

Multiaxiale Gelege auf Basis der
Kettenwirktechnik -
Technologie für Mehrschichtverbunde
mit variabler Lagenanordnung

Jan Hausding



**Multiaxiale Gelege auf Basis der Kettenwirktechnik -
Technologie für Mehrschichtverbunde mit variabler Lagenanordnung**

Von der Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
angenommene Dissertation von

Dipl.-Ing. Jan Hausding

geboren am 6. Juni 1978 in Pirna

Tag der Einreichung

1. Oktober 2009

Tag der Verteidigung:

17. März 2010

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Chokri Cherif

Prof. Dr.-Ing. Burkhard Wulfhorst

Vorsitzender der Prüfungskommission

Prof. Dr. rer. nat. habil. Dr. h. c. Karl-Heinz Modler

für Helge, Hanna, Louisa



Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der Technischen Universität Dresden in Verbindung mit der interdisziplinären Forschung im Sonderforschungsbereich 528 der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“.

Mein Dank gebührt Prof. Chokri Cherif, dem Direktor des ITM, für die Betreuung dieser Arbeit, seine Unterstützung und für die Übernahme des ersten Gutachtens. Prof. Burkhard Wulfhorst danke ich für das entgegengebrachte Interesse und die Bereitschaft zur Erstellung des zweiten Gutachtens. Mein Dank gilt weiterhin allen Kollegen am ITM, die mich mit vielen hilfreichen Hinweisen und anregenden Diskussion auf meinem Weg begleitet haben, insbesondere Thomas Engler, Dr. Evelin Hufnagl, Prof. Peter Offermann, Martin Waldmann, Karsten Trips, Mirko Schade, Fryderyk Krzywinski und Dr. Gerd Franzke. Für die Bearbeitung der Fragestellungen zum Textilbeton unerlässlich und hilfreich war der Austausch mit den Kollegen aus dem Institut für Massivbau, wobei ich Enrico Lorenz und Dr. Silvio Weiland besonders danken möchte. Die stets gute Zusammenarbeit mit der Karl Mayer Malimo Textilmaschinenfabrik GmbH, insbesondere mit Dr. Frank Friedrich, Gert Zeidler und Swen Petrenz, war eine wichtige Voraussetzung für das Gelingen dieser Arbeit.

Dresden im März 2010

Jan Hausding



Inhaltsübersicht

1	Einleitung.....	1
2	Das Nähwirken als textiles Flächenbildungsverfahren.....	3
3	Technische Umsetzung des erweiterten Wirkprozesses.....	19
4	Bindungskonstruktion beim erweiterten Wirkprozess.....	25
5	Anwendung des erweiterten Wirkprozesses bei der Herstellung von Textilbeton	51
6	Anwendung des erweiterten Wirkprozesses bei der Herstellung von Faser- Kunststoff-Verbunden	78
7	Lösungen für die Umsetzung der variablen Lagenanordnung	132
8	Zusammenfassung und Perspektive.....	172
9	Literatur.....	I
10	Anhang.....	XVIII



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Das Nähwirken als textiles Flächenbildungsverfahren.....	3
2.1	Einführung und Begriffe	3
2.2	Abgrenzung und Entwicklungsbedarf	10
2.2.1	<i>Anwendungsfelder und Abgrenzung.....</i>	<i>10</i>
2.2.2	<i>Übersicht zu Verfahrensalternativen.....</i>	<i>12</i>
2.2.3	<i>Möglichkeiten der Erweiterung des Nähwirkprozesses.....</i>	<i>17</i>
3	Technische Umsetzung des erweiterten Wirkprozesses.....	19
3.1	Grundlegendes	19
3.2	Prototypmaschine für den erweiterten Wirkprozess.....	22
4	Bindungskonstruktion beim erweiterten Wirkprozess.....	25
4.1	Darstellung der Bindungen mit Nadelversatz	25
4.1.1	<i>Absolute und relative Positionsnummern</i>	<i>25</i>
4.1.2	<i>Erweiterter Legungsplan.....</i>	<i>26</i>
4.1.3	<i>Erweitertes Legungsbild</i>	<i>27</i>
4.2	Äquivalenzbindungen	30
4.3	Grundbindungen in Kombination mit Nadelversatz.....	32
4.3.1	<i>Einteilung und Merkmale</i>	<i>32</i>
4.3.2	<i>Grundbindungen ohne Legebarrenversatz (Franse).....</i>	<i>36</i>
4.3.3	<i>Grundbindungen mit einmaligem Legebarrenversatz.....</i>	<i>39</i>
4.3.4	<i>Grundbindungen mit mehrmaligem Legebarrenversatz (Atlas)</i>	<i>40</i>
4.3.5	<i>Kombinierte Bindungen.....</i>	<i>43</i>
4.4	Grundbahnen	44
4.4.1	<i>Symmetrie der Lagenanordnung</i>	<i>44</i>
4.4.2	<i>Fadenlagen.....</i>	<i>45</i>
4.4.3	<i>Flächengebilde und Kombinationen</i>	<i>46</i>
4.4.4	<i>Bindung und Grundbahnen beim erweiterten Nähwirkprozess</i>	<i>47</i>
4.4.5	<i>Schlussfolgerung.....</i>	<i>50</i>

5	Anwendung des erweiterten Wirkprozesses bei der Herstellung von Textilbeton	51
5.1	Einflussgrößen	51
5.1.1	<i>Überblick.....</i>	<i>51</i>
5.1.2	<i>Einflüsse des Nähwirkprozesses auf die Tragfähigkeit.....</i>	<i>54</i>
5.1.3	<i>Einfluss der Bindung auf Handhabung und Bewehrungsführung.....</i>	<i>57</i>
5.2	Untersuchungsschwerpunkte	61
5.2.1	<i>Zielgrößen.....</i>	<i>61</i>
5.2.2	<i>Einflussgrößen.....</i>	<i>63</i>
5.2.3	<i>Experimentelle Durchführung.....</i>	<i>64</i>
5.3	Ergebnisse und deren Bewertung.....	69
5.3.1	<i>Beeinflussung der Kettfadengeometrie durch den Nähwirkprozess.....</i>	<i>69</i>
5.3.2	<i>Einfluss des Flächenbildungsverfahrens auf den Verbund.....</i>	<i>73</i>
5.4	Ableitung der Anforderungen an die Nähwirkmaschine	76
6	Anwendung des erweiterten Wirkprozesses bei der Herstellung von Faser- Kunststoff-Verbunden	78
6.1	Einsatz von Nähwirkstoffen in Faser-Kunststoff-Verbunden	78
6.2	Einflussgrößen	80
6.2.1	<i>Überblick.....</i>	<i>80</i>
6.2.2	<i>Nachgewiesene Einflüsse des Nähwirkprozesses auf den Verbund.....</i>	<i>82</i>
6.3	Untersuchungsschwerpunkte	91
6.3.1	<i>Zielgrößen.....</i>	<i>91</i>
6.3.2	<i>Einflussgrößen.....</i>	<i>92</i>
6.4	Einfluss der Wirkfadenzugkraft und der Bindung auf die Grundbahn	102
6.4.1	<i>Bestimmung der Wirkfadenzugkraft.....</i>	<i>102</i>
6.4.2	<i>Optische Bewertung der Nähwirkstoffe aus Glasfilamentgarn.....</i>	<i>105</i>
6.5	Versuchsplanung und experimentelle Durchführung	107
6.5.1	<i>Probenherstellung.....</i>	<i>107</i>
6.5.2	<i>Prüfverfahren zur Kennwertermittlung.....</i>	<i>113</i>
6.6	Auswertung	114
6.6.1	<i>Einfluss von Wirkfadenzugkraft und Bindung auf die Kettfadengeometrie.....</i>	<i>114</i>
6.6.2	<i>Einfluss der Fadenlagenanordnung auf die Bauteilgeometrie.....</i>	<i>115</i>

6.6.3	<i>Einfluss der Herstellung des Nähwirkstoffs auf die Verbundeigenschaften ...</i>	116
6.6.4	<i>Einfluss der Bindung des Nähwirkstoffs auf die Verbundeigenschaften</i>	120
6.6.5	<i>Einfluss des Wirkfadenwerkstoffs auf die Verbundeigenschaften</i>	121
6.6.6	<i>Einfluss der Wirkfadenzugkraft auf die Verbundeigenschaften</i>	122
6.6.7	<i>Beeinflussung des Drapierverhaltens durch den Nähwirkprozess.....</i>	124
6.6.8	<i>Vergleich der Nähwirk-, Web- und Mehrlagenstricktechnik.....</i>	126
6.7	Ableitung der Anforderungen an die Nähwirkmaschine	130
7	Lösungen für die Umsetzung der variablen Lagenanordnung	132
7.1	Anforderungen an Prozess und Maschine	132
7.1.1	<i>Problemanalyse.....</i>	132
7.1.2	<i>Abgeleitete Teilaufgaben.....</i>	135
7.1.3	<i>Anforderungen.....</i>	136
7.2	Funktionsstrukturen	139
7.2.1	<i>Gesamtfunktion.....</i>	139
7.2.2	<i>Funktionsstrukturvarianten für die Gesamtaufgabe.....</i>	139
7.3	Teilfunktion Speichern	140
7.4	Teilfunktion Zuführen und Ablegen	142
7.4.1	<i>Zuführung der Unterkette</i>	142
7.4.2	<i>Ergonomische Aspekte beim Einziehen der Unterkette</i>	143
7.4.3	<i>Zuführung der Zwischenketten</i>	145
7.5	Teilfunktion Transport	146
7.5.1	<i>Transport der Zwischenkette</i>	146
7.5.2	<i>Führung der Kettfäden</i>	146
7.5.3	<i>Fixierung der Kettfäden.....</i>	149
7.5.4	<i>Variantenbewertung</i>	159
7.5.5	<i>Vorzugslösungen</i>	164
7.6	Teilfunktion Fügen	167
7.6.1	<i>Teilaufgabe Verhinderung unzulässiger Nadelverformungen</i>	167
7.6.2	<i>Teilaufgabe Führen an der Wirkstelle</i>	169
8	Zusammenfassung und Perspektive.....	172
9	Literatur.....	I

9.1	Eigenständige Werke	I
9.2	Zeitschriftenartikel und Tagungsbeiträge.....	III
9.3	Normen und Schutzrechte	XI
9.4	sonstige Literatur	XIV
10	Anhang.....	XVIII

1 Einleitung

Der schonende und effiziente Umgang mit den weltweit zur Verfügung stehenden natürlichen Ressourcen ist ein wesentlicher Schwerpunkt der aktuellen und zukünftigen wirtschaftlichen Entwicklung. Ein elementarer Baustein hierbei ist die Verminderung des Energieverbrauchs und der Schadstoffemissionen in Bereichen, in denen große Massen bewegt und beschleunigt werden, wie etwa der Luftfahrt, dem schienen- und straßengebundenen Personen- und Güterverkehr sowie dem Maschinen- und Anlagenbau. Zur Reduktion der zu beschleunigenden Massen werden seit längerem auf verschiedenen Wegen Leichtbaulösungen erarbeitet. Neben der Weiterentwicklung klassischer metallischer Werkstoffe stehen dabei insbesondere auf textilen Halbzeugen basierende langfaserverstärkte Faser-Kunststoff-Verbunde im Zentrum des Interesses. Diese bieten den Vorteil einer gezielten Anpassbarkeit der Werkstoffeigenschaften an die Produkthanforderungen. Allerdings sind Großserienanwendungen auf dieser Grundlage derzeit noch rar, da sich wirtschaftliche und reproduzierbare Fertigungsverfahren erst in der Entwicklung befinden.

Mit multiaxialen Gelegen auf Basis der Kettenwirktechnik stehen seit geraumer Zeit hervorragende textile Halbzeuge für die Weiterverarbeitung als Verstärkungskomponente in Faser-Kunststoff-Verbunden zur Verfügung. Die Gelege konkurrieren jedoch mit einer Vielzahl an Alternativen. Die Kettenwirktechnik ist deshalb sowohl von Seiten der Maschinenhersteller als auch der Anwender in der Textilindustrie von ständigen Weiterentwicklungen und Verbesserungen geprägt. Die verfolgten Ziele sind dabei insbesondere die Steigerung der Produktivität des Prozesses, der Qualität des Produktes sowie eine Erweiterung der Produktvariabilität. Die Verwendung von multiaxialen Gelegen auf Basis der Kettenwirktechnik ist insbesondere immer dann attraktiv, wenn durch die Nutzung des textilen Halbzeugs nachfolgende Arbeitsschritte in der Prozesskette eingespart und so Kosten reduziert werden können. Ein besonderer Vorteil beim Einsatz dieser speziellen Multiaxialgelege ergibt sich aus der Möglichkeit, in nur einem Arbeitsgang bis zu achtlagige textile Halbzeuge herstellen zu können, die neben Fadenlagen aus Hochleistungsgarnen in unterschiedlichen Ausrichtungen auch zusätzliche Schichten wie etwa Vliesstoffe oder Folien enthalten können.

Die Fertigung der multiaxialen Gelege, die auch als Nähwirkstoffe bezeichnet werden, erfolgt auf speziellen Kettenwirkmaschinen, sogenannten Nähwirkmaschinen. Die bisherige Maschinenkonfiguration führt aber verfahrensbedingt zu einem unsymmetrischen Produkt-aufbau mit üblicherweise nur einer Fadenlage in Gelegelängsrichtung. Bei einer Vielzahl von Anwendungsfällen im Bereich der Mehrschichtverbunde treten durch eine unsymmetrische Lagenanordnung jedoch Probleme bei der Bauteilfertigung und im Einsatz auf. Diese Probleme resultieren aus Eigenspannungen, die sich unter anderem durch den unsymmetrischen Aufbau der Verbunde ergeben. Deshalb sind bisher häufig zusätzliche, meist manuelle Arbeitsschritte nötig, etwa indem mehrere Nähwirkstoffe unvernäht übereinander geschichtet oder in einem zweiten maschinellen Prozess wiederum miteinander vernäht werden. Da der Anteil der Fertigungskosten, verursacht durch eine Vielzahl notwendiger Arbeitsschritte,

bei der Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden grundsätzlich einen wesentlichen Kostenfaktor darstellt, ist eine Reduktion des Fertigungsaufwands von großem Interesse.

Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit bildet nun eine Erfindung aus dem Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik in Dresden, welche die bisherige verfahrensbedingte Einschränkung aufhebt. Durch Einführung einer zusätzlichen Bewegung der Wirkelemente wird es möglich, Nähwirkstoffe mit einer beliebigen Abfolge der Einzellaagen, zum Beispiel in symmetrischer Anordnung, herzustellen. Ziel der Arbeit ist, aufbauend auf diesem erweiterten Wirkprozess und einer bestehenden Prototypmaschine, die technologischen Möglichkeiten auszuloten, die sich für die Herstellung von Nähwirkstoffen mit variabler Lagenanordnung bieten.

Ausgehend von der klassischen Bindungskonstruktion beim Nähwirken werden deshalb zunächst die grafische Darstellung und die numerische Beschreibung der Wirkbindung an die Erfordernisse des erweiterten Wirkprozesses angepasst. Die neuen Varianten der Bindungskonstruktion bilden den Ausgangspunkt für die Produktentwicklung am Beispiel zweier Anwendungen aus den Bereichen der Faser-Kunststoff-Verbunde und des textilbewehrten Betons. Hier wird deutlich, dass über die Herstellung symmetrischer Gelege hinaus der Einsatz des erweiterten Wirkprozesses die Eigenschaften der Gelege und der Endprodukte vorteilhaft beeinflussen kann. Aus den untersuchten Beispielen und grundsätzlichen Betrachtungen wird im Folgenden abgeleitet, unter welchen maschinentechnischen Voraussetzungen der Einsatz des erweiterten Wirkprozesses sinnvoll sein könnte. Es wird ein Konzept entwickelt, auf Grundlage dessen Nähwirkstoffe mit variabler Lagenanordnung auf Nähwirkmaschinen gefertigt werden können.

Aufbauend auf diesem Konzept und der Ergebnisse der Anwendungsuntersuchungen ergibt sich ein aussichtsreiches Potenzial für den Einsatz des erweiterten Wirkprozesses zur Herstellung textiler Halbzeuge sowohl für Textilbeton als auch für Faser-Kunststoff-Verbunde. Mit auf den Anwendungszweck angepassten Maschinenkonzepten werden deutliche Eigenschaftverbesserungen und eine größere Produktvielfalt erreicht. Insbesondere bei der Herstellung textiler Bewehrungen für Textilbeton können durch die vom erweiterten Wirkprozess eröffneten Möglichkeiten der Bindungskonstruktion und Lagenanordnung die bisher bestehenden Kritikpunkte an Nähwirkstoffen ausgeräumt werden. Damit etabliert sich die Nähwirktechnologie endgültig als das Standardverfahren zur Herstellung textiler Bewehrungen für tragende Textilbetonbauteile und multiaxialer Verstärkungshalbzeuge für Faser-Kunststoff-Verbunde.

2 Das Nähwirken als textiles Flächenbildungsverfahren

2.1 Einführung und Begriffe

Das Nähwirken ist ein Verfahren zur Herstellung von textilen Flächengebilden und stellt eine Variante des Kettenwirkens dar (WÜNSCH, 2008 [39]). Das Verfahren beruht darauf, Fadenscharen oder Flächengebilde mittels Maschen eines oder mehrerer Wirkfadensysteme miteinander zu verbinden. Beim verwandten Vlieswirken erfolgt die Verfestigung von Faservliesen durch die Bildung von Maschen aus Fasern des vorgelegten Vlieses. Die Fadenscharen werden beim Nähwirken an einer oder mehreren aufeinander folgenden Legestationen in zwei parallel laufende Transportvorrichtungen eingebracht. Die übereinander angeordneten Fadenscharen werden dann der Wirkeinheit zugeführt und durch die Maschen des Wirkfadensystems zu einem stabilen Flächengebilde verbunden (Bild 1).

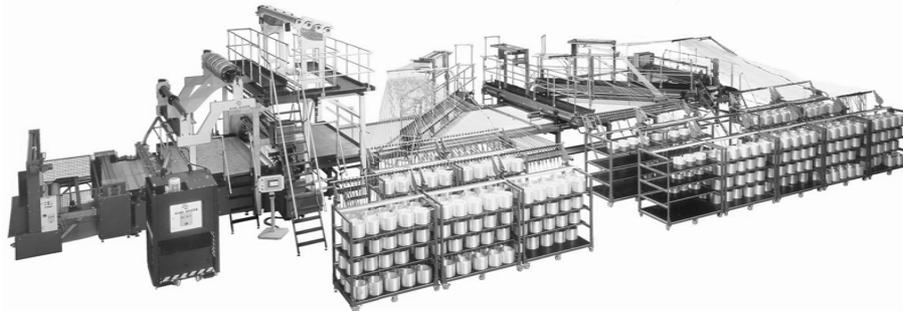


Bild 1: Beispiel einer handelsüblichen Nähwirkmaschine (*Malitronic Multiaxial, Karl Mayer Malimo Textilmaschinenfabrik GmbH [260]*)

In Bild 2 ist das Nähwirken in die maschenbildenden Verfahren eingeordnet. Die Darstellung ist vereinfacht und verzichtet bewusst auf eine Abbildung aller Verfahren. Eine ausführliche Übersicht findet sich zum Beispiel in WEBER, 2004 [36]. Wichtig sind in dem hier vorgestellten Zusammenhang vor allem die Zuordnung des Nähwirkens zu den Rechts-Links (RL) - Flachkettenwirkmaschinen und die Abgrenzung gegenüber Kettenwirkautomaten und Raschelmaschinen.

Die Flächenbildung beim Wirken erfolgt durch Umformen von Fäden zu Maschenschleifen und die anschließende Verbindung dieser Maschenschleifen miteinander (OFFERMANN, 1998 [26]). Das Kettenwirken ist dadurch gekennzeichnet, dass eine oder mehrere Fadenscharen, die auch als Wirkfadensysteme bezeichnet werden, gleichzeitig zu Maschen umgeformt werden. Ein Wirkfadensystem ist demnach eine Vielzahl von Fäden, die parallel nebeneinander laufen und bei der Bildung des Kettengewirkes die gleiche Funktion innehaben (RENZ, 1980 [32]). Bei RL-Flachkettenwirkmaschinen sind die Nadeln geradlinig nebeneinander (flach) auf einem Nadelträger (RL) angeordnet und werden gemeinsam bewegt (zur Definition siehe auch ISO 7839 [210]).

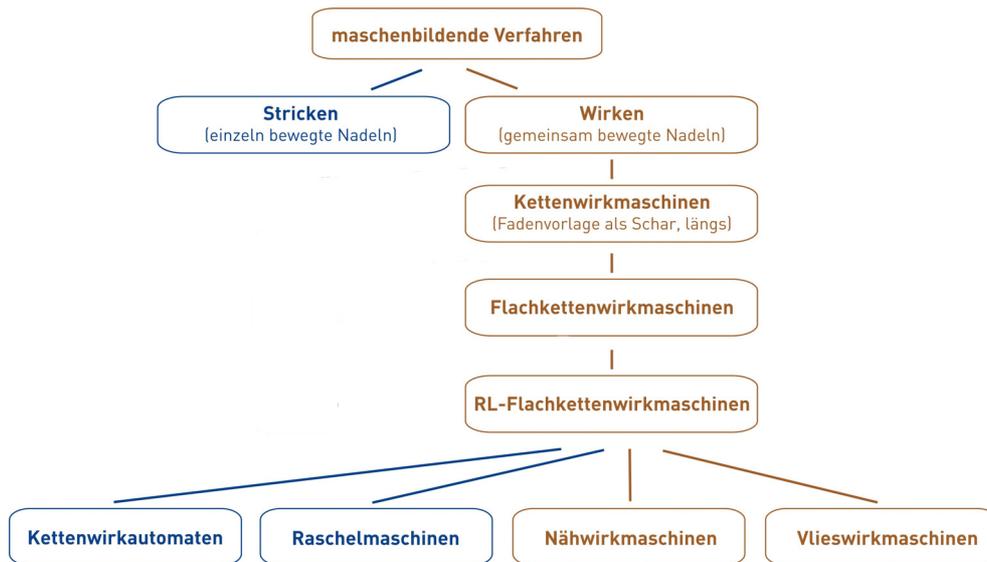


Bild 2: Einordnung der Näh- und Vlieswirkmaschinen in das Spektrum maschenbildender Flächenbildungsverfahren

RL-Flachkettenwirkmaschinen werden üblicherweise in Kettenwirkautomaten, Raschelmaschinen und Nähwirkmaschinen unterteilt. Diese Unterteilung hat sich historisch entwickelt und die Abgrenzung kann in Hinsicht auf das Produkt, den Einsatzzweck und die Maschinengestaltung betrachtet werden. Die Unterscheidung anhand des fertigen Produktes ist bei gleichen Einstellungen und Materialien oft nicht ohne weiteres möglich und daher nicht praktikabel [RAZ, 1987 [31]]. Der Einsatzzweck von Nähwirkmaschinen liegt nach WEBER, 2004 [36] immer in der Verbindung vorgegebener Flächen durch die Maschenbildung, während Kettenwirkautomaten und Raschelmaschinen allein durch die Maschenbildung eine Fläche erzeugen. Jedoch können auch mit den beiden letztgenannten Maschinentypen Flächen verbunden werden, so dass dieses Kriterium zur eindeutigen Abgrenzung ebenfalls nicht geeignet ist. Am häufigsten erfolgt die Unterscheidung anhand der Art und Anordnung der Wirkelemente sowie des Winkels zwischen zugeführtem Fadensystem und abgezogener Ware.

Für die klassischen Anwendungen in der Flächenbildung ist diese Abgrenzung deutlich und sinnvoll, siehe dazu ausführlich in [31], [36], [37], [260]. Bei RL-Flachkettenwirkmaschinen zur Verarbeitung vorgelegter Flächen ist die Gestaltung der Arbeitsstelle oft an die speziellen Anforderungen dieses Einsatzzweckes angepasst, so dass sie sich von herkömmlichen Maschinen gleicher Bezeichnung unterscheidet (vgl. dazu beispielsweise die Gestaltung der Arbeitsstellen der Kettenwirkautomaten *Liba Copcentra MAX 3 CNC* [273] für verbundene Flächen und *Liba Copcentra K* [274] für Flächen aus Maschen). Oder die Arbeitsstelle ist sogar umbaubar und kann entweder wie bei einem Kettenwirkautomaten oder wie bei einer Raschelmaschine ausgeführt werden [275]. Zudem nähern sich Kettenwirkmaschinen, die sich aus verschiedenen Ursprüngen entwickelt haben, in ihrer Arbeitsweise und Produktausrichtung immer mehr an. Als Beispiel dafür seien die Raschelmaschine *Karl Mayer RS MSU S-V* und die Nähwirkmaschine *Karl Mayer Malimo Biaxial* genannt [ANAND, 2003 [43]]. Zu-

nehmend wird deshalb für derartige RL-Flachkettenwirkmaschinen nur noch der Oberbegriff Wirk- oder Kettenwirkmaschine verwendet, mit einer Zusatzbezeichnung meist zu der Art der vorgelegten Fläche [262], [275]. In WEBER, 2004 [36] werden solche Maschinen teilweise als Verbundmaschinen bezeichnet. Eine umfassende Definition oder genauere Abgrenzung erfolgt jedoch nicht.

Als Schlussfolgerung dessen werden im Folgenden RL-Flachkettenwirkmaschinen zur Verbindung vorgelegter Flächen und/oder Fadenscharen mittels Wirkfadensystemen unter dem Oberbegriff Nähwirkmaschinen (NWM, engl. *stitch bonding machine*) zusammengefasst, wobei das Produkt mindestens aus einem Wirkfadensystem und einer vorgelegten Fläche oder Fadenschar besteht. Der Begriff Nähwirkmaschine erscheint geeignet, da er

- die wesentlichen Charakteristika des Verfahrens und der danach hergestellten Produkte umfasst (PLOCH, 1978 [29]), nämlich
 - die Bildung von Maschen aus vielen Fäden gleichzeitig = Wirken,
 - und die Verbindung von Flächen durch ein Fadensystem = Nähen,
- als erster für diese Art der Verbindung von Flächen verwendet wurde (PÖTSCH, 2001 [156]),
- die Einführung eines neuen Begriffes nicht sinnvoll erscheint.

Eine Nähwirkmaschine ist demnach

- eine Kettenwirkmaschine (d. h. Nadelbewegung gleichzeitig),
- in flacher Ausführung (d. h. Nadeln gerade nebeneinander),
- mit einer Nadelbarre (Rechts-Links),
- und üblicherweise ein oder zwei (theoretisch auch mehr) Wirkfadensystemen und Legebarren,
- zur Verbindung von vorgelegten Fadenscharen oder Flächen (im folgenden als Grundbahnen bezeichnet) durch das oder die Wirkfadensystem(e), indem die Nadel die vorgelegte Fadenschar oder Fläche durchdringt,
- unabhängig von der Ausgestaltung der Wirkstelle oder der Nadel.

Eine Kettenwirkmaschine mit einem für Raschelmaschinen typischen Abzug (Abzugswinkel zwischen 120° und 160°), die vorgelegte Vlies- und Schussfadenlagen mit einem Wirkfadensystem verbindet, ist nach dieser Definition eine Nähwirkmaschine. Werden bei einer Kettenwirkmaschine die Verstärkungsfäden allein durch die Legebarre eingebracht, handelt es sich hingegen nicht um eine Nähwirkmaschine, da keine Fläche vorgelegt wird. Unter diese Definition fallen somit auch Maschinen, die vom Hersteller als Raschelmaschine oder Kettenwirkautomat bezeichnet werden, wenn sie den genannten Kriterien entsprechen. Beispiele und Beschreibungen für Kettenwirkmaschinen, die nach dieser Definition zu den Nähwirkmaschinen zählen, finden sich in [265] und [273] bis [276].

Eine Ableitung des Nähwirkprinzips stellen die Vlieswirkmaschinen dar. Auch hier arbeiten alle Nadeln gleichzeitig, sie formen jedoch keinen Faden um, sondern Fasern, die aus einem vorgelegten Faservlies stammen (dazu ausführlich in [45], [47], [49], [50], [53] sowie [263], [266], [267]). Die Vlieswirkmaschinen sind als weitere Variation der RL-Flachkettenwirkmaschinen anzusehen (Bild 2) und werden hier nicht den Nähwirkmaschinen zugeordnet.

Entsprechend der Einteilung in Näh- und Vlieswirkmaschinen können auch die herstellbaren Flächengebilde in Nähwirkstoffe und Vlieswirkstoffe gegliedert werden. Nähwirkstoffe (NWS, engl. meist *stitch bonded fabrics*, MCINTYRE, 1995 [22], auch *stitch bonded multi-ply*, HAUSDING, 2007 [104]) sind nach DIN 61211 [207]

„textile Flächengebilde, die durch maschenförmiges Einbinden von Wirkfäden in ein flächiges Grundmaterial hergestellt sind.“

Auch aus dieser Definition ergibt sich, dass Nähwirkstoffe auf jeder geeigneten und mit den eventuell nötigen Zusatzeinrichtungen versehenen Kettenwirkmaschine hergestellt werden können, sei sie nun als Kettenwirkautomat, Raschelmachine oder Nähwirkmaschine bezeichnet.

Vlieswirkstoffe (VWS, engl. nach MCINTYRE, 1995 [22] ebenfalls *stitch bonded fabrics*, zur Abgrenzung geeigneter jedoch *stitch bonded nonwovens*) sind demgegenüber nach DIN 61211 [207]

„textile Flächengebilde, die ohne Verwendung von Fäden dadurch hergestellt sind, dass Fasern aus einem Faservlies in maschenähnliche Form übergeführt sind.“

Die Gliederung der Näh- und Vlieswirkstoffe in weitere Untergruppen in DIN 61211 [207] soll hier nicht übernommen werden, da sie sich vor allem daraufhin orientiert, alle aus dem ursprünglichen Nähwirkverfahren Malimo nach Heinrich Mauersberger ([51], PÖTSCH, 2001 [156], [268]) entwickelten Verfahrensvarianten einzuordnen. Eine Einteilung der Nähwirkstoffe in Hinblick auf das textile Produkt kann in Anlehnung an DIN 61211 [207] hinsichtlich der vorgelegten Grundbahn in Fadenlagen-Nähwirkstoffe, Flächen-Nähwirkstoffe und Kombinations-Nähwirkstoffe erfolgen (Bild 3).



Bild 3: Einteilung der auf Näh- und Vlieswirkmaschinen hergestellten Flächengebilde (vergl. [207])

Nach der Definition bestehen Nähwirkstoffe neben ein oder zwei Wirkfadensystemen also aus mindestens einer Grundbahn. Grundbahnen beim Nähwirken sind nach Bild 3

- Fadenlagen,
- Flächengebilde (Vliese, Folien etc.),
- Kombinationen aus Fadenlagen und Flächengebilden.

Insbesondere für Fadenlagen-Nähwirkstoffe, aber teilweise auch für Kombinations-Nähwirkstoffe werden in der Literatur verschiedene, uneinheitliche Begriffe benutzt. Zum einen werden Bezeichnungen wie

- Gelege,
- Biaxial- oder Multiaxialgelege,
- direkt orientierte Strukturen,
- *multiaxial multi-ply fabrics* (MMF) oder
- *non-crimp fabrics* (NCF)

angewendet, die allgemein auf die Verwendung von einer oder mehreren Fadenlagen hinweisen. Dem Wortsinn nach umfassen diese Begriffe jedoch alle möglichen Gelege, unabhängig von der Art der Lagenverbindung und sind eher als Oberbegriffe zu verwenden. Zum anderen werden Begriffe benutzt, die konkret auch die Fixierung der Fadenlagen mittels eines Wirkverfahrens beinhalten, etwa

- verwirktes Gelege,
- verwirktes multiaxiales Gelege (WIMAG),
- nähgewirktes Gelege (NWG),
- biaxial oder multiaxial verstärktes Gewirk,

- Biaxial- oder Multiaxialgewirk oder
- *multiaxial warp knit* (MWK).

Prinzipiell können die Nähwirkstoffe (und ebenso die oben aufgeführten Alternativbegriffe) unter den häufig benutzten Oberbegriff der (Multiaxial)-Gelege nach DIN EN 13473-1 [196] eingruppiert werden. Demnach ist ein Multiaxialgelege ein

„durch ein Maschensystem oder ein chemisches Bindemittel fixiertes Flächengebilde, das aus einer oder mehreren parallelen gestreckten Fadenlagen besteht, das unterschiedlich orientiert ist, unterschiedliche Fadendichten der Einzellagen vorweist und in das Faservliese, Folien, Schäume oder andere Materialien integriert werden können.“

Diese Definition erscheint allerdings etwas widersprüchlich, da hier unter multiaxial, also in Richtung mehrerer Achsen ausgerichtet, auch Gelege aus nur einer Fadenlage umfasst sind, die ja auch nur in Richtung einer Achse verlaufen können. Der Begriff der Axialität stellt nur eine von mehreren Möglichkeiten dar, unterschiedliche Arten von Gelegen zu beschreiben und zu untergliedern. Zudem sind die Angaben zur Fixierung der Fadenlagen schon relativ speziell und umfassen nicht alle denkbaren Möglichkeiten.

Deshalb wird hier im Folgenden der Oberbegriff Gelege (engl. *multi-ply*) verwendet für

- ein durch Stoffschluss oder mechanisch durch Reib- und/oder Formschluss fixiertes Flächengebilde,
- das aus einer oder mehreren Lagen paralleler und gestreckter¹ Fäden und/oder anderer Flächengebilde besteht,
- wobei die Fadenlagen verschieden orientiert sein und unterschiedliche Fadendichten aufweisen können.

Der Nähwirkstoff stellt eine Unterordnung der Gelege dar und kann abschließend definiert werden als

ein durch maschenförmiges Einbinden von Wirkfäden fixiertes Gelege.

Im Sinne der Einheitlichkeit wird im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich der Begriff Nähwirkstoff entsprechend dieser Definition benutzt. Dabei ist lediglich zu beachten, dass in Teilen der zitierten Literatur die oben aufgeführten Alternativbegriffe synonym verwendet werden.

Die Ausrichtung der Fadenlagen im Nähwirkstoff muss nicht notwendigerweise gerade sein. Mit Einrichtungen zur Manipulation von Kett- und Schussfäden kann der Fadenverlauf im Nähwirkstoff in weiten Grenzen eingestellt werden (dazu näheres in [213], [214] und in LEOPOLD, 2005 [21] mit weiteren Verweisen).

¹ Gestreckt bedeutet, dass keine Auslenkung der Fäden senkrecht zur Fadenlängsachse stattfindet.

Falls notwendig, wird die nähere Bezeichnung der Grundbahn entsprechend Bild 3 vorangestellt. Zudem kann ein ergänzendes Adjektiv zur Angabe der Fadenlagenausrichtung verwendet werden, nämlich:

- *ein* axialer Nähwirkstoff (ein oder mehrere Fadenlagen in *einer* Richtung),
- *zwei* axialer Nähwirkstoff (zwei oder mehr Fadenlagen in *zwei* Richtungen),
- *drei* axialer Nähwirkstoff (drei oder mehr Fadenlagen in *drei* Richtungen),
- *vier* axialer Nähwirkstoff (vier oder mehr Fadenlagen in *vier* Richtungen),
- *multi*axialer Nähwirkstoff (mehr als vier Fadenlagen in *mehr als vier* Richtungen).

Ist dem Begriff Nähwirkstoff ohne Angabe der Grundbahn eine Angabe zur Fadenlagenausrichtung vorangestellt, so besteht dieser prinzipiell nur aus Fadenlagen. Eventuell vorhandene weitere Flächenlagen bei Kombinations-Nähwirkstoffen sind gesondert anzugeben.

Die Angabe der Orientierungen der einzelnen Lagen erfolgt in dieser Arbeit in der Form $[\alpha/\beta/\gamma]$, wobei α , β und γ den Ablagewinkeln der Fadenlagen gemäß der Definition in DIN 13473-1 [196] ohne Angabe des Winkelsymbols „°“ entsprechen:

„Die Orientierungen der einzelnen Fadenlagen werden in Abhängigkeit der Produktionsrichtung angegeben. Die Produktionsrichtung wird als 0°-Richtung definiert. Die Bezeichnung der Fadenorientierungen erfolgt [...] mit der als ±-Winkelorientierung (90°-Maximalwinkel) benannten Darstellung, die wie folgt definiert wird: Fadenlagen, die im Intervall $[0^\circ, 90^\circ]$ liegen, werden mit „+“ oder „-“ in Relation zu 0° bezeichnet. Die Orientierung wird mit „+“ definiert, wenn die Fäden im positiven Quadranten des Koordinatensystems liegen bzw. mit „-“, wenn die Fäden im negativen Quadranten liegen“ (siehe Bild 4).

Ein dreilagiger, zwei axialer Nähwirkstoff mit den Ausrichtungen der einzelnen Lagen von 0°, 90° und 0° wird somit in der Form $[0/90/0]$ gekennzeichnet.

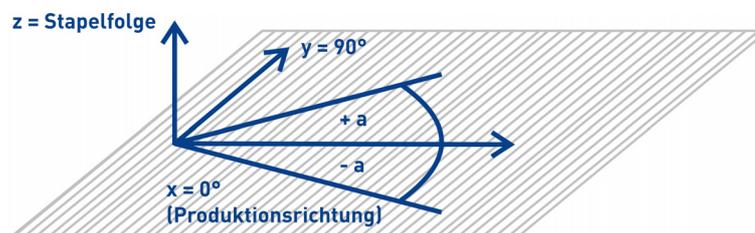


Bild 4: Angabe der Lagenorientierung in Fadenlagen-Nähwirkstoffen (vergl. [196])

2.2 Abgrenzung und Entwicklungsbedarf

2.2.1 Anwendungsfelder und Abgrenzung

Nähwirkstoffe finden ihren Einsatz in vielen Anwendungsbereichen, sowohl allein als auch in Form von Werkstoffkombinationen. Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten.

Tabelle 1: Anwendungsgebiete für Nähwirkstoffe [52], [264], [277], [278], [283]

Anwendungsbereich	Beispiele
Agrartextilien	Grassamentträger, Gewächshausabdeckung
Bautextilien	Betonverstärkungen, Putzarmierungen
Bekleidungstextilien	Futterstoffe
Geotextilien	Eisenbahnbau, Wasserbau
Heimtextilien	Gardinen
Industrietextilien	Förderbänder, Polierscheiben
Medizintextilien	Verbandstoffe
Mobiltextilien	Verbundwerkstoffe für Fahrzeuge, Schiffe, Luft- und Raumfahrt
Ökologietextilien	Filter, Ölfangmatten
Packtextilien	Klebebänder, Verpackungssäcke
Schutztextilien	Schutznetze, Helme
Sport- und Freizeittextilien	Skier, Surfbretter

Natürlich stellen Nähwirkstoffe dabei nicht die einzige Möglichkeit dar, derartige Produkte herzustellen. Welche Alternativen zum Nähwirken vorhanden sind, soll im Folgenden kurz aufgezeigt werden.

Um der Frage nach den alternativen Herstellungsverfahren nachzugehen, wird als erstes Abgrenzungsmerkmal die geometrische Form herangezogen. Ganz allgemein besteht die Möglichkeit, textile Strukturen in ebene (zweidimensionale) oder räumliche (dreidimensionale) einzuteilen. Diese Einteilung kann nach BÜSGEN, 1993 [8] und ROYE, 2005 [160] folgendermaßen vorgenommen werden: Bei einem zweidimensionalen Textil ist weder die Fadenanordnung noch die Textilgeometrie in mehr als zwei Raumrichtungen ausgedehnt. Ein dreidimensionales Textil erstreckt sich demgegenüber in der Fadenanordnung und/oder der Textilgeometrie in drei Raumrichtungen. Die Fadenanordnung gilt als dreidimensional, wenn in eine volumenbildende Anordnung von wenigstens drei oder mehr Fadensystemen oder

Fadenvorzugsrichtungen kein rechtwinkliges Koordinatensystem so gelegt werden kann, dass eine der drei Achsen senkrecht zu allen Fadensystemen des textilen Körpers steht. Eine dreidimensionale Textilgeometrie ist die

„volumenbildende Ausdehnung des textilen Körpers ohne die vorherige Einwirkung umformender Maßnahmen, so dass ein Volumen durch die Textilstruktur (selbst) gebildet oder von ihr umschlossen wird, unabhängig von der Anzahl der Fadensysteme und der durch sie gebildeten Struktur“ (BÜSGEN, 1993 [8]).

Die mit den derzeit zum Stand der Technik² gehörenden Nähwirkmaschinen herstellbaren Nähwirkstoffe sind nach diesen Definitionen den Textilien mit einer Fadenanordnung in drei Raumrichtungen zuzuordnen (Grundbahn in der Ebene, Wirkfaden senkrecht dazu), wobei den Fadenlagen in der Grundbahn die Haupttragwirkung zukommt. Die weitere Abgrenzung erfolgt deshalb hier gegenüber dreidimensionalen Textilien mit ähnlichen Charakteristika sowie gegenüber zweidimensionalen Textilien. Zwar können Produkte aus ebenen Nähwirkstoffen, die in einem mehrstufigen Verfahren zu dreidimensionalen Textilien umgeformt oder zusammengesetzt wurden (siehe zum Beispiel NEITZEL, 2004 [25] und RÖDEL, 2004 [158]) auch als Alternative zu Textilien mit dreidimensionaler Geometrie zur Anwendung kommen, sie sind jedoch in ihren Eigenschaften diesen nicht direkt vergleichbar.

Neben der räumlichen Ausdehnung sind Nähwirkstoffe, wenn sie Fadenlagen enthalten, zudem gekennzeichnet durch deren gestreckte und parallele Anordnung. Die Ausrichtung der Fäden soll für den hier vorgenommenen Vergleich auf geraden Fadenverlauf beschränkt werden, da die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Möglichkeiten der Fadenverlaufsm Manipulation derzeit nicht kommerziell verfügbar sind. Alternative Verfahren in direkter Konkurrenz zum Nähwirken müssen demnach einen im Wesentlichen gestreckten, geraden und parallelen Verlauf der Fäden aufweisen. Diese Fäden können entweder chemisch durch Stoffschluss oder mechanisch durch Reib- und Formschluss miteinander verbunden werden. Die in Frage kommenden Möglichkeiten sind in Bild 5 dargestellt und werden im Folgenden kurz vorgestellt. Für weitergehende Information sei auf die jeweilige umfangreich vorhandene Literatur verwiesen.

² Aktuelle, noch nicht abgeschlossene Entwicklungen am *Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM)* der *Technischen Universität Dresden (TUD)* zielen auf den Einsatz der Nähwirktechnik zur Herstellung von Nähwirkstoffen mit einer dreidimensionalen Geometrie (CHERIF, 2008 [251]).

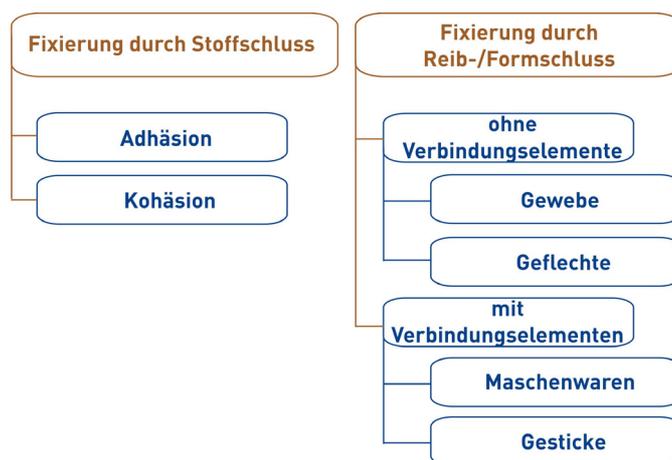


Bild 5: Einteilung der Alternativen zum Nähwirken in Anlehnung an DIN 60 000 [206]

2.2.2 Übersicht zu Verfahrensalternativen

2.2.2.1 *Stoffschlüssig fixierte Gelege*

Stoffschlüssige Gelege sind in aller Regel adhäsiv durch Zugabe von Bindemitteln fixiert, die in fester oder flüssiger respektive viskoser Form aufgetragen werden können. Diese Gelege werden aus textilen Endlosfasern hergestellt oder aus vorgefertigten einaxialen Gelegen zusammengesetzt. Der Winkel jeder Lage ist einstellbar, wofür jedoch teilweise mehrstufige Prozesse notwendig sein können. So sind einaxiale bis multiaxiale Gelegevariationen möglich, die als offene Gitter [270] oder mit geschlossenen Oberflächen ausgeführt werden können ([42], [290], [296]). Die Gelege können mit einer oder mehreren Lagen Vliesstoffen kombiniert werden ([124], [248], [270]). Vielfältige Möglichkeiten kommen in Betracht, die Faden- oder Gelegelagen miteinander zu verbinden. Dazu sei an dieser Stelle nur auf weiterführende Beispiele in [221]-[246] und zusammenfassend auf HAUSDING, 2008 [15] verwiesen. Die Vorteile der stoffschlüssig fixierten Gelege im Vergleich zu Nähwirkstoffen sind insbesondere in der freien Lagenanordnung und der schonenden Fadenverarbeitung zu sehen. Jedoch ist mit steigendem Bindemittelanteil einerseits eine Veränderung des Biege- und Drapierverhaltens gegenüber den textilen Ausgangsmaterialien verbunden (KÖCKRITZ, 2007 [18]), andererseits besteht unter Umständen ein unerwünschter Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Verbunden mit vom Bindemittel abweichenden Matrixsystemen.

2.2.2.2 *Gewebe*

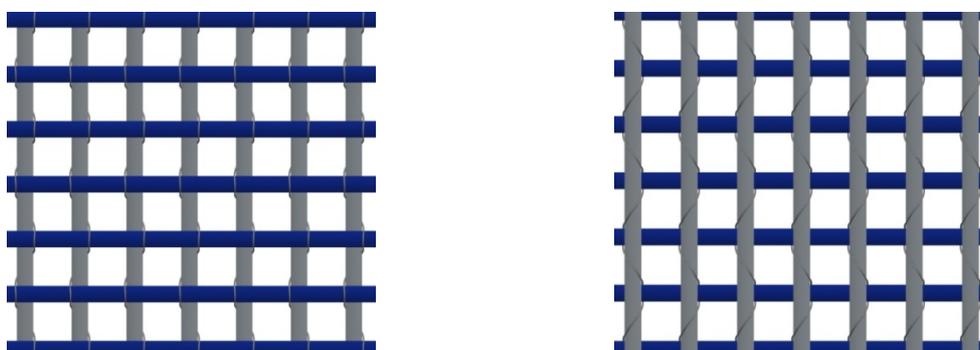
Gewebe sind laut DIN 60 000 [206] Flächengebilde, die mittels Fachbildung aus sich rechtwinklig verkreuzenden Fadensystemen (Kette und Schuss) hergestellt werden. Sie finden im Bereich der Verstärkungstextilien für Verbundwerkstoffe häufig Anwendung. Die Gründe dafür liegen in der für viele Anwendungen günstigen zweiaxialen Ausrichtung der Fadenlagen in Kett- und Schussrichtung, dem variabel einstellbaren Flächengewicht, der besseren Handhabung im Vergleich zu UD-Gelegen und den vielfältigen Bindungsmöglichkeiten. Die Bindung, in diesem Fall die Art der Verkreuzung von Kette und Schuss, beeinflusst weitge-

hend die Eigenschaften der Gewebe, insbesondere das Drapierverhalten, die mechanischen Kennwerte im Bauteil und die Imprägnierbarkeit (NEITZEL, 2004 [25]).

Die Bindung entscheidet darüber, wie oft ein Faden des Gewebes auf einer bestimmten Länge verkreuzt wird, die so genannte Flottierung. Kurze Flottierungen führen tendenziell zu einer höheren Verschiebefestigkeit des Flächengebildes, aber gleichzeitig auch zu geringerer Drapierbarkeit und einer Auslenkung des Fadens aus der gestreckten Lage (SCHÜRMAN, 2007 [33]). Die durch die Fadenverkreuzung beim Weben hervorgerufene Welligkeit kann zu Festigkeitsverlusten zwischen zehn und vierzig Prozent im Flächengebilde verglichen mit der Festigkeit des Einzelfadens führen (GELDERBLOM, 2002 [255]). Durch geeignete Bindungen, zum Beispiel mit längeren Fadenflottierungen, kann dieser Nachteil jedoch reduziert werden. Auch mit Mehrlagengeweben ist es möglich, Strukturen herzustellen, bei denen die kraftaufnehmenden Fäden nur eine geringe Welligkeit aufweisen. Dabei fixiert eine Bindekette die geradlinig angeordneten Verstärkungsfäden (NEITZEL, 2004 [25]).

Ein ähnlicher Ansatz wird auch mit Drehergeweben verfolgt. Auf Basis der Nadelstabdrehertechnik ist es möglich, Kett- und Schussfäden so zu fixieren, dass die Fadenwelligkeit reduziert werden kann (Bild 6). Die Bindefunktion übernimmt ein dünnerer Kettfaden, der verkreuzt mit den Schussfäden um den Verstärkungskettfaden gelegt wird (KLEICKE, 2007 [126], [48] und WAHHOUD, 2005 [176]).

Weiterhin existiert eine Vielzahl von speziellen Geweben, etwa mit quasi einaxialen Eigenschaften, d. h. mit bis zu doppelt so hoher Festigkeit in einer Richtung durch die Erhöhung der Fadenzahl in dieser Richtung auf über siebenzig Prozent (MAIWALD, 2004 [139]). Prinzipiell können auch Gewebe mit dreiaxialer Ausrichtung der Verstärkungsfäden hergestellt werden (TROST, 1977 [171] und FUJITA, 1993 [97]), derartige Maschinen und Strukturen konnten sich aber bislang nicht etablieren. In jüngerer Zeit wurde zudem die Entwicklung einer Webmaschine für vieraxiale Gewebe wieder aufgenommen (ROSIEPEN, 2006 [159]). Abweichungen von der geraden Fadenausrichtung sind ebenfalls möglich. Durch gebogenen Eintrag der Kettfäden und radiale Schussfadenanordnung können schraubflächenförmige Strukturen erzeugt werden (CURISKIS, 1997 [80] und LEOPOLD, 2002 [134]).



a) Kettoberseite

b) Kettunterseite

Bild 6: Modell eines Nadelstabdrehergewebes

2.2.2.3 Geflechte

Geflechte sind Flächen oder Körpergebilde mit regelmäßiger Fadendichte und geschlossenem Warenbild, deren Flechtfäden sich in schräger Richtung zu den Warenkanten verkreuzen (DIN 60 000 [206]). Sie werden üblicherweise in zwei- und dreidimensionale Geflechte unterteilt (WULFHORST, 1998 [38]), von denen hier nur die ersteren kurz betrachtet werden sollen. Die Vorteile der Geflechte liegen in der variablen Fadenanordnung von $\pm 10^\circ$ bis $\pm 80^\circ$ mit der Möglichkeit, zusätzlich Fäden in 0° -Richtung zuzuführen (GELDERBLOM, 2002 [255]). Weiterentwicklungen der konventionellen Flechttechnik (beschrieben von WULFHORST, 1998 [38] und ROYE, 2005 [160]) ermöglichen die Herstellung endkonturnaher Preforms (HENKEL, 2003 [107]). Bei diesen Flechtverfahren steht die Herstellung sphärisch geformter Flächengebilde im Vordergrund, deren Breite herstellungsbedingt deutlich eingeschränkt ist (BISCHOFF, 2002 [63]). Die Anwendung der Flechttechnik ist auf spezielle Verstärkungsstrukturen ausgerichtet und kann daher nur mit großen Einschränkungen als Alternativverfahren zur Nähwirktechnik betrachtet werden.

2.2.2.4 Maschenwaren

Gewirke und Gestricke sind Flächengebilde, die aus einem oder mehreren Fäden oder aus einem oder mehreren Fadensystemen durch Maschenbildung hergestellt werden (DIN 60 000 [206]). Als Oberbegriff wird häufig der Ausdruck Maschenwaren verwendet. Hier werden jedoch nur die Verfahrensvarianten betrachtet, bei denen das Maschensystem lediglich als Verbindungselement für ein oder mehrere kraftaufnehmende Fadensysteme fungiert.

Beim Stricken werden die Maschenfäden im rechten Winkel zur Abzugsrichtung zugeführt und verlaufen im Flächengebilde in horizontaler Richtung. Die maschenbildenden Nadeln arbeiten einzeln und nacheinander. Zur Herstellung von zweiaxialen Verstärkungsstrukturen nach einem an der *Technischen Universität Dresden* entwickelten Verfahren werden Strickmaschinen mit zwei Nadelbetten (Rechts-Rechts- (RR) Maschinen) genutzt. Die Verstärkungsfäden werden zwischen die beiden Nadelbetten gelegt und mit den Maschenfadensystemen fixiert, es entsteht ein sogenanntes Mehrlagengestrick (CEBULLA, 2004 [9]). Dadurch sind auch symmetrische Lagenanordnungen der Form Schuss-Kette-Kette-Schuss möglich. Kettfäden können bindingsbedingt nicht auf beiden Außenseiten der Mehrlagenstruktur angebracht werden. Prinzipbedingt erfolgt beim Stricken keinerlei Anstechen der Verstärkungsfäden. Aufgrund der im Vergleich zum Weben und Wirken niedrigen Produktivität sind die verstärkten Gestricke weniger für Produkte mit großem Mengenbedarf geeignet. Für die Herstellung endformnaher Preforms bieten sie jedoch große Vorteile. Die Verstärkungsfadenlagen können in zweiaxialer Ausrichtung eingearbeitet werden, zum Beispiel auch als kreisförmige Preforms mit variabler Schussfadenzahl. Die Möglichkeiten zur Breitenänderung innerhalb der Struktur und Einarbeitung von Durchbrüchen führen zu vielfältigen Bauteilgestaltungen (CEBULLA, 2002 [69] und LEONG, 2000 [133]). Ein weiterer Vorteil der Mehrlagengestricke ist in der Anzahl von in einem Arbeitsgang verarbeitbaren Fadenlagen

zu sehen. Nach dem derzeitigen Stand der Technik können bis zu elflagige Mehrlagengestricke hergestellt werden (SCHULZ, 2007 [166]). Prinzipiell möglich ist ebenso die Herstellung vieraxialer Mehrlagengestricke (DIESTEL, 2004 [84]).

Die Wirktechnik bietet neben der in Kapitel 2.1 bereits einführend vorgestellten Methode des Nähwirkens, auf die in den folgenden Kapiteln näher eingegangen wird, noch weitere Möglichkeiten, Fäden durch ein Maschenfadensystem miteinander zu verbinden. Auf RL-Kettenwirkmaschinen können Stehschüsse (Kettfäden), Teilschüsse und Vollschüsse von den Wirkfäden abgebunden werden. Dabei werden Stehschüsse zumeist von einer Legebarre geführt, die keine Über- und Unterlegungen ausführt (zu diesen Begriffen Näheres in Kapitel 3). Es sind üblicherweise zwei weitere Legebarren nötig, deren Bindungen den Stehschuss fixieren. Vollschüsse werden nicht über Legebarren, sondern mittels Schusseintragsvorrichtungen quer zur Arbeitsrichtung eingetragen. Mit Teilschüssen wiederum ist es möglich, auch diagonale Fadenverläufe zu erreichen, so dass im Ergebnis durch Kettenwirken hergestellte Flächengebilde mit ein- bis multiaxialer Fadenausrichtung entstehen können (WEBER, 2004 [36]). Die Herstellung derartiger multiaxialer Flächengebilde nach dem Kettenwirkprinzip ist jedoch sehr aufwändig, so dass dafür geeignete Maschinen keine breite Anwendung gefunden haben.

Auch auf Kettenwirkmaschinen mit zwei Nadelbetten (RR) ist die Herstellung von Flächengebilden mit bis zu multiaxialer Fadenausrichtung möglich. Hier arbeiten zwei Nadelbarren nacheinander und die Verstärkungsfäden werden ohne Anstechen zwischen den beiden Gewirkeflächen abgelegt. Durch die Einarbeitung von Unterbrechungen zwischen diesen Gewirkeflächen können multiaxiale Gelege realisiert werden, die zu räumlichen, bauteilnahen Preforms wie etwa Doppel-T-Profilen drapierbar sind. Die Legewinkel der Diagonalfäden können zwischen 10° und 60° variiert werden (HUFNAGL, 2003 [113], HUFNAGL, 2004 [114], [220]). Symmetrische Lagenanordnungen nach dem Muster $[90/\pm\alpha/\pm\alpha/90]$ (mit $10^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$) sind damit erreichbar. Verglichen mit dem Nähwirken ist die Produktivität des Verfahrens jedoch gering.

2.2.2.5 Gesticke

Bei der Herstellung technischer Gesticke für Verstärkungsstrukturen, dem so genannten TFP-Verfahren (*Tailored Fibre Placement*), wird der Verstärkungsfaden auf einer Grundbahn abgelegt und anschließend mit einem Nähfaden auf dieser fixiert (Feltin, 1998 [12], NEITZEL, 2004 [25], MATHEIJ, 1998 [141]). Die Verstärkungsfäden können in nahezu beliebiger Ausrichtung dem vorausberechneten Kraftverlauf im Bauteil angepasst werden. Die Bauteildicke ist variabel. So lassen sich bei gleichzeitiger Materialeinsparung endkonturnahe Preforms mit auf das Bauteil abgestimmter Faserorientierung herstellen. Die Grundbahn kann als bloßer Träger dienen (z. B. in Form eines dünnen Vlieses) oder ebenfalls als Verstärkungsstruktur ausgeführt sein. Durch den Einsatz geeigneter Fasermaterialien im Nähfaden wird eine Verstärkung in Dickenrichtung und damit eine Preform mit dreidimensionalem Charakter erreicht. Die Produktivität des Verfahrens kann durch Verwendung von mehreren parallel

arbeitenden Stickköpfen deutlich gesteigert werden ([257] und FELTIN, 2000 [93]). Die Einsatzgebiete dieser Technologie sind besonders in der Herstellung kleinerer Bauteile mit komplexer Geometrie oder in lokalen Verstärkungen anderer Preforms zu sehen.

2.2.2.6 Schlussfolgerung

Die Lagenanordnung in Nähwirkstoffen ist aufgrund des Verbindungsprinzips und der bisher üblichen Maschinenkonfigurationen eingeschränkt (siehe Kapitel 4.4). Eine Kettfadenebene allein kann beim konventionellen Nähwirkprozess durch die Wirkfadensysteme nicht fixiert werden. Der Kettfaden wird zwar zur linken Wareseite hin durch die Platinenmaschen einer Maschenbindung begrenzt, zur rechten Seite hin ist jedoch mindestens eine Schussfadenebene erforderlich (Bild 7).

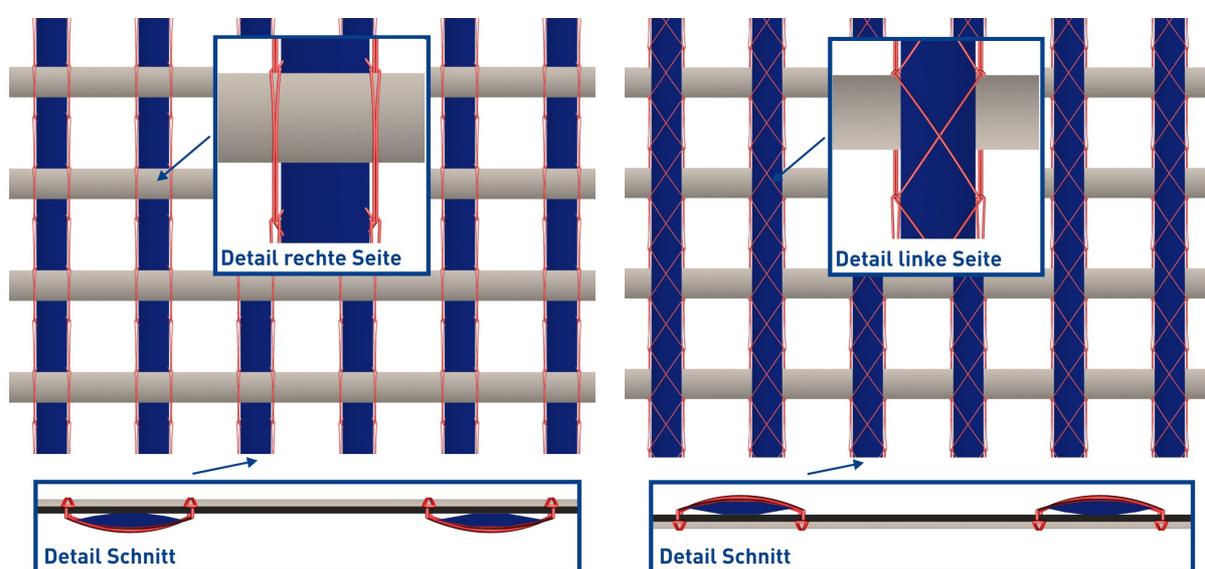


Bild 7: Modell zweiachsialer Nähwirkstoff, Bindung Doppel-Trikot (RL), offen, gegenlegig

Daraus folgt auch, dass Nähwirkstoffe mit Kettfadenebenen auf beiden Außenseiten grundsätzlich nicht möglich sind. Sie lassen sich nur durch nachträgliche Verbindung zweier Nähwirkstoffe fertigen, zum Beispiel wiederum im Nähwirkprozess. Anordnungen von Kettfadenebenen innerhalb des Geleges sind unüblich. Darin wird häufig ein Nachteil der Nähwirktechnik im Vergleich zu den Verfahrensalternativen gesehen (DU, 1996 [87], TRUONG, 2005 [172], DUMOLARD, 2007 [88], [217], [220]), insbesondere beim Einsatz der Nähwirkstoffe als Halbzeuge in Verbundwerkstoffen (dazu ausführlicher in Kapitel 6). Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, ist es beispielsweise mit der Stricktechnik, der RR-Kettenwirktechnik, der Mehrlagenwebtechnik und bei stoffschlüssig fixierten Gelegen möglich, symmetrische Lagenanordnungen zu erzielen beziehungsweise Kettfadenebenen innerhalb des Textils anzuordnen. Jedoch weist jedes dieser Verfahren spezifische Schwächen auf, die es lohnenswert erscheinen lassen, durch eine entsprechende Anpassung des Nähwirkprozesses eine unbeschränkt frei wählbare Lagenanordnung zu realisieren (HAUSDING, 2007 [104]). In Verbindung mit den weiteren günstigen Eigenschaften der Nähwirkstoffe, insbesondere der Vielfalt der verarbeitbaren Fasermaterialien, der gestreckten Fadenla-

ge, dem großen Spektrum an möglichen Lagenwinkeln und der Möglichkeit, beliebige durchstechbare Flächengebilde in den Nähwirkstoff zu integrieren, bietet sich die Chance, die Anwendungen von Nähwirkstoffen wesentlich zu erweitern. In der Literatur wird eine Reihe von Lösungsvarianten beschrieben, die es ermöglichen können, eine solche frei wählbare Lagenanordnung zu erzeugen.

2.2.3 Möglichkeiten der Erweiterung des Nähwirkprozesses

Wie nachfolgend in Kapitel 4.4 noch ausführlicher gezeigt wird, ist es zur Verbindung vorgelegter Flächengebilde durch ein Maschensystem nötig, dass die das Maschensystem bildenden Wirkfäden in jedem Arbeitsgang von den Nadeln durch das Flächengebilde geführt werden. Zur Anbindung von Kettfadenlagen ist es erforderlich, dass die Wirkfäden in regelmäßigem Abstand seitlich über diese Kettfäden geführt und fixiert werden. Das bedeutet, Kett- und Wirkfäden müssen eine Relativbewegung zueinander und quer zur Arbeitsrichtung der Nähwirkmaschine ausführen. Für die linke Seite des Nähwirkstoffs ist dies auf allen Nähwirkmaschinen möglich. Für die Anbindung von Kettfäden auch auf der gegenüberliegenden, rechten Seite des Nähwirkstoffs bieten sich prinzipiell folgende Möglichkeiten an:

- a) der Wirkfaden führt die Relativbewegung aus,
 - i bewegt durch Fadenführer,
 - ii bewegt durch die Nadel,
- b) der Kettfaden führt die Relativbewegung aus,
- c) die Anbindung erfolgt nach dem Prinzip Wenden und Wiederholen,
 - i in zwei Arbeitsgängen,
 - ii in einem Arbeitsgang.

Prinzipiell ist es denkbar, die Anbindung von Kettfäden auf der rechten Seite des Nähwirkstoffs durch auf der Seite der Nadeln angeordnete Fadenführer zu realisieren (Variante a_i). Bekannt ist eine solche Abbindung von Kettenwirkmaschinen, bei denen die Kettfäden durch eine dritte Legebarre zugeführt werden, die zwischen zwei mustergemäß arbeitenden Legebarren angeordnet ist (WEBER, 2004 [36]). Diese Arbeitsweise ist jedoch auf Nähwirkmaschinen nicht ohne weiteres übertragbar. Da sich in der Abschlagebene die zu verbindenden Faden- oder Flächenlagen befinden, müssen die die Fadenführer tragenden Legebarren auf der rechten und linken Seite des Nähwirkstoffs getrennt voneinander arbeiten. Eine solche Lösung, allerdings ohne die Zuführung von Kettfadenlagen zeigt [211]. Problematisch sind hierbei jedoch der hohe Aufwand für eine solche Lösung und die mit dem notwendigerweise vergrößerten Nadelhub sowie der aufwändigen Steuerung einhergehenden Leistungseinbußen [219].

Anstatt den Wirkfaden auf der rechten Seite durch einen zusätzlichen Fadenführer zu bewegen, ist es auch möglich, dafür die Nadel zu nutzen (Variante a_{ii}). Dabei werden die im Nadelhaken befindlichen Nadelmaschen nach dem Abschlagen durch eine Seitwärtsbewegung der

Nadeln mustergemäß versetzt und dann im nächsten Wirkzyklus wieder eingebunden. Auf diese Weise wird eine außen liegende Kettfadenlage fixiert ([218], [219]). Für Vlieswirkmaschinen ist eine solche Querbewegung der Nadel zur besseren Verfestigung des Faservlieses schon länger bekannt (HOFFMANN, 1987 [16] und [211], [212], [215]), hat sich allerdings bisher nicht durchsetzen können.

Auch mit einer seitlichen Versatzbewegung der Kettfäden durch entsprechend gesteuerte Kettfadenführerbarren ist es theoretisch möglich, diese auf der rechten Seite des Nähwirkstoffs anzubinden (Variante b). Eine solche Lösung, allerdings nur für die linke Seite, beschreibt zum Beispiel STOCKMANN, 2002 [35]. Diese Technik dient zur Fixierung von gitterförmigen Nähwirkstoffen oder zur Anbindung von einzelnen Kettfäden auf einer Grundbahn mit der Bindung RL-Franse. Die Probleme dieser Lösung liegen in der durch die Seitwärtsbewegung ausgeübten hohen Belastung auf die Kettfäden und der damit verbundenen Schädigung, insbesondere bei der Verwendung querdruckempfindlicher Materialien sowie in den eingeschränkten Gestaltungsmöglichkeiten für die Geometrie des Nähwirkstoffs.

Die einfachste Lösung, auf einer herkömmlichen Nähwirkmaschine Kettfadenlagen auf beiden Außenseiten des Nähwirkstoffs anzubinden, besteht darin, zwei Arbeitsgänge durchzuführen (Variante c_i). Im ersten Arbeitsgang werden die Kettfäden auf der einen Seite des Nähwirkstoffs eingebunden, dann wird dieser gewendet und der Wirkprozess wiederholt. So wird in [217] eine Vorgehensweise beschrieben, bei der zwei unsymmetrische, mehrlagige Nähwirkstoffe, von denen einer gewendet wird, in einem Nähwirkprozess miteinander verbunden werden. Auf diese Weise kann die Kettfadenlage in jeder beliebigen Position im entstehenden Nähwirkstoff angeordnet werden. Der größte Nachteil dieser Variante liegt sicherlich in den deutlichen Produktivitätseinbußen, die durch diesen zweistufigen Prozess entstehen. Durch den zweimaligen Wirkprozess erhöhen sich jedoch auch der Wirkfadenverbrauch und die Schädigung der Grundbahn.

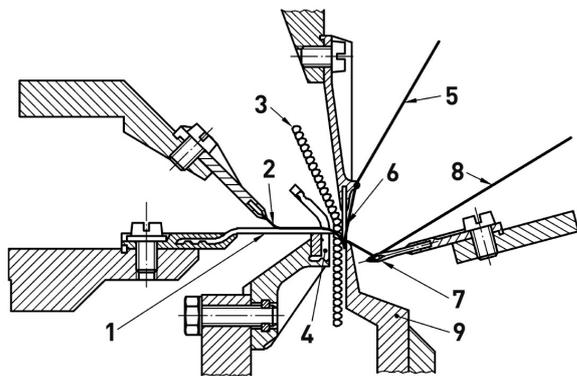
Die Produktivität dieser Methode lässt sich deutlich steigern, wenn zwei Arbeitsstellen in einer Maschine hintereinander angeordnet werden. Damit ist eine Verarbeitung in einem Arbeitsgang möglich (Variante c_{ii}). Ein Beispiel für eine solche Lösung findet sich für Nähwirkmaschinen in [217], für Vlieswirkmaschinen analog als Lösung zur Vliesverfestigung in [216]. Damit in einer solchen Nähwirkmaschine die Kettfadenlagen beliebig angeordnet werden können, ist es jedoch nötig, entweder den Nähwirkstoff zwischen den beiden Arbeitsstellen zu wenden, oder die zweite Arbeitsstelle gegenüber der ersten auf dem Kopf stehend arbeiten zu lassen. Dies wurde jedoch bei keiner der bekannten Lösungen realisiert. Die Problematik des erhöhten Wirkfadenverbrauches und der Beanspruchung der Grundbahn lässt sich auch mit dieser Variante nicht vermeiden.

Aus dieser kurzen Zusammenfassung möglicher Lösungen für die Frage der freien Lagenanordnung in Nähwirkstoffen lässt sich ableiten, dass mit der Methode der seitlichen Bewegung der Nadelmaschen mit nachfolgender Abbindung (kurz Nadelversatz) eine sehr aussichtsreiche Variante zur Verfügung steht. Im folgenden Kapitel wird nun die konkrete Umsetzung dieser Lösung in Form eines Prototyps beschrieben.

3 Technische Umsetzung des erweiterten Wirkprozesses

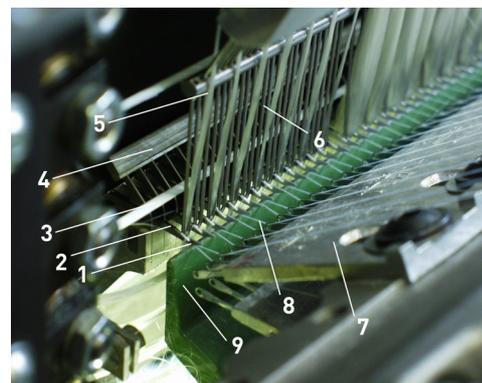
3.1 Grundlegendes

Der erweiterte Nähwirkprozess ist das Resultat einer gemeinsamen Entwicklung der *Karl Mayer Malimo Textilmaschinenfabrik GmbH (KMC)* und des *Instituts für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM)*. Basierend auf einer am *ITM* entwickelten Prinziplösung [[218], [219]] erfolgte die maschinenbauliche Umsetzung in Form eines Prototyps durch *KMC* (FRIEDRICH, 2007 [96]). Basis für die Prototypmaschine bildet eine am *ITM* vorhandene Nähwirkmaschine *Malimo 14022 P2-2S* mit parallelem Schusseintrag zur Herstellung zweiaxialer Fadenlagen-Nähwirkstoffe. Diese Maschinenkonfiguration wurde insbesondere aus Gründen der einfachen Verfügbarkeit ausgewählt und unterscheidet sich von der aktuellen Generation von Nähwirkmaschinen für zweiaxiale Nähwirkstoffe insbesondere durch die senkrechte statt waagerechte Zuführung der Grundbahn. Somit ist auch die Anordnung der Nähwirkelemente gegenüber aktuellen Maschinen um 90° gedreht (Bild 8).



Quelle: [206]

a) Prinzipdarstellung



b) modifizierte Ausführung des *ITM*

1 – Durchstech-Schiebernadel; 2 – Schließdraht; 3 – Schussfaden; 4 – Abschlagplatine; 5 – Kettfaden; 6 – Kettfadenführer (links mit Gegenhaltenadel); 7 – Legebarre (Wirkfadenführer); 8 – Wirkfaden; 9 – Stützschiene

Bild 8: Wirkelemente einer Nähwirkmaschine am Beispiel der *Malimo 14022* (nach DIN 61211 [206])

Für Grundlagenuntersuchungen wurde am *ITM* ein Technologie-Demonstrator entwickelt (Bild 9). Der Demonstrator dient insbesondere der Untersuchung einer großen Zahl an Bindungsvarianten. An einer Nähwirkmaschine erfordern solche Versuche einen hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand, hervorgerufen durch die notwendigen Umrüstzeiten beim Wechsel der Kurvenscheiben, der Wirkelemente und des Fadenmaterials. Mit einem kleinen, handbetriebenen Modell einer Nähwirkmaschine lassen sich viele Fragestellungen hingegen schnell und kostengünstig beantworten.

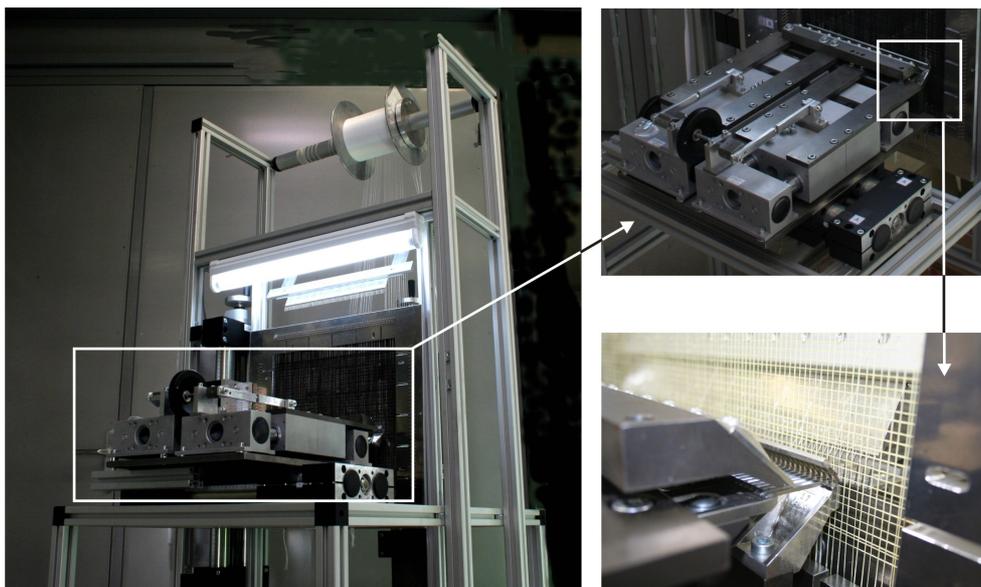


Bild 9: Technologie-Demonstrator für die Nähwirktechnik mit Nadelversatz

Für die technologische Umsetzung der Nadelversatztechnik stehen deshalb die in Tabelle 2 gezeigten Möglichkeiten zur Verfügung. Die Grundlagen werden im Laborbetrieb am Technologie-Demonstrator erarbeitet und dann auf die Arbeit unter Realbedingungen an der Prototypmaschine *Malimo 14022 P2-2S (E)* übertragen.

Tabelle 2: technologische Umsetzung der Nadelversatztechnik

Realbedingungen	Laborbedingungen
Nähwirkmaschine Malimo 14022 P2-2S (E)	Technologie-Demonstrator Nadelversatz, ITM
Merkmale: <ul style="list-style-type: none"> - Arbeitsbreite: 1650 mm - verschiedene Maschinenfeinheiten möglich 	Merkmale: <ul style="list-style-type: none"> - Arbeitsbreite 30 mm - Original-Nähwirkelemente Feinheit F 7 - flexibel einsetzbar
Anpassungen: <ul style="list-style-type: none"> - zusätzlicher Antrieb für Nadelbarrenversatz (FRIEDRICH, 2007 [96]) 	Abweichungen zu Malimo 14022 P2-2S: <ul style="list-style-type: none"> - diskontinuierlicher Bewegungsablauf - minimale Beschleunigung der Arbeitselemente - Fadenlagen auf einen Rahmen aufgespannt, keine Führung an der Nähwirkstelle - rein mechanische Kettbaumbremse

Kennzeichnend für die Nähwirkmaschine *Malimo 14022 P2-2S (E)* ist die Verwendung von Schiebernadeln mit einem zur Spitze ausgeformten hakenförmigen Kopfteil zum Durchdringen der vorgelegten Grundbahn und einem separat geführten Schließdraht. Sie werden als Durchstech-Schiebernadeln bezeichnet (siehe auch DIN 8640-4 [195]). In diese Nadeln legen

die Fadenführer, in diesem Fall auf zwei Legebarren angeordnete Lochnadeln, den Wirkfaden ein, der anschließend zur Maschenschleife umgeformt wird (zum Maschenbildungszyklus ausführlich PLOCH, 1978 [29]). Entscheidend für die Ausführung der Bindung, also die mustergemäße Anordnung und Ausführung der Maschen im Gewirk, ist die Bewegung der Legebarren zu den Nadeln.

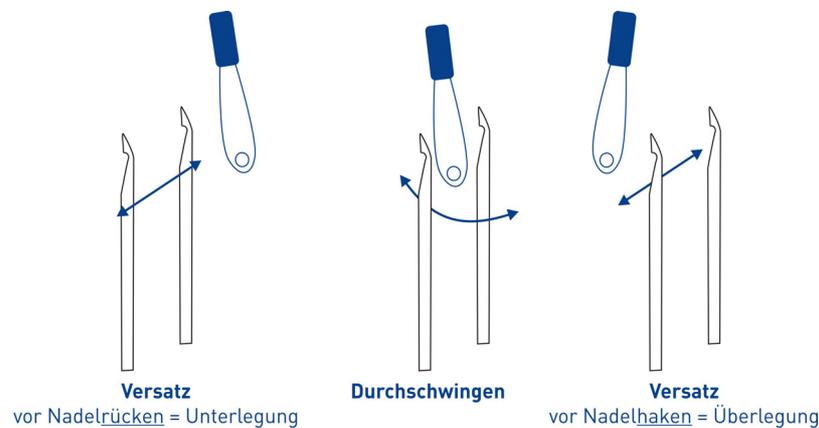


Bild 10: Bewegungen der Fadenführer beim Kettenwirken

Sie führen eine kombinierte Schwingbewegung aus, die in die Komponenten Durchschwingen und seitlicher Versatz geteilt werden kann (RENZ, 1980 [32], SPENCER, 2001 [34]). Beim Durchschwingen bewegen sich die Fadenführer durch die Lücken zwischen zwei Nadeln (Nadelgassen, siehe Bild 10). Die Versatzbewegung kann somit auf der Seite der Nadelhaken absolviert werden und wird dann Überlegung genannt oder auf der Seite des Nadelrückens, dann heißt sie Unterlegung.

Die Steuerung des Versatzes der Nadelbarren erfolgt über eine so genannte Mustereinrichtung, zum Beispiel Musterketten, Summengetriebe, Linearmotoren oder, wie im Fall der hier vorgestellten Maschine *Malimo 14022 P2-2S (E)*, Kurvenscheiben (Bild 11) [248].

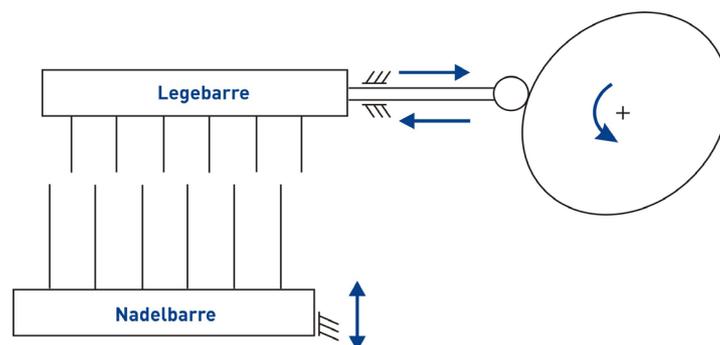


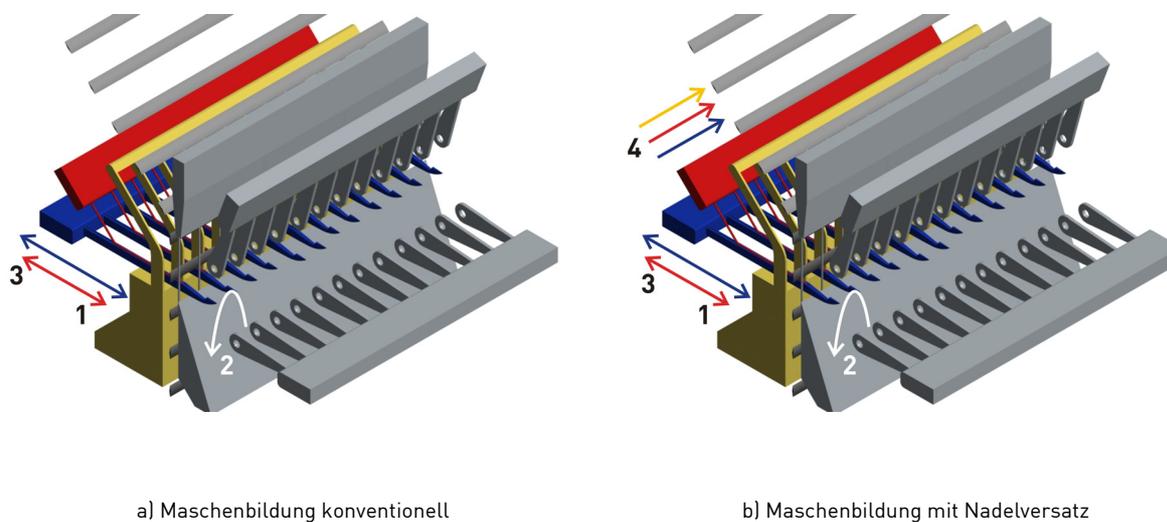
Bild 11: Steuerung der Versatzbewegung der Legebarre über Kurvenscheibe

Die Anzahl der Wirkelemente, insbesondere der Nadeln pro Längeneinheit, wird als Maschinenfeinheit bezeichnet. Bei bisherigen Nähwirkmaschinen der *Karl Mayer Malimo Textilmaschinenfabrik GmbH*, Chemnitz ist die Bezugsgröße 25 mm und wird mit „F“ gekennzeichnet. Eine Maschinenfeinheit von F 7 bedeutet also sieben Schiebernadeln, Schließdrähte, Lochnadeln usw. pro 25 mm Arbeitsbreite. Im Unterschied dazu wird die Maschinenfeinheit bei

allen Kettenwirkautomaten, Raschelmachines und aktuellen Nähwirkmaschinen auf 1 Zoll englisch (1'' = 25,4 mm) bezogen und mit „E“ bezeichnet.

3.2 Prototypmaschine für den erweiterten Wirkprozess

Beim erweiterten Wirkprozess wird der Arbeitszyklus um eine zusätzliche Bewegung der Schiebernadeln im rechten Winkel quer zu ihrer bisherigen Bewegung ergänzt (Nadelbarrenversatz oder kurz Nadelversatz). In konventionellen Kettenwirkmaschinen führen Schiebernadel und Schließdraht nur eine Vor- und Zurück-Bewegung senkrecht zur Grundbahn aus. Beim Nadelversatz wird nun zusätzlich eine Querbewegung des Schiebernadel-Schließdrahtsystems eingeführt (Bild 12), um den Wirkfaden auch auf der den Fadenführern abgewandten (rechten) Seite mustergemäß zu versetzen.



1- Vorwärtsbewegung von Schiebernadel und Schließdraht, 2 – Einlegen des Fadens, 3 – Rückwärtsbewegung von Schiebernadel und Schließdraht, 4 – Querversatz von Schiebernadel, Schließdraht und Abschlagplatte

Bild 12: Bewegung der Wirkelemente einer Nähwirkmaschine ohne und mit Nadelversatz

Das Ziel, einen seitlichen Versatz der Nadeln einzuführen, erfordert bei der vorhandenen Maschinenkonfiguration den Versatz der gesamten Nadeleinheit bestehend aus Abschlagbarre, Nadelbarre und Schließdrahtbarre um eine oder mehrere Nadelteilungen. Das heißt, dass der seitliche Versatz analog dem Versatz der Legebarren durchgeführt werden muss. Diese Bewegung wird im Prototyp über eine zusätzliche Kurvenscheibe, welche im vorhandenen Mustergetriebe integriert ist, auf die gesamte Barrenversatzeinheit übertragen. Dadurch ist sowohl ein absoluter Synchronlauf zum Legebarrenversatz gewährleistet als auch ein schneller Wechsel der Antriebsbewegung möglich. Alle bekannten Einstellmechanismen für Legebarren können ebenfalls für den Nadelversatz angewendet werden (FRIEDRICH, 2007 [96]).

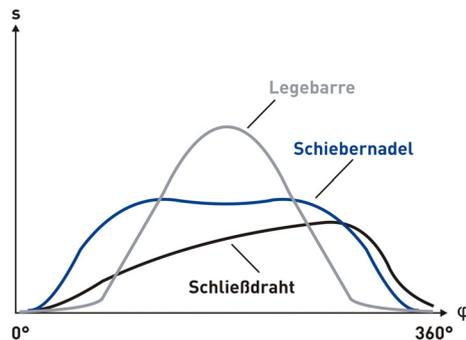


Bild 13: vereinfachtes schematisches Bewegungsdiagramm der Arbeitsorgane bei einer konventionellen Nähwirkmaschine

Der Arbeitszyklus der Nähwirkmaschine läuft einmal pro Hauptwellenumdrehung vollständig ab. Bild 13 zeigt eine schematische Darstellung des Bewegungsdiagramms für Schiebernadel, Schließdraht und Legebarre. Es ist erkennbar, dass für die Einfügung einer zusätzlichen Seitwärtsbewegung von Schiebernadel und Schließdraht beginnend während des Rücklaufs derselben nur ein begrenztes Zeitfenster zur Verfügung steht. Die Einführung des Nadelversatzes führt somit in der bestehenden Maschinenkonfiguration zu einer Reduktion der Arbeitsgeschwindigkeit der Prototyp-Nähwirkmaschine.

Die Mustereinrichtungen für den Versatz der Nadelbarre entsprechen beim Prototyp denen der Legebarren. Neben der Steuerung über eine Musterkurvenscheibe wie sie in Bild 14 dargestellt ist, kommen jedoch zum Beispiel auch Linearantriebe in Betracht. Für die nachfolgenden Betrachtungen zur Bindungskonstruktion wird von einer unbegrenzten Vielzahl an Musterungsmöglichkeiten ausgegangen, wie sie durch einen solchen Linearantrieb realisierbar ist [260]. Praktisch beschränkt sich die Anwendung von Bindungen in Nähwirkstoffen jedoch meist auf wenige Grundbindungen.

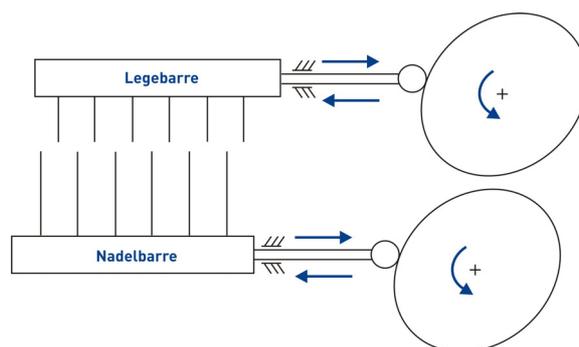


Bild 14: Steuerung der Versatzbewegung von Lege- und Nadelbarre über Kurvenscheiben

Zur Realisierung mittellagensymmetrischer Fadenlagen-Nähwirkstoffe der Form $[0/90/0]$ (siehe Kapitel 4.4.1) wurde der Prototyp weiterhin um eine zweite Kettfadenzuführung ergänzt. Ein echter symmetrischer Aufbau in der Form $[0/90/90/0]$ ist aufgrund des Schusseintragsystems der Prototypmaschine nicht realisierbar, für die angestrebten Untersuchungen jedoch auch nicht zwingend erforderlich. Die Zuführung der zweiten Kettfadeneinlage erfolgt von der dem Bediener abgewandten Seite unter dem Schusseintrags- und Schusstransportsystem hindurch (Bild 15).

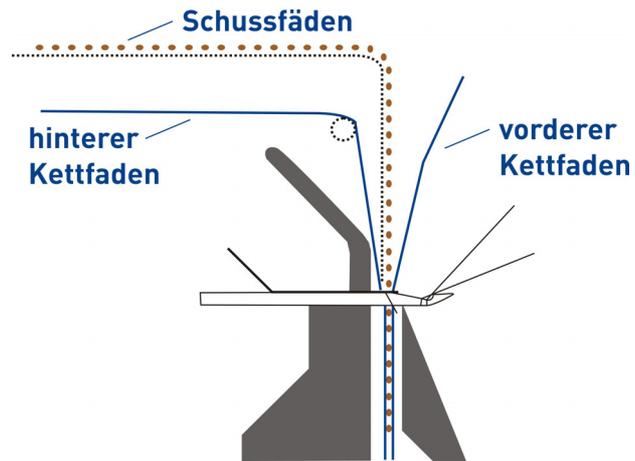


Bild 15: vereinfachte schematische Darstellung der Fadenzuführung an der Prototypmaschine

4 Bindungskonstruktion beim erweiterten Wirkprozess

4.1 Darstellung der Bindungen mit Nadelversatz

4.1.1 Absolute und relative Positionsnummern

Im Mittelpunkt dieses Kapitels stehen die Bindungen, die mit dem erweiterten Wirkprozess realisiert werden können, sowie deren grafische und numerische Beschreibung. Wie nachfolgend gezeigt wird, lassen sich die bisherigen Vorgehensweisen nicht ohne Einschränkung auf Bindungen nach dem erweiterten Wirkprozess übertragen. Durch die Einführung der Versatzbewegung der Nadeln ergeben sich neue Anforderungen an die Darstellung der Bindung. Der Versatz muss richtig und eindeutig aus der grafischen und numerischen Darstellung hervorgehen. Zudem soll die grafische Darstellung einen Rückschluss auf das Aussehen des Gewirkes erlauben. Alle Darstellungen und Angaben für Kettengewirke mit Nadelversatz orientieren sich an der üblichen Darstellung der Bindung von Kettengewirken.

Das *Maschenbild* bietet auch bei Kettengewirken mit Nadelversatz eine Zeichnung, die dem tatsächlichen Maschenverlauf nahe kommt. Gegenüber der bisherigen Darstellungsweise sind keine Änderungen notwendig.

Das *Legungsbild* beruht bisher auf der Darstellung der Fadenführerbewegung um die Nadeln, die eindeutig durch die Positionsnummern der Nadelgassen definiert ist. Diese eindeutige Lagedefinition geht mit der Einführung des Nadelversatzes verloren, da die Nadelgassen nicht mehr in ihrer Position fixiert sind. Deshalb wird eine Unterscheidung in *absolute* und *relative* Positionsnummern eingeführt. Die absoluten Positionsnummern sind definiert als die Position der Nadelgassen bei Nullstellung der Mustereinrichtungen von Legebarre und Nadelbarre (absolute Nullstellung). Die absolute Nullstellung ist bei Anordnung des Getriebes auf der rechten Seite die äußerst rechte Stellung von Legebarre und Nadelbarre, bei linker Anordnung entsprechend umgekehrt. Der am weitesten rechts befindliche Fadenführer liegt in der Nadelgasse „0“ und damit rechts der äußerst rechten Nadel. Diese absoluten Positionsnummern bilden den Bezug für die Steuerung der Legebarrenbewegung, da sie der bisherigen Nadelgassennummerierung entsprechen und unveränderlich sind. Aus dieser Unveränderlichkeit ergibt sich, dass die absoluten Positionsnummern bei Versatz der Schiebernadeln nicht mehr mit der tatsächlichen Lage der Nadelgassen übereinstimmen, sie sind dann virtuell. Die tatsächliche Lage der Nadelgassen wird durch die relativen Positionsnummern gekennzeichnet. Sie sind jeweils einer Nadelgasse fest zugeordnet und mit diesen in ihrer Position veränderlich (Bild 16).

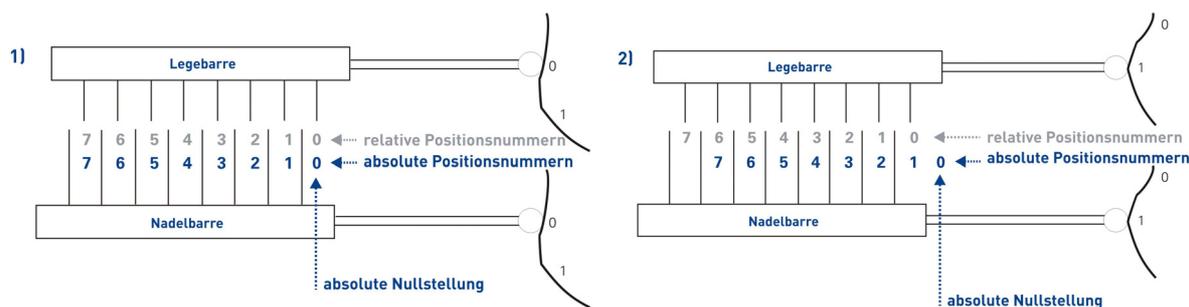


Bild 16: Definition: absolute und relative Positionsnummern

4.1.2 Erweiterter Legungsplan

Die numerische Beschreibung der Legebarrenbewegung bezieht sich somit immer auf die absoluten Positionsnummern. Diese dienen ebenfalls zur Beschreibung der Versatzbewegung der Nadelbarre. Dazu wird eine weitere Angabe im *Legungsplan* eingeführt (Bild 17). Der Legungsplan für die Nadelbarre wird mit NB gekennzeichnet (von engl. *needle bar*, in Anlehnung an die Legebarrenbezeichnung). Jeder Wirkzyklus wird mit zwei Ziffern gekennzeichnet. Die erste steht für die Position der Nadelbarre vor dem Einschwingen, die zweite für die Position der Nadelbarre nach dem Ausschwingen der Fadenführer. Die Position zwei des vorhergehenden Wirkzyklus ist immer identisch mit der Position eins des nachfolgenden Wirkzyklus. Die Angabe der ersten Nummer ist nötig, da ein Rapport der Nadelbarrenbewegung auch in einer anderen Position als der absoluten Nullstellung beginnen kann. Dies ist immer dann der Fall, wenn der erste Versatzschritt im Rapport in Richtung der absoluten Nullstellung erfolgt. Wie beim Legungsplan der Legebarren steht ein Trennstrich für das Ende eines Wirkzyklus, zwei Trennstriche für das Ende des Rapports. Die letzte Ziffer im Rapport entspricht immer der ersten Ziffer im Rapport, da die Legebarre nach dem letzten Versatzschritt wieder mit dem ersten beginnt. Die Länge des Rapports der Nadelbarre kann von dem der Legebarren abweichen.

GB1	GB2	NB
1	1	0
0	2	1
<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
<u>2</u>	<u>0</u>	<u>0</u>

GB1	1 - 0 / 1 - 2 //
GB2	1 - 2 / 1 - 0 //
NB	0 - 1 / 1 - 0 //

vor Einschwingen
nach Ausschwingen

Bild 17: Legungsplan (RL-Doppel-Trikot, gegenlegig) mit Angabe des Nadelbarrenversatzes

Sind die Rapportlängen von Legebarre und Nadelbarre voneinander verschieden, so beträgt der Rapport der resultierenden Bindung das kleinste gemeinsame Vielfache der zu Grunde liegenden Basisrapporte. Am Beispiel der Bindung RL-Franse, offen (1 - 0 / 0 - 1 //) und dem Nadelversatz (1 - 2 / 2 - 0 / 0 - 1 //) bedeutet dies, dass die resultierende Bindung einen

Rapport von $2 \times 3 = 6$ aufweist (mehr zu diesem Beispiel in Kapitel 10). Die Überlegungen und Versatzbewegungen sind bis zum Erreichen des resultierenden Rapports fortlaufend zu wiederholen.

4.1.3 Erweitertes Legungsbild

Die einfachste Form des Legungsbildes für Kettengewirke mit Nadelversatz entspricht dem für Kettengewirke ohne Nadelversatz, ergänzt um zwei Merkmale (Bild 18). Zum einen wird ein Pfeil eingeführt, der Weite und Richtung des Versatzes angibt. Dazu wird eine beliebige Nadel in der ersten Punktzeile der Bindung als Bezugsnadel definiert. Diese Bezugsnadel soll so gewählt werden, dass der Pfeil weder in dieser noch in einer der folgenden Reihen in das Legungsbild hineinragt. Es ist in jeder Reihe die gleiche Nadel als Bezugsnadel beizubehalten. Die Pfeilspitze gibt die Richtung, die Pfeillänge die Weite des Versatzes an, der nach der Lochnadelbewegung erfolgt. Der Pfeil entspricht somit der zweiten Nummer im Legungsplan. Zum anderen ist zu beachten, dass die Positionsnummern unter dem Legungsbild die absoluten Positionsnummern sind. Daraus ergeben sich folgende Konsequenzen: Die Positionsnummern entsprechen den Nummern im Legungsplan, das heißt, die Richtung der Überlegungen wird wie bisher gezeichnet und entspricht der tatsächlichen Bewegung der Legebarre (Bild 18). Damit ist eine einfache und korrekte Beschreibung der Bewegungen von Nadel- und Legebarre möglich. Die jeweilige aktuelle Position der Nadelbarre ist jedoch nicht sofort erkennbar. Der tatsächliche Fadenverlauf in einem klassischen Gewirk wird durch die Legebarrenbewegung nicht mehr abgebildet und ist nicht erkennbar. In Nähwirkstoffen jedoch entspricht die Legebarrenbewegung dem tatsächlichen Bindungsverlauf, da der Wirkfaden durch die Grundbahn fixiert wird. Für die Abbildung von Bindungen in Nähwirkstoffen wird das einfache Legungsbild um den Verlauf der Nadelbarrenbewegung ergänzt. Diese wird durch eine gestrichelte Linie dargestellt. Damit ergibt sich auch der Bindungsverlauf auf der rechten Seite des Nähwirkstoffs.

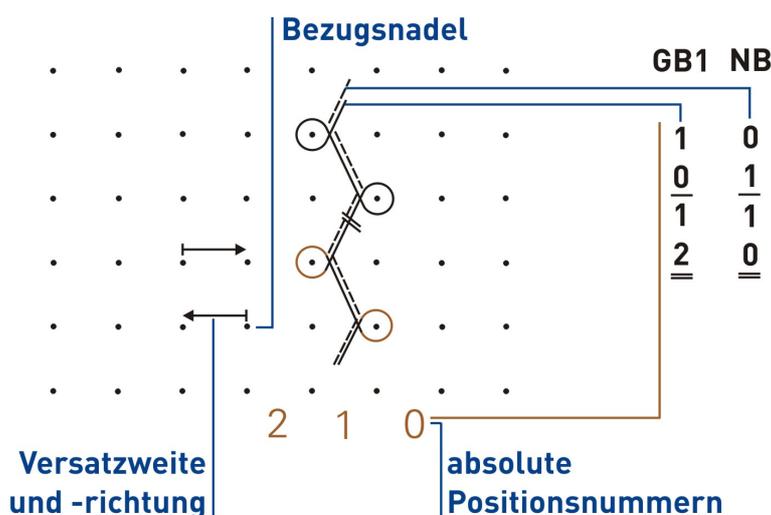


Bild 18: einfaches Legungsbild mit Nadelversatz (RL-Trikot, geschlossen)

Soll die tatsächliche Position der Nadelbarre zum Zeitpunkt der Maschenbildung erkennbar sein, müssen in jeder Punktreihe die relativen Positionsnummern angegeben werden. Die

Darstellung erfolgt wie in Bild 19 (Legungsbild mit relativen Positionsnummern, kurz *rP*) beispielhaft illustriert. Unterhalb des Legungsbildes werden die absoluten Positionsnummern, hervorgehoben durch die Schriftgröße, angeführt. Es ist zu beachten, dass auch bei dieser Variante des Legungsbildes die Überlegungen gemäß Legungsplan anhand der absoluten Positionsnummern gezeichnet werden. Die relativen Positionsnummern dienen nur der Verdeutlichung der Nadelbarrenposition. Sie werden beginnend unterhalb der Punktreihe der ersten Masche eingetragen und in jeder darauf folgenden Punktreihe entsprechend des Versatzes verschoben. Dieser Versatz wird durch die Versatzpfeile in der vorhergehenden Reihe gekennzeichnet. Um die relative Position der Nadelgassen bezogen auf den absoluten Nullpunkt gut erkennbar zu kennzeichnen, wird zusätzlich eine Indexzahl eingeführt. Mit ihr wird die Nadelgasse „0“ in jeder Reihe markiert und so die Anzahl der Nadelgassen angezeigt, um die die Legebarre verschoben ist. Die relativen Positionsnummern zeigen immer die Position der zugeordneten Nadelreihe vor dem Einschwingen der Lochnadeln und damit vor dem Versatz, der am Ende dieses Wirkzyklus erfolgt.

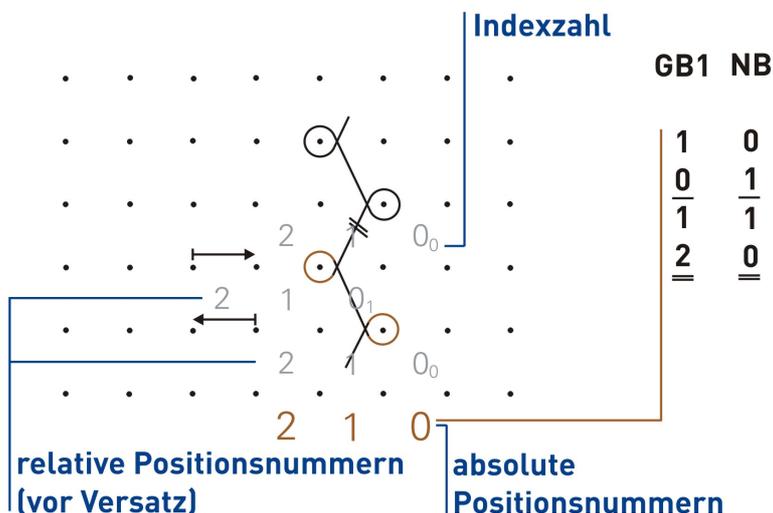


Bild 19: Legungsbild mit relativen Positionsnummern (RL-Trikot, geschlossen)

Durch die eindeutige Positionsbestimmung der Nadelbarre relativ zur absoluten Nullstellung, die ja die Bezugsgröße der Legebarrenbewegung darstellt, ist in diesem erweiterten Legungsbild auch erkennbar, dass bei Versatz der Nadelbarre von „0“ auf „1“ und einer Überlegung der Lochnadeln zum Beispiel von „1“ nach „0“ (absolut) die äußerst rechte Lochnadel ins Leere legt, da die erste Schiebernadel um eine Teilung versetzt wurde. Die Anzahl der Nadeln, die dadurch betroffen sind, ist aus dem Legungsbild erkennbar. Weiterhin wird mit Einführung der relativen Positionsnummern deutlich, dass die in Bild 19 dargestellte Trikotbindung in Verbindung mit dem gezeigten Versatz einer herkömmlichen Trikotbindung nicht entsprechen kann, da jeder Fadenführer seinen Faden immer auf dieselbe Nadel legt. Daraus ergibt sich, dass auch diese Darstellungsweise die tatsächliche Beschaffenheit des Gewirkes nicht abbildet.

Um eine annähernde Darstellung des Gewirkes zu erreichen, werden die Nadeln so abgebildet, als wären sie zum Zeitpunkt der Maschenbildung schon wieder in der absoluten Null-

stellung (Legungsbild mit auf den Nullpunkt verschobenen relativen Positionsnummern). Um eine korrekte Zeichnung der Überlegungen zu gewährleisten, wird jedoch jede Nadelgasse mit der relativen Positionsnummer gekennzeichnet, die sie in diesem Moment tatsächlich innehat (Bild 20). Das heißt, die Nadelgassennummerierung in jeder Zeile entspricht der tatsächlichen momentanen Nadelposition, ihre Stellung hingegen der Position der Nadel in absoluter Nullstellung. Die Nummern des Legungsplanes beziehen sich bei diesem Legungsbild immer auf die relativen Positionsnummern in der jeweiligen Zeile und nicht mehr auf die absoluten Positionsnummern. Da die relativen Positionsnummern nicht mehr verschoben dargestellt sind, werden sie folgendermaßen ermittelt: Sie berechnen sich durch Addition (Versatzpfeil zeigt nach links) oder Subtraktion (Versatzpfeil zeigt nach rechts) der Positionsnummer der vorhergehenden Zeile mit der Versatzweite (Länge des Versatzpfeils). Die relativen Positionsnummern beginnen immer bei „0“. Es ist jedoch zu beachten, dass alle relativen Positionsnummern, die sich rechts der absoluten Nullstellung befinden, nur virtuell sind. Hier befinden sich zum Zeitpunkt der Maschenbildung keine Nadeln (vergleiche auch Bild 19).

Das Legungsbild mit verschobenen relativen Positionsnummern (kurz *vrP*) ermöglicht eine näherungsweise Darstellung des Fadenlaufs im Gewirke, die tatsächliche Bewegung der Fadenführer ist jedoch nicht erkennbar.

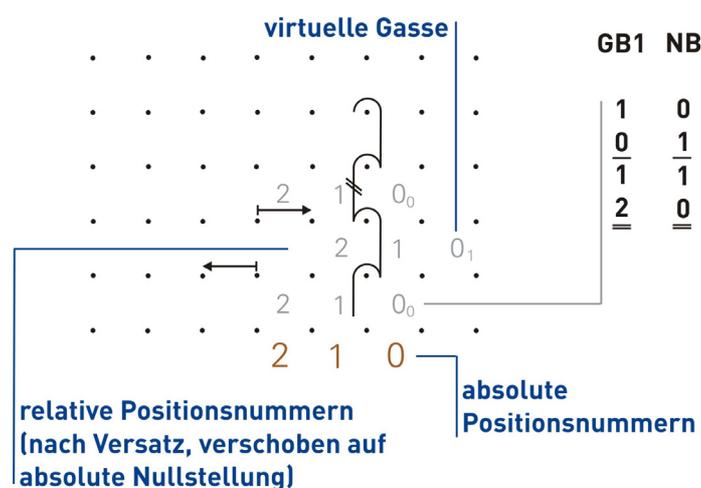


Bild 20: Legungsbild mit verschobenen relativen Positionsnummern (RL-Trikot, geschlossen entspricht RL-Franse, offen)

Für die Darstellung von Kettenwirkbindungen mit Nadelversatz stehen somit drei Varianten des Legungsbildes zur Verfügung:

- Das einfache Legungsbild zur bloßen Angabe von Versatzrichtung und -weite sowie der Legebarrenbewegung, abgeleitet aus dem einfachen Legungsplan, ist ausreichend zur Einrichtung der Mustersteuerung.
- Das Legungsbild mit relativen Positionsnummern (*rP*), abgeleitet aus dem einfachen Legungsplan, bietet zusätzlich die Angabe der korrekten Nadelbarrenposition.

- Das Legungsbild mit verschobenen relativen Positionsnummern (vrP), abgeleitet aus dem erweiterten Legungsplan, ermöglicht die korrekte Darstellung des Fadenlaufs.

Diese Varianten können einzeln oder kombiniert verwendet werden. Für die Steuerung der Maschine ist immer der Legungsplan maßgeblich. Im Folgenden wird in dieser Arbeit ausschließlich das Legungsbild mit verschobenen relativen Positionsnummern benutzt.

4.2 Äquivalenzbindungen

Grundsätzlich lassen sich für alle RL-Bindungen mit Nadelversatz Analogien zu RL-Bindungen ohne Nadelversatz finden. Das heißt zu jeder Bindung mit Nadelversatz existiert eine Äquivalenzbindung, die ohne den Einsatz von Nadelversatz eine ähnliche Struktur aufweist, insbesondere bezogen auf die Versatzweite, die ein von einer Legebarre geführter Faden im Textil aufweist.

Die Äquivalenzbindung ist aus dem Legungsplan für Legebarre und Nadelbarre nicht ohne weiteres ablesbar. Sie ist aber aus dem Legungsbild mit verschobenen relativen Positionsnummern erkennbar. Der Legungsplan der Äquivalenzbindung berechnet sich aus dem Legungsplan für die Nadelversatzbindung wie folgt:

$$\begin{pmatrix} a_{GB} \\ b_{GB} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} G_{\max} \\ G_{\max} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a_{NB} \\ a_{NB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a'_{GB} \\ b'_{GB} \end{pmatrix}.$$

Gleichung 1

Dabei bedeuten

a_{GB} Beginn Überlegung Legebarre,

b_{GB} Ende Überlegung Legebarre,

a'_{GB} Beginn Überlegung Legebarre (Äquivalenzbindung),

b'_{GB} Ende Überlegung Legebarre (Äquivalenzbindung),

a_{NB} Stellung der Nadelbarre zum Zeitpunkt der Überlegung,

G_{\max} maximal beanspruchte Anzahl virtueller Gassen.

Der Wert G_{\max} für die maximal von der Bindung beanspruchte Anzahl an virtuellen Gassen berechnet sich durch Subtraktion aus dem maximalen Versatzwert der Nadelbarre V_{\max} im gesamten Rapport und dem kleineren Wert der entsprechenden Überlegung der Legebarre. V_{\max} ist immer die erste Zahl in der Matrix des Nadelbarrenversatzes. Tritt der Wert V_{\max} mehrmals im Rapport auf, so ist G_{\max} die größte Differenz der aus allen V_{\max} berechneten Werte für G . Der Wert für G_{\max} kann nie kleiner Null sein. Ist der kleinere Wert der entsprechenden Überlegung also größer als V_{\max} , so beträgt G_{\max} Null.

Diese Rechnung muss für jede Überlegung des Rapports ausgeführt werden. Ist der Rapport der Nadelbarre länger als der der Legebarre, so wird mit dem Rapport der Legebarre wieder von neuem begonnen bis der Nadelbarrenrapport aufgefüllt ist und umgekehrt. Diese Be-

rechnung soll hier kurz am Beispiel der Bindung RL-Trikot, geschlossen aus Bild 18 bis Bild 20 erläutert werden:

Der Legungsplan der Legebarre lautet: $1 - 0 / 1 - 2 //$.

Der Legungsplan der Nadelbarre lautet: $0 - 1 / 1 - 0 //$.

Die Äquivalenzbindung berechnet sich zu:

$$\begin{pmatrix} a'_{GB} \\ b'_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c'_{GB} \\ d'_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Gleichung 2

Dabei gilt:

$$\begin{pmatrix} a_{GB} \\ b_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c_{GB} \\ d_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$a_{NB} = 0$$

$$c_{NB} = 1$$

Der maximale Versatzwert der Nadelbarre wird in der zweiten Reihe erreicht und beträgt $V_{\max}=1$. Die entsprechende Überlegung beträgt $1 - 2$, der kleinere Wert der Überlegung demzufolge $c_{GB}=1$. Die beanspruchte Zahl virtueller Gassen G_{\max} beträgt somit:

$$G_{\max} = V_{\max} - c_{GB} = 1 - 1 = 0$$

Gleichung 3

Die Äquivalenzbindung zu der Bindung RL-Trikot, geschlossen mit dem Nadelversatz $0 - 1 / 1 - 0 //$ ist damit die Bindung RL-Franse, offen. Weitere Berechnungsbeispiele zur Bestimmung der Äquivalenzbindung finden sich im Kapitel 10.1.

4.3 Grundbindungen in Kombination mit Nadelversatz

4.3.1 Einteilung und Merkmale

Alle Grundbindungen können mit dem Nadelversatz kombiniert werden. Die möglichen Versatzbewegungen der Nadelbarre können, bezogen auf die typischen Anwendungsfälle, folgendermaßen eingeteilt werden:

- Es erfolgt kein Versatz. Das heißt, die entstehende Bindung entspricht der konventionellen RL-Grundbindung (*Nullversatz*).
- Der Versatz erfolgt regelmäßig in jeder Reihe, wobei
 - o die Versatzrichtung in jeder Reihe wechselt und die Versatzweite immer gleich ist (*Basisversatz*),
 - o die Versatzrichtung in jeder Reihe wechselt und die Versatzweite unregelmäßig ist (*unregelmäßiger Basisversatz*),
 - o die Versatzrichtung immer nach n Reihen wechselt und die Versatzweite immer gleich ist, wobei $n \neq 1$ (*Diagonalversatz*),
 - o die Versatzrichtung immer nach n Reihen wechselt und die Versatzweite unregelmäßig ist, wobei $n \neq 1$ (*unregelmäßiger Diagonalversatz*).
- Alle anderen Versatzvarianten werden als *Irregulärversatz* zusammengefasst und umfassen Bewegungen wie zum Beispiel:
 - o den Versatz mehrfach in die gleiche Richtung mit Wechsel nach unregelmäßiger Reihenanzahl oder
 - o den unregelmäßigen Versatz mit ungleichmäßiger Versatzweite.

Dabei ist weiterhin zu unterscheiden, in welcher Richtung die Nadelbarre, bezogen auf die Legebarre(n), bewegt wird (Richtungsverhältnis):

- Gleichgerichtet – der Versatz der Nadelbarre erfolgt in der gleichen Richtung wie die Unterlegung der Legebarre.
- Entgegengerichtet – der Versatz der Nadelbarre erfolgt entgegengesetzt der Richtung der Unterlegung der Legebarre.

Sind sowohl die Legebarrenunterlegungen als auch der Nadelversatz regelmäßig in jeder Reihe wechselnd oder sonst regelmäßig zueinander, so gilt die Festlegung des Richtungsverhältnisses für den gesamten Rapport. Das Richtungsverhältnis des Nadelbarrenversatzes wird dann immer bezogen auf die Legebarre 1 (GB 1). Bei mehreren Legebarren ergibt sich daraus eindeutig das Richtungsverhältnis bezogen auf die anderen Legebarren. Bewegt sich also zum Beispiel bei einer Bindung RL-Doppel-Trikot, gegenlegig, die Nadelbarre gleichgerichtet mit GB 1, ist die Bewegung bezogen auf GB 2 entgegengerichtet. Sind jedoch die Legebarrenüberlegungen und der Nadelversatz in ihrem Richtungsverhältnis nicht regelmä-

ßig, so können die Bezeichnungen gleichgerichtet und entgegengerichtet nur für jede Reihe einzeln bestimmt werden und gelten nicht für den gesamten Rapport. In diesem Fall beziehen sich Angaben des Richtungsverhältnisses, wenn nicht anders angegeben, immer auf die erste Unterlegung im Rapport.

Ein weiteres Merkmal des Nadelversatzes ist die Versatzweite in jeder Reihe. Hier wird maximal eine Versatzweite von vier betrachtet. Die Versatzweite wird bei der Beschreibung von Bindungen mit Basisversatz als Ziffer angefügt (zum Beispiel *Basisversatz 2*). Bei Bindungen mit Diagonalversatz erfolgt die Angabe der Versatzweite nach der Angabe der Reihen n , nach denen ein Richtungswechsel erfolgt (zum Beispiel *Diagonalversatz 4-2*, Richtungswechsel nach vier Reihen, in jeder Reihe eine Versatzweite von zwei).

In Tabelle 3 sind die genannten Merkmale zusammengefasst, nach denen RL-Grundbindungen und Versatzbewegungen der Nadelbarre miteinander kombiniert werden können.

Aus diesen Merkmalen lassen sich die wesentlichen Bindungskombinationen für den Nadelversatz ableiten (Tabelle 4). Die folgenden Untersuchungen beschränken sich dabei im Wesentlichen auf Bindungen, bei denen die Bewegung von Lege- und Nadelbarre auf einem regelmäßigen Schema beruht, insbesondere also diejenigen, welche die Merkmale 1.2.1.1, 1.2.2.1 sowie 2.1, 2.2. oder 2.3 auf sich vereinigen. Diese Bindungen werden im Folgenden näher beschrieben. Für Bindungen mit anderen Merkmalskombinationen nach Tabelle 3 werden nur ausgewählte Beispiele angeführt, da der Umfang an Möglichkeiten hier nahezu unbegrenzt ist.

Tabelle 3: Merkmale zur Kombination von RL-Grundbindungen mit Nadelversatz

Ord nende Gesichtspunkte (OG)	Unterscheidende Merkmale (UM)
1 Versatz der Nadelbarre	1.1 ohne Versatz 1.2 Versatz in jeder Reihe 1.2.1 Richtungswechsel in jeder Reihe 1.2.1.1 mit regelmäßiger Versatzweite (Basisversatz) 1.2.1.1.1 gleichgerichtet 1.2.1.1.2 entgegengerichtet 1.2.1.2 mit unregelmäßiger Versatzweite (unregelmäßiger Basisversatz) 1.2.1.2.1 gleichgerichtet 1.2.1.2.2 entgegengerichtet 1.2.2 Richtungswechsel regelmäßig nach n Reihen 1.2.2.1 mit regelmäßiger Versatzweite (Diagonalversatz) 1.2.2.1.1 gleichgerichtet 1.2.2.1.2 entgegengerichtet 1.2.2.2 mit unregelmäßiger Versatzweite (unregelmäßiger Diagonalversatz) 1.2.2.2.1 gleichgerichtet 1.2.2.2.2 entgegengerichtet 1.3 unregelmäßiger Versatz (Irregulärversatz)
2 Bewegung der Legebarre	2.1 ohne Versatz (Franse) 2.1.2 offen 2.1.3 geschlossen 2.2 regelmäßiger Richtungswechsel 2.2.2 Versatz 1 (Trikot) 2.2.2.1 offen 2.2.2.2 geschlossen 2.2.3 Versatz 2 (Tuch) 2.2.3.1 offen 2.2.3.2 geschlossen 2.2.4 Versatz 3 (Satin) 2.2.4.1 offen 2.2.4.2 geschlossen 2.2.5 Versatz 4 (Samt) 2.2.5.1 offen 2.2.5.2 geschlossen 2.3 Versatz in gleiche Richtung (Atlas, n-reihig) 2.3.2 offen 2.3.2.1 einfach 2.3.2.2 hinterlegt 2.3.3 geschlossen 2.3.3.1 einfach 2.3.3.2 hinterlegt

Tabelle 4: Äquivalenzbindungen für RL-Grundbindungen mit Nadelversatz

			1 Versatz der Nadelbarre										
			1.1 Nullversatz	1.2 Versatz in jeder Reihe									
				1.2.1.1 Basisversatz, gleichgerichtet					1.2.1.2 Basisversatz, entgegengerichtet				
				um 1	um 2	um 3	um 4	um 1	um 2	um 3	um 4		
2 Versatz der Legebarre	2.1 ohne Versatz (Franse)	2.1.1 offen	Franse, offen	Trikot, geschl.	Tuch, geschl.	Satin, geschl.	Samt, geschl.	Trikot, offen	Tuch, offen	Satin, offen	Samt, offen		
			2.1.2 geschlossen	Franse, geschl.	0 - 1 / 1 - 2 //	0 - 1 / 2 - 3 //	0 - 1 / 3 - 4 //	0 - 1 / 4 - 5 //	1 - 2 / 0 - 1 //	2 - 3 / 0 - 1 //	3 - 4 / 0 - 1 //	4 - 5 / 0 - 1 //	
		2.2.1 Versatz 1 (Trikot)	2.2.1.1 offen	Trikot, offen	Franse, offen	Trikot, geschl.	Tuch, geschl.	Satin, geschl.	Tuch, offen	Satin, offen	Samt, offen	0 - 1 / 6 - 5 //	
			2.2.1.2 geschlossen	Trikot, geschl.	Franse, offen	Trikot, offen	Tuch, offen	Satin, offen	Tuch, geschl.	Satin, geschl.	Samt, geschl.	1 - 0 / 5 - 6 //	
	2.2.2 Versatz 2 (Tuch)	2.2.2.1 offen	Tuch, offen	Trikot, offen	Franse, offen	Trikot, geschl.	Tuch, geschl.	Satin, offen	Samt, offen	0 - 1 / 6 - 5 //	0 - 1 / 7 - 6 //		
		2.2.2.2 geschlossen	Tuch, geschl.	Trikot, geschl.	Franse, offen	Trikot, offen	Tuch, offen	Satin, geschl.	Samt, geschl.	1 - 0 / 5 - 6 //	1 - 0 / 6 - 7 //		
	2.2.3 Versatz 3 (Satin)	2.2.3.1 offen	Satin, offen	Tuch, offen	Trikot, offen	Franse, offen	Trikot, geschl.	Samt, offen	0 - 1 / 6 - 5 //	0 - 1 / 7 - 6 //	0 - 1 / 8 - 7 //		
		2.2.3.2 geschlossen	Satin, geschl.	Tuch, geschl.	Trikot, geschl.	Franse, offen	Trikot, offen	Samt, geschl.	1 - 0 / 5 - 6 //	1 - 0 / 6 - 7 //	1 - 0 / 7 - 8 //		
	2.2.4 Versatz 4 (Samt)	2.2.4.1 offen	Samt, offen	Satin, offen	Tuch, offen	Trikot, offen	Franse, offen	0 - 1 / 6 - 5 //	0 - 1 / 7 - 6 //	0 - 1 / 8 - 7 //	0 - 1 / 9 - 8 //		
		2.2.4.2 geschlossen	Samt, geschl.	Satin, geschl.	Tuch, geschl.	Trikot, geschl.	Franse, offen	1 - 0 / 5 - 6 //	1 - 0 / 6 - 7 //	1 - 0 / 7 - 8 //	1 - 0 / 8 - 9 //		

4.3.2 Grundbindungen ohne Legebarrenversatz (Franse)

Durch die Kombination von RL-Fransenbindung und Nadelversatz entsteht immer eine textile Fläche. Tabelle 4 gibt einen Überblick über alle Kombinationen von RL-Franse mit einem Basisversatz um bis zu vier Nadeln.

Die Kombination von RL-Franse, offen mit Basisversatz ergibt Äquivalenzbindungen zu den RL-Grundbindungen Trikot bis Samt. Erfolgt der Nadelversatz gleichgerichtet (mangels Unterlegungen bezogen auf die Überlegungen) entstehen geschlossene, bei entgegengerichtetem Versatz offene Maschen. Die Bindungen mit gleichgerichtetem Nadelversatz sind spiegelbildlich zu denen mit entgegengerichtetem Versatz (siehe Beispiele in Bild 21³, Bild 22 und Bild 23).

Aus RL-Franse, geschlossen und Basisversatz entstehen Äquivalenzbindungen zu abgeleiteten Grundbindungen aus Trikot, Tuch, Satin und Samt, bei denen jeweils eine Masche offen und eine Masche geschlossen ist, da das Richtungsverhältnis in jeder Reihe wechselt (Bild 24). Bei Umkehr der Versatzrichtung entsteht eine spiegelbildliche Bindung, bei der die Abfolge offener und geschlossener Maschen um eine Reihe verschoben ist (Bild 25).



Bild 21: Legungsbild *vrP*(links) und Vergleich mit Äquivalenzbindung (rechts): RL-Franse, offen mit gleichgerichtetem Basisversatz 1

³ Hinweis: Dieses und alle weiteren Muster in diesem Kapitel wurden auf dem Technologie-Demonstrator (siehe Kapitel 3) hergestellt.

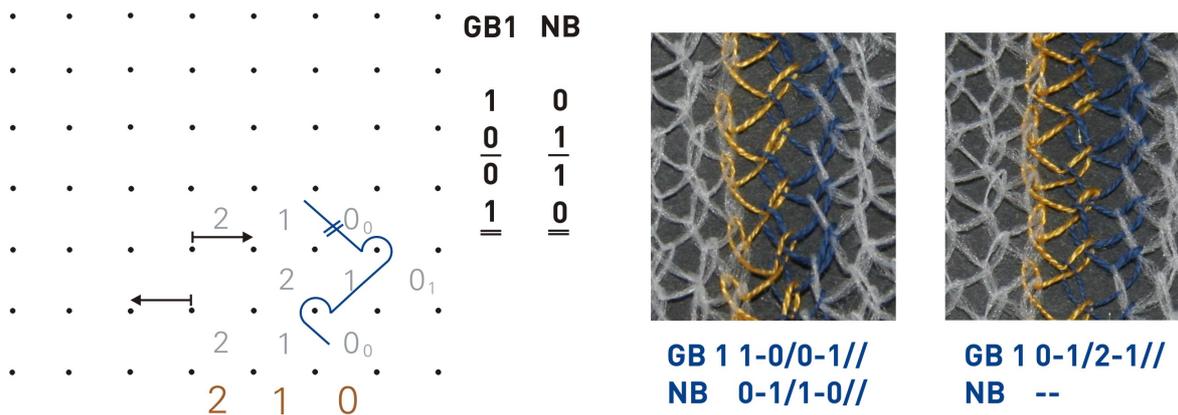


Bild 22: Legungsbild $vrP(links)$ und Vergleich mit Äquivalenzbindung (rechts): RL-Franse, offen mit entgegengerichtetem Basisversatz 1

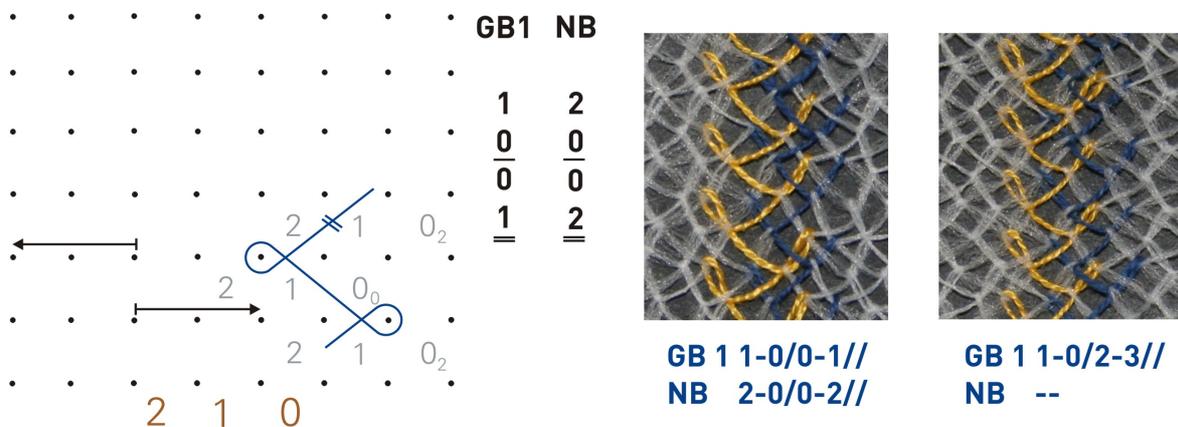


Bild 23: Legungsbild $vrP(links)$ und Vergleich mit Äquivalenzbindung (rechts): RL-Franse, offen mit gleichgerichtetem Basisversatz 2

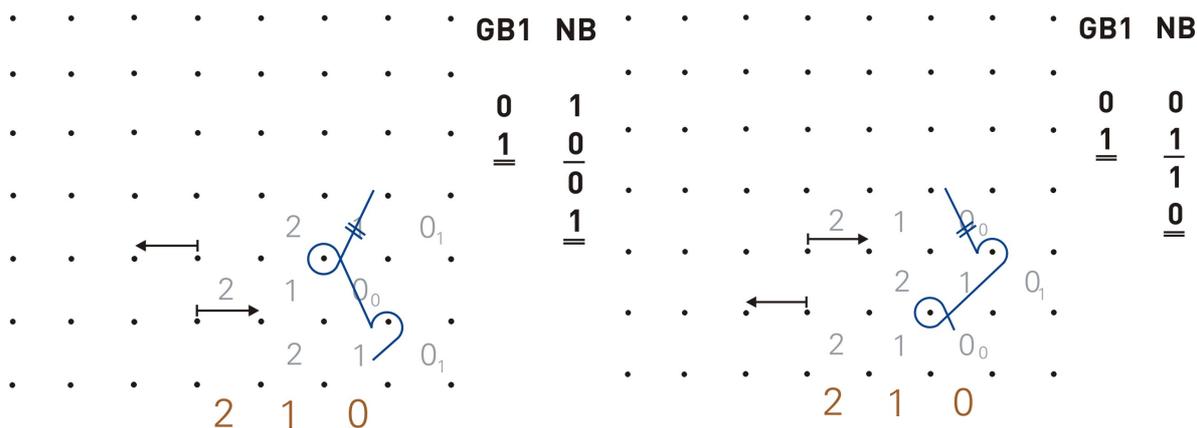
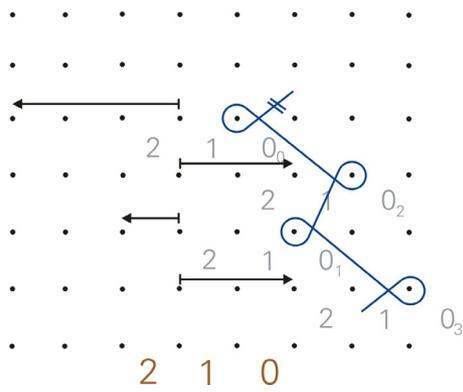


Bild 24: Legungsbild vrP : RL-Franse, geschlossen mit gleichgerichtetem Basisversatz 1

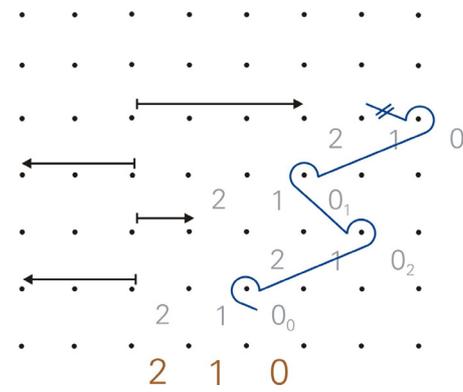
Bild 25: Legungsbild vrP : RL-Franse, geschlossen mit entgegengerichtetem Basisversatz 1

Aus der Kombination von RL-Franse, offen und unregelmäßigem Basisversatz entstehen abgeleitete Grundbindungen, die sich auf die Bindungen Trikot, Tuch, Satin und Samt zurückführen lassen. Prinzipiell gilt auch hier, dass sich Bindungen mit gleichgerichtetem und

entgegengerichtetem Versatz spiegelbildlich zueinander verhalten. Bei gleichgerichtetem Versatz entstehen geschlossene Maschen, bei entgegengerichtetem Versatz offene Maschen (Bild 26 und Bild 27).



GB1	NB
1	3
0	1
0	1
1	2
	2
	0
	0
	3

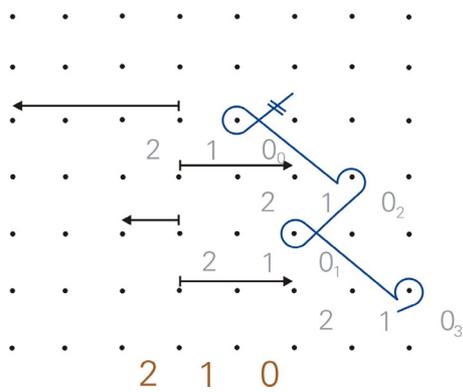


GB1	NB
1	0
0	2
0	2
1	1
	1
	3
	3
	0

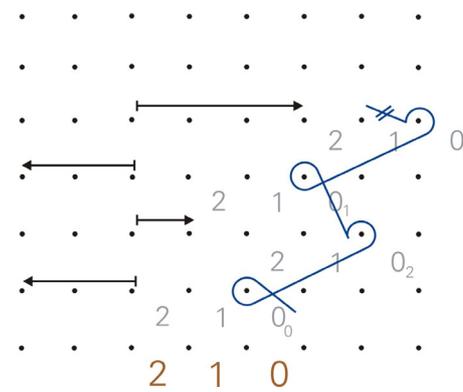
Bild 26: Legungsbild vrP : RL-Franse, offen mit unregelmäßigem Basisversatz, gleichgerichtet

Bild 27: Legungsbild vrP : RL-Franse, offen mit unregelmäßigem Basisversatz, entgegengerichtet

Demgegenüber wechseln sich bei RL-Franse, geschlossen und unregelmäßigem Basisversatz offene und geschlossene Maschen ab. Auch hier entsteht bei Umkehr der Versatzrichtung ein Spiegelbild der Bindung mit um eine Reihe versetzter Anordnung der offenen und geschlossenen Maschen (Bild 28 und Bild 29).



GB1	NB
0	3
1	1
	1
	2
	2
	0
	0
	3



GB1	NB
0	0
1	2
	2
	1
	1
	3
	3
	0

Bild 28: Legungsbild vrP : RL-Franse, geschlossen mit unregelmäßigem Basisversatz, gleichgerichtet

Bild 29: Legungsbild vrP : RL-Franse, geschlossen mit unregelmäßigem Basisversatz, entgegengerichtet

In Kombination mit Diagonalversatz führt die Fransenbindung zu abgewandelten Atlasbindungen. Beispiele dafür finden sich im Anhang 2.

Bei Irregulärversatz entstehen abgeleitete Grundbindungen aus Franse und Trikot bis Samt. Bindungen mit offener und geschlossener Franse und Nadelversatz unterscheiden sich, resultierend aus den unterschiedlichen Richtungsverhältnissen, nur in der Abfolge offener und geschlossener Maschen (Bild 30 und Bild 31).

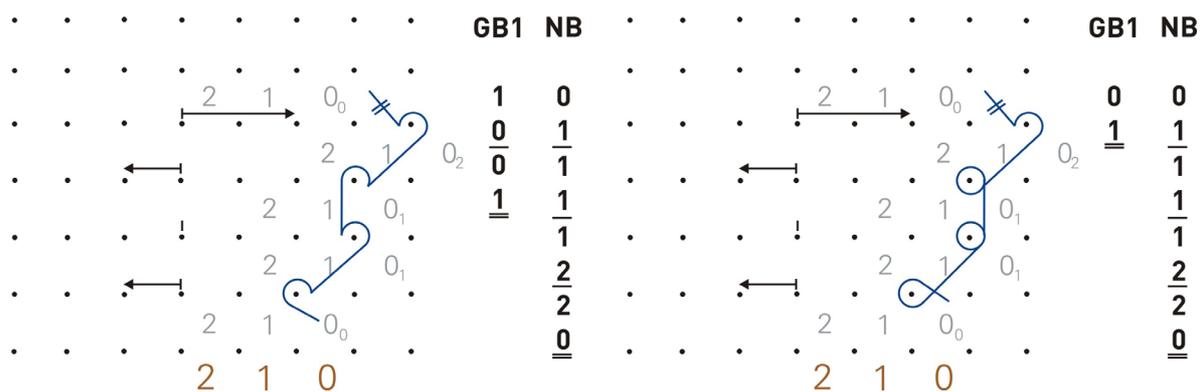


Bild 30: Legungsbild vrP : RL-Franse, offen mit Irregulärversatz

Bild 31: Legungsbild vrP : RL-Franse, geschlossen mit Irregulärversatz

4.3.3 Grundbindungen mit einmaligem Legebarrenversatz

Werden die RL-Grundbindungen mit einmaligem Legebarrenversatz, also Trikot, Tuch, Satin und Samt, mit Basisversatz kombiniert, so entstehen im Ergebnis Äquivalenzbindungen zu den Grundbindungen Franse und Trikot bis Samt sowie Bindungen, deren Unterlegungen noch über vier Nadelreihen hinausgehen (Tabelle 4).

Bei gleichgerichtetem Versatz ergeben sich die Äquivalenzbindungen folgendermaßen:

- Ist die Versatzweite der Nadelbarre gleich der Versatzweite der Legebarre, entsteht immer die Äquivalenzbindung Franse, offen (Bild 32).
- Ist die Versatzweite der Nadelbarre kleiner als die der Legebarre, ergeben sich Äquivalenzbindungen Trikot (Versatzweite um eins kleiner), Tuch (um zwei kleiner), Satin (um drei kleiner). Die Maschen bleiben gleich.
- Ist die Versatzweite der Nadelbarre größer als die der Legebarre, ergeben sich Äquivalenzbindungen Trikot (Versatzweite um eins größer), Tuch (um zwei größer, Bild 33), Satin (um drei größer, Bild 34). Aus offenen Maschen werden geschlossene Maschen und umgekehrt.

Bei entgegengerichtetem Versatz wird die Äquivalenzbindung um die Versatzweite der Nadelbarre erhöht. Es ergeben sich aus RL-Trikot demzufolge äquivalent Tuch (Versatzweite eins, Bild 35), Satin (zwei), Samt (drei). Die Maschen bleiben bei offener Bindung offen, bei geschlossener Bindung geschlossen.

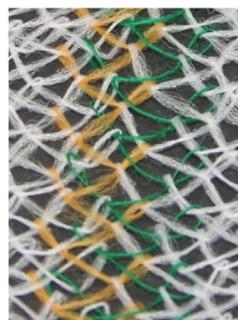
Erfolgt der Nadelversatz unregelmäßig oder irregulär, so entstehen als Äquivalenzbindung abgeleitete Grundbindungen entsprechend den Gesetzmäßigkeiten für Bindungen mit Basisversatz.



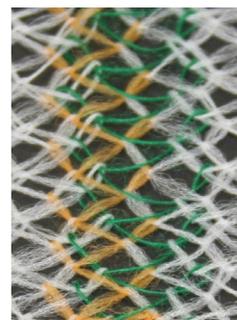
GB 1 0-1/2-1//
NB 0-1/1-0//



GB 1 1-0/0-1//
NB --



GB 1 0-1/2-1//
NB 0-3/3-0//



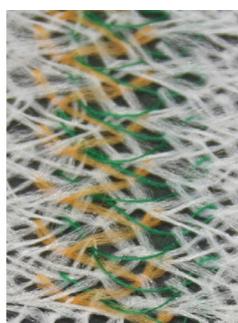
GB 1 1-0/2-3//
NB --

Bild 32: Trikot, offen mit gleichgerichtetem Basisversatz 1, Vergleich mit Äquivalenzbindung

Bild 33: Trikot, offen mit gleichgerichtetem Basisversatz 3, Vergleich mit Äquivalenzbindung



GB 1 0-1/2-1//
NB 0-4/4-0//



GB 1 1-0/3-4//
NB --



GB 1 0-1/2-1//
NB 1-0/0-1//



GB 1 0-1/3-2//
NB --

Bild 34: Trikot, offen mit gleichgerichtetem Basisversatz 4, Vergleich mit Äquivalenzbindung

Bild 35: Trikot, offen mit entgegengerichtetem Basisversatz 1, Vergleich mit Äquivalenzbindung

4.3.4 Grundbindungen mit mehrmaligem Legebarrenversatz (Atlas)

Bei der Kombination von Atlaslegung und Basisversatz ist aufgrund des mehrmaligen Versatzes der Legebarre in die gleiche Richtung keine Unterscheidung des Richtungsverhältnisses nach gleichgerichtet und entgegengerichtet für den gesamten Rapport möglich. Deshalb wird die Angabe des Richtungsverhältnisses auf die erste Überlegung im Rapport bezogen.

Prinzipiell entstehen durch Atlaslegung und Basisversatz als Äquivalenzbindungen abgeleitete Grundbindungen, die sich auf die Grundbindungen Franse und Trikot, Tuch usw. zurückführen lassen (Bild 36). Eine Umkehr des Richtungsverhältnisses hat eine Umkehr der sich ergebenden Bindung zur Folge (Bild 37). Eine Erhöhung der Nadelversatzweite hat ebenso wie eine Hinterlegung des Atlas eine, wenn auch unterschiedliche, Streckung der Bindung zur Folge (Bild 38 und Bild 39). Offener und geschlossener Atlas unterscheiden sich bei gleichem Nadelversatz hinsichtlich der Abfolge offener und geschlossener Maschen und der Richtung der Überlegungen der Legebarre (vergl. Bild 40 und Bild 36).

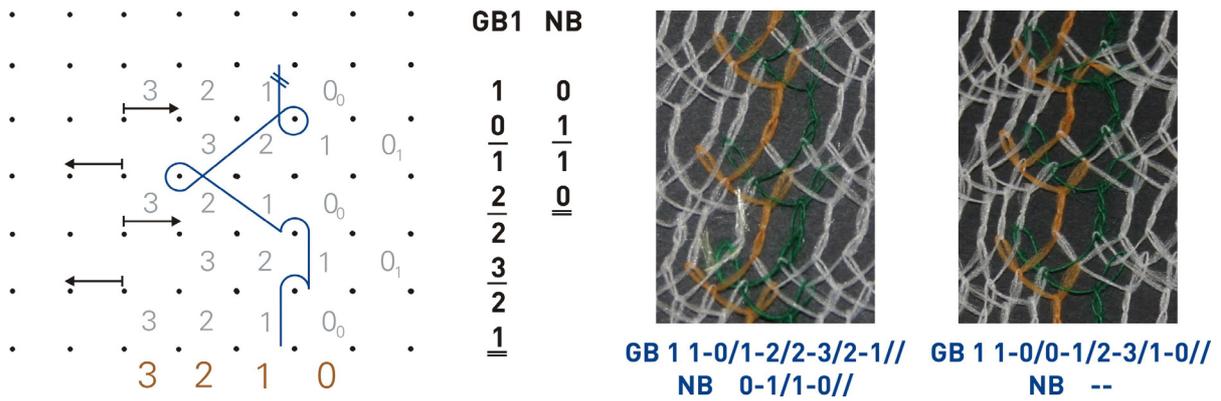


Bild 36: Atlas (2-reihig, offen, mit geschlossenen Umkehrreihen) mit gleichgerichtetem Basisversatz 1 (links: Legungsbild; rechts: Vergleich mit Äquivalenzbindung)

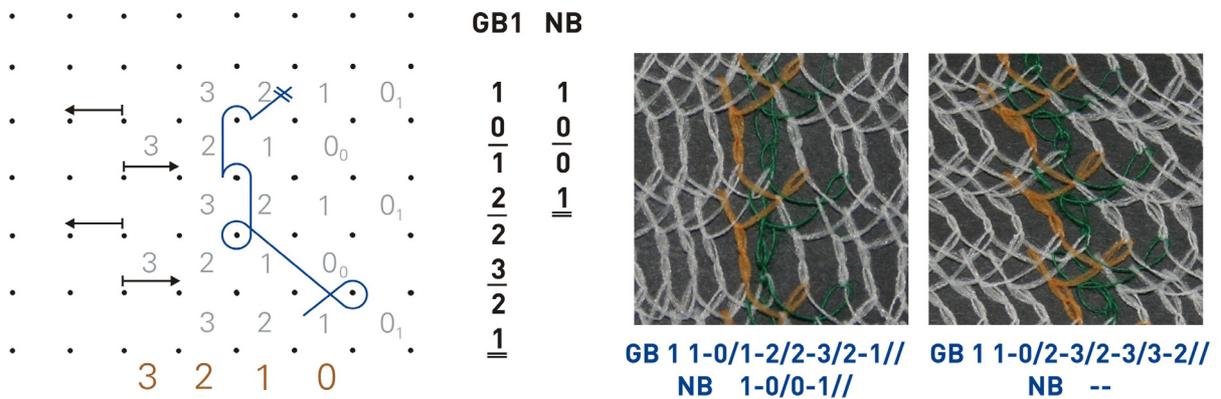


Bild 37: Atlas (2-reihig, offen, mit geschlossenen Umkehrreihen) mit entgegengerichtetem Basisversatz 1 (links: Legungsbild; rechts: Vergleich mit Äquivalenzbindung)

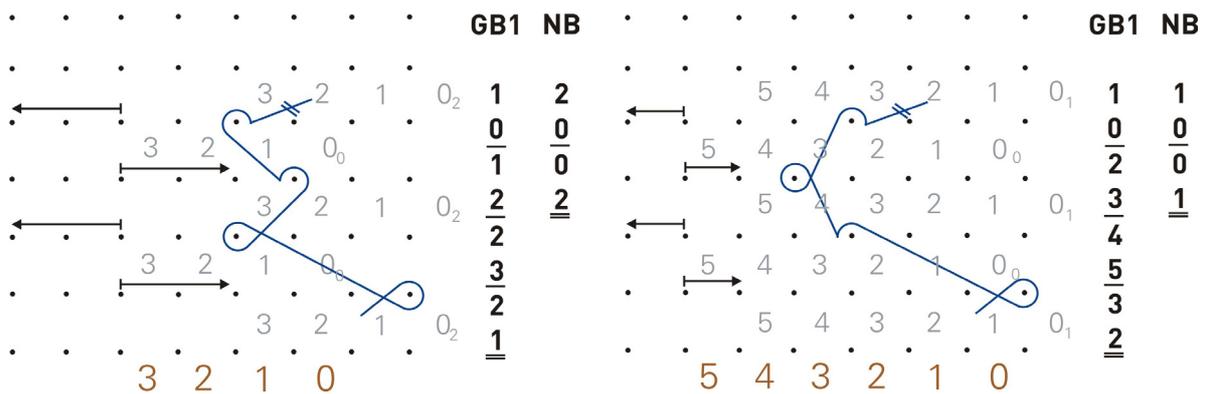


Bild 38: Atlas (2-reihig, offen, mit geschlossenen Umkehrreihen) mit entgegengerichtetem Basisversatz 2

Bild 39: Atlas (2-reihig, offen, hinterlegt mit geschlossenen Umkehrreihen) mit entgegengerichtetem Basisversatz 1

Bei Atlaslegung führt ein Diagonalversatz, welcher der Legung der Legebarre folgt, immer zur Äquivalenzbindung Franse, je nach Richtungsverhältnis in den einzelnen Reihen mit offenen oder geschlossenen Maschen. Es wird keine Fläche gebildet (Bild 41). Erfolgt der

Diagonalversatz entgegengerichtet, so entsteht als Äquivalenzbindung ein hinterlegter Atlas (Bild 42).

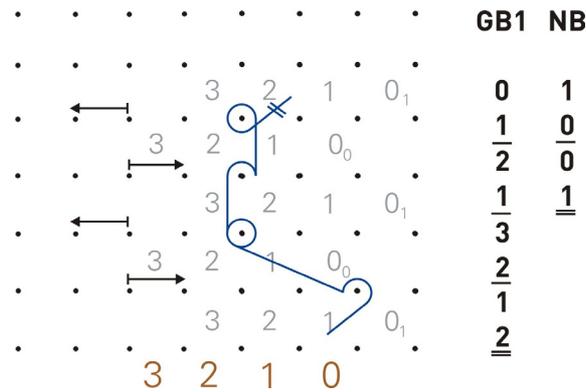


Bild 40: Atlas (2-reihig, geschlossen, mit offenen Umkehrreihen) mit entgegengerichtetem Basisversatz 1

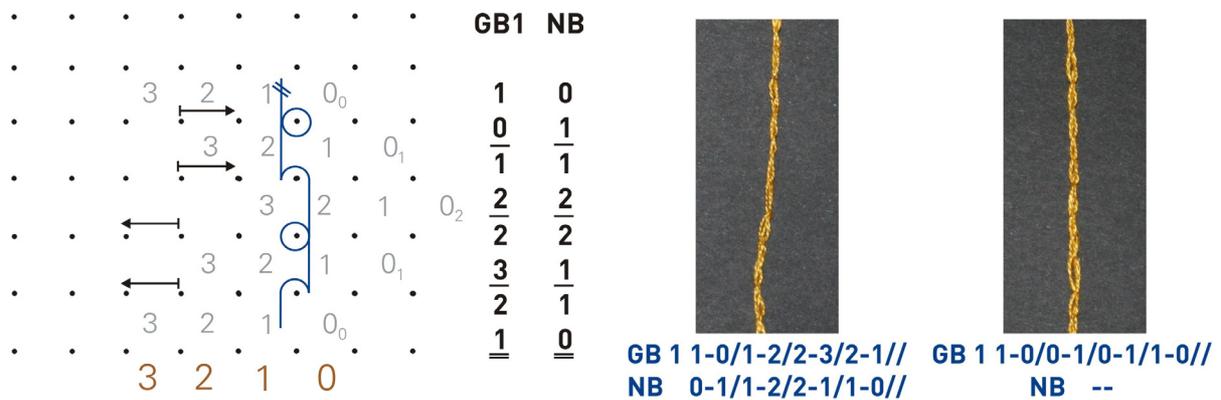


Bild 41: Atlas (2-reihig, offen, mit geschlossenen Umkehrreihen) mit gleichgerichtetem Diagonalversatz 2-1 (links: Legungsbild; rechts: Vergleich mit Äquivalenzbindung)

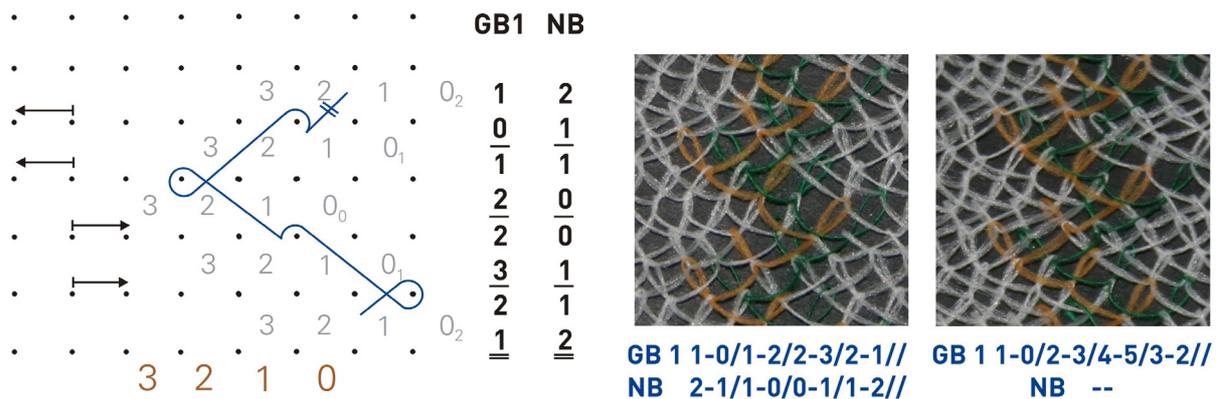


Bild 42: Atlas (2-reihig, offen, mit geschlossenen Umkehrreihen) mit entgegengerichtetem Diagonalversatz 2-1 (links: Legungsbild; rechts: Vergleich mit Äquivalenzbindung)

4.3.5 Kombinierte Bindungen

Kombinierte Bindungen entstehen bei der Verwendung von zwei oder mehr Legebarren, wobei auf jeder Legebarre eine andere Bindung gearbeitet werden kann. Auf Nähwirkmaschinen werden üblicherweise kombinierte Bindungen mit zwei Fadensystemen auf zwei Legebarren hergestellt. Arbeiten die Legebarren im gleichen Richtungssinn, so sind die entstehenden Bindungen gleichlegig, arbeiten sie gegeneinander, dann sind die Bindungen gegenlegig.

Für die Darstellung von kombinierten Bindungen, die mit Nadelversatz gearbeitet werden, gelten im Legungsbild mit verschobenen relativen Positionsnummern und für die Bestimmung der Äquivalenzbindung die gleichen Regeln wie für die Grundbindungen. Die Bindungen auf den einzelnen Legeschienen können getrennt betrachtet werden. Dies kann beispielhaft an einigen ausgewählten Bindungen verdeutlicht werden.

Die Bindung RL-Doppel-Trikot, kombiniert mit einem Basisversatz, gleichgerichtet der Bewegung der Legebarre 1, führt zu einer einer RL-Franse-Tuch Bindung (Bild 43). Wird das Richtungsverhältnis der Nadelbarrenbewegung umgekehrt, so entsteht eine entsprechend umgekehrte kombinierte Bindung aus RL-Franse und RL-Tuch (Bild 44). Bei der Verwendung unterschiedlicher Grundbindungen gilt dies entsprechend. Die Bindung RL-Tuch-Trikot in Verbindung mit einem entgegengerichteten Basisversatz 1 führt zu einer kombinierten Bindung aus RL-Satin und RL-Franse (Bild 45). Entsprechend den im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Regeln können so alle Variationen von kombinierten Bindungen mit Nadelversatz nach den in den Kapiteln 4.1 und 4.2 aufgestellten Regeln behandelt werden.

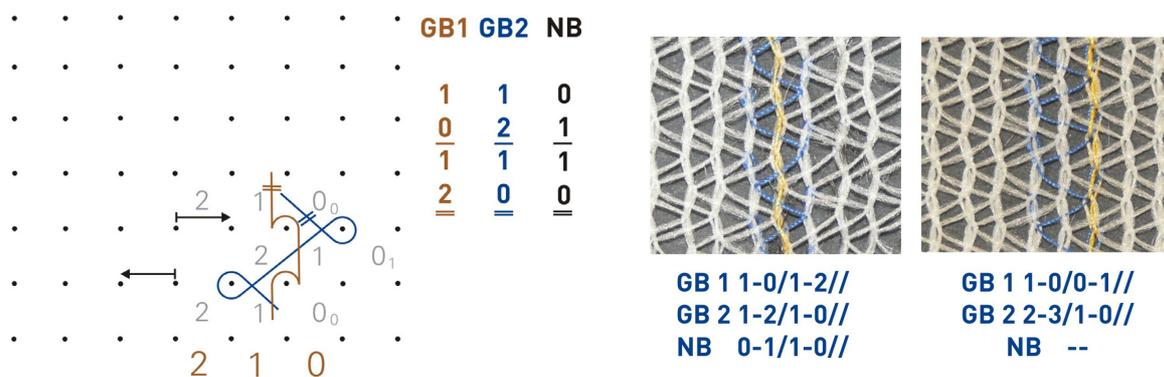


Bild 43: Doppel-Trikot (RL), geschlossen, gegenlegig mit gleichgerichtetem Basisversatz 1 (links: Legungsbild; rechts: Vergleich mit Äquivalenzbindung)

Eine übliche Form der kombinierten Bindungen sind weiterhin Kombinationen aus Grundbindungen und Schüssen. Die maschenbildende Grundbindung wird immer von Legebarre 1 ausgebildet, die Schusslegung erfolgt mit Legebarre 2. Die Ausführung der Schusslegung kann variieren hinsichtlich der Versatzweite und deren Wechsel im Rapport. Bild 46 zeigt ein Beispiel für die Kombination des Bindungselements Schuss mit der Grundbindung RL-Franse und einem entgegengerichteten Basisversatz 1.

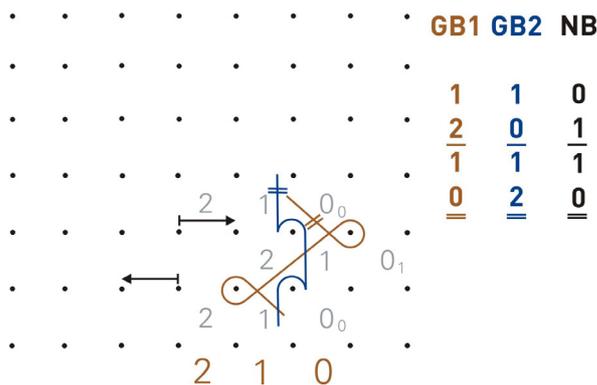


Bild 44: Doppel-Trikot (RL), geschlossen, gegenlegig mit entgegengerichtetem Basisversatz 1

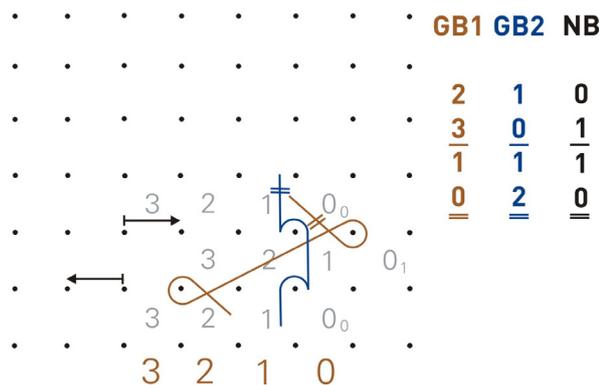
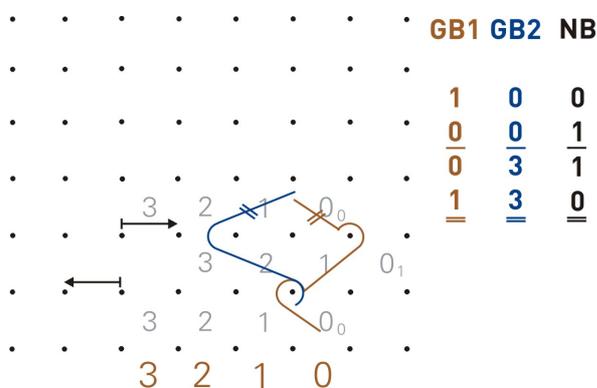


Bild 45: Tuch-Trikot (RL), geschlossen, gegenlegig mit entgegengerichtetem Basisversatz 1



GB 1 1-0/0-1//
GB 2 0-0/3-3//
NB 0-1/1-0//



GB 1 2-1/0-1//
GB 2 1-1/3-3//
NB --

Bild 46: RL-Franse, offen – Schuss unter 3, entgegengerichteter Basisversatz 1 (links: Legungsbild; rechts: Vergleich mit Äquivalenzbindung)

4.4 Grundbahnen

4.4.1 Symmetrie der Lagenanordnung

Im Rahmen der Betrachtung des Einflusses des Nadelversatzprinzips auf die Lagenanordnung spielt die Frage der inneren Symmetrie der Grundbahn eine große Rolle. Die symmetrische Anordnung der einzelnen Schichten oder Lagen in der Grundbahn ist eines der wesentlichen Ziele bei der Verwendung des Nadelversatzes (siehe Kapitel 2.2.2.6). Unter innerer Symmetrie der Grundbahn soll hier eine Lagenanordnung verstanden werden, bei der eine Ebene (die Symmetrieebene) parallel zur Ebene der Produktionsrichtung so in die Grundbahn gelegt werden kann, dass zwei Schichten, die auf einer Gerade senkrecht zur Symmetrieebene gleichweit von dieser entfernt liegen, den gleichen Aufbau aufweisen. Bei einer geraden Lagenanzahl in der Grundbahn liegt die Symmetrieebene so, dass sich jeweils die Hälfte der Lagen über und unter der Symmetrieebene befindet (Grundbahn mit eigentlicher Symmetrie, Bild 47). Bei einer ungeraden Lagenanzahl liegt die Symmetrieebene in der Mitte der Mittellage (Grundbahn mit Mittellagensymmetrie, Bild 48).

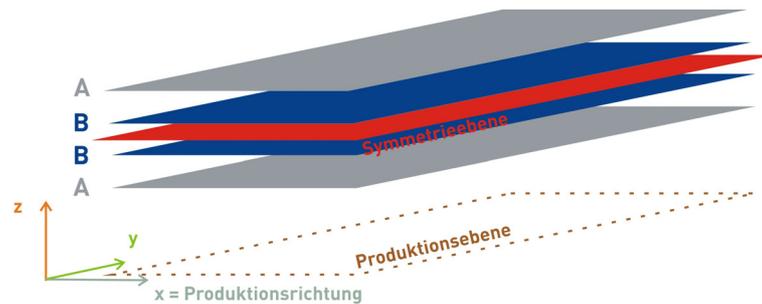


Bild 47: Definition der Symmetrie einer Grundbahn mit gerader Lagenanzahl

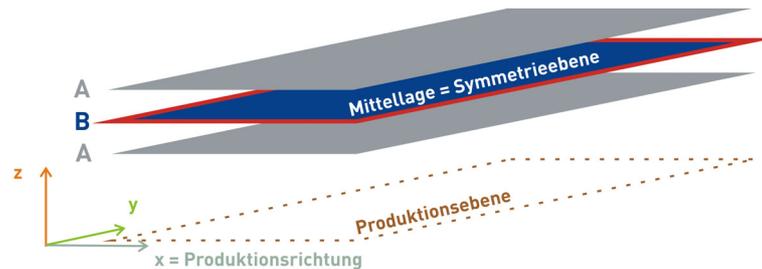


Bild 48: Definition der Symmetrie einer Grundbahn mit ungerader Lagenanzahl

4.4.2 Fadenlagen

Beim Einsatz von Fäden als Grundbahn werden diese in Form von Fadenlagen der Wirkstelle zugeführt, und zwar als Kettfadenlagen und/oder Schussfadenlagen. Die Kettfadenlagen können von Kettbäumen oder aus einem Spulengatter abgezogen werden und verlaufen in der Arbeitsrichtung der Maschine (0° -Richtung). Die Schussfadenlagen werden von Spulen abgezogen und verlaufen quer zu den Kettfäden. Der Winkel, unter dem sie in Bezug auf die Kettfäden abgelegt werden, ist prinzipiell frei wählbar. Je nach Ausführung der Nähwirkmaschine beträgt er immer 90° oder ist in bestimmten Grenzen einstellbar, zum Beispiel bei der Nähwirkmaschine *Malimo 14024* zwischen $+45^\circ$ und -45° [262]. Die Schussfäden werden von einem Legersystem in eine Transportkette eingelegt, welche die Fäden der Wirkstelle zuführt (zur Transportproblematik siehe u. a. WALDMANN, 2003 [177], WIEDENHÖFT, 1999 [181], VETTERMANN, 2001 [175]).

Je nach Arbeitsprinzip des Schusslegers werden die Fadenscharen parallel (Parallelschluss) oder mit leichter Winkelabweichung von etwa 3° (Kreuzschuss oder Schrägschluss) in die Transportkette eingelegt [248].

Die einfachste Variante eines Nähwirkstoffs ist die Kombination aus einem Wirkfadensystem (zum Beispiel in der Bindung Franse) und einer Schussfadenlage (Bild 49). Eine Kettfadenlage allein kann beim konventionellen Prozess durch die Wirkfadensysteme nicht fixiert werden, es ist mindestens eine Schussfadenlage erforderlich (Bild 50). Nähwirkstoffe mit Kettfadenlagen auf beiden Außenseiten lassen sich nur durch nachträgliche Verbindung zweier Nähwirkstoffe fertigen, zum Beispiel wiederum im Nähwirkprozess.

Symmetrische Lagenanordnungen innerhalb der Grundbahn können mit den konventionellen Bindungsmöglichkeiten bei der Verwendung von Schussfadenlagen unterschiedlicher Win-

kelausrichtung realisiert werden. So sind beispielsweise mittellagensymmetrische Lagenaufbauten der Form $[+45/-45/+45]$ industriell üblich (DUMOLARD, 2007 [88]).

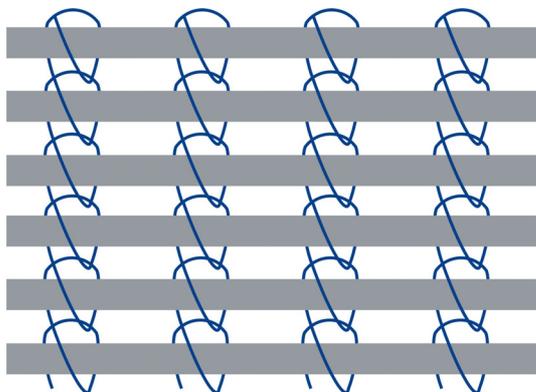


Bild 49: einaxialer Nähwirkstoff, Bindung: RL-Franse, geschlossen

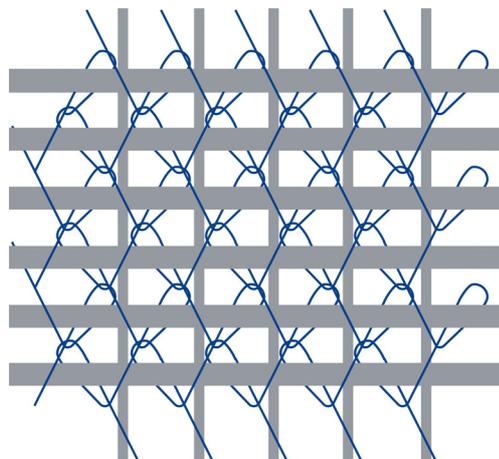


Bild 50: zweiachialer Nähwirkstoff, Bindung: RL-Trikot, geschlossen

Je nach Maschinenausführung können die Schussfadenlagen der Wirkstelle so zugeführt werden, dass alle Fäden immer genau von den Maschen eingebunden werden, das heißt, ohne dass die Nadeln die Fäden durchstechen (maschengerecht) oder so, dass die Schussfäden von den Nadeln teilweise verdrängt oder durchstochen werden (nicht maschengerecht), WEBER, 2004 [36].

Beim Einsatz von zwei Wirkfadensystemen ergeben sich wesentlich erweiterte Möglichkeiten der Bindungskonstruktion. Zur Herstellung von Fadenlagen-Nähwirkstoffen kommen häufig Grundbindungen in Verbindung mit dem Bindungselement Schuss oder Kombinationen aus ein und derselben Maschenbindung zum Einsatz.

4.4.3 Flächengebilde und Kombinationen

Gebrauchliche Flächengebilde zum Einsatz im Nähwirkverfahren sind derzeit in erster Linie unverfestigte oder vorverfestigte Faservliese ([45], [47]). Die in älterer Literatur (z. B. PLOCH, 1978 [29]) beschriebene Verwendung von Geweben und Maschenwaren als Grundbahn spielt im Produktspektrum der Nähwirktechnik keine Rolle mehr.

Solche Flächen-Nähwirkstoffe sind zum Beispiel quer orientierte Faservliese oder vorverfestigte Spinnvliese, die durch die Maschenbildung im Nähwirkprozess verfestigt werden. Die Vlieslieferung kann kontinuierlich mit vorgelagerter Vliesbildung oder diskontinuierlich vom Wickel erfolgen. Das Verfahren ist durch eine große Variabilität der verarbeitbaren Materialien hinsichtlich ihrer Dicke, Flächenmasse und der einsetzbaren Faserstoffe gekennzeichnet. Der Anteil an Fasern/Filamenten aus dem Vlies liegt im fertigen Nähwirkstoff zwischen 80 und 95 Prozent der Gesamtmasse ([45], [47]).

Vorverfestigte Vliesstoffe und Verstärkungsfadenlagen bilden auch die Grundlage für Kombinations-Nähwirkstoffe (dazu siehe u. a. KLEMM, 2001 & 2004 [125], [127]). Als Flächengebilde-

de-Komponente können jedoch ebenso gut Glasschnitzelmatten, Folien oder andere von Spitzen-Schiebernadeln durchdringbare flächige Materialien dienen. Alle für Fadenlagen genannten Bindungen können auch für Flächen- und Kombinations-Nähwirkstoffe genutzt werden (ANAND, 2003 [44]).

4.4.4 Bindung und Grundbahnen beim erweiterten Nähwirkprozess

Nachfolgend werden ausgewählte Bindungen, wie sie üblicherweise in Nähwirkstoffen zum Einsatz kommen, im Zusammenspiel mit dem erweiterten Nähwirkprozess betrachtet. Dazu gehören insbesondere die Fransen- und Trikotbindung, die in konventionellen Nähwirkstoffen sehr häufig eingesetzt werden. Besonderes Augenmerk gilt der Frage, ob mit der Bindung ein Kettfaden ohne Unterstützung von Schussfadenlagen abgebunden werden kann, was die Voraussetzung für die Erzeugung symmetrischer Strukturen darstellt.

Für die Kombination von Kettengewirken, die mit Nadelversatz hergestellt wurden, und Grundbahnen gilt prinzipiell Folgendes: Da der Wirkfaden an der Durchtrittsstelle durch die Grundbahn fixiert ist, entspricht der Verlauf der Wirkfäden auf der rechten Wareenseite dem Bewegungsverlauf der Nadelbarre, auf der linken Wareenseite dem Verlauf der Legebarren. Er unterscheidet sich damit von Kettengewirken mit Nadelversatz ohne Grundbahn (Bild 51) und es entstehen keine Äquivalenzbindungen.

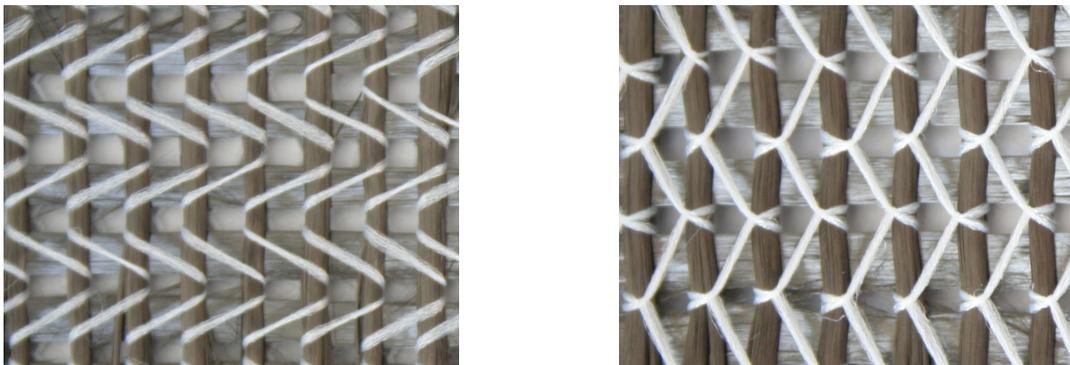


Bild 51: zweiachsender Nähwirkstoff, dreilagig, Bindung: RL-Tuch mit Basisversatz 1, gleichgerichtet

Bild 52 zeigt einen Nähwirkstoff mit nur einer Verstärkungsfadenlage in Kettrichtung. Die Bindung RL-Franse, offen ist mit einem gleichgerichteten Basisversatz um eine Nadelteilung kombiniert. Es zeigt sich, dass die resultierende Struktur, ebenso wie ein konventioneller Nähwirkstoff mit Trikotbindung, keine Abbindung von Kettfäden auf beiden Seiten ermöglicht. Dies gilt für größere Versatzweiten ebenso wie für die Bindung RL-Franse, geschlossen. Erst durch Kombination mit Teilschusslegung einer zweiten Legebarre wird die Abbindung des Kettfadens erreicht (Bild 53). Eine Gitterstruktur gemäß Bild 7 ist mit Fransenbindung und Nadelversatz prinzipiell nicht möglich, da die maschenbildenden Nadeln durch den Versatz nicht in jeder Reihe mit Faden bedient werden.

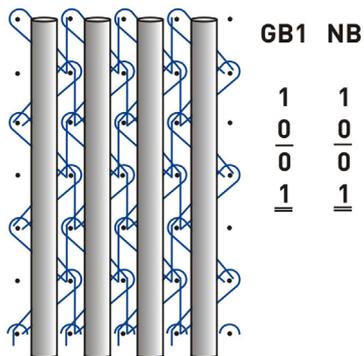


Bild 52: einaxialer Nähwirkstoff, Bindung: RL-Franse, offen, Basisversatz 1

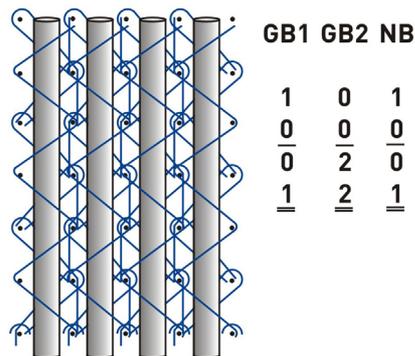


Bild 53: einaxialer Nähwirkstoff, Bindung: RL-Franse, offen – Schuss unter 2

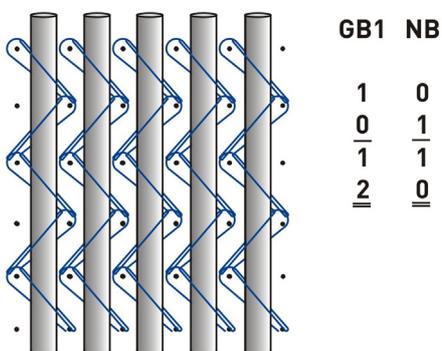


Bild 54: einaxialer Nähwirkstoff, Bindung: RL-Trikot, geschlossen, Basisversatz 1

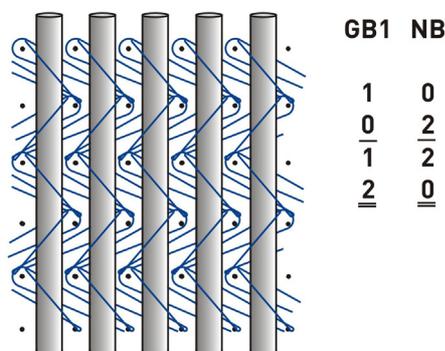


Bild 55: einaxialer Nähwirkstoff, Bindung: RL-Trikot, geschlossen

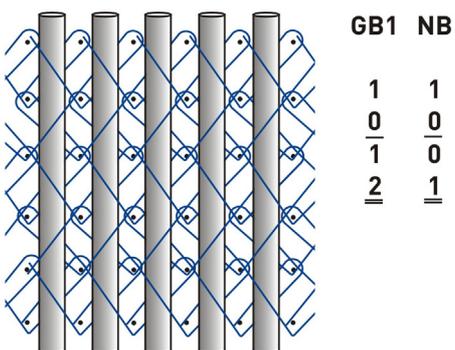


Bild 56: einaxialer Nähwirkstoff, Bindung: RL-Trikot, geschlossen

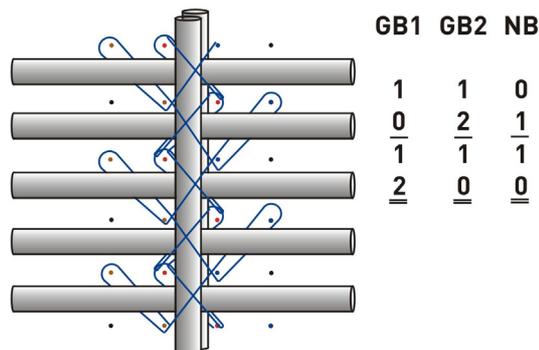


Bild 57: zweiaxialer Nähwirkstoff, Bindung: Doppel-Trikot (RL), gegenlegig

Durch Kombination von Trikotbindung und gleichgerichtetem Basisversatz kann der Kettfaden sicher fixiert werden (Bild 54). Es entsteht keine Verbindung zwischen den einzelnen Wirkfäden, das heißt bei nur einer Kettfadenlage auch kein zusammenhängendes Flächengebilde. Diese Bindung ist bei mindestens zwei axialen Nähwirkstoffen auch für den muster-gemäßen Fadeneinzug bei Gitterstrukturen geeignet (Bild 58, vergleiche auch Bild 7). Bei

Vergrößerung der Versatzweite entstehen, wie in Bild 55 dargestellt, Nähwirkstoffe mit unterschiedlich langen Nadel- und Platinenmaschen. Die Nähfäden sind miteinander verbunden. Eine mustergemäße Abbindung gitterartiger Strukturen ist dann nicht mehr möglich, da die maschenbildenden Nadeln nicht in jeder Reihe bedient werden.

Erfolgt der Nadelversatz bei der Trikotbindung entgegengerichtet, so werden Nadel- und Platinenmaschen kreuzweise übereinander angeordnet und fixieren den Kettfaden (Bild 56). Bei Vergrößerung der Versatzweite verlängern sich die Nadelmaschen entsprechend. Die Herstellung von Gitterstrukturen mit mustergemäßer Abbindung ist nicht möglich.

Die genannten Eigenschaften der Trikotbindung mit Nadelversatz gelten für Bindungen mit offenen und mit geschlossenen Maschen. Sie lassen sich weiterhin auf die Bindungen Tuch, Satin und Samt übertragen. Ist bei diesen Bindungen die Versatzweite der Nadelbarre größer als die der Legebarre, so entstehen Bindungen mit kurzen Nadelmaschen und längeren Platinenmaschen.

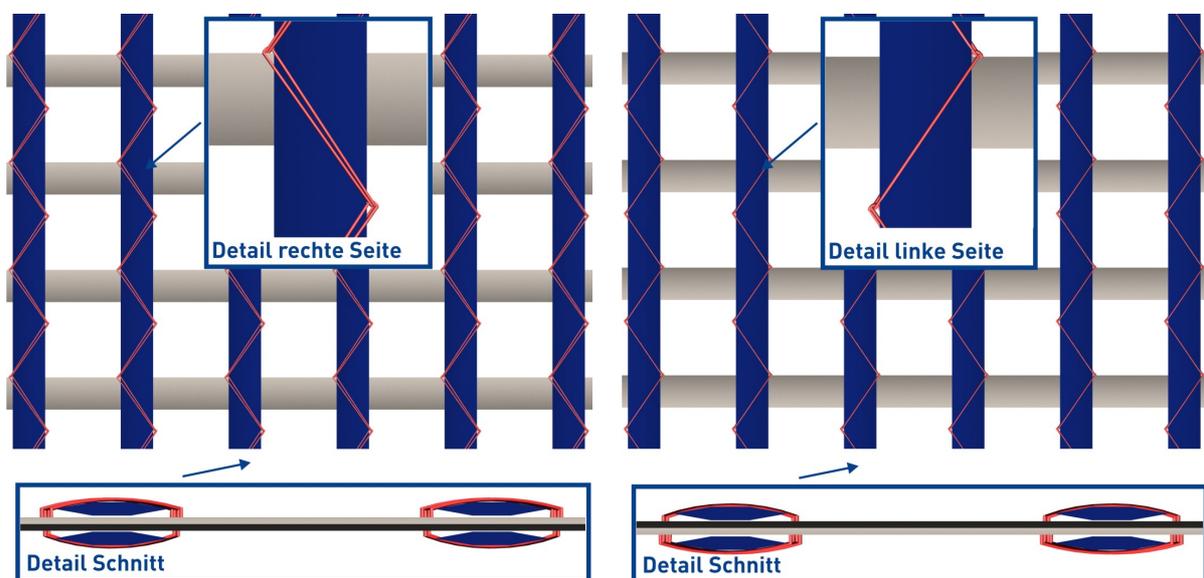


Bild 58: Modell zweiachsialer Nähwirkstoff, Bindung wie Bild 54

Die Bindung Doppel-Trikot (RL), wie sie in Bild 7 dargestellt ist, kann in der Kombination mit Nadelversatz nicht für Gitterstrukturen mit mustergemäßigem Wirkfadeneinzug eingesetzt werden (Bild 57), da die maschenbildenden Nadeln nicht regelmäßig mit Wirkfäden bedient werden.

Eine symmetrische Wirkfadenanordnung um die Kettfäden dergestalt, dass sich die Platinen- und die Nadelmaschen zweier Wirkfadensysteme kreuzen, ist prinzipiell nicht möglich. Unmöglich sind zudem Bindungen, bei denen sich die Platinenmaschen zweier Wirkfadensysteme kreuzen, wenn der Fadeneinzug mustergemäß zur Herstellung von Gitterstrukturen erfolgt.

4.4.5 Schlussfolgerung

Wie in den vorhergehenden Abschnitten gezeigt werden konnte, betrifft die durch den Nadelversatz eingeführte Verfahrensmodifikation im Produkt, also im Nähwirkstoff, insbesondere die erweiterten Möglichkeiten der Bindungskonstruktion und die freie Anordnung der Fadenschichten. Die Einflüsse der Bindungskonstruktion und der Schichtenanordnung werden deshalb hier beispielhaft an zwei ausgewählten Anwendungsfällen für textilverstärkte Verbundwerkstoffe untersucht, Textilbeton auf der einen und thermoplastische Faser-Kunststoff-Verbunde auf der anderen Seite. Diese Beispiele liefern Anhaltspunkte für die günstigsten Einsatzmöglichkeiten von mit Nadelversatz hergestellten Nähwirkstoffen sowie Anforderungen an die Konfiguration von Nähwirkmaschinen nach dem erweiterten Wirkprozess. Aufgrund des bekannten Standes der Technik sind für beide Anwendungen relevante Beeinflussungen sowohl des Nähwirkstoffs als auch des Endproduktes durch den erweiterten Nähwirkprozess zu erwarten.

Einen derzeitigen Schwerpunkt der Arbeiten mit Nähwirkstoffen an der *TU Dresden* stellt die Anwendung als Verstärkung für Betonbauteile dar. Bisherige Forschungen deuten auf einen signifikanten Einfluss sowohl der Bindung an sich als auch der Art der Bindungskonstruktion auf die relevanten Eigenschaften des Nähwirkstoffs sowie des Bauteiles hin, zum Beispiel das Verbund- oder das Handhabungsverhalten ([7], [17], [20], [24]). Aus diesem Grund soll ein beispielhafter Anwendungsfall aus dem Bereich der Betonverstärkung den Einfluss der Bindung auf die Textil- und Bauteileigenschaften herausstellen. Begleitende Einflüsse durch die Schichtenanordnung im Nähwirkstoff werden ebenfalls betrachtet.

Demgegenüber übt zwar die Bindung in Nähwirkstoffen als Halbzeuge für Faser-Kunststoff-Verbunden einen deutlichen Einfluss auf die Eigenschaften des Endproduktes aus, jedoch scheint nach bisherigen Erkenntnissen der Einfluss der Bindungsart auf die mechanischen Eigenschaften des Verbundbauteiles gering (TRUONG, 2005 [172]). Das mechanische Verhalten von Faser-Kunststoff-Verbunden wird aber in großem Umfang von unterschiedlichen Schichtenanordnungen beeinflusst, insbesondere im Vergleich symmetrisch-unsymmetrisch (BHASKAR, 2005 [60]). Deshalb wird nachfolgend der Einfluss der Schichtenanordnung auf Nähwirkstoff und Bauteil am Beispiel eines Faser-Kunststoff-Verbundes näher untersucht.

5 Anwendung des erweiterten Wirkprozesses bei der Herstellung von Textilbeton

5.1 Einflussgrößen

5.1.1 Überblick

Textilbewehrter Beton ist ein Verbundwerkstoff aus textilem Fasermaterial und Beton. Die textilen Fasern dienen der Aufnahme von Zugspannungen, während die Betonmatrix Druckspannungen aufnimmt. Im Unterschied zu bereits seit längerem bekannten Kurzfaserbetonen, bei denen willkürlich verteilte Kurzfasern der Spannungsaufnahme dienen, werden hier Endlosfasern zu Fäden großer Länge gebündelt und in Form textiler Flächengebilde als Bewehrungstextil in die Betonmatrix integriert. Zu den schon bekannten Grundlagen dieses Werkstoffs existiert eine umfangreiche Literatur. Für eine Einführung in das Thema eignen sich die Arbeiten von CURBACH, 2004 [79], CURBACH, 2009 [10] und BRAMESHUBER, 2006 [7] mit zahlreichen weiteren Verweisen.

Zur Bestimmung des Einflusses der Bindung mit Nadelversatz ist letztendlich immer der Einfluss des textilen Flächengebildes, in diesem Fall also des Fadenlagen-Nähwerkstoffs, auf die Eigenschaften des Betonbauteils ausschlaggebend. Hier sollen drei übergreifende Einflussbereiche unterschieden werden, die sich auf die Herstellung und den Gebrauch des Bauteils beziehen: die Handhabung, die Bewehrungsführung und die Tragfähigkeit (Bild 59).

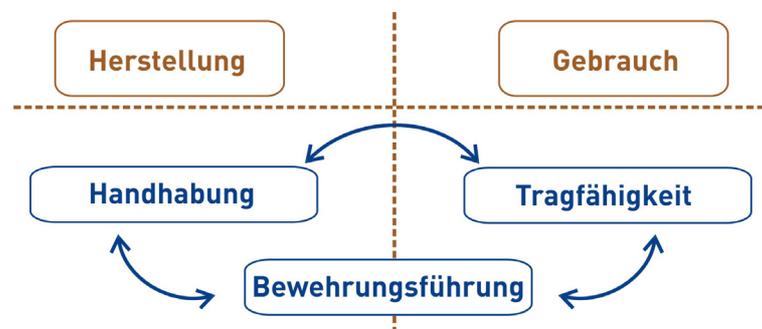


Bild 59: Einflussbereiche der textilen Bewehrung auf das Betonbauteil

Unter der Handhabung sollen hier alle Eigenschaften zusammengefasst werden, die mit der Verarbeitung des textilen Flächengebildes in Zusammenhang stehen. Die Bewehrungsführung kennzeichnet die Einflüsse, die sich auf die Anordnung der textilen Verstärkung im Bauteil beziehen und die Tragfähigkeit das Verhalten des beanspruchten Bauteils.

In zahlreichen Forschungsarbeiten wurde der Einsatz von Fadenlagen-Nähwerkstoffen im Verbund mit Beton bereits untersucht. Mit der Erweiterung des Nähwirkprozesses durch den Nadelversatz können nun unter Umständen die Eigenschaften der textilen Bewehrung noch gezielter beeinflusst werden. Aus diesem Grund ist eine Neubewertung des bisherigen Wissensstandes erforderlich, der gezielt um Erkenntnisse über die Auswirkungen des erweiterten Nähwirkprozesses erweitert werden soll.

Tabelle 5 zeigt die in der Literatur nachgewiesenen, unmittelbaren Einflüsse der Parameter des Nähwirkprozesses auf die wesentlichen Eigenschaften von textildbewehrten Betonbauteilen. Diese werden im Folgenden näher betrachtet und Ansatzpunkte für den zielgerichteten Einsatz des Nadelversatzes abgeleitet. Die Bindung des Wirkfadens ist neben der Lagenanordnung derjenige Faktor, der direkt durch den Nadelversatz beeinflusst und gezielt verändert werden kann. Die weiteren Einflussfaktoren Abbindung, Stichlänge, Fadenabstand, Wirkfadenspannung und (zusätzliche) stoffschlüssige Stabilisierung stehen in ihren Wirkungen mit denjenigen der Bindung in Zusammenhang und Wechselwirkung.

Tabelle 5: nachgewiesene Einflüsse technologischer Parameter von Fadenlagen-Nähwirkstoffen als textile Bewehrungen für Beton

Einflussfaktor	Einflussnahme auf	Einflussbereich	Art des Einflusses	Nachweise
Fadenabstand	Biegesteifigkeit	Handhabung, Bewehrungsführung	kleiner Fadenabstand führt zu höherer Biegesteifigkeit	[5]
	Öffnungsweite/Faservolumen	Tragfähigkeit, Bewehrungsführung	Optimierungsaufgabe	[5][7][17] [28][35] [78][147]
	Fadenauslenkung	Tragfähigkeit, Bewehrungsführung	größerer Fadenabstand verstärkt Fadenauslenkung	[280][281]
Wirkfadenspannung	äußerer Verbund (Faden zur Matrix)	Tragfähigkeit	höhere Wirkfadenspannung bewirkt geringere Tragfähigkeit	[20][35] [163][287]
	innerer Verbund (innerhalb Faden)	Tragfähigkeit	größere Wirkfadenspannung erhöht innere Reibung	[20][75] ²
Stabilisierung ¹	Verschiebestabilität	Handhabung, Bewehrungsführung	bewirkt deutliche Steigerung der Verschiebestabilität	[289]
	Biegesteifigkeit	Handhabung, Bewehrungsführung	führt zu deutlicher Steigerung der Biegesteifigkeit	[289][288]
	innerer/äußerer Verbund	Tragfähigkeit	bewirkt deutlich höhere Tragfähigkeit	[7][20] [165][169]
¹ stoffschlüssige Stabilisierung, z. B. durch Beschichten, Imprägnieren o. ä.; ² nachgewiesen in Kunststoffmatrix				

Tabelle 5 (Fortsetzung): nachgewiesene Einflüsse technologischer Parameter von Fadenlagen-Nährwirkstoffen als textile Bewehrungen für Beton

Einflussfaktor	Einflussnahme auf	Einflussbereich	Art des Einflusses	Nachweise
Abbindung ¹	Verschiebestabilität	Handhabung, Bewehrungsführung	nicht maschengerechte Abbindung erzeugt höhere Verschiebestabilität	[164][287]
	Biegesteifigkeit	Handhabung, Bewehrungsführung	nicht maschengerechte Abbindung erzeugt höhere Biegesteifigkeit	[95][287]
	Öffnungsweite	Bewehrungsführung	bei maschengerechter Abbindung keine Verringerung der Öffnungsweite	[95]
Stichlänge	Verschiebestabilität	Handhabung, Bewehrungsführung	höhere Stichlänge erzeugt niedrigere Verschiebestabilität	[103][164][289]
	Biegesteifigkeit	Handhabung, Bewehrungsführung	Einfluss umstritten	[103][287][289]
	äußerer Verbund	Tragfähigkeit	größere Stichlänge erzielt höhere Tragfähigkeit durch bessere Verbundwirkung	[76][103]
	innerer Verbund	Tragfähigkeit	kleinere Stichlänge erhöht innere Reibung	[103]
Bindung (durch erweiterten Wirkprozess direkt beeinflussbar)	Verschiebestabilität	Handhabung, Bewehrungsführung	Einfluss minimal	[164][177][288]
	Biegesteifigkeit	Handhabung, Bewehrungsführung	Einschnürung der Kettfäden durch Bindung erhöht Biegesteifigkeit	[287]
	Öffnungsweite	Bewehrungsführung	Bindung darf nicht zur Abdeckung der Öffnung führen	[78][94]
	äußerer Verbund	Tragfähigkeit	insbesondere in Verbindung mit einer Beschichtung lässt sich durch die Bindung eine formschlüssige Verbindung zum Beton erzeugen; beeinflusst Ausmaß der Fadenabdeckung, je stärker diese, desto schlechter die Tragfähigkeit; beeinflusst Fadenquerschnitt, dadurch Beeinflussung der Tragfähigkeit	[5][24][68][106][129][131][280][7][17][153][5][7][17][24][35][152][153][169]
	innerer Verbund	Tragfähigkeit	Bindung beeinflusst innere Reibung	[17]

¹ Abbindung maschengerecht oder nicht maschengerecht

5.1.2 Einflüsse des Nähwirkprozesses auf die Tragfähigkeit

5.1.2.1 *Fadenlagen-Nähwirkstoffe ohne stoffschlüssige Stabilisierung*

Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass die Tragfähigkeit textildbewehrter Betone neben anderen Einflüssen, wie etwa den Eigenschaften der Ausgangsmaterialien, signifikant durch den Verbund zwischen Bewehrung und Matrix beeinflusst wird. Da in textildbewehrtem Beton nur die äußeren Filamente der Bewehrungsfäden von der Matrix umschlossen werden, ist neben dem Verbund zwischen Matrix und Filamenten (äußerer Verbund) auch der Zustand innerhalb der Fäden zwischen den Filamenten (innerer Verbund) zu betrachten (BRAMESHUBER, 2006 [7]).

Bei der Betrachtung des Einflusses der Bindung auf den äußeren Verbund zwischen Bewehrung und Betonmatrix ist nach dem bisherigen Stand der Forschung zu unterscheiden zwischen Bewehrungen aus Nähwirkstoffen ohne und mit zusätzlicher stoffschlüssiger Stabilisierung (Beschichtung o. ä.).

JESSE, 2004 [17] hat umfangreiche Untersuchungen an textildbewehrten Betonbauteilen unter Zugbelastung durchgeführt, wobei als Bewehrung unbeschichtete Nähwirkstoffe zum Einsatz kamen. Der Einfluss der Bindung auf die Tragfähigkeit des Betonbauteils ist nach diesen Untersuchungen deutlich ausgeprägt. Dieser Einfluss beruht im Wesentlichen auf zwei Effekten:

- der Abdeckung des Bewehrungsfadens (Kettrichtung) durch den Wirkfaden (Einflussnahme auf den äußeren Verbund) und
- der Einschnürung des Bewehrungsfadens (Kettrichtung) durch den Wirkfaden (Einflussnahme auf den inneren Verbund und die Fadenauslenkung).

Eine starke Abdeckung des Bewehrungsfadens durch den Wirkfaden führt nach JESSE, 2004 [17] zu einer geringeren Tragfähigkeit des Verbundes. Bei Prüfungen im einaxialen Zugversuch wurden Betonprüfkörper bewehrt mit zwei axialen Fadenlagen-Nähwirkstoffen untersucht. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass Textilien mit Bindungen, bei denen der Wirkfaden direkt am Bewehrungsfaden konzentriert ist, die niedrigsten Festigkeiten erreichten. Nach BRAMESHUBER, 2006 [7] stellt dieser Effekt einen der wichtigsten Einflüsse auf die Tragfähigkeit überhaupt dar, der die Auswirkungen von Änderungen der Stichelänge oder Wirkfadenspannung überwiegt. Der Einfluss unterschiedlicher Wirkfadenfeinheiten stand bisher nicht im Mittelpunkt von Untersuchungen, jedoch liegt die Annahme nahe, dass eine gröbere Feinheit in analoger Weise zu einer verringerten Tragfähigkeit führt.

Im Stadium des Bruches erreichten von den durch JESSE, 2004 [17] untersuchten Bindungen RL-Trikot die höchste, RL-Doppel-Trikot, gegenlegig eine mittlere und RL-Franse-Trikot, gegenlegig im Betonverbund die niedrigste Bruchlast. Dies wird damit begründet, dass die Abdeckung der Fäden in der Grundbahn durch den Wirkfaden bei den geprüften Bindungen entsprechend steigt. Die Wirkfäden wirken als Verbundstörungen, die zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Dehnungen in den Filamenten am Umfang bzw. im Querschnitt des

Verstärkungsfadens führen [BISCHOFF, 2000 [5], PELED, 2003 [153], HANISCH, 2006 [103]]. Entsprechend beeinflusst eine größere Stichlänge den Verbund mit der Matrix positiv [COHEN, 2006 [76]]. Nach JESSE, 2004 [17] ist ein weiteres Indiz für diese Zusammenhänge der Vergleich der Festigkeiten in Kett- und Schussrichtung bei der Bindung RL-Doppel-Trikot, gegenlegig. Die erreichten Festigkeitskennwerte in Schussrichtung (hier ist die Abdeckung durch den Wirkfaden deutlich geringer) liegen in seinen Untersuchungen höher als in Kett-richtung.

Untersuchungen von OFFERMANN, 2005 [289] haben jedoch für einen anderen Versuch an Betonbauteilen (Biegezugversuch an unterbewehrten Textilbetonproben, Bindung RL-Doppel-Trikot, gegenlegig) Höchstzugkräfte in Schussrichtung ergeben, die deutlich unter denen in Kettrichtung liegen. Der Einfluss der Bindung wird also offenbar von weiteren Einflussgrößen überlagert, wie etwa prozessbedingten Faserschädigungen, die teilweise einen wesentlich stärkeren Einfluss auf die Tragfähigkeit des Verbundbauteils ausüben können. So zeigen auch bei beschichteten Nähwirkstoffen die Kettfäden gegenüber den Schussfäden bessere Verbundeigenschaften [ORTLEPP, 2007 [28]].

Als weiterer Effekt ist auch die Einschnürung des Kettfadens durch den Wirkfaden von der Bindung abhängig. Durch die Einschnürung wird der Querschnitt des Kettfadens gegenüber dem unverarbeiteten Ausgangsmaterial deutlich verändert, es kommt zu einer Kompression. JESSE, 2004 [17] sieht in dieser Einschnürung einen weiteren wesentlichen Einflussfaktor auf die Verbundeigenschaften, bei dem sich drei Effekte überlagern:

- Durch den verringerten Umfang sinkt die zur Matrix übertragbare Verbundkraft.
- Durch die Kompression und den damit verbundenen Querdruck steigt die innere Reibung im Kettfaden. Dies führt zu einer Vergleichmäßigung der Dehnungen von Kern- und Randfilamenten und damit theoretisch zu höheren Festigkeiten, die aber nicht nachweisbar waren.
- Die Bindung führt zu einer Änderung der Kettfadengeometrie in Längsrichtung (Ausknicken, Welligkeit).

Neben der Bindung wird die Einschnürung der Fäden auch durch die Wirkfadenspannung beeinflusst. Hier gilt, dass mit steigender Wirkfadenspannung die Einschnürung verstärkt wird [OFFERMANN, 2003 [287]].

Die Querschnittsform des Fadens bestimmt den Anteil von Filamenten mit direktem (Randfasern) und ohne Kontakt zur Matrix (Kernfasern). Aus den ausgewerteten Untersuchungen zu diesem Thema lässt sich ableiten, dass die Einschnürung (Verhältnis von Querschnittsfläche zu Fadenumfang) und damit das Verhältnis von Rand- zu Kernfasern der Fäden im Rahmen einer Optimierungsaufgabe in Bezug auf die jeweiligen Randbedingungen angemessen einzustellen sind ([20], [24], [35], [92], [287]).

Abschließend lässt sich feststellen, dass beim Einsatz von Nähwirkstoffen zur Betonbewehrung ohne Beschichtung der Wirkfaden eher einen negativen Einfluss hat, der durch gezielte

Auswahl geeigneter Bindungen und der damit verbundenen Faktoren wie Stichtlänge und Wirkfadenspannung beeinflusst und gezielt gemindert werden kann.

5.1.2.2 Fadenlagen-Nähwirkstoffe mit stoffschlüssiger Stabilisierung

Untersuchungen an nachträglich auf unterschiedlichen Wegen stabilisierten Nähwirkstoffen lassen demgegenüber den Schluss zu, dass sich durch die Behandlung mit geeigneten Beschichtungsmassen der zuvor ungünstige Einfluss des Wirkfadens neutralisieren oder sogar zielgerichtet zur Steigerung der Tragfähigkeit einsetzen lässt. Die Beschichtungsmassen werden mit dem Ziel aufgebracht, durch Verbesserung des inneren Verbundes auch die Kernfasern am Lastabtrag stärker zu beteiligen sowie das Verbund- und das Verarbeitungsverhalten zu verbessern. Zwar kann auch durch Variation von Bindung, Wirkfadenspannung und Stichtlänge Einfluss auf den inneren Verbund genommen werden, diese Einflüsse stehen aber deutlich hinter dem Einfluss der Beschichtung zurück (Nachweise in Tabelle 5). Die Tragfähigkeit kann durch zusätzliche Stabilisierungsmaßnahmen sehr deutlich verbessert werden ([7], [20], [35], [165]). ORTLEPP, 2007 [28] kommt bei der Auswertung von Untersuchungen zum Auszugsverhalten textiler Strukturen zur Bauwerksanierung zu dem Schluss, dass eine nachträgliche Beschichtung zur Sicherstellung des inneren Verbundes der AR-Glasfilamentgarne in der Feinbetonmatrix unbedingt erforderlich ist.

Die Steigerung der Tragfähigkeit durch eine zusätzliche Beschichtung kann sowohl auf die Verbesserung des inneren Verbundes (SCHORN, 2002 [165]) als auch des äußeren Verbundes zurückgeführt werden. Letzteres ist in den Arbeiten zu diesem Thema unter anderem auf das Zusammenwirken von Wirkfaden und Stabilisierung zurückgeführt worden. So ergaben Auszugversuche durch KRÜGER, 2004 [20] an Betonbauteilen, bewehrt mit stoffschlüssig stabilisierten Fadenlagen-Nähwirkstoffen, eine Erhöhung der Verbundfestigkeit im Vergleich zu nicht imprägnierten Proben. Das wird im Wesentlichen auf die strukturierte Oberfläche der Verstärkungsfäden zurückgeführt, die durch die Stabilisierung verfestigt ist. Diese Oberfläche entsteht durch die Wirkfäden, die wie eine Rippung wirken. Die Ergebnisse werden durch Untersuchungen von LORENZ, 2008 [280] bestätigt. Bei der Bestimmung der Wirkung der Wirkfäden auf die Fadenauszugskräfte an mit polymerbeschichteten Nähwirkstoffen (Styrol-Butadien) bewehrten Betonproben konnten im Bereich des Haftverbundes (siehe Bild 60) keine Beeinflussungen festgestellt werden. Im Gegensatz dazu wurden im Reibbereich bei größeren Rissöffnungen deutliche Steigerungen der gemessenen Auszugskräfte festgestellt. Bei Verwendung eines Epoxidharzes als Stabilisierung werden die Auszugskräfte so stark erhöht, dass mögliche Einflüsse des Wirkfadens nicht mehr differenziert werden können.

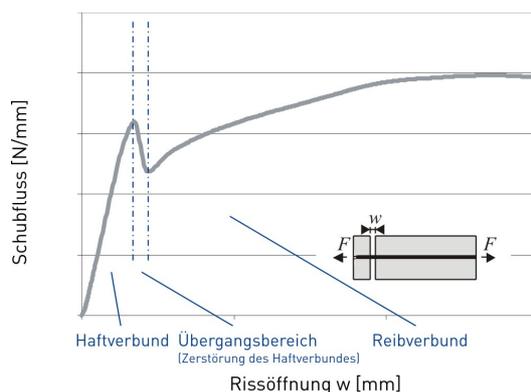


Bild 60: Schematische Darstellung des Schubfluss-Rissöffnungsverlaufs beim Fadenzugversuch

Bei Stahlbetonbauteilen leistet die mechanische Verankerung der Bewehrung durch Rippen den höchsten Anteil an der Kraftübertragung (BRAMESHUBER, 2006 [7]). Auch bei Bewehrungsstäben aus Carbon- oder Glasfaser-FKV wird mit unterschiedlichen Methoden, z. B. Umwinden mit Verstärkungsfäden oder Besanden eine Profilierung erzielt, die dem Betonrippenstahl nachempfunden ist ([41], [70], [120], [122]). Demzufolge wird auch für Textilbeton ein mechanischer Verankerungsmechanismus gefordert, da durch eine entsprechende Gestaltung der Fadenoberfläche die Tragfähigkeit verbessert werden kann ([5], [7], [24], [129], [131], [153]). Um eine mechanische Verankerung zu erreichen, reicht nach KRÜGER, 2004 [20] der Wirkfaden schon aus. Es wurden jedoch verschiedentlich Vorschläge gemacht, diesen Effekt durch Manipulation der verwendeten Bewehrungsfäden noch zu verbessern, etwa durch Einsatz von Friktionsspinnarnen (KOLKMANN, 2008 [19]), verdrehten Garnen, Zwirnen (MOLTER, 2005 [24]) oder schraubenförmig umwundenen Kern-Mantel-Garnen bzw. kablierten Garnen (KOLKMANN, 2001 [129], BISCHOFF, 2000 [5], CASADEI, 2005 [68]). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen führten jedoch zu dem Schluss, dass durch den Einsatz der genannten Methoden zwar teilweise deutliche Steigerungen der Garnzugfestigkeiten gegenüber dem Ausgangsmaterial erreicht werden konnten (CHUDOBA, 2007 [74]), die Festigkeit des Beton-Textil-Verbundes jedoch nicht verbessert wurde (KOLKMANN, 2008 [19], HEGGER, 2008 [256]). Das Besanden von epoxidbeschichteten Nähwirkstoffen führt demgegenüber zu einer sehr deutlichen Steigerung der Verbundfestigkeit (LORENZ, 2008 [280]).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in Verbindung mit einer zusätzlichen Stabilisierung, etwa einer Beschichtung, der Wirkfaden möglicherweise die Funktion einer Rippe übernimmt und dann zu einer formschlüssigen Verankerung der Bewehrung und damit zu einer Steigerung der Tragfähigkeit führen kann. Die Größe dieses Einflusses und seine gezielte Einstellung sind bisher nicht bestimmt worden.

5.1.3 Einfluss der Bindung auf Handhabung und Bewehrungsführung

Der Bewehrungsführung und der Handhabung, also der Anordnung der textilen Verstärkung in der Betonmatrix und den Verarbeitungseigenschaften, kommen ein wichtiger Anteil an der Tragfähigkeit und der Herstellbarkeit des Betonbauteils zu. Entscheidend ist, dass eine gute Umhüllung mit der Matrix gewährleistet wird, eine Anpassung an unterschiedliche Bauteil-

geometrien erfolgt, die Fadenlagen in Beanspruchungsrichtung ausgerichtet sind und der Nähwirkstoff dem jeweiligen Herstellprozess angepasst verarbeitbar ist.

Die Ausrichtung der Fadenlagen in Belastungsrichtung ist abhängig vom Herstellprozess und kann beim Nähwirken in weiten Grenzen eingestellt werden. Eine angepasste Ausrichtung ist wichtig, da schon eine geringe Abweichung zu einem Tragfähigkeitsverlust führt (BRAMESHUBER, 2006 [7], BISCHOFF, 2000 [5]). Für bisher in der Literatur untersuchte Anwendungsfälle boten bis auf wenige Ausnahmen (z. B. FRANZKE, 2002 [94]) zweiachsiges Fadenlagen-Nähwirkstoffe eine ausreichende Kraftaufnahme, so dass der Einsatz vierachsiger Fadenlagen-Nähwirkstoffe noch nicht in breitem Maße untersucht wurde. Auch beim Einsatz zweiachsiger Nähwirkstoffe liegt meist nur eine Haupttragrichtung vor, so dass die Eigenschaften des Schussfadens weniger relevant sind als die des Kettfadens. Die Orientierung der Fadenlagen wird nicht von der Bindung und damit auch nicht durch den erweiterten Wirkprozess beeinflusst.

Für eine ausreichende Umhüllung der Bewehrung durch die Betonmatrix ist ein angemessener Abstand der einzelnen Fäden in den jeweiligen Fadenlagen zu gewährleisten. Nach JESSE, 2004 [17] muss der Anteil an Öffnungen an der Gesamtfläche der textilen Bewehrung bei mindestens 50 Prozent liegen. ORTLEPP, 2007 [28] ermittelte in umfangreichen Untersuchungen je nach Anwendungsfall geeignete Werte zwischen 31 und 65 Prozent für die notwendige wirksame Fläche einer Textilbewehrung, also den Anteil der Öffnungen im Vergleich zur Gesamtfläche. Dieser wirksame Flächenanteil hat einen großen Einfluss auf das Delaminationsverhalten der Textilbeton-Verstärkungsschicht. Die notwendige Öffnungsweite und ebenso die notwendige Überdeckung in Dickenrichtung sind hauptsächlich abhängig vom Durchmesser der größten Partikel in der Betonmatrix, dem so genannten Größtkorn und lassen sich aus diesem Durchmesser auch rechnerisch bestimmen (OFFERMANN, 2005 [289]). Bei der Festlegung der notwendigen Öffnungsweite ist auch die vorgesehene Beanspruchung in Betracht zu ziehen. So ist für eine nachträgliche Verstärkung von Betonbauwerken mit einer Textilbetonschicht zur Verringerung der Versagensgefahr meist ein möglichst großer Fadenabstand zu realisieren (ORTLEPP in [7], [78], CURBACH, 2003 [77], MÖLLER, 2004 [143]).

Neben dem Fadenabstand nehmen weitere herstellungsbedingte Faktoren Einfluss auf die Öffnungsweite. So konnte beobachtet werden, dass ein nicht maschengerechtes Abbinden durch Anstechen und damit verbundenes Aufspreizen der Fäden zu einer deutlichen Verringerung der Öffnungsweite führt (FRANZKE, 2003 [95]).

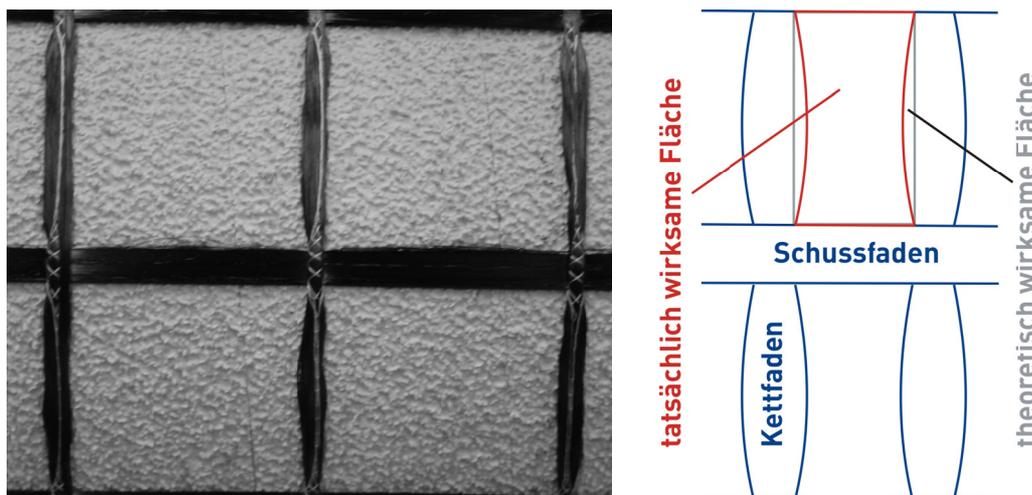


Bild 61: Aufweitung der Kettfäden im konventionellen Nähwirkprozess (links: Foto auf der Abzugswalze der Nähwirkmaschine, rechts: Prinzipdarstellung)

Die Bindung hat keinen Einfluss auf den Abstand der Fadenachsen. Solche Bindungen, die bei vollem Fadeneinzug eine zusammenhängende Fläche erzeugen (z. B. RL-Trikot), führen jedoch zur Verdeckung der Öffnungen durch die Wirkfäden. Führt die Bindung, wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, zu einer Kompression des Kettfadens, so ist damit auch eine Vergrößerung der Fadenzwischenräume verbunden. Das Ausmaß dieser Vergrößerung ist dabei abhängig vom Fadendurchmesser und dem Grad der Kompression. Jedoch kann durch die Bindung auch ein über die Kettfadenlänge unregelmäßiger Querschnitt hervorgerufen werden. So konnte bei Fadenlagen-Nähwirkstoffen mit der Bindung RL-Doppel-Trikot, gegenlegig beobachtet werden, dass es im Fadenverlauf an den Kreuzungsstellen mit dem Schussfaden zu Fadeneinschnürungen, auf dem freiliegenden Teil zwischen den Schussfäden hingegen zu Fadenaufweitungen kommt (Bild 61). Ursache hierfür ist die unregelmäßige Anordnung des Wirkfadens bei konventionellen Nähwirkstoffen, die keine gleichmäßige Umschließung der Kettfäden gewährleistet. Dadurch wird eine unerwünschte fadenstrukturbedingte Dehnungsreserve erzeugt, die im Verbund die Steifigkeit reduziert. Dazu kommt, dass die Abstützung der Kett- auf den Schussfäden insbesondere bei größeren Fadenabständen zu einer über die Textillänge schwankenden Auslenkung der Kettfäden in z-Richtung führt, die sich ungünstig auf das Verbundverhalten auswirkt (LORENZ, 2008 [280]).

Die Anpassung sowohl an ebene als auch an gekrümmte oder unebene Bauteilformen, aber auch die Handhabungseigenschaften werden wesentlich durch das Verformungsverhalten beeinflusst. Dieses ist abhängig von einer Vielzahl an Faktoren und kann durch die Biegesteifigkeit, die Verschiebestabilität und das Scherverhalten jeweils nur teilweise beschrieben werden. Einen deutlichen Einfluss der Biegesteifigkeit auf das Verformungsverhalten des Bewehrungstextils ermittelten ENGLER, 2002 [91] und OFFERMANN, 2005 [288]. Die Biegeeigenschaften müssen also an die Bauteilgeometrie und den Bauteilherstellprozess angepasst werden. Für gekrümmte Oberflächen ist die Bewehrung zumindest partiell biegeschlaff oder verformbar zu gestalten, für ebene Bauteile ist meist eine höhere Biegesteifigkeit anzustreben. In Bezug auf die bautechnische Weiterverarbeitung kann verallgemeinernd ausgesagt

werden, dass eine geringere Biegesteifigkeit für die industrielle Produktion und eine höhere für die Verwendung auf einer Baustelle anzustreben ist (FRANZKE, 2003 [95]). Daraus wird offensichtlich, dass die einzustellende Biegesteifigkeit der textilen Bewehrung einen auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmten Kompromiss darstellen sollte.

In der Literatur wurde der Einfluss folgender prozessbedingter Faktoren auf die Biegesteifigkeit von Nähwirkstoffen für Betonbewehrungen nachgewiesen: Mit sinkender Stichlänge steigt die Biegesteifigkeit von zwei axialen Nähwirkstoffen nach OFFERMANN, 2005 [289] geringfügig, teilweise konnte ein derartiger Einfluss jedoch überhaupt nicht nachgewiesen werden (OFFERMANN, 2003 [287]). Etwas deutlicher bemerkbar macht sich die Art der Abbindung. Zwei axiale Nähwirkstoffe, deren Schussfäden nicht maschengerecht abgebunden wurden, weisen eine erhöhte Biegesteifigkeit auf (FRANZKE, 2003 [95], OFFERMANN, 2003 [287]). In denselben Arbeiten wurde auch der Einfluss unterschiedlicher Bindungen auf vier axiale Nähwirkstoffe untersucht. Hier zeigte sich, dass Bindungen, die eine stärkere Einschnürung der Kettfäden verursachen (z. B. RL-Trikot, gegenlegig im Vergleich zu RL-Trikot) eine höhere Biegesteifigkeit hervorrufen. Wesentlich deutlicher als die genannten prozessbedingten Faktoren wirkt sich jedoch der Auftrag einer zusätzlichen Beschichtung aus (OFFERMANN, 2005 [289]). Während der Wechsel von maschengerechter zu nicht maschengerechter Abbindung eine Steigerung der Biegesteifigkeit um etwa 25 Prozent verursacht, bewirkt schon ein geringer Anteil an Beschichtungsmasse eine Verzehnfachung der Biegesteifigkeit.

Für das Bauwesen geeignete textile Bewehrungen müssen sich neben der Anpassung an die Bauteilgeometrie auch durch angemessene Handhabungseigenschaften auszeichnen. Dazu sind im Wesentlichen eine hohe Verschiebestabilität und eine angepasste Biegesteifigkeit des Textils anzustreben (BRAMESHUBER, 2006 [7], OFFERMANN, 2005 [288]). Unter Verschiebestabilität wird hier der Widerstand der Kett- und Schussfäden gegen das Verschieben aus ihrer Position im Nähwirkstoff verstanden.

Neben einer guten Handhabbarkeit bei der Verarbeitung auf einer Baustelle (BRAMESHUBER, 2006 [7]) garantiert eine hohe Verschiebestabilität des Nähwirkstoffs zudem den Erhalt der Fadenlagenausrichtung und ist damit eine wesentliche Bedingung für die Bewahrung der Tragfähigkeit im Bauteil (OFFERMANN, 2003 [287], SCHIERZ, 2003 [164]). Jedoch ist zu beachten, dass eine Steigerung der Verschiebestabilität durch die hier betrachteten Einflussfaktoren mit einer Steigerung der Biegesteifigkeit einhergeht, die eine Kompromissfindung notwendig macht.

Ein Einfluss der Bindung auf die Verschiebestabilität konnte in bisherigen Untersuchungen nicht nachgewiesen werden (SCHIERZ, 2003 [164], WALDMANN, 2005 [178]). Eine niedrige Stichlänge oder eine nicht maschengerechte Abbindung führen hingegen zu einer Steigerung der Verschiebestabilität (SCHIERZ, 2003 [164], OFFERMANN, 2003 [287], OFFERMANN, 2005 [289]). Den entscheidenden Einfluss übt jedoch auch bei der Verschiebestabilität eine zusätzliche Beschichtung aus, mit der sich diese maßgeblich beeinflussen lässt (OFFERMANN, 2005 [289]).

5.2 Untersuchungsschwerpunkte

5.2.1 Zielgrößen

Die Auswertung der bisherigen Erkenntnisse zum Einfluss des Nähwirkprozesses auf den Textil-Beton-Verbund im vorangegangenen Kapitel lässt eine Einflussnahme des erweiterten Wirkprozesses, speziell durch die Bindung und die Fadenlagenanordnung, insbesondere auf die Bereiche Tragfähigkeit und Bewehrungsführung erwarten. Die Handhabungseigenschaften werden ganz wesentlich durch den Einfluss einer zusätzlichen Stabilisierung bestimmt, die die wirktechnischen Einflussgrößen bei weitem übertreffen. Gleichzeitig kann aus den Betrachtungen zur Beeinflussung der Tragfähigkeit von textilbewehrten Betonbauteilen durch die Bindung in Kapitel 5.1.2 der Schluss gezogen werden, dass ein Einsatz von Nähwirkstoffen mit Nadelversatz insbesondere in Verbindung mit einer zusätzlichen Stabilisierung erfolgen sollte. So folgert auch ORTLEPP, 2007 [28], dass eine nachträgliche Beschichtung zur Sicherstellung des inneren Verbundes der Filamentgarne unbedingt erforderlich ist. JESSE, 2008 [259] sieht Verbundprüfungen an nicht beschichteten Bewehrungstextilien als nicht mehr praxisgerecht an. Aus diesem Grund werden keine weiterführenden Untersuchungen zum Handhabungsverhalten im Zusammenhang mit dem erweiterten Wirkprozess durchgeführt. Dies umso mehr, als die bisherigen Untersuchungen keinen deutlichen Einfluss der Bindung auf diesen Bereich nachweisen konnten.

In Bezug auf die Handhabung können bei Verwendung des erweiterten Wirkprozesses jedoch zumindest Vorteile darin gesehen werden, dass bei symmetrischer Lagenanordnung der Form Kette-Schuss-Kette die Verwendung insbesondere auf Baustellen vereinfacht wird, da die Unterscheidung von Ober- und Unterseite des Bewehrungstextils, die bisher beim Einbau beachtet werden muss, entfallen kann.

In Bezug auf die Bewehrungsführung ergeben sich weiterhin mögliche Vorteile bei Verwendung des erweiterten Nähwirkprozesses durch die Beeinflussung der Fadenlagenanordnung. Dadurch, dass zwei Kettfäden geringerer Feinheit übereinander angeordnet als Ersatz für einen einzelnen, dickeren Kettfaden wirken, kann entweder eine größere Menge an Bewehrungsfadenmaterial bei gleicher Öffnungsweite eingesetzt oder bei gleicher Bewehrungsmenge die Öffnungsweite vergrößert werden. Eine Verringerung der unregelmäßigen Auslenkung der Kettfäden in z-Richtung ist auf diesem Wege ebenfalls denkbar. Weiterhin kann dieser Effekt unter Umständen durch die bindungsbedingte Kettfadenkompression zur Verringerung der Fadenaufweitung noch unterstützt werden (Bild 62). Es entsteht eine auf beiden Seiten des Nähwirkstoffs gleichmäßige Verbundoberfläche zum Beton.

Im Mittelpunkt der weiteren Untersuchungen steht weiterhin die Nutzung des Wirkfadens als mechanische Verankerung durch gezielten Einsatz des Nadelversatzes in Verbindung mit geeigneten zusätzlichen Stabilisierungsmaßnahmen. Als Schlussfolgerung dessen werden die in Tabelle 6 dargestellten Zielgrößen für die Versuchsplanung festgelegt.

Die Beeinflussung der Tragfähigkeit des Textilbetons wird mit zwei Versuchsmethoden betrachtet, die einen Aufschluss über die Einflüsse der textilen Bewehrung sowohl auf das

Spannungs-Dehnungs-Verhalten eines als Dehnkörper bezeichneten Textilbeton-Probekörpers als auch auf die Festigkeit des Verbundes zwischen Textilbewehrung und Beton geben können. Der gestreckte Verlauf des Kettfadens im Nähwirkstoff sowie der Garnquerschnitt sind Zielgrößen für die Beschreibung der Bewehrungsführung.

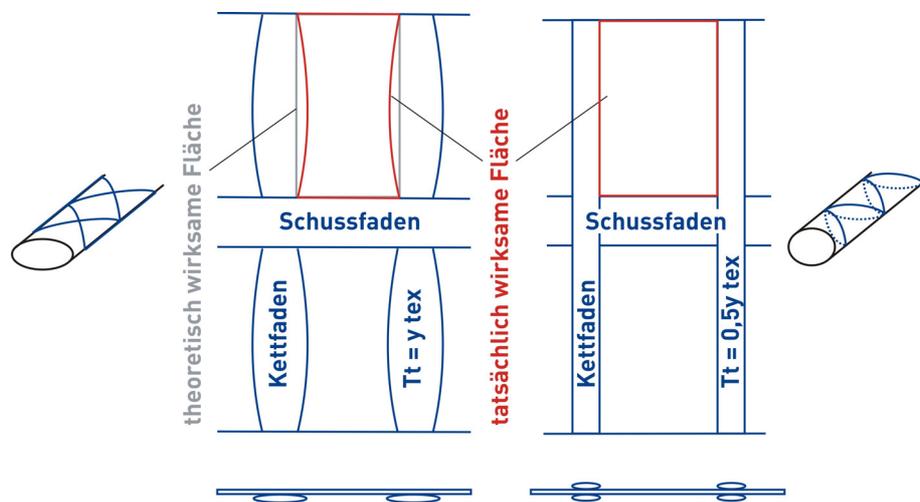


Bild 62: mögliche Vergleichsmäßigung des Kettfadenquerschnitts und Vergrößerung der wirksamen Fläche durch erweiterten (rechts) gegenüber dem konventionellen (links) Wirkprozess

Tabelle 6: Zielgrößen und Prüfverfahren

Tragfähigkeit	Bewehrungsführung
Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Bauteils Dehnkörperversuch nach JESSE, 2004 [17]	Fadenverlauf im Nähwirkstoff optische Bewertung des Nähwirkstoff-Längsschnitts
Verbundwirkung Beton-Textil Fadenauszugversuch nach LORENZ, 2008 [280]	optische Bewertung des Kettfadenquerschnitts
Zugfestigkeit Garn Zugversuch nach ABDKADER, 2004 [1]	

5.2.2 Einflussgrößen

Für die Versuchsplanung werden aus den zur Verfügung stehenden Einflussgrößen des Nähwirkprozesses die in Tabelle 7 dargestellten Steuerfaktoren ausgewählt, während die übrigen Parameter im Versuch konstant bleiben (Tabelle 8). Jedem Steuerfaktor werden mehrere Faktorstufen zugeordnet, das sind diejenigen Werte, die der Faktor während des Versuches annehmen kann.

Tabelle 7: Faktoren und Faktorstufen

Faktoren	Faktorstufen
1) Fadenlagenanzahl/-anordnung und Bindung	Stufe 1: 2-lagig [0/90], RL-Doppel-Trikot, gegenlegig Stufe 2: 2-lagig [0/90], RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet Stufe 3: 3-lagig [0/90/0], RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet
2) Kettfaden (Faserstoff, Fein- heit)	Stufe 1: CF 800 tex (TEN-CF800) Stufe 2: CF 400 tex (TEN-CF400)

Tabelle 8: unveränderliche Einflussgrößen

Einflussgröße	Wert
Textilmaschine	Karl Mayer Malimo 14022 P2-PS (E) (mit Nadelbarrenversatzeinrichtung)
Schussfaden	AR-GF 640 tex (VET-ARG640)
Schussabstand	18 mm
Kettabstand	7,2 mm
Stichlänge	2,3 mm
Beschichtung	wässrige Styrol-Butadien-Dispersion ⁴ (30 % Feststoffanteil in der Dispersion; 23,5 % Masseanteil im Nähwirkstoff)

Faktor 1 fasst die Einflüsse Fadenlagenanzahl und Bindung zusammen. Verglichen wird der bisher übliche zweilagige Aufbau eines zweiaxialen Fadenlagen-Nähwirkstoffs mit einem mittellagensymmetrischen dreilagigen Aufbau ebenfalls in zweiaxialer Ausrichtung. Ziel des Vergleiches ist die Bestimmung des Einflusses der Lagenanordnung insbesondere auf das Verbundverhalten des Textilbetons. Im engen Zusammenhang mit der Fadenlagenanzahl

⁴ Diese Beschichtung wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 528 im Teilprojekt A5 (Leitung Dr. E. Mäder, *Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V.*) entwickelt und bereitgestellt.

steht die Bindung, da sich der dreilagige Aufbau nur in Verbindung mit dem Versatz der Nadelbarre realisieren lässt. Verglichen wird die am häufigsten bei konventionellen Fadenlagen-Nähwirkstoffen zur Betonbewehrung eingesetzte Bindung RL-Doppel-Trikot, gelegentlich mit der Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet. Letztere ist durch ihren kontinuierlichen Fadenverlauf um die Kettfäden herum (siehe Bild 62, rechts) gut zur Abbindeung von gitterförmigen Fadenlagen-Nähwirkstoffen geeignet. Durch diesen Vergleich soll der Einfluss auf die Bauteilfestigkeit (Dehnkörperversuch und Verbundversuch) der neuen Bindung im Vergleich mit der konventionellen Bindung ermittelt werden. Bei dem dreilagigen Aufbau [0/90/0] kommen Kettfäden mit der halben Feinheit gegenüber den beim zweilagigen Aufbau [0/90] verwendeten zum Einsatz (Faktor 2). Eine Übersicht der verwendeten Fadenmaterialien zeigen Tabelle 9 und Tabelle 10, alle Versuchsvarianten finden sich in Tabelle 11.

Tabelle 9: Fadenmaterialien für Grundbahn und Wirkfaden

Bezeichnung	Hersteller	kommerzielle Bezeichnung	Material	Aufmachung	Nennfeinheit [tex]
Material für Grundbahn:					
VET-ARG640	OCV Germany GmbH	Cem-FIL Direct Roving LTR ARC 640 5325	AR-GF	Filamentgarn	640
TEN-CF800	TohoTenax Europe GmbH	Tenax HTS 5631 f12000 t 0	CF	Filamentgarn	800
TEN-CF400	TohoTenax Europe GmbH	Tenax HTA 40 E13	CF	Filamentgarn	400
Material für Wirkfaden:					
CHE-PP11	Chemosvit Fibrochem a.s.	Prolenset FX 110/33X1/75	PP	texturiertes Filamentgarn	11

5.2.3 Experimentelle Durchführung

5.2.3.1 *Fertigung der textilen Bewehrung*

Die Fertigung der Proben 5-1 bis 5-3 mit dem Standard-Wirkfaden CHE-PP11 auf der Prototyp-Maschine bereitete keine Probleme. Alle Muster konnten mit derselben Produktionsgeschwindigkeit von 0,9 m²/min (400 min⁻¹ Hauptwellendrehzahl) gefertigt werden. Eine Übersicht der gefertigten Proben findet sich im Anhang 10.6. Als aufwändiger erwies sich erwartungsgemäß die Einstellung eines einheitlichen Beschichtungsgehalts in allen Proben. Dieser ist neben den Maschineneinstellungen sehr stark von den Parametern des Nähwirkstoffs abhängig. So führen bereits kleine Änderungen in der Ausführung der Grundbahn (Faserstoff, Feinheit, Fadenabstände) und der Wirkfadenbindung (Bindungstyp, Stichlänge

und Wirkfadenspannung) zu deutlich abweichenden Beschichtungsergebnissen. Die Proben wurden mit einem einheitlichen Beschichtungsanteil von 23,5 Prozent (Masse) versehen.

Tabelle 10: Kennwerte relevanter Garne

Garn	Feinheit [tex]	Höchstzugkraft [N]	Dehnung [%]	feinheitsbezogene Höchstzugkraft [cN/tex]
TEN-CF800	807	673	0,84	83,4
TEN-CF400	405	296	0,73	73,2

Tabelle 11: Versuchsplan

Probennummer	Fadenlagen	Bindung	Kettfaden
5-1 (NWM4-002-09-b1) ⁵	[0/90]	RL-Doppel-Trikot, gegenlegig	CF 800 tex (TEN-CF800)
5-2 (NWM4-003-09-b1)	[0/90]	RL-Trikot, Basisver- satz 1, gleichgerichtet	CF 800 tex (TEN-CF800)
5-3 (NWM4-004-09-b1)	[0/90/0]	RL-Trikot, Basisver- satz 1, gleichgerichtet	CF 400 tex (TEN-CF400)

5.2.3.2 Herstellung der Textilbeton-Probekörper

Die Herstellung der Textilbeton-Probekörper erfolgte im *Otto-Mohr-Labor des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Dresden*. Die textilbewehrten Platten mit den Abmessungen 1200 mm x 700 mm x 10 mm werden mit Hilfe des Laminierverfahrens hergestellt. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit von Dehnkörper- und Verbundversuch werden die Proben für beide Versuche aus derselben Betonplatte gefertigt. Die Zusammensetzung und Eigenschaften der Betonmatrix sind in LORENZ, HAUSDING ET AL., 2009 [281] näher beschrieben. Nach dem Auftragen einer ersten Feinbetonschicht wird die textile Bewehrungslage in die Matrix eingearbeitet, anschließend werden Beton und Bewehrung abwechselnd lagenweise in die eingölte Plattenschalung eingebracht. Nach dem Einbringen einer Deckschicht erfolgt das Abziehen der Oberfläche. Direkt nach der Herstellung werden die Probekörper für drei Tage bei einer Temperatur von 20 °C gegen Austrocknen geschützt in der

⁵ interne Bezeichnung im SFB 528, nur zur Information

Schalung gelagert. Nach dem Ausschalen folgt eine Aufbewahrung bis zum siebenten Tag im Wasser. Anschließend werden die Proben bis zum Prüftermin nach 28 Tagen in der Klimakammer bei 20 °C und 65 Prozent relativer Luftfeuchte aufbewahrt (LORENZ, 2008 [280]).

5.2.3.3 Prüfverfahren

Tabelle 12 gibt einen Überblick über die zur Kennwertermittlung herangezogenen Prüfverfahren. Diese wurden im Rahmen des *Sonderforschungsbereichs 528* erarbeitet und stützen sich teilweise auf die angegebenen Normen. Die Prüfparameter sind im Anhang 10.4 dargestellt.

Tabelle 12: Übersicht Prüfverfahren

Ebene	Prüfung	Norm
Faden	Feinheitsbestimmung Zugversuch	DIN 53830 [204] ITM (interne Prüfvorschrift in Anlehnung an ISO 3341 [209], DIN-Norm in Vorbereitung)
textile Fläche	Fadenquerschnitt Fadenauslenkung	-- --
Textilbeton	Dehnkörperversuch Fadenzugversuch	SFB 528 (JESSE, 2004 [17]) SFB 528 (LORENZ, 2008 [280])

Untersuchungen am Faden

Als Grundlage für die Untersuchungen des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens der Filamentgarne dient ISO 3341 [209]. Eine ausgehend von diesem Standard durch ABDKADER, 2004 [1] am *ITM* modifizierte Variante der Prüfmethode unter Einsatz von Umschlingungsklemmen ist insbesondere für die Ermittlung von Festigkeiten und Bruchdehnungen von querdruckempfindlichen Filamentgarnen geeignet. Vorteile dieser Versuchsanordnung sind die hohe Sensibilität, das Umgehen zeitaufwendiger Probenvorbereitungen, die Vermeidbarkeit von Klemmrutschen und Klemmbrüchen, die Möglichkeit der direkten Dehnungsmessung, die hohe Versuchsanzahl sowie eine geringe Kennwertstreuung bei guter Reproduzierbarkeit.

Untersuchungen am Nähwirkstoff

Die Bestimmung des Einflusses des Nähwirkprozesses auf den Querschnitt des Kettfadens erfolgt anhand von Schliffbildern des Fadenquerschnitts. Dazu wird der Faden in Epoxid eingebettet und mit einem Auflichtmikroskop eine digitale Fotografie erstellt, die zur Auswertung herangezogen wird. JESSE, 2004 [17] beschreibt ausführlich den Stand der Forschung zur Bestimmung von Querschnittsfläche und Umfang von in Beton eingebetteten Glasfilamentgarnen und leitet daraus eine eigene Vorgehensweise ab. Grundlegend ist hierbei die exakte Bestimmung der Randfläche des Fadens, die im Kontakt mit der Betonmatrix steht. Die Auswertung der Digitalbilder ist aufwändig und wird von einer Vielzahl an

Faktoren bestimmt, die sich aus der Probenherstellung, dem Mikroskop, der fotografischen Aufnahme und der Bildauswertungssoftware ergeben. Aus folgenden Gründen soll hier eine vereinfachte Auswertung vorgenommen werden: Es ist bekannt, dass der Fadenquerschnitt über die Textillänge schwankt. Die Probenherstellung ist jedoch sehr zeitaufwändig und kann nur eine Stichprobe liefern. Die Herstellung einer großen Anzahl Proben für eine statistisch abgesicherte Auswertung ist nicht umsetzbar. Weiterhin enthält der Querschnitt der hier untersuchten Proben noch das Beschichtungsmittel, was zu einer Vergrößerung des Fadenquerschnitts führt. Eine optische Unterscheidung des Beschichtungsmittels, des zur Probenherstellung verwendeten Epoxidharzes und der Fasern ist derzeit nicht möglich. Entsprechende Untersuchungsmethoden befinden sich derzeit am *ITM* in der Entwicklung. Schließlich entspricht der Querschnitt des Fadens im Textil nicht notwendigerweise dem Fadenquerschnitt im Beton, da es bei der Probenherstellung am Textil zu Faserverschiebungen kommen kann. Aus diesem Grund wird hier eine vereinfachte Betrachtung genutzt, die nichtsdestotrotz eine gute Bewertung des Fadenquerschnitts ermöglicht.

Aus den Querschnittsbildern wird die Abmessung des Kettfadens waagerechter (*a*) und in senkrechter (*b*) Richtung bestimmt (Bild 63). Das Verhältnis dieser beiden Größen dient als Anhaltspunkt für die Form des Querschnitts. Je kleiner das Verhältnis, desto mehr nähert sich die Querschnittsform einem Kreis (bei einer elliptischen Grundform) beziehungsweise einem Quadrat (bei einer rechteckigen Grundform) an.

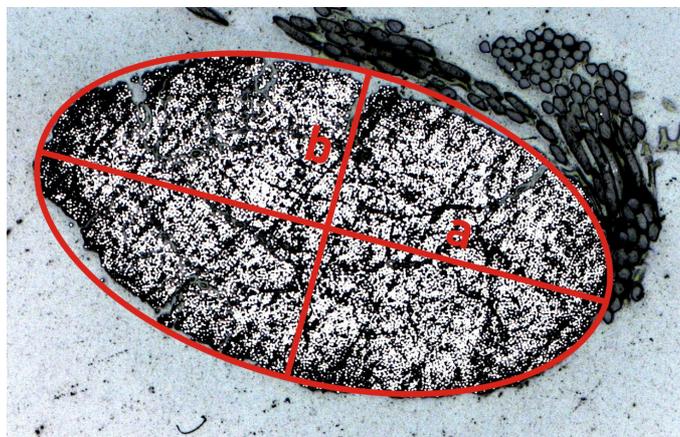


Bild 63: Vermessung Kettfadenquerschnitt (schematisch)

Werden die Fadenquerschnitte näherungsweise als Ellipse betrachtet, so können Anhaltswerte für den Fadenumfang und die Fadenquerschnittsfläche bestimmt werden. Die Fläche einer Ellipse ergibt sich zu:

$$A = \pi ab$$

Gleichung 4

Der Umfang einer Ellipse kann nicht exakt durch elementare Funktionen, sondern nur durch das elliptische Integral angegeben werden. Hier soll der Umfang nach der Näherungsformel von RAMANUJAN bestimmt werden [249]:

$$U \approx \pi(a+b) \left(1 + \frac{3\lambda^2}{10 + \sqrt{4 - 3\lambda^2}} \right)$$

Gleichung 5

Dabei gilt:

$$\lambda = \frac{a-b}{a+b}$$

Der tatsächliche Fadenumfang ist größer, da er sich aus der Gesamtlänge aller Kreissegmente ergibt, die von den Randfilamenten mit Kontakt zur Betonmatrix gebildet werden. Für die hier betrachteten Querschnittsveränderungen des Fadens ist die exakte Bestimmung des tatsächlichen Fadenumfangs jedoch nicht relevant.

Zur Ermittlung der Auslenkung der Kettfäden aus der gestreckten Lage existiert derzeit kein etabliertes Prüfverfahren. Im Rahmen des *Sonderforschungsbereichs 528* wird an der Entwicklung eines einfach zu handhabenden Verfahrens zur Bestimmung des Ausmaßes dieser Auslenkung gearbeitet. Schwierigkeiten ergeben sich hierbei insbesondere aus der Überlagerung der Textilkrümmung, die aus der Aufwicklung auf einer zylindrischen Papphülse resultiert und der eigentlichen Kettfadenauslenkung sowie aus der durch den Wirkfäden unregelmäßigen Oberfläche des Nähwirkstoffs. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Einschätzung der Auslenkung anhand von Querschnitten des Nähwirkstoffs. Diese werden digital fotografiert und in einem Bildbearbeitungsprogramm vermessen. Die durch den Wickelvorgang hervorgerufene Krümmung wird zuvor entfernt.

Untersuchungen am Textil-Beton-Verbund

Für die experimentelle Bestimmung des Verbundverhaltens zwischen Betonmatrix und Textilbewehrung wird der Fadenauszugsversuch nach LORENZ, 2008 [280] genutzt. Es kommt der in Bild 64 dargestellte Probekörper zum Einsatz. Nach dem Riss des Betons im Bereich der durch entsprechende Sägeschnitte festgelegten Sollbruchstelle kann das charakteristische Verbundverhalten durch die Messung der jeweiligen Kraft-Rissöffnungs-Beziehung bestimmt werden. Mit dieser Probengeometrie ist eine gezielte Prüfung der Verbundeigenschaften für beschichtete textile Bewehrungsstrukturen möglich. In Folge der vollständigen Einbettung in den umgebenden Feinbeton kann eine direkte Krafteinleitung in das Multifilamentgarn über den Verbund mit der Matrix erreicht werden. Bei der Zugprüfung erfolgt die Krafteinleitung in den Probekörper im oberen Auszugsbereich über eine Klemmvorrichtung, welche gelenkig an eine weggesteuerte Zugprüfmaschine angeschlossen ist (Bild 65).

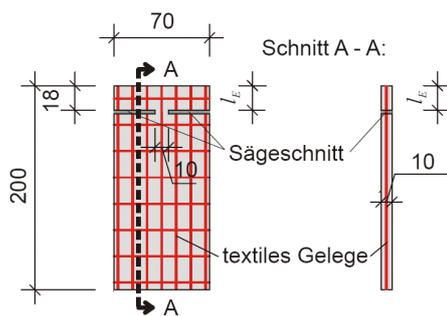


Bild 64: Textilbeton-Probekörper für Verbundversuch [280]

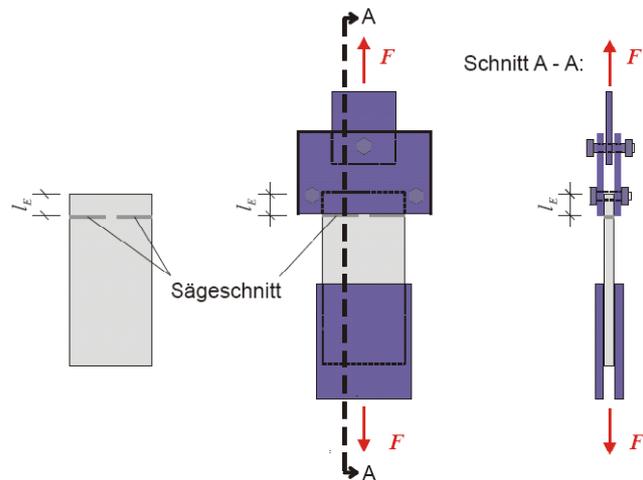


Bild 65: Versuchsaufbau für Verbundversuch [280]

Die Prüfung von Dehnkörpern mit den Abmessungen 500 mm x 100 mm x 8 mm erfolgt im von JESSE, 2004 [17] für Textilbetonproben entwickelten Zugversuch (Bild 66). Der Versuch dient zur Ermittlung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens.



Bild 66: Zugversuch am Dehnkörper

5.3 Ergebnisse und deren Bewertung⁶

5.3.1 Beeinflussung der Kettfadengeometrie durch den Nähwirkprozess

Stichproben des Kettfadenquerschnitts wurden für jede Nähwirkstoff-Variante jeweils am Kreuzungspunkt mit dem Schussfaden und in der Mitte zwischen zwei Schussfäden entnommen. Für die Variante 5-3 wurden die Abmessungen für die beiden übereinander liegen-

⁶ Die Ergebnisse in diesem Abschnitt entstanden im Rahmen des *Sonderforschungsbereichs 528* in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten B1 (Leitung Dr. Frank Jesse) und B5 (Leitung Dr. Regine Orlepp, Projektbearbeitung Enrico Lorenz, M. Sc.), *Institut für Massivbau, TU Dresden*.

den Kettfäden summarisch bestimmt, da sich die Fäden zwischen zwei Schussfäden optisch nicht unterscheiden lassen. Tabelle 13 zeigt die aus den Schliffbildern bestimmten Abmessungen der Kettfadenquerschnitte unter Angabe der Näherungswerte für die Querschnittsfläche A und den Umfang U. Die theoretische Querschnittsfläche für den Faden kann aus der Dichte und der Feinheit bestimmt werden:

$$A = Tt/\rho.$$

Gleichung 6

Für das hier verwendete Carbonfilamentgarn TEN-CF800 mit einer Feinheit von 800 tex ergibt sich so eine theoretische Querschnittsfläche von 0,47 mm², für das Garn TEN-CF400 mit der Feinheit 400 tex von 0,24 mm².

Tabelle 13: Abmessungen der Kettfadenquerschnitte

Probe	Messpunkt	a [mm]	b [mm]	A [mm ²]	U [mm]
5-1	Kreuzung	0,81	0,25	0,64	3,58
5-1	Mitte	0,83	0,26	0,69	3,67
5-2	Kreuzung	0,67	0,37	0,77	3,33
5-2	Mitte	0,72	0,39	0,89	3,58
5-3 ⁷	Kreuzung	0,59	0,33	0,61	2,95
5-3 ⁷	Mitte	0,59	0,45	0,84	3,29

Die Variante 5-1 mit der Bindung RL-Doppel-Trikot, gegenlegig weist einen flachen Querschnitt mit einem großen Verhältnis a/b auf (Bild 67). Am Kreuzungspunkt mit dem Schussfaden ist die Querschnittsfläche von regelmäßiger Form, mit einer elliptischen Außenseite und einer abgeflachten, dem Schussfaden zugewandten Innenseite (Bild 68). Zwischen den Schussfäden ändern sich die Abmessungen für diese Variante nur geringfügig. Da der Wirkfaden jedoch einseitig angeordnet ist, weist der Kettfaden im mittleren Abschnitt eine sehr ungleichmäßige Querschnittsform auf.

Die Verwendung der Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1 (Variante 5-2) führt zu einem deutlich kompakteren, elliptischen Querschnitt sowohl am Kreuzungspunkt mit dem Schussfaden, als auch zwischen den Schussfäden (Bild 69). Dies trifft ebenso auf die Variante 5-3 zu, bei der zwei Kettfäden übereinander angeordnet sind (Bild 70). Hierbei ergeben sich jedoch sichtbare Unterschiede zwischen der Kreuzungsstelle, wo die beiden Kettfäden leicht abgeplattet werden und der Zwischenstelle, an der die Kettfäden am stärksten verdichtet sind.

⁷ Abmessungen für zwei Kettfäden TEN-CF400

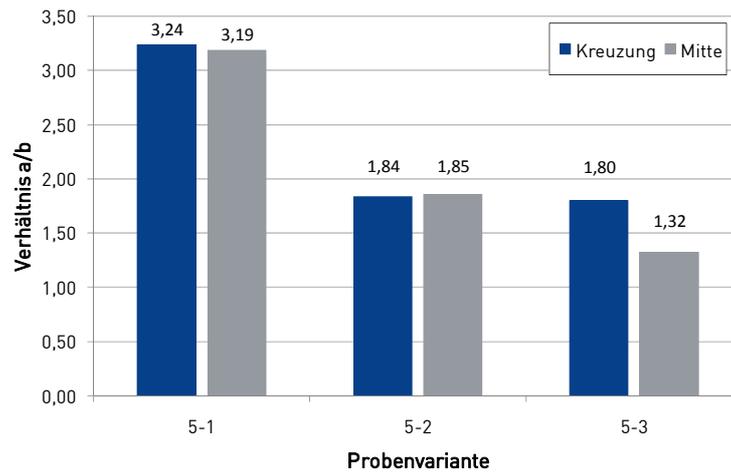


Bild 67: Einfluss der Herstellung des Nähwirkstoffs auf den Kettfadenquerschnitt

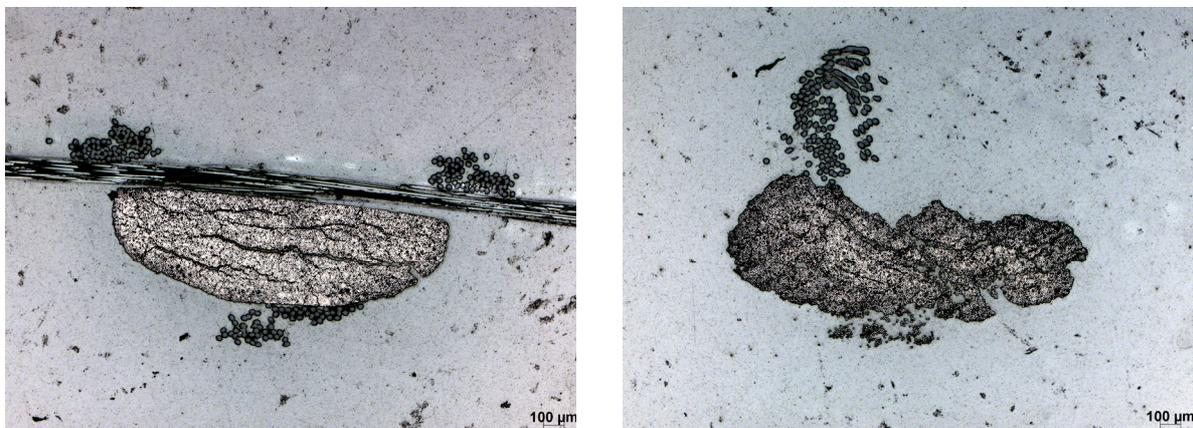


Bild 68: Querschnitt Kettfaden (5-1, TEN-CF800, Bindung: RL-Doppel-Trikot, gegenlegig), links: Kreuzungspunkt mit Schussfaden, rechts: zwischen zwei Schussfäden

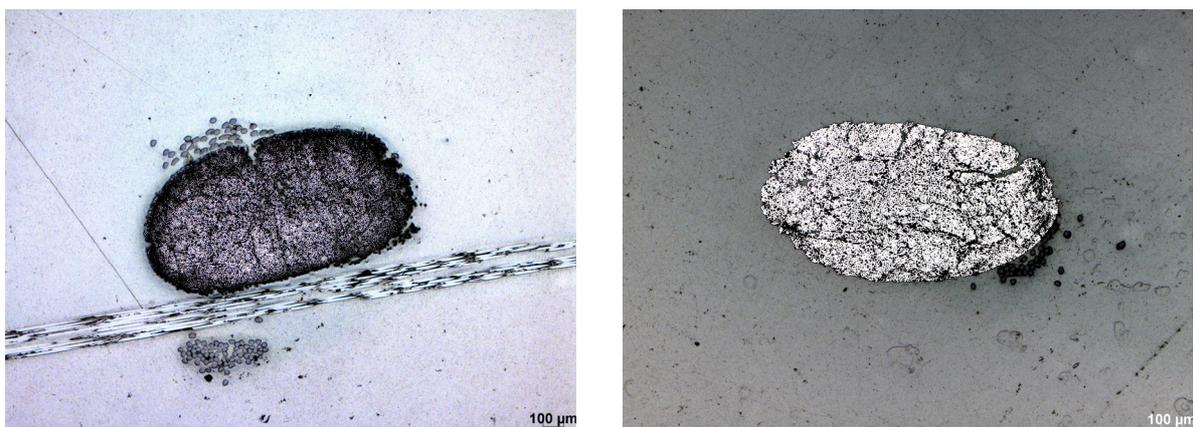


Bild 69: Querschnitt Kettfaden (5-2, TEN-CF800, Bindung: RL-Trikot, BV1, gleichgerichtet), links: Kreuzungspunkt mit Schussfaden, rechts: zwischen zwei Schussfäden

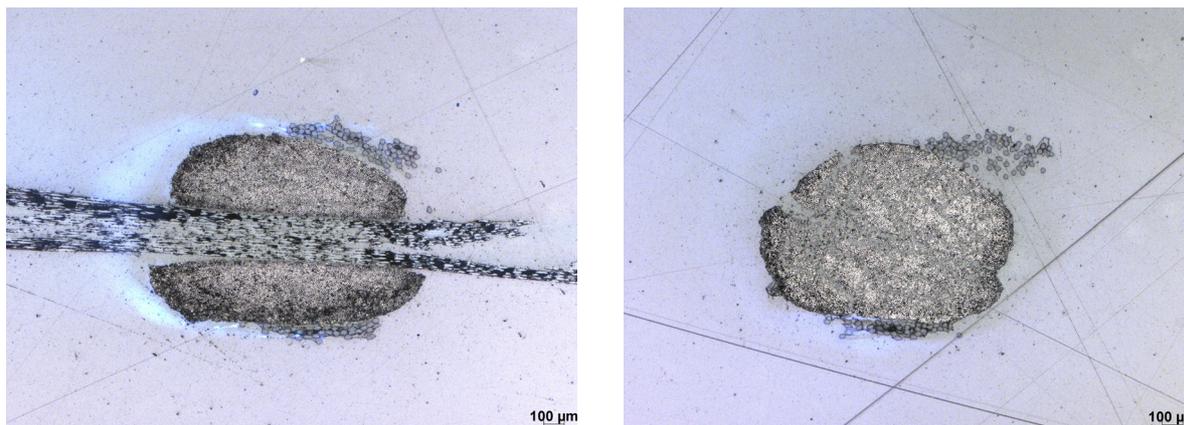


Bild 70: Querschnitt Kettfaden (5-3, TEN-CF400, Bindung: RL-Trikot, BV1, gleichgerichtet), links: Kreuzungspunkt mit Schussfaden, rechts: zwischen zwei Schussfäden

Es zeigt sich, dass die Auslenkung der Kettfäden stark durch die Bindung und die Lagenanordnung beeinflusst wird. Variante 5-1 weist das für konventionelle Nähwirkstoffe bekannte Bild einer deutlichen Auslenkung des Kettfadens und der Konzentration des Wirkfadens auf einer Seite der Textilbewehrung auf (Bild 71, oben). Durch Verwendung des erweiterten Wirkprozesses und der Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1 (Variante 5-2) kann die Kettfadenauslenkung reduziert werden, der Wirkfaden ist gleichmäßig um den Kettfaden herum angeordnet (Bild 71, Mitte). Durch Anordnung zweier Kettfäden auf den Außenseiten des Nähwirkstoffs (Variante 5-3) wird die Kettfadenauslenkung wirksam vermieden (Bild 71, unten).

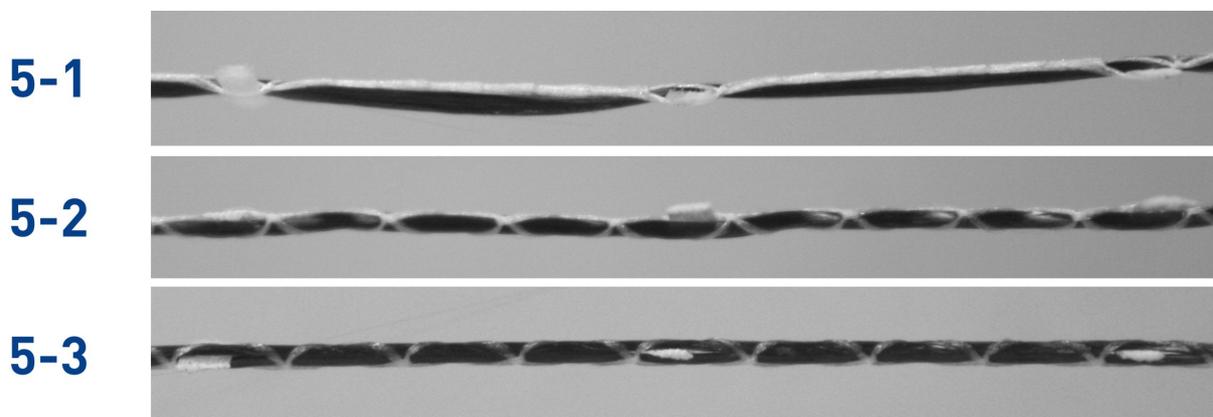


Bild 71: Seitenansicht Nähwirkstoffvarianten in Kettrichtung

Die Kettfadenauslenkung ruft im Textilbeton Querkzugkräfte hervor (Bild 72). Diese entwickeln sich in Abhängigkeit vom Ausmaß der Kettfadenauslenkung proportional zur Garnzugkraft in der Ebene der textilen Bewehrung. Diese Querkzugkräfte können zum lokalen Ablösen der Betondeckung im Bereich des Schussfadens führen.

Anhand der gemessenen Kettfadenauslenkung können nach LORENZ, 2009 [282] die daraus resultierenden Querkzugkräfte für beliebige Garnzugkräfte berechnet werden. Dazu wird der Verlauf des Kettfadens durch ein Polynom höherer Ordnung abgebildet und die Garnzugkraft

entsprechend des Fadenverlaufs in einem Kräfteparallelogramm zerlegt, woraus sich die Querkzugkraft in jedem Punkt ergibt.



Bild 72: schematische Darstellung der durch die Kettfadenauslenkung hervorgerufenen Querkzugkräfte [281]

Die resultierenden, über die Garnlänge gemittelten Querkzugspannungen für eine Garnzugkraft von 1200 N sind in Bild 73 vergleichend gegenübergestellt. Während bei konventioneller Herstellung der Nähwirkstoffe mit der Bindung RL-Trikot, gegenlegig aufgrund der einseitigen Anordnung der Wirkfäden mittlere Spannungen von 5,5 N/mm² auftreten, ist bei Verwendung beider Varianten nach dem erweiterten Wirkprozess eine deutliche Verringerung der wirkenden Querkzugspannungen erkennbar. Werden die durch die Kettfadenauslenkung hervorgerufenen Querkzugspannungen mit den aus dem Verbund resultierenden Querkzugspannungen summiert, so ergibt sich die delaminationsverursachende Querbelastung. Diese kann der in einem separaten Versuch ermittelten Haftzugfestigkeit, also dem Widerstand des Verbundes gegen Delamination, gegenübergestellt werden (Bild 74).

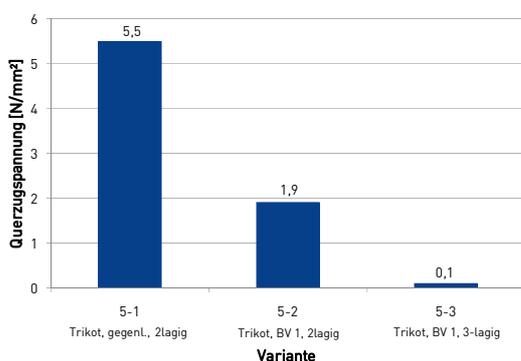


Bild 73: Vergleich der mittleren Querkzugspannungen

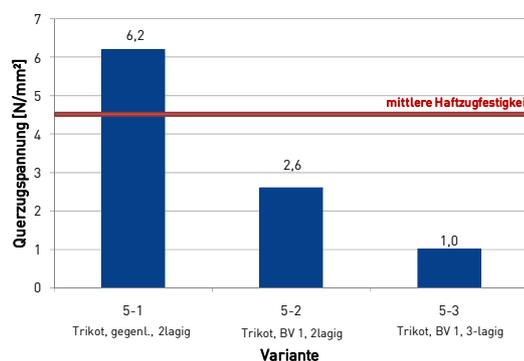


Bild 74: Vergleich der summierten Querkzugbeanspruchungen

Es ist demnach für die Variante 5-1 bei Garnzugkräften von etwa 1200 N und einer Aktivierung der maximalen Verbundkräfte aus äußerem Verbund mit Delaminationsversagen beziehungsweise einer Längsrisssbildung in der Ebene der textilen Bewehrung zu rechnen. Zusätzlich sind die lokal erhöhten Querkzugspannungen aufgrund der kleinen Krümmungsradien im Bereich der Schussfäden zu beachten, in deren Folge besonders im Bereich der äußeren Bewehrungslagen bei höheren Zugbeanspruchungen lokale Abplatzungen der Betondeckung auftreten können (LORENZ, HAUSDING ET AL., 2009 [281]).

5.3.2 Einfluss des Flächenbildungsverfahrens auf den Verbund

Die zur Ermittlung des Verbundverhaltens durchgeführten Fadenzugversuche ergeben mittlere Auszugskurven, welche die Ergebnisse von zehn Einzelmessungen widerspiegeln

(Bild 75). Die bei den gewählten Einbindelängen von 18 mm gemessenen charakteristischen Fadenauszugswiderstände werden aufgrund gleicher Dehnsteifigkeiten und Einbindelängen der untersuchten Textilien vereinfacht als Schubfluss τ in N/mm über die im Versuch gemessene Rissöffnung w aufgetragen [281]. Der Schubfluss ist der Quotient aus der im Versuch messtechnisch bestimmten Zugkraft und der bekannten Einbindelänge des Textils.

Bei Rissweiten von etwa 0,1 bis 0,2 mm wird der Haftverbund zwischen der äußeren Hülle des beschichteten Kettfadens und der Betonmatrix überwunden. Der Faden beginnt zu gleiten. Nach einem kurzen Abfall des Auszugswiderstandes schließt sich daran ein nochmaliger Anstieg der gemessenen Last-Verformungs-Kurve an. Er beruht auf der Reibung zwischen dem Faden und der Oberfläche des Betonkanals, in dem dieser liegt. Der Anstieg ist typisch für beschichtete Bewehrungstextilien und in seiner Größe abhängig vom Beschichtungsgehalt im Textil und von der Textilgeometrie, bei konventionellen Nähwirkstoffen insbesondere dem Ausmaß der Kettfadenauslenkung. Aufgrund gleicher Beschichtungsgehalte sowie in Folge der vergleichbaren Verbundoberfläche sind die gemessenen Anstiege im Haftverbundbereich der in Bild 75 dargestellten Auszugskurven nahezu identisch. Während die Höchstwerte der Auszugskräfte der Proben 5-1 und 5-2 ähnliche Werte von etwa 9 N/mm erreichen, kann bei den symmetrischen Proben 5-3 ein deutlich höherer Verbundwiderstand von durchschnittlich 12 N/mm gemessen werden. Die Ursache dafür liegt darin, dass der quer zur Belastungsrichtung liegende Schussfaden bei der dreilagigen Variante 5-3 zwischen den beiden Kettfäden fixiert ist und damit keine Kontaktfläche zum Beton überdeckt, wie es bei den zweilagigen Varianten der Fall ist. Im weiteren Kurvenverlauf weisen die beiden Varianten nach dem erweiterten Wirkprozess deutliche höhere Auszugskräfte auf, wahrscheinlich begründet durch die reibungserhöhende Wirkung des regelmäßig um den Kettfaden verlaufenden Wirkfadens. Demgegenüber führt die stärkere Kettfadenauslenkung der Probe 5-1 nicht zu einer der durch die Rippenwirkung verursachten Reibkraft vergleichbaren Steigerung der Auszugskraft.

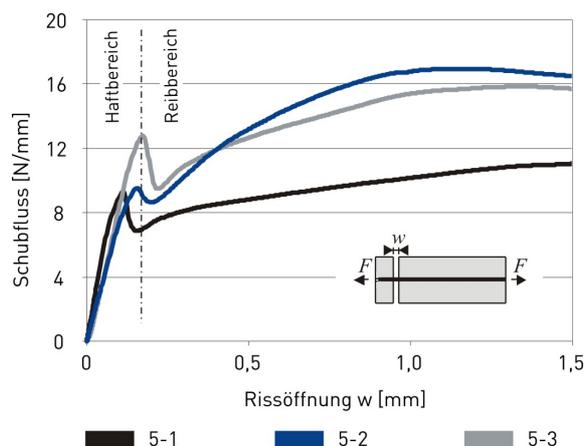


Bild 75: Ergebnisse der Verbundversuche [281]

Die Dehnkörperversuche wurden jeweils mit zwei und drei textilen Bewehrungslagen im Betonprüfkörper ausgeführt. Den Spannungs-Dehnungsverlauf für diese Prüfungen zeigt Bild 76. Gegenüber dem konventionellen Nähwirkstoff weisen die nach dem erweiterten

Verfahren hergestellten Proben eine erhöhte Steifigkeit auf. Als bedeutsam ist weiterhin festzuhalten, dass bei der Prüfung der Variante 5-1 eine starke Zerstörung der Betonstruktur mit Abplatzungen im Schussfadensbereich beim Erreichen der Bruchfestigkeit sichtbar ist (Bild 77). Im Gegensatz dazu konnte bei den nach dem erweiterten Wirkprozess hergestellten Nähwirkstoffen eine Längsrisssbildung in der Garnebene des Prüfkörpers vermieden werden. Während bei der Variante 5-2 in Folge der bereits deutlich reduzierten Kettfadenauslenkungen nur noch geringfügige Rissbildungen im Bereich des Schussfadens erkennbar sind, zeigt sich bei Variante 5-3 ein komplett spaltrissfreier Betonkörper. Dies spiegelt sich auch in der geradlinig verlaufenden Spannungs-Dehnungs-Kurve für diese Probe wieder, während die Kurven der anderen Varianten Sprünge zeigen, welche die Zeitpunkte der Abplatzungen markieren. Die Bruchfestigkeiten der Varianten 5-1 und 5-2 einerseits sowie 5-3 andererseits sind aufgrund der unterschiedlichen Garnfestigkeiten (siehe Tabelle 10) nicht direkt vergleichbar. Die Festigkeit von zwei Garnen TEN-CF400 liegt um etwa zwölf Prozent unter der eines Garnes TEN-CF800. Aus diesem Grund werden für die Auswertung die Verbundfestigkeiten auf die Garnfestigkeiten bezogen (Tabelle 14). Es zeigt sich, dass bei den Proben mit zwei Bewehrungslagen die Variante 5-1 die höchste und die Variante 5-3 die niedrigste Festigkeit aufweisen. Bei den dreilagigen Proben liegen 5-1 und 5-3 gleichauf, während Variante 5-2 die höchste Festigkeit zeigt.

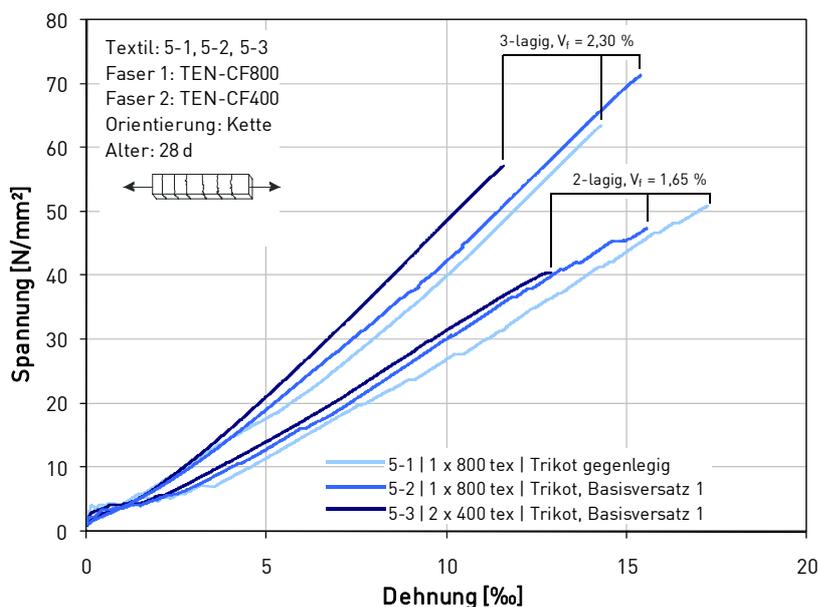


Bild 76: Ergebnisse Dehnkörperversuch [281]

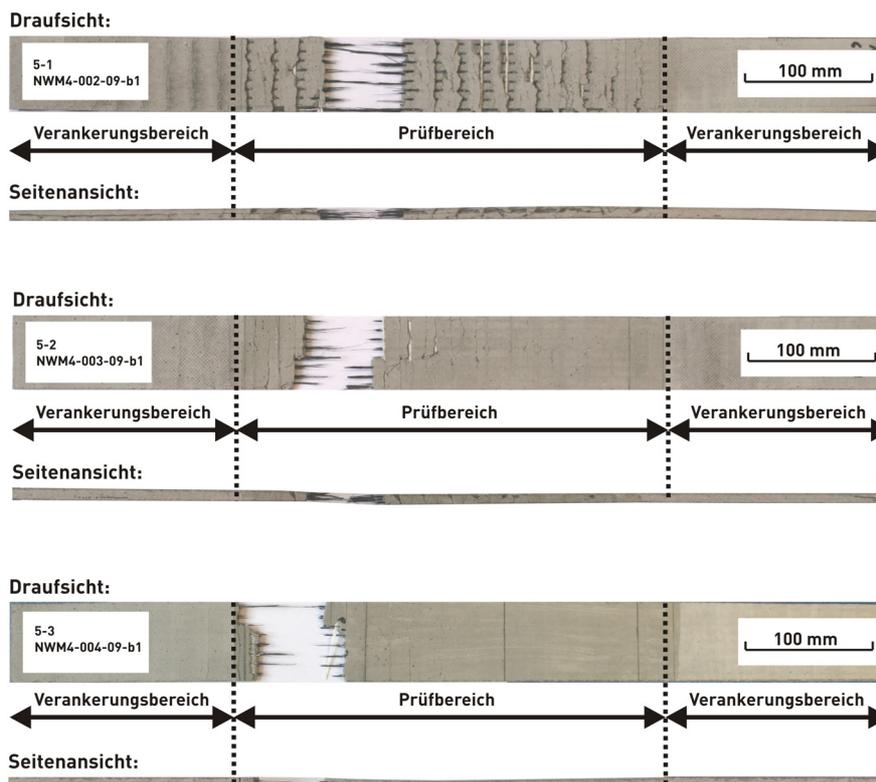


Bild 77: Proben Dehnkörperversuch

Tabelle 14: Festigkeit der Dehnkörper

Probe	Fadenmaterial	Lagenanzahl im Verbund	Bruchspannung [N/mm ²]	auf Garnfestigkeit bezogene Bruchspannung [N/mm ²]
5-1	TEN-CF800	2	50,9	50,9
5-2	TEN-CF800	2	47,4	47,4
5-3	2 x TEN-CF400	2	40,1	45,3
5-1	TEN-CF800	3	64,7	64,7
5-2	TEN-CF800	3	71,4	71,4
5-3	2 x TEN-CF400	3	57,2	64,6

5.4 Ableitung der Anforderungen an die Nähwirkmaschine

Durch die nachgewiesene Minimierung der Kettfadenauslenkung bei der Herstellung textiler Bewehrungen nach dem erweiterten Nähwirkverfahren wird eine zielgerichtete Erhöhung des äußeren Verbundes zwischen Textilbewehrung und Betonmatrix ermöglicht. Gleichzeitig kann ein einwandfreies Erscheinungsbild der Textilbetonbauteile auch bei deutlich höherer Ausnutzung der Garntragfähigkeiten sichergestellt werden. Daraus ergibt sich die Notwen-

digkeit, die in der Prototypmaschine für den erweiterten Wirkprozess integrierten Funktionen auf die aktuell verfügbaren Nähwirkmaschinen zu übertragen. Als wesentlich sind in diesem Zusammenhang insbesondere die neuen Bindungsmöglichkeiten, die freie Lagenanordnung und der maschenreihengerechte Schusseintrag zu sehen.

Aus der baupraktischen Anwendung und neueren Forschungsarbeiten (CURBACH ET AL., 2008 [253], ORTLEPP ET AL., 2008 [148], WEILANDT ET AL., 2007 [180], PLAGGENBORG, 2008 [155]) lässt sich ableiten, dass die Akzeptanz des Textilbetons in dem Maße steigt, wie es gelingt, einen möglichst großen Bewehrungsquerschnitt in einem einzigen Gelege zu vereinigen, um die Anzahl der vor Ort aufzutragenden Lagen aus Textilbeton zu minimieren. Insbesondere bei Verwendung von sehr groben Garnen (beispielsweise 3500 tex Feinheit) können derartige Textilbetonlagen mit einem hohen Faservolumengehalt hergestellt werden. Aus eigenen Arbeiten (CURBACH ET AL., 2008 [253]) ist bekannt, dass bei gitterförmigen Nähwirkstoffen aus sehr groben Garnen die Probleme der Auslenkung und Aufweitung der Kettfäden deutlich stärker hervortreten. Hier bietet der erweiterte Nähwirkprozess in Verbindung mit einem maschenreihengerechten Schusseintrag eine sehr gute Lösung für die Herstellung gebrauchstauglicher textiler Bewehrungen mit hoher Tragfähigkeit. Die Öffnungsweite der textilen Bewehrung kann so bei identischem Faservolumengehalt deutlich vergrößert werden. Damit wird bei gleicher Zugfestigkeit die Delaminationsgefahr verringert.

Für die meisten Anwendungsfälle genügt eine Ausführung der Nähwirkmaschine mit einem Schussfadenleger und der Möglichkeit, sowohl darüber als auch darunter je eine Kettfadenschicht anzubinden. Für die gesamte Bandbreite an Textilbetonbewehrungen, zum Beispiel auch für die Verstärkung gekrümmter Bauteile mit mehraxialen Spannungszuständen, ist eine flexible Maschinenkonfiguration mit zwei Schusslegern vorzusehen, wobei die Schusslegung auch mit Winkeln ungleich 90 Grad erfolgen soll. In diesem Zusammenhang ist als Entwicklungsziel die teilungsgerechte Fadenlegung für diagonale Fadenlagen festzuhalten. Weiterhin ist eine maschinenintegrierte Beschichtungseinrichtung erforderlich.

6 Anwendung des erweiterten Wirkprozesses bei der Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden

6.1 Einsatz von Nähwirkstoffen in Faser-Kunststoff-Verbunden

Ein Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) kombiniert faserförmige Werkstoffe mit einer Kunststoffmatrix. Erst durch die Kombination mit der Kunststoffmatrix können die hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten der Fasern praktisch genutzt werden. Ein Festkörper sehr geringer Abmessungen, zum Beispiel in Form einer Faser oder eines Drahtes, besitzt eine wesentlich höhere Festigkeit als ein Körper aus demselben Material mit größerer Ausdehnung. Die Ursache hierfür liegt in der zunehmenden Ausrichtung der Molekülketten und der Verringerung der Anzahl rissauslösender Fehlstellen mit abnehmendem Querschnitt (GRIFFITH, 1920 [101]). Auf dieser Grundlage kann durch den Einsatz faserförmiger Werkstoffe bei gleich bleibender Festigkeit die einzusetzende Masse deutlich reduziert werden. Die Fasern bilden somit die Verstärkungskomponente. Die Kunststoffmatrix fixiert die Fasern in ihrer Position und verhindert ein Ausknicken unter Druckbeanspruchung, schützt sie gegen äußere Einflüsse und überträgt die angreifende Last auf die Fasern. Entscheidenden Einfluss auf die Wirksamkeit des Faser-Matrix-Verbundes hat die Grenzfläche zwischen den beiden Komponenten. Hier wird die angreifende Last von der Matrix in die Fasern eingeleitet. Es können die verschiedensten Varianten von Matrix und Fasern miteinander kombiniert werden.

Vorimprägnierte Faserlagen (sogenannte UD-Prepregs) werden seit längerer Zeit erfolgreich als Halbzeuge für FKV eingesetzt. Die Verarbeitung erfolgt in Form von Mehrschichtverbunden, oft auch als Laminat bezeichnet, bestehend aus einer Vielzahl an Faserlagen. Diese UD-Prepregs haben jedoch eine Reihe Nachteile, insbesondere hohe Kosten für die Herstellung der Halbzeuge, aufwändige Lagerung durch Notwendigkeit zur Kühlung, große Verarbeitungsschwierigkeiten bei der Fertigung komplexer Geometrien und eine durch einen hohen Handarbeitsanteil bedingte aufwändige und teure Bauteilherstellung (EBERTH, 2005 [89], HERRMANN, 2006 [109], SHINODA, 2007 [167]). Neben diesen wirtschaftlichen Nachteilen weisen Mehrschichtverbunde aus UD-Prepregs jedoch auch mechanische Einschränkungen auf. Während die Eigenschaften in Faserrichtung (*in-plane*) hervorragend sind, ist der Verbund mangels einer Verstärkung senkrecht zu den Faserlagen (*out-of-plane* oder z-Verstärkung) anfällig für Delamination, hervorgerufen insbesondere durch Druck-, Biege- oder Schlagbeanspruchungen (BYUN, 2005 [66], HERRMANN, 2006 [109]). Nach HILEY, 2005 [111] liegt in der Delamination die häufigste Versagensursache für Mehrschichtverbunde. Sie führt zu einer deutlichen Verschlechterung der Druckfestigkeit und kann bei weiterer Belastung zum plötzlichen Versagen des Bauteils führen (AYMERICH, 2007 [56]). Die dadurch nötigen Sicherheitsreserven führen zu einer höheren Bauteilmasse, woraus wiederum höhere Herstell- und Betriebskosten resultieren (LOENDERSLOOT, 2006 [136]). Aus diesen Gründen wird intensiv nach Alternativen gesucht.

Die aktuellen Entwicklungen konzentrieren sich dabei auf den Einsatz textiler Halbzeuge, die im trockenen Zustand verarbeitet und anschließend mit einer Matrix getränkt werden (EBERTH, 2005 [89]). Die Materialkosten eines Serienbauteils können durch den Einsatz automatisierter textiler Prozesse bei annähernd gleichen Prozesskosten im Vergleich zum Prepreg-Einsatz um bis zu 40 Prozent gesenkt werden (HERRMANN, 2006 [109]). Es besteht dabei jedoch an die textilen Halbzeuge generell die Forderung, die mechanischen Eigenschaften von Mehrschichtverbunden aus UD-Prepregs zu erreichen oder zu übertreffen.

Nach Untersuchungen der *NASA* gehören Fadenlagen-Nähwirkstoffe zu den am besten geeigneten Textilien für den Einsatz in FKV in der Luft- und Raumfahrt, insbesondere wenn große Flächen benötigt werden (POE, 1997 [291]). Dies führen die Autoren darauf zurück, dass die mechanischen Eigenschaften in der Flächenebene gut einstellbar sind und ein automatisierter Herstellungsprozess zur Verfügung steht. SCHÜRMAN, 2007 [33] sieht weitere Vorteile der Fadenlagen-Nähwirkstoffe darin, dass im Gegensatz insbesondere zu Geweben keine herstellungsbedingte Ondulierung der Verstärkungsfasern vorliegt und bei der Herstellung von Mehrschichtverbunden mit Diagonallagen weniger Verschnitt anfällt. Mit dem Ziel eines weitgehenden Einsatzes der Nähwirkstoffe werden weltweit umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um deren Eigenschaften und die der aus ihnen hergestellten Faser-Kunststoff-Verbunde zu verbessern und exakt vorhersagen. Dieses Ziel konnte bisher nur teilweise erreicht werden. Zwar kann durch den Einsatz von Nähwirkstoffen der Ablageaufwand bei der Herstellung deutlich reduziert werden, da Mehrschichtverbunde aus UD-Prepregs aus nur 0,125 mm dünnen Einzelschichten aufgebaut werden, während die Herstellung der Nähwirkstoffe in einem Schritt erfolgen kann (HERMANN, 2005 [108], TRUONG, 2005 [172], SCHÜRMAN, 2007 [33]). Zudem ermöglicht die ausreichende Dimensionsstabilität bei gleichzeitig guter Drapierbarkeit komplizierte Bauteilformen (TRUONG, 2005 [172]). Doch kamen BIBO ET AL., 1997 [61] in einer älteren Untersuchung zu dem Schluss, dass FKV aus Nähwirkstoffen zwar teils gleichwertige, teils jedoch auch schlechtere mechanische Eigenschaften im Vergleich zu Mehrschichtverbunden aus UD-Prepregs aufweisen.

So zeigen auch aktuelle Untersuchungen, dass die Zugfestigkeit von FKV aus Nähwirkstoffen bis zu 17 Prozent unter idealen Mehrschichtverbunden aus UD-Prepregs liegt. Diese Festigkeitseinbuße resultiert aus Faserverschiebungen im Wirkprozess und bei der Handhabung sowie aus mangelnder Präzision der Musterherstellung. So führt bereits eine fünfprozentige Faserabweichung aus der Kraffteinleitungsrichtung zu dreizehn Prozent Festigkeitsverlust (TRUONG, 2005 [172]). LOENDERSLOOT ET AL., 2006 [136] konnten feststellen, dass schon nach dem ersten Handhaben von Nähwirkstoffen nach der Herstellung eine Faserabweichung von bis zu acht Prozent aus den Vorzugsrichtungen erfolgen kann.

Demgegenüber ergaben Untersuchungen von ÖNAL, 2005 [146], in denen die Kosten von FKV-Halbzeugen ins Verhältnis zur erzielten Festigkeit gesetzt wurden, Kostenvorteile von Nähwirkstoffen gegenüber UD-Prepregs.

Trotz der noch notwendigen Entwicklungsarbeit auf diesem Gebiet existiert bereits eine Vielzahl von industriellen Vorserien- und Serienanwendungen von Nähwirkstoffen in FKV.

Beispielsweise befindet sich die Herstellung von Rumpfsektionen für zukünftige *Airbus* Verkehrsflugzeuge, die zum Teil aus Nähwirkstoffen bestehen, in der Versuchsphase [EBERTH, 2005 [89]], während die Druckkalotte im *Airbus A 380* bereits serienmäßig aus einem Nähwirkstoff-Halbzeug gefertigt wird [HERRMANN, 2006 [109]]. Das Hauptanwendungsgebiet sind derzeit jedoch Windenergieanlagen, in denen Nähwirkstoffe in großem Umfang als textile Halbzeuge in den Rotorflügeln eingesetzt werden [54].

6.2 Einflussgrößen

6.2.1 Überblick

Aufgrund der bereits skizzierten großen wirtschaftlichen Bedeutung und angesichts der noch offenen Fragestellungen ist die Zahl der Forschungsarbeiten, die sich mit dem Einsatz von Nähwirkstoffen in Faser-Kunststoff-Verbunden beschäftigen, sehr hoch. Tabelle 15 zeigt die in der Literatur nachgewiesenen unmittelbaren Einflüsse der Parameter des Nähwirkprozesses auf die wesentlichen Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden. Aus diesen werden wiederum Ansatzpunkte für den zielgerichteten Einsatz des Nadelversatzes abgeleitet. Die Bindung des Wirkfadens und die Lagenanordnung sind die Faktoren, die direkt durch den Nadelversatz beeinflusst und gezielt verändert werden können. Als weitere Einflussfaktoren, die mit der Bindung in Zusammenhang stehen, werden die Abbindung, die Stichlänge, die Wirkfadenspannung und eine zusätzliche Stabilisierung betrachtet.

Trotz der großen Zahl an Forschungsarbeiten zu Nähwirkstoffen in Faser-Kunststoff-Verbunden ist der Einfluss der Wirkparameter (Wirkfadenmaterial, Wirkfadenspannung, Bindung, Stichlänge bzw. Maschendichte) auf die Eigenschaften der Verbundbauteile bisher noch nicht umfassend untersucht worden [LEONG, 2000 [133]]. Auch sind die ermittelten Ergebnisse der einzelnen Studien in nicht unerheblichem Maße widersprüchlich. Der Betrachtungsschwerpunkt der meisten Autoren liegt auf dem grundsätzlichen Vergleich von Mehrschichtverbunden ohne und mit z-Verstärkung in Form von Fäden oder Nieten ([67], [140], [149]).

Die Faktoren Abbindung, zusätzliche Stabilisierung und Fadenabstand sind im Bereich der Faser-Kunststoff-Verbunde bisher kaum betrachtet worden. Die weitaus meisten der in der Literatur beschriebenen Nähwirkstoffe stammen von Multiaxial-Nähwirkmaschinen ohne maschenreihengerechten Schusseintrag, so dass entsprechende Vergleichsuntersuchungen zur Abbindung kaum durchgeführt wurden. Da in der Mehrzahl der Anwendungsfälle eine gleichmäßig dichte Verteilung der Fasern in der Grundbahn gefordert ist, entfällt das bei der Betonbewehrung bedeutende Kriterium des Fadenabstands als Betrachtungsgröße. Demgegenüber ist die Art der Fadenlagenanordnung von großer Bedeutung für die Eigenschaften des Faserverbundbauteils.

Tabelle 15: Einflüsse technologischer Parameter von Fadenlagen-Nähwirkstoffen als Halbzeuge für Faser-Kunststoff-Verbunde

Einflussfaktor	Einflussnahme auf	Einflussbereich	Art des Einflusses	Nachweise
Abbindung ¹	Verformbarkeit (Textil)	Verarbeitung	maschengerechte Abbindung führt zu einer verbesserten Verformbarkeit	[130]
Stichlänge	Permeabilität (Textil)	Verarbeitung	größere Maschendichte führt zu steigender Permeabilität ²	[86]
	Verformbarkeit (Textil)	Verarbeitung	umstritten, nach [72] kein Einfluss der Stichlänge, jedoch der Maschendichte/Maschinenfeinheit; nach [130] bei steigender Stichlänge größere Verformbarkeit	[72][130]
	Faserondulierung (Textil)	Festigkeit	sinkende Stichlänge verringert Faserondulationen	[294]
	Delamination (Verbund)	Festigkeit	sinkende Stichlänge steigert interlaminaire Energiefreisetzungsrate (Mode I und Mode II) ²	[85][118]
	Biegefestigkeit (Verbund)	Festigkeit	sinkende Stichlänge verringert Biegefestigkeit	[85]
Bindung (durch erweiterten Wirkprozess direkt beeinflussbar)	Verformbarkeit (Textil)	Verarbeitung	Trikotbindung höheres Schervermögen als Franse oder Kombination Franse-Trikot	[72]
	Permeabilität (Textil)	Verarbeitung	Trikotbindung weist gegenüber Fransebindung verbessertes Tränkungsverhalten auf	[138]
	Bauteilherstellung (Verbund)	Verarbeitung	unsymmetrische Anordnung der Bindung kann zu Bauteilverformungen führen	[172]
	<i>in-plane</i> Festigkeit (Verbund)	Festigkeit	Einfluss umstritten	[64][100] [108][110] [133][144] [172][189]
	Delamination (Verbund)	Festigkeit	im Vergleich zu unverbundenen Schichten Verbesserung der interlaminairen Energiefreisetzungsrate (Mode I), Mode II umstritten	[85][118] [132][144] [161][183]
	Faserondulierung (Textil)	Festigkeit	Einfluss umstritten	[136][294]
	Bruchzähigkeit (Verbund)	Festigkeit	fadenförmige Lagenverbindung verbessert Bruchzähigkeit ²	[71][85]
Fadenlagenanordnung (durch erweiterten Wirkprozess direkt beeinflussbar)	Verformbarkeit (Textil)	Verarbeitung	höhere Lagenanzahl führt zu verringertem Schervermögen	[72]
	Bauteilherstellung (Verbund)	Verarbeitung	unsymmetrischer Lagenaufbau führt zu Verformungen durch Eigenspannungen	[14][57][73] [81][82][83] [97][112] [115][116] [117][157] [162][172] [182]

Tabelle 15 (Fortsetzung): Einflüsse technologischer Parameter von Fadenlagen-Nähwirkstoffen als Halbzeuge für Faser-Kunststoff-Verbunde

Einflussfaktor	Einflussnahme auf	Einflussbereich	Art des Einflusses	Nachweise
Wirkfadenzugkraft	Verformbarkeit (Textil)	Verarbeitung	geringe Fadenspannung führt zu höherer Verformbarkeit ²	[130]
	Faserondulationen (Textil)	Festigkeit	Einfluss unklar	[133]
	Delamination (Verbund)	Festigkeit	steigende Fadenspannung verschlechtert interlaminare Energiefreisetzungsrate (Mode II) ²	[118]
Stabilisierung	Verformbarkeit (Textil)	Verarbeitung	führt zu deutlicher Steigerung der Scherfestigkeit des Nähwirkstoffs	[250]
	Biegesteifigkeit (Textil)	Verarbeitung	führt zu deutlicher Steigerung der Biegesteifigkeit des Nähwirkstoffs	[250]
¹ Abbildung maschengerecht oder nicht maschengerecht, ² nachgewiesen beim Nähen				

6.2.2 Nachgewiesene Einflüsse des Nähwirkprozesses auf den Verbund

6.2.2.1 Einführung

Das Ziel der Verbesserung der *out-of-plane* Eigenschaften von Mehrschichtverbunden aus UD-Prepregs respektive der Entwicklung geeigneter Alternativen mit entsprechenden Eigenschaften ist bisher nicht in überzeugender Weise erreicht worden. So geht bei den meisten Verfahren die Verbesserung der *out-of-plane* Eigenschaften, insbesondere eine Steigerung des Delaminationswiderstands, mit Einbußen bei der Festigkeit in der Flächenebene (*in-plane*) einher.

Zur Bestimmung des Widerstands eines Mehrschichtverbundes gegenüber Delamination ist die Messung der interlaminaren Energiefreisetzungsrate (z. B. nach DIN 6033 [193], DIN 6034 [194] für carbonfaserverstärkte FKV) ein weit verbreitetes Verfahren und wurde in den meisten Untersuchungen verwendet. Die interlaminare Energiefreisetzungsrate ist die „auf die Plattenbreite bezogene Energie zur Erzeugung eines definierten Rissfortschritts an einem interlaminaren Anriss zwischen zwei Lagen eines Laminats“ [193]. Zwei Versuchsaufbauten und zwei Versagensfälle werden unterschieden. Im so genannten Mode I Versuch breitet sich ein Riss in Folge von Delaminationskräften senkrecht zur Rissebene aus [193]. Im Mode II Versuch breitet sich der Riss in Folge von Schubkräften an der Rissspitze aus, die in einem Biegeversuch eingeleitet werden [194].

6.2.2.2 Mechanische Eigenschaften senkrecht zur Faser (*out-of-plane*)

Untersuchungen, die sich konkret auf den Einfluss der Wirkfadenbindung in einem Nähwirkstoff auf die mechanischen Eigenschaften des Faser-Kunststoff-Verbundes beziehen, sind rar. Unter Einbeziehung von Studien zu nachträglich vernähten UD-Prepregs, Geweben und

Nähwirkstoffen, ergibt sich die Tendenz zu einer deutliche Verbesserung der Delaminationsfestigkeit zumindest im Mode-I-Versuch (DRANSFIELD, 1998 [85], LAOURINE, 2003 [132], MOURITZ ET AL., 1997 [144], DE VERDIERE, 2009 [174], WOOD, 2007 [183]).

Demgegenüber ist der Einfluss einer fadenförmigen Verbindung auf die interlaminare Energiefreisetzungsrate nach Mode II umstritten. Während SANKAR, 1997 [161] und JAIN ET AL., 1995 [118] unter Nutzung von Aramid und Glas als Bindefäden Verbesserungen der interlaminaren Energiefreisetzungsrate (Mode II) gegenüber nicht mit Bindefäden gefügten Mehrschichtverbunden feststellen konnten, ergaben Untersuchungen von BYUN, 2005 [66], LAOURINE, 2003 [132] und MOURITZ ET AL., 1997 [144] keine Verbesserung.

Eine Reihe weiterer mechanischer Kennwerte, wie Schadenstoleranz, Druck- und Zugfestigkeit nach einer Schlagbeanspruchung sowie die Bruchzähigkeit, wird durch eine fadenförmige Verbindung positiv beeinflusst (AYMERICH, 2007 [56], CHEN, 2002 [71], DRANSFIELD, 1998 [85], MOURITZ ET AL., 1997 [144], POE, 1997 [291]). Die Auswirkungen auf die Steifigkeit in Dickenrichtung sind demgegenüber umstritten (GRASSI, 2002 [100], HERRMANN, 2005 [108]). Nach Einschätzung von AYMERICH, 2005 [55] ist die Wirkung von Bindefäden als z-Verstärkung nur dann effektiv, wenn der Lastangriff in der Nähe der Verstärkung erfolgt.

6.2.2.3 Mechanische Eigenschaften längs zur Faser (*in-plane*)

Die Verbindung der Einzellagen eines Mehrschichtverbundes durch Fäden führt aber nach den meisten Untersuchungen auch zur Beeinträchtigung relevanter mechanischer Kennwerte der entsprechenden Verbundwerkstoffe in Faserrichtung (*in-plane*). Das Ausmaß dieser Beeinträchtigung ist dabei bisher nicht eindeutig bestimmt worden (MOURITZ ET AL., 1997 [144]). Gesichert ist, dass die Bindefäden an den Stellen, an denen sie die Textilagen durchdringen, zu Fasereinschnürungen an den Außenseiten und zu Verschiebungen der Verstärkungsfasern (Ondulierung) führen (BRANDT, 2000 [64], EBERTH, 2005 [89], LEONG, 2000 [133], MOURITZ ET AL., 1997 [144]). Dadurch werden Öffnungen in der Textilloberfläche hervorgerufen, die sich auch während der Weiterverarbeitung nicht schließen (LOENDERSLOOT ET AL., 2006 [136]). Selbst wenn die Wirkfäden nachträglich wieder entfernt werden, lassen sich die Öffnungen nicht wieder beseitigen (RITTNER, 2005 [294]). Diese Fehlstellen führen im Verbund zu Harzanreicherungen und Lufteinschlüssen (CHUN, 2006 [75], LEONG, 2000 [133], LOMOV, 2000 [137], TRUONG, 2005 [172]), welche wiederum Spannungskonzentrationen zur Folge haben (LOENDERSLOOT ET AL., 2006 [136]). Insgesamt steigt so das Risiko, dass im Verbundwerkstoff Defekte auftreten (YUEXIN, 2007 [185]).

Die Auswertung der zur Verfügung stehenden Literatur zeigt jedoch, dass über die tatsächlichen Auswirkungen dieser Effekte auf die mechanischen Eigenschaften der Faser-Kunststoff-Verbunde weiterhin Unklarheit besteht. Eine Literaturanalyse von MOURITZ ET AL., 1997 [144] bestätigte die große Anzahl an Widersprüchen in vorhandenen experimentellen Arbeiten auf. Der Einfluss der Bindefäden auf die Festigkeit des Verbundes ist das Ergebnis einer Vielzahl voneinander abhängiger Faktoren. Ein umfassender Lösungsansatz zur Bestimmung dieses Einflusses ist bisher nicht vorhanden, da sich die durchgeführten Unter-

suchungen auf Teilprobleme beschränkten (LEONG, 2000 [133], MOURITZ ET AL., 1997 [144]). Zur Vertiefung dieses Thema sei auf folgende Studien verwiesen, in denen an konkreten Beispielen bestimmte Einflussfaktoren bestimmt wurden: BRANDT, 2000 [64], GRASSI, 2002 [100], HERRMANN, 2005 [108], HEB, 2007 [110], LEONG, 2000 [133], MEYER ET AL., 2008 [142], MOURITZ ET AL., 1997 [144] und TRUONG, 2005 [172].

6.2.2.4 Einfluss der Bindungsart

Kaum betrachtet wurde bisher der Einfluss der Bindungsart. Zudem gelangen die durchgeführten Studien zu unterschiedlichen Ergebnissen. ZHOU ET AL., 2002-2005 [186]-[189] widmeten sich ausführlich dem Vergleich des Einflusses der Bindungen RL-Trikot und RL-Körperfranse auf die mechanischen Eigenschaften des Nähwirkstoffs. Sie ermittelten im Zugversuch fünf bis sieben Prozent höhere Bruchspannungen sowohl in Kett- als auch in Schussrichtung durch die Verwendung der Bindung Körperfranse (Polyester-Wirkfäden). Sie führen diese Festigkeitssteigerung auf den höheren Anteil der in Richtung der Kett- und Schussfäden ausgerichteten Wirkfadenabschnitte im Vergleich zu Trikot zurück. Dies scheint fraglich, da bei RL-Körperfranse zwar ein größerer Anteil der Wirkfäden parallel zu den Schussfäden ausgerichtet ist, jedoch nicht zu den Kettfäden. Auch hat die Verwendung der Bindung RL-Körperfranse aufgrund des hohen Herstellungsaufwandes kaum praktische Bedeutung bei der Herstellung von Nähwirkstoffen.

Untersuchungen von RITTNER, 2005 [294] konzentrierten sich auf den Einfluss der Bindung auf das Ausmaß der verursachten Faserondulierung. Im Vergleich der Bindungen RL-Franse und RL-Trikot konnte ein Einfluss der Bindungsart nachgewiesen werden. So verursacht die Bindung RL-Trikot höhere Winkelabweichungen der Fasern in der Grundbahn als die Bindung RL-Franse. Demgegenüber kamen TRUONG ET AL., 2005 [172] zu dem Schluss, dass der Einfluss der Bindungsart (und damit der Ausrichtung der Wirkfäden relativ zu den Kett- und Schussfäden) auf die Zugfestigkeit und die interlaminare Scherfestigkeit von Carbonfaser-Epoxidharz-Mehrschichtverbunden aus zwei axialen Nähwirkstoffen (mit Einsatz von Polyester-Wirkfäden) sehr gering ist. Auch SJÖGREN ET AL., 2004 [168] stellten fest, dass Änderungen der Bindungsart nicht zu Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden aus Nähwirkstoffen führen.

6.2.2.5 Einfluss des Wirkfadens und der Stichtlänge

Auch zum Einfluss der Wirkfadenspannung (LEONG ET AL., 2000 [133], JAIN ET AL., 1995 [118]), des Wirkfadenwerkstoffs (LAOURINE, 2003 [132], BIBO, 1998 [62]) und der Wirkfadenfeinheit (HEB ET AL., 2007 [110], JAIN ET AL., 1998 [119], ZHOU, 2005 [189]) liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor. Die Ergebnisse der aufgeführten Studien widersprechen einander und sind aufgrund der unterschiedlichen Fertigungs- und Geometrieparameter der eingesetzten Nähwirkstoffe nur bedingt vergleichbar.

Zum Einfluss der Stichtlänge liegen sowohl Erkenntnisse zum Nähwirk- als auch zum Nähprozess vor. Die Veränderung der Stichtlänge hat nach RITTNER, 2005 [294] Einfluss auf das

Ausmaß der Faserondulierung im Nähwirkstoff. Im Rahmen eines Vergleichs unterschiedlicher Stichlängen zeigte sich, dass die verursachten Abweichungen bei kleineren Stichlängen geringer ausfallen, wobei sich eine Stichlänge von 2,5 mm als optimal erwiesen hat. Das Delaminationsverhalten wird ebenfalls durch die Stichlänge beeinflusst. Eine geringere Stichlänge verbessert die interlaminaire Energiefreisetzungsrate (sowohl Mode I als auch Mode II), verschlechtert jedoch die Biegefestigkeit (JAIN, 1995 [118], DRANSFIELD, 1998 [85]). Eine umfangreichere Untersuchung zum Einfluss der Stichlänge auf die Festigkeit von vieraxialen Nähwirkstoffen lieferten CHUN ET AL., 2006 [75]. Sie ermittelten Steigerungen der Zugfestigkeit, des Zug-E-Moduls und der *in-plane* Scherfestigkeit in Längs- und Querrichtung mit sinkender Stichlänge.

6.2.2.6 Das Deformations- und Tränkungsverhalten

Bezüglich des Einflusses des Nähwirkprozesses auf die Weiterverarbeitung standen insbesondere das Deformations- und das Tränkungsverhalten des textilen Halbzeugs sowie die Bauteilherstellung im Harztränkungsverfahren im Mittelpunkt bisheriger Untersuchungen. Speziell der Einfluss der Lagenanordnung hat umfassende Aufmerksamkeit erfahren.

CHERIF, 2000 [72] führte umfangreiche Untersuchungen des Deformationsverhaltens von Nähwirkstoffen durch. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass die Stichlänge keinen Einfluss auf das Deformationsverhalten hat, während eine größere Maschendichte den maximal möglichen Schwerwinkel reduziert. Auch die Bindung wirkt sich nach dieser Untersuchung auf das Schervermögen aus. So weist ein Nähwirkstoff mit RL-Trikot-Bindung ein besseres Deformationsvermögen auf als ein solcher mit RL-Franse oder mit einer kombinierten RL-Franse-Trikot-Bindung. Zu diesem Ergebnis kommt auch NEITZEL, 2004 [25]. Weiterhin führt eine steigende Lagenanzahl sowie eine höhere Anzahl an unterschiedlichen Winkeln im Nähwirkstoff zu einem sinkenden Deformationsvermögen. KONG ET AL., 2004 [130] ermittelten eine deutliche Beeinflussung des Deformationsvermögens durch die Stichlänge. Ersteres steigt mit größerer Stichlänge, während eine höhere Wirkfadenspannung die Verformbarkeit reduziert. Ebenso verbessert eine maschengerechte Abbindung des Wirkfadens das Deformationsvermögen deutlich, da auf Grund der nicht durch Anstechen fixierten Grundbahn das Fadengleiten als Verformungsmechanismus möglich wird.

Bezüglich der Tränkungseigenschaften des Nähwirkstoffs sehen LOMOV ET AL., 2003 [138] einen Einfluss der Bindung auf die Permeabilität. So sinken bei der kombinierten RL-Franse-Trikot-Bindung die Fransenabschnitte in die Kettfäden der Grundbahn ein, wodurch eine Rille entsteht. Beim Stapeln mehrerer Lagen sinken dann wiederum die nächsten Fransenabschnitte in diese Rille ein, während die Trikotabschnitte an der Oberfläche bleiben. Dadurch kommt es zu Dickenschwankungen und zur Verschließung der Kanäle für den Harzfluss. Dieser Effekt äußert sich darin, dass mit steigender Lagenanzahl die Dicke pro Lage häufig sinkt. Dieser Mechanismus resultiert dann in zufällig verteilten Permeabilitätseigenschaften im Nähwirkstoff. Bei Verwendung der RL-Trikotbindung konnten keine Verschiebungen festgestellt werden, so dass sich ein besseres Tränkungsverhalten ergibt.

Weiterhin ermittelten ELBOUAZZAoui ET AL., 2005 [90], dass die Wahl der Seite des Nähwirkstoffs, von der aus die Tränkung vorgenommen wird, Auswirkungen auf die Permeabilität des Nähwirkstoffs hat. Die Autoren führen dies auf die unterschiedliche Form der durch den Wirkfaden verursachten Öffnungen in der Grundbahn zurück. DRAPIER ET AL., 2002 [86] und TALVENSAARI ET AL., 2005 [170] untersuchten das Tränkungsverhalten von nachträglich vernähten Nähwirkstoffen. Durch das Vernähen stieg die Permeabilität gegenüber dem unvernähten Zustand deutlich an. Die Anzahl der Nähte und die Stichlänge haben dabei einen sehr großen Einfluss, während Lagenanordnung und Stichart die Permeabilität nicht beeinflussten. Es wird davon ausgegangen, dass die Verbindung von Fadenlagen mittels Nähwirken eine ähnliche Veränderung gegenüber nicht verwirkten Fadenlagen hervorruft.

6.2.2.7 Der Einfluss der Lagenanordnung

Umfangreiche Aufmerksamkeit wurde bisher schon der Frage gewidmet, wie sich die Lagenanordnung in Mehrschichtverbunden auf die Verarbeitung und die Bauteileigenschaften auswirkt. Diese Untersuchungen beziehen sich zumeist auf Mehrschichtverbunde aus UD-Prepregs, jedoch sind die wesentlichen Mechanismen für Mehrschichtverbunde auf Basis der Nähwirktechnik ebenso relevant.

Die Eigenschaften eines Mehrschichtverbunds werden wesentlich durch die Art der Lagenanordnung beeinflusst, wobei ausschlaggebend ist, ob die einzelnen Lagen symmetrisch zur neutralen Zone aufgebaut sind oder nicht. Unsymmetrische Mehrschichtverbunde zeigen einige besondere Verhaltensweisen, die dazu geführt haben, dass für die meisten Anwendungen ein symmetrischer Lagenaufbau bevorzugt wird (EHRENSTEIN, 2006 [11], GUDE, 2000 [14]).

Bei isotropen Werkstoffen, also Werkstoffen, deren Eigenschaften nicht richtungsabhängig sind, rufen Normalspannungen nur Dehnung und Schubspannungen nur Schubverformungen hervor. Diese Entkopplung ist bei FKV aus Mehrschichtverbunden jedoch nur unter bestimmten Voraussetzungen gegeben, da typische FKV richtungsabhängige (anisotrope) Eigenschaften aufweisen. Es wird häufig angestrebt, durch geeignete Lagenanordnungen im Mehrschichtverbund die auftretenden Verformungen zu entkoppeln. Das Resultat sind orthotrope Werkstoffe, die zwar grundsätzlich anisotrop sind, in ihren Symmetrieachsen jedoch eine Entkopplung von Dehnung und Schubverformung zeigen. Ein orthotroper Werkstoff hat eine Struktur, die zu drei senkrecht aufeinander stehenden (orthogonalen) Ebenen symmetrisch ist. Ein Mehrschichtverbund ist nur dann orthotrop, wenn die Einzelschichten symmetrisch zur Mittelebene angeordnet werden und auch in ihren Schichtdicken, Schichtwinkeln, Fasermengen und Werkstoffen jeweils übereinstimmen. Die Differenz zwischen den Orientierungswinkeln benachbarter Lagen sollte dabei möglichst gering sein, um Wärmeschubspannungen zwischen diesen Lagen zu minimieren. Bei Lastangriff außerhalb der Orthotropieachsen zeigt sich ein anisotropes Materialverhalten. Bei einem nicht-orthotropen Mehrschichtverbund stellt sich schon bei einachsiger Beanspruchung ein mehrachsiger Spannungs- und Verformungszustand ein. Normalspannungen können so zu Schiebung und

auch zu Krümmung sowie Drillung des Mehrschichtverbundes führen (MICHAELI ET AL., 1994 [23], EHRENSTEIN, 2006 [11], ZEPF, 1997 [40]).

Dies soll hier in kurzer Form anhand der klassischen Laminattheorie erläutert werden⁸. Die klassische Laminattheorie (CLT) ist ein übliches Verfahren zur Analyse von Schichtverbunden. Unter Beachtung einer Reihe von Annahmen können die Spannungen im Mehrschichtverbund unter Berücksichtigung von Scheiben-Platten-Kopplungen ermittelt werden. Eine Scheibe ist definiert als ein Flächenelement, bei dem alle äußeren Beanspruchungen nur in der Mittelfläche wirken. Dabei wird die Mittelfläche verzerrt und es treten keine Biegewirkungen auf. Bei einer Platte hingegen treten immer Biegeverformungen auf. In bestimmten Fällen können die Scheiben- und Plattenwirkungen getrennt berechnet werden, zum Beispiel bei isotropen Werkstoffen, bei anisotropen Mehrschichtverbunden ist dies jedoch nicht immer möglich. Nach der Laminattheorie [4] lautet das Materialgesetz für die Schnittgrößen des Schichtverbundes:

$$\begin{bmatrix} n \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon \\ \kappa \end{bmatrix}$$

Gleichung 7

oder ausführlich:

$$\begin{bmatrix} n_{11} \\ n_{22} \\ n_{12} \\ m_{11} \\ m_{22} \\ m_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{14} & B_{11} & B_{12} & B_{14} \\ A_{12} & A_{22} & A_{24} & B_{12} & B_{22} & B_{24} \\ A_{14} & A_{24} & A_{44} & B_{14} & B_{24} & B_{44} \\ B_{11} & B_{12} & B_{14} & D_{11} & D_{12} & D_{14} \\ B_{12} & B_{22} & B_{24} & D_{12} & D_{22} & D_{24} \\ B_{14} & B_{24} & B_{44} & D_{14} & D_{24} & D_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ 2\epsilon_{12} \\ \kappa_{11} \\ \kappa_{22} \\ 2\kappa_{12} \end{bmatrix}$$

Gleichung 8

Dabei sind:

n_{ij} die Schnittkräfte (Bild 78),

m_{ij} die Schnittmomente (Bild 78),

ϵ_{ij} und κ_{ij} die Scheiben- und die Plattenverzerrungen.

⁸ Die Ausführungen zur klassischen Laminattheorie stützen sich auf die Lehrbücher von ALTENBACH ET AL., 1996 [3], ALTENBACH ET AL., 2007 [4], EHRENSTEIN, 2006 [11], MICHAELI ET AL., 1995 [23] und PUCK, 1996 [30]. Für weitergehende Informationen zu diesem Verfahren sei auf diese ausführliche Literatur verwiesen.

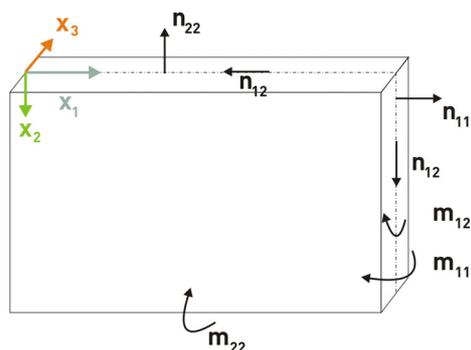


Bild 78: Schnittgrößen (nach [4])

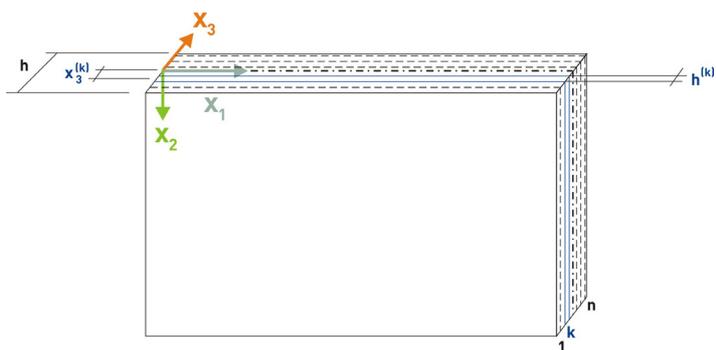


Bild 79: Geometrie des Mehrschichtverbundes

A, D und B sind die Scheiben-, die Platten- und die Koppelsteifigkeitsmatrizen des Schichtverbundes. Ihre Elemente folgen nach [4] aus:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n Q_{ij}^{(k)} h^{(k)}$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^{(k)} (x_3^{(k)^2} - x_3^{(k-1)^2})$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n Q_{ij}^{(k)} (x_3^{(k)^3} - x_3^{(k-1)^3})$$

Gleichungen 9

Dabei sind:

$$h^{(k)} = x_3^{(k)} - x_3^{(k-1)}, k = 1, 2, \dots, n$$

die Dicke der Einzelschichten,

$$x_3^{(k)} = \frac{h}{2} - \sum_{i=1}^k h^{(i)}$$

der Abstand von der Mittelfläche (Bild 79),

$$h = \sum_{k=1}^n h^{(k)}$$

die Dicke des Mehrschichtverbundes (Bild 79),

$$Q_{ij} = E_{ij} - \frac{E_{i3} E_{j3}}{E_{33}}$$

die reduzierte Steifigkeit mit E_{ij} als Materialkennwerte für die Steifigkeit der Schicht.

Da bei symmetrischen Mehrschichtverbunden zu jeder einzelnen Schicht k auf der einen Seite der Mittelfläche eine zugehörige Schicht k' auf der anderen Seite der Mittelfläche existiert, die den selben Abstand, die selbe Schichtdicke, die selben Materialeigenschaften und Faserorientierungen aufweist, ergeben sich die Werte B_{ij} der Koppelsteifigkeitsmatrix zu Null. Es kommt zu keinen Scheiben-Platten-Koppeleffekten.

Ein Sonderfall ist der symmetrische Kreuzverbund, der aus paarweise gleichen Einzelschichten in 0°- und 90°-Orientierung besteht. Hierbei fallen die Materialhauptachsen mit den globalen Bezugsachsen zusammen, so dass sich nach [4] das Materialgesetz folgendermaßen ergibt:

$$\begin{bmatrix} n_{11} \\ n_{22} \\ n_{12} \\ m_{11} \\ m_{22} \\ m_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ 2\epsilon_{12} \\ \kappa_{11} \\ \kappa_{22} \\ 2\kappa_{12} \end{bmatrix}$$

Gleichung 10

Bei unsymmetrischen Mehrschichtverbunden können sowohl durch Belastungen in der Flächenebene als auch durch Hitze und Feuchte Verbiegungen und Verdrehungen hervorgerufen werden (BAR-YOSEPH, 1995 [57], GIGLIOTTI, 2005 [98], HYER, 1982 [115]-[117]). Durch die Strukturanisotropie der unsymmetrischen Mehrschichtverbunde werden bereits während des Herstellungsprozesses komplizierte Eigenspannungen induziert. Diese führen zu unerwünschten Krümmungen und Drillungen (Bild 80) bei mehrdeutigen Stabilitätszuständen (GUDE, 2000 [14], HUFENBACH ET AL., 2006 [112], VANNUCCI, 2001 [173]).

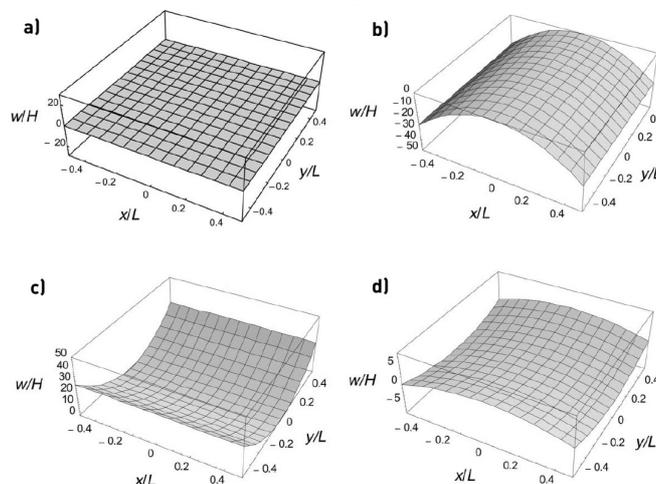


Bild 80: Formen von [0/90] Verbunden: a) Aushärtetemperatur, flach; b) Raumtemperatur, stabile zylindrische Konfiguration in x-Richtung; c) Raumtemperatur, stabile zylindrische Konfiguration in y-Richtung; d) Raumtemperatur, instabile Sattelkonfiguration [82]

WISNOM ET AL., 2006 [182] ermittelten drei wesentliche Ursachen für dieses Verhalten: unterschiedliche Wärmeausdehnung (siehe auch DANO, 2001 [82], CHO, 2003 [73]), Schrumpfen und Werkzeug-Bauteil-Interaktionen. Der Wärmeausdehnungskoeffizient der Matrix ist üblicherweise viel höher als der der Fasern. Zudem ist der Wärmeausdehnungskoeffizient vieler Fasern orthotrop (bei Carbonfasern zum Beispiel klein oder negativ in Faserlängsrichtung, größer in Faserquerrichtung, siehe Bild 81). Dies führt zu Materialeigenspannungen

beim Aushärten, die selbst in einaxialen Mehrschichtverbunden nachgewiesen werden können. Diese Spannungen können das Kraft-Dehnungsverhalten beeinflussen, verursachen jedoch meist keine Verformungen, da sie lokal begrenzt sind und sich im Bauteil ausgleichen. In flachen Platten jedoch, deren Lagenanordnung nicht ausgewogen und symmetrisch ist, führen diese Spannungen zu Verformungen. In gebogenen Platten kann es auch bei symmetrischer Lagenanordnung zu Verformungen kommen, die durch Eigenspannungen verursacht werden.

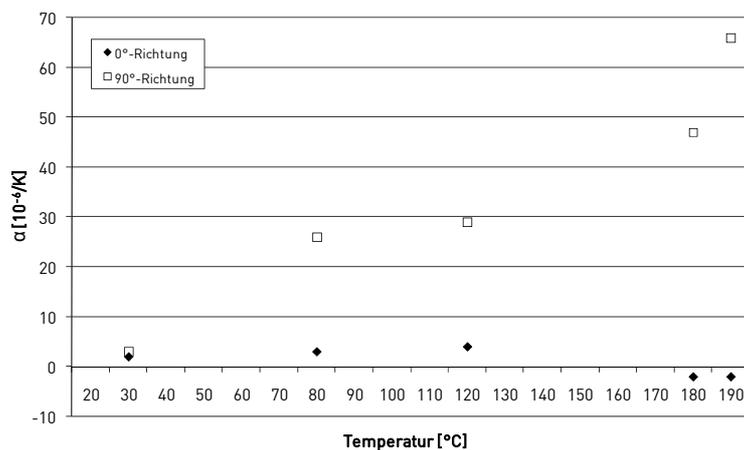


Bild 81: Wärmeausdehnungskoeffizient von CF-Mehrschichtverbunden in Abhängigkeit von der Temperatur [162]

Die bei der Herstellung von Mehrschichtverbunden verwendeten Polymere schrumpfen während des Aushärtens. Dies verursacht eine zusätzliche Volumenänderung, bei Epoxidharz zum Beispiel um etwa sieben Prozent. Zusätzlich führen Interaktionen zwischen Werkzeug und Bauteil zu Spannungen. Dies wird dadurch hervorgerufen, dass metallene Werkzeuge andere Wärmeausdehnungskoeffizienten als das Bauteil aufweisen. Daneben verursachen noch Feuchtigkeit (lässt Matrix anschwellen), ungleichmäßige Harzverteilung, ungleichmäßige Faserverteilung oder ungleichmäßiges Aushärten über die Bauteildicke Eigenspannungen (WISNOM ET AL., 2006 [182]).

GIGLIOTTI ET AL., 2005 [98] ermittelten, dass diese Koppelwirkungen, insbesondere das thermisch verursachte Biegemoment, bei unsymmetrischen [0/90] Mehrschichtverbunden maximal sind. Daraus resultiert jedoch nicht notwendigerweise auch die größte Verformung, da diese auch von der Biegesteifigkeit des Mehrschichtverbunds abhängig ist.

Während durch die beschriebenen Verhaltensweisen von unsymmetrischen Mehrschichtverbunden eine Reihe von Problemen verursacht wird, gibt es auch verschiedene Ansätze, sich diese Materialeigenspannungen zunutze zu machen. Durch gezielte Nutzung der Eigenspannungen können nicht nur komplizierte Bauteilformen (zum Beispiel zylindrische Schalen oder doppelt gekrümmte Flächen) mit ebenen Werkzeugen hergestellt werden (GUDE, 2000 [14]), sondern durch den Einsatz von Formgedächtnislegierungen oder Piezokeramiken auch adaptive Bauteile (HUFENBACH ET AL., 2006 [112]). GIGLIOTTI ET AL., 2005 [98] berichten zudem von der Nutzung der beschriebenen Effekte zur Ermittlung interner Bauteilspannungen.

6.3 Untersuchungsschwerpunkte

6.3.1 Zielgrößen

Die einzelnen Einflussfaktoren des Nähwirkprozesses auf die Eigenschaften von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden werden in ihrer Beziehung zu den Bereichen Verarbeitung und Festigkeit betrachtet.

Die Auswertung der umfangreich vorhandenen Literatur im vorangegangenen Kapitel lässt den (durch eigene Untersuchungen am *ITM* gestützten) Schluss zu, dass aus Untersuchungen mit bestimmten Textilkonfigurationen, Faserstoffen und weiterverarbeitenden Prozessen keine allgemeingültigen Aussagen auf den Einfluss bestimmter Parameter des Nähwirkprozesses auf das Endprodukt abgeleitet werden können. Aus diesem Grund wird der Einfluss des erweiterten Nähwirkprozesses an einem bestimmten Anwendungsbeispiel exemplarisch untersucht. Die Auswahl dieser Anwendung wird insbesondere auf die zur Verfügung stehende Nähwirkmaschine mit maschengerechtem Schusseintrag gestützt. Diese Maschinenkonfiguration bietet den Vorteil wesentlich verbesserter Drapiereigenschaften gegenüber Nähwirkstoffen mit nicht-maschengerechtem Schusseintrag. Damit rückt eine Anwendung in den Blickpunkt, bei der in bisherigen Untersuchungen bevorzugt Mehrlagengestricke zum Einsatz kommen: thermoplastische Mehrschichtverbunde bestehend aus textilen Halbzeugen mit hoher Drapierbarkeit. Auf diesem Gebiet liegen am *ITM* langjährige Erfahrungen und die entsprechende technische Ausstattung vor, auf die im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wird.

Die Auswertung der bisherigen Erkenntnisse zum Einfluss des Nähwirkprozesses auf Faser-Kunststoff-Verbunde im vorangegangenen Kapitel lässt eine Einflussnahme des erweiterten Wirkprozesses speziell durch die neuen Bindungen und die erweiterte Fadenlagenanordnung erwarten. Eines der Hauptziele des erweiterten Wirkprozesses ist die Herstellung symmetrischer Gelegeaufbauten zur Minimierung von Eigenspannungen im Bauteil. Deshalb liegt ein erster Untersuchungsschwerpunkt auf dem Nachweis der Reduktion der Eigenspannungen. Gegenüber symmetrisch gestapelten Mehrschichtverbunden hat der erweiterte Wirkprozess den Vorteil, eine durchgehende Verstärkung in Dickenrichtung zu realisieren. Deshalb werden die Auswirkungen der z-Verstärkung auf das Delaminationsverhalten und die Schlagzähigkeit des Verbundes untersucht. Bisherige Studien zeigen einen engen Zusammenhang zwischen der Beeinflussung der *in-plane* und der *out-of-plane* Eigenschaften von Mehrschichtverbunden durch das textile Herstellungsverfahren. Dieser Zusammenhang soll auch am Beispiel des erweiterten Nähwirkprozesses untersucht werden.

Neben den Festigkeitseigenschaften sind bei der Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden auch die Verarbeitungseigenschaften von Bedeutung. Insbesondere die Anpassung des textilen Halbzeugs an komplexe Bauteilformen steht hier im Mittelpunkt. Aus diesem Grund wird die Beschreibung des Drapierverhaltens der Nähwirkstoffe in die Untersuchung mit einbezogen.

Der Vergleich der Nähwirkstoffe mit textilen Halbzeugen, die ebenfalls gestreckte Fadenlagen verarbeiten können, stellt einen weiteren Schwerpunkt dar. Vergleichsstrukturen werden auf Basis der Flachstricktechnik (Mehrlagengestricke, MLG) und der Nadelstabdrehwebtechnik (Drehergewebe, DRG) hergestellt (zur Beschreibung der Verfahren siehe Kapitel 2.2.2.2 und 2.2.2.4)⁹. Als Schlussfolgerung dessen werden die in Tabelle 16 dargestellten Zielgrößen für die Versuchsplanung festgelegt.

Tabelle 16: Zielgrößen und Prüfverfahren

Faser-Kunststoff-Verbund	textiles Halbzeug
Bauteilverformung: - Messung der Formabweichung ebener Platten	Drapierverhalten: - Scherprüfung - Stempel-Durchdruck-Prüfung - Beurteilung des Drapierverhaltens
Zugfestigkeit und E-Modul: - Zugprüfung	Fadenondulationen: - Messung der Lageabweichung
Biegefestigkeit: - Biegeprüfung	
Schlagzähigkeit: - Charpy-Schlagprüfung	
Delaminationswiderstand: - interlaminae Scherfestigkeit	

6.3.2 Einflussgrößen

6.3.2.1 *Unveränderliche Einflussgrößen*

Die unveränderlichen Einflussgrößen ergeben sich im Wesentlichen aus dem Ziel, mit den vorliegenden Untersuchungen gleichzeitig auch eine Vergleichsmöglichkeit zu Mehrlagengestricken und Drehergeweben zu schaffen. Umfangreiche Untersuchungen am *ITM* im Rahmen des *Sonderforschungsbereichs (SFB) 639* der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* stützen sich auf die Verwendung von Mehrlagengestricken als Halbzeuge für die Herstellung von thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden. Dazu liegt bereits eine große Datenbasis vor, so dass die Konfiguration der Nähwirkstoffe und Drehergewebe an die Parameter aus dem *SFB 639* angepasst werden (Tabelle 17). Die für die Untersuchungen am *ITM* genutzte Strickmaschine hat eine feste Maschinenfeinheit (definiert den Abstand der Kettfäden)

⁹ Die vergleichenden Untersuchungen wurden durchgeführt in Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. Mirko Schade (Mehrlagengestricke) und Dipl.-Ing. Roland Kleicke (Drehergewebe).

von E 7, das heißt 7 Nadeln pro Zoll (25,4 mm). Dementsprechend wird für die Nähwirkmaschine eine Feinheit von F 7 (je 7 Wirkelemente pro 25 mm) ausgewählt. Die Webmaschine weist eine andere Art der Kettfadenzuführung auf, diese wird so gewählt, dass die Fadenichte in Kettrichtung der von Strick- und Nähwirkmaschine entspricht.

Auf der für die Vergleichsuntersuchungen genutzten Strickmaschine können, ebenso wie auf der Dreherwebmaschine, derzeit maximal zwei Fadenlagen verarbeitet werden. Der Prototyp der Nähwirkmaschine gestattet bis zu drei Fadenlagen. Aus diesem Grund werden auf der Nähwirkmaschine dreilagige [0/90/0] Anordnungen umgesetzt und zusätzlich [0/90] Anordnungen hergestellt und unvernäht geschichtet. Auf Strick- und Dreherwebmaschine werden ebenfalls [0/90] Anordnungen realisiert und unvernäht zu Mehrschichtverbunden gestapelt.

Tabelle 17: unveränderliche Einflussgrößen

	Nähwirken	Stricken	Dreherweben
Maschinenbezeichnung	Karl Mayer Malimo 14022 P2-PS (E) (mit Nadelbarrenversatzeinrichtung)	Steiger Aries.3	Dornier EasyLeno 2T
Bild			
Maschinenfeinheit (Kettabstand)	F 7 (3,57 mm)	E 7 (3,63 mm)	-- (3,56 mm)
Schussabstand	bei [0/90/0]: 1,8 mm bei [0/90]: 3,6 mm	bei [0/90]: 3,6 mm	bei [0/90]: 3,6 mm
Fadenlagenanzahl	3	2	2
Produktivität	64,5 m ² /h ¹⁰	5,4 m ² /h ¹¹	48,6 m ² /h ¹²
Arbeitsbreite	max. 1,5 m	max. 1,35 m	max. 1,8 m

¹⁰ bei einer max. möglichen Drehzahl von 200 min⁻¹ für diese Versuche und einer Stichlänge von 3,6 mm

¹¹ bei einer Gestrickbreite von 1 m, einer Schlittengeschwindigkeit von max. 15 mm/s und einem Schussabstand von 3,6 mm

¹² bei einer Drehzahl von max. 125 min⁻¹ und einem Schussabstand von 3,6 mm

6.3.2.2 Veränderliche Einflussgrößen

Fadenlagen, Herstellprozess und Wirkfadenzugkraft

Die veränderlichen Einflussgrößen sind in Tabelle 18 dargestellt und gliedern sich in die Bereiche Fadenlagenanzahl sowie -anordnung, Herstellprozess, Bindung, Wirkfadenzugkraft, eingesetzte Faserstoffe und Art des Flächenbildungsverfahrens.

Tabelle 18: Faktoren und Faktorstufen

Faktoren	Faktorstufen
1) Fadenlagenanzahl/-anordnung	Stufe 1: 2-lagig [0/90] Stufe 2: 3-lagig [0/90/0] Stufe 3: 4-lagig [0/90/90/0]
2) Herstellprozess	Stufe 1: 1-Schritt, vernäht Stufe 2: 2-Schritt, vernäht Stufe 3: 2-Schritt, unvernäht
3) Bindung	Stufe 1: RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet Stufe 2: RL-Tuch, Basisversatz 2, gleichgerichtet Stufe 3: RL-Trikot, Basisversatz 1, entgegengerichtet
4) Wirkfadenzugkraft	Stufe 1: hoch Stufe 2: mittel Stufe 3: niedrig
5) Wirkfaden (Faserstoff)	Stufe 1: PP 11 tex (CHE-PP11) Stufe 2: GF/PP-HG 170 tex (GSO-HG170)
6) Kett- und Schussfaden (Faserstoff)	Stufe 1: GF/PP-HG 408 tex (ITB-HG408) Stufe 2: GF 640 tex (VET-ARG640, nur zum Vergleich der Fadenondulationen)
7) Flächenbildungsverfahren	Stufe 1: Nähwirken Stufe 2: Flachstricken Stufe 3: Weben

Es werden drei unterschiedliche Konfigurationen der Fadenlagenanzahl und -anordnung betrachtet. Zunächst eine konventionelle [0/90]-Anordnung. Diese dient zum Vergleich bezüglich der Bauteilverformung mit der mittellagensymmetrischen [0/90/0]-Anordnung und gleichzeitig als Zwischenstufe für die Herstellung der symmetrischen [0/90/90/0]-Anordnung, die durch Stapeln ohne Wirkfadenverbindung entsteht. Der Vergleich der beiden symmetrischen Anordnungen dient in Verbindung mit der Variation des Herstellprozesses zur Bestimmung des Einflusses des erweiterten Nähwirkprozesses auf die Eigenschaften

des textilen Halbzeugs und des Faser-Kunststoff-Verbundes. Während mit dem erweiterten Nähwirkprozess eine [0/90/0]-Anordnung in einem Arbeitsgang verbunden werden kann, ist bei Verwendung des konventionellen Nähwirkprozesses eine 2-stufige Herstellung nötig. Die dritte Faktorstufe beim Herstellprozess dient dem Vergleich mit einem unvernähten Mehrschichtverbund, wie er in der Praxis häufig eingesetzt wird. Bisherige Untersuchungen zeigen einen Einfluss der Wirkfadenzugkraft auf die Auslenkung der Kettfäden aus ihrer Vorzugsrichtung. Es ist deshalb auch Ziel dieser Versuche, eine Wirkfadenzugkraft (beziehungsweise die korrespondierende Fadenliefermenge) zu ermitteln, bei der das Ausmaß dieser unerwünschten Kettfadenondulierung minimal ist.

Bindung

Eine geeignete Bindung zur Fixierung der Fadenlagen-Nähwirkstoffe sollte folgende Bedingungen erfüllen:

- geringe Auslenkung der Kettfäden aus ihrer definierten Lage,
- geringe Versatzweiten von Nadel- und Legebarren (Erhalt einer hohen Produktivität),
- geringer Wirkfadenverbrauch bei Verwendung von nicht-tragendem Wirkfadenmaterial (Minimierung der nicht lastabtragenden Komponenten im Verbund),
- Lastabtragung durch den Wirkfaden in Kett- und/oder Schussrichtung bei Verwendung hochfester Werkstoffe,
- anwendungsbezogene, gute Drapierbarkeit.

Im Folgenden wird betrachtet, wie einige Standardbindungen in Kombination mit dem erweiterten Wirkprozess unter Berücksichtigung der genannten Kriterien eingeschätzt werden können, um eine Auswahl geeigneter Bindungen für das Versuchsprogramm zu treffen. Diese Betrachtung erfolgt anhand geometrischer Überlegungen und Kräftezerlegungen, durch welche die Einflussnahme der Bindung auf die Grundbahn qualitativ ermittelt werden kann. Es soll gezeigt werden, dass durch den unter Zugspannung stehenden Wirkfaden auf den Kettfäden Kräfte ausgeübt werden, die in Abhängigkeit von dessen Beschaffenheit und der Größe der wirkenden Kräfte zu einer Kompression oder Auslenkung des Kettfadens führen.

Werden die Grundbindungen Trikot, Tuch, Satin und Samt in Verbindung mit einem Nadelversatz gleicher Legungsweite und gleicher Richtung gearbeitet, so entsteht keine Verbindung der Wirkfäden untereinander (siehe Bild 82a und Bild 83a). Deshalb werden die Wirkfäden im Verarbeitungsprozess eng um die Kettfäden gelegt (siehe Bild 82b und Bild 83b). In Abhängigkeit von der Wirkfadenzugkraft kommt es dabei zu einer Kompression und zu einer Auslenkung der Kettfäden durch die quer zur Fadenlängsachse wirkende Resultierende der Wirkfadenzugkraft (siehe Bild 82c und Bild 83c). Die Größe dieser resultierenden Kraft F_Q lässt sich aus den geometrischen Abmessungen des Fadenverlaufs (Stichlänge, Maschinenfeinheit, komprimierter Kettfadendurchmesser) bestimmen. Dabei bedeuten:

F_z	Wirkfadenzugkraft [N],
F_Q	resultierende Kettfadenquerkraft [N],
F	Maschinenfeinheit [dimensionslos],
f	Abstand der Wirkelemente [mm], $f = \frac{25mm}{F}$,
s	Stichlänge [mm],
d_K	komprimierter Kettfadendurchmesser [mm],
x_K	Abstand der Wirkfadenknotenpunkte in Schussrichtung,
y_K	Abstand der Wirkfadenknotenpunkte in Kettrichtung,
α, β	Winkel im Kräfteparallelogramm.

Der Abstand der Wirkfadenknotenpunkte x_K , also der Punkte, an denen der Wirkfaden mit sich selbst verschlungen wird und die Grundbahn durchdringt, entspricht theoretisch dem Vielfachen des Abstands der Wirkelemente f (bei Trikot $x_K = f$, bei Tuch $x_K = 2f$ usw.). Er verringert sich in Schussrichtung (x_K) jedoch aufgrund der engen Einbindung der Kettfäden bei der Bindung Trikot auf den komprimierten Kettfadendurchmesser d_K , bei Tuch auf die Summe des einfachen Abstands der Wirkelemente f plus dem komprimierten Kettfadendurchmesser d_K usw. (siehe Bild 82a und b und Bild 83a und b). Der Abstand der Wirkfadenknotenpunkte in Kettrichtung (y_K) entspricht bei diesen Bindungen und dem verwendeten Schussfadenabstand näherungsweise der Stichlänge s .

Die resultierende Kettfadenquerkraft F_Q wird aus dem Kräfteparallelogramm der Wirkfadenzugkräfte F_z bestimmt (siehe Bild 82d und Bild 83d). Aus den bekannten Größen x_K und y_K für die jeweilige Bindung lässt sich aus den Winkelfunktionen für das rechtwinklige Dreieck der von den Wirkfadenzugkräften F_z eingeschlossene Winkel α folgendermaßen bestimmen:

$$\alpha = 2 \arctan \left(\frac{y_K}{x_K} \right)$$

Gleichung 11

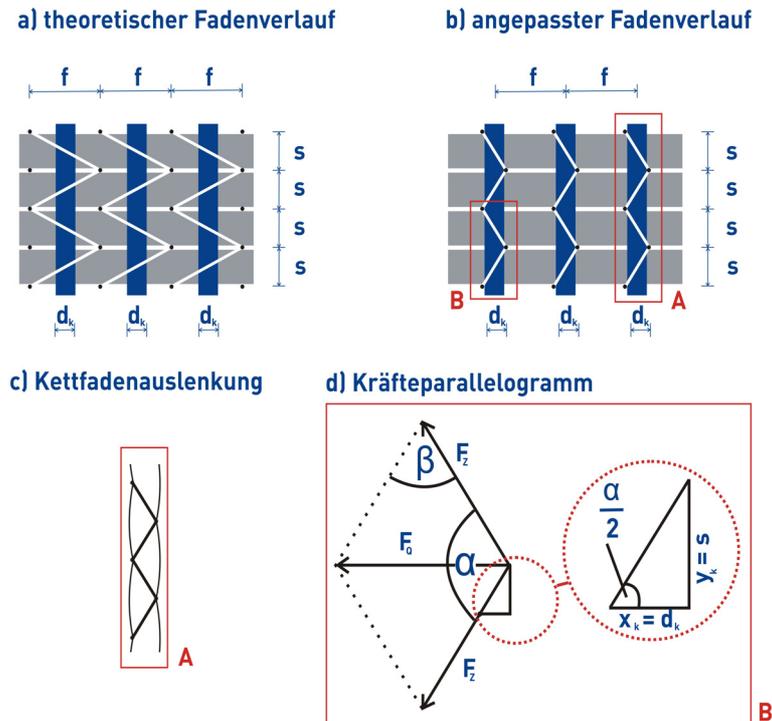


Bild 82: schematische Darstellung des Wirkfadeneinflusses auf die Auslenkung der Kettfäden für die Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet

Die resultierende Kettfadenquerkraft F_Q bestimmt sich nach dem Projektionssatz für das allgemeine Dreieck:

$$F_Q = F_z \cos \frac{\alpha}{2} + F_z \cos \frac{\alpha}{2} = 2F_z \cos \frac{\alpha}{2} = 2F_z \cos \left[\arctan \left(\frac{y_K}{x_K} \right) \right] = \frac{2F_z}{\sqrt{1 + \frac{y_K^2}{x_K^2}}}$$

Gleichung 12

Somit ergibt sich nach Gleichung 12 bei gleichbleibender Stichelweite und gleichbleibender Wirkfadenzugkraft eine Erhöhung der resultierenden Kettfadenquerkraft mit Vergrößerung der Legungsweite von Lege- und Nadelbarre (siehe grafische Darstellung in Bild 82d und Bild 83d).

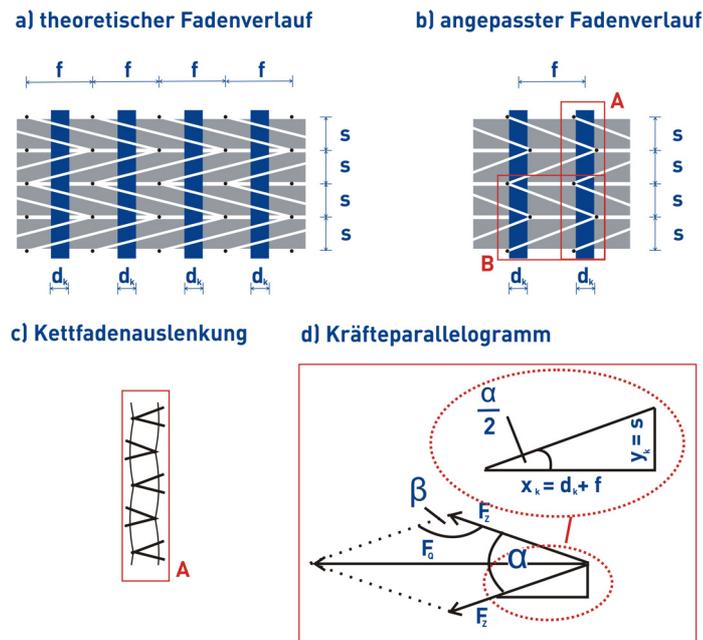


Bild 83: schematische Darstellung des Wirkfadeneinflusses auf die Auslenkung der Kettfäden für die Bindung RL-Tuch, Basisversatz 2, gleichgerichtet

Bei Verwendung von Grundbindungen mit gleichgerichtetem Basisversatz und gleicher Legungsweite ergibt sich somit immer eine quer zur Kettfadenlängsachse wirkende Kraft, die Auslenkungen hervorrufen kann und die mit steigender Legungsweite zunimmt. Weiterhin steigen mit größerer Legungsweite sowohl der Wirkfadenverbrauch als auch die theoretisch in Schussrichtung wirksame Tragwirkung.

Durch Kombination der Grundbindungen mit einem Basisversatz gleicher Legungsweite in entgegengesetzter Richtung entsteht eine Verbindung zwischen den benachbarten Wirkfäden. Durch diese Verbindung heben sich die in Richtung der Kettfäden wirkenden Resultierenden der Wirkfadenzugkraft gegenseitig weitgehend auf, so dass es bei den verwendeten Parametern, bei denen der Kettfadendurchmesser d_k kleiner ist als der Abstand der Kettfäden f , eine sehr geringe Querkraft auf die Kettfäden wirkt (Bild 84). Durch die geringere Kettfadenkontraktion ist der Wirkfadenverbrauch etwas höher als bei derselben Bindung mit gleichgerichtetem Basisversatz.

Zur Verminderung der Kettfadenquerkraft F_Q bei Verwendung von Grundbindungen mit gleichgerichtetem Basisversatz besteht die Möglichkeit der Kombination mit der Grundbindung RL-Franse. Durch die daraus resultierende Verschiebung des Kräfteparallelogramms der Wirkfadenzugkraft F_Z ändern sich sowohl die Wirkungsrichtung als auch der Betrag von F_Q (Bild 85). Zudem wird die Tragwirkung des Wirkfadens in Kettrichtung erhöht und der Wirkfadenverbrauch ist etwas geringer als bei der entsprechenden Grundbindung ohne die Kombination mit RL-Franse. Bild 86 zeigt einen Vergleich der betrachteten Bindungen hinsichtlich der Erfüllung der eingangs dieses Abschnitts aufgestellten Anforderungen.

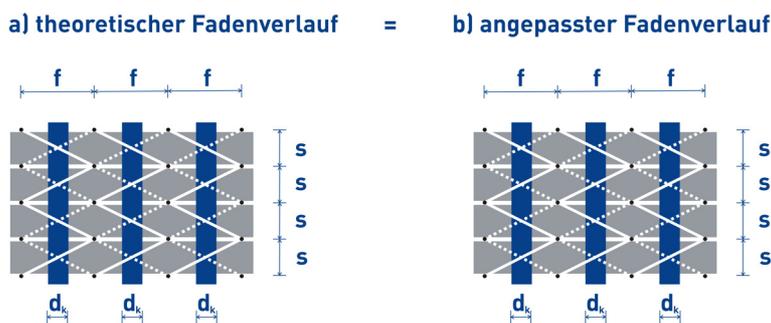


Bild 84: schematische Darstellung des Wirkfadenverlaufs für die Bindung RL-Tricot, Basisversatz 1, entgegengerichtet

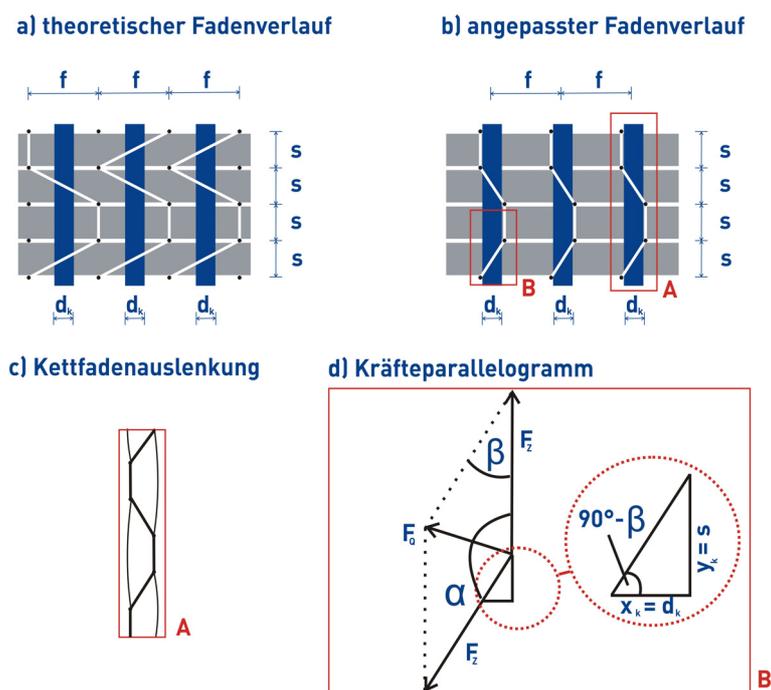


Bild 85: schematische Darstellung des Wirkfadeneinflusses auf die Auslenkung der Kettfäden für die kombinierte Bindung aus RL-Tricot und RL-Franse, Irregulärversatz folgt der Legebarre



Bild 86: Vergleich unterschiedlicher Bindungsvarianten

Aufgrund dessen werden folgende Bindungsvarianten für die weiteren Untersuchungen ausgewählt:

- RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet (mit mittlerem Wert für F_Q und höherer Kettverstärkung)
- RL-Trikot, Basisversatz 1, entgegengerichtet (mit geringerem Wert für F_Q und ausgeglichener Kett- und Schussverstärkung),
- RL-Tuch, Basisversatz 2, gleichgerichtet (mit höherem Wert für F_Q und höherer Schussverstärkung).

6.3.2.3 Veränderliche Werkstoffgrößen

Zusätzlich zu den Prozessgrößen werden die verwendeten Faserstoffe für den Wirkfaden und die Grundbahn variiert (Tabelle 19 und Tabelle 20). Standardfadenmaterial für die Grundbahn ist ein Glasfaser-Polypropylen-Hybridgarn (GF/PP-HG) mit einer Nennfeinheit von 408 tex (ITB-HG408). Dieses besteht aus Glasfilamentgarn (*P-D Glasseiden GmbH*) mit einer Nennfeinheit von 300 tex und drei Polypropylen-Filamentgarnen (*Chemosvit Fibrochem a.s.*) mit einer Nennfeinheit von je 32 tex. Die Abweichung in der Gesamtfeinheit von der Summe der Einzelfeinheiten ergibt sich durch die bei der Herstellung des Garnes erfolgte Überlieferung (siehe Tabelle 20). Der Glasfaservolumengehalt dieser Kombination in einem UD-Verbund beträgt 52 Prozent.

Die Mischung der Komponenten erfolgt im Luftverwirbelungsverfahren (*Commingling-Hybridgarn*). Hybridgarne nach diesem Herstellungsverfahren weisen eine typische Abfolge von kompakteren und voluminöseren Abschnitten auf (PAUL ET AL., 2006 [150], HAUSDING, PAUL ET AL., 2008 [105]). Für die Herstellung der Commingling-Hybridgarne wird eine modifizierte Lufttexturiermaschine RMT-D (*Stähle GmbH*) eingesetzt. Die Verstärkungs- und Matrixfilamentgarne werden über getrennte Lieferwerke der Luftverwirbelungsdüse zugeführt (*TEMCO LD 5.05*). Dort erfolgt mittels Luftstrom das Öffnen und Mischen der Filamente. Tabelle 21 zeigt die wesentlichen Parameter der Hybridgarnherstellung.

Tabelle 19: Fadenmaterialien

Bezeichnung	Hersteller	kommerzielle Bezeichnung	Material	Aufmachung	Nennfeinheit [tex]
Vergleichsmaterial für optische Bewertung:					
VET-ARG640	OCV Germany GmbH	Cem-FIL Direct Roving LTR ARC 640 5325	AR-Glas	Filamentgarn	640
Ausgangsmaterial für Grundbahn:					
GSO-GF300	P-D Glasseiden GmbH	EC 300 E35	E-Glas	Filamentgarn	300
CHE-PP32	Chemosvit Fibrochem a.s.	Prolen H	PP	Filamentgarn	32
Hybridgarn für Grundbahn:					
ITB-HG408	ITB, TU Dresden	-	E-Glas/PP-Hybridgarn aus GSO-GF300 und CHE-PP32	lufttexturiertes Hybridgarn	408
Wirkfadenmaterial:					
CHE-PP11	Chemosvit Fibrochem a.s.	Prolenset FX 110/33X1/75	PP	texturiertes Filamentgarn	11
GSO-HG170	P-D Glasseiden GmbH	-	E-Glas/PP-Hybridgarn	lufttexturiertes Hybridgarn	170
ITB-HG138	ITB, TU Dresden	-	E-Glas/PP-Hybridgarn	lufttexturiertes Hybridgarn	138

Dieses Hybridgarn stellt das Ausgangsmaterial für alle Untersuchungen am Faser-Kunststoff-Verbund und zum Drapierverhalten dar. Zur Bewertung des Ausmaßes der Faserondulationen wird als Vergleichsmaterial ein Glasfilamentgarn (*OCV Germany GmbH*) verwendet. Dieses weist eine gleichmäßigere Struktur als das Hybridgarn auf und soll die Beurteilung verfahrensbedingter Kettfadenondulierungen ohne den Einfluss der Strukturungleichmäßigkeiten des Fadens ermöglichen.

Tabelle 20: Kennwerte der eingesetzten Hybridgarne

Garn	gemessene Feinheit [tex]	Höchstzugkraft [N]	Dehnung [%]	feinheitsbezogene Höchstzugkraft [cN/tex]
GSO-HG170	168	22,85	2,46	13,6
ITB-HG408	406	41,42	1,06	10,2
ITB-HG138	138	21,11	3,60	15,3

Tabelle 21: Parameter Hybridgarnherstellung

Garn	Verstärkungs-komponente	Matrix-komponente	Verarbeitungsbedingungen				theoretische Feinheit
			Luftdruck	Überlieferung		Prozess-geschw.	
				GF	PP		
ITB-HG408	1 x GF 300 tex	3 x PP 32 tex	0,02 MPa	2,5 %	5 %	100 m/min	408 tex

Die Verwendung von GF/PP-Commingling-Hybridgarn als Wirkfaden für die Nähwirkstoffe (GSO-HG170, *P-D Glasseiden GmbH*, Faservolumengehalt 35 Prozent) und als Maschenfaden für die Gestricke (ITB-HG138, Faservolumengehalt 27 Prozent) dient der Untersuchung des Einflusses von Verstärkungsfadenmaterial in z-Richtung auf die Eigenschaften des Faser-Kunststoff-Verbundes. Als Standardwirkfadenmaterial kommt ein texturiertes 11 tex Polypolylen-Multifilamentgarn zum Einsatz.

6.4 Einfluss der Wirkfadenzugkraft und der Bindung auf die Grundbahn

6.4.1 Bestimmung der Wirkfadenzugkraft

Im Rahmen einer Versuchsreihe mit den Probenvarianten 6-1 bis 6-9 (Tabelle 22) soll zunächst der Einfluss von Wirkfadenzugkraft und Bindung auf das Ausmaß der Kettfadenauslenkungen ermittelt werden. Ziel dieser Betrachtungen ist die Auswahl einer geeigneten Wirkfadenzugkraft, bei der sowohl eine optimale Verarbeitbarkeit als auch eine geringe Kettfadenauslenkung gewährleistet werden können. Tastversuche mit dem PP-GF-Hybridgarn (ITB-HG408-01) zeigen, dass es teilweise zum Ausknicken der Fäden aus der gestreckten Lage kommt. Da das Fadenmaterial überdies eine herstellungsbedingt bauschichtige Struktur aufweist, werden die Vorversuche zunächst an Glasfaserfilamentgarn durchgeführt. Diese haben eine gleichmäßigere Struktur, so dass die Auswirkungen von Bindung und Wirkfadenzugkraft ohne Beeinflussung durch die Fadenstruktur beobachtet werden können.

Tabelle 22: Versuchsplan Wirkfadenzugkraft und Bindung

Probennr.	Technologie	Fadenlagen	Herstellprozess	Bindung	Grundbahn	Wirkfaden	Wirkfadenzugkraft
6-1	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet	GF 640 tex (VET-ARG640)	CHE-PP11	niedrig 5500 mm/Rack 4,2 cN
6-2	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet	GF 640 tex (VET-ARG640)	CHE-PP11	mittel 4400 mm/Rack 12,5 cN
6-3	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet	GF 640 tex (VET-ARG640)	CHE-PP11	hoch 4100 mm/Rack 20,7 cN
6-4	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Trikot, Basisversatz 1, entgegengerichtet	GF 640 tex (VET-ARG640)	CHE-PP11	hoch 5600 mm/Rack 20,8 cN
6-5	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Trikot, Basisversatz 1, entgegengerichtet	GF 640 tex (VET-ARG640)	CHE-PP11	mittel 5700 mm/Rack 10,5 cN
6-6	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Trikot, Basisversatz 1, entgegengerichtet	GF 640 tex (VET-ARG640)	CHE-PP11	niedrig 5950 mm/Rack 4,7 cN
6-7	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Tuch, Basisversatz 2, gleichgerichtet	GF 640 tex (VET-ARG640)	CHE-PP11	niedrig 7850 mm/Rack 4,7 cN
6-8	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Tuch, Basisversatz 2, gleichgerichtet	GF 640 tex (VET-ARG640)	CHE-PP11	mittel nicht realisierbar
6-9	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Tuch, Basisversatz 2, gleichgerichtet	GF 640 tex (VET-ARG640)	CHE-PP11	hoch nicht realisierbar

Zu Beginn der Untersuchungen wurde ermittelt, an welcher Stelle des Verlaufes der Wirkfäden vom Kettbaum bis zur Wirkstelle welche Fadenzugkräfte auftreten und inwieweit sie von der Maschinendrehzahl abhängig sind. Die Messung der Wirkfadenzugkraft wurde mit einem Handmessgerät an zwölf verschiedenen Stellen (jeweils links, rechts und in der Mitte der Wirkfadenschar an vier verschiedenen Positionen auf dem Weg zur Wirkstelle) an der Prototypmaschine je fünf mal durchgeführt und anschließend gemittelt (siehe Bild 87). Dabei konnte festgestellt werden, dass die Wirkfadenzugkraft zwischen Kettbaum und Wirkstelle kontinuierlich ansteigt und an der Wirkstelle ihr Maximum erreicht. Die Wirkfadenspannung schwankt über die Breite der Wirkfadenschar, jedoch unabhängig von der Messstelle. An der Wirkstelle betragen die Schwankungen schließlich nur noch drei Prozent. Die Zugkraftschwankungen an den einzelnen Wirkfäden über die Zeit sind gering.

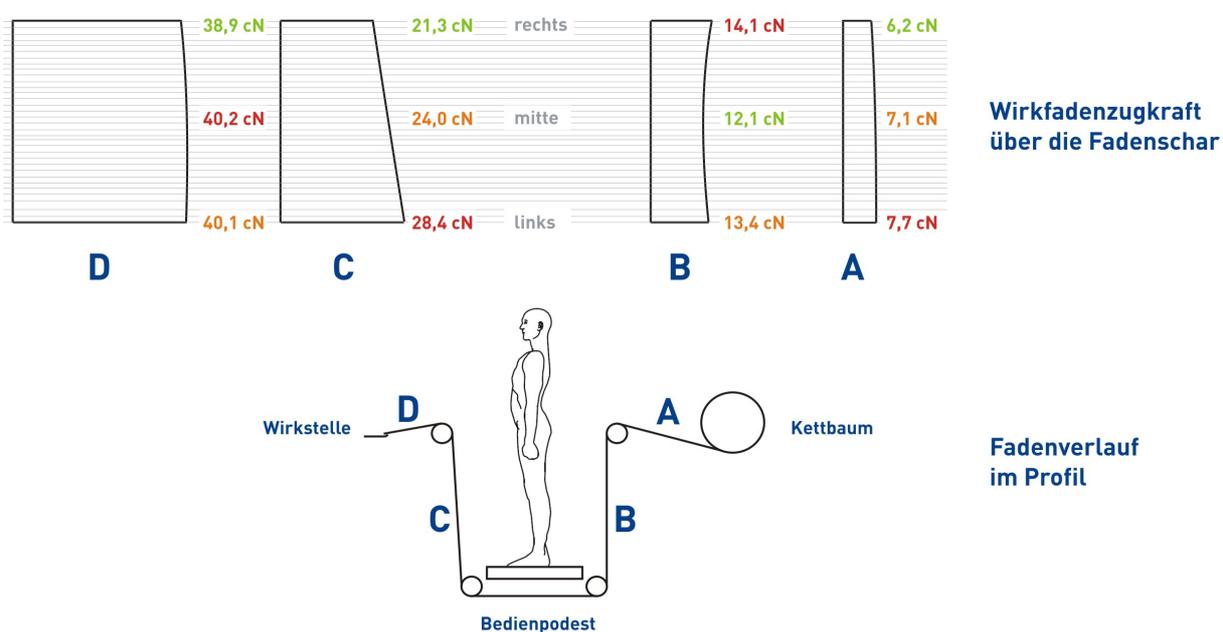


Bild 87: Wirkfadenzugkraft an der Prototypmaschine in Abhängigkeit von der Messstelle (Drehzahl 200 min^{-1} , Stichelänge 1,8 mm, Fadeneinlauf 4400 mm/Rack, Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet)

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Wirkfadenzugkraft mit steigender Maschinendrehzahl unabhängig von der Messstelle abnimmt (Bild 88). Aus den Untersuchungen wird deutlich, dass das Verhältnis der Wirkfadenzugkräfte an den einzelnen Messstellen bei veränderter Drehzahl konstant bleibt, so dass für die weiteren Messungen eine ausgewählte Messstelle genügt. Alle weiteren Messungen werden deshalb an der Messstelle B-mitte durchgeführt, da sie am leichtesten zugänglich ist. Die Wirkfadenzugkraft ist weiterhin von der Einlauflänge des Wirkfadens pro Hauptwellenumdrehung abhängig. Diese wird in Millimeter pro Rack angegeben, wobei ein Rack 480 Umdrehungen entspricht. Aufgrund des unterschiedlichen Fadenverbrauchs bei verschiedenen Bindungen muss der Zusammenhang zwischen Fadeneinlauflänge und Fadenzugkraft jeweils neu bestimmt werden. Prinzipiell jedoch gilt, dass mit steigender Einlauflänge die Wirkfadenzugkraft sinkt (Bild 89). Damit

dient dieser Maschinenparameter für die weiteren Untersuchungen als Stellgröße für die gezielte Wahl der Wirkfadenzugkraft.

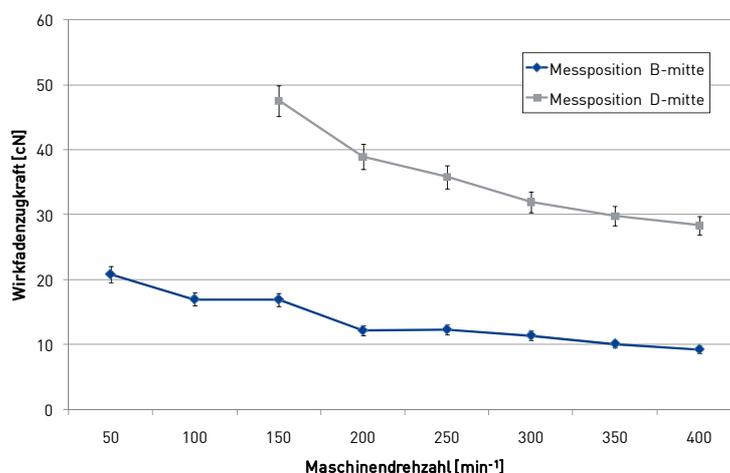


Bild 88: Wirkfadenzugkraft an der Prototypmaschine in Abhängigkeit von der Drehzahl (Stichlänge 1,8 mm, Fadeneinlauf 4400 mm/Rack, Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet)

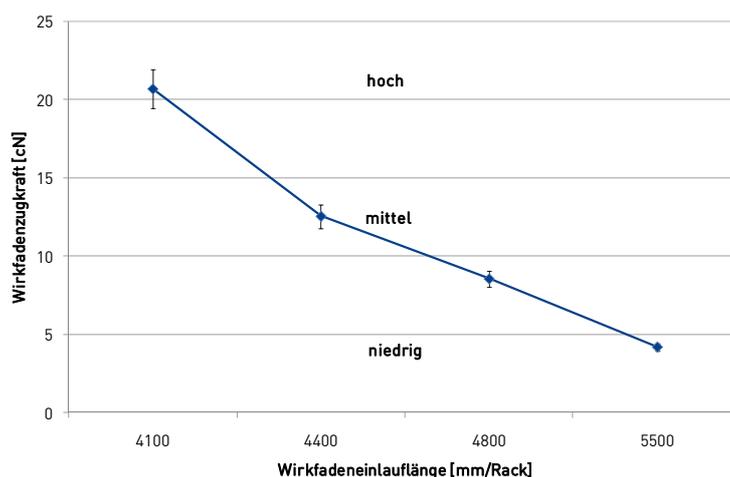


Bild 89: Wirkfadenzugkraft an der Prototypmaschine in Abhängigkeit von der Wirkfadeneinlaufänge (Drehzahl 200 min⁻¹, Stichlänge 1,8 mm, Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet)

6.4.2 Optische Bewertung der Nähwirkstoffe aus Glasfilamentgarn

Die optische Analyse (siehe Beschreibung im Anhang 10.5.2) der Nähwirkstoffe (Probevarianten 6-1 bis 6-9) zeigt, dass Bindung und Wirkfadenzugkraft einen großen Einfluss auf den Verlauf und die Bündelung des Kettfadens ausüben. Aus Bild 90 wird deutlich, dass insbesondere die Kettfadenbreite im Nähwirkstoff von diesen beiden Parametern abhängig ist. Mit steigender Wirkfadenzugkraft kommt es zu einer Einschnürung des Kettfadens und damit zu einer Verringerung der Kettfadenbreite. Dabei weist die Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1, entgegengerichtet die geringste Einschnürung auf. Durch die Abbindung der benachbarten Wirkfäden miteinander (siehe Schema in Bild 84), wird nur eine geringe Querkraft F_Q auf die Kettfäden ausgeübt, so dass sich auch bei steigender Wirkfadenzugkraft die Einschnürung der Kettfäden in Grenzen hält. Demgegenüber ist bei der Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1,

gleichgerichtet aufgrund der bindungsbedingt hohen Kettfadenquerkräfte eine deutliche Einschnürung der Kettfäden zu beobachten, die mit steigender Wirkfadenzugkraft noch verstärkt wird. Die höchste Kettfadenquerkraft wird bei der Bindung RL-Tuch, Basisversatz 2, gleichgerichtet ausgeübt, so dass schon bei niedriger Wirkfadenzugkraft eine sehr hohe Kettfadenkompression auftritt. Mittlere und hohe Wirkfadenzugkräfte ließen sich mit dieser Bindung nicht realisieren, da es dabei zu Fehlern durch Anstechen der Schussfäden kommt. Bei den Trikotbindungen konnte darüber hinaus festgestellt werden, dass die Kettfadenkompression auf der rechten Seite des Nähwirkstoffs geringer ausfällt als auf der linken.

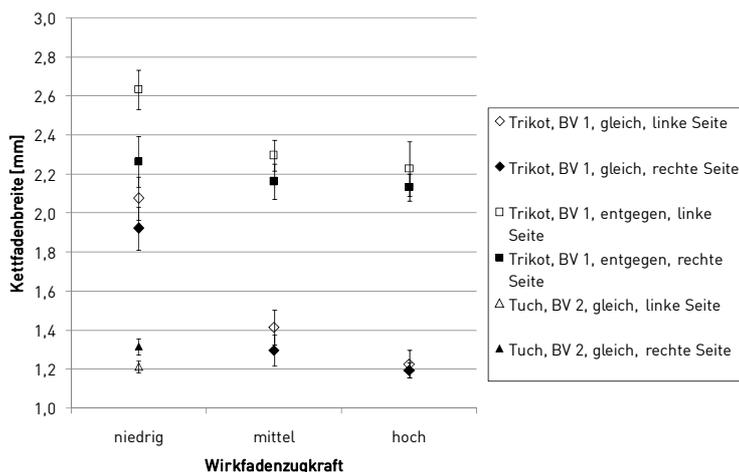


Bild 90: Einfluss der Wirkfadenzugkraft und der Bindung auf die Kettfadenbreite (Drehzahl 200 min⁻¹, Stichlänge 1,8 mm), ursprüngliche Breite des Fadens (VET-ARG640) 4 mm

Hauptbetrachtungsgegenstand dieser Vorversuche ist der Einfluss von Wirkfadenzugkraft und Bindung auf die Auslenkung der Kettfäden aus ihrer gestreckten Lage in Fadenlängsrichtung. Die optische Analyse macht deutlich, dass das in den Tastversuchen beobachtete Ausknicken der Kettfäden an den Wirkfadenknotenpunkten durch einen zweiten Effekt überlagert wird, der sich durch deutlich größere Lageabweichungen bemerkbar macht (Bild 91). Die Methode zur Bestimmung der Lageabweichung ist im Anhang 10.5.2 beschrieben. Es kann festgestellt werden, dass Kettfadenverschiebungen, die aus der Handhabung des Nähwirkstoffs resultieren, zu wesentlich größeren Abweichungen führen, als die Ausknickungen durch den Wirkfaden.

Die Varianten mit der Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1, entgegengerichtet weisen die höchste Gleichmäßigkeit auf. Der breit aufgefächerte Kettfaden wird durch die Maschen, die untereinander verbunden und damit in ihrer Lage fixiert sind, sicher gehalten und kaum durch nachfolgende Handhabungsschritte beeinträchtigt. Mit größerer Wirkfadenzugkraft steigt bei dieser Variante die Anzahl der Ungleichmäßigkeiten leicht an, liegt jedoch auch mit hoher Wirkfadenzugkraft noch über den Ergebnissen der Bindungen mit gleichgerichtetem Versatz. Da bei diesen Varianten die einzelnen Maschenfäden keine Verbindung untereinander aufweisen, lassen sich die Kettfäden sehr leicht aus ihrer geforderten Lage verschieben. Durch die Handhabung bei der Probenvorbereitung kommt es dadurch bereits zu deutlichen Lageabweichungen. Diese können durch eine hohe Wirkfadenzugkraft verringert werden. Die

starke, bindungsbedingte Einschnürung bei der Bindung RL-Tuch, Basisversatz 2, gleichgerichtet führt bereits bei einer geringen Wirkfadenzugkraft zu einer guten Fixierung der Kettfäden und damit zu geringen Lageabweichungen.

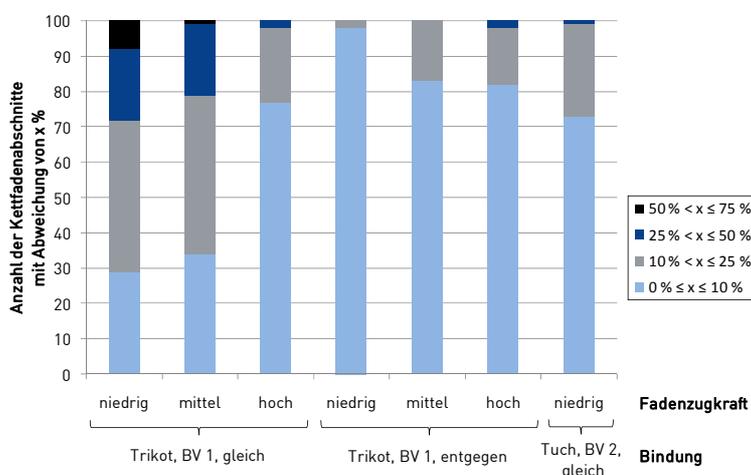


Bild 91: Einfluss der Wirkfadenzugkraft und der Bindung auf die Kettfadenauslenkung (Drehzahl 200 min⁻¹, Stichlänge 1,8 mm, Grundbahn VET-ARG640)

Aufgrund dieser Voruntersuchungen werden für die weitere Probenherstellung folgende Wirkfadenzugkräfte ausgewählt:

- für RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet: hohe Wirkfadenzugkraft,
- für RL-Trikot, Basisversatz 1, entgegengerichtet: niedrige Wirkfadenzugkraft,
- für RL-Tuch, Basisversatz 2, gleichgerichtet: niedrige Wirkfadenzugkraft.

6.5 Versuchsplanung und experimentelle Durchführung

6.5.1 Probenherstellung

6.5.1.1 Herstellung der textilen Halbzeuge

Das Versuchsprogramm wird ausgehend von den im Kapitel 6.3 definierten Untersuchungsschwerpunkten aufgestellt. Es umfasst 15 Varianten auf Basis der Nähwirktechnik sowie zwei Gestrick- und eine Gewebevariante. Die Nähwirkstoffe (Übersicht in Bild 92) unterscheiden sich hinsichtlich des Herstellverfahrens, des verwendeten Wirkfadens, der Bindung sowie der Wirkfadenzugkraft. Eine Gesamtübersicht aller Probenvarianten und ihrer Parameter zeigen die Tabelle 23 und die Tabelle 24 auf den Seiten 110-111.

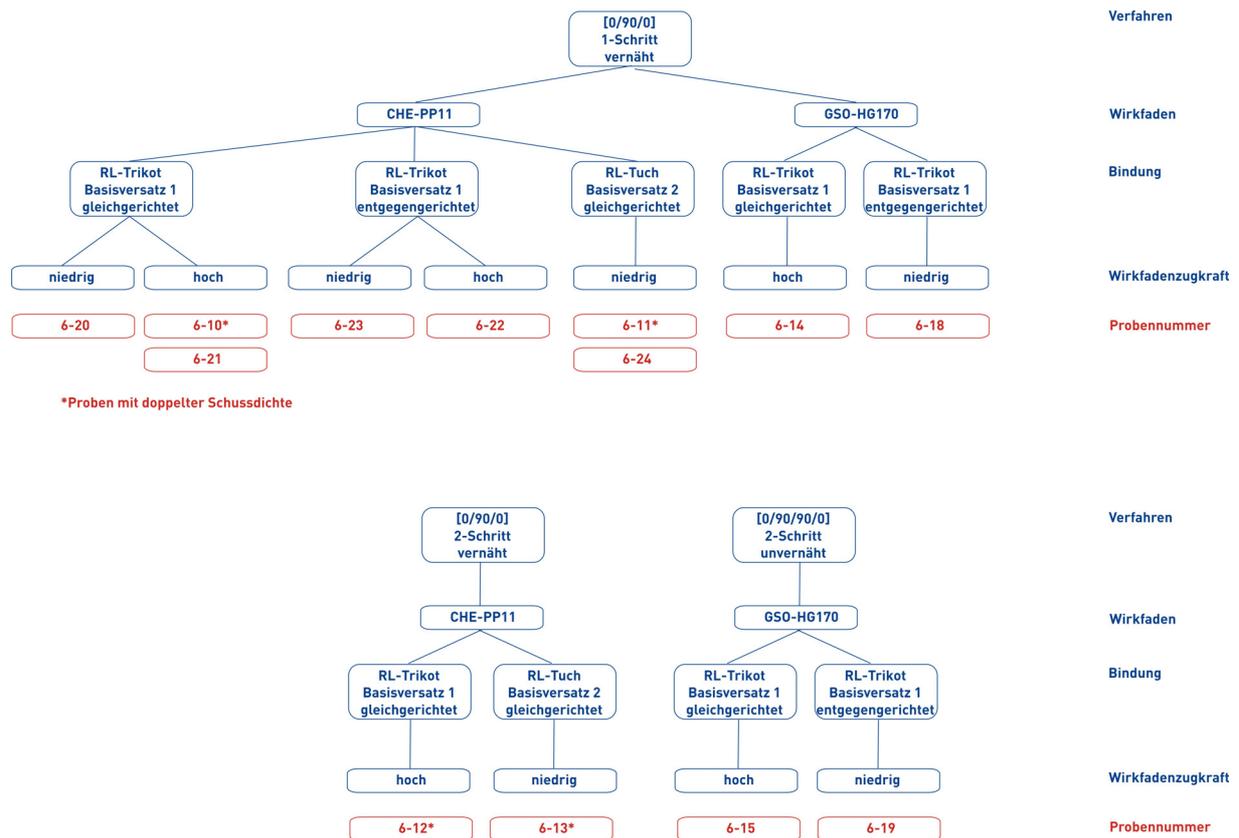


Bild 92: Versuchsplan Fadenlagen-Nähwirkstoffe

Die Herstellung der Fadenlagen-Nähwirkstoffe (Bild 93) erfolgt auf der Nähwirkmaschine Malimo 14022 P2-2S (E). Folgende Besonderheiten beziehungsweise Probleme wurden beobachtet:

- Die Verarbeitung von GF/PP-Hybridgarn (ITB-HG408) in der Grundbahn zu Fadenlagen-Nähwirkstoffen mit den geforderten geometrischen Parametern erfordert eine Reduktion der Maschinendrehzahl auf 150 min^{-1} gegenüber der maximal Drehzahl von 500 min^{-1} , da sonst durch das ungewollte Anstecken der Schussfäden keine sichere Fertigung gewährleistet werden kann.
- Die Verarbeitung von GF/PP-Hybridgarn (GSO-HG170) als Wirkfaden reduziert die Arbeitsgeschwindigkeit weiter und schränkt die Variationsmöglichkeiten hinsichtlich unterschiedlich einzustellender Wirkfadenzugkräfte ein.
- Die Herstellung der RL-Tuch-Muster 6-16 und 6-17 mit GF/PP-Hybridgarn (GSO-HG170) als Wirkfaden sowie der Muster 6-8 und 6-9 mit Variation der Wirkfadenzugkraft können aufgrund von Kett- und Schussfadenverschiebungen an der Wirkstelle nicht realisiert werden.
- Die Herstellung im 2-Schritt-Verfahren führt im zweiten Durchlauf zur Schädigung der vorgefertigten [0/90]-Grundbahn durch das teilweise Auftrennen des Wirkfadens. Eine exakte Kettfadenpositionierung ist nicht mehr gewährleistet.

Letzterer Punkt verdeutlicht den Vorteil der Herstellung im 1-Schritt-Verfahren nach dem erweiterten Wirkprozess, während die beobachteten Fertigungsschwierigkeiten bei der Maschinenweiterentwicklung (siehe Kapitel 7) berücksichtigt werden müssen. Eine Übersicht aller gefertigten Muster findet sich in Kapitel 10.6.

Weiterhin werden zwei Mehrlagengestricke und ein Drehergewebe gefertigt (Tabelle 23). Das Gestrick 6-25 dient als Vergleichsvariante mit dem Nähwirkstoff 6-10 für die Verwendung von PP-Bindefaden und weist ebenso ein Verhältnis von Kett- zu Schussfadenanzahl von 1:2 auf. Allerdings musste aus technischen Gründen ein 32 tex PP-Faden an Stelle des 11 tex PP-Fadens als Bindefaden verarbeitet werden.

Als Vergleichsvariante für die Verwendung von GF/PP-Hybridgarn im Wirkfaden dient das Gestrick 6-26. Unterschiede zu den Nähwirkstoff-Varianten ergeben sich insbesondere dadurch, dass die Kett- und Schussfäden beim Stricken bei gleicher Maschinenfeinheit dreifach zugeführt werden, so dass der Mehrschichtverbund für die Prüfung aus lediglich vier Lagen des Gestricks besteht. Weiterhin weichen Feinheit und Faservolumengehalt des verwendeten Maschenfadens ITB-HG138 von dem für die Nähwirkstoffe verwendeten GSO-HG170 ab. Als zusätzliche Variante wird das Gewebe 6-27 in den Vergleich einbezogen. Hier war die Verarbeitung von Hybridgarnen im Dreherfaden nicht möglich.



a) Gesamtansicht



b) Detail Nähwirkstelle



c) Zuführung der hinteren Kettfadenlage



d) Zuführung der Kett- und Schussfadenlagen

Bild 93: Musterfertigung an der Nähwirkmaschine Malimo 14022 P2-2S (E)

Tabelle 23: Versuchsplan

Probennr.	Technologie	Fadenlagen	Herstellprozess	Bindung	Grundbahn	Wirkfaden	Wirkfadenzugkraft
6-10	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet	GF/PP-HG 408 tex (ITB-HG408)	CHE-PP11	hoch 4100 mm/Rack 20,7 cN
6-11	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Tuch, Basisversatz 2, gleichgerichtet	GF/PP-HG 408 tex (ITB-HG408)	CHE-PP11	niedrig 7850 mm/Rack 4,7 cN
6-12	Nähwirken	[0/90/0]	2-Schritt, vernäht	RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet	GF/PP-HG 408 tex (ITB-HG408)	CHE-PP11	hoch 4100 mm/Rack 20,7 cN
6-13	Nähwirken	[0/90/0]	2-Schritt, vernäht	RL-Tuch, Basisversatz 2, gleichgerichtet	GF/PP-HG 408 tex (ITB-HG408)	CHE-PP11	niedrig 7850 mm/Rack 4,7 cN
6-14	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet	GF/PP-HG 408 tex (ITB-HG408)	GSO-HG170	hoch 4100 mm/Rack 20,7 cN
6-15	Nähwirken	[0/90]	2-Schritt, unvernäht	RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet	GF/PP-HG 408 tex (ITB-HG408)	GSO-HG170	hoch 4100 mm/Rack 20,7 cN
(6-16)	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Tuch, Basisversatz 2, gleichgerichtet	GF/PP-HG 408 tex (ITB-HG408)	GSO-HG170	nicht realisierbar
(6-17)	Nähwirken	[0/90]	2-Schritt, unvernäht	RL-Tuch, Basisversatz 2, gleichgerichtet	GF/PP-HG 408 tex (ITB-HG408)	GSO-HG170	nicht realisierbar
6-18	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Trikot, Basisversatz 1, entgegengerichtet	GF/PP-HG 408 tex (ITB-HG408)	GSO-HG170	niedrig 5950 mm/Rack 4,7 cN

Tabelle 24: Versuchsplan

Probennr.	Technologie	Fadenlagen	Herstellprozess	Bindung	Grundbahn	Bindefaden	Wirkfadenzugkraft
6-19	Nähwirken	[0/90]	2-Schritt, unvernäht	RL-Trikot, Basisver- satz 1, entgegengerich- tet	GF/PP-HG 408 tex [ITB-HG408]	G50-HG170	niedrig 5950 mm/Rack
6-20	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Trikot, Basisver- satz 1, gleichgerich- tet	GF/PP-HG 408 tex [ITB-HG408]	CHE-PP11	niedrig 5500 mm/Rack
6-21	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Trikot, Basisver- satz 1, gleichgerich- tet	GF/PP-HG 408 tex [ITB-HG408]	CHE-PP11	hoch 4100 mm/Rack
6-22	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Trikot, Basisver- satz 1, entgegengerich- tet	GF/PP-HG 408 tex [ITB-HG408]	CHE-PP11	hoch 5600 mm/Rack
6-23	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Trikot, Basisver- satz 1, entgegengerich- tet	GF/PP-HG 408 tex [ITB-HG408]	CHE-PP11	niedrig 5950 mm/Rack
6-24	Nähwirken	[0/90/0]	1-Schritt, vernäht	RL-Tuch, Basisver- satz 2, gleichgerich- tet	GF/PP-HG 408 tex [ITB-HG408]	CHE-PP11	niedrig 7850 mm/Rack
6-25	Stricken	[0/90]	1-Schritt, verbunden durch Maschenfa- den	Rechts-Links	GF/PP-HG 408 tex [ITB-HG408]	CHE-PP32	--
6-26	Stricken	[0/90]	1-Schritt, verbunden durch Maschenfa- den	Rechts-Links	GF/PP-HG 408 tex [ITB-HG408]	ITB-HG138	--
6-27	Dreherweben	[0/90]	1-Schritt, verbunden durch Dreherfaden	Dreherbindung	GF/PP-HG 408 tex [ITB-HG408]	CHE-PP32	--

6.5.1.2 Herstellung der Mehrschichtverbunde

Die Herstellung der Mehrschichtverbunde aus den Fadenlagen-Nähwirkstoffen, Drehergeweben und Mehrlagengestriken erfolgte an einer Laborpresse *Collin P300 PV* (*Dr. Collin GmbH*, Ebersberg). Aus den Erfahrungen früherer Forschungsprojekte wird ein optimaler Presszyklus für die Herstellung der Mehrschichtverbunde abgeleitet (Tabelle 25). Der Pressvorgang umfasst fünf Phasen. In der ersten Phase (Vorheizphase) erfolgt das Vorheizen auf die gewünschte Ausgangstemperatur. In der zweiten Phase, der Aufheizphase, wird die Presse bei einer Temperaturrampe von 10 K/min auf die Höchsttemperatur erwärmt. Die dritte Phase dient anschließend dem Durchwärmen des Presswerkzeugs. In der vierten Phase findet nach Erhöhung des Pressdrucks der eigentliche Pressvorgang statt. In der letzten und fünften Phase wird der Mehrschichtverbund abgekühlt. Die Abkühlung erfolgt ebenfalls bei einer Temperaturrampe von 10 K/min. Um Lufteinschlüsse in Dickenrichtung zu vermeiden und eine hohe Formgenauigkeit des Verbundes zu gewährleisten, wird der Pressdruck in der Abkühlphase beibehalten. Zusätzlich kann der Luftdruck im Pressinnenraum durch eine Vakuumpumpe angepasst werden. Als Standardwert für die Herstellung der Mehrschichtverbunde wird ein Luftdruck von -0,05 MPa gewählt.

Tabelle 25: Kennwerte Pressvorgang

Parameter	Phase 1: Vorheizen	Phase 2: Aufheizen	Phase 3: Durchwärmen	Phase 4: Pressen	Phase 5: Abkühlen
Temperatur [°C]	30	223	223	223	30
Hydraulikdruck [MPa]	0,01	0,06	0,06	0,49	0,49
Zeit [s]	60	1140	180	600	1500

Tabelle 26 zeigt die Kennwerte der hergestellten Mehrschichtverbunde. Es ist erkennbar, dass das Herstellungsverfahren, die Bindung und das Wirkfadenmaterial folgendermaßen Einfluss auf den Faservolumengehalt im Verbund nehmen:

- Die Verwendung einer Bindung mit höherem Wirkfadenverbrauch (RL-Tuch gegenüber RL-Trikot) bewirkt eine Verringerung des Faservolumengehaltes durch den höheren Anteil an Polypropylen aus dem aufgeschmolzenen Wirkfaden.
- Gleichermäßen führt die Verarbeitung im 2-Schritt-Verfahren infolge Verdopplung des Wirkfadenanteils zu geringeren Faservolumengehalten.
- Auch eine Verwendung von GF/PP-Hybridgarn (GSO-HG170) als Wirkfaden reduziert den Faservolumengehalt gegenüber dem Einsatz von PP-Filamentgarn (CHE-PP11) durch die größere Menge an Polypropylen.

Tabelle 26: Kennwerte Mehrschichtverbunde

Variante	Anzahl Schichten	Plattendicke [mm]	Masseanteil Glasfaser [%]	Volumenanteil Glasfaser [%]
6-10	6	2,23	73,2	49,5
6-11	6	2,32	72,2	48,2
6-12	6	2,33	71,9	47,8
6-13	6	2,39	71,3	47,1
6-14	6	2,42	70,4	45,9
6-15	12	3,14	67,5	42,6
6-18	6	2,50	69,3	44,6
6-19	12	3,45	66,9	42,0
6-20	6	1,69	73,0	49,2
6-21	6	1,65	73,6	49,9
6-22	6	1,69	72,9	49,1
6-23	6	1,69	73,0	49,2
6-24	6	1,71	72,4	48,5
6-25	12	3,10	62,9	37,2
6-26	4	2,04	70,8	46,1
6-27	12	1,82	71,8	47,7

6.5.2 Prüfverfahren zur Kennwertermittlung

Tabelle 27 gibt einen Überblick über die zur Kennwertermittlung herangezogenen Prüfverfahren. Diese stützen sich im Wesentlichen auf die angegebenen Normen, die jedoch aufgrund von früheren Erfahrungen bei der Prüfung von Hybridgarnen und thermoplastischen Verbundwerkstoffen am *ITM* im Rahmen des *Sonderforschungsbereichs 639* teilweise angepasst werden. Eine detailliertere Darstellung findet sich im Anhang (Kapitel 10.4).

Tabelle 27: Übersicht Prüfverfahren

Ebene	Prüfung	Norm
Faden	Feinheitsbestimmung Zugversuch	DIN 53830 [204] DIN 53834 [205]
textile Fläche	Bestimmung Fadenondulierung Stempeldurchdruck-Versuch Scherversuch	ITM (interne Prüfvorschrift) ITM (interne Prüfvorschrift) ITM (interne Prüfvorschrift)
Faser-Kunststoff-Verbund	Zugversuch 4-Punkt-Biegeversuch Charpy-Schlagversuch scheinbare interlaminare Scherfestigkeit	EN ISO 527-4 [191] DIN EN ISO 14125 [199] DIN EN ISO 179-2 [190] DIN EN ISO 14130 [200]

6.6 Auswertung

6.6.1 Einfluss von Wirkfadenzugkraft und Bindung auf die Kettfadengeometrie

6.6.1.1 *Optische Bewertung der Nähwirkstoffe aus Hybridgarn*

Bei der optischen Analyse (Kapitel 10.4) der Hybridgarn-Varianten zeigen sich zwei Einschränkungen gegenüber den Varianten mit Glasfilamentgarn. Zum einen führt die Verwendung von Hybridgarn (GSO-HG170) im Wirkfaden zur weitestgehenden Abdeckung des Kettfadens, so dass diese Varianten nicht zur Auswertung herangezogen werden können, zum anderen ist die Bestimmung der Kettfadenbreite bei Verwendung von Hybridgarn aufgrund der starken Garnbauschigkeit und Dickenschwankungen von bis zu 50 Prozent weniger aussagekräftig. Die Unterschiede zwischen niedriger und hoher Wirkfadenzugkraft können analog der Auswertung der Glasfilamentgarnproben (Kapitel 6.4.2) beobachtet werden (Bild 94). Bindungsbedingte Einflüsse auf die Kettfadenbreite werden bei diesem Fadenmaterial jedoch durch die Garnstruktur überlagert und können nicht eindeutig identifiziert werden.

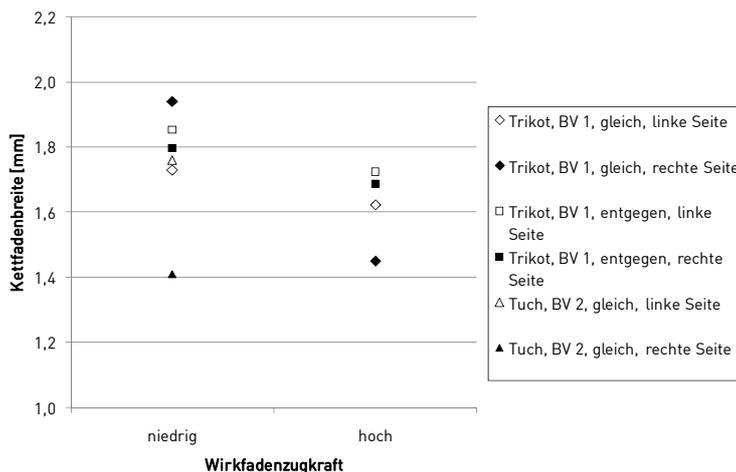


Bild 94: Einfluss der Wirkfadenzugkraft und der Bindung auf die Kettfadenbreite (Drehzahl 200 min⁻¹, Stichlänge 1,8 mm, Wirkfaden PP 11 tex, Grundbahn ITB-HG408)

Grundsätzlich können bei der Beurteilung der Kettfadenauslenkung unter Verwendung des Hybridgarns die gleichen Tendenzen wie bei der Verwendung des Glasfilamentgarns beobachtet werden (Bild 95). Abweichungen ergeben sich insofern, als die Gleichmäßigkeit der Nähwirkstoffe insgesamt etwas schlechter ist, wobei zu beachten ist, dass diese durch die verwirbelte Fadenstruktur zusätzlich herabgesetzt wird. Die RL-Tuchbindung weist die größte Gleichmäßigkeit auf. Die Wahl der jeweilig einzustellenden Wirkfadenzugkraft auf Grundlage der Erkenntnisse mit Glasfilamentgarn wird durch die Ergebnisse bestätigt. Auch bei den Hybridgarnvarianten führen handhabungsbedingte Lageabweichungen selbst bei sorgfältigem Umgang mit den Proben zu deutlicheren Strukturungleichmäßigkeiten als das durch die Bindung hervorgerufene Ausknicken.

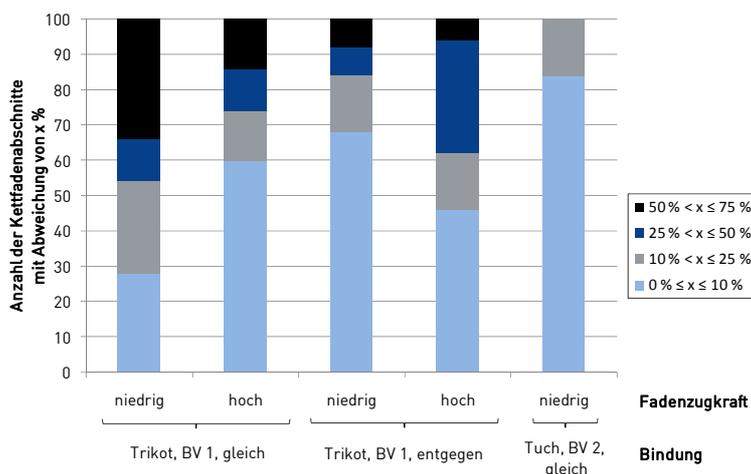


Bild 95: Einfluss der Wirkfadenzugkraft und der Bindung auf die Kettfadenauslenkung (Drehzahl 200 min⁻¹, Stichlänge 1,8 mm, Wirkfaden PP 11 tex, Grundbahn ITB-HG408)

6.6.2 Einfluss der Fadenlagenanordnung auf die Bauteilgeometrie

Zur Bestimmung des erwarteten Einflusses der Fadenlagenanordnung auf die Bauteilgeometrie werden von zwei Mustern (6-14 und 6-15) Proben hergestellt, bei denen jeweils nur

eine einzige Lage des Nähwirkstoffs verpresst wird. Eine unsymmetrische Lagenanordnung in der Form $[0/90]$ (Variante 6-15) führt im Mehrschichtverbund zu Deformationen (Bild 96). Die Probe weist eine deutliche Krümmung in Richtung der Kettfäden auf. Demgegenüber wird durch eine symmetrische Anordnung in der Form $[0/90/0]$ (Variante 6-14) eine ebene Platte erzeugt.

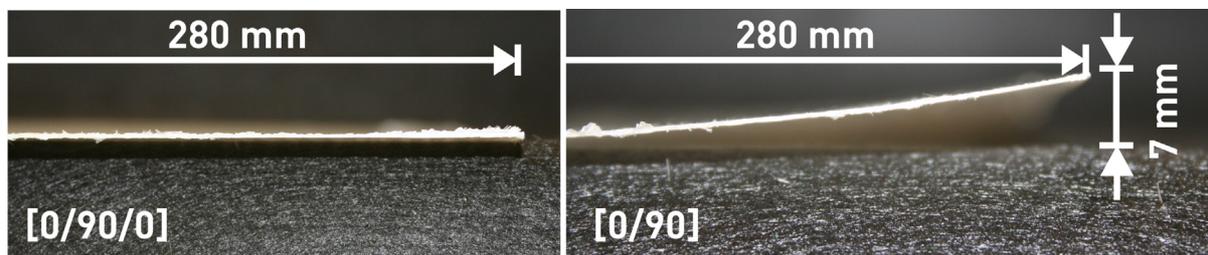


Bild 96: Einfluss der Lagenanordnung auf die Bauteilgeometrie (Plattendicke ca. 0,4 mm)

6.6.3 Einfluss der Herstellung des Nähwirkstoffs auf die Verbundeigenschaften

Einen wichtigen Untersuchungsschwerpunkt stellt die Ermittlung des Einflusses des Herstellverfahrens auf die Verbundeigenschaften dar. Dabei werden zwei Einflussfaktoren untersucht, die aus dem Vergleich von konventionellem und erweitertem Nähwirkprozess resultieren: Zum einen die Herstellung mittellagensymmetrischer Nähwirkstoffe in einem Arbeitsgang im Vergleich zur Herstellung in zwei Arbeitsschritten, zum anderen die Möglichkeit, im Verbund eine durchgehende z-Verstärkung zu realisieren, wenn dieser aus einem einzigen Nähwirkstoff hergestellt werden kann.

In Bild 97 bis Bild 100 sind die Ergebnisse für den Vergleich von 1-Schritt und 2-Schritt-Verfahren dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Proben 6-10 bis 6-13, auf deren Prüfung dieser Vergleich beruht, im Rahmen einer Forschungsarbeit hergestellt wurden, bei der ein Verhältnis von Kett- zu Schussdichte von etwa 1:2 eingestellt wurde [105], [298]. Aus diesem Grund weichen die Ergebnisse in Kett- und Schussrichtung, außer bei der Kenngröße Biegefestigkeit (hier wird der Effekt durch die Schichtreihenfolge kompensiert), im dargestellten Maße voneinander ab. Die Ergebnisse sind damit zwar untereinander, aber nicht mit den anderen Proben in dieser Arbeit vergleichbar.

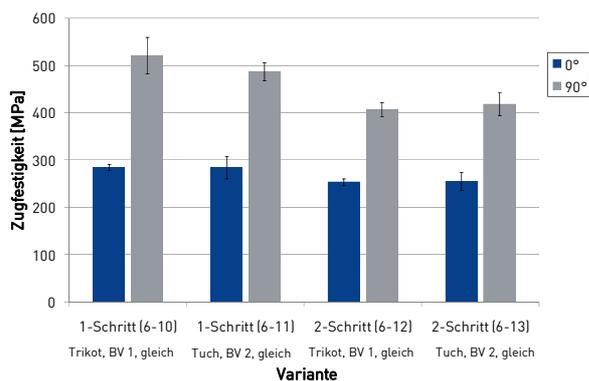


Bild 97: Zugfestigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden CHE-PP11

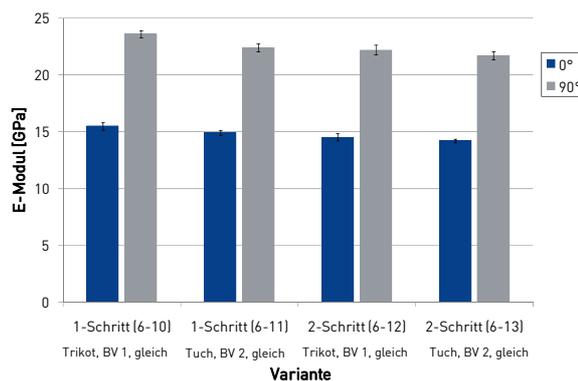


Bild 98: Zug-E-Modul der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden CHE-PP11

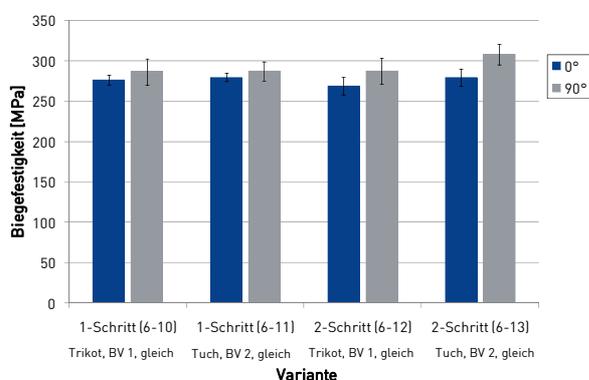


Bild 99: Biegefestigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden CHE-PP11

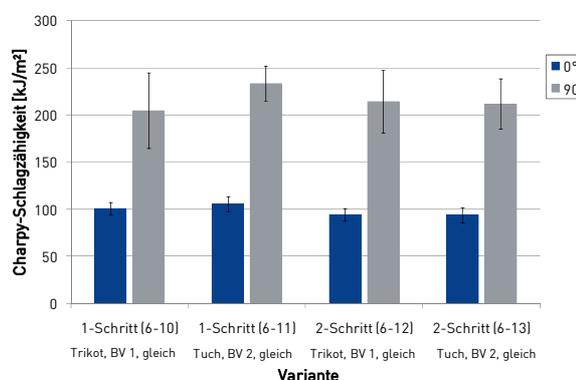


Bild 100: Charpy-Schlagzähigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden CHE-PP11

Es zeigt sich, dass die Zugfestigkeit der Mehrschichtverbunde unabhängig von der gewählten Bindung sowohl in 0°- als auch in 90°-Richtung durch Einsatz des erweiterten Nähwirkprozesses (1-Schritt-Verfahren) mit statistisch signifikanter Sicherheit (99,9 %) gegenüber dem konventionellen 2-Schritt-Verfahren verbessert werden kann (Bild 97). Die Zugfestigkeit steigt bei dieser Probenkonfiguration im Durchschnitt bei Verwendung des 1-Schritt-Verfahrens um 35 MPa in Kett- und 85 MPa in Schussrichtung. Hauptursache für diesen Effekt ist die Beeinflussung des Geleges bei der Verarbeitung im 2-Schritt-Verfahren. Der wiederholte Wirkprozess führt zu Faserschädigungen sowie zu Fadenverdrängungen und Fadenverschiebungen sowohl in Kett- als auch in Schussrichtung. Diese zusätzliche und deutliche Abweichung der Fadenlagen aus der Ideallage führt zu den beobachteten Festigkeitseinbußen im konventionellen Verfahren.

Auch der Zug-E-Modul der Mehrschichtverbunde wird durch die Herstellung mit dem erweiterten Nähwirkprozess beeinflusst (Bild 98), wenn auch weniger stark (in Kettrichtung um 0,7 GPa, in Schussrichtung um 0,9 GPa, Sicherheit 99,9 %). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der E-Modul als beschreibende Kenngröße für die Steifigkeit des Materials vom Faser-

volumengehalt abhängig ist. Im 1-Schritt-Verfahren ist der Wirkfadenanteil im Verbund wesentlich niedriger, was zu einem höheren Faservolumengehalt und damit zu einem höheren E-Modul der Verbundprobe führt. Der gleiche Effekt wird auch durch die Bindung hervorgerufen. Aus dem geringeren Wirkfadenanteil bei der Bindung RL-Trikot im Vergleich zu RL-Tuch resultiert ein höherer E-Modul.

Beim Vergleich der Biegefestigkeiten konnte weder in 0°- noch in 90°-Richtung ein signifikanter Einfluss des Herstellungsverfahrens nachgewiesen werden (Bild 99).

Die Untersuchung der Schlagzähigkeit (Bild 100) zeigt wiederum einen signifikanten Einfluss des erweiterten Nähwirkverfahrens (Sicherheit 99,0 %). Die Schlagzähigkeit kann in 0°-Richtung um 8 kJ/m² verbessert werden. In 90°-Richtung zeigen die Prüfergebnisse eine so starke Streuung, dass eine statistisch abgesicherte Auswertung nicht vorgenommen werden kann. Die Proben versagen in beiden Prüfrichtungen durch interlaminares Bruch. Die Festigkeitssteigerung gegenüber dem konventionellen Nähwirkverfahren bei dieser Untersuchung kann wie beim Zugversuch auf Schädigungen des Nähwirkstoffs während des zweiten Arbeitsschritts zurückgeführt werden.

Die Darstellungen in Bild 101 bis Bild 105 zeigen den Vergleich zwischen [0/90/0]-Mehrschichtverbunden aus dem erweiterten Wirkprozess, bei denen die Lagen durch den Wirkfaden (GSO-HG170) miteinander verbunden sind und Verbundplatten aus dem einfachen Wirkprozess, die aus [0/90]-Nähwirkstoffen geschichtet wurden. Es ist zu beachten, dass zur Erreichung der für die Vergleichbarkeit insbesondere mit den Mehrlagengestricken notwendigen Probendicke jeweils sechs [0/90/0]- beziehungsweise zwölf [0/90]-Proben geschichtet werden mussten.

Bei der Prüfung im Zugversuch (Zugfestigkeit und E-Modul) sowie im Biegeversuch ergeben sich mit hoher Sicherheit (99,9 %) Vorteile bei der Verwendung des erweiterten Nähwirkprozesses (Bild 101, Bild 102, Bild 103). Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass bei den Verbundprobekörpern nach dem erweiterten Wirkverfahren durch den geringeren Wirkfadenanteil höhere Faservolumengehalte umsetzbar sind. Bei Schlag- und Scherbelastung (Bild 104, Bild 105) führt die herstellungsbedingt größere Dicke der konventionell hergestellten Proben zu verbesserten Kennwerten. Der Einfluss der Lagenverbindung durch den Wirkfaden ist nicht messbar, da die dreilagigen Nähwirkstoffe für die Herstellung der Verbundproben nicht ausreichen und in den mehrfach geschichteten Mustern dieser Einfluss nicht hervortritt. Daraus kann geschlossen werden, dass die Verwendung des erweiterten Wirkprozesses zur Steigerung der *out-of-plane* Eigenschaften eines Mehrschichtverbundes nur dann sinnvoll ist, wenn die endgültige Bauteildicke in einem Arbeitsgang erreicht werden kann, da dann der Verbund gegenüber der konventionell geschichteten Variante keine Fehlstellen in Dickenrichtung enthält.

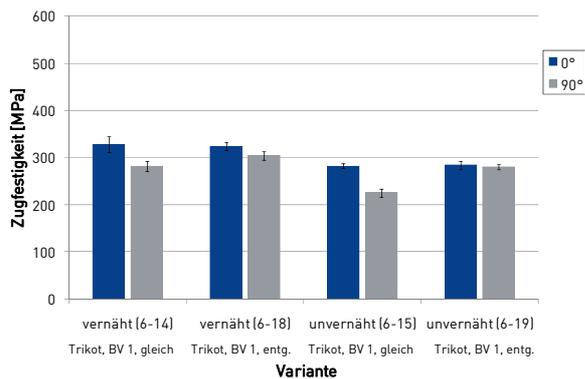


Bild 101: Zugfestigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden GSO-HG170

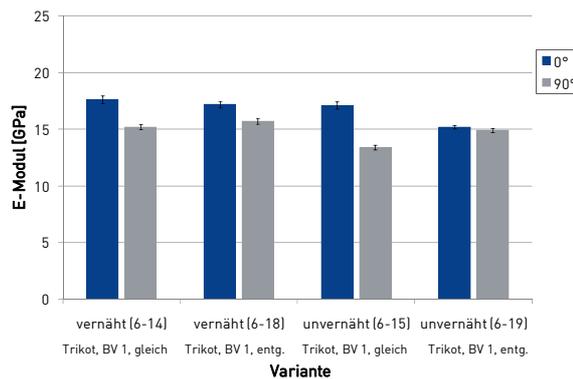


Bild 102: Zug-E-Modul der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden GSO-HG170

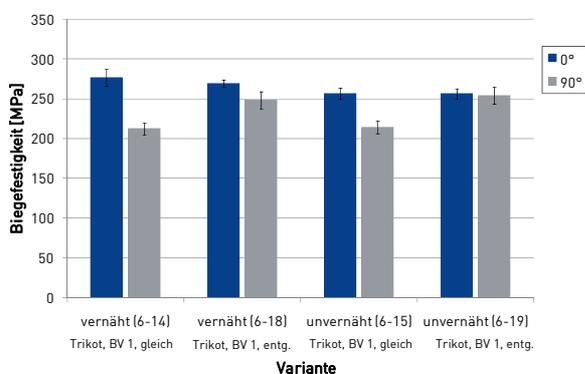


Bild 103: Biegefestigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden GSO-HG170

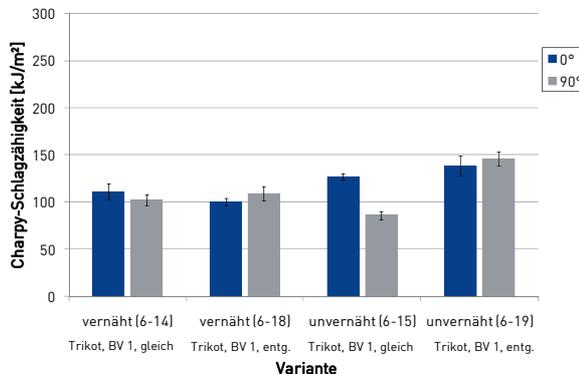


Bild 104: Charpy-Schlagzähigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden GSO-HG170

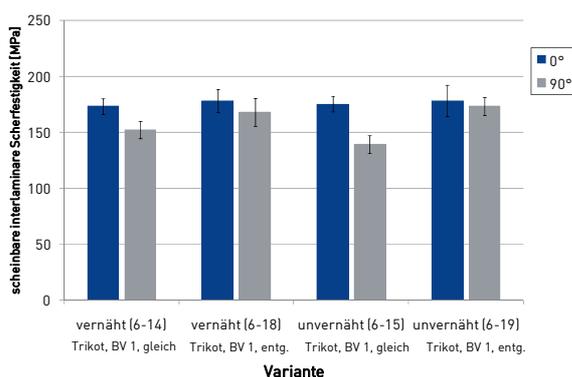


Bild 105: scheinbare interlaminare Scherfestigkeit in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden GSO-HG170

6.6.4 Einfluss der Bindung des Nähwirkstoffs auf die Verbundeigenschaften

Der Vergleich des Einflusses unterschiedlicher Bindungen wird mit zwei verschiedenen Wirkfaden-Faserstoffen durchgeführt. Bild 106 bis Bild 110 zeigen die Ergebnisse bei Verwendung von texturiertem 11 tex Polypropylen (CHE-PP11), Bild 101 bis Bild 105 für GF/PP-Hybridgarn (GSO-HG170). Bei beiden Wirkfadenvarianten wirkt sich der bindungsabhängige Faservolumengehalt auf den Zug-E-Modul aus (Bild 102, Bild 107). Bei der Beurteilung der Zugfestigkeit ist unabhängig vom Wirkfadenwerkstoff kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden RL-Trikot-Varianten ermittelt worden. Bei Verwendung von CHE-PP11 im Wirkfaden (für GSO-HG170 liegt keine Probe vor) führt die hohe Gleichmäßigkeit des Nähwirkstoffs mit der RL-Tuch-Bindung (siehe Bild 95) zu einer Steigerung der Zugfestigkeit gegenüber den Trikot-Varianten (Bild 106).

Bei der Biegefestigkeit ist kein Unterschied zwischen den beiden Trikot-Varianten zu ermitteln, wohingegen die Tuch-Bindung einen niedrigeren Wert zeigt (Bild 103, Bild 108). Weiterhin ist kein signifikanter Einfluss der Bindung auf die Schlagzähigkeit des Verbundes erkennbar. Während bei den Varianten nach dem erweiterten Wirkprozess sowohl bei CHE-PP11 als auch bei GSO-HG170 die gleichgerichtete Trikotbindung etwas höhere Werte zeigt als die entgegengerichtete Trikotbindung (Bild 104, Bild 109), kehrt sich das Verhältnis im konventionellen Prozess um (Bild 104). Die Tuch-Bindung liegt auf einem Niveau mit der gleichgerichteten Trikotbindung. Unabhängig vom Wirkfaden-Faserstoff weisen die Proben mit der gleichgerichteten Trikotbindung eine geringere scheinbare interlaminae Scherfestigkeit auf als die Proben mit Trikot, entgegengerichtet (Bild 105, Bild 110).

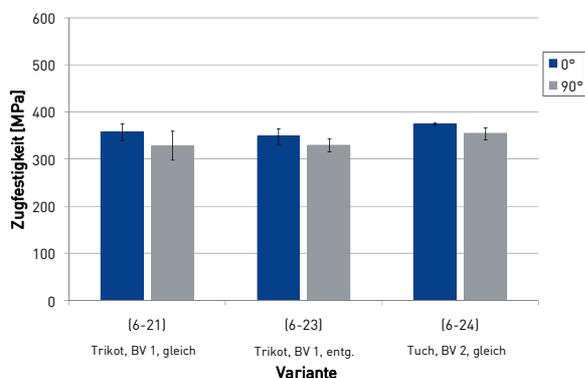


Bild 106: Zugfestigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden CHE-PP11

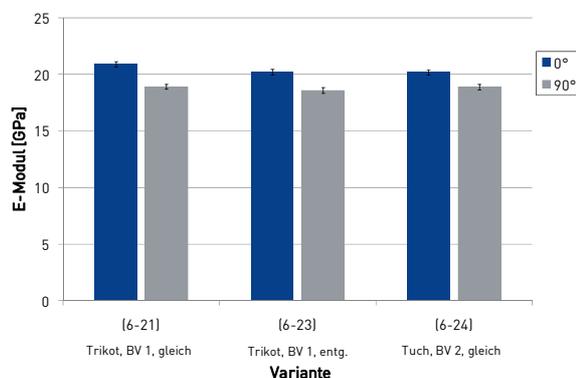


Bild 107: Zug-E-Modul der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden CHE-PP11

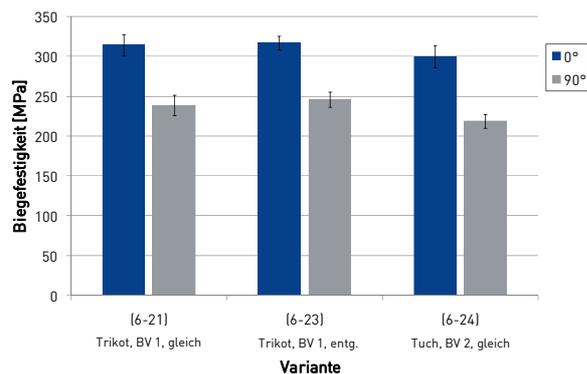


Bild 108: Biegefestigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden CHE-PP11

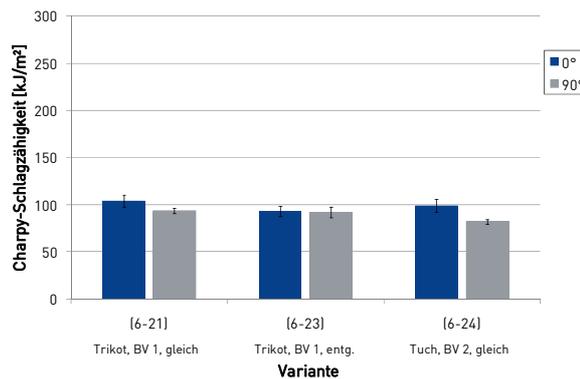


Bild 109: Charpy-Schlagzähigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden CHE-PP11

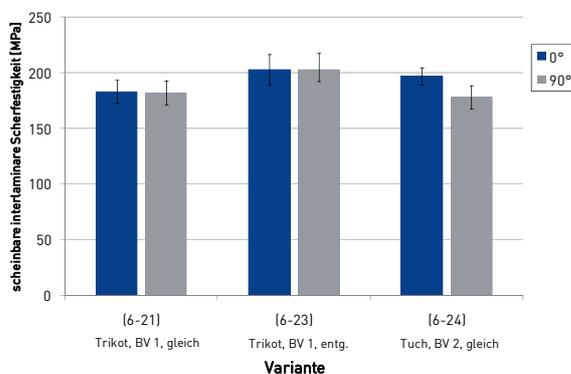


Bild 110: scheinbare interlaminare Scherfestigkeit in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden CHE-PP11

6.6.5 Einfluss des Wirkfadenwerkstoffs auf die Verbundeigenschaften

Die Verwendung von GSO-HG170 als Wirkfaden reduziert gegenüber dem Einsatz von CHE-PP11 die Zugfestigkeit, den E-Modul, die Biegefestigkeit und die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit des Verbundes. Dies kann zurückgeführt werden auf den höheren Anteil an nichttragendem Polypropylen im Verbund und den daraus resultierenden geringeren Faservolumengehalt (Bild 111, Bild 112, Bild 113, Bild 115). Weiterhin wird das Garn während der Weiterverarbeitung nach der Herstellung (Schären des Kettbaums, Nähwirkprozess) Belastungen ausgesetzt, die zu einer Schädigung der enthaltenen Glasfilamente führen. Demgegenüber steigt durch die Verstärkung in z-Richtung die Schlagzähigkeit an (Bild 114).

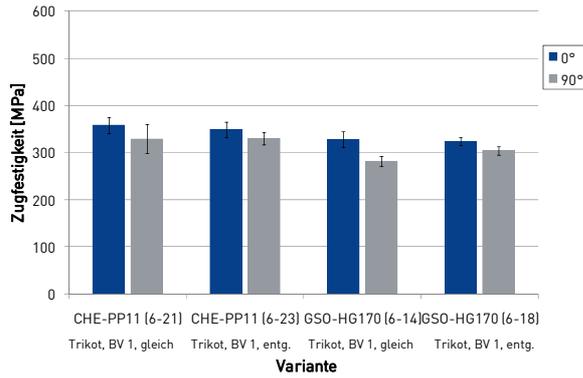


Bild 111: Zugfestigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung

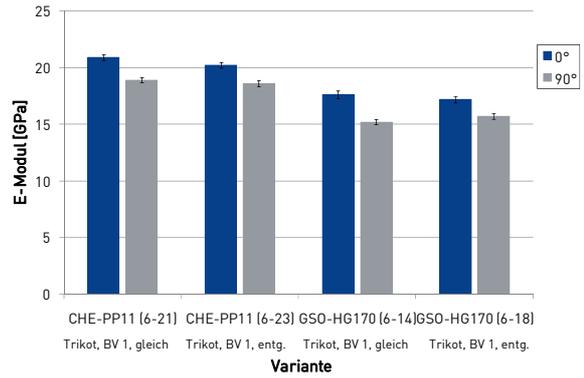


Bild 112: Zug-E-Modul der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung

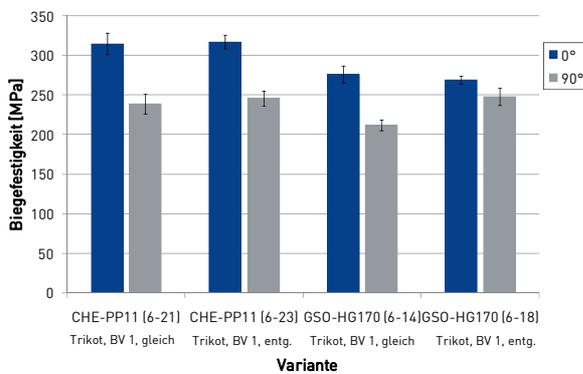


Bild 113: Biegefestigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung

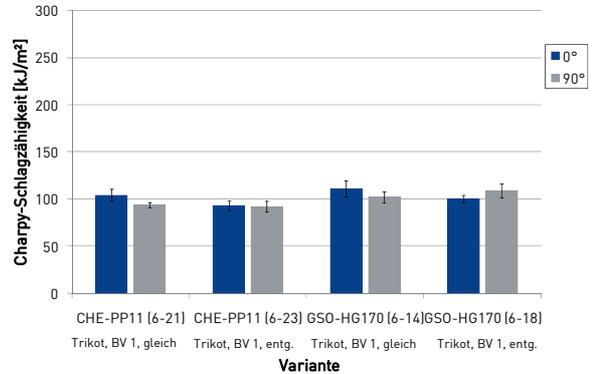


Bild 114: Charpy-Schlagzähigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung

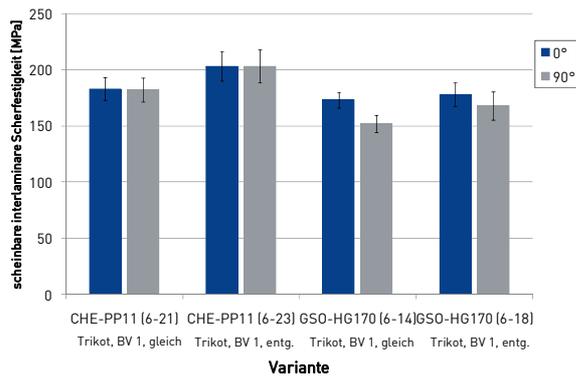


Bild 115: scheinbare interlaminare Scherfestigkeit in 0°- und 90°-Richtung

6.6.6 Einfluss der Wirkfadenzugkraft auf die Verbundeigenschaften

Eine Zusammenfassung des Einflusses der Wirkfadenzugkraft auf die Verbundeigenschaften bieten Bild 116 bis Bild 120. Für den Zug-E-Modul und die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit kann ein solcher Einfluss nicht bestimmt werden (Bild 117, Bild 120). Bei Erhöhung

der Wirkfadenzugkraft erhöht sich die Zugfestigkeit bei Verwendung der entgegengerichteten Bindung, bei der gleichgerichteten Bindung ist keine Veränderung bestimmbar (Bild 116). Für die Schlagzähigkeit und die Biegefestigkeit kann ein solcher Einfluss nicht statistisch gesichert bestimmt werden (Bild 118, Bild 119). In Abwägung der mechanischen Kennwerte und der Prozesssicherheit sollte die Wahl der geeigneten Wirkfadenzugkraft in Abhängigkeit von der Bindungsvariante insbesondere unter dem Aspekt einer sicheren und den Qualitätsansprüchen genügenden Fertigung erfolgen.

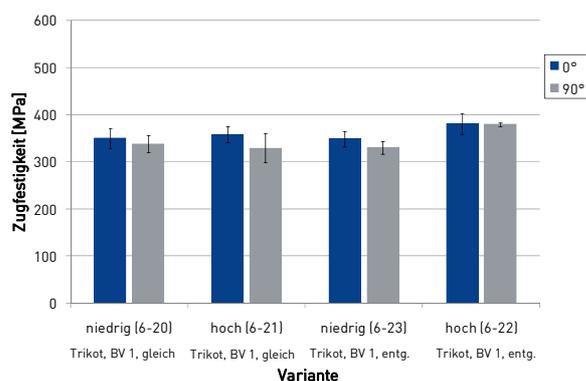


Bild 116: Zugfestigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden CHE-PP11

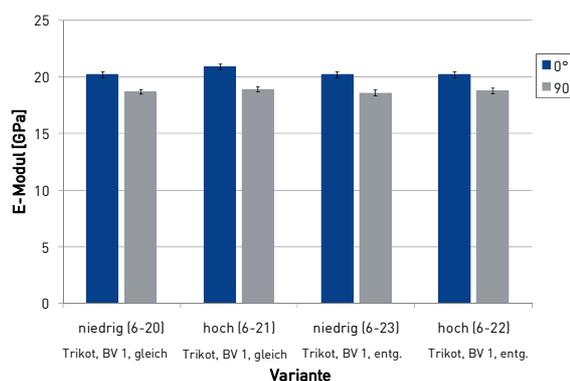


Bild 117: Zug-E-Modul der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden CHE-PP11

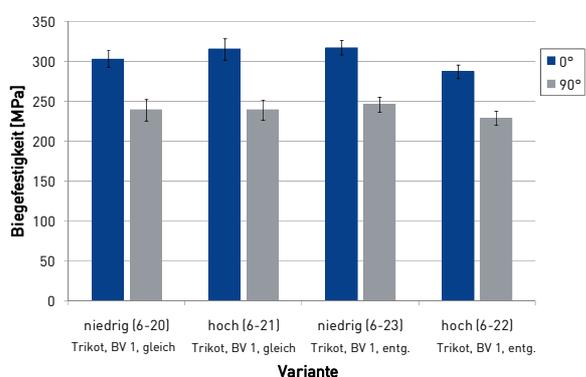


Bild 118: Biegefestigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden CHE-PP11

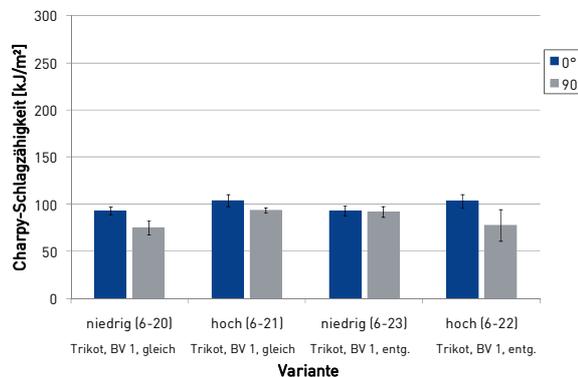


Bild 119: Charpy-Schlagzähigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden CHE-PP11

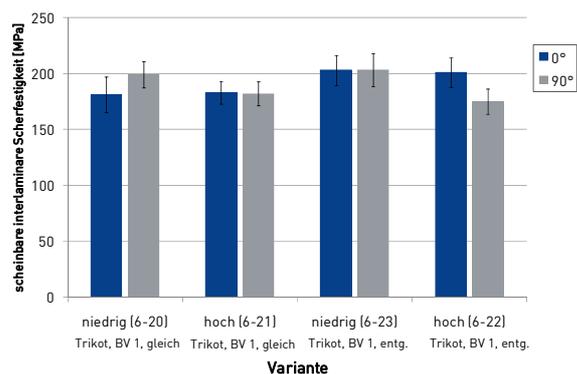


Bild 120: scheinbare interlaminare Scherfestigkeit in 0°- und 90°-Richtung, Wirkfaden CHE-PP11

6.6.7 Beeinflussung des Drapierverhaltens durch den Nähwirkprozess

Ein wichtiges Merkmal für das Verarbeitungsverhalten textiler Verstärkungshalbzeuge stellt die Drapierbarkeit dar. Zu deren Beurteilung wird ein zweistufiges Bewertungsverfahren eingesetzt, das auf Vorarbeiten im Rahmen des *Sonderforschungsbereiches 639* am *ITM* beruht. Die erste Stufe der Bewertung besteht aus zwei maschinellen Testverfahren, dem Scherversuch und dem Stempel-Durchdrück-Versuch. In der zweiten Stufe wird die Drapierbarkeit am Beispiel verschiedener Grundformen (Halbkugel und Pyramidenstumpf) optisch bewertet.

Der Scherversuchsstand von ORAWATTANASRIKUL, 2006 [27] dient der Beurteilung der reinen Scherung, bei der lediglich Winkeländerungen zwischen den Fäden der Grundbahn auftreten. Die Verformung durch Scherung wird durch eine quer zur Orientierung der Fadenlagen in der Grundbahn angreifende Zugkraft hervorgerufen. Die Versuchseinrichtung in Form eines Scherrahmens ist in eine Zugprüfmaschine integriert. Der Scherrahmen weist eine spezielle Probenfixierung mittels Nadeln auf, so dass sich die Fäden der textilen Struktur während des Schervorgangs frei bewegen können. So wird die von konventionellen Scherrahmen bekannte frühzeitige und klemmungsbedingte Faltenbildung am Probenrand vermieden [27]. Das Ergebnis des Versuchs bildet ein Kraft-Scherwinkel-Verlauf.

Zur Durchführung von komplexen Deformationsprüfungen für textile Strukturen wurde am *ITM* eine Stempeldurchdrückeinrichtung entwickelt und umgesetzt. Die Prüfvorrichtung ist ebenfalls in einer Zugprüfmaschine integriert und besteht aus einem als Halbkugel ausgebildeten Druckstempel und der Gegenform. Die Fixierung der Probe erfolgt durch Klemmung an den Probenecken. Es wird die Verformung als Wegänderung und die für die Verformung aufzubringende Kraft bestimmt.

Verglichen werden der Einfluss des erweiterten Nähwirkprozesses und des Wirkfadenwerkstoffs. Wegen des hohen experimentellen Aufwands werden nur ausgewählte Varianten in die Untersuchung einbezogen. Da diese aufgrund ihrer Konfiguration unterschiedliche

Flächenmassen aufweisen, werden im Versuch zur Angleichung ein bis drei Lagen der jeweiligen Variante geprüft. Bild 121 und Bild 122 zeigen die Ergebnisse für Scher- und Stempel-Durchdrück-Prüfung. Variante 6-18 ([0/90/0]) und 6-19 ([0/90]) unterscheiden sich hinsichtlich der Lagenanordnung und damit auch hinsichtlich der Flächenmasse. Deshalb wurden die Prüfungen für Variante 6-18 zweilagig und für Variante 6-19 dreilagig durchgeführt. Die Ergebnisse sowohl im Scher- als auch im Stempel-Durchdrück-Versuch zeigen ein vergleichbares Verhalten der beiden Varianten. Ein signifikanter Einfluss der Lagenanordnung wurde nicht ermittelt. Demgegenüber zeigt sich für den Einsatz unterschiedlicher Wirkfäden (CHE-PP11 bei 6-20 und GSO-HG170 bei 6-18) und Bindungen (gleichgerichtet bei 6-20 und entgegengerichtet bei 6-18) eine deutliche Beeinflussung der Kennwerte aus den beiden Versuchen. Bei Verwendung eines feinen und glatten Wirkfadens (CHE-PP11) und gleichzeitig der Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet, können die bei Scherung und Umformung auftretenden Kräfte signifikant reduziert werden. Da bei dieser Bindung keine Verbindung zwischen den einzelnen Wirkfäden besteht, ist der Widerstand der Fäden in der Grundbahn gegen Verschiebung äußerst gering.

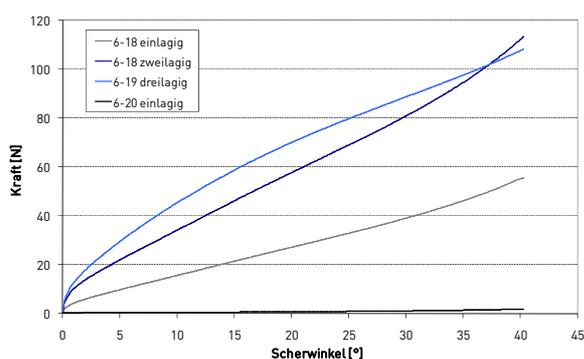


Bild 121: Ergebnisse Scherversuch für verschiedene NWS-Varianten

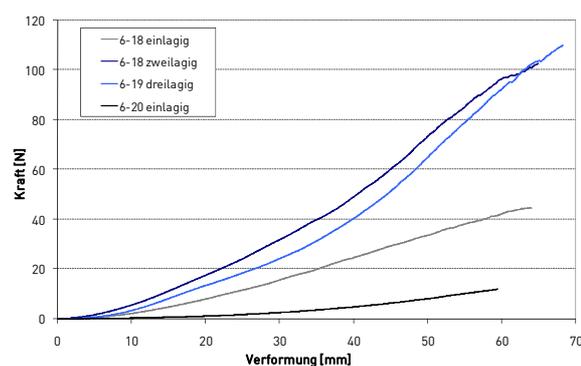


Bild 122: Ergebnisse Stempel-Durchdrück-Versuch für verschiedene NWS-Varianten

Die Messergebnisse werden durch die Drapierversuche an den Grundformen gestützt. So ergibt sich zwar für die Variante 6-20 eine sehr gute Drapierbarkeit über die Halbkugelform und den Pyramidenstumpf (Bild 123). Durch die leichte Verschiebbarkeit der Fäden ist dieser Nähwirkstoff jedoch nicht praktisch einsetzbar. Es sind deutliche Fehlstellen aufgrund verschobener Fäden sowohl am Pyramidenstumpf und als auch an der Halbkugel zu erkennen. Die zweilagige Variante 6-19 weist weniger Fehlstellen auf, jedoch sind teilweise auch noch unerwünschte Fadenverschiebungen insbesondere im Randbereich der Halbkugel zu erkennen. Die Kanten des Pyramidenstumpfs werden hingegen gut abgebildet. Variante 6-18 lässt eine sehr gute Drapierbarkeit mit einer sehr geringen Anzahl an Fehlstellen sowohl bei der Halbkugelform als auch beim Pyramidenstumpf erkennen. Dünnstellen im Verbund resultieren aus der für einen einlagigen Einsatz geringen Fadendichte.

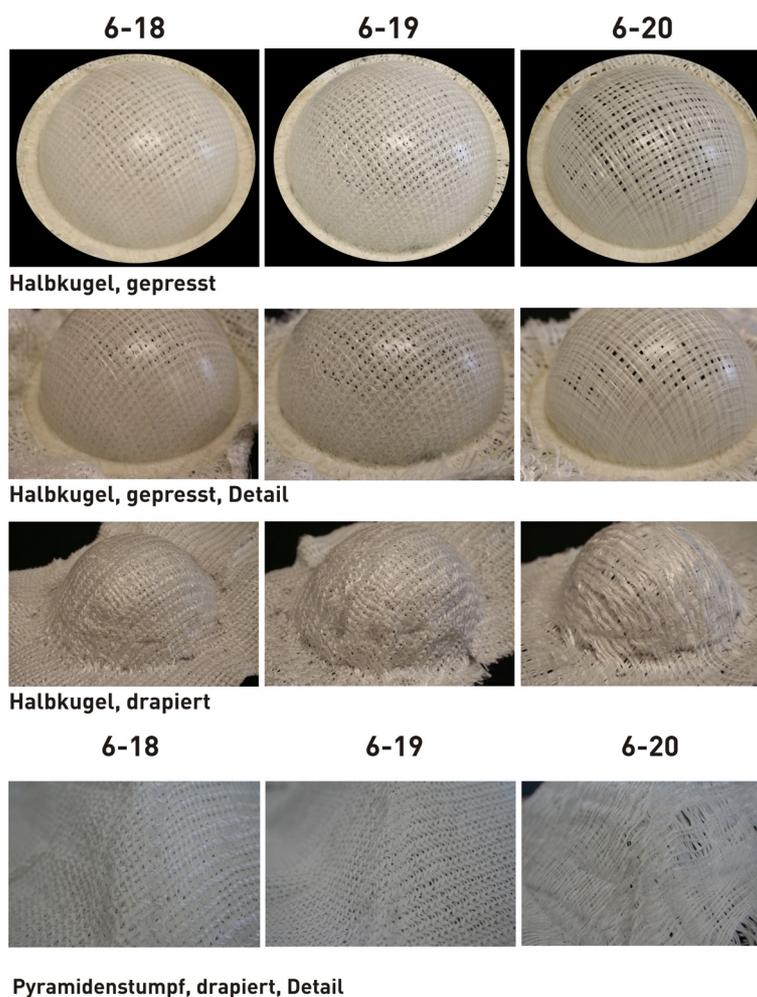


Bild 123: Vergleich drapierter Grundformen

6.6.8 Vergleich der Nähwirk-, Web- und Mehrlagenstricktechnik

Die Ergebnisse der Verbundprüfung zeigen für die Nähwirkstoffe und Mehrlagengestricke unterschiedliche Tendenzen in Abhängigkeit vom verwendeten Wirkfadenwerkstoff (Bild 124 bis Bild 127). Bei den Varianten mit Polypropylen (6-10 und 6-25) führt der höhere PP-Anteil im Gestrick, verursacht durch die höhere Feinheit und den bindingsbedingt höheren Maschenfadenanteil, im Vergleich zum Nähwirkstoff zu niedrigeren Kennwerten für die Zugfestigkeit, den Zug-E-Modul, die Biegefestigkeit sowie die Schlagzähigkeit. Lediglich die Ergebnisse im Biegeversuch in 90°-Richtung liegen beim Gestrick höher als beim Nähwirkstoff.

Bei den Varianten mit Hybridgarnbindefaden (6-18 und 6-26) ergeben sich für die einzelnen Verbundprüfungen unterschiedliche Ergebnisse. So führt der höhere Faservolumengehalt im Mehrlagengestrick (6-26) zu einem höheren Zug-E-Modul und einer etwas verbesserten Zugfestigkeit gegenüber der Nähwirkstoff-Variante (6-18). Die Schlagzähigkeit wird ebenfalls erhöht. Hier kann davon ausgegangen werden, dass durch die Kettbaumherstellung und die Verarbeitung im Nähwirkprozess bei deutlich höheren Maschinengeschwindigkeiten, das Hybridgarn stärker geschädigt wird, als im Strickprozess. Die Biegefestigkeit liegt wie bei den PP-Varianten für den Nähwirkstoff in Kettrichtung über und in Schussrichtung unter der

des Gestricks. Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass mit Nähwirkstoffen und Mehrlagengestriken bei Verwendung identischer Herstellparameter vergleichbare Festigkeitskennwerte erreicht werden können.

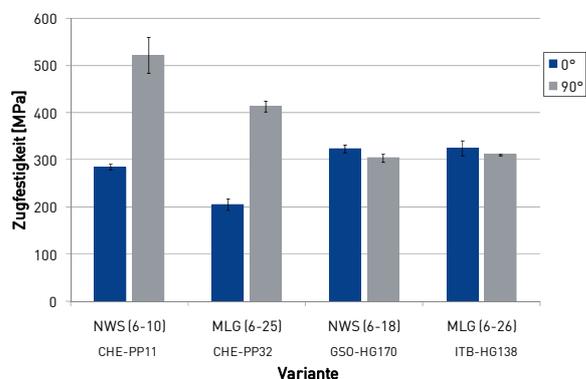


Bild 124: Zugfestigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung

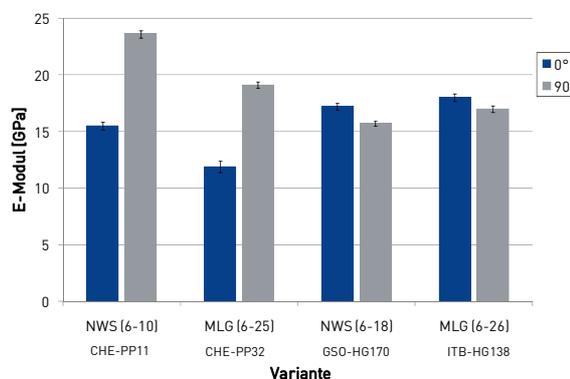


Bild 125: Zug-E-Modul der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung

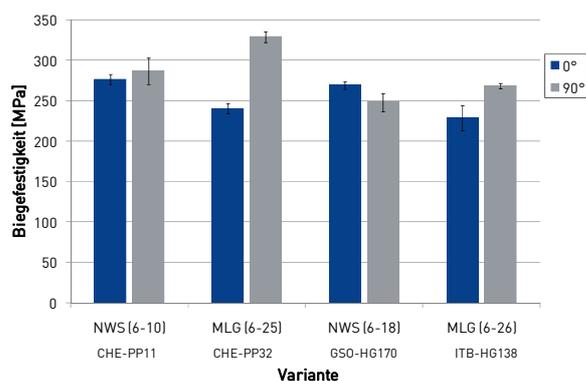


Bild 126: Biegefestigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung

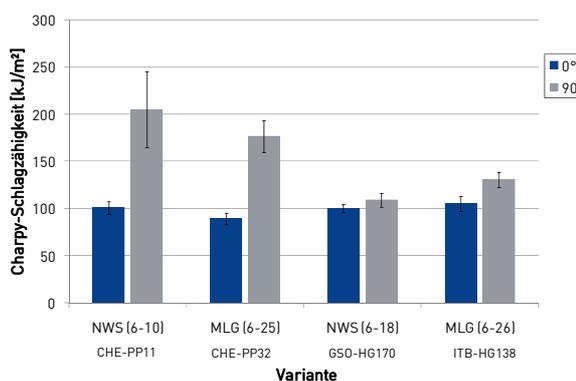


Bild 127: Charpy-Schlagzähigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung

Bild 128 bis Bild 130 zeigen die Ergebnisse eines weiteren Vergleichs unter Einbeziehung der Drehergewebe-Variante (6-27). Aus technologischen Gründen ist es nicht möglich, vollkommen identische Textilkonfigurationen für alle drei Varianten herzustellen. Deshalb unterscheiden sich die drei untersuchten Strukturen hinsichtlich des verwendeten Bindefadens und daraus resultierend auch hinsichtlich des Faservolumengehalts. Grundsätzliche Aussagen lassen sich auch auf Basis der vorliegenden Ergebnisse treffen. Die Zugfestigkeit des Drehergewebes in Schussrichtung liegt auf dem Niveau des Nähwirkstoffs und des Mehrlagengestricks. In Kettrichtung jedoch sind deutliche Festigkeitseinbußen zu verzeichnen. Dies kann insbesondere auf den ondulierten Kettfadenverlauf im Gewebe zurückgeführt werden (siehe dazu Textilübersicht in Kapitel 10.6). Demgegenüber liegen die Schussfäden gestreckt vor. Der E-Modul des Gewebes liegt in einer Größenordnung mit dem für das Mehrlagengestrick bestimmten Kennwert, da beide Varianten einen nahezu identischen Faservolumengehalt aufweisen. Demgegenüber liegt die Biegefestigkeit der Mehrschichtverbunde aus

Drehergewebe deutlich unter der des Nähwirkstoffs beziehungsweise des Mehrlagengestricks. Zur Ermittlung der Ursachen bedarf es weiterer Untersuchungen.

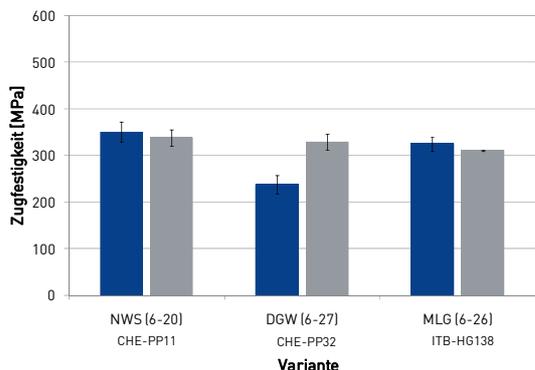


Bild 128: Zugfestigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung

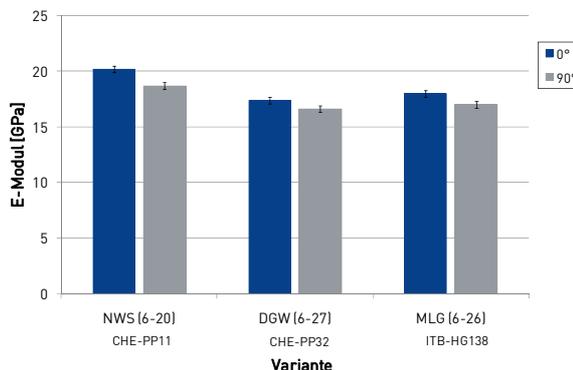


Bild 129: Zug-E-Modul der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung

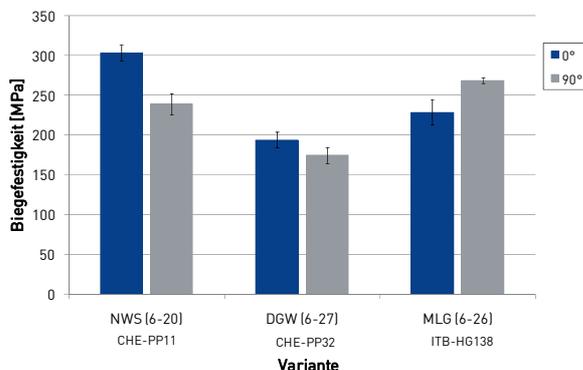


Bild 130: Biegefestigkeit der FVK-Proben in 0°- und 90°-Richtung

Für die Beurteilung des Drapierverhaltens wird die Anzahl der geprüften Textillagen so gewählt, dass sich möglichst nah beieinander liegende Flächenmassen ergeben. Die Ergebnisse der maschinellen Prüfungen sind in Bild 131 und Bild 132 dargestellt. Bei der reinen Scherung zeigen sich für den Nähwirkstoff mit Hybridgarn-Wirkfaden und der Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1, entgegengerichtet (6-18) die höchsten Scherkräfte, während für das Mehrlagengestrick (6-26) und das Drehergewebe (6-27) zwischen 40 und 55 Prozent geringere Scherkräfte bestimmt werden. Die geringsten Scherkräfte können für den Nähwirkstoff mit feinem, texturiertem Filamentgarn als Wirkfaden und der Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1, gleichgerichtet (6-20) gemessen werden. Bei der komplexeren Verformung im Stempel-Durchdrück-Versuch zeigt sich in den ersten zwei Dritteln des Verformungsbereichs ein ähnlich hohes Kraftniveau für den Nähwirkstoff 6-18, das Mehrlagengestrick und das Drehergewebe. Im Endbereich der Verformung steigt der Kraftverlauf des Gestricks aufgrund der höheren Fadendichte deutlich gegenüber den anderen beiden Varianten an. Der Näh-

wirkstoff 6-20 zeigt auch im Stempel-Durchdrück-Versuch einen merklich geringeren Widerstand gegenüber der Verformung.

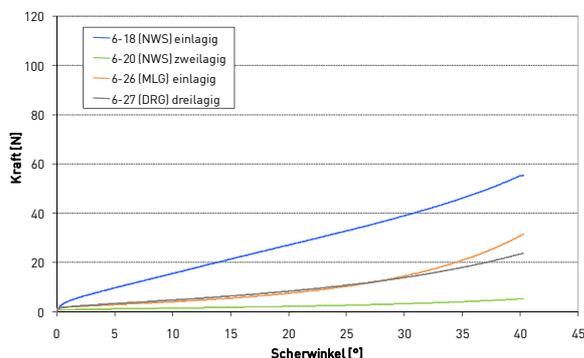


Bild 131: Ergebnisse Scherversuch

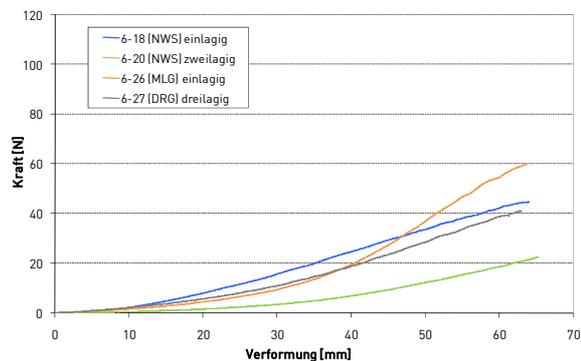


Bild 132: Ergebnisse Stempel-Durchdrück-Versuch

Die Drapierversuche an den Grundformen (Bild 133) werden für die Varianten 6-18, 6-20, 6-26 und 6-27 jeweils an einer Einzellage durchgeführt. Lediglich die gepresste Halbkugelform von Variante 6-27 besteht wegen der geringen Fadendichte der Einzellage aus drei Lagen. Erwartungsgemäß ergibt sich für das Mehrlagengestrick (6-26), aufgrund der hohen Fadendichte und der bekannt guten Drapierbarkeit, eine sehr gute und formtreue Abbildung der Halbkugel und des Pyramidenstumpfs. Nähwirkstoff (6-18) und Drehergewebe (6-27) weisen vergleichbar gute Drapiereigenschaften bei hoher Formtreue auf. Die Nähwirkstoff-Variante 6-20 ist auf Grund der äußerst geringen Verschiebestabilität nicht praxisgerecht.

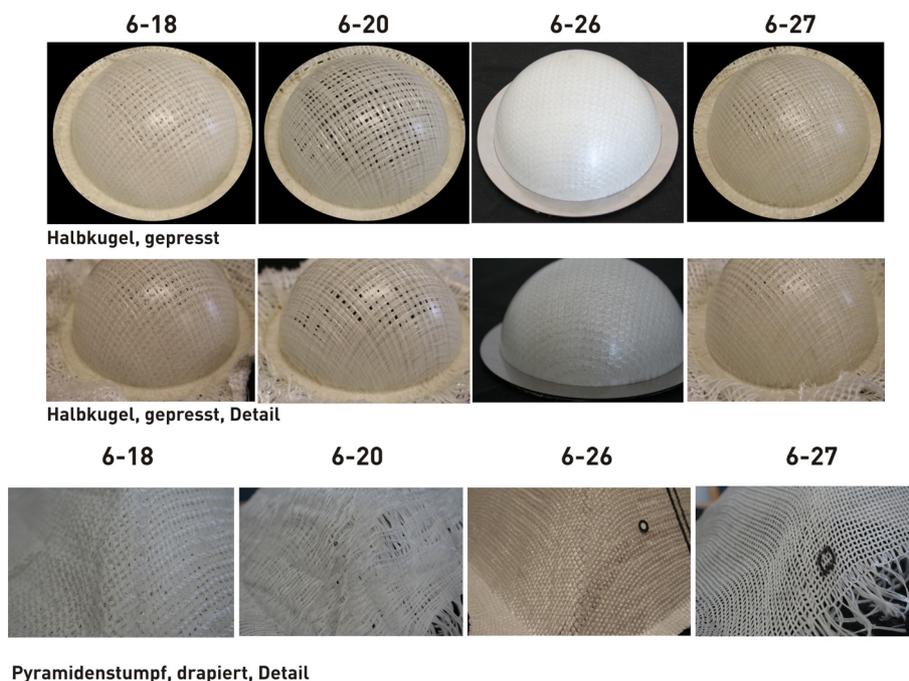


Bild 133: Vergleich drapierter Grundformen

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sowohl mit der Nähwirk- als auch mit der Mehrlagenstricktechnik thermoplastische Verbunde mit vergleichbaren mechanischen

Eigenschaften erzielt werden können. Mehrlagengestricke bieten darüber hinaus eine exzellente Drapierbarkeit, die in einer sehr guten Formtreue selbst bei kritischen Geometrien resultiert. Nähwirkstoffe mit maschengerechtem Schusseintrag und der Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1, entgegengerichtet weisen eine gute Drapierbarkeit bei ebenfalls guter Formtreue auf. Da noch deutlich höhere Fadendichten als in diesem Experiment verarbeitet werden können, ist abzusehen, dass auf Basis der Nähwirktechnik mit maschengerechtem Schusseintrag eine durch ihre hohe Produktivität attraktive Ergänzung zu den Mehrlagengestricken für den Bereich der hochdrapierbaren Textilhalbzeuge zur Verfügung steht. Für die Drehergewebe spricht die gute Drapierbarkeit bei teils sehr guten Festigkeitskennwerten. Jedoch sind insbesondere zur Steigerung der Zugfestigkeit in Kettrichtung sowie der Biegefestigkeit noch Verbesserungen bezüglich der schonenden Fadenverarbeitung erforderlich. Den Mehrlagengestricken und Nähwirkstoffen vergleichbare Fadendichten sind derzeit mit der Drehertechnologie noch nicht erreichbar.

6.7 Ableitung der Anforderungen an die Nähwirkmaschine

Aus den absolvierten Untersuchungen an thermoplastischen Mehrlagenverbunden aus GF/PP-Hybridgarn können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Anwendung eines Nähwirkprozesses mit maschengerechter Einbindung der Schuss- und Kettfäden wie beim Nadelversatz-Prototypen, führt zu einer geringen Verschiebestabilität in der Grundbahn, insbesondere bei Bindungen, bei denen die einzelnen Wirkfäden nicht miteinander verbunden sind und bei denen mit niedrigen Wirkfadenzugkräften gearbeitet wird. Daraus resultiert einerseits eine gute Drapierbarkeit, andererseits treten handhabungsbedingte Verschiebungen der Fäden in den Grundbahnen auf. Der Einsatz einer Bindung, bei der alle benachbarten Maschenstäbchen miteinander verbunden sind, verbessert die Handhabbarkeit bei immer noch sehr guter Drapierbarkeit deutlich.
- Die Verwendung des erweiterten Wirkprozesses zur Herstellung symmetrischer Mehrschichtverbunde minimiert die durch den Lagenaufbau im Bauteil hervorgerufenen Eigenspannungen.
- Die Verwendung von Nähwirkstoffen aus dem erweiterten Wirkprozess erhöht Zugfestigkeit, E-Modul und Schlagzähigkeit im Vergleich zu Textilien aus dem konventionellen zweistufigen Verfahren.
- Die besten Kennwerte für die *in-plane* Festigkeit, Drapierbarkeit und Herstellbarkeit ergeben sich für die Bindung RL-Trikot, Basisversatz 1, entgegengerichtet.
- Ein Einfluss des erweiterten Wirkprozesses auf die Biegefestigkeit des Verbundes kann nicht nachgewiesen werden.

- Die Verwendung eines Wirkfadens mit Verstärkungskomponente im erweiterten Wirkverfahren ist zur Verbesserung der *out-of-plane* Eigenschaften lediglich dann zu empfehlen, wenn die finale Bauteildicke mit nur einem Fadenlagen-Nähwirkstoff erzielt werden kann.

Besteht die Zielstellung, eine Nähwirkmaschine mit variabler Lagenanordnung anbieten zu können, so bestimmen die vorgesehenen Anwendungen letztendlich die erforderliche Gesamtanzahl der Einzellagen im Nähwirkstoff und damit die Maschinenkonfiguration.

Nach SCHÜRMAN, 2007 [33] werden in der Faserverbundtechnik einige Mehrschichtverbundtypen bevorzugt eingesetzt. Diese sind auf spezielle Belastungen abgestimmt, einfach herstellbar und weisen Symmetrien auf, die unerwünschten Verzug vermeiden. Zu diesen Typen gehören ausgeglichene Winkelverbunde (paarweise Zuordnung gleicher Winkel mit unterschiedlichem Vorzeichen, z. B. [+20/-20/+80/-80]), Kreuzverbunde ([0/90]) und [0/+45/-45/90]-Mehrschichtverbunde. Diese Verbundtypen sind auf bisherigen Nähwirkmaschinen herstellbar, wobei eine Maschine, die zur Herstellung von [0/+45/-45/90]-Anordnungen geeignet ist, auch Winkel- und Kreuzverbunde herstellen kann. Derartige Strukturen weisen bereits zwei Symmetrieebenen senkrecht zur Textilebene auf, die dritte Symmetrieebene entsteht bisher durch eine mittensymmetrische Schichtung. Durch Einsatz des erweiterten Wirkprozesses besteht nun die Möglichkeit, mittensymmetrische Mehrschichtverbunde der Form [0/+45/-45/90/90/-45/+45/0] in einem Arbeitsgang und mit durchgehender z-Verstärkung herzustellen. Unter Berücksichtigung von konkurrierenden Flächenbildungsverfahren (siehe Kapitel 2.2.2) kann es darüber hinaus sinnvoll sein, auch Kettfadenlagen zwischen den Schussfadenlagen anzuordnen.

Daraus ergeben sich folgende denkbare Maschinenkonfigurationen:

- Zunächst die Maximalkonfiguration einer Multiaxial-Nähwirkmaschine zur Herstellung von Nähwirkstoffen mit zwei Kettfadenlagen auf den Gelegeaußenseiten, bis zu sechs Schussfadenlagen und der Möglichkeit, auch Kettfäden als Zwischenlage zuzuführen: So stünde das vollständige Potential des erweiterten Wirkprozesses sowohl zur Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden als auch für Textilbeton zur Verfügung.
- Die Standardvariante einer Multiaxial-Nähwirkmaschine verzichtet auf die Zuführung von Kettfäden als Zwischenlage und kann mit zwei Kettfadenlagen auf den Gelegeaußenseiten und bis zu sechs Schussfadenlagen alle wesentlichen Grundtypen von Mehrschichtverbunden mit insgesamt bis zu acht Fadenlagen abdecken.
- Die Standardvariante einer Biaxial-Nähwirkmaschine kann Nähwirkstoffe in der Konfiguration [0/90/90/0] fertigen. Für Anwendungen, bei denen eine hohe Drapierbarkeit gefordert wird, wie auch für die Herstellung von Betonbewehrungen, ist ein maschenreihengerechter Schusseintrag zu bevorzugen.

7 Lösungen für die Umsetzung der variablen Lagenanordnung

7.1 Anforderungen an Prozess und Maschine

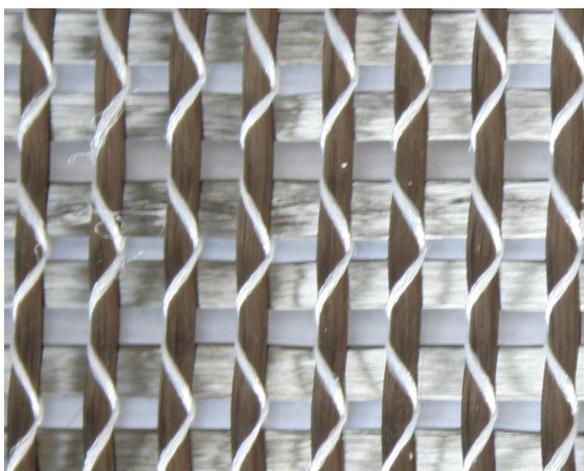
7.1.1 Problemanalyse

7.1.1.1 Demonstrator

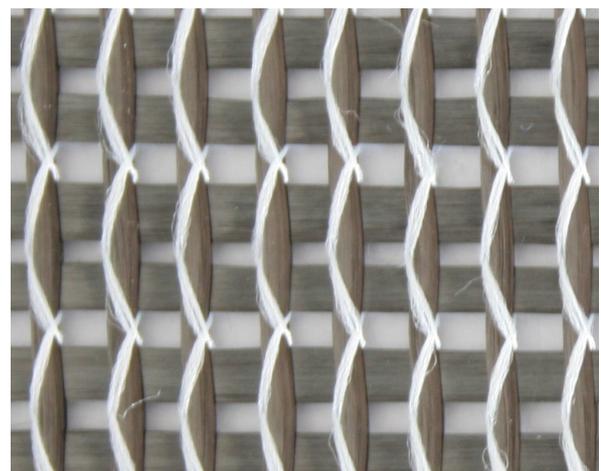
Zur grundlegenden Betrachtung der Herstellbarkeit von Nähwirkstoffen mit Nadelversatz wurde zunächst eine erste Versuchsreihe mit Bindungen unterschiedlicher Versatzweiten auf dem Demonstrator absolviert (zur Beschreibung siehe Kapitel 3). Als Grundbahn dienten drei Fadenlagen in zweiaxialer Ausrichtung, die durch Trikot-, Tuch- und Samtbindung fixiert wurden (Tabelle 28). Die Herstellung eines Nähwirkstoffs mit Trikotbindung und Basisversatz 1 (gleich- und entgegengerichtet) bereitete keine Schwierigkeiten. Es konnte eine saubere Abbindung des symmetrisch aufgebauten Nähwirkstoffs erzielt werden (Bild 134).

Tabelle 28: Versuchsplan Bindungskonstruktion 1

Legungsplan GB1	Legungsplan NB	Beobachtungen
1-0/1-2//	0-1/1-0//	keine
1-0/1-2//	1-0/1-2//	keine
1-0/2-3//	0-1/1-0//	leichte Verschiebung der Kettfäden
1-0/2-3//	0-2/2-0//	Verschiebung der Kettfäden
1-0/4-5//	0-4/4-0//	Verschiebung der Kettfäden und Biegung der
1-0/4-5//	4-0/0-4//	Nadeln, Herausspringen des Schließdrahtes
unveränderte Parameter: Fadeneinzug: voll Stichlänge: 4 mm Fadenlagen: Carbon, 800 tex; zweiaxial [0/90/0]		



a) linke Seite



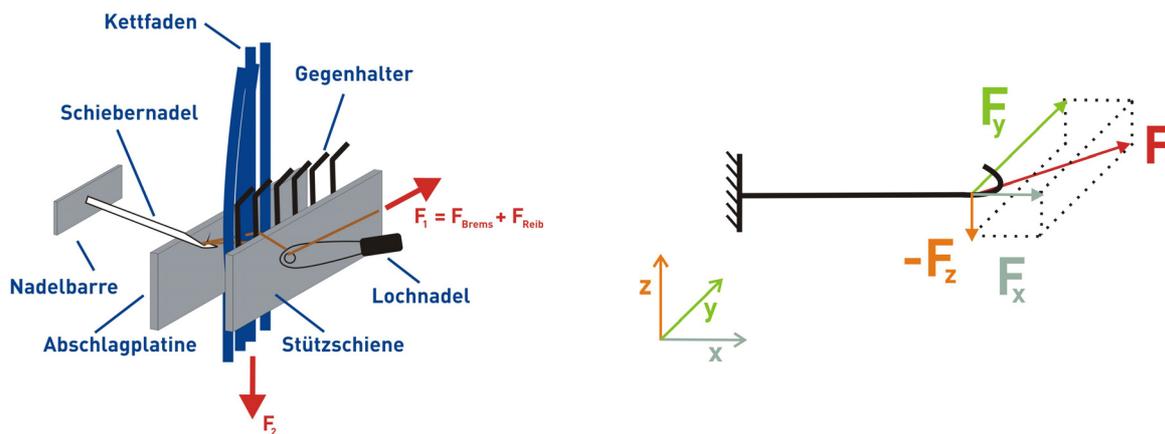
b) rechte Seite

Bild 134: zweiaxialer Nähwirkstoff, Bindung: RL-Trikot, geschlossen mit gleichgerichtetem Basisversatz 1

Beim Übergang auf die Tuchbindung mit Nadelversatz um eine oder zwei Nadelteilungen zeigte sich eine leichte bis ausgeprägte Verschiebung der Kettfäden durch die Wirkfäden während des Versetzens der Nadelbarre. Dadurch kam es zu Verzerrungen der Fadenlagen und fehlerhaftem Abbinden im darauf folgenden Arbeitsschritt. Bei Verwendung der Samtbindung mit Nadelversatz um vier Nadeln kam es zusätzlich zu einer Biegung der Nadeln durch die im Nadelhaken befindlichen Maschenschlaufen mit der Folge, dass die Schließdrähte aus ihren Führungen springen. Damit lassen sich für den Demonstrator zwei miteinander in Verbindung stehende Problemstellungen bei der Herstellung von Bindungen mit hohen Versatzweiten ableiten:

- a) Abbinden der Kettfäden, ohne dass deren Lage beeinflusst wird,
- b) seitlicher Versatz der Schiebernadel ohne deren Verformung.

Bild 135 zeigt schematisch die beim Nadelversatz auf die Schiebernadel durch den Wirkfaden einwirkenden Kräfte. Die im Nadelkopf liegende Maschenschleife ist mit einem Ende im schon fertig gestellten Nähwirkstoff verankert, das andere Ende läuft über die Fadenführungselemente zum Kettbaum. Der Kettbaum wird am Demonstrator mechanisch gebremst.



a) Wirkstelle

b) Kräfte

Bild 135: Schema der auf die Schiebernadel einwirkenden Kräfte

Zusätzlich zu der durch die Kettbaumbremse aufgebrachten Zugkraft wird der Faden durch Reibungskräfte belastet, die an den verschiedenen Fadenführern und den Gegenhaltestiften entstehen.

Der Schaft der Schiebernadel ist fest in der Nadelbarre eingespannt, das freie Ende mit dem Nadelkopf ist verschiebbar auf der Abschlagplatte gelagert. Bild 135 zeigt ein Koordinatensystem mit der x-Achse in Richtung der Nadellängsachse und der y-Achse in Längsrichtung der Nadelbarre. Wird die durch die Maschenschleife am Nadelkopf auf die Nadel übertragene Kraft in drei Komponenten mit Wirkungslinien in Richtung der Koordinatenachsen zerlegt, so zeigt sich, dass die wesentliche Kraftkomponente (F_y) senkrecht zur Nadellängsachse in der xy-Ebene angreift. Die geringeren Kräfte F_x und F_z werden durch das Lager und die

Einspannung aufgenommen. F_y jedoch bewirkt ein Biegemoment um die Einspannung. Dieses Moment führt zu den beschriebenen Verformungen.

7.1.1.2 Prototyp-Nähwirkmaschine Malimo 14022 P2-2S (E)

Die Prototyp-Nähwirkmaschine unterscheidet sich vom Technologie-Demonstrator in einigen wesentlichen Punkten (siehe Kapitel 3), wozu insbesondere die kontinuierliche Arbeitsweise und die aktive Zuführung der Wirkfäden zählen. Bei der Herstellung der in den Kapiteln 5 und 6 beschriebenen Nähwirkstoffe traten demzufolge teilweise ähnliche aber auch abweichende Problemstellungen auf. Die Probleme können zunächst folgenden Komplexen zugeordnet werden:

- Produktivität,
- Zuführung der Kettfadenlagen,
- Sicherstellung des Wirkprozesses bei angemessener Qualität des Nähwirkstoffs.

Eine für die industrielle Umsetzung wesentliche Fragestellung betrifft den Erhalt der Produktionsgeschwindigkeit der Nähwirkmaschine. Während der durchgeführten Verarbeitungsversuche konnte eine Maschinendrehzahl von bis zu 500 min^{-1} bei Standardstrukturen (Grundbahn aus Glasfasergarn, Wirkfaden Polypropylen geringer Feinheit, geringe Versatzweite der Nadelbarre) mit gleichbleibend hoher Qualität des Nähwirkstoffs realisiert werden. Somit ist durch die vom Maschinenhersteller realisierte erste Prototypenlösung bereits die geforderte Mindestdrehzahl von 50 Prozent der üblichen Arbeitsdrehzahl erreichbar. Damit wird es möglich, symmetrische Nähwirkstoffe, bei denen eine Verbindung zwischen den Lagen gefordert wird, in nur einem Arbeitsgang mit einer konkurrenzfähigen Produktivität gegenüber dem herkömmlichen 2-Schritt-Verfahren herzustellen. Ziel bleibt es jedoch darüber hinaus, auch im erweiterten Wirkprozess vergleichbare Drehzahlen wie bisher bei den konventionellen Nähwirkmaschinen üblich zu erzielen. Entsprechende Entwicklungen werden derzeit von der *Karl Mayer Malimo Textilmaschinenfabrik GmbH* verfolgt.

An dieser Stelle sollen die produkt- und verarbeitungsbezogenen Fragestellungen der Zuführung der Kettfadenlagen und der Sicherstellung des Wirkprozesses im Mittelpunkt stehen. Bei den durchgeführten Verarbeitungsversuchen wurde festgestellt, dass

- sich die am Prototyp realisierte Kettfadenzuführung nicht ohne weiteres auf derzeit am Markt verfügbare Maschinen übertragen lässt,
- es bisher keine anwendbare Lösung für die Zuführung von Kettfadenscharen als Zwischenlage im Nähwirkstoff gibt,
- es bei bestimmten Kombinationen von Material und Maschinenparametern zur Verschiebung der Kett- und Schussfäden in der Wirkstelle kommt.

Insbesondere die letzte Fragestellung bedarf einer näheren Erläuterung. Bei der Herstellung der unterschiedlichen Probenvarianten nach dem erweiterten Wirkprozess im Rahmen dieser Arbeit konnte festgestellt werden, dass an der Prototypmaschine ähnliche Verarbei-

tungsprobleme wie beim Technologie-Demonstrator zu beobachten waren, wenn auch unter anderen Voraussetzungen. Auf der Prototypmaschine können bei der eingesetzten Maschinenfeinheit F 7 Versatzweiten der Nadelbarre um bis zu zwei Nadelteilungen problemlos realisiert werden, wenn übliche Materialien in der Grundbahn und im Wirkfaden zum Einsatz kommen. Bei der Verwendung von Commingling-Hybridgarn GSO-HG170 in Verbindung mit der Bindung RL-Tuch, Basisversatz 2, gleichgerichtet kam es jedoch zu Verschiebungen der Kettfäden insbesondere auf der rechten Seite. Zudem wurde durch Wirk- und Kettfäden der Abzug der Schussfäden durch die Wirkstelle behindert, was zum unerwünschten Anstechen der Schussfäden führte. Bei der Verwendung der Maschinenfeinheit F 12 und Glasfasergarnen 1200 tex, also einer sehr dichten Zuführung der Kettfäden, kam es ebenfalls insbesondere auf der rechten Seite des Nähwirkstoffs zu Verschiebungen der Kettfäden und dadurch zu unvollständigem Abbinden (siehe Schema in Bild 135).

7.1.2 Abgeleitete Teilaufgaben

Die dem Prototyp zugrunde liegende Nähwirkmaschine Malimo 14022 P2-2S weist eine vertikale Zuführung der Grundbahn auf. Der Trend bei aktuellen Nähwirkmaschinen aller Anbieter geht seit einiger Zeit in Richtung einer horizontalen Zuführung der Grundbahn und einer vertikalen Nadelhubbewegung, die Grundanordnung der Wirkstelle ist um 90° gedreht. Daraus resultiert, dass die an der Prototypmaschine mit verhältnismäßig geringem Aufwand realisierte Zuführung der zweiten Kettfadenlage nicht ohne weiteres auf aktuelle Serienmaschinen übertragen werden kann (Bild 136). Eine erste Aufgabenstellung ergibt sich somit in der Lösungsentwicklung für die Zuführung der zweiten äußeren Kettfadenlage an Nähwirkmaschinen mit horizontaler Warenführung. Dabei sind insbesondere die aus der Zuführung von unten an die Maschine resultierenden Fragestellungen zur Handhabung und zur Ergonomie zu beachten.

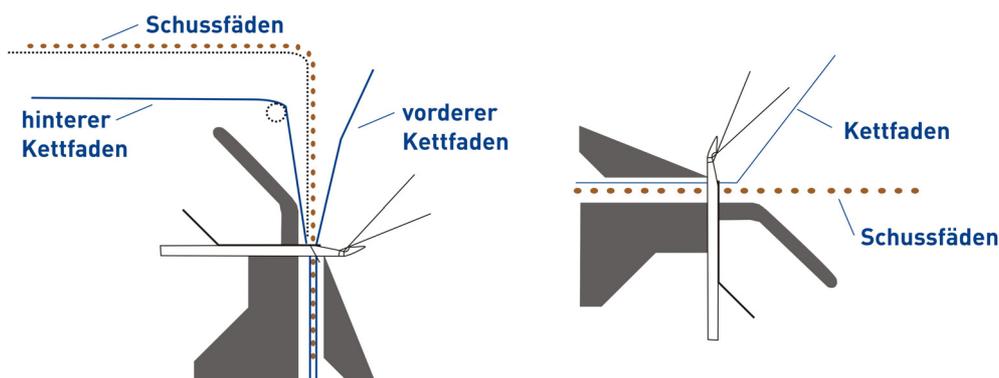


Bild 136: schematischer Vergleich der Arbeitsstelle der Prototyp-Nähwirkmaschine (links) mit aktuellen Serienmaschinen (rechts)

Um jedoch von einer wirklichen Variabilität der Lagenanordnung sprechen zu können, ist es erforderlich, Kettfadenlagen an jeder Position im Gelege anordnen zu können. Entsprechende Maschinen sind derzeit nicht verfügbar. Es sind also die Voraussetzungen zu schaffen, um

auf Nähwirkmaschinen die Kettfadenlagen sowohl an beiden Außenseiten als auch an jeder beliebigen Lage innerhalb des Nähwirkstoffs anzuordnen.

Weiterhin ist sicher zu stellen, dass die der Wirkstelle zugeführten Fadenlagen auch sicher und mit gleichbleibender Qualität verarbeitet werden können. Dazu sind sowohl die Verschiebung von Fäden in der Grundbahn als auch die Verformung der Wirkelemente auszuschließen.

7.1.3 Anforderungen

Die Gesamtaufgabe für die hier zu konzipierende Nähwirkmaschine kann ausgehend von den Betrachtungen in Kapitel 6.7 in der Maximalkonfiguration folgendermaßen beschrieben werden:

Maschine zur Herstellung multiaxialer Nähwirkstoffe mit bis zu vier Kettfadenlagen und sechs Schussfadenlagen bei beliebiger Lagenanordnung.

Die Gesamtaufgaben für die Standard- und die Minimalkonfiguration ergeben sich aus dieser Aufgabe durch Reduktion der erforderlichen Lagenanzahl. Die Lösungsentwicklung erfolgt also zunächst für die Maximalkonfiguration, aus der dann die beiden anderen Varianten abgeleitet werden können.

Am Markt verfügbar sind derzeit Nähwirkmaschinen, die bis zu sieben Schussfadenlagen und eine Kettfadenlage verarbeiten können [273]. Aufbauend auf diesem Stand der Technik kann die hier zu bearbeitende Aufgabenstellung präzisiert werden:

Nähwirkmaschine mit Zuführung und sicherer Fixierung von Kettfadenlagen an den Außenseiten und als Zwischenlage eines bis zu zehnlagigen Nähwirkstoffs.

Dabei liegt das Ziel dieses Kapitels nicht vorrangig in der Detailkonstruktion sondern zunächst einmal in der Lösungskonzeption für eine prototypische Nähwirkmaschine. Die Anforderungen an eine solche Lösung zeigt Tabelle 29.

Die geometrischen Anforderungen resultieren aus den üblichen Konfigurationen bestehender Nähwirkmaschinen und der gestellten Gesamtaufgabe. Die Arbeitsbreite der Nähwirkmaschinen wird aus historischen Gründen meist in Zoll angegeben, wobei Breiten von etwa 50, 100, 130 und 150 Zoll üblich sind ([262], [273]). Um den Platzbedarf der zu konzipierenden Nähwirkmaschine zu bestimmen, wird von einer Arbeitsbreite von 102 Zoll (2600 mm) ausgegangen, die maximal mit der Maschinenfeinheit F 14 ausgestattet ist, wobei hauptsächlich die gröberen Maschinenfeinheiten F 5 bis F 10 zum Einsatz kommen. Dies ergibt eine maximale Kettfadenzahl pro Lage von 1456. Vorzusehen sind zwei Kettfadenlagen an den Außenseiten (Ober- und Unterkette) sowie bis zu zwei Zwischenlagen (Zwischenkette). Damit sind insgesamt bis 5824 Kettfäden gleichzeitig zu verarbeiten. Angesichts dieser hohen Anzahl sollte die Anordnung der Kettfadengatter so platzsparend wie möglich erfolgen.

An erster Stelle der sich aus dem zu verarbeitenden Fasermaterial ergebenden Anforderungen steht die schonende Verarbeitung der querdruckempfindlichen Glas- und Carbonfasern. So ist insbesondere die Zahl der bei der Fadenzuführung zu passierenden Umlenkstellen gering zu halten, beziehungsweise sind diese faserschonend mit großen Umlenkradien zu gestalten. Sollte es sich als notwendig erweisen, zusätzliche Arbeitsschritte in den Nähwirkprozess zu integrieren, so gilt es, die innere und äußere Fadenstruktur zu bewahren. Dazu gehört auch, die Verarbeitungstemperatur unter 200 °C zu halten, da sich oberhalb dieser Temperatur sowohl bei Glas- als auch bei Carbonfilamentgarnen deutliche Eigenschaftsbeeinflussungen zeigen (YOUNES, 2009 [184]). Weiteres Ziel muss es sein, die bisherigen günstigen Eigenschaften der Nähwirkstoffe, insbesondere den gestreckten Fadeneintrag, zu bewahren, Fadenverschiebungen an der Wirkstelle und Erhöhungen der Biegesteifigkeit des Nähwirkstoffs zu vermeiden sowie die Eignung für die Weiterverarbeitung in Faser-Kunststoff-Verbunden und Textilbeton zu gewährleisten.

Die bisherige Arbeitsgeschwindigkeit der Maschine von bis zu 6 m/min soll beibehalten werden und weiterhin stufenlos einstellbar sein, so dass ein kontinuierlicher Herstellprozess gewährleistet ist. Zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Qualität können Kettfadenfördereinrichtungen vorgesehen werden. Dazu ist auf die am Markt verfügbare Technik zurückzugreifen.

Die erweiterte Kettfadenzuführung sollte in bestehende Anlagen nachgerüstet werden können. Wichtig für die Bedienung ist weiterhin, dass die Kettfadenführer schnell und unkompliziert ausgewechselt werden können, die Zugänglichkeit der für die Bedingung relevanten Maschinenmodule sowie aller Fäden gewährleistet ist und Zwangshaltungen für den Maschinenbediener beim Umrüsten sowie während des Betriebes vermieden werden.

Tabelle 29: Anforderungsliste

Anforderungsliste	
Aufgabe: Nähwirkmaschine mit Zuführung und sicherer Fixierung von Kettfadenlagen an den Außenseiten und als Zwischenlage eines bis zu zehnlagigen Nähwirkstoffs	
Bedeutung	Festforderung/optionale Anforderung
	Geometrie
F	- Maschinenfeinheit bis zu F 14
F	- Verarbeitung von bis zu 1456 Kettfäden pro Lage
F	- 2 Kettfadenlagen an den Außenseiten des Nähwirkstoffs
F	- zusätzlich bis zu 2 Kettfadenlagen als Zwischenlagen
O	- geringer Flächen-/Raumbedarf
O	- Arbeitsbreite beispielhaft 2600 mm (102''), auch andere Breiten möglich
	Stoff
F	- maximale Verarbeitungstemperatur 200 °C
F	- Erhalt der inneren und äußeren Fadenstruktur
F	- Vermeidung der seitlichen Verschiebung der Kettfäden durch die Wirkfäden
F	- gestreckte Lage der Kettfäden im Nähwirkstoff
F	- gestreckte Lage der Schussfäden im Nähwirkstoff
O	- Eignung für geschlossene und gitterförmige Nähwirkstoffe
O	- keine Erhöhung der Biegesteifigkeit des Nähwirkstoffs
O	- Eignung für die Weiterverarbeitung in Faser-Kunststoff-Verbunden und Textilbeton
O	- schädigungsarme Verarbeitung von insbesondere Glas- und Carbonfilamentgarnen (geringe Anzahl Umlenkstellen, große Radien)
	Kinematik
F	- Arbeitsgeschwindigkeit zwischen 0 und 6 m/min
F	- kontinuierlicher Herstellprozess
O	- geregelter Kettfadenantrieb
	Montage/Bedienung/Instandhaltung
F	- Zugänglichkeit der Maschine gewährleisten
F	- Zugänglichkeit aller Fäden in der Maschine gewährleisten
O	- Vermeidung von Zwangshaltungen beim Umrüsten
O	- wartungsarm
O	- geringer Reinigungsbedarf
O	- nachrüstbar für bestehende Maschinen
O	- einfacher Wechsel der Wirkelemente
	Kosten
O	- geringe Investitionskosten für Zusatzeinrichtungen
O	- geringer Energieverbrauch
O	- geringe Materialkosten bei Verwendung von zusätzlichen Werkstoffen

F: Festforderung, Erfüllung unbedingt notwendig (Ausschlusskriterium)

O: optionale Anforderung, Erfüllung wünschenswert (Bewertungskriterium)

7.2 Funktionsstrukturen

7.2.1 Gesamtfunktion

Die Funktionsstruktur einer konventionellen Nähwirkmaschine umfasst die Teilfunktionen Speichern des Ausgangsfadenmaterials (Kett- und Schussfäden in getrennten Gattern auf Spulen für Über-Kopf- oder Tangentialabzug, Wirkfäden auf Kettbäumen), Zuführen und Ablegen der Schussfäden und deren Transport im Transportrahmen zur Wirkstelle, wo sie mit den kurz zuvor zugeführten Kettfäden im Fügeprozess mittels Nähwirken zum Nähwirkstoff verbunden werden. Abschließend erfolgen das Trennen des Nähwirkstoffs von der Transportkette durch Randbeschnitt und das Aufwickeln auf dem Speichermedium, üblicherweise in Form eines Warenwickels.

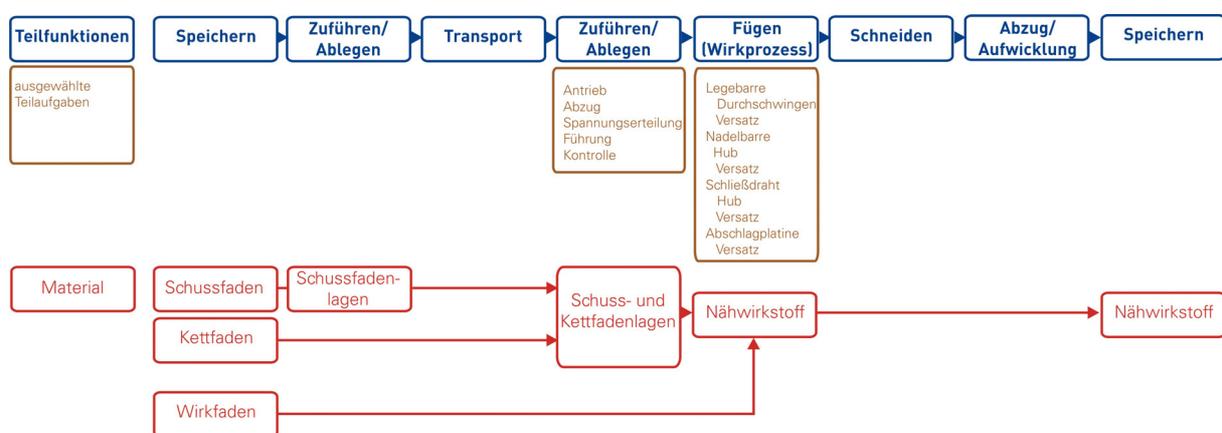


Bild 137: Gesamtfunktion einer konventionellen Nähwirkmaschine

Aus der eingangs formulierten Gesamtaufgabe ergeben sich bei Betrachtung dieser Funktionsstruktur folgende neu zu konzipierende oder anzupassende Teilfunktionen: Speichern der Kettfäden, Zuführen und Transport der Kettfäden sowie Fügen (hier insbesondere die Teilaufgaben Führung der Kettfäden an der Wirkstelle und Nadelbarrenversatz).

7.2.2 Funktionsstrukturvarianten für die Gesamtaufgabe

Durch die Arbeitsweise der Maschine mit den aufeinanderfolgenden Schusseintragsstationen auf dem Transportrahmen und dem Transport der Schussfadenlagen zur Wirkstelle ergeben sich für die Zuführung von Kettfäden als Ober-, Unter- und Zwischenkette die in Bild 138 dargestellten Varianten. Die Oberkette kann nur senkrecht zwischen dem letzten Schussleger und der Wirkstelle zugeführt werden, während für die Unterkette die Zuführung von unten an die Wirkstelle an einer beliebiger Stelle unterhalb der Schusslagen beziehungsweise waagrecht von hinten erfolgen kann. Die Zwischenkette kann demgegenüber nur senkrecht zwischen den Schusslegern zugeführt werden.

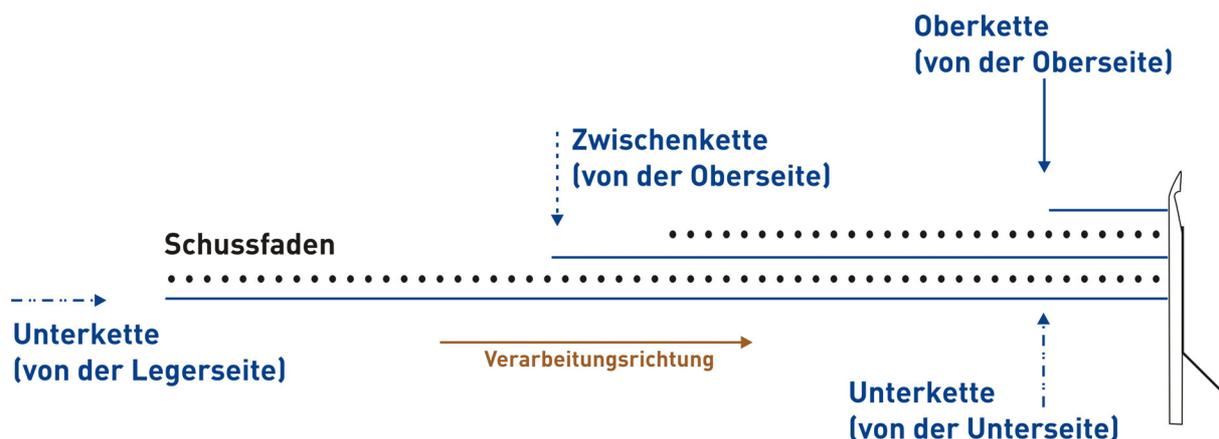


Bild 138: Varianten der Zuführung von Kettfadenschichten an einer Nähwirkmaschine (schematische Seitenansicht)

7.3 Teilfunktion Speichern

Aus den in Bild 138 dargestellten Varianten der Kettfadenzuführung lassen sich mögliche Anordnungen der Kettfadengatter ableiten, die in Bild 139 zu sehen sind. Die Betrachtung der unterschiedlichen Anordnungen und des daraus resultierenden Platzbedarfs beruht auf der Verwendung der am *ITM* entwickelten Universalgatter nach WALDMANN, 2008 [297]. Diese zeichnen sich durch eine platzsparende Anordnung und günstige Bedienung aus. Sie werden aus Grundeinheiten aufgebaut, die bei Abmessungen von 650 mm x 1200 mm x 1200 mm entweder elf Spulen bei Über-Kopf- oder zwölf Spulen bei Tangentialabzug aufnehmen können.

Eine Längsseite der Maschine ist für die Schussfadengatter vorzusehen, so dass neben, vor (Legerseite) und hinter (Wicklerseite) der Nähwirkmaschine Aufstellflächen für die Kettfadengatter verbleiben. Während die Oberkette bei der Verwendung von vier Kettfadenschichten sinnvollerweise von der Wicklerseite hinter der Maschine über die Wirkstelle hinweg zugeführt wird, besteht für die Anordnungen der Gatter für die Unterkette die Aufstellmöglichkeit neben der Maschine beziehungsweise vor der Maschine auf der Legerseite. Die beiden Gatter für die Zwischenketten können dann auf allen drei Seiten oder auch über der Maschine angeordnet werden.

Die Aufstellung der Kettfadengatter muss sich immer an den baulichen Gegebenheiten und den betrieblichen Abläufen sowie der Art der eingesetzten Kettfadengatter orientieren. Für die weitere Betrachtung wird hier eine Variante ausgewählt, welche die Länge der Gesamtanlage durch die Anordnung der Kettfadengatter nicht noch allzu stark vergrößert. So werden die Gatter für die Unter- und die Oberkette vor und hinter der Maschine, die Gatter für Zwischenketten über der Maschine platziert (Bild 140). Auf diese Weise bleibt eine Maschinenseite komplett frei, so dass die Zugänglichkeit der Maschine gewährleistet ist und die Kettfadengatter auf dem Podest bestückt werden können.

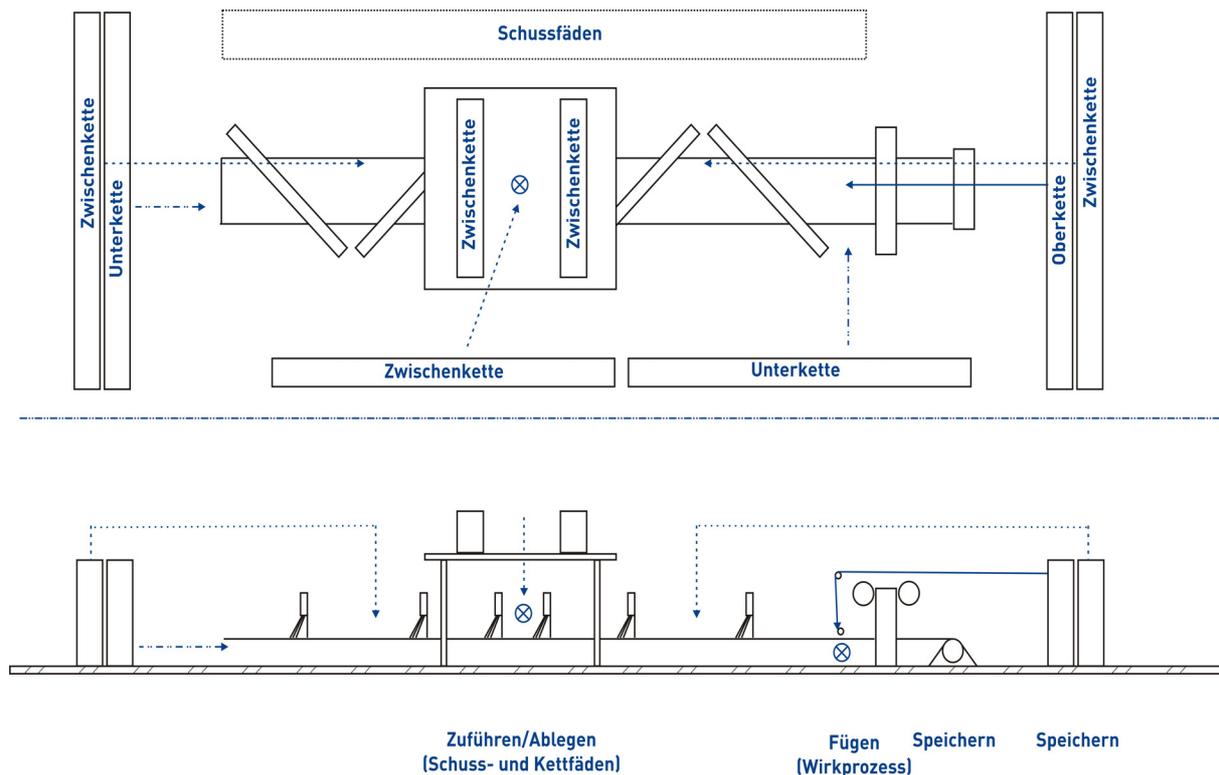


Bild 139: Varianten der Zuführung von Kettfadenschichten an einer Nähwirkmaschine und Aufstellung der Kettfadengatter (schematische Darstellung in Drauf- und Seitenansicht)

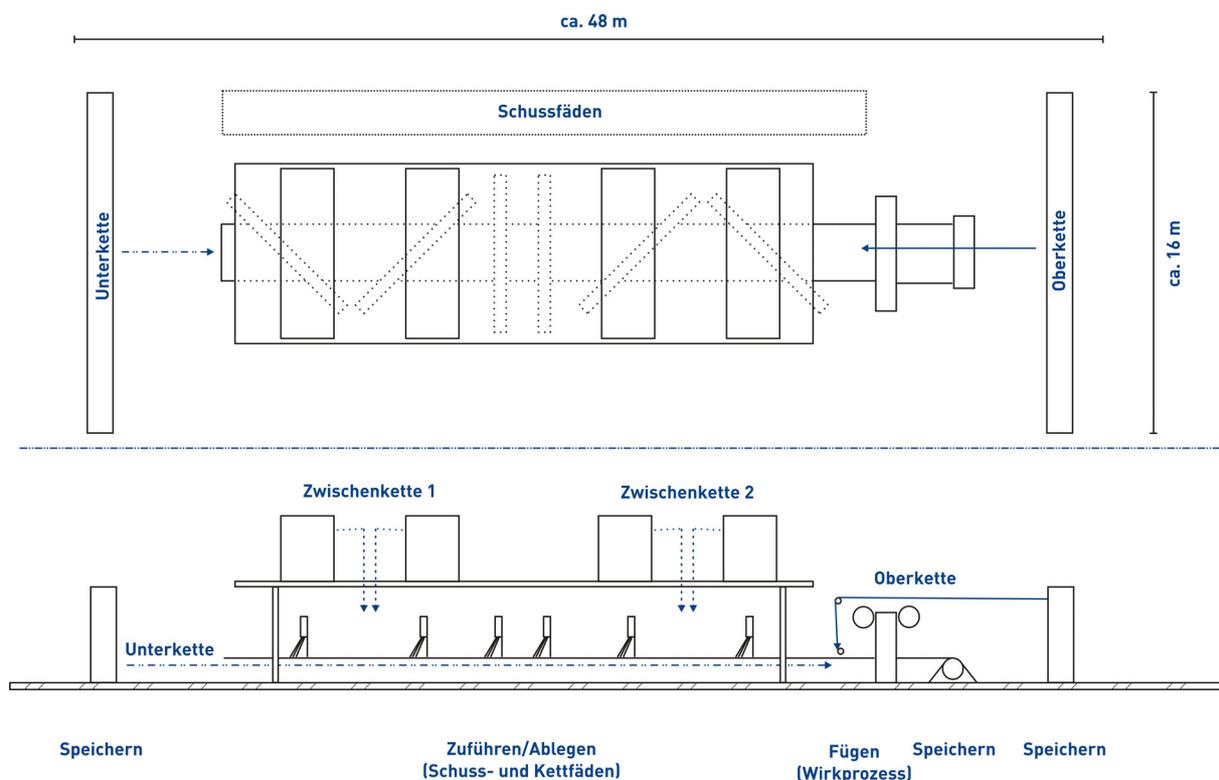


Bild 140: Beispielvariante der Zuführung von Kettfadenschichten an einer Nähwirkmaschine und Aufstellung der Kettfadengatter (Maschinenbreite 2600 mm, Maschinenfeinheit F 10)

Die Speicherung des Nähwirkstoffs in Form eines Wickels kann grundsätzlich genutzt werden. Bei mehrlagigen Nähwirkstoffen, insbesondere bei Anordnung von Kettfadenschichten

auf beiden Gelegeaußenseiten, besteht jedoch das Problem, dass die innere Kettfadenlage stärker gestaucht wird als die äußere. Hier ist als einfache Abhilfe der Außendurchmesser des Wickelkerns möglichst groß zu wählen. Bestehen jedoch sehr hohe Anforderungen an die Qualität des Nähwirkstoffs, so kann die Anlage um eine Stapleinrichtung zur ebenen Ablage des Textils ergänzt werden. Lösungen für solche Einrichtungen finden sich bei KERN, 2007 [269] und KÖNIG, 2008 [272].

7.4 Teilfunktion Zuführen und Ablegen

7.4.1 Zuführung der Unterkette

Die Zuführung der Unterkette unter den Schussfadenlagen über die gesamte Maschinenlänge erfordert geeignete Hilfsmittel für den Maschinenbediener, so dass eine schnelle und unkomplizierte Bestückung der Maschine gewährleistet werden kann. Zwei Punkten soll hier besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, der Führung der Kettfäden vom Gatter bis zur Wirkstelle und dem Einziehen der Fäden an der Wirkstelle.

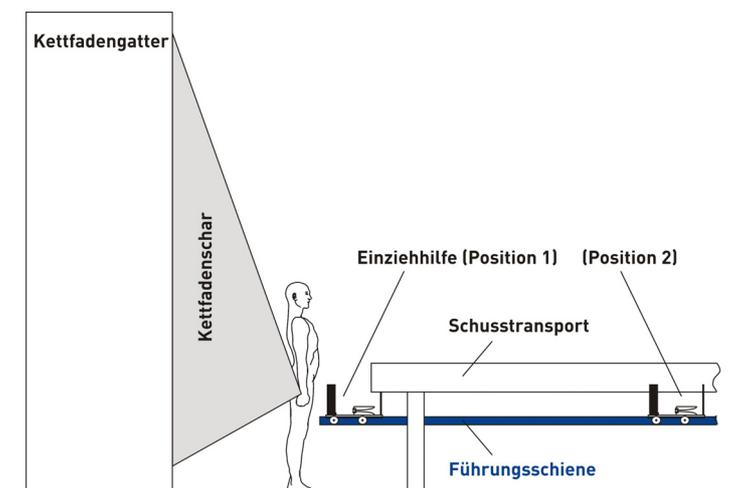


Bild 141: Einziehen der Unterkette (Seitenansicht)

Für die Führung der Kettfäden wird der Einsatz einer Einziehhilfe vorgeschlagen. Diese besteht aus einem festen Riet zur Trennung der Kettfäden (austauschbar entsprechend der Maschinenfeinheit), Klemmschienen zur Fixierung der Kettfäden und einer auf die Maschinenlänge abgestimmten Anzahl an versetzbaren Rieten zur Führung der Fäden, ohne dass diese während des Maschinenbetriebes ineinanderlaufen. Die Einziehhilfe befindet sich zu Beginn des Einziehvorgangs vor der Maschine (Bild 141, Position 1). Hier kann der Maschinenbediener in aufrechter Haltung die Kettfäden durch die Riete führen und mit den Klemmschienen fixieren. Danach wird die Einziehhilfe in einer Transportschiene, die unterhalb der Schussfadenlagen an den Maschinenpfeilern angebracht ist, bis zur Wirkstelle gefahren (Bild 141, Position 2). Dabei werden die versetzbaren Riete in regelmäßigen Abständen zwischen Maschinenvorderseite und Wirkstelle arretiert, um eine gleichmäßige Stützung der Kettfäden zu gewährleisten.

7.4.2 Ergonomische Aspekte beim Einziehen der Unterkette

Durch Ergänzung der Nähwirkmaschine um die Zuführung einer unteren Kettfadenlage entstehen neue Arbeitsvorgänge für den Maschinenbediener. Neben der schon bisher üblichen Arbeit an der Nähwirkstelle, insbesondere zum Einziehen der Kett- und Wirkfäden, die von einem oder mehreren Podesten oberhalb der Nähwirkstelle aus erfolgt, sind jetzt auch regelmäßig Arbeitsschritte unter der Maschine auszuführen. Beim vollständigen Einziehen der Kettfäden in eine leere Nähwirkmaschine, kann das Einziehen der Unterkette vor den anderen Fadenlagen erfolgen, wenn zumindest die Stützschiene vorübergehend entfernt wird. Dann ist es für den Maschinenbediener möglich, die Unterkette von oben einzuziehen. Jedoch wird es zum Beispiel bei Fadenbruch in der Unterkette notwendig sein, das Anknüpfen des Kettfadens unter der Maschine vorzunehmen, da der Zugang von oben durch die anderen Fadenlagen blockiert ist. Der Zugang unter die Maschine und die Arbeit dort sind entsprechend den gängigen Anforderungen an die ergonomische und sicherheitstechnische Gestaltung von Maschinenarbeitsplätzen auszuführen (DIN EN ISO 13857 [197] und 14738 [201]). Dabei sind nach DIN EN ISO 14738 [201] unter Berücksichtigung technischer und ökonomischer Bedingungen die besten Körperhaltungen und Bewegungsabläufe sicherzustellen. Sitzen ist gegenüber anderen möglichen Haltungen als Hauptarbeitshaltung zu bevorzugen, da hierbei Energieaufwand und Ermüdung gering sind, eine standfeste Körperunterstützung geboten wird und die Möglichkeit zur Feinarbeit gegeben ist. Nachteilig ist das Risiko, langfristig Zwangshaltungen einzunehmen.

Der Arbeitsplatz unter der Nähwirkmaschine kann folgendermaßen charakterisiert werden:

- Die Dauer der dort zu verrichtenden Arbeit ist kurz, zwischen einigen Minuten und höchstens einer Stunde.
- Der Bediener hat es nur mit leichten Objekten (Fäden) und Werkzeugen (Hilfsmittel zum Fadeneinzug) zu tun.
- Dadurch sind nur geringe Kräfte aufzuwenden.
- Es ist kein großer Bewegungsspielraum notwendig.
- Da sehr kleine Objekte zu handhaben sind, ist eine optimale Beleuchtung vorzusehen.

Arbeitsplätze können aus wirtschaftlichen Gründen nicht für jeden einzelnen Benutzer gestaltet werden (DIN 33402-2 [202], [203]). Gebräuchliche Grenzen für die Anpassung von Arbeitsmitteln sind das 5. und das 95. Perzentil der Körpermaße von Erwachsenen zwischen 18 und 65 Jahren. Diese Grenzen schließen bei nur einem Viertel der Variationsbreite der Körpermaße 90 Prozent aller Erwachsenen ein.

DIN EN ISO 14738 [201] gibt davon ausgehend die minimale Sitzhöhe mit 370 mm an. Die Körpersitzhöhe eines großen Mannes beträgt 965 mm (P95). Somit sollte der Abstand zwischen Boden und der untersten Fadenlage in der Maschinentransportkette mindestens 1335 mm betragen. Aus ergonomischer Sicht wäre es für große Männer vorteilhaft, die Sitzhöhe zu vergrößern. Wenn möglich sollte deshalb eine Höhenverstellbarkeit der Maschine vorgesehen werden, um die lichte Höhe der Fadenlagen über dem Boden um weitere

120 mm zu vergrößern, falls die Deckenhöhe am Aufstellort und die Bedienbarkeit der Maschine von der Seite dies zulassen. Alternativ könnte ein in den Boden eingelassener Bedienergang vorgesehen werden. Für große Männer wird eine Sitzhöhenverstellung um 120 mm, für kleine Frauen (P5) um 155 mm benötigt (Bild 142).

Die Reichweite einer kleinen Frau (P5) nach vorn beträgt bei gestrecktem Arm 625 mm, bei einem großen Mann (P95) 815 mm, der Abstand zwischen Rücken und Knie variiert beim Sitzen zwischen 545 mm und 655 mm, dazu addiert sich noch der nach vorn stehende Fuß. Damit der Bediener den möglichst kleinsten Abstand zur Arbeitsstelle realisieren kann, sollte deshalb wenn technisch möglich unter der Wirkstelle Freiraum für die Füße gelassen werden. Der Abstand des Bedieners (gemessen vom Rücken) von der Wirkstelle ist dann zwischen 545 mm und 655 mm einstellbar.

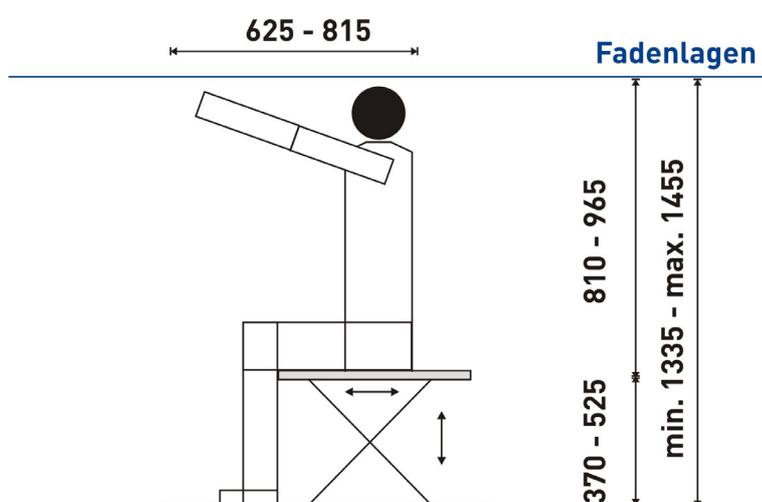


Bild 142: Bedienerarbeitsplatz an der Wirkstelle unter den Fadenlagen

Zum Erreichen dieses Arbeitsplatzes ist eine seitliche Zugangsöffnung zwischen den Trägern des Maschinenrahmens vorzusehen. Ausgehend von einem großen Mann sollte diese Öffnung mindestens 775 mm breit und 915 mm hoch sein [DIN EN 547-1 [192]]. Sie ist durch eine Sicherheitstür zu verschließen, die im geöffneten Zustand keinen Maschinenbetrieb zulässt.

Problematischer ist die Gestaltung des Arbeitsplatzes über der Wirkstelle, für den folgende Aspekte relevant sind:

- Das Einziehen aller Fäden kann in Abhängigkeit der Maschinenbreite mehrere Stunden in Anspruch nehmen, auch während des Betriebes sind in regelmäßigen Abständen Arbeiten über einen längeren Zeitraum an der Wirkstelle vorzunehmen.
- Der Bediener hat es nur mit leichten Objekten (Fäden) und Werkzeugen (Hilfsmittel zum Fadeneinzug) zu tun.
- Dadurch sind nur geringe Kräfte aufzuwenden.
- Es ist ein größerer Bewegungsspielraum notwendig.
- Da sehr kleine Objekte zu handhaben sind, ist eine ausreichende Beleuchtung vorzusehen.

Eine sitzende Arbeitshaltung kann hier mangels Fußraum nicht eingenommen werden, so dass der Bediener üblicherweise entweder kniet, hockt oder auf der Maschinenabdeckung liegt. Diese Körperhaltungen sind nach DIN EN ISO 14738 [201] jedoch zu vermeiden. Das Grundprinzip des waagerechten Fadenlagentransports schließt andere Körperhaltungen allerdings aus. Da die Belastungen beim gebeugten Knien und Hocken als problematischer eingeschätzt werden als beim Liegen, soll für die liegende Arbeitsweise eine verträgliche Lösung gefunden werden.

Zunächst einmal ist das Arbeitspodest für eine liegende Tätigkeit genügend lang zu gestalten. Maßgeblich ist dabei die Körperhöhe eines großen Mannes (P95) von 1855 mm. Um die liegende Arbeitshaltung für unterschiedliche Bediener zu ermöglichen, sollte auf dem Podest eine seitlich verschiebbare und höhenverstellbare Liegefläche vorgesehen werden. Diese kann, wenn sie nicht benötigt wird, zur Seite geklappt werden. Um Ermüdungerscheinungen der Arm- und Halsmuskulatur vorzubeugen, muss die Liegefläche Halt für die Schultern und die Arme bieten. Ausgehend von einem großen Mann beträgt die Liegenbreite 525 mm. In der Mitte des Kopfendes ist eine Aussparung zum Abstützen des Kinns vorzusehen. Während der Tätigkeit des Einziehens auf der Liege muss der Bediener Zugriff auf eine Fernbedienung für die Maschinengrundfunktionen haben, zudem sollte eine Ablage für häufig benötigtes Werkzeug angebracht werden.

7.4.3 Zuführung der Zwischenketten

Die Gatter für die Kettfäden der Zwischenketten werden in der Vorzugsvariante über der Maschine auf einem Podest, Zwischenboden oder in einem Obergeschoss angeordnet. Von dort werden sie durch eine Öffnung in Richtung der Schussfadenlagen geführt (Bild 143). Für jede Zwischenkette sind drei Eintragungspunkte vorzusehen (A, B, C). Eintragungspunkt A befindet sich mittig unter den Kettfadengattern, die Eintragungspunkte B und C sind seitlich verschoben. Für den Maschinenbediener ist eine verschiebbare Arbeitsbühne vorzusehen, die unter alle drei Eintragungspunkte versetzt werden kann. An Eintragungspunkt A, der sich senkrecht unter der Kettfadenzuführstelle befindet, kann das Einziehen unmittelbar erfolgen. Soll die Zwischenkette an den Eintragungspunkten B oder C zugeführt werden, so muss sie zu den dort fest angeordneten Umlenkorganen geführt werden. Dazu fixiert der Bediener die Kettfäden in der bei A angebrachten verschiebblichen Einziehhilfe, die dann über den Schussleger hinweg zum Eintragungspunkt B oder C verfahren wird. Die Umlenkorgane bei A, B und C können auch als aktive Zuführung gestaltet werden.

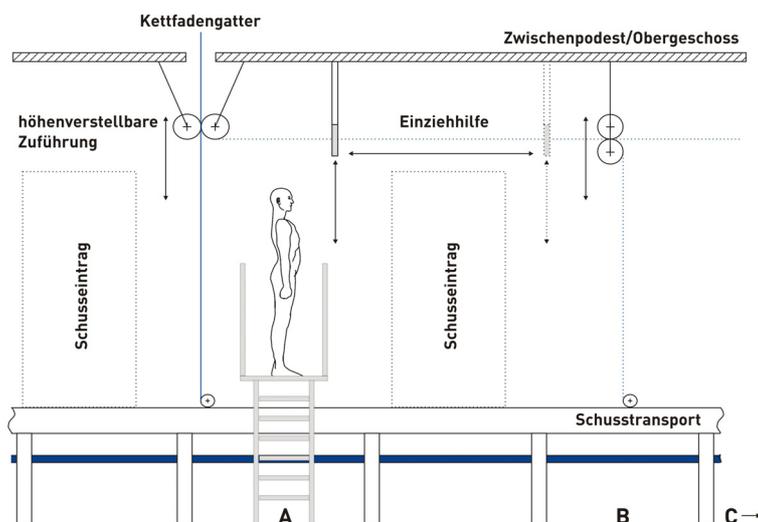


Bild 143: Zuführung der Zwischenkette (Seitenansicht)

7.5 Teilfunktion Transport

7.5.1 Transport der Zwischenkette

Der Transport der Schussfadenlagen von der Ablage bis zur Wirkstelle erfolgt unter einer seitlichen Fixierung in der Transportkette. So kann sichergestellt werden, dass die geforderte Ausrichtung der Schussfäden bis zur Einbindung in den Nähwirkstoff an der Wirkstelle gewährleistet ist. Bezüglich der Kettfadenlagen besteht diese Forderung in gleicher Weise. Während die Ober- und die Unterkette bis unmittelbar vor die Wirkstelle geführt werden, ist die sichere Zuführung der Zwischenketten näher zu untersuchen, da sie sich vom Moment der Fadenablage an zwischen den Schussfadenlagen befinden. Die entsprechende Teilaufgabe kann als gestreckte und gerade Führung der Zwischenkettfäden von der Ablage auf der darunterliegenden Schussfadenlage bis unmittelbar an die Wirkstelle formuliert werden. Zur Sicherstellung der geraden Fadenausrichtung, also exakt in 0° , bedarf es entweder einer Fixierung oder einer Führung der Kettfäden. Unter Fixierung soll hier die verschiebefeste Verbindung mit den darunter oder darüber befindlichen Schussfadenlagen oder der Kettfäden untereinander verstanden werden. Als Führung wird die Verhinderung von Lageänderungen der Kettfäden durch Elemente der Nähwirkmaschine angesehen.

7.5.2 Führung der Kettfäden

7.5.2.1 Funktionsstrukturen

Für die Führung der Zwischenkettfäden vom Eintragspunkt bis zur Wirkstelle bestehen grundsätzlich folgende Möglichkeiten:

1. Es erfolgt eine exakte Positionierung jedes einzelnen Kettfadens durch Führungsorgane am Eintragspunkt und durch die Einbindung an der Wirkstelle, jedoch nicht auf dem dazwischenliegenden Weg.

2. Es erfolgt eine exakte Positionierung der Kettfäden am Eintragspunkt, die auf dem Weg zur Wirkstelle durch Führungsorgane sichergestellt wird, entweder
 - a. für jeden Faden einzeln zwischen den Schussfadenlagen oder
 - b. für alle Fäden gemeinsam
 - i. zwischen den Schussfadenlagen oder
 - ii. außerhalb der Schussfadenlagen.

Eigene Versuche zum Transport der Kettfäden ohne Zwischenführung (Variante 1 im Bild 144) an einer Nähwirkmaschine *Malimo 14024* mit waagerechter Schussfadenzuführung und drei Schusslegern zeigten, dass auf diesem Wege keine sichere Führung der Kettfäden in der Zwischenlage gewährleistet werden kann. Es wurden Lageabweichungen pro Faden von über einem Zentimeter beobachtet. WAGENER, 2003 [229] berichtet vom erfolgreichen Einsatz von geeigneten Rollen zum Aufspreizen der Kettfäden, was zu einer höheren Ablagegenauigkeit führen kann. Jedoch ist dieser Ansatz für gitterförmige Nähwirkstoffe nicht geeignet.

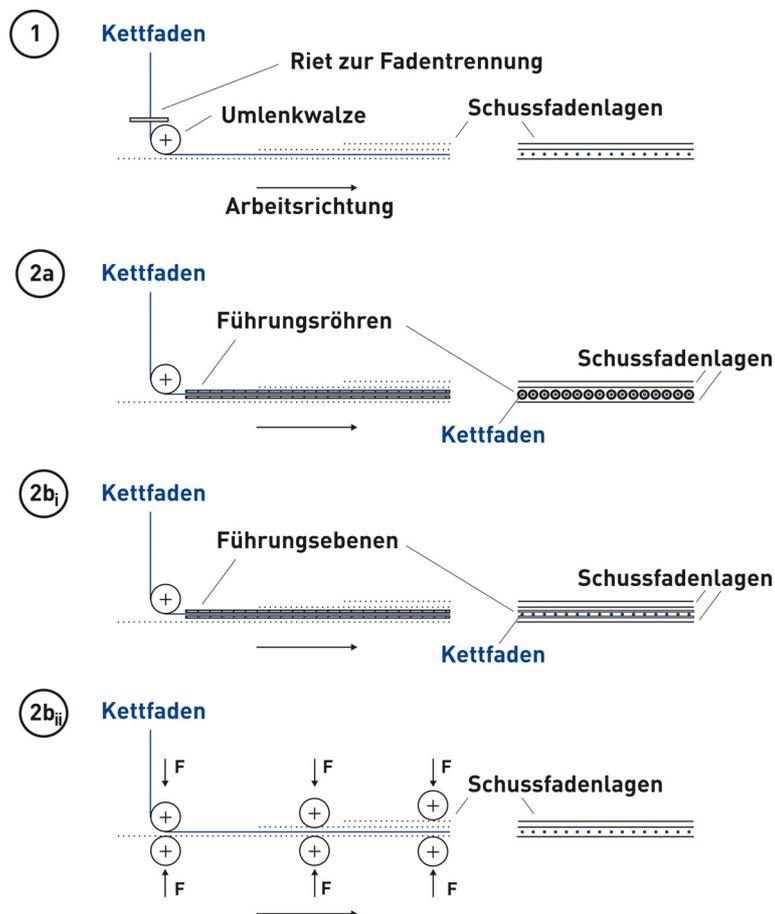


Bild 144: Lösungsvarianten für das Prinzip Führen

Bei der Variante 2 (Bild 144) erfolgt zusätzlich eine Führung zwischen dem Eintragspunkt und der Wirkstelle. Diese Führung kann für jeden Faden einzeln (Variante 2a) zwischen den Schussfadenlagen angeordnet werden (z. B. durch Führungsröhrchen). Oder sie erfolgt für alle Kettfäden gemeinsam entweder zwischen den Schussfadenlagen (Variante 2b_i, z. B.

zwischen Führungsebenen, die innerhalb der Schussfadenlagen angeordnet werden) oder außerhalb der Schussfadenlagen (Variante 2b_{iii}, z. B. durch Walzen oder Bänder).

Da abzusehen ist, dass nicht alle der genannten Varianten gleichwertig praktikabel sind, soll an dieser Stelle eine erste Bewertung und Auswahl vorgenommen werden. Dies erfolgt mit einer Auswahlliste (Tabelle 30). Die Lösungen müssen sich als vereinbar mit der Anforderungsliste und als technisch realisierbar erweisen.

Tabelle 30: Auswahlliste für Funktionsstrukturvarianten zur Kettfadenführung

Lösungsvariante	Festforderungen erfüllt?	Technisch realisierbar?	Bemerkung	Entscheidung
1	nein	ja	Festforderung „gestreckte Kettfadenlage“ nicht erfüllt, keine Gitter möglich	nein
2a	nein	nein	Festforderung „gestreckte Schussfadenlage“ nicht erfüllt	nein
2b _i	nein	nein	Festforderung „gestreckte Schussfadenlage“ nicht erfüllt	nein
2b _{ii}	nein	ja	Festforderung „gestreckte Kettfadenlage“ bzw. „keine Fadenschädigung“ nicht erfüllt	nein

Die Varianten 2a und 2b_i entfallen aufgrund mangelnder Realisierbarkeit. Eine zwischen den Schussfadenlagen angeordnete Führung kann aufgrund der darüber und darunter befindlichen Schussfadenlagen nicht seitlich am Maschinenrahmen befestigt werden, nur auf der Seite des Eintragungspunktes ist eine Befestigung an der Maschine möglich. Weiterhin gestaltet sich das Einziehen und Anarbeiten zu aufwändig. Das zwischen den Schussfadenlagen angeordnete Führungselement führt weiterhin zu deren Auslenkung, so dass die Schussfäden beim Einbinden in das Gelege nicht gestreckt liegen.

Bei Variante 2b_{ii} werden die Kettfäden in regelmäßigen Abständen, die von der Ausrichtung der Schussleger abhängen und mehrere Meter betragen können, geführt. Auf den dazwischenliegenden Abschnitten, an denen sich die Schussleger befinden und kurz vor der Wirkstelle findet keine Führung statt. Um zu ermitteln, ob eine solche Führung die exakte Kettfadenpositionierung sicherstellen kann, werden Tastversuche zur Feststellung der Höchstabstände zwischen den Fixier- beziehungsweise Führungspunkten an einer Nähwirkmaschine *Malimo 14024* durchgeführt. Dazu wird ein Kettfaden der Zwischenkette in regelmäßigen Abständen auf der darunterliegenden Schussfadenlage befestigt und die Lagetreue dieses Kettfadens im Nähwirkstoff beobachtet. Es kann festgestellt werden, dass bei verdrehten Garnen (z. B. bei Innenabzug von Rovingspulen) ein Höchstabstand zwischen den Fixierpunkten von etwa zehn Zentimetern und bei drehungsfreien Garnen von etwa 20 Zentimetern eingehalten werden sollte. Aus diesem Grund wird die Nutzung einer äußeren Führung, auch in der Form mit in die Fadenlagen eingreifenden Elementen wie etwa bei

einer Nadelwalze, ausgeschlossen. Als Ableitung dieser Variante kann auch ein über die gesamte Maschinenlänge angeordnetes Führungssystem, z. B. in Form eines Nadelbandes (WAGENER, 1999 [244]) zum Einsatz kommen. Bei der notwendigen Nadeldichte für eine variable und sichere Fixierung sind jedoch deutliche Schädigungen der Fadenlagen zu erwarten. Eine Fixierung von gitterförmigen Nähwirkstoffen ist nicht gegeben.

7.5.3 *Fixierung der Kettfäden*

7.5.3.1 *Funktionsstrukturen*

Ausgehend von der Gesamtstruktur der Nähwirkmaschine (Bild 137) wird hier die Funktionsstruktur für die Zuführung der Zwischenkette bis zur Wirkstelle näher betrachtet (Bild 145). Es wird die neue Funktion Fixieren der Zwischenkette auf der vorgelegten beziehungsweise unter der nachfolgenden Schussfadenlage eingeführt.



Bild 145: Ausschnitt aus Funktionsstruktur der Nähwirkmaschine betreffend die Zuführung der Zwischenkette bis zur Wirkstelle, Einführung der neuen Funktion Fixieren

Folgende Verbindungsprinzipien kommen für das Fixieren der Zwischenkette auf einer Schussfadenlage in Frage:

1. Stoffschluss
 - a. mit Bindemitteln
 - b. ohne Bindemittel
2. Formschluss
 - a. mit Zusatzelementen
 - b. ohne Zusatzelemente
3. Kraftschluss
 - a. mit Zusatzelementen
 - b. ohne Zusatzelemente

Eine stoffschlüssige Verbindung entsteht durch atomare beziehungsweise molekulare Kräfte, die ein stoffliches Vereinigen der zu verbindenden Elemente entweder mit oder ohne ein zusätzliches Bindemittel bewirken. Formschlüssige Verbindungen entstehen durch das Ineinandergreifen der zu verbindenden Elemente beziehungsweise zusätzlicher Elemente, wobei die angreifende Kraft durch eine Flächenpressung übertragen wird. Kraftschlüssige Verbindungen entstehen zum Beispiel durch das Aufbringen von Druck- oder Reibkräften. Häufig kommt es bei der Verbindung von Fasern oder Fäden miteinander zu kombinierten Form- und Kraftschlusseffekten.

Für die drei Verbindungsprinzipien lassen sich die nachfolgend dargestellten Funktionsstrukturvarianten aufstellen (Bild 146).

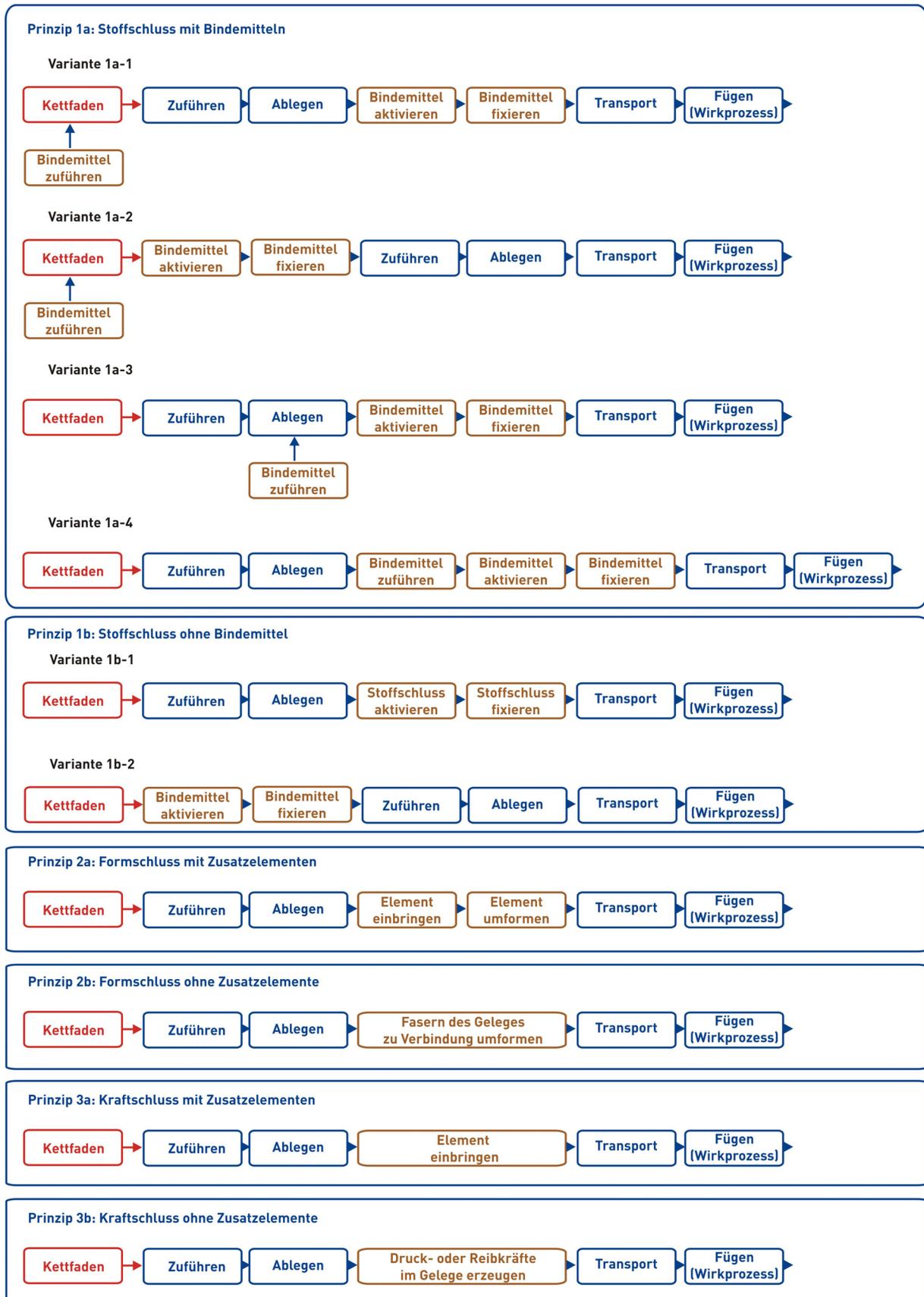


Bild 146: Funktionsstrukturvarianten für die Funktion Fixierung

Die vier Varianten zum Verbindungsprinzip 1a (Stoffschluss mit Bindemittel) unterscheiden sich hinsichtlich des Zeitpunkts im Funktionsablauf, an dem das Bindemittel eingetragen

wird. Dieses kann den Fäden zugegeben beziehungsweise während des Legeprozesses oder danach eingebracht werden. Nach dieser Zugabe erfolgen falls nötig die Aktivierung des Bindemittels und die Fixierung der Verbindung. Unter Aktivierung soll hier verstanden werden, dass das Bindemittel in einen Zustand versetzt wird, in dem es die Filamente benetzt und so nach der Fixierung eine feste Verbindung entstehen lässt. Aus diesen vier Lösungsvarianten ergeben sich folgende neue Teilaufgaben:

- Bindemittelauftrag während der Fadenzuführung,
- Bindemittelauftrag während des Legeprozesses,
- Bindemittelauftrag auf die Fadenlage,
- Bindemittelaktivierung (falls erforderlich),
- Bindemittelfixierung (falls Bindemittel nicht selbstfixierend).

Das Verbindungsprinzip 1b (Stoffschluss ohne Bindemittel bei unterschiedlichen Zeitpunkten der Aktivierung) erfordert, dass die Filamente des Geleges in einen Zustand gebracht werden, in dem sie sich miteinander verbinden lassen. Nachfolgend ist die Fixierung dieser Verbindung notwendig. Es ergeben sich die zu bearbeitenden Teilaufgaben Stoffschluss aktivieren und Stoffschluss fixieren.

Zur Anwendung des Verbindungsprinzips 2a (Formschluss mit Zusatzelementen) ist es notwendig, entsprechende Elemente einzubringen und gegebenenfalls umzuformen, um die formschlüssige Verbindung entstehen zu lassen. Dagegen erfordert Verbindungsprinzip 2b (Formschluss ohne Zusatzelemente), dass Bestandteile des Nähwirkstoffs so verformt werden, dass sie zu einer formschlüssigen Verbindung umgestaltet werden. Dies ist als Teilaufgabe für diesen Lösungsansatz zu untersuchen.

Das Verbindungsprinzip 3a verfolgt den Ansatz, durch zusätzliche Elemente Reib- oder Druckkräfte zwischen den Fäden hervorzurufen, so dass sich eine haltbare Verbindung ergibt. Dazu sind entsprechende Elemente zu bestimmen. Demgegenüber werden bei Verbindungsprinzip 3b diese Kräfte durch die Fasern im Nähwirkstoff selbst aufgebracht.

7.5.3.2 Auswahl der Funktionsstrukturvarianten

Da abzusehen ist, dass sich aus den aufgeführten Funktionsstrukturvarianten eine sehr große Anzahl an Lösungsvarianten ergeben wird, soll an dieser Stelle eine erste Bewertung und Auswahl vorgenommen werden. Die Auswahlliste ist in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Auswahlliste für Funktionsstrukturvarianten

Lösungsvariante	Festforderungen erfüllt?	Technisch realisierbar?	Bemerkung	Entscheidung
1a	ja	ja	wird weiter verfolgt	ja
1b	nein	ja	Festforderung „Erhalt der Fadenstruktur“ nicht erfüllt	nein
2a	ja	ja	wird weiter verfolgt	ja
2b	nein	ja	Festforderung „gestreckte Kett- und Schussfäden“ nicht erfüllt	nein
3a	ja	ja	wird weiter verfolgt	ja
3b	nein	ja	Festforderung „gestreckte Kett- und Schussfäden“ nicht erfüllt	nein

Wie die Auswahlliste zeigt, erfüllen nur für die Lösungsvarianten 1a (Stoffschluss mit Bindemittel), 2a (Formschluss mit Zusatzelementen) und 3a (Kraftschluss mit Zusatzelementen) die aufgestellten Forderungen. Den anderen Lösungsvorschlägen stehen Widersprüche zur Anforderungsliste oder geringe Erfolgchancen entgegen.

Prinzip 1b (Stoffschluss ohne Bindemittel) basiert auf der Ausbildung eines Stoffschlusses zwischen den Fäden ohne den Einsatz eines zusätzlichen Werkstoffes. Eine solche Verbindung lässt sich zum Beispiel durch Anlösen oder Thermoplastifizieren der Fasern erreichen. Beide Verfahren führen aber zwangsläufig zu einer mindestens teilweisen Auflösung der Filamente. Die Anforderungsliste fordert aber einen Erhalt der Fasereigenschaften, so dass dieser Lösungsansatz entfällt. Weiterhin sollen auch Faserstoffe verarbeitbar sein, die sich nicht lösen oder plastifizieren lassen.

Bei Prinzip 2b (Formschluss ohne Zusatzelemente) ergibt sich schon aus der genannten Teilaufgabe eine Inkompatibilität mit den Anforderungen. Zum Verbinden der Fadenlagen müssten Teile des Nähwerkstoffes so umgeformt werden, dass sich eine formschlüssige Verbindung ergibt. Die Fäden dürfen aber nicht aus ihrer nach dem Legeprozess erreichten Ausrichtung verformt werden.

Soll die Reibung zwischen den Fäden ohne zusätzliche Elemente erhöht werden (Prinzip 3b), so macht es die schichtweise übereinander liegende Anordnung der Fäden unmöglich, die Reibung zu erhöhen, ohne die Fäden aus ihrer bisherigen Lage umzuorientieren. Da dies vermieden werden muss, kommt auch diese Variante nicht in Betracht.

7.5.3.3 Lösungen für Verbindungsprinzip Stoffschluss mit Bindemitteln

Die Lösungsvariante Stoffschluss mit Bindemitteln entspricht dem chemischen Prinzip der Adhäsion. Hierfür gilt es zunächst, die in Frage kommenden Werkstoffvarianten zu erarbeiten, um dann Arbeitsprinzipien für die Teilaufgaben Zuführung, Aktivierung und Fixierung zu ermitteln. Einen Überblick über übliche Werkstoffaufmachungen gibt Tabelle 32 für die

Verfahrensvarianten Zuführung zu Fäden (1a-1 und 1a-2), Zuführung bei der Legung (1a-3) und Zuführung nach der Legung (1a-4).

Tabelle 32: Werkstoffvarianten für formschlüssige Verbindungen

Zustand bei 20 °C	fest						flüssig
Aktivierungsprinzip	Thermoplastifizieren				Lösen		-
Auftragszustand	fest			flüssig	fest		flüssig
Aufmachung	Fasern	Pulver	Flächen	Schmelze	Fasern	Flächen	Flüssigkeit

Eine adhäsive Verfestigung erreicht man durch Einbringen fester oder flüssiger Bindemittel in die zu stabilisierende Struktur, die damit verklebt wird. Die üblicherweise als feste Binder eingesetzten Pulver, Klebeflächen (wie etwa Klebefolien und -vliese) und Klebefasern werden als Schmelzkleber oder Hot-Melts bezeichnet [KEMPER, 1996 [123], BUNDI, 2003 [65]]. Schmelzkleber können darüber hinaus im flüssigen Zustand aufgebracht werden. Als Werkstoffe für diese Bindemittel kommen alle thermoplastischen Polymere wie etwa Polyester, Polyethylen oder Polypropylen in Frage. Weiterhin können auch Polymere verwendet werden, die eine Löslichkeit in bestimmten Medien aufweisen und sich auf diese Weise aktivieren lassen. Jedoch ist die Verwendung von Wasser oder anderen Lösungsmitteln nicht zur Integration in eine Nähwirkmaschine geeignet, da die verfahrenstechnischen Anforderungen ungünstiger als bei der Verarbeitung von Thermoplasten sind [HAUSDING, 2008 [15]]. Aus diesem Grund wird dieses Aktivierungsprinzip nicht weiter verfolgt.

Flüssige Bindemittel wie Dispersionen oder Lösungen werden nach verschiedenen Verfahren der Beschichtungstechnik aufgebracht. Die Verfestigung erfolgt je nach Polymer auf unterschiedlichen Wegen. Grundsätzlich lassen sich durch adhäsive Methoden Strukturen unabhängig von Faserstoff und Flächengebildestruktur verfestigen. Eine ausführlichere Vorstellung der genannten Werkstoffvarianten unter Berücksichtigung ihrer Eignung für die Verwendung im Nähwirkprozess findet sich in HAUSDING, 2008 [15].

Aus dem Lösungsprinzip Stoffschluss mit Bindemitteln ergeben sich folgende präzisierte Teilaufgaben:

- für Varianten 1a-1 bis 1a-4:
 - o Bindemittel zu Fäden zuführen in Form von Fasern, Schmelzen, flüssigen/viskosen Massen,
 - o Bindemittel aktivieren,
 - o Bindemittel fixieren.

Eine Übersicht möglicher Lösungsvarianten zeigen Tabelle 33 und Tabelle 34. Aufgrund der großen Anzahl an Varianten ist es nötig, bereits in diesem frühen Stadium das Lösungsfeld deutlich zu reduzieren. Alle Lösungen mit Widersprüchen zur Anforderungsliste oder mangelnden Erfolgsaussichten werden nicht weiter verfolgt. Dabei stützt sich die Bewertung der

Erfolgsaussichten auf eine Untersuchung von HAUSDING, 2008 [15] zu einer ähnlichen Fragestellung, nämlich der maschinenintegrierten Fixierung von Nähwirkstoffen.

Tabelle 33: Lösungsvarianten für das Prinzip Stoffschluss mit Bindemitteln, Teil 1

Eintrag	Aufmachung	Varianten	Auswahl	Anmerkung
vor der Legung	Fasern	Verwendung von Zweikomponentenfasern [221][241]	nein	Beschränkung auf bestimmten Fasertyp widerspricht Anforderungen
		Herstellung von Hybridgarn [225][227][240][243][246]	nein	Beschränkung auf bestimmte Fadenaufmachung widerspricht Anforderungen
		Fertigung einer UD-Lage unter Verwendung von Klebefäden zur Stabilisierung [224][226][242]	ja, mit Einschränkung	durch aktiv verfolgtes Schutzrecht [236] für bestimmte Fasermaterialien derzeit nicht verfügbar, nicht für Gitter geeignet
	Pulver	Fäden mit Pulver beschichten und nach der Legung aktivieren [238]	nein	Abrieb der Beschichtung an den Fadenführern zu erwarten
		Fertigung einer UD-Lage unter Verwendung eines Klebepulvers [235]	nein	Haftung der Kettfäden aneinander fraglich, nicht für Gitter geeignet
	Flächen	Fertigung einer UD-Lage durch Fixieren mittels einer Klebefläche [236]	nein	zu hoher Bindemittelanteil
	Schmelze	Fäden mit Schmelzkleber beschichten, der nach der Legung aktiviert wird [222][241]	nein	zu hoher Aufwand, Eignung für Weiterverarbeitung fraglich
		Fertigung einer UD-Lage durch Fixieren mittels einer Schmelze [236]	nein	zu hoher Bindemittelanteil
	Flüssigkeit	Fertigung einer UD-Lage durch Fixieren mit einer Bindeflüssigkeit	ja, mit Einschränkung	durch aktiv verfolgtes Schutzrecht [236] für bestimmte Fasermaterialien derzeit nicht verfügbar, nicht für Gitter geeignet
		Fäden mit Bindeflüssigkeit beschichten und im Gelege aktivieren	nein	zu hoher Aufwand, Eignung für Weiterverarbeitung fraglich

Tabelle 34: Lösungsvarianten für das Prinzip Stoffschluss mit Bindemitteln, Teil 2

Eintrag	Aufmachung	Varianten	Auswahl	Begründung für Ausschluss
bei der Legung	Fasern	parallele Zuführung von Bindefäden oder Foliebändchen (Fachen)	nein	zu hoher Bindemittelanteil
		Ablage von Klebefäden mittels eines Schusslegers vor der Eintragstelle der Kettfäden	ja	
	Pulver	Pulverauftrag auf die vorgelegte Schussfadenlage oder die eingetragene Kettfadenlage	nein	Auftragsverfahren nicht für offene Nähwirkstoffe geeignet
	Flächen	Zuführung eines Schmelzklebers in Flächenform mit anschließender Aktivierung [223][233][234][245]	nein	zu hoher Bindemittelanteil
	Schmelze/ Flüssigkeit	vollflächiger Auftrag auf die Kettfäden	nein	zu hoher Bindemittelanteil
		vollflächiger Auftrag auf die vorgelegte Schussfadenlage	nein	zu hoher Bindemittelanteil
		linienförmiger Auftrag entlang der Kettfäden	nein	zu hoher Bindemittelanteil
		linienförmiger Auftrag auf die vorgelegte Schussfadenlage	ja	
		punktförmiger Auftrag auf die Kettfäden	ja	
			punktförmiger Auftrag auf die vorgelegte Schussfadenlage	ja
nach der Legung	Fasern	Ablage von Klebefäden mittels eines Schusslegers nach der Eintragstelle der Kettfäden	nein	insbesondere vor Diagonallegern zu großer Abstand zwischen Eintragungspunkt und Fixierung
	Pulver	Pulverauftrag auf die Kettfadenlage zur Verbindung mit nachfolgender Schussfadenlage	nein	Auftragsverfahren nicht für offene Nähwirkstoffe geeignet
	Flächen	Zuführung eines Schmelzklebers in Flächenform mit anschließender Aktivierung [223][233][234][245]	nein	zu hoher Bindemittelanteil
	Schmelze/ Flüssigkeit	vollflächiger Auftrag [247]	nein	zu hoher Bindemittelanteil
		linienförmiger Auftrag [239] auf die Kettfäden	nein	insbesondere vor Diagonallegern zu großer Abstand zwischen Eintragungspunkt und Fixierung
		punktförmiger Auftrag auf die Kettfäden	nein	insbesondere vor Diagonallegern zu großer Abstand zwischen Eintragungspunkt und Fixierung

Die weiter zu verfolgenden Lösungsvarianten lassen sich wie folgt einteilen:

- maschinenexterne Herstellung einer einaxialen Fadenlage bevorzugt durch einen geringen Anteil an Schmelzklebefasern oder Bindeflüssigkeit
- Zuführung von Schmelzklebern in Faserform mit der vorgelegten Schussfadenlage
- linien- oder punktförmiger Auftrag von Schmelzen oder Flüssigkeiten auf die vorgelegte Schussfadenlage
- punktförmiger Auftrag von Schmelzen oder Flüssigkeiten auf die Kettfadenlage

Mit der Lösungsvariante der Zuführung vorfixierter Fadenlagen steht eine einfach in den Prozess zu integrierende Möglichkeit der Einbindung einer Zwischenkette zur Verfügung, insbesondere da in diesem Fall der Aufwand für die Speicherung und Zuführung einer großen Schar einzelner Kettfäden entfallen kann. Die vorfixierte Fadenlage kann als Rollenware vergleichsweise einfach zwischen den Schussfadenlegern zugeführt werden. Diese Lösungsvariante ist jedoch nicht für gitterförmige Nähwirkstoffe geeignet. Zudem existiert derzeit ein Schutzrecht [236], welches die Nutzung dieser Lösung insbesondere für Fadenlagen aus ausgebreiteten Carbonfilamentgarnen, aber auch anderen Faserstoffen, in vielen Staaten noch bis 2018 (vorbehaltlich der Aufrechterhaltung durch den Inhaber) einschränkt. Diese Lösung wird darum zwar weiter verfolgt, kann aber nicht für alle Anwendungsfälle zum Einsatz kommen.

Die Zuführung von Schmelzklebefasern kann unter Nutzung der vorhandenen Zuführbeziehungsweise Legeeinrichtungen erfolgen. Neue Fragestellungen ergeben sich daher insbesondere für die Aktivierung dieser Schmelzklebefasern sowie für Verfahren zum punkt- oder linienförmigen Auftrag von Schmelzen und Flüssigkeiten. Während Schmelzklebefasern und thermoplastische Schmelzen nach der Aktivierung durch Abkühlung automatisch fixiert werden, sind für die Bindeflüssigkeiten auch Fixiermethoden zu bestimmen.

7.5.3.4 Lösungen für die Aktivierung thermoplastischer Bindefasern

Es existiert eine Vielzahl industrietauglicher Verfahren zum Aufschmelzen thermoplastischer Bindemittel (siehe Tabelle 35). Nicht alle sind jedoch gleichermaßen für fadenförmige Bindemittel in dem hier zu betrachtenden Zusammenhang geeignet. Auf Basis der Auswertung der angegebenen Literatur werden für die weitere Lösungsentwicklung das Thermofusionsverfahren, also die Kombination aus Wärmeleitung und Druck, sowie die Erwärmung mittels Infrarotstrahlung in Betracht gezogen.

Tabelle 35: Lösungsvarianten für die Aktivierung thermoplastischer Bindemittel

thermisches Prinzip	Auswahl	Anmerkung
1.1 Wärmeübertragung		
1.1.1 Konvektion [179]	-	hoher Energieverbrauch in Verbindung mit Druck
1.1.2 Leitung [1], [58]	+	
1.1.3 Strahlung		nicht vollflächig
1.1.3.1 Laser [58], [121]	-	
1.1.3.2 Infrarot [18], [179]	+	
1.2 Wärmeerzeugung		
1.2.1 innere Reibung		nicht vollflächig verarbeitbare Materialien eingeschränkt
1.2.1.1 mechanisch (Ultraschall) [128], [59]	-	
1.2.1.2 elektrisch (Hochfrequenz) [59], [179]	-	

7.5.3.5 Auftrag und Fixierung von Schmelzen und Bindeflüssigkeiten

Für den Auftrag schmelzflüssiger Thermoplaste ist eine Vielzahl an Verfahren bekannt, von denen einige für den hier vorgesehenen Anwendungszweck in Frage kommen können (Tabelle 36). Durch intermittierenden Auftrag aus einer Breitschlitzdüse kann ein Schmelzkleber streifenförmig quer auf die Schussfäden aufgetragen werden [286]. Diese Variante ist allerdings nicht für den Auftrag auf gitterförmige Fadenlagen-Nähwirkstoffe geeignet. Dies gilt ebenso für den Tiefdruck mit Gravurwalzen. Dabei wird die Schmelze auf eine mit Vertiefungen versehene Walze aufgetragen und so abgestreift, dass der Klebstoff nur in den Vertiefungen verbleibt [46]. Von dort wird er dann zum Beispiel linienförmig auf die Kett- oder Schussfäden aufgetragen. Theoretisch könnten durch unterschiedliche Walzengeometrien auch unterschiedliche gitterförmige Gelegegeometrien beschichtet werden, die erforderliche große Walzenanzahl und die nicht exakt regelmäßige Schussverlegung beim nicht maschengerechten Schusseintrag schließen dies jedoch praktisch aus.

Tabelle 36: Lösungsvarianten für den Auftrag von Schmelzen und Bindeflüssigkeiten

Auftragsprinzip	Anwendung	Auswahl	Anmerkung
- Schmelze			
o Breitschlitzdüsenauftrag (intermittierend) [286]	quer auf Schuss	(+)	nicht für Gitter
o Spinnprühverfahren [99], [285]	kreisförmig auf Schuss	-	ungünstige Binderverteilung, nicht für Gitter
o Tiefdruck mit Gravurwalze [46]	quer auf Schuss/Kette	(+)	nicht für Gitter
o Raupenauftrag [102]	quer auf Schuss	-	Auftragsmenge zu hoch nicht für Gitter
o Fadenauftrag [258]	quer/längs auf Schuss	(+)	
o Punktdüsenauftrag [295]	Punkte auf Schuss/Kette	+	
- Bindeflüssigkeit			
o Sprühauftrag [13]	quer auf Schuss	+	nicht für Gitter
o Rotationssiebdruck [252]	Punkte auf Schuss/Kette	(+)	
o Düsenauftrag [271], [299]	Punkte auf Schuss/Kette	+	

Mit dem Düsenauftrag ist auch der punktförmige Schmelzeauftrag auf die Kett- oder Schussfäden möglich [295]. Beim Fadenauftrag wird der Schmelzkleber fadenförmig und parallel auf die Schusslage aufgetragen. Für den Auftrag auf Gitter ist auch bei diesem Verfahren für jede Gittergeometrie eine neue, angepasste Auftragseinrichtung nötig [258]. Das Spinnprühverfahren ([99], [285]) und der Raupenauftrag [102] scheiden wegen der Auftragsmengen und der Bindemittelverteilung aus.

Bindeflüssigkeiten können beispielsweise durch Rotationssiebdruck mustergemäß quer auf die Schussfäden oder auf die Kettfäden aufgebracht werden [252]. Ein Auftrag auf gitterförmige Nähwirkstoffe scheidet jedoch ebenso wie beim Gravurwalzenauftrag aus. Durch intermittierenden Sprühauftrag kann ein streifenförmiges Kleberbild auf der Schussfadenlage realisiert werden [13]. Beim Düsenauftrag kann die Bindeflüssigkeit fein verteilt und punktförmig auf die Kett- oder die Schussfäden aufgebracht werden, bei gitterförmigen Nähwirkstoffen müssen jedoch das Gittermaß und der Abstand sowie die Anzahl der Auftragsdüsen aufeinander abgestimmt werden ([271], [299]).

Der Vorteil der Schmelzkleber gegenüber den Bindeflüssigkeiten liegt insbesondere darin begründet, dass nach dem Eintrag keine zusätzliche Fixierung benötigt wird und somit der Aufwand und der Platzbedarf geringer sind. Für die Fixierung werden in Abhängigkeit des verwendeten Materials folgende Prinzipien angewendet:

- Verdunsten oder Verdampfen von Lösungsmitteln (Wärmezufuhr),
- Gelieren (Wärmezufuhr),
- Vernetzen (Wärmezufuhr oder UV-Strahlung),
- Koagulieren (im Bad).

7.5.3.6 Abgeleitete Lösungsvarianten für Verbindungsprinzip Stoffschluss mit Bindemitteln

Eine kurze Zusammenfassung der Lösungen zum Verbindungsprinzip Stoffschluss mit Bindemitteln bietet Tabelle 37. Es ist ersichtlich, dass abhängig vom Lösungsprinzip (mit Ausnahme der Verwendung vorfixierter Kettfadenlagen) ein bis zwei Arbeitsschritte in den Flächenbildungsprozess integriert werden müssen. Dabei bietet die Anzahl der Arbeitsschritte jedoch noch keinen Anhaltspunkt für den tatsächlichen Realisierungsaufwand. Dieser wird im Rahmen der Variantenbewertung (Kapitel 7.5.4) betrachtet.

Tabelle 37: Übersicht Lösungsvarianten Stoffschluss mit Bindemitteln

Lösungsprinzip	Bindemittel zuführen	Bindemittel aktivieren	Bindemittel fixieren
vorfixierte Kettfadenlage	-	-	-
Klebefaser	Schussleger	Heizwalze Infrarot	-
Schmelze	Breitschlitzdüse Gravurwalze Düse (Fadenauftrag) Düse (Punktauftrag)	-	-
Flüssigkeit	Sprühauftrag Rotationssiebdruck Düse (Punktauftrag)	-	Wärme

7.5.3.7 Lösungen für eine mechanische Verbindung mit Zusatzelementen

Die Verbindungsprinzipien Kraft- und Formschluss mit Zusatzelementen werden hier gemeinsam betrachtet, da es bei den textiltypischen Verbindungen häufig zu Überlagerungen der beiden Mechanismen kommt. Grundsätzlich können die zusätzlichen Bindeelemente folgende Form aufweisen:

- punktförmig,
- linien- beziehungsweise fadenförmig oder
- flächenförmig.

Punktförmige Verbindungselemente können zum Beispiel in Form einer Heftklammer oder eines Nietes in das Gelege eingetragen werden. Fadenlagen, die derartige Elemente enthalten, sind jedoch nicht mehr zur Weiterverarbeitung im Nähwirkprozess geeignet (HAUSDING, 2008 [15]). Bei der Verwendung fadenförmiger Verbindungen kann die Fixierung sowohl maschinenextern als auch beim Ablegen der Kettfadenschar erfolgen. Im ersten Fall können vorvernähte einaxiale Nähwirkstoffe oder einaxiale Gewebe zum Einsatz kommen. Diese Variante ist allerdings nicht für die Herstellung gitterförmiger Nähwirkstoffe geeignet. Im zweiten Fall erfolgt das Vernähen bei der Kettfadenablage. Der Aufwand für eine derartige Lösung kann aber als zu groß für eine praktische Realisierung eingeschätzt werden. Die flächige Fixierung auf einer Trägerfläche kommt auf Grund des resultierenden hohen Fremdstoffanteils ebenfalls nicht in Betracht.

7.5.4 Variantenbewertung

7.5.4.1 Übersicht der Lösungsvarianten und Bewertungskriterien

Zusammenfassend zeigt Tabelle 38 eine Übersicht der in den vorangegangenen Kapiteln entwickelten Lösungsvarianten.

Tabelle 38: Variantenübersicht

Variante	Beschreibung
B1	vorfixierte Kettfadenlage (Nähwirkstoff oder stoffschlüssig gebundenes Gelege)
C1	Klebefaser, Eintrag über Schussleger, thermische Aktivierung
D1	Schmelzauftrag, Breitschlitzdüse
D2	Schmelzauftrag, Gravurwalze
D3	Schmelzauftrag, Düse für Fadenauftrag
D4	Schmelzauftrag, Düse für Punktauftrag
E1	Bindeflüssigkeit, Sprühauftrag, thermische Fixierung
E2	Bindeflüssigkeit, Rotationssiebdruck, thermische Fixierung
E3	Bindeflüssigkeit, Düse für Punktauftrag, thermische Fixierung

Die Kriterien, nach denen die Bewertung dieser Lösungen durchgeführt wird, resultieren aus den Soll-Bedingungen der Anforderungsliste. Tabelle 39 zeigt die Bewertungskriterien mit ihrer Gewichtung. Dabei gibt der Wert g die Gewichtung innerhalb einer Klasse von Kriterien an und der Wert g_{ges} die Bedeutung dieses Kriteriums gegenüber allen anderen. Die Kennzahl g_{ges} eines Zieles errechnet sich aus dem jeweiligen Wert für g , multipliziert mit dem Wert g_{ges} der übergeordneten Kategorie.

Tabelle 39: Bewertungskriterien

Kategorie	g	g_{ges}	Ziele	g	g_{ges}
1 Geometrie	0,05	0,05	1.1 geringer Platzbedarf	1	0,05
2 Stoff	0,5	0,5	2.1 sichere Fixierung der Zwischenkette	0,3	0,15
			2.2 schädigungsarme Verarbeitung	0,1	0,05
			2.3 Eignung für gitterförmige Nähwirkstoffe	0,2	0,1
			2.4 geringe Veränderung Biegesteifigkeit	0,1	0,05
			2.5 Eignung für Einsatz mit Kunststoffmatrix	0,2	0,1
			2.6 Eignung für Einsatz mit Betonmatrix	0,1	0,05
3 Bedienung	0,2	0,2	3.1 nachrüstbar für bestehende Maschinen	0,2	0,04
			3.2 einfache, ergonomische Bedienung	0,3	0,06
			3.3 wartungsarm	0,3	0,06
			3.4 geringer Reinigungsbedarf	0,2	0,04
4 Wirtschaftlichkeit	0,25	0,25	4.1 geringe Investitionskosten	0,3	0,075
			4.2 geringer Energieverbrauch	0,4	0,1
			4.3 geringe Materialkosten	0,3	0,075
Summe		1			1

Die Bewertungskriterien sind in vier Kategorien eingeteilt und betreffen die räumlichen, stofflichen, wirtschaftlichen und bedientechnischen Anforderungen. Die auf den Stoff, also das eigentliche Produkt bezogenen Kriterien beschreiben die Funktionserfüllung und erhalten, auch wegen ihrer Anzahl, eine Gewichtung von 50 Prozent. Bedienung und Wirtschaft-

lichkeit sind entscheidende Kriterien für die Akzeptanz im praktischen Einsatz und werden gemeinsam mit 45 Prozent gewichtet. Als Kategorie mit nur einer Zielgröße entfallen die restlichen 5 Prozent auf die Anforderung nach geringem Platzbedarf der jeweiligen Lösung.

Die Bewertung der Lösungsvarianten erfolgt anhand eines Punktsystems mit einer Skala von 0 (unbefriedigend) über 1 (schlecht), 2 (mäßig), 3 (gut) bis 4 (sehr gut). Die maximale Punktzahl erhält jeweils die beste Variante im Vergleich. Zur Ermittlung der besten Variante pro Kriterium wird eine Dominanzmatrix verwendet (siehe Kapitel 10.7.1). Die Vergabe der Punktzahl an die schlechteren Varianten erfolgt dann anhand der Punkteskala, wobei die Punktzahl entsprechend den Gewichtungsfaktoren aus Tabelle 39 gewertet wird. Für diesen Arbeitsschritt wird eine Bewertungsliste herangezogen, wie sie in Tabelle 40 für eine (hypothetische) Ideallösung dargestellt ist.

Tabelle 40: Bewertungsliste für Ideallösung

Bewertungskriterien		Eigenschaft	Bewertung		
Nr.	Gew.		Eigenschaft	Wert	gew.
1.1	0,05	Platzbedarf	gering	4	0,2
2.1	0,15	Fixierwirkung	hoch	4	0,6
2.2	0,05	Schädigung	gering	4	0,2
2.3	0,1	Gitterherstellung	möglich	4	0,4
2.4	0,05	Biegesteifigkeit	gering	4	0,2
2.5	0,1	Eignung für Kunststoffmatrix	hoch	4	0,4
2.6	0,05	Eignung für Betonmatrix	hoch	4	0,2
3.1	0,04	Nachrüstbarkeit	gegeben	4	0,16
3.2	0,06	Bedienung	einfach	4	0,24
3.3	0,06	Wartung	einfach	4	0,24
3.4	0,04	Reinigungsbedarf	gering	4	0,16
4.1	0,075	Investitionskosten	gering	4	0,3
4.2	0,1	Energieverbrauch	gering	4	0,4
4.3	0,075	Materialkosten	gering	4	0,3
Summe:				56	4

7.5.4.2 Bewertungsergebnisse und Schwachstellenanalyse

Die Durchführung der Bewertung im Detail kann im Anhang (Kapitel 10.7) nachvollzogen werden. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse zeigt Tabelle 41. Zu sehen sind die summierten gewichteten Ergebnisse jeder Lösung und deren Wertigkeit verglichen mit einer idealen Lösung mit voller Punktzahl. Vier Varianten liegen bei einer Erfüllung der Anforderungen von über 50 Prozent:

- der Einsatz vorfixierter Kettfadenlagen (B1),
- der Eintrag von Klebefasern mit den Schusslegern und anschließendem Aufschmelzen, (C1)
- der punktweise Auftrag einer thermoplastischen Schmelze (D4),
- der punktweise Auftrag einer Bindeflüssigkeit mit anschließender thermischer Fixierung (E3).

Diese Varianten sollen mittels Schwachstellenanalyse näher beleuchtet werden, um eine geeignete Vorzugsvariante auswählen zu können. Auf die Abbildung der der Bewertung zugrundeliegenden Wertprofile wird aus Platzgründen verzichtet, da die entsprechenden Kennzahlen auch der Bewertungsliste (Tabelle 41) entnommen werden können.

Die günstigste und einfachste Lösung stellt für viele Anwendungsfälle die Verwendung vorgefertigter Kettfadenlagen dar (B1). Sie sollte dann zum Einsatz kommen, wenn vollflächig gearbeitet wird und die herzustellenden Produkte beziehungsweise verwendeten Fasermaterialien nicht durch Schutzrechte blockiert sind. Eine derartige Zuführung kann prinzipiell auch in bestehenden Anlagen nachgerüstet werden. Es wird jedoch eingeschätzt, dass mit diesem Verfahren, in Abhängigkeit von der gewählten Bindemethode und der Anzahl an Kettfadenlagen, die Biegesteifigkeit des Endprodukts stärker steigt als bei den anderen Varianten. Weiterhin lassen sich auf diesem Wege keine Gitter zur Beton- und Spritzgussverstärkung herstellen.

Tabelle 41: Ergebnisse der Variantenbewertung

Lösung	gewichtete Werte für Kategorien														Summe	Wertigkeit
	1.1	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	3.1	3.2	3.3	3.4	4.1	4.2	4.3		
B1	0,2	0,6	0,2	0	0	0,4	0	0,16	0,24	0,24	0,16	0,3	0,4	0,08	2,98	0,74
C1	0,15	0,15	0,2	0,2	0,15	0,1	0,1	0,08	0,18	0,18	0,12	0,23	0,3	0,15	2,29	0,57
D1	0,1	0,45	0,2	0	0,05	0,1	0	0,08	0,06	0,06	0,04	0,15	0,1	0,08	1,47	0,37
D2	0,1	0,45	0,2	0	0,1	0,1	0	0,08	0,06	0,06	0,04	0,15	0,1	0,15	1,59	0,40
D3	0,1	0,45	0,2	0	0	0,1	0	0,08	0,06	0,06	0,04	0,15	0,1	0,08	1,42	0,35
D4	0,1	0,45	0,2	0,4	0,15	0,1	0,1	0,12	0,06	0,06	0,04	0	0,1	0,15	2,03	0,51
E1	0	0,45	0,2	0,4	0,05	0,1	0,15	0,04	0,06	0,06	0,04	0,08	0,1	0,15	1,88	0,47
E2	0	0,45	0,2	0	0,1	0,1	0	0,04	0,06	0,06	0,04	0,08	0,2	0,15	1,48	0,37
E3	0	0,45	0,2	0,4	0,15	0,1	0,15	0,04	0,06	0,06	0,04	0	0,2	0,15	2	0,50

Die Variante C1, Fixierung durch vom Schussleger zugeführte Klebefasern, ist, was die Zuführung des Bindemittels betrifft, mit der vorhandenen Maschinenteknik ohne weiteres umzusetzen. Erforderlich ist jedoch eine thermische Aktivierung, vorzugsweise mittels

Infrarotstrahler oder Heizwalzen, die zusätzlichen Einbauraum benötigen. Diese Variante kann nicht eingesetzt werden, wenn im Endprodukt keine thermoplastischen Binderanteile enthalten sein sollen. Kritisch eingeschätzt werden muss allerdings die Erfüllung des maßgebenden Kriteriums der Fixierwirkung. Untersuchungen von CHERIF ET AL., 2007 [250] zur Vorkonsolidierung von gitterförmigen Nähwirkstoffen für die Spritzgussverstärkung zeigen eine Fixierwirkung durch eine derartige Verbindungsvariante gemeinsam mit dem Wirkfaden. Eine alleinige sichere Verbindung durch den Schmelzklebefaden ist jedoch fraglich, da dieser aufgrund des Fadeneintrags nicht kontinuierlich auf, sondern teilweise auch unter oder zwischen der Schussfadenlage abgelegt wird. In Weiterentwicklung dieser Lösung ist eine separate Eintragsvorrichtung für die Schmelzklebefäden unmittelbar vor der Kettfadeneintragsstelle einzusetzen, um die Klebefäden auf der Schussfadenlage zu positionieren. Dadurch verbessert sich die Fixierwirkung bei gleichzeitiger Verschlechterung der Eignung für Gitter und des Platzbedarfs beziehungsweise Realisierungsaufwands. Es wird eingeschätzt, dass eine derartige Lösung dem Auftrag von schmelzflüssigen Klebern nach Variante D4 vorzuziehen ist.

Die Lösungen D4 und E3 unterscheiden sich im Wesentlichen durch das verwendete Bindemittel. Ist die Verwendung von thermoplastischen Bindemitteln im Endprodukt unkritisch, so bietet die Verwendung eines Schmelzklebers den Vorteil eines geringeren Einbauraums, da keine nachträgliche Fixierung notwendig ist. Beide Lösungen erfordern jedoch die Zufuhr von Wärmeenergie entweder zur Aktivierung oder Fixierung des Bindemittels. Weiterhin sind beide Varianten grundsätzlich auch für die Fixierung von gitterförmigen Kettfadenlagen geeignet. Durch den Einzeldüsenauftrag bedingen sie jedoch einen vergleichsweise hohen Investitions- und Umsetzungsaufwand.

Es ist ersichtlich, dass keine allgemeingültige Lösung für die vorliegende Problemstellung gefunden wird, die bei geringem Aufwand und Kosten gleichermaßen für alle Anwendungszwecke geeignet ist. Insbesondere die Forderung, auf einer Anlage sowohl klassische geschlossene als auch offene, gitterförmige Gelege herzustellen, bereitet Schwierigkeiten, da viele der untersuchten Varianten gerade nicht für die Gitterherstellung geeignet sind. Auf Grund des Marktpotenzials gitterförmiger Nähwirkstoffe für die Beton- und Spritzgussverstärkung sollte die Herstellung derselben auf jeder Nähwirkanlage möglich sein. Deshalb werden zwei Lösungsvarianten weitergeführt, von denen die erste für die meisten und die zweite für alle Anwendungsfälle geeignet ist. Die erste Variante umfasst die Maximalkonfiguration nach Kapitel 6.7, jedoch erfolgt die Zuführung von Zwischenketten nur zu geschlossenen, nicht zu gitterförmigen Nähwirkstoffen. Die vollständige Maximalkonfiguration soll auch die Zuführung von Zwischenketten zu gitterförmigen Nähwirkstoffen ermöglichen.

Werden dementsprechend die Kriterien Eignung für Gitter (2.3) und Eignung für Betonmatrix (2.6) aus der Auswertung nach Tabelle 41 gestrichen, so ergibt sich ein abweichendes Ergebnis für die besten Lösungsvarianten. Neben der Zuführung vorfixierter Kettfadenlagen als Vorzugsvariante mit den oben benannten Einschränkungen können jetzt auch der Auftrag mittels Gravurwalze beziehungsweise Rotationssiebdruck betrachtet werden. Aufgrund der

in vielen Endanwendungen kritischen Zugabe zusätzlicher Bindematerialien muss die Auswahl entsprechend des Endprodukts getroffen werden. Hier soll aufgrund der größeren Bindemittelauswahl die Variante Rotationssiebdruck weiterverfolgt werden. Ist die Verwendung thermoplastischer Bindemittel unkritisch, so sollte Variante C1 aufgrund des geringeren Platzbedarfs und der einfacheren Realisierung der Vorrang eingeräumt werden.

Für die Zuführung einer gitterförmigen Zwischenkette muss der Auftrag punktförmig erfolgen. Auch hier soll unter den genannten Voraussetzungen auf Bindeflüssigkeiten anstelle von Schmelzkleber zurückgegriffen werden.

7.5.5 Vorzugslösungen

7.5.5.1 *Maximalkonfiguration*

Die Vorzugslösung für eine Nähwirkmaschine mit variabler Lagenanordnung in einer Maximalkonfiguration umfasst Zuführeinrichtungen für je eine Kettfadenschusslage auf beiden Außenseiten des Nähwirkstoffs, für sechs Schussfadenschusslagen und für zwei Kettfadenschusslagen, die zwischen den Schussfäden angeordnet werden können. Die Zuführung der Unterkette erfolgt entsprechend des Ansatzes aus Kapitel 7.4.1 von der Vorder- beziehungsweise Legerseite der Nähwirkmaschine unter der Maschine entlang. Die Oberkette wird über die Wirkstelle hinweg von der Rückseite (Wicklerseite) der Maschine zugeführt. Die Lösung für die Zuführung der Zwischenketten von einem Podest ist in Kapitel 7.4.3 beschrieben. An den Eintragungspunkten der Zwischenkette ist die Fixiereinrichtung angeordnet. Diese besteht aus einer Siebdruckwalze mit gegengelagerter Andruckwalze unmittelbar vor der Eintragungstelle des Kettfadens. Die Siebdruckwalze bringt ein Bindemittelmuster entsprechend Bild 147 auf, das durch die gleichmäßige Verteilung der Bindepunkte lokale Erhöhungen der Biegesteifigkeit im Nähwirkstoff reduzieren soll. Die Kettfäden werden über Umlenkrollen und teilungsgerechte Fadenführer auf die Schussfadenschusslage aufgebracht und leicht an die mit dem Bindemittel versehene Schussfadenschusslage angeedrückt. Das Bindemittel wird dann in der sich anschließenden Heizzone fixiert.

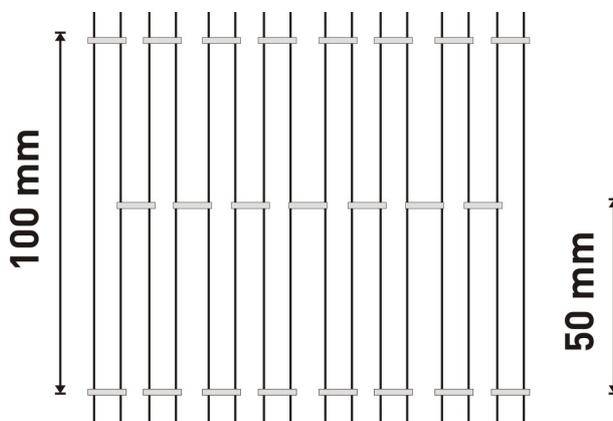


Bild 147: Auftragsmuster zur Fixierung der Zwischenkette auf den Schussfäden

Als Bindemittel soll hier beispielhaft Epoxid zum Einsatz kommen, das in vielen Endanwendungen ein typisches Matrixmaterial darstellt. Wärmeaushärtende Epoxide haben eine vergleichsweise lange Härtedauer ab etwa 45 Sekunden, üblicherweise aber weit darüber, die für schnell laufende Prozesse mit geringem Platzbedarf wie hier nur bedingt geeignet sind [292]. Demgegenüber lassen sich mit UV-härtenden Epoxiden Härtungsdauern zwischen einer und zehn Sekunden realisieren [293]. Dazu muss das Bindemittel ultraviolettem Licht aus einer speziellen Lichtquelle ausgesetzt werden. Da sich das Bindemittel hier jedoch zwischen zwei Fadenlagen befindet, deren UV-Durchlässigkeit nicht als gegeben vorausgesetzt werden kann, muss diese Form der Binderfixierung verworfen werden.

Eine dritte Möglichkeit besteht in der Verwendung wässriger Epoxid dispersionen. Untersuchungen von NOATZSCH, 2009 [284] zur Fixierung von Beschichtungen auf Basis von Epoxid-Dispersionen *online* in der Nähwirkmaschine zeigen, dass eine Wärmeeinwirkung mittels Infrarotstrahlung (170 °C) über eine Länge von 100 Zentimetern eine sichere Fixierung des Beschichtungsmittels gewährleistet. Davon ausgehend wird eine Infrarotheizeinrichtung von 100 Zentimetern Länge nach der Eintragstelle der Kettfäden angeordnet (Bild 148). Diese Heizeinrichtung ist versetzbar, so dass sie bei Änderung der Gelegekonfiguration auch an einer der anderen Eintragsstellen zum Einsatz kommen kann. Insgesamt führt diese Fixiervariante zur Verlängerung der Nähwirkmaschine um etwa acht Meter gegenüber der Verwendung vorfixierter Kettfadenlagen und etwa fünf Meter gegenüber der Verwendung von Gravurwalzen.

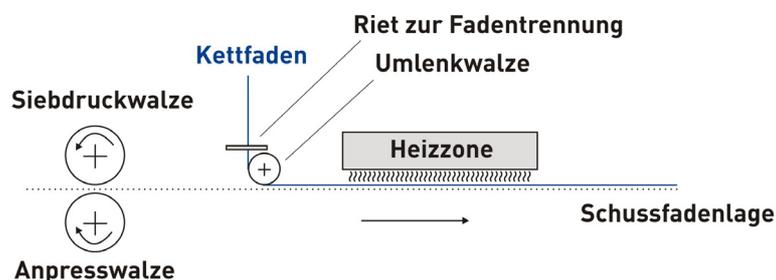


Bild 148: Fixiereinrichtung

Bei der auch für die Gitterherstellung geeigneten Variante wird die Siebdruckeinrichtung durch eine Vielzahl an Auftragsdüsen ersetzt, die das Bindemittel auf die Kettfäden auftragen. Ein Sensor signalisiert der Auftragseinrichtung die Abstände zwischen den Schussfäden, so dass aufgrund der gleichen Geschwindigkeiten von Schussfadenlage und Kettfäden das Bindemittel gezielt auf die Bindepunkte von Kett- und Schussfäden aufgetragen werden kann (Bild 149).

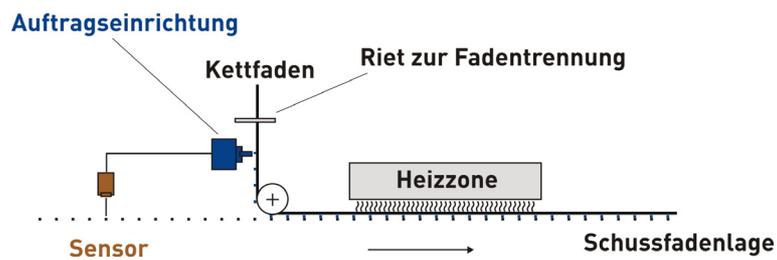


Bild 149: Fixiereinrichtung für Punktauftrag

7.5.5.2 Standard- und Minimalkonfiguration

Die Standard- (Bild 150) und die Minimalkonfiguration (Bild 151) einer Nähwirkmaschine mit variabler Lagenanordnung können aus der beschriebenen Maximallösung durch Weglassen der Zwischenkettzuführung beziehungsweise zusätzlicher Reduktion der Schusslegeranzahl abgeleitet werden. Die Lösungen für die Zuführung der Unterkette werden entsprechend übernommen.

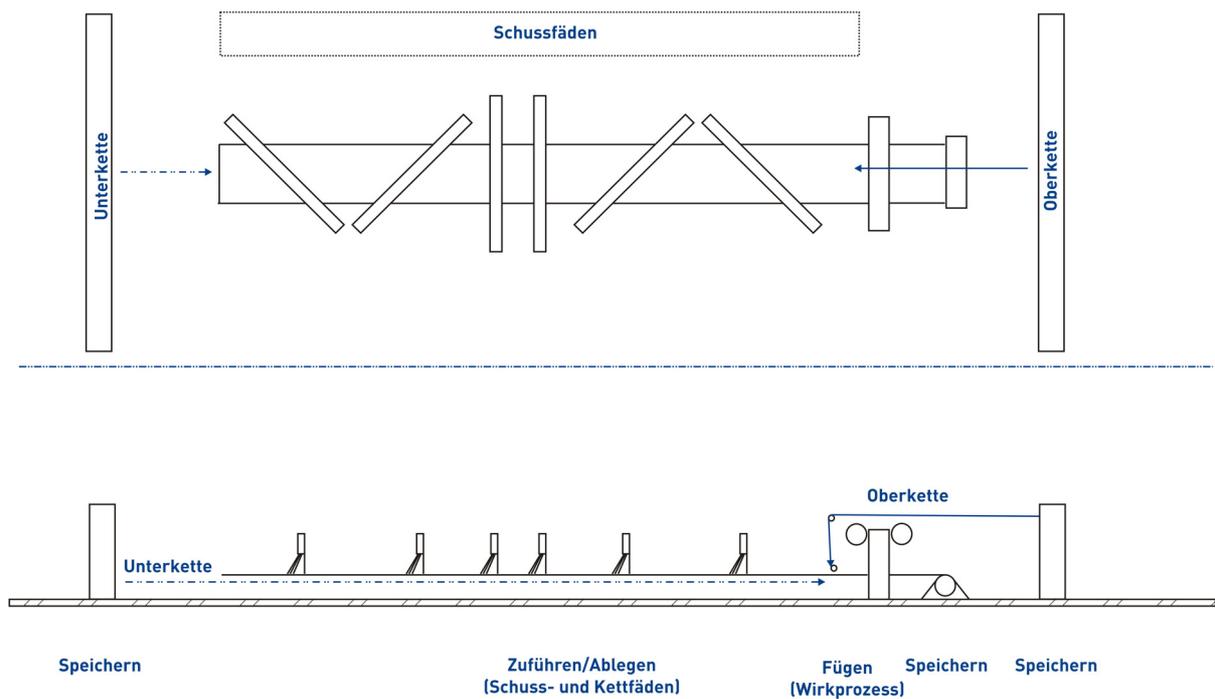


Bild 150: Nähwirkmaschine mit variabler Lagenanordnung in der Standardkonfiguration

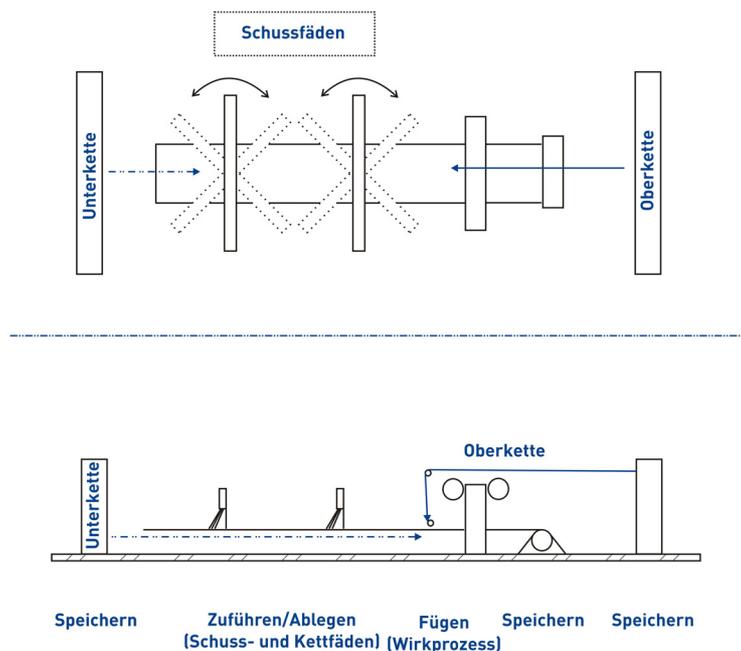


Bild 151: Nähwirkmaschine mit variabler Lagenanordnung in der Minimalconfiguration

7.6 Teilfunktion Fügen

7.6.1 Teilaufgabe Verhinderung unzulässiger Nadelverformungen

In dem bei der Prototypmaschine verfügbaren Drehzahlbereich bis 500 min^{-1} und den realisierbaren Versatzweiten wurden bei den durchgeführten Versuchen keine unzulässigen Nadelverformungen beobachtet. Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass ähnliche Verformungen wie beim Technologie-Demonstrator auch in einer Nähwirkmaschine zu beobachten sein werden, wenn die Drehzahl gesteigert wird. Größere Versatzweiten als zwei sollten, wie bisher schon, zum Erhalt der Produktivität vermieden werden. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle kurz auf die Vermeidung unzulässiger Nadelverformungen eingegangen. Dazu sind zunächst die Faktoren zu ermitteln, die die Verformung der Nadel beeinflussen. Der Sachverhalt wird zunächst einmal wie folgt vereinfacht: Betrachtet wird nur die durch die Kraft F_y (Bild 152) hervorgerufene Verformung der Schiebernadel. Ein Biegemoment um die y -Achse besteht nicht, da der Nadelkopf auf der Abschlagplatte aufliegt. Wird allein die durch die Kraft F_y verursachte Biegebeanspruchung betrachtet, so lässt sich die mit der Nadelbarre fest verbundene Schiebernadel auf den Fall eines einseitig eingespannten Trägers reduzieren (Bild 152). Der Querschnitt des Trägers sei als konstant, die auftretenden Verformungen als gering angenommen.

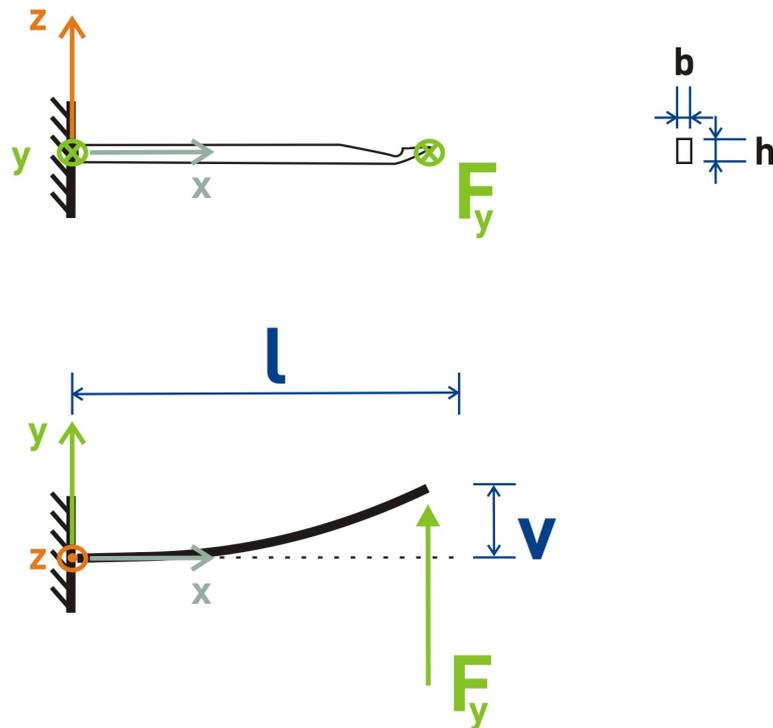


Bild 152: vereinfachte Betrachtung der Verformung der Schiebernadel

Für den einseitig eingespannten Träger ergibt sich die maximale Verschiebung im Kraftangriffspunkt v_F nach LINKE, 1999 [279] zu:

$$v_F = \frac{Fl^3}{3EI_z}$$

Gleichung 13

Die Verformung der Nadel lässt sich demnach reduzieren:

- a) durch Verringerung des Produktes aus Kraft F und Kraftarm l ,
 - i indem der Betrag der angreifenden Kraft verringert wird,
 - ii indem der Kraftarm verkürzt wird (größerer Einfluss durch Potenz),
- b) durch Vergrößerung des Produktes aus Elastizitätsmodul E und Flächenträgheitsmoment I ,
 - i indem ein anderer Werkstoff mit einem größeren Elastizitätsmodul verwendet wird,
 - ii indem ein Querschnitt mit größerem Flächenträgheitsmoment verwendet wird

oder durch die Kombination mehrerer dieser Maßnahmen.

Die einfachste Eingriffsmöglichkeit bietet die Variation der Fadenzugkraft. Diese setzt sich zusammen aus der Bremskraft des Kettbaums und der Reibkraft, verursacht durch die Fadenführungselemente. Im Versuch (Kapitel 6.4.1) konnte gezeigt werden, dass sich durch Anpassung der Fadeneinlauflänge die Fadenzugkraft unter günstigen Umständen um bis zu 75 Prozent reduzieren lässt. Für die Prozesssicherheit ist jedoch eine Mindestfadenzugkraft nötig. In Abhängigkeit von der Bindung und dem verwendeten Wirkfadenmaterial schränkt sich die Variation der Fadeneinlauflänge deutlich ein. Dennoch ist diese Maßnahme zunächst vordringlich anzuwenden, da sie keine Eingriffe in die Maschine erfordert.

Weiterhin ist es denkbar, eine temporäre Reduktion der Fadenzugkraft zu dem Zeitpunkt vorzunehmen, in dem die Nadelbarre seitwärts versetzt wird. Dies muss in Abhängigkeit von der Maschinendrehzahl bis zu zwanzig Mal pro Sekunde erfolgen. Dazu kann beispielsweise auf Lösungen aus dem Bereich der Hochleistungskettenwirkautomaten zurückgegriffen werden, etwa durch die Verwendung von Elastan-Kettfadenbremsen (YOUNES, 2006 [300]).

Die Länge l des Kraftarms ist abhängig von der freien Länge der Nadel ab der Einspannung in die Nadelbarre. Deshalb kommen prinzipiell zwei Möglichkeiten in Betracht, diese Länge zu verringern: die Verkürzung der Nadel oder die Einführung eines zusätzlichen Lagers nahe dem Nadelkopf. Der Spielraum zur Verkürzung der Nadel ist prinzipiell gering, da deren Länge durch den notwendigerweise zu realisierenden Nadelhub bedingt ist. Eine deutliche Verkürzung der Nadel erfordert daher eine Anpassung der gesamten Nähwirkstelle einschließlich einer Begrenzung der maximal möglichen Dicke des Nähwirkstoffs. Dies widerspricht der Tendenz, bei Einsatz des erweiterten Wirkprozesses eine größere Anzahl an Fadenlagen zu verarbeiten und kann deshalb nicht realisiert werden. Die Gestaltungsmöglichkeiten für ein zusätzliches Lager der Nadel werden im folgenden Abschnitt bei der Wirkstelle betrachtet.

Grundsätzlich einfacher zu realisieren als die temporäre Reduktion der Fadenzugkraft ist die Anpassung der Nadel, da auf diesem Weg keine Veränderungen an der Maschine selbst vorgenommen werden müssen. Im industriellen Einsatz sind unterschiedliche Nadelkonfigurationen für verschiedene Einsatzzwecke und Belastungen verbreitet. Da eine deutliche Steigerung oder gar Verdopplung des E-Moduls der eingesetzten Werkstoffe nicht realistisch ist, liegt der Lösungsansatz in der Anpassung des Nadelquerschnitts. Wird dieser vereinfachend als rechteckig angenommen, so führt eine moderate Verdickung der Nadel um 25 Prozent bereits zu einer Verdopplung des Flächenträgheitsmoments. Allerdings sind damit auch eine Erhöhung der Masse und eine Verringerung der Nadelzwischenräume verbunden.

7.6.2 Teilaufgabe Führen an der Wirkstelle

Zur Umsetzung der variablen Lagenanordnung muss die Wirkstelle insbesondere um zwei Aspekte erweitert werden: Es sind geeignete Zuführelemente für die Kettfäden auf der Unterseite vorzusehen und gleichzeitig ist sicherzustellen, dass es durch den seitlichen Versatz der Schiebernadeln nicht zu Verschiebungen der Fadenlagen kommt. Bei der Um-

setzung des Prototyps für den erweiterten Wirkprozess ist es nötig gewesen, die Abschlagplatinenbarre gemeinsam mit Schiebernadel und Schließdraht zu versetzen. Dies garantiert eine schnelle Versatzbewegung, da die Schiebernadeln keine zusätzliche Bewegung um die Abschlagplatinen durchführen müssen. Gleichzeitig führt diese Lösung jedoch auch dazu, dass die Kettfäden auf der Unterseite während der seitlichen Versatzbewegung nicht gegen Beeinflussungen durch den im Nadelhaken befindlichen Wirkfaden geschützt sind. Aus diesem Grund wird die Wirkstelle um eine kombinierte Kettfadenführungs- und Gegenhalteplatte ergänzt, die die Abschlagplatte ersetzt und die keine Versatzbewegung ausführt (Bild 153).

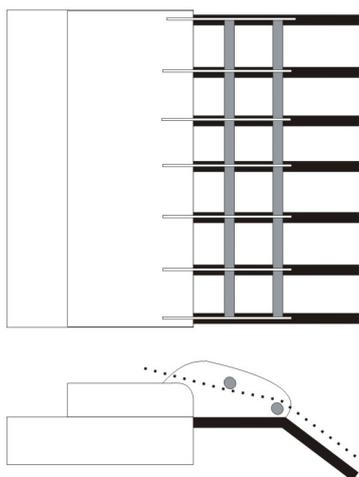


Bild 153: kombinierte Kettfadenführungs- und Gegenhalteplatte

Diese Kombiplatine besteht aus dem Führungsteil für die Kettfäden der Unterkette und aus Gegenhaltestiften entsprechend denen, die auch bisher schon auf der Lochnadelseite eingesetzt werden. Diese erfüllen auch dieselbe Funktion: Sie halten bei der Rückwärtsbewegung der Nadel die Fadenlagen zurück und verhindern ein seitliches Verschieben der Unterkette durch Aufnahme der Wirkfadenquerkräfte. Durch die schlankere Ausführung gegenüber der bisherigen Abschlagplatte wird der Nadelhub nur geringfügig vergrößert.

Bild 154 zeigt die Seitenansicht der überarbeiteten Wirkstelle. Zur Abstützung der neuen Kombiplatine und der Schiebernadeln dient eine ebenfalls neu eingeführte Stützschiene. Zur Verhinderung von unzulässigen Nadelverformungen kann, falls benötigt, zusätzlich eine seitlich versetzbare Stützschiene für die Schiebernadel eingesetzt werden. Diese weist für jede Schiebernadel eine Führungsrille auf, deren Abmessungen etwas größer als die der Schiebernadel sind, um eine weitgehend reibungsfreie Nadelhubbewegung zu ermöglichen. Gleichzeitig ist die Größe der Führungsrille so eng, dass bei der seitlichen Versatzbewegung eine Stützung der Nadel gegen unzulässige Biegeverformung gewährleistet wird. Bei Wirkfadenbindungen oder Maschinengeschwindigkeiten, die keine seitliche Stützung der Nadel erfordern, kann diese Stützschiene entfernt werden.

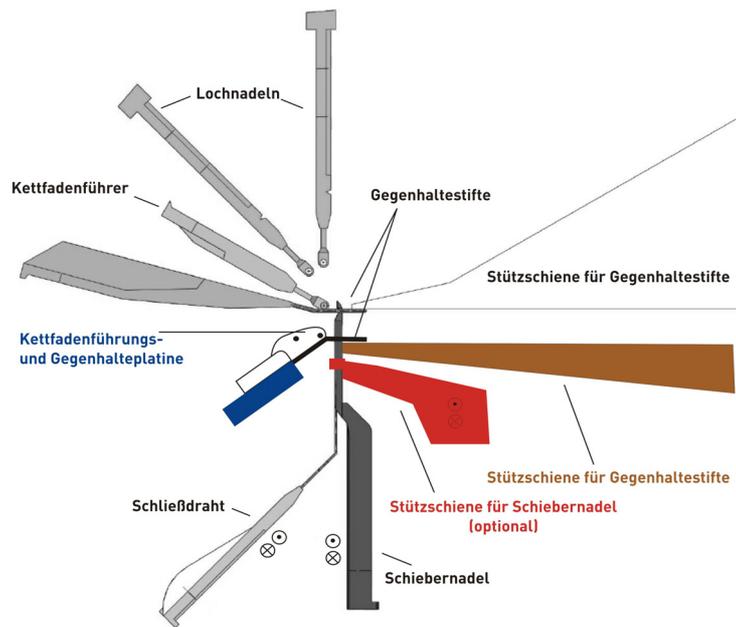


Bild 154: Wirkstelle für den erweiterten Wirkprozess an Nähwirkmaschinen (grau: bestehende Elemente, farbig: neue Wirkelemente)

8 Zusammenfassung und Perspektive

Mit der Entwicklung des erweiterten Wirkprozesses ist eine wichtige Modifikation der Herstelltechnologie von Nähwirkstoffen realisiert worden. Durch die Einführung einer seitlich verschiebbaren Nadelbarre wird der Wirkprozess gegenüber der seit langem etablierten Arbeitsweise grundlegend verändert. Den Kern dieser Arbeit bildet deshalb die methodische Entwicklung der daraus resultierenden neuen Bindungsvarianten, die Modellbildung zur Beschreibung dieser Bindungen und deren Anwendung.

Die eingeführte Neuerung erfordert die Anpassung der bisher üblichen Darstellungsweise von Wirkbindungen. Die Beschreibung der erweiterten Wirkbindungen kann aufbauend auf den klassischen numerischen und grafischen Darstellungen (Legungsplan und Legungsbild) erfolgen. Für die numerische Angabe der Nadelbarrenbewegung im Legungsplan für die Maschinensteuerung wird eine zusätzliche Zahlenfolge eingeführt, die in ihrer Darstellungsweise auf der Angabe der Legebarrenbewegung beruht. Ein Wirkzyklus, beziehungsweise die Bildung einer Maschenreihe, wird durch zwei Zahlen gekennzeichnet, von denen die erste die Position der Nadelbarre vor dem Einschwingen der Fadenführer und die zweite die Position der Nadelbarre nach dem Ausschwingen der Fadenführer definiert. Diese Darstellung bietet eine einfache und eindeutige Beschreibung der Nadelbarrenbewegung.

Ist eine Modellierung der Bindung erforderlich, so stehen drei Varianten eines erweiterten Legungsbilds zur Verfügung. Anders als bei konventionellen Wirkbindungen ist es bei Bindungen nach dem erweiterten Wirkprozess nicht generell möglich, sowohl die Legebarrenbewegung als auch die Gestalt der Bindung gleichzeitig dem Legungsbild zu entnehmen. Nur bei Einsatz einer Grundbahn, mit der die Bindung fixiert wird, stimmt die Bewegung von Lege- und Nadelbarre mit dem Verlauf der Bindung überein. Deshalb zeigt das einfache Legungsbild für den erweiterten Wirkprozess nur die Bewegung der Legebarre und den Legungsplan als numerische Darstellung der Nadelbarrenbewegung. Durch Einführung von relativen Positionsnummern, welche die Stellung der Nadelbarre in jeder Maschenreihe kennzeichnen, kann das Legungsbild auf einfache Weise um diese relevante Information erweitert werden. Zur Darstellung des tatsächlichen Bindungsverlaufs müssen die relativen Positionsnummern wieder auf die Ausgangsstellung verschoben werden. Das Legungsbild mit verschobenen relativen Positionsnummern bietet dann eine realitätsnahe Abbildung der Bindung.

Mit diesen Darstellungsmethoden ist es möglich, alle Bindungen falls nötig auch mit mehreren Wirkfadensystemen zu entwickeln und exakt zu beschreiben. Als Ergänzung dazu wird ein Berechnungsverfahren vorgestellt, das es erlaubt, konventionelle und erweiterte Bindungen ineinander umzurechnen. Grundsätzlich kann für jede erweiterte Bindung, wenn sie für eine klassische Wirkware und nicht im Nähwirkprozess eingesetzt wird, eine Bindung nach dem konventionellen Verfahren gefunden werden, die einen äquivalenten Fadenverlauf im Textil aufweist.

Aufbauend auf diesen Grundlagen werden für die am häufigsten genutzten Grundbindungen die entsprechenden Bindungen in Kombination mit in Frage kommenden Nadelbarrenbewegungen entwickelt. In Bezug auf die nachfolgenden Anwendungsbeispiele wird betrachtet, welche erweiterten Bindungen in Kombination mit üblichen Konfigurationen von Fadenlagenanordnungen vorteilhaft eingesetzt werden können.

Als eine dieser Anwendungen wird der Einsatz von Nähwirkstoffen als textile Bewehrung für Beton untersucht. Hierbei ergeben sich aus den bekannten herstellungsbedingten Einschränkungen beim konventionellen Wirkprozess vielversprechende Einsatzmöglichkeiten für den erweiterten Wirkprozess. Durch die neuen Bindungsmöglichkeiten und die freie Lagenanordnung wird eine deutlich verbesserte Qualität der textilen Bewehrung erreicht, die ein nachweisbar günstigeres Verbundverhalten zeigt als die konventionelle Variante. Durch die sichere Verhinderung von Abplatzungen an der Betonoberfläche bei Gebrauchslast wird eine wichtige Voraussetzung für den praktischen Einsatz textiler Betonbewehrungen geschaffen.

Die Untersuchungen an thermoplastischen Mehrlagenverbunden aus GF/PP-Hybridgarn zeigen deutlich, dass durch die Verwendung des erweiterten Wirkprozesses aus der Lagenanordnung resultierende Eigenspannungen im Bauteil zuverlässig zu vermeiden sind. Weiterhin werden Verbesserungen sowohl der Zugfestigkeit und des E-Moduls als auch der Schlagzähigkeit im Verbund erreicht. Die Anwendung einer maschengerechten Einbindung der Schuss- und Kettfäden führt in Verbindung mit dem erweiterten Nähwirkprozess beim Einsatz geeigneter Bindungen, bei denen alle benachbarten Maschenstäbchen miteinander verbunden sind, zu einer sehr guten Drapierbarkeit bei praxisgerechter Handhabbarkeit.

Die Notwendigkeit der Verwendung des erweiterten Wirkprozesses zur Herstellung von textilen Halbzeugen für Faser-Kunststoff-Verbunde und Textilbeton ergibt sich insbesondere aus der Möglichkeit, symmetrische Nähwirkstoffe zur unmittelbaren Verwendung ohne weitere Schichtungs- oder Fügeschritte herstellen zu können. Soll der Nähwirkstoff eine mindestens vieraxiale Ausrichtung der Fadenlagen aufweisen, so bedingt dies die Verwendung von wenigstens fünf (Mittellagensymmetrie) oder sechs (echte Symmetrie) Schussfadenlegern in der Nähwirkmaschine sowie die Zuführung einer unteren und einer oberen Kettfadenlage. Der Stand der Technik erlaubt die Entwicklung derartiger Nähwirkmaschinen mit vertretbarem Aufwand. Ist die Verwendung von vorfixierten Kettfadenlagen möglich, können zusätzlich ohne größere Schwierigkeiten Kettfadenlagen auch zwischen den Schussfadenlagen angeordnet werden. Die entwickelten Lösungen für eine vollkommen variable Lagenanordnung mit Zwischenkettfadenlagen aus Einzelfäden ermöglichen die Fertigung anforderungsgerechter textiler Halbzeuge für ein sehr breites Anwendungsspektrum in nur einem Prozessschritt. Erstmals sind auf diesem Wege auch einaxiale textile Halbzeuge ohne Längenbegrenzung herstellbar.

Bei Einschränkung der Produktpalette auf die Fertigung gitterförmiger Bewehrungen, insbesondere für Beton, genügt prinzipiell eine 90°-Schussfadenlage zwischen zwei Kettfadenlagen. Zur Abdeckung fast aller für Bauanwendungen relevanten Textilkonfigurationen

wird jedoch eine Nähwirkmaschine mit zwei verstellbaren Schusslegern und der Zuführung einer unteren und einer oberen Kettfadenlage empfohlen, bei der die Schussfäden zumindest in 90°-Richtung, möglichst aber auch diagonal teilungsgerecht eingetragen werden können. Eine solche Maschinenkonzeption wäre der erste und auch naheliegende Schritt zur Einführung des erweiterten Wirkprozesses in den industriellen Einsatz, da hierbei die produktbezogenen Vorteile am deutlichsten darstellbar sind und bereits mit der Prototyp-Nähwirkmaschine eine akzeptable Produktivität sichergestellt werden kann. Gleichzeitig können so auch erste Anwendungsbereiche aus dem Gebiet der Faser-Kunststoff-Verbunde erschlossen werden. Ein solches Präzedenz würde die Einführung von Maschinenkonzepten für vieraxiale symmetrische Nähwirkstoffe vorbereiten. Eine wesentliche Bedingung für deren Einsatz liegt dabei in der Annäherung der möglichen Produktivität des erweiterten Wirkprozesses an die des konventionellen Prozesses. Angesichts der Vorteile betreffend die Produktqualität und die mögliche Ersparnis nachfolgender Prozessschritte sind moderate Produktivitätseinbußen jedoch durchaus akzeptabel.

Eine bedeutende allgemeine Voraussetzung für die Verbreiterung des Einsatzes der Nähwirktechnologie, ob nach dem konventionellen oder nach dem erweiterten Verfahren, stellt die Erweiterung des Wissensstandes zum Einfluss der Nähwirkparameter auf das Endprodukt Faser-Kunststoff-Verbund dar. Wie die Analyse der umfangreichen zu diesem Thema vorhandenen Literatur zeigt, fehlt bisher ein allgemeingültiger, umfassender Ansatz zur Beschreibung dieses Einflusses und insbesondere zu dessen Vorhersage, ohne dass für jeden Spezialfall auf aufwändige Experimente zurückgegriffen werden muss. Für den erweiterten Nähwirkprozess gilt es in diesem Zusammenhang, die Anwendungsbeispiele auf weitere Faser-Matrix-Kombinationen auszudehnen und dabei bestehende Serienprodukte als Endanwendung mit den verbesserten Möglichkeiten zur Lagenanordnung und Bindung neu zu konzipieren.

9 Literatur

Zur übersichtlicheren Darstellung sind alle Literaturstellen alphabetisch in die folgenden Bereiche eingeordnet:

- Eigenständige Werke (Bücher, Dissertationen),
- Zeitschriftenartikel und Tagungsbeiträge,
- Normen und Schutzrechte,
- sonstige Literatur (Firmenschriften, Webseiten, Forschungsberichte, Studienarbeiten).

9.1 *Eigenständige Werke*

- [1] ABDKADER, A.: *Charakterisierung und Modellierung der Eigenschaften von AR-Glasfilamentgarnen für die Betonbewehrung*. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2004
- [2] ALBRECHT, W.; FUCHS, H.; KITTELMANN, W. (HRSG.): *Vliesstoffe*. Weinheim : Wiley-VCH, 2000
- [3] ALTENBACH, H.; ALTENBACH, J.; RIKARDS, R.: *Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke*. Stuttgart : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1996
- [4] ALTENBACH, H.; NAUMENKO, K.; ALTENBACH, J.: *Ebene Flächentragwerke: Grundlagen der Modellierung und Berechnung von Scheiben und Platten*. Berlin : Springer, 2007
- [5] BISCHOFF, T.: *Verwirkte Textilien zur Bewehrung von zementgebundenen Matrices*. Dissertation. RWTH Aachen, 2000
- [6] BOBETH, W.: *Textile Faserstoffe*. Berlin : Springer, 1992
- [7] BRAMESHUBER, W. (HRSG.): *Textile Reinforced Concrete*. Bagnex : RILEM Publications, 2006
- [8] BÜSGEN, A.: *Neue Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen Textilien für den Einsatz in Faserverbundwerkstoffen*. Dissertation. RWTH Aachen, 1993
- [9] CEBULLA, H.: *Formgerechte zwei- und dreidimensionale Mehrlagengestricke mit biaxialer Verstärkung*. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2004
- [10] CURBACH, M.; Jesse, F. (HRSG.): *Textilbeton – Theorie und Praxis*. Dresden : Technische Universität Dresden, 2009
- [11] EHRENSTEIN, G.: *Faserverbund-Kunststoffe*. München : Hanser, 2006
- [12] FELTIN, D.: *Entwicklung von textilen Halbzeugen für Faserverbunde unter Verwendung von Stickautomaten*. Dissertation. Technische Universität Dresden, 1998
- [13] GIESSMANN, A.: *Substrat und Textilbeschichtung*. Berlin : Springer, 2002
- [14] GUDE, M.: *Zum nichtlinearen Deformationsverhalten multistabiler Mehrschichtverbunde mit unsymmetrischem Strukturaufbau*. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2000
- [15] HAUSDING, J.: *Multiaxialgelege auf Basis der Kettenwirktechnik – Möglichkeiten der maschinenintegrierten Verfestigung*. Saarbrücken : VDM-Verlag, 2008

- [16] HOFFMANN, G.: *Entwicklung eines Nähwirkverfahrens zur Herstellung von Vlies-Nähgewirken mit beidseitiger Maschenstruktur*. Dissertation. Technische Universität Dresden, 1987
- [17] JESSE, F.: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2004
- [18] KÖCKRITZ, U.: *In-Situ Polymerbeschichtung zur Strukturstabilisierung offener nähgewirkter Gelege*. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2007
- [19] KOLKMANN, A.: *Methoden zur Verbesserung des inneren und äußeren Verbundes technischer Garne zur Bewehrung zementgebundener Matrices*. Dissertation. RWTH Aachen, 2008
- [20] KRÜGER, M.: *Vorgespannter textilbewehrter Beton*. Dissertation. Universität Stuttgart, 2004
- [21] LEOPOLD, T.: *Beitrag zur Entwicklung textiler Halbzeuge für Faserverbundwerkstoffe unter Berücksichtigung moderner Fertigungsverfahren*. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2005
- [22] MCINTYRE, J. E.; DANIELS, P. N. (HRSG.): *Textile Terms and Definitions*. Manchester : The Textile Institute, 1995
- [23] MICHAELI, W.; HUYBRECHTS, D.; WEGENER, M.: *Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen*. München : Hanser, 1994
- [24] MOLTER, M.: *Zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton*. Dissertation. RWTH Aachen, 2005
- [25] NEITZEL, M.; MITSCHANG, P.: *Handbuch Verbundwerkstoffe*. München : Hanser, 2004
- [26] OFFERMANN, P.; WÜNSCH, I.; FINKELMEYER, S.: *Verfahren und Maschinen der Textiltechnik – Bindungen und Musterungen der Strickerei und Wirkerei*. Dresden : Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Arbeitsgruppe Fernstudium, 1998
- [27] ORAWATTANASRIKUL, S.: *Experimentelle Analyse der Scherdeformation biaxial verstärkter Mehrlagengestricke*. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2006
- [28] ORTLEPP, R.: *Untersuchungen zur Verbundverankerung textilbewehrter Feinbetonverstärkungsschichten für Betonbauteile*. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2007
- [29] PLOCH, S.; BÖTTCHER, P.; SCHARCH, D.: *Malimo-Nähwirktechnologie*. Leipzig : Fachbuchverlag, 1978
- [30] PUCK, A.: *Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten*. München : Hanser, 1996
- [31] RAZ, S.: *Warp knitting production*. Heidelberg : Melliand, 1987
- [32] RENZ, R.; FLECKEISEN, M.: *Bindungslehre der Ketten- und Nähwirkerei*. Leipzig : Fachbuchverlag, 1980
- [33] SCHÜRMAN, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Heidelberg : Springer, 2007
- [34] SPENCER, D. J.: *Knitting technology*. Cambridge : Woodhead, 2001
- [35] STOCKMANN, P.: *Textile Strukturen zur Bewehrung zementgebundener Matrices*. Dissertation. RWTH Aachen, 2002
- [36] WEBER, K. P.; WEBER, M.: *Wirkerei und Strickerei*. Frankfurt/M. : Fachverlag, 2004
- [37] WILKENS, CH.: *Bindungslehre der Kettenwirkerei*. Heusenstamm : Wilkens, 1993

- [38] WULFHORST, B.: *Textile Fertigungsverfahren*. München : Hanser, 1998
- [39] WÜNSCH, I.: *Wirkerei und Strickerei*. Frankfurt/M. : Deutscher Fachverlag, 2008
- [40] ZEPF, H.: *Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix*. Renningen-Malmsheim : Expert, 1997

9.2 Zeitschriftenartikel und Tagungsbeiträge

- [41] ABBASI, A.; HOGG, P.: Temperature and environmental effects on glass fibre rebar: modulus, strength and interfacial bond strength with concrete. In: *Composites: Part B*, 36 (2005), S. 394-404
- [42] AKER, R.: Die neue Crossply-Technik. In: *Technische Textilien*, 42 (1999), 4, S. 272-274
- [43] ANAND, S.: Fast and flexible fabrics, Part I. In: *Knitting International*, 110 (2003), 1309, S. 49-52
- [44] ANAND, S.: Fast and flexible fabrics, Part II. In: *Knitting International*, 110 (2003), 1310, S. 16-25
- [45] ANONYM: Vliesstoffe auf Wirkmaschinen. In: *Allgemeiner Vliesstoff-Report*, 31 (2003), 1, S. 45-47
- [46] ANONYM: Hotmelt-Auftragsverfahren. In: *Allgemeiner Vliesstoff-Report*, 31 (2003), 4, S. 42-43
- [47] ANONYM: Mechanische Vliesstoffherzeugung und -verarbeitung durch Maschenbildung. In: *Allgemeiner Vliesstoff-Report*, 31 (2003), 6, S. 23-24
- [48] ANONYM: Dreherweben – Leicht und schnell. In: *Dornier Insider*, 2003, 13, S. 12-13
- [49] ANONYM: Nähwirkmaschinen Malimo – technische und technologische Möglichkeiten. Teil 1, Maliwatt und Malivlies. In: *Kettenwirk-Praxis*, 28 (1994), 1, S. 13-24
- [50] ANONYM: Nähwirkmaschinen Malimo – technische und technologische Möglichkeiten. Teil 2, Kunit und Multiknit. In: *Kettenwirk-Praxis*, 28 (1994), 1, S. 13-24
- [51] ANONYM: Nähwirkmaschinen Malimo – technische und technologische Möglichkeiten. Teil 4, Malipol und Voltex. In: *Kettenwirk-Praxis*, 28 (1994), 3, S. 9-16
- [52] ANONYM: Technische Textilien – von welcher Kettenwirk- und Nähwirkmaschine. In: *Kettenwirk-Praxis*, 31 (1997), 2, S. 51-57
- [53] ANONYM: Maliwatt + Malivlies neu konzipiert. In: *Kettenwirk-Praxis*, 32 (1998), 3, S. 13-17
- [54] ANONYM: Technische Kunstwerke – Rotorblätter aus Multiaxial-Gelegen. In: *Kettenwirk-Praxis*, 37 (2003), 1, S. 28-30
- [55] AYMERICH, F.; ONNIS, R.; PRIOLO, P.: Analysis of the fracture behaviour of a stitched single-lap joint. In: *Composites: Part A*, 36 (2005), S. 603-614
- [56] AYMERICH, F.; PANI, C.; PRIOLO, P.: Effect of stitching on the low-velocity impact response of $[0_3/90_3]_s$ graphite/epoxy laminates. In: *Composites: Part A*, 68 (2007), S. 1174-1182
- [57] BAR-YOSEPH, P.; BEN-DAVID, D.: Free-edge effects in unsymmetrically laminated composite plates. In: *Composite Structures*, 30 (1995), S. 13-23
- [58] BÄCKMANN, R.: Indirekte Schweißtechniken für Filtertextilien (Teil 2). In: *Textilveredlung*, 38 (2003), 3-4, S. 20-22

- [59] BÄCKMANN, R.: Direkte Schweißtechniken – Ultraschall und Hochfrequenz (Teil 3). In: *Textilveredlung*, 38 (2003), 5-6, S. 20-23
- [60] BHASKAR, K.; KAUSHIK, B.: Analysis of clamped unsymmetric cross-ply rectangular plates by superposition of simple exact double Fourier series solutions. In: *Composite Structures*, 68 (2005), S. 303-307
- [61] BIBO, G.; HOGG, P.; KEMP, M.: Mechanical characterisation of glass- and carbon-fibre-reinforced composites made with non-crimp fabrics. In: *Composite Science and Technology*, 57 (1997), S. 1221-1241
- [62] BIBO, G.; HOGG, P.; BACKHOUSE, R.; MILLS, A.: Carbon-fibre non-crimp fabric laminates for cost-effective damage-tolerant structures. In: *Composite Science and Technology*, 58 (1998), S. 129-143
- [63] BISCHOFF, T.; WULFHORST, B.: Textilbewehrte Betonrohre. In: *Bauen mit Textilien*, 1 (1998), 1, S. 14-16
- [64] BRANDT, J.; DRECHSLER, K.; FILSINGER, J.: Innovative Textiltechniken zur kostengünstigen Herstellung von Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffen. Konferenz-Einzelbericht: *5. Dresdner Textiltagung*. Dresden, 2000
- [65] BUNDI, C.: Die Wirkung von Klebefasern in Vliesstoffen. In: *Industrial Fabrics Bulletin*, 13 (2003), 1, S. 40-43
- [66] BYUN, J. ET AL: Impact properties of laminated composites stitched with z-fibers. Konferenz-Einzelbericht: *ICCM 15*. Durban, 2005
- [67] CARTIÉ, D.; TROULIS, M.; PARTRIDGE, I.: Delamination of Z-pinned carbon fibre reinforced laminates. In: *Composites Science and Technology*, 66 (2006), S. 855-861
- [68] CASADEI, P.; NANNI, A.; ALKHRDAJI, T.: Steel-reinforced polymer. In: *Concrete Engineering International*, 9 (2005), 1, S. 54-56
- [69] CEBULLA, H.; DIESTEL, O.; OFFERMANN, P.: Fully fashioned biaxial weft knitted fabrics. Konferenz-Einzelbericht: *World Congress: Knitting for the 21st Century*. Manchester, 2002
- [70] CHAALLAL, O.; BENMOKRANE, B.: Fiber-reinforced plastic rebars for concrete applications. In: *Composites: Part B*, 27 (1996), S. 245-252
- [71] CHEN, L.; SANKAR, B.; IFJU, P.: A new mode I fracture test for composites with translaminar reinforcements. In: *Composite Science and Technology*, 62 (2002), S. 1407-1414
- [72] CHERIF, C.; WULFHORST, B.: Deformationsverhalten von multiaxialen Verstärkungstextilien für den Einsatz in Composites. In: *Technische Textilien*, 43 (2000), S. 58-60
- [73] CHO, M.; ROH, H.: Non-linear analysis of the curved shapes of unsymmetric laminates accounting for slippage effects. In: *Composites Science and Technology*, 63 (2003), S. 2265-2275
- [74] CHUDOBA, R.; VORECHOVSKÝ, M.; ECKERS, V.; GRIES, T.: Effect of Twist, Fineness, Loading Rate and Length on Tensile Behavior of Multifilament Yarns (A Multivariate Study). In: *Textile Research Journal*, 77 (2007), S. 880-891
- [75] CHUN, H.; KIM, H.; BYUN, J.: Effects of through-the-thickness stitches on the elastic behaviour of multi-axial warp knit fabric composites. In: *Composite Structures*, 74 (2006), S. 484-494

- [76] COHEN, Z.; PELED, A.; PASDER, Y.; ROYE, A.; GRIES, T.: Effects of warp knitted fabrics made from multifilament in cement-based composites. In: HEGGER, J. (HRSG.) *Textile Reinforced Concrete*, Bagneux : RILEM Publications, 2006, S. 23-34
- [77] CURBACH, M. ET AL.: Entwicklung einer großformatigen, dünnwandigen, textildbewehrten Fassadenplatte. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 98 (2003), 6, S. 345-350
- [78] CURBACH, M.; ORTLEPP, R.: Besonderheiten des Verbundverhaltens von Verstärkungsschichten aus textildbewehrtem Beton. In: CURBACH, M. (HRSG.) *Textile Reinforced Structures*, Dresden : Technische Universität, 2003, S. 361-374
- [79] CURBACH, M.; HEGGER, J.: Textildbewehrter Beton – Sonderbeitrag über die SFB 528 und 532. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 99 (2004), 6, S. 437-488
- [80] CURISKIS, J. I.; DURIE, A.; NICOLAIDIS, A.; HERSZBERG, I.: Developments in multiaxial weaving for advanced composite materials. Konferenz-Einzelbericht: *ICCM 11*. Gold Coast, 1997
- [81] DANO, M.; HYER, M.: Thermally-induced deformation behavior of unsymmetric laminates. In: *International Journal of Solids and Structures*, 35 (1998), S. 2101-2120
- [82] DANO, M.; HYER, M.: Snap-through of unsymmetric fiber-reinforced composite laminates. In: *International Journal of Solids and Structures*, 39 (2002), S. 175-198
- [83] DANO, M.; HYER, M.: SMA-induced snap-through of unsymmetric fiber-reinforced composite laminates. In: *International Journal of Solids and Structures*, 40 (2003), S. 5949-5972
- [84] DIESTEL, O.; OFFERMANN, P.: Bi- und multiaxiale verstärkte Mehrlagengestricke für Faserverbundwerkstoffe. Konferenz-Einzelbericht: *10. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e. V.* Dresden, 2004
- [85] DRANSFIELD, K.; JAIN, L.; MAI, Y.: On the effects of stitching in CFRPs – I. Mode I delamination toughness. In: *Composites Science and Technology*, 58 (1998), S. 815-827
- [86] DRAPIER, S.; PAGOT, A.; VAUTRIN, A.; HENRAT, P.: Influence of the stitching density on the transverse permeability of non-crimped new concept (NC2) multiaxial reinforcements: measurements and predictions. In: *Composites Science and Technology*, 62 (2002), S. 1979-1991
- [87] DU, G.; KO, F.: Analysis of multi-axial warp knit preforms for composite reinforcement. In: *Composites Science and Technology*, 56 (1996), S. 253-260
- [88] DUMOLARD, J.; SHIMELL, A.: The benefit of balance. In: *JEC Composites Magazine*, 2007, 35, S. 34
- [89] EBERTH, U.; HERRMANN, A.; MEYN, T.: Stringerversteifte Schalen in Textiltechnologie. Konferenz-Einzelbericht: *10. Chemnitzer Textilmaschinenntagung*. Chemnitz, 2005
- [90] ELBOUZZAQUI, O.; DRAPIER, S.; HENRAT, P.: An experimental assessment of the saturated transverse permeability on non-crimp new concept (NC2) multiaxial fabrics. In: *Journal of Composite Materials*, 39 (2005), 13, S. 1169-1193
- [91] ENGLER, T.; SCHIERZ, M.; FRANZKE, G.; OFFERMANN, P.: Standfest auch im Sturm durch Multiaxiale Gelege. In: *Kettenwirk-Praxis*, 36 (2002), 4, S. 22-23
- [92] ENGLER, T. ET AL.: Bewehrungs-Proben: Malimo-Textilien auf dem Verschleißprüfstand. In: *Kettenwirk-Praxis*, 38 (2004), 2, S. 17-20

- [93] FELTIN, D.; GLIESCHE, K.: TFP-Technologie - Vorteile in Leistung und Preis. Textile Strukturen für Faserverbundbauteile. In: *BW Technics* (2000), 2, S. 16-17
- [94] FRANZKE, G. ET AL.: Betonmastsanierung mit mehraxialen Gelegen aus alkaliresistentem Glas. In: *Bautechnik*, 79 (2002), 6, S. 368-374
- [95] FRANZKE, G. ET AL.: Bauen glasfaserleicht gemacht. In: *Kettenwirk-Praxis*, 37 (2003), 2, S. 20-22
- [96] FRIEDRICH, F.; HAUSDING, J.; FRANZKE, G.: Neue Perspektiven beim Nähwirken. Konferenz-Einzelbericht: *11. Chemnitzer Textiltechniktagung*. Chemnitz, 2007
- [97] FUJITA, A.; HAMADA, H.; MAEKAWA, Z.: Tensile properties of carbon fiber triaxial woven fabric composites. In: *Journal of Composite Materials*, 27 (1993), 15, S. 1427-1442
- [98] GIGLIOTTI, M.; JACQUEMIN, F.; VAUTRIN, A.: On the maximum curvatures of 0/90 plates under thermal stress. In: *Composite Structures*, 68 (2005), S. 177-184
- [99] GÖHLERT, R.: Verklebung von Vliesstoffen durch innovative Sprühauftragstechnik. In: *Allgemeiner Vliesstoff-Report*, 31 (2003), 2, S. 66-68
- [100] GRASSI, M.; ZHANG, X.; MEO, M.: Prediction of stiffness and stresses in z-fibre reinforced composite laminates. In: *Composites: Part A*. 33 (2002), S. 1653-1664
- [101] GRIFFITH, A. A.: The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 221 (1920), S. 163-198
- [102] GUDER, M.: Moderne Hotmelt-Auftragsverfahren. *Adhäsion. Kleben & Dichten*, 43 (1999), 1-2, S. 19-23
- [103] HANISCH, V.; KOLKMANN, A.; ROYE, A.; GRIES, T.: Influence of machine settings on mechanical performance of yarn and textile structures. In: HEGGER, J. (HRSG.) *Textile Reinforced Concrete*, Bagneux : RILEM Publications, 2006, S. 13-22
- [104] HAUSDING, J.; FRANZKE, G.; CHERIF, C.: Improved stitch bonded multi-ply for composites. Konferenz-Einzelbericht: *SAMPE 07*. Baltimore, 2007
- [105] HAUSDING, J.; WIDULLE, C.; PAUL, C.; CHERIF, C.: Manufacturing method for symmetric laminates from improved stitch-bonded multi-ply. Konferenz-Einzelbericht: *ECCM 13*. Stockholm, 2008
- [106] HEGGER, J.; WILL, N.; CURBACH, M.; JESSE, F.: Tragverhalten von textiltbewehrtem Beton. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 99 (2004), 6, S. 452-455
- [107] HENKEL, F.; GRIES, TH.: Reinforced plastics going up. In: *textile network*, 1 (2003), 1, S. 86-87
- [108] HERRMANN, A.; EBERTH, U.: Textilien für die Flugzeugstruktur – Stand der Technologie und Herausforderungen. Konferenz-Einzelbericht: *44. Internationale Chemiefasertagung*. Dornbirn, 2005
- [109] HERRMANN, A.; EBERTH, U.: Technische Textilien für Luftfahrt- und Fahrzeuganwendungen. In: KNECHT, P. (HRSG.) *Technische Textilien*, Frankfurt/Main : Deutscher Fachverlag, 2006, S. 337-352
- [110] HEß, H.; ROTH, Y.; HIMMEL, N.: Elastic constants estimation of stitched NCF CFRP laminates based on a finite element unit-cell model. In: *Composite Science and Technology*, 67 (2007), S. 1081-1095

- [111] HILEY, M.: Z-pinning and stitching of composites: A comparative study. Konferenz-Einzelbericht: *ICCM 15*. Durban, 2005
- [112] HUFENBACH, W.; GUDE, M.; CZULAK, A.: Actor-initiated snap-through of unsymmetric composites with multiple deformation states. In: *Journal of Materials Processing Technology*, 175 (2006), S. 225-230
- [113] HUFNAGL, E.; ARNOLD, R.; FUCHS, H.: Kunststoffverstärkung durch mehrlagige Multiaxialgewirke aus Kohlenstoff-Filamentgarn. In: *Technische Textilien*, 46 (2003), 3, S. 216-218
- [114] HUFNAGL, E.; ARNOLD, R.; RIDZEWSKI, J.; HÖNINGER, H.: Entwicklung innovativer Multiaxialgewirke zur Kunststoffverstärkung. Konferenz-Einzelbericht: *10. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e. V.* Dresden, 2004
- [115] HYER, M.: Some observations on the cured shape of thin unsymmetric laminates. In: *Journal of Composite Materials*, 15 (1981), S. 175-194
- [116] HYER, M.: Calculations of the room temperature shape of unsymmetric laminates. In: *Journal of Composite Materials*, 15 (1981), S. 296-310
- [117] HYER, M.: The room-temperature shapes of four-layer unsymmetric cross-ply laminate. In: *Journal of Composite Materials*, 16 (1982), S. 318-340
- [118] JAIN, L.; MAI, Y.: Determination of mode II delamination toughness of stitched laminated composites. In: *Composites Science and Technology*, 55 (1995), S. 241-253
- [119] JAIN, L.; DRANSFIELD, K.; MAI, Y.: On the effects of stitching in CFRPs – II. Mode II delamination toughness. In: *Composites Science and Technology*, 58 (1998), S. 829-837
- [120] KACHLAKEV, D.: Experimental and analytical study on unidirectional and off-axis GFRP rebars in concrete. In: *Composites: Part B*, 31 (2000), S. 569-575
- [121] KAGAN, V.: Polyamid kostengünstig fügen. In: *Kunststoffe*, 90 (2000), 9, S. 110-114
- [122] KATZ, A.; BERMAN, N.: Modeling the effect of high temperature on the bond of FRP reinforcing bars to concrete. In: *Cement & Concrete Composites*, 22 (2000), S. 433-443
- [123] KEMPER, P.: Hotmelteinsatz in der Textilindustrie. In: *Adhäsion. Kleben und Dichten*, 40 (1996), 12, S. 12-15
- [124] KEYSER, A.: Diagonale Fadengelege für technische Einsatzgebiete. In: *Mittex*, 110 (2003), 2, S. 12-13
- [125] KLEMM, B.: Neueste Vliesrascheltechnik aus Chemnitz. In: *Allgemeiner Vliesstoff-Report*, 29 (2001), 6, S. 39-40
- [126] KLEICKE, R. ET AL.: Dreherweben – Anknüpfen an alte Wurzeln mit neuer Technologie. In: *Melliand*, 88 (2007), 6, S. 423-425
- [127] KLEMM, B.: Modernes Bauen mit technischen Gewirken. In: *Technische Textilien*, 47 (2004), 1, S. 41-42
- [128] KNORRE, K.: Laminieren mit Ultraschall. In: *Vliesstoffe-Technische Textilien*, 47 (2001), 2, S. 51-54

- [129] KOLKMANN, A.; WULFHORST, B.: Garnstrukturen für den Einsatz in textilbewehrtem Beton. In: HEGGER, J. (HRSG.) *Textilbeton – 1. Fachkolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 und 532*, Aachen : RWTH Aachen, 2001, S. 35-44
- [130] KONG, H.; MOURITZ, A.; PATON, R.: Tensile extension properties and deformation mechanisms of multiaxial non-crimp fabrics. In: *Composite Structures*, 66 (2004), S. 249-259
- [131] KRÜGER, M.; REINHARD, H.: Vorgespannte Bauteile aus textilbewehrtem Beton. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 99 (2004), 6, S. 472-475
- [132] LAOURINE, E.; GRIES, T.; JÄGER, G.; KEILMANN, R.: Renforts composites: coudre ou ne pas coudre? In: *TUT – Textiles à usages techniques*, 44 (2003), 4, S. 36-39
- [133] LEONG, K. ET AL.: The potential of knitting for engineering composites – a review. In: *Composites: Part A*, 31 (2000), S. 197-220
- [134] LEOPOLD, TH.; FRANZKE, G.; OFFERMANN, P.: On textile preforms for composite rotors. Konferenz-Einzelbericht: *23rd International European Conference of SAMPE*. Paris, 2002
- [135] LIMA, M.; FANGUEIRO, R.; COSTA, A.; ROSIPEEN, C.; ROCHA, V.: Multiweave - A prototype weaving machine for multiaxial technical fabrics. In: *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 34 (2009), 1, S. 59-63
- [136] LOENDERSLOOT, R. ET AL.: Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms – Part 5: Geometry of sheared biaxial fabrics. In: *Composites: Part A*, 37 (2006), S. 103-113
- [137] LOMOV, S. ET AL.: Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms – Part 1: Geometry of the preform. In: *Composites: Part A*, 33 (2000), S. 1171-1183
- [138] LOMOV, S.; VERPOEST, I.; PEETERS, T.; ROOSE, D.; ZAKO, M.: Nesting in textile laminates: geometrical modelling of the laminate. In: *Composite Science and Technology*, 63 (2003), S. 993-1007
- [139] MAIWALD, B.; NEUMANN, D.; BARTH, M.; GROß, G.: Textilglasprodukte, deren Weiterentwicklung und Verstärkungswirkung. Konferenz-Einzelbericht: *10. Nationales Sampe Symposium Deutschland*. Dresden, 2004
- [140] MARASCO, A.; CARTIÉ, D.; PARTRIDGE, I.; REZAI, A.: Mechanical properties balance in novel Z-pinned sandwich panels: Out-of-plane properties. In: *Composites: Part A*, 37 (2006), S. 295-302
- [141] MATHEIJ, P. J.; GLIESCHE, K.; FELTIN, D.: Tailored Fibre Placement – Mechanical Properties and Applications. In: *Reinforced Plastics and Composites*, 17 (1998), 9, S. 774-787
- [142] MEYER, O.; GESSLER, A.; WEGNER, A.; VETTERMANN, F.: Influence of sewing of multiaxial textile structures in regard of mechanical properties. Konferenz-Einzelbericht: *SEICO 08 – Sampe Europe International Conference and Forum*. Paris, 2008
- [143] MÖLLER, B.; BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; STEINIGEN, F.: Verstärken mit textilbewehrtem Beton. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 99 (2004), 6, S. 466-471
- [144] MOURITZ, A.; LEONG, K.; HERSZBERG, I.: A review of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites. In: *Composites: Part A*, 28 (1997), S. 979-991
- [145] OFFERMANN, P.; ENGLER, T.; GRIES, T.; ROYE, A.: Technische Textilien zur Bewehrung von Betonbauteilen. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 99 (2004), 6, S. 437-443

- [146] ÖNAL, L.: Flexural strength, performance, and cost analysis of multiaxial warp-knitted preforms for composite reinforcements. In: *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 44 (2005), S. 1347-1354
- [147] ORTLEPP, R.; HAMPEL, U.; CURBACH, M.: A new approach for evaluating bond capacity of TRC strengthening. In: *Cement & Concrete Composites*, 28 (2006), S. 589-597
- [148] ORTLEPP, R.; WEILAND, S.; CURBACH, M.: Restoration of a hypar concrete shell using carbon-fibre textile reinforcement concrete. In: LIMBACHIYA, M. C. (HRSG.); KEW, H. Y. (HRSG.): *Proceedings of the International Conference Excellence in Concrete Construction through Innovation*. London : Taylor & Francis Group, 2008, S. 357-364
- [149] PARTRIDGE, I.; CARTIÉ, D.: Delamination resistant laminates by Z-Fiber® pinning: Part I manufacture and fracture performance. In: *Composites: Part A*, 36 (2005), S. 55-64
- [150] PAUL, C.; CHERIF, C.; HANUSCH, J.: Three-components hybrid yarn and hybrid yarn knitted fabrics for complex lightweight applications. Konferenz-Einzelbericht: 8. *Dresdner Textiltagung*. Dresden, 2006
- [151] PEEL, L.; JESSIE, N.: Processing and performance characteristics of braided vs filament wound rubber muscle actuators. Konferenz-Einzelbericht: *SAMPE 2009*. Baltimore, 2009
- [152] PELED, A.; BENTUR, A.: Reinforcement of cementitious matrices by warp knitted fabrics. In: *Materials and Structures*, 31 (1998), S. 543-550
- [153] PELED, A.; BENTUR, A.: Fabric structure and its reinforcing efficiency in textile reinforced cement composites. In: *Composites: Part A*, 34 (2003), S. 107-118
- [154] PELED, A.; BENTUR, A.: Mechanisms of fabric reinforcement of cement matrices. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 99 (2004), 6, S. 456-459
- [155] PLAGGENBORG, B.; JESSE, F.: Textile-reinforced concrete with high-performance carbon fibre grids. In: *JEC Composites Magazine*, (2008), 44
- [156] PÖTSCH, W.: Malimo - die Idee des Heinrich Mauersberger. In: *Melliand Textilberichte*, 81 (2001), 10, S. 838
- [157] REN, L.: Theoretical study on shape control of thin cross-ply laminates using piezoelectric actuators. In: *Composite Structures*, 80 (2004), S. 451-460
- [158] RÖDEL, H.; WEILAND, A.: Dreidimensional räumlich verstärkte Preforms mittels Einseitennäh-technik. In: *Technische Textilien*, 47 (2004), 4, S. 215-216
- [159] ROSIPEEN, C.; AMABILE, M.; LIMA, M.; GRIES, T.: Multiweave – ein neues multiaxiales Gewebe. Konferenz-Einzelbericht: 33. *Aachener Textiltagung*. Aachen, 2006
- [160] ROYE, A.; STÜVE, J.; GRIES, T.: Definition zur Unterscheidung von 2D- und 3D-Textilien, Teil 1. In: *Band- und Flechtindustrie*, 42 (2005), 2, S. 46-49
- [161] SANKAR, B.; SHARMA, S.: Mode II delamination toughness of stitched graphite/epoxy textile composites. In: *Composite Science and Technology*, 57 (1997), S. 729-737
- [162] SCHLECHT, M.; SCHULTE, K.; HYER, M.: Advanced calculation of the room-temperature shapes of thin unsymmetric composite laminates. In: *Composite Structures*, 32 (1995), S. 627-633

- [163] SCHIERZ, M. ET AL.: Textilbewehrungen: Ein Material, auf das man bauen kann. In: *Kettenwirk-Praxis*, 36 (2002), 4, S. 20-21
- [164] SCHIERZ, M.; FRANZKE, G.; WALDMANN, M.; OFFERMANN, P.; HES, L.: Charakterisierung der Handhabbarkeit textiler Bewehrungsstrukturen. In: *Technische Textilien*, 46 (2003), 2, S. 141-144
- [165] SCHORN, H.; PUTERMAN, M.: Textile Glasfasergelege mit Polymerdispersionen als Bewehrung für Beton. In: *Bautechnik*, 79 (2002), 10, S. 671-675
- [166] SCHULZ, C.; DIESTEL, O.; CHERIF, C.: Weiterentwicklung der Flachstricktechnik für Faserverbundwerkstoffanwendungen. Konferenz-Einzelbericht: *11. Chemnitzer Textiltechniktagung*. Chemnitz, 2007
- [167] SHINODA, T.: A-VARTM technology application for Japan's new regional jet aircraft. Konferenz-Einzelbericht: *ICCM 16*. Kyoto, 2006
- [168] SJÖGREN, A.; EDGREN, F.; APS, L.: Effects of stitching pattern on the mechanical properties of non-crimp fabric properties. Konferenz-Einzelbericht: *ECCM 11*. Rhodos, 2004
- [169] STOCKMANN, P.; MOLTER, M.: Auf die Kettenwirktechnologie bauen. In: *Kettenwirk-Praxis*, 35 (2001), 4, S. 47-51
- [170] TALVENSAARI, H.; LADSTÄTTER, E.; BILLINGER, W.: Permeability of stitched preform packages. In: *Composite Structures*, 71 (2005), S. 371-377
- [171] TROST, W. C.: Triaxiale Webmaschine TW 2000. In: *Chemiefasern - Textilindustrie*, 27 (1977), 5, S. 444ff
- [172] TRUONG, T. ET AL.: Carbon composites based on multi-axial multi-ply stitched preforms. Part 4. Mechanical properties of composites and damage observation. In: *Composites: Part A*, 36 (2005), S. 1207-1221
- [173] VANNUCCI, P.: On bending-tension coupling of laminates. In: *Journal of Elasticity*, 64 (2001), S. 13-28
- [174] DE VERDIERE, C.; PICKETT, A.; SKORDOS, A.; WITZEL, V.: Evaluation of the mechanical and damage behaviour of tufted non crimped fabric composites using full field measurements. In: *Composites Science and Technology*, 69 (2009), S. 131-138
- [175] VETTERMANN, F.; HEINECKE, T.: Parallelschusseintrag-System. In: *Kettenwirk-Praxis*, 35 (2001), 2, S. 17-18
- [176] WAHHOUD, A.: Neue Gestaltungskonzepte zur Gewebeerstellung. In: *Melliand Textilberichte*, 86 (2005), 7-8, S. 526-529
- [177] WALDMANN, M.; SCHIERZ, M.; FRANZKE, G.; OFFERMANN, P.: Directional Dependent Yarn Tensioning Regulation for the Production of Multi-Axial Reinforcement Structures. Konferenz-Einzelbericht: *14th International Conference on Composite Materials*. San Diego, 2003, Paper 2194
- [178] WALDMANN, M.; KÖCKRITZ, U.; FRANZKE, G.; CHERIF, C.: Strukturstabilisierung offener Nähgewirkter Gelege durch eine prozessintegrierte Beschichtungstechnologie auf der Multiaxial-Nähwirkmaschine. Konferenz-Einzelbericht: *10. Chemnitzer Textilmaschinentagung*. Chemnitz, 2005, S. 269-276

- [179] WATZL, A.: Thermofusion, Thermobonding und Thermofixierung für Nonwovens. In: *Melliand Textilberichte*, 75 (1994), 10, S. 840-850
- [180] WEILAND, S.; ORTLEPP, R.; HAUPTENBUCHNER, B.; CURBACH, M.: Textile Reinforced Concrete for Flexural Strengthening of RC-Structures—Part 2: Application on a Concrete Shell. In: ALDEA, C.-M. (HRSG.): *Design & Applications of Textile-Reinforced Concrete. Proceedings of the ACI Fall Convention*. Puerto Rico, 2007.
- [181] WIEDENHÖFT, K.; VETTERMANN, F.: Die neue Malimo-Multiaxial als Beispiel für mechatronische Lösungen im Textilmaschinenbau. Konferenz-Einzelbericht: *7. Chemnitzer Textilmaschinen-tagung*. Chemnitz, 1999, S. 179-186
- [182] WISNOM, M. ET AL.: Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer-matrix composite structures. In: *Composites: Part A*, 37 (2006), S. 522-529
- [183] WOOD, M. ET AL.: The effect of stitch distribution on mode I delamination toughness of stitched laminated composites – experimental results and FEA simulation. In: *Composite Science and Technology*, 67 (2007), S. 1058-1072
- [184] YOUNES, A.; SEIDEL, A.; ENGLER, T.; CHERIF, C.: Materialverhalten von AR-Glas- und Carbonfilamentgarnen unter Dauerlast- sowie unter Hochtemperatureinwirkung. In: CURBACH, M. (HRSG.); JESSE, F. (HRSG.): *Textilbeton – Theorie und Praxis*. Dresden : Technische Universität Dresden, 2009, S. 1-16
- [185] YUEXIN, D.: Effect of fabric structure on defects in composites manufactured by RTM. Konferenz-Einzelbericht: *ICCM 16*. Kyoto, 2007
- [186] ZHOU, R. ET AL.: Experimental study on the energy absorption properties of MWK reinforced composites. In: *Journal of Donghua University*, 19 (2002), 3, S. 31-35
- [187] ZHOU, R. ET AL.: A study on the tensile properties of the MWK structures for composite reinforcement. In: *Journal of Donghua University*, 21 (2004), 6, S. 121-123
- [188] ZHOU, R. ET AL.: An experimental and numerical study on the impact energy absorption characteristics of the multiaxial warp knitted (MWK) reinforced composites. In: *Journal of Composite Materials*, 39 (2005), 6, S. 525-542
- [189] ZHOU, R. ET AL.: An improved MWK structure for composite reinforcement. In: *Textile Research Journal*, 75 (2005), 4, S. 342-345

9.3 Normen und Schutzrechte

- [190] Norm DIN EN ISO 179-2: 2000. *Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften – Instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung*
- [191] Norm DIN EN ISO 527-1: 1996. *Bestimmung der Zugeigenschaften – Allgemeine Grundsätze*
- [192] Norm DIN EN 547-1: 2009. *Sicherheit von Maschinen – Körpermaße des Menschen – Teil 1: Grundlagen zur Bestimmung von Abmessungen für Ganzkörper-Zugänge an Maschinenarbeitsplätzen*
- [193] Norm DIN 6033: 1996. *Kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe, Prüfverfahren, Bestimmung der interlaminaeren Energiefreisetzungsrates Mode I, G_{IC}*

- [194] Norm DIN 6034: 1996. *Kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe, Prüfverfahren, Bestimmung der interlaminaren Energiefreisetzungsrates Mode II, G_{IIc}*
- [195] Norm DIN 8640-4: 1997. *Flach-Kettenwirkmaschinen, Begriffe – Teil 4: Nähwirkmaschinen und Nähwirkeinrichtungen*
- [196] Norm DIN 13471-1: 2001. *Spezifikation für Multiaxialgelege – Teil 1, Bezeichnung*
- [197] Norm DIN EN ISO 13857: 2008. *Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefährdungsbereichen mit den oberen und unteren Gliedmaßen*
- [198] Norm DIN 13934-1: 1999. *Zugeigenschaften von Textilflächengebilden – Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung mit dem Streifenversuch*
- [199] Norm DIN EN ISO 14125: 1998. *Bestimmung der Biegeeigenschaften*
- [200] Norm DIN EN ISO 14130: 1998. *Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken*
- [201] Norm DIN EN ISO 14738: 2008. *Sicherheit von Maschinen – Anthropometrische Anforderungen an die Gestaltung von Maschinenarbeitsplätzen*
- [202] Norm DIN 33402-2: 2005. *Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte*
- [203] Norm DIN 33402-2 Beiblatt 1: 2006. *Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte; Beiblatt 1: Anwendung von Körpermaßen in der Praxis*
- [204] Norm DIN EN ISO 53830-3: 1981. *Bestimmung der Feinheit von Garnen und Zwirnen – Einfache Garne und Zwirne, Texturierte Garne, Abschnittverfahren*
- [205] Norm DIN 53834-2: 1979. *Prüfung von Textilien; Einfacher Zugversuch an Garnen und Zwirnen im ofentrockenen Zustand*
- [206] Norm DIN 60 000: 1969. *Textilien – Grundbegriffe*
- [207] Norm DIN 61211: 2005. *Auf Nähwirkanlagen hergestellte textile Flächengebilde*
- [208] Norm DIN 62050: 2005. *Maschenstoffe – Darstellungsformen und Patronierung*
- [209] Norm ISO 3341: 2000. *Textile glass -Yarns- Determination of breaking force and breaking elongation*
- [210] Norm ISO 7839: 2006. *Maschenbildende Maschinen – Einteilung und Begriffe*
- [211] Schutzrecht. DD 219047 A3 (1985-02-20). Technische Universität Dresden
- [212] Schutzrecht. DD 282719 A5 (1990-09-19). VEB Textimaforschung Malimo
- [213] Schutzrecht. DE 3800244 A1 (1988-01-07). Textima AG
- [214] Schutzrecht. DE 3800381 A1 (1988-01-08). Textima AG
- [215] Schutzrecht. DE 3836262 A1 (1989-08-24). VEB Kombinat Textima
- [216] Schutzrecht. DE 4309990 A1 (1994-10-06). Malimo Maschinenbau GmbH
- [217] Schutzrecht. DE 19913647 A1 (2000-09-28). LIBA Maschinenfabrik GmbH
- [218] Schutzrecht. DE 10163683 C1 (2003-08-14). KARL MAYER Malimo Textilmaschinenfabrik GmbH

- [219] Schutzrecht. DE 10163730 C1 (2003-10-09). KARL MAYER Malimo Textilmaschinenfabrik GmbH
- [220] Schutzrecht. DE 19928635 C1 (1999-06-23). Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V.
- [221] Schutzrecht. DE 4137310 A1 (1991-11-13). Akzo N.V.
- [222] Schutzrecht. DE 3835929 A1 (1988-10-21). Kirson Patentverwertung und Vertriebsgesellschaft mbH
- [223] Schutzrecht. DE 19809264 A1 (1998-03-04). Eldra Kunststofftechnik GmbH
- [224] Schutzrecht. DE 10334343 A1 (2003-07-29). MTU Aero Engines GmbH
- [225] Schutzrecht. DE 19531001 A1 (1995-08-23). Hoechst Trevira GmbH & Co. KG
- [226] Schutzrecht. DE 19537663 A1 (1995-10-10). Pott, Richard
- [227] Schutzrecht. DE 19643871 A1 (1996-10-30). Kirson Patentverwertung und Vertriebsgesellschaft mbH
- [228] Schutzrecht. DE 19925588 A1 (1999-06-04). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. & Saertex Wagener GmbH & Co. KG
- [229] Schutzrecht. DE 10303992 B3 (2003-02-01). Saertex Wagener GmbH & Co. KG
- [230] Schutzrecht. DE 10200406067 A1 (2006-07-06). Eurocopter Deutschland GmbH
- [231] Schutzrecht. DE 102004060001 A1 (2004-12-14). Saertex Wagener GmbH & Co. KG
- [232] Schutzrecht. DE 102005000115 A1 (2005-09-13). Cetex Chemnitzer Textilmaschinenentwicklung gGmbH
- [233] Schutzrecht. DE 19706839 A1 (1997-02-21). Möller Plast GmbH
- [234] Schutzrecht. DE 19707125 A1 (1997-02-22). Epo-Faser-Technik GmbH
- [235] Schutzrecht. DE 20120447 U1 (2001-12-18). Weberei C. Cramer GmbH & Co. KG
- [236] Schutzrecht. DE 69819699 T2 (1998-03-25). Société Nationale d'Etude et de Construction de Moteurs d'Aviation SNECMA & Hexcel Fabrics
- [237] Schutzrecht. DE 69730199 T2 (1997-09-03). McDonnell Douglas Corp.
- [238] Schutzrecht. EP 1350615 A1 (2003-03-20). Chomarat Composites
- [239] Schutzrecht. EP 1410900 A1 (2002-10-17). Reifenhäuser GmbH & Co. Maschinenfabrik
- [240] Schutzrecht. EP 851049 A2 (1997-10-30). Kirson Patentverwertung und Vertriebsgesellschaft mbH
- [241] Schutzrecht. EP 344318 A1 (1988-09-19). Hagihara Industries, Inc.
- [242] Schutzrecht. EP 81843 A2 (1983-06-22). Kurashiki Boseki Kabushiki Kaisha
- [243] Schutzrecht. EP 761859 A1 (1996-08-01). Hoechst Trevira GmbH & Co. KG
- [244] Schutzrecht. EP 1112400 A1 (1999-08-18). Saertex Wagener GmbH & Co. KG
- [245] Schutzrecht. EP 1348791 A1 (2003-02-21). Chomarat Composites
- [246] Schutzrecht. WO 02/070806 A1 (2002-02-20). Saint Gobain Vetrotex France S.A.

[247] Schutzrecht. WO 03/083198 A1 (2003-04-03). Chavanoz Industrie

9.4 sonstige Literatur

- [248] BAFATEX: *Products and services*. – URL: http://www.bafatex.de/html_de/produkte.php (2007_02_20)
- [249] BERCHTOLD, B.: Berechnung des Umfanges einer Ellipse mit Näherungsformel. – URL: <http://www.mathematik.ch/anwendungenmath/ellipsenumfang/> (2009_05_12)
- [250] CHERIF, C.; HUFENBACH, W.; ERTH, H.: Entwicklung und Erprobung thermoplastischer endlosfaserverstärkter mehraxialer Gitterstrukturen als Verstärkungselement (TEMAG). Dresden : Technische Universität Dresden, 2007. – Forschungsbericht. AiF-Forschungsprojekt Nr. 175 ZBR
- [251] CHERIF, C.; MECHTCHERINE, V; HORLACHER, H.: Entwicklung und Erprobung neuer, innovativer Verbundrohrverbindungsstücke (Kunststoff-Textilbeton-Verbundsystem) einschließlich ihrer Herstellungstechnologie. Dresden : Technische Universität Dresden, 2008. – Forschungsbericht. AiF-Forschungsprojekt Nr. 214 ZBR
- [252] COATEMA: *Rotary Screen System - Rotationssiebtechnologie*. – URL: http://www.coatema.de/ger/lab_solutions/auftragssysteme/rotary_screen_system.php (2009_01_28)
- [253] CURBACH, M.; JESSE, F.; ORTLEPP, R.; LORENZ, E.; HAUSDING, J.: *Vorversuche zu Trag- und Verbundeigenschaften von Textilien aus SGL-Carbonfasern in Feinbetonmatrix*. Dresden : Technische Universität Dresden, Interner Ergebnisbericht, 2008
- [254] EUROFIGHTER: *Eurofighter Typhoon – Materials & Production*. – URL: http://www.eurofighter.com/et_mp_ma_cf.asp (2007_08_15)
- [255] GELDERBLOM, S.; HANUSCHIK, D; SCHRÖDER, E.: *Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffen an Teppich-Tuftingmaschinen*. Aachen : Schriftenreihe des Deutschen Teppich-Forschungsinstitutes e.V., 2002/74
- [256] HEGGER, J. ET AL.: SFB 532. Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie. Aachen : RWTH Aachen, 2008. – Forschungsantrag.
- [257] HIGHTEX VERSTÄRKUNGSSTRUKTUREN: *Erläuterungen zur TFP-Technologie*. – URL: <http://www.hightex-dresden.de/tfptech.pdf> (2007-05-15)
- [258] INATEC GMBH: *Fadenauftrag*. – URL: <http://www.inatec-gmbh.de/node/filament> (2009-01-29)
- [259] JESSE, F.: Experimentelle Ermittlung des Tragverhaltens von textilbewehrtem Beton. In: CURBACH, M.: SFB 528. Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung. Dresden : Technische Universität Dresden, 2008. – Forschungsantrag.
- [260] KARL MAYER MALIMO TEXTILMASCHINENFABRIK: *Malitronic Multiaxial*. persönliche Information (2009-07-14)
- [261] KARL MAYER TEXTILMASCHINENFABRIK: *Introduction into basics of warp knitting*. Obertshausen, Firmenschrift

- [262] KARL MAYER TEXTILMASCHINENFABRIK: *Multiaxial – High-Tech Wirkmaschine*. Obertshausen, Firmenschrift
- [263] KARL MAYER TEXTILMASCHINENFABRIK: *Maliwatt – Nähwirkmaschinen*. Obertshausen, Firmenschrift
- [264] KARL MAYER TEXTILMASCHINENFABRIK: *Technische Textilien*. – URL: <http://www.karlmayer.com/internet/de/textilmaschinen/22.jsp> (2006_08_09)
- [265] KARL MAYER TEXTILMASCHINENFABRIK: *RS 3 MSUS-V – Raschelmaschine mit Magazin-Schusseintrag zur Herstellung von Vliesverbundstoffen*. Obertshausen, Firmenschrift
- [266] KARL MAYER TEXTILMASCHINENFABRIK: *Kunit/Multiknit – Nähwirkmaschinen*. Obertshausen, Firmenschrift
- [267] KARL MAYER TEXTILMASCHINENFABRIK: *Malivlies – Nähwirkmaschine*. Obertshausen, Firmenschrift
- [268] KARL MAYER TEXTILMASCHINENFABRIK: *Malipol – Nähwirkmaschine*. Obertshausen, Firmenschrift
- [269] KERN, M.: *Konstruktive Entwicklung einer Modullösung für die Konfektionierung stabilisierter Nähgewirke*. Studienarbeit. Technische Universität Dresden, 2007
- [270] KIRSON INDUSTRIAL REINFORCEMENTS: *Produkte*. – URL: <http://www.kirson.de/inhalt/de/download/Produkte.pdf> (2007_02_20)
- [271] KONICA MINOLTA: *The new textile printing system*. Tokio, Firmenschrift, 2004
- [272] KÖNIG, C.: *Entwurf einer modular aufgebauten Multiaxialgelegeanlage neuen Typs zur Verarbeitung von Hochleistungsfilamentgarnen*. Studienarbeit. Technische Universität Dresden, 2008
- [273] LIBA MASCHINENFABRIK: *Kettenwirkautomat mit multiaxialem Schusseintrag Copcentra MAX 3 CNC*. Naila, Firmenschrift
- [274] LIBA MASCHINENFABRIK: *Hochleistungs-Kettenwirkautomaten Copcentra K*. Naila, Firmenschrift, 1999
- [275] LIBA MASCHINENFABRIK: *Kettenwirkmaschine mit Magazin-Schußeintrag Copcentra HS-2-ST*. Naila, Firmenschrift, 2003
- [276] LIBA MASCHINENFABRIK: *Copcentra HS-2-ST-CH – Kettenwirkmaschine mit Magazin-Schusseintrag und Glasfaser-Schnitzel-System*. Naila, Firmenschrift
- [277] LIBA MASCHINENFABRIK: *Copcentra HS-ST*. – URL: http://www.liba.de/tricot/cop_st_allg.htm (2007_05_10)
- [278] LIBA MASCHINENFABRIK: *Copcentra Max 5 CNC Carbon*. – URL: http://www.liba.de/tricot/cop_max5_allg.htm (2007_05_10)
- [279] LINKE, H. ET AL.: *Maschinenelemente – Gestaltungs- und Berechnungsgrundlagen*. Dresden : Technische Universität Dresden, 1999
- [280] LORENZ, E.: *Beitrag zum Verbundtragverhalten und der Verankerung textiler Bewehrungen in der Feinbetonmatrix*. Masterarbeit. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), 2008

- [281] LORENZ, E.; HAUSDING, JESSE, F.; ORTLEPP, R.: *Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit von Textilbeton durch Einsatz textiler Bewehrungen nach dem erweiterten Nähwirkverfahren*. Dresden : Technische Universität Dresden, Interner Ergebnisbericht, 2009 (Zeitschriftenpublikation in Vorbereitung)
- [282] LORENZ, E.: *Verbundverhalten von Textilbeton*. Dresden : Technische Universität Dresden, Interner Ergebnisbericht, 2009 (Zeitschriftenpublikation in Vorbereitung)
- [283] MESSE FRANKFURT: *Techtextil*. – URL: <http://techtextil.messefrankfurt.com/frankfurt/de/home.html> (2007_05_10)
- [284] NOATZSCH, M.: *Bestimmung des Einflusses der Prozessparameter beim Nähwirken mit Online-Beschichtung auf textile Verstärkungsgitter*. Studienarbeit. Technische Universität Dresden, 2009
- [285] NORDSON CORPORATION: *Sprühauftrag mit Nordson Auftragstechnologie*. Erkrath, Firmenschrift, 2002
- [286] NORDSON CORPORATION: *Speed-Coat® Breitschlitzdüsen-Auftragskopf*. Erkrath, Firmenschrift, 2004
- [287] OFFERMANN, P.; HORLACHER, H.: Erhöhung der Abrasionsfestigkeit von dünnen Mörtelschichten durch textile Strukturen. Dresden : Technische Universität Dresden, 2003. – Forschungsbericht. AiF-Forschungsprojekt Nr. 12872 BR
- [288] OFFERMANN, P.; SCHORN, H.; SCHEGNER, P.: Entwicklung von Textil-Stahl-Hybridstrukturen für textilstahlbewehrte dünnwandige Betonelemente. Dresden : Technische Universität Dresden, 2005. – Forschungsbericht. AiF-Forschungsprojekt Nr. 13523 BR
- [289] OFFERMANN, P.; SCHORN, H.; HORLACHER, H.: Entwicklung und Erprobung neuer, innovativer Verbundrohre einschließlich ihrer Herstellungstechnologie. Dresden : Technische Universität Dresden, 2005. – Forschungsbericht. AiF-Forschungsprojekt Nr. 102 ZBR
- [290] PLYTRON: *Plytron: product description, properties and application*. – URL: http://files.guritsuprem.com/files/Plytron_Presentation_GS_eng.pdf (2007_02_20)
- [291] POE, C.; DEXTER, H.; RAJU, I.: A review of the NASA textile composites research : National Aeronautic and Space Administration (NASA), 1997. – Forschungsbericht. NASA Technical Report Server – Document ID: 20040105589
- [292] POLYTEC PT: *Epoxid- und Polyimid-Klebstoffe*. Waldbronn, Firmenschrift, 2008
- [293] POLYTEC PT: *UV-Klebstoffe*. Waldbronn, Firmenschrift, 2008
- [294] RITTNER, S.: *Reduzierung der durch den Wirkprozess entstehenden Faserondulationen bei gewirkten multiaxialen Gelegestrukturen aus Kohlenstofffasern*. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, 2005.
- [295] ROBATECH AG: *Hotmelt Auftragsköpfe – Raupen- und Punktauftrag*. Muri, Firmenschrift, 2008
- [296] VAN WEES: *Products and services*. – URL: http://www.vanwees.nl/main_content.htm (2007_02_20)
- [297] WALDMANN, M.: *Gatter für Nähwirkmaschinen*. – internes Arbeitspapier, Technische Universität Dresden (2008_04_21)

- [298] WIDULLE, C.: *Einflüsse des erweiterten Nähwirkprozesses auf die Eigenschaften des Nähwirkstoffs und dessen Einsatz in Faser-Kunststoff-Verbunden*. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, 2008
- [299] XAAR PLC: *Innovative inkjet technology*. Cambridge, Firmenschrift
- [300] YOUNES, A.: *Vergleichmäßigung der Kettfadenspannung und Warenspannung über die Arbeitsbreite an Kettenwirkmaschinen*. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, 2006

10 Anhang

10.1 Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole

Bezeichnung der Faserstoffe



ARG	alkaliresistente Glasfaser (AR-Glas)
CF	Carbonfaser
GF	Glasfaser
GSO	P-D Glasseiden GmbH, Oschatz
HG	Hybridgarn
ITB	Institut für Textil- und Bekleidungstechnik, Technische Universität Dresden (jetzt Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik)
PES	Polyester
PP	Polypropylen
TEN	Toho Tenax Europe GmbH, Wuppertal
VET	Saint-Gobain Vetrotex (jetzt OCV Germany GmbH)

allgemeine technische Abkürzungen

FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
ITM	Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik
MMF	<i>multiaxial multi-ply fabric</i>
MWK	<i>multiaxial warp knit</i>
NCF	<i>non crimp fabric</i>
NWG	nähgewirktes Gelege
NWS	Nähwirkstoff
P5	5. Perzentil
P95	95. Perzentil

RL	Rechts-Links
RR	Rechts-Rechts
TFP	<i>tailored fibre placement</i>
Tt	Titer (Faser- oder Garnfeinheit, Angabe in tex = g/km)
TUD	Technische Universität Dresden
UD	unidirektional
VWS	Vlieswirkstoff
WIMAG	verwirktes multiaxiales Gelege

Nähwirktechnik/Bindungskonstruktion

BVx	Basisversatz um x Teilungen
E	Maschinenfeinheit bei Kettenwirkautomaten, Raschelmaschinen und allen aktuellen Nähwirkmaschinen (Anzahl Wirkelemente pro Zoll bzw. 25,4 mm)
F	frühere Maschinenfeinheit bei Nähwirkmaschinen der <i>Karl Mayer Malimo Textilmaschinenfabrik GmbH</i> , Chemnitz (Anzahl Wirkelemente pro 25 mm)
GB	Legebarre (<i>guide bar</i>)
NB	Nadelbarre (<i>needle bar</i>)
rp	relative Positionsnummern
vrp	verschobene relative Positionsnummern

Äquivalenzbindungen

a_{GB}	Beginn Überlegung Legebarre
b_{GB}	Ende Überlegung Legebarre
a'_{GB}	Beginn Überlegung Legebarre (Äquivalenzbindung)
b'_{GB}	Ende Überlegung Legebarre (Äquivalenzbindung)
a_{NB}	Stellung der Nadelbarre zum Zeitpunkt der Überlegung
G_{max}	maximal beanspruchte Anzahl virtueller Gassen
V_{max}	maximaler Versatzwert der Nadelbarre

Klassische Laminattheorie

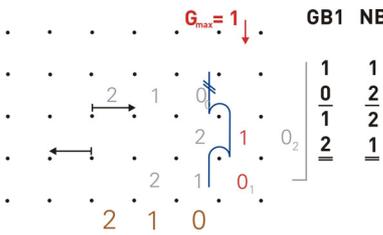
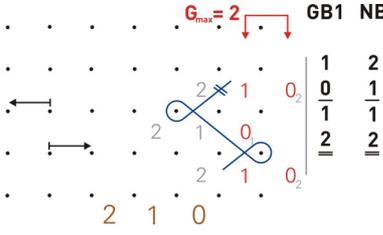
n_{ij}	Schnittkräfte
m_{ij}	Schnittmomente
ϵ_{ij}	Scheibenverzerrungen
κ_{ij}	Plattenverzerrungen
A	Scheibensteifigkeitsmatrix
B	Koppelsteifigkeitsmatrix
D	Plattensteifigkeitsmatrix
$h^{(k)}$	Dicke der Einzelschicht
$x_{3,k}$	Abstand von der Mittelfläche
h	Dicke des Mehrschichtverbundes
Q	reduzierte Steifigkeit

Beschreibung der Nähwirkbindung

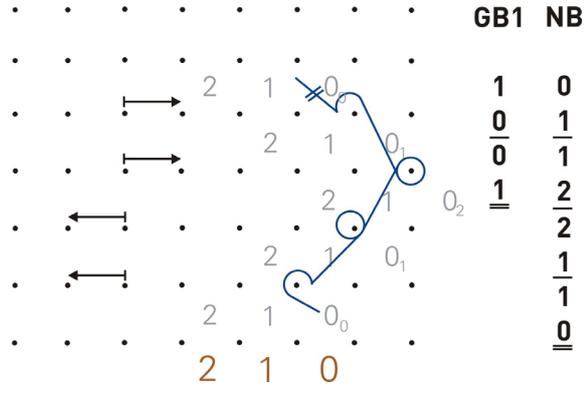
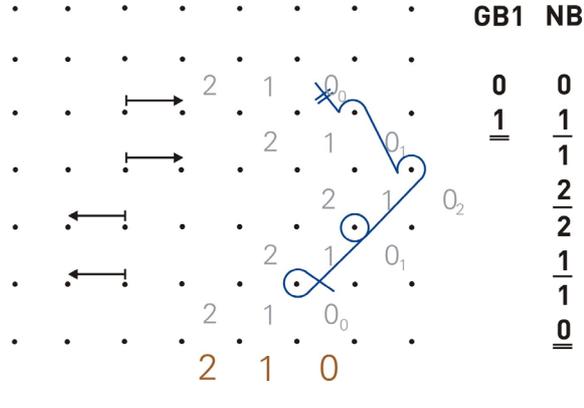
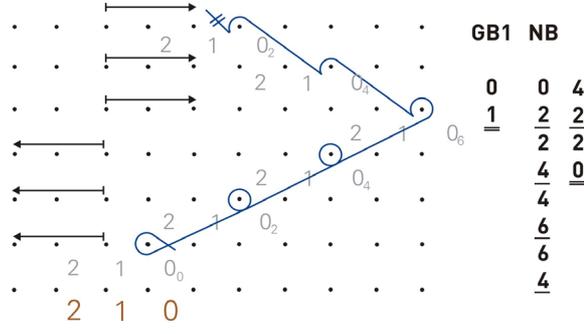
F_Z	Wirkfadenzugkraft [N]
F_Q	resultierende Kettfadenquerkraft [N]
F	Maschinenfeinheit bei Nähwirkmaschinen [dimensionslos]
f	Abstand der Wirkelemente [mm]
s	Stichlänge [mm]
d_K	komprimierter Kettfadendurchmesser [mm]
x_K	Abstand der Wirkfadenknotenpunkte in Schussrichtung [mm]
y_K	Abstand der Wirkfadenknotenpunkte in Kettrichtung [mm]
α, β	Winkel im Kräfteparallelogramm [°]

10.2 Berechnungsbeispiele zur Äquivalenzbindung

Bindung	Legungsbild & Legungsplan	Äquivalenzberechnung	Äquivalenzbindung
RL-Franse, offen		$\begin{pmatrix} a'_{GB} \\ b'_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} c'_{GB} \\ d'_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ $V_{\max} = 2$ $G_{\max} = V_{\max} - c_{GB} = 2$ $a_{NB} = 0$ $c_{NB} = 2$	RL-Tuch, offen
RL-Franse, offen	<p>Basisrapport Legebarre Basisrapport Nadelbarre resultierender Rapport</p>	$\begin{pmatrix} a'_{GB} \\ b'_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} c'_{GB} \\ d'_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} e'_{GB} \\ f'_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} g_{GB} \\ h'_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} i'_{GB} \\ j'_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} k'_{GB} \\ l'_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$ $V_{\max} = 2$ $G_{\max} = V_{\max} - c_{GB} = 2$ $a_{NB} = 1$ $c_{NB} = 2$ $e_{NB} = 0$ $g_{NB} = 1$ $i_{NB} = 2$ $k_{NB} = 0$	abgeleitete Grundbindung 2 - 1 / 0 - 1 / 3 - 2 / 1 - 2 / 1 - 0 / 2 - 3 //

<p>RL-Trikot, geschlossen</p>		$\begin{pmatrix} a'_{GB} \\ b'_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} c'_{GB} \\ d'_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ $V_{\max} = 2$ $G_{\max} = V_{\max} - c_{GB} = 1$ $a_{NB} = 1$ $c_{NB} = 2$	<p>RL-Franse, offen</p>
<p>RL-Trikot, geschlossen</p>		$\begin{pmatrix} a'_{GB} \\ b'_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} c'_{GB} \\ d'_{GB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix}$ $V_{\max} = 2$ $G_{\max} = V_{\max} - b_{GB} = 2$ $a_{NB} = 2$ $c_{NB} = 1$	<p>RL-Tuch, geschlossen</p>

10.3 Fransenbindung und Diagonalversatz

Bindung	Legungsbild & Legungsplan
RL-Franse, offen mit Diagonalversatz 2-1	
RL-Franse, geschlossen mit Diagonalversatz 2-1	
RL-Franse, geschlossen mit Diagonalversatz 3-2	

10.4 Prüfverfahren Textilbeton

10.4.1 Faden

Feinheit	DIN 53830	
Fadenweife	Vorspannkraft	1 cN/tex
Zugversuch	ISO 3341	
Zugprüfmaschine <i>Zwick Z100</i> (<i>Zwick GmbH & Co. KG</i>)	Kraftaufnehmer Probenhalter Wegaufnehmer Einspannlänge Prüfgeschwindigkeit Vorkraft Prüfende Probenanzahl	10 kN Seilprobenhalter 8270, vulkanisiert, glatt 60 x 50 mm optischer Längenänderungsaufnehmer 500 mm 200 mm/min 0,5 cN/tex bei 50 % Kraftabfall 20

10.4.2 Textilbeton

Fadenauszugversuch	SFB 528 (Lorenz, 2008 [280])	
Zugprüfmaschine	Prüfgeschwindigkeit Probenbreite Probenlänge Probenanzahl Prüfungsende	1 mm/min 70 mm 200 mm 5 bei 3 mm Rissöffnung
Dehnkörperversuch	SFB 528 (Jesse, 2004 [17])	
Zugprüfmaschine	Kraftaufnehmer Dehnungsaufnehmer Stützweite Prüfgeschwindigkeit Vorkraft Probenbreite Probenlänge Probenanzahl	10 kN optischer Längenänderungsaufnehmer 45 mm 5 mm/min 3 N 15 mm 60 mm 10

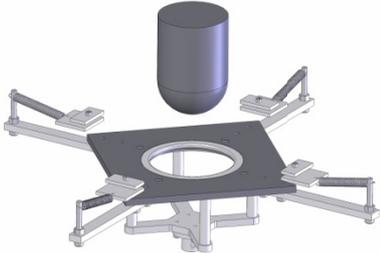
10.5 Prüfverfahren Faser-Kunststoff-Verbund

10.5.1 Faden

Feinheit	DIN 53830	
Fadenweife	Vorspannkraft	1 cN/tex
Zugversuch	DIN 53834-2	
Zugprüfmaschine <i>Zwick Z100</i> (<i>Zwick GmbH & Co. KG</i>)	Kraftaufnehmer Probenhalter Wegaufnehmer Einspannlänge Prüfgeschwindigkeit Vorkraft Prüfende Probenanzahl	10 kN Seilprobenhalter 8270, vulkanisiert, glatt 60 x 50 mm optischer Längenänderungsaufnehmer 500 mm 200 mm/min 0,5 cN/tex bei 50 % Kraftabfall 20

10.5.2 Textile Fläche

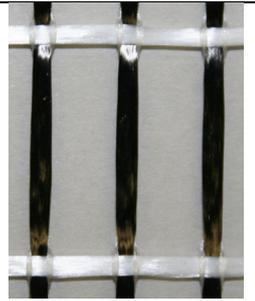
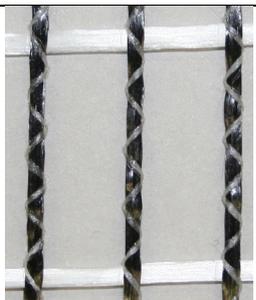
optische Analyse	interne Prüfvorschrift
Digitalfotografie	Zur Bestimmung der Kettfadenauslenkung werden an einer drei Meter langen Probe des Nähwirkstoffs jeweils zehn zufällig ausgewählte Abschnitte von zehn Zentimetern Länge untersucht. Jeder Zehn-Zentimeter-Abschnitt wird nochmals in Abschnitte von jeweils einem Zentimeter unterteilt. In jedem der insgesamt einhundert Prüfabschnitte pro Probe wird bestimmt, wie stark der Kettfaden jeweils aus seiner gestreckten Lage ausgelenkt wird. Dazu wird über das Digitalfoto der Probe ein Kettfadengrundkörper mit dem mittleren Fadendurchmesser dieser Probe gelegt. Zu beiden Seiten des Vergleichsgrundkörpers werden Schwellenlinien gezeichnet, die jeweils einer Abweichung von 10, 25, 50 und 75 Prozent vom Kettfadendurchmesser entsprechen. Anschließend werden die Fadenabschnitte gezählt, deren Abweichungen in der entsprechenden Größenordnung liegen.

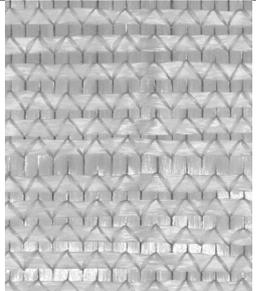
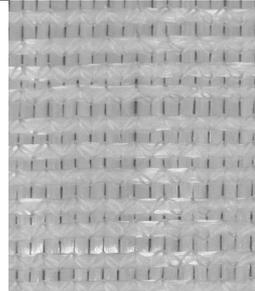
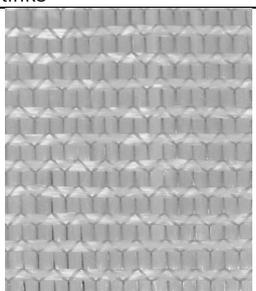
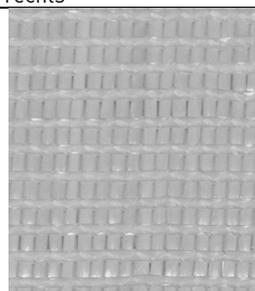
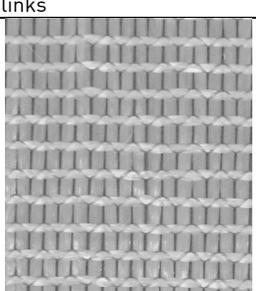
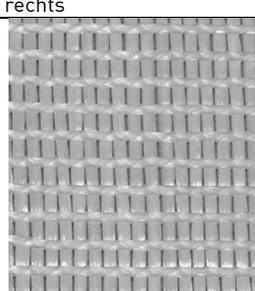
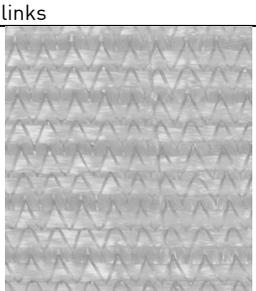
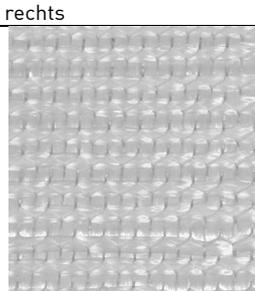
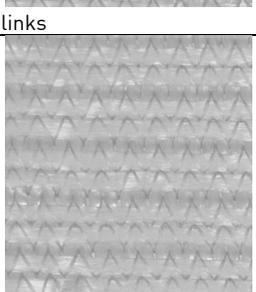
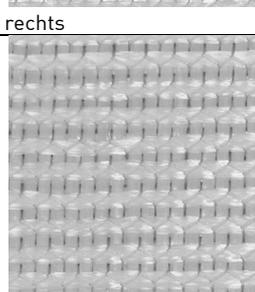
Stempeldurchdrück-Versuch	interne Prüfvorschrift	
Zugprüfmaschine <i>Zwick Z100</i> [<i>Zwick GmbH & Co. KG</i>]	Zur Durchführung einer komplexen Deformationsprüfung der textilen Strukturen wurde im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs 639 am ITM eine Stempeldurchdrückeinrichtung entwickelt. Die Prüfvorrichtung wurde in die Zugprüfmaschine Z100 der Firma Zwick GmbH & Co. KG integriert und besteht aus einem als Halbkugel ausgebildeten Druckstempel und der Gegenform. Die Probenfixierung wurde mit einer Klemmung der Probenecken realisiert.	 <p data-bbox="991 678 1126 707">Grafik: <i>ITM</i></p>
Scherversuch	interne Prüfvorschrift	
Zugprüfmaschine <i>Zwick Z100</i> [<i>Zwick GmbH & Co. KG</i>]	Zur Beurteilung der reinen Scherung wurde am ITM ein Scherrahmen mit spezieller Probenfixierung mittels Nadeln entwickelt. Durch die Nadelfixierung können sich die Verstärkungsfäden der textilen Strukturen während des Schervorgangs frei bewegen, d. h. drehen und gleiten. Aus diesem Grund wird die von konventionellen Scherrahmen bekannte frühzeitige, klemmungsbedingte Faltenbildung am Probenrand vermieden [27].	
Zugversuch	DIN EN ISO 13934-1	
Zugprüfmaschine <i>Zwick Z100</i> [<i>Zwick GmbH & Co. KG</i>]	Kraftaufnehmer Dehnungsaufnehmer Einspannlänge Prüfungsgeschwindigkeit Vorkraft Prüfende Probenanzahl	10 kN Traversenwegaufnehmer 200 mm 20 mm/min 5 N bei 50 % Kraftabfall 10

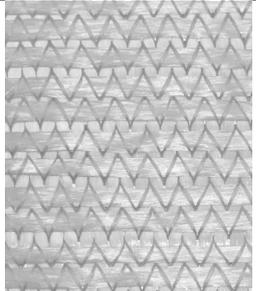
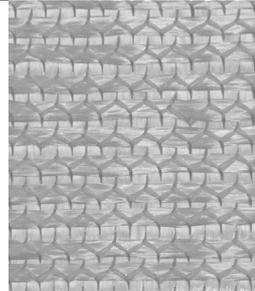
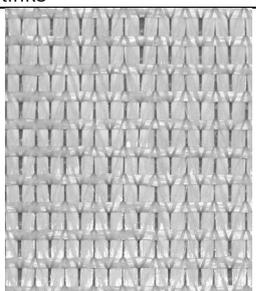
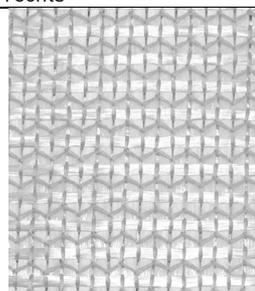
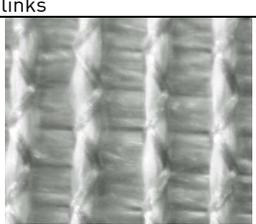
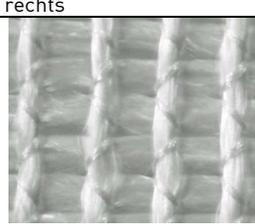
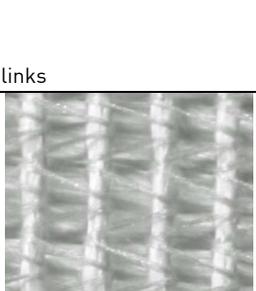
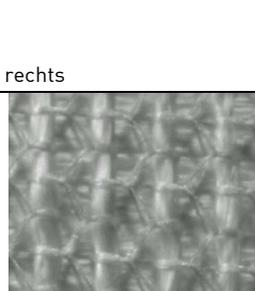
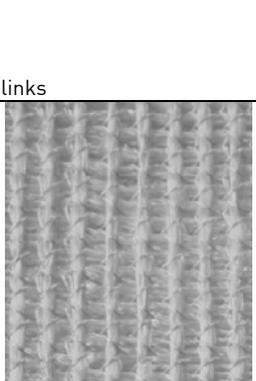
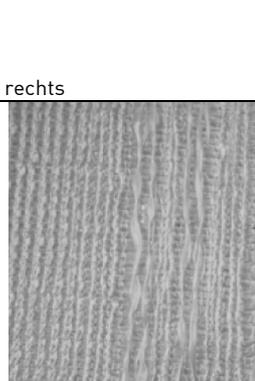
10.5.3 Verbundwerkstoff

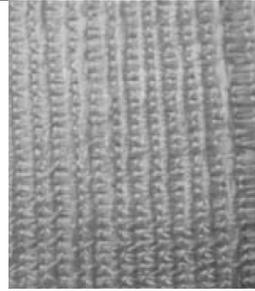
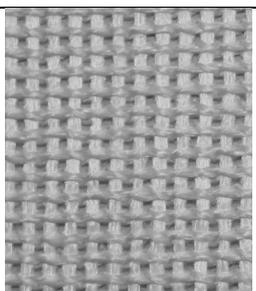
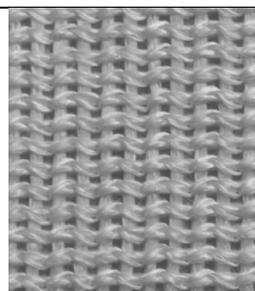
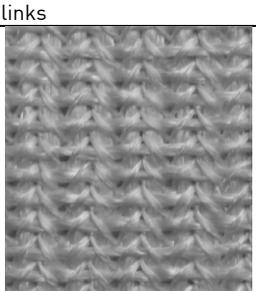
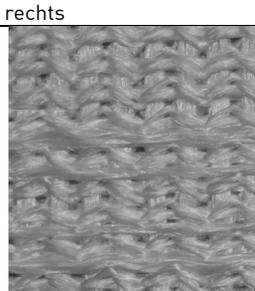
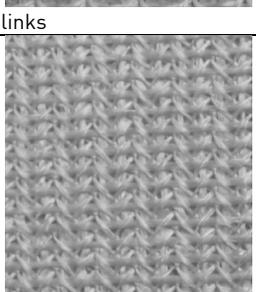
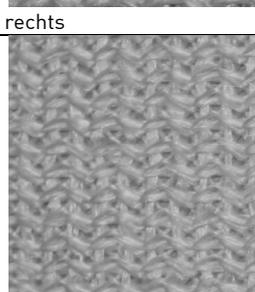
Zugversuch	DIN EN ISO 527-1	
Zugprüfmaschine <i>Zwick Z100</i> (<i>Zwick GmbH & Co. KG</i>)	Kraftaufnehmer Dehnungsaufnehmer Einspannlänge Prüfgeschwindigkeit Vorspannung Probenbreite Probenlänge Probenanzahl Prüfungsende	100 kN Feindehnungsaufnehmer (für E-Modul) Traversenwegaufnehmer (für Zugfestigkeit) 150 mm 2 mm/min 2,5 MPa (für E-Modul) 5 MPa (für Zugfestigkeit) 25 mm 250 mm 5 bei 0,3 % Dehnung (E-Modul) bei 15 % Kraftabfall (Zugfestigkeit)
4-Punkt-Biegeversuch	DIN EN ISO 14125	
Zugprüfmaschine <i>Zwick Z100</i> (<i>Zwick GmbH & Co. KG</i>)	Kraftaufnehmer Dehnungsaufnehmer Stützweite Prüfgeschwindigkeit Vorkraft Probenbreite Probenlänge Probenanzahl	10 kN optischer Längenänderungsaufnehmer 45 mm 5 mm/min 3 N 15 mm 60 mm 10
Charpy-Schlagversuch	DIN EN ISO 179-2	
Pendelschlagwerk <i>Zwick/Roell</i> (<i>Zwick GmbH & Co. KG</i>) durchgeführt am Institut für Leichtbau- und Kunststofftechnik, TU Dresden	Stützweite Ausklinkwinkel Arbeitsvermögen Probenbreite Probenlänge Probenanzahl	40 mm 160° 15 J 15 mm 40 mm 10
scheinbare interlaminare Scherfestigkeit	DIN EN ISO 14130	
Zugprüfmaschine <i>Zwick Z100</i> (<i>Zwick GmbH & Co. KG</i>)	Kraftaufnehmer Wegaufnehmer Stützweite Prüfgeschwindigkeit Probenbreite Probenlänge Probenanzahl	10 kN Traversenwegaufnehmer 10 mm 1 mm/s 10 mm 20 mm 5

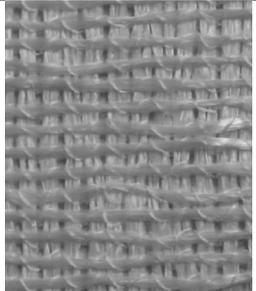
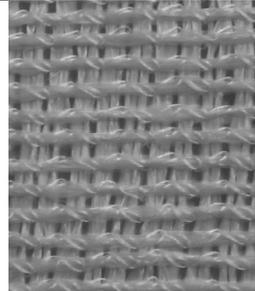
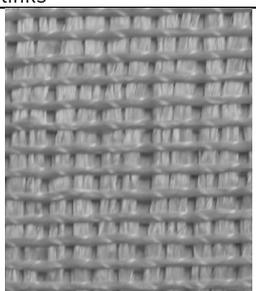
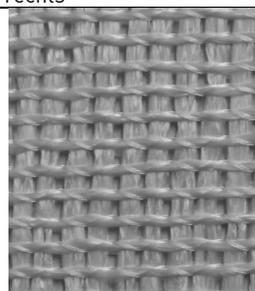
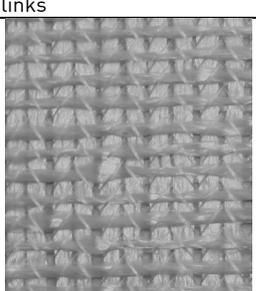
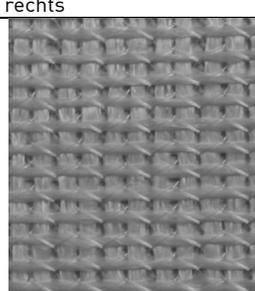
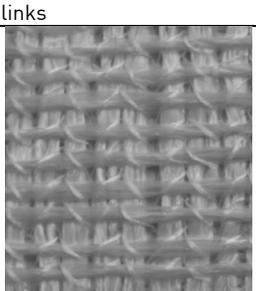
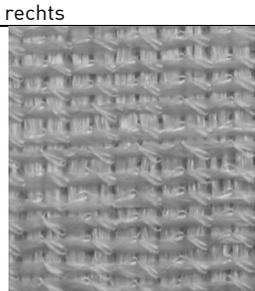
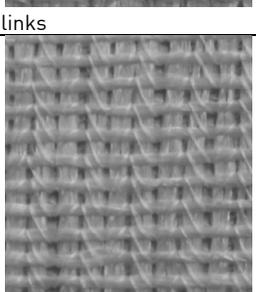
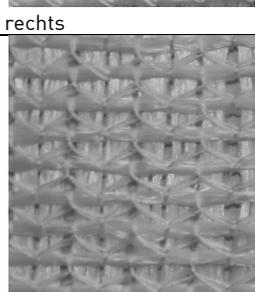
10.6 Übersicht Textilien

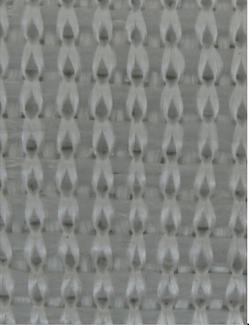
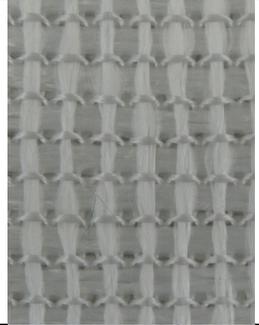
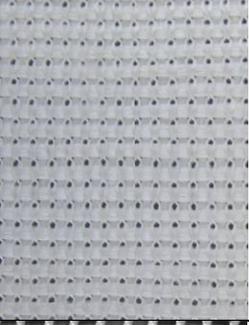
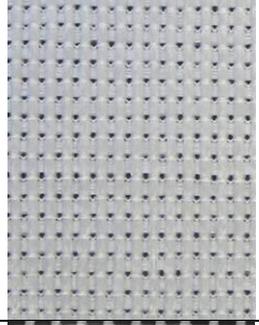
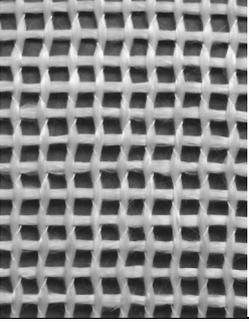
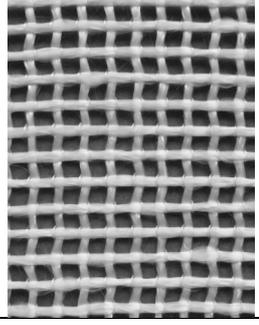
5-1					
Wirkfaden: CHE-PP11 Bindung: RL-Doppel-Trikot, gegenl. Flächenmasse: 195,9 g/m ² Beschichtungsanteil: 23,5 %					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	7,2 mm	TEN-CF800	800 tex		
90°	18 mm	VET-ARG640	640 tex	links	rechts
5-2					
Wirkfaden: CHE-PP11 Bindung: RL-Trikot, BV 1, gleich Flächenmasse: 190,1 g/m ² Beschichtungsanteil: 23,5 %					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	7,2 mm	TEN-CF800	800 tex		
90°	18 mm	VET-ARG640	640 tex	links	rechts
5-3					
Wirkfaden: CHE-PP11 Bindung: RL-Trikot, BV 1, gleich Flächenmasse: 190,1 g/m ² Beschichtungsanteil: 23,5 %					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	7,2 mm	TEN-CF400	400 tex		
90°	18 mm	VET-ARG640	640 tex		
0°	7,2 mm	TEN-CF400	400 tex	links	rechts

6-1					
Wirkfaden: CHE-PP11					
Bindung: RL-Trikot, BV 1, gleich					
Stichlänge: 1,8 mm					
Flächenmasse: 733,6 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	VET-ARG640	640 tex		
90°	1,8 mm	VET-ARG640	640 tex		
0°	3,6 mm	VET-ARG640	640 tex	links	rechts
6-2					
Wirkfaden: CHE-PP11					
Bindung: RL-Trikot, BV 1, gleich					
Stichlänge: 1,8 mm					
Flächenmasse: 729,6 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	VET-ARG640	640 tex		
90°	1,8 mm	VET-ARG640	640 tex		
0°	3,6 mm	VET-ARG640	640 tex	links	rechts
6-3					
Wirkfaden: CHE-PP11					
Bindung: RL-Trikot, BV 1, gleich					
Stichlänge: 1,8 mm					
Flächenmasse: 728,6 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	VET-ARG640	640 tex		
90°	1,8 mm	VET-ARG640	640 tex		
0°	3,6 mm	VET-ARG640	640 tex	links	rechts
6-4					
Wirkfaden: CHE-PP11					
Bindung: RL-Trikot, BV 1, entgegen					
Stichlänge: 1,8 mm					
Flächenmasse: 733,9 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	VET-ARG640	640 tex		
90°	1,8 mm	VET-ARG640	640 tex		
0°	3,6 mm	VET-ARG640	640 tex	links	rechts
6-5					
Wirkfaden: CHE-PP11					
Bindung: RL-Trikot, BV 1, entgegen					
Stichlänge: 1,8 mm					
Flächenmasse: 734,3 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	VET-ARG640	640 tex		
90°	1,8 mm	VET-ARG640	640 tex		
0°	3,6 mm	VET-ARG640	640 tex	links	rechts

6-6	Wirkfaden: CHE-PP11 Bindung: RL-Trikot, BV 1, entgegen Stichlänge: 1,8 mm Flächenmasse: 735,2 g/m ²		
Verstärkungsfaden			
Lage	Abstand	Material	Feinheit
0°	3,6 mm	VET-ARG640	640 tex
90°	1,8 mm	VET-ARG640	640 tex
0°	3,6 mm	VET-ARG640	640 tex
		links	rechts
6-7	Wirkfaden: CHE-PP11 Bindung: RL-Tuch, BV 2, gleich Stichlänge: 1,8 mm Flächenmasse: 741,9 g/m ²		
Verstärkungsfaden			
Lage	Abstand	Material	Feinheit
0°	3,6 mm	VET-ARG640	640 tex
90°	1,8 mm	VET-ARG640	640 tex
0°	3,6 mm	VET-ARG640	640 tex
		links	rechts
6-10	Wirkfaden: CHE-PP11 Bindung: RL-Trikot, BV 1, gleich Stichlänge: 2 mm Flächenmasse: 654,7 g/m ²		
Verstärkungsfaden			
Lage	Abstand	Material	Feinheit
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex
90°	1 mm	ITB-HG408	408 tex
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex
		links	rechts
6-11	Wirkfaden: CHE-PP11 Bindung: RL-Tuch, BV 2, gleich Stichlänge: 2 mm Flächenmasse: 667,2 g/m ²		
Verstärkungsfaden			
Lage	Abstand	Material	Feinheit
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex
90°	1 mm	ITB-HG408	408 tex
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex
		links	rechts
6-12	Wirkfaden: CHE-PP11 Bindung: RL-Trikot, BV 1, gleich Stichlänge: 2 mm Flächenmasse: 667,5 g/m ²		
Verstärkungsfaden			
Lage	Abstand	Material	Feinheit
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex
90°	1 mm	ITB-HG408	408 tex
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex
		links	rechts

6-13 Wirkfaden: CHE-PP11 Bindung: RL-Tuch, BV 2, gleich Stichlänge: 2 mm Flächenmasse: 680,0 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
90°	1 mm	ITB-HG408	408 tex	links	rechts
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
6-14 Wirkfaden: GSO-HG170 Bindung: RL-Trikot, BV 1, gleich Stichlänge: 1,8 mm Flächenmasse: 664,5 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
90°	1,8 mm	ITB-HG408	408 tex		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex	links	rechts
6-15 Wirkfaden: GSO-HG170 Bindung: RL-Trikot, BV 1, gleich Stichlänge: 3,6 mm Flächenmasse: 419,0 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
90°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
6-18 Wirkfaden: GSO-HG170 Bindung: RL-Trikot, BV 1, entgegen Stichlänge: 1,8 mm Flächenmasse: 693,4 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
90°	1,8 mm	ITB-HG408	408 tex	links	rechts
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
6-19 Wirkfaden: GSO-HG170 Bindung: RL-Trikot, BV 1, entgegen Stichlänge: 3,6 mm Flächenmasse: 459,0 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
90°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
				links	rechts

6-20 Wirkfaden: CHE-PP11 Bindung: RL-Trikot, BV 1, gleich Stichlänge: 1,8 mm Flächenmasse: 470,3 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
90°	1,8 mm	ITB-HG408	408 tex		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex	links	rechts
6-21 Wirkfaden: CHE-PP11 Bindung: RL-Trikot, BV 1, gleich Stichlänge: 1,8 mm Flächenmasse: 466,9 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
90°	1,8 mm	ITB-HG408	408 tex		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex	links	rechts
6-22 Wirkfaden: CHE-PP11 Bindung: RL-Trikot, BV 1, entgegen Stichlänge: 1,8 mm Flächenmasse: 469,0 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
90°	1,8 mm	ITB-HG408	408 tex		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex	links	rechts
6-23 Wirkfaden: CHE-PP11 Bindung: RL-Trikot, BV 1, entgegen Stichlänge: 1,8 mm Flächenmasse: 470,8 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
90°	1,8 mm	ITB-HG408	408 tex		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex	links	rechts
6-24 Wirkfaden: CHE-PP11 Bindung: RL-Tuch, BV 2, gleich Stichlänge: 1,8 mm Flächenmasse: 474,4 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
90°	1,8 mm	ITB-HG408	408 tex		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex	links	rechts

6-25 Binfaden: CHE-PP32 Bindung: RL Stichlänge: n. a. Flächenmasse: 380,8 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
90°	4 mm	ITB-HG408	2 x 408 tex		
6-26 Binfaden: ITB-HG138 Bindung: RL Stichlänge: n. a. Flächenmasse: 815 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	3 x 408 tex		
90°	3,6 mm	ITB-HG408	3 x 408 tex		
6-27 Dreherfaden: CHE-PP32 Bindung: Dreherbindung Stichlänge: n. a. Flächenmasse: 246,5 g/m ²					
Verstärkungsfaden					
Lage	Abstand	Material	Feinheit		
0°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		
90°	3,6 mm	ITB-HG408	408 tex		

10.7 Variantenbewertung

10.7.1 Dominanzmatrizen

Kriterium 1.1: geringer Platzbedarf

	B1	C1	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3
B1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
C1	1	-	0	0	0	0	0	0	
D1	1	1	-	0,5	0,5	0,5	0	0	0
D2	1	1	0,5	-	0,5	0,5	0	0	0
D3	1	1	0,5	0,5	-	0,5	0	0	0
D4	1	1	0,5	0,5	0,5	-	0	0	0
E1	1	1	1	1	1	1	-	0,5	0,5
E2	1	1	1	1	1	1	0,5	-	0,5
E3	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	-
Summe	8	7	4,5	4,5	4,5	4,5	1	1	1

Kriterium 2.1: sichere Fixierung der Zwischenkette

	B1	C1	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3
B1	-	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
C1	1	-	1	1	1	1	1	1	1
D1	0,5	0	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
D2	0,5	0	0,5	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
D3	0,5	0	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0,5	0,5
D4	0,5	0	0,5	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0,5
E1	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0,5	0,5
E2	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0,5
E3	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
Summe	4,5	0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

Kriterium 2.2: schädigungsarme Verarbeitung

Bei allen Varianten wird das Risiko einer Schädigung der Fasern in den Fadenlagen als gleichermaßen gering eingeschätzt.

Kriterium 2.3: Eignung für gitterförmige Nähwirkstoffe

	B1	C1	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3
B1	-	1	0	0	0	1	1	0	1
C1	0	-	0	0	0	1	1	0	1
D1	0	1	-	0	0	1	1	0	1
D2	0	1	0	-	0	1	1	0	1
D3	0	1	0	0	-	1	1	0	1
D4	0	0	0	0	0	-	0,5	0	0,5
E1	0	0	0	0	0	0,5	-	0	0,5
E2	0	1	0	0	0	1	1	-	1
E3	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0	-
Summe	0	5	0	0	0	7	7	0	7

Kriterium 2.4: geringe Veränderung der Biegesteifigkeit

	B1	C1	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3
B1	-	1	1	1	0,5	1	1	1	1
C1	0	-	0	0	0	0,5	0	0	0,5
D1	0	1	-	1	0	1	0,5	1	1
D2	0	1	0	-	0	1	0	0,5	1
D3	0,5	1	1	1	-	1	1	1	1
D4	0	0,5	0	0	0	-	0	0	0,5
E1	0	1	0,5	1	0	1	-	1	1
E2	0	1	0	0,5	0	1	0	-	1
E3	0	0,5	0	0	0	0,5	0	0	-
Summe	0,5	7	2,5	4,5	0,5	7	2,5	4,5	7

Kriterium 2.5: Eignung für Einsatz mit Kunststoffmatrix

	B1 ¹³	C1	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3
B1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
C1	1	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
D1	1	0,5	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
D2	1	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
D3	1	0,5	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0,5	0,5
D4	1	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0,5
E1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0,5	0,5
E2	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0,5
E3	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
Summe	8	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

¹³ wenn in Form eines einaxialen Nähwirkstoffs zugeführt

Kriterium 2.6: Eignung für Einsatz mit Betonmatrix

	B1	C1	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3
B1	-	1	0	0	0	1	1	0	1
C1	0	-	0	0	0	0,5	1	0	1
D1	0	1	-	0	0	1	1	0	1
D2	0	1	0	-	0	1	1	0	1
D3	0	1	0	0	-	1	1	0	1
D4	0	0,5	0	0	0	-	1	0	1
E1	0	0	0	0	0	0	-	0	0,5
E2	0	1	0	0	0	1	1	-	1
E3	0	0	0	0	0	0	0,5	0	-
Summe	0	5,5	0	0	0	5,5	7,5	0	7,5

Kriterium 3.1: nachrüstbar für bestehende Maschinen

	B1	C1	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3
B1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
C1	1	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0
D1	1	0,5	-	0,5	0,5	0,5	0	0	0
D2	1	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0	0	0
D3	1	0,5	0,5	0,5	-	0,5	0	0	0
D4	1	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0	0	0
E1	1	1	1	1	1	1	-	0	0
E2	1	1	1	1	1	1	0	-	0
E3	1	1	1	1	1	1	0	0	-
Summe	8	5	5	5	5	5	0	0	0

Kriterium 3.2: einfache Bedienung

	B1	C1	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3
B1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
C1	1	-	0	0	0	0	0	0	0
D1	1	1	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
D2	1	1	0,5	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
D3	1	1	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0,5	0,5
D4	1	1	0,5	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0,5
E1	1	1	0,5	0,5	0,5		-	0,5	0,5
E2	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0,5
E3	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
Summe	8	7	3	3	3	3	3	3	3

Kriterium 3.3: wartungsarm

	B1	C1	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3
B1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
C1	1	-	0	0	0	0	0	0	0
D1	1	1	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
D2	1	1	0,5	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
D3	1	1	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0,5	0,5
D4	1	1	0,5	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0,5
E1	1	1	0,5	0,5	0,5		-	0,5	0,5
E2	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0,5
E3	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
Summe	8	7	3	3	3	3	3	3	3

Kriterium 3.4: geringer Reinigungsbedarf

	B1	C1	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3
B1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
C1	1	-	0	0	0	0	0	0	0
D1	1	1	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
D2	1	1	0,5	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
D3	1	1	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0,5	0,5
D4	1	1	0,5	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0,5
E1	1	1	0,5	0,5	0,5		-	0,5	0,5
E2	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-	0,5
E3	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
Summe	8	7	3	3	3	3	3	3	3

Kriterium 4.1: geringe Investitionskosten

	B1	C1	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3
B1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
C1	1	-	0	0	0	0	0	0	0
D1	1	1	-	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0
D2	1	1	0,5	-	0,5	0	0,5	0,5	0
D3	1	1	0,5	0,5	-	0	0,5	0,5	0
D4	1	1	0,5	0,5	0,5	-	0,5	0,5	0,5
E1	1	1	0,5	0,5	0,5	0	-	0,5	0
E2	1	1	0,5	0,5	0,5	0	0,5	-	0
E3	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-
Summe	8	7	3	3	3	0,5	3	3	0,5

Kriterium 4.2: geringer Energieverbrauch

	B1	C1	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3
B1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
C1	1	-	0	0	0	0	0	0	0
D1	1	1	-	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1
D2	1	1	0,5	-	0,5	0,5	0,5	1	1
D3	1	1	1	0,5	-	0,5	0,5	1	1
D4	1	1	0,5	0,5	0,5	-	0,5	1	1
E1	1	1	0	0,5	0,5	0,5	-	1	1
E2	1	1	0	0	0	0	0	-	0,5
E3	1	1	1	0	0	0	0	0,5	-
Summe	8	7	3	2	2	2	2	5,5	5,5

Kriterium 4.3: geringe Materialkosten

	B1	C1	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3
B1	-	1	1	1	1	1	1	1	1
C1	0	-	0	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5
D1	0	1	-	1	0,5	1	1	1	1
D2	0	0,5	0	-	0	0,5	0,5	0,5	0,5
D3	0	1	0,5	1	-	1	1	1	1
D4	0	0,5	0	0,5	0	-	0,5	0,5	0,5
E1	0	0,5	0	0,5	0	0,5	-	0,5	0,5
E2	0	0,5	0	0,5	0	0,5	0,5	-	0,5
E3	0	0,5	0	0,5	0	0,5	0,5	0,5	-
Summe	0	5,5	1,5	5,5	1,5	5,5	5,5	5,5	5,5

10.7.2 BewertungslisteKriterium 1.1: geringer Platzbedarf ($g_{ges} = 0,05$)

Lösung	Wert	gew. Wert	Begründung
B1	4	0,2	kein zusätzlicher Platzbedarf
C1	3	0,15	geringer Platzbedarf für Heizeinrichtung
D1	2	0,1	größerer Platzbedarf für Auftragsvorrichtung
D2	2	0,1	größerer Platzbedarf für Auftragsvorrichtung
D3	2	0,1	größerer Platzbedarf für Auftragsvorrichtung
D4	2	0,1	größerer Platzbedarf für Auftragsvorrichtung
E1	0	0	großer Platzbedarf für Auftrag und Fixierung
E2	0	0	großer Platzbedarf für Auftrag und Fixierung
E3	0	0	großer Platzbedarf für Auftrag und Fixierung

Kriterium 2.1: sichere Fixierung der Zwischenkette ($g_{ges} = 0,15$)

Lösung	Wert	gew. Wert	Begründung
B1	4	0,6	Vorfixierung durch Nähwirken sehr gut möglich
C1	1	0,15	nach eigenen Erfahrungen am <i>ITM</i> Lösung nicht sehr zuverlässig
D1	3	0,45	Aufgrund von Vorversuchen und bisherigen Arbeiten am <i>ITM</i> wird bei diesen Varianten von einer guten Sicherheit der Fixierung ausgegangen
D2	3	0,45	
D3	3	0,45	
D4	3	0,45	
E1	3	0,45	
E2	3	0,45	
E3	3	0,45	

Kriterium 2.3: Eignung für gitterförmige Nähwirkstoffe ($g_{ges} = 0,1$)

Lösung	Wert	gew. Wert	Begründung
B1	0	0	eine Kettfadenlage mit Abständen zwischen den Fäden kann nicht vorfixiert hergestellt werden
C1	2	0,2	grundsätzlich für Gitter geeignet, jedoch nach eigenen Erfahrungen mit Qualitätsproblemen
D1	0	0	nicht geeignet wegen vollflächigem Auftrag
D2	0	0	nicht geeignet wegen definiertem Walzenmuster und unregelmäßiger Fadenanordnung (insbesondere Schuss)
D3	0	0	nicht geeignet wegen fester Düsen- und unregelmäßiger Fadenanordnung (insbesondere Schuss)
D4	4	0,4	gut geeignet bei Abstimmung der Düsenanzahl/-anordnung auf die möglichen Gittervarianten
E1	4	0,4	gut geeignet (Überschuss auffangen)
E2	0	0	siehe D2
E3	4	0,4	siehe D4

Kriterium 2.4: geringe Veränderung der Biegesteifigkeit ($g_{ges} = 0,05$)

Lösung	Wert	gew. Wert	Begründung
B1	0 (2)	0 (0,1)	bei Verwendung stoffschlüssig gebundener Gelege deutlicher Anstieg, bei Nähwirkstoff moderat
C1	3	0,15	geringer Bindemittelanteil
D1	1	0,05	hoher Bindemittelanteil
D2	2	0,1	mittlerer Bindemittelanteil
D3	0	0	sehr hoher Bindemittelanteil
D4	3	0,15	zielgerichteter, geringer Bindemittleinsatz
E1	1	0,05	hoher Bindemittelanteil
E2	2	0,1	mittlerer Bindemittelanteil
E3	3	0,15	zielgerichteter, geringer Bindemittleinsatz

Kriterium 2.5: Eignung für Einsatz mit Kunststoffmatrix ($g_{ges} = 0,1$)

Lösung	Wert	gew. Wert	Begründung
B1	4	0,4	bei Herstellung mittels Nähwirken kein zusätzliches Bindemittel
C1	1	0,1	zusätzliches Bindemittel, mögliche Verwendung und zulässigen Anteil mit Endanwendung abstimmen
D1	1	0,1	
D2	1	0,1	
D3	1	0,1	
D4	1	0,1	
E1	1	0,1	
E2	1	0,1	
E3	1	0,1	

Kriterium 2.6: Eignung für Einsatz mit Betonmatrix ($g_{ges} = 0,05$)

Lösung	Wert	gew. Wert	Begründung
B1	0	0	kein Gitter möglich
C1	2	0,1	handhabungsgerechte Fixierung nicht gesichert
D1	0	0	kein Gitter möglich
D2	0	0	kein Gitter möglich
D3	0	0	kein Gitter möglich
D4	2	0,1	zusätzliche Binderkomponente, evtl. Verbundstörung
E1	3	0,15	Binder kann auf nachfolgende Beschichtung abgestimmt werden
E2	0	0	kein Gitter möglich
E3	3	0,15	siehe E1

Kriterium 3.1: nachrüstbar für bestehende Maschinen ($g_{ges} = 0,04$)

Lösung	Wert	gew. Wert	Begründung
B1	4	0,16	Abrolleinrichtung standardmäßig verfügbar
C1	2	0,08	Maschinenverlängerung für Fixiereinrichtung nötig
D1	2	0,08	Maschinenverlängerung für Auftragsvorrichtung nötig
D2	2	0,08	
D3	2	0,08	
D4	2	0,12	
E1	1	0,04	Maschinenverlängerung für Auftrags- und Fixiereinrichtung nötig
E2	1	0,04	
E3	1	0,04	

Kriterium 3.2: einfache Bedienung ($g_{ges} = 0,06$)

Lösung	Wert	gew. Wert	Begründung
B1	4	0,24	etabliertes Verfahren, kaum zusätzliche Arbeitsschritte
C1	3	0,18	einfaches Vorgehen unter Nutzung der vorhandenen Technik
D1	1	0,06	mehrere zusätzliche Bedienschritte und Arbeitsaufwand
D2	1	0,06	
D3	1	0,06	
D4	1	0,06	
E1	1	0,06	
E2	1	0,06	
E3	1	0,06	

Kriterium 3.3: wartungsarm ($g_{ges} = 0,06$)

Lösung	Wert	gew. Wert	Begründung
B1	4	0,24	keine Bindemittel, keine zusätzlichen Vorrichtungen
C1	3	0,18	Zusatzeinrichtungen mit geringem Verschleiß
D1	1	0,06	zusätzlicher Wartungsaufwand für Auftragsvorrichtungen
D2	1	0,06	
D3	1	0,06	
D4	1	0,06	
E1	1	0,06	
E2	1	0,06	
E3	1	0,06	

Kriterium 3.4: geringer Reinigungsbedarf ($g_{ges} = 0,04$)

Lösung	Wert	gew. Wert	Begründung
B1	4	0,16	keine Verunreinigungen
C1	3	0,12	kaum Verunreinigungen
D1	1	0,04	viele Verunreinigungen, regelmäßiges Reinigen der Auftragsvorrichtungen sowie der Maschine notwendig, nicht gut geeignet für Start-Stopp-Betrieb
D2	1	0,04	
D3	1	0,04	
D4	1	0,04	
E1	1	0,04	
E2	1	0,04	
E3	1	0,04	

Kriterium 4.1: geringe Investitionskosten ($g_{ges} = 0,075$)

Lösung	Wert	gew. Wert	Begründung
B1	4	0,3	Zuführeinrichtung zumeist vorhanden
C1	3	0,225	Installation Heizeinrichtung
D1	2	0,15	Investition für Auftragseinrichtung
D2	2	0,15	
D3	2	0,15	
D4	0	0	große Anzahl Düsen benötigt
E1	1	0,075	Investition für Auftrags- und Fixiereinrichtung
E2	1	0,075	
E3	0	0	große Anzahl Düsen benötigt

Kriterium 4.2: geringer Energieverbrauch ($g_{ges} = 0,1$)

Lösung	Wert	gew. Wert	Begründung
B1	4	0,4	kein Energieverbrauch
C1	3	0,3	Energieverbrauch durch Heizeinrichtung
D1	1	0,1	konstanter Energieverbrauch zum Erweichen der Schmelze
D2	1	0,1	
D3	1	0,1	
D4	1	0,1	
E1	1	0,1	Druckluft und Fixiereinrichtung
E2	2	0,2	Auftrags- und Fixiereinrichtung
E3	2	0,2	

Kriterium 4.3: geringe Materialkosten ($g_{ges} = 0,075$)

Lösung	Wert	gew. Wert	Begründung
B1	1	0,075	zur externen Fixierung der Fadenlage höherer Binderanteil als in der Maschine nötig
C1	2	0,15	mittlerer Binderanteil
D1	1	0,075	hoher Binderanteil
D2	2	0,15	mittlerer Binderanteil
D3	1	0,075	hoher Binderanteil
D4	2	0,15	mittlerer Binderanteil
E1	2	0,15	
E2	2	0,15	
E3	2	0,15	