

Fakultät für Maschinenwesen

# Hochgeschwindigkeitsumflechten für die Fertigung von Faserverbundbauteilen

**Christoph Sebastian Ebel**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr. Julien Provost

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler
2. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Die Dissertation wurde am 03.11.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 11.04.2017 angenommen.

Technische Universität München  
Fakultät für Maschinenwesen  
Lehrstuhl für Carbon Composites  
Boltzmannstraße 15  
D-85748 Garching bei München

Tel.: +49 (0) 89 / 289 – 15092

Fax.: +49 (0) 89 / 289 – 15097

Email: [info@lcc.mw.tum.de](mailto:info@lcc.mw.tum.de)

Web: [www.lcc.mw.tum.de](http://www.lcc.mw.tum.de)





# DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Gruppenleiter und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Carbon Composites der Technischen Universität München.

Zunächst gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler, der mir an seinem Lehrstuhl die Möglichkeit zur Promotion gegeben und die vorliegende Arbeit betreut hat. Seine feste Überzeugung, dass das Potenzial der Flechttechnik für die Faserverbundbauteilherstellung noch nicht ausgeschöpft ist, und sein unermüdlicher, überzeugender Einsatz für das Thema waren Ausgangspunkt für die enge Zusammenarbeit mit der Abteilung für die Entwicklung von CFK-Fertigungsprozessen der BMW AG in Landshut, die durch ihre finanzielle Unterstützung die Durchführung der Arbeit ermöglicht hat. Ich danke Herrn Drechsler für das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart vom Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München für seine Bereitschaft, die Arbeit als Zweitprüfer zu betreuen.

Ganz besonderer Dank gilt Frau Dr. Elisabeth Ladstätter, die mir als Mentorin zwar zu gegebener Zeit „das Messer auf die Brust gesetzt“, als geschätzte Kollegin und stellvertretende Leiterin des Lehrstuhls für Carbon Composites aber auch immer wieder „den Rücken freigehalten“ und so zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen hat. Danke, Elisabeth!

Für die tiefgreifenden Diskussionen rund um die Flechtbauteilherstellung danke ich im Besonderen Herrn Dipl.-Ing. Bernd Veihelmann von BMW, Herrn Dr. Andreas Erber von SGL sowie meinen Kollegen am Lehrstuhl Herrn Dr. Michael Brand, Herrn Dr. Maximilian Mitwalsky und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Andreas Mierzwa. Über zahlreiche Anknüpfungspunkte hat auch ein Teil Eurer Arbeiten und Gedanken Eingang in diese Dissertation gefunden.

Den Firmen Maschinenfabrik Niehoff GmbH & Co. KG und Spirka Schnellflechter GmbH danke ich herzlich für die Möglichkeit, Versuche auf ihren Anlagen durchzuführen. So hat sich der für mich seinerzeit völlig neue Blick in den Bereich der Hochgeschwindigkeitsflechttechnik geöffnet.

Schließlich möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für die gute Zusammenarbeit, die kollegiale Unterstützung und die herzliche Atmosphäre bedanken. Weiterer Dank gilt den Studentinnen und Studenten, die ich während meiner Zeit am Lehrstuhl als wissenschaftlicher Ansprechpartner begleitet habe und die mit ihren Arbeiten und Ideen teilweise wichtige Beiträge für diese Arbeit geliefert haben.

In ganz besonderer Weise möchte ich meinen Eltern danken, die mich stets motiviert und mir den Rücken gestärkt haben, und bei denen ich jederzeit einen ruhigen Rückzugsraum mit „Full Service“ hatte, um die Arbeit zu vollenden.

Abschließend möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Partnerin Sylvie bedanken. Ohne ihre Unterstützung wäre all dies nicht möglich gewesen. Sie hat an mich geglaubt und mir geholfen, den Punkt zu überwinden, an dem man vielleicht auch mal „alles in die Ecke schmeißen“ möchte.

Ich freue mich sehr darauf, mit meiner lieben Tochter Ella, die in der letzten Zeit oft auf ihren Papa verzichten musste, das eine oder andere nachzuholen, was vielleicht währenddessen ein bisschen zu kurz gekommen ist.

Zu guter Letzt gilt mein Dank auch meiner restlichen Familie und allen Freunden, die meinen Weg begleitet haben. Besonders hervorheben möchte ich die Unterstützung meiner langjährigen Freunde Karin und Hans-Jürgen Fenzl, die auf vielfältige und großzügige Weise immer Anteil an meinem Leben genommen haben.

München, im Oktober 2016

Christoph Ebel

# KURZFASSUNG

Der Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) in der Automobilstruktur birgt großes Potenzial zur Gewichtseinsparung. Für die Fertigung von Hohlprofilbauteilen wird dabei unter anderem das Flechtverfahren eingesetzt. Dieser Prozess ist vorteilhaft, weil wenig Verschnitt an Kohlenstofffasern entsteht und die Materialeigenschaften gut an die Bauteilbelastung angepasst werden können. Der Materialdurchsatz ist jedoch zu gering, um Bauteile in der gewünschten Taktzeit herzustellen. Für einen Einsatz im Großserienbereich sind sie daher zu teuer.

Um Ansätze zur Verbesserung der Produktivität des Flechtverfahrens zu finden, werden zunächst die Zusammenhänge verschiedener Prozess-, Material- und Anlagenparameter auf Basis der heute verwendeten Klöppelflechttechnik modelliert. Anhand dieses Berechnungsmodells wird detailliert untersucht, wie sich Änderungen einzelner Parameter (z. B. Geflechtart, Spulengröße oder Maschinengeschwindigkeit) auf die Produktivität des Verfahrens auswirken. Zusätzlich werden die Interaktionen der betrachteten Parameter analysiert. Es zeigt sich, dass verschiedene Maßnahmen die Produktivität des Verfahrens steigern können - die deutlichsten Verbesserungen lassen sich jedoch durch höhere Maschinengeschwindigkeiten der Anlage erreichen.

Da die Arbeitsgeschwindigkeit von Klöppelflechtmaschinen bauartbedingt kaum gesteigert werden kann, wird die Hebelarmflechttechnik als alternatives Fertigungsverfahren für Faserverbundkunststoffe untersucht. Diese Maschinenteknologie wird in der Drahtverarbeitung verbreitet eingesetzt. Bauartbedingt können damit erheblich höhere Flechtgeschwindigkeiten erreicht werden. Über Flechtversuche wird gezeigt, dass auch die Verarbeitung von Verstärkungsfasergarnen auf solchen Maschinen prinzipiell möglich ist. Für die Herstellung von Vorformlingen für die Faserverbundbauteilfertigung sind aktuell verfügbare Maschinen aber nur eingeschränkt geeignet.

Es wird daher das Anforderungsprofil einer Hebelarmflechtmaschine entwickelt, die für die Verarbeitung von Verstärkungsfasergarnen zur Fertigung von CFK-Automobilbauteilen optimiert ist. Lösungsansätze zum Aufbau einzelner Anlagenbestandteile wie der Abzugseinheit oder des Spulenträgers werden vorgestellt und anhand von Versuchsaufbauten überprüft. Über ein virtuelles Modell werden die Dimensionen einer solchen Flechtmaschine abgeschätzt.

In einer zweiten Produktivitätsberechnung wird das theoretische Leistungsvermögen einer Flechtanlage auf Basis der vorgeschlagenen Maschine mit Hilfe dimensionsanalytischer Skalierungsmethoden analysiert und mit der Produktivität einer Anlage auf Basis der Klöppelflechttechnik verglichen. Die Analyse zeigt, dass mit der Hochgeschwindigkeits-Umflechttechnik die Produktivität gegenüber dem heute eingesetzten Stand der Technik potenziell auf das Fünffache gesteigert werden kann.





## ABSTRACT

Using components from carbon fiber reinforced plastic (CFRP) within the car body structure has huge potential for weight savings. Among other processes, braiding technology is most commonly used for manufacturing hollow CFRP profiles. The advantages of this process are a very low waste material rate as well as the possibility to tailor material properties according to relevant load cases. However, material throughput is too low for producing parts within desired cycle times. Thus, braiding is currently too expensive for high volume production.

A detailed analysis of how different material, process and machine parameters interact is carried out for the currently used maypole braiding technology to identify potential for improving the productivity. The implemented calculation model allows for varying the different input parameters (e.g. braid type, spool size and machine speed) and their respective interdependencies to investigate how they affect productivity. Although various measures are found to improve productivity, increasing machine speed is the most effective.

However, the speed of maypole machines is limited inherent to their design. Thus, the lever arm braiding technology that is currently used for wire braiding is investigated as an alternative. Equally inherent to their design, lever arm machines can reach much higher braiding speeds. Braiding trials show that processing reinforcement fiber yarns with such machines is generally possible. However, all lever arm braiders currently available on the market are not well suited for manufacturing preforms for composite profile parts with complex geometries.

Thus, the requirements for a lever arm braider that is optimized for producing car body parts from reinforcement fibers are derived. Possible solutions of how specific components of such a machine e.g. mandrel handling or spool carrier could be realized are proposed and partially validated using respective test setups. A virtual machine model is generated to assess the dimensions of a future series manufacturing cell.

A second evaluation is then carried out to theoretically investigate the productivity of the proposed system by means of dimensional analytic scaling methods and subsequently compare it with a maypole machine's capabilities. As a result, it can be shown that a future braid manufacturing cell based on lever arm braiding technology could increase productivity by a factor of five with respect to current material deposition rates.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>xi</b>
<b>Nomenklatur .....</b>	<b>xv</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>xxvii</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>xxxiii</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Flechten – Material und Anlagentechnik.....</b>	<b>5</b>
2.1 Einordnung der Flechttechnik.....	5
2.2 Geflechte .....	7
2.2.1 Definition.....	7
2.2.2 Garnmaterialien .....	8
2.2.3 Halbzeuggeometrie .....	11
2.2.4 Geflechtparameter und deren Zusammenhänge .....	12
2.2.5 Geflechtarten .....	15
2.2.6 Untersuchte Basisgeflechte.....	18
2.3 Anlagentechnik .....	20
2.3.1 Klöppelflechttechnik .....	22
2.3.2 Rotationsflechttechnik .....	26
2.3.3 Vergleich der beiden Funktionsprinzipien .....	37
2.3.4 Flechtmaschinenhersteller .....	41
2.4 Das Flechten für faserverstärkte Kunststoffe.....	42
2.4.1 Entwicklung von Prozess- und Anlagentechnik.....	42
2.4.2 Einsatzbereiche und Anwendungen.....	46
2.4.3 Aktuelle Entwicklungstrends.....	49
<b>3 Berechnungsmodell für die Produktivität des Klöppelflechtverfahrens .....</b>	<b>57</b>
3.1 Kennzahlen für die Anlagenproduktivität.....	58
3.1.1 Stückkosten.....	58
3.1.2 Maschinenproduktivität .....	59

3.1.3	Gesamtanlageneffektivität und Verfügbarkeit.....	62
3.1.4	Alternative Kennzahlen .....	63
3.2	Aufbau des Gesamtmodells.....	63
3.3	Basismodell zur Produktivitätsberechnung .....	65
3.3.1	Bauteil und Geflecht .....	66
3.3.2	Flechtmaschine .....	72
3.3.3	Maschinenzyklus und Bauteilanzahl.....	74
3.3.4	Prozesskennzahl Maschinenablagereate .....	75
3.4	Teilmodell zum Produktionssystem .....	76
3.4.1	Aufbau des Produktionssystems .....	76
3.4.2	Ermittlung der Bauteilfertigungszeiten.....	93
3.4.3	Bauteilbezogene Prozesskennzahlen .....	95
3.5	Teilmodell zum Rüstzeiteinfluss .....	96
3.5.1	Rüstkonzepte.....	96
3.5.2	Ermittlung der Rüstzeiten .....	98
3.5.3	Zykluszeitbezogene Prozesskennzahlen .....	102
3.6	Teilmodell zu Fertigungsfehlereinflüssen .....	104
3.6.1	Flechtfehler und ihre Ursachen .....	104
3.6.2	Ermittlung der fehlerbedingten Ausfallzeiten.....	106
3.6.3	Fehlerbehaftete Prozesskennzahlen .....	109
3.7	Interaktion zwischen Spulengröße und Maschinengeschwindigkeit .....	110
3.7.1	Herleitung des Zusammenhangs .....	112
3.7.2	Ableich mit Realmaschinen .....	116
<b>4</b>	<b>Ergebnisse der Produktivitätsanalyse.....</b>	<b>121</b>
4.1	Herangehensweise .....	121
4.2	Bewertung auf Maschinenebene .....	122
4.2.1	Maschinenablagereate der Basisgeflechte .....	122
4.2.2	Flechtwinkel.....	123
4.2.3	Garntiter .....	125
4.2.4	Maschinengeschwindigkeit.....	128
4.3	Bewertung auf Bauteilebene .....	130

4.3.1	Produktionssystem.....	130
4.3.2	Bauteilgeometrie.....	132
4.3.3	Prozessnebenzeitzenszenario.....	133
4.4	Bewertung auf Fertigungszyklusebene .....	135
4.4.1	Rüsten .....	135
4.4.2	Zyklusbezogene Produktivitätskennzahlen .....	138
4.4.3	Rüstzeitzenszenario.....	141
4.4.4	Fehlerzeitzenszenario .....	143
4.5	Ergebnisdiskussion .....	144
4.5.1	Potenzialanalyse der Einflussfaktoren.....	144
4.5.2	Ansätze zur Produktivitätssteigerung .....	146
<b>5</b>	<b>Hochgeschwindigkeitsflechtmaschinen: Versuche und Entwicklungsansätze .....</b>	<b>149</b>
5.1	Versuche .....	149
5.1.1	Versuchsmaschinen .....	150
5.1.2	Versuchsplanung .....	153
5.1.3	Umspulen.....	154
5.1.4	Flechten .....	156
5.1.5	Bewertung der Versuchsergebnisse.....	160
5.2	Entwicklungsaufgaben .....	163
5.2.1	Grundsätzliches Maschinenlayout.....	163
5.2.2	Kernhandhabung.....	167
5.2.3	Spulenträger und Garnführungssystem .....	169
5.2.4	Stehfadenzuführung.....	171
5.2.5	Schmierstoffverunreinigungen .....	173
5.2.6	Schutz der Elektrik .....	174
5.2.7	Dauerbetriebsverhalten .....	175
5.3	Entwicklungsstrategie und Prüfstände .....	176
5.3.1	Entwicklungsszenarien .....	176
5.3.2	Bewertung der Szenarien.....	177
5.3.3	Prüfstände .....	179

<b>6</b>	<b>Produktivität des Hochgeschwindigkeitsflechtverfahrens .....</b>	<b>185</b>
6.1	Aufbau des Berechnungsmodells .....	185
6.1.1	Maschinenablagerate.....	185
6.1.2	Produktionssystem, Rüsten, Fertigungsfehler.....	187
6.1.3	Maschinengröße und -geschwindigkeit .....	189
6.2	Ergebnisse der Produktivitätsberechnung .....	199
6.2.1	Ablageraten und optimale Spulengröße.....	199
6.2.2	Einsatz von gespreiztem Geflecht.....	201
6.2.3	Biaxialgeflechte mit variablem Flechtwinkel .....	203
6.2.4	Verwendung von CF-Herstellerspulen .....	204
6.2.5	Fazit.....	206
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>209</b>
7.1	Zusammenfassung .....	209
7.2	Ausblick .....	212
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>213</b>
<b>A</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>225</b>
a	Grundlegendes zu Faserverbundkunststoffen .....	225
b	Flechtmaschinenhersteller und -anwender .....	230
c	Eigenschaften von Fasern und Garnen .....	236
d	Eingangswerte für die Produktivitätsanalyse .....	237
e	Ergebnisdiagramme Klöppelflechtverfahren .....	241
f	Daten zu den Versuchen.....	249
g	Gestaltung und Herstellung von Prüfkörpern.....	252
h	Bewertung Entwicklungsszenarien .....	258
i	Ergebnisdiagramme Schnellflechtverfahren .....	262
<b>B</b>	<b>Veröffentlichungen.....</b>	<b>265</b>
<b>C</b>	<b>Betreute studentische Arbeiten .....</b>	<b>269</b>
<b>D</b>	<b>Lebenslauf .....</b>	<b>271</b>

# Nomenklatur

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$b_{CF}$	$m$	Breite einer CF-Herstellerspule
$b_F$	$m$	Fadenabstand, Fadenablagebreite
$b_{Ff}$	$m$	Flechtfadenabstand, Flechtfadenablagebreite
$b_S$	$m$	Breite der Flechtfadenspule (Hebelflechtmaschine)
$b_{S4}$	$m$	Breite der Hebelarmflechtfadenspule vom Typ S4
$b_{Sf}$	$m$	Stehfadenabstand, Stehfadenablagebreite
$c$	—	Dimensionslose Konstante
$d_L$	$m$	Lagendicke
$d_{L,Bb}$	$m$	Lagendicke in einem Bauteilbereich
$D_B$	$m$	Bauteildurchmesser
$D_{Bb}$	$m$	Bauteildurchmesser in einem Bauteilbereich
$D_F$	$m$	Flügelraddurchmesser
$D_K$	$m$	Klöppeldurchmesser
$D_{KF}$	$m$	Klöppelfußdurchmesser
$f$	$s^{-1}$	Frequenz bzw. Drehzahl (Dimension)
$f_F$	$s^{-1}$	Flügelraddrehzahl
$f_{F,hyp}$	$s^{-1}$	Hypothetische Flügelraddrehzahl
$f_S$	$s^{-1}$	Spulenumauffrequenz bzw. Flechtmaschinendrehzahl
$F_{Z,Kvoll}$	$N$	Auf den vollen Klöppel wirkende Zentrifugalkraft
$i, j$	—	Zählvariablen in Summen und Produkten
$h_K$	$m$	Höhe des Klöppels

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$h_{K,voll}$	$m$	Gesamthöhe aus Klöppel und Flechtspule
$h_S$	$m$	Höhe der Flechtfadenspule (Klöppeflechtmaschine)
$h_{SP,K}$	$m$	Abstand des Schwerpunkt des Klöppels zur Flügelradunterkante
$h_{SP,Kvoll}$	$m$	Abstand vom Schwerpunkt des besetzten Klöppels zur Flügelradunterkante
$h_{SP,S}$	$m$	Abstand vom Schwerpunkt der Spule zur Flügelradunterkante
$k$	—	Faktor 1000 (z. B. Filamentanzahl im Garn)
$k_{FVG}$	—	Faservolumengehalt
$k_{FVG,Bb}$	—	Faservolumengehalt in einem Bauteilbereich
$k_{L,Bb1}$	—	Anteil von Bauteilbereich 1 an der Gesamtlänge
$k_{PP}$	—	Packungsdichte der Preform
$k_{PR}$	—	Packungsdichte auf der Rohmaterialspule
$k_{PS}$	—	Packungsdichte auf der Flechtspule
$k_R$	—	Rüstzeitfaktor
$k_x$	€	Stückkosten
$K$	€	Gesamtkosten
$K_f$	€	Fixkosten
$K_v$	€	Variable Kosten
$l_B$	$m$	Bauteillänge
$l_{Bb}$	$m$	Länge eines Bauteilbereichs
$l_G$	$m$	Gleitbahnlänge
$l_S$	$m$	Fadenlauflänge auf einer Spule



<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$l_{S, Ff}$	$m$	Fadenlauflänge auf einer Flechtfadenspule
$l_{S, Ff, L}$	$m$	Fadenverbrauch einer Flechtfadenspule je Lage
$l_{S, Sf}$	$m$	Fadenlauflänge auf einer Stehfadenspule
$L$	$m$	Länge (Dimension)
$m$	$kg$	Masse (Dimension)
$m_A$	$kg\ m^{-2}$	Flächengewicht einer Lage
$m_{A, Bb}$	$kg\ m^{-2}$	Flächengewicht einer Lage in einem Bauteilbereich
$m_{A, Ff}$	$kg\ m^{-2}$	Flechtfadenflächengewicht einer Lage
$m_{A, Ff, Bb}$	$kg\ m^{-2}$	Flechtfadenflächengewicht einer Lage in einem Bauteilbereich
$m_{A, Sf}$	$kg\ m^{-2}$	Stehfadenflächengewicht einer Lage
$m_{A, Sf, Bb}$	$kg\ m^{-2}$	Stehfadenflächengewicht einer Lage in einem Bauteilbereich
$m_K$	$kg$	Masse des Klöppels
$m_{Kvoll}$	$kg$	Masse des Klöppels inklusiver voller Flechtspule
$m_L$	$kg$	Garnmasse einer Lage
$m_{L, Bb}$	$kg$	Garnmasse einer Lage in einem Bauteilbereich
$m_P$	$kg$	Preformmasse
$m_S$	$kg$	Masse der vollen Spule
$\dot{m}$	$kg\ s^{-1}$	Ablagerate (Garn bzw. Geflechtmasse)
$\dot{m}_B$	$kg\ s^{-1}$	Bauteilbezogene Ablagerate
$\dot{m}_{B, err}$	$kg\ s^{-1}$	Fehlerbehaftete, bauteilbezogene Ablagerate

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$\dot{m}_{Ff}$	$kg\ s^{-1}$	Flechtfadenablagerate
$\dot{m}_{Ff,Bb}$	$kg\ s^{-1}$	Flechtfadenablagerate in einem Bauteilbereich
$\dot{m}_M$	$kg\ s^{-1}$	Maschinenablagerate
$\dot{m}_{Sf}$	$kg\ s^{-1}$	Stehfadenablagerate
$\dot{m}_{Sf,Bb}$	$kg\ s^{-1}$	Stehfadenablagerate in einem Bauteilbereich
$\dot{m}_{Zyk}$	$kg\ s^{-1}$	Zyklusbezogene Ablagerate
$\dot{m}_{Zyk,err}$	$kg\ s^{-1}$	Fehlerbehaftete, zyklusbezogene Ablagerate
$\dot{m}_{Zyk,o}$	$kg\ s^{-1}$	Optimale, zyklusbezogene Ablagerate
$M_{KF}$	$N\ m$	Biegemoment im Klöppelfuß
$n$	—	Anzahl (dimensionslos)
$n_{B,Zyk}$	—	Bauteilzahl je Zyklus
$n_{B,Zyk,theo}$	—	Theoretische Bauteilzahl je Zyklus
$n_{err,DFV}$	—	Fehleranzahl in einem Dauerflechtversuch
$n_{err,Zyk}$	—	Fehleranzahl je Zyklus
$n_F$	—	Flügelradanzahl, entspricht der Stehfadenanzahl
$n_K$	—	Klöppelanzahl
$n_L$	—	Lagenanzahl der Flechtpreform
$n_{L,theo}$	—	Theoretische Lagenanzahl der Flechtpreform
$n_S$	—	Anzahl der besetzten Flechtspulen
$n_{Zyk,Sf}$	—	Anzahl Maschinenzyklen mit einer Stehfadenfüllung
$t$	$s$	Ablagedauer

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$t_B$	s	Gesamtfertigungsdauer für ein Bauteil
$t_{L,Bb}$	s	Ablagedauer einer Lage in einem Bauteilbereich
$t_{F,B}$	s	Flechtzeitdauer für die Fertigung eines Bauteils
$t_{L,B}$	s	Ablagedauer einer Lage des Bauteils
$t_{MTTR}$	s	Mittlere Fehlerbehebungsdauer
$t_{MTTR,DFV}$	s	Mittlere Fehlerbehebungsdauer im Dauerflechtversuch
$t_{N,Ab}$	s	Zeit für das Abschneiden einer Lage
$t_{N,B}$	s	Nebenzeitdauer für die Fertigung eines Bauteils
$t_{N,fix}$	s	Zeit für das Anbringen einer Lagenfixierung
$t_{N,i}$	s	Lagenzahlunabhängige Nebenzeiten
$t_{N,in}$	s	Zeit für das Zuführen eines Kerns
$t_{N,j}$	s	Lagenzahlabhängige Nebenzeiten
$t_{N,out}$	s	Zeit für das Abführen eines Kerns
$t_{N,W}$	s	Zeit für einen Wendevorgang beim Pendelbetrieb
$t_{R,Ab}$	s	Zeit für das Abschneiden eines Fadens
$t_{R,An}$	s	Zeit für das Anflechten
$t_{R,Ein}$	s	Zeit für das Einfädeln eines Fadens
$t_{R,i}$	s	Spulenzahlunabhängige Rüstzeitschritte
$t_{R,j}$	s	Spulenzahlabhängige Rüstzeitschritte
$t_{R,Kn}$	s	Zeit für das Anknoten eines Fadens
$t_{R,Sf}$	s	Rüstzeit der Stehfäden

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$t_{R,S,Ff}$	$s$	Zeit für den Wechsel einer Flechtfadenspule
$t_{R,S,Sf}$	$s$	Zeit für den Wechsel einer Stehfadenspule
$t_{R,Sw}$	$s$	Zeit für den Schnellwechsel eines Klöppeloberteils
$t_{R,V}$	$s$	Zeit für die Vorbereitung des Rüstvorgangs
$t_{R,WK}$	$s$	Zeit für das Ein- bzw. Ausfahren eines Klöppels
$t_{R,WM}$	$s$	Zeit für den Wechsel des Maschinenrumpfs
$t_{R,Zus}$	$s$	Zeit für das Zusammenziehen der Flechtfäden
$T$	$s$	Zeit (Dimension)
$T_B$	$s$	Bauteilfertigungszeit, Uptime in einem Zyklus
$T_{B,err}$	$s$	Fehlerbehaftete Bauteilfertigungszeit in einem Zyklus
$T_{B,err,DFV}$	$s$	Fehlerbehaftete Bauteilfertigungszeit in einem Dauerflechtversuch
$T_{down}$	$s$	Stillstandzeit (Downtime) in einem Zyklus
$T_{err}$	$s$	Fehlerzeit bzw. Reparaturzeit in einem Zyklus
$T_{err,DFV}$	$s$	Fehlerzeit eines Dauerflechtversuchs
$T_F$	$s$	Flechtzeit in einem Zyklus
$T_{F,DFV}$	$s$	Flechtzeit eines Dauerflechtversuchs
$T_{FR}$	$s$	Flügelradumlaufdauer
$T_N$	$s$	Nebenzeit in einem Zyklus
$T_R$	$s$	Rüstzeit in einem Zyklus
$T_{R,Ff}$	$s$	Rüstzeit der Flechtfäden
$T_{R,Sf,Zyk}$	$s$	Zyklusbezogener Anteil der Rüstzeit der Stehfäden

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$T_S$	$s$	Spulenumlaufdauer
$Tt$	$tex$	Titer
$Tt_{Ff}$	$tex$	Titer der Flechtfäden
$Tt_{Sf}$	$tex$	Titer der Stehfäden
$T_{Zyk}$	$s$	Zykluszeit (Zeit zwischen zwei Rüstvorgängen)
$T_{Zyk,err}$	$s$	Fehlerhaftete Zykluszeit
$U_B$	$m$	Bauteilumfang
$U_{Bb}$	$m$	Bauteilumfang in einem Bauteilbereich
$v$	$m s^{-1}$	Kernvorschubgeschwindigkeit
$v_{Bb}$	$m s^{-1}$	Kernvorschubgeschwindigkeit in einem Bauteilbereich
$v_{G,rel}$	$m s^{-1}$	Relative Gleitbahngeschwindigkeit
$V$	$m^3$	Volumen (Dimension)
$V_{CF}$	$m^3$	Volumen einer CF-Herstellerspule
$V_S$	$m^3$	Volumen einer Spule
$V_{S4}$	$m^3$	Volumen der Hebelarmflechtfadenspule von Typ S4
$V_{S,Ff}$	$m^3$	Flechtspulenvolumen
$V_{S,Ff,o}$	$m^3$	Optimales Flechtspulenvolumen für die höchste zyklusbezogene Ablagerate
$V_{S,Sf}$	$m^3$	Stehfadenspulenvolumen
$w_{soll}$	$m$	Wandstärke
$x$	–	Ausbringungsmenge (Stückzahl)
$\lambda_{err,P}$	$s^{-1}$	Fehlerrate des Produktionssystems

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$\lambda_{err,P,DFV}$	$s^{-1}$	Fehlerrate des Produktionssystems im Dauerflechtversuch
$\lambda_{err,S}$	$s^{-1}$	Fehlerrate einer Flechtspule
$\lambda_{err,S,DFV}$	$s^{-1}$	Fehlerrate einer Flechtspule im Dauerflechtversuch
$\Lambda$	—	Verfügbarkeit
$\Lambda_B$	—	Bauteilbezogene Verfügbarkeit
$\Lambda_{B,err}$	—	Fehlerbehaftete, bauteilbezogene Verfügbarkeit
$\Lambda_{Zyk}$	—	Zyklusbezogene Verfügbarkeit
$\Lambda_{Zyk,err}$	—	Fehlerbehaftete, zyklusbezogene Verfügbarkeit
$\rho$	$kg\ m^{-3}$	Dichte (Dimension)
$\rho_{CF}$	$kg\ m^{-3}$	Dichte von Kohlenstofffasern
$\rho_{GF}$	$kg\ m^{-3}$	Dichte von Glasfasern
$\rho_K$	$kg\ m^{-3}$	Dichte des Klöppelmaterials
$\rho_S$	$kg\ m^{-3}$	Dichte des Spulenmaterials
$\sigma_{KF}$	$N\ m^{-2}$	Biegespannung im Klöppelfuß
$\varphi$	°	Flechtwinkel
$\varphi_{Bb}$	°	Flechtwinkel in einem Bauteilbereich

# Abkürzungsverzeichnis

---

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
AF	Aramidfasergarn
AFP	Automated Fiber Placement
b/c	best case (Szenario)
BMW	Bayrische Motoren Werke Aktiengesellschaft
CAD	Computer Aided Design
CF	Kohlenstofffasergarn
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DFM	Deflektorflechtmaschine
DFV	Dauerflechtversuch
EADS	European Aeronautics Defence and Space Company
ELFM	Einzellagenflechtmaschine
EU	Europäische Union
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FM	Flechtmaschine
FVG	Faservolumengehalt
FVK	Faserverbundkunststoff
GAE	Gesamtanlageneffektivität
GF	Glasfasergarn

---

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
HFM	Hebelarmflechtmaschine
HGFM	Hochgeschwindigkeitsumflechtmaschine
HM	High modulus
HT	High tenacity
ILSS	Interlaminar shear strength
IM	Intermediate modulus
KFM	Klöppelflechtmaschine
LCC	Lehrstuhl für Carbon Composites
LCM	Liquid Composite Molding
MA	Mitarbeiter
MLFM	Mehrlagenflechtmaschine
MTBF	Mean Time between Failures
MTM	Methods-Time Measurement
MTTR	Mean Time to Recover / Mean Time to Repair
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OEE	Overall Equipment Effectiveness
P	Prozessparallel (Beschnitt)
PB	Pendelbetrieb (bei einer Flechtanlage)
QI	Quasiisotrop (Faseranordnung)
QS	Qualitätssicherung
RFM	Rotationsflechtmaschine
RH	Rüsten (einer Flechtspule) von Hand
RTM	Resin Transfer Molding



<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
S	Sequenziell (Beschnitt)
SH	Schnellwechseln (eines Klöppels) von Hand
SMED	Single Minute Exchange of Die
TPM	Total Productive Maintenance
TUM	Technische Universität München
UB	Umlaufbetrieb (bei einer Flechtanlage)
UD	Unidirektional (Faseranordnung)
UFM	Umlaufradflechtmaschine
UHM	Ultra high modulus
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
VEB	Volkseigener Betrieb
VKFM	Verkettete Flechtmaschinen
w/c	worst case (Szenario)
WK	Wechsel des Klöppelsatzes
WM	Wechsel des Maschinenrumpfs



# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Entwicklung der Leermasse ausgewählter Fahrzeugmodelle .....	1
Abb. 1-2: Produktivitätssteigerung durch alternative Anlagentechnik .....	3
Abb. 2-1: Übersicht von FVK-Fertigungsrouten .....	5
Abb. 2-2: Eigenschaften von Rovings.....	8
Abb. 2-3: Vergleich von Litzen und Schlauchgeflecht .....	11
Abb. 2-4: Definition von Ablagebreite und Flechtwinkel.....	12
Abb. 2-5: Geflechtgeometrieänderung durch a) Stauchen und b) Strecken.....	13
Abb. 2-6: Zusammenhang zwischen Flechtwinkel und Abzugsgeschwindigkeit.....	15
Abb. 2-7: Einbindung der Stehfäden im Triaxialgeflecht .....	17
Abb. 2-8: Übersicht der in der Arbeit verwendeten Basisgeflechtarten.....	18
Abb. 2-9: Massenanteil der Stehfäden für die untersuchten Basisgeflechte .....	19
Abb. 2-10: Funktionseinheiten einer Flechtmaschine .....	21
Abb. 2-11: Funktionsprinzip der Klöppelflechttechnik .....	23
Abb. 2-12: Gestaltung der Flügelräder bei Axial- und Radialmaschinen .....	24
Abb. 2-13: Funktionsprinzip der Hochgeschwindigkeitsflechttechnik .....	27
Abb. 2-14: Schematische Darstellung der Garnverlegung .....	28
Abb. 2-15: Funktionsprinzip der Umlaufradflechtmaschine aus [34].....	30
Abb. 2-16: Prinzip der Garnverlegung bei Wardwell-Maschinen aus [28].....	31
Abb. 2-17: Aufbau einer Hebelarmflechtmaschine im Schnitt .....	33
Abb. 2-18: Hebelarmflechtmaschine "System Horn" .....	34
Abb. 2-19: Entwicklungsschritte der Pleueflechtmaschine.....	36
Abb. 2-20: Geflechtähnliche Textilstrukturen mit Längsfäden.....	40
Abb. 2-21: Flechtzelle für die Herstellung von Faserverbundbauteilen .....	45
Abb. 2-22: Markt für Radialflechtmaschinen zur FVK-Fertigung [66].....	46
Abb. 2-23: Geflochtene FVK-Bauteile in verschiedenen Automobilbaureihen .....	48
Abb. 2-24: Fertigungszelle für Geflechtpreforms am LCC .....	51
Abb. 3-1: Produktivitätsbewertung auf verschiedenen Detaillierungsebenen .....	59
Abb. 3-2: Definition der Zeitanteile innerhalb eines Fertigungszyklus .....	61
Abb. 3-3: Aufbau des Gesamtmodells zur Produktivitätsberechnung .....	64

Abb. 3-4: Ein- und Ausgabewerte des Basisberechnungsmodells .....	66
Abb. 3-5: Mögliche Varianten der Testbauteildefinition .....	67
Abb. 3-6: Flügelraddrehzahl und Klöppelgeschwindigkeit.....	73
Abb. 3-7: Relativbewegung zwischen Flecht kern und Maschine .....	77
Abb. 3-8: Einzel- und Mehrlagenflechtmaschine in Radialbauweise .....	79
Abb. 3-9: Verschiedene Flechtmaschinenkonfigurationen im Halbschnitt.....	80
Abb. 3-10: Einsatzszenarien verketteter Flechtmaschinen .....	81
Abb. 3-11: Einseitiges Führen des Flecht kerns .....	84
Abb. 3-12: Beidseitiges Führen des Flecht kerns .....	85
Abb. 3-13: Führen des Kerns mit mehreren Robotern .....	85
Abb. 3-14: Wendevorgang beim Beflechten eines Kerns im Pendelbetrieb .....	86
Abb. 3-15: Aufbau der untersuchten Grundvarianten von Flechtanlagen.....	90
Abb. 3-16: Ein- und Ausgabewerte des Produktionssystem-Teilmodells.....	95
Abb. 3-17: Vergleich der Rüstmethoden Spulenwechsel und Klöppelwechsel .....	97
Abb. 3-18: Flecht fadenrüstzeiten für verschiedene Rüstkonzepte .....	102
Abb. 3-19: Ein- und Ausgabewerte des Teilmodells zum Rüstvorgang .....	103
Abb. 3-20: Faserringbildung und resultierende Ablagelücke.....	104
Abb. 3-21: Ein- und Ausgabewerte des Teilmodells zum Fehlereinfluss .....	109
Abb. 3-22: Verfügbarkeit und Ablagerate über Flügelraddrehzahl.....	111
Abb. 3-23: Maße von Klöppel und Flügelrad.....	113
Abb. 3-24: Flügelraddrehzahl und Spulengröße nach Herstellern .....	116
Abb. 3-25: Flügelraddrehzahl und Spulengröße nach Einsatzbereichen.....	117
Abb. 4-1: Maschinenablagerate bei konstantem Kerndurchmesser .....	123
Abb. 4-2: Maschinenablagerate bei konstanter Flecht fadenbreite .....	124
Abb. 4-3: Ablageraten für Standardgeflechte mit unterschiedlichem Titer .....	126
Abb. 4-4: Ablagerate und Lagenzahl für verschiedene Garntiter.....	127
Abb. 4-5: Linearer Zusammenhang von Ablagerate und Flügelraddrehzahl .....	128
Abb. 4-6: Sinkende Ablagerate bei steigendem Spulenvolumen .....	129
Abb. 4-7: Bauteilbezogene Verfügbarkeit der Produktionssysteme.....	130
Abb. 4-8: Einfluss von Fehlern auf die bauteilbezogene Verfügbarkeit .....	131

Abb. 4-9: Abhängigkeit der bauteilbezogenen Ablagerate von Bauteillänge und -wandstärke beim Standardgeflecht .....	132
Abb. 4-10: Abhängigkeit der bauteilbezogenen Ablagerate von den Prozessnebenzeiten für das Standardgeflecht .....	133
Abb. 4-11: Rüstzeitfaktor und Rüstzeit in Abhängigkeit der Spulenzahl .....	136
Abb. 4-12: Zusammenhang zwischen Spulengröße und Rüstaufwand .....	137
Abb. 4-13: Zyklusbezogene Verfügbarkeiten beim Standardgeflecht .....	138
Abb. 4-14: Zykluszeitbezogene Ablageraten für das Standardgeflecht .....	139
Abb. 4-15: Zyklusbezogene Ablageraten der Basisgeflechte für ELFM-UB-P.....	141
Abb. 4-16: Einfluss der Rüstzeitszenarien beim Standardgeflecht (ELFM-UB-P) ...	142
Abb. 4-17: Fehlerrate und fehlerbehaftete Verfügbarkeit .....	143
Abb. 4-18: Spulengröße und Flügelradrehzahl für schnellere Flechtmaschinen .....	147
Abb. 4-19: Leistungsdaten von Hochgeschwindigkeitsflechtmaschinen.....	148
Abb. 5-1: Versuchsmaschine bei der Niehoff GmbH & Co. KG.....	150
Abb. 5-2: Detailabbildungen der Niehoff-Versuchsmaschine .....	151
Abb. 5-3: Versuchsmaschine bei der Spirka Schnellflechter GmbH .....	152
Abb. 5-4: Detailabbildungen der Spirka-Versuchsmaschine .....	152
Abb. 5-5: Versuchsmaterialspulen .....	154
Abb. 5-6: Garnbremse und Messung der Garnspannung .....	155
Abb. 5-7: Umspulkräftmessungen für die GF-Garne für V1-N.....	155
Abb. 5-8: Versuchsgeflechte aus V1-N beim Austritt aus der Flechtscholle.....	159
Abb. 5-9: Qualität der Versuchsgeflechte .....	160
Abb. 5-10: Schmierölkontamination .....	161
Abb. 5-11: Umlenkrollen an der Hebelspitze der Niehoff-Maschine .....	161
Abb. 5-12: Schädigung der GF-1200-Garne in V2-S.....	162
Abb. 5-13: Bauraum für die Flechtmaschine in Abhängigkeit der Kernkontur.....	164
Abb. 5-14: Beispiele für vertikal ausgerichtete Schnellflechtmaschinen.....	166
Abb. 5-15: Umlenkpunkte des Garns am Spulenträger.....	170
Abb. 5-16: Vorschlag für die Längsfadenzuführung bei einer HFM.....	172
Abb. 5-17: Portfolio-Analyse der Entwicklungsszenarien.....	178
Abb. 5-18: Übersicht des Spulenträgerprüfstands.....	179

Abb. 5-19: Details des Spulenträgerprüfstands .....	180
Abb. 5-20: Prüfstand zur Kernhandhabung .....	181
Abb. 5-21: Abbildungen des Rollenabzugsprüfstands .....	181
Abb. 5-22: Verschieden große Flechtgarnspulen .....	182
Abb. 5-23: Vergleich von HFM mit je 64 unterschiedlich großen Spulen.....	183
Abb. 6-1: Änderungen am Basisberechnungsmodell .....	186
Abb. 6-2: Handhabungssysteme bei HFM.....	187
Abb. 6-3: Skalieren von Hebelarmflechtmaschinen .....	190
Abb. 6-4: Skalieren von Flechtspulen bei HFM.....	191
Abb. 6-5: Drehzahlen verschiedener Hochgeschwindigkeitsflechtmaschinen.....	193
Abb. 6-6: Zusammenhang von Gleitbahnlänge und Spulenumlauf Frequenz.....	194
Abb. 6-7: Vergleich der spulenzahlspezifischen Spulenumlauf Frequenzen .....	195
Abb. 6-8: Ablageraten beim Hochgeschwindigkeitsflechten „b/c“ .....	199
Abb. 6-9: Vergleich der zyklusbezogenen Ablageraten von KFM und HFM.....	200
Abb. 6-10: Reguläre und gespreizte Geflechtanlage im „b/c“ .....	201
Abb. 6-11: Optimale Spulengröße für verschiedene Flechtwinkel .....	203
Abb. 6-12: Produktivitätseinbuße durch Einsatz von CF-Herstellerspulen.....	204
Abb. 6-13: Produktivität von HFM bei partiell befüllten CF-Herstellerspulen.....	205
Abb. 6-14: Untersuchte HFM im Vergleich mit Realmaschinen .....	207
Abb. 7-1: Ablageratensteigerung durch Einsatz von Hebelarmflechtmaschinen .....	211
Abb. A-1: Steifigkeiten verschiedener FVK (aus [144]).....	228
Abb. A-2: Übersichtsdiagramm der Versuchszeiten für die Dauerflechtversuche ...	240
Abb. A-3: Bauteilbezogene Ablagerate der verschiedenen Produktionssysteme.....	241
Abb. A-4: Bauteilgeometrie und Ablagerate beim QI-Geflecht.....	241
Abb. A-5: Bauteilgeometrie und Ablagerate beim Hybridgeflecht.....	242
Abb. A-6: Bauteilgeometrie und Ablagerate beim Heavy-Tow-Geflecht.....	242
Abb. A-7: Abhängigkeit der bauteilbezogenen Ablagerate von den Prozessnebenzeiten für das QI-Geflecht .....	243
Abb. A-8: Abhängigkeit der bauteilbezogenen Ablagerate von den Prozessnebenzeiten für das Hybridgeflecht .....	243

Abb. A-9: Abhängigkeit der bauteilbezogenen Ablagerate von den Prozessnebenzeiten für das Heavy-Tow-Geflecht .....	244
Abb. A-10: Zyklusbezogene Verfügbarkeiten beim QI-Geflecht .....	244
Abb. A-11: Zyklusbezogene Verfügbarkeiten beim Hybridgeflecht .....	245
Abb. A-12: Zyklusbezogene Verfügbarkeiten beim Heavy-Tow-Geflecht .....	245
Abb. A-13: Zyklusbezogene Ablageraten beim QI-Geflecht.....	246
Abb. A-14: Zyklusbezogene Ablageraten beim Hybridgeflecht.....	246
Abb. A-15: Zyklusbezogene Ablageraten beim Heavy-Tow-Geflecht.....	247
Abb. A-16: Ablagerate und Rüstzeitszenarien beim Standardgeflecht (ELFM-PB) ..	247
Abb. A-17: Fehlermodellparameter Standardgeflecht (ELFM-UB-P) .....	248
Abb. A-18: Fehlermodellparameter Standardgeflecht (VKFM) .....	248
Abb. A-19: Umspulkräftmesswerte für das GF-136-Garn.....	249
Abb. A-20: Umspulkräftmesswerte für das GF-300-Garn.....	249
Abb. A-21: Umspulkräftmesswerte für das GF-600-Garn.....	250
Abb. A-22: Umspulkräftmesswerte für das GF-1200-Garn.....	250
Abb. A-23: Umspulkräftmesswerte für das GF-2400-Garn.....	251
Abb. A-24: Schematische Darstellung der Herstellung von Geflechtprobeplatten.....	252
Abb. A-25: Entnahme von Zugprüfkörpern bei verschieden breiten Probeplatten.....	253
Abb. A-26: Ablageraten beim Hochgeschwindigkeitsflechten im „w/c“ .....	262
Abb. A-27: Ablageraten des Heavy-Tow-Geflechts beim Klöppelflechtverfahren....	262
Abb. A-28: Reguläre und gespreizte Geflechtablage im „w/c“ .....	263
Abb. A-29: Reguläre und gespreizte Geflechtablage bei KFM .....	263





# Tabellenverzeichnis

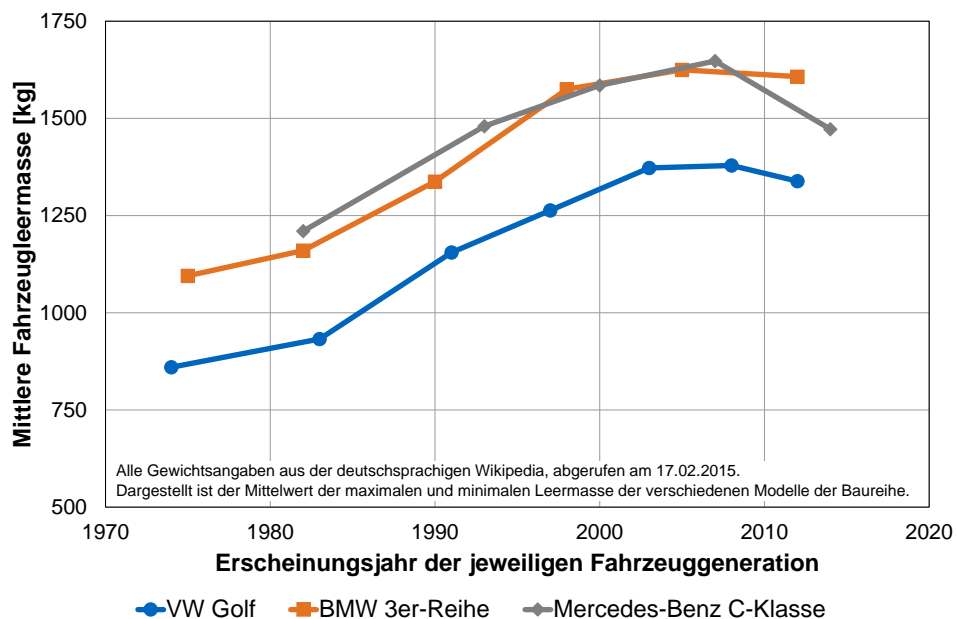
Tab. 3-1:	Eingabeparameter für das Standardbauteil .....	70
Tab. 3-2:	Eckdaten des Standardbauteils für die Basisgeflechte.....	71
Tab. 3-3:	Eingabeparameter für die Referenzmaschine .....	74
Tab. 3-4:	Zentrale Kenngrößen der verschiedenen Produktionssystemvarianten ....	92
Tab. 3-5:	Ergebnisübersicht für Dauerflechtversuche .....	108
Tab. 3-6:	Eingangswerte des Teilmodells zu den Fertigungsfehlereinflüssen .....	109
Tab. 4-1:	Farbkennzeichnung der Basisgeflechtarten .....	121
Tab. 4-2:	Maschinenablagerraten für die Basisgeflechte.....	123
Tab. 4-3:	Ablagebreite und Kerndurchmesser bei verschiedenen Flechtwinkeln ...	125
Tab. 4-4:	Maximale zyklusbezogene Ablageraten und optimale Spulengrößen .....	140
Tab. 4-5:	Standardgeflecht-Kenngrößen je Rüstzeitszenario (ELFM-UB-P) .....	142
Tab. 4-6:	Ablageraten bei doppelter und vierfacher Maschinengeschwindigkeit ...	147
Tab. 5-1:	Übersicht der bei den Versuchen eingesetzten Garne.....	153
Tab. 5-2:	Übersicht der materialspezifischen Umspulkkräfte .....	154
Tab. 5-3:	Flechtkerne und Maschineneinstellungen für V1-N und V2-S.....	157
Tab. 5-4:	Resultate der Versuchsreihe V1-N.....	158
Tab. 5-5:	Resultate der Versuchsreihe V2-S .....	159
Tab. 5-6:	Kerngeschwindigkeit für verschiedene Maschinendrehzahlen.....	168
Tab. 6-1:	Eingabeparameter für die Referenz-HFM.....	187
Tab. 6-2:	Leistungsdaten der untersuchten HFM im Vergleich .....	206
Tab. A-1:	Flechtmaschinenhersteller (USA, Europa, Japan) .....	230
Tab. A-2:	Hersteller von geflochtenen Faserpreforms .....	230
Tab. A-3:	Klöpfflechtmaschinen der August Herzog GmbH & Co.KG.....	231
Tab. A-4:	Klöpfflechtmaschinen der Talleres Ratera SA.....	233
Tab. A-5:	Klöpfflechtmaschinen der Spiraltex Industrie.....	234
Tab. A-6:	Schnellflechtmaschinen der Spirka Schnellflechter GmbH.....	235
Tab. A-7:	Schnellflechtmaschinen der Niehoff GmbH & Co.KG.....	235
Tab. A-8:	In der Arbeit verwendete Ablagebreiten verschiedener Garntypen.....	236

Tab. A-9: Grundlegende Eingangswerte der Berechnung .....	237
Tab. A-10: Werte für die einzelnen Prozessnebenzeiten .....	237
Tab. A-11: Bauteilfertigungszeiten für die betrachteten Produktionssysteme .....	238
Tab. A-12: Rüstzeitwerte einzelner Arbeitsschritte für die Rüstzeitberechnung .....	238
Tab. A-13: Berechnung der Zeiten für die verschiedenen Rüstvarianten.....	239
Tab. A-14: Farbcode für die Geflechtumfänge.....	254
Tab. A-15: Bauteilumfänge für CF-12k-Geflecht .....	255
Tab. A-16: Bauteilumfänge für CF-24k-Geflecht .....	256
Tab. A-17: Bauteilumfänge für CF-50k-Geflecht .....	257
Tab. A-18: Bewertungskriterien „Technische Aspekte“ .....	258
Tab. A-19: Bewertungskriterien „Entwicklungsrahmenbedingungen“ .....	259
Tab. A-20: Paarweiser Vergleich der Technischen Aspekte .....	260
Tab. A-21: Paarweiser Vergleich der Entwicklungsrahmenbedingungen.....	260
Tab. A-22: Einstufung der betrachteten Szenarien .....	261

# 1 Einleitung

Strengere Vorschriften zum Kraftstoffverbrauch von Pkw und gleichzeitig gestiegene Ansprüche der Kunden an die Fahrleistungen zwingen die Automobilindustrie, das Gewicht ihrer Fahrzeuge zu reduzieren – allerdings ohne Abstriche bei Komfort oder Sicherheit. Darüber hinaus bringen neue, emissionsarme batterie- oder brennstoffzellenbetriebene elektrische Antriebe gegenüber konventionellen Motoren oft erhebliches Mehrgewicht mit sich, das bestmöglich durch Einsparungen an der Strukturmasse kompensiert werden muss, um das Fahrzeug mit attraktiver Reichweite anbieten zu können.

Leichtbau hat daher in der Automobilbranche in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Durch verbesserte Bauteilgestaltung, computergestützte Auslegungsmethoden und moderne Werkstoffe in Kombination mit hohem entwicklungsseitigem Aufwand ist es gelungen, „die Gewichtspirale“, den Trend zu immer höherem Fahrzeuggewicht beim jeweiligen Nachfolger einer Modellreihe, zu durchbrechen (s. Abb. 1-1).



**Abb. 1-1: Entwicklung der Leermasse ausgewählter Fahrzeugmodelle**

Etwa ab dem Jahr 2000 lässt sich für die dargestellten Modelle eine Stagnation der Leermasse nach zuvor rasanter Zunahme erkennen. Bei der jeweils aktuellen Fahrzeuggeneration zeigen sich die Anstrengungen der Hersteller an erstmals gesunkener Leermasse.

Die klassische Stahlkarosserie hat ausgedient – neben höherwertigen, warmumgeformten Stählen und Aluminium finden in den letzten Jahren vermehrt auch Faserverbundkunststoffe ihren Weg in die Fahrzeugstruktur. In der Luftfahrt werden diese seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt und haben dort ihr bedeutendes Potenzial zur Gewichtseinsparung unter Beweis gestellt. Für die breite Anwendung in der automobilen Großserie sind sie allerdings derzeit zu teuer; ihr Einsatz beschränkt sich daher bislang oft auf einzelne Teile in besonders hochwertigen Autos. Hohe Ausgangsmaterialpreise und ein energieintensives Herstellungsverfahren eröffnen kaum Spielräume für eine Kostenreduktion bei den bevorzugt eingesetzten Kohlenstofffasern. Großes Potenzial liegt hingegen in der Reduktion des Materialverschnitts und der Optimierung der handarbeitsintensiven, traditionellen Fertigungsprozesse von Faserverbundkunststoffen.

Mit seinem Project i hat BMW in den vergangenen Jahren die Vorreiterrolle beim Einsatz von Faserverbundkunststoffen in der Automobilindustrie übernommen. Für das Elektromodell i3 und den Hybridsportwagen i8 werden die Fahrgastzellen fast komplett aus CFK<sup>1</sup> hergestellt. Durch weitgehende Automatisierung der Bauteilherstellung und bedeutende Vereinfachungen in der Rohbaumontage ist es gelungen, diesen Werkstoff bei mittleren Stückzahlserien wie dem i3 mit einigen zehntausend Einheiten pro Jahr einzusetzen. Die Formgebung der Fasern erfolgt automatisiert aus textilen Halbzeugen, die mit hohem Durchsatz gefertigt werden können. Die Faseraufbauten werden anschließend in einem Flüssigimprägnierverfahren (LCM<sup>2</sup>) mit Harz getränkt und ausgehärtet. BMW verfolgt das Ziel, den Werkstoff CFK innerhalb der neuen modularen Modellplattform 35up auch für Baureihen mit größeren Stückzahlen und geringerem Kostenspielraum außerhalb der Submarke BMW i einzusetzen. Als Ergebnis dieser Strategie enthalten die Fahrzeuge der 2015 neu erschienenen Generation der 7er-Baureihe als erste Großserienfahrzeuge einen nennenswerten Anteil an CFK-Bauteilen. Diese leisten einen großen Beitrag zur Gewichtseinsparung von 130 kg in der Fahrzeugstruktur gegenüber dem Vorgängermodell [1].

Für die Fertigung von Faserverbundhohlprofilen, die einen bedeutenden Anteil an der Karosseriestruktur ausmachen, kommt bei BMW das Flechtverfahren zum Einsatz. Dieses vereint in besonderer Weise die Forderungen nach effizienter Fertigung und geringem Materialverschnitt und wird als der Prozess erachtet, der *"das größte Potenzial bei Carbonfaseranwendungen hat"* [2]. Der Faseraufbau wird maschinell und bereits in Bauteilgeometrie direkt aus dem Rohgarn gefertigt. Für den BMW i3 werden so zum Beispiel Verstärkungsprofile für die A-Säulen hergestellt [3]. Obwohl der dafür bei BMW eingesetzte Prozess durch die Automatisierung bisher manueller Arbeitsschritte bereits weiterentwickelt wurde, ist der Materialdurchsatz noch nicht so hoch, dass großserientaugliche Taktzeiten von wenigen Minuten je Bauteil erreicht werden.

---

<sup>1</sup> Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

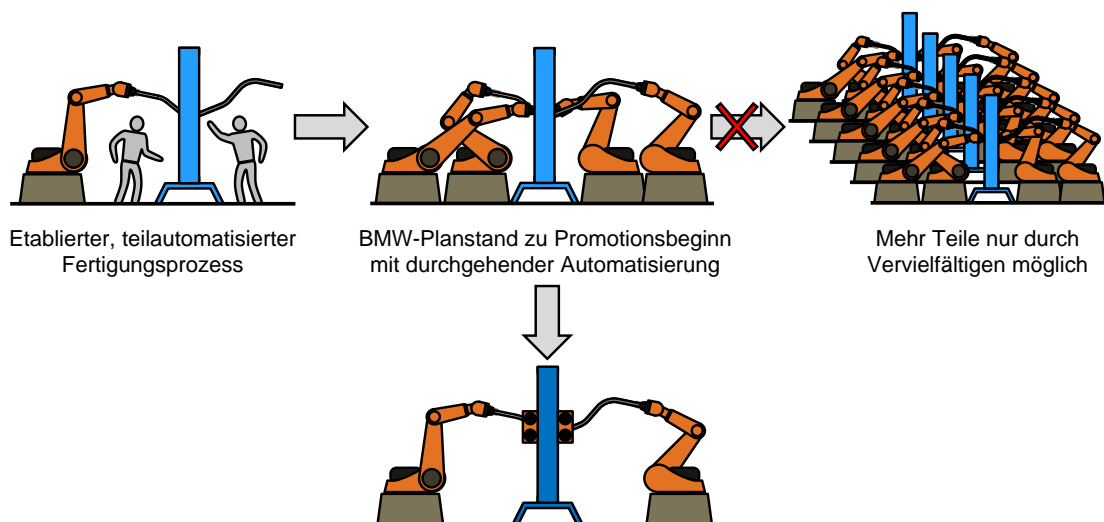
<sup>2</sup> Liquid Composite Molding

Im Zusammenhang mit dem Entwicklungsprojekt für die 35up-Plattform hat BMW 2012 eine Forschungsk Kooperation mit der TUM, Lehrstuhl für Carbon Composites, zur Weiterentwicklung des Flechtverfahrens ins Leben gerufen. Nach den Erfahrungen aus der Flechtbauteilfertigung für den i3 war klar, dass sich mit der dort eingesetzten Technologie größere Stückzahlen nicht wirtschaftlich herstellen lassen. Eine Erhöhung des Bauteil ausstoßes ist damit nur über eine Vervielfachung der Fertigungszellen möglich, was mit sehr hohen Investitionskosten und großem Platzbedarf verbunden ist.

Mit der hier vorliegenden Arbeit, die im Rahmen der Zusammenarbeit mit BMW entstanden ist, wird ein alternativer Ansatz zur Steigerung der Produktivität verfolgt. Durch die Verwendung eines völlig anderen Maschinenkonzepts soll der Materialdurchsatz so deutlich gesteigert werden, dass ein Einsatz für die Großserienfertigung von CFK-Hohlprofilen zu akzeptablen Kosten möglich wird (s. Abb. 1-2).

In dieser Arbeit wird ermittelt, welche die wichtigsten Stellgrößen sind, die die Produktivität aktuell einschränken. Dabei wird im Speziellen die Auswirkung der Interaktion verschiedenster anlagen- und prozessspezifischer Parameter untersucht. Eine alternative Hochgeschwindigkeitsumflechttechnik wird vorgestellt, die bisher im Bereich der Drahtverarbeitung zum Einsatz kommt und mit der sich die Fertigungsgeschwindigkeit deutlich steigern lässt. Die Eignung solcher Maschinen für die Verarbeitung von Verstärkungsfasern wird untersucht, und es werden Anpassungen für den Einsatz zur Herstellung von Hohlprofilbauteilen vorgeschlagen.

Auf Basis dieser Weiterentwicklungsideen wird eine zukünftige Fertigungsanlage für Automobilbauteile konzeptioniert, deren theoretisch ermitteltes Leistungsvermögen mit der Produktivität des aktuell eingesetzten Systems verglichen wird.



**Abb. 1-2: Produktivitätssteigerung durch alternative Anlagentechnik**

Die bisher eingesetzte Flechttechnik mit hohem Handarbeitsanteil (links) wurde von BMW automatisiert (Mitte oben). Eine Erhöhung des Ausstoßes durch Vervielfachen der Fertigungszellen (rechts) ist keine wirtschaftliche Lösung. Es wird daher die Verbesserung der Flechtmaschinentechnik selbst angestrebt (Mitte unten).



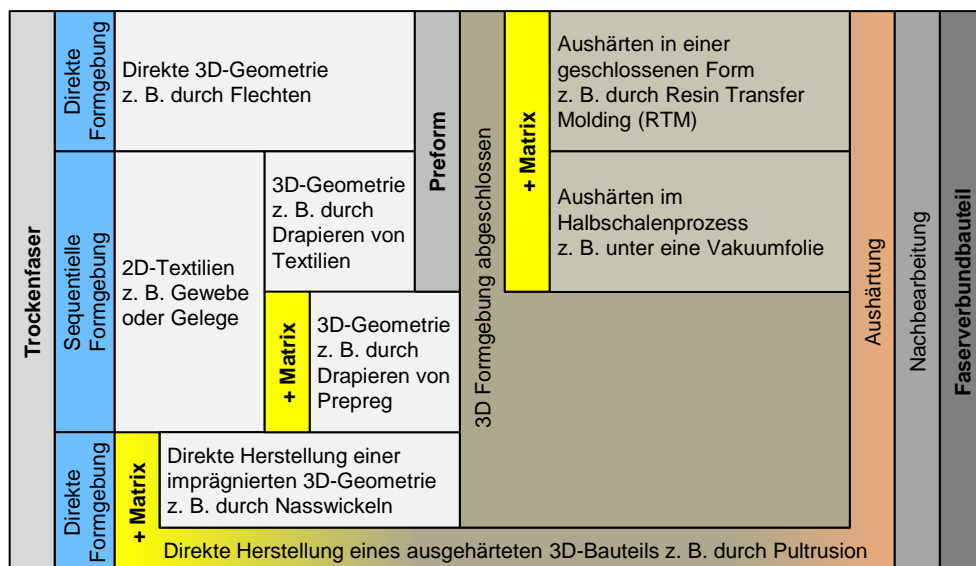
## 2 Flechten – Material und Anlagentechnik

### 2.1 Einordnung der Flechttechnik

Zur Herstellung von Faserverbundkunststoffen (FVK) sind verschiedene Fertigungsverfahren bekannt. Diese lassen sich danach unterscheiden, zu welchem Zeitpunkt der Verarbeitung die Tränkung der Fasern mit dem Matrixharz erfolgt. Abb. 2-1 zeigt verschiedene Wege, um von der trockenen Faser zum fertigen FVK-Bauteil zu gelangen.

Im einfachsten, unten in der Grafik dargestellten Fall des Pultrusionsprozesses werden Fasern direkt mit dem Harz getränkt, durch eine beheizte Form gezogen und das Harz dadurch im selben Prozessschritt ausgehärtet. Trennt man Formgebung und Aushärtung, befindet man sich in der Ebene darüber bei einem Verfahren wie dem Nasswickeln.

In der nächsthöheren Ebene werden aus trockenen Fasern zunächst flächige Halbzeuge wie z. B. Gewebe hergestellt, die zugeschnitten und über einen Drapierprozess in Form gebracht werden. Geschieht dies, nachdem die Halbzeuge bereits mit Harz getränkt wurden, spricht man von Prepreg<sup>1</sup>.



**Abb. 2-1: Übersicht von FVK-Fertigungsrouten**

Die Prozessschritte werden im Diagramm waagrecht von links nach rechts durchlaufen.

<sup>1</sup> Vom englischen PREimPREGnated für „vorimprägniert“. Das Faserhalbzeug ist mit dem noch flüssigen Harz getränkt und lässt sich in Form bringen. Die Aushärtung beschleunigt sich erst bei hoher Temperatur.

Erstellt man hingegen aus den trockenen Halbzeugen einen Faseraufbau, der schon die Geometrie des Endbauteils hat, bezeichnet man diesen als Preform. Eine solche Preform kann mit den direkten Preform-Prozessen der obersten Ebene auch unmittelbar aus den Fasern erzeugt werden.

Die Preform wird anschließend in einem Imprägnierverfahren (LCM) mit dem Matrixharz getränkt. Dieses härtet schließlich unter Temperatur aus und fixiert so die Fasern. Die Wahl des Fertigungsverfahrens hat bei Faserverbundkunststoffen maßgeblichen Einfluss auf deren Eigenschaften, hauptsächlich über die Art und Weise wie die Fasern im Material angeordnet sind (vgl. hierzu Anhang A, Abschnitt a).

Eines der wichtigsten direkten Preformverfahren ist die Flechttechnik. Kern der vorliegenden Arbeit ist die Analyse und Verbesserung der Produktivität dieses Verfahrens – speziell für Anwendungen in der Automobilindustrie. Für einen aktuellen und umfangreichen Überblick über den Flechtprozess, die Maschinentechnik, das Design von Geflechtes und die dazugehörigen Anwendungen sei auf das 2014 neu erschienene Buch von Kyosev [4] verwiesen.

Dieses Buch geht allerdings nicht im Besonderen auf die Anwendung des Flechtens zur Fertigung von Faserverbundkunststoffen ein. Da Flechten eine unter vielen verschiedenen Fertigungstechnologien für diese Werkstoffe ist, nimmt die Darstellung des Verfahrens auch in Übersichtswerken zu dieser Werkstoffklasse [5–9] ebenfalls nur einen kleineren Teil ein. Spezielle Literatur zum Thema Flechten für Faserverbundkunststoffe bieten hingegen [10, 11]. Obwohl schon etwas älter, ist im englischsprachigen Raum das „Handbook of Industrial Braiding“ von Ko et al. immer noch von großer Bedeutung [12]. Im deutschsprachigen Raum basieren viele Entwicklungen der Faserverbundflechttechnik auf den Arbeiten von Rosenbaum [13].

Das vorliegende Grundlagenkapitel fasst die wichtigsten Aspekte des Flechtverfahrens zusammen. Dabei wird der Fokus auf die Darstellung der Besonderheiten gelegt, die bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen eine Rolle spielen. Die allgemein beim Flechten und die speziell in dieser Arbeit eingesetzten Materialien, die Anlagentechnik und typische Anwendungen aus dem Faserverbundbereich werden vorgestellt.

Das Erschließen dieses neuen Anwendungsfelds hat in vielen Punkten Anpassungen der klassischen, für die Verarbeitung von Polymerfasern optimierten Anlagentechnik notwendig gemacht. Diese über Jahre erarbeiteten Erkenntnisse, welche spezifischen Verbesserungen die prozesssichere Verarbeitung von Verstärkungsfasern ermöglichen, sollen bei der Konzeptionierung einer neuen Anlage mit höherer Produktivität – sofern übertragbar – beibehalten werden. Einen sehr ausführlichen Überblick der aktuell typischerweise für die Produktion von Faserverbundkunststoffen eingesetzten Anlagentechnik hat v. Reden in seiner Dissertation zusammengestellt [14].



## 2.2 Geflechte

Die Ursprünge der textilen Fertigungstechnologie des Flechtens reichen bis weit vor unsere Zeit zurück. Frühe Zeugnisse haben sich in Form von Abdrücken geflochtener Schnüre in Ton erhalten und datieren auf die jüngere Altsteinzeit (Gravettien, ca. 30.000 a vor heute [15, 16]). Es wird angenommen, dass auch davor schon Flechtwerk z. B. für Körbe verwendet wurde. Aufgrund der schwierigen Erhaltungsbedingungen für organisches Material sind bislang allerdings noch keine derartigen Funde gelungen. Da für einfache Geflechte außer den Händen kein weiteres Werkzeug notwendig ist, könnte es sich sogar um die älteste aller Textiltechnologien handeln [17].

### 2.2.1 Definition

Ähnlich wie beim bekannteren Weben werden beim Flechten Stränge des verarbeiteten Materials in einem bestimmten Muster regelmäßig ober- und unterhalb voneinander vorbeigeführt. Die so erzeugte Abbindung der Fäden an den Kreuzungspunkten stabilisiert das Textil (s. auch Abschnitt 2.2.5). Anders als beim Weben, bei dem Schussfäden die in Produktionsrichtung verlaufenden Kettfäden rechtwinklig kreuzen, verlaufen beim Flechten beide Fadenscharen diagonal zur Produktionsrichtung<sup>2</sup>.

In Bezug auf die Fertigung bedeutet dies, dass beim Weben ein Schussfaden mit allen Kettfäden verkreuzt wird, bevor der nächste Faden eingetragen werden kann. Beim Flechten ist hingegen das Verkreuzen aller Fäden einer Laufrichtung mit den jeweils benachbarten der anderen Richtung gleichzeitig möglich. Dieses Prinzip lässt zunächst sehr hohe Produktivität vermuten, es hat allerdings den Nachteil, dass jeweils die kompletten freien Garnenden umeinander herumgeführt werden müssen. Das Flechtmaterial wird dafür auf zwei Gruppen von Spulen bevorratet, die sich gegenläufig zueinander bewegen und dabei jeweils um die Spulen der Gegenrichtung herumgeführt werden. Diese bewegten Massen sind ein prinzipbedingter Nachteil des Flechtverfahrens in Bezug auf Produktivitätssteigerung, weil dadurch der Geschwindigkeit des Prozesses Grenzen auferlegt sind.

Durch die Bewegung der Spulen wird das Garn nach und nach abgewickelt. Die Fäden laufen im sogenannten Flechtpunkt zusammen und bilden dort das Geflecht. Das fertige Produkt muss, um gleichmäßige Produktqualität sicherzustellen, unter Spannung gehalten und aus dem Flechtpunkt gefördert werden.

---

<sup>2</sup> Die DIN-Norm 60000 definiert: „Geflechte: Flächen- oder Körpergebilde mit regelmäßiger Fadendichte und geschlossenem Warenbild, deren Flecht-(Klöppel-)Fäden sich in schräger Richtung zu den Warenkanten verkreuzen.“ [18]

## 2.2.2 Garnmaterialien

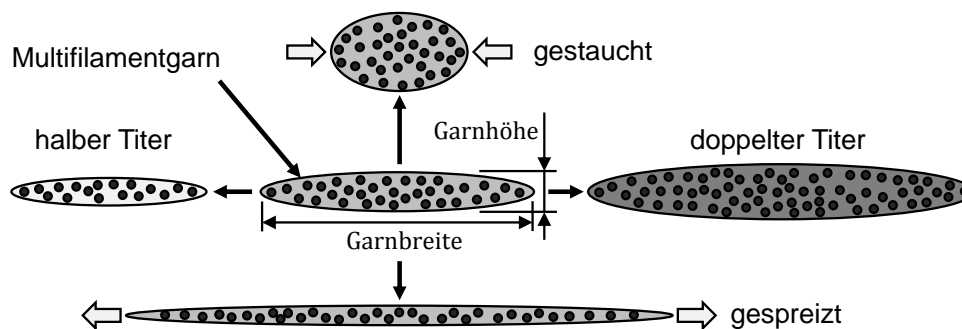
Traditionell wurden Geflechte mit Naturmaterialien wie biegsamen Ruten für Körbe oder Pflanzenfasern z. B. aus Flachs und Hanf für Seile hergestellt. Heutzutage kommen beim Flechten alle Arten von Natur- und Kunstfasern bis hin zu Drähten zum Einsatz.

### 2.2.2.1 Rovings

In der vorliegenden Arbeit wird nur der Einsatz von Verstärkungsfasern<sup>3</sup> für Verbundwerkstoffe wie Kohlenstoff-, Glas- oder Basaltfasern betrachtet. Der Einsatz dieser Fasern erfolgt in Form von Multifilamentgarnen, in denen die einzelnen dünnen Faserfilamente gebündelt sind. Ein Verstärkungsfasergarn, in dem alle Filamente im Wesentlichen parallel zueinander verlaufen, wird Roving genannt (s. Abb. 2-2).

Weil die Filamente der typischen Verstärkungsfasermaterialien sehr spröde sind und im Vergleich mit Polymerfasern ein extrem geringes Dehnungsvermögen aufweisen, sind sie in der Verarbeitung äußerst bruchempfindlich. Eine Möglichkeit, um den Garnzusammenhalt zu verbessern und die Filamente vor Brüchen zu schützen, ist das Zwirnen der Garne, das bei der Verarbeitung von Polymerfasergarnen oft eingesetzt wird. Verstärkungsfasergarne sollten allerdings bevorzugt ohne Drehung zum Einsatz kommen, um durch die gerade Filamentausrichtung möglichst gute mechanische Eigenschaften im Verbundwerkstoff zu erreichen. Ihre Verarbeitung erfordert daher besonders schonende Prozesse und speziell angepasste Anlagentechnik (s. Abschnitt 2.4.1) [19].

Abb. 2-2 zeigt in der Mitte einen Schnitt durch einen Roving. Durch die Spannung im Garn in Kombination mit Querdruck gegen eine Oberfläche, z. B. beim Aufwickeln auf eine Spule, ist sein Querschnitt nicht gleichmäßig rund, sondern elliptisch abgeflacht.



**Abb. 2-2: Eigenschaften von Rovings**

Die dunklen Punkte veranschaulichen die weitgehend homogene, aber unregelmäßige Verteilung der Einzelfilamente in der Garnquerschnittsfläche. Beide sind nicht maßstabsgetreu zueinander; tatsächlich sind die Filamente wesentlich kleiner und zahlreicher.

<sup>3</sup> Unter diesem Oberbegriff sind in der Arbeit die für den Faserverbundbereich maßgeblichen Fasertypen zusammengefasst. Anwendungsseitig zählt auch die Aramidfaser zu den Verstärkungsfasern; sie weist allerdings im Vergleich mit den genannten Fasern bedeutend bessere Verarbeitungseigenschaften auf.

Mit dieser Geometrie liegen die Garne in gefertigten Textilien vor. Dabei stellen sich für jeden Garntyp – mit einem gewissen Schwankungsbereich – eine typische Höhe und Breite der Ellipse ein, die im Weiteren natürliche Garnbreite genannt wird.

Bei der Herstellung eines Textils mit sehr hoher Garnspannung kann das Garn durch Querkkräfte in Breitenrichtung, die an den Kreuzungspunkten durch Kontakt mit Nachbargarnen entstehen, zusammengeschoben werden. Das heißt, die Breite nimmt ab, die Höhe hingegen zu. Dieser Fall ist im oberen Teil der Abb. 2-2 dargestellt. Die Grenze dieses Zusammenstauchens ist erreicht, wenn das Garn eine annähernd kreisförmige Querschnittsgeometrie aufweist und nicht mehr weiter komprimiert werden kann. Wirken hingegen keine seitlich einschnürenden Kräfte auf den Roving, kann er – wie im unteren Teil der Abbildung gezeigt – durch Druck in Höhenrichtung gespreizt werden. Dadurch vergrößert sich bei abnehmender Höhe des Garns die Breite deutlich. Unter der Annahme, dass weiterhin vergleichbare Abstände der Einzelfilamente vorliegen, ändert sich die Querschnittsfläche des Rovings beim Spreizen bzw. Stauchen nicht, was in der Abbildung durch die gleichbleibende Hintergrundfärbung verdeutlicht wird.

Beim links bzw. rechts in Abb. 2-2 dargestellten Roving ändert sich hingegen der Titer<sup>4</sup>  $Tt$ , repräsentiert durch die Anzahl der Einzelfilamente innerhalb des Garns. Unter den Annahmen, dass einerseits die Verteilung der Einzelfilamente hier ebenfalls vergleichbar ist und dass andererseits die Querschnittsgeometrie für die Garne der verschiedenen Titer ähnlich bleibt, ändern sich Garnbreite und –höhe mit der Quadratwurzel des Skalierungsfaktors für den Titer. Das bedeutet, dass ein doppelt so „dickes“ Garn sich nicht doppelt so breit ablegt, sondern nur etwa um das  $\sqrt{2}$ -Fache breiter bzw. höher, da dann die doppelte Querschnittsfläche vorliegt.

### 2.2.2.2 Eingesetzte Garne

Die Produktivitätsbetrachtungen dieser Arbeit (s. Kapitel 3 und 4) werden anhand verschiedener Beispielgeflechte (s. Abschnitt 2.2.6) durchgeführt. Diese bestehen aus Garntypen, die im Bereich der Faserverbundgeflechte – speziell für den Automobilbereich – häufig eingesetzt werden. Zudem sind in Kapitel 5 Flechtversuche beschrieben, bei denen verschiedene Glasfasergarne<sup>5</sup> verwendet werden. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Garntypen, die in der Arbeit verwendet worden sind.

Bei allen betrachteten Kohlenstofffasergarnen<sup>6</sup> handelt es sich um solche aus hochfesten oder HT-Fasern (für high tenacity) in verschiedenen Garnstärken. Diese Fasertypen sind am weitesten verbreitet und werden oft als „Standardfaser“ bezeichnet. Im Vergleich mit mittelsteifen (IM für intermediate modulus) oder sogar hoch- bzw. höchststeifen Fasern

---

<sup>4</sup> Die längenbezogene Garnmasse wird im Faserverbundbereich zumeist in  $\text{tex}$  angegeben und mit  $Tt$  abgekürzt. 1  $\text{tex}$  entspricht 1 g/1000 m Lauflänge des Garns.

<sup>5</sup> Glasfasergarn wird in der Arbeit mit GF abgekürzt.

<sup>6</sup> Kohlenstofffasergarn wird in der Arbeit mit CF vom englischen carbon fiber abgekürzt.

(HM für high modulus bzw. UHM für ultra high modulus), die vornehmlich in der Luft- bzw. Raumfahrt eingesetzt werden, sind HT-Fasern deutlich kostengünstiger – hauptsächlich weil ihre Herstellung geringeren Energieeinsatz erfordert. Für kostengetriebene automobile und industrielle Anwendungen kommen praktisch ausschließlich HT-Fasern zum Einsatz. Folgende Übersicht fasst die in der Arbeit verwendeten CF-Garntypen zusammen; in Klammern ist jeweils die im Weiteren benutzte Abkürzung angegeben:

- Rovings mit 12.000 Einzelfilamenten (CF-12k<sup>7</sup>)  
Diese Garne haben eine längenbezogene Masse von 800 *tex*. Beispiele für oft eingesetzte Fasertypen sind die TORAYCA T700® von Toray Industries Inc. oder die Tenax HTS40® der Firma Toho Tenax, die zur Teijin Gruppe gehört.
- Rovings mit 24.000 Filamenten (CF-24k)  
Diese Garne haben eine längenbezogene Masse von 1600 *tex*. Auch hier sind die TORAYCA T700® oder die Tenax HTS40® typische Vertreter.
- Rovings mit 50.000 Filamenten (CF-50k)  
Diese Garne sind mit ihrem Titer von 3300 *tex* bedeutend dicker als die beiden zuvor genannten Garntypen und zählen zu den so genannten „heavy tows“. Solch dicke Garne sind kostengünstiger zu produzieren und kommen bevorzugt für preissensitive Anwendungen zum Einsatz. Der hohe Titer erlaubt zudem in den Verarbeitungsprozessen einen höheren Durchsatz und hilft, die Prozesskosten zu senken. Typische Vertreter dieser Fasern sind die SIGRAFIL® C50-Garne der SGL Group oder die PX 35 der Firma Zoltek™, die zur Toray-Gruppe gehört. BMW setzt für seine CFK-Bauteile z. B. 50k-CF-Garne von SGL Automotive Carbon Fibers ein, einem gemeinsam mit der SGL Group gegründeten Joint-Venture-Unternehmen. Dabei handelt es sich um speziell für BMW ausgerüstete Fasern, die auf den SIGRAFIL®-Garnen von SGL basieren.

Bei den eingesetzten GF-Garnen handelt es sich um E-Glasfasern<sup>8</sup> verschiedener Hersteller (vgl. Tab. 5-1). Für die Versuche werden Garne unterschiedlicher Feinheit verwendet, für die Berechnung nur das Garn mit einer Feinheit von 600 *tex*.

- GF-Garne mit Feinheiten im Bereich von 68 *tex* bis hin zu sehr dicken mit 2400 *tex* längenbezogener Masse. Die Garntypen werden im Verlauf der Arbeit mit GF-68 bis entsprechend GF-2400 abgekürzt.

Eine Übersicht der Ablagebreiten, die die vorgestellten Garntypen natürlicherweise haben, auf welchen Breitenwert sie sich minimal kompaktieren lassen und welche Ablagebreite mit gespreizten Garnen erreicht werden kann, bietet Tab. A-8 im Anhang.

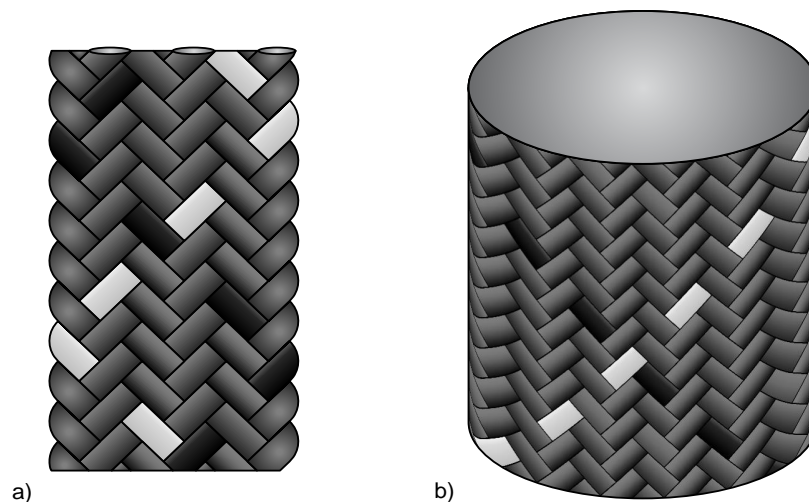
<sup>7</sup> k steht in der Faserbezeichnung für 1000 (Filamente).

<sup>8</sup> Das E steht für „Electric“ und kennzeichnet eine bestimmte Fasertypen. Diese gilt als Standardfaser, mit der ca. 90 % des Glasfasermarkts bedient werden.

### 2.2.3 Halbzeuggeometrie

Flächig geflochtene Textilien<sup>9</sup> (2D-Geflechte) können in zwei Grundformen erstellt werden, als Litzengeflecht oder als Rund- bzw. Schlauchgeflecht (s. Abb. 2-3). Ein Litzengeflecht hat die Form eines flachen Bandes, bei dem die schräg verlaufenden Garne einer Spulengruppe jeweils bei Erreichen einer seitlichen Begrenzung ihre Laufrichtung ändern. Es bildet sich bei Verwendung einer ungeraden Anzahl von Flechtfadenspulen. Das einfachste und bekannteste dreisträngige Litzengeflecht kommt z. B. beim typischen Einflechten der Haare oder der bei der Herstellung eines Hefezopfs zum Einsatz. Typische Einsatzbereiche für Litzengeflechte sind Gürtel, Borten oder Schnürbänder.

Ein Rund- oder Schlauchgeflecht entsteht, wenn eine gerade Anzahl von Spulen verwendet wird. Mindestens acht Garnspulen, verteilt auf die beiden Laufrichtungsgruppen, sind dafür notwendig. Durch deren gegenläufige Bewegung um den Flechtpunkt, verläuft jeder einzelne Flechtfaden helixförmig im fertigen, schlauchförmigen Produkt wie in Abb. 2-3 b). Typische Anwendungen dieser Geflechte sind verschiedenste Arten von Schnüren und Seilen. Das hohle Innere des Schlauchs kann mit einer sogenannten Seele gefüllt werden. Diese besteht bei Seilen z. B. aus parallel verlaufenden Fasern für hohe Zugfestigkeit oder bei Koaxialkabeln aus dem Innenleiter, für den ein ummantelndes Schlauchgeflecht aus feinen Drähten Außenleiter und Abschirmung bildet.



**Abb. 2-3: Vergleich von Litzen und Schlauchgeflecht**

- a) Litzengeflecht: Das hell bzw. dunkel hervorgehobene Garn zeigt den Laufrichtungswechsel an der Warenkante. Alle Garne verlaufen prinzipiell gleich.
- b) Schlauchgeflecht: Es gibt zwei Gruppen von Garnen mit gegensinniger Laufrichtung, deren spiralförmiger Verlauf durch je ein Garn hell bzw. dunkel hervorgehoben ist.

<sup>9</sup> Es gibt zusätzlich auch volumenbildende Geflechte, bei denen die Garne dreidimensional miteinander verflochten sind, wodurch ein kompaktes Profil entsteht. In der vorliegenden Arbeit werden 3D-Geflechte nicht betrachtet. Weiterführende Informationen zu diesem Thema bieten z. B. die Quellen [10, 11, 20].

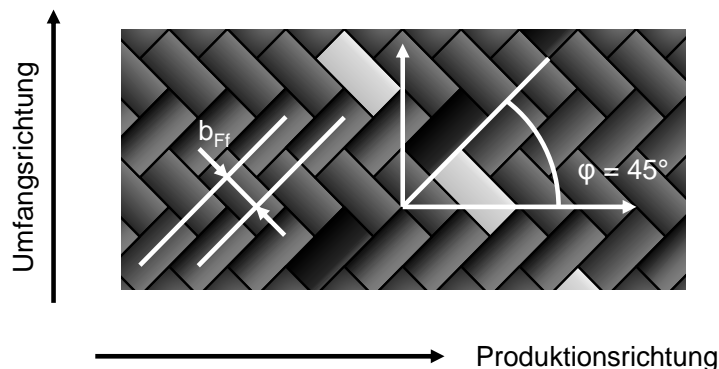
Bei der Herstellung von Faserverbundhohlprofilen wird die sogenannte Umflechttechnik eingesetzt, die im weiteren Verlauf der Arbeit ausschließlich betrachtet wird. Bei dieser wird ein Schlauchgeflecht gefertigt und anstelle der Seele ein Kern eingesetzt, an dessen Oberfläche sich das Geflecht anlegt. Die Kerengeometrie bestimmt die Innenkontur des späteren Bauteils. So können Bauteilen mit runden und eckigen Querschnitten sowie variablen Querschnittsflächen bzw. Kernumfängen gefertigt werden.

## 2.2.4 Geflechtparameter und deren Zusammenhänge

Die Kerengeometrie kann nicht beliebig verändert werden, da verschiedene Parameter, die das Geflecht beschreiben, voneinander abhängen. Abb. 2-4 zeigt beispielhaft den Ausschnitt eines Geflechts, dessen Produktionsrichtung von links nach rechts verläuft. Mit dieser Richtung schließen die Flechtfäden einen Winkel ein, den sogenannten Flechtwinkel  $\varphi$ . Bei einem kleinen Flechtwinkel sind die Flechtfäden eher in Bauteillängsrichtung orientiert, bei einem großen Flechtwinkel mehr in Umfangsrichtung<sup>10</sup>.

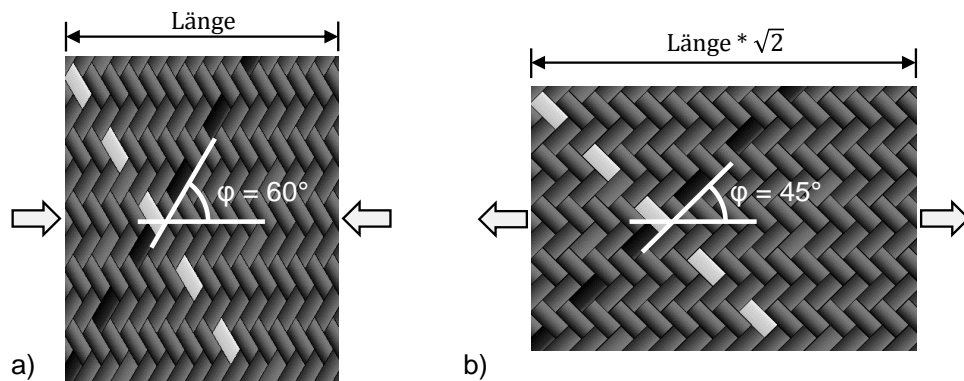
Des Weiteren ist in der Abbildung die theoretische Ablagebreite der Flechtfäden, also deren Abstand,  $b_{Ff}$  dargestellt. Diese kann für eine festgelegte, flechtmaschinenabhängige Anzahl Flechtfadenspulen  $n_s$  und einen bestimmten Bauteilumfang  $U_B$  berechnet werden.

$$b_{Ff} = \frac{2 * U_B * \cos \varphi}{n_s} \quad (2-1)$$



**Abb. 2-4: Definition von Ablagebreite und Flechtwinkel**

<sup>10</sup> Diese Konvention ist im Faserverbundbereich gängig, da hier für die Bauteillängsachse, also die Produktionsrichtung, zumeist die Faserrichtung  $0^\circ$  definiert wird. Achtung: In der klassischen Seilflechterei ist die Definition des Flechtwinkels oftmals genau umgekehrt; es wird der sogenannte Steigungswinkel bestimmt, der gegenüber der Umfangsrichtung gemessen wird.



**Abb. 2-5: Geflechtgeometrieänderung durch a) Stauchen und b) Strecken**

Der Faktor zwei findet Eingang in die Formel, da jeweils nur die Hälfte der Flechtfäden in einer Richtung den Kern umläuft und dadurch an jeder Stelle des Geflechts zwei Garne unterschiedlicher Laufrichtung übereinander liegen.

Die Formel veranschaulicht zudem, warum die Kerngeometrie nicht beliebig geändert werden kann. Weil die Spulenzahl während des Prozesses nicht geändert werden kann und durch die Maschine vorgegeben ist<sup>11</sup>, kann auf einen geänderten Bauteilumfang nur durch Anpassung des Flechtwinkels oder des Garnabstands reagiert werden, wenn weiterhin geschlossenes Geflecht auf dem Kern abgelegt werden soll. Bei zunehmendem Umfang müsste der Flechtwinkel reduziert oder die Fadenbreite gesteigert werden, bei sinkendem Umfang gilt das Gegenteil. Dies zeigt sich bei der Handhabung von Geflechtschläuchen, deren Durchmesser durch Längen des Schlauchs reduziert bzw. durch Stauchen geweitet werden kann. Bei diesem Vorgang ändern sich Flechtwinkel und Garnbreite. Die Länge der Garne selbst bleibt gleich. Abb. 2-5 zeigt die Zusammenhänge schematisch.

### 2.2.4.1 Ablagebreite

Die reale Ablagebreite eines Garns kann nicht jeden beliebigen Wert annehmen, da sie vom verwendeten Material abhängt und sich im Prozess nur innerhalb enger Grenzen ändert (s. Abschnitt 2.2.2.1). Die in Formel (2-1) berechnete theoretische Ablagebreite beschreibt in der vorliegenden Arbeit deshalb nicht die tatsächliche Breite des abgelegten Flechtfadens, sondern den Abstand zweier benachbarter Flechtfäden derselben Laufrichtung. Dieser Ansatz wird verwendet, da es sich so bei der Ablagebreite um eine rein geometrische Größe handelt, die im Gegensatz zur realen Ablagebreite eines Garns keinen Schwankungen unterworfen ist. Kenngrößen wie z. B. die Lagendicke werden in dieser Arbeit mit einem verschmierten Ansatz errechnet, der davon ausgeht, dass die Flechtfäden gleichmäßig den rechnerisch zur Verfügung stehenden Raum ausfüllen.

<sup>11</sup> Mitwalsky diskutiert in [21] die Möglichkeit, die Flechtfadenanzahl während des Prozesses zu variieren. Diese Arbeit wurde zeitgleich mit der vorliegenden am LCC in Kooperation mit BMW durchgeführt.

Diese Herangehensweise ist für die Bestimmung von Ablageraten und Produktivität zulässig, bildet allerdings nur innerhalb eines gewissen Bereichs der Ablagebreite die tatsächliche Geometrie des betrachteten Geflechts ab.

Tatsächlich bilden sich, wenn die berechnete Ablagebreite die Realablagebreite eines Garns übersteigt, Lücken zwischen den Flechtfäden, so dass keine geschlossene Bedeckung der Kernoberfläche mit Flechtfäden erreicht wird. Ist die theoretische Ablagebreite kleiner als die natürliche Breite des Garns, wird dieses komprimiert. Dies ist nur bis zu einem gewissen Grad möglich. Unterschreitet die Garnbreite einen bestimmten Wert, kann sich das Geflecht nicht mehr vollständig bis auf den Kern zusammenziehen, da sich die Garne gegenseitig blockieren. Beide Effekte haben einen starken Einfluss auf die Welligkeit der Flechtgarne und damit auf die lokalen mechanischen Eigenschaften des Geflechts. Mitwalsky beschäftigt sich in seiner Dissertation [21] ausführlich mit den Zusammenhängen von Garnablagebreite und mechanischen Eigenschaften.

In der vorliegenden Arbeit dient der Vergleich der tatsächlichen mit der theoretischen Ablagebreite lediglich dazu, Fälle bei der Bewertung der Ergebnisse auszuschließen, bei denen das Garn unzulässig stark kompaktiert werden müsste. Abb. 2-2 zeigt den als liegende Ellipse angenommenen Garnquerschnitt, dessen minimale Breite die eines Kreises mit äquivalenter Fläche sein kann. Die einschnürenden Effekte der Nachbargarne im Textil verhindern die Ausbildung einer aufrecht stehenden Ellipsenform mit noch geringerer Breite.

### 2.2.4.2 Flechtwinkel

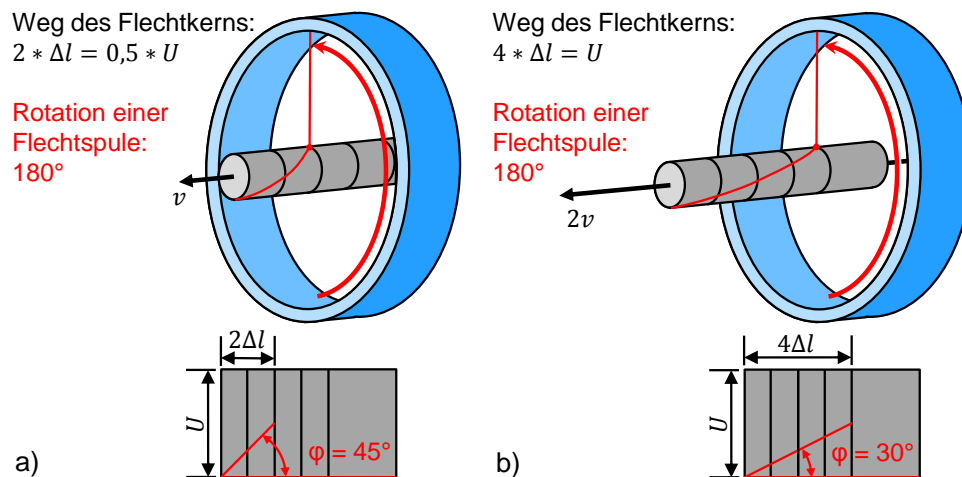
Der Flechtwinkel ergibt sich aus der Relation der Vorschubgeschwindigkeit des Flechtkerns und der Umlaufgeschwindigkeit der Flechtspulen. Je höher die Geschwindigkeit des Kerns ist, umso mehr orientieren sich die abgelegten Fasern in Kernlängsrichtung: Der Flechtwinkel verringert sich. Abb. 2-6 verdeutlicht diesen Zusammenhang schematisch anhand eines runden, geraden Flechtkerns, der mit verschiedenen, beispielhaften Geschwindigkeiten durch eine Flechtmaschine bewegt wird.

Die Kernvorschubgeschwindigkeit  $v$ , die notwendig ist, damit sich ein bestimmter gewünschter Flechtwinkel  $\varphi$  auf dem Kern einstellt, hängt von der Umlaufdauer einer Spule um den Kern  $T_S$  und dem Kernumfang  $U_B$  ab.

$$v = \frac{U_B}{T_S * \tan \varphi} \quad (2-2)$$

Der Flechtwinkel lässt sich erfahrungsgemäß [14, 22, 23] in einem Bereich von etwa  $15^\circ$  bis  $75^\circ$  variieren. Das untere Limit für den Flechtwinkel ist erreicht, wenn die Abbindungspunkte im Geflecht so weit auseinander liegen, dass es zu geringe Eigenstabilität aufweist und sich nicht ausreichend fest an die Geometrie des Flechtkerns anlegt. Am oberen Limit tritt der gegenteilige Effekt ein.





**Abb. 2-6: Zusammenhang zwischen Flechtwinkel und Abzugsgeschwindigkeit**

Ein Kern bewegt sich durch eine schematisch dargestellte Flechtmaschine, während eine Spule ihn zur Hälfte umläuft. Zur Visualisierung des Kernvorschubs ist dieser in Abschnitte unterteilt, die den Abstand eines Viertelkernumfangs haben.

- Der Kern bewegt sich mit der Geschwindigkeit  $v$  einen halben Kernumfang weiter. Das Garn legt sich im  $45^\circ$ -Winkel ab.
- Der Kern bewegt sich mit der Geschwindigkeit  $2v$  einen ganzen Kernumfang weiter. Das Garn legt sich im  $30^\circ$ -Winkel ab.

Die Kreuzungspunkte der Garne liegen so eng beieinander, dass sich das Geflecht aufgrund der hohen Reibungskräfte und der stark kompaktierten Garne nicht mehr auf dem Kern zusammenzieht. Detaillierte Untersuchungen dieser Effekte hat Brand [23] durchgeführt. In den allermeisten Fällen ist der Flechtwinkel ohnehin durch die mechanischen Anforderungen an das Geflecht bzw. Bauteil vorgegeben und kann daher nicht beliebig eingestellt werden.

## 2.2.5 Geflechtarten

Flechten bietet die Möglichkeit, die Abbindung des Textils zu gestalten, je nachdem in welchem Muster die gegenseitig umlaufenden Spulen aneinander vorbeigeführt werden. Passiert eine Spule die jeweils nächste entgegenkommende immer abwechselnd auf der anderen Seite, entsteht ein Geflecht mit 1 x 1-Leinwandbindung. Passiert die Spule nacheinander je immer zwei Spulen auf derselben Seite bevor gewechselt wird, bildet sich ein Geflecht mit 2 x 2-Körperbindung. Dieses Geflecht wird im Faserverbundbereich typischerweise eingesetzt und daher in dieser Arbeit in den Abbildungen (z. B. in Abb. 2-3 bis Abb. 2-5) verwendet<sup>12</sup>.

Zusätzlich lässt sich die Art des gefertigten Geflechts durch die Kombination verschiedener Materialien für die verarbeiteten Garne beeinflussen. Ein solches Geflecht wird

<sup>12</sup> Andere Bindungsarten sind ebenfalls möglich, dafür ist aber eine speziell gestaltete Fertigungsanlage notwendig. Z. B. kann die Anlage am LCC auch Geflechte mit 4 x 4-Abbindung fertigen.

als Hybridgeflecht bezeichnet. Im einfachsten Fall sind alle Flechtspulen mit demselben Garntyp bespult, im (gedanklichen) Extremfall befände sich auf jeder am Prozess teilnehmenden Spule eine andere Art Garn. Diese Variante spielt für reale Produkte zwar keine Rolle, verdeutlicht aber, dass Geflechte äußerst vielfältig gestaltet und an ihren Einsatzzweck angepasst werden können.

### 2.2.5.1 Biaxialgeflecht

Kreuzen sich beim Geflecht nur die zwei Fadenscharen der gegensätzlich umlaufenden Spulengruppen, wird das gebildete Geflecht „biaxial“ genannt, weil sich Fasern zweier unterschiedlicher Verlaufsrichtungen in einer Lage befinden. Im Faserverbundbereich kommt reines Biaxialgeflecht bislang<sup>13</sup> selten zum Einsatz, weil der Faseraufbau eines solchen Bauteils vornehmlich für Torsions- und Schubbelastungen geeignet ist. Dies ist für die meisten Anwendungen nicht ausreichend, da es sich bei Flechtbauteilen aufgrund des Herstellungsverfahrens praktisch immer um längliche, profilförmige Bauteile handelt, die hauptsächlich entlang ihrer Erstreckungsrichtung gute Eigenschaften benötigen. Zusätzlich lassen sich die Fasern im Biaxialgeflecht sehr leicht gegeneinander verschieben (vgl. Abb. 2-5), wodurch prozesssicheres Handling des gefertigten Textils ohne eine Veränderung der Flechtstruktur erschwert wird.

### 2.2.5.2 Triaxialgeflecht

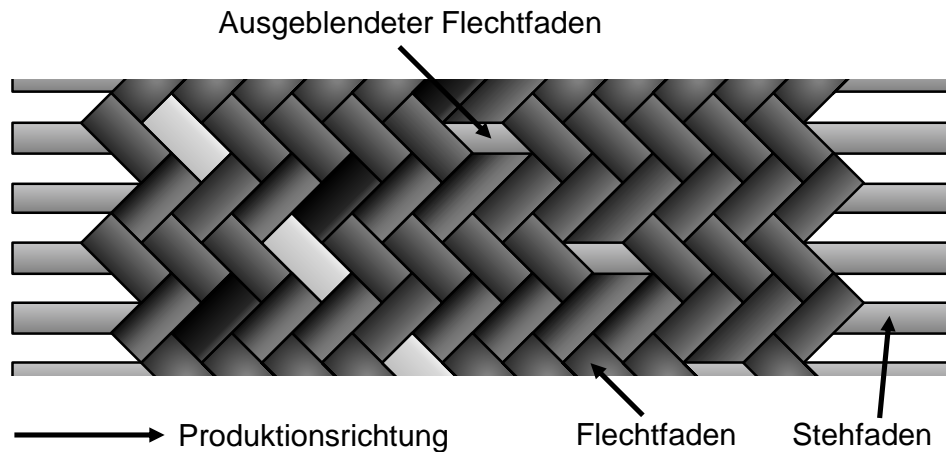
Es besteht beim Flechten aber auch die Möglichkeit, an den Kreuzungspunkten, an denen die Spulen aneinander vorbeigeführt werden, weitere Fäden ins Geflecht einzubringen, die entlang der Fertigungsrichtung verlaufen. Diese werden als Stehfäden (auch Zettelfäden oder UD-Fäden) bezeichnet. Ein solches Geflecht weist drei Fadensysteme unterschiedlicher Verlaufsrichtung innerhalb einer Lage auf. Es wird deshalb als „triaxiales“ Geflecht bezeichnet.

Die Einbindung der Stehfäden zwischen den von außen sichtbaren Flechtfäden ist in Abb. 2-7 dargestellt. Das zusätzliche Fadensystem verhindert zudem das gegenseitige Verscheren der Flechtfäden weitgehend, so dass ein Triaxialgeflecht wesentlich bessere Eigenstabilität als ein Biaxialgeflecht aufweist. Der Faseraufbau für Bauteile aus Triaxialgeflecht muss deswegen in Endgeometrie gefertigt werden, da es sich nach Abschluss der Fertigung kaum mehr deformieren lässt.

Das Triaxialgeflecht findet im Faserverbundbereich dann Anwendung, wenn Bauteile gefertigt werden sollen, die in Längsrichtung besonders gute Steifigkeits- und Festigkeitswerte aufweisen sollen. Alle aktuell im Automobilbereich eingesetzten CFK-Bauteile aus Geflechten (vgl. Abschnitt 2.4.2) weisen einen hohen Stehfadenanteil auf.

---

<sup>13</sup> Brand [23] untersucht die Möglichkeiten zum Einsatz von Biaxialgeflechten mit sehr kleinen Flechtwinkeln in längsbelasteten Flechtbauteilen. Seine Arbeit wurde zeitgleich mit der vorliegenden am LCC in Kooperation mit BMW durchgeführt.



**Abb. 2-7: Einbindung der Stehfäden im Triaxialgeflecht**

Um den Verlauf der Stehfäden innerhalb der Lage zu visualisieren, ist ein Flechtfaden in der Darstellung ausgeblendet.

### 2.2.5.3 Unidirektionalgeflecht

Weisen alle in einer Lage Textil enthaltenen Fasern dieselbe Verlaufsrichtung auf, wird – speziell im Zusammenhang mit Faserverbundkunststoffen – von „unidirektionalem“ bzw. UD-Material gesprochen. Auch mit der Flechttechnik lassen sich vergleichbare Materialien realisieren. Es ist allerdings immer zumindest ein zweites Garnsystem mit abweichender Verlaufsrichtung innerhalb derselben Lage notwendig, um durch das Verkreuzen der Fäden das Geflecht zu stabilisieren. Es handelt sich streng genommen weiterhin um ein biaxiales bzw. triaxiales Geflecht. Damit in einer Lage dennoch der überwiegende Faseranteil in einer Richtung verläuft, werden für die verschiedenen Faden-systeme Garne mit stark unterschiedlichem Titer verwendet. Es handelt sich bei den UD-Geflechtes also um eine Form der Hybridgeflechtes.

Die dickeren Verstärkungsfasergarne, die den Hauptanteil der Lage bilden, können in einer der beiden Flechtfaserrichtungen oder als Stehfäden („0°-Geflecht“) eingebracht werden. Das zur Fixierung der Fasern verwendete Stützgarne besteht aus sehr dünnen Fäden, die den Verlauf der Fasern des Hauptanteils der Lage nur unwesentlich stören. Diese weisen deshalb kaum Welligkeit auf, was die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Faserverbundbauteilen aus UD-Geflecht im Vergleich zu solchen aus Geflecht, bei dem alle Garne aus demselben Materialtyp bestehen und das viel stärkere Garnwelligkeit aufweist, bedeutend verbessert. Für Faserverbundanwendungen wurde das UD-Geflecht 2004, bei dem die Verstärkungsfasern in Flechtfaserrichtung verlaufen, von EADS<sup>14</sup> entwickelt und patentiert [24].

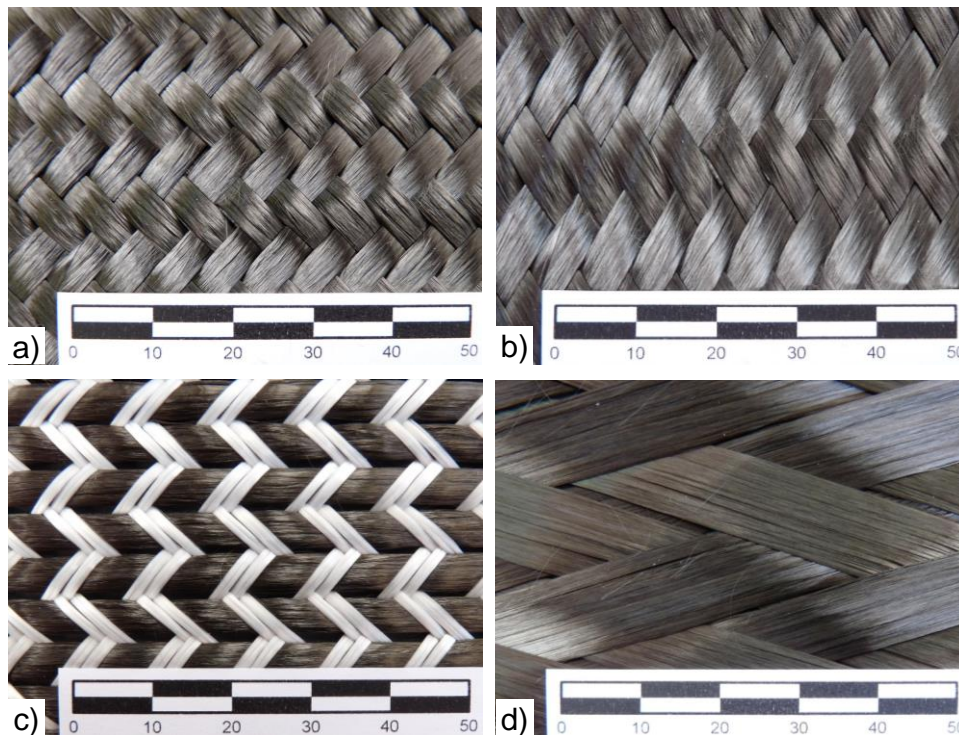
<sup>14</sup> European Aeronautic Defence and Space Company, seit 2013 AIRBUS Group

## 2.2.6 Untersuchte Basisgeflechte

Der Aufbau des Geflechts hat großen Einfluss darauf, wie produktiv der Prozess ist – werden z. B. besonders dicke Garne verwendet, kann eine deutlich größere Materialmenge pro Zeit verarbeitet werden als bei dünnen Garnen. Die Vergleiche der Produktivität verschiedener Arten von Flechtmaschinen und Prozessparametern, die einen Hauptteil dieser Arbeit bilden, kann daher immer nur anhand einer bestimmten Art von Geflecht erfolgen. Dazu werden vier Basisgeflechte definiert, die Geflechttypen repräsentieren, die im Faserverbundbereich je nach Anforderungsprofil häufig eingesetzt werden. Sofern nicht explizit anders angegeben, werden die Untersuchungen in dieser Arbeit mit den nachfolgend beschriebenen Basisgeflechtarten durchgeführt.

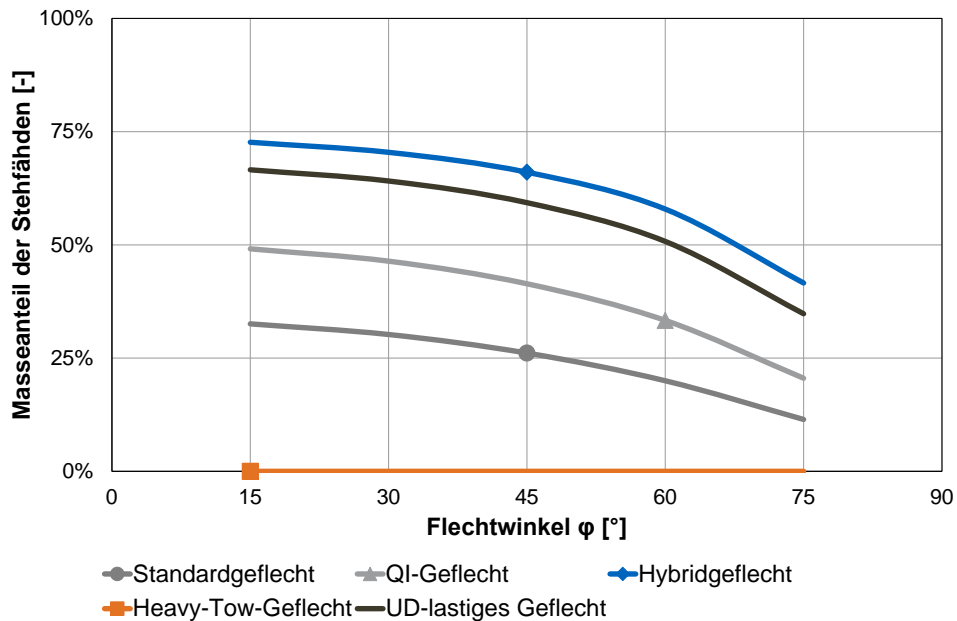
### 2.2.6.1 Standardgeflecht

Als „Standardgeflecht“ wird eine triaxiale Geflechtvariante bezeichnet, bei der die Garne aller Fadensysteme aus CF-12k bestehen. Die Flechtfäden sind im  $\pm 45^\circ$ -Flechtwinkel angeordnet (s. Abb. 2-8 a). Der Anteil der Stehfäden an der Gesamtmasse einer Lage liegt für dieses Geflechts etwa bei 26 % (s. Abb. 2-9). Sehr viele Untersuchungen von Materialkennwerten von Faserverbundgeflechtem sowie Arbeiten zum Thema Geflechtesimulation und Materialmodellierung verwenden diesen Geflechttyp.



**Abb. 2-8: Übersicht der in der Arbeit verwendeten Basisgeflechtarten**

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| a) Standardgeflecht   | (CF-12k-Flechtfäden, CF-12k-Stehfäden, $\pm 45^\circ$ ) |
| b) QI-Geflecht        | (CF-12k-Flechtfäden, CF-24k-Stehfäden, $\pm 60^\circ$ ) |
| c) Hybridgeflecht     | (GF-600-Flechtfäden, CF-50k-Stehfäden, $\pm 45^\circ$ ) |
| d) Heavy-Tow-Geflecht | (CF-50k-Flechtfäden, $\pm 15^\circ$ )                   |



**Abb. 2-9: Massenanteil der Stehfäden für die untersuchten Basisgeflechte**

Der Anteil der Stehfäden innerhalb einer Lage ist eine Funktion des Flechtwinkels und des Geflechtaufbaus. Das Diagramm stellt den kompletten Winkelbereich von  $15^\circ - 75^\circ$  dar, in dem Geflecht produziert werden kann. Der Auslegungswinkel des jeweiligen Basisgeflechts ist auf jeder Kurve markiert. Es wurde zusätzlich eine Kurve für ein stark UD-lastiges, reines Kohlenstofffasergeflecht aus CF-12k-Flechtäden und CF-50k-Stehfäden mit in die Darstellung aufgenommen, um den nochmals höheren UD-Anteil des Hybridgeflechts zu verdeutlichen.

### 2.2.6.2 QI-Geflecht

Beim „QI-Geflecht“ besitzt jede Lage für sich quasiisotrope Eigenschaften (zur Erklärung vgl. Abschnitt a in Anhang A). Für triaxiale Geflechte kann dies mit einem  $\pm 60^\circ$ -Flechtwinkel erreicht werden, wenn die Stehfäden den doppelten Titer der Flechtäden haben. Dann weist jede der drei Garnverlaufsrichtungen den gleichen Massenanteil von 33 % innerhalb der Lage auf (s. Abb. 2-9). Bei dem für vorliegende Arbeit definierten QI-Geflecht wird diese Bedingung durch einen Aufbau mit CF-12k-Flechtäden und CF-24k-Stehfäden erfüllt (s. Abb. 2-8 b)).

Für geflochtene Automobilbauteile (z. B. Schweller, A-Säule des Lamborghini Aventador) wird oft eine in der Arbeit nicht näher betrachtete Variante dieses Geflechts eingesetzt, das aus denselben Fasertypen besteht, bei dem aber der Flechtwinkel nur  $\pm 45^\circ$  beträgt. Auf Kosten der Quereigenschaften verbessert dies die Längseigenschaften von in der Karosseriestruktur eingesetzten Profilbauteilen.

### 2.2.6.3 Hybridgeflecht

Als „Hybridgeflecht“ wird im Weiteren eine ebenfalls triaxiale Geflechtvariante bezeichnet, die bei BMW in der Serienfertigung von FVK-Profilbauteilen verwendet wird. Sie enthält einen sehr hohen Anteil an Stehfäden aus CF-50k. Als Flechtäden werden

GF-600 in  $\pm 45^\circ$ -Anordnung verwendet (s. Abb. 2-8 c). Dieser Lagenaufbau weist einen Massenanteil von etwa 70 % für die CF-Stehfäden auf (s. Abb. 2-9) und verleiht dadurch den daraus gefertigten FVK-Profilen hervorragende Längseigenschaften (vgl. hierzu die Untersuchungen von v. Reden et al. [25]).

Durch die in Querrichtung dominierenden GF mit ihrer vergleichsweise hohen Dehnfähigkeit erhält das Material im Crashfall ein höheres Energieaufnahmevermögen. Außerdem sinken durch die Verwendung günstigerer GF-Garne die Materialkosten des Geflechts im Vergleich mit Varianten, die komplett aus kostspieligen CF aufgebaut sind. In Abb. 2-9 ist eine solche als „UD-lastiges Geflecht“ bezeichnete Variante mit eingezeichnet. Aufgrund der dickeren CF-12k-Flechtäden ist der Stehfadenanteil etwas geringer als beim Hybridgeflecht.

#### 2.2.6.4 Heavy-Tow-Geflecht

Zusätzlich wird eine biaxiale Geflechtvariante (Stehfadenanteil 0 %, s. Abb. 2-9) betrachtet, bei der dicke CF-50k, die sogenannten „Heavy-Tows“, als Flechtäden zum Einsatz kommen.

Diese Art Geflecht wird von Brand [23] detailliert untersucht. Von besonderem Interesse sind bei dieser Art Geflecht Varianten mit sehr kleinen Flechtwinkeln. Diese haben ausreichend gute Längseigenschaften, so dass sie als Ersatz für hoch längsverstärkte Triaxialgeflechte (z. B. die im vorherigen Abschnitt 2.2.6.3 betrachtete Variante Hybridgeflecht) verwendet werden können. Die im Weiteren betrachtete Geflechtarchitektur weist deswegen einen Flechtwinkel von nur  $\pm 15^\circ$  auf (s. Abb. 2-8 d).

### 2.3 Anlagentechnik

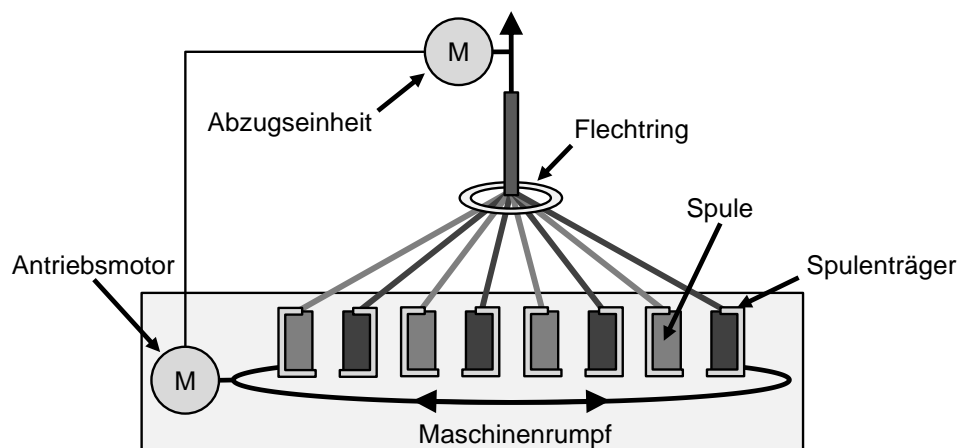
Damit sich ein Geflecht bildet, müssen die Spulen mit den Garnen in einem bestimmten Muster umeinander herumgeführt werden, um die Verkreuzung der Garne zu erreichen. Diese wickeln sich dabei von den Spulen ab und werden von einem Ring, der Flechtscholle oder Flechtring genannt wird, gebündelt. Innerhalb dieses Rings bildet sich das fertige Geflecht. Die Stelle, an der die Geflechtbildung abgeschlossen ist, also alle Fäden auf ihre finale Breite kompaktiert sind und ihre endgültige Position innerhalb des Textils erreicht haben, wird als Flechtpunkt bezeichnet. Eine Abzugsvorrichtung fördert das fertige Geflecht aus der Maschine. Die Spulenbewegung und das Fördern des Geflechts müssen in genau zueinander passenden Geschwindigkeiten erfolgen, damit der gewünschte Flechtwinkel im Produkt eingehalten wird (vgl. Abb. 2-6).

Es liegt nahe, diese Spulenbewegung entlang einer vorgegebenen und sich immer wiederholenden Bahn maschinell zu realisieren und mechanisch mit der Abzugsvorrichtung zu koppeln, so dass das Fördern des Fertigprodukts genau synchron mit der Spulenbewegung erfolgt. Abb. 2-10 stellt die Funktionseinheiten einer solchen Flechtmaschine sowie deren jeweilige Aufgaben und Interaktionen schematisch dar. Zwei verschiedene

Ansätze, wie sich das Bewegen der Spulen und das Verkreuzen der Garne konstruktiv lösen lassen, werden in heutigen Flechtmaschinen verwendet – die Klöppelflechttechnik und die Rotationsflechttechnik.

Die Entwicklung von Maschinen für die Herstellung von geflochtenen Textilerzeugnissen reicht zurück bis ins 18. Jahrhundert [26]. Um die vorletzte Jahrhundertwende, beginnend etwa ab dem Jahr 1890, sind über zahlreiche Patente weitreichende Verbesserungen der bis dahin verwendeten Anlagentechnik dokumentiert. In diese Zeit fällt auch die Entwicklung der Rotationsflechttechnik - bis dahin basierten die Maschinen ausschließlich auf verschiedenen Varianten der Klöppelflechttechnologie. In der Folge wurden beide Technologien von zumeist unterschiedlichen Firmen unabhängig voneinander weiterentwickelt. Die beiden Flechtprinzipien wurden für jeweils verschiedene Hauptanwendungsbereiche – nämlich die Faserverarbeitung im Fall der Klöppelflechttechnik und die Drahtverarbeitung für die Rotationsflechttechnik – weiter optimiert.

Die Trennung der beiden Bereiche führte so weit, dass im Buch „Die Flechterei“ [27] von 1914, das im Vorwort den Anspruch erhebt, „die gesamte Flechterei“ zu behandeln, die Rotationsflechttechnik überhaupt nicht erwähnt ist, obwohl diese zu jener Zeit ebenfalls bereits hoch entwickelt und in weiten Industriebereichen in Anwendung war. Diese schon damals erkennbare, getrennte Entwicklung der beiden Technologien hat Auswirkungen bis zum heutigen Tag. Dies wird unter anderem daran deutlich, dass in der Faserverbundkunststoffindustrie mit ihrem vielfach durch die Textiltechnik geprägten Hintergrund bislang ausschließlich die Klöppelflechttechnik zum Einsatz kommt.



**Abb. 2-10: Funktionseinheiten einer Flechtmaschine**

Der Maschinenrumpf gibt die Bewegungsbahn der Spulenträger vor, die vom Antriebsmotor bewegt werden. Die Spulenträger bzw. Klöppel nehmen die Spulen auf und halten das Garn unter Spannung. Die Spulen bevorraten das Garn. Der Flechtring bündelt die Flechtäden und sorgt dafür, dass sich das Geflecht an einem definierten Punkt schließt, so dass der vorgegebene Flechtwinkel eingehalten wird. Die Abzugseinheit fördert das Fertigprodukt ab. Antrieb und Abzug werden über ein Getriebe oder elektronisch synchronisiert.

Generell findet sich zur Konstruktion und zum technischen Aufbau von Flechtmaschinen vergleichsweise wenig Literatur. Das erwähnte Buch „Die Flechtereie“ von Lepperhoff [27] war über lange Jahre – zumindest im deutschsprachigen Raum – das Standardwerk und wurde bis in die 1950er Jahre mehrfach neu aufgelegt. In den 1960er Jahren übernahm das Buch „Braiding and Braiding Machinery“ von Douglass [28] diese Rolle. Eine weitere übersichtliche Darstellung von Grundlegendem zur Flechtanlagentechnik bietet das Paper von Branscomb et. al. [29]. Erst in jüngster Zeit ist mit dem Buch „Braiding technology for textiles“ von Kyosev [4] wieder eine aktuelle Zusammenfassung zum Thema Flechten erschienen. Von den genannten Büchern beschäftigt sich nur Douglass vertiefend mit der Anlagentechnik von Rotationsflechtmaschinen; in den anderen Büchern wird ausschließlich die Klöppelflechtmaschinenteknik beschrieben.

Der jeweils große zeitliche Abstand des Erscheinens neuer Fachliteratur zum Thema mag erstaunen – es ist allerdings so, dass die Maschinenteknik sich seit über einem Jahrhundert nicht grundlegend geändert hat und nur in Details Entwicklungsfortschritte zu verzeichnen waren. Die Anlagen der verschiedenen Hersteller funktionieren alle nach den gleichen Grundprinzipien, eine Differenzierung ist nur über Verbesserungen von Teilaspekten des Maschinensystems möglich. So können z. B. etwas höhere Anlagengeschwindigkeit, reduzierter Verschleiß oder leicht bessere Produktqualität im Vergleich mit den Maschinen der Mitbewerber über den Verkaufserfolg entscheiden.

Aufgrund der harten Konkurrenzsituation in dieser kleinen und hoch spezialisierten Branche werden deshalb entweder selbst kleinste Weiterentwicklungen patentrechtlich geschützt oder als internes Firmenwissen geheim gehalten. Es muss daher angenommen werden, dass viel Know-how zur Flechtmaschinenteknik nie veröffentlicht wurde und nur bei den Maschinenherstellern und einem kleinen Kreis der Anwender vorhanden ist, die die Anlagentechnik mit eigenen Modifikationen verbessern und für die Fertigung ihrer jeweiligen Produkte optimieren.

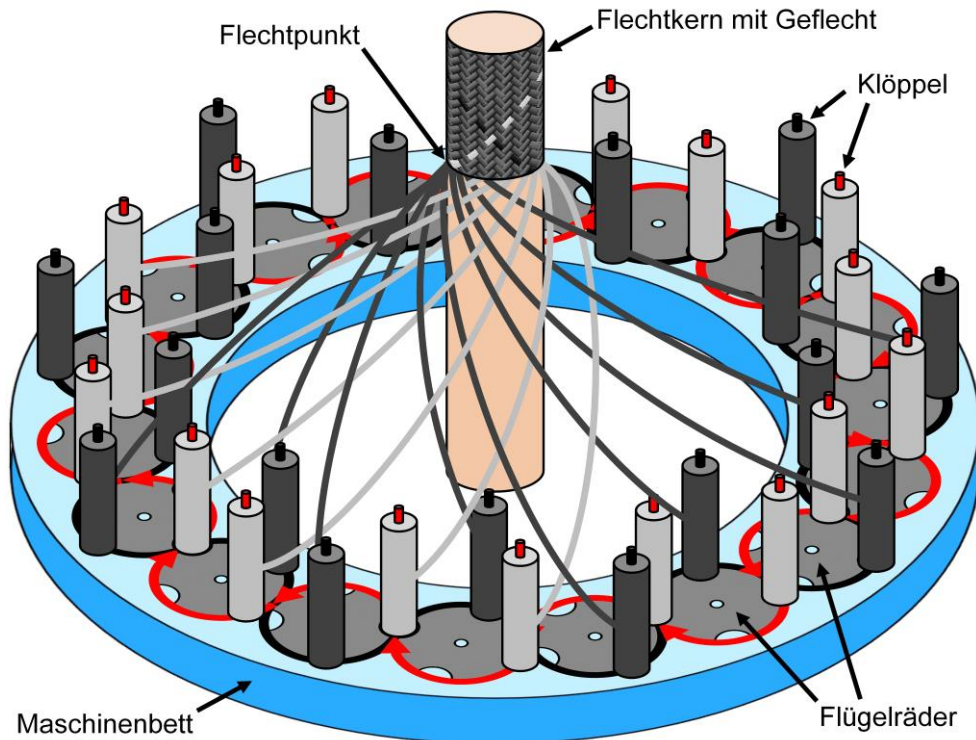
### 2.3.1 Klöppelflechttechnik

Das Prinzip der Klöppelflechttechnik kann sehr gut mit dem Tanz um den Maibaum (engl. Maypole<sup>15</sup>) veranschaulicht werden. Zwei Gruppen von Tänzern bewegen sich dabei gegenläufig im Kreis um den Baum, wobei die jeweils entgegenkommenden Tänzer der anderen Gruppe im Wechsel auf der Innen- und der Außenseite passiert werden. Das von jedem Tänzer gehaltene Band ist zu Beginn des Tanzes mit dem anderen Ende an der Spitze des Baums befestigt und wird durch die Tanzbewegung spiralförmig um den Baum gewickelt. Durch das Überkreuzen mit den Bändern der anderen Tänzer bildet sich ein Schlauchgeflecht aus den Bändern, das zum Ende des Tanzes den gesamten Baum bedeckt.

---

<sup>15</sup> Daher stammt die im Englischen geläufige Bezeichnung „maypole braider“ für diese Art Maschinen.





**Abb. 2-11: Funktionsprinzip der Klöppelflechttechnik**

Die roten Spulenträger (hellgraues Garn) umlaufen das Flechtzentrum im Uhrzeigersinn, die schwarzen (dunkelgraues Garn) entgegengesetzt. Vereinfacht sind nicht alle Flecht-fäden dargestellt. Das Geflecht legt sich an die Oberfläche des Kerns an.

### 2.3.1.1 Konstruktive Umsetzung

In der technischen Umsetzung dieses Prinzips werden mit dem Flechtfaden bewickelte Spulen auf sogenannte Klöppel („die Tänzer“) aufgesetzt, die dann angetrieben von Flügelrädern um das Maschinenzentrum bewegt werden. Das Überkreuzen der Spulen wird dadurch erreicht, dass benachbarte Flügelräder sich in entgegengesetzte Richtung drehen und so die Klöppel durch schlangenlinienförmige und in sich selbst geschlossene Gangbahnen führen, die in die Maschinengrundplatte eingearbeitet sind. Damit die Gangbahnen in sich geschlossen sind, muss die Anzahl der Flügelräder gerade sein.

Ein Mechanismus zum Garmlängenausgleich im Klöppel sorgt dafür, dass das Garn immer gespannt bleibt, obwohl sich der Abstand zum Flechtzentrum, an dem die Fäden der einzelnen Klöppel zusammenkommen, durch die oszillierende Bewegung beim Überkreuzen ständig ändert. Abb. 2-11 verdeutlicht dieses Funktionsprinzip. Bei der im Faserverbundbereich eingesetzten Umflechttechnik legt sich das gebildete Geflecht am Flechtzentrum auf dem Kern ab, der durch das Maschinenzentrum bewegt wird. Die rote und die schwarze Linie in der Abbildung zeigen den Verlauf der beiden Klöppelbahnen für die gegenläufig um das Maschinenzentrum rotierenden Spulengruppen.

In der Mitte jedes Flügelrades sind Öffnungen angedeutet, durch die bei der Fertigung eines Triaxialgeflechts die Fäden der dritten Verlaufsrichtung zugeführt werden können,

die hier nicht dargestellt sind. Die Flechtfäden verlaufen um diese herum und binden sie innerhalb der Lage ein (vgl. Abb. 2-7). Die Stehfäden selbst nehmen am Flechtvorgang nicht teil und verlaufen kernparallel direkt zum Flechtpunkt. Ihre Zuführung geschieht über Rohre, die von der Maschinenrückseite durch das Maschinenbett ragen, und auf denen die Flügelräder gelagert sind. In Abb. 2-12 sind diese Stehfadenrohre in schwarz dargestellt.

### 2.3.1.2 Bauarten

Klöpfflechtmaschinen lassen sich entsprechend ihrer Klöppelausrichtung in Axial- und Radialmaschinen unterteilen. Bei axialer Bauart sind die Drehachsen der Flügelräder parallel zur Mittelachse der Maschine, also der Produktionsrichtung des Geflechts (vgl. Abb. 2-11). Bei radialer Bauart weisen sie auf den Maschinenmittelpunkt und stehen senkrecht zur Zentralachse. Die Flügelräder liegen nicht wie bei der Axialbauweise in einer Ebene, sondern stehen in einem von der Flügelradzahl abhängigen Winkel zueinander. Damit die Klöppl dennoch von Flügelrad zu Flügelrad weitergegeben werden können, haben diese die Form einer Kugelkalotte. Dieses Konzept wurde erstmalig bereits um 1920 patentiert [30]. Abb. 2-12 zeigt schematisch die Übergabe von Klöppln zwischen benachbarten Flügelrädern für beide Bauprinzipien.

Da die Klöppl auf den kalottenförmigen Flügelrädern leicht nach innen gekippt sind (s. Abb. 2-12 b), weisen sie nur exakt am Übergabepunkt gegenüber beiden benachbarten Rädern dieselbe Ausrichtung auf. Da der Klöpplfuß eine gewisse Breite besitzt, steht er schon etwas vor bzw. nach der Übergabe mit dem benachbarten Flügelrad in Kontakt. Deshalb tritt beim Übergang von einem Flügelrad zum nächsten ein leichtes „Verkanten“ auf, das erhöhten Verschleiß der Klöpplfüße zur Folge hat. Eine Maschine in Radialbauweise muss eine Mindestanzahl an Flügelrädern aufweisen, damit der Winkel zwischen benachbarten Rädern nicht so groß wird, dass eine Klöpplübergabe nicht mehr möglich ist.

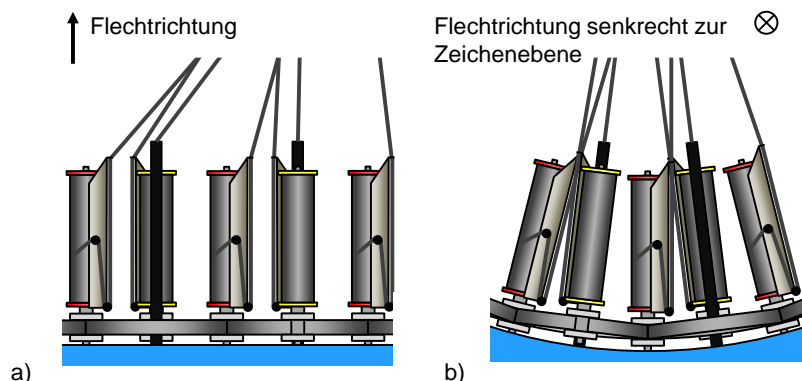


Abb. 2-12: Gestaltung der Flügelräder bei Axial- und Radialmaschinen

Eine Erhöhung des Schmiermitteleinsatzes, um die Übergabe zu erleichtern, kann bei Verarbeitung von Verstärkungsfasern nicht akzeptiert werden. Daher muss bei Radialmaschinen die Verarbeitungsgeschwindigkeit gesenkt werden. Die Flügelradrehzahl liegt etwa bei der Hälfte einer mit vergleichbar großen Klöppeln ausgestatteten Axialflechtmaschine. Durch das „gegeneinander Kippen“ der Klöppel verringert sich deren Abstand im oberen Bereich. Damit diese während des Prozesses nicht gegeneinander schlagen, muss der Durchmesser der Flügelräder vergrößert werden, weshalb Radialmaschinen einen größeren Platzbedarf haben als Axialmaschinen mit gleicher Klöppelzahl und -größe. Zusätzlich sind der Fertigungsaufwand und damit der Preis bei Radialmaschinen bedeutend höher – dennoch werden sie bei der Verarbeitung von Verstärkungsfasern verwendet.

Die von der schlangelinienförmigen Bewegung des Klöppels ausgelöste ständige Änderung des Abstands von Klöppelspitze zu Flechtpunkt bei der Axialmaschine lässt sich mit der Radialbauweise praktisch vollständig eliminieren. Die Klöppel bewegen sich auf der Oberfläche einer Kugel, deren Mittelpunkt der Flechtpunkt ist. Die Relativbewegung zwischen Garn und Führungselementen im Klöppel beschränkt sich somit rein auf die durch den Garnverbrauch entstehende Komponente ohne die Garnbewegung zum Längenausgleich. Dadurch lässt sich die Schädigung der empfindlichen Verstärkungsfasergarne bedeutend vermindern.

Ein weiteres bauartliches Unterscheidungskriterium ist die Ausrichtung des Maschinenbetts bzw. der Ebene, in der die Klöppel das Anlagenzentrum umlaufen. Typischerweise werden Flechtmaschinen horizontal aufgebaut (wie beim Beispiel in Abb. 2-11). Die Antriebsmechanik kann dann in einem Ölbad unterhalb der Maschinenfundplatte laufen, so dass zu jedem Zeitpunkt ausreichende Schmierung der Zahnräder sichergestellt ist. Wird hingegen eine vertikale Maschinenausrichtung gewählt, muss für die Schmierung der oben befindlichen Antriebsräder besondere Sorge getragen werden. Es wird zumeist mit Haftschmierstoffen gearbeitet, die nicht aus dem Maschinenrumpf austreten und nach unten tropfen, da eine Verunreinigung des Produkts mit Schmiermittel nicht erfolgen darf. Im Faserverbundbereich hätte dies sogar ein Ausschussbauteil zur Folge.

Der große Vorteil der vertikalen Maschinenausrichtung ist, dass vor bzw. hinter der Maschine sehr einfach zusätzlicher Platz zur Verfügung gestellt werden kann, wohingegen beim horizontalen Maschinenkonzept das Schaffen von Freiraum ober- und unterhalb nur mit einer höheren Produktionshalle möglich ist. Sollen Kerne durch das Maschinenzentrum bewegt werden, wird je eine Kernlänge Platz auf beiden Seiten des Flechtpunkts benötigt. Daher sind Umflechtmaschinen zur Preformherstellung im Faserverbundbereich (s. Abschnitt 2.4.1) zumeist in vertikaler Bauweise ausgeführt. Ein Nachteil der vertikalen Bauweise ist, dass durch den Schwerkrafteinfluss die Garne oben und unten in der Maschine unterschiedlich stark gespannt werden, wodurch es sogar bei kreisrunden Profilquerschnitten zu ungleichmäßigen Flechtwinkeln in Bauteilumfangsrichtung kommt. Diese Effekte werden in den Arbeiten von Brand [23] und von Reden [14] genauer untersucht.

### 2.3.1.3 Klassische Einsatzbereiche

Klöpplflechtmaschinen werden hauptsächlich in der Textilindustrie für die Verarbeitung aller Arten von Kunststofffasern zur Herstellung von Seilen, Schläuchen, Tauwerk und Litzen eingesetzt. Typische Produkte reichen von sehr dünnen chirurgischen Nähfäden, über Seile aus dem Kletter- und Segelsportbereich bis hin zu massiven Tauen für die Verankerung von Offshore-Plattformen.

### 2.3.2 Rotationsflechttechnik

Den Anstoß für die Entwicklung der Rotationsflechttechnik gab zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Erkenntnis, dass sich die Geschwindigkeit der bekannten Klöpplflechtmaschinen aufgrund der oszillierenden Klöppelbewegung nicht bedeutend steigern lassen würde. Es wurde also nach einem Konstruktionsprinzip für Flechtmaschinen gesucht, bei dem die Spulen gleichmäßig um das Flechtzentrum rotieren. Diese damals entwickelte Rotationsflechttechnik erlaubt erheblich höhere Fertigungsgeschwindigkeiten und wird daher auch Hochgeschwindigkeitsflechttechnik<sup>16</sup> genannt.

Um das Funktionsprinzip der Rotationsflechttechnik zu veranschaulichen, soll eine abgewandelte Form des Tanzes um den Maibaum als Vergleich herangezogen werden. Weiterhin bewegen sich die zwei Gruppen von Tänzern gegenläufig um den Baum, allerdings auf einer inneren und einer äußeren Kreisbahn, ohne dass die Positionen gewechselt werden. Damit sich aus den von den Tänzern gehaltenen Bändern dennoch ein Geflecht bildet, das sich um den Baum im Zentrum schließt, passieren die Tänzer des inneren Kreises die Bänder der Tänzer des Außenkreises jeweils abwechselnd ober- bzw. unterhalb. Sie springen über ein entgegenkommendes Band und tauchen unter dem nächsten hindurch.

Es wird bereits die zentrale Herausforderung in der Umsetzung dieser Variante in Form einer Maschine deutlich: Die Tänzer der inneren Bahn verlieren zwischenzeitlich den Kontakt zum Boden. Die Garnspulen können also nicht an allen Punkten ihrer Bahn direkten Kontakt zum Maschinenbett haben, da das von außen kommende Band unter ihnen hindurchgeführt werden muss.

#### 2.3.2.1 Konstruktive Umsetzung

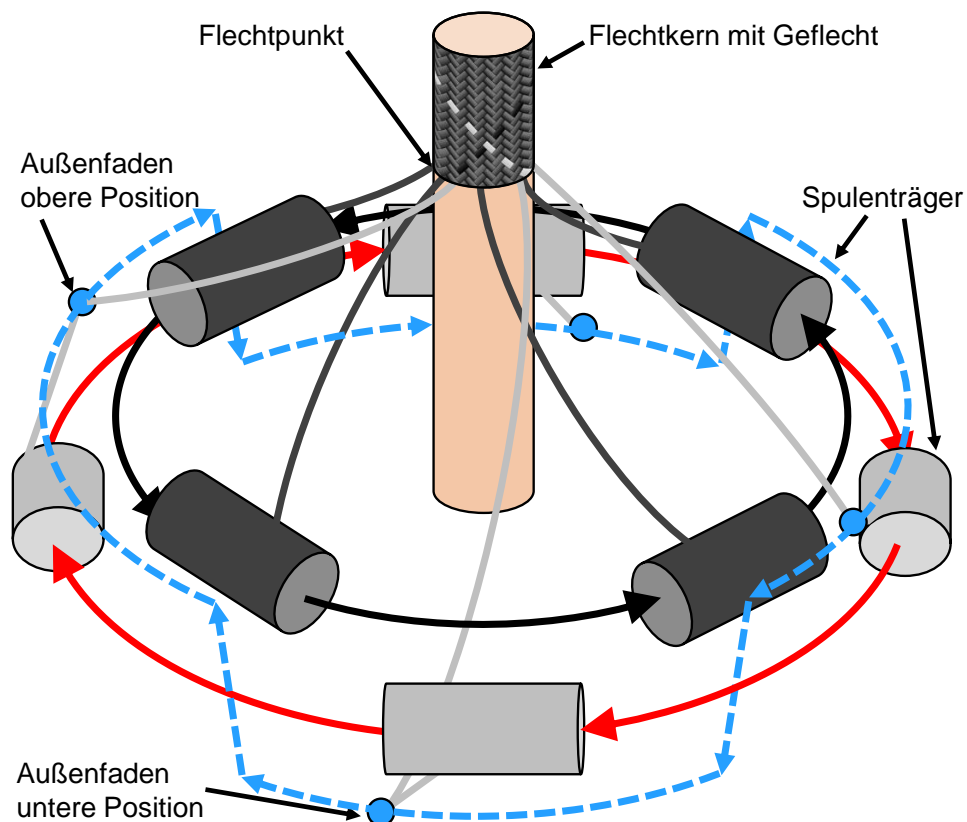
Bei der Rotationsflechttechnik bewegen sich die zwei Gruppen von Spulenträgern, auf denen das Garn bevorratet ist, jeweils auf einer Kreisbahn gegenläufig um das Flechtzentrum (s. Abb. 2-13). Die beiden Bahnen sind so angeordnet, dass das Garn von den Spulenträgern der einen Umlaufrichtung – in der Abbildung schwarz dargestellt – direkt zum Flechtzentrum abgezogen wird. Diese Bahn wird im Weiteren als „innere“ Bahn be-

---

<sup>16</sup> engl. high speed braiding

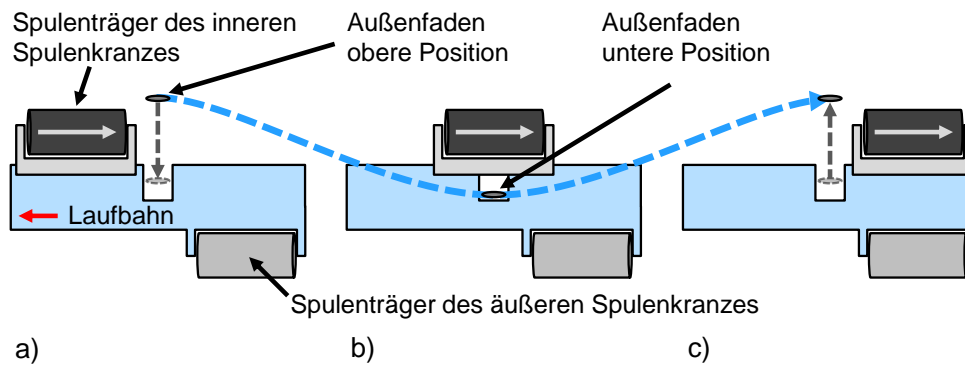
zeichnet. Das von den Spulen der anderen – hier „äußeren“ genannten und rot dargestellten – Bahn kommende Garn muss nun abwechselnd ober- bzw. unterhalb der auf der inneren Bahn entgegenkommenden Spulen vorbeigeführt werden, um die Abbindung des Geflechts zu erreichen.

Anhand der blau gestrichelten Verlegebahn ist dargestellt, dass der von den äußeren Spulen kommende Faden im Verlauf einer Umkreisung des Maschinenzentrums mehrfach von der unteren in die obere Position wechselt, so dass die inneren Spulen unter- bzw. oberhalb passieren können. Der Wechsel der Position muss nicht nach jedem Passieren einer Spule der anderen Laufrichtung erfolgen; es können auch mehrere hintereinander passiert werden. So kann die Bindungsart des Geflechts beeinflusst werden – allerdings wird dies beim Bau der Maschine festgelegt und kann dann nicht mehr geändert werden. Die Ansteuerung des Fadens wird mit Hilfe einer sogenannten Verlegeeinheit realisiert, die in der Abbildung nicht dargestellt ist, da ihre konstruktive Umsetzung je nach Bauprinzip der Maschine unterschiedlich ist. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um relativ starre Garnführungsbleche, die Deflektoren genannt werden. In anderen Fällen wird das Garn über eine mechanische Verlegung aktiv bewegt.



**Abb. 2-13: Funktionsprinzip der Hochgeschwindigkeitsflechttechnik**

Die Spulenträger mit dem hellgrauen Garn umlaufen das Flechtzentrum auf der rot markierten Bahn im Uhrzeigersinn, die mit dem dunkelgrauen Garn entgegengesetzt auf der schwarzen Bahn. Die blau gestrichelte Linie verdeutlicht die Auf- und Ab-Bewegung des von den äußeren Spulen kommenden Garns.



**Abb. 2-14: Schematische Darstellung der Garnverlegung**

Die Abbildung zeigt einen Abschnitt der Laufbahn der inneren Spulen an drei aufeinander folgenden Zeitpunkten mit Blickrichtung entlang eines Garns des äußeren Spulenkranzes. Die Perspektive des Betrachters bewegt sich in der Darstellung mit der Laufbahn.

- Das Garn senkt sich vor dem herannahenden Spulenträger in die Laufbahn.
- Der Spulenträger des inneren Spulenkranzes überfährt das abgeseckte Garn.
- Vor Ankunft des nächsten Spulenträgers bewegt sich das Garn in die obere Position.

Damit das Funktionsprinzip der Maschine besser dargestellt werden kann, sind in Abb. 2-13 die Laufbahnen der Spulen nicht dargestellt. Da das Garn unter den inneren Spulen hindurchgeführt werden muss, stellt deren Lagerung auf ihrer Laufbahn eine weitere maschinenbauliche Herausforderung dar. In der Vergangenheit wurden verschiedenste Konzepte zur Lösung dieses Problems vorgeschlagen. Sie reichen von einem einfachen „Überrollen“, bei dem die innere Spule auf Rollen geführt und das Garn zwischen diesen und der Laufbahn kurzfristig geklemmt wird, bis hin zu Varianten mit Aussparungen in der Bahn, in die das Garn während des Vorbeiführens der inneren Spule abtaucht. Abb. 2-14 veranschaulicht dieses Konstruktionsprinzip.

Die Spulen des äußeren Spulenkranzes, die in der Abbildung hellgrau dargestellt sind, dürfen ihre Position gegenüber den Schlitzen in der Laufbahn nicht ändern, da sonst das Garn nicht prozesssicher hindurchgeführt werden könnte. Die komplette Laufbahn mit den daran befestigten Außenspulen dreht sich deswegen in einer Richtung um das Flechtzentrum (roter Geschwindigkeitspfeil). Damit die Spulen des inneren Spulenkranzes sich gegenläufig ebenfalls um das Zentrum bewegen, muss ihre Vorschubgeschwindigkeit gegenüber der Laufbahn doppelt so hoch wie die Drehgeschwindigkeit der Bahn sein (hellgrauer Geschwindigkeitspfeil).

### 2.3.2.2 Bauarten

Allen bekannten Konstruktionsformen von Schnellflechtmaschinen ist gemein, dass sie mit massiven, sich auf einer zentralen Achse drehenden Rotoren ausgestattet sind, die die Spulen tragen und antreiben. Über Getriebe sind die Rotoren bzw. die Vorschubrollen für die Spulenträger so miteinander gekoppelt, dass sie zueinander jeweils die richtigen Geschwindigkeiten aufweisen. Die Zentralachse ist in der Regel hohl, so dass ein Kern (z. B. ein Kabel) hindurchgeführt und mit dem Geflecht ummantelt werden kann.

Bei der Gestaltung der Rotoren und vor allem der Verlegeeinheit, die das Verkreuzen der Flechtfäden von innerem und äußerem Spulenkranz ermöglicht, gibt es hingegen bedeutende Unterschiede. Zumeist wird das Fadenstellglied per Hebel über eine Kurvenbahn angesteuert, aber auch Pleuel oder rotierende Stellhebel werden eingesetzt. Sogar eine elektromagnetische Garnverlegung wurde bereits um 1915 untersucht [31].

Douglass unterscheidet in seinem Buch [28] die Schnellflechtmaschinen anhand ihrer Bauarten und benennt diese nach den jeweiligen Erfindern bzw. Produzenten, unter deren Namen die jeweilige Bauart im Markt bekannt ist. Die vorliegende Arbeit orientiert sich an dieser Einteilung, setzt allerdings abweichende Schwerpunkte. Während bei Douglass die Anlagentechnik der Deflektorflechtmaschinen (System „Wardwell“) am ausführlichsten behandelt wird, nimmt hier die Hebelarmflechttechnologie (System „Horn“) die wichtigste Stellung ein, da Anlagen dieses Typs bei den Versuchen (s. Kapitel 5) verwendet werden. Des Weiteren basieren auch die Berechnung der Produktivität (s. Kapitel 6) und die Vorschläge zur Weiterentwicklung des Maschinendesigns für Faserverbundanwendungen auf Anlagen nach dem System Horn.

Nachfolgend werden die verschiedenen Bauarten anhand der zu Grunde liegenden Patente dargestellt und mit beispielhaften Abbildungen ergänzt. Manche Maschinentypen werden aktuell kaum noch eingesetzt, andere finden sich bis heute im Angebot der Hersteller.

### **Flechtmaschine mit Treibrollenantrieb (System „Tober“)**

Das System „Tober“ mit rollender Spulenführung [32] wird im Buch von Douglass recht ausführlich dargestellt, findet sich aber nach Kenntnis des Autors heute nicht mehr in Produktion. Das Maschinensystem wird dennoch erwähnt, da die Garnverlegung bereits über einen mit Federkraft gespannten und per Nutkurve angesteuerten Hebel erfolgt. Maschinen dieser Bauart sind damit ein wichtiger Vorläufer der bis heute im Einsatz befindlichen Hebelarmflechtmaschinen nach dem System Horn.

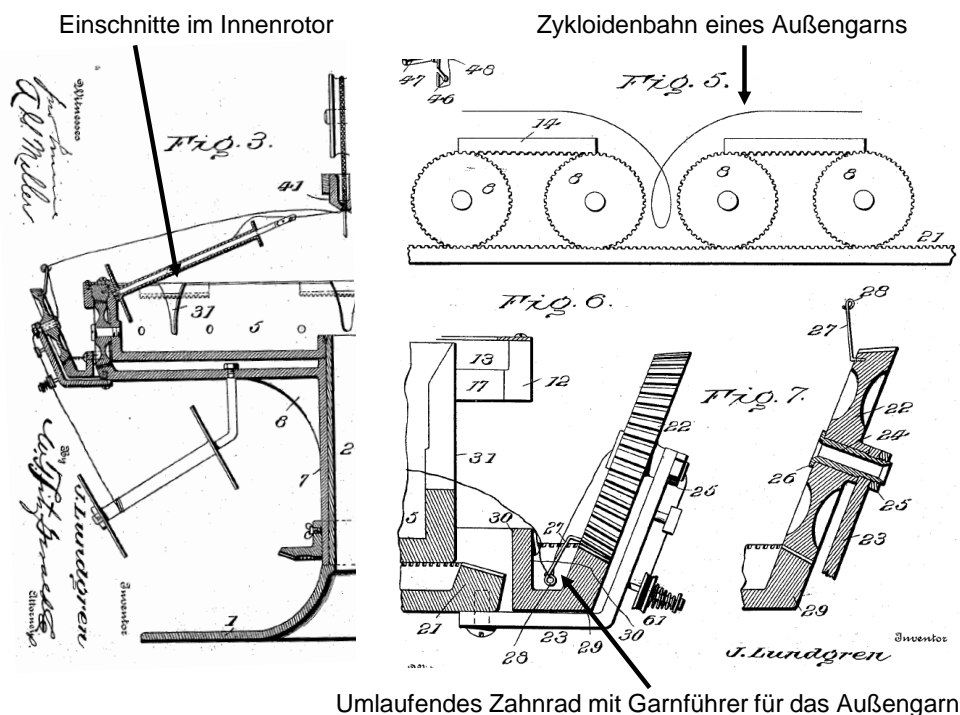
Carl Tober selbst gibt an, dass die Position der verlegten Garne mit dieser Konstruktion nicht genau genug kontrolliert werden kann, um mit einer gekerbten Treibrolle für die Innenspulen zu arbeiten. Er schreibt, es sei: *"... wegen unvermeidlicher Differenzen in der Fadenlage [...] nicht zu vermeiden, daß [sic!] sich der Faden auch neben die Aussparung legt."* [33]. Seine Lösung sieht daher vor, dass die von den Außenspulen kommenden Garne direkt überrollt werden. Um dies möglichst materialschonend zu gestalten, sind die Rollen mit einer Beschichtung aus Gummi oder Leder versehen. Weil aber durch die Garnklemmung beim Überrollen die gleichmäßige Bewegung des Garns zum Flechtunkt immer wieder blockiert wird, ist dieses System mutmaßlich mit starker Schädigung der verarbeiteten Garne und ungleichmäßiger Geflechtbildung verbunden. Zudem merkt Douglass an, dass die vielen Lager der Konstruktion leicht durch Filamentstaub beschädigt und blockiert werden können, was zu häufigen Ausfällen der Maschine führt. Er schreibt: *"... ball races [...] become choked with fly, thereby causing*

*frequent stoppages ...*" [28]. Mutmaßlich sind es diese Gründe, warum Maschinen des Typs Tober heute nicht mehr hergestellt werden.

## Umlaufradflechtmaschinen

Bei Umlaufradflechtmaschinen wird das von den äußeren Spulen kommende Garn über einen rotierenden Hebel geleitet und führt so eine Zykloidenbewegung aus. Am Tiefpunkt der Zykloide wird das Garn in die Laufbahn der inneren Spulen abgesenkt, so dass diese darüber passieren können. Eine frühe Beschreibung dieses Konstruktionsprinzips findet sich in einem Patent von Lundgren [34]. Dieses enthält exzellente Abbildungen, in denen alle wesentlichen Konstruktionsbestandteile gut erkennbar dargestellt sind. Die Darstellungen in Abb. 2-15 sind dieser Patentschrift entnommen.

Ein Problem, das bei der Verarbeitung von Garnen auf dieser Art von Maschinen auftritt, ist, dass durch die Rotationsbewegung Drehungen in das Garnmaterial eingebracht werden. Diese sind in den vom äußeren Spulenkranz kommenden Fäden enthalten, in denen vom inneren Spulenkranz nicht. Dies führt zu ungleichen Spannungen der Garne und zu einem spiralgig verdrehten Flechtprodukt und wäre für Anwendungen im Faserverbundbereich nicht akzeptabel. Die Verarbeitung von parallel gefachten Garnen oder Bändern ist unmöglich.



Umlaufendes Zahnrad mit Garnführer für das Außengarn

### Abb. 2-15: Funktionsprinzip der Umlaufradflechtmaschine aus [34]

Der linke Teil der Abbildung (Fig. 3) zeigt die Hälfte eines Schnitts durch die Maschine. Die beiden Rotoren und die Positionen der Spulen sind gut zu erkennen. Rechts sind das namensgebende Umlaufrad (Fig. 6 und 7) mit der Garnführung und die dadurch beschriebene Zykloidenbahn des Außengarns (Fig. 5) im Detail dargestellt.



Anlagen dieses Typs finden sich bis heute im Verkaufsprogramm der Maschinenhersteller<sup>17</sup>; auch werden weiterhin Verbesserungen am Funktionsprinzip der Maschinen vorgenommen und patentiert. So sind z. B. in [35] Umlaufräder mit großem Mittendurchbruch beschrieben, durch den die starke Umlenkung und resultierende Beschädigung der Garne beim Durchtritt durch das Führungsrad minimiert werden soll. Mutmaßlich werden Maschinen dieses Typs in eher geringen Stückzahlen produziert.

### Deflektorflechtmaschinen (System „Wardwell“)

Frühe Vorläuferformen einer Flechtmaschine nach dem System Wardwell sind durch Patentschriften in den USA bereits etwa ab dem Jahr 1890 dokumentiert [36]. Mit der von Simon Wardwell um 1910 entwickelten und patentierten Rotationsflechtmaschine [37, 38] gelang allerdings ein maschinenbaulicher Durchbruch, so dass sich Maschinen dieser Bauart auch wirtschaftlich langfristig am Markt durchsetzen konnten. Douglass liefert in seinem Buch [28] eine Beschreibung des Funktionsprinzips dieser Maschinen und gibt ausführliche Hinweise zu Betrieb, Wartung und Fehlerbeseitigung.

Zur Ablenkung der von außen kommenden Flechtfäden werden bei Wardwell sogenannte Deflektoren eingesetzt. Die Träger der Spulen des Innenkranzes sind mit schiffchenförmigen Leitblechen versehen, die das jeweils entgegenkommende Außengarn einmal unter- und einmal oberhalb der Innenspule vorbeileiten (s. Abb. 2-16).

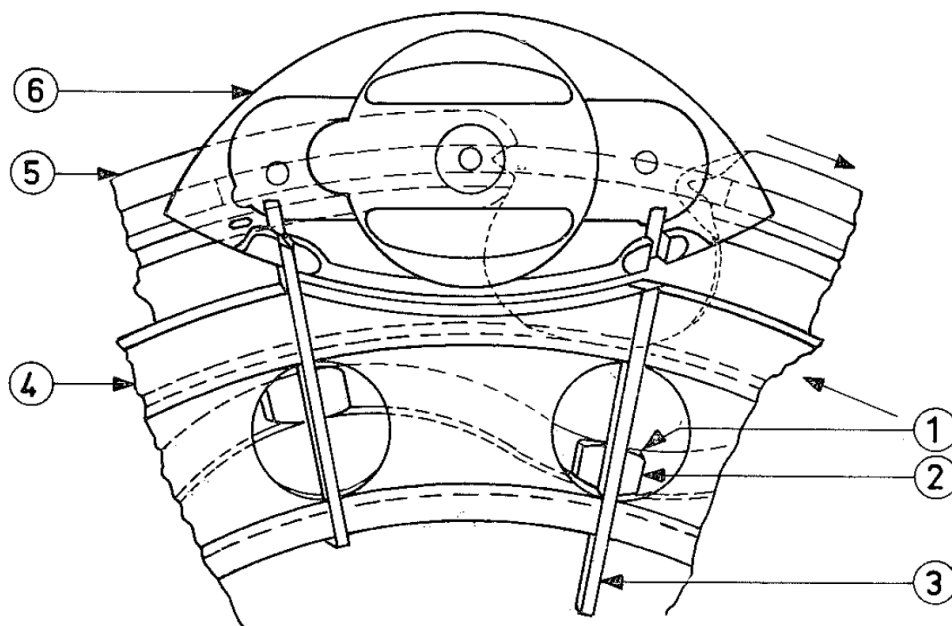


Abb. 2-16: Prinzip der Garnverlegung bei Wardwell-Maschinen aus [28]

<sup>17</sup> z. B. als Typ C der Spirka Schnellflechter GmbH

Die Spulenträger mit den Ablenkblechen (6) werden über Mitnehmerstifte (3) auf der Gleitbahn (5) nach links transportiert. Der Antrieb erfolgt über die Drehung des Rotors (4). Pro Spulenträger gibt es zwei Mitnehmerstifte, die über einen Gleitschuh (2) in einer Kurvenbahn auf-und-ab-bewegt werden. Es befindet sich so immer zumindest ein Mitnehmer im Eingriff am Spulenträger, der andere ist zurückgezogen und gibt einen schmalen Spalt zwischen der Deflektorplatte und dem Rotor frei. Durch diesen kann das Außengarn unter dem Spulenträger hindurchgeführt werden. Die Auslenkung des Garns erfolgt über die Kanten der Deflektorplatte. Bei der Auslenkung nach unten taucht das Garn in eine Vertiefung der Bahn ein, die gestrichelt dargestellt ist.

Da das Garn direkt über die Kanten der Deflektorplatte gleitet, darf diese keinesfalls beschädigt werden – das Garn könnte an rauen Stellen oder Riefen sonst reißen. Aber auch bei einwandfreiem Zustand der Gleitkante stellt dieser Vorgang eine hohe Belastung für das Garn dar, wodurch die Verarbeitung querdruckempfindlicher, spröder Materialien auf dieser Art von Maschinen schwierig ist. Zusätzlich ist ein Mechanismus zum Garmlängenausgleich an den Außenspulen notwendig, da sich die Weglänge des Garns zum Flechtpunkt durch die Auslenkung an der Deflektorplatte periodisch ändert.

Deflektorflechtmaschinen (DFM) stammen aus den USA und werden dort bis heute weiterentwickelt, hergestellt und vornehmlich verwendet. So wurde zuletzt zum Beispiel die Entwicklung eines aktiv angetriebenen Garnliefersystems für die Außenspulen bekannt, das die durch die Deflektion entstehenden Spannungsspitzen im Garn reduzieren soll. Dies könnte künftig auch die Verarbeitung von empfindlicheren Garnmaterialien auf Wardwell-Maschinen ermöglichen [39]. Hinsichtlich der Flechtgeschwindigkeit, der Anlagenkomplexität und der Anschaffungskosten sind sie im Mittelfeld einzuordnen.

### **Hebelarmflechtmaschinen (System „Horn“)**

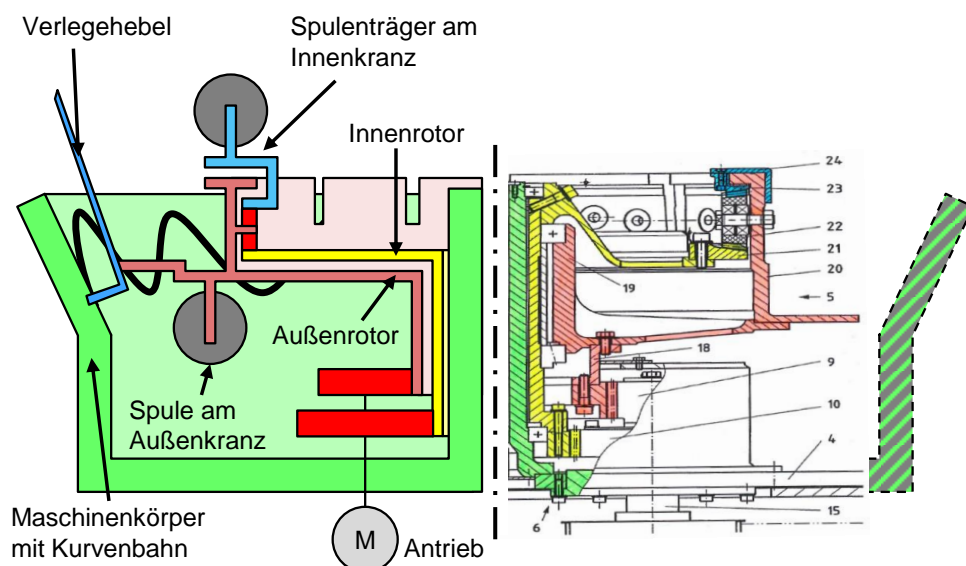
Um das Jahr 1920 konstruierten auch in Europa verschiedene Hersteller Maschinen nach dem Rotationsflechtprinzip und entwickelten sie maßgeblich weiter. Einer der führenden Köpfe war Guido Horn aus Weißensee bei Berlin. Obwohl auch im Fall seiner Entwicklung ähnliche Maschinen bereits bekannt waren (z. B. [40]), gelangen Horn entscheidende Verbesserungen der Konstruktion. Douglass schreibt ihm die Erfindung des Flechtmaschinentyps zu, der heute unter dem Begriff Hebelarmflechtmaschine (HFM) bekannt ist (er schreibt: "*... is probably the original high speed rotary braider and seems to be of German origin.*" [28]). Bis heute sind diese Maschinen eher in Europa verbreitet.

Bei dieser Art von Maschine werden die Außengarne über Umlenkhebel geführt, die während der Umkreisung des Zentrums periodische Auf-und-ab-Bewegungen ausführen. Immer wenn der Hebel mit dem darüber geführten äußeren Garn sich am Hochpunkt befindet, kann ein in Gegenrichtung kreisender innerer Spulenträger unter dem Garn hindurchgleiten. Im Anschluss bewegt sich der Hebel in seine untere Stellung, und das Garn wird in eine Einkerbung in der inneren Führungsbahn abgesenkt, bevor der nachfolgende innere Spulenträger dort ankommt, so dass er anschließend darüber hinweggleiten kann. Auf diese Weise wird die Abbindung der Garnsysteme erreicht.

Die entscheidende Verbesserung, die Horn einführt, scheint der feststehende Nutkurvenring zu sein, mit dem der Verlegehebel angesteuert wird. Der Verlegehebel für das Außengarn ist dabei so geformt, dass die Hebelspitze sich auf einer um den Flechtpunkt aufgespannten, gedachten Kugeloberfläche bewegt. Die über den Hebel geführten Garne haben so zum Flechtpunkt immer dieselbe Weglänge zurückzulegen, weshalb in der Maschine keine Garnlängenkompensation benötigt wird.

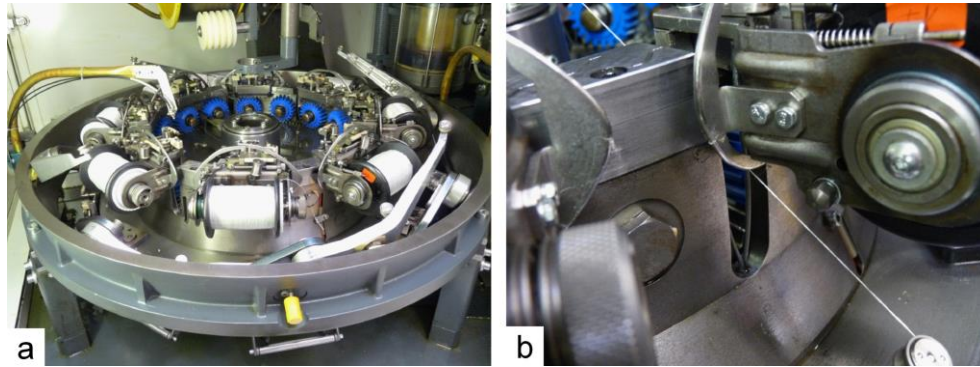
Abb. 2-17 zeigt die Funktionseinheiten einer Hebelarmflechtmaschine des Typs Horn. Die Grafik stellt ein Schema der Funktionseinheiten (links) einem Schnitt durch eine reale Maschinenkonstruktion aus der Offenlegungsschrift einer Schutzrechtsanmeldung (rechts) gegenüber. Ähnliche Farben heben die jeweiligen Bauelemente im rechten Teil der Abbildung hervor, die aufgrund der verschiedenen Lager und des komplexen Aufbaus der Rotoren aus einzelnen Bauelementen sonst nur schwer zu identifizieren sind.

Auf eine zentrale Achse (grün) werden zwei Rotoren aufgesetzt, der Innenrotor (gelb) und der Außenrotor (hellrot). Beide werden über einen Antriebsmotor in derselben Richtung gedreht – allerdings mit unterschiedlichen und aufeinander abgestimmten Geschwindigkeiten. Dies wird an den verschiedenen großen Zahnrädern für den Antrieb (rot) deutlich. Der Außenrotor trägt die äußeren Spulen; jeder ist jeweils ein Verlegehebel (blau) zugeordnet, der drehbar am Außenrotor gelagert ist. Gleichzeitig stellt dieser Rotor die Gleitbahn für die Spulenträger des inneren Spulenkranzes dar (ebenfalls in blau). Der Außenrotor enthält auch die Gleitbahneinschnitte, in die die Außengarne abgesenkt werden können (vgl. Abb. 2-14).



**Abb. 2-17: Aufbau einer Hebelarmflechtmaschine im Schnitt**

Der linke Teil der Abbildung stellt die Funktionseinheiten einer Hebelarmflechtmaschine schematisch dar. Rechts ist die reale Konstruktion einer solchen Maschine gezeigt. Die Funktionseinheiten sind in ähnlichen Farben hervorgehoben. Der Kurvenring, die Spulen und der Verlegehebel sind nicht dargestellt. Rechte Darstellung entnommen aus [41].



**Abb. 2-18: Hebelarmflechtmaschine "System Horn"**

- a) Maschine mit 16 Spulen. In blau sind die Zahnräder zum Antrieb der Spulenträger zu erkennen. Vier Hebel befinden sich im Hochpunkt der Bewegung; die anderen vier sind abgesenkt und nicht zu sehen.
- b) Detailansicht des Einschnitts in die Laufbahn mit darin abgesenktem Garn.

Der Verlegehebel greift mit einem Gleitelement in die Führungsnut des Kurvenrings ein. Die Nut ist als schwarze sinusförmige Linie in der Abbildung angedeutet. Der Ring ist ebenfalls feststehend montiert und kann mit der Zentralachse verbunden sein. Durch die Drehung des Außenrotors wird das Gleitelement des Hebels durch die Führungsnut geschoben und dieser dadurch auf-und-ab-bewegt (Abb. 2-18 a)). Der Verlauf der Nut gibt vor, wie oft der Hebel während eines Umlaufs seine Position ändert. So wird das Abbindeungsmuster des Geflechts eingestellt. Da der Hebel und die Gleitbahn mit den Einschnitten beide am Außenrotor fixiert sind, treten keine Positionierungsprobleme auf, und das Garn wird immer exakt in den jeweiligen Einschnitt abgesenkt (Abb. 2-18 b)).

Damit sich die Spulenträger des inneren Spulenkranzes gegenläufig um das Maschinenzentrum bewegen, werden diese über am Außenrotor gelagerte Zahnräder in die Gegenrichtung geschoben. Angetrieben werden diese durch eine Ringverzahnung am Innenrotor, der sich doppelt so schnell dreht wie der Außenrotor, so dass die Spulen mit betragsmäßig gleich großer Geschwindigkeit entgegen der Drehbewegung der Gleitbahn um das Flechtzentrum kreisen. Durch dieses Konstruktionsprinzip kommt eine Relativgeschwindigkeit zwischen Spulenschlitten und Gleitbahn zustande, die doppelt so hoch ist wie die Geschwindigkeit der Gleitbahn selbst.

Die prinzipielle Funktionsweise dieser Art von Maschinen hat sich seit ihrer Erfindung nicht maßgeblich verändert, es wurden allerdings in verschiedenen Details Verbesserungen vorgenommen, um die Leistungsfähigkeit der Maschinen zu steigern. Damit die Maschine hohe Drehzahlen erreichen kann, ist für die Gleitbewegung der Spulenschlitten auf der Führungsbahn eine sehr gute Schmierung notwendig, die in jüngerer Zeit durch verschiedene Maßnahmen bei gleichzeitiger Senkung des Schmierstoffbedarfs verbessert wurde [42, 43]. In modernen Anlagen wird z. B. mit Schmiermittelkanälen in den Rotoren gearbeitet, durch die Öl auf der Gleitbahn austritt. Für Anwendungen, bei denen keine Schmierstoffkontamination auf dem Produkt zugelassen ist (wie es z. B. bei

Faserverbundanwendungen der Fall wäre), wurde zuletzt ein anderes Konzept zur Lagerung der Spulenschlitten über eine Rollenbahnführung patentiert [44]. Diese arbeitet mit Kunststoffrollen und gekapselten Lagern, so dass sich der Schmierstoffeinsatz bedeutend reduzieren lässt.

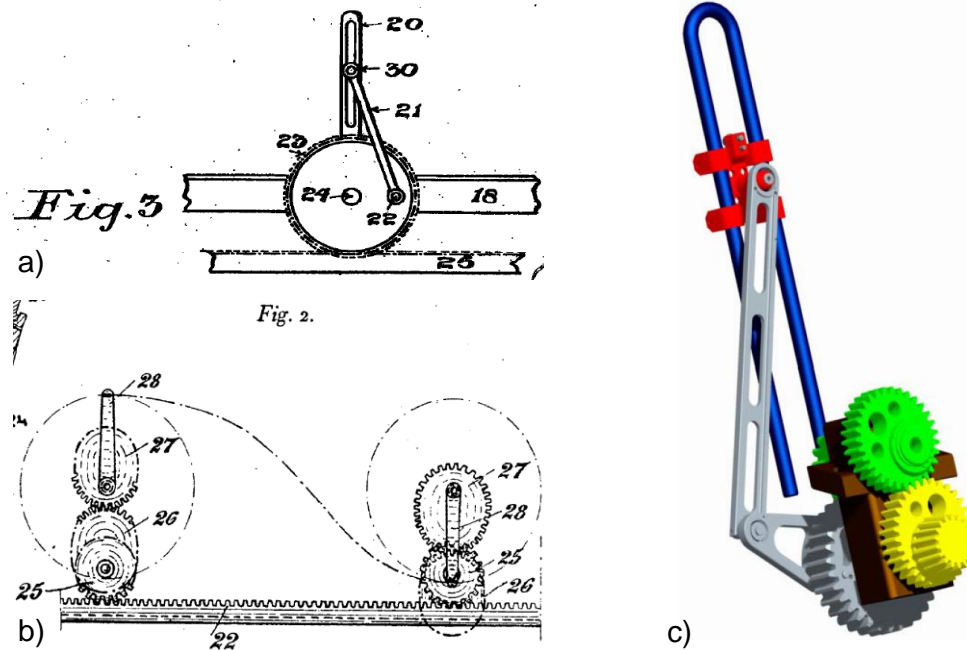
Ein weiterer limitierender Aspekt für die Maschinengeschwindigkeit sind die dynamischen Lasten, die auf den Umlenkhebel wirken. Bei einer Maschine mit 16 Spulen, die mit einer Drehzahl von 180 Umdrehungen pro Minute betrieben wird, muss der Hebel sechs Auf-und-ab-Bewegungen je Sekunde ausführen. Um die Hebelmasse für gutes Beschleunigungsverhalten möglichst gering zu halten und gleichzeitig die für genaue Garnverlegung notwendige Steifigkeit sicherzustellen, werden in modernen Anlagen teilweise Hebel aus CFK eingesetzt [45]. Weitere aktuelle Arbeiten zur Verbesserung der Maschinen befassen sich zum Beispiel mit der Integration von Prozessüberwachungstechnik. Garnbrüche oder Leerspulen werden auch bei den hohen Verarbeitungsgeschwindigkeiten erkannt, bei denen dies mit visueller Kontrolle durch einen Bediener nicht mehr möglich ist [46].

Schnellflechtmaschinen nach dem System Horn erreichen derzeit die höchste Verarbeitungsgeschwindigkeit. Gleichzeitig ermöglichen sie dadurch, dass keine Garmlängenkompensation stattfinden muss, die genaueste Kontrolle der Fadenspannung und damit eine exzellente Qualität des Flechtguts. Der Nachteil ist der hohe Preis der Maschinen.

### **Pleueflechtmaschinen (System „Denninger“)**

Erst kürzlich wurden Arbeiten bekannt, in denen die Entwicklung eines Verlegesystems wieder aufgegriffen wird, das ebenfalls bereits um 1920 entwickelt wurde. Ein Patent von Jones aus England zeigt ein Fadenstellglied für eine Rotationsflechtmaschine, das mittels eines Pleuels auf-und-ab-bewegt wird [47] (s. Abb. 2-19 a)). Horn schlägt in [48] eine Zahnradanordnung vor, um die Winkelgeschwindigkeit der Garnverlegung bei einer Umlaufradflechtmaschine zu beeinflussen (s. Abb. 2-19 b)). Bei dieser Verlegevariante wird aber durch das Rotieren des Fadenverlegearms dem Garn eine Drehung aufgeprägt. Die Ideen wurden von Denninger aufgegriffen, der das System von Unrundzahnradern als Vorschaltgetriebe zum Antrieb eines Pleuels einsetzt, um damit ein Fadenstellglied zu bewegen [49, 50] (s. Abb. 2-19 c)).

Das Fadenstellglied verweilt so länger nahe der oberen bzw. unteren Endlage, bevor schneller als beim Pleuelantrieb über runde Zahnräder die Position gewechselt wird. So gelingt es, die Verlegekurve einer Hebelarmflechtmaschine, die über die Gestaltung der Nutkurve vorgegeben wird, abzubilden. Im Vergleich mit der Schnellflechttechnik nach dem System Horn sollen durch die Optimierung der Verlegekurve der Außengarne mit der Pleueflechtmaschine noch höhere Fertigungsgeschwindigkeiten erreicht werden.



**Abb. 2-19: Entwicklungsschritte der Pleueflechtmaschine**

- a) Pleuelgesteuerte Garnverlegung aus dem Patent von Jones [47]
- b) Unrundzahnradanordnung aus dem Patent von Horn [48]
- c) Vorschaltgetriebegetriebene Pleuelverlegung von Denninger aus [49]

Durch die Verwendung des Pleuels tritt bei der Garnverlegung keine Verdrehung des Außengarns auf, was einen Vorteil gegenüber der Umlaufradflechttechnik darstellt. Es wird allerdings der große Vorteil der Hebelarmflechttechnik aufgegeben: Die Weglänge des Garns von der Spule bis zum Flechtspunkt ändert sich. Daher ist bei dieser Art von Flechtmaschine die Verwendung einer Fadenlängenkompensation notwendig. Dies geht beim Einsatz von Verstärkungsfasergarnen in der Regel mit starker Garnschädigung einher. Dies gilt umso mehr, wenn der Garnlängenausgleich bei den angestrebten hohen Verarbeitungsgeschwindigkeiten besonders schnell erfolgt. Mit hohen Spannungsspitzen im Garn, die zum Riss führen können, ist daher zu rechnen. Bei der Klöppelflechttechnik hat genau der Wunsch, die Garnlängenänderung zu eliminieren, zur Entwicklung der Radialflechtmaschinen geführt, die seither bei der Faserverbundbauteilherstellung bevorzugt eingesetzt werden (s. Abschnitte 2.3.1.2 und 2.4.1).

Es ist daher davon auszugehen, dass die Maschinen mit pleuelgesteuerter Garnverlegung für die Verarbeitung von Verstärkungsfasern wenig geeignet sind. Bisher sind noch keine Maschinen bekannt, die nach dem vorgestellten System arbeiten<sup>18</sup>. Daher können für die vorliegende Arbeit keine Versuche auf entsprechenden Anlagen durchgeführt werden.

<sup>18</sup> Die Homepage des Entwicklungspartners Kabelflechter Alfeld GmbH kündigt die Einführung einer neuartigen Maschinenteknik bereits an. Es sind aber noch keine genaueren Informationen hierzu abrufbar (Stand Januar 2016).

### 2.3.2.3 Klassische Einsatzbereiche

Die Rotations- oder Hebelarmflechttechnik wird vornehmlich in der Metallindustrie, speziell bei der Drahtverarbeitung, eingesetzt. Typische Erzeugnisse solcher Anlagen sind zum Beispiel geflochtene Abschirmungen von Datenkabeln oder mit Armierungsdrähten ummantelte Druckschläuche. Teilweise werden für Kabelummantelungen Polymerfasern, in einigen Fällen auch GF-Garn eingesetzt. Eine Verwendung für Produkte aus dem Faserverbundbereich ist hingegen bisher noch nicht bekannt.

### 2.3.3 Vergleich der beiden Funktionsprinzipien

Aufgrund ihrer völlig unterschiedlichen Konstruktion weisen Klöppel- und Rotationsflechtmaschinen wesentliche Unterschiede auf, die im Folgenden diskutiert werden.

#### 2.3.3.1 Geschwindigkeit und Kosten

Klöppelflechtmaschinen zeichnen sich durch ein leicht verständliches und maschinenbautechnisch einfach umsetzbares Konzept aus und können zu vergleichsweise geringen Kosten hergestellt werden. Der prinzipielle Nachteil ist jedoch, dass die kompletten Klöppel umeinander herumgeführt werden. Damit unterliegt die komplette Klöppelmasse – ergänzt um die Masse des auf der Spule bevorrateten Garnmaterials – andauernd wechselnden Beschleunigungen. Die Führungsbahn einerseits, vor allem aber die Klöppelfüße andererseits werden durch die hohen Fliehkräfte stark belastet und zeigen mit steigender Anlagengeschwindigkeit rapide zunehmenden Verschleiß und Materialermüdung bis hin zum Bruch. Um die Kräfte nicht zu groß werden zu lassen, muss entweder die Klöppelmasse und damit der Garnvorrat begrenzt werden, was häufigeres Nachrüsten erforderlich macht. Oder die maximal mögliche Anlagengeschwindigkeit muss diesen Gegebenheiten untergeordnet werden und bleibt begrenzt. Diese Zusammenhänge werden in Abschnitt 3.7 detailliert analysiert.

Der entscheidende Vorteil der Rotationsflechttechnik gegenüber der Klöppelflechttechnik besteht darin, dass sich die großen Massen (Spulenträger und bevorratetes Garnmaterial) kontinuierlich bewegen und daher nur der konstanten Kreisbeschleunigung und nicht ständig in der Richtung wechselnden Beschleunigungen ausgesetzt sind. Aufgrund der dadurch wesentlich geringeren mechanischen Belastung können die Spulenträger das Zentrum mit größerer Geschwindigkeit umkreisen. Für die Geflechtabbildung muss das Garn selbst aber weiterhin auf einer schlangenförmigen Bahn geführt werden. Der wechselnden Beschleunigung sind dabei nur die geringeren Massen des Verlegesystems und des zum Flechtunkt geführten Garnabschnitts selbst ausgesetzt. Für die in dieser Arbeit betrachtete Hebelarmflechttechnik handelt es sich im Wesentlichen um die Auf-und-ab-Bewegung des Umlenkhebels. Limitierende Faktoren für die Anlagengeschwindigkeit sind bei dieser Maschinenteknik zum einen die Beschleunigungen an der Hebelspitze, die sowohl vom Hebel als auch vom Garn ertragen werden müssen, und zum anderen die Integrität des Schmierfilms zwischen den Spulenträgern des inneren

Spulenkranzes und der Laufbahn. Wird die Relativgeschwindigkeit zwischen Spulenträger und Bahn zu hoch, reißt der Schmierfilm ab: starke Wärme- und Lärmentwicklung sowie erhöhter Verschleiß bis hin zum „Fressen“ wären die Folge.

Der Vergleich aktueller Rotationsflechtanlagen mit Klöppelflechtanlagen gleicher Spulenzahl zeigt für die Hebelarmflechttechnik eine bis zu fünffach höhere Arbeitsgeschwindigkeit. Dieser Geschwindigkeitsvorteil wird allerdings mit einer wesentlich komplexeren Konstruktion und aufwendiger maschinenbaulicher Umsetzung erkauft. Die sehr hohe Fertigungspräzision der Gleitschienen, Getriebeteile und Lager sowie ein zuverlässiges und genau regelbares Schmiermittelsystem treiben die Fertigungskosten in die Höhe. Schon Douglass stellt fest: "*... these very necessary refinements [...] make high speed braiders complicated and expensive.*" [28]. Auch in [51] wird ein Vergleich der verschiedenen Anlagentypen vorgestellt. Die Klöppelflechtmaschinen werden als sehr günstig und langsam, die Deflektorflechtmaschinen als schnell bei angemessenem Preis und die Hebelarmflechtmaschinen als sehr präzise und schnell, aber teuer beschrieben.

### 2.3.3.2 Produktqualität

Die Spannung der Flechtfäden wirkt sich sehr stark auf die Qualität des gefertigten Produkts aus. Abweichende Garnspannungen an verschiedenen Spulen führen zu einem ungleichmäßigen Warenbild. Bei größeren Abweichungen kann dies sogar die Einstufung als Ausschussmaterial zur Folge haben. Eine exakte Kontrolle der Garnspannung ist daher unbedingt erforderlich. Eine besondere Herausforderung ist dabei die gleichmäßige Einhaltung der voreingestellten Garnspannung über den kompletten Füllbereich der Spule hinweg. Aufgrund der Änderung des Spulendurchmessers während des Flechtprozesses muss die Bremskraft des Garns immer nachgeregelt werden. Prinzipiell ist die Umsetzung eines Garnbremssystems bei den Schnellflechtmaschinen einfacher umzusetzen. Da die Spulen nicht komplett umeinander herumgeführt werden müssen, gibt es weniger Einschränkungen, am Spulenträger zusätzlichen Bauraum für die Fadenbremse zur Verfügung zu stellen. Während bei den Klöppelflechtmaschinen die Garnspannung an allen Klöppeln identisch sein muss, ist es bei den Rotationsflechtmaschinen so, dass für den inneren und den äußeren Spulenring verschiedene Bremskräfte eingestellt werden müssen, damit beide Garnsysteme die gleiche Spannung aufweisen. Die von außen kommenden Garne durchlaufen wesentlich mehr Umlenkpunkte als die direkt zum Flechtzentrum abgezogenen Garne des inneren Spulenkranzes und sind daher bedeutend höheren Reibungskräften ausgesetzt.

In [51] wird den Hebelarmflechtmaschinen die genaueste Kontrolle der Garnspannung zugesprochen. Die Klöppelflechttechnik schneidet in diesem Punkt aufgrund der stark oszillierenden Klöppelbewegung schlecht ab. Da diese Betrachtungen für die Verarbeitung von Drähten durchgeführt werden, ist fraglich, ob sich diese Aussagen direkt auf den Fall des Einsatzes von Fasermaterialien übertragen lassen.



### 2.3.3.3 Lageparalleler Garnabzug

Ein großer Vorteil der Schnellflechtmaschinen nach dem Hebelarmflechtprinzip gegenüber den Klöppelflechtmaschinen ist, dass die Spulen „liegend“ angeordnet werden können (vgl. Abb. 2-13). Durch das Umkreisen des Flechtzentrums wird bei den auf einem Klöppel stehend angeordneten Spulen (vgl. Abb. 2-11) Drehung ins Garn eingebracht. Aus diesem Grund müssen die links- und rechts umlaufenden Spulen in der Flechtereie auch gegenläufig (mit S- bzw. Z-Schlag) gezwirnt sein, da sonst für beide Laufrichtungen unterschiedlich stark gedrehte Garne im Endprodukt vorliegen. Dies hätte ungleiche Flechtwinkel für rechts- und linkslaufende Garne und ein spiralig deformiertes Produkt zur Folge. Bei liegenden Spulen ist ein lagenparalleler Abzug des Garnmaterials von der Spule möglich, was insbesondere dann von Vorteil ist, wenn Bänder verflochten werden sollen, da bei diesen ein „Umklappen“ einen kritischen Fertigungsfehler darstellt.

### 2.3.3.4 Integration von Stehfäden für Triaxialgeflecht

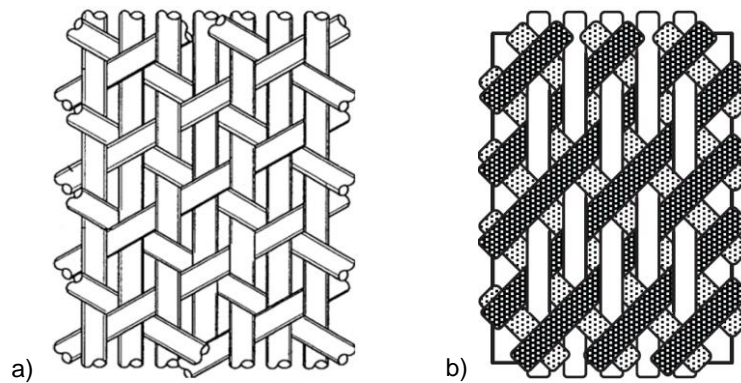
Ein zentraler Unterschied von Klöppelflechtmaschinen und Schnellflechtmaschinen besteht bei den Geflechtarten, die mit den Anlagen jeweils hergestellt werden können. Während es mit beiden Anlagentypen möglich ist, die unterschiedlichen Abbindungsarten von Biaxialgeflechten zu realisieren, kann mit Schnellflechtmaschinen prinzipiell kein triaxiales Geflecht hergestellt werden. Die bei Klöppelflechtmaschinen verwendete Zuführung des dritten Fadensystems durch die Flügelräder lässt sich bei Schnellflechtmaschinen so nicht realisieren. Die Fäden des dritten Garnsystems müssten quasi „in der Luft“ gelagert sein, damit die Fäden beider anderen Garnsysteme jeweils im Wechsel um diese herumgeführt werden können.

### Historische Lösungsansätze

Ein Vorschlag, wie sich Stehfäden bei Rotationsflechtmaschinen einbringen lassen, stammt von Lundgren und datiert bereits aus dem Jahr 1908 [52]. Er löst das Problem dadurch, dass er einen Teil der Stehfäden von außen, einen anderen Teil von innen durch die Zentralwelle der Anlage zuführt. Die Garnführung speziell der von innen zugeführten Garne ist dabei äußerst kompliziert, auch ist die Verwendung eines segmentierten Laufrings für die inneren Spulen notwendig. Ein weiteres Konzept, wie sich Stehfadenzuführungen in eine Rotationsflechtmaschine einbinden lassen, entwickelt Horn in den 1930er Jahren [53]. Er teilt dabei die Gleitbahn des inneren Spulenkranzes komplett in mehrere Segmente und lagert diese fliegend – eine gewagte Konstruktion, die Zweifel an einem präzisen und verschleißfreien Dauerbetrieb aufkommen lässt.

### True Triaxial Braid

Ein Konzept mit fliegender Lagerung der Stehfadenspulen schlagen Klein et al. Ende des vergangenen Jahrhunderts vor [54]. Die im Patent beschriebene Anlage weist eine äußerst komplizierte Garnführung auf – im Betrieb mit Verstärkungsfasergarnen ist auf jeden Fall mit starker Garnschädigung zu rechnen.



**Abb. 2-20: Geflechtähnliche Textilstrukturen mit Längsfäden**

- a) „True triaxial braid“ aus [29].  
 b) „D-3F-Geflecht“ aus [55].

Die dargestellte Lagerung der Spulen und der Antrieb über Reibrollen lässt zudem wenig präzises Arbeiten der Maschine vermuten. Es ist anzunehmen, dass es sich bei der in den Veröffentlichungen gezeigten Maschine um einen an einer Universität entwickelten Prototypen handelt. Ob dieser zwischenzeitlich in ein Produkt weiterentwickelt wurde, und wie schnell und zuverlässig diese Maschine betrieben werden könnte, ist nicht bekannt.

Das mit dieser Maschine gefertigte textile Gebilde ist allerdings kein Geflecht im eigentlichen Sinne, da die beiden Flechtfadensysteme sich untereinander überhaupt nicht kreuzen. Eine Abbindung wird lediglich über einen Teil der Stehfäden erreicht. Das Textil wird von den Autoren als true triaxial braid bezeichnet: "... called true triaxial braid. [...] because axial yarns interlace the helical braiding yarns ..." [29]. Abb. 2-20 a) zeigt an einem Ausschnitt den Aufbau dieses Textils.

Die Ondulation der einzelnen Garnsysteme unterscheidet sich allerdings fundamental vom bekannten Triaxialgeflecht. Bei diesem liegen die Stehfäden in komplett gerader Ausrichtung vor, nur die Flechtfäden ondulieren. Beim vorgeschlagenen Textil ondulieren hingegen alle Fadensysteme – die Flechtfäden tendenziell etwas weniger stark, da sie sich nicht untereinander verkreuzen. Der Teil der Stehfäden, über die die Abbindung realisiert wird, weist hingegen relativ starke Welligkeit auf, die übrigen liegen weiterhin gestreckt vor. Von Branscomb et al. [29] genannte Untersuchungen zeigen, dass sich die Verschlechterung der Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften in Längsrichtung dennoch im Rahmen hält.

### D-3F-Geflecht

In jüngster Zeit wurden von Denninger [55] Überlegungen vorgestellt, die ebenfalls zum Ziel haben, Längsfäden in mit Schnellflechtmaschinen hergestellte Geflechte einzubringen. Er wählt einen anderen Lösungsansatz als Klein et al [54]. Allerdings verkreuzen sich auch hier die Flechtfäden nicht miteinander, und die Abbindung des Textils wird ausschließlich über die Längsfäden realisiert. Es entsteht dabei eine neuartige Textilstruktur, die als "D-3F-Geflecht" [55] bezeichnet wird und anhand eines Ausschnitts in

Abb. 2-20 b) dargestellt ist. Da alle Stehfäden jeweils mit beiden von den Flechtfäden gebildeten gelegeartigen Lagen abgebunden werden, sind sie relativ stark onduliert. Es ist daher von einer deutlichen Verschlechterung der Längssteifigkeit und –festigkeit im Vergleich mit triaxialem Geflecht auszugehen. Dennoch stellt der vorgeschlagene Aufbau für eine Fertigungsanlage einen interessanten Ansatz zur hoch produktiven Herstellung geflechtähnlicher Textilstrukturen dar. Eine anlagentechnische Umsetzung sowie mögliche Leistungsdaten des vorgeschlagenen Konzepts sind bis dato nicht bekannt.

### 2.3.3.5 Fazit: Eignung für Faserverbundanwendungen

Bei der flechttechnischen Herstellung von Preforms für Faserverbundbauteile zum Einsatz in automobilen Großserienanwendungen ist die Flechtgeschwindigkeit momentan der limitierende Faktor für das Erreichen der vorgegebenen Taktzeiten. Der Schnellflechtprozess wird als alternatives Fertigungsverfahren für Faserverbundbauteile aktuell entweder überhaupt nicht beachtet oder für ungeeignet gehalten, wie sich z. B. an den Aussagen von Branscomb et al. festmachen lässt, die schreiben: *"Although the machine speeds are higher, these machines are not well suited for [...] large composite overbraiding processes."* [29].

Für die aktuell am Markt verfügbaren Flechtmaschinen mag dies zutreffen, dennoch stellt der Einsatz von weiterentwickelten Hebelarmflechtmaschinen einen möglichen Weg zur Steigerung des Bauteiloutputs dar und wird daher in dieser Arbeit untersucht. Der höhere Maschinenpreis stellt beim Einsatz in der Großserienfertigung erfahrungsgemäß keinen Hinderungsgrund da, da die Investitionskosten im Vergleich zu den Material- und Prozesskosten oft in den Hintergrund treten. Dies gilt insbesondere, wenn das verarbeitete Material sehr teuer ist – eine Voraussetzung, die beim Einsatz von Kohlenstofffasern auf jeden Fall gegeben ist.

### 2.3.4 Flechtmaschinenhersteller

Es gab in der Vergangenheit eine große Anzahl von Flechtmaschinenherstellern – Firmen, deren Namen sich heute nur noch auf den zahlreichen Patenten finden, die sie im Lauf der Jahrzehnte für ihre Entwicklungen beantragt haben. Viele dieser Firmen sind inzwischen aufgegeben worden, manche in Zusammenschlüssen mit anderen Firmen aufgegangen. In Deutschland war vor allem die Gegend um Wuppertal-Barmen ein Zentrum der Flechtindustrie, aus der viele der Flechtmaschinenhersteller stammen [28, 56, 57]. Douglass nennt in den Referenzen am Ende seines Buchs die wichtigsten Maschinenhersteller, die in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts in Europa und den Vereinigten Staaten am Markt vertreten waren.

Die Tab. A-1 im Anhang gibt einen Überblick der Flechtmaschinenhersteller, deren Produkte im heutigen Markt vornehmlich verbreitet sind. Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem europäisch-nordamerikanischen Markt. In Asien gibt es eine Vielzahl weiterer Hersteller, deren Bedeutung allerdings zumeist noch auf die dortigen Märkte beschränkt ist.

Es ist in der Tabelle auch aufgeführt, welche Flechtmaschinentypen der jeweilige Hersteller anbietet. Speziell für das neue Marktsegment der FVK-Herstellung gibt es nur wenige eigens optimierte Produkte. Von besonderer Bedeutung im europäischen Marktumfeld für Faserverbundbauteile sind die Maschinen der August Herzog Maschinenfabrik GmbH & Co. KG.

## 2.4 Das Flechten für faserverstärkte Kunststoffe

Verschiedene Textiltechnologien wurden in der Vergangenheit erfolgreich für die Verarbeitung von Verstärkungsfasern angewendet – so zum Beispiel die Webtechnik. Ähnliche Verarbeitungseigenschaften der eingesetzten Rohmaterialien haben Unternehmen aus der Textilindustrie neue Märkte in der Faserverbundbranche eröffnet, in denen vorhandenes Know-how und bekannte Anlagentechnik für die Herstellung innovativer Produkte weiter verwendet werden können.

Flächige Textilien – wie z. B. Gewebe – lassen sich auch aus Verstärkungsfasern kostengünstig fertigen. Beim Erstellen von Zuschnitten aus Rollenware, wie sie für das Drapieren komplex geformter Faserverbundprofilbauteile notwendig sind, entsteht allerdings viel Materialverschnitt. Alternativ können Profilbauteile zwar mit wenig Verlust an Fasermaterial im Wickelverfahren gefertigt werden. Dabei werden allerdings nur wenige Garnstränge gleichzeitig verarbeitet, wodurch die Ablagerate relativ gering ist. Zudem bringt das Wickelverfahren geometrische Einschränkungen bei der Bauteilgestaltung mit sich, da es nur für gerade Bauteile optimal geeignet ist und Fasern in Bauteillängsrichtung schwer platziert werden können. Ein weiteres Fertigungsverfahren für Profilbauteile ist die Pultrusion. Sie ist zwar hoch produktiv, allerdings auf die Herstellung gerader Profile beschränkt, und lässt keine Variation der Querschnittsgeometrie zu. Der Faseraufbau der Profile besteht vornehmlich aus Längsfasern, die Einbringung von Fasern mit anderen Winkel ist schwierig.

Die Umflechttechnik vereinigt hingegen die hohe Produktivität der Fertigung eines textilen Halbzeugs mit endkonturnaher, verschnittarmer Ablage direkt auf einem Formkern. Dabei können sowohl Fasern in Längsrichtung als auch unter einem Winkel dazu eingebracht werden. Das Hauptanwendungsfeld für den Einsatz von Geflecht ist daher die Fertigung von gekrümmten Profilbauteilen mit wechselnder Querschnittsgeometrie. Besonders geeignet ist das Verfahren für die Herstellung von Hohlprofilen, durch geschicktes Falten des gefertigten Flechtschlauchs können allerdings auch monolithische Profile (zum Beispiel mit L-, T-, C- oder Z-Geometrie) gefertigt werden, wie sie oft als Versteifungsrippen auf Schalenbauteilen zum Einsatz kommen.

### 2.4.1 Entwicklung von Prozess- und Anlagentechnik

Die Ursprünge der Herstellung von Faserverbundbauteilen durch das Überflechten eines Kerns sind in den USA zu verorten. Laut dem „Handbook of Industrial Braiding“ von Ko et al. aus dem Jahr 1989 [12] wurden erste Überlegungen zum Einsatz von Geflecht

Ende der 1970er Jahre in der (Militär)Luftfahrtindustrie angestellt. Im Buch selbst wird unter der Bezeichnung „formed braid“ die Umflechttechnik beschrieben, bei der ein formgebender Kern mit einer genau passenden Geflechthülle beflochten wird. Das Ergebnis wird bereits bei Ko et al. als „near net-shape composite preform“ beschrieben. In einem Report von Kruesi und Hasko [58] aus dem Jahr 1987 werden in der Einleitung einige Anwendungen aufgeführt, die bereits in den späten 1970er und frühen 1980er Jahren umgesetzt wurden und zumeist aus dem Luftfahrtbereich stammen.

Die Entwicklung des Verfahrens wird schon in der Literatur aus den 1980er Jahren mit seiner hohen Ablagerate und dem geringen Materialverschnitt begründet. Vor dem Hintergrund der damals exorbitant hohen Kosten von CF-Garnen ist besonders der Wunsch nach verschnittfreien Fertigungsverfahren verständlich. Obwohl der Faserpreis inzwischen deutlich geringer ist, hat das Thema Verschnittreduktion vor dem Hintergrund des heutigen Einsatzes in sehr preissensitiven Bereichen wie der automobilen Massenproduktion nichts an Aktualität eingebüßt.

Wie bei anderen Textiltechnologien ist auch im Fall des Flechtens die Verarbeitung von Verstärkungsfasern naheliegenderweise auf die in der Textilindustrie bekannte Klöppelflechttechnik übertragen worden. Für die Preformherstellung waren allerdings Anpassungen der seinerzeit verfügbaren Anlagentechnik notwendig.

In der Textilindustrie eingesetzte Flechtmaschinen, z. B. zur Herstellung von Seilen, weisen nur in seltenen Fällen mehr als 48 Flechtfadenspulen auf. Um die Dimensionen der gewünschten Bauteile aus dem Faserverbundbereich abdecken zu können, war zunächst der Einsatz von Maschinen mit deutlich größerer Klöppelanzahl von Nöten<sup>19</sup>. Typische Maschinen haben heute bis zu 288 Klöppel [59]. Nach den Quellen aus den 1980er Jahren [12, 58] waren bereits damals Maschinen mit 144 Klöppeln in Verwendung. Beflügelt wurde der Trend hin zu Flechtmaschinen mit sehr vielen Spulen nicht nur durch die Faserverbundindustrie, sondern auch durch die parallel stattfindende Entwicklung von Airbag-Systemen, bei denen es sich vielfach um geflochtene Strukturen handelt. Beim Geflechthersteller A&P Technology wurden zwischenzeitlich sogar sogenannte „Megabraider™“ entwickelt, die bis zu 800 Klöppel haben [60, 61].

Eine weitere Änderung, die gegenüber Maschinen aus dem Textilbereich vorgenommen wurde, ist die vertikale Ausrichtung des Maschinenrumpfs, um Platz für das Zu- und Abführen der Flechtkerne zur Verfügung zu stellen. Die Bewegung des Kerns durch das Maschinenzentrum wurde zu Beginn zumeist mit Hilfe einer Linearführung realisiert oder durch das Verfahren der Maschine auf einem Schienensystem entlang des fest eingespannten Kerns. Beide Varianten weisen hinsichtlich der Verarbeitung von dreidimensional gekrümmten Flechtkernen starke Einschränkungen auf.

---

<sup>19</sup> Dies gilt umso mehr, da in dieser Zeit nur „dünne“ CF-Garne zur Verfügung standen [8].

Nachdem Verstärkungsfasern wegen ihrer Sprödigkeit und ihres geringen Dehnvermögens schlechte Verarbeitungseigenschaften in textilen Prozessen aufweisen, waren die Anpassung aller garnführenden Elemente in der Maschine sowie die Reduktion der Garn-Garn-Interaktion zentrale Punkte, in denen die existierende Anlagentechnik verbessert werden musste.

In den Vereinigten Staaten war das Flechten für Verbundwerkstoffe bereits in den 1980er Jahren mit einem Netzwerk aus Maschinenherstellern (z. B. Wardwell Braiding Co.), Anwendern (z. B. A&P Technology Inc.) und universitärer Forschung (z. B. an der Drexel University) etabliert. In Europa wurde die erste Flechtmaschine, die explizit für die Herstellung von Serienbauteilen aus Verstärkungsfasern ausgelegt war, von Hersteller Herzog im Jahr 1991 ausgeliefert [62].

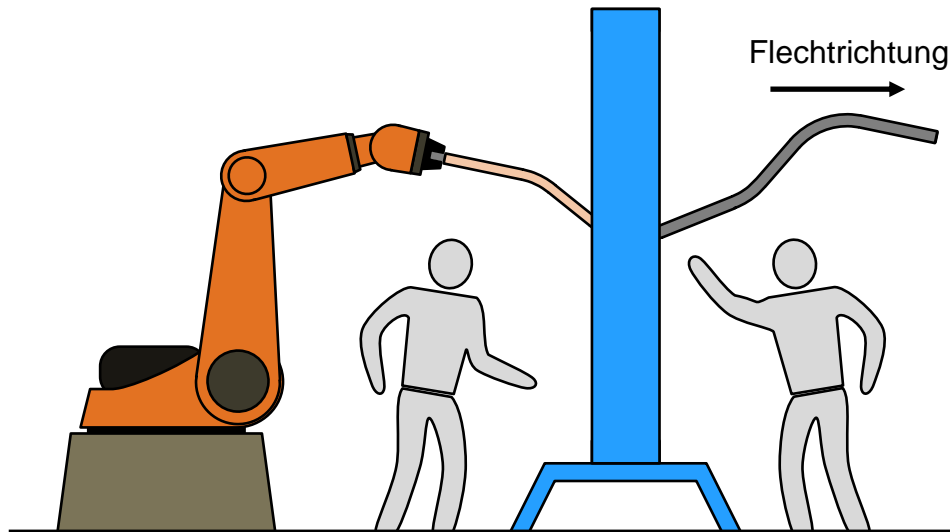
Während die Impulse zu Beginn der Entwicklung des Fertigungsverfahrens eher aus den USA kamen, ist mittlerweile auch die europäische Forschungslandschaft sehr gut ausgebaut und konnte wegweisende technische Entwicklungen initiieren (s. hierzu auch Abschnitt 2.4.3). Aufbauend auf den Arbeiten von Rosenbaum<sup>20</sup> [13] wurde die aus der Polymerfaser- und Naturfaserverarbeitung kommende Anlagentechnik schrittweise auf die Bedürfnisse bei der Verarbeitung von Verstärkungsfasern angepasst. Zentrale Arbeiten hierzu wurden während der 1990er Jahre in der damaligen DASA<sup>21</sup>-Forschung durchgeführt. Von den europäischen Flechtmaschinenherstellern war weiterhin die Firma Herzog am aktivsten. Einerseits wurde in verschiedenen Forschungsprojekten die Entwicklung der 3D-Flechttechnik für Composites vorangetrieben, andererseits wurden das Umflechten von Kernen systematisch untersucht und Ideen für die notwendigen Modifikationen am System erarbeitet. Geßler [63] fasst einige Erfahrungen aus der hausinternen Entwicklung zusammen.

Anfang dieses Jahrhunderts mündeten diese Ergebnisse in die vollständige Neuentwicklung einer Flechtmaschine zur Herstellung von Endkonturpreforms aus Verstärkungsfasern durch eine Entwicklungsgruppe rund um die Firma Herzog. Die entstandene Anlage wird als 2 ½ D-Flechtmaschine bezeichnet und verbessert die Qualität der gefertigten Preforms erheblich [64, 65]. Abb. 2-21 zeigt schematisch eine solche Fertigungszelle (Realanlage: s. Abb. 2-24). Die Maschine ist nach dem Bauprinzip der radialen Klöppelausrichtung mit vertikalem Maschinenrumpf gestaltet. Dies ermöglicht mehr Spielraum bei der Krümmungsgeometrie der zu beflechtenden Kerne und reduziert die Garnreibung durch die verringerte Längenänderung der Garne beim Umlauf der Spulen. Die Bewegung des Kerns erfolgt bei der vorgestellten Maschine mit einem Roboter, der die Funktion des Abzugs übernimmt und flexibel auch unregelmäßig geformte Flechtkerne exakt durch die Maschine führt.

---

<sup>20</sup> An der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) in Aachen

<sup>21</sup> Von 1989 – 2000 erst Deutsche, dann Daimler-Benz schließlich DaimlerChrysler Aerospace AG; aufgegangen im europäischen Luft- und Raumfahrtkonzern EADS, inzwischen AIRBUS Group.



**Abb. 2-21: Flechtzelle für die Herstellung von Faserverbundbauteilen**

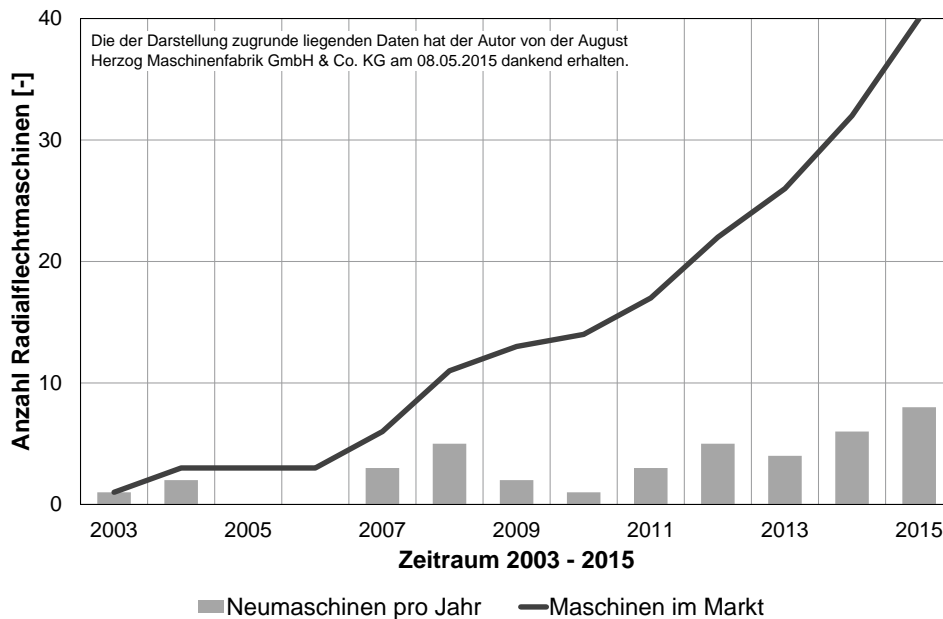
Der Maschinenrumpf ist transparent dargestellt, damit die Flechtringe und die radiale Klöppelausrichtung erkennbar werden. Das System ist teilautomatisiert, da für das Kernhandling sowie beim An- und Abflechten manuelle Arbeitsschritte durch Bediener notwendig sind.

Um die Schädigung der Verstärkungsfasern weiter zu verringern, sind diese Flechtmaschinen mit einem speziell für die Faserverbundverarbeitung optimierten Klöppel ausgestattet, der es erlaubt, das Garn über ein Leitblech besonders schonend von der Spule abzuziehen. Im Maschinenzentrum können zwei Flechtringe montiert werden, damit die Flechtrichtung gewechselt werden kann. So können mit einer Einspannung des Kerns im Roboter mehrere Lagen nacheinander aufgeflochten werden, um ein Bauteil mit größerer Wandstärke zu realisieren (s. hierzu auch Abschnitt 3.4.1.4).

Aufgrund seiner besonders faserschonenden Verarbeitungseigenschaften hat sich dieser Maschinentyp im vergangenen Jahrzehnt in Europa als Standardsystem für die Verbundwerkstofffertigung etabliert. In Amerika werden weiterhin vielfach Axialmaschinen von Wardwell Braiding Co. eingesetzt. In Japan sind für die Faserverbundbauteilherstellung Maschinen des Herstellers Murata Ltd. verbreitet<sup>22</sup>. Abb. 2-22 zeigt, dass sich das Radialflechtsystem der Firma Herzog nach einer schwierigen Anlaufphase mittlerweile mit jährlich steigenden Stückzahlen verkauft.

Bei der Verarbeitung von Verstärkungsfasern für FVK ist die Flechttechnik mittlerweile ein etablierter Prozess. Immer noch werden dafür ausschließlich Klöppelflechtmaschinen eingesetzt. In den verschiedenen Quellen zum Flechten für FVK wird die Rotationsflechttechnik entweder überhaupt nicht erwähnt (z. B. [10–12]), oder es wird – wenn die Technik beschrieben wird – gleichzeitig klargestellt, dass diese für die Verarbeitung von Verstärkungsfasern nicht geeignet sei (z. B. bei Branscomb et al. [29]).

<sup>22</sup> Zusätzlich setzen Geflechtproduzenten wie z. B. A&P Technology oder Eurocarbon B.V. auch selbst konstruierte Anlagentechnik ein.



**Abb. 2-22: Markt für Radialflechtmaschinen zur FVK-Fertigung [66]**

Als Grund wird vage auf die höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit verwiesen; es wird allerdings nicht klar, ob tatsächlich entsprechende Versuche durchgeführt worden sind. Durch die höhere Geschwindigkeit kommt es definitiv zu größeren Belastungen des Garns. Zu Beginn der Entwicklung des Flechtens für Faserverbundkunststoffe war das Verarbeitungsverhalten der Fasern (z. B. aufgrund weniger ausgereifter Schlichte) wesentlich schlechter als heute. Daher wurde bereits bei Klöppelflechtmaschinen die Geschwindigkeit im Vergleich zur Polymerfaserverarbeitung deutlich reduziert, um akzeptable Flechtresultate zu erhalten [63]. Es kann nur gemutmaßt werden, dass nach diesen Erfahrungen auf entsprechende Versuche mit den wesentlich schneller laufenden Rotationsflechtmaschinen verzichtet wurde.

Ein zweiter Grund für fehlende Untersuchungen der Rotationsflechttechnik im Faserverbundbereich kann sein, dass diese dort zu wenig bekannt war. Die technologische Verwandtschaft der typischerweise eingesetzten Drähte, der daraus entstehenden Fertigprodukte und der eingesetzten Anlagentechnik mit dem Gebiet der Verbundwerkstoffe ist gering. Verglichen mit der Textilindustrie ist eine einfache Übertragbarkeit nicht gegeben.

## 2.4.2 Einsatzbereiche und Anwendungen

Obwohl Halbzeuge (Flechtschläuche, Litzen oder aufgeschnittene Schläuche als flächige Textilien) für die Weiterverarbeitung in zumeist manuellen Preformprozessen den überwiegenden Teil geflochtener Produkte im Faserverbundbereich ausmachen, spielt dieses Marktsegment für die vorliegende Arbeit keine Rolle und wird daher nicht im Detail betrachtet.



Stattdessen wird anhand einiger Beispielbauteile aufgezeigt, wie sich die Anwendung des Flechtverfahrens für die direkte Herstellung von Preforms in den vergangenen Jahren entwickelt hat. Im Vergleich mit dem Gesamtmarkt für (kohlenstofffaserverstärkte) Verbundwerkstoffe ist der Anteil von Bauteilen aus geflochtenen Preforms trotz des deutlichen Wachstums der vergangenen Jahren noch immer gering. Das Verfahren befindet sich am Übergang von der Forschung in die Serienproduktion.

Von den Maschinen aus Abb. 2-22 wird laut Hersteller etwa ein Drittel bei Forschungseinrichtungen betrieben, immerhin ein weiteres Drittel im Automobilbereich, ein Fünftel in der Luftfahrtbranche und die Übrigen in der Sportartikelindustrie und für weitere gemischte Anwendungen [66]. Tab. A-2 im Anhang gibt einen Überblick verschiedener Hersteller von Geflechtpreforms, die an der Fertigung der im Folgenden vorgestellten Bauteile beteiligt waren bzw. sind. Neben einigen Beispielen aus der Luftfahrtbranche liegt das Hauptaugenmerk auf Bauteilen aus dem Automobilbereich, für die im Besonderen die Marktsituation in Europa betrachtet wird.

Neben einigen kleineren Anwendungen im Sportartikelbereich (z. B. bei Fahrrädern [67, 68]), wird das Flechten verschiedentlich für Luftfahrtbauteile eingesetzt. Eine der ersten Anwendungen in der Zivilluftfahrt war das Bläsergehäuse (fan case) des GE90-Triebwerks von General Electric<sup>23</sup>. Inzwischen wird das Verfahren auch beim neueren GENx-Triebwerk eingesetzt [61, 69–72]. Weitere Anwendungen für geflochtene Strukturen finden sich bei Propellerblättern aus Faserverbundkunststoffen, z. B. für das Transportflugzeug A400M von Airbus<sup>24</sup> und verschiedene andere zivile und militärische Turbo-prop-Triebwerke<sup>25</sup>. Bei dieser impactgefährdeten Anwendung macht, wie bei der Verwendung im Bläsergehäuse, das hohe Energieabsorptionsvermögen von geflochtenen Strukturen den Einsatz dieses Materials besonders attraktiv.

Des Weiteren wurde sowohl diesseits – bei Airbus [74–76] – als auch jenseits des Atlantiks – bei Boeing [77] und bei der NASA [78] – der Einsatz der Flechttechnik für die Herstellung von Versteifungsprofilen in der Flugzeugstruktur, insbesondere der Rumpfspante, intensiv untersucht. Auch in Japan wurden entsprechende Vorentwicklungsprojekte durchgeführt [79].

Inzwischen verbaut Boeing im bereits seit 2011 im Einsatz befindlichen Modell 787 geflochtene Spante<sup>23</sup> [80]. Für Airbus hingegen war das erste Ziel der Einsatz im A350-1000<sup>26</sup>. Allerdings konnte das Entwicklungsprogramm bis zur endgültigen Entscheidung über die Fertigungstechnologie nicht alle Technologienachweise erbringen, so dass

---

<sup>23</sup> Geflecht gefertigt beim Zulieferer A&P Technology Inc.

<sup>24</sup> Gefertigt beim Zulieferer Ratier-Figeac auf Flechtmaschinen von Spiraltex Industrie.

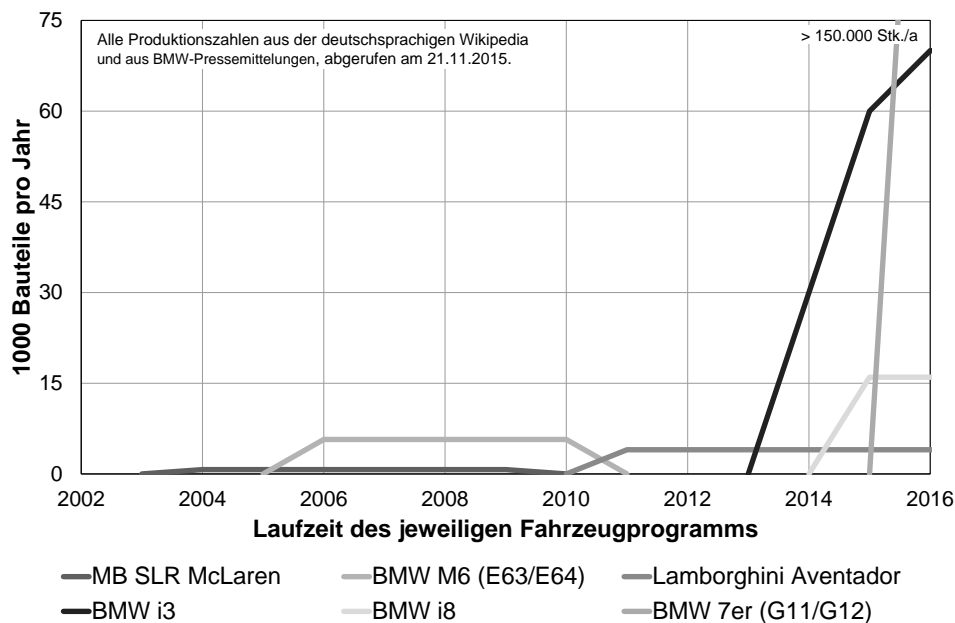
<sup>25</sup> Ein wichtiger Hersteller in diesem Marktsegment ist GE Dowty Propellers, deren Produktionsstandort Anfang des Jahres 2015 durch ein Feuer zerstört wurde. Ende 2015 geht die Fertigung mit komplett neuem Maschinenpark von Herzog wieder in Betrieb [73].

<sup>26</sup> Markteintritt geplant für 2017.

nun eine Alternativtechnologie eingesetzt wird [81]. Langfristig wird ein hochproduktives Spantfertigungsverfahren für die große Bauteilanzahl in einem Nachfolgemodell der A320-Baureihe gesucht. Neuere Äußerungen von Airbus deuten allerdings darauf hin, dass voraussichtlich wieder eine Metalllösung zum Einsatz kommen wird. Weitere Untersuchungen zur Eignung von Geflechtbauteilen für Luftfahrtanwendungen wurden z. B. an Fahrwerkskomponenten [82] oder Fußbodenstützen [83] durchgeführt.

Vor allem im Automobilbereich hat sich das Flechten als Fertigungsprozess in den letzten Jahren etabliert. Abb. 2-23 zeigt die Stückzahlentwicklung geflochtener CFK-Bauteile, die in verschiedenen Automobilbaureihen eingesetzt wurden bzw. werden.

Da triaxiale Geflechte im Vergleich mit anderen Textilien ein besonders gutes Energieaufnahmevermögen haben, wurde schon früh ihre Eignung für crashbelastete Strukturen in der Karosserie erkannt [84]. Die erste Serienanwendung erfolgte bei den Crashelementen des Mercedes-Benz SLR McLaren (2003-2009). Zwei Bauteile sind je Fahrzeug verbaut; im Schnitt wurden über die Laufzeit des Fahrzeugprogramms etwa 700 Bauteile pro Jahr gefertigt<sup>27</sup> [85]. BMW sammelte erste Erfahrungen mit den vorderen und hinteren Stoßfängerträgern des BMW M6 (2005-2010) mit ungefähr 5.500 Bauteilen pro Jahr<sup>28</sup> [86]. Der dritte deutsche Premiumhersteller Audi arbeitet über seine Konzerntochter Lamborghini mit deren Modell Aventador ebenfalls an der Technologie. Bei diesem Fahrzeug sind die Schweller und A-Säulen des CFK-Monocoques mit geflochtenen Profilen realisiert.



**Abb. 2-23: Geflochtene FVK-Bauteile in verschiedenen Automobilbaureihen**

<sup>27</sup> Gefertigt beim Zulieferer Eurocarbon B.V.

<sup>28</sup> Gefertigt beim Zulieferer F. A. Kumpers GmbH & Co. KG. auf Herzog-Maschinen.

Das Programm läuft seit 2011 mit etwa 1.000 Fahrzeugen, also 4.000 Flechtbauteilen, pro Jahr<sup>27</sup> [87]. Weitere Klein(st)serienfahrzeuge, bei denen Flechtbauteile zum Einsatz kommen, sind der Lexus LFA und der Porsche 918 Spyder.

Die Abbildung illustriert, dass sich mit dem breiteren Einsatz von CFK in der Automobilstruktur durch BMW weit über den bis dato erreichten Stand hinausgehende Anforderungen an die Stückzahlfähigkeit des Flechtprozesses ergeben. So sind im seit 2013 gefertigten i3 zwei Flechtprofile in den A-Säulen verbaut<sup>29</sup>. Ende 2015 liegen die Verkaufszahlen dieses Fahrzeugs bei etwa 3.000 Stück pro Monat [88], was einen Bedarf in der Größenordnung von 70.000 Flechtprofilen pro Jahr erwarten lässt. Seit 2014 wird außerdem der Hybrid-Sportwagen i8 produziert, bei dem ähnlich wie beim Aventador im Schweller und den A-Säulen CFK-Flechtbauteile eingesetzt werden. Mit einer Stückzahl von etwa 4.000 Fahrzeugen im Jahr (konservativ geschätzt aus [89]) sind dies jährlich 16.000 Geflechtbauteile<sup>27</sup>.

Der erste Einsatz geflochtener Faserverbundbauteile in der Großserie erfolgt seit 2015 im Dachrahmen von Fahrzeugen der neuen BMW 7er-Reihe [1]. Mit einer Stückzahl in der Größenordnung von 80 - 100.000 Einheiten pro Jahr und der doppelten Anzahl an Flechtbauteilen ist die Grenze dessen, was sich mit der momentan eingesetzten Anlagentechnologie wirtschaftlich darstellen lässt, erreicht.

### 2.4.3 Aktuelle Entwicklungstrends

Die aktuellen Arbeiten im Bereich des Flechtens für Faserverbundkunststoffe verfolgen das Ziel, den Prozess weiter zu verbessern und zusätzliche Anwendungsbereiche zu erschließen. Horn [59] fasst in seinem Keynote-Vortrag auf der TexComp-12 (2015) den erreichten Entwicklungsstand zusammen und identifiziert aus Sicht eines Anlagenherstellers verschiedene Bereiche für die weitere Forschung von der Automatisierung bis hin zur Simulation.

Die genannten Punkte werden von der Forschung bereits adressiert. Speziell von den deutschen Universitätsinstituten<sup>30</sup>, die im Bereich der Faserverbundkunststoffe an der Flechttechnik forschen, gehen immer wieder entscheidende Entwicklungsimpulse aus. Einige Forschungsergebnisse, die in den vergangenen Jahren in den verschiedenen Handlungsfeldern erzielt wurden, werden nachfolgend vorgestellt.

---

<sup>29</sup> Gefertigt bei BMW selbst auf Herzog-Maschinen.

<sup>30</sup> Hier zu nennen sind vornehmlich das Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen, das Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart, das Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden sowie der Lehrstuhl für Carbon Composites (LCC) an der TUM. Alle genannten Institute sind mit modernsten Radialflechtmaschinen der Firma Herzog ausgestattet.

### 2.4.3.1 Verbesserte Maschinenteknik

Verschiedene Untersuchungen haben sich mit der Möglichkeiten zur Anpassung der Maschinenteknik auseinandergesetzt – alle mit dem Ziel die Prozessgrenzen zu erweitern und die Prozessführung zu verbessern.

Die Arbeiten von Mitwalsky [21] zielen darauf ab, die in Formel (2-1) gezeigten Zusammenhänge aufzuweichen und verschiedene Bauteildurchmesser mit gleichbleibendem Winkel geschlossen zu bedecken. Er untersucht dafür zum einen Möglichkeiten, die Garnbreite im Prozess durch Spreizen per Luftdruckdüsen variabel einzustellen, zum anderen wird eine Methode vorgestellt, mit der sich die Fadenzahl der Flechtmaschine im laufenden Prozess verändern lässt.

Von einer Dresdner Forschungsgruppe stammen Arbeiten zur Kombination der 3D- mit der Umflechttechnik. In [90] wird der Entwurf einer Flechtmaschine offengelegt, die auf der Radialbauweise basiert und mit der das Abbindungsmuster des Geflechts während des Prozesses variiert werden kann, um lokal unterschiedliche Bauteileigenschaften zu realisieren. Ebenfalls in Dresden wurde ein variabler Flechtring entwickelt, der sich dem Kerndurchmesser anpassen kann [91]. Dadurch wird ein besseres Anlegen des Geflechts an die Kerngeometrie erreicht, und komplexer geformte Kerne mit Durchmessersprüngen können mit besserem Ergebnis beflochten werden [92].

Von Reden [14] verfolgt einen anderen Ansatz, um das Flechtergebnis auf komplexen Geometrien zu verbessern. Ein elektronisch gesteuerter Klöppel passt die Spannung der Flechtfäden während des Prozesses immer so an, dass sich das Geflecht auch an Kanten oder bei Krümmungen des Kerns gleichmäßig an dessen Oberfläche anlegt. Ein ähnliches Konzept wurde auch von Fabich et al. [93] in Aachen entwickelt.

### 2.4.3.2 Material und Material-Prozess-Interaktion

Schon seit Anfang der Entwicklung des Flechtens für Faserverbundkunststoffe wurden immer wieder Versuche unternommen, vorimprägnierte Garne zu verflechten [94] oder das fertige Geflecht direkt nach der Ablage mit Harz zu besprühen [58], um den anschließenden Prozessschritt der Harzimprägnierung einzusparen und das Bauteil direkt auszuhärten. Bisher konnte sich jedoch keines dieser Verfahren auf Dauer als Produktionsmethode für Faserverbundbauteile etablieren. Die Verschmutzung von Maschinenelementen mit Matrixharz und der damit einhergehende hohe Reinigungsaufwand waren wohl ebenso ein Hinderungsgrund wie ungleichmäßige Tränkung und – je nach Halbzeug – hohe Materialkosten. Die zwischenzeitliche Entwicklung spezieller Prepreg-Materialien mit geringem Tack<sup>31</sup> hat dazu geführt, dass dieses Thema erneut untersucht

---

<sup>31</sup> Tack bezeichnet den Grad der Klebrigkeit des Prepregmaterials, der maßgeblich von der Art des Materials und der Verarbeitungstemperatur bestimmt wird.

wird. Rapp et al. [95] analysieren z. B. das Potenzial zur Produktivitätssteigerung durch den Einsatz von Prepregmaterial.

Zudem hat sich in jüngster Zeit durch die Verwendung von mit thermoplastischem Matrixharz vorimprägnierten Bändern ein neuer Ansatzpunkt ergeben. Diese sind zum Zeitpunkt der Verarbeitung trocken und lassen sich damit unproblematisch in einer Flechtmaschine einsetzen. Erber und Spitko [96] zeigen, dass Geflechte aus solchen Bändern durch einen anschließenden Konsolidierungsschritt zu Faserverbundbauteilen gepresst werden können. Verschiedentlich wurden auch Arbeiten mit Hybridgarnen durchgeführt, die sich aus Verstärkungsfasern und Polymerfasern zusammensetzen, am LCC z. B. im Rahmen des kürzlich beendeten EU-Projekts HIVOCOMP<sup>32</sup> [97].

Brand [23] und Birkefeld [22] zeigen, dass das detaillierte Verständnis der Material-Prozess-Interaktion Grundlage für die Auslegungsregeln von Geflechtbauteilen sein muss. Die bereits von Rosenbaum [13] dargestellten Einflüsse von gekrümmten oder exzentrisch geführten Kernen auf die Geflechtanlage werden von Brand mit der Flechtmaschine am LCC (s. Abb. 2-24) am Heavy-Tow-Geflecht verifiziert und um Untersuchungen an Kernen mit trapezförmigem Querschnitt erweitert.



**Abb. 2-24: Fertigungszelle für Geflechtpreforms am LCC**

Die Flechtzelle besteht aus einer Radialflechtmaschine der Firma Herzog mit 128 Klöppeln in Kombination mit einem Industrieroboter für die Bewegung der Flechtkerne. Diese Maschine hat Flügelräder mit acht Einstichen, die eine 4 x 4-Abbindung des Geflechts ermöglichen, und eine schwenkbare Lagerung, so dass auch horizontal geflochten werden kann.

<sup>32</sup> Akronym des Projektitels “Advanced materials enabling HIgh-VOLume road transport applications of lightweight structural COMPOSITE parts”

Die Arbeit von Brand zu Heavy-Tow-Geflechten schafft Grundlagen für den Einsatz kostengünstiger CF-50k-Verstärkungsfasergarne in Biaxialgeflechtem für Verbundbauteile. Er zeigt, dass sich die mechanischen Kennwerte von Geflechtem durch geringere Ondulation der Flechtfäden bei 4 x 4-Abbindung bedeutend verbessern lassen. Mit Hilfe des schwenkbaren Flechtrumpfs der Anlagen am LCC wird zudem erstmals der Einfluss der Schwerkraft auf die Faserablage untersucht – ein Effekt, der bei großen, vertikal aufgebauten Flechtmaschinen und Verwendung schwerer Garne nicht vernachlässigbar ist.

### **2.4.3.3 Sicherstellen und Überprüfen der Materialqualität**

Neben Garnrissen, die bei der Preformfertigung keinesfalls auftreten dürfen, sind die wichtigsten Qualitätskriterien Flechtwinkelabweichungen und Lücken (Gaps) zwischen benachbarten Garnen, die durch abweichende Spannung einzelner Flechtfäden ausgelöst werden. Während Fadenwächter für gerissene oder fehlende Garne im Flechtmaschinenbau seit langem Standard sind, wurden die anderen angesprochenen Fehler bislang oft durch visuelle Inspektion identifiziert. In der Serienproduktion großer Stückzahlen geflochtener Preforms (Vgl. Abb. 2-23) kann diese Vorgehensweise nicht mehr angewendet werden – es müssen automatisierte Systeme für die Qualitätskontrolle zum Einsatz kommen.

Erforscht wurden in den letzten Jahren besonders optische Systeme [98, 99]. In der Regel untersuchen diese – integriert in der Anlage oder offline – das auf dem Kern abgelegte Geflecht. Wichtigste Verbesserungspunkte bei diesen Qualitätssicherungssystemen sind die Auswertelgorithmen sowie Wege zur effizienten Verarbeitung der großen Datenmengen, die bei der optischen Erfassung der kompletten Bauteiloberfläche anfallen.

Besser sind Systeme, die Fehler bereits erkennen, bevor diese im Geflecht abgebunden und auf dem Kern abgelegt wurden. Durch geometrische Analyse des sich schließenden Geflechtes im Bereich zwischen den Klöppeln und dem Flechtring ist dies ebenfalls optisch möglich. Des Weiteren bieten die bereits erwähnten elektronisch gesteuerten Klöppel [14, 93, 100] die Möglichkeit, jederzeit die Spannung aller am Prozess beteiligten Flechtfäden auszulesen. Bildet sich z. B. im Prozess ein Faserring auf einer der Spulen, ein häufiger Fehler und zumeist der Grund für Faserwinkelabweichungen und Gaps, kann die dadurch allmählich zunehmende Spannung des betroffenen Garns erkannt und der Prozess unterbrochen werden, bevor ein Fehler im Geflecht entsteht.

### **2.4.3.4 Simulation von Prozess und Material**

Einen immer wichtigeren Stellenwert nimmt die Simulation bei der Entwicklung von Faserverbundbauteilen aus Geflecht ein. Dabei muss zwischen der Simulation des Materialverhaltens und der virtuellen Analyse des Herstellvorgangs, der Prozesssimulation, unterschieden werden.

Die Prozesssimulation eröffnet einen Weg, um die tatsächliche Lage der Fasern an jedem Punkt der Oberfläche eines Bauteils vorherzusagen. Diese Daten können als Grundlage dienen, um Modelle für die Berechnung des Füllverhaltens während der Imprägnierung mit dem Matrixharz oder zur Vorhersage der bruchmechanischen Eigenschaften zu erstellen. Die Berechnung der Garnablage erfolgt im einfacheren Fall analytisch. In den letzten Jahren hat speziell v. Ravenhorst [101] auf diesem Gebiet gearbeitet und umfangreiche Arbeiten zu verbesserten Methoden der analytischen Garnablageberechnung vorgestellt. Mit Berechnungsansätzen, die auf der FE-Methode basieren, lassen sich die Vorgänge während der Geflechtbildung noch genauer modellieren – allerdings geht dies mit größerem Berechnungsaufwand einher. Aktuelle Arbeiten der FE-basierten Geflechtprozesssimulation fokussieren sich daher auf Modellierungsansätze, mit denen die Rechenzeit minimiert werden kann, oder zerlegen die Berechnung kompletter Bauteile in Segmente, wie es z. B. Hans [102] vorschlägt.

Für den Einsatz in der Automobilstruktur oder bei Luftfahrtbauteilen ist es mittelweilige Voraussetzung, dass das mechanische Verhalten der Bauteile mit Hilfe von Struktursimulationsmethoden vorhersagbar ist. Während sich die Bauteilsteifigkeit recht genau prognostizieren lässt, stoßen etablierte Berechnungsmodelle aufgrund des komplexen textilen Aufbaus und der lokal unterschiedlichen Geflechtarchitektur bei der Vorhersage von Festigkeit und Bruchverhalten an ihre Grenzen. Cox und Flanagan [103] fassen analytische Berechnungsmethoden für Textilstrukturen inklusive Geflechtes zusammen. Diese werden immer mehr von FE-basierten Verfahren abgelöst bzw. durch diese ergänzt. Cichosz gibt in seiner 2015 veröffentlichten Dissertation [104] einen umfangreichen und aktuellen Überblick zum Stand der Entwicklung im Bereich der Struktursimulation von Geflechtes.

Die Ansätze der FE-basierten Simulationsmethoden funktionieren auf Einheitszelebene bereits sehr gut, allerdings sind die Rechenzeiten sowohl der Prozess- als auch der Struktursimulation noch zu hoch, wenn komplette Bauteile auf diesem Genauigkeitslevel analysiert werden sollen. Der Fokus aktueller Forschungsarbeiten liegt auf dem Erstellen von Berechnungsmodellen, die das Materialverhalten hinreichend genau abbilden, ohne dass der Berechnungsaufwand unverträglich ansteigt. Sie können z. B. in einer Crashsimulationsrechnung eingesetzt werden. So beschäftigt sich z. B. Wehrkamp-Richter [105] mit neuartigen Ansätzen zur Einheitszellenmodellierung über periodische Randbedingungen, um Rechenzeit einzusparen.

#### **2.4.3.5 Senken der Prozesskosten**

Die wichtigste und entscheidende Frage ist die nach der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Am Ende entscheidet eine Gesamtkostenbetrachtung, die Bauteilperformance, Material- und Prozesskosten, Investitionsbedarf, Ausschussraten und weitere Faktoren beinhaltet, je nach Bauteil darüber, ob sich mit dem Flechtprozess die Herstellung am günstigsten umsetzen lässt.

Da sich alle Fortschritte in den in 2.4.3 genannten Bereichen in mehr oder weniger starkem Ausmaß auf die Bauteilkosten auswirken, könnten sie als Unterpunkte eines einzigen Entwicklungsschwerpunkts „Prozesskosten“ aufgefasst werden. Da ein so umfangreicher Ansatz aber keine Detailbetrachtung zulassen würde, konzentriert sich die vorliegende Arbeit auf die Produktivität des Flechtverfahrens an sich sowie Möglichkeiten zu deren Verbesserung. Eine Analyse, inwieweit Teilaspekte der in den Abschnitten 2.4.3.1 bis 2.4.3.4 aufgeführten Arbeiten die Produktivität des Flechtprozesses beeinflussen, wird an den entsprechenden Stellen im Kapitel 3 in die Betrachtungen mit aufgenommen.

Das weite Feld von Maßnahmen zur Steigerung der Produktivität des Verfahrens reicht dabei von reduziertem Ausschuss und einem gesteigerten Automatisierungsgrad über reduzierte Rüstzeiten und effizienteren Materialeinsatz bis hin zu erhöhter Maschinengeschwindigkeit. Da diese Aspekte in den folgenden Kapiteln detailliert analysiert werden, soll an dieser Stelle ein Blick auf die in den letzten Jahren erreichten Verbesserungen bei konkurrierenden Verfahren zur Fertigung von Faserverbundhohlprofilen geworfen werden.

Was die Bauteilkosten anbelangt sind bereits heute sowohl der Wickel- als auch der Pultrusionsprozess dem Flechtverfahren oft überlegen. Ähnlich wie beim Flechten setzen beide Verfahren das Verstärkungsfasergarn direkt vom Hersteller ein und liegen diesbezüglich kostenseitig gleichauf. Allerdings wird das Garn anders als beim Flechten bereits während des Wickel- bzw. Pultrusionsprozesses mit Harz getränkt, wodurch sich die Prozesskette um diesen Schritt verkürzt. Wickeln legt zwar typischerweise weniger Garnmasse je Zeiteinheit ab, hat aber im Vergleich mit Flechten wesentlich geringere Rüstaufwände und geringere anlagenseitige Investitionskosten. Pultrusion zieht hingegen seine Vorteile vor allem aus dem kontinuierlichen Fertigungsprozess mit hohem Materialdurchsatz.

Allerdings haben beide Verfahren Nachteile in Bezug auf das Spektrum der herstellbaren Bauteile. Sie eignen sich zur Fertigung von geraden Komponenten. Bei der Pultrusion kommt die Einschränkung hinzu, dass keine Änderungen des Profilquerschnitts möglich sind. Während beim Wickelverfahren außer bauteilparallelen  $0^\circ$ -Fasern praktisch alle Faserorientierungen möglich sind, ist es bei der Pultrusion exakt umgekehrt: Ein Pultrusionsbauteil weist in seiner ursprünglichen Form ausschließlich Fasern in Bauteillängsrichtung auf.

An der Auflösung genau dieser Nachteile wird gearbeitet. Bereits etabliert ist die Kombination des Pultrudierens mit Wickel- oder Flechtvorrichtungen zu einem Fertigungsverfahren, das dann als Pullwinding bzw. Pullbraiding bezeichnet wird. So können Verstärkungsfasern unter einem Winkel zur Fertigungsrichtung in die Bauteile eingebracht werden. Die geometrischen Einschränkungen bei der Bauteilgestaltung hebt dies allerdings nicht auf. Wesentlich interessanter sind deshalb neue Entwicklungen, um pultrudierte Bauteile mit einem Krümmungsradius zu fertigen [106] oder abschnittsweise mit



unterschiedlichen Profilquerschnittsformen zu versehen. Derartige Bauteile könnten zukünftig als Standardprofilbauteile – ähnlich zu stranggepressten Aluminiumprofilen – in der Karosseriestruktur zum Einsatz kommen. Sehr interessante Optionen für die zukünftige hochproduktive Fertigung von Profilbauteilen ergeben sich auch aus der Verwendung thermoplastischer oder teilausgehärteter, duroplastischer Matrixwerkstoffe. Pultrudierte, gerade Profilbauteile einheitlichen Querschnitts könnten in Zukunft wieder erwärmt und mit einem Umformschritt in die endgültige Form gepresst werden [107, 108]. Ein dem Flechten vergleichbarer Freiheitsgrad in der Formgebung ist allerdings bei all diesen Verfahren noch nicht in Sicht.

Eine interessante Entwicklung sind Verfahren, die die hohe Spulenzahl des Flechtens mit dem rotierenden Kern des Wickelns verbinden oder die Spulen in Form eines Orbitalwickelprozesses um den Kern rotieren lassen. Uozumi et al. [109] stellen eine Maschine vor, mit der sich die Ablagerate der Fasern für gerade Kerne gegenüber dem Flechtverfahren um etwa 80 % verbessern lässt. Hauptsächlich lässt sich dieser Produktivitätsvorteil laut Angaben der Autoren auf den geringeren Rüstaufwand zurückführen. Da die Spulen nicht wie beim Flechten umeinander herumgeführt werden müssen, können die Garne von Herstellerspulen mit großer Lauflänge direkt vom Gatter<sup>33</sup> zugeführt werden.

---

<sup>33</sup> Textiltechnischer Fachbegriff für ein Gestell, auf dem neben einer Fertigungsanlage Rohmaterialspulen gelagert werden können, von denen das Garn direkt in die Fertigungsanlage eingezogen wird.



### 3 Berechnungsmodell für die Produktivität des Klöppelflechtverfahrens

Ziel der Arbeit ist, Ansätze zur Verbesserung der Produktivität des Flechtverfahrens zu finden und diese hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zu bewerten. Um diese Bewertung durchführen zu können, wird zunächst die Leistungsfähigkeit aktuell verwendeter Klöppelflechtanlagen für die Verarbeitung von Verstärkungsfasern als Vergleichsbasis („Baseline“) ermittelt. Gegenüber dieser Basis kann die Leistungsfähigkeit eines verbesserten Fertigungssystems, das im Verlauf der Arbeit konzeptioniert wird, bewertet werden.

Bei der Produktivitätsanalyse darf sich der Blick nicht allein auf die Betrachtung der eigentlichen Flechtmaschine konzentrieren. In der weitgehend automatisierten Fertigung von Faserverbundbauteilen in der Automobilbranche kommt die Flechtmaschine stets zusammen mit anderen Baueinheiten in einem komplexen Produktionssystem zum Einsatz. Folgende Begriffsdefinitionen gelten für die vorliegende Arbeit:

- Die **Flechtmaschine** stellt den Flechtfadenvorrat auf den Flechtspulen bereit, bewegt die Spulen und sorgt so für die Verflechtung der Fäden, also die Erstellung des Geflechts.
- Sie ist Bestandteil und Kernelement des **Produktionssystems** (auch als Gesamtanlage bzw. Flechtanlage bezeichnet), das zusätzlich das Handhabungssystem zur Bewegung des Flechtkerns beinhaltet und weitere Baugruppen wie z. B. Systeme für den automatischen Beschnitt der Geflechtenden oder zur Qualitätskontrolle aufweisen kann.

Im Rahmen einer Bauteilfertigung wird letztendlich immer die Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage entscheidend sein. Je komplexer der Aufbau des Systems ist und je mehr Einzelkomponenten bzw. Subsysteme es enthält, umso schwieriger ist es, diese im Modell abzubilden und den Einfluss einzelner Betriebsparameter auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu isolieren. Im Folgenden wird daher zunächst diskutiert, wie sich die Produktivität des Flechtprozesses für die Zwecke dieser Arbeit am besten definieren lässt, was also die Messgröße ist, mit der der Produktivitätsvergleich durchgeführt wird. Anschließend wird der Modellierungsansatz vorgestellt, der die gewünschten Betrachtungen erlaubt.

## 3.1 Kennzahlen für die Anlagenproduktivität

Grundlegend ist Produktivität als Quotient aus „Output“ und „Input“ definiert [110]. Dabei fallen unter „Output“ z. B. die gefertigten Produkte, unter „Input“ Dinge wie Arbeitszeit-, Material- und Kostenaufwände, die für das Generieren eines bestimmten „Output“ erforderlich sind. Für die Bewertung einzelner Prozesse oder Anlagen ist eine so generelle Betrachtungsweise in den meisten Fällen nicht hilfreich.

### 3.1.1 Stückkosten

Um für ein Bauteil das geeignete Fertigungsverfahren auswählen zu können, werden häufig die Stückkosten  $k_x$  als Entscheidungskriterium herangezogen. Bei der Stückkostenberechnung handelt es sich um eine spezielle Betrachtungsform des oben genannten allgemeinen Produktivitätsbegriffs. Dabei bilden alle Kosten, die bei der Fertigung einer bestimmten Menge an Produkten (Bauteilen) anfallen, den „Input“. Dieser wird auf die Ausbringungsmenge  $x$  umgelegt, den „Output“. Die Gesamtkosten  $K$  setzen sich nach [111] aus den variablen Kosten  $K_v$  (z. B. Materialkosten, Personalkosten, Energiekosten) und den Fixkosten  $K_f$  (z. B. Investitionskosten für Produktionsanlagen, Infrastrukturkosten, Werkzeugkosten oder unternehmensfixen Kosten – dem sogenannten „Overhead“) zusammen.

$$k_x = \frac{K}{x} = \frac{K_v + K_f}{x} \quad (3-1)$$

Für diese Analyse müssen alle mit der Bauteilherstellung verbundenen Kosten möglichst exakt bekannt sein. Während sich Teile der variablen Kosten, so z. B. die Materialmenge bereits mit Kenntnis der Bauteilgeometrie vergleichsweise gut im Vorhinein bestimmen lassen, sind andere Kostenbeiträge kaum vor dem tatsächlichen Beginn der Fertigung zu ermitteln. Von zentraler Bedeutung für die Ermittlung der Fixkosten ist die Produktivität des vorgesehenen Fertigungsverfahrens. Erst auf dieser Basis kann die Anzahl der Produktionsanlagen ermittelt werden, die zur Fertigung der geplanten jährlichen Stückzahl notwendig ist. Diese Daten wiederum liegen der Produktionsplanung (Platzbedarf, Hallenlayout, etc.) zu Grunde und bestimmen damit letztlich über die Fixkosten der zukünftigen Fertigung.

Durch den Einsatz produktiverer Fertigungsanlagen lassen sich die Fixkosten potenziell bedeutend senken – sofern nicht ein höherer Anschaffungspreis den Produktivitätsvorteil „auffrisst“. In der Regel treten die Anschaffungskosten einer Fertigungsanlage gegenüber den Prozess- und Materialkosten umso weiter in den Hintergrund je höher die Stückzahl der damit gefertigten Bauteile ist. In dieser Arbeit wird die Anlagenproduktivität vor dem Hintergrund des Einsatzes in der automobilen Großserienfertigung betrachtet; interessant sind daher Stückzahlen in einer Größenordnung von 100.000 Bauteilen pro Jahr. In einem solchen Fertigungsszenario ist davon auszugehen, dass die variablen Kosten die Fixkosten anteilmäßig bei weitem übersteigen, weshalb auf einen

Vergleich der – für neu entwickelte Anlagen ohnehin kaum seriös abschätzbaren – Beschaffungskosten für die eingesetzte Anlagentechnik verzichtet wird.

Die Stückkostenbetrachtung benötigt viele Eingabewerte, die für neu zu entwickelnde Fertigungsprozesse bzw. -anlagen noch nicht bekannt sind. Außerdem bringt sie die Einschränkung mit sich, dass sie auf ein konkretes Produkt angewendet werden muss, für welches das komplette Produktionsszenario bekannt sein muss. Sie kommt hier für die Bewertung der Produktivität des Flechtverfahrens nicht in Betracht.

### 3.1.2 Maschinenproduktivität

Eine weitere Produktivitätskennzahl ist die sogenannte Maschinenproduktivität (vgl. hierzu [110]), die sich für die Evaluierung der Leistungsfähigkeit von Produktionsanlagen etabliert hat. Dabei wird die Ausbringungsmenge auf die Fertigungszeit bezogen. Es wird allerdings kein Bezug zu den Kosten hergestellt.

$$\text{Maschinenproduktivität} = \frac{\text{Ausbringungsmenge}}{\text{Eingesetzte Maschinenstunden}} \quad (3-2)$$

Dieser Ansatz erweist sich für die Betrachtungen in vorliegender Arbeit als zielführender – zumal durch verschiedene Definitionsweisen für die Ausbringungsmenge die Möglichkeit besteht, die Produktivität von Produktionsanlagen auf unterschiedlich tiefem Detaillierungsgrad zu vergleichen. Abb. 3-1 gibt einen Überblick über die Detaillierungsgrade, die in der Arbeit verwendet werden und verknüpft diese mit der jeweils verwendeten Ausprägungsform der Maschinenproduktivität.

Die Ausbringungsmenge in Formel (3-2) ist deswegen nicht wie in Formel (6-12) mit  $x$  bezeichnet, da hier je nach Definition nicht zwingenderweise eine konkrete Stückzahl verwendet werden muss. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten unterschiedlich detaillierten Maschinenproduktivitätskennzahlen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

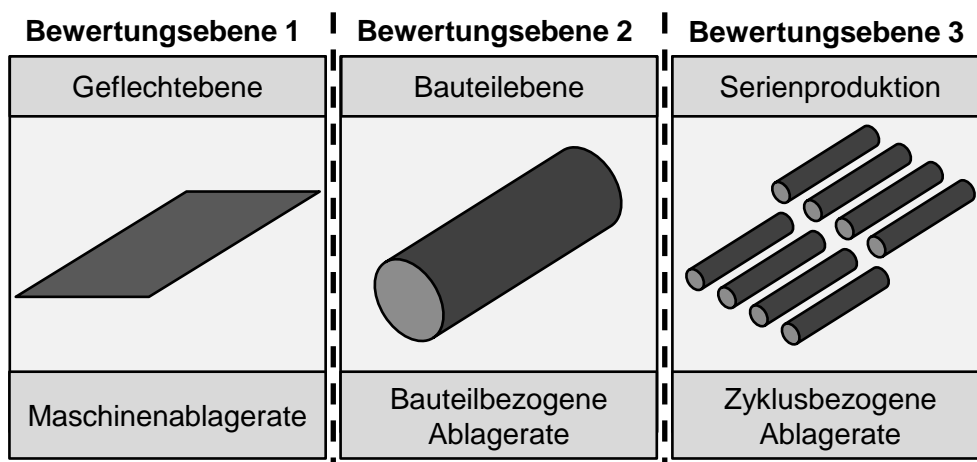


Abb. 3-1: Produktivitätsbewertung auf verschiedenen Detaillierungsebenen

### 3.1.2.1 Maschinenablagerate

Bei grundlegender Betrachtungsweise kann die Menge der verarbeiteten Fasern als Ausbringungsmenge einer Flechtmaschine definiert werden. Die Maschinenproduktivität ist in diesem Fall also die Ausbringungsrate, wenn die Maschine bei Nenngeschwindigkeit läuft und keine Störungen vorliegen. Bei Betrachtung des Flechtprozesses wird dieser Wert Maschinenablagerate der Flechtmaschine genannt, in dieser Arbeit mit  $\dot{m}_M$  bezeichnet und in  $kg/h$  angegeben.

Zu beachten ist, dass dieser Wert auf ein bestimmtes Geflecht bezogen sein muss, da die Art der eingesetzten Garne, der Flechtwinkel und der Geflechtumfang die Ablagerate stark beeinflussen. Die Festlegung dieser Parameter ist notwendig, um die Ablagerate überhaupt errechnen zu können. Damit diese als Vergleichsgröße für die Produktivität verschiedener Arten von Flechtmaschinen dienen kann, werden zunächst Standardwerte für Geflecht und Bauteil definiert und für die Berechnung verwendet.

### 3.1.2.2 Bauteilbezogene Ablagerate

Auf einem höheren Komplexitätslevel kann die Ausbringungsmenge als ein gefertigtes Bauteil definiert werden. Dadurch wird berücksichtigt, wie viele Lagen auf das Bauteil aufgeflochten werden müssen oder welche Zeiten zu berücksichtigen sind, bei denen die Maschine während der Fertigung des Bauteils angehalten und die Geflechtanlage unterbrochen werden muss. Je nach Anlagenkonzept fallen diese Nebenzeiten zum Beispiel beim Wechsel des Flechtkerns oder beim Abschneiden des Geflechts nach Abschluss des Flechtens einer Lage an. Diese Kennzahl wird daher stark durch den Aufbau des Produktionssystems und den Grad an Automatisierung beeinflusst, mit deren Hilfe sich der Anteil zeitaufwendiger manueller Arbeitsschritte minimieren lässt.

Als Vergleichsgröße kann die Fertigungszeit eines Bauteils verwendet werden – also der zeitliche Abstand, in dem fertige Bauteile die Flechtanlage verlassen, wenn diese störungsfrei bei Nenngeschwindigkeit läuft. Unter Berücksichtigung der im Bauteil vorhandenen Fasermenge lässt sich auch hier eine Ablagerate errechnen, die bauteilbezogene Ablagerate genannt und mit  $\dot{m}_B$  bezeichnet wird.

### 3.1.2.3 Zyklusbezogene Ablagerate

Auf einem wiederum erhöhten Detaillierungsgrad kann der „Output“ als Anzahl der Gutteile definiert werden, die innerhalb eines Fertigungszyklus hergestellt werden. Ein Fertigungszyklus ist in dieser Arbeit als Zeitraum zwischen dem Beginn zweier aufeinanderfolgender Rüstvorgänge der Flechtanlage definiert. Zwei verschiedene produktivitätsrelevante Zustände können innerhalb eines Maschinenzklus auftreten. Entweder die Maschine läuft, und es werden Bauteile produziert, oder sie steht. Die Bauteilfertigungszeit (Betriebszeit der Maschine bzw. Uptime) wird mit  $T_B$  abgekürzt. Sie besteht aus der Flechtzeit  $T_F$  und der Nebenzeit  $T_N$  (z. B. für Kernwechsel, Wenden oder Beschnitt), die ebenfalls zur regulären Bauteilfertigungszeit zählt.

Die Stillstandzeit der Maschine wird als Downtime  $T_{down}$  bezeichnet. Die Maschine steht zum einen für den Zeitraum des Rüstvorgangs  $T_R$ , zum anderen aufgrund des Auftretts von Störungen im Fertigungsprozess für die Fehlerzeit  $T_{err}$ . Weitere, planbare Stillstandzeiten (z. B. für Wartungsvorgänge) werden für die Betrachtungen ausgeklammert. Je nachdem, welche der Teil-Zykluszeiten

$$T_i := \{T_F, T_N, T_{err}, T_R\} \tag{3-3}$$

mit aufgenommen werden, sind bauteil- oder zykluszeitbezogene Analysen mit bzw. ohne den Einfluss von Fehlern möglich.

$$T_{Zyk,i} = T_B + T_{down,i} = \sum_i T_i \tag{3-4}$$

Abb. 3-2 stellt die verschiedenen Teil-Zykluszeiten  $T_i$  innerhalb des Fertigungszyklus und deren Zusammenhänge grafisch dar.

Der Produktivitätsvergleich erfolgt über eine fertigungszyklusbezogene Ablagerate  $\dot{m}_{Zyk}$ , die aus der Gesamtmasse der gefertigten Preforms und der für die Herstellung notwendigen Zyklusdauer berechnet wird. Werden auch Fertigungsfehler berücksichtigt, ergibt sich die fehlerbehaftete, zyklusbezogene Ablagerate  $\dot{m}_{Zyk,err}$ .

Stillstandzeiten innerhalb des Fertigungszyklus reduzieren diese Produktivitätskennzahl direkt. Die Betrachtung kann um den Faktor Ausschuss erweitert werden: Wenn erst spät im Fertigungsprozess (z. B. beim Flechten der letzten von mehreren Geflechtlagen im Bauteil) ein Fehler auftritt, dessentwegen das Bauteil ausgesondert werden muss, kann die bereits aufgewendete Fertigungszeit, die als Produktivitätsverlust berücksichtigt werden muss, erheblich sein. Dieser Einfluss wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

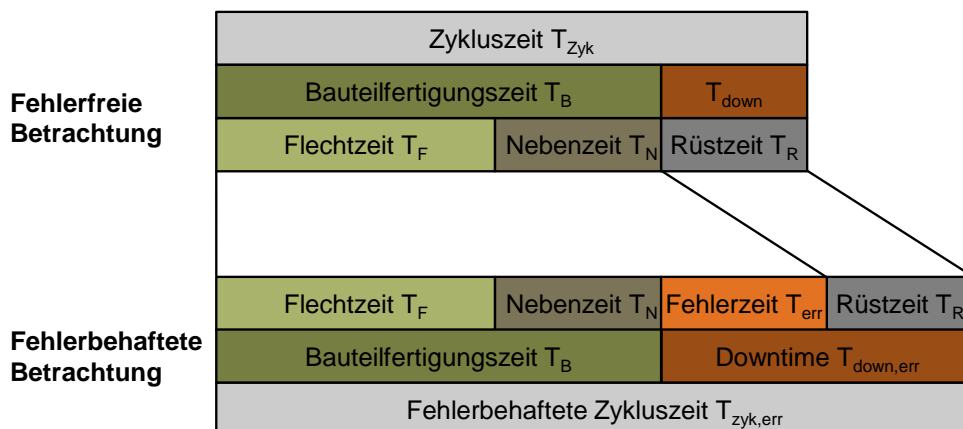


Abb. 3-2: Definition der Zeitanteile innerhalb eines Fertigungszyklus

### 3.1.3 Gesamtanlageneffektivität und Verfügbarkeit

Eine Kenngröße, die häufig bei der Evaluierung von Fertigungsanlagen verwendet wird, ist die Gesamtanlageneffektivität (GAE)<sup>1</sup> [112]. Dieses Konzept wird in der Automobilindustrie verbreitet im Rahmen des „total productive maintenance“ (TPM) eingesetzt, einem System zur kontinuierlichen Verbesserung der Produktion, das dazu dient, Abläufe zu optimieren und die Ausschussrate zu senken [113]. Die GAE ist eine Messgröße für die ungeplanten Verluste einer Anlage und gibt an, zu welchem Anteil der geplanten Produktionszeit tatsächlich Gut-Bauteile hergestellt werden. Im Bestfall beträgt der Wert einhundert Prozent. Dieser reduziert sich durch Faktoren für Fertigungsunterbrechungen (Verfügbarkeitsfaktor), verminderte Fertigungsgeschwindigkeit (Leistungsfaktor) oder die Herstellungszeit von Ausschussteilen (Qualitätsfaktor). Je nach unternehmensspezifischer Definition reduzieren Wartungs- und Rüstzeiten die Kennzahl ebenfalls. Sie lässt sich nach anwenderspezifischen Vorgaben nur an real existierenden Maschinen individuell ermitteln.

In den Qualitätsfaktor des GAE-Werts gehen unter anderem Ausschussraten ein, da nur die Fertigungszeit von Gut-Bauteilen als produktiver Fertigungszeitanteil gewertet wird. Die Ausschussraten sind z. B. einer der Faktoren, die an der Realmaschine ermittelt werden müssten. In dieser Arbeit wird zwar der direkte Fertigungszeitverlust durch fehlerbedingte Maschinenstillstände geschätzt und mit betrachtet; die Anzahl der Teile, die in einem Qualitätskontrollschritt am Ende der Fertigung aufgrund von Geflechtfehlern aussortiert werden müssen, ist jedoch unbekannt. Der dadurch entstehende Fertigungszeitverlust wird deswegen in der durchgeführten Betrachtung nicht berücksichtigt. Für die theoretischen Produktivitätsvergleiche in dieser Arbeit ist die GAE-Betrachtung daher nicht direkt anwendbar, weil die zu untersuchende Anlage noch nicht existiert.

Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit technischer Systeme bietet das Konzept der Verfügbarkeit. Allgemein formuliert gibt diese an, zu welchem Prozentsatz innerhalb eines vereinbarten Zeitraums das System einsatzbereit ist. Für den Vergleich von Fertigungsanlagen im Rahmen dieser Arbeit erweist sich eine speziell definierte Form der Verfügbarkeit als gut geeignet. Sie wird mit  $\Lambda$  bezeichnet und stellt bei der gewählten Herangehensweise ein Maß für den Zeitanteil dar, in dem tatsächlich Geflecht erzeugt wird. Jegliche Stillstandzeiten (geplante und ungeplante) für Rüstvorgänge oder fehlerbedingte Unterbrechungen reduzieren den Kennwert genauso wie die Nebenzeiten. Diese Verfügbarkeit kann auf den verschiedenen Bewertungsebenen (bauteil- oder zyklusbezogen; jeweils mit oder ohne Fehlereinfluss) ausgewertet werden, je nachdem, welche der Teil-Zykluszeiten  $T_i$  in die Berechnung eingehen.

$$\Lambda_i = \frac{T_F}{\sum_i T_i} \quad (3-5)$$

<sup>1</sup> englisch: overall equipment effectiveness (OEE)



### 3.1.4 Alternative Kennzahlen

Bei der Produktivitätsbewertung von Produktionsprozessen wird je nach Fragestellung mit einer Vielzahl weiterer Kenngrößen gearbeitet. Im Zusammenhang mit dem Vergleich verschiedener Geflechtarten könnte z. B. die Verwendung einer „materialparameterspezifischen“ Ablagerate sinnvoll sein. Werden Fasern mit besseren Materialeigenschaften eingesetzt, muss weniger Fasermasse verarbeitet werden. Ein geflochtenes Faserverbundbauteil muss zum Beispiel weniger Lagen aufweisen, wenn CF anstelle von GF verwendet werden, und kann dennoch dieselbe Biegesteifigkeit erreichen. Der Einsatz von Fasern mit besseren mechanischen Eigenschaften kann also Fertigungszeit einsparen.

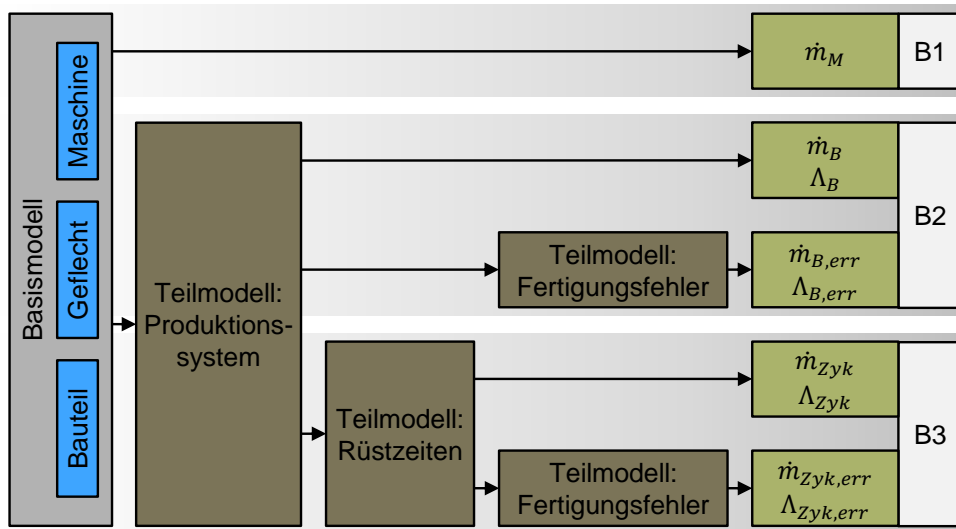
An diesem Beispiel wird jedoch schnell klar, dass eine derartige Betrachtungsweise in Bezug auf die tatsächlich entstehenden Bauteilkosten zu kurz greift, da CF außer besseren mechanischen Eigenschaften eben auch einen erheblich höheren Preis als GF haben. Eine Vergleichsgröße, die dies ebenfalls erfasst, müsste also eine Art „materialparameterspezifische Stückkosten“ sein. Es würde sich zudem sofort die Frage stellen, auf Basis welcher Materialparameter (Längssteifigkeit? Impactbeständigkeit?) der Vergleich durchgeführt werden soll, da das Ergebnis je nach Betrachtungsweise unterschiedlich ausfallen muss. Derartige Vergleiche lassen sich nur bei sehr genau definierten Fragestellungen für ein ganz bestimmtes Bauteil mit vertretbarem Aufwand anstellen. Auch wenn die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Basisgeflechtarten unterschiedliche Materialkennwerte haben, wird wegen der oben genannten Schwierigkeiten auf eine so detaillierte Betrachtung verzichtet und nur auf Basis der Ablagerate verglichen.

## 3.2 Aufbau des Gesamtmodells

Um die Produktivität des Flechtprozesses für die Untersuchungen in dieser Arbeit bewerten zu können, werden die Zusammenhänge der prozessrelevanten Größen in einem interaktiven Berechnungsmodell<sup>2</sup> erfasst. Mit dem Modell kann der Einfluss verschiedener Eingangsgrößen auf die Zielgröße Produktivität untersucht werden. Diese wird auf den drei vorgestellten Bewertungsebenen (s. Abb. 3-3; vgl. auch Abb. 3-1) ermittelt und in Form der Ablagerate bzw. der Anlagenverfügbarkeit angegeben. Aufgrund der komplexen Interaktionen zwischen den vielen Eingangsparametern der Berechnung wird das Gesamtmodell in mehrere Teilmodelle aufgelöst, mit denen jeweils bestimmte Aspekte des Systems separat untersucht werden können. Die nachfolgende Abb. 3-3 zeigt anhand des Aufbaus des Gesamtmodells, welche Teilmodelle jeweils in die Berechnung eingehen.

---

<sup>2</sup> in Microsoft Excel™



**Abb. 3-3: Aufbau des Gesamtmodells zur Produktivitätsberechnung**

Am rechten Rand der Darstellung sind die Bewertungsebenen (B1 – B3) angegeben, auf denen die jeweiligen Kennwerte ermittelt werden.

Berechnungen der Geometrie von Geflechtes und der Ablagerate, wie sie im Basismodell durchgeführt werden, sind in Teilen bereits aus der Literatur bekannt. Das „Handbook of Industrial Braiding“ [12] beschäftigt sich z. B. in den Kapiteln 4 und 5 ausführlich mit Berechnungen zur Geflechtgeometrie. Allerdings wird hier im Besonderen auch das mechanische Verhalten von gedrehten Garnen (Zwirnen) detailliert untersucht. Dieses spielt für die Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit jedoch keine Rolle. Ko et al. [12] gehen im Übrigen nicht weiter auf die Produktivität des Verfahrens ein – der Fokus ihrer Analyse liegt im Bereich der mechanischen Eigenschaften des Geflechtes. Von Reden führt in Kapitel 4 seiner Dissertation [14] Berechnungen zur Ablagerate durch, allerdings beschränkt er sich dabei auf die Herleitung der Formeln und führt keine Parameteranalysen mit dem Ziel der Produktivitätssteigerung durch.

Über diese Produktivitätsberechnungen hinausgehende Arbeiten, die die Ablageratenberechnung des Basismodells mit weiteren produktivitätskritischen Vorgängen wie dem Rüsten oder dem Auftreten von Fehlern verknüpfen, sind nicht bekannt.

### Bewertungsebene 1

Auf der ersten Bewertungsebene wird nur das Basisberechnungsmodell verwendet, in dem die Eckdaten des Bauteils, der verwendeten Geflechtart und der eingesetzten Flechtmaschine miteinander verknüpft sind. Als Vergleichsgröße wird die Maschinenablagerate  $\dot{m}_M$  verwendet. Da die Analyse der Produktivität allein auf Basis des gefertigten Geflechtes erfolgt, muss nur die Flechtmaschine selbst betrachtet werden. Kenntnis der Gesamtanlage, in die die Flechtmaschine eingebunden ist, wird dafür nicht benötigt.

Auf dieser Modellebene können detaillierte Untersuchungen zum Einfluss einzelner Parameter erfolgen, da sich diese unabhängig voneinander variieren lassen und es nur eine Zielgröße gibt, die betrachtet werden muss. Für alle Teilbereiche des Modells (Bauteil,

Geflecht, Maschine) werden im Basismodell Parametersätze definiert, die für die Produktivitätsberechnungen auf den anderen Bewertungsebenen verwendet werden.

## Bewertungsebene 2

Auf dieser Bewertungsebene wird die Produktivität anhand des gefertigten Bauteils verglichen. Für diese Berechnung wird das Basismodell mit einem Teilmodell verknüpft, das die Auswirkungen der Gestaltung der Fertigungszelle bzw. des Produktionssystems auf die Bauteilfertigung ermittelt. Nebenzeiten, z. B. für Kernzuführung und -entnahme oder Beschnittvorgänge, werden berücksichtigt. Es handelt sich also um eine Bewertung, bei der die Gesamtanlage betrachtet werden muss. Die Auswirkungen unterschiedlicher Bauteilgrößen auf die Fertigungsrate können untersucht werden.

Als Vergleichsgröße werden die bauteilspezifische Verfügbarkeit  $\Lambda_B$  oder eine bauteilspezifische Geflechtablagerate  $\dot{m}_B$  verwendet. Die Betrachtung kann für die Berücksichtigung von Flechtfehlern mit Hilfe der Kennwerte  $\Lambda_{B,err}$  und  $\dot{m}_{B,err}$  erfolgen.

## Bewertungsebene 3

Auf der dritten Bewertungsebene erfolgt die Ermittlung der Produktivität auf Basis der Serienproduktion. Das Basisberechnungsmodell wird hierfür mit einem Teilmodell zur Bewertung der Rüstzeiten und mit einem Teilmodell für die Auswirkung von Fertigungsunterbrechungen aufgrund von Fehlern gekoppelt.

Als Vergleichsgröße für die Produktivität können die effektive Taktzeit, der Verfügbarkeitswert  $\Lambda_{Zyk}$  oder die zykluszeitbezogene Ablagerate  $\dot{m}_{Zyk}$  verwendet werden. Diese Betrachtungen können unter Verwendung der Kennwerte  $\Lambda_{Zyk,err}$  und  $\dot{m}_{Zyk,err}$  auch mit Berücksichtigung von Fertigungsfehlern durchgeführt werden.

## 3.3 Basismodell zur Produktivitätsberechnung

Die Vorgehensweise bei der Erstellung des Basisberechnungsmodells orientiert sich am Ablauf, der bei der Auslegung einer Flechtmaschine für ein bestimmtes Bauteil zugrunde gelegt werden muss. Für die verschiedenen Bereiche des Rechenmodells werden jeweils die einstellbaren Größen sowie deren Zusammenwirken im Hinblick auf die Zielgröße dargestellt. Einen Gesamtüberblick der Ein- und Ausgabewerte des Basismodells bietet Abb. 3-4. Die genaue Definition der angegebenen Variablen findet sich bei der Beschreibung der einzelnen Modellbereiche in den folgenden Abschnitten, in denen deren Berechnungsmethodik detailliert beschrieben wird.

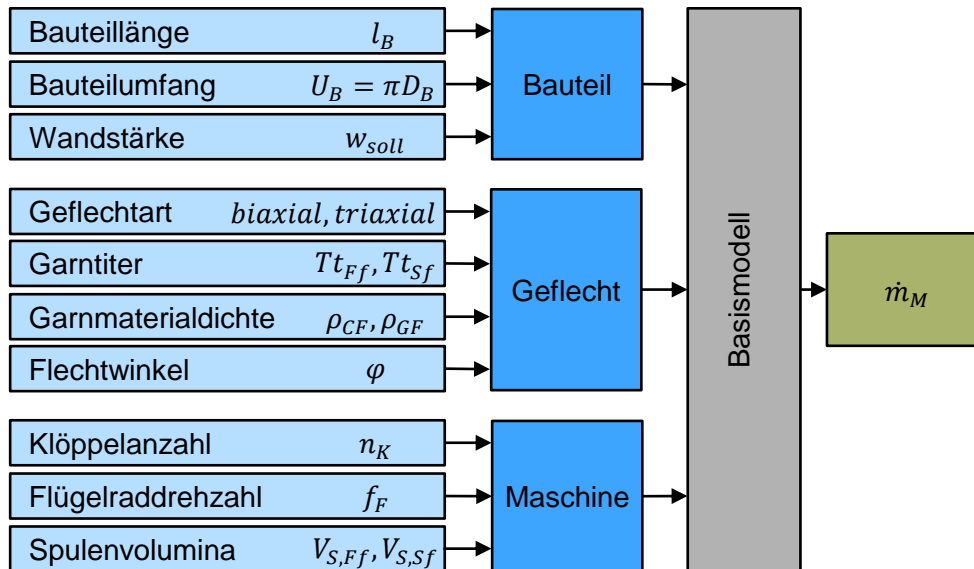


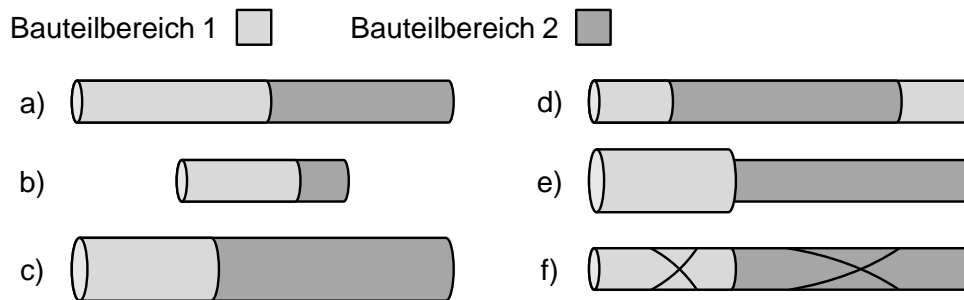
Abb. 3-4: Ein- und Ausgabewerte des Basisberechnungsmodells

Die Inputparameter für Bauteil und Geflecht werden gemeinsam betrachtet. Bei einem realen Bauteil würden diese beiden Bereiche jeweils Vorgaben enthalten, die aus den Bauteilanforderungen abgeleitet sind und nicht unabhängig voneinander festgelegt werden können. Die Fertigungsmaschine wird anschließend passend dazu ausgewählt.

### 3.3.1 Bauteil und Geflecht

Für das Rechenmodell wird entsprechend zunächst ein Testbauteil definiert, auf dessen Basis der Produktivitätsvergleich durchgeführt werden kann. Einfluss auf die Fertigungsrate haben die Bauteillänge  $l_B$ , der Bauteilumfang bzw. –durchmesser  $D_B$  und die Wandstärke  $w_{soll}$ , über die errechnet wird, wie viele Lagen auf den Kern aufgeflochten werden müssen. Eine weitere entscheidende Rolle für die Definition der Maschine spielen die Art des Geflechts (biaxial, triaxial, welche Fasern), mit dem der Kern bedeckt werden soll, sowie der Flechtwinkel  $\varphi$ .

Beim Testbauteil, das für die Berechnungen dieser Arbeit verwendet wird, handelt es sich um ein rundes, gerades Hohlprofil. Die Annahme eines gekrümmten Bauteils ist für Untersuchungen zur Fertigungsgeschwindigkeit nicht notwendig. Einen großen Einfluss haben allerdings die bei realen Bauteilen häufig auftretenden Änderungen des Bauteildurchmessers. Um diese Einflüsse zumindest näherungsweise abbilden zu können, wird das Testbauteil im Berechnungstool mit zwei Bauteilbereichen (gekennzeichnet mit dem Index  $Bb$ ) modelliert, für die Länge, Durchmesser und Flechtwinkel jeweils unabhängig definiert werden können. Abb. 3-5 zeigt verschiedene Varianten, wie das Bauteil aufgeteilt werden kann.



**Abb. 3-5: Mögliche Varianten der Testbauteildefinition**

- Bauteilbereiche 1 und 2 weisen identische Geflechteigenschaften auf.
- Längenänderung des Gesamtbauteils oder der jeweiligen Anteile der Bereiche 1 und 2.
- Änderung des Bauteildurchmessers.
- Aufteilung eines Bauteilbereichs in mehrere Abschnitte.
- Unterschiedliche Durchmesser der Bauteilbereiche 1 und 2
- Unterschiedliche Flechtwinkel in den Bauteilbereichen 1 und 2

Die Länge des ersten Bauteilbereichs  $l_{Bb1}$  wird als prozentualer Anteil  $k_{l,Bb1}$  der Gesamtlänge vorgegeben. Der verbleibende Teil der Gesamtlänge ist die Länge des zweiten Bauteilbereichs  $l_{Bb2}$ .

$$l_B = \frac{l_{Bb1}}{k_{l,Bb1}} = l_{Bb1} + l_{Bb2} \quad (3-6)$$

Die Art des Geflechts (biaxial bzw. triaxial, Garnanzahl) sowie die Lagenanzahl werden in beiden Bereichen als identisch vorausgesetzt. Diese Annahme ist für den Einsatz der aktuell verwendeten Flechtmaschinen zulässig. Um ein Geflecht unterschiedlichen Typs in verschiedenen Bauteilabschnitten zu realisieren, wären z. B. Anlagen notwendig, wie sie Mitwalsky [21] vorschlägt (s. Abschnitt 2.4.3.1). Bauteile mit unterschiedlicher Anzahl von Lagen in verschiedenen Bereichen entlang der Bauteillängsachse sind zwar bekannt, allerdings sind für die Fertigung anlagenbautechnische Speziallösungen nötig (z. B. Crashbox des Mercedes-Benz SLR McLaren [114]). Es handelt sich also um Spezialfälle, die im Rahmen der allgemein angelegten Produktivitätsberechnung für Flechtprozesse in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Das Modell lässt die Möglichkeit zu, die Bereiche 1 bzw. 2 bei der Modellbildung jeweils in mehrere Teilstücke aufzuteilen. Die Teilstücke eines jeden Bereichs müssen identische Eigenschaften aufweisen, können sich aber von denen des anderen Bereichs unterscheiden, z. B. durch einen größeren Flechtwinkel. Das Modellbauteil in Abb. 3-5 d) ist ein Beispiel für diese Art der Aufteilung. Für die Berechnung der Fertigungszeit spielt es keine Rolle, in wie viele Abschnitte die Bereiche 1 und 2 in der Modellüberlegung aufgeteilt werden – entscheidend ist lediglich die addierte Gesamtlänge der jeweiligen Bereiche.

Die Werte, die für die Bauteilbereiche 1 und 2 jeweils unterschiedlich sein können, sind in den nachfolgenden Formeln mit dem Index  $Bb$  versehen. Das Ergebnis muss mit den

zum jeweiligen Bereich gehörigen Eingabewerten (etwa für Durchmesser, Flechtwinkel und Bereichslänge) separat für jeden der Bereiche bestimmt werden. Für die Gesamtlage werden die Werte entsprechend aufsummiert.

Basierend auf der Formel (2-1) für den Flechtfadenabstand  $b_{Ff}$  lässt sich zunächst bereichsweise das Flächengewicht einer Flechtlage  $m_A$  berechnen. Es setzt sich aus den Anteilen der Flechtfäden  $m_{A,Ff}$  und der Stehfäden  $m_{A,Sf}$  zusammen. Als zusätzliche Eingangsgröße werden die Titer der Flechtfäden  $Tt_{Ff}$  und der Stehfäden  $Tt_{Sf}$  benötigt sowie die Anzahl der Stehfäden<sup>3</sup>  $n_F$  in der verwendeten Flechtmaschine.

$$m_{A,Bb} = m_{A,Ff,Bb} + m_{A,Sf,Bb} = \frac{Tt_{Ff} * n_S}{\pi * D_{Bb} * \cos \varphi_{Bb}} + \frac{Tt_{Sf} * n_F}{\pi * D_{Bb}} \quad (3-7)$$

Wird ein Biaxialgeflecht eingesetzt, ist der Stehfadentiter null und der zweite Teil der Gleichung entfällt. Für die Berechnung der Lagenmasse  $m_{L,Bb}$  in einem Bauteilbereich wird das Flächengewicht mit der Oberflächengröße des jeweiligen Bereichs multipliziert. Dabei wird die Vereinfachung getroffen, dass die Lagendicke im Vergleich mit dem Bauteildurchmesser als klein anzusehen ist – der Umfang der Lage entspricht also dem Umfang des Bauteils (bzw. des Flechtkerns) an dieser Stelle.

$$m_{L,Bb} = \pi * D_{Bb} * l_{Bb} * m_{A,Bb} \quad (3-8)$$

Für die Berechnung der Lagenanzahl wird zunächst davon ausgegangen, dass die Preform in einem Kompaktierungszustand gefertigt wird, bei dem die Packungsdichte der Preform  $k_{PP}$  dem Zielwert für den Faservolumengehalt im Bauteil entspricht. In dieser Arbeit wird mit einem für Automobilanwendungen typischen  $k_{PP}$ -Wert von 55 % gerechnet<sup>4</sup>. Die Lagendicke wird als verschmierter Wert errechnet. Das heißt, die Lage wird so behandelt, als sei sie unabhängig von der realen Textilarchitektur überall gleich dick, und die Flecht- und Stehfäden wären gleichmäßig in diesem Volumen verteilt. Diese Annahme ist für eine Einzellage nicht zulässig. Im Fall der hier betrachteten mehrlagigen Aufbauten gleichen sich Unregelmäßigkeiten in der Faserverteilung aufgrund von Nesting<sup>5</sup>-Effekten zwischen den einzelnen Lagen aber aus. Diese Vereinfachung

<sup>3</sup> Die Anzahl der Stehfäden entspricht der Anzahl der Flügelräder  $n_F$ . Werden Geflechte mit 2 x 2-Abbinde betrachtet, ist die Flechtfadenanzahl doppelt so groß wie die Stehfadenanzahl.

<sup>4</sup> Dieser Wert liegt für RTM-Prozesse in der Automobilindustrie zumeist etwas niedriger als der für Luftfahrtbauteile typischerweise angestrebte Wert von 60 %.

<sup>5</sup> Nesting beschreibt ein Phänomen, das bei mehrlagigen Textilaufbauten beobachtet werden kann. Die Oberfläche einzelner Lagen ist aufgrund der Textilarchitektur nicht komplett glatt. Beim Aufeinanderstapeln tendieren übereinander liegende Lagen dazu, dass dickere Bereiche einer Lage bevorzugt über dünneren Bereichen der Nachbarlage zu liegen kommen; die Lagen sich sozusagen etwas ineinander „verhaken“. Dieser Effekt erklärt auch die besseren interlaminaren Schubeigenschaften von Geweben bzw. Geflechten im Vergleich mit Gelegen, bei denen der Nesting-Effekt kaum auftritt.

stimmt mit der Realität umso besser überein, je mehr einzelne Lagen der Faseraufbau aufweist. Unter Verwendung der jeweiligen Dichte des Flechtfadenmaterials  $\rho_{Ff}$  und des Stehfadenmaterials  $\rho_{Sf}$  kann bereichsweise die Lagendicke  $d_L$  errechnet werden.

$$d_{L,Bb} = \frac{1}{k_{PP}} \left( \frac{m_{A,Ff,Bb}}{\rho_{Ff}} + \frac{m_{A,Sf,Bb}}{\rho_{Sf}} \right) \quad (3-9)$$

Auch hier entfällt bei Biaxialgeflechten der zweite Teil der Gleichung in der Klammer. Die Bestimmung der Lagenanzahl wird anhand des Vorgabewerts  $w_{soll}$  für die Wandstärke in Bereich 1 vorgenommen. Aus der errechneten Lagendicke für Bereich 1 und dem Vorgabewert ergibt sich eine theoretische Lagenanzahl  $n_{L,theo}$  – in der Regel ein Kommawert. Die Wahl der tatsächlichen Lagenanzahl  $n_L$  als Ganzzahlwert für die weiteren Berechnungsschritte erfolgt so, dass bis zu einem Nachkommawert von 0,25 abgerundet, bei höheren Werten aufgerundet wird<sup>6</sup>.

$$\frac{w_{soll}}{d_{L,Bb1}} = n_{L,theo} \xrightarrow{\text{spezifisches Runden}} n_L \quad (3-10)$$

Es wird davon ausgegangen, dass das Bauteil nach der Aushärtung in beiden Bauteilbereichen letztendlich die Sollwandstärke aufweist<sup>7</sup>. Der jeweilig erreichte tatsächliche Faservolumengehalt  $k_{FVG}$  wird für beide Bereiche errechnet, und es wird geprüft, ob dieser nicht zu weit vom Vorgabewert abweicht. Angestrebt wird eine Abweichung von weniger als 3 %.

$$k_{FVG,Bb} = \frac{n_L}{w_{soll}} \left( \frac{m_{A,Ff,Bb}}{\rho_{Ff}} + \frac{m_{A,Sf,Bb}}{\rho_{Sf}} \right) \quad (3-11)$$

Die Masse einer Gesamtlage des Bauteils  $m_L$  ergibt sich aus der Summe der Lagenmassen der beiden Bereiche, die Masse der Preform  $m_p$  aus der Lagenmasse multipliziert mit der Anzahl der Lagen.

<sup>6</sup> Der Übergangswert von auf- zu abrunden liegt niedriger als der normalerweise verwendete von 0,5. So soll berücksichtigt werden, dass mit den Lagen in Faserverbundbauteilen immer auch mechanische Eigenschaften verknüpft sind. Bei einem Rechenergebnis von z. B. knapp 2,5 hätte man bei Verwendung von nur 2 Lagen etwa 20 % weniger Fasermasse im Bauteil als rechnerisch gefordert. Um speziell bei geringer Lagenzahl nicht nur eine oder zwei Lagen im Bauteil zu haben, wurde diese abweichende Rundungsregel gewählt. Der Faservolumengehalt soll eher nach oben abweichen als zu stark nach unten.

<sup>7</sup> Bei beiderseits hartem Werkzeug, wie z. B. beim in der Automobilindustrie für monolithische Strukturen häufig eingesetzten RTM-Verfahren, trifft diese Annahme zu. Abweichungen in der tatsächlichen Wandstärke gegenüber dem Vorgabewert kann es geben, wenn mit nur einseitig hartem Werkzeug gearbeitet wird. Bei der Fertigung von Hohlprofilbauteilen ist dies z. B. der Fall, wenn als Innenwerkzeug ein flexibler Druckschlauch oder ein Blasformkern eingesetzt wird.

$$m_P = n_L * \sum_i m_{L,Bb,i} \quad (3-12)$$

Mit der Möglichkeit, ein Bauteil in zwei Bereiche aufzuteilen, für die getrennt die jeweils enthaltene Materialmenge berechnet wird, kann auch der Einfluss der Materialverschnittmenge auf die Gesamtproduktivität untersucht werden. Dazu wird davon ausgegangen, dass an beiden Enden des Bauteils ein Bereich des Geflechts entfernt wird. Dieser Beschnittbereich weist z. B. oft einen größeren Flechtwinkel und einen geringeren Bauteildurchmesser auf. So bleiben die Flechtfäden im Mittelteil des Geflechts, dem Bereich des späteren Bauteils, auch nach dem Beschnitt und der Entnahme aus der Flechtmaschine besser unter Spannung. Die Aufteilung in zwei Bauteilbereiche kann im Rechenmodell verwendet werden, um die beim Randbeschnitt anfallende Materialmenge zu berücksichtigen. Das Testbauteil wird dafür nach dem Schema aus Abb. 3-5 d) aufgebaut und die Lagenmasse aus dem Bereich 1 dem Verschnitt zugeschlagen.

### 3.3.1.1 Standardwerte für die Berechnung

Für die Produktivitätsbetrachtungen in der Arbeit wird als Basis ein Standardbauteil definiert. Dieses wird bei allen Berechnungen verwendet, es sei denn, es werden explizit abweichende Werte angegeben. Es ist einfach gestaltet: Die Bauteilbereiche 1 und 2 weisen die gleichen Eigenschaften auf. Tab. 3-1 fasst die Vorgabewerte zusammen.

**Tab. 3-1: Eingabeparameter für das Standardbauteil**

Parameter	Variable	Wert	SI-Wert
Bauteillänge	$l_B$	2 m	2 m
Längenanteil von Bereich 1	$k_{l,Bb1}$	beliebig	beliebig
Durchmesser	$D_{Bb1} = D_{Bb2}$	70 mm	0,07 m
Sollwandstärke	$w_{soll}$	4 mm	0,004 m
Flechtwinkel	$\varphi_{Bb1} = \varphi_{Bb2}$	von Basisgeflecht	von Basisgeflecht

Der Durchmesserwert ist so gewählt, dass mit allen Basisgeflechtarten (Standard-, QI-, Hybrid und Heavy-Tow-Geflecht aus Abschnitt 2.2.6) auf einer Flechtmaschine mit 64 Flechtfadenspulen<sup>8</sup> ein möglichst geschlossener Geflechtaufbau erreicht wird, bei dem sich die Werte für die Ablagebreite der Garne im Bereich der natürlichen Ablagebreite der jeweilig verwendeten Garne bewegen (vgl. hierzu Tab. A-8). Die Wandstärke ist so gewählt, dass der tatsächliche Faservolumengehalt für alle Basisgeflechtvarianten

<sup>8</sup> Die Spulenzahl der Maschine am LCC (Vgl. Abb. 2-24) in halber Flechtspulenbesetzung wird als Referenz für die Betrachtungen dieser Arbeit verwendet. Bei diesem Maschinen-Setup wird ein Geflecht mit 2 x 2-Abbindung aus 64 Flechtfadenspulen und 32 Stehfäden erzeugt.



bei der gewählten Lagenzahl möglichst nicht mehr als 3 % vom Vorgabewert (55 %) abweicht. Die nachfolgende Tab. 3-2 fasst einige berechnete Werte für zentrale Kenngrößen des Standardbauteils zusammen, die sich für die vier Basisgeflechte ergeben.

**Tab. 3-2: Eckdaten des Standardbauteils für die Basisgeflechte**

	Variable	Standard	QI	Hybrid	Heavy-Tow
<b>Flechtfadenabstand [mm]</b>	$b_{Ff}$	4,86	3,44	4,86	6,64
<b>Stehfadenabstand [mm]</b>	$b_{Sf}$	6,87	6,87	6,87	-
<b>Lagenanzahl [-]</b>	$n_L$	9	6	6	4
<b>Faservolumengehalt [%]</b>	$k_{FVG}$	55,7	58,2	54,8	55,2
<b>Preformmasse [g]</b>	$m_p$	1764	1843	1919	1749

Grundidee bei der Definition des Bauteils ist, dass mit allen Basisgeflechtvarianten dieselbe Geometrie bei gleichzeitig akzeptabler Geflechtqualität gefertigt werden kann, um den Einfluss des Geflechtaufbaus auf die Fertigungszeit bewerten zu können<sup>9</sup>. Der Vergleich muss auf Bauteil- und nicht auf Einzellagenebene erfolgen, allein schon deswegen, weil sich die Anzahl der für das Bauteil benötigten Lagen bei den verschiedenen Basisgeflechten unterscheidet und deshalb bedeutende Unterschiede in der Fertigungszeit zu erwarten sind. Die Preformmasse ist für alle Geflechtvarianten in etwa ähnlich, so dass die Maschinenablagerate, die mit der jeweiligen Geflechtart erreicht wird, gleichzeitig ein ungefähres Maß für die Bauteilfertigungszeit ist.

Flechtmaschine und Basisgeflechte sind festgelegt. Für die Definition des Standardbauteils müssen noch Werte für den Durchmesser (Einfluss auf die Faserablagebreiten, Bedeckungsgrad) und die Wandstärke (Einfluss auf den angestrebten Faservolumengehalt) festgelegt werden. Da die Basisgeflechte sehr unterschiedlich aufgebaut sind, ist es schwierig, Werte für die beiden Parameter zu finden, bei denen alle Rahmenbedingungen (geschlossene Bedeckung, Garnbreite im Bereich der natürlichen Ablagebreite, Faservolumengehalt) für alle vier Geflechtarten erfüllt sind. Auch beim verwendeten Parametersatz müssen bei der Bauteildefinition teilweise Kompromisse eingegangen werden:

- Der Kerndurchmesser  $D_{Bb}$  ist für das **Standardgeflecht** etwas zu groß; der Wert für den Flechtfadenabstand liegt mit knapp 5 mm bereits oberhalb der Grenze für die natürliche Ablagebreite eines CF-12k-Garns. Das Geflecht ist daher voraussichtlich nicht komplett geschlossen. Bei der hohen Anzahl an Lagen im

<sup>9</sup> Ein solcher Vergleich müsste eigentlich auf Basis gleicher mechanischer Eigenschaften (Längssteifigkeit o.ä.) erfolgen. Da die verwendeten Basisgeflechte jedoch alle auf unterschiedliche Anwendungsfälle ausgelegt sind, ist ein solcher Vergleich schwierig. Es werden daher die Fertigungszeiten auf Basis geometrischer und nicht mechanischer Ähnlichkeit des Bauteils verglichen.

Bauteil wird aufgrund von Nesting dennoch eine gleichmäßige Verteilung der Garne in der Bauteilquerschnittsfläche erwartet. Die Abweichung zum angestrebten Flechtfadenabstand wird daher als zulässig bewertet.

- Beim **QI-Geflecht** liegt die Flechtfadenbreite trotz Verwendung desselben Garntyps (CF-12k) aufgrund des höheren Flechtwinkels von  $\pm 60^\circ$  im akzeptablen Bereich. Es ergibt sich jedoch etwas zu große Abweichung des tatsächlichen Faservolumengehalts vom Sollwert. Das wird akzeptiert, da der Wert für die anderen Geflechtarten sehr gut getroffen wird und auch mit anderen Parametersätzen keine geringere Abweichung realisiert werden konnte.
- Beim **Hybridgeflecht** wird die Entscheidung, ob eine geschlossene Bedeckung vorliegt, anhand der Stehfadenbreite getroffen. Die dünnen GF-Garne bilden immer ein offenes Geflecht. Die Stehfadenbreite liegt für CF-50k-Fasern im akzeptablen Bereich, zudem wird der angestrebte Faservolumengehalt sehr genau getroffen.
- Beim **Heavy-Tow-Geflecht** liegen die Werte sowohl für die Flechtfadenbreite als auch den Faservolumengehalt sehr eng an den Zielwerten.

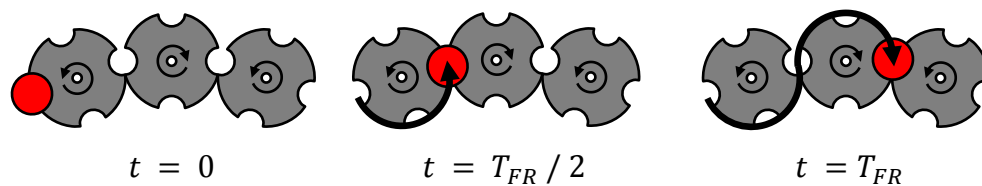
Für die vier verschiedenen Basisgeflechte kann die Preformmasse des Bauteils nach Formel (3-12) bestimmt werden, die ebenfalls in der Tabelle angegeben ist. Sie liegt für Standard- und Heavy-Tow-Geflecht beinahe beim gleichen Wert. Die QI-Geflecht-Preform ist aufgrund des höheren Faservolumengehalts etwas schwerer; beim Hybridgeflecht ist das höhere Preformgewicht auf die größere Dichte der GF-Flechtfäden zurückzuführen.

## 3.3.2 Flechtmaschine

Bei der Planung einer Geflechtbauteilfertigung wird aus den Bauteilgeometriedaten und der Art des Geflechts mit Kenntnis der natürlichen Ablagebreite der verwendeten Garne die Anzahl der benötigten Flechtspulen  $n_S$  und damit der Maschinengröße nach Formel (2-1) bestimmt. Anschließend lässt sich für eine bestimmte Arbeitsgeschwindigkeit der Maschine die Ablagerate berechnen.

### 3.3.2.1 Definition der Flechtmaschine im Berechnungsmodell

Im Berechnungsmodell ist die Anzahl der Klöppel  $n_K$  der Anlage ein Eingabewert. Das Modell ist so aufgebaut, dass auch Teilbesetzungen der Maschine und andere Abbin-dungen (1 x 1 und 4 x 4) gerechnet werden können. Bei Teilbesetzungen werden allerdings teilweise leere Spulen durch die Maschine transportiert, die Produktivität ist dabei niedriger als bei einer vollbesetzten Maschine. Für das 4 x 4-Geflecht weisen die Flü-gelräder acht Einstiche auf. Diese Sonderfälle werden im weiteren Verlauf der Arbeit nicht berücksichtigt. Alle betrachteten Geflechte sind 2 x 2-Geflechte.



**Abb. 3-6: Flügelradrehzahl und Klöppelgeschwindigkeit**

Ausschnitt einer Flügelradreihe zu drei verschiedenen Zeitpunkten: Je kompletter Flügelradumdrehung wandert der Klöppel zum übernächsten Flügelrad.

Auf einer Maschine, deren Flügelräder vier Einstiche aufweisen, entspricht die Anzahl der Klöppel immer der Anzahl der Flechtspulen. Da auf jedem Flügelrad zwei Klöppel sitzen, ist die Anzahl der Flügelräder  $n_F$  halb so groß wie die Klöppelanzahl.

Die Klöppel werden durch Drehung der Flügelräder in der Maschine transportiert. Bei jeder Umdrehung eines Flügelrades werden die Klöppel um zwei Flügelräder weitergeschoben (s. Abb. 3-6). Nach halb so vielen Flügelradumdrehungen wie es Flügelräder in der Maschine gibt, befindet sich der Klöppel wieder am Ausgangspunkt und hat einen Umlauf um das Maschinenzentrum vollendet.

Die Dauer für einen Spulenumlauf hängt davon ab, wie schnell sich die Flügelräder drehen. Die Flügelradrehzahl  $f_F$  ist ein weiterer Eingabewert, dessen Kehrwert die Dauer einer Flügelradumdrehung  $T_{FR}$  ist. Für die Berechnungen in der Arbeit wird die Referenzflügelradrehzahl auf  $200 \text{ min}^{-1}$  festgelegt. Die Spulenumlaufdauer  $T_S$  beträgt:

$$T_S = T_{FR} * \frac{n_K}{4} = \frac{1}{f_S} \quad (3-13)$$

Das Ergebnis wird oft in Form der Spulenumlauffrequenz  $f_S$  dargestellt und dann Flechtmaschinendrehzahl<sup>10</sup> genannt, die in Umdrehungen pro Minute angegeben wird.

Weitere Eingabewerte für das Rechenmodell sind die Spulenvolumina, sowohl für die Flechtfadenspulen  $V_{S,Ff}$  als auch für die Stehfadenspulen  $V_{S,Sf}$ . Diese haben sehr großen Einfluss auf die Produktivität, da sie darüber bestimmen, wie oft der Prozess unterbrochen und die Maschine neu gerüstet werden muss. Als Referenzmaschine, die die Basis für die Berechnungen bildet, wird eine 64-klöpplige Flechtmaschine verwendet. Das Flechtspulenvolumen wird mit  $V_{S,Ff} = 300 \text{ cm}^3$  festgelegt<sup>11</sup>. Die Stehfadenspulen werden als sehr groß angenommen. Das verwendete Volumen entspricht etwa  $15 \text{ kg CF}$  bei einem Packungsdichtefaktor der Rohmaterialspule  $k_{PR}$  von  $60 \%$ <sup>12</sup>. Spulen dieser

<sup>10</sup> Die Flechtmaschinendrehzahl ist die typische Geschwindigkeitsangabe für Rotationsflechtmaschinen.

<sup>11</sup> Dieser Wert orientiert sich an der Spulengröße der Flechtmaschine des LCC mit  $265 \text{ cm}^3$ .

<sup>12</sup> Dieser Wert wurde durch Wiegen und Volumenbestimmung an einigen CF-Herstellerspulen im Rahmen einer Semesterarbeit von Christian Poxleitner [115] ermittelt.

Größe sind am Markt wenig verbreitet, werden allerdings in der Automobilindustrie als Vorlagespulen in Faserverbund-Fertigungsprozessen verwendet<sup>13</sup>, um Rüstaufwände zu reduzieren. BMW setzt diese Spulen für die vom Gatter zugeführten Stehfäden auch bei der Geflechtherstellung ein. Die nachfolgende Tab. 3-3 fasst alle die Maschine betreffenden Eingabewerte zusammen.

**Tab. 3-3: Eingabeparameter für die Referenzmaschine**

Parameter	Variable	Wert	SI-Wert
Klöppelanzahl	$n_K$	64	-
Flügelraddrehzahl	$f_F$	$200 \text{ min}^{-1}$	$3,3 \text{ s}^{-1}$
Flechtspulenvolumen	$V_{S,ff}$	$300 \text{ cm}^3$	$0,000300 \text{ m}^3$
Stehfadenspulenvolumen	$V_{S,sf}$	$14000 \text{ cm}^3$	$0,014 \text{ m}^3$

### 3.3.3 Maschinenzklus und Bauteilanzahl

Nach der Festlegung der Bauteil- und Maschineneckdaten wird die Anzahl der Bauteile errechnet, die je Maschinenzklus gefertigt werden kann. Bei dieser Betrachtung wird davon ausgegangen, dass immer die Flechtfadenspulen vor den Stehfäden leer werden, d. h. die Flechtfadenlauflänge ist limitierend für die Anzahl der in einem Zyklus herstellbaren Preforms.

Die auf einer Flechtfadenspule vorhandene Fadenlauflänge  $l_{S,ff}$  hängt vom Spulenvolumen  $V_{S,ff}$ , dem Flechtfadentiter  $Tt_{ff}$  und der Packungsdichte  $k_{PS}$  des Garns auf der Spule ab. Da die Flechtfadenspulen nach dem Umspulvorgang nicht mehr so dicht gepackt sind wie auf den Herstellerspulen, wird ein geringerer Packungsdichtefaktor von 50 % angenommen (vgl. hierzu auch Tab. A-9).

$$l_{S,ff} = \frac{V_{S,ff} * k_{PS} * \rho_{ff}}{Tt_{ff}} \quad (3-14)$$

Pro abgelegter Lage wird vom Fadenvorrat auf der Spule die Länge  $l_{S,ff,L}$  verbraucht, die vom Flechtwinkel  $\varphi_{Bb}$  und der Länge  $l_{Bb}$  der jeweiligen Bauteilbereiche abhängt.

$$l_{S,ff,L} = \sum_i \frac{l_{Bb,i}}{\cos \varphi_{Bb,i}} \quad (3-15)$$

Abhängig von der Lagenanzahl können mit der Lauflänge der Spule theoretisch  $n_{B,Zyk,theo}$  Bauteile geflochten werden. Diese Zahl wird in der Regel ein Kommawert

<sup>13</sup> z. B. in der Gelegefertigung bei SGL Automotive Carbon Fibers für BMW.

sein, da die auf der Spule vorhandene Lauflänge nicht exakt derjenigen entspricht, die für eine bestimmte Anzahl von Preforms benötigt wird. Der errechnete Wert muss also auf die nächstkleinere ganze Zahl  $n_{B,Zyk}$  abgerundet werden, die dann die tatsächliche Anzahl der Bauteile angibt, die mit einer Maschinenfüllung hergestellt werden kann.

$$\frac{l_{S,ff}}{l_{S,ff,L} * n_L} = n_{B,Zyk,theo} \xrightarrow{\text{Abrunden}} n_{B,Zyk} \quad (3-16)$$

Das auf der Spule verbleibende Restgarn ist dem Verschnitt zuzuschlagen<sup>14</sup>.

### 3.3.4 Prozesskennzahl Maschinenablagereate

Mit der Kernvorschubgeschwindigkeit  $v$  aus Formel (2-2) und der Bauteillänge lässt sich bestimmen, wie lange das Flechten einer Lage dauert. Diese Berechnung muss wiederum bereichsweise mit den jeweiligen Eingabewerten durchgeführt werden. Aus der Summe ergibt sich die Ablagedauer für eine Lage des Flechtbauteils  $t_{L,B}$ , die einen wichtigen Eingabewert für die weitere Berechnung darstellt.

$$t_{L,B} = \sum_i t_{L,Bb,i} = \sum_i \frac{l_{Bb,i}}{v_{Bb,i}} \quad (3-17)$$

Aus dem Flechtwinkel  $\varphi$  und dem Bauteilumfang  $U_B$ , der Spulenumlaufdauer  $T_S$ , dem Titer  $Tt_{ff}$  der Flechtäden und der Spulenzahl  $n_S$  lässt sich die Flechtadenablagereate der Maschine  $\dot{m}_{ff}$  bestimmen. Auch dies erfolgt bereichsweise:

$$\dot{m}_{ff,Bb} = \frac{U_{Bb} * Tt_{ff}}{\sin \varphi_{Bb} * T_S} * n_S \quad (3-18)$$

Die Stehfadenablagereate in einem Bereich lässt sich aus der Kernvorschubgeschwindigkeit  $v$ , der Anzahl der Stehfäden  $n_F$  (entspricht der Anzahl der Flügelräder) und dem Titer der Fäden  $Tt_{sf}$  ermitteln.

$$\dot{m}_{sf,Bb} = v_{Bb} * n_F * Tt_{sf} \quad (3-19)$$

Um die mittlere Geflechtablagereate der Maschine  $\dot{m}_M$  zu errechnen, werden die jeweiligen Ablageraten für Flecht- und Stehfäden aus den beiden Bereichen mit einem Faktor

<sup>14</sup> Die Verschnittminimierung muss das Ziel der Fertigung und Aufgabe der Produktionsplanung sein. Naheliegenderweise sollten die Flechtspulen mit genau der Materialmenge bespult werden, die für die angestrebte Bauteilanzahl ausreicht. Dies ist allerdings nur dann korrekt, wenn keine Flechtfehler auftreten, die Materialverlust auf einzelnen Spulen zur Folge haben. Es ist im Einzelfall abzuwägen, mit welcher Garnreserve auf den Spulen gearbeitet werden muss, um das Produktionsziel sicher zu erreichen. In der vorliegenden Arbeit werden diese Aspekte allerdings nicht weiter betrachtet.

multipliziert, der die anteilige Flechtdauer im betreffenden Bereich in Relation zur Gesamtflechtdauer der Lage angibt. Die Vorschubgeschwindigkeiten in den einzelnen Bereichen können bei unterschiedlichen Flechtwinkeln stark voneinander abweichen, so dass für die Gesamtlage unbedingt ein gemittelter Wert angegeben werden muss. Abschließend ergibt sich die mittlere Ablagerate der Maschine:

$$\dot{m}_M = \sum_i \frac{t_{L,Bb,i}}{t_{L,B}} (\dot{m}_{Ff,Bb,i} + \dot{m}_{Sf,Bb,i}) \quad (3-20)$$

Dieser Wert stellt eine der zentralen Bewertungsgrößen in der vorliegenden Arbeit dar. Er gibt den maximalen ungestörten Output der Maschine an fertigem Geflecht pro Zeiteinheit an. Durch Maschinenstillstandzeiten, verursacht z. B. von Rüstvorgängen oder Fertigungsfehlern, reduziert sich diese Ablagerate.

## 3.4 Teilmodell zum Produktionssystem

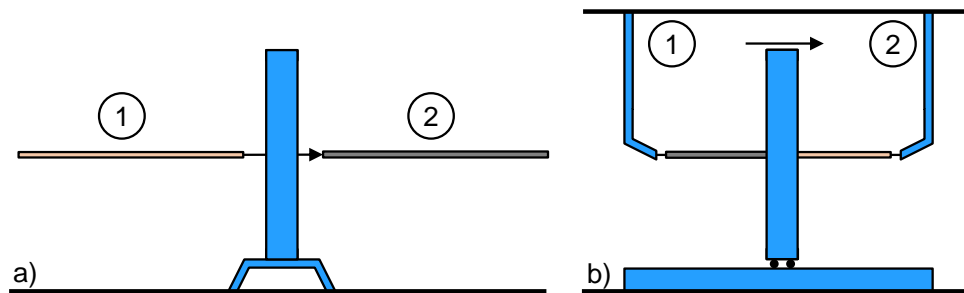
In diesem Teilbereich des Gesamtmodells zur Produktivitätsbewertung des Flechtprozesses wird der Einfluss des Produktionssystems untersucht. Je nach dessen Aufbau gibt es Unterschiede in der Fertigungszeit für ein- und dasselbe Bauteil. Ziel der Untersuchung ist, die Variante zu identifizieren, mit der eine möglichst hohe bauteilspezifische Geflechtablagerate erreicht werden kann.

### 3.4.1 Aufbau des Produktionssystems

Ein Produktionssystem für die automatisierte Serienfertigung von Geflechtbauteilen, wie es in der Automobilindustrie benötigt wird, weist verschiedene Bestandteile auf. Die Flechtmaschine erzeugt das Geflecht, ein Handhabungssystem sorgt für die Relativbewegung zwischen Flechkern und Flechtmaschine, und verschiedene Nebenaggregate kommen zum Einsatz, z. B. für das automatische Abschneiden des Geflechts nach dem Abschluss des Flechtvorgangs, um das gefertigte Bauteil aus der Anlage zu entnehmen.

#### 3.4.1.1 Grundlegendes zum Layout der Fertigungszelle

Das Aufbringen einer Geflechtlage auf den formgebenden Flechkern setzt eine Relativbewegung zwischen Kern und Flechtmaschine voraus. Diese kann prinzipiell auf zwei verschiedene Weisen erreicht werden, die in Abb. 3-7 dargestellt sind: Entweder der Kern wird durch das Zentrum der Flechtmaschine bewegt, oder die Maschine bewegt sich entlang des Kerns.



**Abb. 3-7: Relativbewegung zwischen Flecht kern und Maschine**

a) Der Kern wird durch eine feststehende Maschine bewegt.

b) Die Maschine bewegt sich entlang eines fest eingespannten Kerns.

Die Darstellung illustriert den geringeren Platzbedarf der Variante mit bewegter Maschine.

Dabei eignet sich der Ansatz der bewegten Flechtmaschine besonders für die Herstellung langer, gerader Bauteile (vgl. hierzu Abschnitt 2.4.1). Dies spart zwar Platz in der Fertigung, da nicht auf beiden Seiten der Maschine freier Raum von der Größe zumindest einer Bauteillänge vorgesehen werden muss. Sobald aber gekrümmte Kerne beflecht werden müssen, wird entweder eine sehr aufwendige Kinematik für das Bewegen des Flechtmaschinenrumpfs erforderlich, oder es müssen Abweichungen des Flechtwinkels entlang des Bauteilumfangs in Kauf genommen werden. Diese entstehen, wenn die Zentralachse des Kerns nicht senkrecht zur Maschinenebene steht, der Kern also „schräg“ durch das Maschinenzentrum bewegt wird (vgl. hierzu auch [23]).

Eine Entwicklung der jüngeren Zeit nutzt einen Industrieroboter zur Bewegung einer Flechtmaschine entlang des fest eingespannten Flecht kerns [116], um auch komplex geformte Profile beflecht zu können. Die verwendete Maschine muss jedoch vom Roboter bewegt werden können, was nur mit einer sehr kleinen Flechtmaschine möglich ist. Das Verfahren ist also nur für Maschinen mit geringer Klöppelzahl oder sehr kleinen Flechtspulen einsetzbar. Ein weiterer Nachteil der bewegten Flechtmaschine ist, dass die Zuführung der Stehfäden von einem Gatter nur schwer umgesetzt werden kann; diese müssen also am Maschinenrumpf befestigt und ebenfalls mitbewegt werden.

In jedem Fall bedingt das Bewegen der Maschine, dass viel größere und zudem rotierende Massen beschleunigt werden müssen. Das hat im Betrieb einen bedeutend höheren Energieaufwand im Vergleich mit der Variante des bewegten Kerns zur Folge. Speziell bei großen und damit schweren Flechtmaschinen ist das problematisch.

Die in der vorliegenden Arbeit verfolgten Ansätze zur Steigerung der Produktivität zielen darauf ab, einerseits größere Flechtspulen zu verwenden und andererseits eine höhere Maschinengeschwindigkeit zu erreichen. Beide Ansätze würden das Bewegen der Flechtmaschine erheblich erschweren und die Kosten einer derartigen Anlage stark erhöhen, so dass der Ansatz der bewegten Maschine für die Maximierung der Produktivität als nicht zielführend eingestuft und daher nicht weiter betrachtet wird.

Aus den oben angeführten Gründen hat sich für das Flechten von komplex geformten Preforms für die FVK-Herstellung weitestgehend das Herstellverfahren mit bewegtem

Kern durchgesetzt. Die Bewegung des Kerns erfolgt bei modernen Anlagen zumeist über Industrieroboter, die maximale Flexibilität in Bezug auf die Geometrie der zu beflechtenden Kerne bieten (s. hierzu auch Abb. 2-21, Abb. 2-24, Abb. 3-11 und Abb. 3-12). Weitere Details zum Aufbau des Handhabungssystems, die für die Produktivitätsberechnung relevant sind, finden sich in Abschnitt 3.4.1.3.

### 3.4.1.2 Flechtmaschinentyp

Das zentrale Element eines Produktionssystems ist die Flechtmaschine. FVK-Hohlprofil-Bauteile, wie sie in der Karosseriestruktur eines Autos eingesetzt werden, weisen in der Regel eine Wandstärke im Bereich einiger Millimeter auf, die nicht mit dem Aufbringen nur einer Materiallage erreicht werden kann. Die Gestaltung der Flechtmaschine ist entscheidend für die Effizienz der Geflechtfertigung.

#### Einzellagenflechtmaschine

Um mehrlagige Faservorformlinge zu erzeugen, muss der Flecht kern bei einer Flechtmaschine mit einer Flügelradreihe mehrmals durch das Flechtzentrum geführt werden. Dieser Maschinentyp kommt für die Faserverbundbauteilfertigung überwiegend zum Einsatz und wird als Einzellagenflechtmaschine (ELFM) bezeichnet (s. Abb. 3-8 a)).

ELFM bieten bestmögliche Flexibilität in der Produktion, da jede gewünschte Lagenanzahl durch eine entsprechende Anzahl an Beflechtvorgängen realisiert werden kann. Sie sind konstruktiv einfach aufgebaut und daher kostengünstig und wenig reparaturanfällig. Sie können in Radial- oder in Axialkonfiguration ausgeführt sein.

#### Mehrlagenflechtmaschine

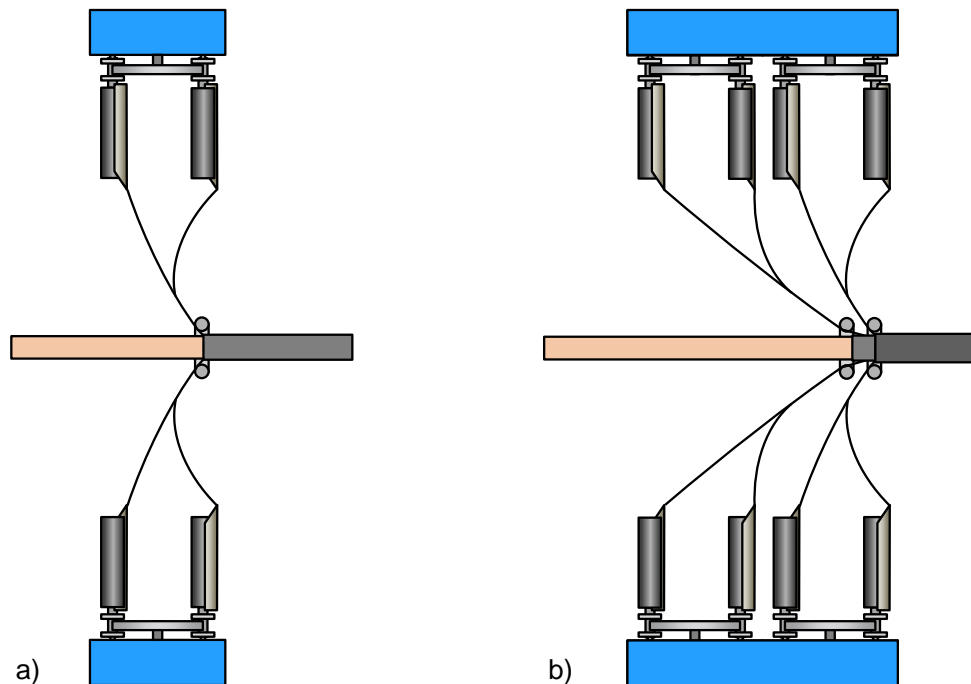
Im Unterschied dazu besitzen so genannte Mehrlagenflechtmaschinen (MLFM) mehrere Flügelradreihen, die gleichzeitig aktiv sind. So können bei einer Durchführung des Flecht kerns durch das Maschinenzentrum mehrere Lagen Geflecht aufgebracht werden (s. Abb. 3-8 b)). Die Maschinenablagerrate vervielfacht sich also im Vergleich mit einer ELFM entsprechend der Anzahl der Flügelradreihen.

Beim Einsatz einer MLFM ist es durch Verwendung entsprechender Weichen möglich, Klöppel zwischen den Flügelradreihen auszutauschen und die übereinander liegenden Lagen miteinander zu verknüpfen. So lassen sich insbesondere die interlaminaren Eigenschaften<sup>15</sup> des resultierenden Composite-Materials verbessern. Auch MLFM können in Axial- oder Radialbauweise ausgeführt werden. Der Vorteil der schnelleren Geflechtablage wird durch verschiedene Nachteile erkauft. Zunächst ist die Konstruktion der Maschine deutlich aufwendiger, das erhöht die Anschaffungskosten.

---

<sup>15</sup> z. B. die interlaminare Schubfestigkeit (ILSS) oder die Bruchzähigkeit



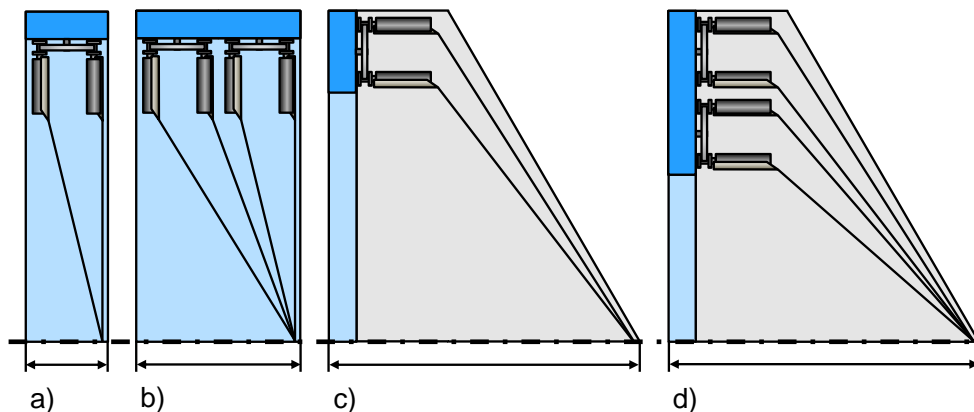


**Abb. 3-8: Einzel- und Mehrlagenflechtmaschine in Radialbauweise**

- a) Schnitt durch eine ELFM. Eine Geflechtlage wird gebildet und auf dem Kern abgelegt.
- b) Schnitt durch eine MLFM. Die Anordnung ist um eine Flögelradreihe erweitert, deren Geflecht sich an einem zweiten Flechtkegel vereinigt.

Durch die höhere Anzahl an Garnen steigen die Flechtkräfte bedeutend an, das Kernhandhabungssystem muss entsprechend hohe Abzugskräfte aufbringen, und der Flechtkegel muss dieser erhöhten Belastung standhalten. Des Weiteren ist die Flexibilität bei der Bauteilgestaltung eingeschränkt. Bauteile können nur mit einer Lagenanzahl gefertigt werden, die einem Vielfachen der Flögelradreihen entspricht. Die Maschinen weisen im Vergleich mit ELFM einen größeren Bauraumbedarf auf (s. Abb. 3-9). Die Bautiefe des Flechtrumpfs bzw. der Flechtkegel können Schwenkbewegungen des Kerns behindern, die beim Beflechten gekrümmter Kerne notwendig sind.

Die Geometrie der Kerne wird zudem durch die hintereinander liegenden Flechtpunkte beeinträchtigt. Um die Geflechtbildung optimal zu kontrollieren, ist es sinnvoll, für jede Flögelradreihe einen separaten Flechtring zu verwenden, wie in Abb. 3-8 b) gezeigt. Dies schränkt jedoch entweder die zugelassenen Krümmungsradien des Kerns stark ein oder es müssen Flechtringe mit größerem Durchmesser eingesetzt werden. Diese liegen nicht optimal eng am Kern an, was nachteilig für die Gleichmäßigkeit des Geflechts ist. Außerdem ist die Halterung mehrerer hintereinander liegender Flechtringe schwierig umzusetzen, und das Einfädeln der Fäden beim Rüsten wird erschwert. Um Einschränkungen bei der Kerngeometrie zu vermeiden, können die Fasern aller Flögelradreihen an einem Flechtring gebündelt werden. Die dabei zwischen den Geflechtlagen auftretenden Reibungseffekte stören eine gleichmäßige Geflechtbildung ebenfalls, so dass Flechtfehler entstehen können.



**Abb. 3-9: Verschiedene Flechtmaschinenkonfigurationen im Halbschnitt**

Schematische Darstellung der Bautiefe und der Lage des Flechtpunkts für Flechtmaschinen unterschiedlicher Bauweise mit gleich großem Außendurchmesser.

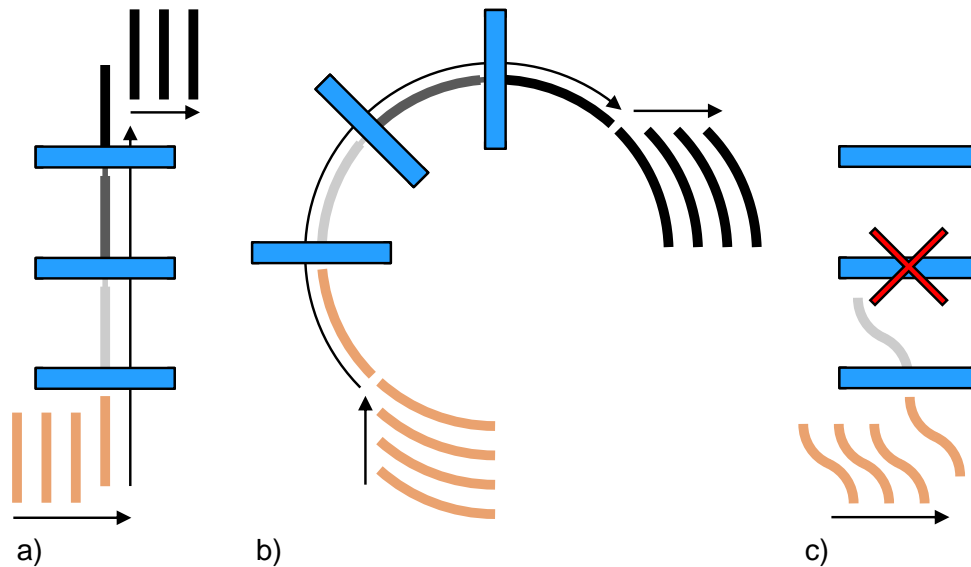
- |                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| a) ELFM in Radialbauweise | b) MLFM in Radialbauweise |
| c) ELFM in Axialbauweise  | d) MLFM in Axialbauweise  |

Die Verwendung von MLFM ist besonders aus Sicht der Qualitätskontrolle kritisch zu beurteilen, da im Fall des gleichzeitigen Aufbringens mehrerer Geflechtlagen keine optische Kontrolle der Geflechtqualität der unteren Lage(n) möglich ist. Neben der Geflechtqualität wird auch die Überwachung der einzelnen Flechtfäden auf Garnschädigung und Fadenriss bei mehreren hintereinander liegenden Flechtkegeln deutlich erschwert. Der Einsatz einer MLFM ist aus diesen Gründen im Bereich Luftfahrt, wo eine vollständige Kontrolle der Faserlage in jedem Bauteil erfolgen muss, unmöglich. Auch bei Automobilanwendungen sind Möglichkeiten zur Online-Überwachung der Fertigungsprozesse oftmals eine Voraussetzung für die Prozessqualifikation.

Der Nachteil einer MLFM aus Sicht der Prozesseffektivität ist, dass die Maschine durch eine größere Klöppelanzahl störanfälliger und aufwendiger zu rüsten ist. Die hintereinander liegenden Flechtkegel erschweren außerdem die Reparatur im Fall des Auftretens eines Fehlers, z. B. wenn ein gerissenes Garn neu eingefädelt werden muss. Für das Beseitigen einer Störung muss bei MLFM im Vergleich mit ELFM deutlich mehr Zeit einkalkuliert werden.

### Verkettete Flechtmaschinen

Einen Sonderfall stellt der Einsatz verketteter Flechtmaschinen innerhalb einer Produktionsanlage dar. Dabei werden mehrere Flechtkerne direkt nacheinander durch verschiedene Maschinen bewegt, die gleichzeitig aktiv sind. Es werden also ein Kern an mehreren Stellen oder mehrere miteinander über ein durchgehendes Geflecht verbundene Kerne gleichzeitig beflochten. Da die einzelnen Maschinenrumpfe gegenseitig feste Positionen aufweisen, eignet sich dieses Anlagenkonzept nur zur Herstellung gerader oder einfach gekrümmter Bauteile (Abb. 3-10 a) + b)). Derartige Anlagen werden z. B. im Bereich der Geflecht-Pultrusion für die Herstellung von FVK-Profilen eingesetzt.



**Abb. 3-10: Einsatzszenarien verketteter Flechtmaschinen**

Aufbringen von jeweils drei Geflechtlagen auf einen Kern (hellgrau, dunkelgrau, schwarz).

a) Fertigung gerader Bauteile.

b) Fertigung einfach gekrümmter Bauteile.

c) Nicht möglich: Verkettete Fertigung mehrfach gekrümmter Bauteile.

Bei mehrfach gekrümmten Profilen lässt sich die Bedingung, dass die Zentralachse der Flechtkerne immer senkrecht auf der Flechtebene jeder der Maschinen stehen muss, nicht erfüllen. Dies wäre nur möglich, wenn entweder der Geflechtschlauch nach dem Durchlauf des Kerns durch eine der Maschinen abgeschnitten würde, oder wenn die Einzelflechtrümpfe beweglich (seitlich verfahr- und schwenkbar) wären (Abb. 3-10 c)).

Bei den im Verbund eingesetzten Maschinen handelt es sich in der Regel um ELFM. Durch deren Verkettung entsteht allerdings ein System, das einer MLFM vergleichbare Eigenschaften aufweist. Die Ablagerate (des Gesamtsystems) vervielfacht sich hier ebenfalls entsprechend der Anzahl der verknüpften Flechtmaschinen. Durch den Abstand zwischen den einzelnen Flechtrümpfen lassen sich einige der im vorigen Abschnitt genannten Nachteile einer MLFM beseitigen. Qualitätskontrolle der einzelnen Lagen ist bei einer verketteten Anlage ebenso möglich wie der Einsatz von Prozessüberwachungsmaßnahmen. Außerdem ist an den einzelnen Flechtrümpfen volle Zugänglichkeit für Rüst- und Reparaturmaßnahmen gegeben. Diese Verbesserungen gegenüber den MLFM ermöglichen auch den Einsatz für die Herstellung von Luftfahrtbauteilen; so wird z. B. die Fertigung von CFK-Spannen mit Hilfe verketteter Flechtmaschinen erforscht [74, 75].

Der Materialdurchsatz ist bei einer Anlage mit verketteten Flechtmaschinen vergleichbar zum parallelen Einsatz der gleichen Anzahl von Fertigungszellen mit jeweils einer Flechtmaschine. Diese belegen allerdings wesentlich mehr Produktionsfläche und sind in der Summe der Anschaffungskosten möglicherweise teurer, da in jeder Fertigungszelle ein eigenes System zur Handhabung der Flechtkerne benötigt wird.

Die verkettete Anlage weist hingegen den großen Nachteil auf, dass die Kerne direkt von einer Maschine in die nächste übergehen, so dass diese nicht unabhängig voneinander betrieben werden können. Tritt an einem der Flechtrümpfe ein Fehler auf, müssen auch die anderen stillgelegt werden, bis die Störung beseitigt ist.

Obwohl sich in der Literatur verschiedene Stellen finden, in denen die Verkettung von Flechtmaschinen als mögliches Mittel zur Verbesserung der Produktivität angeführt wird (z. B. [117]), ist zu erwarten, dass es durch die Verkettung zu Einbußen bei der Maschinenverfügbarkeit kommt. Speziell für komplex geformte Bauteile, bei denen aus Geometrie Gründen das Geflecht nach dem Durchlaufen einer Flechtebene ohnehin am Kernende abgeschnitten werden muss, wird voraussichtlich immer die Fertigung in einzelnen, nicht verketteten Fertigungszellen zu bevorzugen sein<sup>16</sup>.

### 3.4.1.3 Handhabungssystem

Ein zweiter zentraler Bestandteil der Gesamtanlage ist das Handhabungssystem, mit dem der Flecht kern bewegt wird. Die Bewegung des Kerns muss exakt mit der Arbeitsgeschwindigkeit der Maschine abgestimmt sein, damit der erwünschte Flechtwinkel eingehalten wird. Die Synchronisation der einzelnen Antriebe wird bei heutigen Anlagen in der Regel durch die Verknüpfung aller Anlagenbestandteile in einer Gesamtanlagensteuerung sichergestellt.

Die Art des Handhabungssystems hat auf die Produktivität einer Flechtanlage praktisch keinen Einfluss, so lange die Bewegung der Kerne schnell genug erfolgt, um die Flechtmaschine mit maximaler Geschwindigkeit betreiben zu können. Dies ist für Klöppelflechtmaschinen bei allen aktuell eingesetzten Systemen zur Kernbewegung gegeben, weshalb die genaue Ausführung des Systems für die Produktivitätsanalyse von Klöppelflechtanlagen von untergeordneter Bedeutung ist.

Im Fall des Einsatzes erheblich schnellerer Flechtmaschinen auf Basis der Rotationsflechttechnik, wie in Kapitel 5 vorgeschlagen, kann allerdings das Kernhandhabungssystem der begrenzende Faktor für die Leistungsfähigkeit der Flechtanlage sein, was bei der Analyse der bauteilbezogenen Ablagerate berücksichtigt werden muss.

#### Linearachse

Für die Fertigung gerader Bauteile kann im einfachsten Fall ein Linearpositionierer verwendet werden. Der Flecht kern wird in diesen zumeist beidseitig eingespannt und durch das Flechtzentrum verfahren. Voraussetzung ist, dass der Kern genügend biegesteif ist, um sich nicht aufgrund der Gravitationskraft so stark zu verformen, dass er nicht zentrisch durch die Flechtmaschine geführt werden kann.

---

<sup>16</sup> Im Fall der oben genannten [74, 75] Spant-Fertigungsanlage wurde die Verkettung zweier Flechtmaschinen aufgrund der Besonderheit des gefertigten UD-Geflecht-Aufbaus gewählt. Jede der beiden Flechtmaschinen bringt dabei nur eine der beiden Verstärkungsfaserorientierungen in +45° bzw. -45° auf.

Ein derartiges System ist äußerst kostengünstig und einfach in der Handhabung bzw. Steuerung. Für die Fertigung von Automobilbauteilen kommt diese Variante aber in der Regel nicht in Betracht, da die Anforderungen an die Geflechtqualität bei den oftmals gekrümmten Bauteilen mit einer rein linearen Kernbewegung nicht erfüllt werden können.

### **Rollen- und Raupenfördereinheit**

Die Förderung des Flechtkerns erfolgt über eine Raupen- oder Rollenfördereinheit. Dabei wird der Kern zwischen den Antriebs- bzw. Führungselementen geklemmt. Die Vorschubkraft für den Kern wird also durch Reibung übertragen, was relativ hohe Klemmkraft erfordert – besonders unter dem Aspekt, dass kein Schlupf zugelassen ist, da er zu Flechtwinkelabweichungen führt.

Für den Einsatz dieses Kernvorschubsystems sind also Flechtkerne erforderlich, die eine ausreichende Querdruckstabilität aufweisen<sup>17</sup>. Da der Kraftangriffspunkt beim Rollen- oder Raupenantrieb allerdings nah beim Flechtzentrum liegt, wird der Kern nur in geringem Umfang auf Biegung belastet – ein Vorteil speziell bei der Herstellung von langen, dünnen Bauteilen.

Der Einsatz einer Raupenfördereinheit ist in der Regel nur bei geraden oder einfach gekrümmten Flechtbauteilen möglich. Ein stark gekrümmter Kern bietet nicht genügend Auflagefläche für die Vorschubeinheit. Im Bereich der Automobilbauteilherstellung wurde der Kernvorschub an der Flechtanlage für Produktion der Stoßfängerträger des BMW M6 mit einer Rollen- bzw. Raupenfördereinheit realisiert [119]. Auf dieser Anlage baut die bereits erwähnte Forschungsflechtanlage zur Spantherstellung ([74, 75]) auf, bei der ein vergleichbares Kernhandhabungssystem erstmals im Bereich Luftfahrt eingesetzt wird. Weiterentwicklungen (z. B. [76, 120]) zielen darauf ab, auch komplexer geformte Kerne mit Rollen- bzw. Raupenvorschubeinheiten zu fördern.

### **Industrieroboter**

Bei der Fertigung komplexer Bauteile werden heute am häufigsten Industrieroboter zur Handhabung der Flechtkerne eingesetzt. Sie bieten maximale Flexibilität, was die Gestaltung der Bewegungsbahn des Kerns anbelangt, und können als Standardprodukte vergleichsweise kostengünstig bezogen werden. Speziell in der Automobilindustrie sind umfangreiche Erfahrungen mit der Programmierung und dem Betrieb dieser Systeme vorhanden, so dass sie sich leicht ins Produktionsumfeld integrieren lassen.

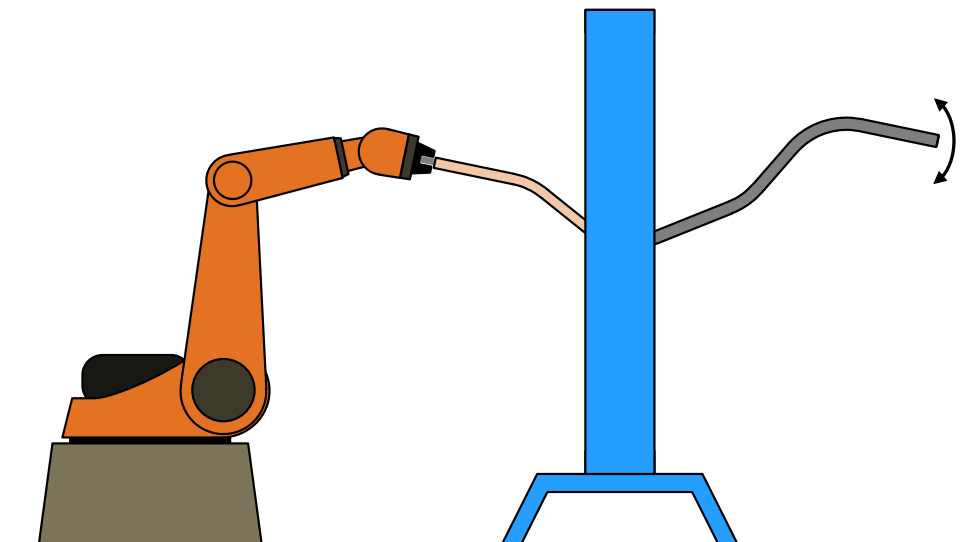
---

<sup>17</sup> Im Rahmen einer Semesterarbeit wurden dazu von Tobias Kistler Untersuchungen durchgeführt [118].

Im einfachsten Fall ist in einer solchen Fertigungszelle auf einer Seite der Flechtmaschine ein Industrieroboter platziert, der den Kern über eine einseitige Einspannung führt (s. Abb. 3-11). In der Faserverbundkunststoffforschung setzen aktuell verschiedene Institute solche Systeme ein (s. Abschnitt 2.4.3). Diese weisen den Nachteil auf, dass längere Flechtkerne und solche, die bruchempfindlich sind oder sehr exakt positioniert werden müssen, mit einseitiger Einspannung oft nicht ausreichend genau geführt werden. Das freie Kernende kann durch die beim Flechten entstehenden Kräfte in Schwingung geraten, oder der Kern kann aufgrund eines zu hohen Biegemoments brechen.

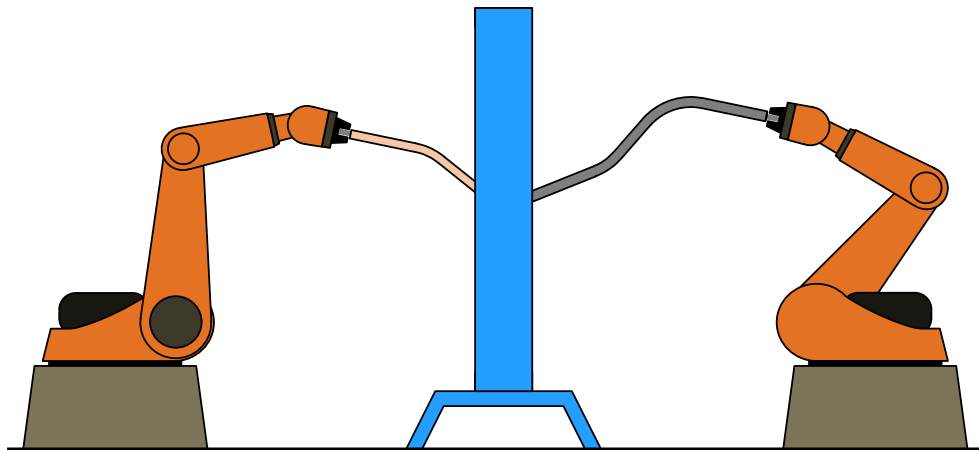
Ein zweiter Roboter auf der anderen Seite der Flechtmaschine, der den Kern ebenfalls führt, beseitigt diesen Nachteil (s. Abb. 3-12). Dieser Aufbau der Fertigungszelle bedingt allerdings eine komplexere Steuerung, da die Bewegungen der beiden Handhabungssysteme exakt aufeinander abgestimmt sein müssen. Erfolgt die Führung der beiden Kernenden nicht absolut synchron, werden dem Kern Kräfte aufgeprägt, die diesen beschädigen können. Dieses Problem lässt sich erfolgreich z. B. durch den Einsatz kooperierender Industrieroboter lösen.

Für den Fall, dass relativ biegeeweiche Kerne z. B. Kunststoffblasformen verarbeitet werden, kann die Führung der Kerne nur an den Enden nicht ausreichend sein. Gekrümmte Kerne können sich durch die Flechtkräfte während des Prozesses verbiegen. Durch das aufgebrachte Geflecht kann die sich die Verformung dann nicht zurückbilden und bleibt nach Abschluss des Flechtvorgangs erhalten: Der gefertigte Vorformling weist nicht die Sollgeometrie auf und kann bei der weiteren Verarbeitung z. B. im RTM-Verfahren nicht ins Werkzeug eingelegt werden.



**Abb. 3-11: Einseitiges Führen des Flechtkerns**

Das freie Kernende schwingt. Beim Vorschub des Flechtkerns durch das Maschinenzentrum werden Biegespannungen im Kern induziert, da dieser Krümmungen aufweist.

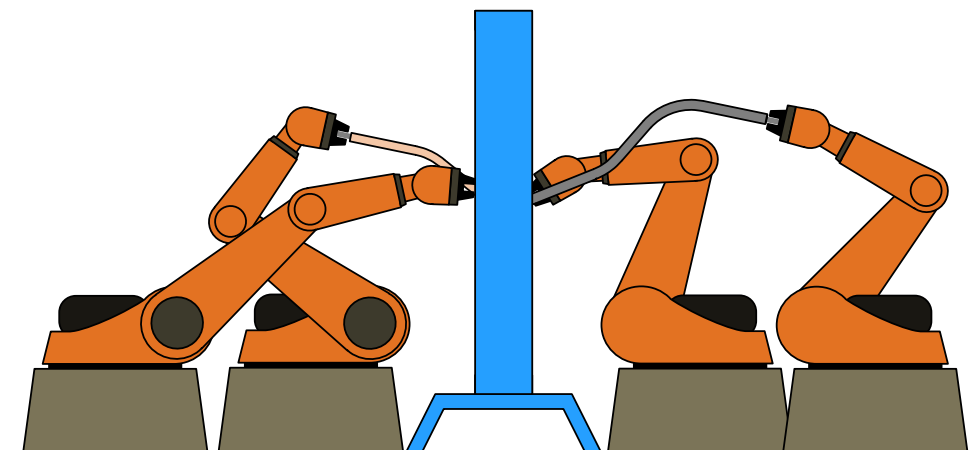


**Abb. 3-12: Beidseitiges Führen des Flechkerns**

Die Schwingungen des Kerns beim Beflechten werden verhindert.

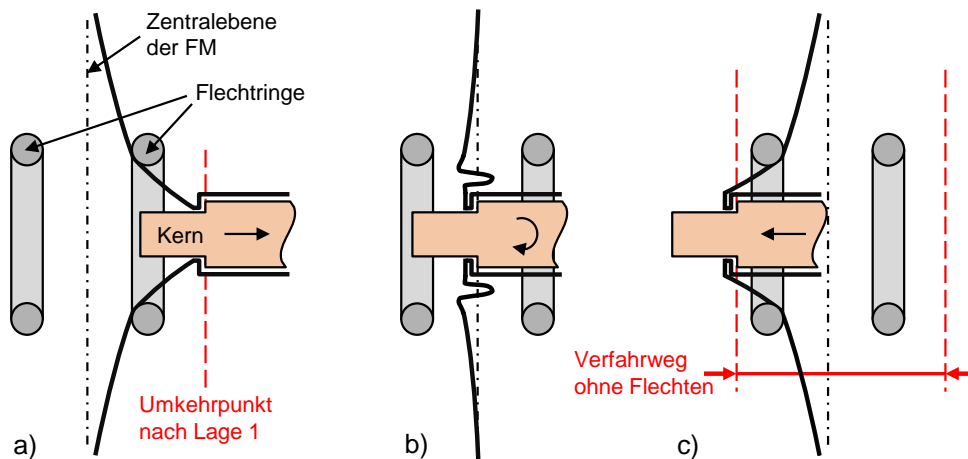
Dieses Problem kann durch den Einsatz weiterer Roboter, die möglichst nah am Flechtpunkt greifen, verhindert werden (s. Abb. 3-13). Dieses Verfahren bringt allerdings weitere Herausforderungen mit sich. Die Roboter müssen auf dem Kern greifen, es ist also ähnlich wie beim Einsatz einer Rollenfördereinheit ein querdruckstabiler Kern notwendig. Um den Kern immer nah am Flechtpunkt zu greifen und eine Verformung zu verhindern, ist zusätzlich häufiges Umgreifen erforderlich, da sich der Kern bewegt. All diese Roboterbewegungen zu koordinieren, verlangt eine ausgefeilte Gesamtanlagensteuerung und eine sehr aufwendige Programmierung.

Diese Variante des Handhabungssystems ist aktuell am weitesten entwickelt und kommt in voll automatisierter Fertigungsumgebung zum Einsatz. Die BMW AG setzt Flechtanlagen mit Multi-Roboter-Handling-Systemen zur Fertigung von Flechtbauteilen ein, z. B. bei der A-Säulen-Verstärkung für den BMW i3 [3].



**Abb. 3-13: Führen des Kerns mit mehreren Robotern**

Durch die beidseitige Führung mit mehreren Kontaktpunkten werden Schwingungen des Kerns verhindert und die flechtkraftbedingten Biegemomente deutlich reduziert.



**Abb. 3-14: Wendevorgang beim Beflechten eines Kerns im Pendelbetrieb**

- Der Kern bewegt sich nach rechts bis zum Umkehrpunkt. Das Beflechten der ersten Lage ist hier abgeschlossen. Das Geflecht (schwarz) zieht sich hinter einer Kante des Kerns zusammen und wird so gegen Verschieben fixiert.
- Die Bewegungsrichtung des Kerns wird umgekehrt. Das Geflecht entspannt sich, während der Kern durch die Zentralebene der Maschine zurück bewegt wird.
- Der Kern bewegt sich nach links, bis am zweiten Flechtring ein neuer Flechtkegel aufgebaut ist, bevor das Flechten der zweiten Lage beginnt.

### 3.4.1.4 Betriebsarten

Wie das Aufbringen mehrerer Lagen durch das Produktionssystem erfolgt, beeinflusst sehr stark die Produktivität. Zwei gängige Ansätze werden nachfolgend beschrieben. Bei beiden Varianten können sowohl ELFM als auch MLFM eingesetzt werden.

#### Pendelbetrieb

Beim Pendelbetrieb wird der Flechtkegel durch das Zentrum der Flechtmaschine hin- und-her-bewegt. Die Bewegungsrichtung des Kerns muss nach dem Flechten einer Lage an einem Umkehrpunkt gewechselt werden. Die Maschine ist dazu für jede der beiden Produktionsrichtungen mit einem Flechtring ausgestattet, an den sich das Geflecht während der Fertigung anlegt. Dieses Setup lässt sich am besten bei Radialflechtmaschinen umsetzen, da hier die Flechtstränge annähernd in der Zentralebene der Maschine verlaufen. Der Flechtkegel und die Umlenkung der Flechtstränge am Ring sind somit für beide Flechtrichtungen identisch. Der Umkehrvorgang ist in Abb. 3-14 dargestellt.

Im Hinblick auf die Prozessproduktivität weist der Pendelbetrieb einen wesentlichen Nachteil auf. Da beim Wechsel der Produktionsrichtung das Beflechten gestoppt wird, während sich der Kern von einem Flechtpunkt zum anderen bewegt, geht Produktionszeit verloren. Es ist daher das Ziel, diesen Verfahrweg (in Abb. 3-14 rot dargestellt) zu minimieren. Er ist umso kleiner, je enger die beiden Flechtringe beieinanderstehen und je genauer der Flechtringdurchmesser an den Bauteildurchmesser angepasst ist, da dann der Flechtkegel besonders klein ausfällt. Für Bauteile mit variablem Durchmesser ist



dies oft nicht möglich, da sich der Flechtringdurchmesser am größten Bauteildurchmesser orientieren muss, wenn kein variabler Flechtring [121] zum Einsatz kommt. Weitere Verluste an Fertigungszeit können durch das Ein- bzw. Ausschleusen von Kernen in die Flechtanlage entstehen, da dies beim Pendelbetrieb nur schwer prozessparallel möglich ist. Bei dieser Betriebsart liegt die bauteilbezogene Ablagerate  $\dot{m}_B$  aufgrund der Maschinenstillstandzeiten immer unter der Maschinenablagerate  $\dot{m}_M$ .

Neben dem Fertigungszeitverlust kann beim Pendelbetrieb ein erhöhter Anteil an Verschnitt entstehen. Da sich das Geflecht während des Umkehrvorgangs entspannt (s. Abb. 3-14 b)), können nahe der Umkehrposition Abweichungen vom gewünschten Faserverlauf auftreten. Damit der vorgegebene Faserwinkel im Bauteil immer sicher eingehalten werden kann, muss ein entsprechend großer Randbereich berücksichtigt werden, der in einem späteren Fertigungsschritt abgetrennt und entsorgt werden muss.

### Umlaufbetrieb

Beim Umlaufbetrieb wird das Aufbringen mehrerer Lagen auf einen Flechkern nicht wie beim Pendelbetrieb direkt hintereinander durchgeführt. Nachdem der Kern für das Beflechten einer Lage durch das Maschinenzentrum geführt wurde, wird der Geflechtschlauch abgeschnitten, so dass der Kern aus der Maschine entnommen werden kann. Dieser wird anschließend wieder auf die Ausgangseite der Maschine zurückgeleitet und in derselben Richtung erneut durch die Maschine geführt, um eine weitere Geflechtlage aufzubringen. Der Vorgang wird so oft wiederholt, bis die gewünschte Anzahl Geflechtlagen auf den Kern aufgebracht ist.

Damit während des Zurückführens des Kerns kein Produktivitätsverlust entsteht, wird direkt im Anschluss an den ersten Kern ein weiterer durch die Maschine geführt und ebenfalls mit der ersten Lage beflochten. Es werden so lange weitere Kerne in die Flechtmaschine geführt, bis der erste Kern wieder in der Ausgangstation angelangt und für das Aufflechten der zweiten Lage bereit ist. Die Anzahl der Kerne, die sich gleichzeitig im Umlauf befindet, hängt also davon an, wie lange die jeweiligen Vorgänge „Flechten einer Lage“ und „Rückführen des Kerns“ dauern. Der Rückführvorgang wird dabei in der Regel deutlich länger dauern, da währenddessen weitere Arbeitsschritte wie z. B. die Qualitätskontrolle der zuletzt aufgebrauchten Lage oder das Auflegen von zusätzlichem Fasermaterial für lokale Verstärkungen erfolgen können.

Optimalerweise wird das Abschneiden des Geflechts nach Abschluss des Flechtens einer Lage so durchgeführt, dass der Flechtvorgang nicht unterbrochen werden muss und die Maschine durchgehend laufen kann. Treten dann keine fehlerbedingten Störungen auf, entspricht die bauteilbezogene Ablagerate  $\dot{m}_B$  der Maschinenablagerate  $\dot{m}_M$ . Nachteilig kann sich allerdings auswirken, dass für das prozessparallele Abschneiden des Flechtschlauchs ein großer Beschnittbereich vorgesehen werden muss, dessen Fertigungszeit die Produktivität verringert. Zusätzlich wird in diesem Bereich Material abgelegt, das beim Besäumen des fertigen Flechtvorformlings vor der Imprägnierung abgetrennt wird und dem Verschnitt zuzuschlagen ist.

### 3.4.1.5 Weitere Systembestandteile

Für die Herstellung von Automobilbauteilen in hohen Stückzahlen wird eine hoch automatisierte Anlage benötigt, bei der abgesehen vom Rüsten keinerlei manuelle Eingriffe vorgenommen werden müssen. Flechtanlagen für den Einsatz in der industriellen Serienfertigung müssen bereits aus Sicherheitsgründen gekapselt ausgeführt sein. Kein Bediener darf sich im Arbeitsbereich des Handhabungssystems (Roboter) aufhalten. Ein weiterer Grund für die vollständige Einhausung der Flechtanlage ist zu verhindern, dass prozessbedingter Faserabrieb in die Umgebung freigesetzt wird. Dies zum einen, weil der Filamentstaub gesundheitsgefährdend sein kann, zum anderen, weil er – beim Einsatz von elektrisch leitfähigen CF – Kurzschlüsse verursachen kann und so eine Gefahr für elektronische Systeme in der Produktionsumgebung darstellt [19]. Wenn nun regelmäßige manuelle Arbeitsschritte erforderlich wären, wie dies z. B. bei den im Forschungsbereich eingesetzten, semi-automatisierten Flechtzellen der Fall ist, wären lange Unterbrechungen der Bauteilfertigung durch den Zutritt des Bedieners in die Zelle nicht zu vermeiden.

Neben der Flechtmaschine und dem Kern-Handhabungssystem müssen daher in einer Gesamtanlage je nach Grad der Automatisierung weitere Aggregate enthalten sein. Im Idealfall werden unbeflochtene Kerne in die Anlage eingespeist und fertig geflochtene und beschnittene Preforms entnommen, die bereits eine Qualitätskontrolle (jeder Geflechtlage) durchlaufen haben.

#### Lagen- bzw. Preformbeschnitt

Das wichtigste Zusatzaggregat, ohne das kein automatisierter Betrieb möglich ist, ist eine Beschnitteinheit, die möglichst nah am Flechtpunkt angebracht sein muss. Sie trennt den beflochtenen Kern vom Geflecht ab, das in der Maschine produziert wird, damit dieser entnommen werden kann. Um zu verhindern, dass die Schnittkanten des Geflechts ausfransen, muss vor dem Abschneiden eine Fixierung aufgebracht werden. Zumeist wird dafür ein Klebeband verwendet, das ebenfalls von der Beschnitteinheit aufgebracht wird.

Im Fall des Pendelbetriebs erfolgt das Abschneiden einmalig nach dem Aufbringen aller Lagen. Im Gegensatz dazu muss beim Umlaufbetrieb nach jeder Lage geschnitten werden, damit der Kern wieder auf die Ausgangsseite der Flechtmaschine zurückgeführt werden kann. Die Art und Weise, wie der Beschnitt erfolgt<sup>18</sup>, muss bei der Prozessbewertung berücksichtigt werden. Wenn der Flechtvorgang für den Beschnitt unterbrochen werden muss, wirkt sich dies negativ auf die bauteilbezogene Ablagerate  $\dot{m}_B$  aus. Idealerweise erfolgen die Lagenbeschnittvorgänge prozessparallel, damit der Flechtvorgang nicht unterbrochen werden muss. Dies lässt sich durch eine synchron mit dem Kern bewegte Beschnitteinheit realisieren.

---

<sup>18</sup> Untersuchungen hierzu wurden in der Semesterarbeit von Florian Rapp [122] durchgeführt.

## Systeme zur Geflechtbeeinflussung

Um den Faseraufbau des geflochtenen Bauteils variabler zu gestalten, können weitere Zusatzaggregate in die Flechtanlage eingebunden werden. Da diese Sonderformen von Geflechten und ihr möglicher Einfluss auf die Produktivität in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet werden, wird auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet.

- Um Bereiche des Bauteils mit zusätzlichen Lagen zu beflechten, kann eine Vorrichtung zum **Umkehren der Flechtrichtung während des Flechtens einer Lage** eingesetzt werden. Um ein Zusammenschieben der zuletzt gefertigten Teillage zu vermeiden, kann diese mit Klemmelementen temporär fixiert werden. Diese Technik wurde z. B. bei der Fertigung der Crashelemente des Mercedes-Benz SLR McLaren eingesetzt [114]. Der Nachteil dieses Vorgehens ist, dass lokale Aufdickungen der Bauteilwandstärke immer eine Dicke von mindestens zwei Geflechtlagen aufweisen.
- Ein weiterer Ansatz ist das **abschnittsweise Aufbringen von Lagen**, bei dem der Geflechtschlauch während des Beflechtens einer Lage abgeschnitten und der Kern dann ohne Flechten weiter verfahren wird, bis an einer anderen Stelle des Kerns wieder mit dem Flechten begonnen wird. Diese Variante hat den Vorteil, dass das Geflecht abschnittsweise gezielt mit einzelnen Zusatzlagen verstärkt werden kann [123].
- Jüngere Arbeiten verfolgen das **Spreizen der Flechtfäden** im Verarbeitungsprozess, um flexibel auf Veränderungen des Bauteildurchmessers reagieren zu können. Dies kann entweder durch pulsierende Flechtringe erfolgen [124] oder durch den Einsatz von Druckluftdüsen [21]. In beiden Fällen sind zusätzliche Aggregate in direkter Umgebung des Flechtzentrums notwendig.
- In der aktuellen Arbeit von Mitwalsky [21] wird ein System zur **Variation der Fadenzahl** vorgestellt, das ebenfalls verwendet wird, ein Geflecht mit konstanter Faserablagebreite an den Bauteildurchmesser optimal anzupassen.
- Immer wieder werden auch **Wickeleinheiten** mit einer Flechtmaschine kombiniert, um Fasern auch in Umfangsrichtung ablegen zu können. Beispiele dafür finden sich an der Spantfertigungsanlage von Airbus [74, 75] oder in der Fan-Case-Fertigung bei A&P Technology [61].
- Auf einen **variablen Flechtring**, der sich an den Durchmesser des zu beflechtenden Kern anpassen lässt, wurde bereits verschiedentlich hingewiesen.

Der Einsatz der genannten Systeme ist je nach Zielsetzung der Anlage optional. Alle beanspruchen flechtpunktnah Platz in der Fertigungszelle, und es werden Signal- und Versorgungsleitungen benötigt. Die große Anzahl verschiedener Systeme macht deutlich, wie komplex der Aufbau eines vollautomatisierten Produktionssystems ist und wie sorgsam die Auswahl der Systembestandteile getroffen werden muss. Denn aus Platzgründen können nicht alle Zusatzaggregate zugleich eingebaut werden.

## Qualitätssicherung

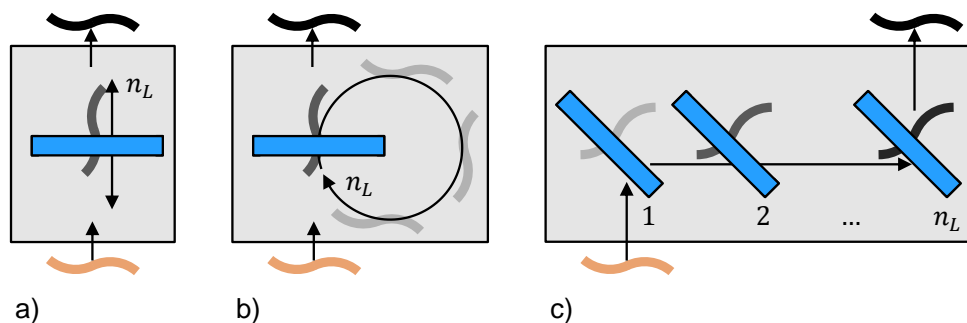
Ein wichtiger Aspekt beim Aufbau einer automatisierten Geflechtfertigung ist die Qualitätssicherung. Sie beginnt bei der Geflechtbildung, die mit Hilfe von Kameras und Kraft-Momenten-Sensoren überwacht werden kann, um Flechtfehler möglichst bereits während ihrer Entstehung zu erkennen und ihre Ablage auf dem Kern zu verhindern. Sie endet bei der kompletten optischen Kontrolle der Geflechtqualität jeder einzelnen Lage.

Für die Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit wird ebenfalls angenommen, dass die Qualitätssicherungsmaßnahmen „online“ erfolgen und keine Verzögerungen im Produktionsablauf verursachen, so dass die bauteilbezogene Ablagerate nicht beeinflusst wird. Die Häufigkeit von Fehlern, die eine Prozessunterbrechung notwendig machen bzw. zu Ausschuss führen, ist eine elementare Eingangsgröße des Teilmodells für Fertigungsfehlereinflüsse, das in Abschnitt 3.6 detailliert behandelt wird.

### 3.4.1.6 Betrachtete Produktionssystemvarianten

Aus den beschriebenen Möglichkeiten zum Aufbau eines Produktionssystems werden vier Layouts abgeleitet, die für die Produktivitätsuntersuchungen in der vorliegenden Arbeit analysiert werden. Die Varianten sind in Abb. 3-15 schematisch dargestellt. Zwei der untersuchten Konzepte stellen dabei Varianten desselben Grundaufbaus dar, weswegen für beide dieselbe Skizze verwendet wird. Die Größe der Darstellungen soll den Platzbedarf für die verschiedenen Anlagentypen qualitativ illustrieren.

Jede der Fertigungszellen beinhaltet neben der Flechtmaschine und dem Handhabungssystem eine Beschnittvorrichtung. Weitere Zusatzaggregate und ein Qualitätskontrollsystem sind in den untersuchten Modellsystemen nicht vorhanden bzw. haben keinen Einfluss auf die Produktivität.



**Abb. 3-15: Aufbau der untersuchten Grundvarianten von Flechtanlagen**

Jeweils für die Herstellung eines Bauteils mit  $n_L$  Geflechtlagen.

- a) ELFM-PB: Einlagenflechtmaschine im Pendelbetrieb.
- b) ELFM-UB: Einlagenflechtmaschine im Umlaufbetrieb (zwei Varianten mit sequentiellem (-S) und prozessparallelem (-P) Beschnitt).
- c) VKFM: Verkettete Einlagen- oder Mehrlagenflechtmaschinen.

### **Einzellagenflechtmaschine im Pendelbetrieb (ELFM-PB)**

Die Verwendung einer Einzellagenflechtmaschine im Pendelbetrieb (ELFM-PB) stellt den einfachsten Aufbau eines automatisierten Fertigungssystems dar (s. Abb. 3-15 a)). Die Fertigungszelle nimmt relativ wenig Platz in Anspruch, und das Handhabungs- und Beschnittsystem kann vergleichsweise einfach aufgebaut sein. Es muss nur ein Beschnittvorgang nach dem Aufflechten aller Lagen stattfinden. Während des Beschnitts und des Kernwechsels wird die Flechtmaschine gestoppt.

### **Einzellagenflechtmaschine im Umlaufbetrieb (ELFM-UB-S u. ELFM-UB-P)**

Wird eine Einzellagenflechtmaschine im Umlaufbetrieb (ELFM-UB) eingesetzt (s. Abb. 3-15 b)), ist im Vergleich mit dem Pendelbetrieb von einem höheren Anlagenwirkungsgrad auszugehen, da keine Stillstandzeiten für das Umkehren der Flechtrichtung bzw. den Wechsel des Flechtkerns anfallen. Es muss allerdings nach jeder Lage geschnitten werden. Dieser Beschnitt sollte prozessparallel erfolgen, um nicht den Vorteil, dass die Anlage im Umlaufbetrieb kontinuierlich laufen kann, durch ein Anhalten während des Beschnittvorgangs zu verlieren. Um die Wichtigkeit des prozessparallelen Verschnitts zu evaluieren, werden für die ELFM im Umlaufbetrieb beide Varianten mit sequentiell (ELFM-UB-S) und prozessparallelem Beschnitt (ELFM-UB-P) untersucht.

Für die Rückführung der Kerne auf die andere Seite der Flechtmaschine ist innerhalb der Anlage ein aufwendiges Handhabungssystem notwendig. Durch dieses System sind sowohl Platzbedarf als auch Anschaffungskosten deutlich höher einzuschätzen als für den Pendelbetrieb. Wird das Handhabungssystem über kooperierende Roboter realisiert, ist zudem ein hoher Aufwand für die Programmierung der Anlage zu erwarten.

### **Verkettete Flechtmaschinen (VKFM)**

Um betrachten zu können, inwieweit die Verkettung von Flechtmaschinen sich im Falle des Auftretens von fehlerbedingten Prozessunterbrechungen negativ auf die Produktivität auswirkt, wird auch eine Anlage mit verketteten Flechtmaschinen (VKFM) modelliert (s. Abb. 3-15 c)). Es wird dabei angenommen, dass in der Anlage so viele Flecht-rümpfe verbaut sind, wie Lagen auf das Bauteil aufgeflochten werden müssen, um die angestrebte Sollwandstärke zu erreichen.

Speziell bei Bauteilen mit hoher Lagenanzahl wird ein starker Einfluss auf die fehlerbehaftete Verfügbarkeit  $\Lambda_{Zyk,err}$  der Anlage erwartet, da eine solche Anlage sehr viele Klöppel als potenzielle Fehlerquellen enthält. Im Hinblick auf die Produktivität spielt es für die vorliegenden Betrachtungen keine Rolle, ob die einzelnen Flügelradreihen innerhalb des Produktionssystems in Form einzelner, verketteter ELFM oder als MLFM enthalten sind. Die Anlage läuft dauerhaft durch, der Beschnitt zur Entnahme der Teile muss auch bei diesem System prozessparallel erfolgen.

Aufgrund der mehrfach vorhandenen Flechtrümpfe und des aufwendigen Handhabungssystems ist für eine VKFM-Fertigungszelle mit den höchsten Anschaffungskosten zu rechnen. Die Zelle nimmt im Vergleich mit den anderen Varianten auch den größten Platz ein. Sie wird allerdings auch weniger oft benötigt, um eine bestimmte Anzahl an Bauteilen zu fertigen. Die Fertigungszellen mit nur einem Flechtmaschinenrumpf müssen hingegen entsprechend der Anzahl der Rümpfe in der VKFM öfter vorhanden sein, um denselben Gesamtdurchsatz zu erreichen.

### Vergleich des Investitionsaufwands der Systeme

Bei der Betrachtung von Kosten und Platzbedarf darf also nicht auf Basis der einzelnen Fertigungszelle verglichen werden. Der Vergleich muss für die gleiche Flechtrumpffzahl des kompletten Anlagenparks gelten, der zur Fertigung einer bestimmten Bauteilserie benötigt wird.

Tab. 3-4 fasst die produktivitätsunabhängigen Eckdaten der betrachteten Produktionssysteme zusammen und vergleicht diese qualitativ. Dabei wird die Lösung mit dem nach Einschätzung des Autors geringsten Aufwand für den Betreiber mit +, eine aufwendigere mit ++ und die mit dem höchsten Aufwand mit +++ bewertet.

Entscheidend ist bei der Betrachtung der Aufwand pro Flechtrumpf. Dieser wird für Lösung ELFM-UB auf jeden Fall am höchsten ausfallen. Erst in kombinierter Betrachtung mit der jeweils erreichbaren Produktivität lässt sich allerdings abschätzen, welches der Systeme unterm Strich am wirtschaftlichsten eingesetzt werden kann.

#### Tab. 3-4: Zentrale Kenngrößen der verschiedenen Produktionssystemvarianten

Die Bewertung ist für die gesamte Fertigungszelle ausgegaut dargestellt, da für einen realistischen Vergleich des Aufwands der schwarz gedruckte Wert für den einzelnen Flechtrumpf entscheidend ist.

		ELFM-PB	ELFM-UB	VKFM
<b>Platzbedarf</b>	<b>pro Fertigungszelle</b>	+	++	+++
	<b>pro Flechtrumpf</b>	++	+++	+
<b>Anschaffungskosten</b>	<b>pro Fertigungszelle</b>	+	++	+++
	<b>pro Flechtrumpf</b>	++	+++	++
<b>Programmieraufwand</b>	<b>pro Fertigungszelle</b>	+	+++	+++
	<b>pro Flechtrumpf</b>	+	++	+++

### 3.4.2 Ermittlung der Bauteilfertigungszeiten

Im Folgenden werden die ausgewählten Produktionssystemvarianten detailliert untersucht und hinsichtlich der mit dem jeweiligen System erreichbaren Fertigungszeit für ein Bauteil  $t_B$  miteinander verglichen. Die Bauteilfertigungszeit setzt sich dabei aus der reinen Flechtzeit  $t_{F,B}$  und den zu jedem Bauteil gehörenden Prozessnebenzeiten  $t_{N,B}$  zusammen.

$$t_B = t_{F,B} + t_{N,B} \quad (3-21)$$

Die Flechtzeit lässt sich aus der Anzahl der Lagen im Bauteil  $n_L$  (3-10) und der Flechtdauer für eine Lage  $t_{L,B}$  (3-17) bestimmen.

$$t_{F,B} = n_L * t_{L,B} \quad (3-22)$$

Dabei ist zu beachten, dass die Flechtzeit bei Verwendung einer VKFM durch die Anzahl der in der Anlage verbauten Flechrümpfe geteilt werden muss. Für den in dieser Arbeit betrachteten Fall, dass diese Anzahl der Lagenzahl des gefertigten Bauteils entspricht, ist die Flechtzeit für ein Bauteil gleich der Flechtzeit einer Lage.

Die je Bauteil benötigten Prozessnebenzeiten variieren für die unterschiedlichen Produktionssysteme. Sie setzen sich aus verschiedenen Arbeitsschritten zusammen, deren Zeitaufwände in die Berechnung der Prozessnebenzeit  $t_{N,B}$  eingehen. Einige Arbeitsschrittzeiten  $t_{N,i}$  sind dabei unabhängig von der Lagenanzahl  $n_L$ , andere  $t_{N,j}$  skalieren mit dieser. Diese Schritte nehmen für ein Bauteil mit einer höheren Anzahl von Lagen entsprechend mehr Zeit in Anspruch.

$$t_{N,B} = \sum_i t_{N,i} + n_L * \sum_j t_{N,j} \quad (3-23)$$

Je nach Anlagenkonzept werden bei der Bauteilfertigung verschiedene der nachfolgend aufgelisteten Arbeitsschritte notwendig (s. hierzu auch Tab. A-10).

- Kernzuführung  $t_{N,in}$   
Die Kernzuführungsphase ist nur für die Flechtanlage, die im Pendelbetrieb arbeitet relevant, bei den anderen Systemen findet die Kernzuführung prozessparallel statt. Die Kernzuführungsphase umfasst das Greifen eines neuen Kerns mit dem Handhabungssystem und seine Positionierung am Flechtpunkt.
- Wenden  $t_{N,W}$   
Dieser Prozessschritt ist ebenfalls nur für ELFM-PB relevant (vgl. Abb. 3-14). Nach dem Beflechten einer Lage muss für das Umkehren der Flechtrichtung der Prozess kurz unterbrochen werden. Dieser Prozessschritt skaliert mit der Anzahl der Lagen und wird für das Flechten eines Bauteils  $n_L - 1$  mal benötigt.

- Lagenfixierung  $t_{N,Fix}$   
 Vor dem Durchtrennen des Geflechtschlauchs wird im Schnittbereich in der Regel zunächst eine Faserfixierung (z. B. ein Klebeband) angebracht, damit die Fadenspannung im Geflecht erhalten bleibt und die abgeschnittenen Garnenden nicht ausfransen.
- Beschnittvorgang  $t_{N,Ab}$   
 In diesem Prozessschritt wird der Geflechtschlauch abgetrennt, damit das Bauteil aus der Maschine entnommen werden kann. Bei ELFM-PB bzw. in der VKFM ist dies einmalig nach dem Aufflechten aller Lagen erforderlich, bei den beiden Varianten der ELFM-UB nach jeder Lage. Je nach Aufbau des Produktionssystems kann der Beschnittvorgang auch prozessparallel erfolgen, so dass kein Zeitverlust berücksichtigt werden muss.
- Kernabführung  $t_{N,out}$   
 Wie bei der Kernzuführung ist diese Phase mit dem Transport des Kerns zur Ablagestation nur für die ELFM-PB zu berücksichtigen, da die Entnahme der Kerne bei den anderen Systemen ebenfalls prozessparallel erfolgt.

Es ist schwer, für die einzelnen Arbeitsschritte exakte Zeitvorgaben zu machen, da sie nicht an real existierenden Anlagen ermittelt werden können. Die Flechtzelle am LCC ähnelt der beschriebenen ELFM-PB-Anlage mit roboterbasiertem Handhabungssystem, weist allerdings nicht deren automatisches Beschnittsystem auf. Mit dieser Anlage wurden Versuche durchgeführt, um zumindest Richtwerte für die Zu- bzw. Abführzeiten der Kerne sowie für die Wendezeit an den Lagenendpunkten zu ermitteln. Richtzeitwerte für die Lagenfixierung und den automatischen Beschnitt wurden an Prüfständen ermittelt<sup>19</sup>. Anlagen, die bei BMW in der Fertigung eingesetzt werden, enthalten die beschriebenen Handhabungs- und Beschnittsysteme, allerdings sind diese nicht für eine Messwertermittlung im Rahmen der vorliegenden Arbeit zugänglich.

Bei den in Tab. A-10 angegebenen Zeiten handelt es sich also um erfahrungsbasierte Schätzwerte, die teilweise durch Versuche abgesichert sind. Es werden drei verschiedene Szenarien für die Prozessschrittzeiten unterschieden, die als „realistisch“, „optimistisch für PB“ und „optimistisch für UB“ bezeichnet werden. Die Werte des „realistischen“ Szenarios decken sich gut mit eigenen Erfahrungswerten und den Versuchsergebnissen an der Anlage des LCC und werden daher, wenn nicht abweichend angegeben, für die Berechnungen dieser Arbeit verwendet. Das für den Pendelbetrieb (PB) optimierte Szenario beinhaltet kürzere Vorgabezeiten für Kernzuführung und Wenden. Das für den Umlaufbetrieb (UB) optimierte geht von sehr kurzen Vorgabezeiten für die Lagenbeschnittvorgänge aus. Wie die Werte jeweils in die Berechnung der Prozessnebenzeiten für die betrachteten Produktionssysteme eingehen, lässt sich den in Tab. A-11 angegebenen Formeln entnehmen.

<sup>19</sup> Im Rahmen der Semesterarbeit von Florian Rapp [122]



### 3.4.3 Bauteilbezogene Prozesskennzahlen

Die nachstehende Abb. 3-16 gibt einen Überblick der Eingabewerte des Teilmodells zum Produktionssystem. In Kombination mit den Ergebnissen des Basismodells (s. Abschnitt 3.3) können nun die bauteilbezogene Ablagerate  $\dot{m}_B$  und die entsprechende Anlagenverfügbarkeit  $\Lambda_B$  errechnet werden.

Dabei ist die Verfügbarkeit der Zeitanteil an der Gesamtfertigungszeit eines Bauteils, in dem die Flechtmaschine tatsächlich läuft.

$$\Lambda_B = \frac{t_{F,B}}{t_B} \quad (3-24)$$

Die bei den Produktionssystemen ELFM-PB und ELFM-UB-S anfallenden Prozessnebenzeiten vermindern den bauteilbezogenen Verfügbarkeitswert. Für die beiden Varianten ELFM-UB-P und VKFM, bei denen alle Nebenprozesse prozessparallel ausgeführt werden, entspricht die Flechtzeit der Bauteilfertigungszeit. Der bauteilbezogene Verfügbarkeitswert dieser Anlagenkonzepte liegt bei 100 %.

Die bauteilbezogene Ablagerate lässt sich mit Hilfe der bauteilbezogenen Verfügbarkeit und der Maschinenablagerate ebenso bestimmen wie mit der Preformmasse  $m_P$  aus Formel (3-12) und der Fertigungszeit für ein Bauteil  $t_B$ .

$$\dot{m}_B = \Lambda_B * \dot{m}_M = \frac{m_P}{t_B} \quad (3-25)$$

Für die oben genannten Anlagenkonzepte mit bauteilbezogener Verfügbarkeit von 100 % entspricht die bauteilbezogene Ablagerate der Maschinenablagerate  $\dot{m}_M$ .

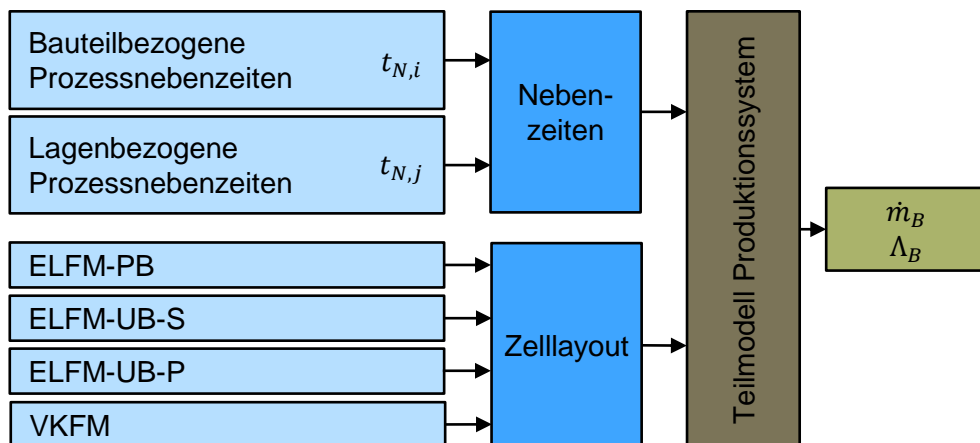


Abb. 3-16: Ein- und Ausgabewerte des Produktionssystem-Teilmodells

## 3.5 Teilmodell zum Rüstzeiteinfluss

Ein prinzipieller Nachteil des Flechtverfahrens gegenüber anderen textilen Prozessen ist, dass nur die Stehfäden von großen Vorlagespulen über ein Gatter zugeführt werden können. Die Flechtfadenspulen werden in der Maschine während des Prozesses permanent umeinander herumgeführt. Damit dennoch akzeptable Verarbeitungsgeschwindigkeiten gefahren werden können, muss die bewegte Spulenmasse limitiert werden<sup>20</sup>.

Das hat zur Folge, dass der Flechtprozess von Zeit zu Zeit unterbrochen werden muss, um die leer geflochtenen Flechtfadenspulen gegen volle auszutauschen. Es ist klar, dass für eine optimierte Produktivität diese unvermeidlichen Rüstzeiten, in denen die Maschine steht, so kurz wie möglich sein müssen. Der Einfluss der Rüstzeit auf die Produktivität des Flechtprozesses wird in einem weiteren, nachfolgend beschriebenen Teilmodell erfasst und anhand der zykluszeitbezogenen Ablagerate bewertet.

### 3.5.1 Rüstkonzepte

Dazu werden verschiedene Konzepte, nach denen der Rüstvorgang erfolgen kann, vorgestellt und hinsichtlich des Rüstzeitaufwands miteinander verglichen.

#### 3.5.1.1 Manueller Tausch der Spulen

Beim klassischen Rüsten von Hand (RH) werden die leeren Spulen aus den Klöppeln entnommen und durch volle ersetzt, während die Flechtmaschine steht. Anschließend muss jeweils das neue Garn in die Führungsösen des Klöppels eingefädelt werden (s. Abb. 3-17 a)). Während der reine Tausch einer Spule schnell geht, ist der Einfädelvorgang vergleichsweise zeitintensiv, da die Führungsösen oft schlecht zugänglich sind.

Die Arbeit erfolgt bei größeren Anlagen in der Regel mit mehreren Personen zugleich, um die Stillstandzeit zu minimieren. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Rüsten von Hand durch einen (Variante: RH-1MA) oder zwei Mitarbeiter (Variante: RH-2MA) betrachtet. Der Einsatz von noch mehr Personal ist erfahrungsgemäß nicht sinnvoll, da die Mitarbeiter sich eher gegenseitig behindern.

#### 3.5.1.2 Schnellwechseln des kompletten Klöppeloberteils

Bei dieser Rüstvariante werden das Austauschen von leeren gegen volle Spulen sowie das Einfädeln nicht in der Flechtmaschine, sondern „offline“ durchgeführt. Der dafür nötige Zeitaufwand trägt also nicht zur Maschinenstillstandzeit bei (s. Abb. 3-17 b)). Dieses Schnellwechseln von Hand (SH) erfolgt mit Hilfe eines Schnellverschlusses in

---

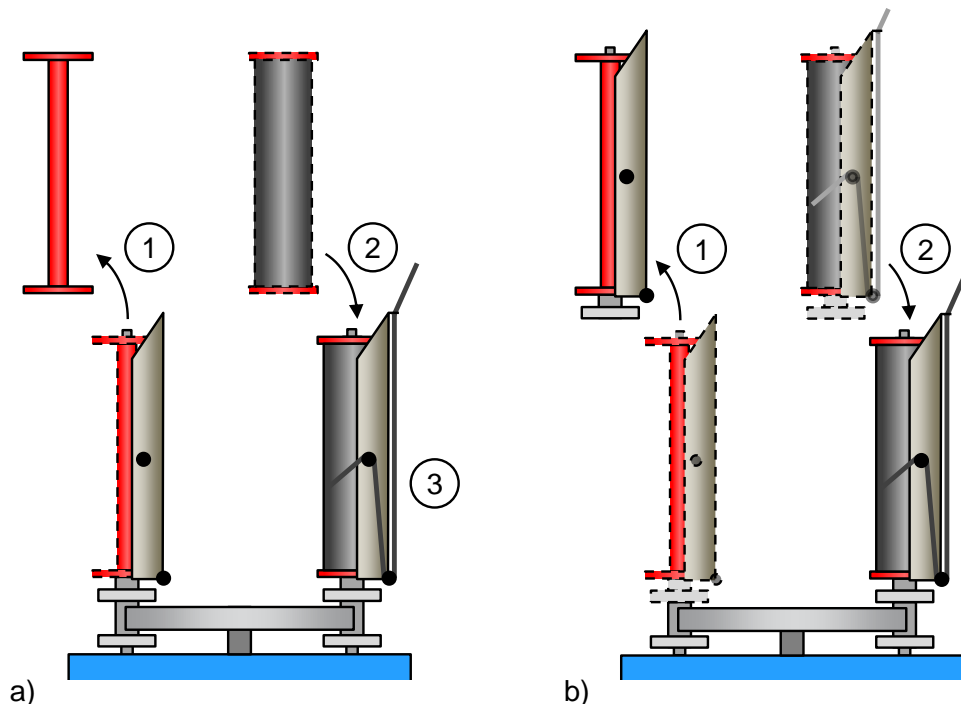
<sup>20</sup> Zur Interaktion von Anlagengeschwindigkeit und Spulengröße s. Abschnitt 3.7

der Fügestelle von Klöppelober- und -unterteil, der durch Daumendruck entriegelt werden kann<sup>21</sup>. Die Zeit für den Tausch eines Klöppels lässt sich so auf wenige Sekunden reduzieren [62]. Allerdings werden für eine derartige Klöppelausstattung anfänglich höhere Investitionskosten fällig, weil einerseits die Klöppelkonstruktion aufwendiger ist und andererseits immer zumindest zwei Sätze Klöppelober- und -unterteile vorhanden sein müssen (beim Rüsten bzw. in der Maschine).

Auch bei dieser Rüstmethode können mehrere Mitarbeiter eingesetzt werden, weshalb Varianten mit einem (SH-1MA) und zwei (SH-2MA) Mitarbeitern betrachtet werden.

### 3.5.1.3 Automatisches Klöppelwechselsystem

Nach dem Leerflechten einer Spulenfüllung wird bei diesem Rüstkonzept der komplette Klöppelsatz mit den leeren Flechtfadenspulen über Weichen an den Laufbahnen aus der Maschine gefahren. Gleichzeitig kann ein zweiter Klöppelsatz, der „offline“ bereits mit vollen Spulen besetzt und eingefädelt wurde, in die Maschine hineingefahren werden.



**Abb. 3-17: Vergleich der Rüstmethoden Spulenwechsel und Klöppelwechsel**

- a) Entnahme der leeren Spule (1). Einsetzen der vollen Spule (2). Einfädeln (3).
- b) Abnehmen des Klöppeloberteils mit Leerspule (1). Einsetzen eines Klöppeloberteils mit voller Spule und bereits eingefädeltm Garn (2).

<sup>21</sup> Die Firma August Herzog Maschinenbau GmbH & Co. KG bietet ein derartiges Schnellwechselsystem für ihre Faserverbundflechtmaschinen an, das auch bei Maschinenbetreibern der Faserverbundbranche in der Serienfertigung eingesetzt wird.

Dieses Wechseln des Klöppelsatzes (Variante: WK) als Rüstvariante wird als technisch aufwendig aber umsetzbar bewertet<sup>22</sup>. Da auf jeden Fall ein kompletter zweiter Klöppelsatz, eine entsprechende „Parkposition“, zusätzliche Antriebe und Führungsbahnen sowie die zugehörige Anlagensteuerung zu berücksichtigen sind, ist für ein derartiges System von erheblichen zusätzlichen Investitionskosten auszugehen.

Für die Berechnung des potenziellen Rüstzeitaufwands dieser Variante wird davon ausgegangen, dass das Ein- bzw. Ausfahren der Klöppel mit Tippgeschwindigkeit der Flechtanlage erfolgt.

#### 3.5.1.4 Tausch des kompletten Maschinenrumpfs

Eine noch aufwendigere Rüstvariante sieht den Wechsel des kompletten Maschinenrumpfs (Variante: WM) vor. Diese Variante orientiert sich am Konzept des „Single Minute Exchange of Die“ (SMED) [125], das z. B. beim Werkzeugtausch in Automobil-Presswerken eingesetzt wird, um innerhalb weniger Minuten die Fertigung von einem Teil auf ein anderes umzustellen. Der Maschinenrumpf mit den leeren Spulen wird aus der Fertigungszelle herausgefahren, anschließend fährt ein zweiter Maschinenrumpf mit vollen Spulen und einem bereits angeflochtenen Geflecht ein.

Diese Variante kann allerdings nur dann schneller sein, wenn die Stehfadenspulen am Maschinenrumpf befestigt sind und ebenfalls mitgetauscht werden. Die Zuführung der Fäden über ein externes Gatter, das oftmals bessere Kontrolle z. B. der Stehfadenspannung erlaubt, lässt sich mit dieser Variante nicht zeitsparend kombinieren, da bei jedem Tausch die Stehfäden abgeschnitten und neu eingezogen werden müssten. Des Weiteren fallen anlagen- und infrastrukturseitig erhebliche zusätzliche Investitionskosten an. Lohnenswert erscheint eine genauere Betrachtung dieser Variante nur, wenn die Kosten für einen Flechtrumpf gegenüber den Kosten der gesamten Fertigungszelle (z. B. mit sehr aufwendigem Multi-Roboter-Handhabungssystem) vergleichsweise gering ausfallen.

### 3.5.2 Ermittlung der Rüstzeiten

Die Gesamtrüstzeit  $T_R$  für einen Zyklus setzt sich aus der Rüstzeit der Flechtfäden  $T_{R,FF}$  und einem zyklusbezogenen Anteil der Stehfadenrüstzeit  $T_{R,Sf,Zyk}$  zusammen.

$$T_R = T_{R,FF} + T_{R,Sf,Zyk} \quad (3-26)$$

Da die Stehfäden von einem Gatter zugeführt werden, auf dem als Vorlagespulen direkt die sehr großen Herstellerspulen zum Einsatz kommen, sind die Flechtfäden in der Maschine für die allermeisten Flechtsetups deutlich öfter zu rüsten als die Stehfäden. Der

<sup>22</sup> Nach aktuellem Wissenstand des Autors liegt ein derartiges System bei den Maschinenherstellern zwar „in der Schublade“, wurde aber bis dato – zumindest im Faserverbundbereich – noch nicht umgesetzt.

Rüstaufwand für die Stehfäden  $t_{R,Sf}$  wird daher auf die Anzahl Zyklen  $n_{Zyk,Sf}$  verteilt, die mit einer Stehfadenfüllung gefahren werden können.

$$T_{R,Sf,Zyk} = \frac{t_{R,Sf}}{n_{Zyk,Sf}} \quad (3-27)$$

Beim Rüsten der Stehfäden fallen folgende Arbeitsschritte an:

- Wechsel einer Stehfadenspule  $t_{R,S,Sf}$   
Der Wechsel einer Stehfadenspule ist aufwendiger als der einer Flechtfadenspule, da Stehfadenspulen größer und schwerer sind<sup>23</sup>.
- Anknoten eines Fadens  $t_{R,Kn}$   
Dieser Arbeitsschritt kommt beim Tausch der Stehfäden zum Einsatz, deren Einfädeln durch den Maschinenrumpf aufwendig ist. Es ist deswegen zeitsparend, das neue Garn am alten anzuknoten und den Garnabschnitt mit dem Knoten durch den Flechtrumpf bis zum Maschinenzentrum durchzuziehen.
- Eingefädelt wird daher bei turnusmäßigen Rüstvorgängen in der Regel nicht, weshalb dieser Schritt nicht in die Betrachtung eingeht.

Die Rüstzeit  $t_{R,Sf}$  der Stehfäden skaliert mit der Anzahl der Fäden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird von einer vollen Stehfadenbesetzung ausgegangen, so dass die Anzahl der Stehfäden der Anzahl der Flügelräder der Maschine  $n_F$  entspricht.

$$t_{R,Sf} = (t_{R,S,Sf} + t_{R,Kn}) * n_F \quad (3-28)$$

Das Rüsten der Flechtfäden setzt sich aus verschiedenen Arbeitsschritten zusammen, deren Zeitaufwände in die Berechnung der Flechtfadentrüstzeit  $T_{R,Ff}$  eingehen. Einige Arbeitsschrittzeiten  $t_{R,i}$  sind dabei unabhängig von der Spulenzahl  $n_S$ , die meisten  $t_{R,j}$  skalieren allerdings linear mit dieser. Der Rüstvorgang dauert für Maschinen mit mehr Klöppeln entsprechend länger. In der Literatur findet sich diese Klöppelzahlabhängigkeit der Rüstzeit z. B. in einer Arbeit von Braley und Dingeldein [60], in der das Rüsten von sehr großen Flechtmaschinen (Megabraider™) mit bis zu 800 Klöppeln untersucht wird.

$$T_{R,Ff} = \sum_i t_{R,i} + n_S * \sum_j t_{R,j} \quad (3-29)$$

Je nach Rüstkonzept werden verschiedene der nachfolgend aufgelisteten Arbeitsschritte notwendig (s. hierzu auch Tab. A-12).

<sup>23</sup> Bei BMW in der Produktion müssen große 15 kg-CF-Stehfadenspulen mit Hilfe eines Handhabungsgeräts bewegt werden, um die maximal zulässigen Hebelasten für Mitarbeiter nicht zu überschreiten.

- Vorbereitung des Rüstvorgangs  $t_{R,V}$   
In die Vorbereitungszeit fallen z. B. das Öffnen des Sicherheitszauns der Gesamtanlage, das Herbeibringen von Werkzeug und Austauschspulen sowie das Verfahren der Anlage in die Rüstposition.
- Abschneiden eines Fadens  $t_{R,Ab}$   
Bevor die Spulen aus der Maschine entfernt werden können, müssen die zum Flechtzentrum verlaufenden Flechtfäden abgeschnitten werden.
- Wechsel einer Flechtspule  $t_{R,S,Ff}$   
Das Wechseln einer Flechtspule beinhaltet das Öffnen des Verriegelungsmechanismus, der die Spule während des Prozesses auf dem Klöppel fixiert, den eigentlichen Tausch der Spule und das erneute Verriegeln nach dem Tausch.
- Einfädeln eines Fadens am Klöppel  $t_{R,Ein}$   
Der Vorgang beinhaltet das Einfädeln des neuen Garns in die Führungsösen. Alternativ kann der alte Faden beim Abschneiden in den Führungselementen belassen und der neue angeknötet werden. In beiden Fällen muss abschließend eine gewisse Fadenlänge durchgezogen werden.
- Schnellwechseln eines Klöppeloberteils  $t_{R,Sw}$   
Das Klöppeloberteil mit leeren Spule wird durch Daumendruck entriegelt und gegen eines mit voller Spule getauscht.
- Zusammenziehen eines Fadens  $t_{R,Zus}$   
Bevor der Flechtvorgang erneut gestartet werden kann, müssen die neu eingefädelten Flechtfäden im Maschinenzentrum zusammengezogen werden.
- Anflechten  $t_{R,An}$   
Nach dem Zusammenziehen aller Fäden muss die Flechtmaschine kurz laufen, bis sich im Maschinenzentrum ein Geflechtschlauch gebildet hat, in dem sich die Garne durch gegenseitige Reibung fixieren. Dieser muss vor Beginn der erneuten Produktion sauber abgeschnitten werden.
- Ein- bzw. Ausfahren eines Klöppels  $t_{R,WK}$   
Es wird davon ausgegangen, dass das Verfahren der Klöppel während des automatischen Tauschvorgangs mit Maschinentippgeschwindigkeit erfolgt.
- Ein- bzw. Ausfahren des Maschinenrumpfs  $t_{R,WM}$   
Es wird davon ausgegangen, dass der neu gerüstete Maschinenrumpf mit bereits angeflochtenem Geflecht in die Gesamtanlage eingefahren wird.

Es ist schwer, die Dauer einzelner Arbeitsschritte exakt anzugeben, da die Zeiten schwanken können, z. B. je nachdem wie geübt ein Bediener ist. Manche Werte lassen sich über eigene Versuchen ermitteln – etwa für den Tausch einer Spule im Klöppel.

Für manuelle Arbeitsschritte können zudem Methoden zur Zeitschritterfassung aus dem Produktivitätsmanagement angewendet werden, um die Zeitdauer von unbekanntem Arbeitsabläufen zu ermitteln (z. B. MTM<sup>24</sup>-Methoden [126]). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde dies allerdings nicht durchgeführt. Zeiten für andere Prozessschritte, z. B. für den Tausch des Maschinenrumpfs, können nur geschätzt werden, da es keine Anlage für die Ermittlung realer Werte gibt.

Um dieser Unsicherheit Rechnung zu tragen, wird auch hier (vgl. die Prozesszeitenberechnung in Abschnitt 3.4.2) zwischen drei verschiedenen Rüstzeitszenarien unterschieden, die als „optimistisch“, „realistisch“ und „pessimistisch“ bezeichnet werden. Die Werte des realistischen Szenarios beruhen auf eigenen Erfahrungen, Versuchen an der Anlage des LCC und Einschätzungen von Kollegen und Experten aus der Industrie, die viel Erfahrung im Umgang mit vergleichbaren Flechtmaschinen haben. Die optimistische Variante geht von geübten Produktionsmitarbeitern aus, bei denen „jeder Handgriff sitzt“. Die pessimistische Variante deckt den Fall ab, der z. B. beim Einsatz von ungeübtem Personal zu erwarten ist. Die der Berechnung zugrunde liegenden Zeiten für die einzelnen Arbeitsschritte in den verschiedenen Szenarien sind in Tab. A-12 im Anhang aufgeführt. Die Formeln für die Berechnung der einzelnen Flechtfadentüchtzeiten sind in Tab. A-13 angegeben.

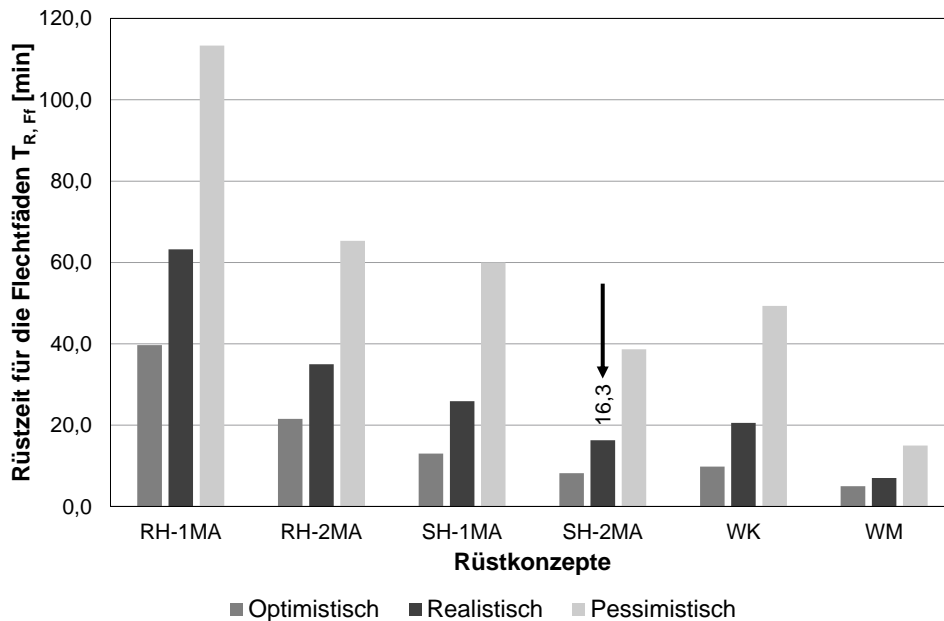
Abb. 3-18 zeigt beispielhaft die Rüstdauer der Flechtfäden  $T_{R,Ff}$  nach Formel (3-29) und Tab. A-13 für die verschiedenen Rüstvarianten bei einer voll besetzten Maschine mit 64 Klöppeln. Die Werte der unterschiedlichen Szenarien decken eine große Bandbreite ab – dies ist beabsichtigt, um mit dem optimistischen und dem pessimistischen Szenario Extremwerte der Rüstzeiten zur Verfügung zu stellen. Diese kommen bei der Betrachtung von „best case“- und „worst case“-Fällen bei der Produktivitätsberechnung zum Einsatz. Die Zeit von etwa 1 *min* pro Klöppel, die sich für das realistische Szenario ergibt, wenn alleine gerüstet wird (Variante RH-1MA), deckt sich sehr gut mit den Erfahrungen aus der Praxis<sup>25</sup>.

Vergleicht man die verschiedenen Varianten, zeigt sich, dass mit dem Klöppelschnellwechselsystem – speziell in der Variante mit zwei Mitarbeitern (SH-2MA) – sehr kurze Rüstzeiten von etwa 15 s pro Spule erreicht werden können. Ein automatisches Klöppelwechselsystem (WK), das bisher nicht erprobt ist und erhebliche zusätzliche Kosten verursacht, würde nach dieser Abschätzung gar keinen Rüstzeitvorteil bringen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass wesentliche Teile des Rüstvorgangs (das Abschneiden bzw. Zusammenziehen der Fäden sowie das Anflechten) auch bei dieser Variante manuell auszuführen sind.

---

<sup>24</sup> Methods-Time Measurement; deutsch: Arbeitsablauf-Zeitanalyse

<sup>25</sup> Dass es auch fast zwei Stunden dauern kann, wenn ein unerfahrener, einzelner Mitarbeiter an der Arbeit ist, entspricht ebenfalls den Beobachtungen (z. B. beim Einlernen von neuen wissenschaftlichen Hilfskräften für die Arbeit an der Flechtmaschine des LCC).



**Abb. 3-18: Flechtfadenrüstzeiten für verschiedene Rüstkonzepte**

Der Pfeil kennzeichnet die Rüstzeitvariante, die für die Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit als Standard verwendet wird. Die dargestellten Werte gelten für eine voll besetzte Maschine mit 64 Klöppeln.

Der Tausch des kompletten Maschinenrumpfs (Variante WM) würde laut der vorliegenden Betrachtung geringere Rüstzeiten ermöglichen, allerdings bei extremem zusätzlichem Aufwand. Interessant könnte diese Variante in einer Fertigung sein, in der mehrere Flechtanlagen gleichen Typs zum Einsatz kommen, so dass mit einem zusätzlichen Maschinenrumpf, der immer offline gerüstet wird, mehrere Fertigungszellen im Wechsel bedient werden können. Dies würde allerdings die sehr genaue Abstimmung der Rüstzeiten der einzelnen Fertigungszellen untereinander erfordern. Bei Betriebsstörungen bestünde zudem die Gefahr, dass mehrere Anlagen zugleich betroffen sind, wenn der Tausch des Flechtumpfes zwischen den Anlagen gestört ist.

Für die Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit wird die Rüstvariante SH-2MA des realistischen Szenarios als Standard gewählt, der – falls nicht anders angegeben – allen Berechnungen zugrunde liegt.

### 3.5.3 Zykluszeitbezogene Prozesskennzahlen

Die nachstehende Abb. 3-19 gibt einen Überblick der im vorigen Abschnitt beschriebenen Eingabewerte für das Teilmodell zum Rüstvorgang. In Kombination mit den Ergebnissen des Basismodells (s. Abschnitt 3.3) und denen des Teilmodells zum Produktionssystem (s. Abschnitt 3.4) können die zyklusbezogene Ablagerate  $\dot{m}_{Zyk}$  und die entsprechende Anlagenverfügbarkeit  $\Lambda_{Zyk}$  errechnet werden.



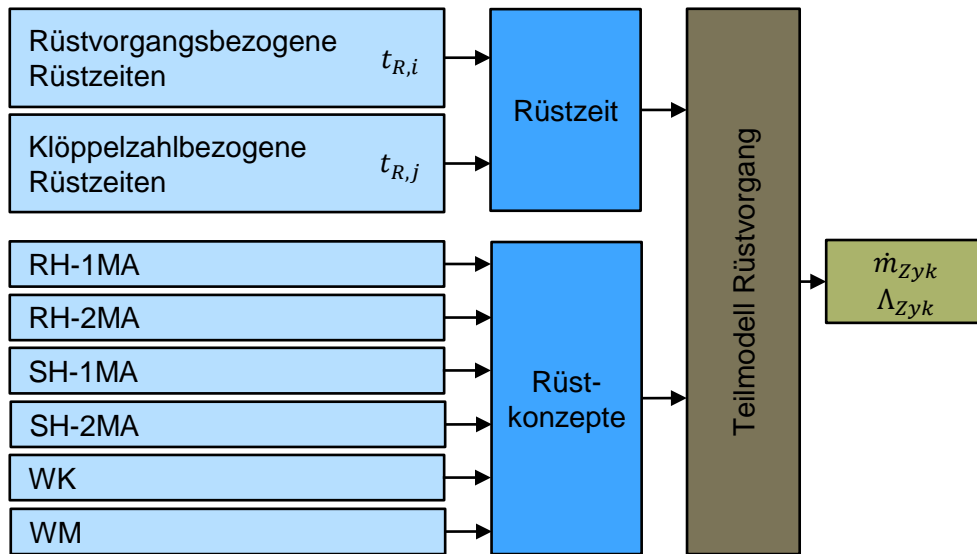


Abb. 3-19: Ein- und Ausgabewerte des Teilmodells zum Rüstvorgang

Zunächst wird die Gesamtzyklusdauer nach Formel (3-4) ermittelt. Mit der tatsächlich zu flechtenden Anzahl an Bauteilen in einem Maschinenzyklus aus Formel (3-16) und den bauteilbezogenen Flecht- und Nebenzeiten aus den Formeln (3-22) und (3-23) können die entsprechenden zyklusbezogenen Werte berechnet werden. Die Gesamtflechtzeit im Zyklus  $T_F$  und die entsprechende Gesamtnebenzeit  $T_N$  ergeben zusammen die Bauteilfertigungszeit  $T_B$ .

$$T_B = T_F + T_N = n_{B,Zyk} * (t_{F,B} + t_{N,B}) \quad (3-30)$$

Die Gesamtrüstzeit  $T_R$  ist ohnehin eine zyklusbezogene Zeit, da der Rüstvorgang nur einmal pro Zyklus auftritt. Mit diesen Teilzykluszeiten wird die zyklusbezogene Verfügbarkeit ermittelt:

$$\Lambda_{Zyk} = \frac{T_F}{T_{Zyk}} = \frac{T_F}{T_F + T_N + T_R} \quad (3-31)$$

Die zyklusbezogene Ablagerate kann mit der Maschinenablagerate und der zyklusbezogene Verfügbarkeit ebenso berechnet werden wie über die Zyklusdauer und die Gesamtmasse der gefertigten Bauteile.

$$\dot{m}_{Zyk} = \Lambda_{Zyk} * \dot{m}_M = \frac{n_{B,Zyk} * m_P}{T_{Zyk}} \quad (3-32)$$

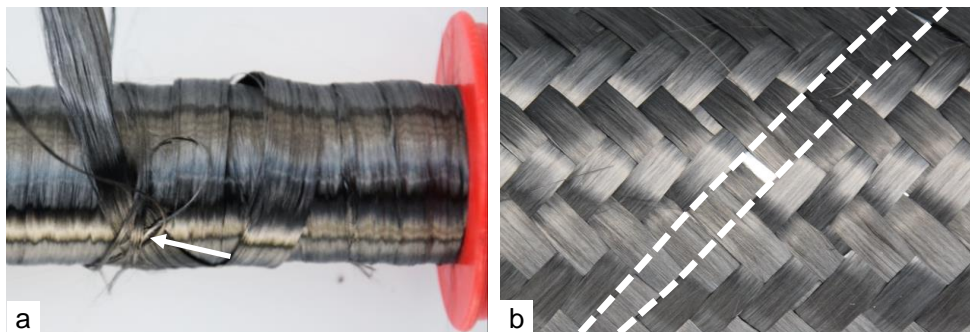
## 3.6 Teilmodell zu Fertigungsfehlereinflüssen

Häufige fehlerbedingte Prozessunterbrechungen reduzieren die Produktivität eines Fertigungsverfahrens stark. Das Flechtverfahren ist bekannt dafür, dass es bei Verarbeitung der empfindlichen Verstärkungsfasern leicht zu Fertigungsfehlern kommen kann, wenn bei der Handhabung der Garne oder der Einstellung der Maschine nicht äußerst exakt gearbeitet wird. Der Einfluss der Flechtfehlerhäufigkeit und deren Interaktion mit dem verwendeten Produktionssystem werden daher in einem weiteren Teilmodell erfasst.

### 3.6.1 Flechtfehler und ihre Ursachen

Da es sich bei der Flechtmaschine selbst um ein technisch ausgereiftes System handelt, das bei guter Wartung in der Regel sehr fehlerarm funktioniert, ist Garnschädigung der Hauptgrund für die meisten Prozessunterbrechungen. Vom Autor dieser Dissertationsschrift liegt ein Kapitel<sup>26</sup> [19] im Buch „Advances in Braiding Technology“ [127] vor, das sich detailliert mit der Entstehung, Klassifizierung und den Auswirkungen von Garnschädigung im Flechtprozess beschäftigt. Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte rund um die Entstehung von Flechtfehlern genannt. Für weitere Details zum Thema sei auf das angesprochene Buchkapitel verwiesen.

Wie Mierzwa et al. [128] zeigen, ist die Bildung von Faserringen beim Abwickeln des Garns von der Spule während des Flechtvorgangs die Hauptursache von prozesskritischen Flechtfehlern. Dieses Fehlerbild ist typisch für ungedrehte Multifilamentgarne, Rovings, wie sie im Verstärkungsbereich zum Einsatz kommen. Dabei lösen sich einzelne Filamente oder Filamentbündel vom Hauptstrang, werden nicht mit abgewickelt und verbleiben als ringförmige Filamentagglomeration auf der betreffenden Spule (s. Abb. 3-20 a).



**Abb. 3-20: Faserringbildung und resultierende Ablagelücke**

- a) Ein Filamentring (weißer Pfeil) blockiert den Abzug des Garns von der Spule.
- b) Erhöhte Garnspannung hat eine Ablagelücke (gestrichelte Linien) verursacht.

<sup>26</sup> Titel: „Yarn damage during braiding of reinforcement fibers for composites“

Dieser Faserring behindert das weitere Abspulen des Garns. Dabei erhöht sich zunächst durch ansteigende Reibung die Spannung im abgespulten Garn, wodurch sich das Geflecht ungleichmäßig zusammenzieht und sich Lücken zwischen den Flechtfäden bilden (s. Abb. 3-20 b)). Dadurch kommt es noch nicht zwingend zu einer Prozessunterbrechung. Die Maschine läuft zunächst weiter. Dennoch ist das entstehende Fehlerbild im Hinblick auf die Qualität oft bereits ausreichend kritisch, um das Bauteil oder zumindest die betroffene Flechtlage als Ausschuss zu klassifizieren.

Bei weiterem Fortschreiten der Ringbildung kann sich die Garnreibung so stark erhöhen, dass es zum Riss des betreffenden Garns kommt. Spätestens diesen wird die automatische Garnüberwachung der Flechtmaschine registrieren, die Maschine stoppen und den Fertigungsvorgang unterbrechen. Verschiedene Methoden zur Online-Überwachung der Garnspannung (s. hierzu Abschnitt 2.4.3.3) werden aktuell entwickelt, um sich anbahnende Garnrisse zu erkennen, z. B. durch die vorhergehende, allmähliche Erhöhung der Garnspannung. Der Prozess kann dann rechtzeitig gestoppt und der ursächliche Faserring auf der betroffenen Spule entfernt werden. So lässt sich zwar die Fertigung von Ausschussbauteilen verhindern; es kommt allerdings weiterhin zur Prozessunterbrechung, die sich negativ auf die Produktivität auswirkt. Das Ziel muss daher sein, die Faserringbildung auf den Flechtspulen möglichst vollständig zu eliminieren.

Das Ausmaß an Garnschädigung (gebrochene Filamente, reduzierter Zusammenhalt der Filamente durch Aufbrechen der Schlichte) bestimmt, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass sich während Abspulens im Flechtprozess Faserringe bilden. Durch Versuche<sup>27</sup> kann gezeigt werden, dass der Umspulpvorgang des Garns von der Rohmaterialspule auf die Flechtspulen die Hauptquelle von Garnschädigung ist.

Zusätzlich entsteht weitere Schädigung des Garns beim Durchlaufen der Führungselemente am Klöppel. Diese Schädigung hat allerdings auf die Faserringbildung nur geringen Einfluss, da das Garn zu diesem Zeitpunkt des Prozessdurchlaufs die Spule bereits verlassen hat. Es wird jedoch weiterhin die gleichmäßige Geflechtbildung beeinträchtigt. Zusätzlich reduzieren sich durch geschädigte Garne die faserdominierten „in-plane“-Laminatkennwerte im späteren Bauteil. Die matrixdominierten „off-plane“-Werte verbessern sich hingegen (s. hierzu Erber et al. [130]). Auch wenn für manche Anwendungen, bei denen z. B. besonders gute Schadenstoleranz gefordert ist, Garnschädigung aus mechanischer Sicht akzeptabel wäre, sind für einen stabilen und reproduzierbaren Prozessablauf möglichst wenig geschädigte Garne immer zu bevorzugen.

Um einen weitgehend störungsfreien Prozessablauf zu gewährleisten, ist also insbesondere die Optimierung des Umspulpvorgangs notwendig. Petermaier [129] zeigt, dass die Wahl der Fadenbremse und die Höhe der Umspulpspannung starken Einfluss auf das Ausmaß der Garnschädigung haben. Als besonders vorteilhaft identifiziert er den Einsatz von Lamellenbremsen in Kombination mit moderater Umspulpspannung. Dabei ist zu

---

<sup>27</sup> Im Rahmen der Diplomarbeit von Johann Petermaier [129]

beachten, dass die genannten Umspulparameter für jedes verarbeitete Material individuell ermittelt werden müssen. Beispielfhaft sei genannt, dass Garne mit höherem Titer bei entsprechend größerer Garnspannung umgespult werden müssen. Ausführlich gehen Ebel et al. [19, 131] auf die Möglichkeiten zur Optimierung des Umspulprozesses und zur Messung der im Prozess verursachten Garnschädigung ein.

Noch besser wäre sicherlich, auf den Umspulprozess vollständig zu verzichten und das Garn direkt auf den Rohmaterialspulen in die Flechtmaschine zu rüsten. Mit den momentan verfügbaren Klöppelflechtmaschinen ist allerdings für die typischen Größen von CF-Rohmaterialspulen mit starker Reduktion der Verarbeitungsgeschwindigkeit zu rechnen (s. hierzu auch Abschnitt 3.7).

Zudem ist fraglich, ob die Rohmaterialspulen mit ausreichend konstanten Umspulparametern aufgespult werden, um diese direkt einsetzen zu können. Um reproduzierbare Ergebnisse zu gewährleisten, kann es also im Interesse des Flechtmaschinenbetreibers sein, dass der prozesskritische Umspulschritt „in-house“ durchgeführt wird. Auf jeden Fall wäre der direkte Einsatz von Rohgarnspulen in der Flechtmaschine nur in enger Abstimmung mit dem Rohmaterialhersteller vorstellbar.

Weitere Fehlerquellen, die zu Prozessunterbrechungen führen, können in der Flechtmaschine selbst, in weiteren Bestandteilen der Anlage (Handhabungssystem, andere Subsysteme) und sogar in der Steuerungssoftware zu finden sein. Klar ist, dass die Gesamtanlage umso fehleranfälliger ist, je mehr Bestandteile sie aufweist und je komplizierter das Anlagensteuerungsprogramm gestaltet ist. Für die vorliegende Arbeit wird angenommen, dass mit einem ausgereiften System gearbeitet wird. Dieses läuft bei Einhaltung der vorgeschriebenen Wartungsintervalle (Reinigen, Schmieren) sowie dem rechtzeitigen Tausch von Verschleißteilen (Klöppelführungselemente, Garnösen) so fehlerfrei, dass keine derartigen Prozessunterbrechungen in die Betrachtung mit aufgenommen werden müssen.

### 3.6.2 Ermittlung der fehlerbedingten Ausfallzeiten

Um die fehlerbedingten Ausfallzeiten im Fertigungszyklus abzuschätzen, werden zwei Kenngrößen benötigt: Die Häufigkeit des Auftretens eines Fehlers, der zu einer Prozessunterbrechung führt, und die Zeitdauer, die für die Behebung dieses Fehlers benötigt wird, bis die Anlage wieder angefahren werden kann.

Wie im vorigen Abschnitt geschildert, wird angenommen, dass Flechtfehler hauptsächlich durch Faserringbildung auf den Flechtspulen ausgelöst werden. Beobachtungen bestätigen, dass sich ohne vorherigen Umspulprozess (also bei den Stehfäden) praktisch keine Faserringe bilden. Für die Häufigkeit des Fehlerauftretens konzentriert sich die Betrachtung deswegen ausschließlich auf die Flechtspulen. Es wird eine zeitabhängige Fehlerrate  $\lambda_{err,S}$  für die Flechtspulen definiert, die beschreibt, wie häufig sich im Betrieb auf der Spule ein Faserring bildet, der eine Prozessunterbrechung zur Folge hat.

Ebenso möglich – und wahrscheinlich besser geeignet – wäre die Wahl einer lauflängenabhängigen Fehlerrate. Diese würde z. B. die erhöhte Abzugsgeschwindigkeit des Garns von der Spule bei größerer Maschinengeschwindigkeit oder kleinerem Flechtwinkel berücksichtigen. Wenn man von gleichbleibender Verteilung geschädigter, fehlerauslösender Bereiche entlang des Garns ausgeht, wären aufgrund der größeren verarbeiteten Garmenge häufigere Fehler innerhalb derselben Flechtzeitspanne zu erwarten. So könnte sich der Geschwindigkeitsvorteil einer schnelleren Flechtmaschine wieder relativieren. Aktuell ist die Entstehung von Faserringen beim Flechten von Verstärkungsfasern noch nicht weit genug verstanden<sup>28</sup>, um weitere Abhängigkeiten (z. B. von der Garngeschwindigkeit selbst) auszuschließen. Aufgrund dieser Unsicherheitsfaktoren und der Tatsache, dass die Fehlerentstehungsrate für jedes der verwendeten Flechtmaterialien spezifisch ermittelt werden müsste, wird auf ein solch kompliziertes Modell verzichtet. Für die Zwecke dieser Arbeit wird die relativ einfache, zeitabhängige Fehlerrate  $\lambda_{err,S}$  als ausreichend erachtet, um die Bedeutung von Flechtfehlern bei der Berechnung der Gesamtproduktivität zu berücksichtigen.

Aus der spulenbezogenen Fehlerrate ergibt sich mit der Anzahl der Flechtspulen  $n_S$  in der Gesamtanlage (bei VKFM also die Spulen aller Flechtrümpfe) die Fehlerrate des Produktionssystems.

$$\lambda_{err,P} = \lambda_{err,S} * n_S \quad (3-33)$$

Da Fehler nur entstehen können, während die Anlage läuft, kann über die Flechtzeit  $T_F$  mit der Fehlerrate des Produktionssystems die Gesamtfehleranzahl je Zyklus errechnet werden.

$$n_{err,Zyk} = \lambda_{err,P} * T_F \quad (3-34)$$

Der Kehrwert dieser Fehlerrate des Produktionssystems gibt die durchschnittliche Laufzeit zwischen zwei Fehlern an, die in der Produktionsplanung als „mean time between failures“<sup>29</sup> bezeichnet wird. Die durchschnittliche Zeit, um einen Fehler zu beheben, wird in vergleichbarer Weise „mean time to recover“<sup>30</sup> genannt. In der vorliegenden Arbeit steht die Zeitvariable  $t_{MTTR}$  für diese Fehlerbehebungszeit. Mit ihr kann aus der Fehleranzahl die Gesamtfehlerzeit  $T_{err}$  im Zyklus errechnet werden.

$$T_{err} = n_{err,Zyk} * t_{MTTR} \quad (3-35)$$

Die Fehlerrate  $\lambda_{err,S}$  und die Fehlerbehebungszeit  $t_{MTTR}$  sind die Stellgrößen für die Gesamtfehlerzeit im Prozess. Die Auswertung von Dauerflechtversuchen (DFV) erlaubt

<sup>28</sup> Momentan beschäftigt sich z. B. Mierzwa in seinen Arbeiten mit diesem Themenkomplex [128].

<sup>29</sup> Abkürzung: MTBF

<sup>30</sup> Abkürzung: MTTR

Rückschlüsse auf die Größenordnung, in der sich beide Werte bei der Verarbeitung von Verstärkungsfasergarnen bewegen. Bei einem DFV wird eine komplette Maschinenbesetzung am Stück zu Geflecht verarbeitet. Das Auftreten von Fehlern, der entstehende Materialverlust und die Dauer zur Behebung des Fehlers werden dokumentiert. Die betreffende Versuchsreihe (s. Tab. 3-5) beinhaltet vier Flechtversuche, für die die Flechtfasern jeweils mit unterschiedlichen Parametern umgespult wurden, um den Einfluss des Umspulens auf die Prozessstabilität zu ermitteln.

**Tab. 3-5: Ergebnisübersicht für Dauerflechtversuche<sup>31</sup>**

Maschine: Herzog Axialflechtmaschine AF60-120 (bis 2013 am LCC)  
 Versuchsparameter: Hybrid-Geflecht, 300 m Flechtfadenumlänge, verschiedene Maschinen- und Umspulparameter.

Versuch (Datum)	$n_{err,DFV}$	$T_{F,DFV}$	$T_{err,DFV}$	$T_{B,err,DFV}$	$t_{MTTR,DFV}$	$\lambda_{err,P,DFV}$	$\lambda_{err,S,DFV}$
Einheit	-	[hh:mm]	[hh:mm]	[hh:mm]	[min]	[h <sup>-1</sup> ]	[(100h) <sup>-1</sup> ]
<b>DFV-1</b> (16.01.12)	10	1:48	0:32	2:20	3,20	5,56	9,26
<b>DFV-2</b> (21.03.12)	15	1:50	0:37	2:27	2,47	8,18	13,64
<b>DFV-3</b> (13.04.12)	1	2:06	0:09	2:15	9,00	<b>0,48</b>	<b>0,79</b>
<b>DFV-4</b> (16.10.12)	7	1:53	0:40	2:33	5,72	3,72	6,19
<b>DFV-1 bis DFV-4</b>	33	7:37	1:58	9:35	<b>3,57</b>	4,33	7,22

Die in den Versuchen ermittelten Fehlerraten  $\lambda_{err,DFV}$  schwanken über einen weiten Bereich und sind bei den Versuchen DFV-1, -2 und -4 auch sehr hoch. Dieses Ergebnis kann auf ungeeignete Umspulparameter zurückgeführt werden und ist für einen Fertigungsbetrieb mit Sicherheit nicht repräsentativ. Mit dem dritten Versuch (DFV-3) konnte eine Fehlerrate  $\lambda_{err,P,DFV}$  von weniger als  $0,5 h^{-1}$  für das untersuchte Produktionssystem nachgewiesen werden. Dies entspricht bei der verwendeten Flechtmaschine mit 60 Klöppeln einer spulenbezogenen Fehlerrate  $\lambda_{err,S,DFV}$  von ca. 0,8 pro einhundert Betriebsstunden. Durch die Optimierung der Umspul- und Betriebsparameter lässt sich die Fehlerrate demnach bedeutend reduzieren. Die Ergebnisse der Versuche sind grafisch im Anhang in Abb. A-2 dargestellt.

Aussagekräftiger sind die Werte für die durchschnittliche Fehlerbehebungsdauer. Die Häufigkeit des Fehlerauftretens während der betrachteten Dauerflechtversuche ist dabei sogar hilfreich, da sich die Datenbasis verbreitert. Der über alle vier Versuche gemittelte Wert von ca. 3,5 min Reparaturzeit je Fehler deckt sich gut mit Erfahrungen aus der täglichen Arbeit mit der Anlage im Forschungsbetrieb am Lehrstuhl. Für die Reparatur

<sup>31</sup> Die Versuche wurden 2012 im Rahmen einer gemeinsamen Forschungsarbeit mit Michael Brand durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind in Teilen bereits veröffentlicht [19, 131].

in einer geschlossenen Fertigungszelle (Zeit zum Betreten der Zelle, schlechtere Zugänglichkeit am Flechtpunkt aufgrund der dort platzierten Subsysteme), wie sie in der Serienfertigung zum Einsatz kommen würde (s. Abschnitt 3.4.1), muss der Wert eher noch etwas höher angenommen werden.

Dauerflechtversuche stellen nur eine Behelfsmaßnahme dar, um die fehlerzeitrelevanten Prozesskenngrößen für eine Serienfertigung realer Bauteile abzuschätzen. Daten über eine höhere Bauteilanzahl (z. B. aus der Fertigung bei BMW) stehen dem Autor nicht zur Verfügung. Es ist aber anzunehmen, dass die betreffenden Kennwerte bei optimierter Produktion bedeutend geringer sind als die mit den DFV ermittelten Richtwerte.

Um dieser Unsicherheit Rechnung zu tragen, wird das Fehlermodell so aufgebaut, dass beide Werte über einen gewissen Bereich variiert werden können (s. Tab. 3-6). Als Standardwerte für die Berechnungen in dieser Arbeit werden eine spulenbezogene Fehlerrate von  $\lambda_{err,S} = 0,5$  pro einhundert Betriebsstunden und eine mittlere Fehlerbehebungs-dauer von  $t_{MTTR} = 5 \text{ min}$  gewählt.

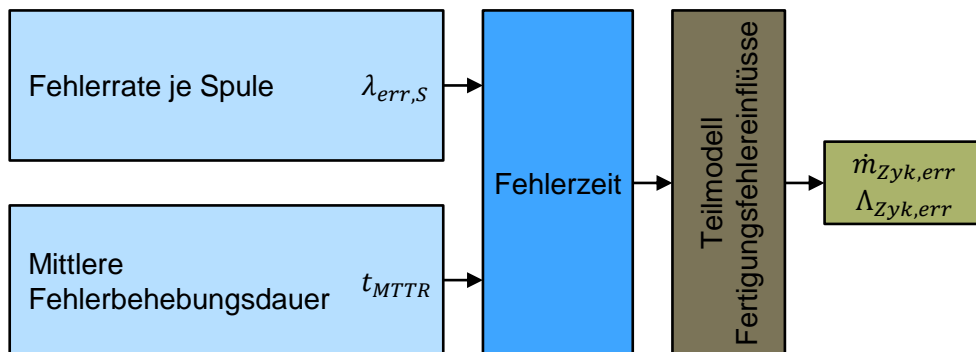
**Tab. 3-6: Eingangswerte des Teilmodells zu den Fertigungsfehlerinflüssen**

Die im weiteren Verlauf der Berechnung als Standardwerte verwendeten Größen sind schwarz dargestellt, die Werte des übrigen Variationsbereichs sind ausgegraut.

Eingangsgröße	Einheit	Varierte Eingabewerte für das Berechnungsmodell						
$\lambda_{err,S}$	$(100h)^{-1}$	0	0,1	0,2	0,5	1	2	5
$t_{MTTR}$	min	1	3	5	7	10	15	20

### 3.6.3 Fehlerbehaftete Prozesskennzahlen

Die nachstehende Abb. 3-21 zeigt zusammenfassend die Ein- und Ausgabeparameter, die in das Modell zur Berechnung des Fehlereinflusses eingehen. Mit Kenntnis der betreffenden Werte lässt sich über Formel (3-35) für jedes der betrachteten Produktionssysteme die zyklusbezogene Gesamtfehlerzeit berechnen.



**Abb. 3-21: Ein- und Ausgabewerte des Teilmodells zum Fehlereinfluss**

Mit Gesamtfehlerzeit  $T_{err}$  kann entsprechend Formel (3-5) die fehlerbehaftete, zyklusbezogene Verfügbarkeit bestimmt werden:

$$\Lambda_{Zyk,err} = \frac{T_F}{T_{Zyk,err}} = \frac{T_F}{T_F + T_N + T_{err} + T_R} \quad (3-36)$$

Die Ablagerate ergibt sich analog zur fehlerfreien Betrachtung in Abschnitt 3.5.3 über die Maschinenablagerate in Kombination mit der Verfügbarkeit oder über die fehlerbehaftete Zyklusdauer und die Gesamtmasse der im Zyklus gefertigten Bauteile:

$$\dot{m}_{Zyk,err} = \Lambda_{Zyk,err} * \dot{m}_M = \frac{n_{B,Zyk} * m_P}{T_{Zyk,err}} \quad (3-37)$$

Die fehlerbehafteten Kennzahlen eignen sich im Besonderen, um den negativen Einfluss der Verkettung mehrerer Flechtmaschinen in einer Anlage herauszuarbeiten. Auch bei niedrigen Werten der klöppelbezogenen Fehlerrate sind für Anlagen mit entsprechend hoher Klöppelzahl deutliche Einbußen bei der Verfügbarkeit zu erwarten.

## 3.7 Interaktion zwischen Spulengröße und Maschinengeschwindigkeit

Wie bereits zu Beginn des Kapitels 3 erwähnt, beeinflussen sich verschiedene Bereiche des Modells gegenseitig. Eine Interaktion, die absehbar so großen Einfluss auf die Produktivität hat, dass sie nicht unbeachtet bleiben kann, ist die Interaktion von Spulengröße und Maschinengeschwindigkeit.<sup>32</sup>

Um die Produktivität zu steigern, ist es wünschenswert, die Maschine möglichst schnell laufen zu lassen. Wie in Abschnitt 3.3.2 über die Formeln (3-13) und (3-18) gezeigt wird, hängt die Ablagerate der Maschine  $\dot{m}_M$  linear von der Flügelraddrehzahl  $f_F$  ab. Daher ist diese ein starker Treiber für die Produktivität. Jedes Prozent erhöhter Maschinengeschwindigkeit lässt den Ausstoß der Maschine entsprechend steigen. Je schneller die Maschine jedoch läuft, umso eher muss neu gerüstet werden. Der Rüstzeitfaktor  $k_R$  beschreibt den Anteil der Rüstzeit an der Zykluszeit<sup>33</sup>.

<sup>32</sup> Eine weitere Interaktion wäre z. B. der Zusammenhang zwischen der Spulengröße und der Rüstdauer. Am Beispiel sehr großer Spulen, wie sie bei Flechtmaschinen für Off-Shore-Taue eingesetzt werden, lässt sich nachvollziehen, dass das Rüsten mit Hilfe eines Krans oder Gabelstaplers pro Spule sehr viel zeitaufwendiger ist als das Rüsten von Hand bei kleinen Spulen. Von einer Abbildung dieses Zusammenhangs wird für die vorliegende Arbeit allerdings abgesehen, da für den relevanten Bereich der Spulengrößen ein prinzipiell gleicher Rüstvorgang und daher ähnliche Rüstzeiten zu erwarten sind.

<sup>33</sup> Die Betrachtung erfolgt ohne die Berücksichtigung von Flechtfehlern, da diese keinen Einfluss auf die grundsätzlichen Zusammenhänge des untersuchten Phänomens haben. Für ein Produktionssystem ohne Nebenzeiten (ELFM-UB-P) lässt sich die Problemstellung weiter vereinfachen.



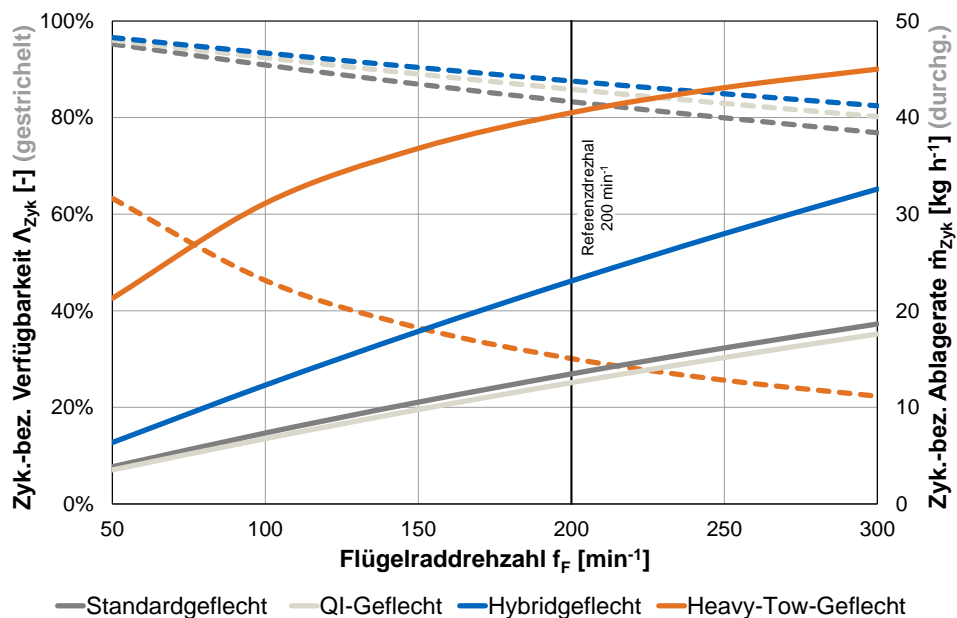
Es gilt:

$$k_R = \frac{T_R}{T_{Zyk}} = 1 - \Lambda_{Zyk} \quad (3-38)$$

Abb. 3-22 zeigt: Die zyklusbezogene Verfügbarkeit (gestrichelte Linien im Diagramm) sinkt wie erwartet für steigende Flügelraddrehzahlen, da die Gesamtzykluszeit wegen der kürzeren Flechtzeit sinkt, wohingegen die Rüstzeit gleich bleibt.

Eine geringere Verfügbarkeit erscheint zunächst nachteilig. Die isolierte Betrachtung dieses Wertes ist hier jedoch trügerisch. Schließlich werden in der kürzeren Gesamtzykluszeit immer noch gleich viele Teile produziert, so dass die zykluszeitbezogene Ablagerate  $\dot{m}_{Zyk}$  sich dennoch wie gewünscht erhöht (durchgängige Linien im Diagramm).

Um für eine weitere Produktivitätssteigerung den Rüstzeitanteil zu reduzieren, müssen größere Flechtfadenspulen zum Einsatz kommen, da sich so die Maschinenlaufzeit bis zum nächsten Rüstvorgang verlängert. Allerdings nehmen dadurch sowohl die Dimensionen als auch die Masse des Klöppels zu, was mit erhöhten Biegekräften am Klöppelfuß einhergeht – speziell dann, wenn die Maschine mit möglichst hoher Geschwindigkeit gefahren wird. Damit also die Klöppel unter der erhöhten Belastung nicht brechen, muss die Flechtmaschine umso langsamer gefahren werden, je größer die verwendeten Spulen sind.



**Abb. 3-22: Verfügbarkeit und Ablagerate über Flügelraddrehzahl**

Rahmenbedingungen: ELFM-UB-P mit 64 Klöppeln, Standardbauteil, konstante Spulengröße  $300 \text{ cm}^3$ , Stehfadenspulengröße  $14000 \text{ cm}^3$ , Rüstkonzept SH-2MA.

Hohe Maschinengeschwindigkeit für gesteigerte Produktivität und große Spulen für seltene Rüstvorgänge sind unvereinbar. Bei der Steigerung der Spulengröße muss es eine Grenze geben: die „optimale“ Spulengröße, bei der sich die Vorteile aus verringertem Rüstaufwand und die Nachteile aus verminderter Anlagengeschwindigkeit die Waage halten.

Aus der Praxis ist bekannt, dass Flechtmaschinenbetreiber immer wieder die Grenzen des vom Hersteller freigegebenen Maschinengeschwindigkeitsbereichs überschreiten, um ihre Ausbringungsrate zu verbessern. Dieses Vorgehen ist jedoch oft nicht von Erfolg gekrönt, da in der Folge vermehrte Maschinenausfälle aufgrund von gebrochenen Klöppelfüßen und erhöhtem Verschleiß an den Führungselementen zu verzeichnen sind. Die durch die Stillstandzeit für die Maschinenreparatur und die Ersatzteilkosten entstehenden Verluste können den kurzfristigen Produktivitätsgewinn erheblich übersteigen.

### 3.7.1 Herleitung des Zusammenhangs

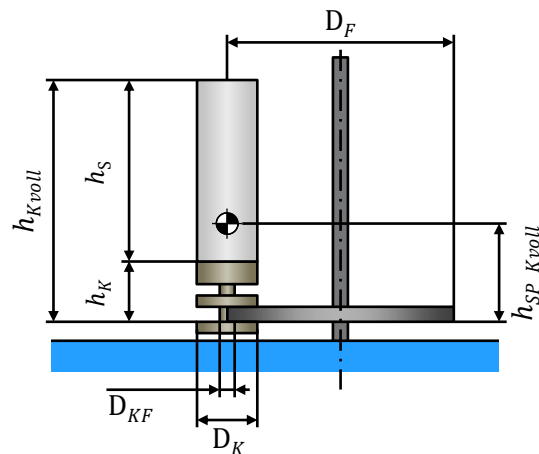
Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen Spulengröße und Maschinengeschwindigkeit theoretisch hergeleitet<sup>34</sup>. Dabei werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Biegespannung im Klöppelfuß stellt sowohl im Hinblick auf spontanen Überlastbruch als auch auf Materialermüdung den dimensionierenden Materialparameter für die Haltbarkeit des Klöppels dar. Daher wird gefordert, dass eine Größenänderung des Klöppels keine Erhöhung der Biegespannung im Klöppelfuß zur Folge haben darf. Dies führt dazu, dass die Geschwindigkeit der Flechtmaschine entsprechend angepasst werden muss.
- Die Klöppel und die darauf gesetzten Garnspulen werden für die verschiedenen großen Flechtspulenvolumina als geometrisch ähnlich angenommen, d.h. ein doppelt so hoher Klöppel hat auch einen doppelt so „dicken“ Fuß. Längen skalieren linear, Flächen quadratisch und Volumina (Massen) kubisch. Die Garnmasse ist proportional zur Garmlänge: Ein doppelt so hoher Klöppel enthält also die achtfache Fadenlaufänge und eignet sich zur Fertigung der achtfachen Menge an Bauteilen, bevor nachgerüstet werden muss.
- Die Konstruktion von Maschinen verschiedener Größen erfolgt mit denselben Werkstoffen. Die maximal ertragbare Biegespannung im Klöppelfuß ist daher für alle Maschinengrößen dieselbe.

Die nachfolgende Abb. 3-23 stellt das System aus Klöppel und Flügelrad mit den wichtigsten Maßen dar, die in die nachfolgende Berechnung eingehen.

---

<sup>34</sup> Das Modell zur Klöppelskalierung wird ebenfalls in Microsoft Excel™ umgesetzt.



**Abb. 3-23: Maße von Klöppel und Flügelrad**

$h_K$	Höhe des Klöppels	$D_K$	Klöppeldurchmesser
$h_S$	Höhe der Spule	$D_{KF}$	Klöppelfußdurchmesser
$h_{Kvoll}$	Höhe des besetzten Klöppels	$D_F$	Flügelraddurchmesser
$h_{SP,Kvoll}$	Abstand vom Schwerpunkt des besetzten Klöppels zur Flügelradunterkante		

Durch die Drehbewegung des Flügelrads erfährt der mitgeführte Klöppel eine Zentrifugalbeschleunigung nach außen, die mit zunehmender Flügelraddrehzahl ansteigt. Der Massenmittelpunkt des Systems aus Klöppel und Spule weist einen Abstand zur Lagerstelle des Klöppelfußes am Flügelrad auf. Aufgrund dieses Hebelarms wird durch die im Massenmittelpunkt angreifende Kraft am Klöppelfuß eine Biegespannung induziert. Für die Berechnung wird angenommen, dass die maximalen Biegekräfte an der unteren Kante der Einspannung des Klöppels am Flügelrad auftreten. Diese vereinfachende Annahme wird als zulässig erachtet, da die genaue Lage der maximalen Spannung für die Herleitung des gesuchten grundlegenden Zusammenhangs nicht von Bedeutung ist.

### 3.7.1.1 Klöppelgeometrie

Für die Bestimmung der Lage des Kraftangriffspunktes  $h_{SP,Kvoll}$  werden folgende weitere Annahmen getroffen:

- Das System aus Klöppel und Spule wird in zwei Bereiche aufgeteilt, einen unteren Bereich „Klöppel“ mit der Höhe  $h_K$  und einen oberen Bereich „Spule“ mit der Höhe  $h_S$ , wobei die Bezeichnung Höhe gewählt wird, um eine Verwechslung mit der Länge  $l$  des Flechtbauteils zu vermeiden.
- Beide Bereiche weisen jeweils unterschiedliche Dichten für das Klöppelmaterial  $\rho_K$  (zumeist Stahl) und das Spulenmaterial  $\rho_S$  (Garne und Kunststoff) auf. Die Dichte des Spulenmaterials und der gepackten Verstärkungsfasern liegt in einem ähnlichen Bereich, weshalb keine getrennte Betrachtung erfolgt.
- Klöppel und Spule werden vereinfacht als Zylinder angenommen. Das Volumen wird also direkt aus Grundfläche und Höhe berechnet. Die Betrachtung erfolgt für volle Spulen, da dann die größte Belastung zu erwarten ist.

Die Gesamtmasse  $m_{Kvoll}$  des Systems aus Klöppel und Spule beträgt

$$m_{Kvoll} = m_K + m_S = \frac{\pi * D_K^2}{4} * (h_K * \rho_K + h_S * \rho_S) \quad (3-39)$$

Die jeweiligen Teilmassenschwerpunkte liegen in Höhen über der Flügelradunterkante von

$$h_{SP,K} = \frac{h_K}{2} \quad (3-40)$$

für den Klöppel und

$$h_{SP,S} = h_K + \frac{h_S}{2} \quad (3-41)$$

für die Spule. Der Abstand des Schwerpunkts für das Gesamtsystem aus Klöppel und Spule von der gewählten Einspannstelle an der Unterkante des Flügelrads lässt sich mit nachstehender Formel bestimmen.

$$h_{SP,Kvoll} = \frac{m_K * h_{SP,K} + m_S * h_{SP,S}}{m_{Kvoll}} \quad (3-42)$$

### 3.7.1.2 Biegebelastung

Aufgrund der Drehbewegung des Flügelrades wirkt auf den Klöppel eine Zentrifugalkraft, die neben der bewegten Masse vom Durchmesser der Flügelräder und von deren Drehzahl  $f_F$  abhängt.

$$F_{Z,Kvoll} = m_{Kvoll} * \frac{D_F}{2} * (2\pi * f_F)^2 \quad (3-43)$$

Mit dem Biegemoment im Klöppelfuß

$$M_{KF} = F_{Z,Kvoll} * h_{SP,kvoll} \quad (3-44)$$

lässt sich mit Hilfe des Flächenträgheitsmoments die maximale Biegespannung im Klöppelfuß  $\sigma_{KF}$  in Abhängigkeit von dessen Durchmesser  $D_{KF}$  bestimmen.

$$\sigma_{KF} = 32 * \frac{M_{KF}}{\pi D_{KF}^3} \quad (3-45)$$

In Anlehnung an die Abmessungen des am LCC verwendeten Klöppels<sup>35</sup> wird die Vereinfachung getroffen, dass der untere „Klöppel“-Bereich  $h_K$  ein Viertel der Gesamthöhe  $h_{Kvoll}$  einnimmt. Durch Einsetzen der Gleichungen (3-39) bis (3-44) lässt sich die Spannung im Klöppelfuß als Funktion ausdrücken, die als Variablen ausschließlich die in Abb. 3-23 dargestellten Längenmaße und die Flügelraddrehzahl  $f_F$  sowie die Dichten von Klöppelmaterial und Garn enthält.

$$\sigma_{KF} = \frac{\pi^2}{2} (\rho_K + 15\rho_S) * f_F^2 * \frac{D_F D_K^2 h_{Kvoll}^2}{D_{KF}^3} \quad (3-46)$$

### 3.7.1.3 Ableitung des gesuchten Zusammenhangs

Durch Normierung mit Hilfe von Konstanten können die Variablen in (3-46) auf die Grundgrößen Dichte, Flügelraddrehzahl und Länge zurückgeführt werden. Die Dichten von Klöppel und Garn sind konstante Werte, die sich beim Skalieren der Klöppelgröße nicht ändern. Die Flügelraddrehzahl geht quadratisch in das Berechnungsergebnis für die Spannung ein, die Längen ebenfalls. Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\sigma_{KF} = \underbrace{c * \rho}_{konst.} * f^2 * L^2 \stackrel{!}{=} konst. \Rightarrow f \sim \frac{1}{L} \quad (3-47)$$

Damit die Bedingung konstanter Biegekraft im Klöppelfuß beim Skalieren der Klöppelgröße erfüllt ist, müssen sich Längen und Drehzahl umgekehrt proportional zueinander verhalten.

In der Flechttechnik wird sowohl von Maschinenherstellern als auch Anwendern der Begriff der Spulengröße so verwendet, dass das Spulenvolumen und nicht die Länge bzw. Höhe der Spule gemeint ist. Dies wird in der vorliegenden Arbeit ebenso gehandhabt. Die Abhängigkeit zwischen Längenmaßen und Volumina

$$V \sim L^3 \Rightarrow L \sim V^{1/3} \quad (3-48)$$

führt dazu, dass nach Formel (3-47) zwischen Spulenvolumen und Flügelraddrehzahl eine Beziehung erwartet wird, die der Form

$$f \sim c * V^{-1/3} \quad (3-49)$$

entspricht. Es ist zu erwarten, dass dieser Zusammenhang bei realen Flechtmaschinen nur näherungsweise erfüllt wird, da bei deren Konstruktion Abweichungen von den zu Beginn des Abschnitts getroffenen Annahmen (geometrische Ähnlichkeit, Biegespannung im Fuß als einzig dimensionierende Größe, gleiche Werkstoffwahl) auftreten.

<sup>35</sup> Flechtspulenkloppe mit  $265 \text{ cm}^3$  Fadenvolumen für Maschinen mit 100er-Stich.

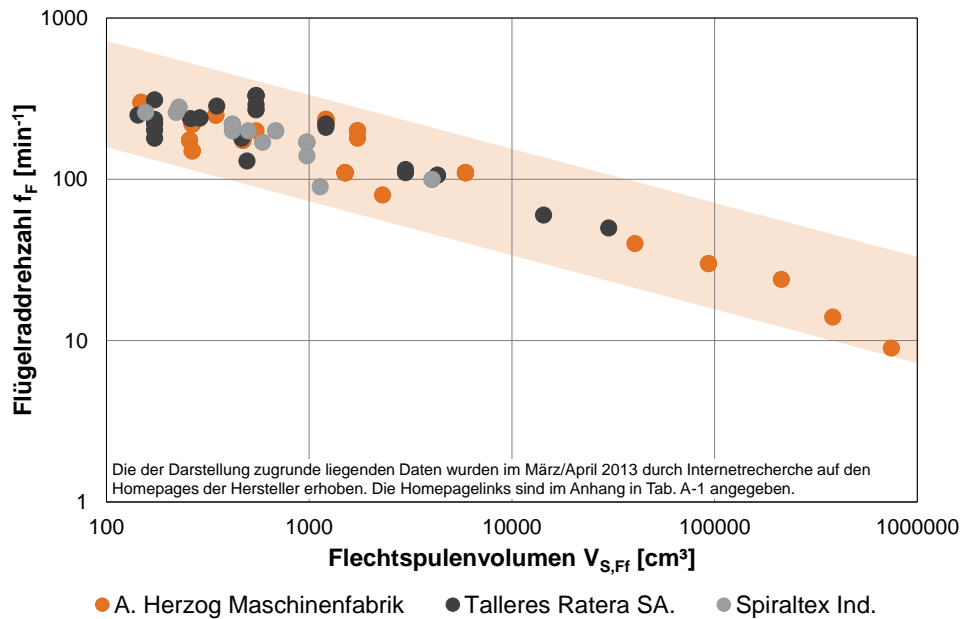


Abb. 3-24: Flügelradrehzahl und Spulengröße nach Herstellern

### 3.7.2 Abgleich mit Realmaschinen

Um diesen theoretisch hergeleiteten Zusammenhang zu überprüfen, wurden im Internet verfügbare Daten zu Spulenvolumen und Flügelradrehzahl der im Verkaufsprogramm der Hersteller befindlichen Flechtmaschinen gesammelt und grafisch aufbereitet. In Abb. 3-24 sind Daten von Klöppelflechtmaschinen der Hersteller August Herzog Maschinenfabrik GmbH (vgl. Tab. A-3), Talleres Ratera SA (vgl. Tab. A-4) und Spiraltex Industrie (vgl. Tab. A-5) aufgetragen. Die Bandbreiten der Flügelradrehzahlen und insbesondere die der Spulenvolumina erstrecken sich dabei über mehrere Größenordnungen, weshalb im Diagramm eine logarithmische Darstellungsweise gewählt wird.

Obwohl die jeweils zugehörigen Maschinengeschwindigkeiten im Bereich der kleineren Spulen eine relativ große Bandbreite abdecken, zeichnet sich über alle Wertepaare hinweg ein deutlich erkennbarer Zusammenhang ab, der in der doppelt logarithmischen Darstellung als gerade nach rechts unten abfallender Bereich erkennbar wird. Der Zusammenhang aus der theoretischen Berechnung lässt sich also auch anhand der Daten realer Maschinen nachweisen.

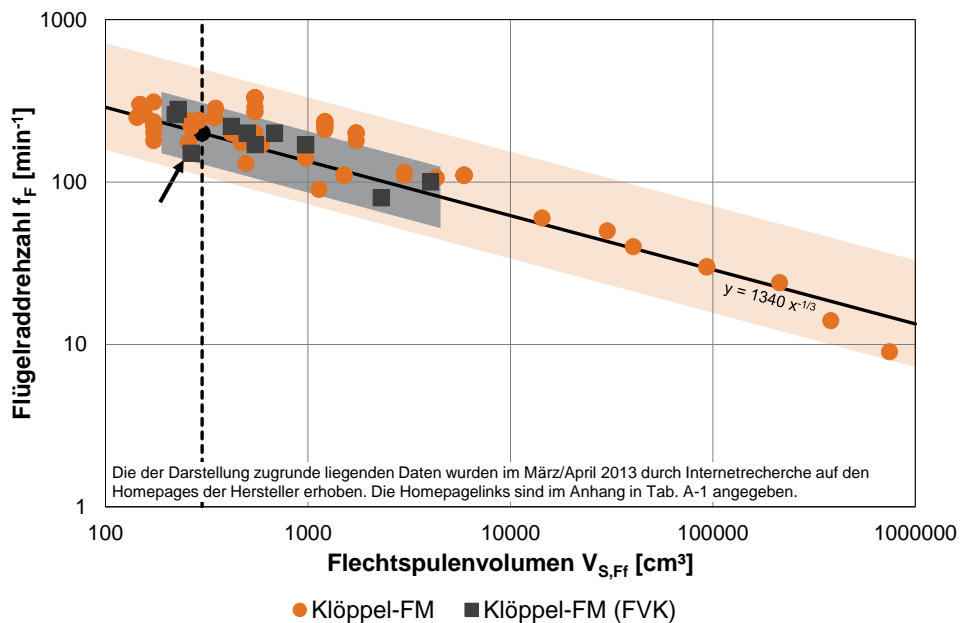
Der Grund für die Bandbreite an Maschinengeschwindigkeiten bei den kleineren Spulenvolumina ist vermutlich auch darin zu suchen, dass nicht alle Klöppel „geometrisch ähnlich“ sind, anders als dies in der theoretischen Herleitung vorausgesetzt wird. Ein im Vergleich mit der Spulengröße überproportional stabiler Klöppelfuß kann z. B. eine höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit als die typischerweise zugehörige erlauben.

Im Bereich der sehr großen Spulenvolumina (wie sie z. B. auf Maschinen für die Herstellung von Verankerungstauen für Ölbohrplattformen zum Einsatz kommen) zeichnet

sich recht exakt ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang zwischen Flügelraddrehzahl und dritter Wurzel des Spulenvolumens ab, der durch die Aufreihung der Datenpunkte in Abb. 3-24 entlang einer Gerade erkennbar wird. Als besonders bemerkenswert kann hervorgehoben werden, dass in diesem Bereich sowohl die Daten der Maschinen von Talleres Ratera als auch von Herzog den Zusammenhang in gleicher Weise erfüllen und im Diagramm exakt entlang derselben gedachten Gerade zu finden sind. Der Zusammenhang zwischen Spulengröße und Maschinengeschwindigkeit scheint also unabhängig von den Konstruktionsphilosophien einzelner Hersteller und damit wie vermutet grundlegender Natur zu sein.

In der folgenden Abb. 3-25 sind dieselben Daten anders aufgeschlüsselt. Alle Maschinen für die Polymerfaserverarbeitung sind hell hinterlegt, in dunkelgrau ist hingegen der Bereich der Maschinen dargestellt, die die Hersteller speziell für die Verarbeitung von Verstärkungsfasern zur FVK-Herstellung im Programm haben.

Es fällt dabei zum einen auf, dass die Maschinen für die FVK-Herstellung überwiegend mit recht kleinen Spulenvolumina angeboten werden. Zum anderen liegen die Flügelraddrehzahlen an der unteren Grenze des Bereichs, der insgesamt von den Klöppelflechtmaschinen abgedeckt wird. Die Vermutung liegt nahe, dass sich beides aufgrund des Bearbeitungsverhaltens der spröden und bruchanfälligen Verstärkungsfasern als praktikabel erwiesen hat (s. hierzu auch Abschnitt 3.6.1).



**Abb. 3-25: Flügelraddrehzahl und Spulengröße nach Einsatzbereichen**

Darstellung des Zusammenhangs für Klöppelflechtmaschinen für die klassischen Einsatzgebiete der Flechttechnik (hell hinterlegter Bereich) und Flechtmaschinen für die Herstellung von FVK (grau hinterlegt). Die gerade Trendlinie im doppelt logarithmischen Diagramm verdeutlicht den umgekehrt proportionalen Zusammenhang von Flügelraddrehzahl und dritter Wurzel des Spulenvolumens.

Durch das Einfügen einer Trendlinie in Abb. 3-25 lässt sich ein empirischer Zusammenhang zwischen Spulengröße und Flügelradrehzahl ermitteln. Die Steigung der Trendlinie wird über den Exponenten von  $x$  eingestellt. Der Wert von  $-1/3$  aus der theoretischen Herleitung in Formel (3-49) ergibt eine Steigung, die sehr gut mit der Anordnung der Datenpunkte zusammenpasst. Über den Vorfaktor von  $x$  lässt sich die Linie im Diagramm in  $y$ -Richtung verschieben.

Da der Streubereich, in dem die Werte für Realmaschinen liegen, im linken Teil des Diagramms relativ groß ist, muss entschieden werden, auf welcher Höhe im Diagramm die Linie verlaufen soll, damit sie die Eigenschaften der FVK-Flechtmaschinen im grauen Bereich der Darstellung möglichst gut abbildet. Der Datenpunkt der Versuchsmaschine am LCC ist mit dem Pfeil markiert und weist Werte von  $V_{S,FF} = 265 \text{ cm}^3$  und  $f_F = 150 \text{ min}^{-1}$  auf. Sie besitzt sehr kleine Spulen und arbeitet im Vergleich mit den übrigen Maschinen für die FVK-Serienfertigung an der untersten Geschwindigkeitsgrenze. Sie eignet sich daher nicht als „typische“ FVK-Flechtmaschine mit einer repräsentativen, mittleren Maschinengeschwindigkeit. Das liegt daran, dass die Maschine nach dem Radialdesign ausgeführt ist (s. Abschnitt 2.3.1.2), mit dem sich nur geringere Maschinengeschwindigkeiten realisieren lassen.

Die vertikale Position der Trendlinie wird deswegen so bestimmt, dass beim Referenzspulenvolumen von  $V_{S,FF} = 300 \text{ cm}^3$  möglichst genau die als Referenzgeschwindigkeit gewählte Flügelradrehzahl von  $f_F = 200 \text{ min}^{-1}$  erreicht wird (s. hierzu Tab. 3-3). Das Referenzspulenvolumen ist mit einer gestrichelten schwarzen Linie markiert. Die durchgehend schwarz eingezeichnete Trendlinie verläuft mit einem Vorfaktor von 1340 entlang der durch die Datenpunkte von Flechtmaschinen mit besonders großen Spulen vorgegebenen Steigung zentral durch den grau markierten Bereich der Maschinen für die Verstärkungsfaserverarbeitung. Der markierte Schnittpunkt beider Linien stellt die Referenzmaschine dar, die als repräsentativ für die Gruppe von FVK-Flechtmaschinen angesehen wird. Der empirische Zusammenhang für die eingezeichnete Trendlinie lautet:

$$f_F = 1340 * V_{S,FF}^{-1/3} \quad (3-50)$$

Das Spulenvolumen muss in  $\text{cm}^3$  eingesetzt werden, um die dazu gehörige Flügelradrehzahl in  $\text{min}^{-1}$  zu erhalten. Bei den beiden grauen Datenpunkten unterhalb der Linie handelt es sich um Maschinen nach dem Radialdesign, die Punkte oberhalb der Linie gehören zu Maschinen mit axialer Klöppelanordnung. Die gefundene Formel erfüllt exakt den in Formel (3-49) hergeleiteten theoretischen Zusammenhang.

Selbstverständlich liefert sie aber keine tatsächlichen Vorgabewerte für die Konstruktion oder den Betrieb einer Flechtmaschine. Speziell in Richtung auf sehr kleine Spulen werden schnell unrealistisch hohe Werte für die Maschinengeschwindigkeit erreicht. Nachdem der Fokus der vorliegenden Arbeit eher auf die Untersuchung größerer Spulenvolumina gerichtet ist, wird diese Einschränkung als vertretbar angesehen.



Die Formel wird verwendet, um zu bewerten, wie sich eine Erhöhung der Spulengröße innerhalb des Modells zur Produktivitätsberechnung auswirkt, wenn die reduzierte Anlagengeschwindigkeit berücksichtigt wird. Für diesen Zweck ist es nicht notwendig, dass der Zusammenhang mit der gefundenen empirischen Formel exakt beschrieben wird. Es genügt, wenn der richtige Trend abgebildet wird, um Aussagen treffen zu können. Für den Zweck der Anwendung im Berechnungsmodell wird die Formel (3-50) daher als geeignet erachtet und im Berechnungsmodell implementiert. Sofern nicht anders angegeben, werden die Produktivitätsuntersuchungen mit Berücksichtigung der Interaktion durchgeführt.



## 4 Ergebnisse der Produktivitätsanalyse

Kapitel 3 stellt ein Berechnungsmodell vor, das die umfassende Analyse der Produktivität des Klöppelflechtverfahrens für die FVK-Bauteilfertigung ermöglicht. Es verknüpft mehrere Teilmodelle zu den Bereichen Maschine und Bauteil, Produktionssystem, Rüsten und Fertigungsfehler. Das vorliegende Kapitel widmet sich der Untersuchung des Prozesses mit Hilfe dieses Berechnungsmodells. Die Ergebnisse der Analysen werden vorgestellt und diskutiert.

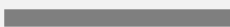

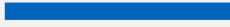

Ziel ist herauszuarbeiten, welche Stellgrößen den größten Effekt auf die Produktivitätssteigerung haben, um daraus Verbesserungsvorschläge für die Optimierung bzw. Neuentwicklung von Flechtanlagen abzuleiten. Gleichzeitig bilden die Ergebnisse der Produktivitätsuntersuchungen mit dem vorliegenden Modell die Basis, mit der die angestrebte Produktivitätssteigerung eines verbesserten Systems verglichen werden kann.

### 4.1 Herangehensweise

Um den Untersuchungsraum zu begrenzen, wurden im vorhergehenden Kapitel für einige der Parameter Standardwerte definiert. Diese werden für alle Berechnungen im aktuellen Kapitel verwendet, sofern nichts Abweichendes angegeben ist. Diese Standardwerte sind in der folgenden Liste noch einmal zusammengefasst.

- Vier verschiedene Geflechtstypen bilden die **Basisgeflechte**. Ihre Beschreibung findet sich in Abschnitt 2.2.6. Um die Ergebnisdiagramme leichter verständlich zu gestalten, werden die Basisgeflechte durchgängig mit den in Tab. 4-1 gezeigten Farben dargestellt.

Tab. 4-1: Farbkennzeichnung der Basisgeflechtarten

Basisgeflechtart	Farbe
Standardgeflecht	Dunkelgrau 
QI-Geflecht	Hellgrau 
Hybridgeflecht	Blau 
Heavy-Tow-Geflecht	Orange 

- Als **Standardbauteil** wird ein gerades, kreisrundes Profil gewählt, das mit allen Basisgeflechten auf derselben Maschine innerhalb akzeptabler Grenzen für Bedeckungsgrad und Faservolumengehalt hergestellt werden kann. Die Eckdaten des Standardbauteils finden sich in Abschnitt 3.3.1.1 (Tab. 3-1 und Tab. 3-2).

- Als **Standardmaschine** wird eine Flechtmaschine mit 64 Klöppeln und 2 x 2-Abbindung definiert, die an die halb besetzte Herzog-Radialflechtmaschine des LCC (s. Abb. 2-24) angelehnt ist. An dieser orientiert sich auch die Referenzspulengröße von  $300 \text{ cm}^3$ . Sofern nicht anders angegeben, wird die Standardmaschine mit einer Flügelraddrehzahl von  $200 \text{ min}^{-1}$  betrieben. Die Eckdaten der Maschine werden in Abschnitt 3.3.2.1 festgelegt (Tab. 3-3).
- Bei der Betrachtung des Produktionssystems wird die Variante mit Einzellagenflechtmaschine im Umlaufbetrieb und prozessparallelem Beschnitt der Preforms (ELFM-UB-P) als **Standardanlage** definiert (Abschnitt 3.4.1.6). Systeme dieser Art stellen aktuell den Benchmark in der Serienfertigung von geflochtenen FVK-Automobilbauteilen dar. Die Vorgabezeiten für die einzelnen Prozessschritte werden dem als „realistisch“ bezeichneten Szenario entnommen, dessen Werte auf Erfahrung und Versuchen basieren (s. Tab. A-10).
- Beim Rüsten wird die Variante mit dem Schnellwechseln des komplett eingefädelt Klöppeloberteils durch zwei Mitarbeiter (SH-2MA) als **Standardrüstkonzept** festgelegt (Abschnitt 3.5.1.2). Auch dieses ist letzter Stand der technischen Entwicklung und wird in der automobilen Serienfertigung verwendet. Hier werden ebenfalls die Rüstzeitwerte des „realistischen“ Szenarios als Standardzeiten verwendet (s. Tab. A-12).
- Über Dauerflechtversuche wurden Werte ermittelt, um die **Standardfehlerzeit** innerhalb eines Fertigungszyklus angeben zu können. Die in der Berechnung verwendeten Vorgabewerte für Fehlerbehebungsdauer und Fehlerrate können Tab. 3-6 entnommen werden.

Durch Variation der Parameterwerte gegenüber dem Standard wird deren Wirkung auf die beiden untersuchten Kennzahlen (Verfügbarkeit des Produktionssystems und Ablagerate) untersucht. Dies erfolgt auf den verschiedenen Bewertungsebenen – je nachdem, auf welche Teilbereiche des Modells die untersuchten Parameter Einfluss haben. Die Ergebnisse werden in Form von Diagrammen präsentiert und diskutiert.

## 4.2 Bewertung auf Maschinenebene

Auf der ersten Bewertungsebene steht als Bewertungsgröße nur die Maschinenablagerate zur Verfügung. Diese wird von den Parametern des Geflechts und der Maschine bestimmt, bauteilseitig spielt allein der Durchmesser eine Rolle.

### 4.2.1 Maschinenablagerate der Basisgeflechte

Da die Basisgeflechtarten in puncto Garntiter und Flechtwinkel stark unterschiedlich aufgebaut sind, ist die Maschinenablagerate für jede Variante anders. Sie wird bei Nenngeschwindigkeit  $f_F = 200 \text{ min}^{-1}$  und beim Standardbauteildurchmesser  $D_B = 70 \text{ mm}$  nach Formel (3-20) ermittelt. Die nachfolgende Tab. 4-2 fasst die Werte zusammen.

**Tab. 4-2: Maschinenablageraten für die Basisgeflechte**

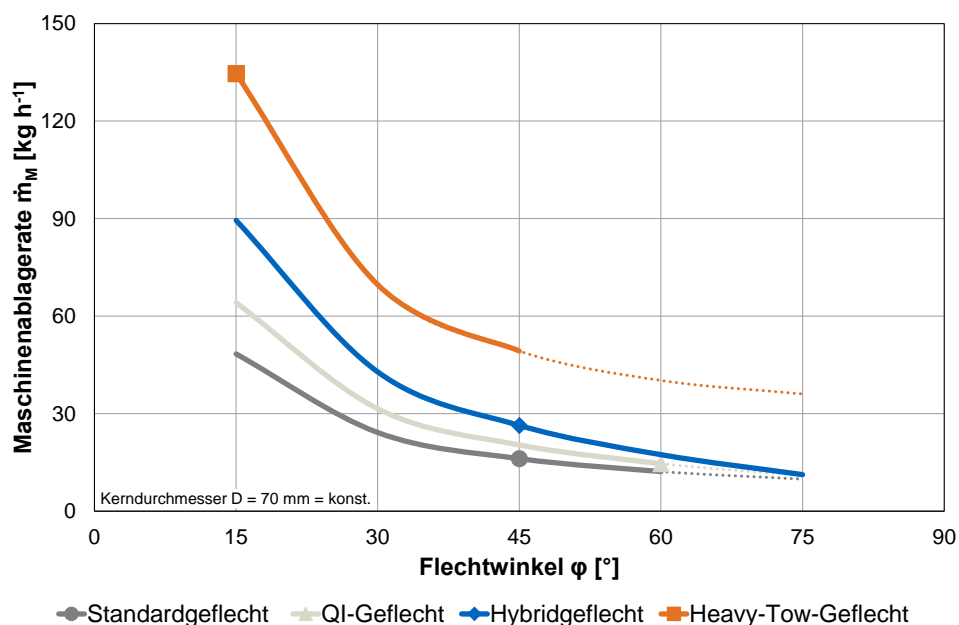
Geflechtart	Standard	QI	Hybrid	Heavy-Tow
$\dot{m}_M$ [ $kg\ h^{-1}$ ]	16,16	14,63	<b>26,37</b>	134,59

Standard- und QI-Geflecht erreichen etwa dieselbe Ablagerate. Aufgrund des größeren Flechtwinkels und der dadurch langsameren Kernbewegung liegt die Ablagerate für das QI-Geflecht trotz der dickeren Stehfäden unter der des Standardgeflechts. Das Hybridgeflecht weist wegen der dicken CF-50k-Stehfäden eine deutlich höhere Ablagerate auf. Solche Geflechtvarianten mit sehr hohem  $0^\circ$ -Faseranteil werden aktuell im Automobilbereich bevorzugt eingesetzt, zum einen aufgrund der guten Biege- und Längssteifigkeit, zum anderen, um mit hoher Ablagerate attraktive Zykluszeiten zu erreichen.

Das Heavy-Tow-Geflecht erreicht eine sehr hohe Ablagerate. Auch Brand [23] stellt dies fest und weist auf dessen Potenzial zur Steigerung der Prozessproduktivität hin. Im Vergleich zum Hybridgeflecht lässt sich die Ablagerate etwa verfünffachen. Dieser starke Effekt resultiert aus der Kombination des geringen Flechtwinkels mit dem hohen Garnliter. Beide Einflussgrößen werden nachfolgend getrennt analysiert.

## 4.2.2 Flechtwinkel

Zunächst wird untersucht, wie sich die Änderung des Flechtwinkels auf die Maschinenablagerate auswirkt. Beim in Abb. 4-1 dargestellten Fall gilt, dass der Durchmesser des Flechtkerns konstant beim Wert von  $D = 70\ mm$  des Standardbauteils gehalten wird, während der Flechtwinkel zwischen  $15^\circ$  und  $75^\circ$  variiert.

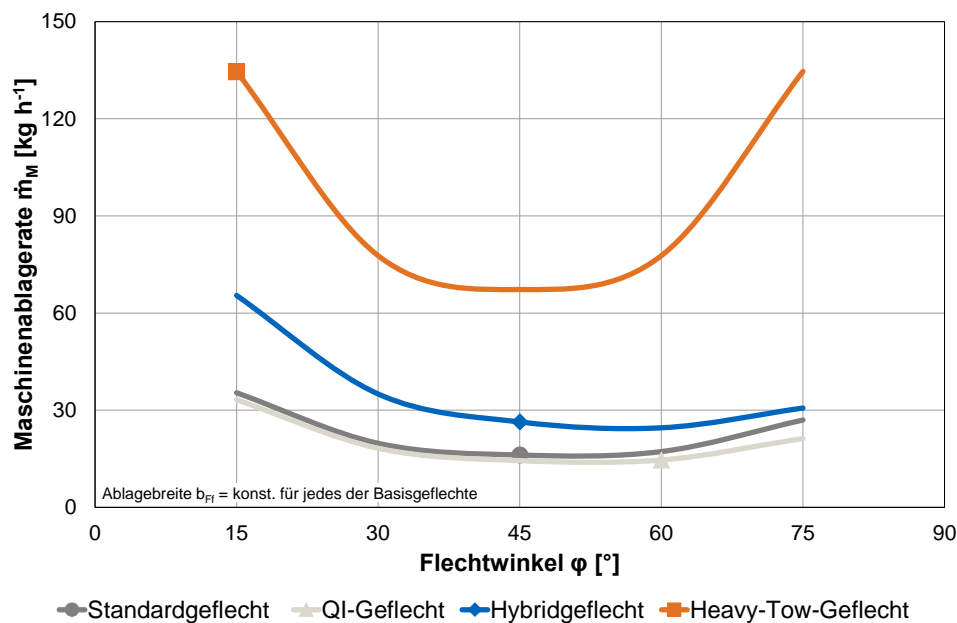
**Abb. 4-1: Maschinenablagerate bei konstantem Kerndurchmesser**

(Standardmaschine, Flügelraddrehzahl  $200\ min^{-1}$ , Kerndurchmesser  $70\ mm$ )

Das Symbol auf jeder der Linien markiert den Auslegungspunkt des betreffenden Basisgeflechts mit dem dazugehörigen Flechtwinkel ( $45^\circ$  beim Standard- und Hybridgeflecht,  $60^\circ$  beim QI-Geflecht und nur  $15^\circ$  beim Heavy-Tow-Geflecht). Bis auf das Hybridgeflecht, bei dem der Bedeckungsgrad über die – in diesem Fall konstante – Stehfadendichte bestimmt wird, endet der durchgezogene Teil der anderen Linien in Richtung auf größere Flechtwinkel an dem Punkt, wo die Flechtfäden enger zusammengeschoben werden müssten, als es ihr Bereich für die Ablagebreite zulässt (s. hierzu Abschnitt 2.2.4.1 und Tab. A-8). Der weitere, theoretische Verlauf der Kurve ist gestrichelt angedeutet.

Um größere Flechtwinkel zu erreichen, muss der Kern sich entsprechend langsamer durch das Zentrum der Maschine bewegen. Dadurch werden die Flechtfäden dichter zusammengeschoben und ihre Ablagebreite sinkt, der Flächengewichtsanteil der Flechtfäden steigt. Der Anteil der Stehfäden bleibt aufgrund des gleichbleibenden Kerndurchmessers konstant. Das insgesamt höhere Flächengewicht kann die langsamere Kernbewegung aber nicht kompensieren. Die Maschinenablagerate sinkt für größere Flechtwinkel stark ab.

Da Flechtwinkel, Ablagebreite und Bauteildurchmesser über Formel (2-1) miteinander verknüpft sind, besteht auch die Möglichkeit, nicht den Kerndurchmesser konstant zu halten, sondern die Garnablagebreite. Das Ergebnis dieser Betrachtungsweise ist in Abb. 4-2 dargestellt. Der Kerndurchmesser wurde hier so angepasst, dass für jeden Flechtwinkel dieselbe Flechtfadenablagebreite wie im Auslegungspunkt erreicht wird. Im Gegensatz zum Fall des konstanten Kerndurchmessers mit variabler Flechtfadenbreite aus Abb. 4-1 ist das Geflecht über den kompletten Winkelbereich herstellbar.



**Abb. 4-2: Maschinenablagerate bei konstanter Flechtfadenbreite**  
(Standardmaschine, Flügelradrehzahl  $200 \text{ min}^{-1}$ , Ablagebreite wie im Auslegungspunkt)

Die nachfolgende Tab. 4-3 gibt einen Überblick über die beim jeweiligen Flechtwinkel für die vier Basisgeflechtarten eingesetzten Kerndurchmesser.

**Tab. 4-3: Ablagebreite und Kerndurchmesser bei verschiedenen Flechtwinkeln**

Der Standardkerndurchmesser am Auslegungspunkt ist jeweils fett gedruckt.

Geflechtart	Standard	QI	Hybrid	Heavy-Tow
$b_{Ff}$ im Auslegungspunkt [mm]	4,86	3,44	4,86	6,64
$D_B$ bei $\varphi = 15^\circ$ [mm]	51,2	36,3	51,2	<b>70,0</b>
$D_B$ bei $\varphi = 30^\circ$ [mm]	57,2	40,5	57,2	78,1
$D_B$ bei $\varphi = 45^\circ$ [mm]	<b>70,0</b>	49,5	<b>70,0</b>	95,6
$D_B$ bei $\varphi = 60^\circ$ [mm]	99,0	<b>70,0</b>	99,0	135,3
$D_B$ bei $\varphi = 75^\circ$ [mm]	191,3	135,2	191,3	261,4

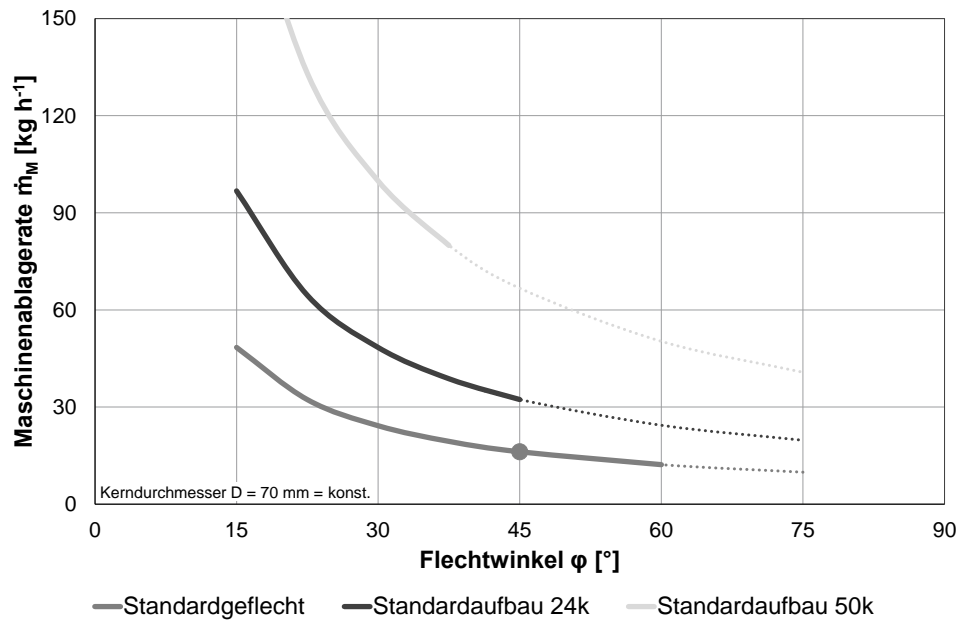
Das Diagramm in Abb. 4-2 zeigt, dass der oft verwendete Flechtwinkel von  $\varphi = 45^\circ$  im Hinblick auf die Produktivität als besonders ungünstig zu bewerten ist. Für Biaxialgeflechte wird bei diesem Flechtwinkel die minimale Maschinenablagerate erreicht. Für kleine Flechtwinkel führt die hohe Kernabzugsgeschwindigkeit zu einer hohen Ablagerate. Bei den größeren Flechtwinkeln erhöht sich die Ablagerate der Flechtfäden aufgrund des stark ansteigenden Kernumfangs ebenfalls. Für Triaxialgeflechte verschiebt sich das Minimum aufgrund des Beitrags der Stehfäden zur Maschinenablagerate etwas in Richtung größerer Flechtwinkel.

Wenn es die mechanischen Anforderungen an das gefertigte Material zulassen, ist für die Verbesserung der Produktivität daher immer anzustreben, dass mit möglichst geringem Flechtfadewinkel gearbeitet wird. Gegenüber dem geringsten Wert lässt sich die Ablagerate für jedes der Geflechte durch die Wahl eines kleineren Flechtwinkels auf etwa das Zwei- bis Dreifache anheben.

### 4.2.3 Garntiter

Der Garntiter hat ebenfalls bedeutenden Einfluss auf die Maschinenablagerate. Dies soll am Beispiel des Standardgeflechts verdeutlicht werden, gilt aber analog auch für die anderen Geflechtarten. In der Basisgeflechtvariante wird es mit CF-12k-Flechtfäden und -Stehfäden gefertigt. In Bezug auf die Faseranteile in den verschiedenen Winkelrichtungen ändert sich am Aufbau nichts, wenn alle Fadensysteme gleichermaßen mit dickeren bzw. dünneren Garnen besetzt werden.

Mit einem Triaxialgeflecht, bei dem dickere CF-24k oder CF-50k-Garne eingesetzt werden, kann also eine entsprechend höhere Ablagerate erreicht werden, wie es das Diagramm in Abb. 4-3 zeigt. Die Ablagerate ist dabei direkt proportional zum Titer der Fäden: Doppelt so dicke Garne führen also zu einer doppelt so hohen Ablagerate. Analog zu Abb. 4-1 wird die Darstellung mit konstantem Kerndurchmesser gewählt.



**Abb. 4-3: Ablageraten für Standardgeflechte mit unterschiedlichem Titer**  
(Standardmaschine, Flügelladdrehzahl  $200 \text{ min}^{-1}$ , Kerndurchmesser  $70 \text{ mm}$ )

Allerdings benötigen dickere Garne mehr Platz. Das Geflecht bei der Verwendung einer Maschine mit derselben Klöppelzahl auf einem Kern gleichen Durchmessers ist schon bei relativ geringen Flechtwinkeln so dicht, dass es sich nicht weiter zusammenziehen kann. In einem großen Flechtwinkelbereich, der analog zu Abb. 4-1 mit gepunkteten Linien dargestellt ist, können die Geflechte mit den dickeren Flechtfäden daher nicht mit derselben Maschine hergestellt werden.

Dieses Problem lässt sich durch die Verwendung einer Flechtmaschine mit einer geringeren Klöppelzahl lösen. Entgegen der Intuition reduziert sich dadurch die Maschinenablagerate nicht, denn diese ist für eine bestimmte Kombination von Geflecht und Bauteil klöppelzahlunabhängig. Dies zeigt Abb. 4-4 exemplarisch für dieselben Geflechtarten, die auch für die Darstellung in Abb. 4-3 verwendet werden. Die Ablagerate ist unabhängig von der Klöppelzahl der Maschine. Dies liegt daran, dass der Umlauf eines Klöppels um den Kern weniger lang dauert (z. B. halb so lang bei halber Klöppelzahl), wohingegen sich der Kern entsprechend schneller vorwärts bewegen muss, damit derselbe Flechtwinkel beibehalten wird (im genannten Beispiel doppelt so schnell). Unterm Strich wird so dieselbe Maschinenablagerate erreicht.

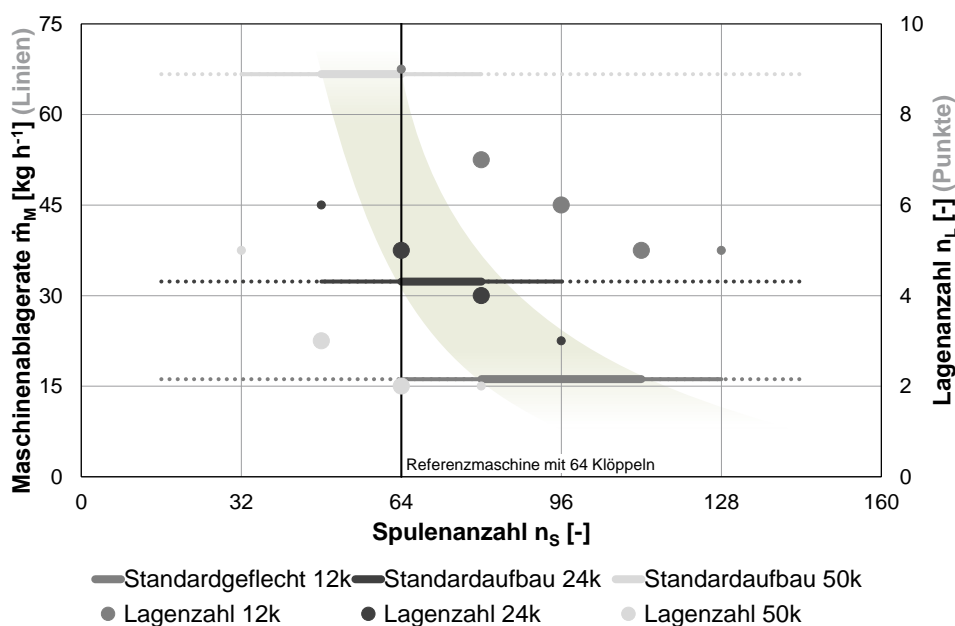
Natürlich ändert sich dabei der Flechtfadenabstand, so dass das Geflecht sich nur für eine bestimmte Spulenanzahl der Maschine geschlossen auf dem Flecht kern ablegt. Dies wird in der Abbildung durch unterschiedliche Linien illustriert. Im fett gedruckten Bereich bildet sich geschlossenes Geflecht, der Flechtfadenabstand liegt im Bereich der natürlichen Ablagebreite der betreffenden Garne. Im dünneren, aber noch durchgängigen Bereich der Linie ist die Geflechtdeckung nicht mehr optimal, wird aber als noch vertretbar eingestuft. Im gestrichelten Bereich der Linie ist das Geflecht für Maschinen



mit geringer Klöppelzahl offen, für große Klöppelzahlen zieht es sich nicht mehr auf dem Flecht kern zusammen. Die betreffenden Bereiche verschieben sich für Garne mit höherem Titer und größerer Ablagebreite zu geringeren Klöppelzahlen.

Da sich z. B. ein Garn mit dem vierfachen Titer doppelt so breit ablegt (vgl. Abb. 2-2), genügt die Hälfte der Flechtspulen, um ein Bauteil mit demselben Umfang geschlossen zu bedecken. Dabei wird allerdings auch die doppelte Lagendicke aufgebracht, so dass sich die insgesamt benötigte Anzahl an Lagen für die gewünschte Wandstärke halbiert. Dies wird durch die in Abb. 4-4 dargestellten Punkte illustriert. Diese geben an, wie viele Lagen abhängig von der Spulenzahl der Maschine jeweils benötigt werden, um die Wandstärke des Standardbauteils von  $w_{soll} = 4 \text{ mm}$  aufzubauen. Die Punkte gehören entsprechend ihrer Schattierung zu den betreffenden Geflechtvarianten und sind analog zu den Linien in den Bereichen der optimalen Geflechtbildung fett gedruckt<sup>1</sup>.

Die geringere Lagenzahl beim Einsatz höherer Titer wirkt sich durch die verminderte Anzahl an Lagenbeschnittvorgängen zusätzlich positiv auf die Produktivität aus. Da der Fertigungsvorgang bei gleicher Spulengröße aber häufiger für Rüstvorgänge unterbrochen werden muss, können die Auswirkungen des höheren Titers auf die Gesamtproduktivität nur auf höheren Bewertungsebenen (s. Abschnitte 4.3 und 4.4) erfolgen.



**Abb. 4-4: Ablagerate und Lagenzahl für verschiedene Garntiter**

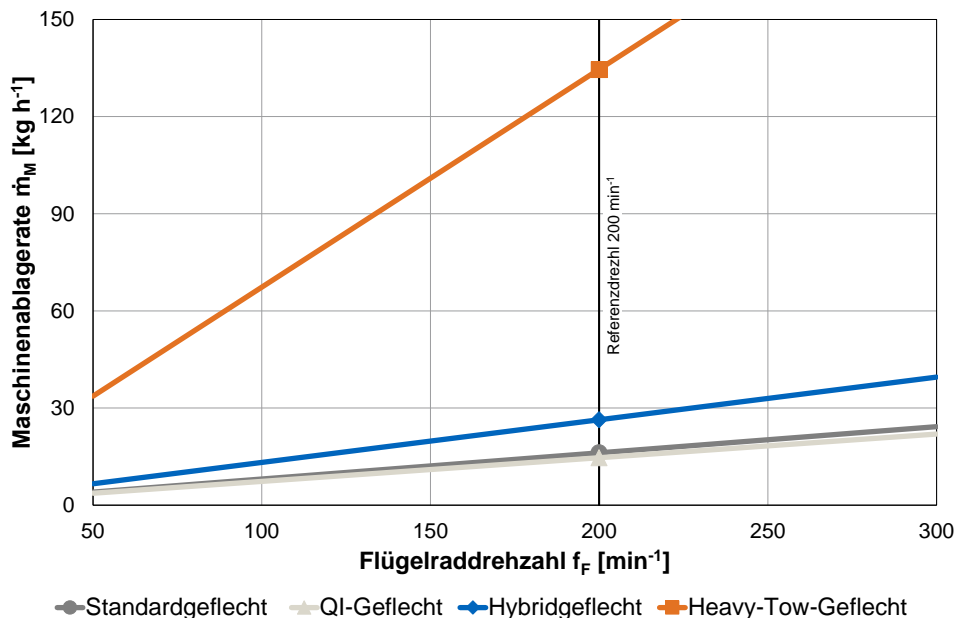
(Maschinen mit Klöppelzahlen von 16 bis 144 ausgewertet in 16er-Schritten, Flügelrad-drehzahl  $200 \text{ min}^{-1}$ , Kerndurchmesser  $70 \text{ mm}$ )

<sup>1</sup> Es lässt sich gut erkennen, dass das Standardgeflecht auf dem gewählten Kern mit einem Durchmesser von  $70 \text{ mm}$  für die Referenzmaschine mit 64 Klöppeln bereits einen Kompromiss darstellt, da die Flecht-fadenbreite bereits knapp außerhalb des optimalen Bereichs liegt (vgl. hierzu Abschnitt 3.3.1.1).

## 4.2.4 Maschinengeschwindigkeit

Wie bereits zu Beginn des Abschnitts 3.7 erläutert, besteht zwischen der Maschinenablagerate und der Maschinengeschwindigkeit ein linearer Zusammenhang. Die Steigerung der Maschinenablagerate, die sich über eine Geschwindigkeitserhöhung theoretisch erreichen ließe, wird aus Abb. 4-5 ersichtlich. Die Flügelraddrehzahl als Maß für die Maschinengeschwindigkeit wird dafür zwischen  $50 \text{ min}^{-1}$  und  $300 \text{ min}^{-1}$  variiert. Die Referenzgeschwindigkeit von  $f_F = 200 \text{ min}^{-1}$  ist im Diagramm mit einer schwarzen Linie dargestellt. Eine Markierung auf jeder Linie zeigt die Ablagerate für die verschiedenen Basisgeflechtarten bei der Referenzgeschwindigkeit am Auslegungspunkt (s. Tab. 4-2). Die Ablageraten steigen mit der Maschinengeschwindigkeit bedeutend an. Für das Heavy-Tow-Geflecht wäre bei einer Flügelraddrehzahl um  $300 \text{ min}^{-1}$  theoretisch eine Maschinenablagerate von bis zu  $200 \text{ kg h}^{-1}$  erreichbar.

Die in der Abbildung eingetragenen Maschinengeschwindigkeiten wären allerdings nicht alle mit derselben Flechtmaschine realisierbar, da nach dem in Abschnitt 3.7 erläuterten Zusammenhang eine Änderung der maximalen Maschinengeschwindigkeit eine gleichzeitige Änderung des Flechtspulenvolumens bedingt. Flügelraddrehzahl und Spulengröße können nicht unabhängig voneinander festgelegt werden. Die beiden Werte sind also als zwei unterschiedliche Ausdrucksformen derselben Größe aufzufassen. Wenn in Diagrammen eine Auftragung über dem Flechtspulenvolumen erfolgt, steht dahinter immer auch eine Änderung der Maschinengeschwindigkeit.

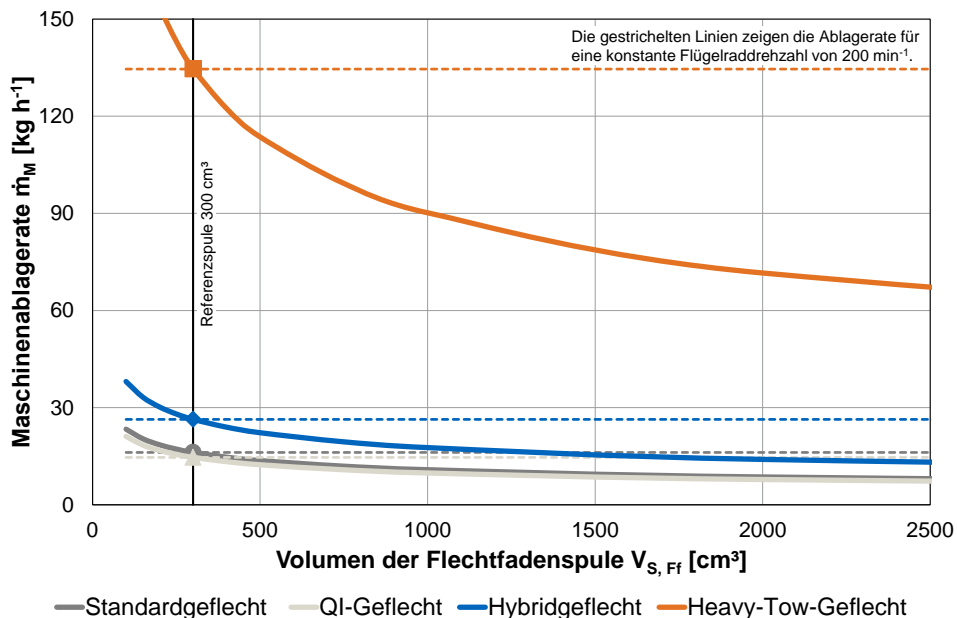


**Abb. 4-5: Linearer Zusammenhang von Ablagerate und Flügelraddrehzahl**

Der obere Teil des Diagramms ist abgeschnitten; das Heavy-Tow-Geflecht erreicht für eine Flügelraddrehzahl von  $300 \text{ min}^{-1}$  theoretisch eine Ablagerate von über  $200 \text{ kg h}^{-1}$ . (Maschine mit 64 Klöppeln, Basisgeflechte, Bauteildurchmesser  $D_B = 70 \text{ mm}$ )

Diesen Zusammenhang illustriert Abb. 4-6. Dort wird die Maschinenablagerate über der Flechtspulengröße aufgetragen. Die Ablagerate reduziert sich aufgrund der geringeren Maschinengeschwindigkeit für größere Flechtspulen entsprechend dem in Formel (3-50) hergeleiteten empirischen Zusammenhang, der im Berechnungsmodell implementiert ist. Es zeigt sich, dass sich die hohen Ablageraten aus Abb. 4-5 nur mit sehr kleinen Flechtspulen erreichen lassen. Gestrichelte Linien im Diagramm illustrieren die Ablagerate, die sich ergeben würde, wenn die Maschine über den kompletten Spulengrößenbereich mit Auslegungsgeschwindigkeit betrieben werden könnte. Die Linien kreuzen sich im Auslegungspunkt, der durch eine Markierung hervorgehoben wird.

Für die bloße Betrachtung der Maschinenablagerate auf der ersten Bewertungsebene spielt der illustrierte Zusammenhang keine Rolle. Die Änderung der Maschinengeschwindigkeit wirkt sich erst bei der Analyse des Prozesses auf der dritten Bewertungsebene auf die Prozesskennzahlen aus, da dann der Zeitverlust durch die häufigeren Rüstzyklen bei kleineren Spulen mit betrachtet wird.



**Abb. 4-6: Sinkende Ablagerate bei steigendem Spulenvolumen**  
(Maschine mit 64 Klöppeln, Basisgeflechte, Bauteildurchmesser  $D_B = 70 \text{ mm}$ )

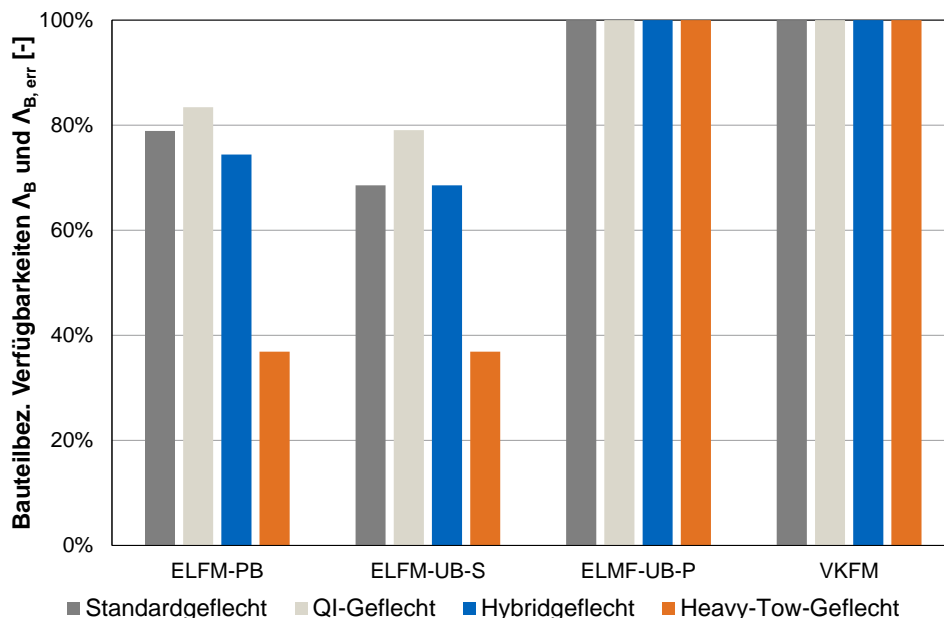
## 4.3 Bewertung auf Bauteilebene

Auf dieser Ebene werden die bauteilbezogenen Werte für Ablagerate und Verfügbarkeit zur Bewertung der Prozessproduktivität verwendet. Der Unterschied zur reinen Maschinenablagerate der ersten Bewertungsebene kommt dadurch zustande, dass die Fertigungsnebenzeiten berücksichtigt werden. Diese variieren je nach Produktionssystem und werden zudem von der Bauteilgeometrie beeinflusst. Maßgeblichen Einfluss haben auch die Vorgabezeiten für die Nebenprozessschritte.

### 4.3.1 Produktionssystem

Zunächst wird der prinzipielle Einfluss des gewählten Produktionssystems auf Ablagerate und Verfügbarkeit untersucht. Die bauteilbezogenen Ablageraten unterscheiden sich je nach Geflecht und Produktionssystem so stark, dass sich eine Darstellung der Verfügbarkeitswerte besser zur Beurteilung der Zusammenhänge eignet. Die absoluten Kennziffern der Ablageraten sind im Anhang in Abb. A-3 dargestellt.

Wie bereits in Abschnitt 3.4.3 bei der Definition der Prozesskennzahlen erläutert, sind die Produktionssysteme, bei denen alle zusätzlichen Fertigungsschritte prozessparallel ablaufen, am besten geeignet, um hohe Produktivitätswerte zu erreichen. Abb. 4-7 zeigt folglich für die Produktionssystemvarianten ELMF-UB-P und VKFM eine bauteilbezogene Verfügbarkeit von 100 %. Für die übrigen Produktionssysteme fällt die Reduktion der Verfügbarkeit durch Nebenzeiten umso stärker ins Gewicht, je höher die Maschinenablagerate für eine bestimmte Geflechtart ist.

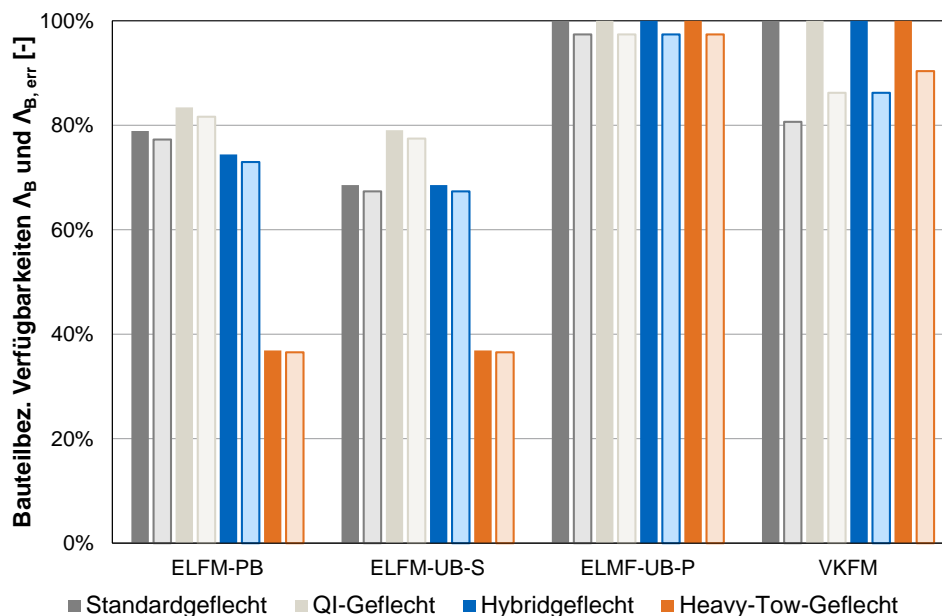


**Abb. 4-7: Bauteilbezogene Verfügbarkeit der Produktionssysteme**  
(Standardflechtmaschine, Standardbauteil, realistisches Prozesszeitszenario)

Für die Systeme ELFM-PB und ELFM-UB-S reduziert sich die Verfügbarkeit beim Standard-, QI- und Hybridgeflecht um etwa 25 %, beim Heavy-Tow-Geflecht sogar um mehr als 60 %. Es fällt auf, dass das Produktionssystem mit Pendelbetrieb für alle Geflechtarten besser abschneidet als die Variante mit Umlaufbetrieb und sequentiellem Beschnitt. Da der Darstellung in Abb. 4-7 allerdings ein bestimmtes Bauteil (das Standardbauteil) zugrunde liegt, lässt sich nicht allgemeingültig folgern, dass das System ELFM-PB produktiver ist als die Variante ELFM-UB-S, weil der Zeitverlust durch Nebenprozesse maßgeblich von der Bauteilgeometrie bestimmt wird. Dieser Effekt wird in Abschnitt 4.3.2 untersucht.

#### 4.3.1.1 Einfluss von Fertigungsfehlern

Fehlerbedingte Prozessunterbrechungen verlängern die Fertigungszeit und reduzieren die bauteilbezogene Anlagenverfügbarkeit. Dieser Effekt ist für die verschiedenen Produktionssysteme und Basisgeflechtarten in Abb. 4-8 dargestellt. Für das zugrunde liegende Standardfehlerszenario (s. Tab. 3-6 in Abschnitt 3.6.2) sinkt die Verfügbarkeit der Produktionssysteme, die nur einen Maschinenrumpf enthalten, bloß um wenige Prozent. Kritisch ist der Einfluss von Fertigungsfehlern hingegen für das System VKFM, bei dem aufgrund der hohen Anzahl an Klöppeln häufigere Ausfälle erwartet werden. Der Verfügbarkeitsverlust liegt im zweistelligen Prozentbereich. Der Eindruck aus der fehlerfreien Betrachtung in Abb. 4-7, dass zwischen ELFM-UB-P und VKFM kein Unterschied in Bezug auf die Produktivität besteht, erweist sich als falsch. Genauer wird der Fehlereinfluss auf Gesamtzyklusebene in Abschnitt 4.4.4 analysiert.



**Abb. 4-8: Einfluss von Fehlern auf die bauteilbezogene Verfügbarkeit**

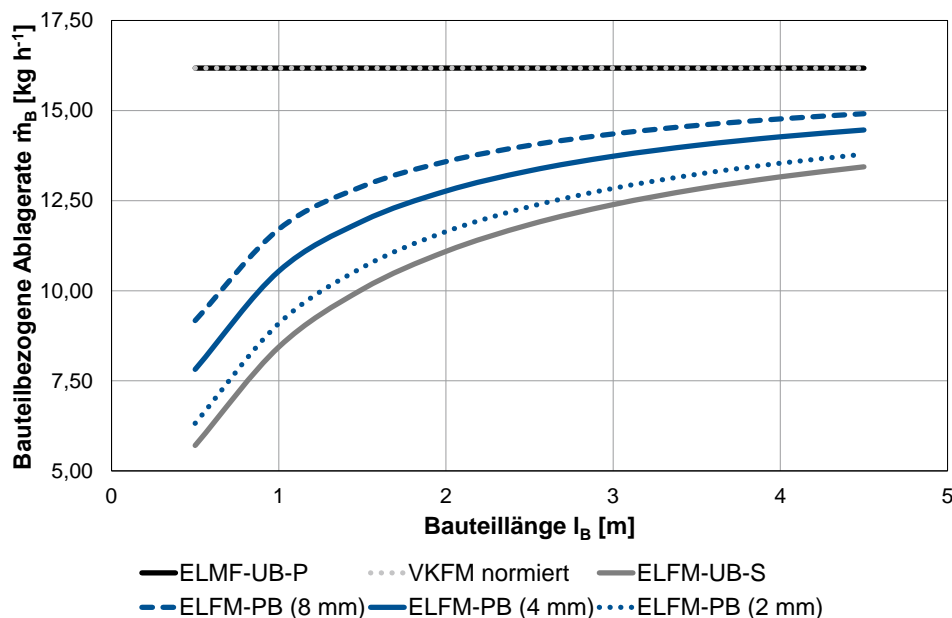
Die jeweilige fehlerbehaftete, bauteilbezogene Verfügbarkeit ist heller schattiert und umrahmt jeweils rechts neben den fehlerfreien Werten dargestellt. (Standardflechtmaschine, Standardbauteil, realistisches Prozesszeitszenario, Standardfehlerzeitszenario)

### 4.3.2 Bauteilgeometrie

Für die Untersuchung des Einflusses der Bauteilgeometrie auf die Ablagerate sind die Wandstärke und die Länge des Bauteils relevant. In Abb. 4-9 ist der Einfluss von Änderungen an diesen beiden Parametern am Beispiel des Standardgeflechts herausgearbeitet. Für die anderen Basisgeflechtarten finden sich die entsprechenden Diagramme im Anhang (Abb. A-4 für das QI-Geflecht, Abb. A-5 für das Hybridgeflecht und Abb. A-6 für das Heavy-Tow-Geflecht).

Da bei den Produktionssystemvarianten ELFM-UB-P und VKFM keine Nebenzeiten auftreten, beeinflusst die Geometrie des Bauteils die Ablagerate bei diesen Systemen nicht. Die Ablagerate des VKFM-Systems wurde für die Darstellung mit der Anzahl der im System enthaltenen Flechtrümpfe normiert, so dass sie mit der des ELFM-UB-P-Systems identisch ist und die Linien im Diagramm übereinander liegen. Sie entspricht dann gleichzeitig der Maschinenablagerate für das Standardgeflecht.

Die Bauteillänge wird in der Darstellung zwischen 0,5 m und 4,5 m variiert und deckt damit den Bereich typischer Längen von FVK-Profilbauteilen für Anwendungen in der Automobilstruktur ab. Bei den Systemen ELFM-PB und ELFM-UB-S zeigt sich eine klare Abhängigkeit der bauteilbezogenen Ablagerate von der Bauteillänge. Je kürzer das Bauteil ist, desto häufiger muss das Flechten für den Wechsel eines Kerns (bei ELFM-PB) bzw. den Beschnitt einer Lage (bei ELFM-UB-S) unterbrochen werden. Für sehr kurze Flechtbauteile sinkt die Ablagerate daher im Vergleich zu den Produktionssystemen ohne Nebenzeiteinfluss auf ungefähr die Hälfte ab und nähert sich erst für sehr lange Kerne dem durch die Maschinenablagerate vorgegebenen Maximum an.



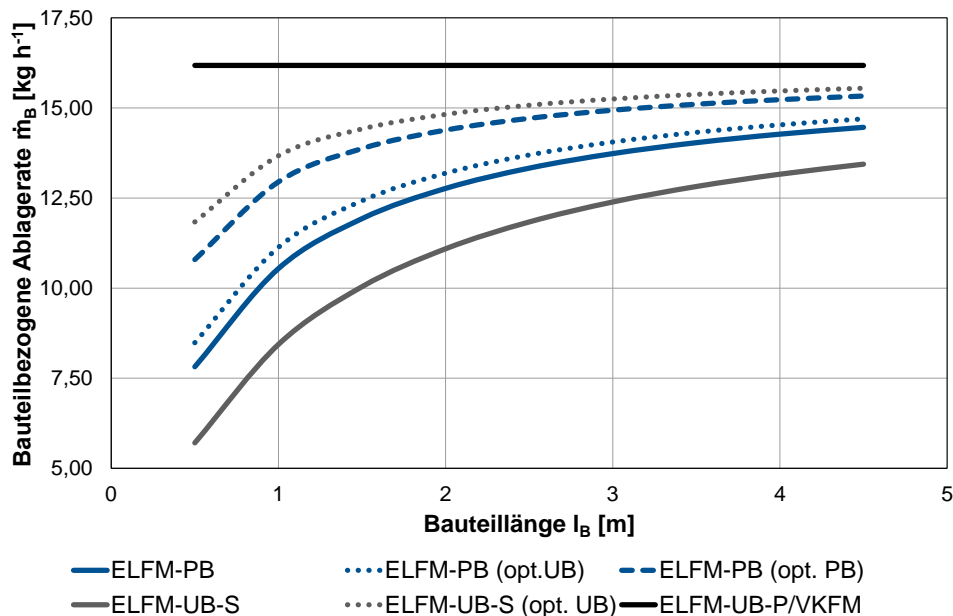
**Abb. 4-9: Abhängigkeit der bauteilbezogenen Ablagerate von Bauteillänge und -wandstärke beim Standardgeflecht**  
(Standardmaschine, realistisches Prozesszeitszenario, variable Bauteildaten)

Des Weiteren wird in Abb. 4-9 die Wandstärke des Bauteils gegenüber dem Standard auf  $2\text{ mm}$  halbiert bzw. auf  $8\text{ mm}$  verdoppelt. Für das Produktionssystem mit Pendelbetrieb, bei dem zusätzlich zum Ein- und Ausfahren der Kerne nur ein finaler Lagenbeschnitt stattfindet, hat diese Stellgröße ebenfalls Einfluss auf die Produktivität. Je mehr Lagen aufgeflochten werden müssen, umso besser schneidet dieses System gegenüber der Variante ELFM-UB-S ab. Bei diesem hat eine Änderung der Wandstärke keinen Einfluss auf die bauteilbezogene Ablagerate, da mit jeder aufgeflochtenen Lage ein gleichbleibender Zeitanteil für den Beschnitt aufgewendet werden muss.

Die gefundenen Zusammenhänge sind für alle untersuchten Basisgeflechtarten prinzipiell vergleichbar, die Abminderungseffekte fallen allerdings unterschiedlich stark aus. Für sehr geringe Bauteilwandstärken kann der einmalige Zeitaufwand für das Ein- und Ausschleusen der Kerne beim ELFM-PB-System so hoch sein, dass eine Anlage nach dem ELFM-UB-S-System effektiver arbeitet (vgl. hierzu die Diagramme Abb. A-4 bis Abb. A-6 für die anderen Basisgeflechtarten).

### 4.3.3 Prozessnebenzeitenszenario

Welche der beiden nebenzeitbehafteten Produktionssystemvarianten im Einzelfall die höhere bauteilbezogene Ablagerate erreicht, hängt zudem stark von den Vorgabezeiten für die einzelnen Nebenprozessschritte ab. In Abschnitt 3.4.2 werden für diese Vorgabezeiten drei unterschiedliche Szenarien definiert. Neben dem als „realistisch“ bezeichneten Standardszenario wird jeweils ein optimierter Satz von Vorgabezeiten für den Umlaufbetrieb (opt. UB) und für den Pendelbetrieb (opt. PB) verwendet (s. Tab. A-10).



**Abb. 4-10: Abhängigkeit der bauteilbezogenen Ablagerate von den Prozessnebenzeiten für das Standardgeflecht**

(Standardmaschine, Standardbauteil, verschiedene Prozesszeitszenarien)

In Abb. 4-10 ist die Auswirkung dieser unterschiedlichen Vorgabezeitszenarien auf die bauteilbezogene Ablagerate am Beispiel des Standardgeflechts dargestellt. Für die anderen Basisgeflechtarten finden sich die entsprechenden Diagramme im Anhang (für das QI-Geflecht in Abb. A-7, für das Hybridgeflecht in Abb. A-8 und für das Heavy-Tow-Geflecht in Abb. A-9).

Die durchgezogenen Linien für die Produktionssysteme ELFM-PB und ELFM-UB-S sind in der Abbildung identisch mit denen für das 4 mm dicke Standardbauteil in Abb. 4-9, der ebenfalls das realistische Prozesszeitszenario zugrunde liegt. Von der für den Pendelbetrieb optimierten Vorgabezeitvariante profitiert nur das Produktionssystem ELFM-PB (dargestellt mit der gestrichelten Linie), da ausschließlich die Zeiten für Kernzuführung und Wenden reduziert sind, die beim Umlaufbetrieb nicht auftreten.

Vom Nebenzeitszenario, das mit sehr kurzen Lagenbeschnittzeiten für den Umlaufbetrieb optimiert ist, profitieren beide Produktionssystemvarianten, ELFM-UB-S jedoch wesentlich stärker als ELFM-PB (dargestellt mit den gepunkteten Linien). Wenn es also gelingt, die Zeiten für den Lagenbeschnitt tatsächlich stark zu reduzieren, kann die Produktionssystemvariante ELFM-UB-S effektiver sein als eine Fertigungsanlage mit Pendelbetrieb. Für große Bauteile ist dieses System dann nur unwesentlich weniger produktiv als die nebenprozesszeitfreien Varianten ELFM-UB-P und VKFM, deren Ablagerate im Diagramm als Referenz mit der schwarzen Linie dargestellt ist.

Die gefundenen Zusammenhänge sind auch für die anderen Basisgeflechtarten ähnlich (vgl. Abb. A-7 bis Abb. A-9). Welches der Systeme, ELFM-PB oder ELFM-UB-S, im Einzelfall effektiver arbeitet, muss über eine genaue Betrachtung des Bauteils und eine möglichst fundierte Abschätzung der zu erwartenden Prozessnebenzeiten individuell entschieden werden.

In der Regel wird die Wahl zwischen den Systemen ELFM-PB und ELFM-UB-S aber nicht von leichten Unterschieden bei der Produktivität, sondern mehr von den Investitionskosten abhängen. Wenn die Anlagenkosten für niedrigere Stückzahlen gering gehalten werden sollen, wird die Wahl auf das Produktionssystem mit Pendelbetrieb fallen. Dafür sind dann entsprechende Einbußen bei der Ablagerate in Kauf zu nehmen. Für hohe Stückzahlen, bei denen die Investitionskosten weniger relevant sind, kommt für kompliziert geformte Bauteile eigentlich nur ein System mit Umlaufbetrieb in Betracht. Dieses sollte allerdings in jedem Fall mit prozessparallelem Beschnitt konzipiert sein, da die Kosten des Systems wesentlich vom Handhabungssystem bestimmt werden und die Beschnitteinheit nur geringe zusätzliche Kosten verursacht.



## 4.4 Bewertung auf Fertigungszyklusebene

Auf der dritten Bewertungsebene werden die zykluszeitbezogenen Werte für Ablagerate bzw. Verfügbarkeit, bei denen zusätzlich der Einfluss der Rüstzeiten berücksichtigt ist, zur Bewertung der Prozessproduktivität herangezogen. Die Rüstzeiten werden zunächst hinsichtlich ihrer Abhängigkeiten von Spulenzahl und Spulengröße der eingesetzten Flechtmaschine untersucht.

Die zyklusbezogenen Produktivitätskennzahlen sind über die Interaktion von Spulengröße und Maschinengeschwindigkeit hauptsächlich vom Flechtspulenvolumen abhängig. Durch ihre Auswertung wird es möglich, für jede Art Geflecht und jeden Produktionsanlagentyp eine optimale Spulengröße zu ermitteln. Abschließend wird analysiert, inwieweit die optimale Spulengröße von den Vorgabezeiten der Rüstprozessschritte und dem gewählten Rüstkonzept abhängt. Zusätzlich wird auf der zyklusbezogenen Bewertungsebene die Auswirkung von Fertigungsfehlern analysiert.

### 4.4.1 Rüsten

Neben der Rüstmethode (s. Abschnitt 3.5.1, Abb. 3-18) ist der Zeitaufwand für das Rüsten hauptsächlich davon abhängig, wie viele Spulen besetzt werden müssen bzw. wie oft gerüstet werden muss, was wiederum von der Spulengröße definiert wird. Die absoluten Rüstzeiten variieren je nach Art des hergestellten Geflechts sehr stark. Um die Rüstzeitwerte für verschiedene Geflechtstypen vergleichbar zu gestalten, wird die Zeit  $T_R$ , die das Rüsten in Anspruch nimmt, auf die Gesamtdauer eines Maschinenzyklus  $T_{Zyk}$  bezogen und nach Formel (3-38) eine prozentuale Kennzahl, der Rüstzeitfaktor  $k_R$ , definiert. Mit Hilfe dieses Faktors sowie der absoluten Rüstzeiten werden die Einflüsse der Parameter Spulenzahl und Spulengröße auf den Rüstaufwand untersucht.

#### 4.4.1.1 Spulenzahl

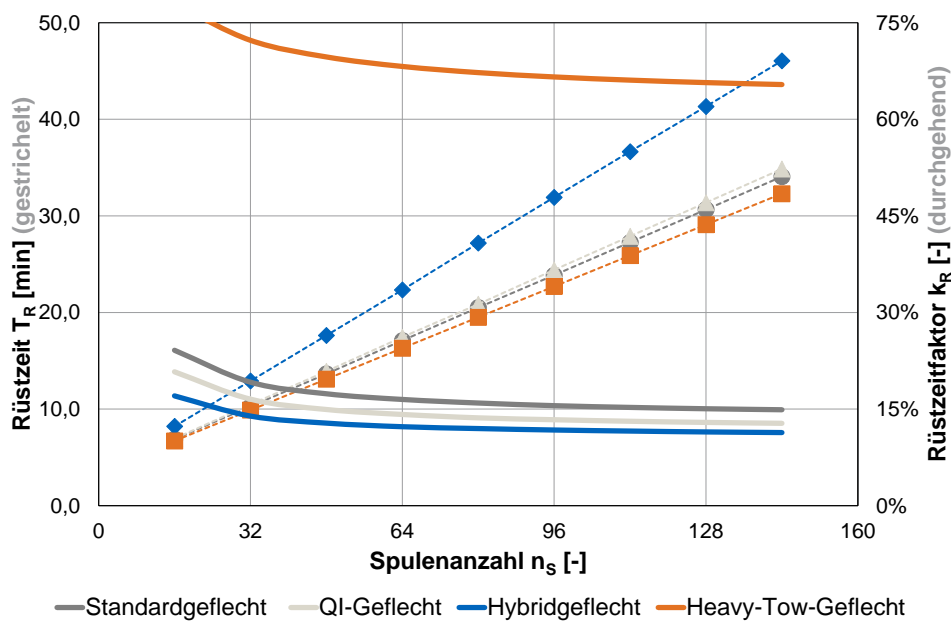
Der Einfluss der Spulenzahl auf den Rüstaufwand ist besonders groß, da die meisten Rüstzeitanteile nach Formel (3-29) direkt mit ihr korrelieren. Abb. 4-11 stellt die absoluten Rüstzeiten und den Rüstzeitfaktor für Flechtmaschinen mit einer Spulenzahl zwischen 16 und 144 für die vier Basisgeflechte dar.

Die absolute Rüstzeit (dargestellt mit den gestrichelten Linien, aufgetragen auf der linken Skala des Diagramms) setzt sich dabei nach Formel (3-26) aus der Rüstzeit für die Flechtfäden und einem zyklusbezogenen Anteil für die Stehfäden zusammen. Sie steigt für alle Geflechtstypen linear mit der Spulenzahl. Für die Geflechtstypen Standard, QI und Heavy-Tow sind die Zeiten nahezu identisch, das Hybridgeflecht weicht davon ab und weist die höchsten absoluten Rüstzeitwerte je Maschinenzyklus auf. Die Rüstzeit der Flechtfadenspulen ist unabhängig vom aufgespulten Material und für alle Geflechtarten gleich. Die Differenzen in der Gesamtrüstzeit werden vom je nach Geflechtart unterschiedlich hohen Anteil der Stehfadenrüstzeit verursacht.

Das Heavy-Tow-Geflecht zeigt die geringsten absoluten Rüstzeiten, weil für den biaxialen Geflechtaufbau keine Stehfäden gerüstet werden müssen. Der Beitrag der Stehfädenrüstzeit ist beim Standard- und QI-Geflecht sehr gering, da in der Beispielrechnung von sehr großen Stehfadenspulen ( $V_{S,Sf} = 14000 \text{ cm}^3$ ) ausgegangen wird, die im Vergleich mit den Flechtfäden nur selten nachgerüstet werden müssen. Einen wesentlich stärkeren Einfluss hat das Rüsten der Stehfäden hingegen beim Hybridgeflecht. Aufgrund der geringen Flechtfadestärke und der dicken Stehfäden ist bei jedem Rüstvorgang ein substantieller Beitrag der Stehfädenrüstzeit enthalten.

Betrachtet man die relative Rüstzeit (dargestellt mit den durchgehenden Linien, aufgetragen auf der rechten Skala des Diagramms), zeigt sich ein anderes Bild. Der Rüstzeitanteil nimmt für größere Flechtmaschinen leicht ab. Dies liegt daran, dass mit steigender Spulenzahl und gleichbleibend großen Spulen bei einem Rüstvorgang eine größere Menge Flechtgarn in die Maschine gesetzt wird. Es können also mehr Bauteile, allerdings mit dichterem Geflecht und entsprechend geringerer Lagenzahl, gefertigt werden. Die Flechtzeit im Zyklus steigt, da die Ablagerate klöppelzahlunabhängig ist (s. Abb. 4-4), die Rüstzeit verlängert sich allerdings ebenfalls.

Die Änderung des Rüstzeitanteils in Abhängigkeit der Spulenzahl bewegt sich für größere Flechtmaschinen, wie sie im Faserverbundbereich eingesetzt werden, im niedrigen einstelligen Prozentbereich und kann somit als vernachlässigbar eingestuft werden. Der Fall einer geänderten Spulenzahl bei gleichbleibendem Bauteil ist aufgrund der resultierenden Änderung der Geflechtarchitektur ohnehin eher theoretischer Natur, da bei einer Realanwendung die Maschinengröße immer passend zur Größe des zu fertigenden Bauteils ausgewählt wird.



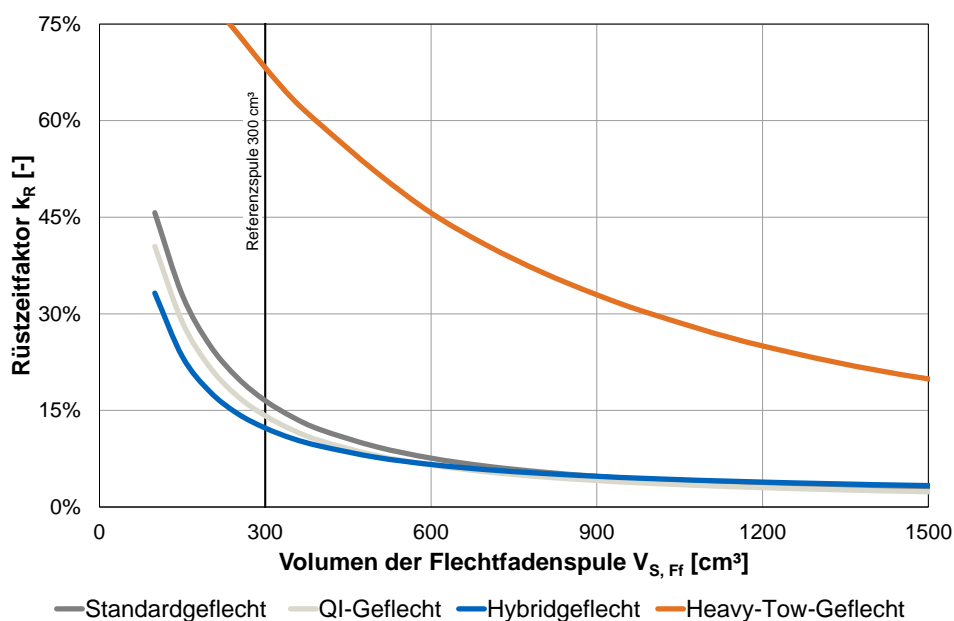
**Abb. 4-11: Rüstzeitfaktor und Rüstzeit in Abhängigkeit der Spulenzahl**  
(Spulengröße  $300 \text{ cm}^3$ , Standardbauteil, Standardrüstkonzept, Standardanlage)

Den geringsten Rüstzeitanteil an der Gesamtzykluszeit hat das Hybridgeflecht, da aufgrund der dünnen Flechtfäden die Anlagenlaufzeit so hoch ist, dass nur relativ selten ein Rüstvorgang notwendig ist. Für das biaxiale Heavy-Tow-Geflecht, bei dem jeder Rüstvorgang absolut betrachtet am schnellsten geht, liegt der Rüstzeitfaktor hingegen weit über 60 %. Von den dicken 50k-Garnen passt so wenig Material auf die Referenzflechtspulen, dass diese schneller leergeflochten sind, als sie nachbesetzt werden können.

#### 4.4.1.2 Spulengröße

Die Spulengröße ist demnach ein zweiter entscheidender Einflussfaktor für den Rüstaufwand. In Abb. 4-12 ist über den Rüstzeitfaktor für die verschiedenen Basisgeflechte dargestellt, wie sich das Volumen der Flechtspulen  $V_{S, Ff}$  auf den Rüstaufwand auswirkt.

Das Spulenvolumen wird dafür zwischen  $100 \text{ cm}^3$  und  $1500 \text{ cm}^3$  variiert. Alle Kurven zeigen, dass sich der anteilige Rüstaufwand durch den Einsatz größerer Spulen reduzieren lässt. Bei jedem Spulenwechsel wird die Maschine mit einer größeren Menge Garnmaterial bestückt, wodurch sich deren Laufzeit bis zum nächsten Wechsel verlängert<sup>2</sup>. Der Aufwand, eine Spule zu tauschen, wird in der vorliegenden Betrachtung hingegen als unabhängig von deren Größe angenommen (vgl. Fußnote 32 auf Seite 110), so dass sich die absolute Dauer eines Rüstvorgangs nicht ebenfalls erhöht. Als Vergleichswert ist das Volumen der Referenzspule mit  $300 \text{ cm}^3$  eingezeichnet.



**Abb. 4-12: Zusammenhang zwischen Spulengröße und Rüstaufwand**  
(64 Klöppel, Standardbauteil, Standardrüstkonzept, Standardanlage)

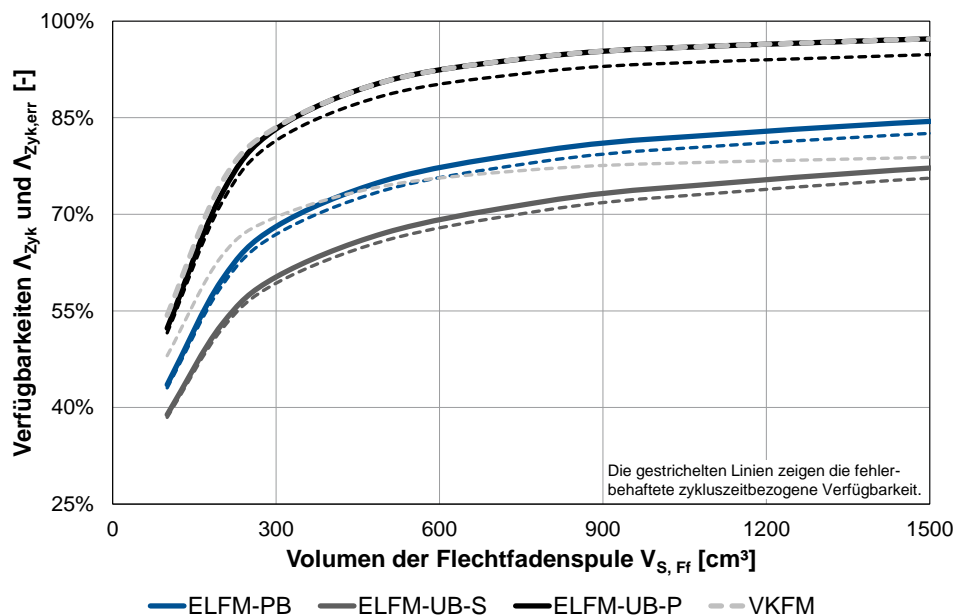
<sup>2</sup> Dies würde bereits bei konstanter Maschinengeschwindigkeit gelten. Da sich diese aber bei größeren Spulen reduziert, verstärkt sich der Effekt der Laufzeitverlängerung zusätzlich.

Die Kurven für das Standard- und das QI-Geflecht zeigen einen annähernd identischen Verlauf. Beide Kurven werden im Spulengrößenbereich um  $700 \text{ cm}^3$  von der Kurve für das Hybridgeflecht geschnitten. Bei dieser Geflechtvariante mit sehr dünnen Flechtfäden und einem hohen UD-Anteil müssen die Stehfäden deutlich häufiger gerüstet werden. Der Kurvenverlauf verdeutlicht, dass hoher Rüstaufwand für die Stehfäden bei größeren Flechtfadenspulen stärker ins Gewicht fällt. Alle triaxialen Geflechtaufbauten (Standard, QI und Hybrid) mit relativ geringem Flechtfadentiter  $Tt_{Ff}$  ( $800 \text{ tex}$  für 12k-CF, bzw.  $600 \text{ tex}$ -GF) haben bei sehr kleinen Flechtspulenvolumina hohe anteilige Rüstzeiten. Sobald das Spulenvolumen  $500 \text{ cm}^3$  übersteigt, sinkt der Rüstaufwand bereits auf unter 10 % der Zykluszeit und reduziert sich auf ca. 3 – 5 % für sehr große Spulen.

Geflechtvarianten mit sehr hohem Flechtfadentiter, wie das Heavy-Tow-Geflecht mit  $Tt_{Ff} = 3300 \text{ tex}$ , weisen für kleine Flechtspulen sehr hohe anteilige Rüstzeiten auf. Für den Fall der Referenzspulengröße übersteigt dieser sogar 50 % – die Spulen sind schneller leergeflochten, als sie nachgerüstet werden können (s. auch Abb. 4-11). Rüstzeitanteile unter 10 % werden erst bei Spulenvolumina von über  $4000 \text{ cm}^3$  erreicht.

#### 4.4.2 Zyklusbezogene Produktivitätskennzahlen

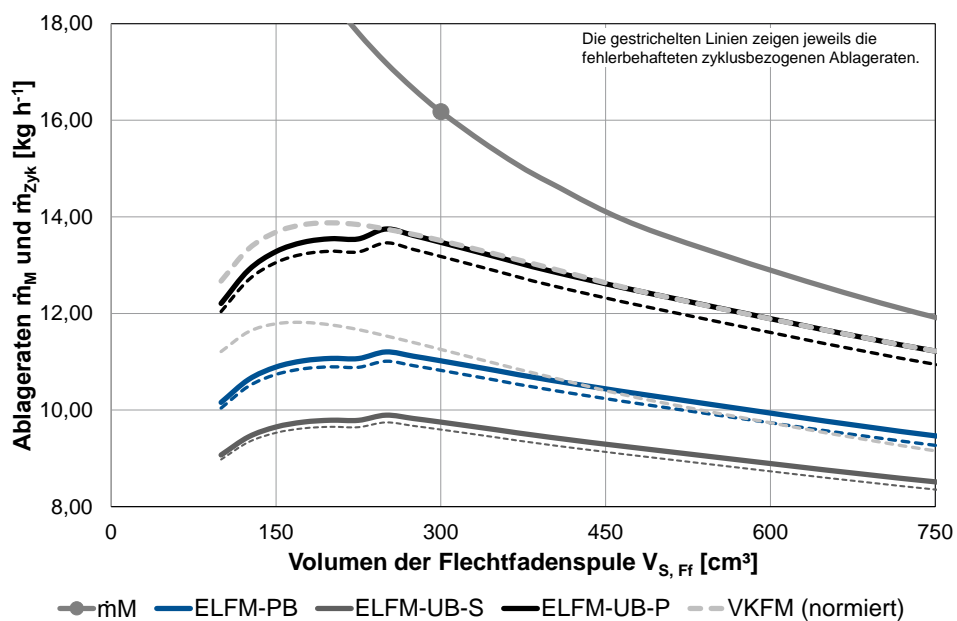
Sehr kleine Spulen erscheinen somit für den Einsatz in der Serienfertigung generell wenig geeignet, da die Anlagenverfügbarkeit deutlich eingeschränkt wird. Das Diagramm in Abb. 4-13 zeigt dies am Beispiel des Standardgeflechts für die verschiedenen Produktionssysteme. Für die anderen Basisgeflechtarten finden sich die entsprechenden Diagramme im Anhang (Abb. A-10 bis Abb. A-12).



**Abb. 4-13: Zyklusbezogene Verfügbarkeiten beim Standardgeflecht**  
(Standardmaschine, Standardbauteil, Standardrüstzeitszenario, Standardfehlerzeitszenario)

Die Verfügbarkeit fällt bei allen Produktionssystemen für Spulengrößen unterhalb von  $300 \text{ cm}^3$  stark ab. In den Diagrammen für die anderen Geflechtarten zeigt sich ein vergleichbares Bild. In der Automobilindustrie sind Verfügbarkeitsraten (dort: GAE- bzw. OEE-Werte) von Fertigungsanlagen von zumindest 80 % eine Grundvoraussetzung für deren Einsatz<sup>3</sup>. In Abb. 4-13 erreichen nur die Anlagenvarianten ELFM-UB-P und VKFM ab der Referenzspulengröße diesen Wert. Wird der Einfluss von Fertigungsfehlern (gestrichelte Linien) berücksichtigt, erfüllt die verkettete Anlage den Vorgabewert ebenfalls nicht. Nur wenn man, wie in der Produktivitätsanalyse teilweise üblich (s. Abschnitt 3.1.3), Rüstzeiten nicht als verfügbarkeitsmindernd annähme, ließen sich die geforderten Werte mit den untersuchten Produktionssystemen erzielen.

Entscheidend ist für eine Serienfertigung aber letzten Endes nicht die Verfügbarkeit eines Systems, sondern dessen zyklusbezogene Ablagerate. Diese bestimmt, wie viele Bauteile innerhalb einer bestimmten Zeitspanne gefertigt werden können. Abb. 4-14 zeigt daher die zyklusbezogenen Ablageraten für die verschiedenen Produktionssysteme aufgetragen über der Spulengröße am Beispiel des Standardgeflechts. Auch in diesem Fall finden sich die entsprechenden Diagramme für die anderen Basisgeflechtarten im Anhang (Abb. A-13 bis Abb. A-15).



**Abb. 4-14: Zykluszeitbezogene Ablageraten für das Standardgeflecht<sup>4</sup>**

Der Auslegungspunkt des Geflechts ist auf der Linie der Maschinenablagerate mit einem Symbol markiert. Die bestmögliche Ablagerate liegt bei knapp unter  $14 \text{ kg h}^{-1}$ . (Standardmaschine, Standardbauteil, Standardrüstzeitszenario, Standardfehlerzeitszenario)

<sup>3</sup> Aus Gesprächen zu FVK-Fertigungssystemen bei BMW mit Hr. Bernd Veihelmann im Jahr 2011.

<sup>4</sup> Die Unregelmäßigkeiten im Kurvenverlauf (vgl. auch Diagramme im Anhang) sind darauf zurückzuführen, dass mit der verfügbaren Garnlauflänge auf den Spulen nur eine bestimmte Anzahl von Bauteilen

Die Kurven für die zyklusbezogene Ablagerate zeigen für alle Produktionssysteme einen ähnlichen Verlauf. Wie erwartet zeigt sich aufgrund der Interaktion zwischen Spulengröße und Maschinengeschwindigkeit ein Hochpunkt in der Kurve, an dem die maximale Ablagerate erreicht wird. Dieser liegt für das Standardgeflecht mit den gegebenen Rahmenbedingungen bei einer optimalen Spulengröße von etwa  $200 \text{ cm}^3$ . Werden Fertigungsfehler nicht betrachtet, liefern die Produktionssysteme ELFM-UB-P und VKFM wiederum die gleichen Resultate. Mit Berücksichtigung des Fehlerauftretens sinkt die Ablagerate des VKFM-Systems etwa auf das Niveau der Anlage mit Pendelbetrieb ab.

Die Diagramme für die anderen Geflechtarten zeigen sehr ähnliche Kurvenverläufe. Beim Heavy-Tow-Geflecht wird die maximale Ablagerate allerdings erst bei einem viel größeren Spulenvolumen erreicht. Tab. 4-4 fasst die optimalen Spulengrößen und Ablageraten für alle Basisgeflechtarten zusammen. Dabei werden die Werte für das Produktionssystem ELFM-UB-P hervorgehoben, das auch bei Berücksichtigung des Flechtfehlereinflusses die besten zyklusbezogenen Produktivitätswerte aufweist. Diese Werte stellen die Bezugsbasis („Baseline“) für weitere Produktivitätsverbesserungen dar.

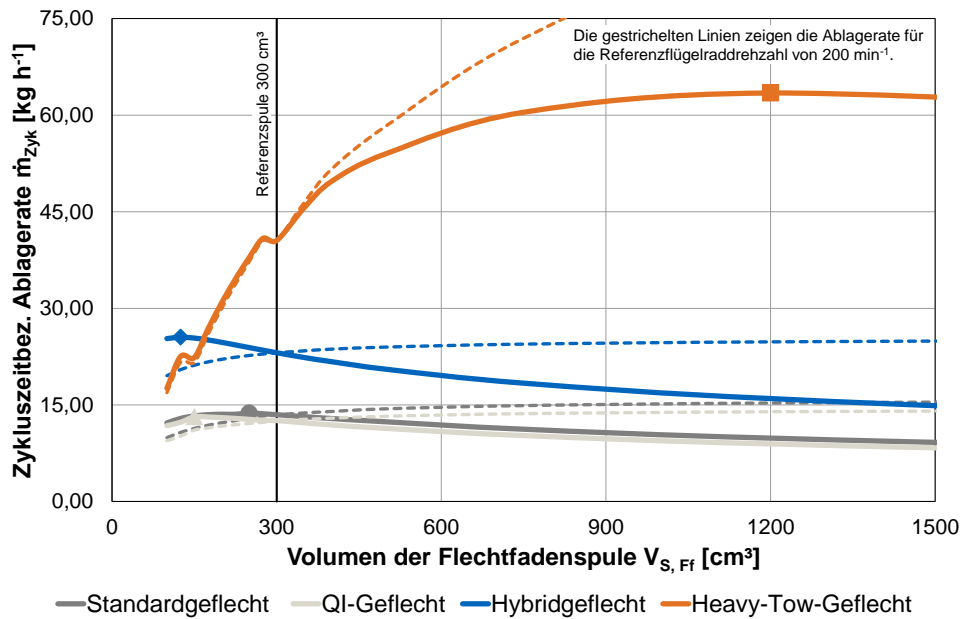
**Tab. 4-4: Maximale zyklusbezogene Ablageraten und optimale Spulengrößen**

Die Ablageraten für das System ELFM-UB-P (fett) sind in Abb. 4-15 aufgetragen.

		ELFM-PB	ELFM-UB-S	ELFM-UB-P	VKFM (norm.) <sup>5</sup>
<b>Standard- geflecht</b>	$\dot{m}_{Zyk} [\text{kg h}^{-1}]$	11,2	9,9	<b>13,8</b>	124,9 (13,9)
	$V_{S,ff} [\text{cm}^3]$	250	250	250	200
<b>QI-Geflecht</b>	$\dot{m}_{Zyk} [\text{kg h}^{-1}]$	11,2	10,6	<b>13,2</b>	79,1 (13,2)
	$V_{S,ff} [\text{cm}^3]$	150	150	150	175
<b>Hybrid- geflecht</b>	$\dot{m}_{Zyk} [\text{kg h}^{-1}]$	19,2	17,7	<b>25,7</b>	154,0 (25,7)
	$V_{S,ff} [\text{cm}^3]$	125	125	125	125
<b>Heavy- Tow- Geflecht</b>	$\dot{m}_{Zyk} [\text{kg h}^{-1}]$	34,9	34,9	<b>63,4</b>	252,7 (63,2)
	$V_{S,ff} [\text{cm}^3]$	1200	1200	1200	1200

innerhalb eines Zyklus geflochten werden kann. Mit ansteigendem Spulenvolumen lässt sich ab einer bestimmten Spulengröße ein weiteres Bauteil fertigen, und die errechnete Ablagerate macht einen Sprung nach oben. Bei exakter Darstellung würde eine „Sägezahnkurve“ entstehen, deren Zacken bei den kleineren Spulenvolumina größer ausfallen und mit steigender Spulengröße verschwinden. In den Diagrammen findet sich eine solche Kurve nicht, da ihr Verlauf nicht kontinuierlich für jede Spulengröße ausgewertet wird, sondern an Stützpunkten, die mehr oder weniger weit von den „Sprungspulengrößen“ entfernt liegen. Für den Fall, dass eine Stützstelle zufällig nahe an einem Unstetigkeitspunkt („Sprungpunkt“) liegt, entsteht im Diagramm eine Unregelmäßigkeit im Kurvenverlauf. Bei der Kurve für die verkettete Anlage zeigt sich der Sägezahneffekt nicht, da die Ablagerate nicht bauteil- sondern lagenweise „springt“ und daher nur unmerklich kleine Ausschläge in der Kurve entstehen.

<sup>5</sup> Normiert mit der Anzahl der im VKFM-System verbauten Maschinenrumpfe (entspricht der Lagenzahl)



**Abb. 4-15: Zyklusbezogene Ablageraten der Basisgeflechte für ELFM-UB-P**

Die Spulengröße mit der maximalen Ablagerate aus Tab. 4-4 ist für jedes der Basisgeflechte mit einem Symbol auf der Kurve markiert.

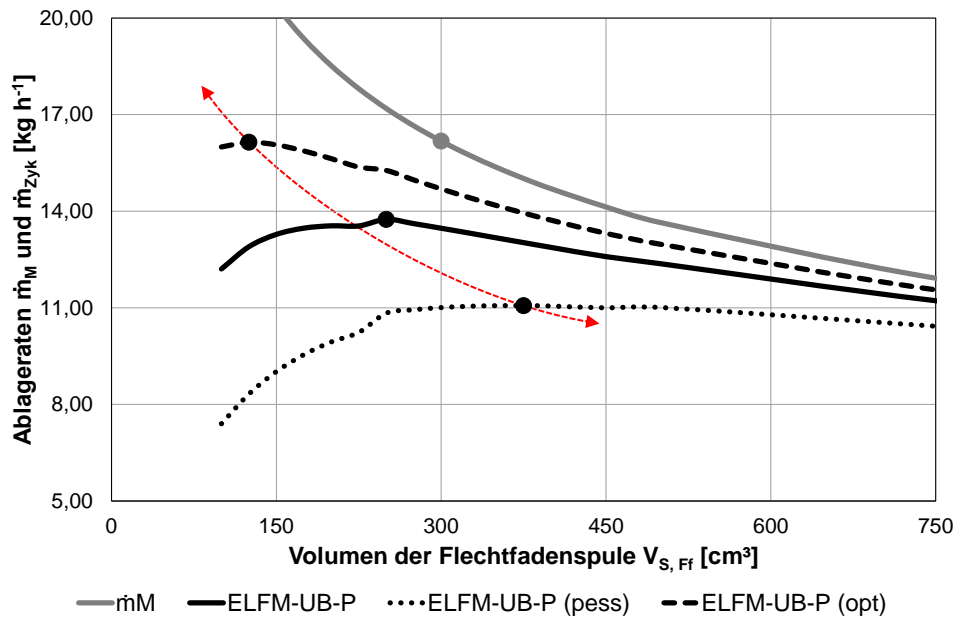
(Standardmaschine, Standardbauteil, Standardrüstzeitszenario, Standardfehlerzeitszenario)

Die zyklusbezogenen Ablageraten aller Basisgeflechte sind daher für das Produktionssystem ELFM-UB-P in Abb. 4-15 noch einmal detailliert dargestellt. Fehlerbezogene Ablageraten sind nicht gezeigt. Die gestrichelt dargestellten Linien zeigen in diesem Diagramm zusätzlich die errechnete zyklusbezogene Ablagerate, die sich ergäbe, wenn beim Einsatz größerer Spulen keine Reduktion der Maschinengeschwindigkeit notwendig wäre. Die Kurven schneiden sich bei der Referenzspulengröße. Insgesamt fällt auf, dass die maximale Ablagerate bei überraschend kleinen Flechtspulen erreicht wird.

### 4.4.3 Rüstzeitszenario

In Abschnitt 3.5.2 werden drei Rüstzeitszenarien definiert, für die die Vorgabewerte der einzelnen Rüstprozessschritte im Anhang in Tab. A-12 aufgeführt sind. Neben einem „realistischen“ Rüstzeitszenario, das als Standard für die Berechnung der zyklusbezogenen Produktivität verwendet wird, gibt es sowohl ein als „pessimistisch“ bezeichnetes Szenario mit deutlich längeren Rüstzeiten als auch ein „optimistisches“, das sehr kurze Vorgabezeiten für die Rüstprozessschritte annimmt.

Anhand des Standardgeflechts wird die Auswirkung von Änderungen an den Rüstzeiten mit den drei Szenarien auf die zykluszeitbezogene Ablagerate untersucht. Die Rüstmethode selbst wird nicht variiert. Es wird durchgängig mit Methode SH-2MA gerüstet, die nach den Daten in Abb. 3-18 als besonders geeignet eingestuft wird. Die Ergebnisse der Analyse sind in Abb. 4-16 dargestellt. Um das Diagramm überschaubar zu halten, werden nur die Daten für das effektivste Produktionssystem ELFM-UB-P gezeigt.



**Abb. 4-16: Einfluss der Rüstzeitszenarien beim Standardgeflecht (ELFM-UB-P)**

Die Verschiebung der Lage des Punkts der optimalen zyklusbezogenen Ablagerate, jeweils markiert durch den schwarzen Kreis, ist durch die rot gestrichelte Linie angedeutet. Der genaue Verlauf der Linie ist nicht rechnerisch ermittelt; diese dient nur der Illustration des Zusammenhangs. (Standardmaschine, Standardbauteil, Standardfehlerzeitszenario)

Es zeigt sich, dass die Lage des Punkts für die maximale Ablagerate stark von der Rüstzeit abhängt. Je kürzer diese ist, desto kleiner muss die optimale Flechtspulengröße gewählt werden und desto höhere zyklusbezogene Ablageraten werden erreicht. Die Ablagerate verbessert sich beim optimistischen Rüstzeitszenario gegenüber der realistischen Variante um etwa  $2,5 \text{ kg h}^{-1}$  und reduziert sich für das pessimistische Szenario um einen ähnlichen Betrag. Die Werte sind in Tab. 4-5 zusammengefasst und jeweils der absoluten Rüstzeit und dem Rüstzeitfaktor gegenübergestellt. Zum Vergleich ist im Anhang in Abb. A-16 noch das Diagramm für das Produktionssystem ELFM-PB dargestellt. Die Verschiebung des Punkts der optimalen Ablagerate findet sich dort in vergleichbarer Art und Weise, allerdings auf entsprechend niedrigerem Niveau.

**Tab. 4-5: Standardgeflecht-Kenngrößen je Rüstzeitszenario (ELFM-UB-P)**

		Pessimistisches Szenario	Realistisches Szenario	Optimistisches Szenario
Maximale, zyklusbezogene Ablagerate	$\dot{m}_{\text{zyk}} [\text{kg h}^{-1}]$	11,1	13,8	16,1
Optimale Spulengröße	$V_{S,Ff} [\text{cm}^3]$	375	250	125
Absolute Rüstzeit	$T_R [\text{min}]$	40,29	16,97	8,35
Rüstzeitfaktor	$k_R [-]$	26,3 %	20,0 %	25,5 %

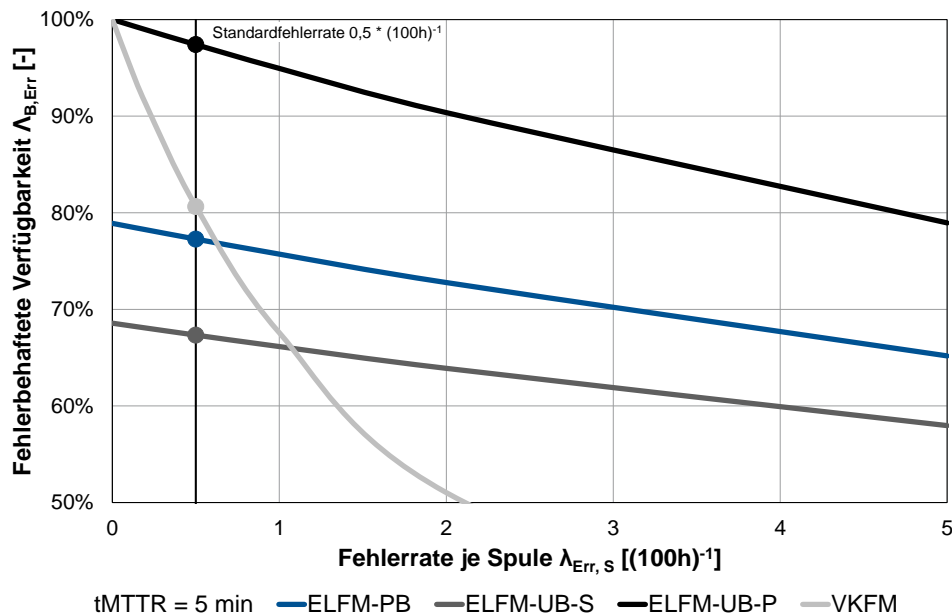


#### 4.4.4 Fehlerzeitszenario

Die Auswirkungen des in Abschnitt 3.6.2 erläuterten Fehlerzeitenmodells auf die Anlagenverfügbarkeit sind am Beispiel des Standardgeflechts für die verschiedenen Produktionssysteme in Abb. 4-17 dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird nur die Linie für eine durchschnittliche Fehlerbehebungsdauer von  $t_{MTTR} = 5 \text{ min}$  angezeigt.

Die Verfügbarkeit der Systeme ELFM-UB-P und VKFM liegt ohne das Auftreten von Fehlern, also bei der Fehlerrate  $\lambda_{err,S} = 0$ , gleichauf bei einem Wert von 100 %. Die Systeme ELFM-PB und ELFM-UB-S haben für diese Fehlerrate niedrigere Werte von knapp unter 80 % bzw. 70 %, da bei ihnen Nebenprozesszeiten auftreten. Für zunehmende Fehlerraten sinken die Verfügbarkeitswerte für alle Produktionssysteme, da ein steigender Zeitanteil für die Fehlerbehebung aufgewendet wird. Ein deutlicher Unterschied zeigt sich allerdings im Verlauf der Kurven. Die Verfügbarkeitskurve für die verkettete Anlage sinkt rapide, wohingegen die Abnahme für die übrigen Produktionssysteme vergleichsweise moderat ausfällt. Bei der als Standard angenommenen Paarung von Fehlerrate und Fehlerbehebungsdauer liegt das VKFM-System bereits auf dem Niveau der Anlage mit Pendelbetrieb. Die Grafik macht deutlich, wie sensibel eine verkettete Anlage auf das Auftreten von Produktionsunterbrechungen reagiert. Ein möglicher Einsatz in der Serienfertigung ist daher äußerst kritisch zu bewerten.

Beispiele, wie sich Fehlerbehebungsdauer und Fehlerrate beim Verfügbarkeitsverlust bemerkbar machen, wenn die Parameter über den kompletten betrachteten Bereich variiert werden, sind im Anhang in den Diagrammen Abb. A-17 für das Produktionssystem ELFM-UB-P und Abb. A-18 für das VKFM-System dargestellt.



**Abb. 4-17: Fehlerrate und fehlerbehaftete Verfügbarkeit**  
(Standardmaschine, Standardbauteil, Standardgeflecht)

## 4.5 Ergebnisdiskussion

### 4.5.1 Potenzialanalyse der Einflussfaktoren

Nach den detaillierten Analysen zum Einfluss der einzelnen Parameter auf die Produktivität des Flechtverfahrens auf den drei Bewertungsebenen in den vorangegangenen Abschnitten, werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und einer abschließenden Bewertung ihres Potenzials zur Produktivitätssteigerung unterzogen.

- Die **Gestaltung des Geflechts** selbst stellt einen der größten Stellhebel dar, um die Ablagerate einer FVK-Flechthanlage zu steigern. Eine Verringerung des Flechtwinkels hat in jedem Fall einen positiven Effekt; der oft verwendete 45°-Winkel geht mit der niedrigsten Ablagerate einher. In der Regel ist eine Flechtwinkeländerung aufgrund der mechanischen Anforderungen nicht möglich, da diese eng mit der Faserausrichtung gekoppelt sind. Alternativ bewirkt eine Steigerung der Garntiters bei gleichzeitiger Reduktion der Spulenzahl in der Maschine ebenfalls eine Verbesserung der Legeleistung. Diese geht allerdings mit dickeren Lagen, Einschränkungen bei der Dimensionierung der Wandstärke und reduzierten Materialkennwerten einher.

Der Ansatz, hoch längsverstärkte Triaxialgeflechte (Hybridgeflecht) durch extrem längs orientierte Biaxialgeflechte (Heavy-Tow-Geflecht) zu ersetzen, ist aus Produktivitätssicht äußerst interessant, da durch die Kombination der oben genannten Effekte eine deutliche Ablageratensteigerung realisiert werden kann. Von der theoretischen Verbesserung der Maschinenablagerate um den Faktor fünf verbleibt jedoch nach Berücksichtigung des erhöhten Rüstaufwands nur eine Steigerung auf etwa das Zweieinhalbfache bei der entscheidenden zyklusbezogenen Legeleistung (vgl. Tab. 4-4).

- Die Wahl eines **geeigneten Produktionssystems** ist ebenfalls von großer Bedeutung. Besonderes Potenzial kommt hierbei Anlagen zu, mit denen prozessbedingte Stillstandzeiten der Flechtmaschine komplett vermieden werden können. Allein durch den Wechsel auf ein solches System kann die Ablagerate um etwa 20 % verbessert werden. Als besonders vorteilhaft wird ein Flechtproduktionssystem mit Umlaufbetrieb und flechtprozessparallel ablaufenden Nebenprozessen identifiziert (ELFM-UB-P). Eine Optimierung der Prozessnebenzeiten erübrigt sich beim Einsatz eines solchen Systems und böte nur für eine – evtl. aus Kostengründen eingesetzte – Anlage mit Pendelbetrieb ein gewisses Potenzial zur Produktivitätsverbesserung. Die Verwendung verketteter Flechtmaschinen in einer Produktionsanlage erhöht zwar die Ablagerate massiv, die Leistungsfähigkeit eines solchen Maschinenverbands nimmt allerdings stark ab, wenn Verarbeitungsfehler auftreten. Da diese nicht komplett ausgeschlossen werden können, ist der Einsatz solcher Anlagen nicht zu empfehlen.

Die Verwendung eines optimierten Produktionssystems der Variante ELFM-

UB-P muss für die heutige automobilen Großserienfertigung als Standard betrachtet werden, da sich derartige Systeme für höhere Stückzahlen (BMW-Modelle i3, i8, 7er) bereits im Serieneinsatz befinden. Das weitere Entwicklungspotenzial der Stellgröße Produktionssystem ist mit der aktuell eingesetzten Klöppelflechtmaschinentechologie ausgeschöpft.

- Eine untergeordnete Bedeutung kommt der **Geometrie des Bauteils** zu, da diese per definitionem zentraler Vorgabewert ist und nicht geändert werden kann. Längere Bauteile sind für das Flechtverfahren besser geeignet, es werden höhere Ablageraten erreicht. Keine Rolle spielt die Bauteilgeometrie bei Verwendung eines optimierten Produktionssystems ohne Nebenprozesszeiten. Da ein solches, wie im vorigen Punkt geschrieben, in der Praxis ohnehin bereits eingesetzt wird, liegt in der Bauteilgeometrie ebenfalls kein Potenzial zur Verbesserung der Prozessproduktivität.
- Nicht zu vernachlässigen ist hingegen der Einfluss der **Rüstzeiten**. Es wird eine Rüstmethode identifiziert (SH-2MA), die nach aktueller Einschätzung den besten Kompromiss aus Kostenaufwand und Rüstzeiteinsparung darstellt. Die Vorgabezeiten für die einzelnen Rüstprozessschritte bieten vom „realistischen“ zum „optimistischen“ der betrachteten Szenarien noch Spielraum zur Rüstzeiteinsparung. Diese wirkt sich überraschend stark auf die zykluszeitbezogene Ablagerate aus, die sich beim „optimistischen“ Szenario um etwa 20 % steigern lässt.
- Die Reduktion der **Fehlerzeiten** ist eine weitere Stellgröße, die sich positiv auf die Produktivität auswirkt. Beim angenommenen – und mit Untersuchungswerten recht gut abgesicherten Szenario – zeigt sich allerdings, dass die Fehlerzeiten nur bei Verwendung des verketteten Maschinensystems wirklich kritisch sind. Für die übrigen Produktionssystemvarianten liegt der Verfügbarkeitsverlust bei wenigen Prozentpunkten. Die zu Grunde gelegten Fehlerraten wurden im Versuchsbetrieb im universitären Umfeld ermittelt. Für eine optimierte Serienfertigungsumgebung ist daher mit hoher Wahrscheinlichkeit von noch geringeren Werten auszugehen, so dass das verbleibende Optimierungspotenzial zu vernachlässigen sein dürfte.
- Als letzter, aber entscheidender Punkt rückt die Steigerung von **Maschinengeschwindigkeit und Spulengröße** in den Fokus. Da diese beiden Größen miteinander gekoppelt sind, müssen sie immer gemeinsam betrachtet werden. Eine Steigerung einer der beiden Größen hat eine Abnahme der anderen zur Folge. Die Maschinengeschwindigkeit erweist sich als extrem starker Treiber der Produktivität, da sich der Grundwert der Ablagerate direkt proportional mit dieser erhöht. Der zusätzliche Rüstaufwand, der durch die Verwendung von kleineren Flechtspulen entsteht, wird von der Steigerung der Maschinengeschwindigkeit überkompensiert. Die untersuchten Fertigungsanlagen erreichen ihre besten Ablageraten im Rechenmodell jeweils für überraschend kleine Flechtfadenspulen ( $150\text{ cm}^3$  bis  $200\text{ cm}^3$  für die Triaxialgeflechtvarianten, um  $1000\text{ cm}^3$  für das

Biaxialgeflecht). Gleichzeitig liegt die zyklusbezogene Verfügbarkeit der Anlagen in diesem Spulengrößenbereich bei etwa 70 % – 80 %, was bedeutet, dass nur in etwa drei Vierteln der zur Verfügung stehenden Zeit tatsächlich Geflecht produziert wird. Dass dennoch so viel Material verarbeitet werden kann, liegt an der hohen Geschwindigkeit, mit der Flechtmaschinen laufen können, wenn sie mit kleinen Spulen ausgestattet sind.

## 4.5.2 Ansätze zur Produktivitätssteigerung

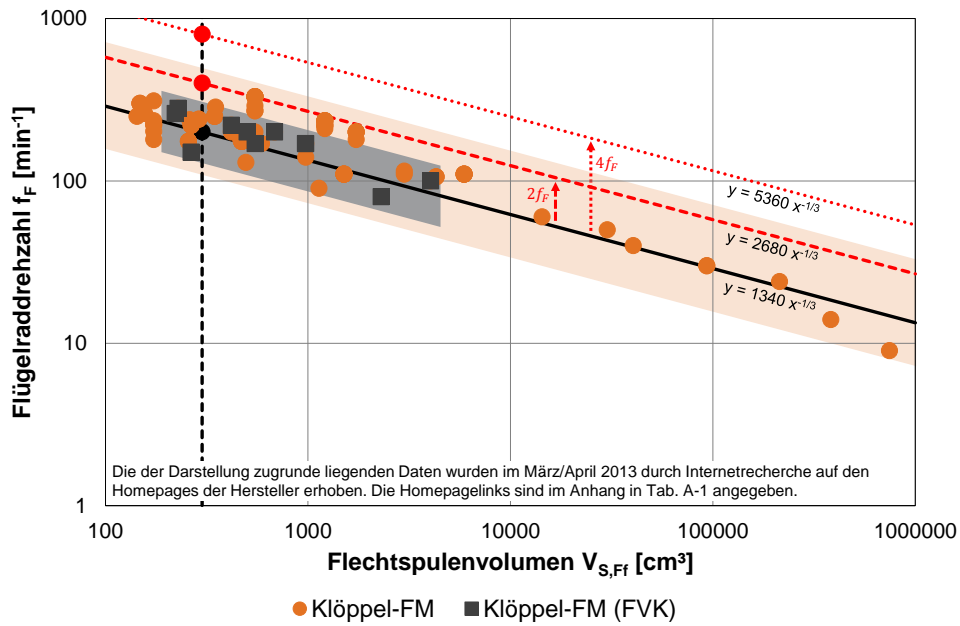
Von den im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Stellgrößen sind für eine substantielle Steigerung der Produktivität vornehmlich die Verwendung eines alternativen Geflechts mit dickeren Garnen und kleinem Flechtwinkel sowie die Steigerung der Maschinengeschwindigkeit von Interesse. Kleinere Produktivitätsgewinne lassen sich über die Automatisierung der Produktion und die Reduktion von Flechtfehlern erzielen.

Die Thematik der Geflechtart wird umfassend von Brand in seiner bereits mehrfach zitierten Dissertation untersucht [23]. Ansätze für diese Detailverbesserungen wurden im Rahmen verschiedener studentischer Arbeiten verfolgt, die während der Arbeit an der vorliegenden Dissertation durch den Autor in seiner Funktion als wissenschaftlicher Mitarbeiter am LCC begleitet wurden. Zu nennen sind insbesondere:

- die Diplomarbeit von J. Petermaier zur Verringerung von Flechtfehlern durch die Analyse und Optimierung des Umspulprozesses [129]
- die Semesterarbeit von T. Miadowitz zur automatisierten Qualitätssicherung bei Geflechtpreforms durch optische Messverfahren [132]
- die Semesterarbeit von T. Kistler zur automatisierten, roboterbasierten Handhabung von Flechtkernen in einer Fertigungsanlage [118]
- die Semesterarbeit von F. Rapp zum automatisierten Beschnitt von Geflechtlagen und Geflechtpreforms in einer Fertigungsanlage [122].

Die Steigerung der Maschinengeschwindigkeit bietet den verbleibenden Stellhebel, um die Produktivität des Flechtverfahrens bedeutend zu erhöhen. Mit Klöppelflechtmaschinen ist es aufgrund der theoretisch und empirisch nachgewiesenen Interaktion mit der Spulengröße nicht ohne weiteres möglich, die Maschinengeschwindigkeit zu erhöhen, um die Ablagerate zu verbessern.

Um das Potenzial einer Geschwindigkeitserhöhung zu bewerten, wird das Produktivitätsberechnungsmodell für den Klöppelflechtprozess in einer theoretischen Überlegung modifiziert. Der Interaktion von Spulengröße und Maschinengeschwindigkeit wird ein geänderter mathematischer Zusammenhang zugrunde gelegt. Abb. 4-18 zeigt in rot zwei Geraden, bei denen der Vorfaktor in Gleichung (3-50) so modifiziert wird, dass bei der Auslegungsspulengröße von  $300 \text{ cm}^3$  die doppelte (gestrichelte Linie) bzw. die vierfache (gepunktete Linie) Flügelraddrehzahl erreicht wird. Die jeweiligen „Referenzmaschinen“ mit den entsprechenden Leistungsdaten sind mit roten Punkten markiert.



**Abb. 4-18: Spulengröße und Flügelradrehzahl für schnellere Flechtmaschinen**

Die roten Linien repräsentieren den Zusammenhang für doppelte und vierfache Flügelradrehzahl. Es ist die jeweils zugrunde liegende Formel im Diagramm angegeben. Grundlage der Darstellung ist der Realmaschinenabgleich aus Abb. 3-25.

Der untere Punkt liegt an der oberen Grenze des Bereichs, der für Klöppelflechtmaschinen markiert ist; eine Realisierung als Axialflechtmaschine erscheint möglich. Der obere Punkt liegt deutlich außerhalb des Bereichs, in dem Klöppelflechtmaschinen bisher konstruiert werden. Unabhängig von der technischen Realisierung lässt sich das Produktivitätspotenzial bewerten. Die ermittelten Werte sind in Tab. 4-6 angegeben.

**Tab. 4-6: Ablageraten bei doppelter und vierfacher Maschinengeschwindigkeit**

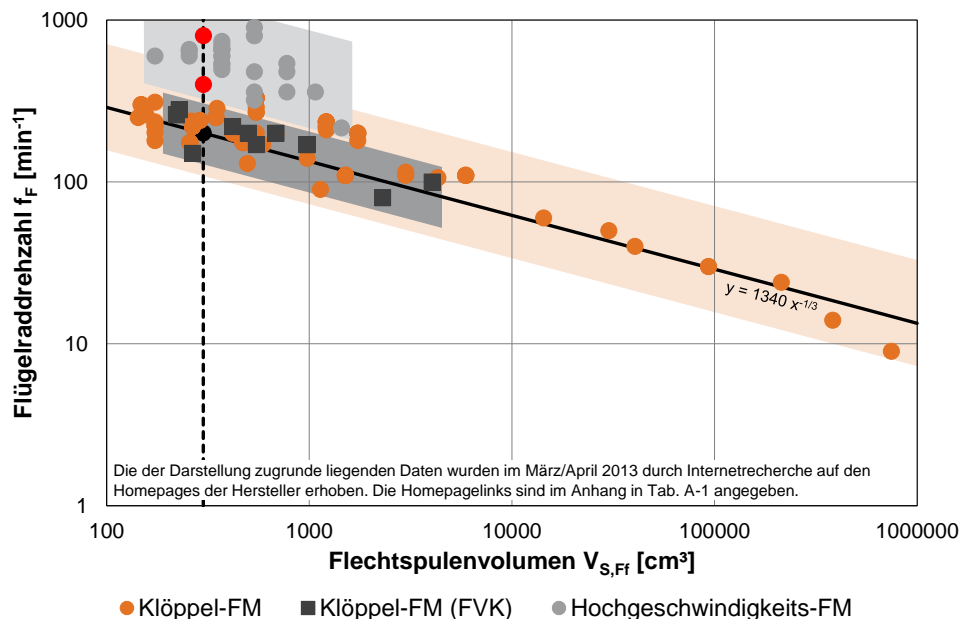
Die Steigerung der Ablagerate gegenüber dem Ausgangswert bei Standardmaschinengeschwindigkeit aus Tab. 4-4 ist als fett gedruckter Prozentwert in Klammern angegeben. Die Werte gelten für das Produktionssystem ELFM-UB-P.

		Reguläre $f_F$	Doppelte $f_F$	Vierfache $f_F$
Standardgeflecht	$\dot{m}_{Zyk}$ [kg h <sup>-1</sup> ]	13,8	23,1 (+67,4 %)	38,7 (+180,0 %)
	$V_{S,Ff,o}$ [cm <sup>3</sup> ]	250	325 (+33,3 %)	550 (+120,0 %)
QI-Geflecht	$\dot{m}_{Zyk}$ [kg h <sup>-1</sup> ]	13,2	22,0 (+66,7%)	36,7 (+178,0 %)
	$V_{S,Ff,o}$ [cm <sup>3</sup> ]	150	300 (+100,0 %)	475 (+216,7 %)
Hybridgeflecht	$\dot{m}_{Zyk}$ [kg h <sup>-1</sup> ]	25,7	42,1 (+65,1 %)	68,0 (+166,7 %)
	$V_{S,Ff,o}$ [cm <sup>3</sup> ]	125	220 (+76,0 %)	350 (+180,0 %)
Heavy-Tow-Geflecht	$\dot{m}_{Zyk}$ [kg h <sup>-1</sup> ]	63,4	106,9 (+68,6 %)	180,0 (+183,9 %)
	$V_{S,Ff,o}$ [cm <sup>3</sup> ]	1200	2100 (+75,0 %)	3500 (+191,7 %)

Mit den geänderten Formeln zum Zusammenhang von Spulengröße und Maschinengeschwindigkeit lässt sich errechnen, dass mit doppelter Geschwindigkeit eine Steigerung der zyklusbezogenen Ablagerate um etwa 65 % erreicht wird. Mit einer Vervielfachung der Geschwindigkeit wäre knapp die Verdreifachung der Ablagerate möglich.

Dies ist allerdings nur dann erfolgversprechend, wenn es technisch gelingt, Maschinen trotz großer Spulen mit hoher Geschwindigkeit zu betreiben. Abb. 4-19 zeigt, dass aktuell am Markt verfügbare Hochgeschwindigkeitsflechtmaschinen (HGFM) mit ihren Leistungsdaten genau im hellgrau hinterlegten Bereich der postulierten, rot markierten Modellmaschinen liegen.

Wäre der Einsatz solcher Maschinen für die Faserverbundkunststoff-Herstellung möglich, bestünde ein bedeutendes Potenzial zur Steigerung der Produktivität des Flechtverfahrens. Der folgende Teil der Arbeit widmet sich daher der Fragestellung, inwieweit die HGFM-Technik für die Herstellung von FVK-Bauteilen über das Beflechten von Formkernen eingesetzt werden kann.



**Abb. 4-19: Leistungsdaten von Hochgeschwindigkeitsflechtmaschinen**

Im hellgrau hinterlegten Bereich sind die Maschinendaten von am Markt verfügbaren HGFM der verschiedenen Hersteller aufgetragen. Die Maschinendrehzahlen  $f_S$ , die auf deren Internetseiten angegeben sind, werden für die HGFM, die ja keine Flügelräder haben, mit der Spulenzahl nach Formel (3-13) auf eine „virtuelle Flügelradrehzahl“ umgerechnet, um die Maschinengeschwindigkeit vergleichbar zu machen.

# 5 Hochgeschwindigkeitsflechtmaschinen: Versuche und Entwicklungsansätze

Zunächst wird anhand von Versuchen die Verarbeitbarkeit von Verstärkungsfasern auf HGFM überprüft. Mit den so gewonnenen Erkenntnissen werden anschließend Vorschläge zur Anpassung und Weiterentwicklung der Anlagentechnik erarbeitet.

## 5.1 Versuche

Für die Versuche wurden die beiden Hersteller Maschinenfabrik Niehoff GmbH & Co. KG<sup>1</sup> und Spirka Schnellflechter GmbH<sup>2</sup>, der auch die Anlagen des dritten bekannten Herstellers Wardwell vertreibt, kontaktiert. Beide Firmen erklären sich bereit, dass jeweils eine Reihe von Flechtversuchen mit Verstärkungsfasern auf firmeneigenen Hebelarmflechtmaschinen durchgeführt werden kann. Bei einer weiteren Firma, der Kabelflechter Alfeld GmbH, konnte kein Termin für Flechtversuche vereinbart werden.

Weitere Anbieter von Hebelarmflechtmaschinen kommen aus Asien – hier im Speziellen aus China. Es handelt sich bei diesen allerdings durchweg nicht um traditionelle Hersteller, die über langjährige Erfahrung in Entwicklung und Bau von Hebelarmflechtmaschinen verfügen, sondern um Firmen, die in den letzten Jahren neu in diesen Bereich des Anlagenbaus eingestiegen sind. Über die Qualität und den technischen Reifegrad der dort produzierten Maschinen sind keine Details bekannt.

---

<sup>1</sup> Die Firma Maschinenfabrik Niehoff GmbH & Co. KG mit Hauptsitz in Schwabach bei Nürnberg ist ein Anlagenbauunternehmen mit ca. 800 Mitarbeitern und rund 160 Mio. € Umsatz. Das Hauptgeschäftsfeld ist die Herstellung von Drahtziehmaschinen. Des Weiteren werden Maschinen rund um die Weiterverarbeitung und Veredlung von Drähten angeboten – Kabelverseil-, Verlitz-, Drahtspulmaschinen und auch Drahtflechtanlagen, mit denen Kabelabschirmungen hergestellt werden. (Daten aus dem Geschäftsjahr 2014/15; abgerufen auf [www.niehoff-gmbh.info](http://www.niehoff-gmbh.info) am 14.08.2016)

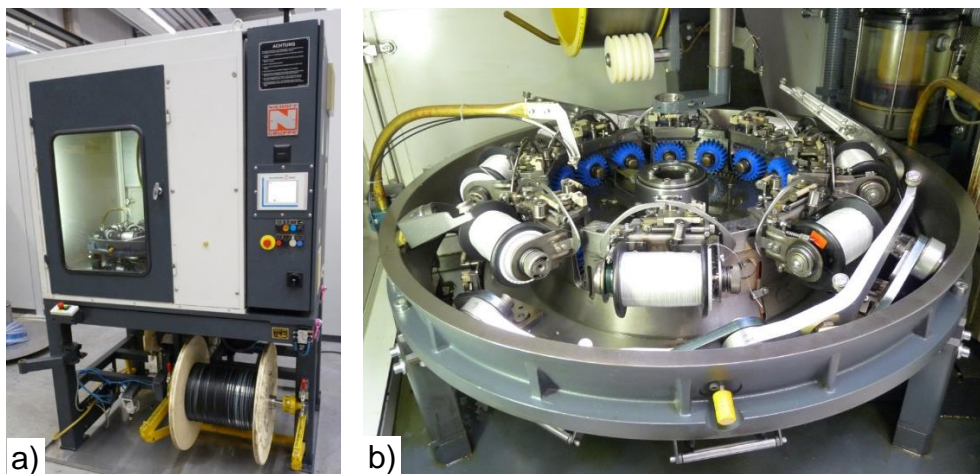
<sup>2</sup> Die Firma Spirka Schnellflechter GmbH, ansässig in Berlin, ist ein kleineres Maschinenbauunternehmen mit ca. 35 Mitarbeitern, das sich auf Herstellung und Vertrieb von Kabelflechtmaschinen, Spiralisieranlagen und Rundwicklern spezialisiert hat. Seit einer Restrukturierung vor einigen Jahren, bei der die Firmen Spirka aus Alfeld (ehemals BRD) und Schnellflechter aus Berlin (ehemals DDR, als VEB Kabelwerk Oberspree) zusammengelegt wurden, ist das Unternehmen Teil der inhabergeführten Wilms-Gruppe. Der Flechtmaschinenhersteller Wardwell aus den USA gehört ebenfalls zur Gruppe, der ca. 50 weitgehend selbstständige Firmen mit insgesamt etwa 5.000 Mitarbeitern angehören. Neben der Flechttechnik ist die Gruppe im verwandten Bereich der Drahtziehmaschinen, Verseil- und Verlitzmaschinen tätig. (Angaben aus Gesprächen und von der Homepage [www.spirka-schnellflechter.com](http://www.spirka-schnellflechter.com), abgerufen am 14.08.2016).

## 5.1.1 Versuchsmaschinen

Mit Hebelarmflechtmaschinen werden bislang praktisch ausschließlich Drähte verflechtet. Nur vereinzelt werden sie eingesetzt, um Kabel mit Isolierungen aus GF zu ummanteln. Für klassische Textilgeflechtanwendungen z. B. die Herstellung von Seilen werden Rotationsflechtmaschinen aufgrund der im Vergleich mit Klöppelflechtmaschinen wesentlich höheren Investitionskosten nicht eingesetzt. Hinsichtlich der Verarbeitung von Verstärkungsfasern für FVK liegen bei den Maschinenherstellern dementsprechend noch keine Erfahrungen vor; die Entwicklung des Marktes wird aber aufmerksam verfolgt<sup>3</sup>. Bei beiden Herstellern steht eine je Versuchsanlage zur Verfügung, die für die Durchführung der Versuche<sup>4</sup> genutzt werden konnte.

### 5.1.1.1 Maschine der Niehoff GmbH & Co. KG

Hebelarmflechtmaschinen haben bei Niehoff 12, 16 oder 24 Spulenträger – größere Anlagen finden sich im Standardmaschinenprogramm nicht. Bei der Versuchsmaschine handelt es sich um eine Drahtflechtmaschine des Typs BMV 16 einer älteren Maschinengeneration mit 16 Spulenträgern. Abb. 5-1 a) zeigt eine Gesamtansicht der Maschine. Es ist zu erkennen, dass die Maschine aus Sicherheitsgründen komplett eingehaust ist. Des Weiteren werden Lärmemissionen und die Verschmutzung der Umgebung durch Schmiermittel verhindert.



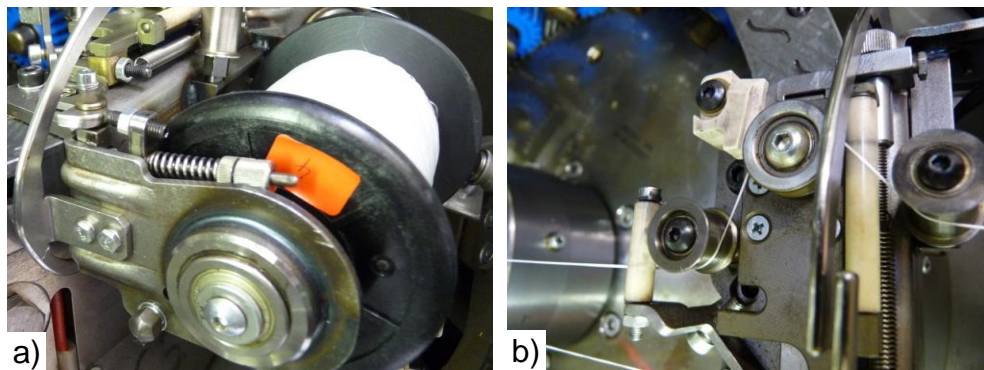
**Abb. 5-1: Versuchsmaschine bei der Niehoff GmbH & Co. KG**

- a) Außenansicht des Schutzgehäuses der Versuchsanlage.
- b) Aufbau der Flechtanlage mit oben liegendem Innenrotor mit acht Spulen.

<sup>3</sup> Die Angaben in diesem Absatz basieren auf Aussagen des Gruppenleiters für Flecht- und Umspulanlagen bei Niehoff, Herrn Dr. Bernd Müller, im Juli 2012 und des Geschäfts- und Vertriebsleiters bei Spirka Schnellflechter, Herrn Harald Baumbach, im Dezember 2012.

<sup>4</sup> Durchführung der ersten Versuchsreihe (V1-N) bei Niehoff im Oktober 2012, der zweiten Versuchsreihe (V2-S) bei Spirka Schnellflechter im Mai 2013.





**Abb. 5-2: Detailabbildungen der Niehoff-Versuchsmaschine**

- a) Detailansicht eines Spulenträgers auf der Gleitbahn.
- b) Detailansicht des Tänzersystems zur Garnbremsung am Spulenträger.

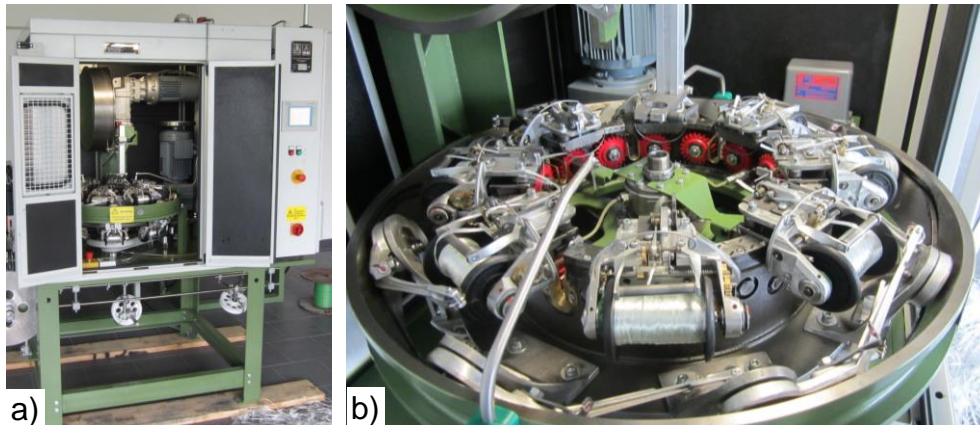
Ein genauere Blick auf den Aufbau der Anlage in Abb. 5-1 b) zeigt die oben liegenden acht Spulen der einen Laufrichtung und – gerade nach oben ragend – vier der acht Umlenkhebel für die Garne der unteren Spulen. Diese Spulen sind durch den Kurvenring verdeckt. In der Mitte der Anlage ist der zentrale Durchbruch zu erkennen, durch den das mit der Drahtabschirmung zu umflechtende Kabel zugeführt wird. Das umflochtene Fertigprodukt wird über die von oben ins Bild ragende Abzugsscheibe abgefördert.

Die Spulenträger sind bei der Versuchsmaschine als Schweißkonstruktion aus abgekanteten Blechteilen hergestellt. Da diese Bauweise laut Hersteller anfällig für Ermüdungsbrüche ist, wird bei den aktuellen Maschinen der Spulenträger als Aluminiumfrästeil ausgeführt. Eine Detailansicht des Spulenträgers bietet Abb. 5-2 a), in der auch die Anlauffarben zu erkennen sind, die durch das thermische Fügen der Einzelteile beim Bau des Spulenträgers entstanden sind.

Auf Abb. 5-2 b) ist das Tänzersystem zur Einstellung der Garnspannung dargestellt. Die Justierung erfolgt über zwei Federsysteme; eines davon kann per Stellschraube reguliert werden, das andere nur über Tausch der Feder. Das Einstellen der Garnspannung ist sehr zeitaufwendig. Das Bremssystem ist beim aktuellen Spulenträger mit einer einfacher regulierbaren Bandbremse deutlich verbessert worden.

### 5.1.1.2 Maschine der Spirka Schnellflechter GmbH

Im Lieferprogramm von Spirka Schnellflechter finden sich Flechtmaschinen verschiedener Größe mit bis zu 48 Spulen. Bei der zur Verfügung stehenden Versuchsanlage handelt es sich um eine Drahtflechtmaschine vom Typ DF16A mit 16 Spulenträgern (s. Abb. 5-3). Die Maschine ist ebenfalls komplett eingehaust. Ihre Grundkonstruktion ist mit der Maschine von Niehoff direkt vergleichbar. Unterschiede gibt es bei der Gestaltung der Spulenträger. Bei Spirka Schnellflechter sind deren Grundkörper Gussbauteile, an die das Fadenführungs- und Bremssystem sowie die Spulenaufnahme angebaut sind. Abb. 5-4 a) zeigt beispielhaft einen der Spulenträger.

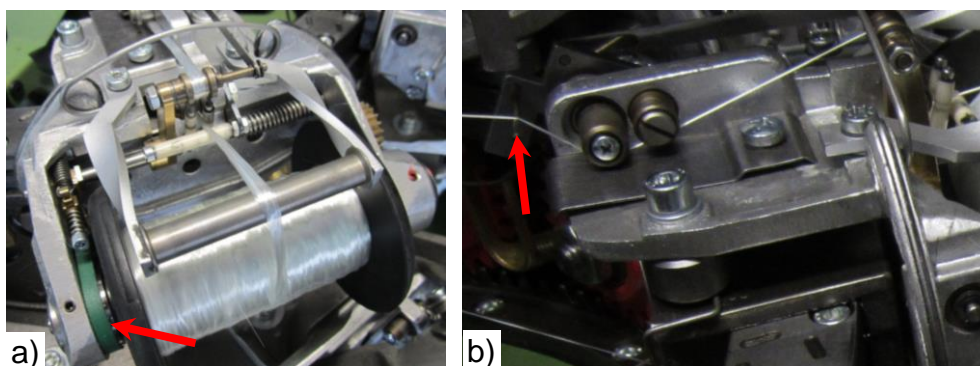


**Abb. 5-3: Versuchsmaschine bei der Spirka Schnellflechter GmbH**

- a) Gesamtansicht der Spirka-Versuchsanlage.
- b) Aufbau der Anlage mit oben liegendem Innenrotor.

Gut zu erkennen (mit dem roten Pfeil markiert) ist die Bremsung der Spule über eine Bandbremse. Diese wird ebenfalls über ein Tänzersystem geregelt, das den Faden bei entsprechender Garnspannung freigibt. Das System ist sensibel einstellbar, allerdings müssen dazu Spannfedern im Spulenträger getauscht werden, so dass das Ändern der Garnspannung auch hier ein aufwendiger Arbeitsschritt ist. Das Bremssystem garantiert laut Hersteller konstante Garnspannung über die komplette Spulenfällung.

Ein interessantes Detail am Spulenträger der Maschine von Spirka Schnellflechter ist die in Abb. 5-4 b) dargestellte Garn-Klemmvorrichtung. Ein Kipphebel (roter Pfeil) wird durch die Spannung des zum Flechtzentrum laufenden Garns ausgelenkt. Im Fall eines Draht- bzw. Garnbruchs schnappt der Hebel zu und klemmt das von der Spule kommende lose Garnende ein. Dieses kann somit nicht in die Laufbahn gezogen werden oder sich mit den Garnen der anderen Spulen verheddern. Auch beim Einfädeln des Materials ist dieser Mechanismus sehr hilfreich. Alle Garne können zuerst durch das am jeweiligen Spulenträger befindliche Bremssystem geführt, zwischenzeitlich geklemmt und abschließend gemeinsam zum Flechtmittelpunkt gezogen werden.



**Abb. 5-4: Detailabbildungen der Spirka-Versuchsmaschine**

- a) Spirka-Spulenträger mit Bandbremse.
- b) Klemmmechanismus für gerissene Garne.

## 5.1.2 Versuchsplanung

Es war anzunehmen, dass für die Drahtverarbeitung entwickelte Maschinen nicht hinreichend gegen die Einwirkung leitfähiger CF-Filamente geschützt sind, die Kurzschlüsse in der Elektrik verursachen können. Es wurde daher entschieden, das Versuchsprogramm mit nicht-leitenden GF-Garnen durchzuführen. Deren Verarbeitungseigenschaften werden als hinreichend ähnlich zu denen von CF-Garnen eingestuft, um Rückschlüsse auf deren Prozessierbarkeit zu ziehen. Eine Beschädigung der Elektrik konnte damit aber ausgeschlossen werden.

Um die Eignung von Hebelarmflechtmaschinen für die Verarbeitung von Verstärkungsfasern möglichst breit abzuprüfen, wurden in den beiden Versuchsreihen Garntiter und Verarbeitungsgeschwindigkeit variiert. Die Versuchsreihen werden mit V1-N (Niehoff) und V2-S (Spirka Schnellflechter) bezeichnet. Es wurden Garne mit Titern von sehr feinen 68 *tex* bis zu dicken 2400 *tex*-Bündeln verarbeitet. Bei den Garnen mit einem Titer von bis zu 300 *tex* handelt es sich um Garne mit Schutzdrehung, bei den dickeren um Rovings. Tab. 5-1 gibt eine Übersicht der für die Versuche verwendeten Garne.

Die Flechtmaschinengeschwindigkeit wurde in Stufen über den kompletten Betriebsbereich der jeweiligen Maschine variiert, da ein Einfluss der Maschinengeschwindigkeit auf die Verarbeitungseigenschaften vermutet wurde. Speziell bei hoher Flechtgeschwindigkeit wurde vermehrtes Auftreten von Faserbrüchen aufgrund der starken Beschleunigung des Garns an der Umlenkhebelspitze erwartet. Auf der Maschine von Niehoff kann die Maschinendrehzahl  $f_s^5$  auf bis zu  $180 \text{ min}^{-1}$  gesteigert werden. Die Flechtmaschine von Spirka Schnellflechter erreicht bis zu  $165 \text{ min}^{-1}$ .

**Tab. 5-1: Übersicht der bei den Versuchen eingesetzten Garne**

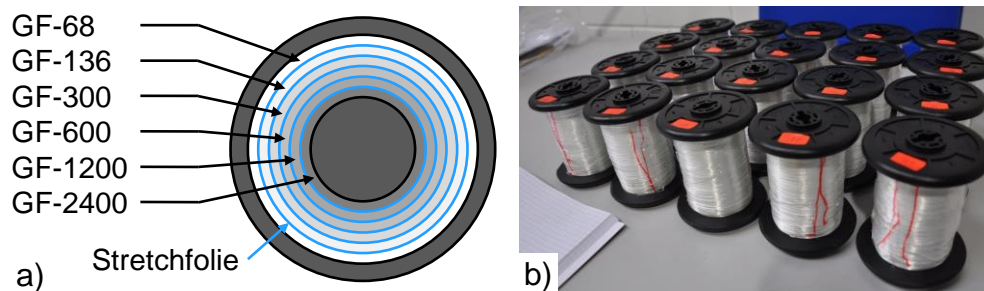
Die mit „X“ gekennzeichneten Garntypen wurden für V1-N bzw. V2-S verwendet.

Garntyp	Hersteller	Type	V1-N <sup>6</sup>	V2-S
<b>GF-68</b>	PPG Industries	1383 [133]		X
<b>GF-136</b>	PPG Industries	1383	X	X
<b>GF-300</b>	PPG Industries	1383	X	X
<b>GF-600</b>	Owens Corning OCV Reinforcements	SE 1500 [134]	X	X
<b>GF-1200</b>	St. Gobain Vetrotex <sup>7</sup>	EC 1200	X	X
<b>GF-2400</b>	St. Gobain Vetrotex	EC 2400	X	X

<sup>5</sup> Zum Unterschied und Zusammenhang von Spulenumlauffrequenz bzw. Maschinendrehzahl von HFM gegenüber der Flügelradrehzahl von KFM s. Formel (3-13).

<sup>6</sup> Die GF-68-Garne waren zum Zeitpunkt der Versuche bei Niehoff noch nicht verfügbar.

<sup>7</sup> St. Gobain Vetrotex wurde zwischenzeitlich aufgelöst bzw. an Owens Corning verkauft. Die verwendeten Garne und die dazugehörigen Datenblätter sind nicht mehr erhältlich (Stand 14.08.2016).



**Abb. 5-5: Versuchsmaterialspulen**

- a) Schnitt durch eine Spule mit Lagen verschiedenen Materials und den Trennfolien dazwischen.  
 b) Vorbereiteter Spulensatz.

### 5.1.3 Umspulen

Da unbekannt ist, ob sich Verstärkungsfasern auf einer Umspulanlage für Drähte bei den Flechtmaschinenherstellern ohne Beschädigung verarbeiten lassen, erfolgte die Spulenvorbereitung an der für das Umspulen von Verstärkungsfasern optimierten Umspulanlage des LCC. Zur Aufnahme der Spulen für die Hebelarmflechtmaschinen wurde ein speziell gefertigter Adapter eingesetzt. Das am Lehrstuhl vorhandene Know-how zum Umspulen von Verstärkungsfasern stellt sicher, dass die Fasern nicht bereits bei diesem Prozessschritt so stark beschädigt werden, dass die Auswirkungen des eigentlichen Verarbeitungsprozesses in der Flechtmaschine nicht mehr eingeschätzt werden können. Gleichzeitig entsteht so Vergleichbarkeit mit Versuchen zur Prozessstabilität auf der Klöppelflechtmaschine am Lehrstuhl (Abschnitt 3.6.2).

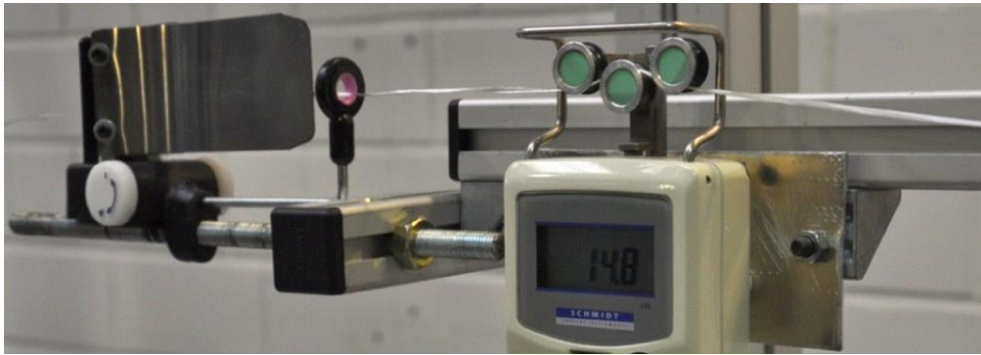
Um alle Versuche mit den verschiedenen Materialien an einem Versuchstermin fahren zu können, wurden die Testfasertypen übereinander auf die Spulen aufgewickelt. So mussten nicht nach jedem Versuch mit einem Garntyp zeitaufwendig alle Spulen getauscht werden. Außerdem wurde nur ein Spulensatz benötigt. Das Aufspulen wurde mit dem dicksten Material begonnen, das dann innen auf der Spule zu liegen kommt. Über dieses wurde eine Trennfolie gelegt und dann das nächstdünnere Material aufgespult bis hin zum dünnsten Testmaterial außen.

Die Zwischenlagen aus Stretchfolie verhindern, dass sich die Einzelmaterialien ineinander verheddern, und ermöglichen, dass diese ohne Beschädigung der darunter liegenden Lagen auf- bzw. abgespult werden können. Eine schematische Darstellung des Lagenaufbaus einer Spule bietet Abb. 5-5 a). Die Zwischenlagen sind mit blauen Linien eingezeichnet. Teilabbildung b) zeigt einen kompletten für die Versuche vorbereiteten Spulensatz. Je nach Garn wird die passende Umspulkraft (s. Tab. 5-2) verwendet.

**Tab. 5-2: Übersicht der materialspezifischen Umspulkräfte**

Materialtype	GF-68	GF-136	GF-300	GF-600	GF-1200	GF-2400
Umspulkraft [cN]	50	120	180	250	350	500



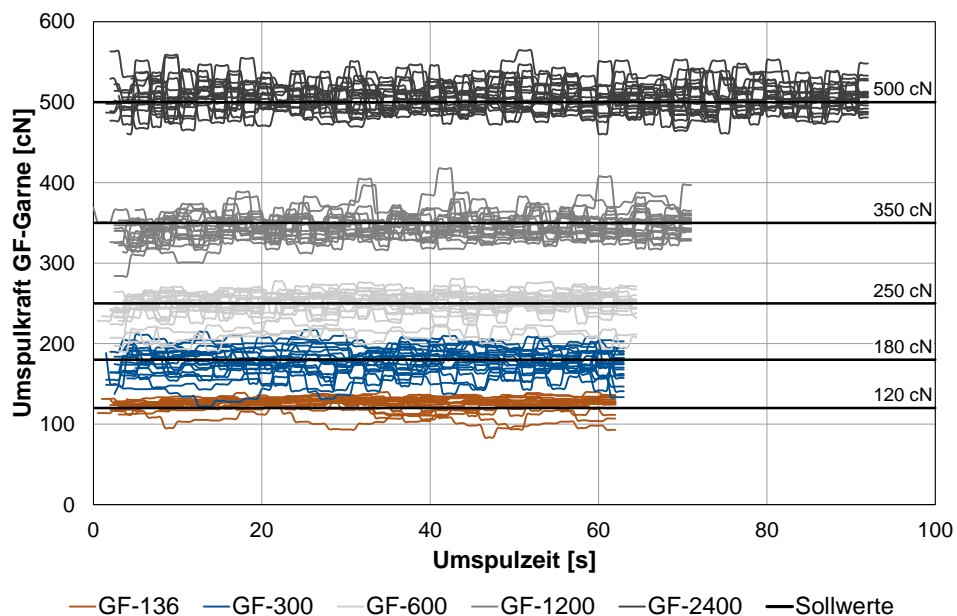


**Abb. 5-6: Garnbremse und Messung der Garnspannung**

Das Garn durchläuft vom Gatter kommend zunächst die Lamellenbremse links, anschließend das Drei-Rollen-Fadenspannungsmessgerät und wird dann aufgespult.

Die Werte für die Umspulkkräfte<sup>8</sup> sind so gewählt, dass das jeweilige Garn bei minimaler Schädigung straff genug aufgewickelt wird, um Fehlern beim Abwickeln vorzubeugen. Der beim Umspulen verwendete Aufbau mit Lamellenbremse und Messgerät zur Überprüfung der Garnkraft ist in Abb. 5-6 dargestellt. Die Lamellenbremse klemmt das Garn zwischen Blechstreifen, deren Winkel zueinander verstellt werden kann, um die Bremskraft zu regeln. Da das Garn nicht umgelenkt wird, ist die Belastung gering [19, 131].

Über den digitalen Ausgang des Messgeräts lassen sich die Garnkräfte aufzeichnen. Abb. 5-7 zeigt die Umspulkraftverläufe, die während der Vorbereitung des Spulensatzes für V1-N aufgezeichnet wurden, aufgetragen über der Umspuldauer.



**Abb. 5-7: Umspulkraftmessungen für die GF-Garne für V1-N**

<sup>8</sup> Ermittelt in der Arbeit von Johann Petermaier [129].

Die Kraftverläufe werden aufgezeichnet, um Unregelmäßigkeiten beim Umspulen auszuschließen, die Probleme beim Flechten verursachen könnten. Durch Nummerierung der Spulen können die Messprotokolle eindeutig zugeordnet werden. Die Umspuldauer ist für dickeren Garne etwas höher, da bei höheren Titern mit geringerer Umspulgeschwindigkeit gearbeitet wird. Von jedem Garntyp wurden 25 m aufgespult.

Die fünf Kurvenscharen in Abb. 5-7 stehen für die Garntypen GF-136 bis GF-2400. Jede Schar repräsentiert die Messwerte für die 20 Umspulvorgänge eines kompletten Spulensatzes. Zwar werden für eine Maschinenbesetzung nur 16 Spulen benötigt, es werden aber vier Spulen als Reserve vorgehalten. Im Mittel wird die erwünschte Umspulkraft gut eingehalten, die Messwerte schwanken allerdings um etwa  $\pm 50$  cN gegenüber dem Sollwert. Die Breite des Schwankungsbereichs ist für alle Garntypen trotz des unterschiedlichen Spannungsniveaus ähnlich. Die Schwankungen sind vermutlich zu einem signifikanten Anteil auf die Änderung der Garnweglänge durch die Verlegung<sup>9</sup> zurückzuführen. Signifikante „Events“ in den Messkurven, denen sich beim Flechten eventuell auftretende Fehler zuordnen lassen würden, sind nicht zu erkennen. Für die Versuchsreihe V2-S wurde daher auf die Messung der Umspulspannungen verzichtet.

Die Umspulkraftverläufe für V1-N sind für die einzelnen Garntypen detailliert im Anhang dargestellt. Auf den Diagrammen Abb. A-19 bis Abb. A-23 wird der Schwankungsbereich der Garnspannung besser erkennbar; zusätzlich zum Vorgabewert ist der Mittelwert der Messwerte angegeben.

## 5.1.4 Flechten

Die Garnspannung bei der Verarbeitung soll erfahrungsgemäß ähnlich hoch liegen wie die Umspulspannung. Wie in Abschnitt 5.1.1 beschrieben, ist die Einstellung der Abzugsspannung an den Spulenträgern bei beiden Versuchsmaschinen jedoch äußerst knifflig und zeitaufwendig. Der Zeitaufwand für einen Einstellvorgang beträgt je Spulenträger etwa eine Viertelstunde. Die Fadenspannung wurde deshalb für V1-N nur in einem Bereich eingestellt, der mit der eingebauten Feder abgedeckt werden kann, um den mehrfachen zeitintensiven Wechsel der Spannfeder zu vermeiden. In V2-S wurden alle Materialien mit derselben Garnspannung verarbeitet.

Um vergleichbare Geflechtqualität zu haben, wurde mit allen Garnen ein 45°-Biaxialgeflecht mit vollem Bedeckungsgrad geflochten. Aufgrund der je nach Garntyp unterschiedlichen Ablagebreite (vgl. Tab. A-8) wurden Flechtkerne (Kabel, Schläuche) mit jeweils passendem Durchmesser und eine entsprechende Flechtscholle<sup>10</sup> verwendet.

---

<sup>9</sup> Die Garnverlegung beschreibt, wie das Garn beim Auf- bzw. Abwickeln entlang der Spule wandert („verlegt“), wodurch sich die Länge des Garns zwischen Spule und Führungselement permanent ändert.

<sup>10</sup> Der Fachausdruck aus dem Bereich der Seil- und Kabelflechtereie bezeichnet eine Buchse, die Garne im Flechtzentrum zusammenführt und auf den gewünschten Zieldurchmesser kompaktiert. Die Flechtscholle erfüllt die gleiche Funktion wie der Flechtring im Bereich der FVK-Geflechte.

Um den Flechtwinkel einzuhalten, ist ein jeweils angepasster Vorschub des Kerns erforderlich, der als „Steigung“ in der Maschinensteuerung eingestellt wird. Für den 45°-Flechtwinkel entspricht die Steigung dem Umfang des Kerns – während das Garn den Kern einmal umrundet, muss sich der Kern um eine Umfangslänge weiterbewegen.

Tab. 5-3 gibt einen Überblick über die in beiden Versuchsreihen verwendeten Kerne und Maschineneinstellungen. Gründe für die Abweichungen z. B. im Kerndurchmesser zwischen V1-N und V2-S liegen in der jeweiligen Verfügbarkeit von Kernen und Flechtbuchsen mit geeigneten Durchmessern bei den beiden Maschinenherstellern.

**Tab. 5-3: Flechtkerne und Maschineneinstellungen für V1-N und V2-S**

Garn	Kern		Ø Kern [mm]		Ø Geflecht [mm]		Steigung [mm]		Bremskraft [cN]	
	V1-N	V2-S	V1-N	V2-S	V1-N	V2-S	V1-N	V2-S	V1-N	V2-S <sup>11</sup>
<b>GF-68</b>	-	Kabel	-	3,8 <sup>12</sup>	-	4,0	-	11,6	-	250
<b>GF-136</b>	Kabel	Kabel	2,9	3,8	3,3	4,0	10,0	11,6	180	250
<b>GF-300</b>	Kabel	Kabel	4,5	6,0	4,8	6,2	15,0	18,8	200	250
<b>GF-600</b>	Schlauch	-	8,0	-	8,5	-	26,7	-	300	-
<b>GF-1200</b>	Schlauch	Kabel	15,0	12,0	15,8	12,2	47,0	37,7	300	250
<b>GF-2400<sup>13</sup></b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Das Flechten einer Versuchsreihe begann jeweils mit dem zuäußerst aufgespulten dünnen Garn bei geringer Anlagengeschwindigkeit. Diese wurde stufenweise bis zur Maximalgeschwindigkeit erhöht. Auf jeder Geschwindigkeitsstufe wurden einige Meter geflochten, um zu beurteilen wie die Qualität des erzeugten Geflechts ist und ob Störungen im Verarbeitungsprozess, d. h. Garnrisse, auftreten.

Nach Anpassung der Bremsspannung (bei V1-N) an allen Spulenträgern und der Entnahme der Trennfolie folgte die Verarbeitung des nächstdickeren Garns, zunächst bei niedriger, dann stufenweise gesteigerter Geschwindigkeit. Diese Vorgehensweise wurde fortgesetzt, bis ab einem gewissen Garntiter keine zufriedenstellende Verarbeitung mehr möglich war. Dies ist entweder der Fall, wenn die Garnführungselemente zu klein werden oder wenn die erforderliche Abzugsgeschwindigkeit nicht mehr erreicht wird.

<sup>11</sup> Die Bremskraft wird in Versuchsreihe V2-S nicht variiert, da die Einstellprozedur zu zeitaufwendig ist, um an einem Versuchstag mehrfach durchgeführt zu werden.

<sup>12</sup> Bei Spirka Schnellflechter ist kein dünneres Kabel verfügbar; daher wird mit dem gleichen Kabel wie beim GF-136-Material gearbeitet, was ein offenes Geflecht zur Folge hat.

<sup>13</sup> Für das 2400 tex-Material kann kein passender Kern zur Verfügung gestellt werden, da keine Flechtscholle mit ausreichend großem Durchmesser zur Verfügung steht.

### 5.1.4.1 Versuchsreihe V1-N

Die Versuche V1-N starteten bei einer Maschinengeschwindigkeit von  $f_S = 60 \text{ min}^{-1}$ ; diese wurde anschließend in Schritten von  $20 \text{ min}^{-1}$  bis auf  $180 \text{ min}^{-1}$  gesteigert. Auf jeder Geschwindigkeitsstufe wurden 3 m geflochten. Tab. 5-4 fasst zusammen, welche der Muster in der Versuchsreihe gefertigt werden konnten; Abb. 5-8 zeigt die Geflechte.

Tab. 5-4: Resultate der Versuchsreihe V1-N

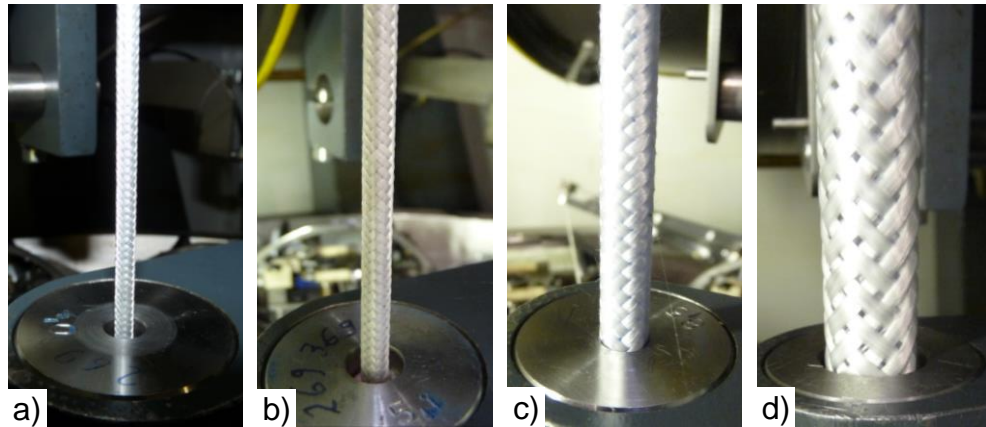
$f_S \text{ [min}^{-1}\text{]}$	GF-136	GF-300	GF-600	GF-1200	GF-2400
60	✓	✓	✓	✓	✗
80	✓	✓	✓	✓	✗
100	✓	✓	✓	✓	✗
120	✓	✓	✓	✗	✗
140	✓	✓	✓	✗	✗
160	✓	✓	✓	✗	✗
180	✓	✓	✗	✗	✗

Die Garne ließen sich von der niedrigsten Geschwindigkeit beim Garn GF-136 bis zur zweithöchsten beim Garn GF-600 weitgehend problemlos, d. h. ohne das Auftreten von Garnrissen, verarbeiten. Gegen Ende der Versuche mit dem GF-300-Garn wurden erstmals leichte Ablagerungen von Filamenten auf der Laufbahn der inneren Spulen festgestellt. Diese verstärkten sich bei höheren Geschwindigkeiten und dickeren Garnen. Die Filamentagglomeration auf der Laufbahn mussten mehrfach entfernt werden.

Teilweise auftretende leichte Unregelmäßigkeiten im Geflecht beim GF-600-Garn werden einer zu geringen Garnspannung zugeschrieben. Ab einer Umlaufgeschwindigkeit von  $140 \text{ min}^{-1}$  traten vermehrt Fehlermeldungen wegen Garnrissen auf, die sich jedoch als Fehlalarme erwiesen. Vermutlich schwankte der Abstand des Garns zum Messsensor aufgrund zu geringer Spannung der Garne zu stark oder der Sensor ist für die Detektion der GF-Garne nicht geeignet. Die Deaktivierung der Garnüberwachung ermöglichte die Fortsetzung der Versuche.

Die Versuche mit dem GF-1200-Garn konnten nur bis zu einer Umlaufgeschwindigkeit von  $100 \text{ min}^{-1}$  durchgeführt werden. Aufgrund des großen Durchmessers des Flecht-kerns und der daraus resultierenden hohen Steigung wird eine Abzugsgeschwindigkeit notwendig, die wegen einer Drehzahlbegrenzung des Abzugsmotors nicht erreicht werden konnte. Zusätzlich traten bei der Verarbeitung des GF-1200-Materials starke Faserschädigungen auf; Filamentagglomerationen an den Garnführungselementen und auf der Laufbahn waren deutlich sichtbar. Die für dünne Drähte ausgelegten Führungselemente sind für so dickes Garn einfach zu klein. Teilweise sprang der Faden sogar von den Führungsrollen an der Spitze des Umlenkhebels.





**Abb. 5-8: Versuchsgeflechte aus V1-N beim Austritt aus der Flechtscholle**

Der Durchmesser der Flechtscholle ist auf allen Bildern vergleichbar, so dass auch die Darstellung der Geflechte in einem realistischen Größenverhältnis zueinander steht, obwohl die Bilder nicht aus der exakt derselben Position aufgenommen sind.

- a) GF-136-Geflecht,  $\varnothing = 3,3 \text{ mm}$     b) GF-300-Geflecht,  $\varnothing = 4,8 \text{ mm}$   
 c) GF-600-Geflecht,  $\varnothing = 8,5 \text{ mm}$     d) GF-1200-Geflecht,  $\varnothing = 15,8 \text{ mm}$

Die Versuche mit dem noch dickeren GF-2400-Garn konnten wegen der Einschränkungen bei Kerndurchmesser und Abzugsgeschwindigkeit nicht durchgeführt werden.

### 5.1.4.2 Versuchsreihe V2-S

Der Maschinendrehzahlbereich in Versuchsreihe V2-S reichte von  $f_s = 50 \text{ min}^{-1}$  bis  $165 \text{ min}^{-1}$ , dem Maximum der Versuchsmaschine. Auf jeder Geschwindigkeitsstufe wurden ebenfalls 3 m geflochten. Die Versuchsreihe V2-S ist in Tab. 5-5 zusammengefasst.

**Tab. 5-5: Resultate der Versuchsreihe V2-S**

$f_s \text{ [min}^{-1}]$	GF-68	GF-136	GF-300	GF-600 <sup>14</sup>	GF-1200	GF-2400 <sup>15</sup>
50	✓	✓	✓	✗	✓	✗
75	✓	✓	✓	✗	✓	✗
100	✓	✓	✓	✗	✓	✗
125	✓	✓	✓	✗	✓	✗
150	✓	✓	✓	✗	✓	✗
165	✓	✓	✓	✗	✓	✗

<sup>14</sup> Das GF-600-Material wurde aus Zeitgründen nicht verarbeitet, da nur ein Tag für die komplette Durchführung der Flechtversuche zur Verfügung stand.

<sup>15</sup> Das GF-2400-Material wurde nicht verarbeitet, da die Maschine den Einsatz eines ausreichend dicken Kerns nicht zulässt.

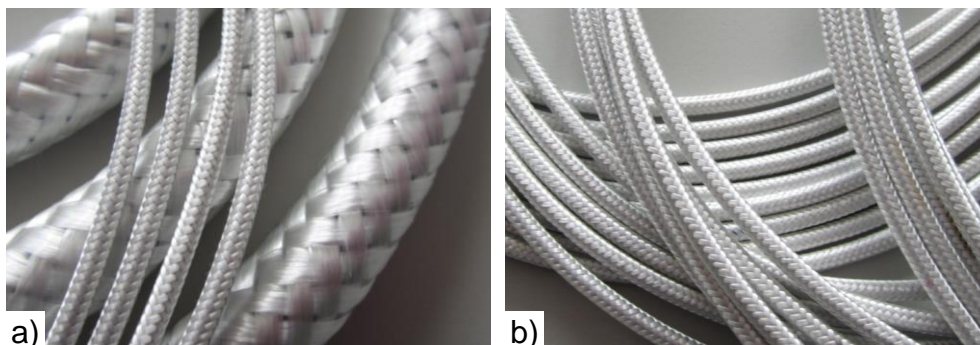
Das Einfädeln der GF-68-Garne bereitete Probleme, da sie aufgrund der zu hohen Bremskraft am Spulenträger von 250 *cN* leicht reißen. Während des Flechtens stellte dies aber wider Erwarten kein Problem dar. Die Garne GF-68 bis GF-300 lassen sich über den kompletten Geschwindigkeitsbereich ohne Schwierigkeiten verflechten. Das GF-600-Garn wurde von den Spulen abgezogen, weil dafür ebenso gute Verarbeitbarkeit zu erwarten war und Versuchszeit eingespart wurde.

Die Versuche mit dem GF-1200-Garnmaterial wurden wieder über den vollen Geschwindigkeitsbereich durchgeführt. Dabei traten allerdings starke Faserschädigungen auf, die sich auch hier durch Filamentagglomerationen an den Garnführungselementen und der Laufbahn bemerkbar machten. Auch an der Maschine von Spirka Schnellflechter erweisen sich die Führungselemente als zu klein, um die GF-1200-Garne prozesssicher führen zu können. Die Versuche mit dem GF-2400-Material mussten aufgrund des zu geringen Durchmessers der größten verfügbaren Flechtbuchse von 15 *mm* entfallen.

### 5.1.5 Bewertung der Versuchsergebnisse

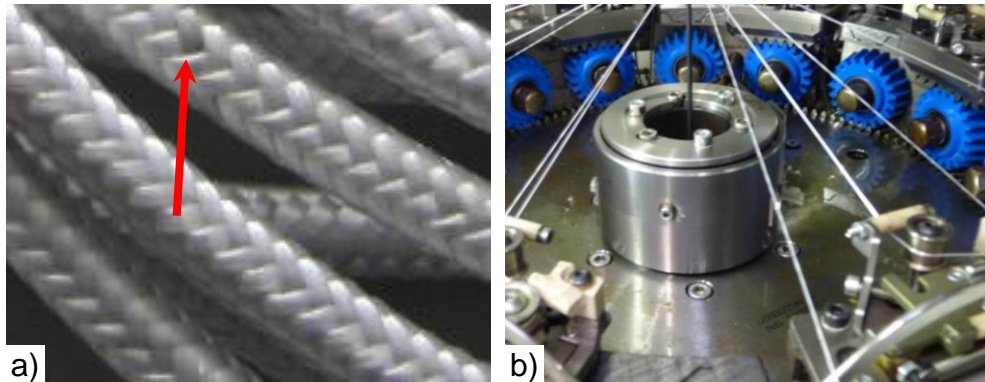
Die Versuchsreihen zeigen eindeutig, dass die Verarbeitung von GF-Garnen auf aktuell erhältlichen Hebelarmflechtmaschinen beider Maschinenhersteller auch bei maximaler Maschinengeschwindigkeit prinzipiell möglich ist. Aufgrund dieser Erfahrungen wird auch für das dicke GF-2400-Garn Verarbeitbarkeit angenommen, wenn die anlagenseitigen Voraussetzungen (Garnführungen für Garne mit hohen Titern, größere Flechtscholle für einen dickeren Kern, schnellerer Abzugsmotor) gegeben sind. Es wird weiterhin angenommen, dass sich die Ergebnisse auch auf andere Verstärkungsfasergarne, vornehmlich CF-Garne, übertragen lassen.

Bei korrekter Garnspannung zeigen die erstellten Geflechte eine sehr gute Qualität, die mit der von Klöppelflechtmaschinen vergleichbar ist (s. Abb. 5-9 a)). Ein Einfluss der Verarbeitungsgeschwindigkeit auf die Qualität des erzeugten Geflechts lässt sich nicht feststellen (s. Abb. 5-9 b)). Wären die Probegeflechte nicht beschriftet, könnte man die Flechtabschnitte der verschiedenen Geschwindigkeitsstufen nicht auseinander halten.



**Abb. 5-9: Qualität der Versuchsgeflechte**

- a) GF-136-Geflecht und GF-1200-Geflecht im Vergleich.
- b) GF-300-Geflechte verschiedener Geschwindigkeitsstufen im Vergleich.

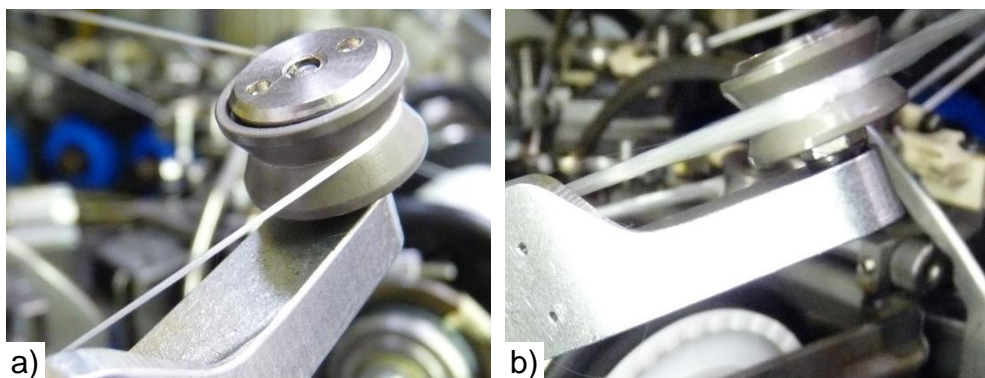


**Abb. 5-10: Schmierölkontamination**

- a) Gehäuftes Auftreten von Schmierölverunreinigungen auf dem Geflecht.
- b) Große Schmierstoffmengen bilden einen Film auf der Maschinenplatte.

Der einzige Anhaltspunkt, der Rückschlüsse auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit erlaubt, ist der Grad der Kontamination des Flechtguts mit Schmierstoffspritzern (s. Abb. 5-10 a)). Diese ist besonders bei hoher Maschinengeschwindigkeit stark ausgeprägt, stellt aber bereits bei geringer Drehzahl ein Problem dar. Für die Schmierung von Zahnrädern und Gleitbahn wird mit erheblichen Schmiermittelmengen gearbeitet, da nur so hohe Maschinengeschwindigkeiten realisierbar sind. Das verwendete Öl sammelt sich in der Anlage (s. Abb. 5-10 b)) und auf der Gleitbahn an und spritzt beim Vorbeifahren der Spulenträger auf das Flechtgut.

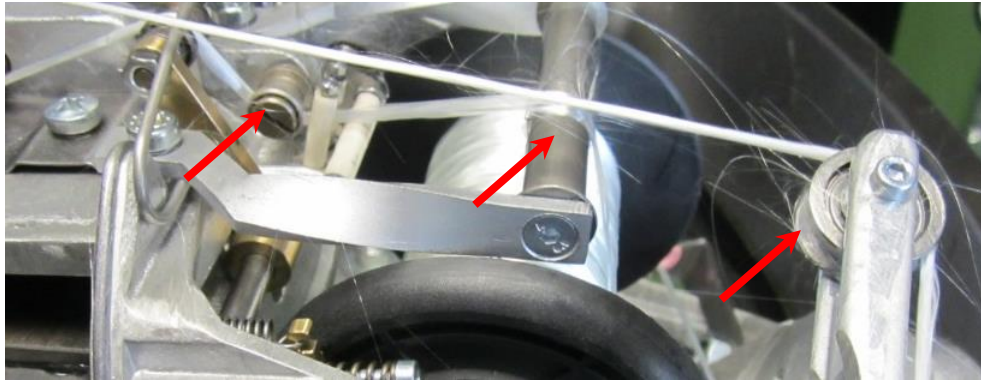
Die im Vorfeld der Versuche vermutete Faserschädigung durch die schnelle Beschleunigung des Garns an der Hebelspitze, die mit häufigen Garnrissen während der Verarbeitung einhergehen sollte, war nicht zu beobachten. Bei den dickeren Garnen wurde Schädigung festgestellt. Schadensursache sind die zu engen, für dünne Drähte ausgelegten Garnführungselemente (s. Abb. 5-11).



**Abb. 5-11: Umlenkrollen an der Hebelspitze der Nihoff-Maschine**

Das montierte Führungselement ist für das dünne Garn prinzipiell geeignet, dicke Garne werden allerdings nicht optimal geführt und sehr stark seitlich eingeschnürt.

- a) GF-136-Garn
- b) GF-1200-Garn



**Abb. 5-12: Schädigung der GF-1200-Garne in V2-S**

Zahlreiche abstehende Filamente zeigen starke Garnschädigung an. Die Filamente reißen vom Garn ab und sammeln sich an den Führungselementen. Dies ist in zweierlei Hinsicht kritisch: Erstens erhöht sich die Reibung, was zu verstärkter Garnschädigung führt; zweitens entstehen Unregelmäßigkeiten im Produkt, wenn Filamentagglomerationen ins Geflecht gezogen werden.

Der Spulenträger und das Bremssystem sind für die Verarbeitung von Verstärkungsfasergarnen aufgrund der vielen Umlenkpunkte nicht optimal. In Abb. 5-12 sind einige kritische Stellen im Garnführungssystem und die resultierende Garnschädigung mit roten Pfeilen markiert. Vielfach sind die Führungselemente rollend ausgeführt, was für die Verarbeitung von Multifilamentgarnen nicht zu empfehlen ist, da sich oft einzelne Filamente vom Garn lösen, um die Rollen schlingen und diese schließlich blockieren.

Die Garne der beiden Spulengruppen verlaufen entweder direkt oder über den Umlenkebel zum Flechtpunkt und passieren daher unterschiedlich viele Garnführungselemente. Eine unterschiedlich starke Schädigung der Garne, die sich über die jeweilige Anzahl der gebrochenen und vom Garn abstehenden Filamente verraten würde, ist jedoch nicht erkennbar. Differenzen in der Garnspannung der beiden Fadenscharen, die spiralig den Kern umlaufende Flechtgrate oder eine Verdrehung des beflochtenen Produkts zur Folge hätten, sind ebenfalls nicht festzustellen.

Da in den Versuchen nur wenig Material getestet wurde, ist die Gleichmäßigkeit des Geflechts über die ganze Lauflänge der Spulen nicht zu beurteilen. Man kann nichts darüber aussagen, ob das tänzergesteuerte Garnbremssystem die Garnspannung über das komplette Spulenvolumen konstant hält. Aufgrund des hohen Entwicklungsstands der HFM, die für das Flechten qualitativ anspruchsvoller Kabelabschirmungen optimiert sind, wird davon ausgegangen, dass die Prozessparameter über die Spulenlauflänge zumindest so konstant gehalten werden, wie dies von Klöppelflechtmaschinen bekannt ist.

Nach diesen Erkenntnissen sind bei der Verarbeitung von Verstärkungsfasergarnen mit der Hebelarmflechttechnik keine unlösbaren Probleme zu erwarten. Sie lässt hohe Flechtgeschwindigkeiten zu und bietet daher großes Potenzial zur Produktivitätssteigerung. Mit den verfügbaren Maschinen können typische FVK-Profilbauteile aber nicht gefertigt werden. Deshalb wird im Folgenden diskutiert, wie die Entwicklung hin zu neuen, speziell für die FVK-Fertigung optimierten HFM gestaltet werden kann.



## 5.2 Entwicklungsaufgaben

Die Versuchsreihen V1-N und V2-S haben aufgezeigt, dass das Verflechten von Verstärkungsfasergarnen auf HFM zwar grundsätzlich möglich ist, dass aber komplex geformte Flechtprofile mit gegenwärtiger Maschinenteknik nicht gefertigt werden können. Die speziellen Anforderungen, die sich aus dieser Erkenntnis an die Technik einer für FVK geeigneten HFM-Anlage stellen, werden nachfolgend anhand der einzelnen Bauelemente analysiert.

Es werden Lösungsansätze skizziert, die berücksichtigen, ob sie sich vergleichsweise einfach in die bestehende Technik integrieren lassen oder ob dies nur im Rahmen einer Maschinenneuentwicklung geschehen kann. Diese Einschätzungen bilden die Basis für die Planung der Entwicklungsstrategie, die zum Ende des Kapitels entworfen wird.

### 5.2.1 Grundsätzliches Maschinenlayout

#### 5.2.1.1 Kerndurchführung

Da HFM aktuell für die Umflechtung von Kabeln ausgelegt sind, ist im Maschinenzentrum nur ein schmaler Durchbruch vorhanden. Um dreidimensional gekrümmte Flechtkerne hindurch führen zu können, muss dieser Durchbruch deutlich größer sein. Weiterer Freiraum im Zentrum der Anlage wird benötigt, um dort Nebenaggregate für die automatisierte Durchführung des Fertigungsprozesses zu integrieren (Beschnitt, QS, etc. s. Abschnitt 3.4.1.5). Gegebenenfalls kommt noch eine Einheit zur Zuführung von Längsfäden hinzu, um auszugleichen, dass mit HFM keine klassischen Triaxialgeflechte gefertigt werden können (s. Abschnitt 5.2.4).

Maßgeblich für die Größe des Zentraldurchbruchs der Flechtmaschine ist die Geometrie der zu beflechtenden Bauteile. Diese richtet sich für Anwendungen in der Automobilindustrie vornehmlich nach dem Einsatzzweck in der Karosseriestruktur und kann dementsprechend sehr komplex sein. Solche Kerne können auch mit aktuell eingesetzten Radialflechtmaschinen, die viel Freiraum im Zentrum bieten, oft nur schwer beflochten werden. Daher gelten für Flechtprofile im Automobilbereich Gestaltungsrichtlinien, die die Freiheit beim Bauteilentwurf begrenzen, damit die Bauteile herstellbar sind<sup>16</sup>.

Eine HFM für die FVK-Bauteilfertigung sollte so konstruiert sein, dass die Gestaltung von Flechtbauteilen nicht weiter eingeschränkt werden muss. Dies kann während der Maschinenentwicklung anhand eines Schikanebauteils abgeprüft werden, das alle zulässigen gestalterischen Vorgaben miteinander kombiniert. Wenn sich dieses in der geplanten HFM beflechten lässt, sind andere, einfacher gestaltete Bauteile ebenfalls fertigbar.

---

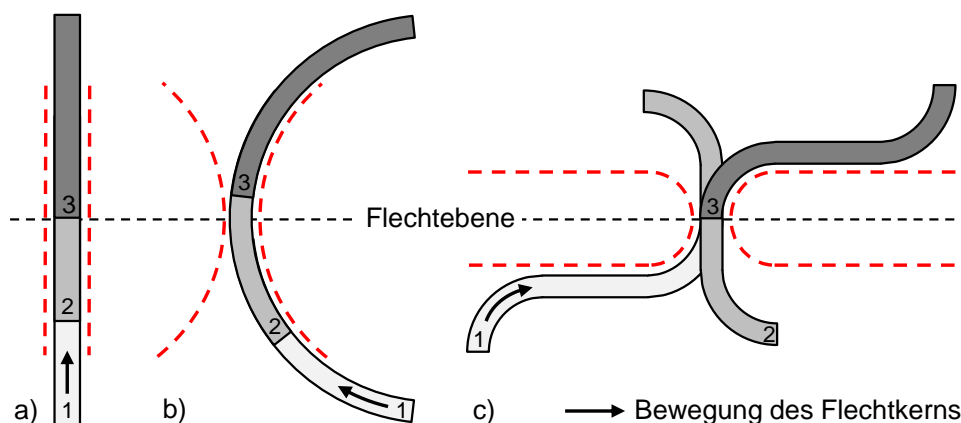
<sup>16</sup> Sie enthalten z. B. Vorgabewerte für die globale und lokale Krümmung, minimale Krümmungsradien, damit der Profilverlauf keine „Ecken“ aufweist, Vorgaben zum Verhältnis zwischen minimalem und maximalem Umfang und zum Rampenwinkel der Umfangsänderung, damit keine Umfangssprünge auftreten.

Abb. 5-13 zeigt die Abhängigkeit des für die Maschine zur Verfügung stehenden Bau- raums von der Kerngeometrie anhand unterschiedlich geformter Kerne, die durch die Flechtebene geführt werden. Da die Längsachse des Kerns im Flechtzentrum immer senkrecht auf der Maschinenebene stehen muss, werden seine Enden während des Flechtens seiner Geometrie entsprechend ausgelenkt. Damit der Kern und die zur Handhabung notwendige Greif- bzw. Fördereinheit, die in der Abbildung vereinfachend weggelassen ist, nicht mit der Maschine kollidieren können, steht für diese nur eingeschränkter Bau- raum zur Verfügung. Der Bereich, in dem sich Teile der Flechtmaschine und die zum Flechtzentrum verlaufenden Flechtfäden befinden dürfen, ist in der Abbildung durch die rot gestrichelte Linie vom Bewegungsraum des Flechtkerns abgegrenzt.

Im einfachsten Fall des geraden Kerns in Abb. 5-13 a) kann der heute bei Hebelarm- flechtmaschinen verwendete Aufbau prinzipiell beibehalten werden. Es muss lediglich der Durchmesser der Bohrung in der zentralen Welle der Maschine so groß sein, dass der Kern hindurchgeführt werden kann. Aber selbst in diesem einfachen Fall kann der zur Verfügung stehende Platz bei zusätzlicher Berücksichtigung einer Kernführungsein- heit nicht mehr ausreichend sein.

Für einen einfach gekrümmten Kern in Abb. 5-13 b) ist der Bauraum für die Maschine entsprechend der Krümmung des Kerns beschränkt. Ein doppelkegelförmiger Bereich im Zentrum der Maschine muss für die Bewegung des Kerns freigehalten werden.

Noch weniger Bauraum steht zur Verfügung, wenn der Kern komplexer geformt ist. Dieser Fall ist in Abb. 5-13 c) mit einem S-förmigen Kern verdeutlicht. Im extremen Fall mit rechtwinkligen Kernkrümmungen muss der Durchbruch in der Mitte der Ma- schine etwa doppelt so groß ausfallen wie die Länge des Kerns. Weiter erschwert wird die Situation, wenn der Kern zusätzlich in der dritten Raumrichtung (also aus der darge- stellten Ebene heraus) gekrümmt ist.



**Abb. 5-13: Bauraum für die Flechtmaschine in Abhängigkeit der Kernkontur**

Teilabbildung a) zeigt das Beflechten eines geraden, b) eines einfach gekrümmten und c) eines Flechtkerns mit S-förmiger Geometrie. Für alle Kerne sind drei Positionen zu Be- ginn (1), während (2) und nach Abschluss (3) des Flechtvorgangs dargestellt. Der Bereich außerhalb der rot gestrichelten Linie stellt den für die Maschine verfügbaren Bauraum dar.

Derartige Anpassungen sind nur im Rahmen der Neuentwicklung einer HFM vorstellbar, da die Konstruktion von der bisherigen Gestaltung erheblich abweichen muss. Denkbar wäre der Antrieb über einen oder mehrere nach außen verlagerte Motoren anstatt über eine zentrale Welle. Dies würde allerdings auch eine völlige Neugestaltung der bisher verwendeten Lagerung der Rotoren nach sich ziehen. Dazu wären z. B. spezielle Lager mit großem Durchmesser notwendig<sup>17</sup>.

### 5.2.1.2 Spulenzahl

Zusätzlich zur Durchführbarkeit des Kerns durch das Maschinenzentrum muss sichergestellt sein, dass sich seine Oberfläche geschlossen mit Geflecht bedecken lässt. Aufgrund von Formel (2-1) ergibt sich aus Flechtwinkel, Garnablagebreite und Bauteilumfang die Spulenzahl der Maschine, die zur Fertigung bestimmter Bauteile benötigt wird. Typische Automobilbauteile haben Umfänge zwischen 150 mm und 500 mm. Dafür wird eine Maschine benötigt, die deutlich mehr Spulen aufweist als aktuell im Drahtflechtbereich eingesetzte HFM. Zum Vergleich: Die Basisgeflechte sind so ausgelegt, dass auf einer Maschine mit 64 Spulen ein Kern mit 70 mm Durchmesser (etwa 220 mm Umfang) geschlossen bedeckt werden kann (vgl. Abschnitt 3.3.1.1).

Die größten Hebelarmflechtmaschinen verfügen derzeit über 48 Spulenträger<sup>18</sup> (vgl. Abb. 5-14), was bei Radialflechtmaschinen für Faserverbundbauteile eher die untere Grenze der Spulenzahl darstellt. Ein zentraler Entwicklungsaspekt muss also sein, die Maschine konstruktiv so zu gestalten, dass die Anzahl der Spulen gegenüber dem aktuellen Stand der Technik signifikant erhöht werden kann.

Zu Beginn der Entwicklung von HFM für FVK-Anwendungen ist es allerdings nicht notwendig, eine Maschine für große Profilumfänge umzusetzen, da Bauteilfertigung nicht im Vordergrund stehen wird. Zunächst müssen Erfahrungen mit der Maschine, dem Prozess und den Eigenschaften des gefertigten Materials gesammelt werden. Ein wichtiger Einsatzzweck für die Maschine wird deswegen die Geflechtproduktion zur Herstellung von Materialprüfkörpern sein. Es wird angenommen, dass für eine grundlegende Materialcharakterisierung Zug-, Druck- und interlaminare Scherfestigkeitseigenschaften ermittelt<sup>19</sup> werden. Die Abmaße der benötigten Probekörper bestimmen die Mindestgröße einer Platte, aus der sich normgerechte Prüfkörper zuschneiden lassen. Daher wird im Anhang A, in Abschnitt g, im Detail analysiert, wie viele Spulen eine Maschine für diesen Anwendungszweck zumindest aufweisen sollte.

---

<sup>17</sup> Solche Lager mit mehreren Metern Durchmesser werden z. B. bei Windenergieanlagen für die Lagerung des Rotors verwendet.

<sup>18</sup> Nach Angaben der Spirka Schnellflechter GmbH aus einem Gespräch mit Herrn Harald Baumbach im Dezember 2012.

<sup>19</sup> Speziellere Kennwerte werden in der Regel erst bei detaillierteren Untersuchungen zu einem späteren Zeitpunkt der Materialentwicklung ermittelt.

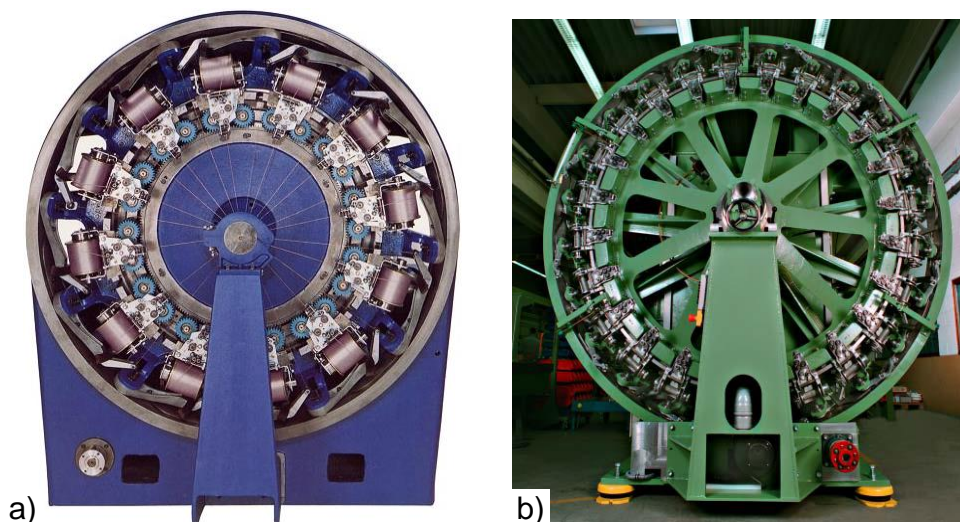
Um ein vollständiges Kennwerte-Programm zumindest für die im Automobilbereich zu meist eingesetzten CF-50k-Garne durchzuführen zu können, wird nach diesen Betrachtungen eine Flechtmaschine mit wenigstens 48, besser jedoch 64 Spulen benötigt.

Diese hohe Spulenzahl – aus Produktivitätsgründen möglicherweise in Kombination mit deutlich gesteigertem Spulenvolumen – führt zu einem erheblich größeren Durchmesser der Anlage. Die Forderung nach größerem Freiraum im Zentrum der Maschine für das Durchführen des Kerns aus dem vorherigen Abschnitt wird also durch die größere Spulenzahl nicht behindert sondern lässt sich einfacher umsetzen.

### 5.2.1.3 Maschinenbettausrichtung

Für die FVK-Bauteil-Herstellung hat sich in der Klöppelflechttechnik der Einsatz von vertikal ausgerichteten Maschinen durchgesetzt (s. Abschnitte 2.3.1.2 und 3.4.1.1). Diese Maschinenausrichtung ist auch bei der Verwendung von HFM wünschenswert, da sich die Handhabung langer Flechtkerne vereinfacht. Im Standardangebot der Schnellflechtmaschinenhersteller finden sich vornehmlich Systeme mit horizontal ausgerichteter Spulenlaufbahn. Auf solchen wurden auch die Versuche durchgeführt.

Es sind allerdings auch Beispiele für Maschinen mit vertikaler Laufbahnausrichtung bekannt (s. Abb. 5-14). Niehoff hat im Jahr 2014 zudem ein System mit schräger Laufbahnebene vorgestellt, wodurch sich die Belastung des Flechtguts reduzieren soll [135]. Ob eine solche Gestaltung auch für die FVK-Bauteilherstellung vorteilhaft wäre, müsste genauer untersucht werden. Es gibt offensichtlich keine prinzipiellen konstruktiven Einschränkungen, die eine vertikale Maschinenausrichtung unmöglich machen, so dass eine für die FVK-Fertigung ausgelegte HFM nach diesem Konstruktionsprinzip hergestellt werden könnte.



**Abb. 5-14: Beispiele für vertikal ausgerichtete Schnellflechtmaschinen**

- a) Maschine der Serie UNIDRA mit 24 Spulenträgern (Abbildung aus [136]).
- b) Maschine 48 S3H mit 48 Spulenträgern (Abbildung aus [51]).



Bei Verwendung der bekannten Gleitbahnkonstruktion mit dem erforderlichen Schmiermittelaufwand erscheint ein solches System allerdings in einer Hinsicht kritisch: Es besteht die Gefahr, dass Schmiermittel von oben auf die Flechtfäden und das in der Mitte der Anlage durchgeführte Bauteil tropft. Eine solche Kontamination muss bei FVK-Anwendungen auf jeden Fall ausgeschlossen werden.

#### **5.2.1.4 Variable Abbindung**

Interessant für die weitere Entwicklung von Material und Anlagentechnik wäre, wenn man die Geflechtabbindung während des Fertigungsprozesses verändern könnte. Standardmäßig wird Geflecht auch auf HFM in 2 / 2-Köperbindung gefertigt. Je nach Bauteilanforderung wäre es wünschenswert, bereichsweise 1 / 1 (für besseres Impactverhalten) oder z. B. 4 / 4 (für bessere Steifigkeitseigenschaften) abzubinden. Dies ließe sich allerdings nur im Rahmen der Neuentwicklung einer Flechtmaschine umsetzen.

Der Wechsel der Geflechtabbindung kann mit der momentan verwendeten Anlagentechnik nur durch einen Tausch des Kurvenrings – in den dann eine abweichende Steuernut für die Garnumlenkhebel eingefräst ist – erreicht werden. Ein denkbare Konzept für die Zukunft wäre, einen solchen Kurvenring mit schaltbaren Weichen auszustatten, um so den Wechsel der Abbindung während der Fertigung zu ermöglichen. Ein noch fortschrittlicherer Ansatz wäre, das Fadenstellglied nicht über eine Nutkurve, sondern direkt über einen Stellmotor anzusteuern. Dies würde volle Flexibilität der Abbindung ermöglichen, geht allerdings mit verschiedenen Herausforderungen einher. Zum einen müssten für jeden der Stellhebel individuelle Steuersignale sowie die Energie für die Versorgung der Motoren in das rotierende System übertragen werden. Dies erscheint über Schleifkontakte möglich. Zum anderen müsste sichergestellt werden, dass das Garn durch den Umlenkhebel exakt in die Aussparung der Gleitbahn abgesenkt wird. Da keine mechanische Kopplung über das Kurvengetriebe mehr vorhanden wäre, müsste diese über entsprechende Sensor- und Steuersignale erfolgen. Ob die Verarbeitung dieser Steuersignale auch bei hoher Maschinengeschwindigkeit und abrupten Geschwindigkeitsänderungen schnell genug ist, um das Garn prozesssicher zu verlegen, wäre bei der detaillierten Ausarbeitung eines solchen Konzepts zu untersuchen.

### **5.2.2 Kernhandhabung**

Ebenso wie die Klöppelflechtmaschinen muss eine HFM mit einem System zur Handhabung der Flechtkerne verbunden sein, um eine Produktionsanlage zur Preformherstellung zu erhalten. Über mechanische oder regelungstechnische Kopplung müssen die Abzugsgeschwindigkeit des Kerns und die Umlaufgeschwindigkeit der Maschine synchronisiert werden, damit der gewünschte Flechtwinkel eingehalten wird. Erfahrungen aus dem Bereich der Klöppelflechttechnik zeigen, dass mit steigender Komplexität der gefertigten Bauteile und weitreichender Automatisierung des gesamten Flechtvorgangs das Handhabungssystem nicht mehr getrennt von der Flechtmaschine betrachtet und entwickelt werden kann (s. Abschnitt 3.4.1.3).

Dies gilt umso mehr, als mit der deutlichen Steigerung der Fertigungsgeschwindigkeit bei Einsatz der Hebelarmflechttechnik ein bisher weniger wichtiger Aspekt des Handhabungssystems in den Vordergrund tritt: nämlich dessen Arbeitsgeschwindigkeit. Bereits die ersten Erfahrungen aus Versuchsreihe V1-N, bei denen der Abzug nur bis zu einer Geschwindigkeit von  $100 \text{ mm s}^{-1}$  in der Lage war, den beflochtenen Schlauch aus der Maschine zu fördern, zeigen, dass bei der Preformherstellung mit HFM Abzugsgeschwindigkeiten auftreten werden, die die bisherigen bei weitem übersteigen. Die zu erwartenden Abzugsgeschwindigkeiten bei regulärer Geflechtablage sind für das Standard- und das Heavy-Tow-Geflecht auf der linken Seite von Tab. 5-6 zusammengestellt.

**Tab. 5-6: Kerngeschwindigkeit für verschiedene Maschinendrehzahlen**

In der Tabelle sind jeweils die Flügelraddrehzahlen (für KFM) und Maschinendrehzahlen (für HFM) angegeben, die derselben Spulenumlaufdauer entsprechen.

		64 Spulen (reguläres Geflecht)			32 Spulen (gespreiztes Geflecht)		
<b>Flügelrad-drehzahl</b>	$f_F [\text{min}^{-1}]$	200	400	800	200	400	800
<b>Maschinen-drehzahl</b>	$f_S [\text{min}^{-1}]$	12,5	25	50	25	50	100
<b>Standard-geflecht</b>	$v [\text{mm s}^{-1}]$	45,8	91,7	183,4	91,7	183,4	366,8
<b>Heavy-Tow-Geflecht</b>	$v [\text{mm s}^{-1}]$	171,1	342,2	684,4	342,2	684,4	1368,8

Bei Klöppelflechtmaschinen wird für das Standardgeflecht bei der Auslegungsflügelraddrehzahl von  $200 \text{ min}^{-1}$  nur eine Abzugsgeschwindigkeit von wenigen  $\text{cm s}^{-1}$  erreicht. Diese steigt allerdings linear mit der Maschinengeschwindigkeit an. Ein geringer Flechtwinkel, wie beim Heavy-Tow-Geflecht, erfordert zusätzlich eine deutlich höhere Abzugsgeschwindigkeit, die dann bei der Referenzdrehzahl bereits bei  $17 \text{ cm s}^{-1}$  liegt.

Für zukünftige Flechtanwendungen ist zudem die Ablage von gespreizten Bändern als interessant einzustufen, weil sich so einerseits die mechanischen Eigenschaften des Faserverbundmaterials verbessern lassen und andererseits Bauteile mit demselben Umfang auf kleineren Maschinen mit weniger Spulen gefertigt werden können. Bei Verdopplung der Ablagebreite der Flechtfäden gegenüber dem „regulären Geflecht“ verdoppelt sich durch die halbe Flechtspulenzahl beim „gespreizten Geflecht“ auch die Abzugsgeschwindigkeit. Die entsprechenden Werte finden sich im rechten Teil von Tab. 5-6.

Die Kombination all dieser Maßnahmen und Effekte würde theoretisch dazu führen, dass bei einem Heavy-Tow-Geflecht mit gespreizten Flechtfäden auf HFM Abzugsgeschwindigkeiten von weit über einem Meter pro Sekunde möglich sind. Diese Überlegung zeigt, dass die Flechtkerne mit den bekannten Handhabungssystemen (s. Abb. 3-13), die auf dem Einsatz von Industrierobotern basieren, voraussichtlich nicht

mehr schnell genug bewegt werden können. Typische Industrieroboter erreichen Bewegungsgeschwindigkeiten von bis zu  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Dies ist keinesfalls ausreichend, um Flechtkerne zu handhaben, die sich mit einer Geschwindigkeit derselben Größenordnung durch den Flechtpunkt bewegen. Die Enden der Flechtkerne, wo ein Roboter greifen würde, bewegen sich aus Geometrie Gründen viel schneller, wenn die Kerne gekrümmt sind. Zusätzlich müssten Umgreif-Operationen stattfinden, die schon bei den derzeitigen Flechtgeschwindigkeiten eine große Herausforderung darstellen.

Um also den Geschwindigkeitsvorteil von HFM bei der Herstellung von FVK-Bauteilen nutzen zu können, sind alternative Handhabungssysteme zu entwickeln. Mit dem Wissen, dass bei den beschriebenen Roboter-Greifer-Handhabungssystemen speziell die Umgreifvorgänge zeitintensiv sind, muss eine Lösung im Bereich kontinuierlich fördernder Abzugssysteme gesucht werden. Dafür kommen prinzipiell rollen- oder raupenbasierte Systeme in Betracht. Allerdings sind diese auf dem aktuellen Entwicklungsstand auf einfache Geometrien der zu fördernden Kerne eingeschränkt. Bisher sind sie nur für gerade oder bestenfalls kontinuierlich gekrümmte Kerne ohne große Veränderungen des Kernquerschnitts im Einsatz. Außerdem erreichen auch diese Systeme die geforderten Abzugsgeschwindigkeiten bis dato nicht.

In jedem Fall muss der Kraftangriffspunkt des verwendeten Handhabungssystems – ob weiterhin in einer verbesserten Form kooperierender Roboter oder mit geeigneten Rollenfördereinheiten – möglichst nah am Flechtpunkt liegen, um die Biegekräfte auf den Flecht kern gering zu halten. Diese Forderung muss schon bei der grundsätzlichen Maschinengestaltung berücksichtigt werden. Es zeigt sich erneut, dass Maschine und Handhabungssystem in Kombination entwickelt werden müssen (s. Abschnitt 5.2.1).

### 5.2.3 Spulenträger und Garnführungssystem

An der Einheit aus Spulenträger und Umlenkhebel werden weitreichende Veränderungen notwendig, damit Verstärkungsfasergarne verarbeitet werden können. Diese betreffen sowohl die Gestaltung des Spulenträgers selbst als auch das komplette Garnführungssystem inklusive Umlenkhebel und Garnbremse, über das die Garne ins Zentrum der Maschine gelenkt werden.

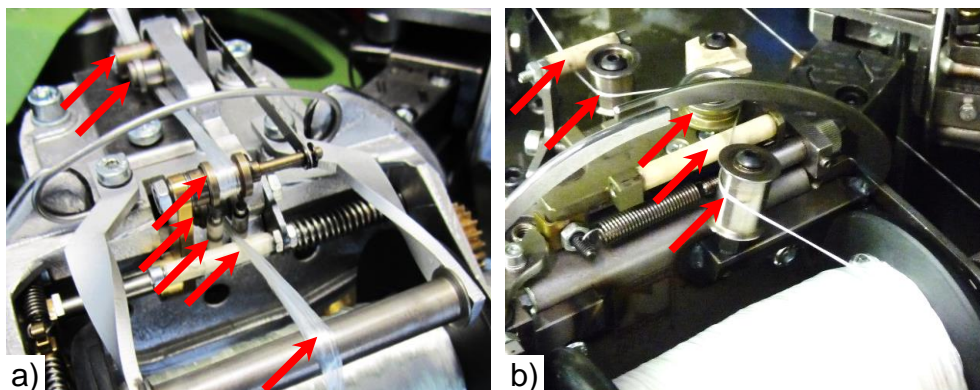
In den Versuchen zeigt sich sehr anschaulich, dass das Garnführungssystem aktueller HFM für die Verarbeitung von Verstärkungsfasern nicht geeignet ist. Die Strangführungselemente sind auf sehr dünne Materialien (Drähte) ausgelegt und schnüren deshalb breite Multifilamentgarne stark ein. Dies äußert sich durch massive Schädigung der Garne in Form von Einzelfilamentbrüchen, insbesondere wenn dicke Garne mit hohem Titer eingesetzt werden. Die beschriebene Problematik ist in Abb. 5-12 gut zu erkennen.

Zunächst sollte die Anzahl der Punkte, an denen das Garn umgelenkt wird, möglichst minimiert werden. Im Speziellen sind die Stellen kritisch, an denen das Garn unter hoher Spannung steht. Die Regelung der Garnbremse über ein Tänzersystem garantiert zwar genaue Kontrolle der Garnspannung über die komplette Spulenfüllung, beinhaltet aber

auch viele garnkontaktierende Elemente (s. Abb. 5-15: die Kontaktstellen sind mit roten Pfeilen markiert) und ist daher im Hinblick auf Reduzierung von Garnschädigungen nicht optimal. Das Bremssystem der Spulen sollte dahingehend überarbeitet werden, dass möglichst wenig Garnschädigung auftritt. Zusätzlich wäre eine leichtere Einstellbarkeit der Garnbremse wünschenswert, da sich dieser Vorgang bei beiden untersuchten Maschinen als äußerst zeitaufwendig erwiesen hat.

Das Garnführungssystem kann außerdem durch den Tausch der garnkontaktierenden Elemente verbessert werden. Diese müssen nach Parametern gestaltet sein, die als besonders faserschonend bekannt sind (große Umlenkradien, entsprechend beschichtete Oberflächen etc.). Insbesondere soll auch die Verarbeitung von bändchenförmigen Materialien (gespreizte, binderstabilisierte Rovings oder Prepreg-Tapes) ermöglicht werden. Diese müssen, ohne sich einzuschnüren oder zu verdrehen, von der Spule bis zum Flechtpunkt geleitet werden. Je breiteres Garnmaterial mit der Maschine abgelegt werden kann, desto weniger Spulen benötigt diese für Bauteile der gleichen Größe. Für eine Versuchsmaschine, mit der die Weiterentwicklung der HFM-Technik beginnen wird, ist zudem die Möglichkeit zum einfachen Tausch der Garnführungselemente erwünscht, um so die Maschine auf die Verarbeitung verschiedener Garnmaterialien anzupassen.

Der Spulenträger selbst muss ebenfalls neu gestaltet werden mit dem vorrangigen Ziel, wesentlich größere Spulen verwenden zu können. Für die aktuell verarbeiteten dünnen Drähte reicht die Lauflänge auf den relativ kleinen Spulen<sup>20</sup> der beiden untersuchten Maschinen aus. Von den dicken CF-50k-Garnen, deren Verarbeitung das eigentliche Ziel ist, lassen sich aber nur etwa 100 m aufspulen – eine Lauflänge, die bei voller Maschinengeschwindigkeit in wenigen Minuten verbraucht ist.



**Abb. 5-15: Umlenkpunkte des Garns am Spulenträger**

- a) Spulenträger der Maschine DF16A (Spirka Schnellflechter): Das Garn durchläuft nach dem Verlassen der Spule auf dem Weg zum Flechtpunkt sieben Garnführungselemente.
- b) Spulenträger der Maschine BMV 16 (Niehoff): Das Garn wird auf dem Weg zum Flechtpunkt von fünf Führungselementen kontaktiert.

<sup>20</sup> Spule FSP 80/100/80 der Firma Steintex ([www.steintex.de](http://www.steintex.de)) mit  $370 \text{ cm}^3$  Spulenvolumen [137].

Die Untersuchungen in Abschnitt 4.4.1.2 haben zudem gezeigt, dass die optimale Spulengröße für die beste zyklusbezogene Ablagerate umso größer ist, je schneller die Flechtmaschine läuft und je dicker die verwendeten Garne sind. Besonders vorteilhaft wäre, wenn die CF-Rohgarn-Spulen direkt in der Maschine verwendet werden könnten, da dann der Umspulvorgang entfällt, der einerseits Zeit- und Kostenaufwand verursacht, andererseits aber vor allem das Garn schädigt (vgl. hierzu Abschnitt 3.6.1).

Ist die Umgestaltung des Garnführungssystems noch als Paket von Verbesserungsmaßnahmen an bestehenden Maschinen vorstellbar, müsste die Integration eines optimierten Spulenträgers mit verbesserter Garnbremse im Rahmen einer Neukonstruktion erfolgen.

## 5.2.4 Stehfadenzuführung

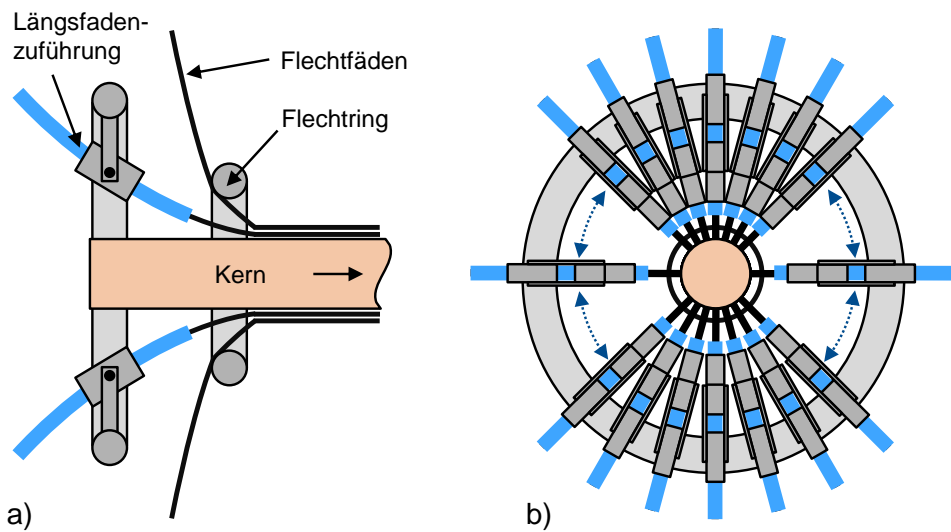
Bei der Klöppelflechttechnik existiert mit den Zentraldurchbrüchen der Flügelräder ein System, mit dem sehr einfach Fäden in Fertigungsrichtung als Steh- oder Zettelfäden in die Geflechtstruktur eingebunden werden können, um einen triaxialen Geflechtaufbau zu erzeugen (s. Abschnitte 2.2.5.2 bzw. 2.3.1.1).

Wie im Abschnitt 2.3.3.4 diskutiert, bietet die Hebelarmflechttechnik diese Möglichkeit nicht – für viele typische Bauteilanwendungen aus dem FVK-Bereich ist aber gerade der Faserverlauf entlang der Bauteillängsachse aufgrund der vorherrschenden mechanischen Belastungen erwünscht. Wenn nicht mit einem längsorientierten Biaxialgeflecht wie dem untersuchten Heavy-Tow-Geflecht gearbeitet werden kann, müssen Längsfäden beim Einsatz einer HFM anderweitig ins Bauteil integriert werden. Entweder ihre Einbringung lässt sich durch ein geschicktes Anlagenkonzept mit dem Funktionsprinzip der Hebelarmflechtmaschine verbinden – das im genannten Abschnitt vorgestellte Maschinenkonzept von Denninger [55] ist diesbezüglich sehr vielversprechend. Oder es müssen alternative Methoden zur Zuführung des dritten Garnsystems gefunden werden.

Vorstellbar ist, die Längsfäden zwischen dem Flecht kern und dem sich schließenden Flechtkegel zuzuführen, so dass sie eine separate Faserlage direkt unter der eigentlichen Geflechtlage bilden. Diese Fäden können sehr gerade verlaufen, da keine Garnwelligkeiten durch das Einbinden im Geflecht auftreten, wodurch sie potenziell sehr gute Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften erreichen. Nachteilig ist allerdings, dass die Fäden in ihrer Position nicht fixiert sind und daher unter der Geflechtlage in Umfangsrichtung verrutschen können. Speziell bei gekrümmten Kernen sind ein gerader Längsfadenverlauf und eine gleichbleibende Verteilung der Fäden am Umfang mutmaßlich nur schwer zu gewährleisten. Das Verrutschen lässt sich minimieren, indem die Fäden so kurz vor dem Zusammenziehen des Geflechts zugeführt werden, dass sie sofort durch dieses fixiert werden. Alternativ kann man auch an den Einsatz von Binder<sup>21</sup> denken.

---

<sup>21</sup> Unter Binder versteht man im Bereich der Faserverbundkunststoffe eine Art „Klebstoff“, der die einzelnen Filamente aneinander fixiert und so Aufbauten aus trockenen Fasern stabiler und besser handhabbar macht. Der Binder kann duroplast- oder thermoplastbasiert sein.



**Abb. 5-16: Vorschlag für die Längsfadenzuführung bei einer HFM**

- Seitenansicht: Die Längsfäden werden in den blau dargestellten Schläuchen zugeführt. In jeder Zuführung kann eine Vorschub- und Beschnitteinheit integriert sein.
- Rückansicht: Die Längsfadenzuführungsmodule können entlang des Umfangs verschoben werden, um die Fäden individuell am Umfang zu verteilen.

Die Längsfäden können direkt von einem Gatter abgezogen und über Führungselemente (z. B. in Teflonschläuchen) direkt zum Flechtzentrum geleitet und ringförmig am Umfang des Kerns verteilt werden. Optimalerweise wird die Zuführeinheit jedes einzelnen Stehfadens mit einer individuellen Förder- und Beschnittvorrichtung – vergleichbar einer AFP<sup>22</sup>-Anlage – versehen. Dieses Konzept ist schematisch in Abb. 5-16 dargestellt.

Dies ermöglicht, dass Stehfäden mit regelbarem Anteil individuell am Umfang angeordnet werden können, und erlaubt so eine gezielte Steuerung der Längssteifigkeits- und Biegeeigenschaften des gefertigten Profils. Vorteilhaft ist dabei insbesondere, dass die Anzahl der zugeführten Längsfäden von der Anzahl der Flechtfäden (Flügelräder) entkoppelt wird. Bei Bedarf kann so ein höherer oder geringerer Anteil von Stehfäden am Lagenaufbau erreicht werden, als dies beim Triaxialgeflecht möglich ist. Die Zuführeinheit kontrolliert auch den Abstand der Garn-Austrittsöffnung zum Flechtzentrum und stellt sicher, dass die Garne direkt unter dem sich schließenden Geflecht eingebunden werden.

Die Integration einer Garnspreizvorrichtung im Zuführmodul erscheint nach ersten Versuchsergebnissen<sup>23</sup> nicht umsetzbar. Eine mechanische Spreizvorrichtung erhöht die Garnreibung zu stark, mit einer pneumatischen lässt sich bei der hohen Geschwindigkeit, mit der das Garn verarbeitet wird, kein akzeptables Spreizergebnis erreichen.

<sup>22</sup> Automated Fiber Placement: Ein Verfahren, bei dem unidirektionale Verstärkungsfaserbündchen mit einer Ablegeeinheit entlang eines frei definierbaren Pfades direkt in einem Werkzeug positioniert werden.

<sup>23</sup> Ansätze, wie die Zuführung und die „Online“-Spreizung von Längsfäden erfolgen könnten, wurden im Rahmen einer Semesterarbeit von Julian Wolf untersucht [138].

## 5.2.5 Schmierstoffverunreinigungen

Bei den Versuchen auf den Maschinen von Spirka Schnellflechter und Niehoff waren innerhalb des Maschinengehäuses praktisch überall Spuren von Schmieröl zu beobachten. Beim raschen Gleiten der Spulenträger auf der Führungsbahn entstehen offensichtlich sehr feine Öltröpfchen, die sich mit der Luftbewegung im kompletten Maschinengehäuse verteilen. Derartige Ölablagerungen sind bei der Herstellung von FVK-Bauteilen nicht zulässig, da Kontaminationen auf den Faserfilamenten deren Anbindung an das Matrixharz vollständig verhindern. Der Verbundwerkstoff erreicht dann nicht die erwarteten Materialeigenschaften. Es erscheint deswegen ausgeschlossen, mit den getesteten Maschinen Vorformlinge für die FVK-Herstellung zu produzieren.

Offensichtlich sind jedoch HFM auch bei der Fertigung medizintechnischer Produkte (z. B. für Katheter) im Einsatz, wofür ebenfalls sehr strenge Anforderungen hinsichtlich der Verschmutzung des Flechtguts mit Schmierstoffen gelten<sup>24</sup>. Für die Medizintechnik-Anwendungen ist es gelungen, die Anforderungen mittels entsprechender Abschirmungen und (mutmaßlich) der Reduktion der Schmiermittelmenge – mit der wohl eine Drosselung der Fertigungsgeschwindigkeit einhergeht – zu erfüllen. Die gleichen Vorrichtungen, die dort eingesetzt werden, sollten sich ohne größere Anpassungen auch an einer Maschine für die Fertigung von Faserverbundmaterialien integrieren lassen.

Auch bei der Verwendung von Abschirmblechen in der Maschine bleibt eine Frage offen: Was passiert, wenn die Garne der Außenspulen in die Laufbahn der Innenspulen eintauchen? Beim Überfahren der Lücke in der Gleitbahn werden vom Spulenträger unweigerlich Schmieröltröpfchen abgeschleudert, die das in diese Lücke abgetauchte Garn kontaminieren können. Wie kritisch das ist, und ob sich diese Problematik auf Basis der existierenden Maschinenteknik lösen lässt, bleibt zu untersuchen.

Alternative Maschinenkonzepte kommen ohne den Einsatz einer geschmierten Gleitbahn aus. Insbesondere ist die bereits entwickelte Rollenlagerung der Spulenträger aus der Schutzrechtsanmeldung [44] zu nennen, mit der eine HFM für FVK aufgebaut werden kann. Weitere Konzepte sind denkbar, müssen allerdings erst entwickelt werden. Eine Idee sind Spulenschlitten, die sich mit Laufrollen an der Bahn abstützen. Die Gleiter können elektromagnetisch nach dem Konzept eines Linearmotors angetrieben werden. Es gibt bereits solche Linearmotorsysteme, bei denen gleichzeitig mehrere Schlitten individuell angesteuert auf einer gekrümmten Bahn fahren<sup>25</sup>. Eine Flechtmaschine könnte auf dieser Technologie basieren, wenn es gelingt, Unterbrechungen für das Überfahren der Garne in die Fahrbahn der Gleiter zu integrieren. Nach anderen Ideen könnten die Spulenträger über Druckluft oder magnetisch kontaktfrei gelagert werden. Beide Varianten erscheinen allerdings aus heutiger Sicht nicht wirtschaftlich umsetzbar.

---

<sup>24</sup> laut der Aussagen der Gesprächspartner bei Niehoff und Spirka Schnellflechter.

<sup>25</sup> Firma Beckhoff hat mit dem XTST<sup>TM</sup>-System einen solchen Linearmotor im Angebot [139].

## 5.2.6 Schutz der Elektrik

Für die Anwendung der Schnellflechttechnik im FVK-Bereich ist der Einsatz von CF das eigentliche Ziel. Bei deren Verarbeitung entstehen allerdings elektrisch leitfähige Filamentstäube. Werden sie auf Maschinen verarbeitet, die nicht gegen diese Stäube abgeschirmt sind, riskiert man schwere Schäden an der Maschinenelektrik<sup>26</sup>. Die Verarbeitungseigenschaften von nichtleitenden GF sind denen von CF vergleichsweise ähnlich, jedenfalls viel ähnlicher als diejenigen von Drähten oder Polymerfasern, die normalerweise auf HFM verarbeitet werden. Deshalb ist, wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben, die Versuchsdurchführung mit GF ein akzeptabler Weg, um auf existierender Anlagentechnik einen ersten Eindruck davon zu gewinnen, ob die Verarbeitung von CF auf HFM möglich sein wird.

Im Detail unterscheiden sich die Verarbeitungseigenschaften von CF und GF, ja selbst die verschiedener CF-Typen untereinander, jedoch deutlich. Denn sie hängen von der Sprödigkeit und der Dehnung der Fasern, der verwendeten Schlichte und weiteren Faktoren ab. Um sicherzugehen, dass sich CF ebenfalls mit HFM verarbeiten lassen, sind umfangreiche Versuche mit verschiedenen CF-Garnen unabdingbar.

Damit eine Hebelarmflechtmaschine mit CF uneingeschränkt betrieben werden kann, ist die komplette Elektrik gegen die Einwirkung von CF-Filamenten zu schützen. Herdegen [140] schlägt folgende Maßnahmen vor:

- Das Lackieren von Elektronikkomponenten (z. B. Leiterplatten) bietet einen gewissen Schutz, allerdings bleibt ein Restrisiko. Von Vorteil ist, dass die Maßnahme nachträglich durchgeführt werden kann, um Maschinen zu schützen, die ursprünglich nicht für die Verarbeitung von CF ausgelegt wurden.
- Die Einhausung der Schaltschränke hilft, CF von den elektrischen Komponenten fernzuhalten. Überdruck im Schaltschrank verhindert zusätzlich das Eindringen von Filamenten. Die Einhausung muss allerdings wirklich dicht sein und darf nicht in kontaminierter Umgebung geöffnet werden. Um dies zu vermeiden, kann ein Schaltschrank mobil verwendet oder außerhalb des mit CF kontaminierten Bereichs aufgestellt werden („Remote-Aufstellung“).
- Die Verwendung von elektrischen Komponenten mit hoher Schutzklasse (IP6x) ist generell anzuraten und ist bei einer Maschinenneuentwicklung zu berücksichtigen. IP6x-Komponenten haben den Vorteil, dass sie auch in kontaminierter Umgebung getauscht werden können.

Um die Freisetzung von CF-Filamentstäuben in die Umgebung zu verhindern, sollte die Flechtmaschine ohnehin gekapselt und mit einem Absaugsystem ausgestattet sein.

---

<sup>26</sup> Die Präsentation „Wenn Carbon auf Elektronik trifft“ [140] bietet einen sehr guten Überblick zum Thema.



## 5.2.7 Dauerbetriebsverhalten

Aus den durchgeführten Versuchen lassen sich keine Rückschlüsse auf das Verhalten der Maschinen im Dauerbetrieb ziehen, da nur sehr wenig Material verarbeitet wurde.

### 5.2.7.1 Verschleiß

Bereits während des kurzen Versuchsbetriebs ist aufgefallen, dass sich Filamentbruchstücke an den ölbenetzten Oberflächen der Maschine, z. B. auf der Gleitbahn, ablagern. GF- und insbesondere CF-Staub ist aufgrund der Materialhärte äußerst abrasiv – in Verbindung mit dem Schmieröl bildet sich so eine regelrechte Schleifpaste, die mutmaßlich zu starkem Verschleiß der betroffenen Oberflächen führen wird. Wie kritisch dies ist, können nur Dauerbetriebsversuche zeigen. Für das Problem kommen verschiedene Lösungen in Betracht.

- Wenn das Problem nicht gravierend ist, kann der Verschleiß durch regelmäßige Reinigung der Maschine auf ein akzeptables Maß begrenzt werden. Dies wäre die einfachste Lösung, die auch bei aktueller Maschinenteknik realisierbar ist. Allerdings verringert dies die Produktivität der HFM, falls es notwendig ist, die Maschine häufig, z. B. bei jedem Rüstvorgang oder gar innerhalb eines Flechtzyklus, zu reinigen. Je nach Reinigungsdauer ist eine signifikante Reduktion der Anlagenverfügbarkeit die Folge.
- Eine weitere denkbare Lösung wäre, den Kontakt zwischen den Filamentbruchstücken und den öligen Oberflächen zu unterbinden. Dies kann entweder dadurch geschehen, dass die Gleitflächen z. B. durch Bleche abgeschirmt werden, oder durch Absaugung der Filamente am Entstehungsort. Beide Lösungsansätze ließen sich möglicherweise an bestehenden Maschine nachrüsten oder mit geringem Aufwand hinzukonstruieren. Ob der Zutritt der Filamente zu den Gleitflächen zuverlässig genug unterbunden werden kann, um starken Verschleiß und häufige Reinigungszyklen zu vermeiden, hängt von der konkreten baulichen Umsetzung ab und kann ohne Versuche nicht geklärt werden.
- Der erfolgversprechendste Lösungsansatz wäre, auf verschleißanfällige, geschmierte Gleitelemente so weit wie möglich zu verzichten. Dies ließe sich allerdings nur im Rahmen der Neukonstruktion einer Maschine realisieren. Wie in Abschnitt 5.2.5 beschrieben, ist diese Variante ohnehin gewünscht, um die mögliche Verschmutzung der Verstärkungsfasern mit Schmieröl zu verhindern.

### 5.2.7.2 Fehlerhäufigkeit

Ein weiterer Punkt, der unbekannt ist und nur mit Dauerflechtversuchen untersucht werden kann, ist die Häufigkeit von fehlerbedingten Prozessunterbrechungen. Wie in Abschnitt 3.6.2 beschrieben, kommt diesem Wert bei der Abschätzung der fehlerbehafteten Prozesskennwerte, und damit der Produktivität, große Bedeutung zu.

Dauerflechtversuche mit Verstärkungsfasermaterial (die Verwendung entsprechend dünner Garne vorausgesetzt) könnten auf einer aktuell verfügbaren HFM prinzipiell durchgeführt werden, würden aber nicht mehr als eine erste Einschätzung der Fehlerhäufigkeit ermöglichen. Diese Versuche hätten für die Kennzahlen einer HFM, die tatsächlich für die Produktion von Preforms eingesetzt werden kann, wenig Aussagekraft, da sich deutlich abzeichnet, dass die Maschinenteknik dafür in vielerlei Hinsicht modifiziert werden muss. Es ist deswegen sinnvoll, diese Versuche erst durchzuführen, wenn ein solches System zur Verfügung steht.

## 5.3 Entwicklungsstrategie und Prüfstände

Der Weg zum Einsatz der HFM-Technik in der Serienfertigung von Automobilbauteilen ist nach dieser Bestandsaufnahme noch weit. Der erste Schritt ist die Absicherung der bisherigen Erkenntnisse und theoretischen Vorhersagen mit Hilfe einer Versuchsmaschine (1. Generation). In einem zweiten Entwicklungsschritt kann auf Basis der dann vorliegenden Ergebnisse die Entwicklung einer seriennahen Fertigungsanlage (2. Generation) angegangen werden, mit der die Vorserienabsicherung erfolgen muss, bis schließlich die tatsächliche Serienanlage zum Einsatz kommen kann (3. Generation).

Die hier vorgestellten Überlegungen sollen einen Beitrag zur Entwicklung der Versuchsmaschine leisten. Nach der Analyse der Entwicklungsaufgaben im vorherigen Abschnitt werden verschiedene Szenarien entworfen, auf welchen Wegen die notwendigen Arbeiten angegangen werden können. Die Szenarien werden bewertet und so die kritischsten Aspekte der Entwicklungsarbeit identifiziert.

### 5.3.1 Entwicklungsszenarien

#### 5.3.1.1 Adaption existierender Maschinen

Das erste Entwicklungsszenario sieht die direkte Beschaffung einer HFM aus dem aktuellen Standardmaschinenprogramm der Flechtmaschinenhersteller vor. So kann man sehr schnell mit dem Sammeln weiterer Erfahrung bei der Verarbeitung von Verstärkungsfasern mit Hebelarmflechtmaschinen beginnen (z. B. was das Dauerbetriebsverhalten anbelangt). Möglicherweise lassen sich in diesen Versuchsreihen noch weitere Aspekte identifizieren, die bei den ersten Versuchen noch nicht erkannt wurden und bei der weiteren Maschinenentwicklung berücksichtigt werden müssen.

Einfache Anpassungen (Abschirmung der Elektrik, Abschirmbleche gegen Schmierstoffspritzer, verbesserte Garnführungselemente) könnten an dieser Maschine nachgerüstet werden, wodurch sich die meisten materialspezifischen Verarbeitungsprobleme beseitigen lassen sollten.

### **5.3.1.2 Prüfstände für Teilsysteme der Maschine**

Nach dieser Entwicklungsstrategie sind die Erkenntnisse, die sich auf Basis bestehender Maschinenteknik gewinnen lassen würden, als wenig zielführend für die weitere Maschinenentwicklung einzustufen, weshalb auf die Beschaffung einer Maschine wie im ersten Szenario verzichtet wird. Stattdessen werden Teilaspekte einer Maschine (z.B. der Spulenträger, das Garnführungssystem etc.) anhand von Prüfständen detailliert untersucht. Basierend auf diesen Erkenntnissen soll anschließend eine HFM spezifiziert werden, die so weit durchdacht ist, dass bis zum Einsatz in der Serienfertigung möglicherweise auf eine der drei genannten Maschinengenerationen verzichtet werden kann.

### **5.3.1.3 Interne Neuentwicklung einer Versuchsmaschine**

In diesem Entwicklungsszenario wird direkt mit der eigenen Entwicklung einer Versuchsmaschine für die FVK-Fertigung begonnen. Es wird davon ausgegangen, dass sich die notwendigen Entwicklungsaufgaben aus den erfolgten Untersuchungen bereits mit hinreichender Zuverlässigkeit ableiten lassen. Die Maschinenentwicklung soll die genannten Aspekte zumindest so weit berücksichtigen, dass Probematerial aus den gewünschten Fasertypen (vornehmlich CF-50k) mit der Maschine hergestellt werden kann.

### **5.3.1.4 Externe Neuentwicklung einer Versuchsmaschine**

Das letzte der Szenarien hat die Entwicklung einer Maschine zum Ziel, mit der zumindest Versuchsmaterial gefertigt werden kann und bestenfalls bereits einfache dreidimensional geformte Kerne beflochten werden können. Die Maschine muss allerdings extern gebaut werden. Dazu wird auf Basis der in dieser Arbeit gesammelten Erkenntnisse ein Anforderungsprofil definiert und dem Maschinenhersteller zur Verfügung gestellt. Dieser führt anschließend die Maschinenentwicklung eigenverantwortlich aus.

## **5.3.2 Bewertung der Szenarien**

Die vorgeschlagenen Szenarien für die weitere Entwicklung werden einer Portfolio-Analyse unterzogen und in den beiden Themenbereichen „Technische Aspekte“ und „Entwicklungsrahmenbedingungen“ bewertet. Die Technischen Aspekte decken die in Abschnitt 5.2 identifizierten Entwicklungsaufgaben ab. Die Rahmenbedingungen beinhalten z. B. den Entwicklungsaufwand, den Zeitrahmen der Arbeiten sowie die patentrechtliche Situation. Die Punkte, die in die Bewertung der beiden Teilbereiche eingehen, sind in Tab. A-18 und Tab. A-19 im Anhang aufgeführt.

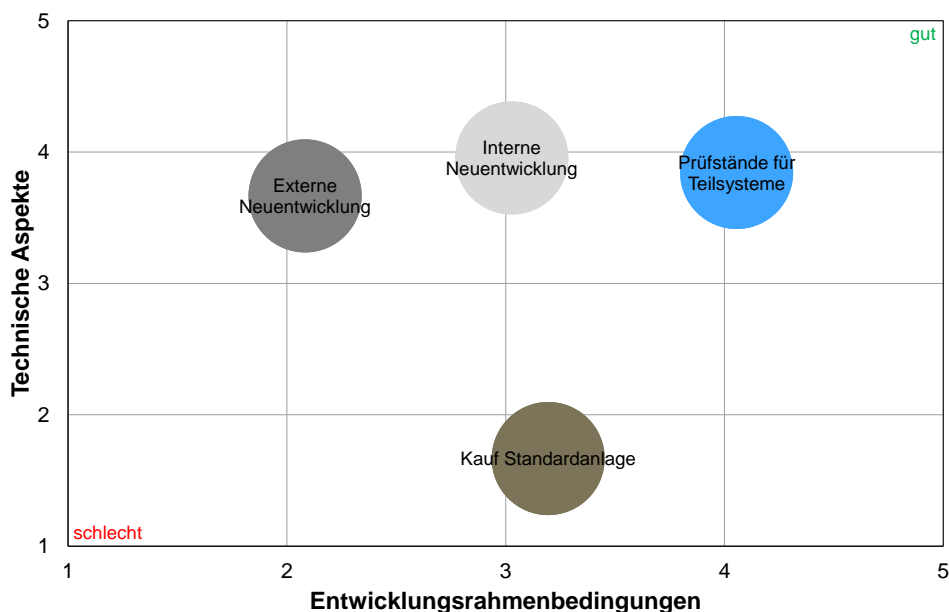
Die einzelnen Aspekte werden hinsichtlich ihrer Bedeutung miteinander verglichen, und es wird eine Gewichtung errechnet (s. Tab. A-20 und Tab. A-21). Anschließend wird für jedes Entwicklungsszenario bewertet, wie gut es die einzelnen Aspekte der beiden Teilbereiche erfüllt (Tab. A-22). Die Bewertungsskala reicht von eins bis fünf, wobei ein Punkt beim geringsten Erfüllungsgrad und fünf Punkte bei vollständiger Erfüllung vergeben werden. Die Bewertungsergebnisse spiegeln in vielen Fällen die subjektive

Einschätzung des Bewertenden wider. Um die Ergebnisse zu objektivieren, wurde die Bewertung deswegen von mehreren fachlich versierten Experten durchgeführt. Strittige Einstufungen wurden in gemeinsamer Diskussion geklärt<sup>27</sup>.

Das Ergebnis der Bewertung ist in Form eines Portfolios in Abb. 5-17 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Adaption einer momentan verfügbaren Maschine die technischen Vorgaben nur unzureichend erfüllt und daher für das weitere Vorgehen als nicht zielführend einzustufen ist. Die drei übrigen Entwicklungsszenarien sind hinsichtlich der technischen Aspekte vergleichbar.

Sie weisen allerdings große Unterschiede in Bezug auf die Entwicklungsrahmenbedingungen auf. Die Entwicklung einer Maschine extern zu beauftragen, ist zwar mit einer raschen Umsetzung verknüpft, wird aber hinsichtlich Kosten, Know-How-Gewinn und Risikobeherrschung schlecht bewertet.

Die Eigenentwicklung einer Maschine erscheint attraktiv, allerdings sind mit einem solchen Vorgehen hohe Risiken verbunden, da die notwendige maschinenbauliche Erfahrung am LCC nur eingeschränkt vorhanden ist. Zielführend ist, zunächst anhand von Prüfständen die Teilaspekte des Systems genauer zu analysieren, um das Entwicklungsrisiko zu senken. Nachteilig ist dabei eine längere Entwicklungsdauer.



**Abb. 5-17: Portfolio-Analyse der Entwicklungsszenarien**

Je weiter rechts oben im Diagramm sich ein Szenario befindet, desto besser schneidet es in der Kombination beider Bewertungsbereiche ab.

<sup>27</sup> Dank gilt an dieser Stelle meinen Kollegen Herrn Dr. Michael Brand und Herrn Dr. Maximilian Mitwalsky sowie Herrn Bernd Veihelmann von BMW für ihre Mitarbeit bei der Bewertung der Szenarien.

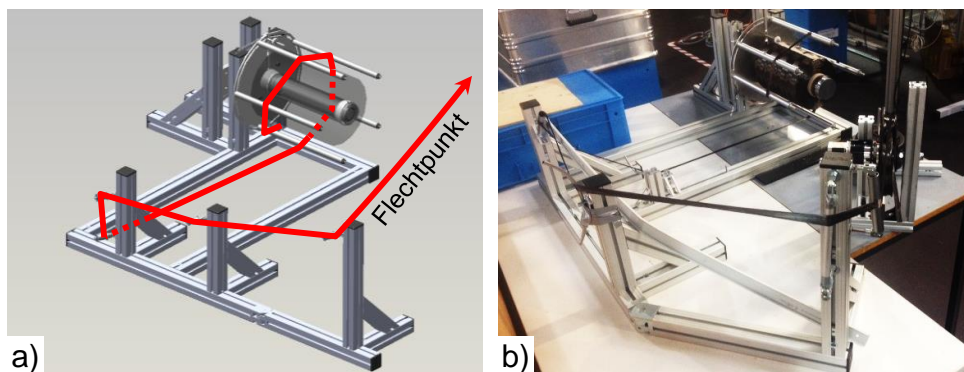
### 5.3.3 Prüfstände

Anhand der Gewichtung in Tab. A-18 lassen sich die technischen Teilaspekte identifizieren, denen besondere Bedeutung zukommt und die deswegen vorrangig zu untersuchen sind. Für die Bereiche „Spulenträger und Garnführungssystem“, „Kernhandhabung“ und „Kerndurchführung“ werden daher Prüfstände entwickelt, mit denen sich grundlegende Erkenntnisse ermitteln lassen Sie können zu einem späteren Zeitpunkt in die Entwicklung einer Maschine einfließen.

#### 5.3.3.1 Spulenträger und Garnführungssystem

Der Prüfstand<sup>28</sup> für Spulenträger und Garnführungssystem bildet den Verlauf des Garns in einer zukünftigen FVK-HFM von der Spule über den Umlenkhebel bis zum Flecht- punkt in realer Größe ab (s. Abb. 5-19). Der Aufbau enthält eine Spulenhalterung, in die eine CF-Herstellerspule eingesetzt werden kann. In die Halterung ist ein Garnbremssystem integriert, das den Spulendurchmesser über eine Abtastrolle ermittelt und die Bremskraft entsprechend einstellt, so dass diese über den kompletten Abspulvorgang konstant gehalten werden kann. Die Bremsung der Spule erfolgt über eine Trommel- bremsse, die im Träger integriert ist. So sollen die Belastung des Garns durch die Bremse auf ein Minimum reduziert und Bauraum eingespart werden. Das Bremssystem erweist sich allerdings als schwierig regelbar und muss weiter verbessert werden.

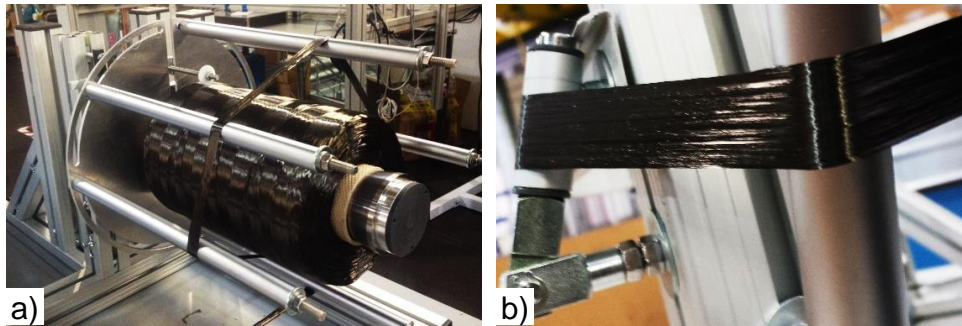
Die einzelnen Umlenkelemente des Garnführungssystems sind an einem verstellbaren Rahmen montiert, so dass sich der Garnverlauf über verschieden geformte Umlenkhebel und Hebelstellungen simulieren lässt. Durch einen Abzugsmotor, der sich an der Stelle des Flechtpunkts einer gedachten Maschine befindet, kann das Garn vom Spulenträger über die Führungselemente abgezogen werden, um den Flechtvorgang zu simulieren.



**Abb. 5-18: Übersicht des Spulenträgerprüfstands**

- CAD-Modell des Prüfstands mit schematischem Garnverlauf zum Flecht- punkt.
- Winklig zueinander eingestellte Gestellelemente am Prüfstand bilden den Verlauf des Garns über einen geknickten Umlenkhebel nach.

<sup>28</sup> Entwickelt im Rahmen einer Semesterarbeit von Christian Poxleitner [115].



**Abb. 5-19: Details des Spulenträgerprüfstands**

- a) Detailansicht der Abspulstelle mit Garnführungsstangen, durch die der Winkel, unter dem das Garn von der Spule gezogen wird, minimiert werden kann.
- b) Verchromte Gleitelemente leiten das Garn zum Flechtpunkt und spreizen es dabei auf.

Bremskraft und Garngeschwindigkeit lassen sich dabei innerhalb eines Bereichs einstellen, der von den erwarteten Einsatzparametern abgeleitet ist. Die Garnführungselemente können ausgetauscht werden, so dass verschiedene getestet und entsprechend des untersuchten Garnmaterials optimiert werden können. Bei der Untersuchung der CF-50k-Fasern werden z.B. verchromte Umlenkstäbe eingesetzt, damit die Rovings während des Gleitens über die Elemente eher zusätzlich aufgespreizt als eingeschnürt werden (s. Abb. 5-19). Es zeigt sich, dass das Führen breiter Bänder im statischen Fall mit dieser Methode sehr gut funktioniert. Der Betrieb der Maschine, bei dem sich der Umlenkhebel sehr schnell auf-und-ab-bewegt ist damit allerdings nicht ansatzweise abgebildet. Der Prüfstand muss für zukünftige Untersuchungen dahingehend erweitert werden, dass das Garn über einen bewegten Umlenkhebel läuft, um zu ermitteln, wie prozesssicher das Führen der breiten Garne auch unter diesen Bedingungen funktioniert.

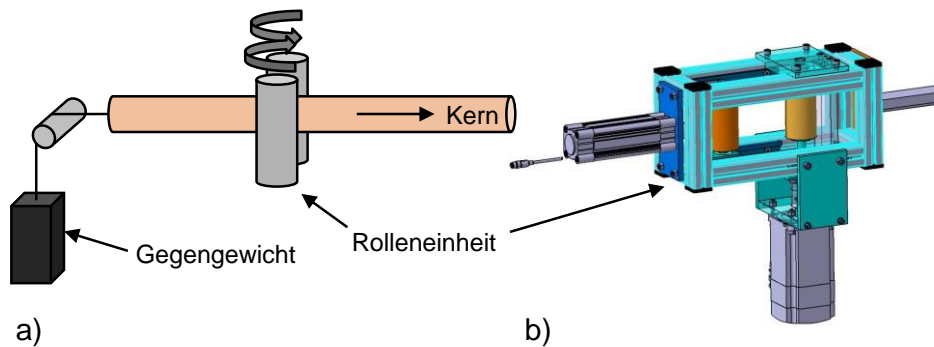
Die am Prüfstand gewonnenen Erkenntnisse geben erste Hinweise, wie das Garnführungssystem und der Umlenkhebel einer HFM gestaltet werden sollten, und liefern Ansätze zur Konstruktion von Spulenträger und Bremssystem.

### 5.3.3.2 Kernhandhabung

Wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben, werden beim Betrieb einer HFM wesentlich höhere Kernvorschubgeschwindigkeiten erwartet, als sie von Klöppelflechtmaschinen bekannt sind. Nachdem ein roboterbasiertes Handhabungssystem an die Grenzen kommen wird, müssen Alternativen entwickelt werden. Es wird deshalb ein Prüfstand aufgebaut<sup>29</sup>, mit dem das Fördern des Kerns per Rollenabzug untersucht wird (s. Abb. 5-20).

Vorrangig soll dadurch ermittelt werden, ob sich die erwarteten Abzugsgeschwindigkeiten mit einem solchem System überhaupt erreichen lassen. Die Untersuchungen erfolgen dabei vor dem Hintergrund der Herstellung von Heavy-Tow-Biaxialgeflechten.

<sup>29</sup> Im Rahmen einer Semesterarbeit von Michael Sanwald [120].



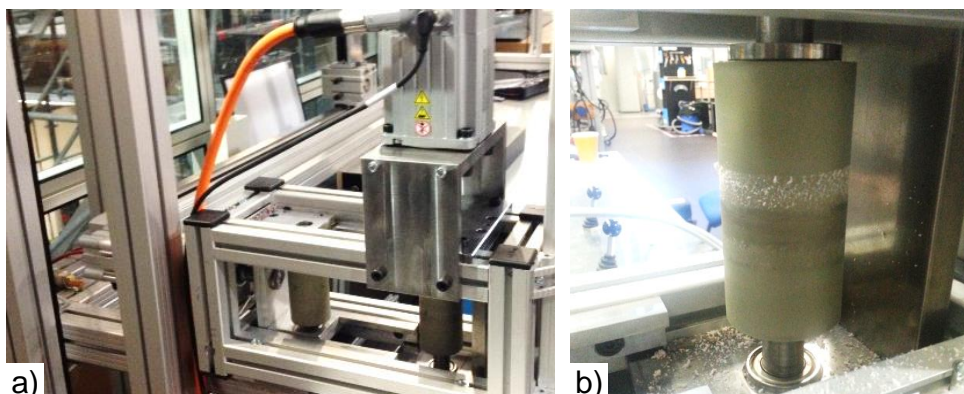
**Abb. 5-20: Prüfstand zur Kernhandhabung**

- a) Schematische Darstellung des Prüfstands  
 b) Modell der Rollenabzugseinheit mit Andruckzylinder und Abzugsmotor

Wie Brand [23] zeigt, steigen bei diesen Geflechten die Abzugskräfte aufgrund des geringen Flechtwinkels und der titerbedingt hohen Flechtfadenspannung massiv an. Eine zentrale Frage ist deswegen, ob sich die benötigte Abzugskraft mit einem Rollensystem auf den Kern übertragen lässt. Da diese Kraft maßgeblich vom Anpressdruck der Rollen auf den Kern bestimmt wird, besteht die Gefahr, dass der Kern, z. B. bei Verwendung eines Blasformkerns, zerdrückt oder zumindest das Geflecht beschädigt wird.

Weil der Reibkoeffizient zwischen Rolle und Kern entscheidend ist, werden unterschiedlich beschichtete Förderrollen untersucht. Die Geflechtspannung wird am Prüfstand durch ein Gegengewicht nachgestellt, das über ein Seil und eine Umlenkrolle am Kern, bzw. an einem auf dem Kern befindlichen Geflecht, befestigt ist (s. Abb. 5-20 a)).

In Versuchen werden Kerndurchmesser, Anpresskraft und Gegengewicht variiert. Der Kern kann bis zu einer Geschwindigkeit von  $800 \text{ mm s}^{-1}$ , bei der das Drehzahllimit des Motors erreicht ist, gefördert werden. Die Anpresskraft bleibt dabei gering genug, um den Kern nicht zu beschädigen. Der Einsatz einer Rollenfördereinheit am Flechtpunkt stellt nach diesen Versuchen einen gangbaren Weg der Kernhandhabung bei HFM dar.



**Abb. 5-21 Abbildungen des Rollenabzugsprüfstands**

- a) Blick auf das geöffnete Rollenpaar und den oben montierten Antriebsmotor.  
 b) Beschädigte Beschichtung aufgrund von „Durchdrehen“ der Antriebsrolle.

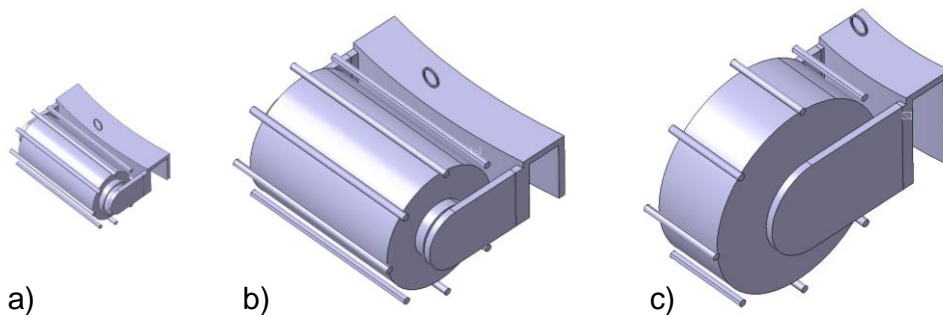


Dennoch müssen weitere Untersuchungen folgen. Die bisherigen Ergebnisse gelten ausschließlich für gerade Kerne, bei realer Anwendung muss das Fördern auch mit gekrümmten Flechtkernen prozesssicher möglich sein. Eine weitere Herausforderung stellen Durchmesseränderungen dar. Erste Versuche zeigen, dass die Anpresskraft der Rollen an Rampen geometrisch bedingt so stark zurückgeht, dass keine ausreichende Kraftübertragung auf den Kern mehr möglich ist. Die Rolle dreht dann „durch“. In der Folge wird der Kern nicht mehr gefördert und die Beschichtung der Rolle sowie das Geflecht werden beschädigt (s. Abb. 5-21 b)). Ein Rollenfördersystem für den Einsatz mit Realbauteilen muss daher auf jeden Fall aus mehreren interagierenden Rollenpaaren bestehen, um unterbrechungsfreie Kraftübertragung zu gewährleisten.

### 5.3.3.3 Virtuelles Gesamtmaschinenmodell

Das Führen von 3D-Kernen durch die Flechtmaschine wird an einem virtuellen Prüfstand untersucht. Ein in der CAD<sup>30</sup>-Umgebung CATIA V5 aufgebautes Modell<sup>31</sup> ermöglicht eine Visualisierung der zukünftigen Maschine. Am Modell lässt sich überprüfen, ob Kerne mit den geometrischen Eigenschaften, die laut den Gestaltungsrichtlinien für Geflechtbauteile zu erwarten sind, durch die Maschine bewegt werden können.

Die Dimensionen der Maschine hängen von verschiedensten Parametern ab. Vorrangig sind dies die Spulenzahl sowie die Form, Größe und Anordnung der Spulen und Umlenkhebel. Diese Stellgrößen werden in einer parametrischen CAD-Konstruktion miteinander gekoppelt. Indem die übrigen Konstruktionsgrößen über mathematische Bezüge von diesen abhängen, kann das Modell der kompletten Maschine über die Vorgabe weniger Werte erstellt werden.



**Abb. 5-22: Verschieden große Flechtgarnspulen**

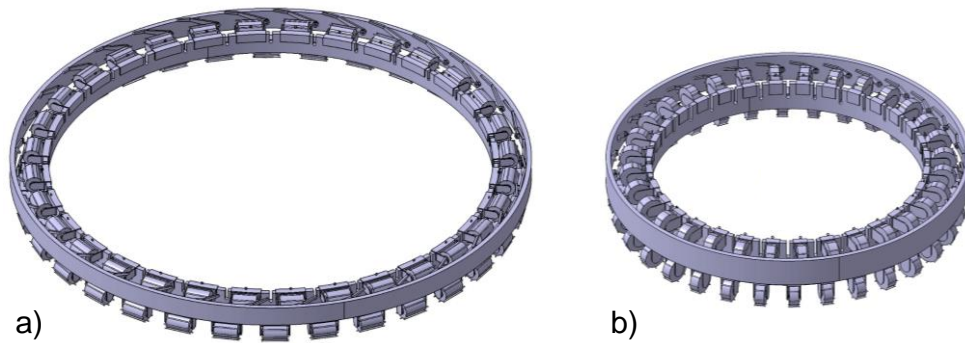
Beispiele für Spulen mit verschiedenen Eingabeparametern aus dem CAD-Modell.

- |   |               |                    |
|---|---------------|--------------------|
| a) Drahtflechtspule S3 (Versuche):                        | Breite 100 mm | Durchmesser 80 mm  |
| b) CF-Herstellerspule ( $V_{S,FF} = 5000 \text{ cm}^3$ ): | Breite 250 mm | Durchmesser 180 mm |
| c) „Hohe Spule“ ( $V_{S,FF} = 5000 \text{ cm}^3$ ):       | Breite 100 mm | Durchmesser 266 mm |

<sup>30</sup> Computer Aided Design

<sup>31</sup> Im Rahmen einer Semesterarbeit von Florian Sommer [141].





**Abb. 5-23: Vergleich von HFM mit je 64 unterschiedlich großen Spulen**

- a) CF-Herstellerspulen: Außendurchmesser der Maschine etwa 5,5 m.
- b) „Hohe Spulen“: Außendurchmesser der Maschine etwa 4,0 m

So wird die zu erwartende Größe einer HFM für Faserverbundbauteile greifbar. Durch Variation der Designparameter kann untersucht werden, wie sich die Änderung von Spulenzahl oder –größe auf die Dimensionen der Gesamtmaschine auswirken. Der Innendurchmesser der Gleitbahn sollte möglichst groß sein, weil es dieser Bereich ist, der potenziell als Freiraum im Zentrum der Maschine zur Verfügung steht, um die Flechtkerne hindurchzuführen und die benötigten Nebenaggregate zu installieren. Es zeigt sich, dass bei der hohen benötigten Spulenzahl auf jeden Fall ausreichend Platz zur Verfügung steht, wenn eine Maschinenkonstruktion ohne zentrale Antriebswelle gelingt. Der Außendurchmesser der Maschine sollte hingegen so gering wie möglich ausfallen, damit die Maschine möglichst wenig Platz einnimmt. Von besonderem Interesse sind zudem die Gleitbahnlänge, die direkten Einfluss auf die Maschinengeschwindigkeit hat, und das Gesamtfaservolumen, das gerüstet werden kann. Diese beiden Faktoren beeinflussen direkt die Produktivität, die sich mit der Maschine erreichen lässt.

Schließlich ist die Spulengestaltung einer der zentralen Aspekte, die sich mit dem Parametermodell untersuchen lassen. Dabei ist es zum einen möglich zu vergleichen, wie sich der Einsatz von CF-Herstellerspulen (Abb. 5-22 b)) anstelle der bislang verwendeten Drahtflechtspulen (Abb. 5-22 a)) auf die Zielgrößen auswirkt. Zum anderen kann das Aussehen der Spulen, im Besonderen deren Verhältnis von Durchmesser zu Breite, so optimiert werden, dass bei gleichbleibendem Spulenvolumen die Abmessungen der Maschine möglichst gering ausfallen.

Dass die Spulenform einen sehr starken Einfluss hat, wird beispielhaft in Abb. 5-23 dargestellt. Bei gleichem Spulenvolumen, also auch gleicher Garnmenge in der Maschine, reduziert sich deren Außendurchmesser für die Variante mit „hohen Spulen“ (aus Abb. 5-22 c)) deutlich.

Damit bei so hohen Spulen das Über- bzw. Unterfahren des von außen kommenden Garns durch die Innenspulen möglich wird, muss der Umlenkhebel allerdings wesentlich größere Schwenkbewegungen ausführen. Da der Gleitbahndurchmesser geringer ausfällt, steht für diese Schwenkbewegung gleichzeitig weniger Zeit zur Verfügung, so

dass der Hebel wesentlich stärker beschleunigt werden muss. Nach diesen Untersuchungsergebnissen ist davon auszugehen, dass ein möglichst geringer Außendurchmesser der Maschine auch eine niedrigere Betriebsgeschwindigkeit zur Folge hat. Wie sich diese Interaktionen auf die Produktivität der Maschine auswirken, bleibt noch im Detail zu untersuchen.

## 6 Produktivität des Hochgeschwindigkeitsflechtverfahrens

Nach den Erkenntnissen des vorhergehenden Kapitels kommt dem Einsatz der Hebelarmflechttechnik für die Fertigung von FVK-Bauteilen hohes Potenzial zu. Auch wenn noch eine ganze Reihe konstruktiver Herausforderungen zu lösen sind, bis das Verfahren tatsächlich zum Einsatz kommen kann, soll im Folgenden abgeschätzt werden, welche Produktivität damit zukünftig erreicht werden kann. Ein Vergleich mit der Leistungsfähigkeit der in Kapitel 4 analysierten Klöppelflechttechnik schließt die Betrachtungen ab.

### 6.1 Aufbau des Berechnungsmodells

Analog zum Vorgehen bei der Erstellung des Berechnungsmodells für die Produktivität des Klöppelflechtverfahrens in Kapitel 3 wird ein angepasstes und in einigen Punkten vereinfachtes Modell für das Hebelarmflechtverfahren entwickelt. Mit diesem können die Bewertungskriterien Ablagerate und Verfügbarkeit in gleicher Weise errechnet werden, um sie anschließend mit den entsprechenden Werten des Klöppelflechtverfahrens zu vergleichen.

#### 6.1.1 Maschinenablagerate

Änderungen ergeben sich zunächst bei der Berechnung der Maschinenablagerate. Abb. 6-1 zeigt, in welchen Bereichen des Basisberechnungsmodells Anpassungen vorgenommen werden (vgl. Abb. 3-4). Es wird weiterhin das Standardbauteil verwendet, dessen Parameter in Tab. 3-1 definiert sind. Die Unterteilung in verschiedene Bauteilbereiche entfällt.

Beim Geflecht vereinfacht sich die Betrachtung deutlich, da vorausgesetzt wird, dass mit der HFM vorerst nur Biaxialgeflechte gefertigt werden können. Konzepte zur Einbringung von Längsfäden (vgl. Abschnitt 5.2.4) werden nicht weiter berücksichtigt, da noch völlig unklar ist, wie eine konkrete Lösung aussehen kann. Voraussichtlich wird sich hierbei eine Faserarchitektur ergeben, die sich so fundamental von den bekannten Triaxialgeflechten unterscheidet, dass ein direkter Vergleich mit den beim Klöppelflechtprozess analysierten Basisgeflechten (Standard-, QI- und Hybrid-Geflecht) nicht sinnvoll ist. Es wird daher in der Auswertung nur das Heavy-Tow-Geflecht betrachtet. Modellparameter, die deswegen entfallen können, sind in Abb. 6-1 durchgestrichen.

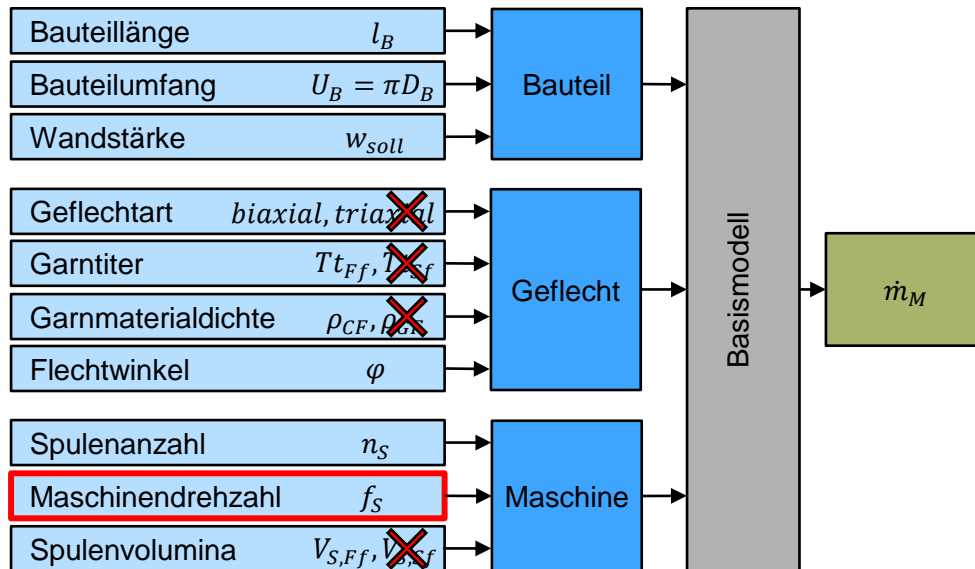


Abb. 6-1: Änderungen am Basisberechnungsmodell

Maschinenseitig ändert sich der wichtigste Parameter: die Maschinengeschwindigkeit. Diese wird nicht mehr als Flügelraddrehzahl vorgegeben, sondern fließt in Form der bei Hebelarmflechtmaschinen gebräuchlichen Maschinen- bzw. Flechkopfdrehzahl in die Berechnung der Maschinenablagerate ein. Sie wird dort als Spulenumlauffrequenz  $f_S$  bezeichnet. Mit dem bekannten Zusammenhang von Frequenz und Umlaufdauer nach Formel (3-13) kann analog zu Formel (3-18) die Maschinenablagerate für HFM errechnet werden:

$$\dot{m}_M = \dot{m}_{Ff} = \frac{U_B * T t_{Ff}}{\sin \varphi_B * T_S} * n_S \quad (6-1)$$

Für die Produktivitätsberechnung wird wie beim Klöppelflechtverfahren eine Referenzmaschine definiert, deren Eckdaten in Tab. 6-1 zusammengefasst sind. Spulenzahl und –volumen sind identisch mit den Werten der Klöppelflechtmaschine, um Berechnungsergebnisse direkt miteinander vergleichen zu können. Das gewählte Spulenvolumen wird als realitätsnah betrachtet, da es in etwa beim Wert von  $370 \text{ cm}^3$  liegt, den die Spulen der beiden Versuchsmaschinen aufweisen (vgl. Fußnote 20 auf Seite 170).

Für die Referenzmaschine wird eine Drehzahl von  $45 \text{ min}^{-1}$  angenommen. Diese orientiert sich an der Geschwindigkeit der getesteten Versuchsmaschine BMV 16 von Niehoff, die eine maximale Maschinendrehzahl von  $180 \text{ min}^{-1}$  erreicht. Die Diskrepanz der beiden Werte ergibt sich aus der unterschiedlichen Spulenzahl. Wenn sich die Spulen mit derselben Geschwindigkeit bewegen, dauert der Umlauf bei der vierfachen Spulenzahl (64 gegenüber 16) viermal so lang. Dies entspricht einer Viertelung der Drehzahl. Ein Vergleich macht den Geschwindigkeitsvorteil der HFM deutlich: Eine Klöppelflechtmaschine müsste mit einer Flügelraddrehzahl von  $720 \text{ min}^{-1}$  angetrieben werden, um dieselbe Spulenumlauffrequenz zu erreichen.

Tab. 6-1: Eingabeparameter für die Referenz-HFM

Parameter	Variable	Wert	SI-Wert
Spulenanzahl	$n_s$	64	-
Maschinendrehzahl	$f_s$	$45 \text{ min}^{-1}$	$0,75 \text{ s}^{-1}$
Flechtspulenvolumen	$V_{s,ff}$	$300 \text{ cm}^3$	$0,000300 \text{ m}^3$

## 6.1.2 Produktionssystem, Rüsten, Fertigungsfehler

Änderungen am prinzipiellen Aufbau des Gesamtmodells müssen nicht vorgenommen werden. Die Ablageraten und Verfügbarkeiten werden für die Produktivitätsbewertung auf den verschiedenen in Abb. 3-3 dargestellten Bewertungsebenen berechnet.

### 6.1.2.1 Produktionssystem

Beim Produktionssystem wird auch für den Einsatz mit HFM die als am effizientesten identifizierte Variante ELFM-UB-P zugrunde gelegt. Der Pendelbetrieb scheidet aus, weil die Flechtrichtung bei den erreichbaren, hohen Flechtgeschwindigkeiten nicht schnell genug gewechselt werden kann.

Als Kernführungssystem wird der Einsatz einer flechtpunktnah montierten Rollenführung mit Roboterunterstützung angenommen (s. Abb. 6-2). Das Kernführungssystem wird sich in der Ausführung deutlich von der bei Klöppelflechanlagen eingesetzten Variante unterscheiden. Seine exakte technische Gestaltung ist für die vorgenommene Betrachtung jedoch unerheblich. Solange der Beschnitt weiterhin prozessparallel möglich ist, ändert sich an der Produktivitätsberechnung nichts, da keine Nebenzeiten anfallen.

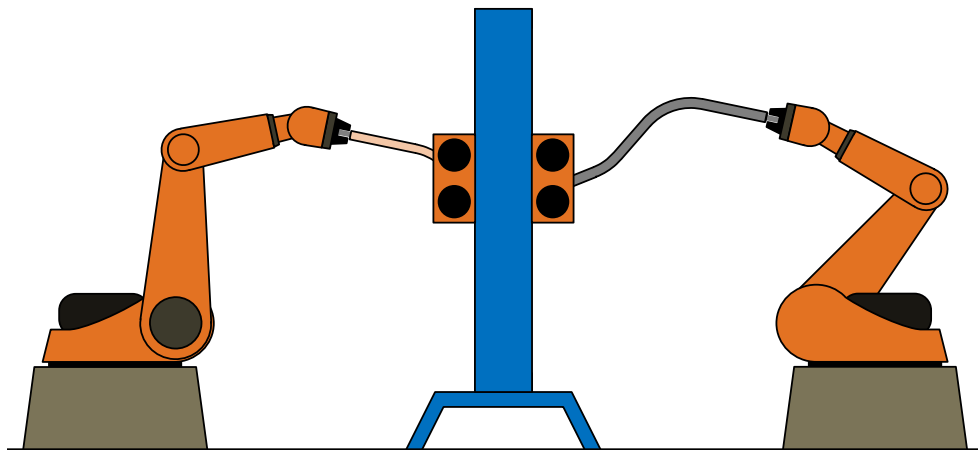


Abb. 6-2: Handhabungssystem bei HFM

Ein möglicher Aufbau des Handhabungssystems ist die Kombination einer flechtpunktnahen Rollen- oder Raupenführungseinheit mit Robotern, die die Zu- bzw. Abführung der Kerne übernehmen.

Ein bisher nicht berücksichtigter Aspekt bei der Betrachtung des Produktionssystems kann sich bei HFM allerdings auf die Produktivität der Flechtanlage auswirken: Die maximale Geschwindigkeit des Handhabungssystems kann die limitierende Größe für die Maschinengeschwindigkeit sein. Es muss deswegen berücksichtigt werden, wie hoch die Kernvorschubgeschwindigkeiten sind, die bei bestimmten Flechtmaschinendrehzahlen erreicht werden. Für die Berechnungen wird angenommen, dass die Kernförderung nur bis zu einer Geschwindigkeit von  $500 \text{ mm s}^{-1}$  mit prozessparallelem Beschnitt technisch beherrschbar ist<sup>1</sup>.

### 6.1.2.2 Rüsten

Für das Rüsten wird ebenfalls das Szenario angenommen, das sich in den Betrachtungen als besonders effizient herausgestellt hat, nämlich die Variante des schnellen Spulenswechsels von Hand mit zwei Mitarbeitern (SH-2MA). Die Erfahrungen aus den Versuchen mit momentan existierender HFM-Technik (vgl. Abschnitt 5.1.1) zeigen allerdings deutlich höhere Rüstzeiten pro Spule, als sie mit den Vorgabezeiten aus Tab. A-12 zustande kommen, die für die Klöppelflechttechnik angenommen werden. Das ist darauf zurückzuführen, dass das Spulenträgersystem von HFM noch nicht für möglichst kurze Rüstzeiten optimiert ist. Mutmaßlich war das bislang nicht notwendig, da bei den vergleichsweise langen Maschinenzykluszeiten, die mit den verarbeiteten dünnen Drähten erreicht werden, eine etwas längere Rüstdauer in Bezug auf die zyklusbezogene Produktivität kaum ins Gewicht fällt.

Die Vereinfachung des Rüstvorgangs gehört daher eindeutig zu den Vorgaben bei der Entwicklung eines verbesserten Spulenträgers (vgl. Abschnitt 5.2.3) für künftige HFM-Anlagen zur Großserienfertigung von FVK-Bauteilen. Im besten Fall kann ein Schnellwechselsystem entwickelt werden, mit dem das Einsetzen der neuen Spulen ähnlich schnell funktioniert wie bei der in Abschnitt 3.5.1.2 beschriebenen Variante. Da nicht ansatzweise abgeschätzt werden kann, welche Rüstzeiten sich mit einem solchen System erreichen ließen, wird in der Berechnung vorerst dieselbe Rüstdauer verwendet, wie sie mit dem realistischen Vorgabezeitszenario bei der Klöppelflechttechnik erreicht wird.

### 6.1.2.3 Fehlerzeiten

In Ermangelung belastbarer Erfahrungswerte (vgl. Abschnitt 5.2.7.2) für die Fehlerhäufigkeit bei der Verarbeitung von Verstärkungsfasern mit HFM werden auch für die Fehlerzeitbetrachtungen dieselben Annahmen wie beim Klöppelflechtverfahren zugrunde gelegt.

---

<sup>1</sup> Diese Annahme wurde in Abstimmung mit BMW getroffen und basiert auf den dort und am LCC vorliegenden Erfahrungen mit Kernführungssystemen sowie den Erkenntnissen aus den Semesterarbeiten von Tobias Kistler [118], Florian Rapp [122] und Michael Sanwald [120]. Sie bleibt aber letztlich spekulativ.

### 6.1.3 Maschinengröße und -geschwindigkeit

Da eine HFM in der Größe, wie sie zur Herstellung von FVK-Bauteilen benötigt wird, momentan weder in Bezug auf die Spulengröße noch in Bezug auf die Spulenzahl verfügbar ist, sind die Leistungsdaten für eine solche Maschine unbekannt. Um ihre Produktivität dennoch abschätzen zu können, wird eine Extrapolationsregel benötigt, mit der von den Leistungsdaten existierender Maschinen auf diejenigen einer zukünftigen HFM für FVK geschlossen werden kann. Die Herleitung einer solchen Skalierungsregel erfolgt ähnlich wie bei der Beschreibung des Zusammenhangs von Flügelraddrehzahl und Spulenvolumen für die Klöppelflechttechnik in Abschnitt 3.7.2.

Die Geschwindigkeit der Maschine wird bei HFM allerdings durch andere konstruktive und physikalische Prinzipien eingeschränkt. Während bei den Klöppelflechtmaschinen die Biegespannung im Klöppelfuß als begrenzender Faktor für die Maschinengeschwindigkeit zugrunde gelegt wurde, wird die maximale Geschwindigkeit bei Hebelarmflechtmaschinen laut Aussagen der Maschinenhersteller vor allem durch zwei Größen limitiert: Zum einen ist es die Relativgeschwindigkeit zwischen den Spulenträgerschlitten und der Gleitbahn, da der Schmierfilm, der die Reibkräfte zwischen den beiden Partnern über Flüssigkeitsreibung stark reduziert, oberhalb einer bestimmten Grenzgeschwindigkeit abreißt. Zum anderen darf die Beschleunigung an der Spitze des Umlenkhebels einen gewissen Wert nicht überschreiten, da sonst das verarbeitete Garn oder der Hebel selbst brechen könnten.

Relative Gleitbahngeschwindigkeit und Hebelspitzenbeschleunigung werden jeweils von vielen einzelnen Parametern beeinflusst, die je nach konkreter konstruktiver Gestaltung über die von einer bestimmten Maschine erreichbare Maximalgeschwindigkeit entscheiden. Die Einflussgrößen reichen dabei von der Art des verwendeten Schmieröls über die Oberflächenbearbeitung der Gleitflächen bis hin zur Wahl des Materials für den Umlenkhebel<sup>2</sup>. Viele dieser Parameter interagieren. Eine Abschätzung der Maschinengeschwindigkeit, die möglichst viele dieser Phänomene zu erfassen versucht, ist ohne eine extrem tiefgreifende maschinenbauliche Analyse der Maschine zwangsweise mit großen Unsicherheiten behaftet. Es wird daher entschieden, eine relativ einfache Skalierungsregel auf Basis konstanter Relativgeschwindigkeit zwischen Spulenschlitten und Gleitbahn herzuleiten, um mit dieser das Verhalten der zu entwickelnden HFM für FVK vorherzusagen. Diese Regel wird als ausreichend erachtet, um damit eine erste, plausible Produktivitätsabschätzung durchzuführen.

---

<sup>2</sup> Der Einsatz von Umlenkhebeln aus CFK wurde vor einigen Jahren erprobt und von Spirka Schnellflechter auch zum Patent angemeldet [45]. Dieses wird mittlerweile aber nicht mehr aufrechterhalten. Für den Drahtflechtbereich scheint sich diese Technologie nicht in größerem Umfang durchgesetzt zu haben, wenn auch Maschinen von Spirka Schnellflechter teilweise mit solchen Hebeln ausgestattet wurden. Im Rahmen der Neuentwicklung eines speziell für CF-Verarbeitung optimierten Garnführungssystems könnte dieser Lösungsansatz noch einmal detailliert betrachtet werden.

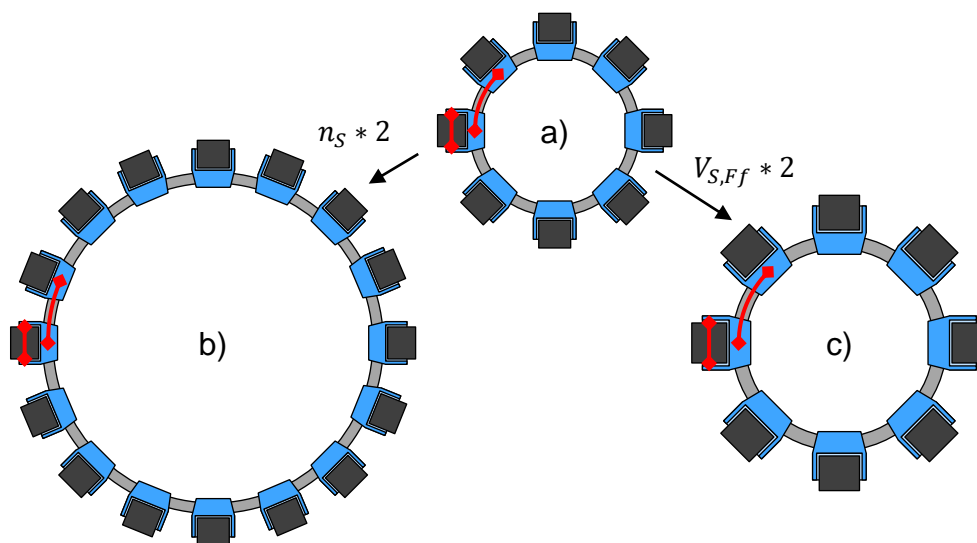
### 6.1.3.1 Herleitung des gesuchten Zusammenhangs

Die relative Gleitbahngeschwindigkeit  $v_{G,rel}$  hängt von der Länge der Gleitbahn  $l_G$  und der Umlaufdauer der Spulen  $T_S$  ab. Da sich die Gleitbahn selbst mit den daran befestigten Außenspulen um das Maschinenzentrum dreht, ist die Relativgeschwindigkeit zwischen der Bahn und den in Gegenrichtung kreisenden Trägerschritten der Innenspulen doppelt so hoch wie die Geschwindigkeit der Bahn selbst (vgl. Abschnitt 2.3.2.1).

$$v_{G,rel} = 2 * \frac{l_G}{T_S} = 2 * l_G * f_S \quad (6-2)$$

Die Gleitbahnlänge wird außer vom individuellen Design der Maschine, das den Abstand der Spulenträger auf der Bahn vorgibt, maßgeblich von zwei Faktoren bestimmt: der Spulenzahl und der Spulengröße. Nach Analyse verschiedener Hebelarmflechtmaschinen (vgl. Abb. 5-1 b), Abb. 5-3 b) und Abb. 5-14), wird vereinfachend angenommen, dass der Abstand zwischen zwei Spulenträgern auf der Bahn in etwa der doppelten Breite einer Spule  $b_S$  entspricht<sup>3</sup>. Die Gleitbahnlänge beträgt dann:

$$l_G = 2 * \frac{n_S}{2} * b_S = n_S * b_S \quad (6-3)$$



**Abb. 6-3: Skalieren von Hebelarmflechtmaschinen**

Schematische Darstellung der Gleitbahn einer HFM (grau) mit den Spulenträgern (blau) und den Innenspulen (dunkelgrau). Spulenbreite und Spulenträgerabstand sind rot markiert.

- Grundlayout der betrachteten Maschine.
- Doppelte Flechtspulenzahl: Verdopplung der Gleitbahnlänge.
- Doppeltes Flechtspulenvolumen: Gleitbahnverlängerung auf das  $\sqrt[3]{2}$ -Fache.

<sup>3</sup> Sommer [141] wendet eine ähnliche Vereinfachung an und drückt den Abstand der Spulen in Abhängigkeit der Spulenbreite aus, variiert diesen allerdings dann.

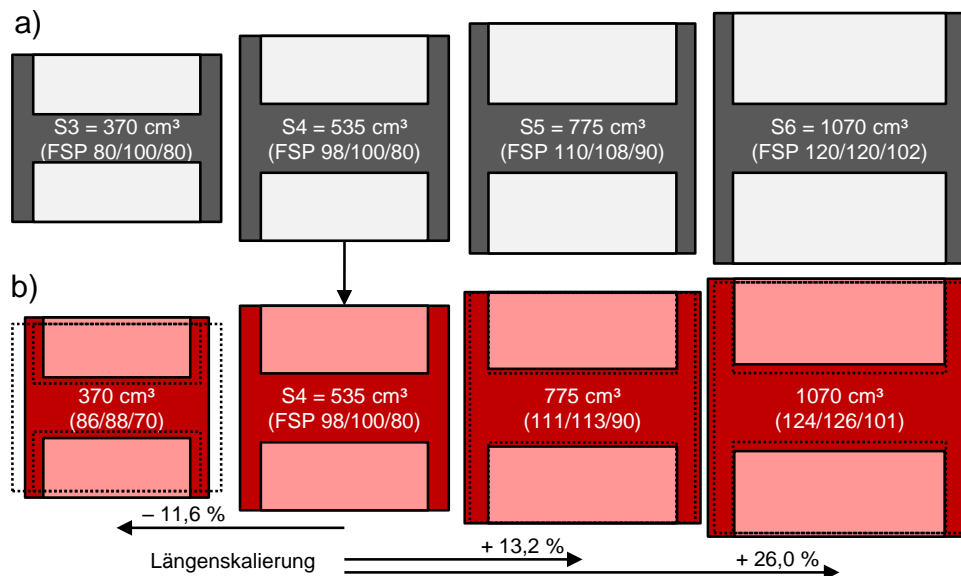


Für die Berechnung der Gleitbahnlänge in Formel (6-3) wird die Spulenzahl halbiert, da sich nur die Innenspulen, also die Hälfte der Spulen, auf den Gleitschlitten befinden. Die Gleitbahn einer Hebelarmflechtmaschine ist also näherungsweise so lang wie die Breite der eingesetzten Spulen multipliziert mit ihrer Gesamtspulenzahl.

Abb. 6-3 illustriert, wie es sich auf die Länge der Gleitbahn auswirkt, wenn die beiden bestimmenden Faktoren, Spulenzahl bzw. Spulengröße, geändert werden. Vernachlässigt man Abweichungen im Spulenträgerabstand, die mit der geänderten Krümmung der Gleitbahn einhergehen, ist die Gleitbahnlänge linear abhängig von der Anzahl der Spulenträger, solange dieselbe Spulengröße verwendet wird.

Eine Änderung der Spulengröße, für die wieder synonym der Begriff „Spulenvolumen“ verwendet wird, beeinflusst ebenfalls die Gleitbahnlänge. Es wird, wie bei den Klöppelflechtmaschinen, von geometrischer Ähnlichkeit beim Skalieren der Spulen- bzw. Maschinengröße ausgegangen.

Abb. 6-4. zeigt in Teilabbildung a) schematisch in korrekter Relation zueinander die Größen der bei real existierenden Maschinen eingesetzten Spulen (vgl. hierzu das Flechtspulen-Lieferprogramm der Fa. Steintex [137]) im Schnitt. Teilabbildung b) skaliert die Spulen ausgehend von der Spule S4 mit  $535 \text{ cm}^3$  Volumen geometrisch ähnlich auf die Spulenvolumina der kleineren bzw. größeren Realspulen. Der rot dargestellten geometrisch ähnlichen Spule ist jeweils die „echte“ Spule aus Teilabbildung a) hinterlegt. Nur beim Skalieren auf die kleinere  $370 \text{ cm}^3$ -Spule sind Unterschiede erkennbar.



**Abb. 6-4: Skalieren von Flechtspulen bei HFM**

Die Zahlen in der Klammer geben jeweils die Hauptabmessungen der Spulen an, Es gilt folgender Schlüssel: (Spulendurchmesser/Spulenbreite außen/Spulenbreite innen).

a) Schnittzeichnungen real eingesetzter Flechtmaschinenspulen nach [137].

b) Abmessungen von Spulen, die ausgehend von der S4-Spule geometrisch ähnlich auf dieselben Spulenvolumina der Realspulen skaliert werden.

Diese sind darauf zurückzuführen, dass die kleinere S3-Spule mit derselben Breite gestaltet wurde wie die S4-Spule, um die beiden im selben Spulenträger einsetzen zu können. Die geringen Unterschiede in der Spulenform lassen den Schluss zu, dass geometrisch ähnliches Skalieren für die Produktivitätsabschätzung näherungsweise zulässig ist.

Mit (6-2) und (6-3) lässt sich die relative Geschwindigkeit der Schlitten gegenüber der Gleitbahn mit folgender Formel ausdrücken:

$$v_{G,rel} = 2 * \underbrace{n_S * f_S}_{4 * f_{F,hyp}} * b_S \quad (6-4)$$

Das Produkt aus Spulenanzahl und Spulenumlauffrequenz stellt eine spulenzahlbezogene Maschinengeschwindigkeit dar, die als hypothetische Flügelraddrehzahl  $f_{F,hyp}$  bezeichnet wird, da sie vergleichbar zur Flügelraddrehzahl bei Klöppelflechtmaschinen definiert ist. Sie lässt sich nach Formel (3-13) errechnen und wurde bereits an verschiedenen Stellen der Arbeit zum Vergleichen der Geschwindigkeiten von Klöppelflechtmaschinen und Hebelarmflechtmaschinen verwendet. Die Bahngeschwindigkeit aus Formel (6-4) kann analog zum Vorgehen bei den Klöppelflechtmaschinen in Formel (3-47) auf die Grundgrößen Länge und Frequenz zurückgeführt werden.

$$v_{G,rel} = \underbrace{c}_{konst.} * n * f * L \stackrel{!}{=} konst. \Rightarrow n * f \sim \frac{1}{L} \quad (6-5)$$

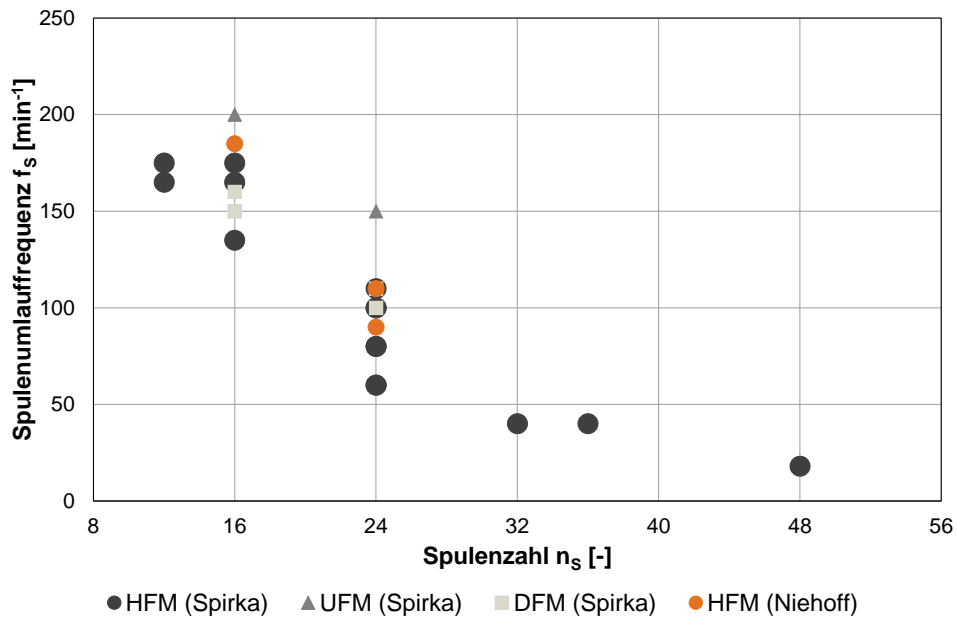
Damit erfüllen HFM prinzipiell den gleichen Zusammenhang zwischen Umlauffrequenz und Spulengröße wie Klöppelflechtmaschinen. Allerdings darf die Spulenanzahl nicht vernachlässigt werden. Zwischen Spulenvolumen und Maschinendrehzahl wird mit Formel (3-48) ein Zusammenhang erwartet, der der Form

$$f_S \sim c * \frac{V_S^{-1/3}}{n_S} \quad (6-6)$$

entspricht. Es wird auch für HFM erwartet, dass die existierenden Maschinen diesen theoretisch erarbeiteten Zusammenhang nur annähernd erfüllen: Geometrische Ähnlichkeit ist für die verschiedenen Maschinenkonstruktionen nur näherungsweise gegeben, und in der Realität wird die Maschinengeschwindigkeit durch weitaus mehr Faktoren beeinflusst bzw. limitiert als nur durch die relative Gleitbahngeschwindigkeit.

### 6.1.3.2 Abgleich mit Realmaschinendaten

Bereits ein erster Blick auf die Daten der aktuell angebotenen Maschinen (s. Tab. A-6 und Tab. A-7 im Anhang) offenbart, dass es den postulierten Zusammenhang zwischen der Maschinengeschwindigkeit und der Größe der Maschine bzw. der Spulen auch bei Hochgeschwindigkeitsflechtmaschinen gibt. Die in den Tabellen aufgeführten Rohdaten sind in Abb. 6-5 aufbereitet.



**Abb. 6-5: Drehzahlen verschiedener Hochgeschwindigkeitsflechtmaschinen**

Dargestellt sind die technischen Eckdaten verschiedener Maschinentypen (HFM = Hebelarmflechtmaschine, UFM = Umlaufradflechtmaschine, DFM = Deflektorflechtmaschine) von den Herstellern Spirka Schnellflechter (inklusive der Maschinen von Wardwell) und Niehoff (vgl. Daten in Tab. A-6 und Tab. A-7).

In der Darstellung ist die Spulenumlauffrequenz der analysierten Maschinen über ihrer Spulenzahl aufgetragen. Erwartungsgemäß sinkt die Spulenumlauffrequenz bei steigender Spulenzahl – schließlich steigt die Maschinengröße mit der Spulenzahl an, so dass jede einzelne Spule beim Umlaufen des Maschinenzentrums einen weiteren Weg zurücklegen muss. Abgesehen von dieser übergeordneten Tendenz zeigen sich allerdings auch für Maschinen mit der gleichen Spulenzahl große Unterschiede in den Geschwindigkeiten. Diese sind mutmaßlich auf generelle konstruktive Unterschiede und die unterschiedlich großen Spulen zurückzuführen.

Betrachtet man den Maschinentyp, fällt auf, dass die beiden von Spirka Schnellflechter angebotenen Umlaufradflechtmaschinen (Dreiecke) die höchsten Maschinengeschwindigkeiten erreichen. Die Deflektorflechtmaschinen (Vierecke) laufen mit ähnlichen Geschwindigkeiten wie die Hebelarmflechtmaschinen (Kreise). Sowohl Umlaufrad- als auch Deflektorflechtmaschinen erscheinen aus den in Abschnitt 2.3.2.2 beschriebenen Gründen für die Herstellung von FVK ungeeignet. Daher werden sie für die folgenden Betrachtungen nicht mehr berücksichtigt.

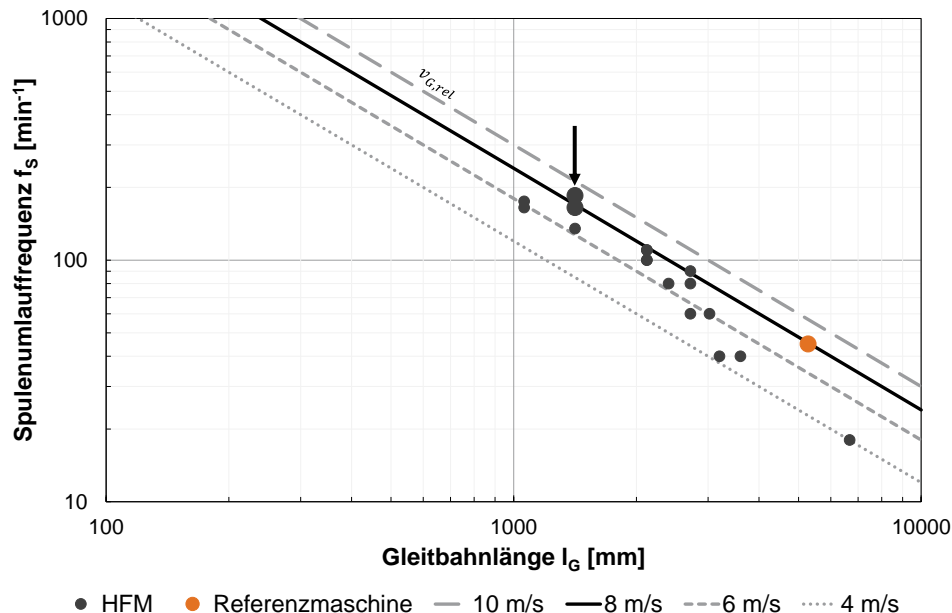
Die Hebelarmflechtmaschinen (Kreise) werden nach Herstellern unterschieden. Die Maschinen von Niehoff (orange) erreichen tendenziell etwas höhere Drehzahlen als die vergleichbaren Modelle von Spirka Schnellflechter; die Unterschiede sind aber gering. Stärkeren Einfluss hat die Spulengröße, die in der weiteren Betrachtung berücksichtigt wird.

Für jede betrachtete Maschine kann aus Spulenzahl und Spulenbreite nach Formel (6-3) näherungsweise eine Gleitbahnlänge abgeschätzt werden. Die Spulengrößen werden dabei entsprechend der in Abb. 6-4 dargestellten Methode skaliert. Als Bezugsgröße wird die S4-Spule mit einer Spulenbreite von  $b_{S4} = 100 \text{ mm}$  gewählt. Die Spulenbreiten der anderen Spulen  $b_i$ , die als Eingangswert für Formel (6-3) benötigt werden, werden entsprechend der Volumenverhältnisse der Spulen errechnet:

$$b_i = b_{S4} * \sqrt[3]{\frac{V_i}{V_{S4}}} \quad (6-7)$$

Das Diagramm in Abb. 6-6 trägt die Spulenumlauffrequenzen aller analysierten Hebelarmflechtmaschinen über der errechneten Gleitbahnlänge auf. Die Einflüsse der unterschiedlichen Spulenzahlen und -größen auf die Maschinengeschwindigkeit werden über die Gleitbahnlänge nach Abb. 6-3 kombiniert erfasst. Stimmt die Grundannahme einer konstanten relativen Gleitbahngeschwindigkeit, ordnen sich die Maschinen im doppelt logarithmischen Diagramm entlang einer nach rechts abfallenden Geraden an.

Dies wird von den eingezeichneten Maschinen nur in einem gewissen Bereich erfüllt. Im Diagramm sind verschiedene Linien für konstante relative Gleitbahngeschwindigkeiten eingezeichnet. Die beiden Versuchsmaschinen liegen etwa auf der Linie mit  $v_{G,rel} = 8 \text{ ms}^{-1}$ . Die für die Produktivitätsberechnung definierte Referenzmaschine liegt mit den in Tab. 6-1 angegebenen Kenndaten auf derselben Linie. Sie hätte damit erheblich bessere Leistungsdaten als bisherige Maschinen mit ähnlicher Gleitbahnlänge.



**Abb. 6-6: Zusammenhang von Gleitbahnlänge und Spulenumlauffrequenz**

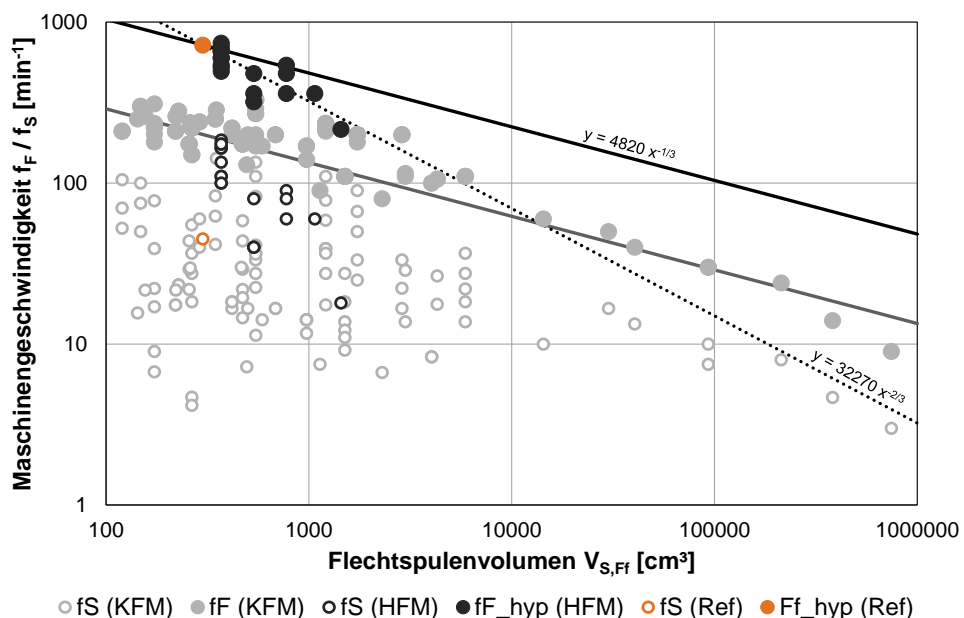
Die beiden für die in Abschnitt 5.1 beschriebenen Versuche genutzten Maschinen BMV16 von Niehoff und DF16A von Spirka Schnellflechter sind im Diagramm mit dickeren Punkten dargestellt und mit einem Pfeil markiert.

Betrachtet man Abb. 6-6, erreichen die drei am weitesten rechts im Diagramm liegenden Maschinen allesamt wesentlich geringere relative Gleitbahngeschwindigkeiten, die nur bei etwa  $4$  bis  $5 \text{ ms}^{-1}$  liegen, als es für die Referenzmaschine angenommen wird. Die Gleitbahn ist bei den genannten Maschinen aufgrund der hohen Spulenzahl von 32, 36 bzw., für den Datenpunkt ganz rechts unten, sogar 48 Spulen vergleichsweise lang. Dies scheint darauf hinzudeuten, dass die Geschwindigkeit bei Maschinen mit vielen Spulen durch ein weiteres, nicht betrachtetes Phänomen begrenzt wird.

Eine zweite Möglichkeit zur Analyse der Daten ist, die Spulenzahl über die in Formel (6-4) erwähnte hypothetische Flügelradrehzahl in die Maschinengeschwindigkeit zu integrieren.

$$f_{F,hyp} = \frac{f_S * n_S}{4} \quad (6-8)$$

Abb. 6-7 stellt die Spulenumlauffrequenzen und Flügelradrehzahlen (quasi als „spulenzahlspezifische Spulenumlauffrequenz“) über dem Flechtspulenvolumen dar. Die grauen Datenpunkte zeigen erneut die in Abschnitt 3.7.2 detailliert analysierten Daten für Klöppelflechtmaschinen – allerdings ergänzt um die Spulenumlauffrequenzen, die als graue Ringe dargestellt sind. Es gibt sowohl Maschinen mit sehr vielen Spulen (die Ringe im linken unteren Bereich des Diagramms) als auch solche mit sehr großen Spulen (die Ringe im rechten Bereich des Diagramms). Normiert man diese mit der Spulenzahl, ordnen sie sich recht gut entlang der grauen Linie an, von der die Skalierregel für Klöppelflechtmaschinen (3-50) abgeleitet wurde.



**Abb. 6-7: Vergleich der spulenzahlspezifischen Spulenumlauffrequenzen**

Maschinendaten für HFM sind im Vergleich mit Klöppelflechtmaschinen nur in einem sehr begrenzten Bereich mit relativ kleinen Flechtspulen verfügbar.

Führt man dasselbe Verfahren für die verfügbaren Maschinendaten der Hebelarmflechtmaschinen durch, ergibt sich ein weniger eindeutiges Bild. Auch hier schieben sich die Datenpunkte durch die Normierung mit der Spulenanzahl von den Spulenumlauffrequenzen (Ringe) auf die hypothetischen Flügelradrehzahlen (Punkte) im Diagramm etwas zusammen. Da das Portfolio der momentan am Markt verfügbaren Hebelarmflechtmaschinen leider nur einen sehr geringen Bereich von Spulenanzahlen und Spulengrößen abdeckt und der rechte Teil des Diagramms quasi „fehlt“, ist das Ableiten eines empirischen Zusammenhangs nicht so „augenfällig“ wie bei den Klöppelflechtmaschinen, bei denen über einige Zehnerpotenzen hinweg Maschinendaten vorliegen.

Geht man davon aus, dass der in Gleichung (6-6) auf Basis konstanter relativer Gleitbahngeschwindigkeit hergeleitete umgekehrt proportionale Zusammenhang zwischen Spulenumlauffrequenz und dritter Wurzel des Spulenvolumens auch bei HFM gilt, müssten sich die Maschinendatenpunkte parallel zur schwarzen Linie anordnen. Diese ist so gewählt, dass sie etwa durch die Maschinendatenpunkte der in den Versuchen verwendeten Maschinen von Niehoff bzw. Spirka Schnellflechter verläuft und erneut etwa einer relativen Gleitbahngeschwindigkeit von  $8 \text{ ms}^{-1}$  entspricht (vgl. Abb. 6-6). Die Referenzmaschine (s. Tab. 6-1) liegt ebenfalls auf dieser Linie. Diese wird durch folgende empirische Formel beschrieben:

$$f_{F, hyp} = 4820 * V_{S, Ff}^{-\frac{1}{3}} \Rightarrow f_S = \frac{4 * 4820}{n_s} * V_{S, Ff}^{-\frac{1}{3}} \quad (6-9)$$

Wie bei Formel (3-50) für die Klöppelflechtmaschinen muss das Spulenvolumen auch hier in  $\text{cm}^3$  eingesetzt werden, um die Spulenumlauffrequenz in  $\text{min}^{-1}$  zu erhalten. Die Linie verläuft am oberen Ende des Geschwindigkeitsbereichs, der von existierenden Maschinen abgedeckt wird. Eine Produktivitätsabschätzung, die auf dieser Formel basiert, liefert Werte, die an der Grenze des technisch Machbaren liegen, und stellt damit eine Abschätzung für den „best case“ (b/c) der mit HFM erreichbaren Produktivität dar.

Betrachtet man die komplette Gruppe der verfügbaren Datenpunkte von HFM in Abb. 6-7, hat man allerdings auch bei dieser Darstellung den Eindruck, dass die gewählte Linie die Abnahme der Maschinengeschwindigkeit bei steigendem Spulenvolumen nicht vollständig zutreffend beschreibt. Die Abnahme scheint vielmehr stärker ausgeprägt zu sein – je nachdem welche zusätzlichen Phänomene die Maschinengeschwindigkeit ebenfalls limitieren, könnte sie in Anbetracht der Lage der Datenpunkte sogar umgekehrt proportional zum Quadrat der Länge abnehmen.

$$f \sim \frac{1}{L^2} \sim V^{-\frac{2}{3}} \quad (6-10)$$

Dies ist mit der schwarz gepunkteten Linie angedeutet. Verringert sich die Maschinengeschwindigkeit entsprechend einer solchen Geraden, nimmt die Maschinengeschwindigkeit für große Spulen viel stärker ab. Dieser Aspekt ist insbesondere kritisch, wenn

für eine zu entwickelnde HFM zur FVK-Bauteilherstellung der Einsatz von besonders großen CF-Herstellerspulen angedacht wird. Ab einer gewissen Spulengröße hätten HFM gegenüber Klöppelflechtmaschinen keinen Geschwindigkeitsvorteil mehr. Im Rahmen einer Produktivitätsabschätzung für den „worst case“ (w/c) wird die Abnahme der Maschinengeschwindigkeit bei steigender Flechtspulengröße entlang der gestrichelten Linie in Abb. 6-7 ebenfalls betrachtet. Diese wird über eine zweite empirische Formel so beschrieben, dass sie ebenfalls durch den Punkt der Referenzmaschine verläuft:

$$f_{F,hyp} = 32270 * V_{S,Ff}^{-\frac{2}{3}} \Rightarrow f_S = \frac{4 * 32270}{n_S} * V_{S,Ff}^{-\frac{2}{3}} \quad (6-11)$$

Die gepunktet skizzierte Linie bildet den Trend in den vorhandenen Daten gut ab, bleibt aber angesichts der extrem geringen Basis an Maschinendaten hoch spekulativ – umso mehr, da die Maschinenkonstruktion in Bezug auf weitere Einflussgrößen, die die Geschwindigkeit limitieren, in der vorliegenden Arbeit nicht detaillierter untersucht wird. Zum Vergleich: Würde man für die Klöppelflechtmaschinen nur die Datenpunkte im linken Teil des Diagramms betrachten, wäre der postulierte Zusammenhang zwischen Spulengröße und Maschinengeschwindigkeit ebenfalls nicht so klar erkennbar.

### 6.1.3.3 Fazit

Die Analyse der Daten existierender Maschinen belegt eindeutig, dass die Maschinengeschwindigkeit von HFM nicht auf demselben Wert gehalten werden kann, wenn die Spulenzahl und/oder -größe erhöht werden. Es lässt sich aus den Maschinendaten allerdings kein ebenso offensichtlicher Zusammenhang ableiten wie bei den Klöppelflechtmaschinen – mutmaßlich, weil sich verschiedene Einflussfaktoren, die die Geschwindigkeit limitieren, überlagern und schwierig voneinander zu trennen sind.

- Zweifelsfrei besteht eine Beschränkung der **relativen Gleitbahngeschwindigkeit**, die bei keiner der analysierten Maschinen  $10 \text{ m s}^{-1}$  überschreitet. Dies liegt an den physikalischen Eigenschaften der Kontaktflächen und des Schmieröls und limitiert auch andere Gleitvorgänge in ähnlicher Art und Weise<sup>4</sup>.
- Der zweite von den Maschinenherstellern genannte Faktor, der die Maschinengeschwindigkeit begrenzt, ist die **Beschleunigung an der Umlenkhebelspitze**. Obwohl diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht detailliert analysiert wird, ist bereits absehbar, dass dieser Faktor an Bedeutung gewinnt, wenn die Spulengrößen nicht geometrisch ähnlich (vgl. Abb. 6-4) skaliert werden. Um die Gleitbahnlänge – und damit die Umlaufdauer – zu verkürzen, lässt sich das Spulenvolumen durch eine im Vergleich mit der Spulenbreite überproportionale

<sup>4</sup> Vergleicht man den gefundenen Grenzgeschwindigkeitswert mit anderen maximalen Relativgeschwindigkeiten, z.B. bei der geschmierten Bewegung eines Kolbens in einem Motor, finden sich Werte in ähnlicher Größenordnung [142].

Steigerung des Spulendurchmessers vergrößern. Dies führt allerdings zu höherer Belastung des Umlenkhebels durch größere, schnellere Schwenkbewegungen.

- Auffällig ist, dass die für HFM verwendeten Spulen praktisch alle ein **Breite-zu-Durchmesser-Verhältnis** nahe eins aufweisen. Sie sind im Vergleich mit den in der Klöppelflechttechnik eingesetzten „schlanken“ Spulen eher „gedrungen“. Es liegt nahe, dass diese Geometrie das Ergebnis einer Optimierung im Spannungsfeld zwischen minimaler Gleitbahnlänge und minimalem Hebelschwenkbereich bzw. Hebelspitzenbeschleunigung ist. Sommer [141] analysiert diese Beschleunigung zwar nicht, ermittelt aber mit einer rein geometrischen Maschinenanalyse ähnliche Werte für das optimale Breite-zu-Durchmesser-Verhältnis.
- Teilweise finden sich bei den Maschinenherstellern Vorgaben zur **maximalen Spulenmasse** – ein Aspekt, der offensichtlich ebenfalls den Betrieb der Maschine limitiert. Dies hat zur Folge, dass Spulen aufgrund der hohen Dichte des verarbeiteten Materials (z. B. von Kupferdrähten) nicht komplett befüllt werden dürfen. Wie die Spulenmasse mit der Maschinengeschwindigkeit interagiert, wird in der vorliegenden Arbeit ebenfalls nicht untersucht. Wenn die Geschwindigkeit von Maschinen mit großen Spulen aufgrund deren Masse reduziert werden muss, besteht beim Einsatz von Verstärkungsfasern Potenzial, höhere Geschwindigkeiten zu erreichen, da diese Materialien im Vergleich mit aktuell zu meist eingesetzten Drähten eine sehr viel geringere Dichte aufweisen.

Zuletzt bleibt ein offensichtlicher Kritikpunkt in Bezug auf die angewendete Methode zu erwähnen: Die durchgeführte Analyse der Maschinendaten setzt nämlich voraus, dass es tatsächlich Ziel der Maschinenentwickler war, möglichst hohe Maschinengeschwindigkeiten zu erreichen. Es ist zwar wahrscheinlich, dass dies das Hauptziel bei der Entwicklung einer Fertigungsmaschine ist – es gibt aber eine große Anzahl weiterer Entwicklungsziele, die jeweils unterschiedlich gewichtet werden können.

Die Tatsache, dass sich der Zusammenhang zwischen Spulengröße und Geschwindigkeit in den analysierten Daten nicht klar abzeichnet, kann also einfach darin begründet sein, dass jeweils unterschiedliche Zielsetzungen der Maschinenkonstruktion zugrunde liegen. So kann z. B. zugunsten von Wartungsarmut und geringen Lärmemissionen oder schlicht aus Kostengründen auf das Ausreizen der technisch machbaren Maschinengeschwindigkeit verzichtet werden. Hinzu kommt, dass die Maschinenhersteller (oder einzelne Entwickler) ihren individuellen Konstruktionsprinzipien folgen oder die technisch optimale Lösung oder Fertigungstechnologie nicht anwenden können, weil diese dem Patentschutz eines Mitbewerbers unterliegen.

Die aufgeführten Parameter müssen bei zukünftigen Untersuchungen in einem „Multi-Parameter-Optimierungsansatz“ gekoppelt erforscht werden, um die genauere Vorhersage der Leistungsdaten einer zu entwickelnden HFM zu ermöglichen. Für die vorliegende Arbeit wird der Ansatz einer „best case“-„worst-case“-Analyse gewählt, um den Leistungsdaten-Bereich einzugrenzen und so die Produktivität zu ermitteln.



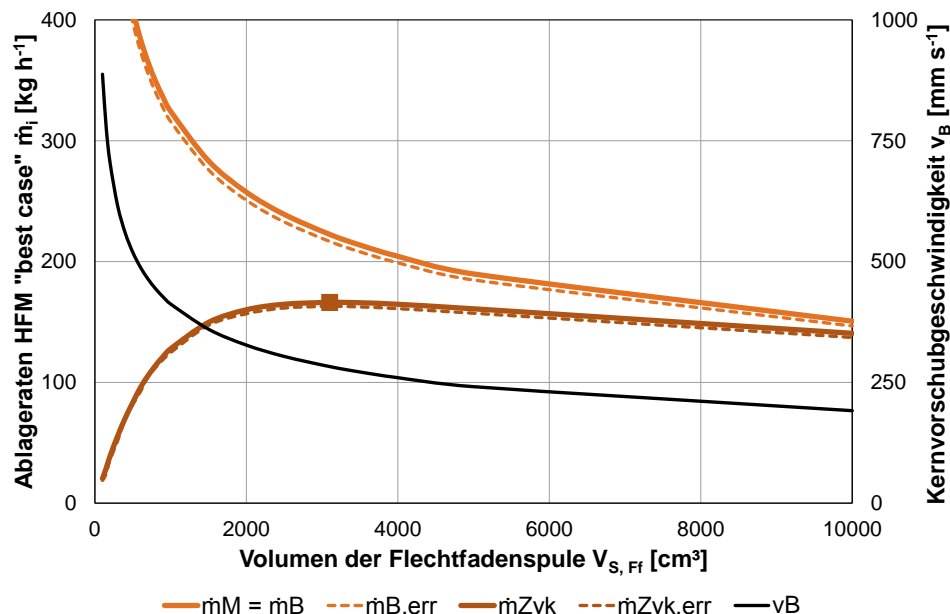
## 6.2 Ergebnisse der Produktivitätsberechnung

Da im Fall von HFM nur die Betrachtung von Biaxialgeflechtem möglich ist, vereinfacht sich die Auswertung der Berechnungsergebnisse gegenüber den Klöppelflechtmaschinen bedeutend. Die Produktivitätsbewertung wird auf Basis des Heavy-Tow-Geflechtes anhand der zykluszeitbezogenen Ablagerate durchgeführt. Unter den in Abschnitt 6.1 genannten Rahmenbedingungen (Standardbauteil, nebenzeitfreies Produktionssystem, Standardrüstzeitszenario und Standardfehlerszenario) wird analysiert, welcher Produktivitätszuwachs durch den Einsatz der HFM-Technik potenziell zu erwarten ist.

Zusätzlich werden erste Einschätzungen zu den Auswirkungen einiger Prozessanpassungen getroffen, die bei der zukünftigen Verwendung von Heavy-Tow-Biaxialgeflechtem von besonderem Interesse sind. Dazu zählen der Einsatz von gespreizten Garnen oder von Biaxialgeflechtem mit variablen Flechtwinkeln sowie die Einsparung des Umspulvorgangs durch die direkte Verwendung von CF-Herstellerspulen in der Flechtmaschine.

### 6.2.1 Ablageraten und optimale Spulengröße

Zunächst wird für die beiden Szenarien „b/c“ aus Formel (6-9) und „w/c“ aus Formel (6-12), die die Geschwindigkeitsabnahme einer HFM mit steigender Spulengröße beschreiben, untersucht, für welche Spulengröße welche Ablageraten erreicht werden. Abb. 6-8 zeigt das Ergebnis dieser Betrachtung in der Variante „b/c“ mit langsam sinkender Geschwindigkeit für eine HFM mit den standardmäßigen 64 Spulen.



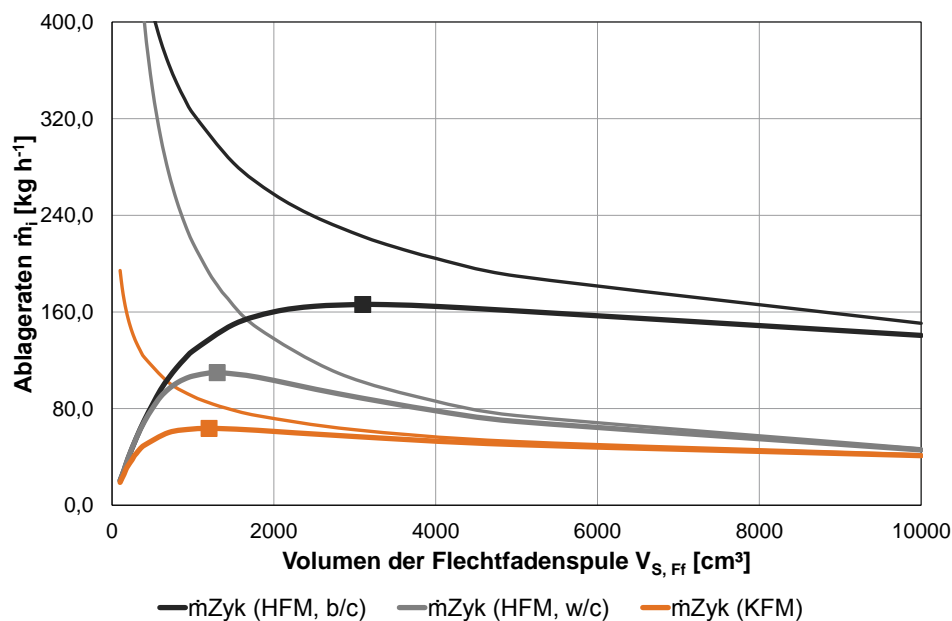
**Abb. 6-8: Ablageraten beim Hochgeschwindigkeitsflechten „b/c“**

Ein Symbol markiert die beste zyklusbezogene Ablagerate. Die schwarze Linie zeigt die Kernabzugsgeschwindigkeit entsprechend der rechten Skala an. Die hellorange Linie gibt die Maschinenablagerate an. Die fehlerbehafteten Ablageraten sind gestrichelt dargestellt.

Da keine Nebenzeiten anfallen, ist die bauteilbezogene Ablagerate identisch mit der Maschinenablagerate. Die wichtigste Bewertungsgröße für die Produktivität, die zyklusbezogene Ablagerate, erreicht bei einer Spulengröße von ca.  $3100 \text{ cm}^3$  einen Maximalwert von etwa  $166 \text{ kg h}^{-1}$  – also ein Vielfaches der Werte, die mit dem bisherigen Klöppelflechtverfahren erreicht werden. Die jeweiligen fehlerbezogenen Ablageraten sind annähernd identisch mit den fehlerfreien Kurven. Dies liegt daran, dass die Fehlerrate, wie in Abschnitt 3.6.2 beschrieben, flechtzeitabhängig definiert ist, so dass sie bei steigender Fertigungsgeschwindigkeit weniger ins Gewicht fällt. Bei hohen Ablageraten wäre alternativ die lauflängenabhängige Fehlerrate für die Bewertung besser geeignet.

Die zu jedem Spulenvolumen gehörende Kernvorschubgeschwindigkeit ist als schwarze Linie ebenfalls in Abb. 6-8 eingezeichnet. Sie sinkt entsprechend der mit steigender Spulengröße abnehmenden Maschinengeschwindigkeit und verläuft näherungsweise parallel zur Kurve der Maschinenablagerate. Mit der Kernvorschubgeschwindigkeit lässt sich überprüfen, ob der Kern durch die Kernhandhabungseinheit des Produktionssystems, in das eine solche Flechtmaschine integriert ist, gefördert werden kann. Nach der in Abschnitt 6.1.2.1 getroffenen Annahme einer maximal möglichen Kernhandhabungsgeschwindigkeit von  $500 \text{ mm s}^{-1}$  ist das Führen des Kerns ab einer Spulengröße von ca.  $500 \text{ cm}^3$  möglich. Für die Spulengröße mit der höchsten zyklusbezogenen Ablagerate läge die Vorschubgeschwindigkeit des Kerns bei etwa  $300 \text{ mm s}^{-1}$  und damit in einem Bereich, der voraussichtlich technisch beherrschbar ist.

Ein zu Abb. 6-8 vergleichbares Diagramm für den „w/c“ findet sich im Anhang in Abb. A-26, ein weiteres in Abb. A-27 stellt dieselben Werte für das Klöppelflechtverfahren dar. Abb. 6-9 fasst die Ergebnisse aller Varianten zusammen.



**Abb. 6-9: Vergleich der zyklusbezogenen Ablageraten von KFM und HFM**

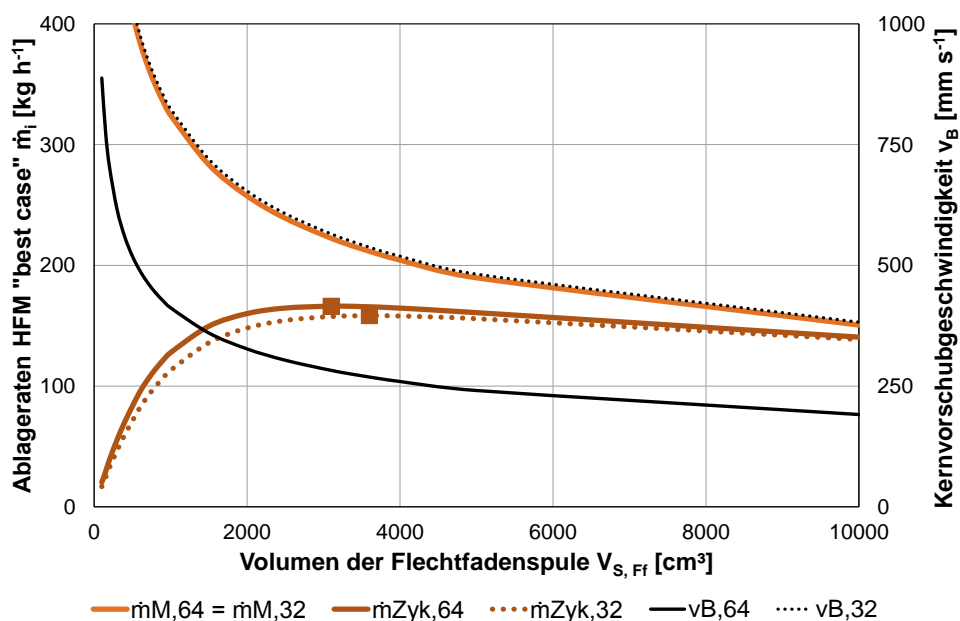
Abkürzungen: b/c = best case, w/c = worst case. Maschinenablagerate mit dünner Linie.

Die Darstellung zeigt, dass sich die beste Ablagerate (jeweils mit einem Symbol markiert) im Vergleich mit dem Klöppelflechtverfahren durch den Einsatz von HFM selbst im „w/c“ etwa verdoppeln lässt – für den „b/c“ ist annähernd eine Verdreifachung möglich. Die stärkere Abnahme der Maschinengeschwindigkeit im Szenario „w/c“ führt dazu, dass die dazugehörige Kurve diejenige des Klöppelflechtverfahrens schneidet. Dies geschieht aber erst bei Spulengrößen, die weit oberhalb des Bereichs liegen, in dem die jeweils besten zyklusbezogenen Ablageraten erreicht werden. Das bedeutet, dass sich mit HFM, auch wenn ihre Geschwindigkeit mit steigender Spulengröße sehr schnell abnimmt, bessere Ablageraten erzielen lassen als mit KFM.

## 6.2.2 Einsatz von gespreiztem Geflecht

Wenn dicke CF-50k-Rovings als Flechtfäden eingesetzt werden, erscheint aus verschiedenen Gründen die möglichst breite Ablage der Garne im Geflecht sinnvoll. Erstens verringert sich dadurch die Welligkeit der Garne, was zu besseren faserdominierten mechanischen Kennwerten führt. Zweitens erlauben dünnere Einzellagen die genauere Einhaltung des Zielfaservolumengehalts bei vorgegebener Wandstärke. Drittens reduziert sich die Anzahl der benötigten Spulen in der Flechtmaschine, um dasselbe Bauteil geschlossen mit Fasern zu bedecken. Dies verringert die Maschinenanschaffungskosten.

Nachfolgend wird abgeschätzt, wie sich der Einsatz von gespreizten Garnen auf die Produktivität des Prozesses auswirkt. Dafür wird angenommen, dass sich die Breite der Rovings durch Spreizen gegenüber der regulären Ablage verdoppeln lässt (vgl. Tab. A-8), die Flechtmaschine also nur halb so viele Spulen benötigt. Abb. 6-10 vergleicht die Ablageraten einer solchen Maschine mit der Standardvariante für das „b/c“-Szenario.



**Abb. 6-10: Reguläre und gespreizte Geflechtablage im „b/c“**

Die höchste zyklusbezogene Ablagerate ist jeweils mit einem Symbol markiert.

Die Spulenzahlen der Maschinen sind jeweils als Index in die Bezeichnungen der Legende aufgenommen. Die Maschinenablagerate ist aufgrund des in Abschnitt 4.2.3 geschilderten Zusammenhangs für beide Maschinen identisch. Auch bei der zyklusbezogenen Ablagerate zeigen sich daher kaum Unterschiede. Die Maschine mit 32 Spulen (gepunktete Linie) erreicht eine etwas geringere maximale Ablagerate, die optimale Spulengröße ist mit  $3600 \text{ cm}^3$  etwas größer als für die Standardmaschine mit 64 Spulen. Insgesamt sind die Differenzen aber marginal.

Einen bedeutenden Unterschied gibt es hingegen bei der Kernvorschubgeschwindigkeit. Damit die kleinere Maschine mit der halben Anzahl an Flechtfäden dieselbe Ablagerate erreicht wie die mit der standardmäßigen Spulenzahl, muss der Kern doppelt so schnell gefördert werden, so dass in derselben Zeit doppelt so viele, aber jeweils nur halb so dicke Lagen aufgebracht werden können. Die Kernvorschubgeschwindigkeit der Maschine mit 32 Spulen ist als gepunktete schwarze Linie in Abb. 6-10 eingezeichnet. Bei dem Spulenvolumen, mit dem die optimale zyklusbezogene Ablagerate erreicht wird, liegt die Kernvorschubgeschwindigkeit deutlich über  $500 \text{ mm s}^{-1}$  und damit oberhalb des als technisch umsetzbar angesehenen Limits.

Vergleichbare Diagramme zur Gegenüberstellung der regulären und der gespreizten Geflechtanlage sind im Anhang für das Szenario „w/c“ in Abb. A-28 und für die Klöppelflechttechnik in Abb. A-29 dargestellt. Die Zusammenhänge von Ablagerate, Spulenzahl und Kernvorschubgeschwindigkeit sind immer prinzipiell identisch.

Der Einsatz von gespreizten Garnen bringt also für die Produktivität keinen Vorteil, geht aber mit bedeutend höheren Kernvorschubgeschwindigkeiten einher, wodurch sich erhebliche technische Herausforderungen bei der Konstruktion des Kernhandhabungssystems ergeben. Diesem erhöhten Entwicklungs- und Investitionsaufwand beim Handhabungssystem stehen geringere Anschaffungskosten für die Flechtmaschine selbst gegenüber, da sie aufgrund der geringeren Spulenzahl bedeutend kleiner dimensioniert werden kann. Ob der Einsatz von gespreizten Garnen unterm Strich wirtschaftlich sinnvoll ist, kann erst zu einem späteren Zeitpunkt der Anlagenentwicklung bewertet werden, wenn zuverlässig abgeschätzt werden kann, mit welchem Kostenaufwand für Handhabungssystem bzw. Flechtmaschine zu rechnen ist.

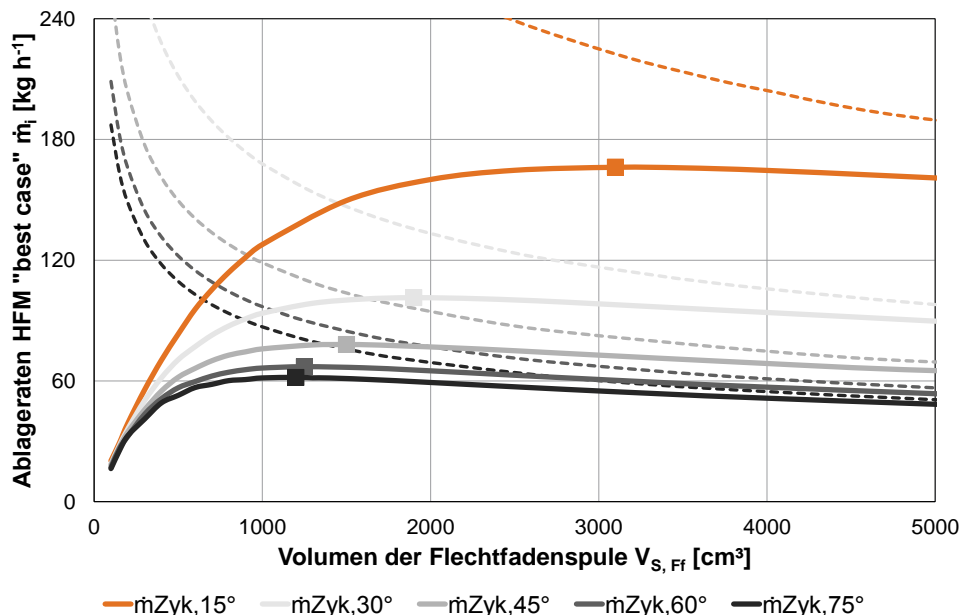
Spielen Investitionskosten nur eine untergeordnete Rolle, wird die Entscheidung über den Einsatz von gespreizten Garnen von anderen Faktoren abhängen. Dazu zählen z. B. die verbesserten mechanischen Eigenschaften durch die reduzierte Garnwelligkeit, mutmaßlich erhöhte Fehlerraten aufgrund der hohen Kernvorschubgeschwindigkeit oder eine Steigerung der Materialkosten durch den Spreizprozess und eine möglicherweise notwendige Binderstabilisierung. Alle Betrachtungen zum Einsatz von gespreizten Garnen stehen ohnehin unter Vorbehalt: Ob es überhaupt gelingt, die Garne bei den angestrebten hohen Verarbeitungsgeschwindigkeiten bis zum Flechtpunkt zu führen, ohne dass die Bänder durch die Auf-und-Ab-Bewegung des Garns stark geschädigt werden oder sich einschnüren, können erst Versuche zeigen.

### 6.2.3 Biaxialgeflechte mit variablem Flechtwinkel

Nach den Ergebnissen von Brand [23] ist Biaxialgeflecht mit sehr kleinen Flechtwinkeln potenziell geeignet, um hoch längsverstärkte Triaxialgeflechte zu ersetzen. Ausgehend von dieser Idee wird in der vorliegenden Arbeit ein Heavy-Tow-Geflecht mit einem Flechtwinkel von nur  $\pm 15^\circ$  als Basisgeflecht betrachtet. In bestimmten Bereichen des Bauteils, z. B. an Kraftereinleitungsbereichen, können aber andere, größere Flechtwinkel besser geeignet sein. Zukünftige Konzepte zur Auslegung von Geflechtbauteilen auf Basis von Biaxialgeflechten müssen daher die Möglichkeit bieten, verschiedene Bereiche des Bauteils (verteilt entlang der Bauteillänge innerhalb derselben Lage oder in unterschiedlichen Lagen) mit unterschiedlichen Flechtwinkeln auszuführen.

Abb. 6-11 untersucht deswegen, welche Ablageraten eine HFM mit dem Heavy-Tow-Geflecht für verschiedene Flechtwinkel erreicht. Die höchste zyklusbezogene Ablagerate ergibt sich – wie erwartet (vgl. Abb. 4-1) – beim kleinsten Flechtwinkel. Für die größeren Flechtwinkel sinkt der Wert, die dazugehörige optimale Spulengröße reduziert sich ebenfalls. Allerdings liegt die maximale Ablagerate auch beim höchsten betrachteten Flechtwinkel von  $\pm 75^\circ$  noch bei etwa  $60 \text{ kg h}^{-1}$  und damit in etwa auf dem Niveau, das Klöppelflechtmaschinen bestenfalls mit dem kleinsten Flechtwinkel erreichen.

Das Diagramm beantwortet zudem die Frage nach der Spulengröße, auf die eine Maschine zur Fertigung von Geflechten mit verschiedenen Flechtwinkeln ausgelegt werden sollte: Bei Verwendung der optimalen Spulengröße für den kleinsten Flechtwinkel reduziert sich die Ablagerate auch für die anderen Flechtwinkel kaum gegenüber dem jeweiligen Optimum, da sie nach Überschreiten der optimalen Größe nur langsam sinkt.



**Abb. 6-11: Optimale Spulengröße für verschiedene Flechtwinkel**

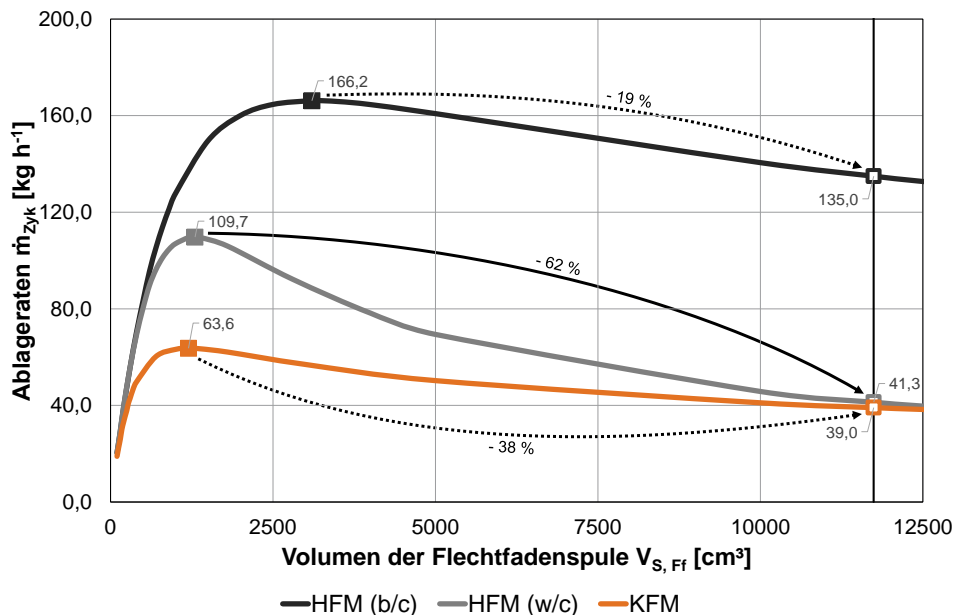
Die zyklusbezogene Ablagerate ist mit der durchgezogenen Linie, die jeweils zugehörige Maschinenablagerate gestrichelt dargestellt (64 Spulen, Skalierungsszenario „b/c“).

## 6.2.4 Verwendung von CF-Herstellerspulen

Für die Serienfertigung wird der direkte Einsatz von CF-Herstellerspulen in der Flechtmaschine angedacht, damit der Umspulprozess entfallen kann. Dies spart einerseits die Kosten dieses Prozessschritts und bietet andererseits Ansatzpunkte, um die Häufigkeit von Flechtprozessfehlern zu reduzieren, die oft auf Garnschäden durch das Umspulen zurückzuführen sind (vgl. Abschnitte 3.6.1 und 5.2.3). Im Folgenden wird abgeschätzt, wie sich der Einsatz von CF-Herstellerspulen auf die Produktivität auswirkt.

Weil die im Flechtprozess verarbeitete Menge von Verstärkungsfasergarnen nur einen geringen Teil der gesamten Garnproduktion ausmacht, bieten die Faserhersteller ab Werk keine auf Flechtspulen aufgemachten Garne an. Möchte man die Fasern ohne Umspulen verwenden, muss dies also in der Standardaufmachung der CF-Hersteller erfolgen. Alle Anbieter verwenden als Aufmachungsform die zylindrische Kreuzwicklung auf 280 mm breiten Papphülsen mit einem Innendurchmesser von 77 mm, die bis auf einen Randbereich von 10 bis 15 mm mit dem CF-Garnpaket bewickelt sind. Da die Breite der Wicklung bei den Spulen aller Hersteller ähnlich ist, bestimmt ihr Durchmesser über das enthaltene Garnvolumen. Die größten angebotenen Spulen enthalten bis zu 15 kg CF, was einem Außendurchmesser der Wicklung von etwa 280 mm entspricht.

Das Breite-zu-Durchmesser-Verhältnis einer solchen Spule beträgt etwa eins. Sie ist also näherungsweise geometrisch ähnlich zu den typischen bei HFM eingesetzten Spulen (vgl. Abb. 6-4). Der in Abschnitt 6.1.3.1 hergeleitete Zusammenhang, nach dem die Maschinengeschwindigkeit umgekehrt proportional zur Gleitbahnlänge ist, kann also angewendet werden, um die Geschwindigkeit einer Maschine abzuschätzen.



**Abb. 6-12: Produktivitätseinbuße durch Einsatz von CF-Herstellerspulen**

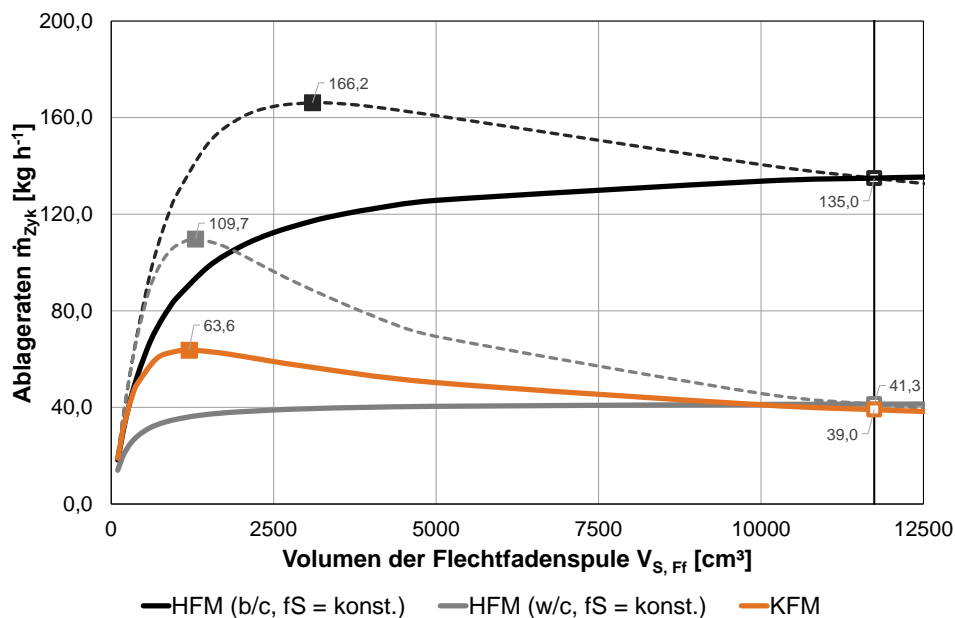
Die gefüllten Quadrate zeigen die maximale zyklusbezogene Ablagerate bei optimaler Spulengröße, die umrandeten zeigen die Werte beim Einsatz von CF-Herstellerspulen.

Skaliert man ausgehend von der S4-Spule entsprechend dem in der Abbildung gezeigten Vorgehen nach Formel (6-7) geometrisch ähnlich auf die genannte Breite der CF-Herstellerspulen von 280 mm, ergibt sich ein Spulenvolumen von:

$$V_{CF} = V_{S4} * \left(\frac{b_{CF}}{b_{S4}}\right)^3 = 11744 \text{ cm}^3 \quad (6-12)$$

Mit dem errechneten Volumenwert können nach den Skalierungsregeln „b/c“ und „w/c“ zyklusbezogene Ablageraten ermittelt werden. Abb. 6-12 stellt diese Werte den jeweils besten Ablageraten gegenüber, die mit der optimalen – und wesentlich kleineren – Spulengröße erreichbar sind. Will man auf den Umspulpprozess verzichten und setzt CF-Herstellerspulen direkt ein, führt dies zu Einbußen bei der zyklusbezogenen Ablagerate. Der Produktivitätsverlust bleibt für HFM mit 19 % im „b/c“-Szenario in einem vergleichsweise moderaten Rahmen. Für das „w/c“-Szenario, bei dem sich die Anlagengeschwindigkeit mit steigenden Spulenvolumen wesentlich stärker reduziert, liegt er bei über 60 %. Auch bei Klöppelflechtmaschinen ist ein starker Produktivitätsverlust von knapp 40 % zu erwarten.

Bei der Herleitung der Skalierregeln für HFM wird vereinfachend angenommen, dass die Maschinengeschwindigkeit durch die Gleitbahnlänge bestimmt wird und dass diese nur von Spulenzahl und Spulenbreite abhängt. CF-Herstellerspulen sind unabhängig von der aufgespulten Fasermenge immer gleich breit. Die Maschinengeschwindigkeit wäre nach dieser Vorstellung beim Einsatz von CF-Herstellerspulen in HFM unabhängig vom Spulenvolumen. Wie sich dies auf die Produktivität auswirkt, illustriert Abb. 6-13.



**Abb. 6-13: Produktivität von HFM bei partiell befüllten CF-Herstellerspulen**

Die Maschinengeschwindigkeit ist für alle Spulenfüllgrade konstant. Die gestrichelten Linien illustrieren die bekannten Ablageraten für variable Maschinengeschwindigkeit.

Die Maschinengeschwindigkeit, die nach den Skalierregeln (b/c und w/c) für das in Formel (6-12) errechnete Spulenvolumen und die dadurch repräsentierte Spulenbreite gilt, wird bei der Berechnung der Ablageraten in Abb. 6-13 für die anderen Spulenvolumina konstant gehalten. Dies führt dazu, dass die zyklusbezogene Maschinenablagerate mit steigendem Spulenfüllgrad immer weiter ansteigt. Partiiell befüllte CF-Herstellerspulen zu verwenden ergibt nach dieser Betrachtung keine Vorteile für die Produktivität.

Anders sieht es bei Klöppelflechtmaschinen aus, da die Skalierregel hier davon ausgeht, dass eher die Spulenmasse dimensionierend wirkt. Die orange Kurve der Klöppelflechtmaschinen wird daher als Abschätzung für die beste erreichbare Ablagerate weiterhin mit der Interaktion von Spulenvolumen und Maschinengeschwindigkeit erstellt. Sie verläuft praktisch über den kompletten Spulengrößenbereich zwischen den Kurven der beiden HFM-Szenarien. Die Entscheidung, ob der Einsatz von CF-Herstellerspulen bei HFM gegenüber KFM höhere Produktivität ermöglicht, hängt also stark davon ab, nach welchen Regeln die Maschinengeschwindigkeit mit dem Spulenvolumen skaliert.

Aufgrund der vielen Annahmen, die den Überlegungen zugrunde liegen, lassen die aufgeführten Resultate nur eine erste Einschätzung zu, wie sich die Verwendung von CF-Herstellerspulen auf die Prozessproduktivität auswirkt. Es zeigt sich aber bereits deutlich, dass die Frage nach der Wirtschaftlichkeit nur mit detaillierteren Betrachtungen beantwortet werden kann. Nach den bisherigen Ergebnissen ist aus Produktivitätssicht vom direkten Einsatz von CF-Herstellerspulen in der Flechtmaschine abzuraten. Dies gilt für HFM im Besonderen bei der Verwendung von nur partiell befüllten Spulen, da die Maschinen dann sogar weniger effektiv als Klöppelflechtmaschinen sein könnten.

## 6.2.5 Fazit

Im Rahmen der Produktivitätsbewertung in den vorhergehenden Abschnitten wurden die beiden Skalierungsszenarien „b/c“ und „w/c“ betrachtet und jeweils die Spulengröße für die optimierte, zyklusbezogene Ablagerate ermittelt. Zusätzlich wurde der direkte Einsatz von CF-Herstellerspulen betrachtet. Tab. 6-2 fasst die Eckdaten der untersuchten Flechtmaschinen zusammen.

Tab. 6-2: Leistungsdaten der untersuchten HFM im Vergleich

	$V_{S,ff}$ [cm <sup>3</sup> ]	$f_s$ [min <sup>-1</sup> ]	$f_{F,hyp}$ [min <sup>-1</sup> ]	$\dot{m}_{zyk,o}$ [kg h <sup>-1</sup> ]
64 Spulen, b/c, opt. Spulengröße, reguläre Ablage	3100	20,7	330,6	166,3
64 Spulen, w/c, opt. Spulengröße, reguläre Ablage	1300	16,9	270,9	109,7
32 Spulen, b/c, opt. Spulengröße, gespreizte Ablage	3600	39,3	314,5	158,3
32 Spulen, w/c, opt. Spulengröße, gespreizte Ablage	1400	32,2	257,9	101,4
64 Spulen, b/c, CF-Herstellerspule, reguläre Ablage	11744	13,3	212,1	135,0
64 Spulen, w/c, CF-Herstellerspule, reguläre Ablage	11744	3,9	62,5	41,3

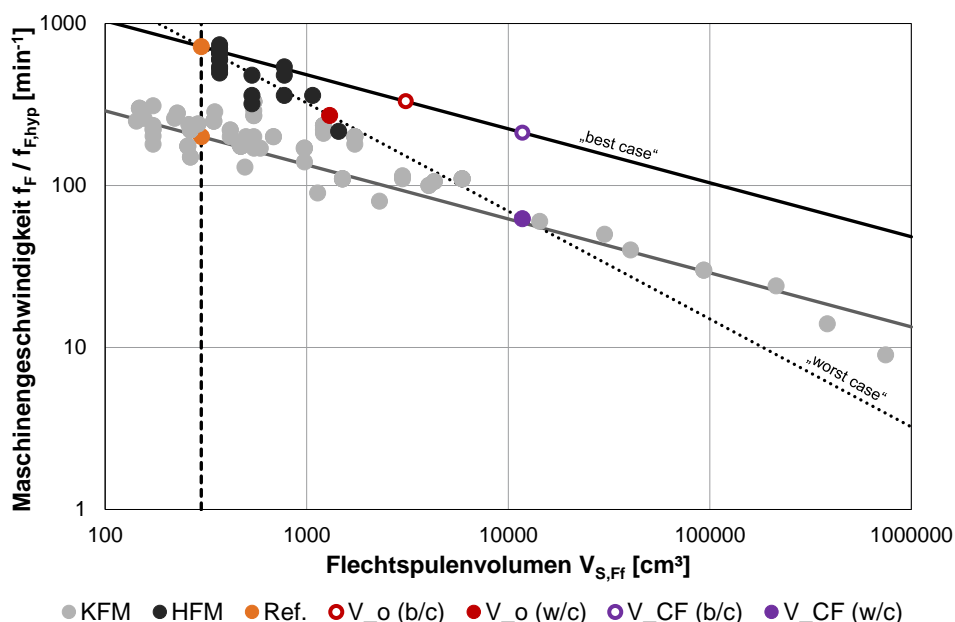


Zum Vergleich sind die Eckdaten von Maschinen mit der halben Spulenanzahl für den Fall der gespreizten Geflechtablage ebenfalls in der Tabelle angegeben. Es zeigt sich aber, dass es sowohl für die zyklusbezogene Produktivität als auch für die optimale Spulengröße nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt, ob die Geflechtablage mit regulärer oder gespreizter Garnbreite erfolgt, wenn die Spulenanzahl der Maschine entsprechend angepasst wird.

Nicht aufgeführt sind die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Flechtwinkel auf die optimale Spulengröße. Denn ohne große Produktivitätseinbußen kann immer die Spulengröße gewählt werden, die für den kleinsten Flechtwinkel, der mit der Maschine gefertigt werden soll, optimal ist.

Die in der Tabelle angegebenen Daten sind in Abb. 6-14 den Eckdaten der bekannten Flechtmaschinen gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass die nach dem w/c-Szenario skalierte HFM mit der optimalen Spulengröße inmitten des Bereichs der mit schwarzen Punkten dargestellten existierenden HFM liegt, so dass davon auszugehen ist, dass sich diese Maschine technisch umsetzen lassen kann. Betrachtet man den Punkt für die Maschine mit CF-Herstellerspulen im w/c-Szenario, liegt dieser bereits auf dem Niveau der mit hellgrauen Punkten dargestellten Klöppelflechtmaschinen.

Die beiden HFM, deren Leistungsdaten nach dem b/c-Szenario extrapoliert werden, liegen hingegen deutlich außerhalb der Bereiche aller bekannten Flechtmaschinen. Entscheidend wird sein, ob es tatsächlich gelingt, solche Maschinen zu konstruieren, um den damit verbundenen erheblichen Produktivitätszuwachs zu ermöglichen.



**Abb. 6-14: Untersuchte HFM im Vergleich mit Realmaschinen**

Die Maschinen mit der auf die beste Ablagerate optimierten Spulengröße sind in rot, die Maschinen mit CF-Herstellerspulen in violett dargestellt. Die Punkte stehen für das w/c-, die Ringe für das b/c-Szenario. Maschinen für gespreizte Garnablage sind nicht dargestellt.



# 7 Zusammenfassung und Ausblick

## 7.1 Zusammenfassung

Das Flechten ist als Fertigungsverfahren für FVK-Komponenten inzwischen für einige Automobilbauteile im Einsatz – bei den Dachrahmen der aktuellen BMW 7er-Fahrzeuge erstmals auch mit sehr hohen Stückzahlen. Dazu wurde der Flechtprozess in den letzten Jahren weitgehend automatisiert. Nun zeichnet sich ab, dass sich Zykluszeiten und Kosten mit bislang eingesetzten Maschinen und Materialien kaum weiter senken lassen. An diesem Punkt setzt die vorliegende Arbeit an. Ausgehend von der aktuell verwendeten Klöppelflechttechnik und typischen, im Automobilbereich eingesetzten Geflechtarten untersucht sie, wie sich die Produktivität des Verfahrens weiter verbessern lässt und wie groß der potenzielle Produktivitätszuwachs ausfallen kann.

Dazu wurde ein Berechnungsmodell erstellt, das alle relevanten Einflussfaktoren verknüpft, um die Produktivität des Flechtprozesses ganzheitlich zu ermitteln. Die Grundparameter von Maschine, Bauteil und Geflecht werden darin mit Daten zum Aufbau des Produktionssystems, zum Rüsten und zu Fehlereinflüssen verknüpft. Alle Einflussgrößen<sup>1</sup> lassen sich individuell variieren. Als zentrale Kenngröße für die Produktivität dient die „zyklusbezogene Ablagerate“. Sie gibt an, welche Fasermenge ein Produktionssystem bei Fertigung eines bestimmten Bauteils unter Berücksichtigung aller Stillstandzeiten in einer bestimmten Zeit effektiv abgelegt. Diese Kennzahl stellt das vorrangige Optimierungsziel dar.

Das Modell berücksichtigt zusätzlich, dass die Maschinengeschwindigkeit mit steigender Flechtspulengröße abnimmt. So ergibt sich für jede betrachtete Kombination der Einflussparameter eine optimale Flechtspulengröße. Diese wird erreicht, wenn der Gewinn an Produktivität durch den geringeren Rüstaufwand beim Vergrößern der Spulen vom Verlust durch die sinkende Maschinengeschwindigkeit kompensiert wird. Der diesem Phänomen zugrunde liegende Zusammenhang wurde dimensionsanalytisch hergeleitet und in Form einer empirischen Skalierungsregel im Modell implementiert, die über einen Abgleich mit den Leistungsdaten existierender Flechtmaschinen bestimmt wurde.

Anschließend wurde zunächst die Produktivität des aktuell verwendeten Klöppelflechtverfahrens für verschiedene Geflechtarten anhand eines Standardbauteils ermittelt. Von

---

<sup>1</sup> Dazu zählen Spulenanzahl und –größe, Maschinengeschwindigkeit, Bauteillänge und Durchmesser, Geflechtart, Garntypen und Flechtwinkel ebenso wie Betriebsart, Nebenprozess- und Rüstzeiten. Zusätzlich lassen sich Fehlerbehebungszeit und Fehlerhäufigkeit variieren.

besonderem Interesse waren dabei das Hybridgeflecht, das aktuell für Hochvolumenanwendungen im Automobilbereich verwendet wird, und das Heavy-Tow-Geflecht, dessen Einsatz für künftige Automobilbauteile angedacht wird. Die Analyse zeigt, dass die Produktivität nur durch den Wechsel der Geflechtart und höhere Flechtmaschinengeschwindigkeit wesentlich gesteigert werden kann. Optimierte Rüstprozesse und die Reduktion von Fertigungsfehlern bieten weiteres, aber vergleichsweise geringes Potenzial.

Wie Abb. 7-1 zeigt, lässt sich unter Beibehaltung der Klöppelflechttechnik die beste zyklusbezogene Ablagerate im betrachteten Bauteil-Szenario bei jeweils optimaler Spulengröße allein durch Umstieg vom Hybrid-Geflecht ( $25,7 \text{ kg h}^{-1}$ , blaue Kurve) auf das Heavy-Tow-Geflecht ( $63,6 \text{ kg h}^{-1}$ , orange Kurve) auf bereits etwa das Zweieinhalbfache anheben. Die Erhöhung der Maschinengeschwindigkeit als zweite wesentliche Stellgröße für die Steigerung der Produktivität lässt sich allerdings mit Klöppelflechtmaschinen nicht realisieren.

Eine Alternative bieten sogenannte Hochgeschwindigkeitsflechtmaschinen, wie sie im Bereich der Drahtverarbeitung zum Einsatz kommen. Um deren Eignung zu überprüfen, wurden Flechtversuche mit Hebelarmflechtmaschinen von zwei Herstellern durchgeführt. Die erzeugten Geflechte zeigen eine sehr gute Qualität. Nach diesen Ergebnissen eignen sich solche Maschinen prinzipiell für die Verarbeitung von Verstärkungsfasern.

Mit den am Markt verfügbaren Hebelarmflechtmaschinen lassen sich allerdings noch keine Faserverbundbauteile fertigen. Der weitere Entwicklungsbedarf wurde analysiert und daraus der Aufbau einer Hebelarmflechtmaschine abgeleitet, die für die Verbundbauteilherstellung optimiert ist. Diese Ideen wurden gemeinsam mit BMW zum Patent [143] angemeldet. Zentrale Anforderungen sind eine wesentlich höhere Spulenzahl, größere Spulen und mehr Platz im Zentrum der Maschine, um geometrisch komplex geformte, mehrfach gekrümmte Flechtkerne hindurch bewegen zu können.

Eine Portfolioanalyse ergab als zielführende Entwicklungsstrategie, zunächst grundlegende Aspekte der zu entwickelnden Anlage mit Prüfständen zu untersuchen. Für die in der Analyse als besonders kritisch bewerteten Systembestandteile Spulenträger, Kernhandhabungssystem und Maschinendimensionierung wurden Prüfstände aufgebaut und für Grundlagenversuche genutzt. Mit einem virtuellen parametrischen Modell zur Maschinendimensionierung konnten die Ausmaße der zu entwickelnden Flechtmaschine mit wesentlich mehr und deutlich größeren Spulen abgeschätzt werden.

Mit den so erzeugten Daten konnte abschließend die Produktivität einer solchen Fertigungsanlage abgeschätzt werden. Dabei wurde dieselbe Methodik wie beim Klöppelflechtverfahren angewendet. Allerdings wurde nur das Heavy-Tow-Geflecht untersucht, da sich mit Hebelarmflechtmaschinen keine Triaxialgeflechte herstellen lassen. Leistungsdaten von am Markt vorhandenen Hochgeschwindigkeitsflechtmaschinen zeigen, dass auch bei diesen ein Zusammenhang zwischen der Flechtspulengröße und der Maschinengeschwindigkeit existiert.

Basierend auf der Annahme konstanter Relativgeschwindigkeit zwischen Spulenträgern und Gleitbahn wurde auch für Hebelarmflechtmaschinen eine dimensionsanalytische Skalierungsregel hergeleitet. Diese wird benötigt, um die Geschwindigkeit einer Hebelarmflechtmaschine für die Verstärkungsfaserverarbeitung abzuschätzen, da es im angestrebten Bereich von Spulenzahl und Spulengröße keine Vergleichsdaten von existierenden Maschinen gibt.

Diese liegen nur für einen relativ kleinen Bereich von Spulengrößen vor, so dass nicht mit hinreichender Zuverlässigkeit zu entscheiden ist, ob die auf konstanter Gleitbahngeschwindigkeit beruhende Skalierungsregel das Phänomen richtig beschreibt. Die Kennwerte bestehender Maschinen liegen in jedem Fall unterhalb, so dass die gefundene Regel als „best case“ Abschätzung für die obere Grenze des technisch Machbaren angesehen wird. Es wurde daher mit einer weiteren Skalierungsregel gearbeitet, die besser zu den vorhandenen Datenpunkten passt und eine „worst case“-Abschätzung ermöglicht. Die Leistungsfähigkeit eines zukünftigen Produktionssystems wird mit hoher Zuverlässigkeit zwischen den durch die beiden Szenarien beschriebenen Extremwerten liegen.

Die hellgraue (w/c-Szenario) und die dunkelgraue (b/c-Szenario) Kurve in Abb. 7-1 stellen die zyklusbezogenen Ablageraten, die sich mit einer Flechtanlage auf Basis der Hebelarmflechttechnologie erreichen lassen, den vom Klöppelflecht bekannten Kurven gegenüber. Im Vergleich zum Klöppelflechtverfahren lässt sich die Ablagerate des Heavy-Tow-Geflechts um etwa 75 % im „worst case“ (auf  $109,7 \text{ kg h}^{-1}$ ) und 160 % im „best case“ (auf  $166,2 \text{ kg h}^{-1}$ ) verbessern. Gegenüber dem aktuell eingesetzten Hybridgeflecht kann eine Steigerung der zyklusbezogenen Ablagerate auf das Vier- bis Sechsfache erwartet werden.

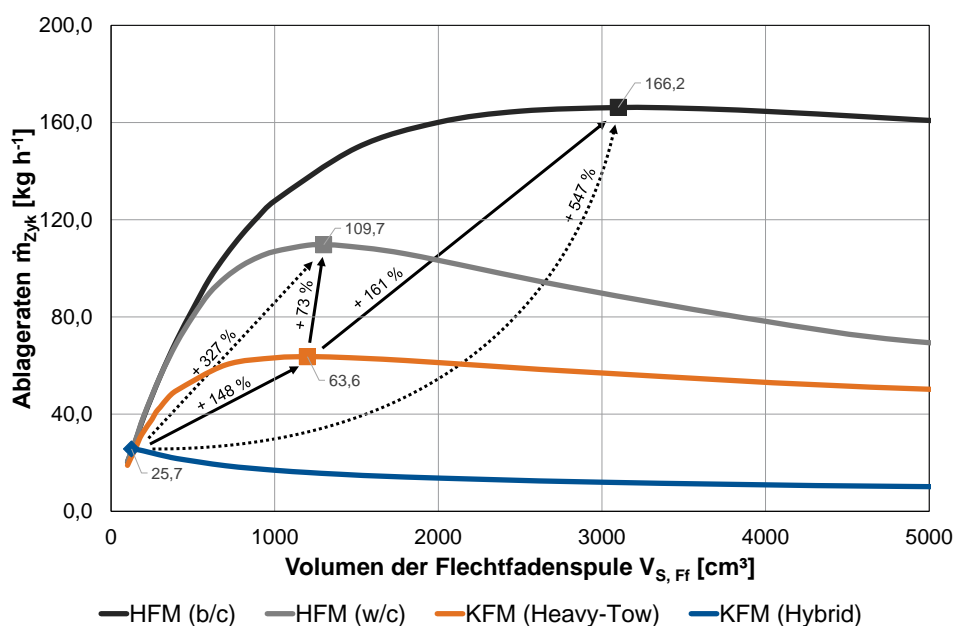


Abb. 7-1: Ablageratensteigerung durch Einsatz von Hebelarmflechtmaschinen

## 7.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit ist ein erster Schritt auf dem Weg zu einer Hochgeschwindigkeitsflechtanlage für die Faserverbundbauteilherstellung. Weitere Schritte müssen bei der konkreten Erarbeitung von tauglichen maschinenbaulichen Lösungen für die Teilsysteme der Gesamtanlage unternommen werden. Diese können zunächst mit den bereits aufgebauten Prüfständen erfolgen.

Der Prüfstand für die Untersuchung des Garnführungssystems muss mit einem beweglichen Umlenkhebel ausgestattet werden. Es wird erwartet, dass die breiten, stangenförmigen Garnführungselemente, die sich für das Führen von Bändern im statischen Fall als vorteilhaft erwiesen haben, für dynamischen Betrieb nicht geeignet sind, da die Garne leicht seitlich abrutschen können. Bevor mit einer konkreten Maschinenkonstruktion begonnen werden kann, muss eine Lösung für die schädigungsfreie und prozesssichere Garnführung unter realistischen Betriebsbedingungen in einer Hebelarmflechtmaschine erarbeitet werden. Gleiches gilt für das Bremssystem der Spule, das noch deutlich verbessert und unter realistischen Bedingungen erprobt werden muss.

Ebenso muss die Frage, wie ein Kernhandhabungssystem aussehen kann und wie schnell das Fördern der Kerne damit möglich ist, vor dem Start der Maschinenentwicklung schlüssig beantwortet werden. Die Versuchsvariante mit einem einzelnen Rollenpaar zeigt, dass sich Kerne prinzipiell mit der gewünschten Geschwindigkeit fördern lassen. Gleichzeitig wird deutlich, dass ein System, mit dem variabel geformte Flechtkerne prozesssicher mit veränderlicher Geschwindigkeit geführt werden können, wesentlich komplexer sein wird. Es muss auf jeden Fall aus mehreren Rollenpaaren bestehen, deren Anpresskraft und Antriebsleistung sich schnell und genau an den individuell erforderlichen Betriebszustand anpassen müssen.

Lösungen für weitere „hardwareseitige Baustellen“, wie z. B. für die reduzierte Schmierung der zu entwickelnden Flechtmaschine, werden am besten in enger Abstimmung mit einem Maschinenhersteller erarbeitet.

Um auf theoretischer Seite genauere Aussagen treffen und eine optimale Spulengröße für die Maschinenentwicklung vorgeben zu können, muss das Verständnis, welche Zusammenhänge von Spulengröße und Maschinengeschwindigkeit bei Hebelarmflechtmaschinen wirksam sind, deutlich verbessert werden. Alle relevanten Einflussgrößen können in einem „Multi-Parameter“-Optimierungsansatz gekoppelt werden. Mit diesem lässt sich der in der vorliegenden Arbeit über den „best case“-„worst case“-Ansatz ermittelte Bereich für die Kenndaten einer Maschine noch wesentlich eingrenzen, damit zuverlässige Prognosen der Leistungsdaten einer zukünftigen Hebelarmflechtanlage zur Faserverbundbauteilherstellung möglich sind.

## Literaturverzeichnis

- [1] K. Pudenz, *Der neue BMW 7er mit Carbon Core: 130 kg leichter*. Abrufbar unter: <http://www.springerprofessional.de/der-neue-bmw-7er-mit-carbon-core-130-kg-leichter/5691238.html> (2015, Nov. 14).
- [2] T. Günnel, *Leichtbau-Gipfel 2016: "Leichtbau ist mehr, als leicht zu bauen"*. Abrufbar unter: <http://files.vogel.de/vogelonline/pdfarticles/525/9/525982.pdf> (2016, Mrz. 14).
- [3] S. Schaper, "Braided Preforms for the BMW i3" Symposium on the occasion of the 5th anniversary of the Institute for Carbon Composites. München, Sep. 2014.
- [4] Y. Kyosev, *Braiding technology for textiles*. Cambridge, UK, Waltham, MA, USA: Elsevier/ Woodhead Pub, 2015.
- [5] C. Cherif, Ed, *Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften*. Berlin: Springer, 2011.
- [6] T. Gries, D. Veit und B. Wulfhorst, *Textile Fertigungsverfahren: Eine Einführung*, 2nd ed. München: Hanser, 2014.
- [7] F. Henning und E. Moeller, Eds, *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München: Hanser, 2011.
- [8] P. Morgan, *Carbon fibers and their composites*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.
- [9] F. Ullmann, *Ullmann's fibers*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
- [10] E. Laourine, "Geflochtene Halbzeuge und Flechttechniken" in *Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften*, C. Cherif, Ed, Berlin: Springer, 2011, pp. 307–325.
- [11] P. Potluri, "Braiding" in *Wiley Encyclopedia of Composites*, L. Nicolais, Ed, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [12] F.K. Ko, C.M. Pastore, und A.A. Head, Eds, *Atkins & Pearce Handbook of Industrial Braiding*. Covington: Atkins & Pearce, 1989.
- [13] J. U. Rosenbaum, *Flechten: Rationelle Fertigung faserverstärkter Kunststoffbauteile*. Köln: Verl. TÜV Rheinland, 1991.
- [14] T. von Reden, "Erweiterung der Systemgrenzen der Flechttechnik durch elektronisch gesteuerte Klöppel" Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2015.

- [15] Wikipedia, *Textilie*. Abrufbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Textilie#Urgeschichtliche\\_Textilnachweise](https://de.wikipedia.org/wiki/Textilie#Urgeschichtliche_Textilnachweise) (2015, Nov. 15).
- [16] J. Svoboda und P. Dvorský, *Čas Llvců: Sějiny paleolitu, zvláště na Moravě*. Brno: Akademie věd České republiky, Archeologický ústav, 1999.
- [17] Wikipedia, *Flechten (Technik)*. Abrufbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Flechten\\_%28Technik%29](https://de.wikipedia.org/wiki/Flechten_%28Technik%29) (2015, Nov. 15).
- [18] *Textilien Grundbegriffe*, 60000, 1969.
- [19] C. Ebel, A. Mierzwa und K. Kind, “Yarn damage during braiding of reinforcement fibers for composites” in *Advances in Braiding Technology: Specialized Techniques and Applications*, Y. Kyosev, Ed. 1st ed.: Woodhead Pub Ltd, 2016.
- [20] F. Schreiber, F. K. Ko, H. J. Yang, E. Amalric und T. Gries, “Novel Three-Dimensional Braiding Approach and its Products” in *The 17th International Conference on Composite Materials: ICCM 17 Conference Proceedings*, Edinburgh, Scotland, 2009.
- [21] M. Mitwalsky, “Strategien zur Steigerung der Variabilität bei der Herstellung von geflochtenen Hohlbauteilen” Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2015.
- [22] K. Birkefeld, “Virtuelle Optimierung von Geflecht-Preforms unter Berücksichtigung von Fertigungsaspekten” Dissertation, Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2013.
- [23] M. Brand, “Grundlagen zur Gestaltung von Heavy-Tow Biaxial-Geflechtem mit variablen Eigenschaften” Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2016.
- [24] A. Geßler und F. Maidl, "Verfahren zum Herstellen von Faserverbund-Halbzeugen mittels Rundflechttechnik", Deutschland Patent-Nr. 102004017311, November 3, 2005
- [25] T. von Reden, M. Bulat und K. Drechsler, “Mechanical Performance of Hybrid Carbon Glass Fibre Braids with a High ration of 0°-Fibres” in *Recent Advances in Textile Composites: October 26-28, 2010, Lille Grand Palais, Lille, France*, C. Binetruy and F. Boussu, Eds, Lancaster, Pa.: DEStech Publications, 2010, pp. 514–520.
- [26] H. Vogler, “Wurde die Flechtmaschine in Barmen erfunden?: The braiding machine - was it invented in Barmen?“, *Band- und Flechtindustrie*, vol. 36, no. 2, pp. 43–46, 1999.
- [27] B. Lepperhoff, *Die Flechtereie*, 3rd ed. Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 1914.



- [28] W. A. Douglass, *Braiding and Braiding Machinery*. Eindhoven, Netherlands: Centrex Publishing Co, 1964.
- [29] D. Branscomb, D. Beale und R. Broughton, "New Directions in Braiding", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. Volume 8, no. 2, pp. 11–24, <http://www.jeffjournal.org/papers/Volume8/JEFF8-02-02.Branscomb.D.pdf>, 2013.
- [30] M. Krissiep, "Flechtmaschine", Deutschland Patent-Nr. 338808, Juli 1, 1921
- [31] O. A. Albrecht, "Rundflechtmaschine mit zwei Reihen entgegengesetzt zueinander umlaufender Spulen", Deutschland Patent-Nr. 328594, November 4, 1920
- [32] C. Tober, "Rundflechtmaschine mit zwei in entgegengesetzter Richtung kreisenden Spulenreihen", Deutschland Patent-Nr. 229968, Januar 12, 1911
- [33] C. Tober, "Flechtmaschine", Deutschland Patent-Nr. 311306, März 18, 1919
- [34] J. Lundgren, "Braiding Machine", USA Patent-Nr. 695746, März 18, 1902
- [35] H.-D. Pape, "Strangführungsvorrichtung für Flechtmaschinen, insbesondere Umlaufflechtmaschinen", Deutschland Patent-Nr. 19925941, Dezember 14, 2000
- [36] N. Lombard, "Braiding Machine", USA Patent-Nr. 458470, August 25, 1891
- [37] S. W. Wardwell, "Braiding Machine", USA Patent-Nr. 1081474, Dezember 16, 1913
- [38] S. W. Wardwell, "Braiding Machine", USA Patent-Nr. 1032870, Juli 16, 1912
- [39] W. M. Presz und S. Kowalski, "Powered Lower Bobbin Feed System for Deflector Type Rotary Braiding Machines", USA Patent-Nr. 7270043, September 18, 2007
- [40] B. Nitz, "Rundflechtmaschine mit zwei in entgegengesetzter Richtung kreisenden Reihen von Spulen", Deutschland Patent-Nr. 437103, November 16, 1926
- [41] J. Lache, "Flechtmaschine", Deutschland Patent-Nr. 10204212, August 14, 2003
- [42] W. Emmerich, M. Schomburg und A. Nagel, "Schmiervorrichtung", Deutschland Patent-Nr. 19526744, Januar 23, 1997
- [43] W. Emmerich, "Schmiersystem sowie Verfahren zum Schmieren", Deutschland Patent-Nr. 102005054907, Mai 24, 2007
- [44] W. Emmerich, "Kreisförmige Schlittenbahnführung für eine Flechtmaschine", Deutschland Patent-Nr. 102010026470, Januar 12, 2012
- [45] J. Lache und D. Prockat, "Strangführungshebel für Flechtmaschinen", Deutschland Patent-Nr. 10014433, Oktober 5, 2000

- [46] S. Wolf, "Flechtmaschine", Deutschland Patent-Nr. 102010035883, März 1, 2012
- [47] T. H. Jones, "Improvements in and relating to Braiding Machines", Großbritannien 109180, September 6, 1917
- [48] G. Horn, "Rundflechtmaschine mit zwei entgegengesetzt umlaufenden Spulenreihen", Deutschland Patent-Nr. 317415, Januar 5, 1920
- [49] D. Denninger, M. Berger und A. Heine, "Entwurf und Auslegung eines neuen nichtlinearen Antriebskonzeptes mittel Creo Elements Pro" Chemnitz, Apr. 2011.
- [50] D. Denninger, M. Berger und W. Emmerich, "Kinematischer Entwurf und optimale Auslegung neuer hochdynamischer Antriebsbaugruppen für Wirk- und Flechtmaschinen" in *Wertschöpfungspotenzial Textiltechnik: Tagungsband zur 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung*, Chemnitz: Förderverein CETEX Chemnitzer Textilmaschinenentwicklung, 2012, pp. 103–110.
- [51] Sealtrading Inc, *Braiding Technology*. Abrufbar unter: <http://www.sealtrading.com/file/bt.pdf> (2014, Okt. 25).
- [52] J. Lundgren, "Braiding Machine", USA Patent-Nr. 887259, Mai 12, 1908
- [53] G. Horn, "Rundflechtmaschine mit zwei entgegengesetzt kreisenden Spulenreihen", Deutschland Patent-Nr. 557008, Juli 28, 1932
- [54] J. T. Klein, R. M. Broughton und D. G. Beale, "Rotably Driven Braiding Machine with Third Yarns Carried and Delivered by Stationary Carriages about a Braiding Point", USA Patent-Nr. 5913959, Juni 22, 1999
- [55] D. Denninger und M. Berger, "Design des Antriebskonzeptes der neuartigen Rotorflechtmaschine "D-3F"" in *11. Kolloquium Getriebetechnik: 23 Artikel zum 11. Kolloquium Getriebetechnik in Garching b. München 2015*, F. Irlinger and K. Abdul-Sater, Eds. 1st ed, pp. 365–387.
- [56] H. A. Niemeyer, "Barmer Artikel: Eine Industrie des gehemmten Exports", *Die Zeit*, 27 Mai, 1948, <http://www.zeit.de/1948/22/barmer-artikel>.
- [57] C. von Katzler, "Barmer Artikel", *Die Zeit*, 01 Mrz, 1951.
- [58] A. H. Kruesi und G. H. Hasko, "Computer Controlled Resin Impregnation for Composite Braiding" Prepared for the U. S. Army Materials Technology Laboratory, U. S. Composites Corporation, Troy, NY, USA, 1987.
- [59] J. Horn, "Flexible and Reproducible Automatized Composite Preform Production by Braiding" TexComp-12 Conference. Raleigh, NC, USA, Mai. 2015.
- [60] M. Braley und M. Dingeldein, "Advancements in Braided Materials Technology" in *A Materials and Processes Odyssey*, Covina, California, USA: Society

- for the Advancement of Material and Process Engineering, 2001, pp. 2445–2454.
- [61] J. Scharf, “Applications in Braid Technology” AMTAS Spring 2008 Meeting. Seattle, Mrz. 2008.
- [62] G. Grave und J. Horn, “Flexible und reproduzierbare Preformherstellung mittels Flechttechnik” in *Wertschöpfungspotenzial Textiltechnik: Tagungsband zur 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung*, Chemnitz: Förderverein CETEX Chemnitzer Textilmaschinenentwicklung, 2012.
- [63] A. Geßler und M. Schouten, “Textiltechnik für Luftfahrt - Lessons Learnt” Cluster-Treff Neue Werkstoffe. Naila, Okt. 2007.
- [64] J. Horn, “Entwicklung einer 2 1/2 D-Flechtmaschine”, *Band- und Flechtindustrie*, vol. 42, no. 1, 2005.
- [65] A. Geßler, J. Brandt, F. Maidl, C. Breu, J. Horn und H. Schneider, “Neue Entwicklungen bei der Fertigung von Kohlenstofffaserpreforms mit der Rundflechttechnik” in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2004: Luft- und Raumfahrt - Brücke für eine wissensbasierte Gesellschaft*: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 2004.
- [66] G. Grave, "Herzog Composite: Radial Braiding Machines for Composite Production", Per Email übermittelte Präsentation, Mai. 2015.
- [67] W. Pittrich, “Made in Switzerland: Fahrradrahmen der Zukunft”, *Technische Rundschau*, no. 3, pp. 70–73, <http://www.technische-rundschau.ch/archiv/2012/03/made-in-switzerland-fahrradrahmen-der-zukunft/>, 2012.
- [68] O. Rüger, “Automatisiertes Flechten” Konferenz für industrialisierte Composite Production - Industrial Composites Production Conference (ICPC). München, Jun. 2014.
- [69] G. D. Roberts, M. J. Pereira, M. S. Braley und W. A. Arnold, “Design and Testing of Braided Composite Fan Case Materials and Components” in *IS-ABE 19 Conference Proceedings*, Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [70] D. Ward, “GE Aviation” Symposium on the occasion of the 5th anniversary of the Institute for Carbon Composites. München, Sep. 2014.
- [71] GE Aviation, *New GENx Engine Advancing Unprecedented Use of Composites in Jet Engines*. Press Release. Evandale, Ohio, USA, 2004.
- [72] B. Griffiths, “Composite fan blade containment case”, *High Performance Composites*, vol. 13, no. 3, pp. 76–78, 2005.

- [73] Dowty Propellers, *Dowty Propellers readies the production restart for its composite propeller blades*. Abrufbar unter: <http://dowty.com/feature-stories/dowty-propellers-readies-production-restart-composite-propeller-blades/> (2015, Nov. 22).
- [74] G. Gardiner, “Airbus A350 Update - BRaF & FPP”, *High Performance Composites*, no. 1, pp. 32–39, 2012.
- [75] B. Arold und M. Beaumont, “Fertigung von Flugzeugspannen auf Basis der unidirektionalen Flechttechnologie”, *Lightweight Design*, no. 5, pp. 16–22, 2010.
- [76] O. Eroglu, “Effizientes Preformkonzept für die Herstellung von CFK-Spannen” Diplomarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2010.
- [77] M. J. Fedro und K. Willden, *Characterization and Manufacture of Braided Composites for Large Commercial Aircraft Structures*. Abrufbar unter: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19950022057.pdf> (2016, Okt. 03).
- [78] J. G. Pérez, “Energy Absorption and Progressive Failure Response of Composite Fuselage Frames” Masterarbeit, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, 1999.
- [79] T. Uozumi, Y. Iwahori, S. Iwasawa und T. Yamamoto, “Braiding Technologies for Airplane Applications Using RTM Process” in *Information and Innovation in Composites Technologies*, 2001, pp. 697–700.
- [80] S. Black und J. Sloan, “Carbon Fiber 2013: Conference Report”, *High Performance Composites*, vol. 22, no. 2, pp. 34–39, 2014.
- [81] Orbital ATK, *Commercial Aircraft: Composite Structures*. Abrufbar unter: [http://www.orbitalatk.com/flight-systems/aerospace-structures/commercial-aircraft-structures/docs/Commercial\\_Aircraft\\_Fact\\_Sheet.pdf](http://www.orbitalatk.com/flight-systems/aerospace-structures/commercial-aircraft-structures/docs/Commercial_Aircraft_Fact_Sheet.pdf) (2015, Nov. 22).
- [82] H. G. Thuis, *The development of composite landing gear components for aerospace applications*. Project Report NLR-TP-2004-141. Abrufbar unter: <http://reports.nlr.nl:8080/xmlui/bitstream/handle/10921/572/TP-2004-141.pdf?sequence=1> (2016, Okt. 03).
- [83] A. Patzelt und F. Eidmann, “Development of High Performance Full-CFRP-Struts for Aerospace Applications” in *EUCOMAS 2009 Conference Proceedings*, 2009.
- [84] H. Hamada, “Can Braided Composites Be Used for Crushing Elements in Cars?” in *ICCM 11 Conference Proceedings: Volume 1 - Composites Applications and Design*, 1997, pp. 218–246.

- [85] Wikipedia, *Mercedes-Benz SLR McLaren*. Abrufbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz\\_SLR\\_McLaren](https://de.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_SLR_McLaren) (2015, Nov. 21).
- [86] Wikipedia, *BMW M6*. Abrufbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/BMW\\_M6](https://de.wikipedia.org/wiki/BMW_M6) (2015, Nov. 21).
- [87] Wikipedia, *Lamborghini Aventador - Wikipedia, the free encyclopedia*. Abrufbar unter: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lamborghini\\_Aventador](https://en.wikipedia.org/wiki/Lamborghini_Aventador) (2015, Nov. 21).
- [88] BMW Group, *BMW Group erzielt im September Absatz-Rekord*. Abrufbar unter: [http://www.bmwgroup.com/d/0\\_0\\_www\\_bmwgroup\\_com/investor\\_relations/corporate\\_news/news/2015/vertriebsmeldung\\_oktober\\_2015.html](http://www.bmwgroup.com/d/0_0_www_bmwgroup_com/investor_relations/corporate_news/news/2015/vertriebsmeldung_oktober_2015.html) (2015, Nov. 21).
- [89] BMW Group, *BMW Group erzielt besten März-Absatz aller Zeiten*. Abrufbar unter: [http://www.bmwgroup.com/d/0\\_0\\_www\\_bmwgroup\\_com/investor\\_relations/corporate\\_news/news/2015/vertriebsmeldung\\_april\\_2015.html](http://www.bmwgroup.com/d/0_0_www_bmwgroup_com/investor_relations/corporate_news/news/2015/vertriebsmeldung_april_2015.html) (2015, Nov. 21).
- [90] A. Gruhl, W. Hufenbach und M. Lepper, "Prozessintegrierte Flechtmustervariation", Deutschland Patent-Nr. 102012205906, Oktober 17, 2013
- [91] U. Hanke, T. Seliger, A. Gruhl, M. Lepper, O. Renner und W. Hufenbach, "Mechanische Vorrichtung zur Realisierung einer Öffnung mit veränderlichen Öffnungsweiten", Deutschland Patent-Nr. 102011006647, Oktober 4, 2012
- [92] W. Hufenbach, A. Gruhl, M. Lepper und O. Renner, "Verfahren für die Fertigung komplexer Faserverbund-Hohlstrukturen" in *ATZ / MTZ-Fachbuch, Leichtbau-Technologien im Automobilbau: Werkstoffe - Fertigung - Konzepte*, W. Siebenpfeiffer, Ed, Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, pp. 64–69.
- [93] B. Fabich, C. Rosiepen und T. Gries, "Concept of an Active Carrier-based Tension Control System for Braiding Machines" in *Innovative Textiles for High Future Demands: Proceedings of the 12th World Textile Conference AUTEX*, Zagreb: Faculty of Textile Technology, University of Zagreb, 2012, pp. 501–506.
- [94] J. B. Sainsbury-Carter, "Prepreg Braid" in *Atkins & Pearce Handbook of Industrial Braiding*, F. K. Ko, C. M. Pastore, and A. A. Head, Eds, Covington: Atkins & Pearce, 1989, pp. RR-JSC-1 - RR-JSC-11.
- [95] F. Rapp, B. Veihelmann und M. Brand, "Braiding Towpreg to Increase Production Efficiency" in *Low Cost Composite Processing, from Aerospace OOA to Automotive Thermoplastic: SEICO 14 Conference Proceedings*, Paris, France, 2014.

- [96] A. Erber und S. Spitko, “Expanded role for thermoplastic composites”, *Reinforced Plastics*, no. 4, pp. 29–33, 2014.
- [97] I. Verpoest, S. Lomov, Y. Swolfs, P. Jacquet, V. Michaud, J.-A. Manson, J. Hobdell, P. Hine, P. Marquette, H. Herten und H. Vasiliadis, “Advanced Materials Enabling High-Volume Road Transport Applications of Lightweight Structural Composite Parts”, *SAMPE Journal*, vol. 50, no. 3, pp. 30–37, 2014.
- [98] R. Schmitt, C. Mersmann und A. Schönberg, “Machine-Vision zur Messung der Faserorientierung bei der textilbasierten FVK-Herstellung”, *tm - Technisches Messen*, vol. 77, no. 4, 2010.
- [99] W. Palfinger, S. Thumfart und C. Eitzinger, “Photometric stereo on carbon fiber surfaces” in *35th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition*, Graz, 2011.
- [100] T. von Reden, S. Becker und K. Drechsler, “Design and Energy Transmission for an Electronic Controlled Lace Bobbin” in *Advanced Composites, the Driver for high Performance Return: SETEC 10 Conference Proceedings*, Brindisi, Italy, 2010, pp. 14–21.
- [101] J. H. van Ravenhorst und R. Akkerman, “Circular braiding take-up speed generation using inverse kinematics”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 64, pp. 147–158, 2014.
- [102] T. Hans, J. Cichosz, M. Brand und R. Hinterhölzl, “Finite element simulation of the braiding process for arbitrary mandrel shapes”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 77, pp. 124–132, 2015.
- [103] B. N. Cox und G. Flanagan, “Handbook of Analytical Methods for Textile Composites”, National Aeronautics and Space Administration (NASA), Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA, NASA Contractor Report 4750, 1997.
- [104] J. Cichosz, “Experimental Characterization and Numerical Modeling of the Mechanical Response for Biaxial Braided Composites” Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2016.
- [105] T. Wehrkamp-Richter, S. T. Pinho und R. Hinterhölzl, “Modelling the Non-linear Mechanical Behaviour of Triaxial Braided Composites” in *Proceedings of the TexComp-12 Conference*, Raleigh, NC, USA, 2015.
- [106] K. Jansen, “Krümmungen endlos produziert: Radius-Pultrusion”, *Kunststoffe*, Nov 2009, p. 77, 2009, <https://www.kunststoffe.de/kunststoffe-zeitschrift/archiv/artikel/radius-pultrusion-krueemmungen-endlos-produziert-539196.html>.
- [107] R. Bezerra, “Entwicklung der Verarbeitungsprozesse Flechtpultrusion und Blasumformung für die Herstellung komplexer FVK-Hohlbauteile” Ab-

- schlussveranstaltung des BMBF-Projekts PulForm: Energieeffiziente Herstellung komplexer Hochleistungsfaserverbundbauteile mittels Pultrusion, In-line-Flechten, Blasumformung und Endbearbeitung. Augsburg, Jun. 2015.
- [108] H. Ahlborn, "Bauteilauslegung hinsichtlich Verarbeitung eines 2-step-curing Harzes im PulForm-Prozess" Abschlussveranstaltung des BMBF-Projekts PulForm: Energieeffiziente Herstellung komplexer Hochleistungsfaserverbundbauteile mittels Pultrusion, In-line-Flechten, Blasumformung und Endbearbeitung. Augsburg, Jun. 2015.
- [109] T. Uozumi, M. Tanigawa, T. Nishida, T. Miura und R. Tahara, "Development of Preforming Technology for High Productivity" in *Proceedings of the Tex-Comp-11 Conference*, Leuven, Belgium, 2013.
- [110] Wikipedia, *Produktivität*. Abrufbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=157582288> (2016, Okt. 03).
- [111] Wikipedia, *Stückkosten*. Abrufbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=157984698> (2016, Okt. 03).
- [112] Wikipedia, *Gesamtanlageneffektivität*. Abrufbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=153724804> (2016, Okt. 03).
- [113] Wikipedia, *Total Productive Maintenance*. Abrufbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=156521602> (2016, Okt. 03).
- [114] M. Bechthold und F. Strachauer, "Vorrichtung und Verfahren zum Beflechten eines Kerns", Deutschland Patent-Nr. 10259593, Juli 15, 2004
- [115] C. Poxleitner, "Entwicklung eines Spulenträgers für die Verarbeitung von Composite-Fasern in einer Rotationsflechtanlage" Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2014.
- [116] M. Giebels und H. van Panhuys, "Device and method for braiding fibers into a braided structure", Europäische Patent-Nr. EP2037028, August 10, 2011
- [117] P. C. Trinkner, *Konzept für die Serienfertigung geflochtener CFK-Hohlbauteile: Konzeption der für den Serien-Automobilbau benötigten Fertigungsprozesse und des Layouts der Produktionslinie*. Saarbrücken: Akademie Verlag, 2012.
- [118] T. Kistler, "Handling von Geflechtstrukturen" Semesterarbeit in Zusammenarbeit mit der BMW AG, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2012.
- [119] K. Drechsler und H. Friedrich, "Wege zur kostengünstigen Fertigung von Hochleistungsfaserverbundstrukturen in innovativen Fahrzeugkonzepten" Handelsblattsymposium „Werkstoffe und Fertigungstechnik, Technologien und Bauweisen“. Stuttgart, 2007.

- [120] M. Sanwald, "Kernhandling für die Composite-Bauteilherstellung mit zukünftigen Hochgeschwindigkeitsflechtverfahren" Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2014.
- [121] A. Gruhl, "Flechtauge ermöglicht die Herstellung komplexer Faserverbundprofile" in vol. 64, *Konstruktion: special Antriebstechnik 2*, H. Birkhofer, J. Feldhusen, and U. Lindemann, Eds, Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co.KG, 2012, p. 8.
- [122] F. Rapp, "Entwicklung eines Beschnittverfahrens für den Endkonturbeschnitt von Flechtpreforms auf einem Kern" Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2012.
- [123] B. Arold, A. Geßler und F. Maidl, "Verfahren zur Herstellung eines Faserhalbzeugs", Deutschland Patent-Nr. DE102009032005, Januar 13, 2011
- [124] A. Geßler, "Flechtmaschine", Deutschland Patent-Nr. DE10115953, Oktober 24, 2002
- [125] M. Turck, *Schnellrüsten: auf dem Weg zur verlustfreien Produktion mit Single Minute Exchange of Die (SMED)*. Ansbach: CETPM Publishing, 2007.
- [126] R. Bokranz und K. Landau, *Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM*, 2nd ed. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2012.
- [127] Y. Kyosev, Ed, *Advances in Braiding Technology: Specialized Techniques and Applications*, 1st ed.: Woodhead Pub Ltd, 2016.
- [128] A. Mierzwa, C. Ebel, T. Harbers und K. Drechsler, "Investigation on Creation of Fibrous Rings and their Influence on the Braided Preform Quality" in *The 17th European Conference on Composite Materials: ECCM17 Conference Proceedings*, München, 2016.
- [129] J. Petermaier, "Entwicklung eines Messverfahrens für die Schädigung von Glasfasergarnen zur Optimierung des Umspulvorgangs" Diplomarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2012.
- [130] A. Erber, A. Weng und K. Drechsler, "Effect of Designed Yarn Damages on the Out-of-Plane Properties of Braided Composite Parts" in *Recent Advances in Textile Composites: October 26-28, 2010, Lille Grand Palais, Lille, France*, C. Binetruy and F. Boussu, Eds, Lancaster, Pa.: DEStech Publications, 2010, pp. 490–497.
- [131] C. Ebel, M. Brand und K. Drechsler, "Effects of Fiber Damage on the Efficiency of the Braiding Process" in *Proceedings of the TexComp-11 Conference*, Leuven, Belgium, 2013.



- [132] T. Miadowitz. Nicht-öffentliche Semesterarbeit in Zusammenarbeit mit der BMW AG, gesperrt bis 2017, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2012.
- [133] PPG Industries Inc, *1383 Yarn: Product Description*. Abrufbar unter: <http://www.ppgfiberglass.com/getmedia/d65d7f5c-f589-4ea7-8dfb-088b2be255cf/1383-Yarn.pdf> (2016, Aug. 14).
- [134] Owens Corning: OCV Reinforcements, *SE 1500 Single-End Roving for Weaving and Knitting: Product Information*. Abrufbar unter: [http://www.ocvreinforcements.com/pdf/products/SingleEndRovings\\_SE1500\\_ww\\_06\\_2008\\_Rev0.pdf](http://www.ocvreinforcements.com/pdf/products/SingleEndRovings_SE1500_ww_06_2008_Rev0.pdf) (2016, Aug. 14).
- [135] Maschinenfabrik Niehoff GmbH & Co. KG, *NIEHOFF Magazine 01/2014: Expertise, Customer Driven, Service - in Good Hands with NIEHOFF*. Abrufbar unter: [http://www.niehoff-gmbh.info/images/pdf/magazine/Niehoff\\_Magazine\\_1\\_2014.pdf](http://www.niehoff-gmbh.info/images/pdf/magazine/Niehoff_Magazine_1_2014.pdf) (2016, Aug. 21).
- [136] Spirka Schnellflechter GmbH, *Schwere Hebelarm-Flechtmaschinen Typ UN-IDRA*. Abrufbar unter: <http://www.spirka-schnellflechter.com/de/produkte/flechtmaschinen/serie-unidra.html> (2016, Aug. 21).
- [137] Steintex oHG, *Flechtspulen für die Textil- und Drahtindustrie / Braider Bobbins for Textile- and Wire-Industry*. Abrufbar unter: [http://www.steintex.de/tl\\_files/pdf/Steintex\\_SpulenProspekt%204%20HQ.pdf](http://www.steintex.de/tl_files/pdf/Steintex_SpulenProspekt%204%20HQ.pdf) (2016, Sep. 04).
- [138] J. Wolf, "Voruntersuchungen zur Konstruktion einer Längsfadenzuführung für eine Hochgeschwindigkeits-Flechtmaschine" Semesterarbeit, Hochschule Reutlingen, Reutlingen, 2014.
- [139] Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, *Antriebstechnik - neu gedacht. XTS. eXtended Transport System*. Das lineare Transportsystem von Beckhoff. Abrufbar unter: <http://www.beckhoff.de/xts/> (2016, Aug. 26).
- [140] N. Herdegen, *Wenn Carbon auf Elektronik trifft*. Vortrag auf den Hofer Vliesstofftagen 2014, Hof. Abrufbar unter: [http://www.hofer-vliesstofftage.de/vortraege/2014/2014\\_1.pdf](http://www.hofer-vliesstofftage.de/vortraege/2014/2014_1.pdf) (2016, Aug. 19).
- [141] F. Sommer, "Parameterstudie zur Geometrieauslegung einer Hebelflechtmaschine" Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2015.
- [142] Wikipedia, *Kolbengeschwindigkeit*. Abrufbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=153012545> (2016, Sep. 12).
- [143] B. Veihelmann und C. Ebel, "Rotationsflechtvorrichtung zum Umflechten eines Formkerns", Deutschland Patent-Nr. DE102014112778, März 10, 2016

- [144] Gutowski, Timothy George Peter, Ed, *Advanced composites manufacturing*. New York: Wiley, 1997.
- [145] *Bestimmung der Zugeigenschaften Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe*, DIN EN ISO 527-4, 1997.
- [146] *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM D 3039/D 3039M - 00, 2000.
- [147] *Determination of Plain, Open Hole and Filled Hole Tensile Strength*, AITM 1-0007, 2004.

# A Anhang

## a Grundlegendes zu Faserverbundkunststoffen

Fasern sind Gebilde, die einen geringen Durchmesser und eine im Vergleich dazu deutlich größere Länge aufweisen. Viele Materialien zeigen erheblich bessere mechanische Eigenschaften, wenn sie in Faserform anstatt als Vollmaterial vorliegen (z. B. feine Metalldrähte oder Glasfasern). Viele der Materialien, die sich besonders gut in Faserform überführen lassen oder gar nur in dieser vorkommen (z. B. alle Arten von Naturfasern), weisen zudem gegenüber Metallen eine deutlich geringere Dichte bei gleichzeitig sehr guten mechanischen Eigenschaften auf.

Dabei beruht die Zunahme der Festigkeit oft auf dem Größeneffekt. Dieser geht von einer gleichmäßigen Verteilung unvermeidlicher Defekte in der Materialstruktur aus, an denen unter Belastung das Materialversagen einsetzt. Bei abnehmendem Durchmesser – also der Überführung in eine Faserstruktur – steigt der mittlere Abstand zwischen den Defektstellen an; es sind somit bezogen auf die Länge weniger potenzielle „Schwachpunkte“ in der Struktur einer Faser enthalten, was erhöhte Bruchfestigkeit zur Folge hat.

Die bei vielen Fasermaterialien sehr gute gewichtsspezifische Steifigkeit beruht hingegen in der Regel auf einer Ausrichtung der Materialstruktur entlang der Faserlängsrichtung. Speziell bei auf Polymeren basierenden Fasern ist diese Ausrichtung der Molekülketten mit ihren starken atomaren Bindungen die Hauptursache für hohe Steifigkeit. Durch den Herstellungsprozess, der oftmals ein Ziehen oder Verstrecken beinhaltet, kann diese strukturelle Ausrichtung weiter verbessert werden.

Leider können Werkstoffe in Faserform praktisch ausschließlich Zugbelastung aufnehmen, bei Druck- oder Querbelastung knicken sie oder weichen seitlich aus. Beim Einsatz in Faserverbundkunststoffen gelingt es, die sehr guten mechanischen Eigenschaften der Fasern durch Einbetten in ein Trägermaterial, die so genannte Matrix, nutzbar zu machen. Ein seitliches Ausweichen oder Knicken wird verhindert, Kraft kann in die Fasern eingeleitet werden; es entsteht ein Konstruktionsmaterial mit in Bezug auf sein Gewicht herausragenden mechanischen Eigenschaften.

### Entwicklung der Faserverbundkunststoffe

Faserverbundwerkstoffe in ihrer natürlichen Form als Holz oder auch künstlich hergestellte in Form von Papier werden schon seit Jahrtausenden genutzt. Auch die „Faser“-Verstärkung von Lehm mit Stroh ist ein uraltes Beispiel dafür, wie ein lasttragendes, aber in Reinform biegeschlaffes Material durch Einbetten in eine Matrix zu einem neuen „Verbund“-Werkstoff entwickelt werden kann, der überlegene Eigenschaften aufweist.

Dieses bekannte Wirkprinzip hat mit der Entwicklung von Kunststoffen zu Anfang des vergangenen Jahrhunderts, die als Matrixsysteme zum Einsatz kommen konnten, zur

Entwicklung einer völlig neuen Klasse von Konstruktionsmaterialien – eben der Faser-verbundkunststoffe – geführt.

### **Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen**

FVK zeigen im Vergleich mit metallischen Konstruktionsmaterialien in verschiedener Hinsicht ein völlig anderes Verhalten. Da es sich um inhomogene Werkstoffe handelt, die aus zwei Phasen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften zusammengesetzt sind, ist das Verhalten des Gesamtmaterials entweder eine Mischung der Eigenschaften der Einzelmaterialien, oder es wird durch die Eigenschaften eines der beiden dominiert. So wird z. B. zwischen faser- und matrixdominierten Eigenschaften unterschieden.

Unter den faserdominierten Eigenschaften sind die maßgeblich von der **Fasertyp** beeinflussten guten Festigkeits- und Steifigkeitswerte hervorzuheben – allerdings liegen diese nur in Faserrichtung vor. Metalle sind in der Regel isotrope Werkstoffe, zeigen also in jeder Richtung annähernd gleiche Eigenschaften. Im Gegensatz dazu sind FVK stark anisotrop, d.h. die Eigenschaften in Faserrichtung unterscheiden sich massiv von denen in Quer- oder Matrixrichtung.

Deswegen ist die **Faserrichtung** der Parameter mit dem größten Einfluss auf die faserdominierten mechanischen Eigenschaften des Verbundmaterials. Da Fasern nur entlang ihrer Längsachse Kraft übertragen können, müssen sie im Bauteil entsprechend der Belastung ausgerichtet sein. Dies lässt sich besonders gut bei Bauteilen mit einer Vorzugsbelastungsrichtung (z. B. einer Zugstrebe oder einem Biegebalken) umsetzen, bei denen das größte Potenzial zur Gewichtseinsparung im Vergleich mit einer Herstellung aus Metallwerkstoffen besteht.

Sind im Bauteil mehrere Belastungsrichtungen vorhanden bzw. müssen unterschiedliche Lastfälle abgedeckt werden, müssen auch in diesen Richtungen verlaufende Fasern vorgesehen werden. Einerseits reduziert sich dadurch das Leichtbaupotenzial, andererseits muss das Fertigungsverfahren die Einbringung der Fasern in der gewünschten Richtung ermöglichen. In der Praxis wird diese Aufgabe oft so gelöst, dass Lagen unterschiedlich orientierter Fasern zu einem sogenannten Laminat übereinandergestapelt werden.

Die Angabe der Faserrichtung ist ein essentieller Bestandteil der Beschreibung eines FVK. Sie erfolgt so, dass eine spezielle Bauteilachse als 0°-Richtung definiert und die Ausrichtung des Verlaufs der Fasern in den anderen Lagen relativ zu dieser Achse angegeben wird. Verlaufen im einfachsten Fall alle Fasern in derselben Richtung, spricht man von einem unidirektionalen (UD) FVK. Sind die Lagenrichtungen so im Laminat verteilt, dass in jeder Richtung annähernd gleiche Eigenschaften erreicht werden, wird dies als quasi-isotroper (QI) Aufbau bezeichnet. Ein typischer QI-Aufbau enthält beispielsweise zu gleichen Anteilen Lagen in 0°, +45°, -45° sowie 90°-Richtung.

Werden für die einzelnen Lagen des Laminats textile Halbzeuge eingesetzt, hat deren **Faserarchitektur** – also die Art und Weise, wie die Fasern in der textilen Fläche miteinander verbunden sind – großen Einfluss auf die Eigenschaften des Verbundmaterials.

Bei Geweben und Geflechtem werden die in verschiedenen Richtungen verlaufenden Garnscharen durch gegenseitiges Verkreuzen fixiert bzw. abgebunden, bei Gelegen durch das Vernähen der Garnscharen. Die Häufigkeit und Verteilung der Kreuzungspunkte im Textil bzw. die Art und Weise der Vernähung hat maßgeblichen Einfluss auf das Materialverhalten. Je weniger Abbindungspunkte vorhanden sind, desto weniger wird der gerade Verlauf der Fasern gestört. Dies hat in Bezug auf Steifigkeit oder Festigkeit des Materials Verbesserungen zur Folge, allerdings in der Regel auf Kosten von Abstrichen bei der Materialhandhabbarkeit und der Schlagbeständigkeit des Verbunds.

Die **Faserlänge** der im Verbundwerkstoff eingesetzten Verstärkungsfasern bestimmt ebenfalls maßgeblich über die faserdominierten Materialeigenschaften. Für Strukturbau- teile, bei denen die mechanische Leistungsfähigkeit die wichtigste Anforderung ist, werden daher möglichst lange Fasern eingesetzt. Bereits ab einer Länge von 50 mm spricht man von Endlosfasern, da sich bei weiter steigender Faserlänge die Materialeigenschaften nicht mehr wesentlich verbessern.

Entscheidend ist, dass die sogenannte kritische Länge der Fasern, die von Faser- und Matrixtype sowie dem Faserdurchmesser abhängt, nicht unterschritten wird: Ab dieser Länge ist die Überlappungslänge einzelner, paralleler Filamente so groß, dass von verlustfreier Kraftübertragung zwischen den Fasern durch die Matrix ausgegangen werden kann. Unterschreitet die Länge der Filamente diese kritische Länge, nehmen die mechanischen Eigenschaften des FVWs immer weiter ab. Bis zu einer Länge von über einem Millimeter ist von sogenannten Langfasern die Rede, noch kürzere Fasern mit Längen von unter einem Millimeter werden als Kurzfasern bezeichnet und z. B. zur Verstärkung von Spitzgussmassen eingesetzt.

Ein weiterer bestimmender Parameter ist die im Verbundwerkstoff vorhandene Faser- menge. Sie wird als **Faservolumengehalt** (FVG) angegeben, der das Volumen der Fa- sern zum Bauteilvolumen ins Verhältnis setzt. Je höher der FVG ist, desto besser sind die faserdominierten Eigenschaften. Die Anordnung der Fasern hat großen Einfluss auf den FVG. Bei wirrer Faseranordnung entstehen zwangsläufig größere Zwischenräume zwischen den Filamenten als bei sehr regelmäßiger, paralleler Faseranordnung in einem UD-Laminat, in dem bis zu 70 % des Volumens durch Fasern ausgefüllt sein können.

Für Luftfahrtbauteile wird in der Regel ein FVG von 60 % angestrebt. Dieser stellt er- fahrungsgemäß den besten Kompromiss zwischen möglichst vielen Fasern für das Er- reichen guter mechanischer Eigenschaften und ausreichender Benetzbarkeit mit dem Matrixmaterial dar. Bei höherem FVG werden einzelne Filamente nicht mehr vollstän- dig mit Matrixmaterial umschlossen. Es bilden sich Trockenstellen, die sich sehr negativ auf mechanische Eigenschaften und Bauteillebensdauer auswirken. Im Automobilbe- reich liegt der Ziel-FVG mit etwa 50 % bis 55 % zumeist etwas niedriger. Da die Fa- serzwischenräume dann größer sind, kann das Laminat einfacher und vor allem schneller mit dem Matrixharz imprägniert werden. So lässt sich die Zykluszeit für die Bauteilher-

stellung bedeutend reduzieren. Ein gewisser Abschlag bei der mechanischen Leistungsfähigkeit wird dafür in Kauf genommen. Abb. A-1 fasst die Einflüsse der verschiedenen genannten Faserparameter (Richtung, Architektur, Länge, Menge) auf die faserdominierte Steifigkeit des Verbundwerkstoffs anschaulich zusammen.

Ein weiter Bereich der Eigenschaften von FVK wird auch vom **Matrixmaterial** bestimmt. Auf mechanischer Seite betrifft dies vorrangig die Druckfestigkeit, da diese davon abhängt, wie gut die Matrix das seitliche Ausweichen der Fasern unter Druckbelastung verhindert. Ebenso werden die Eigenschaften, die von der Verbindungsfestigkeit zwischen Fasern und Matrix abhängen, maßgeblich vom Matrixmaterial bestimmt. Dies betrifft praktisch alle Materialeigenschaften, die im Fall von Crashbeanspruchungen relevant sind, wie z.B. die Energiefreisetzungsrates oder die interlaminare Scherfestigkeit.

Im Vergleich mit vielen Metallen zeigen FVK ein vollkommen anderes Versagensverhalten. Unter Belastung tritt häufig zunächst das Ablösen der Fasern von der Matrix auf, wodurch ein Riss im Material entsteht, der dieses dann in der Matrix durchläuft und so schließlich zum Versagen des Bauteils führt. Aufgrund der inhomogenen Materialstruktur mit beständigen Übergängen zwischen steifem Faser- und vergleichsweise dehnbarem Matrixmaterial sind FVK nur sehr begrenzt zu Lastumlagerung und duktilem Verhalten fähig, was speziell bei punktuell hohen Lasten z. B. in Kräfteinleitungsbereichen kritisch ist. Das Materialverhalten ist in der Regel linearelastisch bis zum Bruch, der dann abrupt eintritt. Das von Metallen bekannte Fließen des Materials, das schadensoleranter ist und Bauteilüberlastungen sichtbar macht, findet nicht statt.

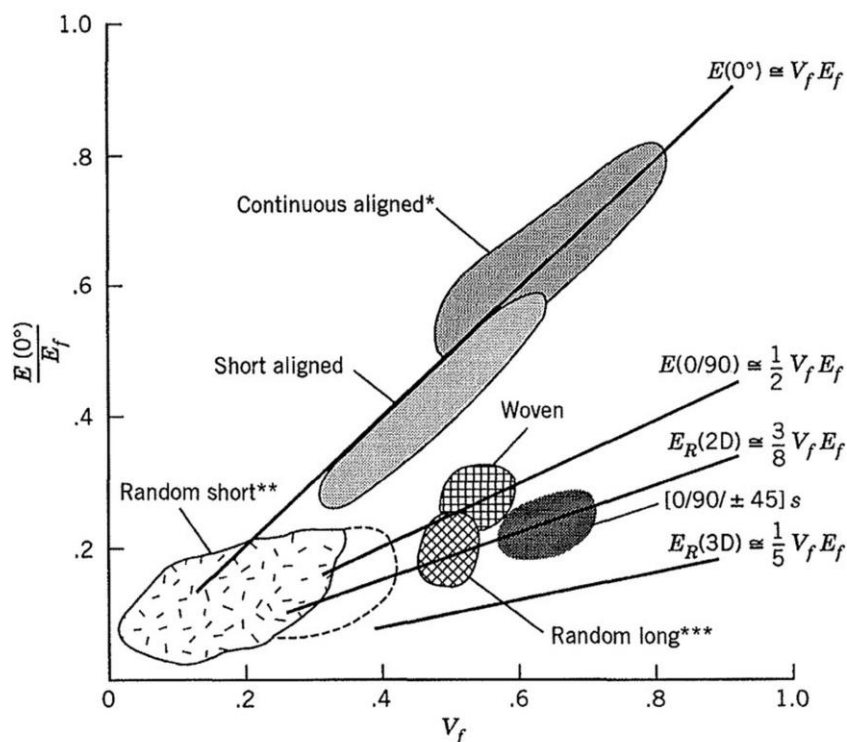


Abb. A-1: Steifigkeiten verschiedener FVK (aus [144])

Dieses Materialverhalten macht FVK im Besonderen anfällig für Schlagbeanspruchungen, die sogenannte Delaminationen zur Folge haben können. Eine Delamination ist ein Schadensfall, der bei Laminaten – also Materialien, die aus Schichten (lat. laminae) aufgebaut sind – auftreten kann, wenn sich die Verbindung zwischen einzelnen, nur durch das Matrixharz miteinander verbundenen Schichten löst. Eine delaminierte Stelle ist von außen am Bauteil nicht notwendigerweise erkennbar – dennoch kann die Tragfähigkeit der Struktur massiv reduziert sein.

Weitere Materialeigenschaften, die primär vom Matrixmaterial bestimmt werden, sind die Ermüdungs- und Korrosionseigenschaften, bei denen FVK typischerweise bedeutend bessere Werte erreichen als metallische Konstruktionsmaterialien.

### **Materialien für Faserverbundkunststoffe**

Kohlenstofffasern (CF) werden als Verstärkungsfasern im Bereich struktureller FVK eingesetzt, wenn beste mechanische Eigenschaften erreicht werden sollen, also z. B. bei vielen Luftfahrtbauteilen. Für Anwendungen mit geringeren mechanischen Anforderungen und hohem Kostendruck kommen häufig die günstigeren Glasfasern (GF) zum Einsatz. Ein typischer Anwendungsbereich ist die Herstellung von Rotorblättern für Windenergieanlagen. Muss das Bauteil bestimmte Brandschutzanforderungen erfüllen oder ist es Schlagbeanspruchungen ausgesetzt, bieten Aramidfasern (AF) eine oft verwendete Alternative, da sie flammbeständig und weniger spröde als CF bzw. GF sind und solchen Belastungen besser standhalten. Ihre Kosten liegen noch über denen von CF. Weitere Fasermaterialien, wie z. B. Naturfasern werden zumeist nur für nicht-strukturelle Anwendungen eingesetzt.

Als Matrixmaterialien sind für FVK-Strukturbauteile sowohl duroplastische als auch thermoplastische Kunststoffe im Einsatz. Elastomere Matrixsysteme werden kaum verwendet, sind aber in anderen Bereichen z. B. bei der Reifenherstellung sehr verbreitet.

Als duroplastische Matrixmaterialien sind Epoxidharz-Systeme am weitesten verbreitet, auch Polyurethane werden verwendet. Duroplaste werden als sogenannte Reaktivsysteme eingesetzt. Das heißt, dass sich in einer chemischen Reaktion aus kleineren Molekülen der Kunststoff bildet. Dieses Aushärten muss nach Abschluss der Formgebung erfolgen, da die Bauteilgeometrie anschließend nicht mehr verändert werden kann.

Bei den thermoplastischen Kunststoffen reicht die Spanne der verwendeten Materialien von im Automobilbereich verbreiteten technischen Kunststoffen wie Polyamid bis hin zu Hochleistungsmaterialien wie PEEK<sup>1</sup>, die sich in Luftfahrtbauteilen finden. Thermoplaste sind fertig ausreagierte, aber untereinander nicht verbundene, lange Molekülketten. Sie lassen sich zwar unter Wärmeeinwirkung verflüssigen, erreichen aber bei weitem keine so geringen Viskositäten wie die Grundbestandteile der Reaktivsysteme.

---

<sup>1</sup> Polyetheretherketon

## b Flechtmaschinenhersteller und -anwender

**Tab. A-1: Flechtmaschinenhersteller (USA, Europa, Japan)**

Die Kategorien KFM (Klöppelflechtmaschinen), RFM (Rotationsflechtmaschinen) und Anlagen für Faserverbundkunststoffe (FVK) sind jeweils mit einem X gekennzeichnet, wenn der betreffende Anlagenhersteller in diesem Bereich Produkte anbietet. Die Homepagelinks wurden am 16.11.2015 in die Liste aufgenommen und überprüft.

Flechtmaschinenhersteller, Land	Homepage	KFM	RFM	FVK
August Herzog Maschinenfabrik GmbH & Co.KG, Deutschland	<a href="http://www.herzog-online.com">www.herzog-online.com</a>	X		X
Eurocarbon B. V., Niederlande	<a href="http://www.eurocarbon.com">www.eurocarbon.com</a>			X
Kabelflechter Alfeld GmbH, Deutschland	<a href="http://www.kabelflechter.de">www.kabelflechter.de</a>		X	
Körting Nachfolger Wilhelm Steeger GmbH & Co.KG, Deutschland	<a href="http://www.steeger-online.de">www.steeger-online.de</a>	X		X
Maschinenfabrik Niehoff GmbH & Co. KG, Deutschland	<a href="http://www.niehoff-gmbh.info">www.niehoff-gmbh.info</a>		X	
Mayer Industries Inc., USA	<a href="http://www.mayerind.com">www.mayerind.com</a>	X		
Muratec Murata Machinery, Ltd., Japan	<a href="http://www.muratec.net">www.muratec.net</a>			X
Spiraltex Industrie, Frankreich	<a href="http://www.spiraltex.com">www.spiraltex.com</a>	X		X
Spirka Schnellflechter GmbH, Deutschland	<a href="http://www.spirka-schnellflechter.com">www.spirka-schnellflechter.com</a>		X	
Talleres Ratera SA., Spanien	<a href="http://www.ratera.com">www.ratera.com</a>	X		
Wardwell Braiding Co., USA	<a href="http://www.wardwell.com">www.wardwell.com</a>	X	X	X

**Tab. A-2: Hersteller von geflochtenen Faserpreforms**

Nicht vollständige Übersicht einiger wichtiger Flechtpreformproduzenten mit ihren Hauptaktivitätsfeldern: Automobil (A), Luftfahrt (L) oder Industrie bzw. Sonstiges (I). Die Homepagelinks wurden am 22.11.2015 in die Liste aufgenommen und überprüft.

Geflechthersteller, Land	Homepage	A	L	I
A & P Technology Inc., USA	<a href="http://www.braider.com">www.braider.com</a>		X	X
Eurocarbon B. V., Niederlande	<a href="http://www.eurocarbon.com">www.eurocarbon.com</a>	X		X
GE Dowty Propellers, Großbritannien	<a href="http://www.dowty.com">www.dowty.com</a>		X	
Munich Composites GmbH, Deutschland	<a href="http://www.munich-composites.de">www.munich-composites.de</a>	X		X
Ratier-Figeac S. A. S., Frankreich	<a href="http://www.ratier-figeac.com">www.ratier-figeac.com</a>		X	
SGL Kumpers GmbH & Co. KG, Deutschland	<a href="http://www.sgl-kuempers.com">www.sgl-kuempers.com</a>	X		X
Teufelberger Composites GesmbH, Österreich	<a href="http://www.teufelberger-composite.com">www.teufelberger-composite.com</a>	X		X



**Tab. A-3: Klöppelflechtmaschinen der August Herzog GmbH & Co.KG**

Die Daten in der Tabelle wurden am 20.03.2013 der Internetseite der Firma entnommen.

Bezeichnung der Maschine	Stich [mm]	$n_S$ [-]	$f_F$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$V_{S,Ff}$ [ $\text{cm}^3$ ]
NG 2/1/8-120	120	8	270	547
NG 2/1/12-120	120	12	330	547
NG 2/1/16-120	120	16	330	547
NG 1/8-140	140	8	220	1211
NG 1/12-140	140	12	235	1211
NG 1/16-140	140	16	235	1211
NG 1/24-140	140	24	235	1211
SENG 1/32-120	120	32	330	547
SENG 1/8-160	180	8	180	1732
SENG 1/12-160	160	12	200	1732
SENG 1/16-160	160	16	200	1732
SENG 1/24-160	160	24	200	1732
SENG 1/32-160	160	32	200	1732
SE 1/12-266	266	12	110	5909
SE 1/16-266	266	16	110	5909
SE 1/20-266	266	20	110	5909
SE 1/24-266	266	24	110	5909
SE 1/32-266	266	32	110	5909
SE 1/12-528	528	12	40	40464
SE 1/12-720	720	12	30	93305
SE 1/16-720	720	16	30	93305
SE 1/12-1088	1088	12	24	213426
SE 1/12-1500	1500	12	14	382764
SE 1/12-2000	2000	12	9	745146
RU 2/12-80	80	12	300	148
RU 2/16-80	80	16	300	148
RU 2/24-80	80	24	300	148
RU 2/12-100	100	12	250	346
RU 2/16-100	100	16	250	346
RU 2/24-100	100	24	250	346
SFL 1/48-120	120	48	330	547

Bezeichnung der Maschine	Stich [mm]	$n_S$ [-]	$f_F$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$V_{S,Ff}$ [ $\text{cm}^3$ ]
<b>SFL 1/24-120</b>	120	24	200	547
<b>EXNG 1/24-140</b>	140	24	235	1211
<b>KBD 1/12-140</b>	140	12	175	471
<b>KBD 1/16-140</b>	140	16	175	471
<b>KBD 1/24-140</b>	140	24	175	471
<b>KBD 1/32-140</b>	140	32	175	471
<b>KBD 1/36-140</b>	140	36	175	471
<b>KBD 1/48-140</b>	140	48	175	471
<b>PZ 1/16-224</b>	224	16	110	1505
<b>PZ 1/24-224</b>	224	24	110	1505
<b>PZ 1/32-224</b>	224	32	110	1505
<b>PZ 1/36-224</b>	224	36	110	1505
<b>PZ 1/40-224</b>	224	40	110	1505
<b>PZ 1/48-224</b>	224	48	110	1505
<b>KBB 1/16-100</b>	100	16	220	265
<b>KBB 1/24-100</b>	100	24	220	265
<b>KBB 1/32-100</b>	100	32	220	265
<b>KBB 1/48-100</b>	100	48	220	265
<b>KBB 1/16-140</b>	140	16	175	257
<b>KBB 1/24-140</b>	140	24	175	257
<b>KBB 1/32-140</b>	140	32	175	257
<b>Klöpfflechtmaschinen für FVK-Anwendungen</b>				
<b>RF 1/128-100</b>	100	128	150	265
<b>RF 1/144-100</b>	100	144	150	265
<b>Typname unbekannt<sup>2</sup></b>	210	48	80	2300

<sup>2</sup> Von Fa. Herzog projektierte Maschine, bei der CF-Herstellerspulen direkt in einen sehr großen Klöppel eingesetzt werden können. Es ist unbekannt, ob sich eine solche Maschine bereits im Einsatz befindet.

**Tab. A-4: Klöppelflechtmaschinen der Talleres Ratera SA.**

Die Daten in der Tabelle wurden am 03.04.2013 der Internetseite der Firma entnommen.

Bezeichnung der Maschine	Stich [mm]	$n_S$ [-]	$f_F$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$V_{S,FF}$ [ $\text{cm}^3$ ]
24/80	80	24	235	173
40/80	80	40	222	173
52/80	80	52	222	173
80/80	80	80	180	173
120/80	80	120	202	173
16/115 Doble	115	16	330	547
36/115	115	36	330	547
16/208	208	16	115	2989
32/208	208	32	110	2989
24/342	342	24	60	14333
12/432	432	12	50	30065
16/80	80	16	311	173
8/104	104	8	285	350
32/115	115	32	290	547
48/115	115	48	270	547
24/140	140	24	220	1211
32/140	140	32	220	1211
48/140	140	48	210	1211
16/240	240	16	106	4297
24/240	240	24	106	4297
32/104	104	32	238	260
64/80	80	64	250	143
16/104	104	16	240	289
24/104	104	24	240	289
24/115	115	24	180	465
72/154 horizontal	154	72	130	494

**Tab. A-5: Klöppelflechtmaschinen der Spiraltex Industrie**

Die Daten in der Tabelle wurden am 03.04.2013 der Internetseite der Firma entnommen.

Bezeichnung der Maschine	Stich [mm]	$n_S$ [-]	$f_F$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$V_{S,Ff}$ [ $\text{cm}^3$ ]
Typname unbekannt	96	8 – 96 (48) <sup>3</sup>	260	156
Typname unbekannt	126	8 – 96 (48)	200	418
Typname unbekannt	150	8 – 96 (48)	170	589
Typname unbekannt	180	8 – 96 (48)	140	975
Typname unbekannt	250	8 – 96 (48)	90	1134
Typname unbekannt	96	8 – 96 (48)	280	228
Typname unbekannt	126	8 – 96 (48)	220	418
Typname unbekannt	150	8 – 96 (48)	200	684
Typname unbekannt	180	8 – 96 (48)	170	975
Typname unbekannt	250	8 – 96 (48)	100	4037
<b>Klöppelflechtmaschinen für FVK-Anwendungen</b>				
Typname unbekannt	96	8 – 96 (48)	280	228
Typname unbekannt	126	8 – 96 (48)	220	418
Typname unbekannt	150	8 – 96 (48)	200	684
Typname unbekannt	180	8 – 96 (48)	170	975
Typname unbekannt	250	8 – 96 (48)	100	4037
Typname unbekannt	96	8 – 96 (48)	260	221
Typname unbekannt	126	8 – 96 (48)	200	500
Typname unbekannt	150	8 – 96 (48)	170	972

Für die übrigen in Tab. A-1 genannten Hersteller von Klöppelflechtmaschinen lassen sich auf den Homepages keine vollständigen Datensätze finden, so dass deren Maschinen für die in der Arbeit vorgenommenen Analysen nicht herangezogen werden können.

<sup>3</sup> Spiraltex Industrie gibt auf der Homepage keine bestimmte Spulenzahl für Maschinen unterschiedlichen Typs an. Alle Maschinentypen sind mit Spulenzahlen von 8 bis 96 Spulen lieferbar. Falls für die Berechnungen in der Arbeit notwendig, wird eine mittlere Maschinengröße mit 48 Spulen gewählt. Da die genauen Typenbezeichnungen auch bei Spiraltex Industrie von der Spulenzahl abhängen, sind diese ebenfalls nicht auf der Homepage angegeben.

**Tab. A-6: Schnellflechtmaschinen der Spirka Schnellflechter GmbH**

Die Tabelle enthält auch die Maschinen von Wardwell Braiding Co. Da beide Firmen der Wilms-Gruppe angehören, ist das Produktportfolio weitgehend identisch.

(Maschinentypen: UFM = Umlaufrad-FM, DFM = Deflektor-FM, HFM = Hebelarm-FM)

Die Daten in der Tabelle wurden am 03.09.2016 den Internetseiten der Firmen entnommen.

Nur die Daten der mit \* gekennzeichneten Maschine 48S3H stammen aus [51].

Bezeichnung der Maschine	Typ	$n_S$ [-]	$f_S$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$V_{S,FF}$ [ $\text{cm}^3$ ]	Spulentyp
DF12A	HFM	12	165	370	S3
DF16A	HFM	16	165	370	S3
DF24A	HFM	24	100	370	S3
DFT24A	HFM	24	80	535	S4
Dratex 1216	HFM	12	175	370	S3
Dratex 1616	HFM	16	175	370	S3
Dratex 2426	HFM	24	110	370	S3
Dratex 2450	HFM	24	60	775	S5
16F03A	HFM	16	135	535	S4
24F03A	HFM	24	100	535	S4
32F03A	HFM	32	40	535	S4
36F03A	HFM	36	40	535	S4
Unidra 2410S/4	HFM	24	60	1070	S6
Unidra 2410S/6	HFM	24	80	775	S5
48S3H*	HFM	48	18	1440	
16C Rapid T160	DFM	16	160	255	
24C Rapid T110	DFM	24	110	255	
Speedmaster 100	DFM	24	100	255	
Speedmaster 150	DFM	16	150	173	
16C5	UFM	16	200	535	S4
24C4	UFM	24	150	535	S4

**Tab. A-7: Schnellflechtmaschinen der Niehoff GmbH & Co.KG**

(Maschinentypen: HFM = Hebelarmflechtmaschine)

Die Daten in der Tabelle wurden am 03.09.2016 der Internetseite der Firma entnommen.

Bezeichnung der Maschine	Typ	$n_S$ [-]	$f_S$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$V_{S,FF}$ [ $\text{cm}^3$ ]	Spulentyp
BMV 16	HFM	16	185	370	S3
BMV 24	HFM	24	110	370	S3
BMV 124	HFM	24	90	535	S4

## c Eigenschaften von Fasern und Garnen

**Tab. A-8: In der Arbeit verwendete Ablagebreiten verschiedener Garntypen**

Die fett gedruckten Werte für CF-Garne sind gut bekannte Erfahrungswerte des Autors und wurden mit den in den Arbeiten von Birkefeld [22], Brand [23] und Mitwalsky [21] angegebenen Ablagebreiten abgeglichen. Die mittleren regulären Ablagebreiten der GF-Garne sind mit den geometrischen Zusammenhängen aus Abb. 2-2 unter Berücksichtigung des Dichteunterschieds von CF- und GF-Garnen aus dem Wert des 12k-CF-Garns errechnet.

Garntype	$b_F$ reguläre Ablage [mm]			$b_F$ für gespreizte Ablage [mm]		
	minimal	mittel	maximal	minimal	mittel	maximal
<b>CF-12k</b>	<b>2,5</b>	<b>3</b>	<b>3,5</b>	2,5	6	7
<b>CF-24k</b>	<b>3,5</b>	<b>4,25</b>	<b>5</b>	3,5	9	11
<b>CF-50k</b>	<b>4</b>	<b>5,5</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>11</b>	<b>15</b>
<b>GF-68</b>		0,9				
<b>GF-136</b>		1,3				
<b>GF-300</b>		1,7				
<b>GF-600</b>		2,4				
<b>GF-1200</b>		3,3				
<b>GF-2400</b>		4,6				

## d Eingangswerte für die Produktivitätsanalyse

**Tab. A-9: Grundlegende Eingangswerte der Berechnung**

Die hier aufgeführten Werte werden für alle Berechnungen der vorliegenden Arbeit verwendet, sofern nicht im Einzelfall Abweichendes angegeben ist.

Parameter	Variable	Wert	SI-Wert
Dichte von Kohlenstofffasern	$\rho_{CF}$	1,8 g cm <sup>-3</sup>	1800 kg m <sup>-3</sup>
Dichte von Glasfasern	$\rho_{GF}$	2,5 g cm <sup>-3</sup>	2500 kg m <sup>-3</sup>
Packungsdichte auf Rohmaterialspulen	$k_{PR}$	60 %	
Packungsdichte auf Flechtspulen	$k_{PS}$	50 %	
Packungsdichte einer Preform <sup>4</sup>	$k_{PP}$	55 %	

**Tab. A-10: Werte für die einzelnen Prozessnebenzeiten**

Da die Werte des realistischen Szenarios in der Arbeit verwendet werden, sind die Zeiten für die anderen Szenarien ausgegraut dargestellt. Geänderte Werte sind fett gedruckt.

Beschreibung	Variable	Optimistisch für PB [s]	Realistisches Szenario [s]	Optimistisch für UB [s]
Kernaufnahme, Roboterfahrt	$t_{N,in}$	<b>10</b>	20	20
Wenden	$t_{N,W}$	<b>1</b>	5	5
Lagenfixierung anbringen	$t_{N,Fix}$	10	10	<b>2</b>
Beschnitt	$t_{N,Ab}$	10	10	<b>2</b>
Roboterfahrt, Kernablage	$t_{N,out}$	<b>10</b>	20	20

<sup>4</sup> Entspricht dem Sollwert für den angestrebten Faservolumengehalt. Im Idealfall würde die Preform in Endgeometrie gefertigt werden und beim Einlegen in das Werkzeug weder zusätzlich kompaktiert werden noch relaxieren. Die Preformpackungsdichte ist dann äquivalent zum Faservolumengehalt im fertigen FVK-Bauteil.

**Tab. A-11: Bauteilfertigungszeiten für die betrachteten Produktionssysteme**

Zellen, deren Wert für die jeweilige Variante in die Berechnung der Bauteilfertigungszeit eines Bauteils eingeht, sind mit (X) markiert. Freie Zellen bedeuten, dass der jeweilige Prozessschritt bei der betreffenden Anlagenvariante nicht auftritt. Bei mit (pp) gekennzeichneten Zellen ist der entsprechende Vorgang zwar notwendig, findet jedoch prozessparallel statt, so dass keine zusätzlichen Zeiten berücksichtigt werden müssen.

Beschreibung des Vorgangs	Formel zur Berechnung des Zeitaufwands	ELFM-PB	ELFM-UB-S	ELFM-UB-P	VKFM
Kernzuführung	$t_{N,in}$	X	pp	pp	pp
Flechten	$t_{L,B} * n_L$	X	X	X	X/n <sub>L</sub>
Wenden	$t_{N,W} * (n_L - 1)$	X			
Lagenbeschnitt	$(t_{N,Fix} + t_{N,Ab}) * n_L$		X	pp	
Endbeschnitt	$t_{N,Fix} + t_{N,Ab}$	X			pp
Kernabführung	$t_{N,out}$	X	pp	pp	pp

**Tab. A-12: Rüstzeitwerte einzelner Arbeitsschritte für die Rüstzeitberechnung**

Da die Werte des realistischen Szenarios in der Arbeit verwendet werden, sind die Zeiten für die beiden anderen Szenarien ausgegraut dargestellt.

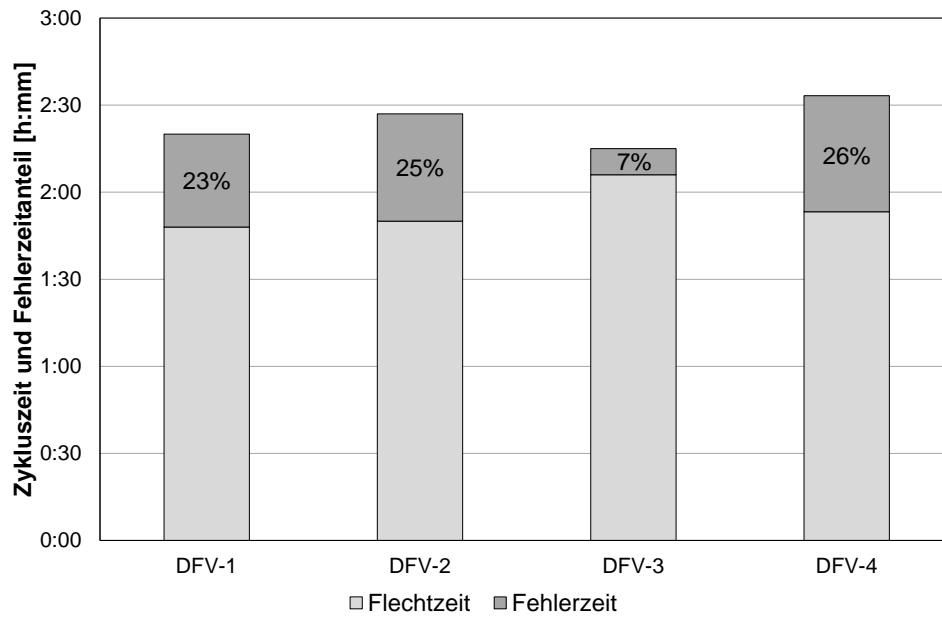
Beschreibung	Variable	Optimistisches Szenario [s]	Realistisches Szenario [s]	Pessimistisches Szenario [s]
Vorbereiten des Rüstvorgangs	$t_{R,V}$	120	180	300
Abschneiden eines Fadens	$t_{R,Ab}$	1	3	10
Tausch einer Flechtfadenspule	$t_{R,S,Ff}$	10	15	30
Tausch einer Stehfadenspule	$t_{R,S,Sf}$	30	60	100
Einfädeln eines Fadens	$t_{R,Ein}$	20	30	40
Schnellwechsel eines Klöppels	$t_{R,Sw}$	5	10	20
Zusammenziehen eines Garns	$t_{R,Zus}$	3	5	10
Anknoten eines Garns	$t_{R,Kn}$	30	60	100
Anflechten	$t_{R,An}$	20	30	100
Ein-/Ausfahren eines Klöppels	$t_{R,WK}$	2	5	10
Ein-/Ausfahren FM-Rumpf	$t_{R,WM}$	90	120	300



**Tab. A-13: Berechnung der Zeiten für die verschiedenen Rüstvarianten**

Zellen, deren Wert für die jeweilige Variante in die Berechnung der Flechtfadentrüstzeit eingeht, sind mit (X) markiert. Beim Rüsten mit zwei Mitarbeitern halbieren sich die betreffenden Zeitaufwände ( $X / 2$ ).

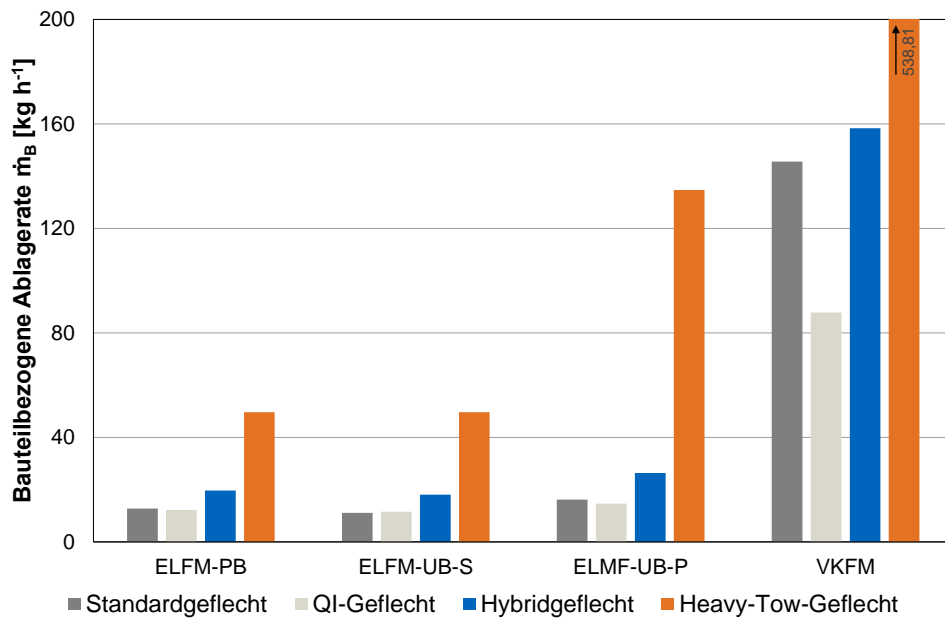
Beschreibung des Vorgangs	Formel zur Berechnung des Zeitaufwands	RH-1MA	RH-2MA	SH-1MA	SH-2MA	WK	WM
Vorbereitung des Rüstvorgangs	$t_{R,V}$	X	X	X	X	X	X
Ausfahren des Maschinenrumpfs	$t_{R,WM}$						X
Abschneiden der Flechtfäden	$t_{R,Ab} * n_S$	X	X / 2	X	X / 2	X	
Ein- und Ausfahren der Klöppel	$t_{R,WK} * n_K$					X	
Spulenwechsel und Einfädeln	$(t_{R,S} * t_{R,Ein}) * n_S$	X	X / 2				
Schnellwechseln der Klöppel	$t_{R,Sw} * n_S$			X	X / 2		
Zusammenziehen der Fäden	$t_{R,Zus} * n_S$	X	X / 2	X	X / 2	X	
Anflechten und Abschneiden	$t_{R,An} + t_{R,Ab} * n_S$	X	X	X	X	X	
Einfahren des Maschinenrumpfs	$t_{R,WM}$						X



**Abb. A-2: Übersichtdiagramm der Versuchszeiten für die Dauerflechtversuche**

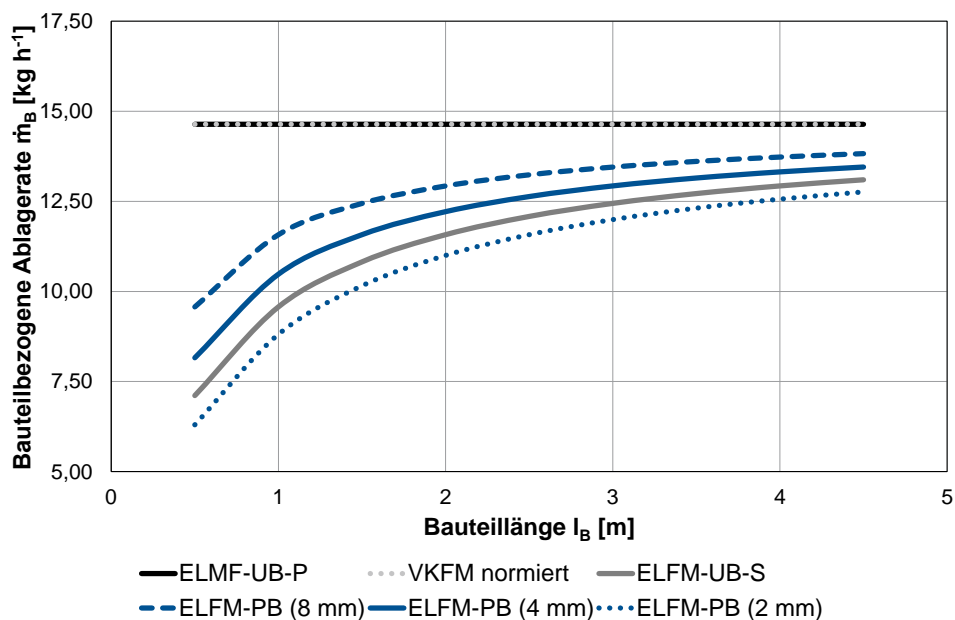
Beim Versuch DFV-3 mit optimierten Verarbeitungsparametern fällt neben der geringen Fehlerzeit auch die höhere Flechtzeit auf. Diese ist auf die größere Garnlänge zurückzuführen, da aufgrund der geringen Fehlerzahl kaum Lauflänge durch Reparaturen verloren geht.

## e Ergebnisdiagramme Klöppelflechtverfahren



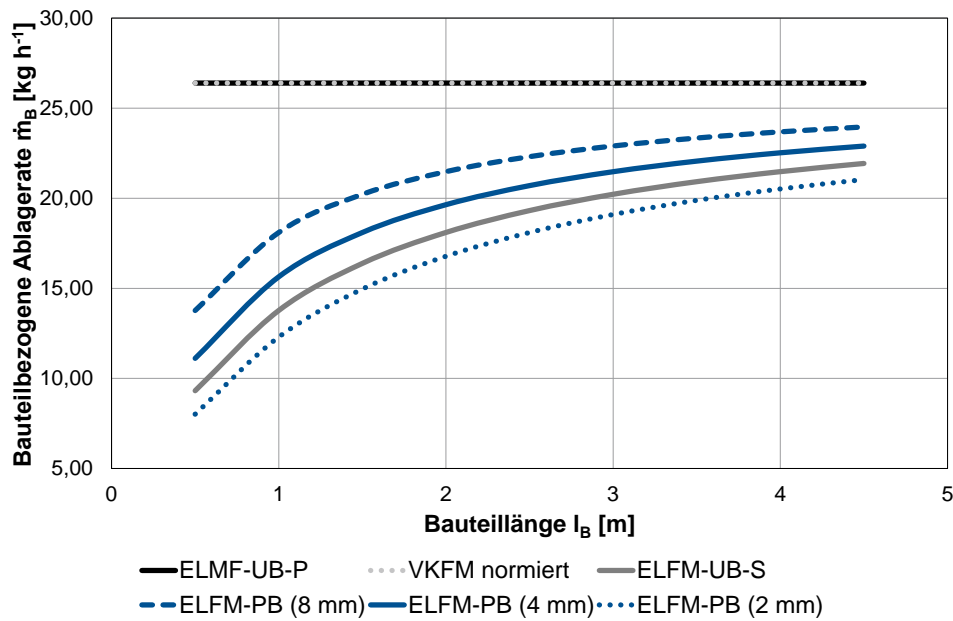
**Abb. A-3: Bauteilbezogene Ablagerate der verschiedenen Produktionssysteme**

Die Ablagerate der VKFM-Zelle ist wegen der entsprechend der Lagenzahl des Bauteils mehrfach vorhandenen Flechtrümpfe bedeutend höher als für die anderen Produktionssysteme. (Standardmaschine, Standardbauteil, realistisches Prozesszeitszenario)



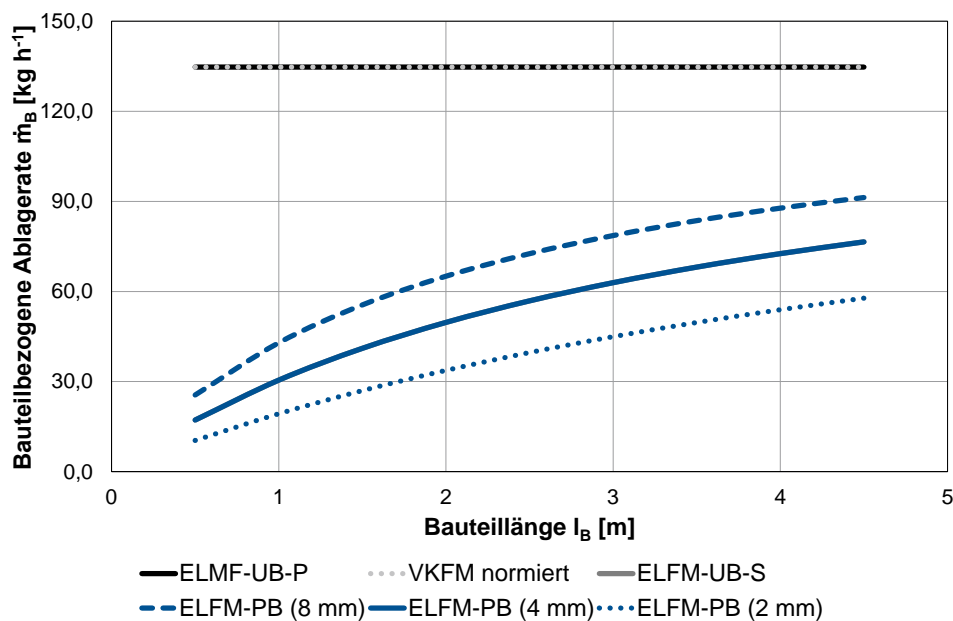
**Abb. A-4: Bauteilgeometrie und Ablagerate beim QI-Geflecht**

Für sehr dünne Bauteile (2 mm im dargestellten Beispiel) mit wenigen Lagen ist im Fall des QI-Geflechts die Anlagenvariante ELFM-UB-S gegenüber ELFM-PB produktiver. Für Bauteile mit höherer Wandstärke (4 mm und 8 mm) ist ELFM-PB besser geeignet. (Standardmaschine, realistisches Prozesszeitszenario, variable Bauteildaten)



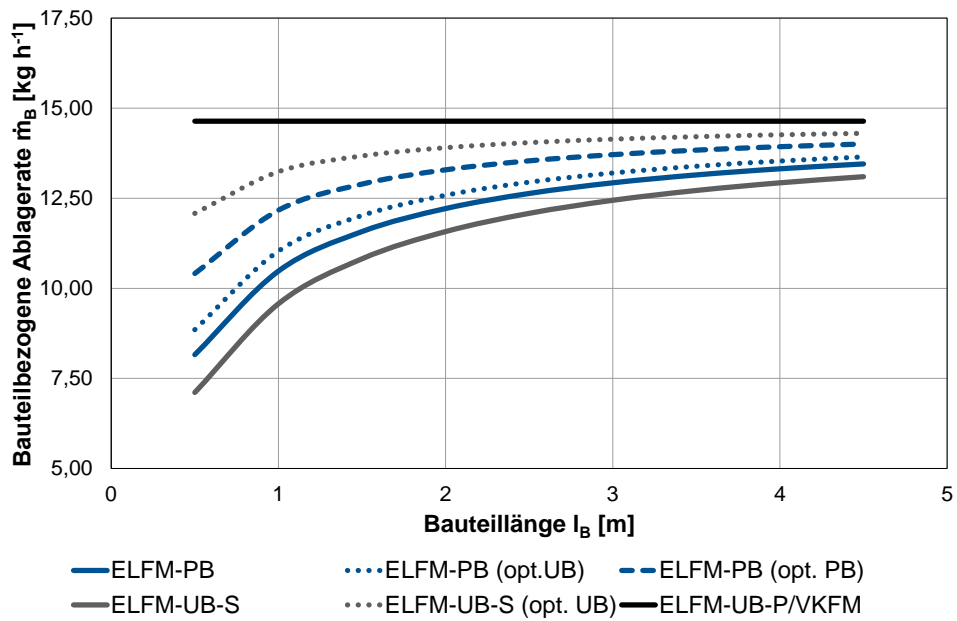
**Abb. A-5: Bauteilgeometrie und Ablagerate beim Hybridgeflecht**

Für sehr dünne Bauteile (2 mm im dargestellten Beispiel) mit wenigen Lagen ist auch im Fall des Hybridgeflechts die Anlagenvariante ELFM-UB-S produktiver als ELFM-PB. Für Bauteile mit höherer Wandstärke (4 mm und 8 mm) ist ELFM-PB besser geeignet. (Standardmaschine, realistisches Prozesszeitszenario, variable Bauteildaten)

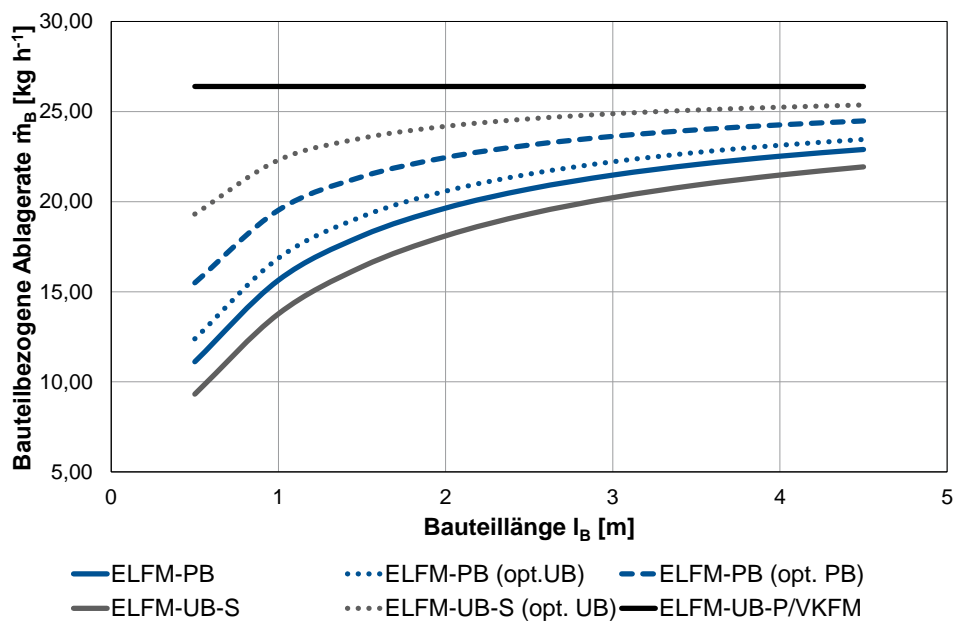


**Abb. A-6: Bauteilgeometrie und Ablagerate beim Heavy-Tow-Geflecht**

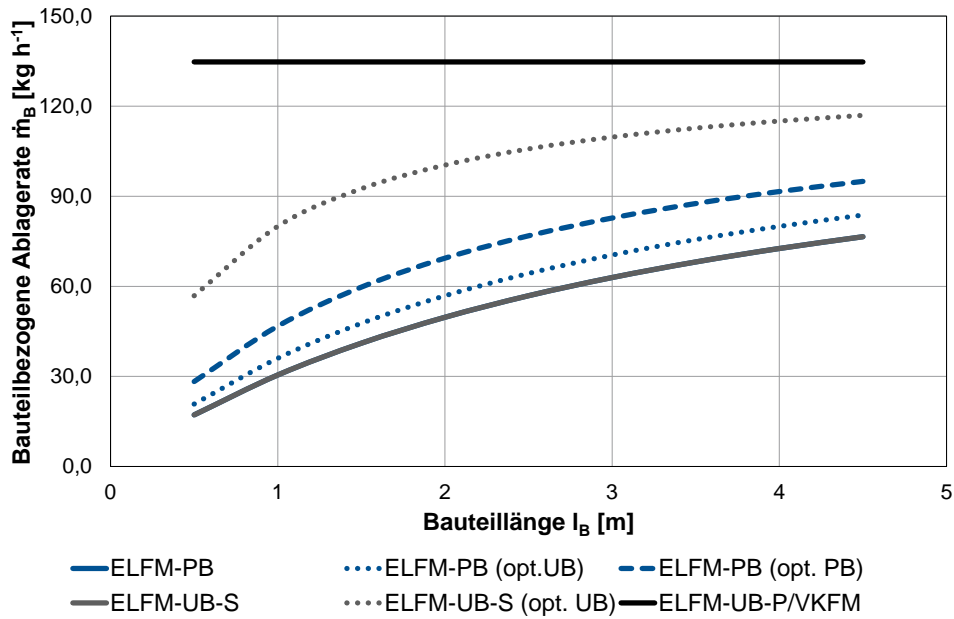
Beim Heavy-Tow-Geflecht sind die Produktionssystemvarianten mit Prozessnebenzeiten auch bei langen Bauteilen bedeutend weniger produktiv als die Varianten ELFM-UB-P und VKFM. Für das Standardbauteil mit einer Wandstärke von 4 mm sind die Prozessnebenzeiten für ELFM-PB und ELFM-UB-S im realistischen Nebenzeitszenario zufällig gleich, wodurch die beiden Kurven direkt übereinander verlaufen. (Standardmaschine, realistisches Prozesszeitszenario, variable Bauteildaten)



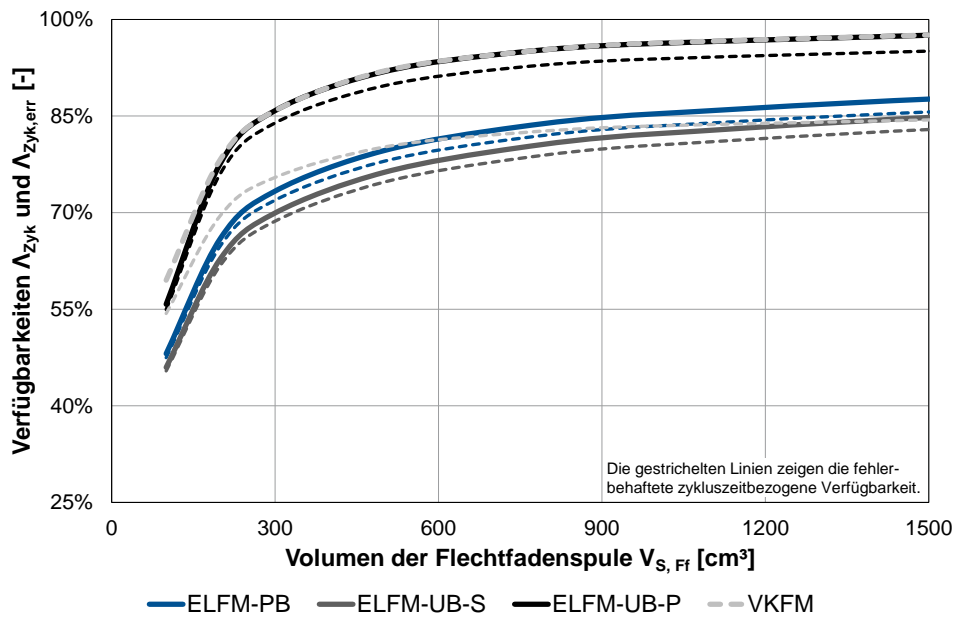
**Abb. A-7: Abhängigkeit der bauteilbezogenen Ablagerate von den Prozessnebenzeiten für das QI-Geflecht**  
(Standardmaschine, Standardbauteil, verschiedene Prozesszeitszenarien)



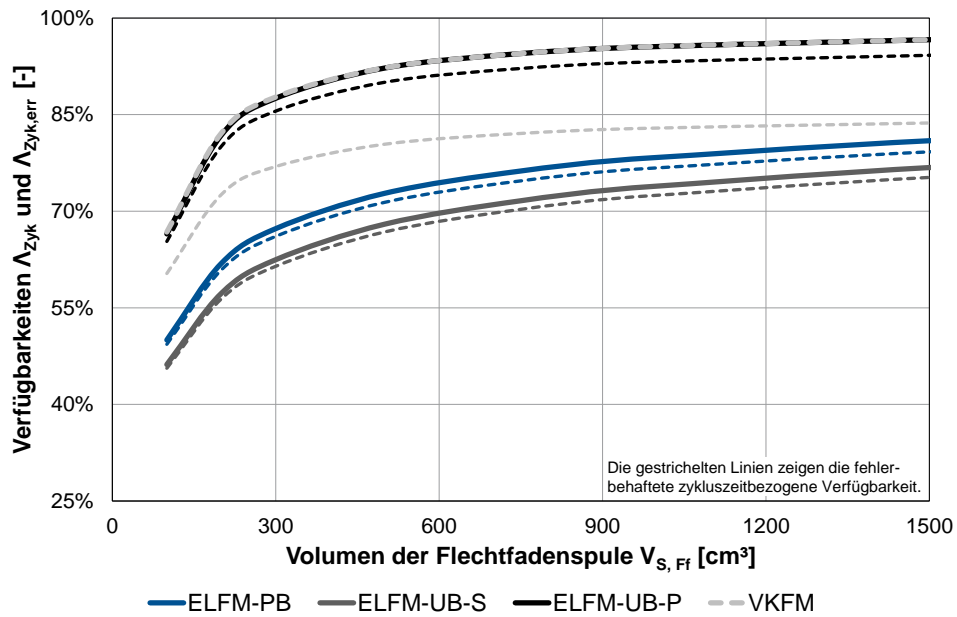
**Abb. A-8: Abhängigkeit der bauteilbezogenen Ablagerate von den Prozessnebenzeiten für das Hybridgeflecht**  
(Standardmaschine, Standardbauteil, verschiedene Prozesszeitszenarien)



**Abb. A-9: Abhängigkeit der bauteilbezogenen Ablagerate von den Prozessnebenzeiten für das Heavy-Tow-Geflecht**  
 (Standardmaschine, Standardbauteil, verschiedene Prozesszeitszenarien)

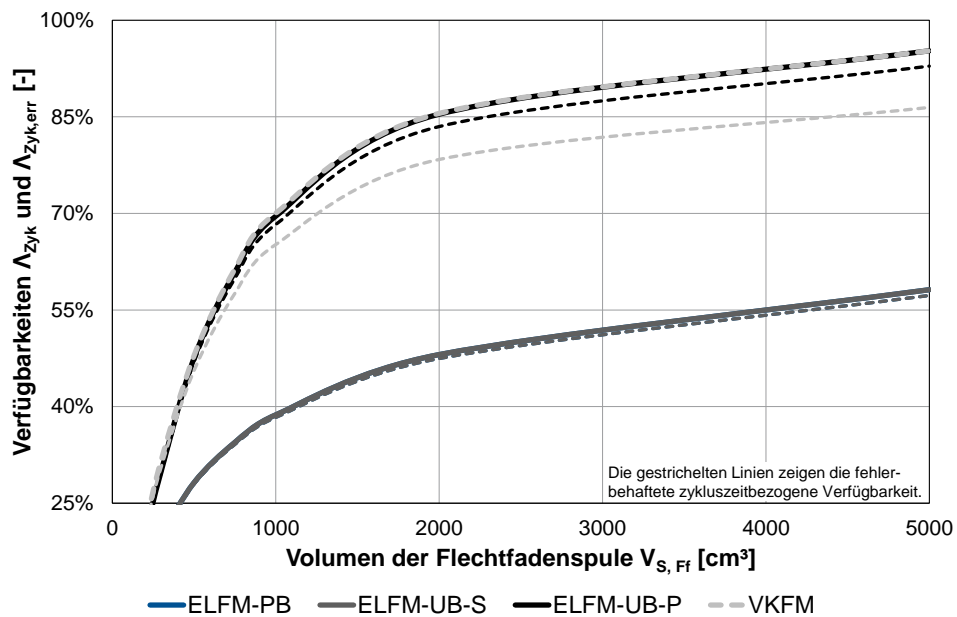


**Abb. A-10: Zyklusbezogene Verfügbarkeiten beim QI-Geflecht**  
 (Standardmaschine, Standardbauteil, Standardrüstzeitszenario, Standardfehlerzeitszenario)



**Abb. A-11: Zyklusbezogene Verfügbarkeiten beim Hybridgeflecht**

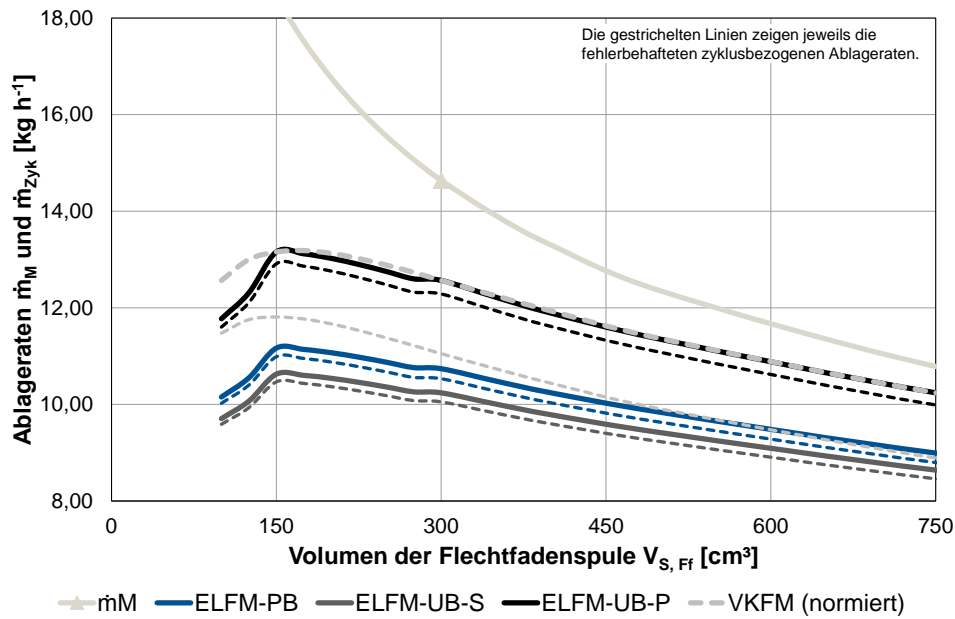
(Standardmaschine, Standardbauteil, Standardrüstzeitszenario, Standardfehlerzeitszenario)



**Abb. A-12: Zyklusbezogene Verfügbarkeiten beim Heavy-Tow-Geflecht**

Aufgrund der gleichen Nebenzeiten beim Standardbauteil liegen die Kurven für die Produktionssysteme ELFM-PB und ELFM-UB-S direkt übereinander.

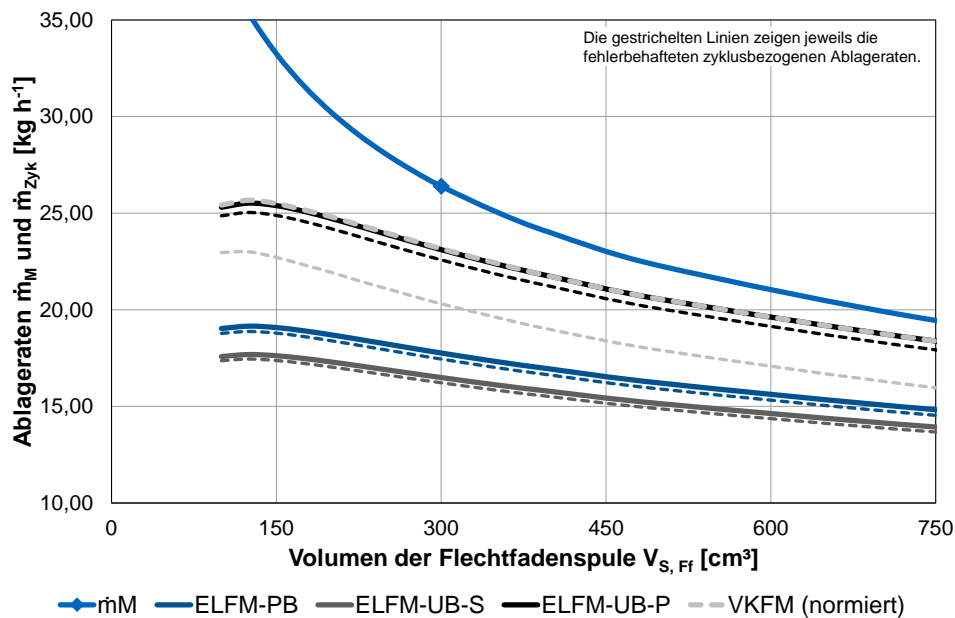
(Standardmaschine, Standardbauteil, Standardrüstzeitszenario, Standardfehlerzeitszenario)



**Abb. A-13: Zyklusbezogene Ablageraten beim QI-Geflecht**

Der Auslegungspunkt des Geflechts ist auf der Linie der Maschinenablagerate mit einem Symbol markiert.

(Standardmaschine, Standardbauteil, Standardrüstzeitszenario, Standardfehlerzeitszenario)

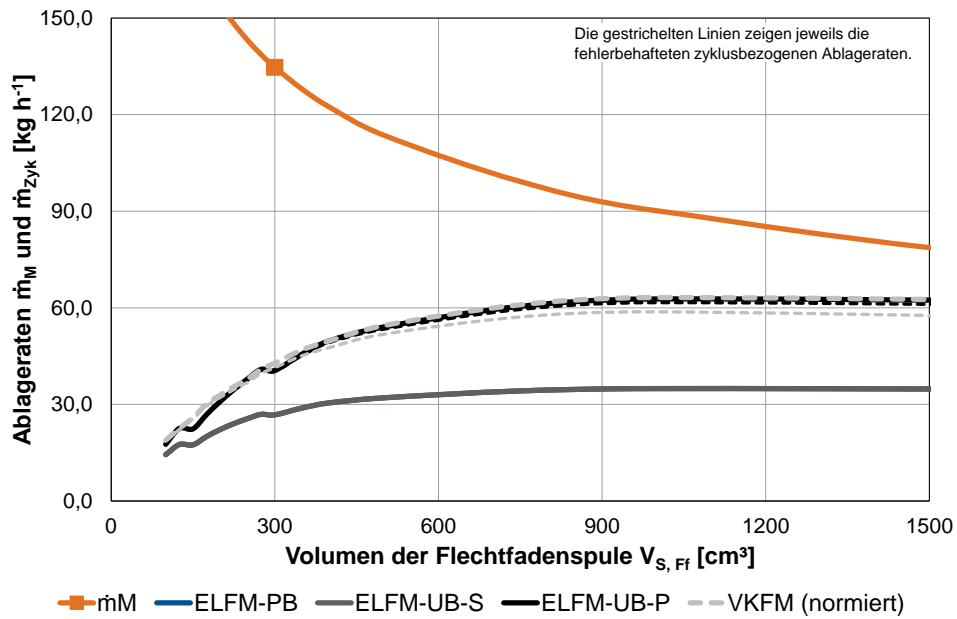


**Abb. A-14: Zyklusbezogene Ablageraten beim Hybridgeflecht**

Der Auslegungspunkt des Geflechts ist auf der Linie der Maschinenablagerate mit einem Symbol markiert.

(Standardmaschine, Standardbauteil, Standardrüstzeitszenario, Standardfehlerzeitszenario)

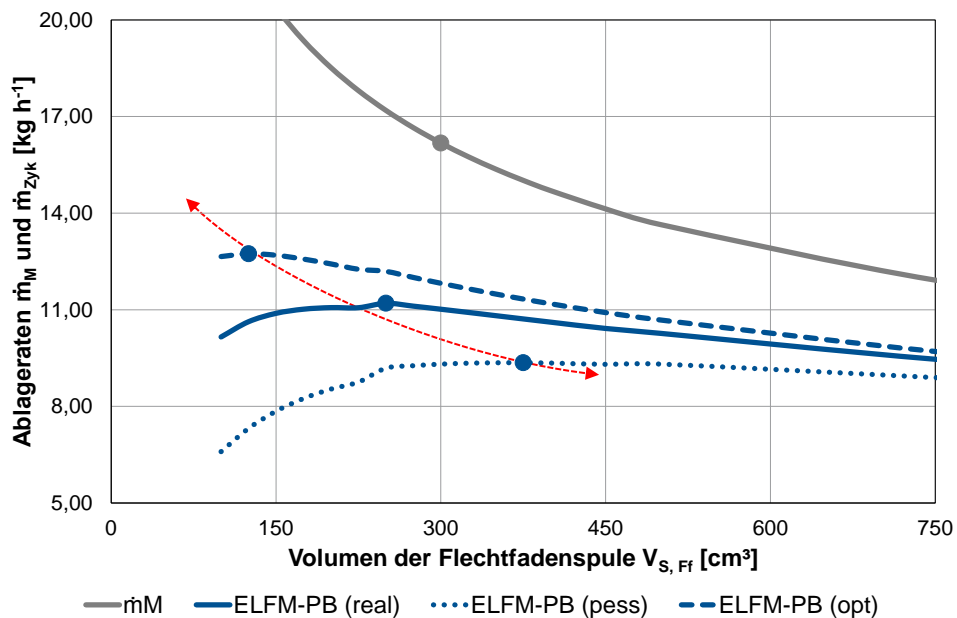




**Abb. A-15: Zyklusbezogene Ablageraten beim Heavy-Tow-Geflecht**

Der Auslegungspunkt des Geflechts ist auf der Linie der Maschinenablagerate mit einem Symbol markiert.

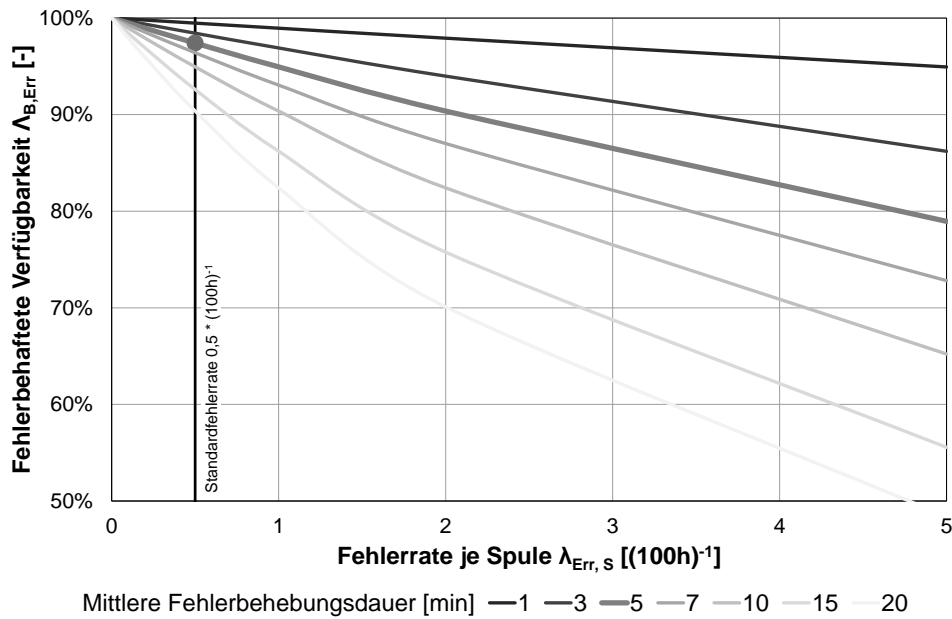
(Standardmaschine, Standardbauteil, Standardrüstzeitszenario, Standardfehlerzeitszenario)



**Abb. A-16: Ablagerate und Rüstzeitszenarien beim Standardgeflecht (ELFM-PB)**

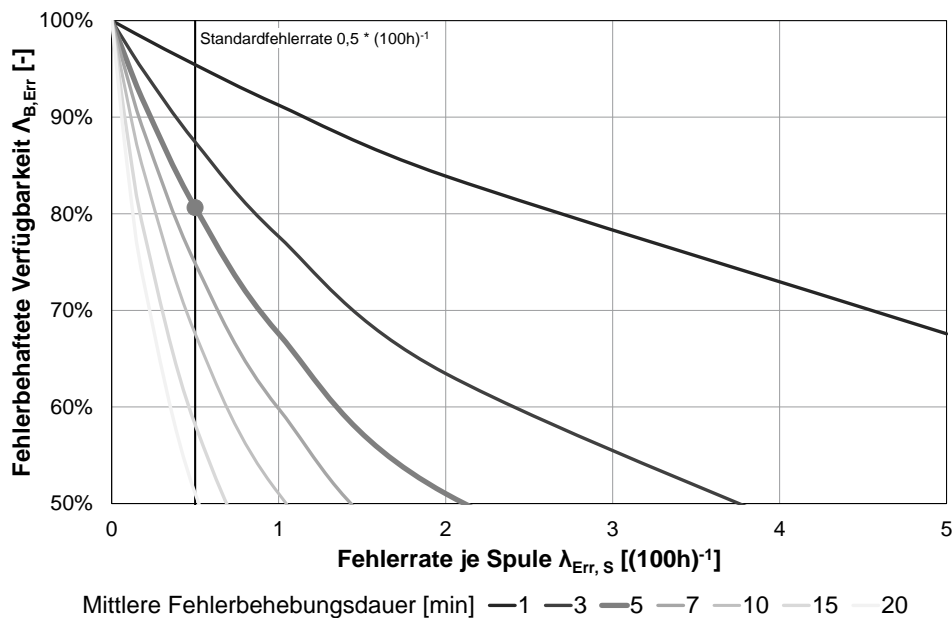
Die Verschiebung der Lage des Punkts der optimalen zyklusbezogenen Ablagerate ist durch die rot gestrichelte Linie angedeutet. Der genaue Verlauf der Linie ist nicht rechnerisch ermittelt; diese dient nur der Illustration des Zusammenhangs.

(Standardmaschine, Standardbauteil, Standardfehlerzeitszenario)



**Abb. A-17: Fehlermodellparameter Standardgeflecht (ELFM-UB-P)**

Die Abbildung zeigt, wie sich die bauteilbezogene Verfügbarkeit in Abhängigkeit von Fehlerrate und Fehlerbehebungsdauer ändert. Der Standardwert ist mit einem Kreis markiert. Die fehlerbedingte Reduktion beträgt nur ca. 3 %. (Standardbauteil, Standardmaschine)



**Abb. A-18: Fehlermodellparameter Standardgeflecht (VKFM)**

Die Abbildung zeigt, wie sich die bauteilbezogene Verfügbarkeit in Abhängigkeit von Fehlerrate und Fehlerbehebungsdauer ändert. Der Standardwert ist mit einem Kreis markiert. Die fehlerbedingte Reduktion beträgt fast 20 %. (Standardbauteil, Standardmaschine)

## f Daten zu den Versuchen

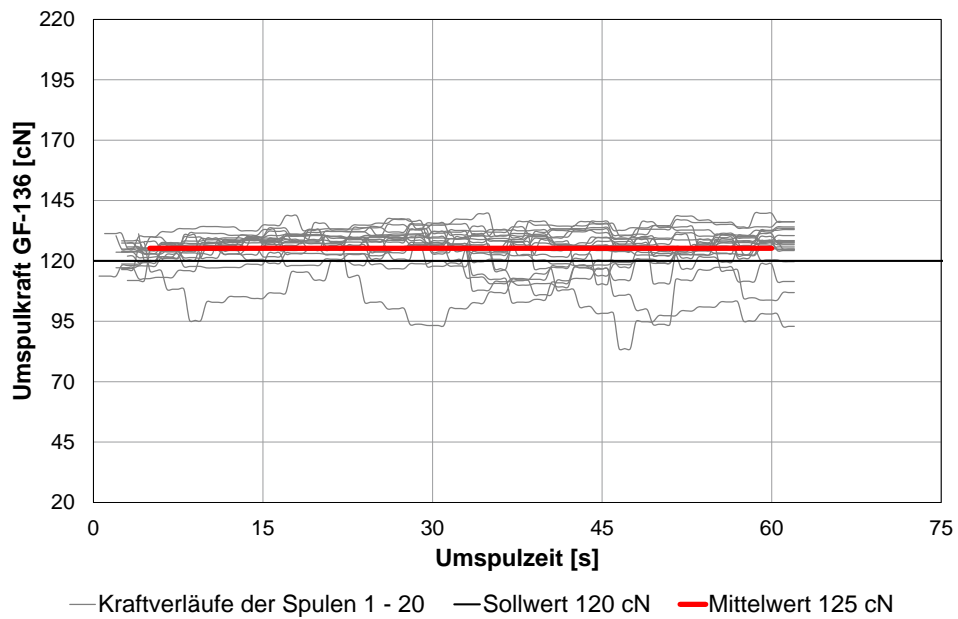


Abb. A-19: Umspulkraftmesswerte für das GF-136-Garn

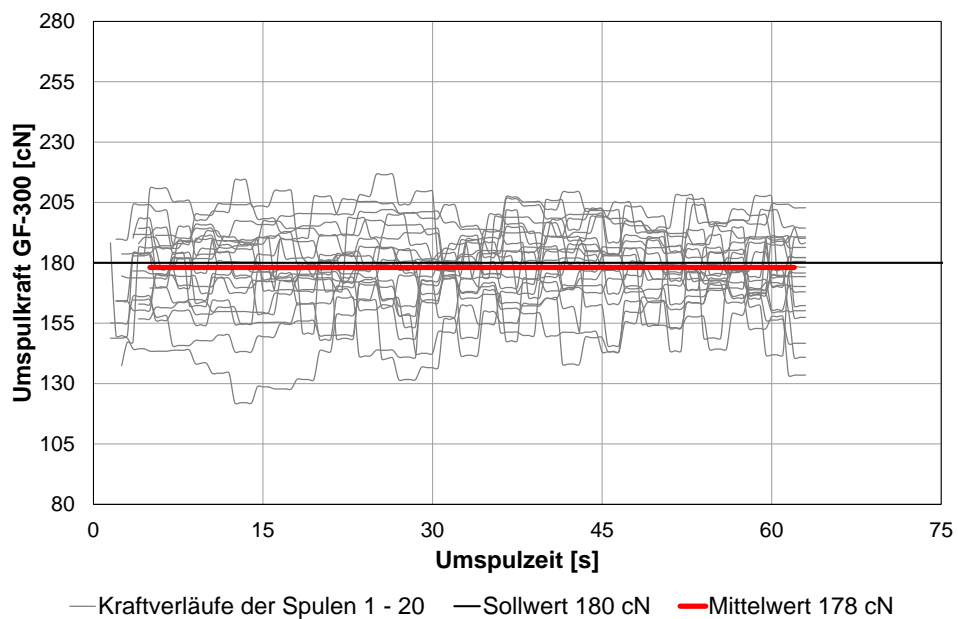
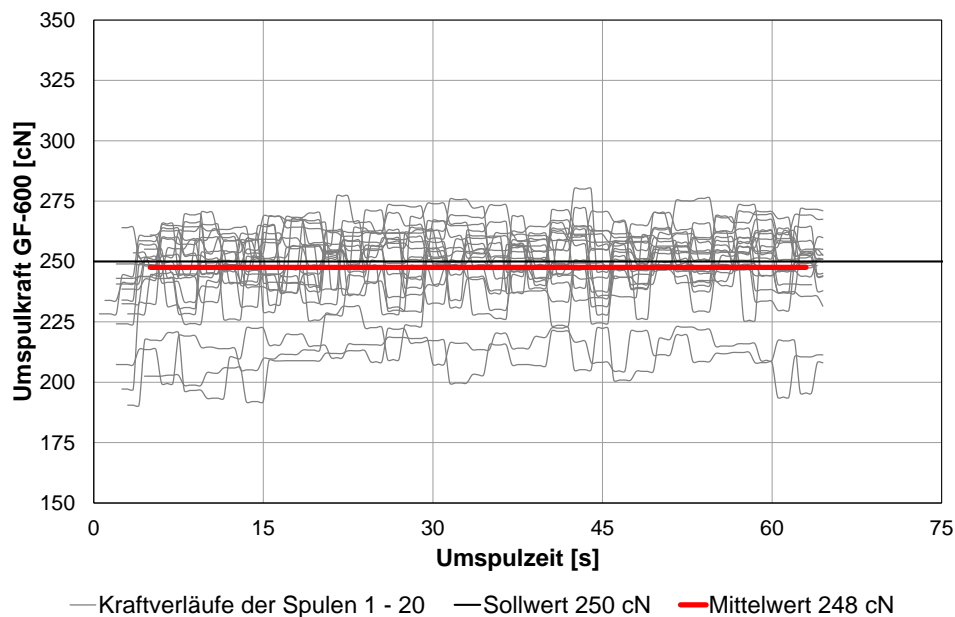
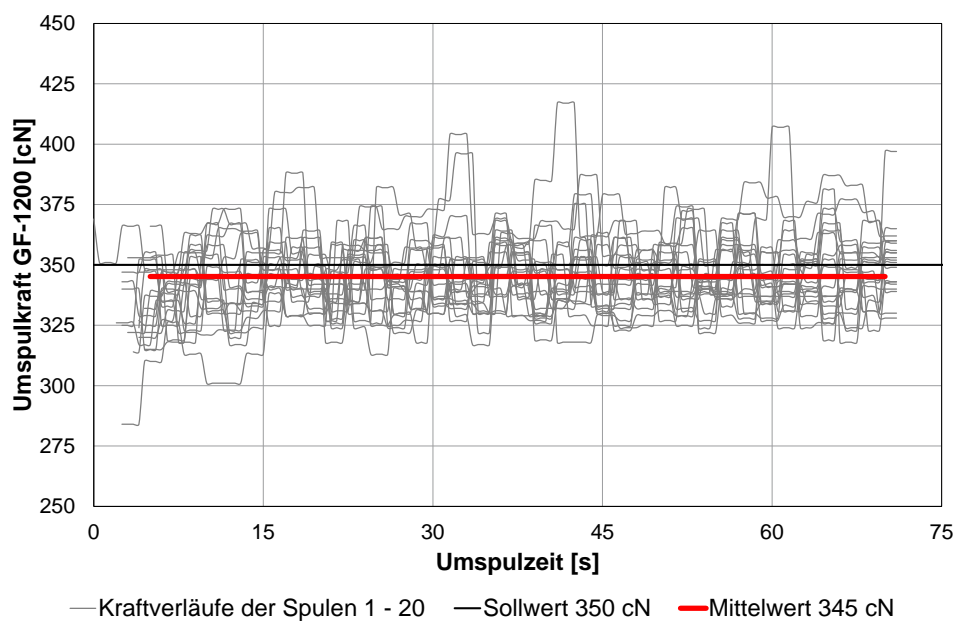


Abb. A-20: Umspulkraftmesswerte für das GF-300-Garn

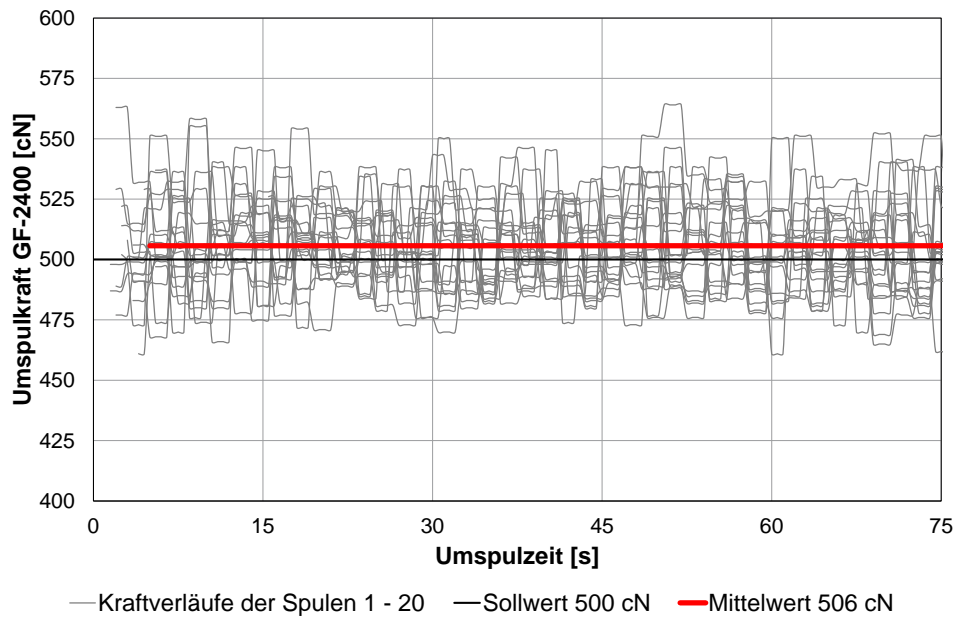


**Abb. A-21: Umspulkraftmesswerte für das GF-600-Garn**

Eine falsche Einstellung der Garnbremse hat zur Folge, dass die Garnspannung für drei der Umspulgänge durchgängig zu gering ausfällt.



**Abb. A-22: Umspulkraftmesswerte für das GF-1200-Garn**



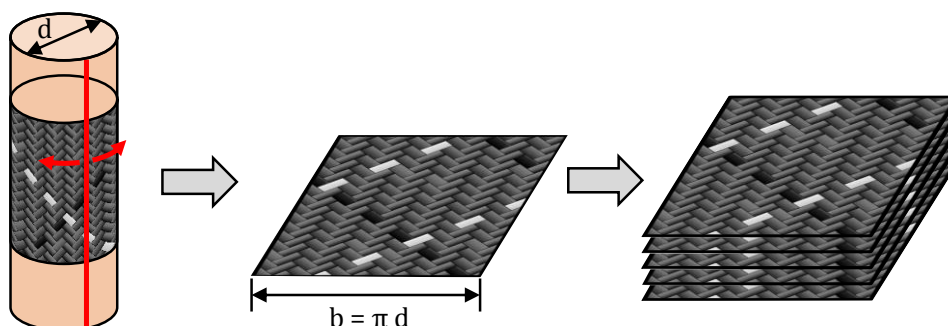
**Abb. A-23: Umspulkraftmesswerte für das GF-2400-Garn**

## g Gestaltung und Herstellung von Prüfkörpern

Für die Herstellung von Probekörpern wird zunächst ein zylindrischer Kern beflochten, dessen Durchmesser so gewählt ist, dass sich beim gewünschten Flechtwinkel und der bekannten Ablagebreite des verwendeten Garns eine geschlossene Lage Geflecht auf seiner Oberfläche bildet. Diese Lage wird anschließend in Kernlängsrichtung aufgeschnitten und in die Ebene abgewickelt. So entsteht ein Zuschnitt, dessen Breite dem Umfang des Zylinders entspricht. Die benötigte Anzahl dieser Lagen wird anschließend übereinander gestapelt, der Aufbau mit Matrixharz getränkt und zu einer Probeplatte der angestrebten Dicke ausgehärtet. Aus dieser werden schließlich die Prüfkörper zur Bestimmung der gesuchten Materialkennwerte entnommen. Abb. A-24 veranschaulicht das Herstellungsprinzip des Lagenaufbaus für die Probeplatten.

Um unerwünschte Dehnungs-Verschiebungs-Kopplungen zu vermeiden, werden Faserverbundkunststoffe entlang ihrer Orthotropieachsen getestet. Es kommt also für alle Geflechtstrukturen (Triaxial- und Biaxialgeflechte jedes Flechtwinkels) eine Probenentnahme entlang der  $0^\circ$ -Richtung (Produktionsrichtung) und der  $90^\circ$ -Richtung in Frage. Bei einem Biaxialgeflecht mit einem Flechtwinkel von  $45^\circ$  können Proben zusätzlich in dieser Richtung entnommen werden. In diesen Prüfkörpern liegen die Flechtäden der einen Umlaufrichtung in Probenlängsrichtung vor, die anderen quer dazu. Diese Proben ermöglichen somit die Gewinnung faserdominierter Zugkennwerte. Für die drei in Frage kommenden Entnahmerichtungen lassen sich aus den Vorgaben der Prüfnormen Mindestabmessungen der Probeplatte ableiten.

Die Bestimmung der Plattengröße richtet sich dabei nach den größten Prüfkörpern, das sind diejenigen für die Zugversuche. Druckprüfkörper weisen zwar meist eine ähnlich große Breite auf, sind aber wesentlich kürzer. Die interlaminare Scherfestigkeit (ILSS) wird häufig mit Kurzbiegeproben ermittelt, die nur wenige Millimeter lang sind.



**Abb. A-24: Schematische Darstellung der Herstellung von Geflechtprobeplatten**

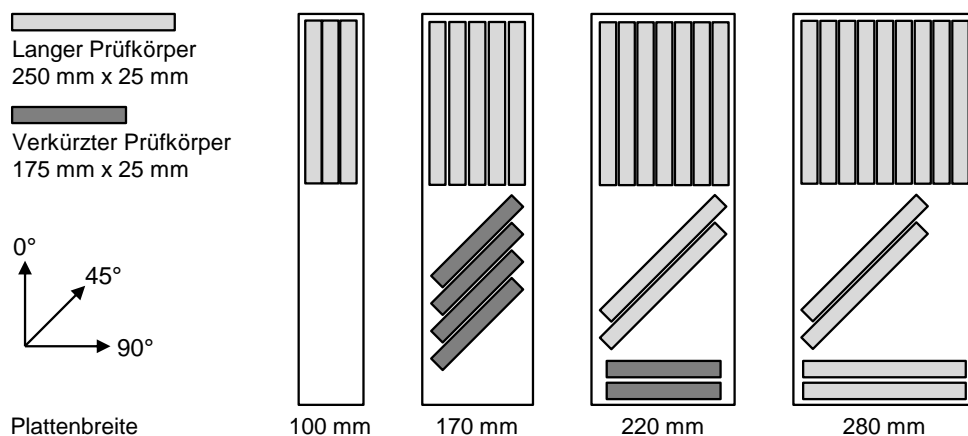
Der Verlauf von jeweils einem Flechtgarn pro Laufrichtung ist farbig hervorgehoben.

Folgende Normen werden bei der Ermittlung von FVK-Zugkennwerten verwendet:

- Die europäische Standardnorm DIN EN ISO 527-4 ([145], angewandt z. B. in [21, 23]) gibt Probekörper-Abmessungen von 250 mm Länge und 25 mm Breite vor, lässt für geringe Zugfestigkeiten aber eine größere Probenbreite zu.
- Die amerikanische Standardnorm ASTM-D 3039/D 3039M ([146]) gibt als Grundwerte ebenfalls 250 mm Länge und 25 mm Breite vor, lässt aber auch Abweichungen von diesen Vorgaben zu. Diese ermöglichen kürzere Prüfkörper von 175 mm Länge, solange das Versagen im gewünschten Bereich auftritt.
- Die bei Airbus eingesetzte Industrienorm AITM 1-0007 ([147], angewandt z. B. in [22, 130]), schreibt für die Prüfkörper eine freie Länge von 180 mm zwischen den Aufleimern vor, was bei einer typischen Aufleimerlänge von 50 mm eine Gesamtlänge von 280 mm ergibt. Auch die Probenbreite ist mit 32 mm höher als bei den Standardnormen. Dies wird besonders bei breiten Garnen der Forderung nach dem Erfassen mehrerer Einheitszellen der Textilstruktur innerhalb der Probenbreite besser gerecht.

Nach diesen Normen ist also eine Prüfkörperlänge von zumindest 175 mm vorzusehen, um Zugkennwerte für das Geflechtmaterial ermitteln zu können. Da die Randbereiche von Probepplatten oft keine perfekte Materialqualität aufweisen, sollte die Platte im Vergleich mit der Probengröße an beiden Rändern etwa 15 mm größer sein.

Abb. A-25 verdeutlicht, welche Probepplattenbreite erforderlich ist, um normgerechte Prüfkörper entnehmen zu können. Erst ab einer Plattenbreite von 170 mm können verkürzte (dunkelgrau dargestellte) Zugprüfkörper unter einem Winkel von 45° entnommen werden. Für die Ermittlung von 90°-Zugkennwerten ist eine Breite von 220 mm erforderlich, was daher die Mindestanforderung für eine vollständige Materialcharakterisierung darstellt. Diese ermöglicht auch die Herstellung von normgerechten (hellgrau dargestellten) 45°-Prüfkörpern. Erst ab einer Plattenbreite von 280 mm ist die uneingeschränkte Entnahme normgerechter Prüfkörper möglich.



**Abb. A-25: Entnahme von Zugprüfkörpern bei verschiedenen breiten Probepplatten**

Die Versuchsmaschine muss so viele Spulen aufweisen, dass mit dem zu untersuchenden Material ein Kern mit dem Umfang von mindestens 220 mm geschlossen bedeckt werden kann. Natürlich ist dies maßgeblich vom gewünschten Flechtwinkel abhängig. Die Variante mit einem Flechtwinkel von 45° muss auf jeden Fall abgedeckt werden, da für Biaxialgeflecht nur in dieser Richtung entnommene Prüfkörper Fasern in Probenlängsrichtung enthalten und so die Ermittlung faserdominierter Geflechtkenwerte erlauben. Bei größerem Winkel wird die Platte ohnehin breiter, so dass weiterhin die Prüfkörper auch in 90°-Richtung entnommen werden können. Für kleinere Winkel und eine geringere Probenplattenbreite nimmt hingegen die Bedeutung der in 0°-Richtung entnommenen Probekörper zu, da die Fasern mit abnehmendem Flechtwinkel immer mehr in Fertigungsrichtung orientiert sind. Der nicht faserdominierte Kennwert in 90°-Richtung könnte für diese Geflechte nicht mehr normgerecht ermittelt werden.

Im Folgenden wird die notwendige Spulenzahl unter den genannten Rahmenbedingungen für die Garne CF-12k, CF-24k und CF-50k ermittelt, da diese typischerweise für die Herstellung von CFK-Bauteilen zum Einsatz kommen. Dabei wird einerseits die natürliche Ablagebreite betrachtet, andererseits der Einsatz von gespreiztem Garnmaterial, der mit einer Versuchsmaschine ebenfalls möglich sein soll. Tab. A-8 zeigt die bei der Berechnung der Spulenzahl verwendeten Garnbreiten. Tab. A-15 bis Tab. A-17 auf den folgenden Seiten zeigen die errechneten Geflechtumfänge für die verschiedenen Garne in Abhängigkeit der Spulenzahl in der Maschine und des Flechtwinkels. Die Ergebnisse sind farblich entsprechend den Angaben in Tab. A-14 kodiert. Der Wert für den besonders interessanten Flechtwinkel von 45° bei mittlerer Garnablagebreite ist in der Darstellung jeweils durch Umrahmung hervorgehoben.

**Tab. A-14: Farbcode für die Geflechtumfänge**

Die Abstufung der einzelnen Bereiche orientiert sich an den Breitenangaben für das Geflecht die in Abb. A-25 dargestellt sind.

U < 170mm	nur Fertigung von 0°-Prüfkörpern
170mm < U < 220mm	0°-PK möglich, 45° eingeschränkt möglich, 90° unmöglich
220mm < U < 280mm	0°-PK möglich, 45° möglich, 90° eingeschränkt möglich
280mm < U < 750mm	0°, 45°- und 90°-Prüfkörper uneingeschränkt möglich
U > 750mm	Flechtkernhandling für Durchmesser > 250mm sehr schwierig

Betrachtet man die Berechnungsergebnisse, zeigt sich, dass eine Flechtmaschine mit weniger als 64 Spulen mit keinem Garntyp ausreichend breites Geflecht herstellen kann, um ein Probenprogramm durchzuführen.

Von besonderem Interesse ist in der Betrachtung das CF-50k-Garn, da dieses aufgrund seines günstigen Preises und wegen der erzielbaren hohen Ablagerate bei zukünftigen Automobilanwendungen bevorzugt eingesetzt werden wird. Für dieses Garn ist mit einer Maschine mit 64 Spulen ein vollständiges Probenprogramm möglich.



**Tab. A-15: Bauteilumfänge für CF-12k-Geflecht**

Für ein Geflecht mit CF-12k-Fasern ist bei einer Spulenzahl von 64 nur bei gespreizter Flechtgarnablage ein eingeschränktes Probenprogramm möglich.

Für CF-12k:		Lagenbreite = Umfang [mm]						
		für normale Ablage			für gespreizte Ablage			
		Winkel [°]	minimal	mittel	maximal	minimal	mittel	maximal
<b>Spulenzahl</b>	<b>24</b>	15	31,1	37,3	43,5	31,1	59,0	87,0
		25	33,1	39,7	46,3	33,1	62,9	92,7
		35	36,6	43,9	51,3	36,6	69,6	102,5
		45	42,4	50,9	59,4	42,4	80,6	118,8
		55	52,3	62,8	73,2	52,3	99,4	146,4
		65	71,0	85,2	99,4	71,0	134,9	198,8
		75	115,9	139,1	162,3	115,9	220,2	324,6
	<b>32</b>	15	41,4	49,7	58,0	41,4	78,7	116,0
		25	44,1	53,0	61,8	44,1	83,9	123,6
		35	48,8	58,6	68,4	48,8	92,8	136,7
		45	56,6	67,9	79,2	56,6	107,5	158,4
		55	69,7	83,7	97,6	69,7	132,5	195,3
		65	94,6	113,6	132,5	94,6	179,8	265,0
		75	154,5	185,5	216,4	154,5	293,6	432,7
	<b>48</b>	15	62,1	74,5	87,0	62,1	118,0	173,9
		25	66,2	79,4	92,7	66,2	125,8	185,4
		35	73,2	87,9	102,5	73,2	139,2	205,1
		45	84,9	101,8	118,8	84,9	161,2	237,6
		55	104,6	125,5	146,4	104,6	198,8	292,9
		65	142,0	170,4	198,8	142,0	269,7	397,5
		75	231,8	278,2	324,6	231,8	440,5	649,1
	<b>64</b>	15	82,8	99,4	116,0	82,8	157,4	231,9
		25	88,3	105,9	123,6	88,3	167,7	247,2
		35	97,7	117,2	136,7	97,7	185,6	273,5
45		113,1	135,8	158,4	113,1	215,0	316,8	
55		139,5	167,4	195,3	139,5	265,0	390,5	
65		189,3	227,2	265,0	189,3	359,7	530,0	
75		309,1	370,9	432,7	309,1	587,3	865,47	
<b>80</b>	15	103,5	124,2	144,9	103,5	196,7	289,9	
	25	110,3	132,4	154,5	110,3	209,6	308,9	
	35	122,1	146,5	170,9	122,1	231,9	341,8	
	45	141,4	169,7	198,0	141,4	268,7	396,0	
	55	174,3	209,2	244,1	174,3	331,3	488,2	
	65	236,6	283,9	331,3	236,6	449,6	662,5	
	75	386,4	463,6	540,9	386,4	734,1	1081,84	
<b>96</b>	15	124,2	149,1	173,9	124,2	236,0	347,9	
	25	132,4	158,9	185,4	132,4	251,6	370,7	
	35	146,5	175,8	205,1	146,5	278,3	410,2	
	45	169,7	203,6	237,6	169,7	322,4	475,2	
	55	209,2	251,1	292,9	209,2	397,5	585,8	
	65	283,9	340,7	397,5	283,9	539,5	795,04	
	75	463,6	556,4	649,1	463,6	880,92	1298,20	

**Tab. A-16: Bauteilumfänge für CF-24k-Geflecht**

Für ein Geflecht mit CF-24k-Fasern ist für eine Spulenzahl von 64 mit regulärer (in dieser und den folgenden Tabellen als normal bezeichneter) Flechtgarnablage ein eingeschränktes, mit gespreizter Flechtgarnablage ein vollständiges Probenprogramm möglich.

Für CF-24k:		Lagenbreite = Umfang [mm]						
		für normale Ablage			für gespreizte Ablage			
		Winkel [°]	minimal	mittel	maximal	minimal	mittel	maximal
<b>Spulenzahl 24</b>	15	43,5	52,8	62,1	43,5	90,1	136,7	
	25	46,3	56,3	66,2	46,3	96,0	145,6	
	35	51,3	62,3	73,2	51,3	106,2	161,1	
	45	59,4	72,1	84,9	59,4	123,0	186,7	
	55	73,2	88,9	104,6	73,2	151,7	230,1	
	65	99,4	120,7	142,0	99,4	205,9	312,3	
	75	162,3	197,0	231,8	162,3	336,1	510,0	
	<b>32</b>	15	58,0	70,4	82,8	58,0	120,1	182,2
		25	61,8	75,0	88,3	61,8	128,0	194,2
		35	68,4	83,0	97,7	68,4	141,6	214,9
		45	79,2	96,2	113,1	79,2	164,0	248,9
		55	97,6	118,6	139,5	97,6	202,2	306,8
		65	132,5	160,9	189,3	132,5	274,5	416,5
		75	216,4	262,7	309,1	216,4	448,2	680,0
	<b>48</b>	15	87,0	105,6	124,2	87,0	180,1	273,3
		25	92,7	112,5	132,4	92,7	192,0	291,3
		35	102,5	124,5	146,5	102,5	212,4	322,3
		45	118,8	144,2	169,7	118,8	246,1	373,4
		55	146,4	177,8	209,2	146,4	303,4	460,3
		65	198,8	241,4	283,9	198,8	411,7	624,7
		75	324,6	394,1	463,6	324,6	672,3	1020,02
	<b>64</b>	15	116,0	140,8	165,6	116,0	240,2	364,4
		25	123,6	150,1	176,5	123,6	256,0	388,4
		35	136,7	166,0	195,3	136,7	283,2	429,7
45		158,4	192,3	226,3	158,4	328,1	497,8	
55		195,3	237,1	279,0	195,3	404,5	613,7	
65		265,0	321,8	378,6	265,0	549,0	832,90	
75		432,7	525,5	618,2	432,7	896,38	1360,02	
<b>80</b>	15	144,9	176,0	207,1	144,9	300,2	455,5	
	25	154,5	187,6	220,7	154,5	320,0	485,5	
	35	170,9	207,5	244,2	170,9	354,0	537,1	
	45	198,0	240,4	282,8	198,0	410,1	622,3	
	55	244,1	296,4	348,7	244,1	505,6	767,12	
	65	331,3	402,3	473,2	331,3	686,2	1041,13	
	75	540,9	656,8	772,74	540,9	1120,47	1700,03	
<b>96</b>	15	173,9	211,2	248,5	173,9	360,3	546,6	
	25	185,4	225,1	264,8	185,4	384,0	582,6	
	35	205,1	249,0	293,0	205,1	424,8	644,6	
	45	237,6	288,5	339,4	237,6	492,1	746,7	
	55	292,9	355,7	418,4	292,9	606,7	920,54	
	65	397,5	482,7	567,9	397,5	823,44	1249,35	
	75	649,1	788,20	927,29	649,1	1344,57	2040,04	

**Tab. A-17: Bauteilumfänge für CF-50k-Geflecht**

Für ein Geflecht mit CF-50k-Fasern ist für eine Spulenzahl von 64 ein vollständiges Probenprogramm möglich.

Für CF-50k:		Lagenbreite = Umfang [mm]					
		für normale Ablage			für gespreizte Ablage		
		Winkel [°]	minimal	mittel	maximal	minimal	mittel
<b>Spulenzahl 48</b>	15	49,7	68,3	87,0	49,7	149,1	248,5
	25	53,0	72,8	92,7	53,0	158,9	264,8
	35	58,6	80,6	102,5	58,6	175,8	293,0
	45	67,9	93,3	118,8	67,9	203,6	339,4
	55	83,7	115,1	146,4	83,7	251,1	418,4
	65	113,6	156,2	198,8	113,6	340,7	567,9
	75	185,5	255,0	324,6	185,5	556,4	927,29
<b>64</b>	15	66,3	91,1	116,0	66,3	198,8	331,3
	25	70,6	97,1	123,6	70,6	211,8	353,1
	35	78,1	107,4	136,7	78,1	234,4	390,6
	45	90,5	124,5	158,4	90,5	271,5	452,5
	55	111,6	153,4	195,3	111,6	334,7	557,9
	65	151,4	208,2	265,0	151,4	454,3	757,18
	75	247,3	340,0	432,7	247,3	741,8	1236,39
<b>48</b>	15	99,4	136,7	173,9	99,4	298,2	496,9
	25	105,9	145,6	185,4	105,9	317,8	529,6
	35	117,2	161,1	205,1	117,2	351,6	586,0
	45	135,8	186,7	237,6	135,8	407,3	678,8
	55	167,4	230,1	292,9	167,4	502,1	836,85
	65	227,2	312,3	397,5	227,2	681,5	1135,78
	75	370,9	510,0	649,1	370,9	1112,75	1854,58
<b>64</b>	15	132,5	182,2	231,9	132,5	397,5	662,6
	25	141,2	194,2	247,2	141,2	423,7	706,2
	35	156,3	214,9	273,5	156,3	468,8	781,30
	45	181,0	248,9	316,8	181,0	543,1	905,10
	55	223,2	306,8	390,5	223,2	669,5	1115,81
	65	302,9	416,5	530,0	302,9	908,62	1514,37
	75	494,6	680,0	865,47	494,6	1483,66	2472,77
<b>80</b>	15	165,6	227,8	289,9	165,6	496,9	828,22
	25	176,5	242,7	308,9	176,5	529,6	882,70
	35	195,3	268,6	341,8	195,3	586,0	976,62
	45	226,3	311,1	396,0	226,3	678,8	1131,37
	55	279,0	383,6	488,2	279,0	836,85	1394,76
	65	378,6	520,6	662,5	378,6	1135,78	1892,96
	75	618,2	850,01	1081,84	618,2	1854,58	3090,96
<b>96</b>	15	198,8	273,3	347,9	198,8	596,3	993,87
	25	211,8	291,3	370,7	211,8	635,5	1059,24
	35	234,4	322,3	410,2	234,4	703,2	1171,94
	45	271,5	373,4	475,2	271,5	814,59	1357,65
	55	334,7	460,3	585,8	334,7	1004,23	1673,71
	65	454,3	624,7	795,04	454,3	1362,93	2271,55
	75	741,8	1020,02	1298,20	741,8	2225,49	3709,16

## h Bewertung Entwicklungsszenarien

**Tab. A-18: Bewertungskriterien „Technische Aspekte“**

Neben den Grundanforderungen (Schmierstofffreiheit, Eignung für CF-Garne) erreichen die Aspekte Spulenträger, Kernhandhabung und Kerndurchführung die höchste Bewertung.

	Erklärung	Schlüssel	Gewichtung
Technische Aspekte	<b>A Kerndurchführung</b>		<b>10%</b>
	3D-Bauteile möglich	5	
	Prüfplattenmaterial möglich	3	
	Dauerflechtversuche mit seilartigen Kernen möglich	1	
	<b>B Spulenzahl</b>		<b>8%</b>
	Keine Einschränkungen bei der Spulenzahl	5	
	48 oder 64 Spulen	3	
	Weniger als 48 Spulen	1	
	<b>C Maschinenbettausrichtung</b>		<b>3%</b>
	Maschinenbett vertikal	5	
	Maschinenbett zumindest schräg / schwenkbar	3	
	Maschinenbett horizontal	1	
	<b>D Variable Abbindung</b>		<b>0%</b>
	Hebelarmbahn frei einstellbar (aktiv gesteuerter Schwinghebel)	5	
	Hebelarmbahn über Weichen im Nutkurvenring veränderbar	3	
	Hebelarmbahn fest, bzw. durch Tausch des Nutkurvenrings einstellbar	1	
	<b>E Kernhandhabung</b>		<b>10%</b>
	Kernhandhabung mit schnellerer Geschwindigkeit im Vgl. zum Multi-Roboter-System	5	
	Multi-Roboter-Handhabungssystem	3	
	Abzug über Linearführung	1	
	<b>F Spulenträger</b>		<b>16%</b>
	Einsatz von CF-Herstellerspulen möglich, Bremssystem ohne Garnkontakt	5	
	Größere Spulen, aber Umspulen nötig. Garmbremse mit weniger Umlenkpunkten.	3	
	Aktuell eingesetzte Spulengrößen, bekanntes Bremssystem	1	
	<b>G Garnführungssystem</b>		<b>18%</b>
	Führungssystem für Verstärkungsfasern optimiert und für breite Bänder geeignet	5	
	Anpassung für Verstärkungsfasern mit hohem Titer, breite Bänder nicht möglich	3	
	mittlere Garntiter, teilweiser Tausch der Führungselemente (z. B. am Umlenkhebel)	1	
	<b>H Stehfadensystem</b>		<b>4%</b>
	Zuführung vergleichbar zu KFM möglich mit Einbindung im Geflecht	5	
Gesonderte Zuführeinheit für Längsfäden bzw. UD-Halbzeuge	3		
Nicht möglich	1		
<b>I Schmierstoffverunreinigungen</b>		<b>16%</b>	
Schmierstofffreie Anlage	5		
Testen alternativer Schmierkonzepte möglich (tauschbare Gleitbahnsegmente)	3		
Produkt nur über einfache Maßnahmen (z.B Abschirmbleche) geschützt	1		
<b>J CF-Eignung (Elektrik)</b>		<b>16%</b>	
Uneingeschränkt (bzgl. Elektronik) für alle Verstärkungsfasern verwendbar	5		
Rudimentäre Abschirmung Elektronik	3		
Eignung nur für Glas/Basalt	1		

**Tab. A-19: Bewertungskriterien „Entwicklungsrahmenbedingungen“**

Die Aspekte Finanzierung, Entwicklungsrisiko und Umsetzungsdauer erreichen die höchste Gewichtung.

		Schlüssel	Gewichtung
Erklärung			
<b>Rahmenbedingungen</b>	<b>A Eigene Kompetenz</b>		<b>13%</b>
	Großteil der Arbeiten kann am LCC gemacht werden	5	
	LCC-Arbeiten ergänzt mit Zulieferanteilen	3	
	Vollständig auf Zulieferer angewiesen	1	
	<b>B Umsetzungsdauer</b>		<b>15%</b>
	Umsetzungsdauer < 1 Jahre	5	
	Umsetzungsdauer zw. 1 und 3 Jahren	3	
	Umsetzungsdauer > 3 Jahre	1	
	<b>C Patentrechtlicher Schutz</b>		<b>10%</b>
	Freie Entscheidung über mögliche Schutzrechte	5	
	Gemeinsame Schutzrechte mit Zulieferer bzw. Projektpartner	3	
	Wesentliche Entwicklungen und alle Schutzrechte beim Zulieferer	1	
	<b>D Finanzierung</b>		<b>19%</b>
	Niedrig: aus Eigenmitteln	5	
	Mittel: z. B. über ein Förderprojekt möglich	3	
	Hoch: nur mit bedeutenden Industriemitteln möglich	1	
	<b>E Erkenntnisgewinn</b>		<b>10%</b>
	Umfangreiches Prozess- und Anlagenbau-Know-How wird intern aufgebaut	5	
	Wesentliche Kompetenz bleibt extern bei Projektpartnern, Prüfstände im eigenen Haus	3	
	Es wird kaum eigenes Know-How aufgebaut	1	
	<b>F Entwicklungsrisiko</b>		<b>18%</b>
	Gering: Alle technischen Risiken sind so gut wie ausgeschlossen	5	
	Mittel: Ein oder mehrere Überarbeitungsloops notwendig, bis die Maschine funktioniert	3	
	Groß: Es besteht die Gefahr, dass die Maschine nicht funktioniert	1	
	<b>G Industrievernetzung</b>		<b>3%</b>
	Kompetentes Netzwerk aufgebaut, gemeinsame Forschung geht weiter	5	
	Zusammenarbeit einzelner Partner	3	
	Keine Industrievernetzung über langfristige Entwicklungszusammenarbeit	1	
	<b>H Platzbedarf</b>		<b>1%</b>
	niedrig	5	
mittel	3		
hoch	1		
<b>I Projektattraktivität</b>		<b>11%</b>	
Es ist einfach, Partnerfirmen für das Projekt zu gewinnen	5		
Projektpartner würden sich im Rahmen eines Förderprojekts beteiligen	3		
Projektpartner können nicht für das Thema gewonnen werden	1		
<b>J</b>		<b>0%</b>	
	5		
	3		
	1		

**Tab. A-20: Paarweiser Vergleich der Technischen Aspekte**

Wertung der Wichtigkeit: 2 bei Zeile &gt; Spalte, 1 bei Zeile = Spalte, 0 bei Zeile &lt; Spalte

Technische Aspekte	Kerndurchführung	Spulenzahl	Maschinenbettausrichtung	Variable Abbindung	Kernhandhabung	Spulenträger	Garnführungssystem	Stehfadensystem	Schmierstoffverunreinigungen	CF-Eignung (Elektrik)		
Kerndurchführung		1	2	2	2	0	0	2	0	0	9	10%
Spulenzahl	1		2	2	1	0	0	1	0	0	7	8%
Maschinenbettausrichtung	0	0		2	0	0	0	1	0	0	3	3%
Variable Abbindung	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0%
Kernhandhabung	0	1	2	2		0	0	2	1	1	9	10%
Spulenträger	2	2	2	2	2		0	2	1	1	14	16%
Garnführungssystem	2	2	2	2	2	2		2	1	1	16	18%
Stehfadensystem	0	1	1	2	0	0	0		0	0	4	4%
Schmierstoffverunreinigungen	2	2	2	2	1	1	1	2		1	14	16%
CF-Eignung (Elektrik)	2	2	2	2	1	1	1	2	1		14	16%
	10%	8%	3%	0%	10%	16%	18%	4%	16%	16%	90	100%

**Tab. A-21: Paarweiser Vergleich der Entwicklungsrahmenbedingungen**

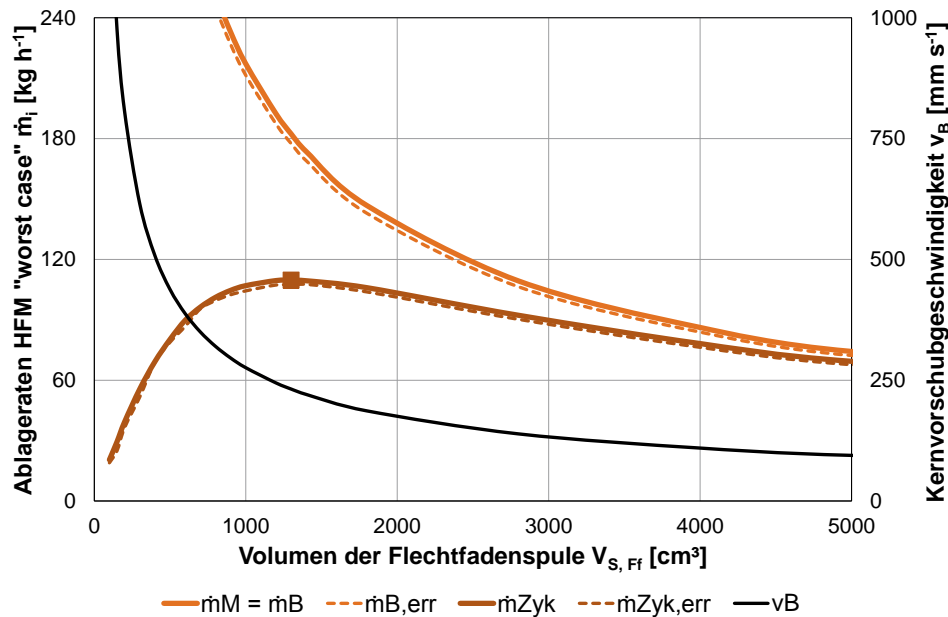
Wertung der Wichtigkeit: 2 bei Zeile &gt; Spalte, 1 bei Zeile = Spalte, 0 bei Zeile &lt; Spalte

Rahmenbedingungen	Eigene Kompetenz	Umsetzungsdauer	Patentrechtlicher Schutz	Finanzierung	Erkenntnisgewinn	Entwicklungsrisiko	Industrievernetzung	Platzbedarf	Projektattraktivität	0		
Eigene Kompetenz		0	1	0	2	1	2	2	1		9	13%
Umsetzungsdauer	2		2	1	1	0	2	2	1		11	15%
Patentrechtlicher Schutz	1	0		0	1	0	2	2	1		7	10%
Finanzierung	2	1	2		2	2	1	2	2		14	19%
Erkenntnisgewinn	0	1	1	0		0	2	2	1		7	10%
Entwicklungsrisiko	1	2	2	0	2		2	2	2		13	18%
Industrievernetzung	0	0	0	1	0	0		1	0		2	3%
Platzbedarf	0	0	0	0	0	0	1		0		1	1%
Projektattraktivität	1	1	1	0	1	0	2	2			8	11%
0											0	0%
	13%	15%	10%	19%	10%	18%	3%	1%	11%	0%	72	100%

Tab. A-22: Einstufung der betrachteten Szenarien

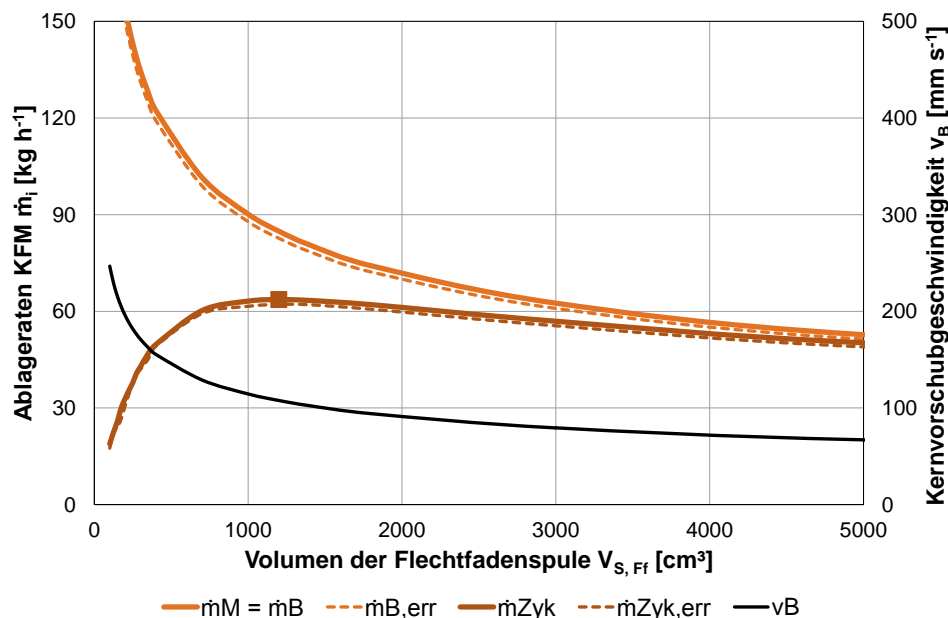
Variante	Technische Aspekte										Rahmenbedingungen									
	Kerndurchführung	Spulenanzahl	Maschinenbetausrichtung	Variable Abbindung	Kernhandhabung	Spulenträger	Garnführungssystem	Stehfadensystem	Schmierstoffverreinigungen	CF-Eignung (Elektrik)	Eigene Kompetenz	Umsetzungsdauer	Patentrechtlicher Schutz	Finanzierung	Erkenntnisgewinn	Entwicklungsrisiko	Industrievernetzung	Platzbedarf	Projektattraktivität	0
<b>Kauf Standardanlage</b>	1	1	1	1	1	1	3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	1	5	5	
<b>Prüfstände für Teilsysteme</b>	1	1	1	1	5	5	5	5	5	3	5	1	5	5	5	5	3	1	3	
<b>Interne Neuentwicklung</b>	3	3	3	3	5	3	5	5	3	5	5	1	5	3	5	1	5	3	3	
<b>Externe Neuentwicklung</b>	5	5	3	3	3	3	3	3	3	5	1	5	1	1	1	3	3	5	1	

## i Ergebnisdiagramme Schnellflechtverfahren



**Abb. A-26: Ablageraten beim Hochgeschwindigkeitsflechten im „w/c“**

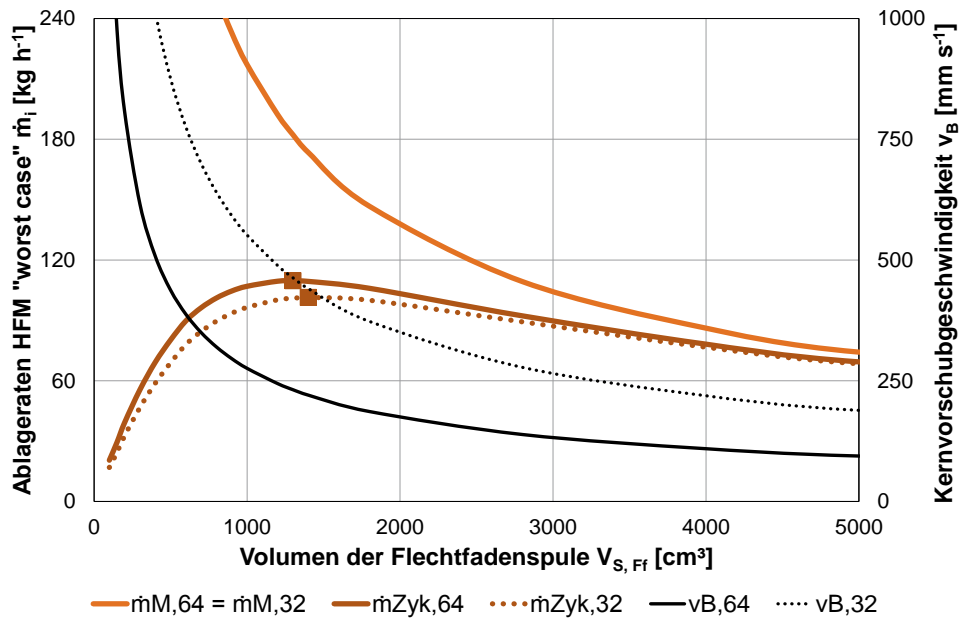
Das Flechtspulenvolumen  $V_{S, Ff} = 1300$  cm<sup>3</sup>, bei dem die höchste zykluszeitbezogene Ablagerate erreicht wird, ist mit einem Symbol markiert. Für Flechtspulen mit einem Volumen von weniger als ca. 400 cm<sup>3</sup> übersteigt die Abzugsgeschwindigkeit den als beherrschbar angenommenen Bereich unterhalb von 500 m s<sup>-1</sup>.



**Abb. A-27: Ablageraten des Heavy-Tow-Geflechts beim Klöppelflechtverfahren**

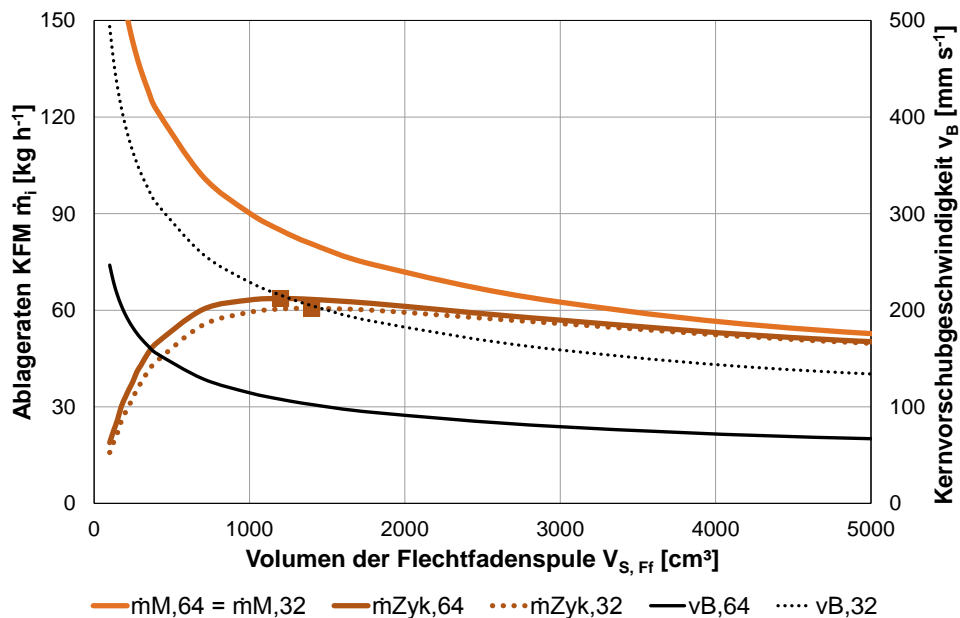
Beim markierten Flechtspulenvolumen von  $V_{S, Ff} = 1200$  cm<sup>3</sup> wird die höchste zykluszeitbezogene Ablagerate erreicht. Die schwarze Linie zeigt die Abzugsgeschwindigkeit. Sie liegt durchweg im als beherrschbar angenommenen Bereich von weniger als 500 mm s<sup>-1</sup>.





**Abb. A-28: Reguläre und gespreizte Geflechtanlage im „w/c“**

Die besten zyklusbezogenen Ablageraten für die reguläre (64 Spulen) und gespreizte Geflechtanlage (32 Spulen) unterscheiden sich kaum. Die Kernvorschubgeschwindigkeit ist für die gespreizte Ablage zwar doppelt so hoch, liegt allerdings bei der optimalen Spulengröße noch im als beherrschbar angesehenen Geschwindigkeitsbereich unter  $500 \text{ mm s}^{-1}$ .



**Abb. A-29: Reguläre und gespreizte Geflechtanlage bei KFM**

Auch für die besten zyklusbezogenen Ablageraten des Heavy-Tow-Geflechts auf Klöppel- flechtmaschinen zeigen sich geringe Unterschiede zwischen regulärer und gespreizter Geflechtanlage. Die Kernvorschubgeschwindigkeiten sind hier natürlich deutlich geringer als bei HFM und sollten für alle Spulengrößen realisierbar sein.



## B Veröffentlichungen

### Buchbeiträge

- [B1] C. Ebel, A. Mierzwa und K. Kind, “Yarn damage during braiding of reinforcement fibers for composites” in *Advances in Braiding Technology: Specialized Techniques and Applications*, Y. Kyosev, Ed. 1st ed.: Woodhead Pub Ltd, 2016.

### Zeitschriftenartikel

- [A1] T. Harbers, C. Ebel und K. Drechsler, “Highly Efficient Production and Characterization of CFRP Made from Recycled Carbon Fibers”, *SAMPE Journal*, vol. 50, no. 3, pp. 7–13, 2014.

### Konferenzbeiträge

- [K1] T. Wettemann, C. Ebel und T. von Reden, “Development of braided bypass duct structure for high volume application” in *New Solutions for new Requirement: SETEC 07 Conference Proceedings*, Madrid, Spain, 2007, pp. 205–211.
- [K2] M. Wolfahrt, P. Gerald, S. Zaremba, T. von Reden und C. Ebel, “Effect of Preform Architecture on the Mechanical and Fatigue Behaviour of Braided Composites for Generating Design Allowables” in *Composites - Innovative Materials for smarter solutions: SEICO 09 Conference Proceedings*, Paris, France, 2009, pp. 271–276.
- [K3] D. Schultheiss, C. Becker, S. Zaremba, C. Ebel und K. Drechsler, “A novel composition for removable inner tooling of hollow composite structures” in *International Conference on Composite Materials 2013: ICCM-19 Conference Proceedings*, Montreal, Quebec, Canada, 2013, pp. 2408–2416.
- [K4] C. Ebel, M. Brand und K. Drechsler, “Effects of Fiber Damage on the Efficiency of the Braiding Process” in *Proceedings of the TexComp-11 Conference*, Leuven, Belgium, 2013.
- [K5] T. Harbers, C. Ebel, K. Drechsler, A. Endres und G. Müller, “Highly Efficient Production and Characterization of CFRP made from Recycled Carbon Fibers” in *Low Cost Composite Processing, from Aerospace OOA to Automotive Thermoplastic: SEICO 14 Conference Proceedings*, Paris, France, 2014, pp. 206–213.
- [K6] M. Mitwalsky, S. Lee, B. Veihelmann, M. Brand, C. Ebel und K. Drechsler, “Online Tow Spreading in the Braiding Process and its Effects” in *Low Cost Composite Processing, from Aerospace OOA to Automotive Thermoplastic: SEICO 14 Conference Proceedings*, Paris, France, 2014, pp. 109–116.

- [K7] T. Harbers, **C. Ebel**, K. Drechsler, A. Endres und G. Müller, "Wetlaid Nonwovens as a Resource-efficient Manufactured Semifinished Product for Composite Structures Made from Recycled Carbon Fibers" in *4th International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management: CRETE 2014 Conference Proceedings*, Chania, Crete, Greece, 2014.
- [K8] **C. Ebel**, "Interaction of braiding ring geometry and fiber lay-up in the braiding process" Symposium on the occasion of the 5th anniversary of the Institute for Carbon Composites. München, Sep. 2014.
- [K9] T. Harbers, **C. Ebel**, K. Drechsler, A. Endres und G. Müller, "Wetlaid Nonwovens Made of Recycled Carbon Fiber for Automotive Applications" in *SAMPE Baltimore: Conference Proceedings*, Baltimore, Maryland, USA, 2015.
- [K10] **C. Ebel** und K. Drechsler, "New Ways to Thermoplastic Composite Parts: Technological Approaches on Cost Reduction Challenges for Thermoplastic Composites" JEC Conference: Cost Reduction Challenges in the Carbon Fiber Industry. Houston, TX, USA, Jun. 2015.
- [K11] B. Horn, S. Sattler, **C. Ebel** und K. Drechsler, "Cutting Strategies of Long Fiber Patch Preforms for Structures with Complex Fiber Architecture" in *The 20th International Conference on Composite Materials: ICCM 20 Conference Proceedings*, Copenhagen, Denmark, 2015.
- [K12] A. Mierzwa, **C. Ebel**, M. Brand und K. Drechsler, "Manufacturing Method of a Thermoplastic Semi-finished Product as Reinforcement in Laminate Thickness Direction" in *The 20th International Conference on Composite Materials: ICCM 20 Conference Proceedings*, Copenhagen, Denmark, 2015.
- [K13] A. Mierzwa, **C. Ebel** und K. Drechsler, "Investigation on Creation of Fibrous Rings and their Influence on the Braided Preform Quality" in *The 17th European Conference on Composite Materials: ECCM17 Conference Proceedings*, München, 2016.
- [K14] B. Horn, **C. Ebel** und K. Drechsler, "Strategies to Increase the Mechanical Performance of Long Fiber Patch Preforms" in *The 17th European Conference on Composite Materials: ECCM17 Conference Proceedings*, München, 2016.

### Patentanmeldungen

- [P1] R. Kirth, S. Schiemer und **C. Ebel**, "Textiles Erzeugnis", Weltweite Patent-Nr. WO2008119093, Oktober 9, 2008
- [P2] R. Kirth und **C. Ebel**, "Arrangement for Connecting an Elongate Element to a Further Component", Weltweite Patent-Nr. WO2009003207, Januar 8, 2009
- [P3] **C. Ebel**, K. Hemmers und R. Kirth, "Rohr zur Elektroisolation", Österreich Patent-Nr. AT507751, Juli 15, 2010

- 
- [P4] D. Schultheiss, S. Zaremba und **C. Ebel**, "Collapsible Mandrel for Manufacturing Three-dimensional Structures", USA Patent-Nr. US20140167319, Juni 19, 2014
- [P5] B. Veihelmann und **C. Ebel**, "Rotationsflechtvorrichtung zum Umflechten eines Formkerns", Deutschland Patent-Nr. DE102014112778, März 10, 2016
- [P6] M. Mitwalsky, S. Hermann, M. Brand, **C. Ebel** und K. Drechsler, "Verfahren zur Bedeckungsgradanpassung einer Flechtstruktur aus geflochtenen Fasersträngen und Flechtvorrichtung hierfür", Deutschland Patent-Nr. DE102014224740, Juni 9, 2014



## C Betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen der Tätigkeit am Lehrstuhl für Carbon Composites wurden die nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten vom Autor wissenschaftlich begleitet.

- [S1] P. Fahr, “Anbindung von Metallen an faserverstärkte Kunststoffe für hoch belastete Bolzenverbindungen in Rotorblättern” Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit der SGL ROTEC GmbH & Co. KG, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2011.
- [S2] B. Härdl, “Entwicklung und Untersuchung von generativen Verfahren zur Herstellung langfaserverstärkter Kunststoffstrukturen” Diplomarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2016.
- [S3] G. Kirmair, “Untersuchung zum Einfluss der Flechtringgeometrie auf die Faserablage beim Umflechten von Kernen” Diplomarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2014.
- [S4] T. Kistler, “Handling von Geflechtstrukturen” Semesterarbeit in Zusammenarbeit mit der BMW AG, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2012.
- [S5] A. Klemm. Nicht-öffentliche Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit der BMW AG, gesperrt bis 2022, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2012.
- [S6] T. Miadowitz. Nicht-öffentliche Semesterarbeit in Zusammenarbeit mit der BMW AG, gesperrt bis 2017, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2012.
- [S7] H. Mühlischlegel, “Untersuchung des Einflusses von Faserschädigungen auf die Bauteilqualität am Beispiel des Flecht- und Spreizvorgangs” Bachelor's Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2014.
- [S8] A. Nieratschker. Nicht-öffentliche Master's Thesis in Zusammenarbeit mit GE Global Research, gesperrt bis 2019, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2016.
- [S9] J. Petermaier, “Entwicklung eines Messverfahrens für die Schädigung von Glasfasergarnen zur Optimierung des Umspulvorgangs” Diplomarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2012.
- [S10] C. Poxleitner, “Entwicklung eines Spulenträgers für die Verarbeitung von Composite-Fasern in einer Rotationsflechtanlage” Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2014.

- [S11] F. Rapp, “Entwicklung eines Beschnittverfahrens für den Endkonturbeschnitt von Flechtpreforms auf einem Kern” Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2012.
- [S12] M. Sanwald, “Kernhandling für die Composite-Bauteilherstellung mit zukünftigen Hochgeschwindigkeitsflechtverfahren” Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2014.
- [S13] F. Sommer, “Parameterstudie zur Geometrieauslegung einer Hebelflechtmaschine” Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2015.
- [S14] M. Wanninger, “ Konzeptstudie zum Einsatz materialkostenoptimierter Halbzeuge für die Faserverbundbauteilfertigung im Thermoplast-RTM-Verfahren” Bachelor’s Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, München, 2016.
- [S15] J. Wolf, “Voruntersuchungen zur Konstruktion einer Längsfadenzuführung für eine Hochgeschwindigkeits-Flechtmaschine” Semesterarbeit, Hochschule Reutlingen, Reutlingen, 2014.

Folgende Arbeiten befassen sich inhaltlich mit Aspekten der in der vorliegenden Dissertationsschrift behandelten Themen und haben teilweise Eingang in diese gefunden:

[S4], [S6], [S7], [S9], [S10], [S11], [S12], [S13], [S15]



# D Lebenslauf

---

## PERSÖNLICHE DATEN

Christoph Ebel	Geburtsdatum	05.10.1978
	Geburtsort	München

---

## BERUFLICHER WERDEGANG

Seit 2010 **Technische Universität München** (Garching b. München)  
 Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
 am Lehrstuhl für Carbon Composites, Prof. Dr.-Ing. K. Drechsler

Seit 2013  
 Leiter der Forschungsgruppe „Prozesstechnik für Fasern und Halbzeuge“

2010 - 2012  
 Leitung einer Forschungsk Kooperation mit GE Global Research

2006-2010 **Teufelberger GesmbH** (Wels, Österreich)  
 Entwicklungsingenieur für Composite-Flechttechnologie

---

## AUSBILDUNG UND WEHRDIENST

seit 2012 **Technische Universität München** (Garching b. München)  
 Promotion am Lehrstuhl für Carbon Composites in Kooperation mit der BMW AG:  
 „Hochgeschwindigkeitsumflechten für die Fertigung von Faserverbundbauteilen“

1999-2006 **Universität Stuttgart** (Stuttgart)  
**Diplom-Ingenieur für Luft- und Raumfahrttechnik**  
 Diplomarbeit am Institut für Flugzeugbau:  
 „Auslegung von Krafteinleitungen in Faserverbundstrukturen“

2004 **Norwegian University of Science and Technology** (Trondheim, Norwegen)  
 Studienarbeit am Department of Chemical Engineering:  
 „Break-up Behaviour of a Liquid Jet Injected into High Pressure Environment“

1998-1999 **Wehrdienst** (Stetten am kalten Markt)  
 Instandsetzungsbataillon 210

1989-1998 **Gymnasium Salvatorkolleg** (Bad Wurzach)  
 Allgemeine Hochschulreife

---