materials“. In: *Journal of Rheology* 47.5 (Sep. 2003), S. 1211–1226. DOI: 10.1122/1.1595098.
- [6] T. Bitzer. *Honeycomb Technology*. Springer Netherlands, 1997. DOI: 10.1007/978-94-011-5856-5.
- [7] A. Björnsson. „Automated layup and forming of prepreg laminates“. Diss. 17. Mai 2017. DOI: 10.3384/diss.diva-137488.
- [8] A. Björnsson, J.-E. Lindback und K. Johansen. „Automated Removal of Prepreg Backing Paper - A Sticky Problem“. In: *SAE Technical Paper Series*. SAE International, Sep. 2013. DOI: 10.4271/2013-01-2289.
- [9] S. Black. *Advanced materials for aircraft interiors*. CompositesWorld Magazine. 11. Jan. 2006. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/advanced-materials-for-aircraft-interiors> (besucht am 01. 08. 2020).
- [10] R. O. Buckingham und G. C. Newell. „Automating the manufacture of composite broadgoods“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 27.3 (Jan. 1996), S. 191–200. DOI: 10.1016/1359-835x(96)80001-9.

- [11] D. Budelmann, C. Schmidt und D. Meiners. „Prepreg tack: A review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication“. In: *Polymer Composites* (Mai 2020). DOI: 10.1002/pc.25642.
- [12] M. J. Buntain und S. Bickerton. „Compression flow permeability measurement: a continuous technique“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 34.5 (Mai 2003), S. 445–457. DOI: 10.1016/s1359-835x(03)00090-3.
- [13] F. C. Campbell. *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*. Elsevier, Sep. 2006. DOI: 10.1016/b978-1-85617-495-4.x5000-8.
- [14] T. Centea, L. K. Grunenfelder und S. R. Nutt. „A review of out-of-autoclave prepregs – Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 70 (März 2015), S. 132–154. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.09.029.
- [15] R. P. Chhabra. *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology*. Elsevier, 2008. DOI: 10.1016/b978-0-7506-8532-0.x0001-7.
- [16] Y. Cohen und A. B. Metzner. „Apparent Slip Flow of Polymer Solutions“. In: *Journal of Rheology* 29.1 (Feb. 1985), S. 67–102. DOI: 10.1122/1.549811.
- [17] P. Coussot. *Rheometry of Pastes, Suspensions, and Granular Materials*. John Wiley & Sons, Inc., 2005. DOI: 10.1002/0471720577.
- [18] R. J. Crossley, P. J. Schubel und N. A. Warrior. „The experimental determination of prepreg tack and dynamic stiffness“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 43.3 (März 2012), S. 423–434. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.10.014.
- [19] K. R. Dando, W. M. Cross, M. J. Robinson und D. R. Salem. „Production and characterization of epoxy syntactic foams highly loaded with thermoplastic microballoons“. In: *Journal of Cellular Plastics* 54.3 (März 2017), S. 499–514. DOI: 10.1177/0021955x17700093.
- [20] T. A. Dean, N. T. Gerken, F. L. Knoll und K. W. Withnell. „Honeycomb cores with splice joints and methods of assembling honeycomb cores“. US-Pat. 8985513. The Boeing Company. 24. März 2015.
- [21] DIN 32676:2009-05. *Armaturen für Lebensmittel, Chemie und Pharmazie – Klemmverbindungen für Rohre aus nichtrostendem Stahl – Ausführung zum Stumpfschweißen*. Mai 2009. DOI: 10.31030/1504130.
- [22] DIN EN ISO 8394-1:2011-05. *Hochbau – Fugendichtstoffe – Teil 1: Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Dichtstoffen*. Berlin, Mai 2011. DOI: 10.31030/1708957.

- [23] DIN EN ISO 8394-2:2018-03. *Hochbau – Fugendichtstoffe – Teil 2: Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Dichtstoffen mit genormtem Gerät*. Berlin, März 2018. DOI: 10.31030/2803892.
- [24] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri und H. Li. „A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 73.1-4 (Apr. 2014), S. 173–183. DOI: 10.1007/s00170-014-5808-5.
- [25] O. Dubois, J.-B. L. Cam und A. Béakou. „Experimental Analysis of Prepreg Tack“. In: *Experimental Mechanics* 50.5 (März 2009), S. 599–606. DOI: 10.1007/s11340-009-9236-7.
- [26] G. Eder, M. Held und P. Palfrader. „Implementing straight skeletons with exact arithmetic: Challenges and experiences“. In: *Computational Geometry* 96 (Juni 2021), S. 101760. DOI: 10.1016/j.comgeo.2021.101760.
- [27] K. G. EJOT Holding GmbH & Co. *EJOT TSSD - Secure fastening solutions for honeycomb and foam materials*. URL: https://www.ejot.com/Industrial-Fasteners-Division/Products/EJOT-TSSD%C2%AE/p/VBT_EPPSYS_TSSD (besucht am 19. 09. 2020).
- [28] H. Eschen, M. Harnisch und T. Schüppstuhl. „Flexible and automated production of sandwich panels for aircraft interior“. In: *Procedia Manufacturing* 18 (2018), S. 35–42. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.11.005.
- [29] H. Eschen, F. Kalscheuer und T. Schüppstuhl. „Optimized process chain for flexible and automated aircraft interior production“. In: (2020). DOI: 10.15480/882.3176.
- [30] J. H. Fogarty. „Honeycomb Core and the Myths of Moisture Ingression“. In: *Applied Composite Materials* 17.3 (Dez. 2009), S. 293–307. DOI: 10.1007/s10443-009-9121-7.
- [31] Formlabs, Inc. *Datenblatt Clear Resin FLGPCL04*. 2021. URL: https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/Clear_Resin_Technical.pdf (besucht am 24. 03. 2021).
- [32] F. Förster, F. Ballier, S. Coutandin, A. Defranceski und J. Fleischer. „Manufacturing of Textile Preforms with an Intelligent Draping and Gripping System“. In: *Procedia CIRP* 66 (2017), S. 39–44. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.370.
- [33] A. W. Franklin und T. M. O’Neill. „Method and apparatus for honeycomb core splicing“. US-Pat. 6017413. The Boeing Company. 25. Jan. 2000.

- [34] A. Gavine. *Diehl delivers milestone monument to LHT*. Aircraft Interiors International. 15. Nov. 2018. URL: <https://www.aircraftinteriorsinternational.com/news/galleys-monuments/diehl-delivers-milestone-monument-to-lht.html> (besucht am 01. 08. 2020).
- [35] A. V. Gaydachuk, M. V. Slivinsky und V. A. Golovanevsky. „Technological defects classification system for sandwiched honeycomb composite materials structures“. In: *Materials Forum*. Bd. 30. Citeseer. 2006, S. 96–102.
- [36] W. Gleißle und E. Windhab. „The ‚Twin capillary‘ — a simple device to separate shear- and slip-flow of fluids“. In: *Experiments in Fluids* 3.3 (Mai 1985), S. 177–180. DOI: 10.1007/bf00280457.
- [37] C. Grant. „Automated processes for composite aircraft structure“. In: *Industrial Robot* 33.2 (März 2006). Hrsg. von F. Smith, S. 117–121. DOI: 10.1108/01439910610651428.
- [38] D. Griefahn, J. Wollnack und W. Hintze. „Principal component analysis for fast and automated thermographic inspection of internal structures in sandwich parts“. In: *Journal of Sensors and Sensor Systems* 3.1 (Mai 2014), S. 105–111. DOI: 10.5194/jsss-3-105-2014.
- [39] L. K. Grunenfelder, T. Centea, P. Hubert und S. R. Nutt. „Effect of room-temperature out-time on tow impregnation in an out-of-autoclave prepreg“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 45 (Feb. 2013), S. 119–126. DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.10.001.
- [40] N. Gupta, E. Woldesenbet und S. Sankaran. „Studies on compressive failure features in syntactic foam materia“. In: *Journal of Materials Science* 36.18 (2001), S. 4485–4491. DOI: 10.1023/a:1017986820603.
- [41] N. Gupta, S. E. Zeltmann, V. C. Shunmugasamy und D. Pinisetty. „Applications of Polymer Matrix Syntactic Foams“. In: *JOM* 66.2 (Nov. 2013), S. 245–254. DOI: 10.1007/s11837-013-0796-8.
- [42] Gurit GmbH. *Datenblatt PHG600-68-50*. 2021.
- [43] T. G. Gutowski, T. Morigaki und Z. Cai. „The Consolidation of Laminate Composites“. In: *Journal of Composite Materials* 21.2 (Feb. 1987), S. 172–188. DOI: 10.1177/002199838702100207.
- [44] L. Hamill, T. Centea und S. Nutt. „Surface porosity during vacuum bag-only prepreg processing: Causes and mitigation strategies“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 75 (Aug. 2015), S. 1–10. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.04.009.

- [45] M. Harnisch, J. Kipping und T. Schueppstuhl. „Evaluation of path planning strategies in automated honeycomb potting“. In: *52th International Symposium on Robotics*. VDE, 10. Dez. 2020, S. 1–7. ISBN: 978-3-8007-5428-1.
- [46] M. Harnisch und T. Schüppstuhl. „High quality automated honeycomb potting with active pressure control“. In: *22nd International Conference on Composite Materials* (13. Aug. 2019). Melbourne, Australia, 2019, S. 2815–2824. ISBN: 978-1-92562-722-0.
- [47] S. G. Hatzikiriakos und J. M. Dealy. „Wall slip of molten high density polyethylene. I. Sliding plate rheometer studies“. In: *Journal of Rheology* 35.4 (Mai 1991), S. 497–523. DOI: 10.1122/1.550178.
- [48] S. Heimbs. „Sandwichstrukturen mit Wabenkern: experimentelle und numerische Analyse des Schädigungsverhaltens unter statischer und kurzzeitdynamischer Belastung“. Diss. Kaiserslautern, 2008. ISBN: 978-3-93493-073-5.
- [49] S. Heimbs und M. Pein. „Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts“. In: *Composite Structures* 89.4 (Aug. 2009), S. 575–588. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.11.013.
- [50] B. Heinrich und W. Schneider. *Grundlagen Regelungstechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. DOI: 10.1007/978-3-658-26741-4.
- [51] M. Held. „A geometry-based investigation of the tool path generation for zigzag pocket machining“. In: *The Visual Computer* 7.5-6 (Sep. 1991), S. 296–308. DOI: 10.1007/bf01905694.
- [52] M. Held und S. deLorenzo. „Weighted Skeletal Structures for Computing Variable-Radius Offsets“. In: *CAD 20*. CAD Solutions LLC, Mai 2020. DOI: 10.14733/cadconf.2020.46-50.
- [53] M. Held und S. de Lorenzo. „On the generation of spiral-like paths within planar shapes“. In: *Journal of Computational Design and Engineering* 5.3 (Nov. 2017), S. 348–357. DOI: 10.1016/j.jcde.2017.11.011.
- [54] M. Held, G. Lukács und L. Andor. „Pocket machining based on contour-parallel tool paths generated by means of proximity maps“. In: *Computer-Aided Design* 26.3 (März 1994), S. 189–203. DOI: 10.1016/0010-4485(94)90042-6.
- [55] M. Held und C. Spielberger. „A smooth spiral tool path for high speed machining of 2D pockets“. In: *Computer-Aided Design* 41.7 (Juli 2009), S. 539–550. DOI: 10.1016/j.cad.2009.04.002.

- [56] A. S. Herrmann, P. C. Zahlen und I. Zuardy. „Sandwich Structures Technology in Commercial Aviation“. In: *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*. Hrsg. von O. Thomsen, E. Bozhevolnaya und A. Lyckegaard. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, S. 13–26. DOI: 10.1007/1-4020-3848-8_2.
- [57] Hexcel. *HexPly® Prepreg - Technology*. 2013.
- [58] Hexcel. *HexWeb® Honeycomb - Attributes and Properties. Attributes and Properties*. 2016.
- [59] J. Hinrichsen. „The material down-selection process for A3XX“. In: *19th European Conference on Materials for Aerospace Applications. Keynote Address* (6. Dez. 2000). München, Deutschland, 2000, S. 127–144. DOI: 10.1007/0-306-48385-8_13.
- [60] Y.-P. Hong und H.-X. Li. „Comparative study of fluid dispensing modeling“. In: *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* 26.4 (Okt. 2003), S. 273–280. DOI: 10.1109/tepm.2003.820823.
- [61] isovolta AG. *Datenblatt Airpreg PY 2050*. 2021.
- [62] JELN Imprägnierung GmbH. *Datenblatt Nano-Seal 180W*. 2021. URL: <http://jeln.de/wp-content/uploads/2017/10/TDS-180W-09.2017.pdf> (besucht am 13.05.2021).
- [63] H. Jiang, H. Zhao, X. Li und C. Quan. „Hyper thin 3D edge measurement of honeycomb core structures based on the triangular camera-projector layout & phase-based stereo matching“. In: *Optics Express* 24.5 (März 2016), S. 5502. DOI: 10.1364/oe.24.005502.
- [64] Z. Jiang, X. Feng, X. Feng und Y. Liu. „Contour-parallel tool-path planning of free surface using Voronoi diagram approach“. In: (Aug. 2010). DOI: 10.1109/icacte.2010.5579011.
- [65] L. Jianping und D. Guiling. „Technology development and basic theory study of fluid dispensing - a review“. In: *6th IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (HDP 04)*. IEEE, 2004. DOI: 10.1109/hpd.2004.1346698.
- [66] Y. Jin, Y. He, G. Fu, A. Zhang und J. Du. „A non-retraction path planning approach for extrusion-based additive manufacturing“. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 48 (Dez. 2017), S. 132–144. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.03.008.
- [67] Y. Kang, W. Lee, J. Hwang und Y. Lee. „Influence of Glass Microsphere Filler on the Rheological Behavior of an Epoxy Resin“. In: *International Polymer Processing* 33.2 (Mai 2018), S. 146–152. DOI: 10.3139/217.3338.

- [68] H. S. Kim und P. Plubrai. „Manufacturing and failure mechanisms of syntactic foam under compression“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35.9 (Sep. 2004), S. 1009–1015. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.03.013.
- [69] J. Kindinger. „Lightweight Structural Cores“. In: *ASM Handbook Vol. 21 Composites*. 2001.
- [70] T. Kötter. „Befähigung roboterbasierter Automatisierungslösungen für die Triebwerksinstandsetzung“. Diss. München, 2019. ISBN: 978-3-84394-100-6.
- [71] J. Kratz und P. Hubert. „Anisotropic air permeability in out-of-autoclave prepregs: Effect on honeycomb panel evacuation prior to cure“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 49 (Juni 2013), S. 179–191. DOI: 10.1016/j.compositesa.2013.02.013.
- [72] J. Kratz und P. Hubert. „Vacuum bag only co-bonding prepreg skins to aramid honeycomb core. Part I. Model and material properties for core pressure during processing“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 72 (Mai 2015), S. 228–238. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.11.026.
- [73] J. Kratz und P. Hubert. „Vacuum-bag-only co-bonding prepreg skins to aramid honeycomb core. Part II. In-situ core pressure response using embedded sensors“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 72 (Mai 2015), S. 219–227. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.11.030.
- [74] D. Krause und S. Eilmus. „Methodical Support for the Development of Modular Product Families“. In: *The Future of Design Methodology*. Springer London, 2011, S. 35–45. DOI: 10.1007/978-0-85729-615-3_3.
- [75] D.-J. Kroon. *Hessian based Frangi Vesselness filter*. Version 1.11.0.0. MATLAB Central File Exchange. 2021. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24409> (besucht am 01.05.2021).
- [76] C. Lekakou, M. A. K. B. Johari und M. G. Bader. „Compressibility and flow permeability of two-dimensional woven reinforcements in the processing of composites“. In: *Polymer Composites* 17.5 (Okt. 1996), S. 666–672. DOI: 10.1002/pc.10658.
- [77] H.-X. Li, S. K. Tso und H. Deng. „A Conceptual Approach to Integrate Design and Control for the Epoxy Dispensing Process“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 17.9 (Mai 2001), S. 677–682. DOI: 10.1007/s001700170133.

- [78] H.-X. Li, J. Liu, C. P. Chen und H. Deng. „A Simple Model-Based Approach for Fluid Dispensing Analysis and Control“. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 12.4 (Aug. 2007), S. 491–503. DOI: 10.1109/tmech.2007.901946.
- [79] X. Li, J. Liang, P. Ni, Y. Wang, Y. Song und L. Tong. „Novel path generation algorithm for high-speed pocket milling“. In: *International Journal of Production Research* 52.2 (Aug. 2013), S. 397–404. DOI: 10.1080/00207543.2013.828172.
- [80] S. H. Ling, H. H. C. Iu, F. H. F. Leung und K. Y. Chan. „Improved Hybrid Particle Swarm Optimized Wavelet Neural Network for Modeling the Development of Fluid Dispensing for Electronic Packaging“. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55.9 (Sep. 2008), S. 3447–3460. DOI: 10.1109/tie.2008.922599.
- [81] S. Z. Liu, J. Y. Peng, Y. B. Zhang und X. B. Chen. „Modeling Rotary-Screw-Driven Dispensing Systems for Electronics Packaging“. In: *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 4.8 (Aug. 2014), S. 1359–1365. DOI: 10.1109/tcpmt.2014.2325894.
- [82] D. H.-J. A. Lukaszewicz und K. D. Potter. „The internal structure and conformation of prepreg with respect to reliable automated processing“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 42.3 (März 2011), S. 283–292. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.11.014.
- [83] J. Lunze. *Regelungstechnik 1*. Springer Berlin Heidelberg, 2020. DOI: 10.1007/978-3-662-60746-6.
- [84] C. J. Martin, J. C. Seferis und M. A. Wilhelm. „Frictional resistance of thermoset prepreps and its influence on honeycomb composite processing“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 27.10 (Jan. 1996), S. 943–951. DOI: 10.1016/1359-835x(96)00037-1.
- [85] S. P. Meeker, R. T. Bonnecaze und M. Cloitre. „Slip and Flow in Soft Particle Pastes“. In: *Physical Review Letters* 92.19 (Mai 2004), S. 198302. DOI: 10.1103/physrevlett.92.198302.
- [86] J. Nagy und G. Steinbichler. „Fluid Dynamic and Thermal Modeling of the Injection Molding Process in OpenFOAM®“. In: *OpenFOAM®*. Springer International Publishing, 2019, S. 183–196. DOI: 10.1007/978-3-319-60846-4_14.
- [87] J.-D. Nam, J. C. Seferis, S.-W. Kim und K.-J. Lee. „Gas permeation and viscoelastic deformation of prepreps in composite manufacturing processes“. In: *Polymer Composites* 16.5 (Okt. 1995), S. 370–377. DOI: 10.1002/pc.750160505.

- [88] National Research Council. *Fire- and smoke-resistant interior materials for commercial transport aircraft*. Washington, D.C: National Academies Press, Jan. 1995. DOI: 10.17226/5073.
- [89] S. C. Park, Y. C. Chung und B. K. Choi. „Contour-parallel offset machining without tool-retractions“. In: *Computer-Aided Design* 35.9 (Aug. 2003), S. 841–849. DOI: 10.1016/s0010-4485(02)00111-2.
- [90] H. Pedersen und K. Singh. „Organic labyrinths and mazes“. In: *3rd international symposium on Non-photorealistic animation and rendering (NPAR 06)*. ACM Press, 2006. DOI: 10.1145/1124728.1124742.
- [91] E. F. Pierce, M. D. Marty, F. W. Moore, R. A. Bown und M. E. Bliss. „Splices comprising honeycomb cores supported by tie clips and methods of forming thereof“. US-Pat. 10195836. The Boeing Company. 5. Feb. 2019.
- [92] L. Pilato, Hrsg. *Phenolic Resins: A Century of Progress*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-04714-5.
- [93] B. Plaumann. „Systemanalyse und -synthese für die Auslegung varianter Leichtbaustrukturen unter dynamischen Lasten“. Diss. 2015. DOI: 10.15480/882.1261.
- [94] R. Pomeroy, S. Grove, J. Summerscales, Y. Wang und A. Harper. „Measurement of permeability of continuous filament mat glass-fibre reinforcements by saturated radial airflow“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38.5 (Mai 2007), S. 1439–1443. DOI: 10.1016/j.compositesa.2006.11.011.
- [95] M. Puterman, M. Narkis und S. Kenig. „Syntactic Foams I. Preparation, Structure and Properties“. In: *Journal of Cellular Plastics* 16.4 (Juli 1980), S. 223–229. DOI: 10.1177/0021955x8001600403.
- [96] J. W. Putnam, J. C. Seferis, T. Pelton und M. Wilhelm. „Perceptions of Prepreg Tack for Manufacturability in Relation to Experimental Measures“. In: *Science and Engineering of Composite Materials* 4.3 (Jan. 1995). DOI: 10.1515/secm.1995.4.3.143.
- [97] C. Red. *Composites in Aircraft Interiors 2012-2022*. CompositesWorld Magazine. 9. Apr. 2012. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-in-aircraft-interiors-2012-2022> (besucht am 01.08.2020).
- [98] F. Roth, H. Eschen und T. Schüppstuhl. „The loop gripper: a soft gripper for honeycomb materials“. In: *Procedia Manufacturing* 55 (2021), S. 160–167. DOI: 10.1016/j.promfg.2021.10.023.

- [99] RUAG International Holding AG. *Honeycomb Panels on Demand*. URL: <https://www.ruag.com/en/products-services/space/spacecraft/satellite-structures/honeycomb-panels-demand> (besucht am 19.09.2020).
- [100] H. Schürmann. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer Berlin Heidelberg, 1. Aug. 2007. DOI: 10.1007/978-3-540-72190-1.
- [101] J. Schwenke, T. Hartwich und D. Krause. „Optimierung von Inserts in Sandwichstrukturen durch additive Fertigung“. In: *Konstruktion für die Additive Fertigung 2018*. Springer Berlin Heidelberg, Dez. 2019, S. 243–259. DOI: 10.1007/978-3-662-59058-4_14.
- [102] J. Schwenke und D. Krause. „Optimization of load introduction points in sandwich structures with additively manufactured cores“. In: *Design Science* 6 (2020). DOI: 10.1017/dsj.2020.10.
- [103] R. Seemann. „A Virtual Testing Approach for Honeycomb Sandwich Panel Joints in Aircraft Interior“. Diss. 2020. DOI: 10.1007/978-3-662-60276-8.
- [104] J. E. Shafizadeh, J. C. Seferis, E. F. Chesmar und R. Geyer. „Evaluation of the In-Service Performance Behavior of Honeycomb Composite Sandwich Structures“. In: *Journal of Materials Engineering and Performance* 8.6 (Dez. 1999), S. 661–668. DOI: 10.1361/105994999770346422.
- [105] F. A. Shutov. „Syntactic polymer foams“. In: *Chromatography/Foams/Co-polymers*. Springer Berlin Heidelberg, 1986, S. 63–123. DOI: 10.1007/3-540-15786-7_7.
- [106] Sinterit sp. z o.o. *Datenblatt Flexa Grey*. 2021. URL: https://www.sinterit.com/wp-content/uploads/2020/12/Sinterit-Powders_Specification-Flexa-Grey.pdf (besucht am 13.05.2021).
- [107] Solvay. *Datenblatt BR 623P4 Potting Compound*. 2021. URL: <https://www.solvay.com/en/product/br-623p4>.
- [108] D. Türk, R. Kussmaul, M. Zogg, C. Klahn, A. B. Spierings, H. Könen, P. Ermanni und M. Meboldt. „Additive manufacturing with composites for integrated aircraft structures“. In: *International SAMPE Technical Conference*. Society for the Advancement of Material und Process Engineering, 2016, S. 1404–1418.
- [109] A. V. Ullas, D. Kumar und P. K. Roy. „Epoxy-Glass Microballoon Syntactic Foams: Rheological Optimization of the Processing Window“. In: *Advances in Polymer Technology* 2019 (Apr. 2019), S. 1–12. DOI: 10.1155/2019/9180302.

- [110] ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH. *Automated Insert Potting - Bonding of inserts in the aerospace industry*. URL: <https://www.viscotec.de/en/automated-insert-potting/> (besucht am 19. 09. 2020).
- [111] Z. Wang, Z. Li, W. Zhou und D. Hui. „On the influence of structural defects for honeycomb structure“. In: *Composites Part B: Engineering* 142 (Juni 2018), S. 183–192. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.01.015.
- [112] K. Xu, Y. Li und B. Xiang. „Image processing-based contour parallel tool path optimization for arbitrary pocket shape“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102.5-8 (Nov. 2018), S. 1091–1105. DOI: 10.1007/s00170-018-3016-4.
- [113] K. Xu, Y. Li und M. Yang. „Quasi-Optimal Tool Trajectories for High Speed 2.5D Process Based on Morphological Transformation“. In: *Computer-Aided Design* 129 (Dez. 2020), S. 102920. DOI: 10.1016/j.cad.2020.102920.
- [114] Y. L. Yeow, Y.-K. Leong und A. Khan. „Slow Steady Viscous Flow of Newtonian Fluids in Parallel-Disk Viscometer With Wall Slip“. In: *Journal of Applied Mechanics* 75.4 (Mai 2008). DOI: 10.1115/1.2910901.
- [115] A. Yoshimura und R. K. Prud'homme. „Wall Slip Corrections for Couette and Parallel Disk Viscometers“. In: *Journal of Rheology* 32.1 (Jan. 1988), S. 53–67. DOI: 10.1122/1.549963.
- [116] D. Zenkert. *The handbook of sandwich construction*. Cradley Heath, West Midlands: Engineering Materials Advisory Services, 1997. ISBN: 978-0-94781-796-1.
- [117] H. Zhao, B. Chen, F. Gu, Q.-X. Huang, J. Garcia, Y. Chen, C. Tu, B. Benes, H. Zhang und D. Cohen-Or. „Connected fermat spirals for layered fabrication“. In: *ACM Transactions on Graphics* 35.4 (Juli 2016), S. 1–10. DOI: 10.1145/2897824.2925958.
- [118] H. Zhou. *Computer modeling for injection molding: simulation, optimization, and control*. Hoboken, N.J: Wiley, 2013. DOI: 10.1002/9781118444887.