

IVW - Schriftenreihe Band 31

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

Christian Weimer

Zur nähtechnischen Konfektion von
textilen Verstärkungsstrukturen für
Faser-Kunststoff-Verbunde

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Weimer, Christian:

Zur nähtechnischen Konfektion von textilen Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde / Christian Weimer. – Kaiserslautern : IVW, 2002

(IVW-Schriftenreihe ; Bd. 31)

Zugl.: Kaiserslautern, Univ., Diss., 2002

ISBN 3-934930-27-1

Herausgeber: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Erwin-Schrödinger-Straße
Universität Kaiserslautern, Gebäude 58
67663 Kaiserslautern

Verlag: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: Universität Kaiserslautern
ZBT – Abteilung Foto-Repro-Druck

D-386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2002

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 1615-021X
ISBN 3-934930-27-1

**Zur nähtechnischen Konfektion von textilen
Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde**

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christian Weimer

aus Pirmasens

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Juni 2002

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. D. Wüstenberg

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. M. Neitzel

Prof. Dr.-Ing. H. Planck

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH in der Zeit von 1998 bis 2002.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. M. Neitzel, der mir stets Vertrauen entgegengebracht und die Möglichkeit eröffnete, diese Arbeit innerhalb großzügig gewährter Freiräume durchzuführen. Die kritischen und wertvollen Anregungen waren für das Gelingen der Arbeit wesentlich. Für die Übernahme des Korreferates bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. H. Planck, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik an der Universität Stuttgart. Prof. Dr.-Ing. D. Wüstenberg sei an dieser Stelle für die Übernahme des Vorsitzes in der Prüfungskommission herzlich gedankt. Besonderer Dank gebührt Dr.-Ing. P. Mitschang, Abteilungsleiter Verarbeitungstechnik, für die fachliche Unterstützung und vertrauensvolle Begleitung der Arbeit.

Den Mitarbeitern der IVW GmbH, studentischen Hilfskräften sowie den Studien- und Diplomarbeitern danke ich für die fachliche und moralische Unterstützung. Hervorzuheben ist hierbei das gesamte LCM-Team innerhalb der Verarbeitungstechnik. Für das überdurchschnittliche Engagement möchte ich Volker Disandt einen ganz besonderen Dank aussprechen, der mich stets bei der Planung, Durchführung und Auswertung zahlreicher Versuche und Experimente unterstützte. Für die kollegiale Zusammenarbeit und überaus positive Arbeitsatmosphäre sollen die Kollegen C. Kissinger, A. Wöginger, C. Mayer, F. Weyrauch und A. Ogale besondere Erwähnung finden. Hervorheben möchte ich auch die Unterstützung verschiedener industrieller Kooperationspartner, insbesondere die enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit Dr.-Ing. D. Huybrechts und C. Lo Faro.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir durch ihre kontinuierliche Unterstützung und vorrausschauende Förderung diesen akademischen und beruflichen Werdegang, auch mit einigem persönlichem Verzicht, ermöglicht haben. Meiner Freundin Dr. Kerstin Gutberlet gilt der größte Dank für die Durchführung der Korrekturen sowie die moralische Unterstützung während der Endphase der Arbeit.

Inhalt

Formelzeichen	III
Abkürzungen	V
Abstract.....	VII
1 Einleitung.....	1
2 Preformtechnik für die Harzinjektionsverfahren	4
2.1 Zielsetzung der Arbeit	5
2.2 Anforderungen	6
2.3 Preformverfahren	7
2.3.1 Grundlagen.....	8
2.3.2 Direkte Preformtechniken	11
2.3.3 Direkte textiltechnische Preformverfahren.....	12
2.3.4 Sequentielle Preformverfahren	14
2.4 Preform-Konstruktion	19
3 Erweiterung des Preformspektrums auf Basis der TR-Technologie	21
3.1 Eingesetzte Halbzeuge und Nähgarne.....	21
3.2 Nahteinteilung	25
3.3 Funktionserweiterung.....	28
3.3.1 Funktionselemente	28
3.3.2 Positionierung von zusätzlichen Verstärkungselementen.....	31
3.4 Durchgängige Prozesskette	31
3.5 Ergebnis.....	33
4 Bewertung der Nähtechnik aus Sicht der FKV-Verarbeitung	33
4.1 Qualitative Wirkpaarungsanalyse.....	34
4.2 Auswahl eines geeigneten Stichtyps für FKV.....	37
4.2.1 Kettenstich.....	39
4.2.2 Blindstich	40
4.2.3 OSS [®] – Nähtechnik	43
4.2.4 Überwendlichstiche	46
4.2.5 Tufting	49
4.2.6 Doppelsteppstich	50

4.2.7	Vergleich zum Fadenverbrauch.....	58
4.2.8	Vergleich hinsichtlich Nähstichdichte und Dickenverstärkung	61
4.2.9	Einsatzfähigkeit der Stichtypen für Preformingaufgaben	72
4.2.10	Zwischenfazit zur Auswahl eines FKV-kompatiblen Stichtyps	74
4.3	Auswahl eines Transportsystems für Standardnähmaschinen.....	74
4.4	Materialkompaktierung durch den Nähvorgang auf Standnähmaschinen	78
4.5	Interpretation des Fadenkraftverlaufs und Ableitung von QM-Elementen	80
4.6	Fazit zur Selektion von Nähmaschinenelementen	84
5	Beeinflussung der Injektionstechnik durch TR	85
5.1	Bezug zur Permeabilität.....	87
5.2	Bezug zur Kompaktierung und zu Kompaktierungsmodellen.....	90
5.3	Auswahl wesentlicher Merkmale	95
6	Charakterisierung der Faserverschiebung	95
6.1	Faserverschiebung in der Ebene	95
6.2	Faserverschiebung im Querschnitt.....	99
6.3	Konsequenzen für das nähtechnische Preforming.....	100
7	Analyse der Kompaktierungseigenschaften.....	101
7.1	Einfluss von makroskopischen Preformeigenschaften	106
7.2	Nähparameter – Presserfußkraft und Fadenkraft.....	107
7.3	Qualitative Auswertung der Nähparameter	110
8	Betrachtung zur Wirtschaftlichkeit.....	112
8.1	LCM-Produktivität und Preforming-Aufwand	112
8.2	Preforming – Kosten	119
8.3	Kritische Preformtiefe	121
9	Zusammenfassung.....	123
10	Referenzen.....	125

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$A_{Preform}$	[m ²]	Grundfläche einer Preform
a	[m/s ²]	Beschleunigung
a, b	[m]	Ellipsenhalfachsen in x- bzw. y-Richtung
α	[°]	Umschlingungswinkel
B	[1]	Kompaktierungssteifheit nach Robitaille
D	[m]	Durchmesser, Garndurchmesser
E_x, E_y	[Gpa]	E-Modul in x- bzw. Y-Richtung des Laminates
F_k	[N]	Kompaktierungskraft
F_{OF}	[N]	Zugkraft Oberfaden
F_{OF}	[N]	Zugkraft Unterfaden
c_i	[N/m]	Kompaktierungssteifigkeit
c_l	[N/m]	Kompaktierungssteifigkeit bei linearem Ansatz
c	[1]	Power-Law-Koeffizient
G_{IC}	[J/m ²]	Mode – I Bruchenergie
G_{IIC}	[J/m ²]	Mode – II Bruchenergie
GW	[tex]	Garngewicht
$G_{Preform}$	[g/m ²]	Gewicht einer Preform
H	[mm]	Dicke einer Preform, Nähgutdicke
$H_{Einstich}$	[mm]	Einstichtiefe der Nadel
h_i	[mm]	Dicke einer Einzellage im trockenen, nicht kompaktierten Zustand
h_a	[mm]	Dicke einer Einzellage im trockenen, kompaktierten Zustand
K	[m ²]	Permeabilität
K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}	[m ²]	Hauptpermeabilität
K_{fix}	[€]	Fixkosten
K_{var}	[€]	Variable Kosten
$L_{Garn(Einzelstich)}$	[m]	Garnverbrauch pro Einzelstich unabhängig vom Stichtyp
$L_{Doppelsteppstich}$	[m]	Garnverbrauch pro Einzelstich eines Doppelsteppstichs
$L_{Oberfaden}$	[m]	Oberfadenanteil des Garnverbrauchs pro Einzelstich eines Doppelsteppstichs bzw. 2-Faden-Kettenstichs
$L_{Unterfaden}$	[m]	Unterfadenanteil des Garnverbrauchs pro Einzelstich eines Doppelsteppstichs bzw. 2-Faden-Kettenstichs
$L_{Einfadenketten}$	[m]	Garnverbrauch pro Einzelstich eines Einfadenkettenstichs
$L_{2-Fadenketten}$	[m]	Garnverbrauch pro Einzelstich eines 2-Faden-Kettenstichs
$L_{Blindstich}$	[m]	Garnverbrauch pro Einzelstich eines Blindstichs
L_{OSS}	[m]	Garnverbrauch pro Einzelstich eines OSS-Stichs

$L_{\text{Dickenrichtung}}$	[m]	Garnanteil des Garnverbrauchs pro Einzelstich zur Dickenverstärkung
$L_{\text{Garn(Naht)}}$	[m]	Garnverbrauch der Nahtstrecke
l	[1]	Charakteristischer Parameter im Potenz-Ansatz
l	[%]	Kalkulatorischer Zinssatz, mit dem das gebundene Kapital zu verzinsen ist
l, l_{ges}	[m]	Länge, Gesamtlänge
m	[1]	Charakteristischer Parameter im Potenz-Ansatz
N_m	[mm/100]	Nadelstärke
N_m	[1000/tex]	Nähgarnfeinheit
n	[1]	Anzahl Verstärkungslagen
n	[1]	Anzahl der Nutzungsperioden
n	[1]	Power-Law- Exponentialkoeffizient
p	[Pa]	Flächenlast, Injektionsdruck
P_k	[Pa]	Kompaktierungsdruck
ΔP	[Pa]	Druckgradient
r_N	[mm]	Nähradius
R^2	[1]	Bestimmtheitskoeffizient
RW_n	[€]	Restwert am Ende der Nutzungsperiode
RW_{n-1}	[€]	Restwert am Beginn des letzten Nutzungsjahres
s_i	[mm]	Federweg / Kompaktierungsweg
SA	[1]	Stichanzahl
$Stck/a$	[1]	Produktionsvolumen in Stück pro Jahr
t	[s]	Zeit
t_k	[s]	Kompaktierungszeit
t_e	[s]	Zeit zum Entspannen einer Preform / Faserreorientierung
t_{zyk}	[s]	Zykluszeit pro Stück
tex	[g/1000m]	Garngewicht bezogen auf 1000 m
$t_{\text{näh}}$	[s]	Nähzeit
V_f	[%]	Faservolumengehalt
$V_{\text{näh}}$	[SPM]	Nähgeschwindigkeit
V_{rel}	[mm/s]	Rel. Nähfadengeschwindigkeit
\bar{v}	[m/s]	Fließgeschwindigkeit, Geschwindigkeit allgemein
η	[mPa s]	Viskosität
η_{naht}	[1]	Wirkungsgrad einer Naht
μ	--	Reibkoeffizient
φ_f	[1]	Faservolumen
φ_a	[%]	Limitierender Faservolumengehalt (P = 0 bar)
φ_{fgrenz}	[%]	Grenzfaservolumengehalt
ψ z-Anteil	[%]	Faseranteil in Dickenrichtung
ψ Z-Gewicht	[g]	Flächengewicht Verstärkungsanteil in Dickenrichtung
ν_{x-y}, ν_{x-y}	[1]	Querkontraktionszahlen

Abkürzungen

Kurzform	Bedeutung
3k, 1k	3000 bzw. 1000 Einzelfilamente bei Kohlenstofffaserbündeln
a	Annum
ARTM	Advanced Resin Transfer Moulding
AVK-TV	Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe – Technische Vereinigung e.V.
AW	Anschaffungskosten
BMC	Bulk Moulding Compound
CAD	Computer Aided Design
CAI	Compression After Impact
CF	Kohlenstofffaser
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CNC	Computer Numeric Control
CRC	Corporate Research Center
DFP	Directed Fibre Preforming
DKS	Doppelkettenstich
DPRTM	Differential Pressure Resin Transfer Moulding
DSS	Doppelsteppstich
EP	Epoxidharz
FeMi	Fertigungsmittel
FIV	Flächeninjektionsverfahren
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FPA	Final-Preform-Assembly
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GMT	Glass-Mat-Reinforced-Thermoplastic-Material
HLW	Höhenleitwerksschwinge
HTA	Handelsname der Firma Tenax Fibers GmbH & Co. KG
ILSS	Interlaminare Scherfestigkeit
KEVLAR	Handelsname für p-Aramidprodukte der Firma DuPont
LCM	Liquid Composite Moulding
LFI	Liquid Film Infusion
LFT	Long-Fibre-Thermoplastic-Material
MAG	Multi-Axial-Gelege
Max.	Maximal
Min	Minute
NA	Nahtabstand
NASA	National Aeronautics und Space Administration
NIS	Nadel-im-Stoff (Winkelgradbereich)
NF	Nadelfaden

NOMEX	Handelsname für m-Aramidprodukte der Firma DuPont
OF	Oberfaden
OS – Textiltechniken	One-Step-Textiltechnik
OSS [®]	One-Side-Stitching
OT	Oberer Totpunkt
P4	Powdered Programmable Preforming Process
PA, PA 6.6	Polyamid, Polyamid 6.6
PBO	Polyphenolen-2,6-benzobisoxazol
PES	Bezeichnung für Polyester-Fasermaterialien
QM	Qualitätsmanagement
QS	Qualitätssicherung
RIFT	Resin Infusion under Flexible Tooling
RTM	Resin Transfer Moulding
S-RIM	Structural Resin Injection Moulding
SCP	Stitch-Cut-Process
SCRIMP [®]	Seeman Composite Resin Infusion Moulding Process
SB	Stichbreite
SL	Stichlänge
SLI	Single Line Injection
SMARTweave [®]	Sensor Mounted As Reinforcing Thread
SMC	Sheet Moulding Compound
SPM	Stiche pro Minute
Stck	Stück
TERTM	Thermal Expansion Resin Transfer Moulding
TFP	Tailored Fiber Placement
T900 2-ply	Handelsname der Firma Toray. 2-faches Kohlenstofffasernähgarn
TR	Tailored Reinforcement
UF	Unterfaden
UD	Unidirektional
UP	Ungesättigter Polyester
UT	Unterer Totpunkt
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding
VI	Vacuum Infusion
VE	Vinylester
AS	Durchschnittliche Abschreibung pro Periode
ZK	Durchschnittliche Zinsen pro Periode
Zylon	Handelsname von Toyobo für PBO Fasern

Abstract

The further exploitation of Liquid-Composite-Moulding Technologies (LCM) for the manufacture of Fiber-Reinforced-Plastics (FRP) relies on an eligible preforming process. Preforming of fibrous reinforcements aspires the manufacture of dry skeletons of the fiber assembly with the desired fiber orientation based on a pre-defined fiber type. The LCM processing must be maintained by the preforming technique. However, FRP part properties - given from fiber orientations - should not be affected.

Sewing technologies, in all their varieties, can be applied as very flexible preforming methods. Analogies between making-up dry reinforcement structures and the classical field of sewing, e.g. garment manufacture, led to a substantial progress in technologies available for preforming as well as to increased economical benefits through the application of sew-preforming.

A comprehensive understanding of the application of sewing technologies for FRP – from the treatment of a semi-finished product to the infusion of a stitched preform – is the basis for the design of an all new process chain.

The present work classifies this new preforming method within the existing technologies. Furthermore, critical sewing machine elements are evaluated regarding FRP compatibility. Stitching parameters and their impact on the reinforcement quality as well as the FRP processing (LCM) are discussed.

Focusing on the economic efficiency of the sewing preforming technology, the critical number of parts for selecting the right preform technology is discussed. The new process chain enables the selection of the critical vertical range of preform manufacture.

The large variety of preform design parameters, e. g. stitch density, needle thread tension, seam type, sub-preform-structures etc., requires a “Preform-Engineering”, covering an interface between preform manufacturing and FRP-part design. This parallel engineering of part-, preform- and process-design leads to a global reflection of the LCM technology. Thus, FRP part quality can be raised.

1 Einleitung

In Politik und Gesellschaft besteht seit langem die Forderung nach einer Reduzierung der Umweltbelastung durch individuelle Mobilität. In diesem Zusammenhang gewinnt im Fahrzeug- oder im Luftfahrtfahrzeugbau bzw. in der Bahntechnik die Leichtbauweise mit Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffen (FKV) an Bedeutung [1, 2, 3, 4]. Gleichzeitig werden im Anlagen- und Maschinenbau bzw. im Bauwesen technologische Anforderungen erreicht, die nur durch den konsequenten Einsatz neuartiger Werkstoffe erfüllt werden können [5, 6, 7]. Polymere Verbundwerkstoffe, wie z.B. kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) oder glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK), sollen hierbei oftmals metallische Komponenten ersetzen.

Die Substitution von metallischen Komponenten durch FKV-Komponenten ist im allgemeinen mit einer Gewichtsreduzierung und einer gesteigerten Funktionalität verbunden. Ein nachhaltig wachsender Einsatz solcher Werkstoffe ist bis dato jedoch durch fehlende wirtschaftliche Fertigungsverfahren begrenzt. Die Harzinjektionstechnologien zur Herstellung von CFK- und GFK-Bauteilen stellen einen Ansatz zur Etablierung eines flexiblen Fertigungsverfahrens - sowohl im Sinne der technologischen Anforderungen als auch der Wirtschaftlichkeit - dar.

Im Gegensatz zum Harzinjektionsverfahren ist das für FKV-Strukturbauteile standardisierte Verfahren, die Prepreg-Technologie, sehr kostenintensiv, bietet aber zur Auslegung von Leichtbaukomponenten das größte Erfahrungspotenzial [8, 9, 10]. Bauteile im Bereich des Maschinen- und Fahrzeugbaus sind bezüglich Komplexität, Größe und Stückzahl bei mittleren Serien (bis 50.000 Einheiten pro Jahr) für die Harzinjektionsverfahren (LCM – Liquid Composite Moulding) – ein flüssiges Harzsystem wird in eine trockene Preform infiltriert - prädestiniert [11, 12]. Diese LCM-Verfahren bieten darüber hinaus ein erhebliches Entwicklungspotenzial zur weiteren Steigerung der Prozesssicherheit im Bereich neuartiger Injektionstechnologien, Werkzeugtechnologien, Preformtechnologien [13] und Matrixsysteme. Die Märkte für Harzinjektionsverfahren entstehen bzw. expandieren derzeit innerhalb unterschiedlicher Branchen. Hauptgrund für diese starke Erweiterung des LCM-Einsatzbereiches ist zunächst die Möglichkeit zur Substitution der klassischen Handlaminieretechniken bzw. der Faserspritzverfahren. Andererseits

besteht aber auch die Möglichkeit zur Herstellung qualitativ sehr hochwertiger Strukturbauteile. Mit der Zahl der Anwendungen steigt zudem die Vielfalt der Anforderungen an die Faserverstärkungsstruktur der Preform. Das Wachstumspotenzial der Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe - und hier insbesondere der Harzinjektionstechnik - ist in Bild 1-1 dargestellt. Die Zuwachsraten in der LCM-Technik (im Bild 1-1 als RTM – Resin Transfer Moulding - zusammengefasst) belegen die Einsatzfähigkeit dieses Verfahrens, jedoch ist die Anwendung dieser Technologien zur Herstellung von Hochleistungsfaserkunststoffverbunden noch eingeschränkt.

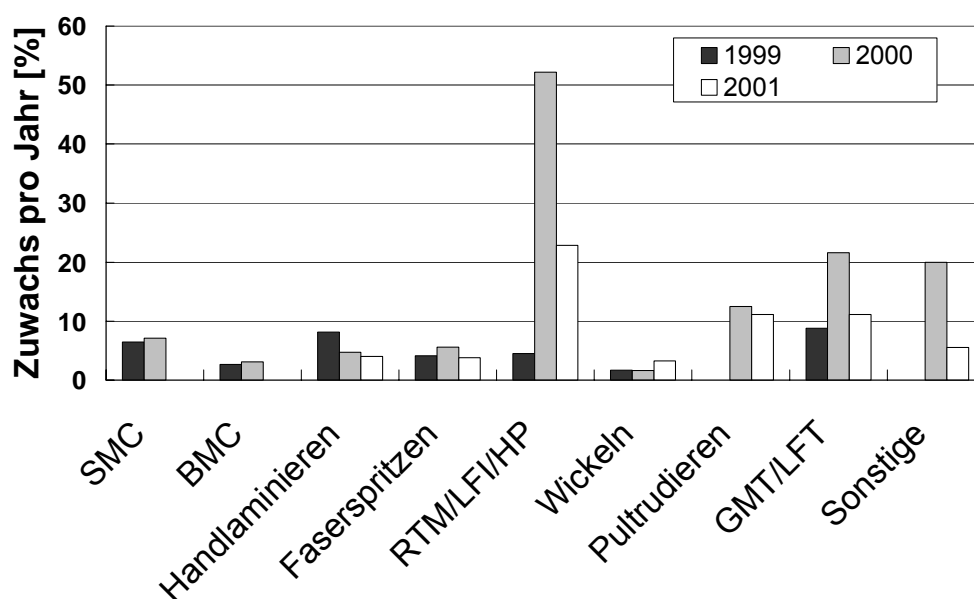


Bild 1-1: Übersicht über das Wachstum der RTM-Anwendungen seit 1999 [14, 15]

Derzeit ist eine Methode zur Sicherstellung einer gewünschten Faserorientierung, vgl. Prepregverarbeitung, in komplexen Strukturen, die im LCM-Verfahren realisiert werden sollen, noch nicht verfügbar. Potenziale, welche die Textiltechniken in ihrer gesamten Breite bieten, sind für die Konstrukteure aufgrund der Unübersichtlichkeit und fehlenden Erfahrung bezüglich der verschiedenen Verfahren nicht zugänglich. Bisherige Ansätze zielen im wesentlichen darauf ab, komplexe Strukturen mit Hilfe nicht weniger komplexer Textiltechniken integral abzubilden [16]. Beispiele hierfür sind Fahrradrahmen, die im „Tailored Fibre Placement (TFP)“ [17] -Verfahren umgesetzt wurden, L-Z-Profile in 3D-Webtechnik [18], gestrickte oder geflochtene Knotenelemente in der Space-Frame-Technik [19] oder gekrümmte Strukturen, die in einer robotergestützten Rotations-Flechttechnik [20] hergestellt werden. Diese

Technologien haben in Nischenanwendungen, wie z. B. Helikopter Längs- und Querträger, bereits Serienreife erlangt [21].

Der nähtechnische Ansatz baut auf verfügbaren Halbzeugen (Gewebe, Gelege [22] etc.) auf, die mittels nähtechnischer Konfektionsstufen zunächst in Subkomponenten und anschließend in eine komplette Bauteilpreform überführt werden. Zum Zusammenbau mehrerer Substrukturen zur gesamten Bauteilpreform wird ein zusätzlicher Fügeprozess, das Preform-Assembly, erforderlich. Folglich werden die Preformcharakteristika durch die textilen Halbzeuge sowie durch die eingebrachten Nähte definiert.

Neben den nähtechnischen Konfektionsverfahren zur Preformherstellung sind in der Literatur weitere Verfahren zu dieser Thematik untersucht worden. Hierzu zählen: Web- [23] und Flechttechniken, sticktechnische Methoden [24, 25] sowie maschenbildende Textiltechniken (Wirken [26], Stricken, Rundstricken [27]). Untersuchungsgegenstand ist hierbei allerdings nicht die Überführung dieser Technologien in eine flexible Fertigungskette zur Preformherstellung. Der bisherige Forschungsstand konzentriert sich vielmehr auf spezielle Fragestellungen innerhalb der Technologien (Faserorientierung, Verarbeitungshilfsmittel [28], Drapierungseigenschaften etc.).

Schwerpunkte der Arbeiten innerhalb des Einsatzes der Nähtechnik zum Assembly von Sub-Preforms sind die Erweiterung der Maschinenteknik, z. B. durch Einseitennähetechniken zum Verbinden von Preform-Sub-Komponenten an schwer zugänglichen Bauteilsektionen [29, 30], sowie die Entwicklung von Anlagen zur Konfektion von großen Strukturen, wie z.B. die Entwicklung eines kompletten Flugzeugflügels als Preform [31]. Eine Verbindung von Nähparametern und FKV-Eigenschaften von vernähten Strukturen wurde bisher nur auf Fragestellungen innerhalb belastungsgerechter Fügezonen oder Schadenstoleranzverbesserungen in Abhängigkeit von der Verknötungslage im Doppelsteppstich untersucht [32, 33, 34, 35, 36, 37]. Die Modellierung des Effektes von Dickenverstärkungen in ebenen Faserarchitekturen durch Vernähen ist bereits weit fortgeschritten [38], jedoch findet keine Verknüpfung mit Nähprozess-Parametern statt.

Bisherige Arbeiten belegen, dass durch die Preformtechnologie eine Steigerung der Automatisierbarkeit der Harzinjektionsverfahren zur Erzeugung von FKV erreicht

werden kann. Die Anpassung der Preformtechnologie an die Erfordernisse der Harzinjektionstechnik muss anhand wirtschaftlicher, aber auch technologischer Argumente erfolgen. Mit Blick auf die typischen Losgrößen einer LCM-Fertigung ist die Flexibilität des Preformverfahrens sehr wichtig. Gelingt es, eine derartige Preformprozesskette zu etablieren, können neue Potenziale für die Harzinjektionstechnik erschlossen werden. Die Methode zur Preformherstellung steht somit im Spannungsfeld zwischen Aufwand zur Preformfertigung und Nutzen bei der Harzinjektion.

2 Preformtechnik für die Harzinjektionsverfahren

Innerhalb der Gruppe der Harzinjektionstechnologien (Liquid Composite Moulding, LCM) werden diverse Untervarianten entwickelt, was aufgrund von Identifizierungs- und Patentierungsargumenten zu vielfältigen Bezeichnungen führte [12]. Allen Verfahren gemeinsam ist das Durchströmen eines porösen Mediums mit einer Flüssigkeit. Grundlegende Unterscheidungen können hinsichtlich der Fließrichtung relativ zu einer Schalenebene (2D- oder 3D-Fließen) bzw. den Injektionsdruckdifferenzen (Vakuum- und / oder Injektionsdruck) und der Prozessführung (z. B. Konsolidierungsdruck) gemacht werden [39, 12]. Zu den Flüssigimprägnierverfahren (LCM) gehören neben der klassischen RTM-Technik (Resin Transfer Moulding, hier: Druckinjektion), welche z. B. im Bereich semi-struktureller Anwendungen Einsatz findet, auch vakuumunterstützte Verfahren (VARTM, Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding) oder Scrimp[®] bzw. Scrimp[®]-ähnliche Verfahren (Vakuuminjektionsverfahren, teilweise druckunterstützt mit der Hauptfließrichtung in Dickenrichtung der Schale). Daneben werden diverse kombinierte Technologien eingesetzt, beispielsweise "Resin Infusion under Flexible Tooling", RIFT [40], "Differential Pressure Resin Transfer Moulding", DPRTM [41] oder "Single-Line-Injection", SLI [42]. In Anhang 1 werden die wesentlichen Merkmale der Harzinjektionstechnologien benannt (Tabelle A-1).

Beim Einsatz von Harzinjektionsverfahren besteht eine Barriere für strukturelle Anwendungen hinsichtlich der freien Definierbarkeit der Verstärkungsstruktur - im Sinne der Faserorientierungen in der Ebene - sowie bezüglich interlaminaerer Eigenschaften (z.B. ILSS oder CAI). Dies behindert zunächst die

Bauweisenfestlegung sowie die Auslegung der Bauteile [43]. Gleichzeitig ist die Zahl der verfügbaren textilen Verstärkungsstrukturen sehr groß. Diese Tatsache bedingt hinsichtlich der Bauteilauslegung eine aufwendige Auswahl der textilen Halbzeuge sowie - aufgrund der Vielzahl an textilen Fertigungsparametern – komplexe Planungen zur Prozessführung.

2.1 Zielsetzung der Arbeit

Innerhalb der vorliegenden Arbeit sollen existierende Ansätze zur konfektionstechnischen Preformherstellung in ein durchgängiges und flexibles Fertigungskonzept überführt werden. Nähtechnische Verfahren bieten hierfür zahlreiche Möglichkeiten, weshalb ein Schwerpunkt auf der grundlegenden Betrachtung der Nähtechnik zur Anwendung bei Verstärkungsstrukturen für FKV liegt. Dies beinhaltet zunächst die Darstellung der Nähmaschinenelemente, die in einem Zusammenhang mit der späteren Verstärkungsstruktur-Qualität stehen. Es soll ein Verfahren entwickelt werden, das, angepasst an die Flexibilität der LCM-Verfahren und unabhängig von der Art der gewünschten Verstärkungsstruktur - von nicht-orientiert bis zu hochgradig orientiert -, eine durchgängige Prozesskette darstellt. Ebenso sollen die notwendigen Montageschritte zur Erzeugung einer räumlichen Preform im Hinblick auf die einzustellenden Preformeigenschaften - Kompaktierung und Formstabilität – beleuchtet werden. Ein weiteres Hauptaugenmerk liegt auf der Berücksichtigung der für die Herstellung der FKV notwendigen Prozessbedingungen.

Die Konzentration auf die Harzinjektionstechnik führt zu einer Reihe von Freiheitsgraden in der Preformherstellung. Zunächst soll eine Preformbasis geschaffen werden, die als Ausgangspunkt für die Konfektion von komplexen Bauteilpreforms dient. Dadurch soll es möglich sein, die gesamten Potenziale, die sich aus der klassischen Konfektionstechnik ergeben, vollständig zu übertragen und auszuschöpfen.

Die Identifizierung der wesentlichen, durch den Nähprozess und die Nähmaschinenelemente beeinflussten Charakteristika der Verstärkungsstruktur soll mit Hinblick auf die FKV-Verarbeitungstechnik und die späteren Bauteileigenschaften

durchgeführt werden. Die Herstellung eines Bezugs zwischen den Nähparametern und FKV-technologischer Fragestellungen ist Ziel der Arbeit.

In einer ergänzenden Betrachtung soll unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine sinnvolle Preformtiefe definiert werden. Hierunter versteht man den Grad der bauteilspezifischen Ausprägung im textilen Vorformling.

Die ganzheitliche Betrachtung der einzelnen Fertigungsstufen bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Datendurchgängigkeit ermöglicht eine weitere Verflechtung von Bauweisenentwicklung, Bauteilkonstruktion und -fertigung. Diese Vorgehensweise schafft die Voraussetzung für ein „Simultaneous-Engineering“.

2.2 Anforderungen

Die Harzinjektionstechnik in ihrer Anwendung hemmenden Faktoren betreffen folgende Punkte:

- Die Werkzeugkonstruktion und –bestückung ist Abhängig vom Qualitätsniveau und der Konstruktion der Preform.
- Die Simulation des Fließvorgangs ist aufgrund nicht ausreichender Kenntnis über die Permeabilität in verschiedenen Bauteilsektionen nur eingeschränkt möglich.
- Standard Verstärkungsstrukturen und deren Zuschnitte sind nicht exakt reproduzierbar einzulegen.
- Es sind vakuumdichte Werkzeuge erforderlich. Die Flächengewichte müssen eng tolerierbar sein.

Diese limitierenden Anforderungen können durch den Einsatz geeigneter Preformverfahren erfüllt werden [12]. Die Reproduzierbarkeit der Preform und infolge dessen die reproduzierbare Werkzeugbestückung führen zu einer Erhöhung der Qualität und der Wirtschaftlichkeit des LCM-Prozesses.

Die herzustellende Preform muss exakt in das Werkzeug passen, was die Überprüfung der Anwendbarkeit verschiedener Dichtungstechniken erfordert. Die Konstruktion der Dichtungen, z.B. nach [44] oder [45], verlangt, dass keine

Faserbündel oder Faserbündelausbrüche an die Dichtlippe bzw. in den Dichtungsbereich des Werkzeugs gelangen. Dadurch ergibt sich die Forderung nach eng tolerierbaren Preformkanten. Können solche Preforms hergestellt werden, vereinfacht dies die Werkzeugkonstruktion. Damit können „net-shape“ LCM-Prozesse etabliert werden. Weitere Möglichkeiten zur Vermeidung solcher Probleme, die in der Regel als „Fiber-Trapping“ bezeichnet werden, sind beispielsweise der Ausgleich von Faserausbrüchen mittels eines toleranzbehafteten Filmangusses sowie die Einbindung eines Fließkanals zwischen Preform und Kavitätenbegrenzung [46].

Den LCM-Prozess bestimmende Größen – wie Prozesstemperatur, zu injizierendes Volumen, Gelierzeit, Zeit zur Werkzeugfüllung, Harzviskosität und Matrixdegradation - stehen in wechselseitiger Beziehung [8, 12, 45, 47]. Bei Auslegung eines Injektionsvorgangs muss somit auch die aufgenommene Wärmemenge im Werkzeug und gegebenenfalls die Exothermie der Matrix bei der Aushärtung berücksichtigt werden [46]. Der eingelegte Vorformling darf das System - „Werkzeug-Polymer“ - nicht beeinflussen. Die Preforminghilfsmittel, wie Binder oder Nähfäden, dürfen dabei keine zusätzlichen Komponenten in das Werkzeug einbringen, welche zu einer Störung des Härtings- und Infiltrationsablaufs führen würden. Dies können z. B. nicht-kompatible Bindersysteme oder Avivagen sein, die die interlaminaren Eigenschaften des Verbundes zusätzlich negativ beeinflussen würden. Bezüglich des möglichen Nachdrucks im RTM-System muss die Preform die notwendige Formstabilität aufweisen. Dies bedeutet für die Preform, dass die eingesetzten Preforminghilfsmittel bezüglich der gegebenen Prozessparameter weiterhin ihre Funktion der Stabilisierung der Faserlagen erfüllen müssen. Anhang 1 (Tabelle A-2) verdeutlicht die Auswirkungen von RTM-Prozessparametern auf die Injektion und das Bauteil.

2.3 Preformverfahren

Die Faser-Verstärkungsstruktur stellt für FKV die zentrale Prozesstechnik- und eigenschaftsbestimmende Komponente dar. Die Herstellung der Preform bzw. des Fasergerüsts definiert somit die folgenden Prozessschritte.

Erste Ansätze zur automatisierten Herstellung von Vorformlingen stammen aus dem Jahre 1940. Damals wurde ein Verfahren entwickelt, das geschnittene Glasrovings mittels eines Luftstroms auf ein perforiertes Werkzeug ablegte. Ein Binder fixierte den auf dem luftdurchlässigen Werkzeug gebildeten Faservorformling. Dieses Prinzip wird bis heute innerhalb der Faserspritztechnologien angewandt [48]. Sonneborn, R.H. et al. [49] führten Anfang der fünfziger Jahre eine auf diesem Verfahren basierende Technologie, die „Plenum-Chamber-Methode“, ein.

Mit Beginn der achtziger Jahre wurden die ersten Anwendungen textiler Halbzeuge für FKV in Serienproduktion eingeführt [50], da man die weit fortgeschritteneren Automatisierungsprozesse in der Textilbranche erkannte. Ko, F. [51] und andere Wissenschaftler begannen, die vielversprechenden textiltechnischen Ansätze zur Herstellung komplexer Vorformlinge für FKV nutzbar zu machen.

2.3.1 Grundlagen

Aufgrund des Einsatzes neuartiger textiltechnischer Verfahren zur Erzeugung von komplexen Faserstrukturen und dem sich anschließenden Formgebungsverfahren ist es angebracht, einige grundlegende Begriffe zu erörtern bzw. zu definieren:

3D-Struktur

Volumenbildende Anordnung von wenigstens 3 oder mehr Fadensystemen oder Fadenvorzugsrichtungen, in die ein rechtwinkliges Koordinatensystem so gelegt werden kann, dass eine der 3 Achsen senkrecht zu allen Fadensystemen oder senkrecht zu allen Vorzugsrichtungen des textilen Körpers steht [52].

3D-Geometrie

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 [52].

Preform

Hier eingeführte Definition für eine Preform im Sinne der Verarbeitungstechnik der FKV: Eine Preform oder Vorform ist ein der Bauteilgeometrie entsprechendes

Verstärkungsgebilde vor der Imprägnierung / Konsolidierung. Eine Preform kann sowohl eine 3D-Struktur als auch eine 3D-Geometrie darstellen. Eine (komplexe) Preform besteht aus diversen - mindestens jedoch einem - Einzelteilen, den *Sub-Preforms*, welche ihrerseits durch individuelle Halbzeuge gebildet werden. Im Idealfall besteht eine Preform aus einem Teil, welches ausschließlich durch Einzelfasern gebildet wird.

Nach der Festlegung der anwendungs- und anforderungsspezifischen Eigenschaften

- Faserorientierung und Art der Fasern
- Faseranteile in den Raumrichtungen
- Komplexitätsgrad
- Geometrieeigenschaften des zu realisierenden Bauteils

kann eine geeignete Preformtechnologie, z. B. anhand einer Portfolio-Analyse, ausgewählt werden. Bild 2-1 erklärt den komplexen Übergang von der einfachen Möglichkeit zur Preformherstellung durch Faserspritzen bis hin zur komplexen Preform für Strukturanwendungen. Hierbei wurde erstmals der Versuch unternommen, klassische Ansätze zur Preformherstellung neuartigen Varianten gegenüber zu stellen und diese miteinander zu vergleichen.

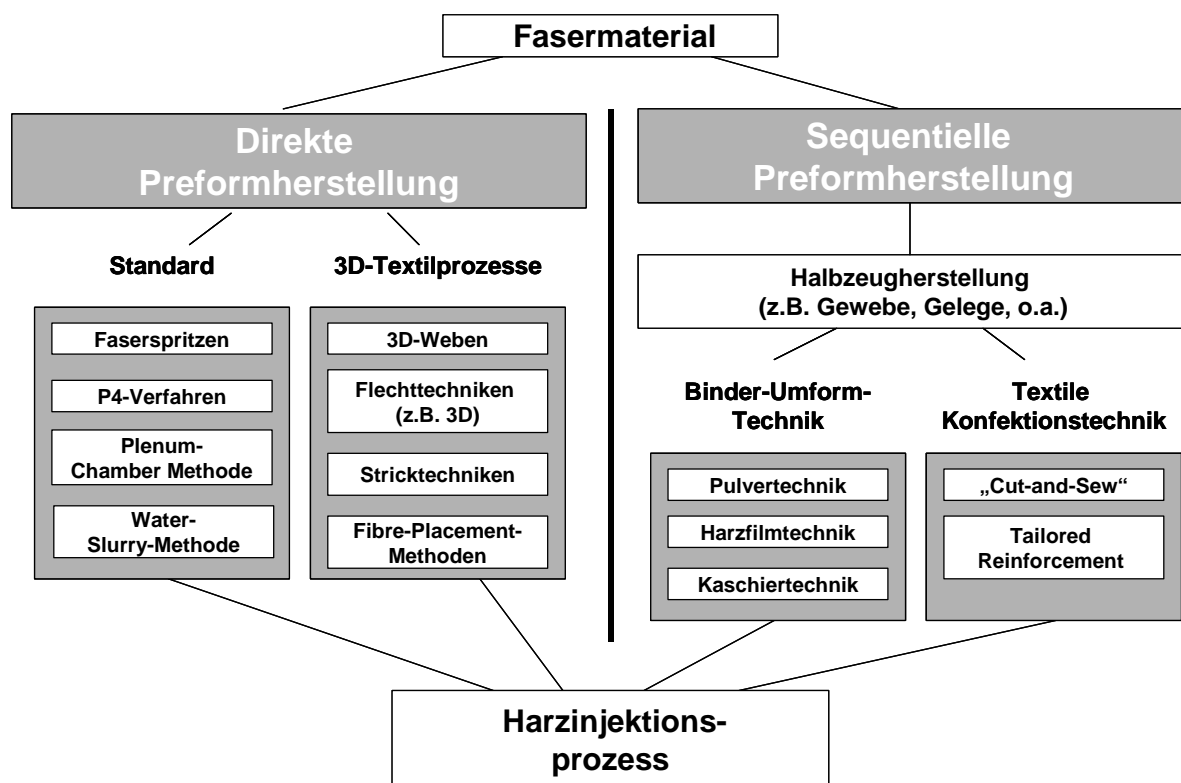


Bild 2-1: Übersicht über verschiedene Verfahren zur Preformherstellung

Basierend auf Fasermaterial, welches wiederum in unterschiedlichen Typen- und Aufmachungsformen erhältlich ist, können verschiedene Wege zur Herstellung einer Bauteil-Preform beschrieben werden. Die Möglichkeiten erstrecken sich über die Standard-Preformingverfahren (siehe Kapitel 2.3.2) hin zu direkten, textiltechnischen Verfahren der Preformherstellung (siehe Kapitel 2.3.3). Hierzu zählen auch diverse Ansätze der „Fibre-Placement“-Techniken, die auf Bindersystemen [53, 54] bzw. sticktechnischen Ansätzen („Tailored Fibre Placement“ – TFP) beruhen [55, 56, 57, 58]. Bei diesen Verfahren geht man davon aus, Faserbündel dem Krafftfluss entsprechend abzulegen und somit das Leichtbaupotenzial der eingesetzten Faserwerkstoffe optimal ausnutzen zu können [59].

Ebenso werden sequentielle Preformherstellungsverfahren diskutiert. Die hier notwendigen Fertigungsstufen zur Erzeugung der 3D-Geometrie werden in der Regel auf Basis des Einsatzes eines „Binders“ bzw. mittels Nähtechnik umgesetzt. Beide Verfahren basieren jeweils auf einem textilen Halbzeug, z.B. einem flächigem Gewebe, das in der Regel zunächst nochmals für den Preformprozess vorbereitet werden muss. Anschließend wird in mehreren Prozessschritten die komplette Preform erzeugt. Der Werkzeugbestückungsaufwand richtet sich nach den Eigenschaften der erzeugten Preform [60]. Die Qualität, losgelöst von den mechanischen Eigenschaften des FKV, richtet sich nach:

- Schiebefestigkeit der Preform (im Sinne der Dimensionstoleranzen)
- Sicherung der Faserbündel vor Ausfransen im Bauteil-Randbereich, Zielrichtung der Dimensionstoleranz $\pm 0,5 - 1,5$ mm
- Preformsteifheit (Biegesteifigkeit) [60]
- Verformungsverhalten der Geometrie nach dem Preformprozess („Springback“) [61] und
- „Re-bulking“ der vorkompaktierten Struktur [62].

Die stark unterschiedlichen Anforderungen an die einzusetzende Preform definieren den zu betreibenden Aufwand und damit die Kosten. Die Kapitel 2.2.2 und 2.2.3 geben einen Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten und Limitierungen einzelner Preformverfahren.

2.3.2 Direkte Preformtechniken

Standardverfahren

Zur Herstellung von regellosen Verstärkungshalbzeug-Preforms mit 3D-Geometrie können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden [61, 63]. Je nach Einsatzzweck werden Faser-Spritzverfahren zum Preforming verwendet, die in der Regel als „Directed Fiber Preforming“ (DFP) bezeichnet werden [64].

Für die Gruppe der DFP-Verfahren soll exemplarisch das *P-4*-Verfahren (*Programmable Powdered Preform Process*) [65], welches ausschließlich Rovings (Multi-Filament-Faserbündel) und ein Bindemittel benötigt, beschrieben werden.

Zentrale Elemente des P-4-Vorformverfahrens sind zwei perforierte Preform-Werkzeuge (Siebformen), die der Form des eigentlichen Werkzeuges selbst entsprechen. Mittels eines rechnergesteuerten Roboters, der mit einer speziellen Schneidvorrichtung ausgestattet ist, werden Glasfilamentgarne oder Rovings auf die Oberfläche der unteren Siebform gesprüht und so ein Glasvlies hergestellt. Während dieses sowie des folgenden Verfahrensschrittes wird Luft durch die Siebform gesaugt, um die Glasfasern an Ort und Stelle zu halten. Nach beendeter Vliesherstellung werden geschnittene oder endlose Glasfasern oben auf die Siebform gespritzt, wobei die Faserbündel je nach Formteil-Spezifikation entweder ungeordnet oder orientiert abgelegt werden. Zusammen mit den Glasfasern wird auch der pulverförmige Binder auf die Preform gebracht. Zum Abschluss des Faser-Spritzprozesses kann nochmals ein Oberflächenvlies, wie zuvor beschrieben, erzeugt werden. Anschließend wird die untere Siebform in die Presse gefahren. Durch Aufsetzen der oberen Siebform wird der Vorformling gepresst. Parallel dazu strömt für die Dauer von ca. 20 Sekunden Heißluft durch die Siebform, um den Binder aufzuschmelzen. Nach einer Kühlzeit von weiteren 5 Sekunden (Kaltluftzufuhr) kann der Vorformling entnommen werden. Der gesamte Zyklus dauert in der Regel nur wenige Minuten. Es können thermoplastische oder duroplastische Bindersysteme in Pulverform zugeführt werden.

Zu den Haupteinschränkungen der Standard-Verfahren in der Preformfertigung zählen der hohe Energieverbrauch, die schwierige Entformung aufgrund des Anklebens von Binderresten im Werkzeug, das regellose Ablegen der Fasern, sowie

die Beschränktheit hinsichtlich der Variabilität der Verstärkungsstruktur (z. B. Vlies an der Oberfläche). Für Anwendungen im Bereich von 20 – 35 % Faservolumengehalt, geringer Komplexitätsgrade, mittlerer Stückzahl (10.000 bis 200.000 Stck/a) und geringen Ansprüchen an die mechanischen Eigenschaften erscheinen die Verfahren hingegen geeignet. Das Spektrum wird zusätzlich jedoch durch die einsetzbaren Fasertypen beschränkt. Bisherige Anlagen arbeiten ausschließlich mit Glasfasern, Kohlenstofffaserversuche sind aus der Literatur nicht bekannt. Die Harzinjektionstechniken, basierend auf derartigen Verstärkungsstrukturen, konkurrieren mit den SMC-Verfahren [66].

2.3.3 Direkte textiltechnische Preformverfahren

Ein direktes textiltechnisches Verfahren (One-Step-(OS)-Textiltechnik) hat die Aufgabe, eine 3D-Geometrie in einem Schritt herzustellen. Demnach werden die zu erzeugenden Preforms direkt hergestellt. Die jeweiligen verfahrensspezifischen Gegebenheiten determinieren hier die Einsatzgrenzen.

3D-Textilien, klassisch die 3D-Gewebe und 3D-Geflechte, wurden ursprünglich entwickelt, um Faserstrukturen zu erzeugen, die in Laminatdickenrichtung verstärkt sind, um somit einer Grundproblemstellung der FKV, der Einzellagenseparierung, zu begegnen. Weiterentwicklungen werden zur Herstellung von einfachen 3D-Geometrien verwendet.

Differenziert sind die 3D-Webtechniken bzw. die TFP-Methoden einzustufen. Beiden Technologien liegt die Möglichkeit zugrunde, eine in der Ebene produzierte Faserstruktur so herzustellen, dass die zu erzeugende Form des späteren Bauteils durch Drapieren hergestellt werden kann.

Bei den hier vorgestellten Verfahren handelt es sich ausschließlich um Methoden mit der Möglichkeit zur Erzeugung von 3D-Geometrien in einem Schritt, d. h. ohne die Notwendigkeit eines zusätzlichen faserstrukturbeeinflussenden Fertigungsschrittes. Spezielle ebene Strukturen können in der Regel ebenso hergestellt werden.

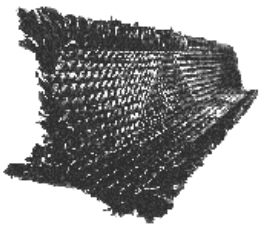
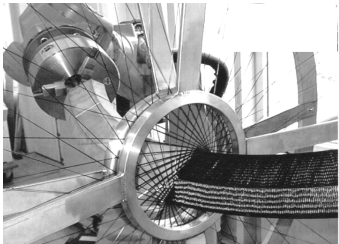
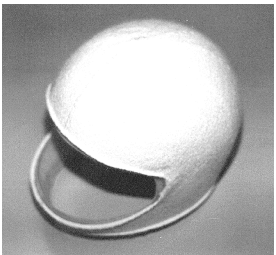
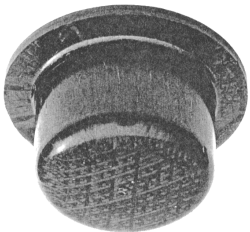
Für die Produktion spezieller Strukturen, wie z. B. Stringerprofile in der Luftfahrt, bieten sich Verfahren wie das 3D-Weben oder 3D-Flechten an [67]. In den beginnenden neunziger Jahren wurden in den USA einige Forschungsvorhaben zu dieser Thematik abgeschlossen, die jedoch nicht in direkte Anwendungen überführt werden konnten. Die Kommerzialisierung wird derzeit hauptsächlich von den Firmen 3TEX, Bally Ribbon Mills, Kümpers, Eurocarbon, Siltex und A&P Technology betrieben.

Die wesentlichen Beschränkungen dieser Technologien sind im Hinblick auf Flexibilität und mechanische „in-plane“ Eigenschaften (d. h. Eigenschaften in der Ebene eines Werkstoffes) zu sehen. 3D-Gewebe bieten die Möglichkeit zur Einstellung eines sehr hohen Faseranteils in Dickenrichtung bis etwa 17 % Faservolumengehalt des gesamten Faserpaketes [68, 69]. Schwierigkeiten ergeben sich durch entstehende Fließkanäle zwischen einzelnen Faserbündeln und nicht die frei einstellbare Faserorientierung im Verbund. Für 3D-Geflechte stellt sich die Situation ähnlich dar. Die möglichen Dimensionen sind jedoch noch stärker eingeschränkt als bei den 3D-Geweben. Neuere Entwicklungen zielen auf die Vorhersagefähigkeit der mechanischen Eigenschaften - abhängig von den eingestellten textiltechnischen Parametern [70, 71] - ab.

Strickwaren bieten ein sehr großes wirtschaftliches Potenzial im Hinblick auf die Konfektionierung von „net-shape“ - d. h. nachbearbeitungsfreier Bauteildimension - Preforms. Jedoch sind die erzielbaren mechanischen Eigenschaften der Maschenstruktur sehr gering und eher vergleichbar mit denen von Wirrfasermatten [72, 73]. Die Anwendung der Placement-Techniken zur kraftflussorientierten Ablage von Faserbündeln bietet sich zur Ausnutzung des Festigkeitspotenzials der Fasern an. Mehrlagigkeit, Homogenität des Verbundes und Imprägnierbarkeit müssen jedoch je nach Anwendungsfall geklärt werden [74].

Tabelle 2-1 gibt eine Übersicht über die unterschiedlichen Arten der Textiltechniken zur direkten Preformherstellung. Die Produktivität sämtlicher hier vorgestellter Verfahren wird hoch angesetzt, wobei die Verarbeitbarkeit der Verstärkungsfasern auf komplex arbeitenden Textilmaschinen jedoch zu sehr hohen Rüst- und Verschleißraten der Anlagen führt.

Tabelle 2-1: Übersicht verschiedener Techniken zur Erzeugung von 3D-Geometrien

Verfahren	Unterklassen	Besonderheiten
3D - Weben 	Shape-Weaving [16], SPARC [75] und 3TEX-Technik [18]	<ul style="list-style-type: none"> - einfache Profile sowie ebene Halbzeuge - Insertearbeitung - Hohe Produktivität, sehr hoher Rüstaufwand - Eingeschränkte Faserorientierungen (0/90 + Dickenrichtung)
Flechttechniken 	3D-Technik [76], Channel-Braiding [77] und Multi-layerbraiding [78, 79]	<ul style="list-style-type: none"> - Offene und geschlossene Profile sowie ebene Halbzeuge - Flechtäden 10 – 80° lokale Einbringung von 0° - Fäden - Hohe Produktivität, großer Rüstaufwand
Stricktechniken 	Flachstricken [80, 81, 82], Rundstricken [83] und Mehrlagenstricken [84]	<ul style="list-style-type: none"> - Sehr komplexe Halbzeuggeometrien (Knotenelemente) - Maschenstruktur, teilweise orientiert verstärkt [84] - Mittlere Produktivität, geringer Rüstaufwand - Geringe Schiebefestigkeit der Produkte
Fibre-Placement-Techniken 	Sticktechnik [24], Sticktechnik mit Bändchenzufuhr [56] und mit Binder [54]	<ul style="list-style-type: none"> - Anbringung zusätzlicher Fasergarne auf eine Basisstruktur (Umformreserve) - Sehr komplexe Faserorientierung und Dickenverstärkung - Geringe Produktivität, geringer Rüstaufwand

2.3.4 Sequentielle Preformverfahren

Binder-Umformtechnik

Zur Herstellung komplexer Preforms greift man weitgehend auf bereits beschichtete Halbzeuge zurück, die ähnlich der Prepregtechnik weiterverarbeitet werden [85]. Im

Fälle von nicht-orientierten Glasfaserhalbzeugen können die Aufbringung, der Anteil und die Verteilung des Bindemittels auf den trockenen Fasern als unkritisch angesehen werden. Werden jedoch Kohlenstofffaserhalbzeuge zu Binder-Preforms weiterverarbeitet, entstehen Probleme hinsichtlich der Pulververteilung, der Blockierung des Harzflusses während der Injektion oder der ILSS-Kennwerte des Verbundes.

Neuartige Ansätze gehen von trockenen Faserstrukturen aus, die erst nach dem Zusammenbau des Verstärkungspaketes mit einem Binder versehen werden [86]. Man ist damit unabhängig von verfügbaren Halbzeugen. „Multi-Textile Bauweisen“ können eingesetzt werden. Gleichzeitig kann der Bindemittelanteil stark herabgesetzt werden. Ein weiteres Verfahren zur Herstellung von Preforms ist beispielsweise die Kaschierung mit speziellen Vliesen zur Fixierung der Preform nach dem Drapiervorgang [87]. Zur Absenkung der Preformzykluszeit ist die Zielrichtung, die Fixierung der Fasermatte möglichst schnell vorzunehmen. Ansätze mit UV-aushärtenden Bindersystemen werden bereits realisiert [88].

Kommerziell verfügbar sind hier verschiedene Wirrmatten-Systeme, aber auch Kohlenstofffaser-Gewebe. Neuere Entwicklungen sind Binder-beschichtete Gelege, die in Kombination mit verschiedenen Bindersystemen individuell angeboten werden. Allerdings handelt es sich hierbei noch immer um Sonderanfertigungen, die auf das eingesetzte Harzsystem abgestimmt werden müssen.

Binder-beschichtete Halbzeuge werden nach dem Zuschnitt und dem Aufbau des angestrebten Laminates in einer Heizstrecke erwärmt und zur Umformstation gebracht. Dort wird das Halbzeug in einem kalten „Preformwerkzeug“ tiefgezogen und abgekühlt. Es entsteht eine Vorform, die allerdings noch nicht endkonturgenau hergestellt werden kann, da Einspannvorrichtungen vorgesehen sein müssen [61], um die Umformung des Verstärkungstextils zu beeinflussen.

In Bild 2-2 a) ist eine Preform-Karussell-Pressen dargestellt, die die prinzipielle Anordnung von Aufheizstation, Bestückungsplatz und Entnahmestelle zeigt. In Bild 2-2 b) werden durch die Explosionszeichnung einer komplexen Preform die notwendigen Prozessschritte deutlich. Für jedes der Einzelteile sind Preformwerkzeuge zu generieren, die Zuschnitte herzustellen und der Beschnitt

durchzuführen. Zusätzlich entsteht durch das Binderpulver zwischen den einzelnen Sub-Preforms eine Zwischenschicht, die eine Schwachstelle im Verbund darstellen kann.

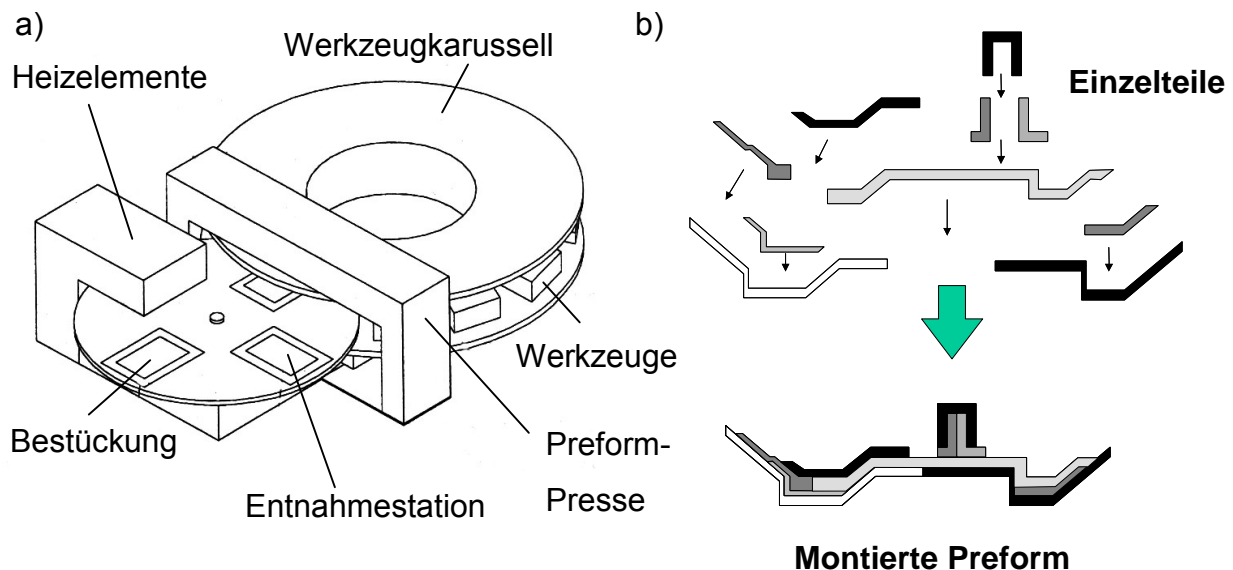


Bild 2-2: a) Karussell Preformmaschine, b) Zusammenbau von Sub-Preforms [85]

Textile Konfektionstechnik

Die Nähtechnik wird für FKV seit den achtziger Jahren eingesetzt. Zunächst wurde der Versuch unternommen, Lamine aus ebenen Prepregs in Dickenrichtung durch Einsatz der Nähtechnik zu verstärken, um somit die Schadenstoleranz bzw. die bruchmechanischen Eigenschaften der Verbunde zu verbessern [89, 90, 91].

Die Ansätze zum Einsatz der Nähtechnik zur Konfektion von Verstärkungsstrukturen stammen weitgehend von Lockheed Engineering & Science, Grumman Corporation CRC [92] bzw. NASA Langley aus der zweiten Hälfte der achtziger Jahre [93, 94]. Hauptvorteil bei Einsatz einer solchen Technologie war die Möglichkeit, Verstärkungsstrukturen mit Endmaß und Enddicke in das Werkzeug einlegen zu können. Zudem sollten gewünschte Eigenschaften, z. B. eine verbesserte Schadenstoleranz, erreicht werden. In den USA wurden die daraus gewonnenen Erkenntnisse auf den Einsatz der Nähtechnik erst später zur reinen Montage von Vorformlingen übertragen [95].

Die als „Cut-and-Sew“ bezeichnete Technik erlaubt:

- die endkonturgenaue Fertigung von hoch integrierten Preforms
- den Einsatz sämtlicher verfügbarer, meist textiler, Halbzeuge
- hohe Faservolumenanteile
- die Herstellung von Bauteilen mit sehr guten mechanischen Eigenschaften
- in Grenzen die Auslegung der Bauteile wie bei der Prepregtechnik
- die Verfügbarkeit von Materialkennwerten aus ebenen Platten
- die reproduzierbare Herstellung von maßgeschneiderten Preforms.

Die klassische, textile Konfektionstechnik auf Basis des Nähens beruht auf ebenen Zuschnitten eines Verstärkungshalbzeuges bzw. auf bereits „auf Endmaß“ gefertigten Einzelteilen [96], die zu komplexen 3D-Geometrien montiert werden [97]. Insbesondere sollen Vorteile hinsichtlich der Preform-Komplexitätsgrade erzielt werden. Die Ausnutzung der Vorteile kann nur durch einen adäquaten Einsatz verschiedener Nähetechniken erfolgen. Bisherige Ansätze konzentrieren sich jedoch auf die Lösung individueller Problemstellungen, was die Verallgemeinerung eines solchen Ansatzes meist verhindert. Prinzipiell ist die Anwendung der „Cut-and-Sew“-Technik als arbeitsintensiv zu bezeichnen, wobei hier das Handling der trockenen, biegeschlaffen Einzelteile bestimmender Faktor für eine weitere Automatisierung ist [67].

Bei der Anwendung dieser Technik können auch Trägermaterialien, wie beispielsweise Schaumkerne, eingesetzt bzw. in die Faserstruktur integriert werden [98, 99]. Im trockenen Zustand werden auch metallische Inserts in die Struktur eingebunden. Es fehlen jedoch Möglichkeiten der exakten Positionierung. Eingearbeitete Inserts werden deshalb bisher nur bei Harzinjektionsverfahren mit nur einer festen Werkzeughälfte und variablen Bauteildicken eingesetzt [100].

Für die Preform-Konfektion ist der Grad der Automatisierung entscheidend für einen wirtschaftlichen Einsatz [2]. Als Zielrichtung kann maßgeblich die Schaffung von „automatenfähigen“ Halbzeugen, die teilweise maßgeschneidert („tailored“) herstellbar sein sollten, vorgegeben werden. Diese Zielrichtung beschreibt die hier neu erarbeitete Technologie zur Herstellung der „Tailored Reinforcements“ (TR-Technologie) [101].

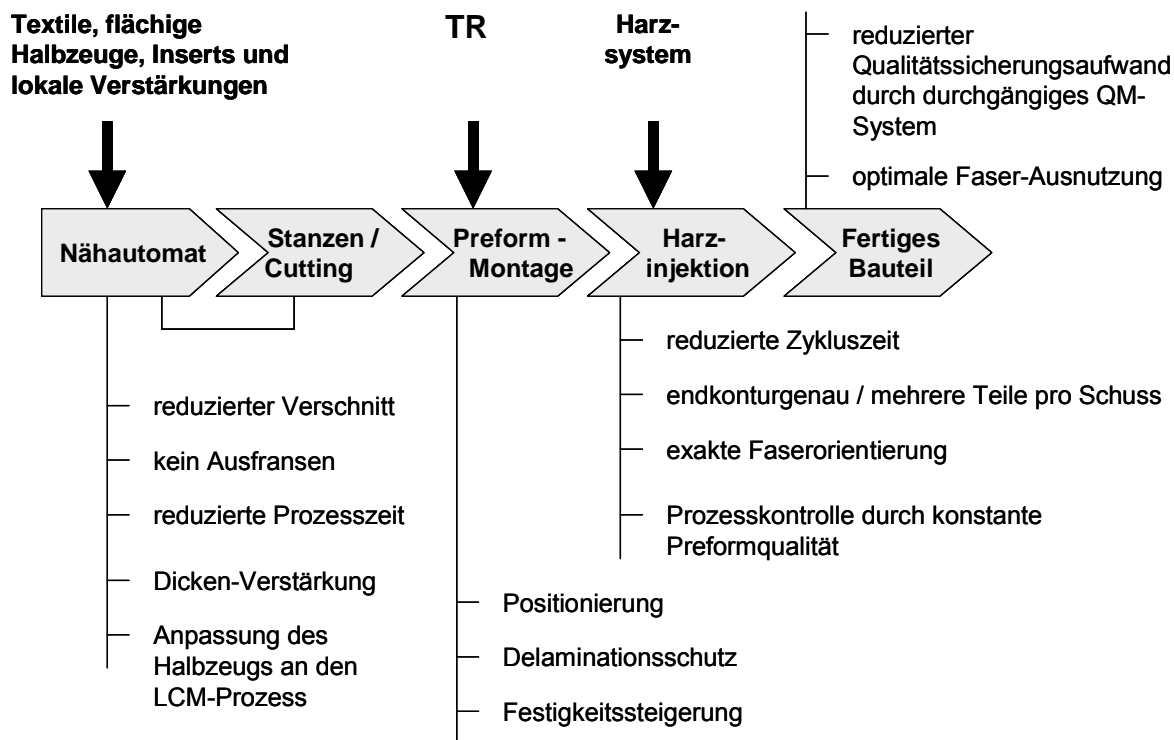


Bild 2-3: Neuartige Fertigungskette: Tailored Reinforcements (TR)

Bild 2-3 zeigt die Vorgehensweise bei der Erzeugung von „automatenfähigen“, hoch integrierten Einzelteilen, den Tailored Reinforcements (TR), und deren Weiterverarbeitungsprozess zu komplexen 3D-Geometrien. Wesentlicher Schritt ist die Vorbereitung der Einzelteile vor den weiteren Montagestufen, dem Sub-Preform-Assembly und dem Final-Preform-Assembly (FPA), (siehe Kapitel 8). Die Vorteile, die sich durch den Einsatz der TRs ergeben, sind in o.g. Kapitel beschrieben.

Tabelle 2-2 ordnet die wesentlichen Anforderungen an eine Preform den vier Hauptkategorien des Preformings zu. Je nach Anwendungsfall sind diese unterschiedlich zu bewerten.

Die Beurteilung ist aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Variationen der Technologien zunächst nur qualitativ und mit Einschränkungen vorzunehmen [102]. Jedoch kann eine Tendenz zugunsten eines flexiblen Verfahrens, welches z.B. die „Cut-and-Sew“-Technik - insbesondere aber das modifizierte Verfahren mit Einsatz der „Tailored Reinforcements“ - darstellt, gefunden werden. Das Verfahren erscheint im Hinblick auf Wirtschaftlichkeitsaspekte der LCM-Verfahren hinreichend flexibel und ist somit für die unterschiedlichsten Anwendungen einsetzbar.

In der Praxis ist davon auszugehen, dass, jeweils angepasst an die Einsatzfälle, Kombinationen aus unterschiedlichen Ansätzen angewendet werden müssen, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Solche Ansätze können unter dem Begriff „Multi-Textile-Preforming“ [103] zusammengefasst werden.

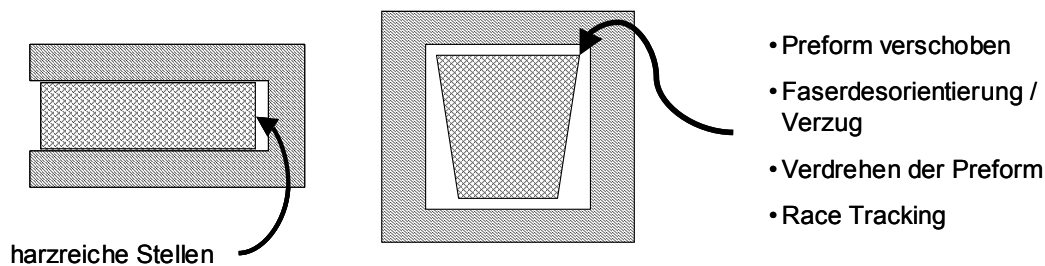
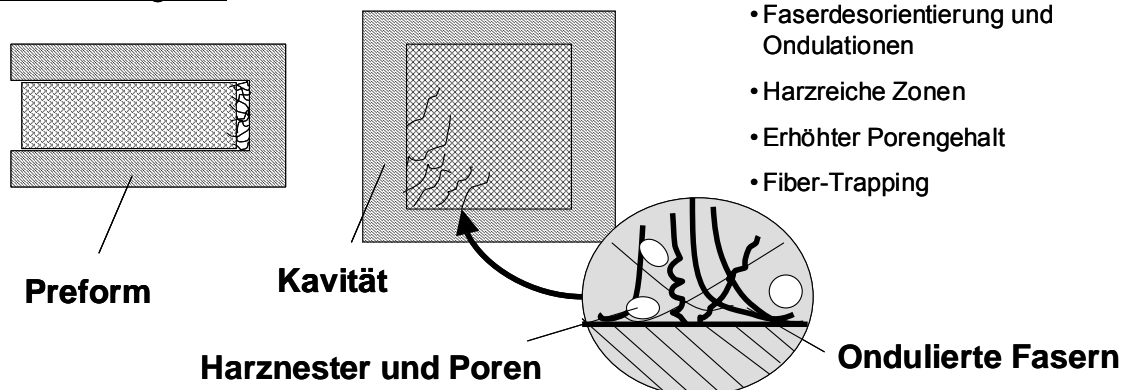
Tabelle 2-2: Vergleich unterschiedlicher Preforming-Konzepte für komplexe Verstärkungsstrukturen. Bewertung von ++ (sehr gut geeignet) bis -- (unzureichend).

Die Bezeichnungen + / - und - / + stellen tendenzielle Beurteilungen dar

Anforderungen	Faser-spritz-Preforming	Direkte Textil-techniken	Binder-Umformen	Konfektions-technik
- Endkonturgenauigkeit	+ / -	+ / -	-	++
- Einsatz von Kohlenstofffasern	--	+	+ / -	++
- Ausnutzung der Fasereigenschaften	--	++	+ / -	+
- Konstante Paketdicken	--	- / +	++	++
- Realisierbare Paketdicken	+ / -	-	- / +	- / +
- Lagenanzahl / Sprünge	--	- / +	+	++
- Lokale Verstärkungen (z. B. multi-textil)	+ / -	-	-	++
- Dickenverstärkung	-	+ / -	-	+
- Integration von Krafteinleitungen (Inserts)	-	+ / -	-	++
- Komplexe Formen	--	-	+ / -	++
- Bauteilgrößen	+	+ / -	+ / -	+ / -
- Automatisierung	+	+ / -	++	- / +

2.4 Preform-Konstruktion

Den Anforderungen aus den Injektionsprozessen folgend, ergeben sich konstruktive Forderungen an die einzusetzenden Preforms. Wie in Bild 2-4 skizziert, entstehen Probleme hinsichtlich der Dimensionstoleranzen der hergestellten Preforms. Ist die Maßhaltigkeit nicht innerhalb der vom Werkzeug vorgegebenen Toleranzen, entstehen sowohl Probleme während der Werkzeugbestückung, der Injektion, als auch hinsichtlich des fertigen Bauteils.

Preform zu klein:Preform zu groß:**Bild 2-4:** Einfluss der Maßhaltigkeit von Preforms auf den Injektionsprozess

Dem Stand der Technik folgend, wurde diesem Problem in der Regel durch Übermaßfertigung begegnet, um hohe Ausschussraten zu vermeiden. Werden nun Preforms zur Verfügung gestellt, die innerhalb einer definierten Fertigungstoleranz hergestellt werden können, ist es möglich, einen sicheren LCM-Prozess zu gewährleisten. Hauptkriterien bei der Festlegung der Preformtoleranz sind die Dimension der Einzelteile und die Montagegenauigkeit. Ist eine Preform zu klein, wird sie während der Injektion durch den anliegenden Druck verrutschen und so zu „Race-Tracking“ und den damit verbundenen Problemen führen [104, 105]. Ist sie zu groß, tritt z. B. „Fibre-Trapping“ auf, das zu Undichtigkeit im Werkzeug führt und somit Probleme innerhalb der Injektionsphase verursacht.

Gembinski [60] beschreibt Probleme, die durch fehlerhafte Preforms auftreten können. Bei der Gestaltung räumlicher Preforms, die durch Montageschritte hergestellt werden müssen, ist deshalb darauf zu achten, dass die Aufteilung in verschiedene Subkomponenten und der Aufbau ihrer Verbindungen exakt durchgeführt werden. Die Dickenkompaktierungseigenschaften und Formstabilität müssen zwingend innerhalb der vorgegebenen Toleranzen eingehalten werden.

3 Erweiterung des Preformspektrums auf Basis der TR-Technologie

Durch den Einsatz der Konfektionstechnik bieten sich diverse, aus der Bekleidungsbranche bekannte Verfahren zur Weiterverarbeitung textiler Halbzeuge hin zur maßgeschneiderten Preformfertigung an. Die Verfügbarkeit von „automatenfähigen“ TR zur Weiterverarbeitung eröffnet Möglichkeiten, die im folgenden Kapitel einleitend erläutert werden.

Die Nähtechnik wurde in den letzten Jahren in immer stärkerem Maße zur Konfektion von Vorformlingen eingesetzt. Maßnahmen, die nur die Fixierung von Einzelteilzuschnitten beinhalten, sind jedoch bisher die einzige Anwendung [106]. Der vorgestellte Ansatz „Tailored Reinforcement“ überführt die Konfektionstechniken in eine durchgängige Prozesskette, die sich an die textile Halbzeugherstellung direkt anschließt.

3.1 Eingesetzte Halbzeuge und Nähgarne

Bei der Anwendung der textilen Konfektionstechnik zur Herstellung von komplexen Bauteilpreforms sind die Komponenten Halbzeug und Nähgarn die prozess- und eigenschaftsbestimmenden Größen.

Als Halbzeuge können bei der konfektionstechnischen Weiterverarbeitung sämtliche flächig vorliegenden, meist textilen Fasergebilde eingesetzt werden [107]. Zur Hauptgruppe gehören Gewebe und Gelege sowie sämtliche darauf basierenden Varianten. Die meisten anderen Systeme befinden sich derzeit in Entwicklung. In der vorliegenden Arbeit werden die einzelnen Verstärkungsstrukturen nicht im Detail betrachtet, jedoch soll eine Übersicht über die Möglichkeiten der weitest verbreiteten Typen gegeben werden (siehe Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Übersicht von Standard-Halbzeugen zur weiteren Preformherstellung

Halbzeug	Arten und Bindungen bzw. Maschenstruktur	Fasertypen	Vorzugsorientierungen
Gewebe [108]	Leinwand-, Köper- oder Atlasbindung	Glas-, Kohlenstoff-, Aramid-, Natur- oder sonstige, auch hybride Systeme	0° / 90° (Anteile einstellbar)
Gelege [109]	Franse-, Tricot- oder Tricot-Fransebindung	Glas-, Kohlenstoff-, Aramid-, Natur- oder sonstige, auch hybride Systeme	Mehrlagig abgelegte Faserstrukturen mit Faserorientierung von -20° bis +20°-Faserorientierung
Non-Wovens o. Vliese [110]	Vernadelt oder aerodynamisch gelegt, mit unterschiedlichen Bindersystemen	Glas-, Naturfasern	Keine Vorzugsrichtung, eingesetzt werden Endlos- oder Kurzfasern

Die wesentlichen - die Charakteristika des späteren Verbundes bestimmenden - Eigenschaften werden bei der Verarbeitung der Halbzeuge definiert. Insbesondere das Handling von Kohlenstofffasern bei der textilen Verarbeitung bedarf größter Sorgfalt. Das Spreizen bzw. die Führung der Multi-Filamentbündel (Rovings) über die Fadenleitorgane ist für die Qualität des FKV mitentscheidend. Die Eigenschaften, wie Schiebefestigkeit oder Drapierbarkeit, werden über die Bindungsmechanismen eingestellt, die innerhalb der jeweiligen Prozessgruppen in Grenzen frei wählbar sind.

Die konfektionstechnisch hergestellten Preforms werden aus mehreren - mindestens jedoch einer – Einzellagen aufgebaut. Der Lagenaufbau entspricht den Vorgaben des Konstrukteurs. Die Verbindung der verschiedenen Einzellagen findet mittels Vernähung statt, wobei ein FKV-kompatibles Nähgarn eingesetzt werden sollte.

Die eingesetzten Nähgarne müssen nun nach Nahtklasse und „Art des Nähfadens“ unterschieden werden. Die Unterscheidung der Nahtklassen findet in Kapitel 3.2 statt. Mit dem Nähgut interagierende Nähmaschinenbauteile, wie Nähadel, Presserfuß und teilweise das Stichloch, sind gesondert zu betrachten.

Der Verarbeitungsprozess, in diesem Fall die Harzinjektionstechnologie, definiert die Anforderungen an das Nähgarn hinsichtlich des Schmelzpunktes des Materials, woraus sich die thermischen Forderungen an das Garn ableiten. Setzt man niedrig schmelzende Polymere als Nähfäden ein, so findet während der Injektion bzw. der Aushärtung des Materials eine Zersetzung des Fadens statt. Diese Reaktionsprodukte werden in die Matrix des FKV eingelagert. Gleiches gilt für die auf dem Nähgarn applizierten Schichten oder Avivagen. Lösen sich Montagenähte während der Injektion, ist die textile Struktur anfällig gegen „Fibre-Wash-Out“ Effekte und Faser-Desorientierungen.

Betrachtet man thermische Spannungen, die durch unterschiedliches Wärmedehnverhalten hervorgerufen werden, sowie den Schrumpf des Fadens (im Falle von Polymerfasern), so ist ersichtlich, dass von der Auswahl des Nähfadens die Qualität des späteren FKV- Bauteils wesentlich abhängt. Oberflächenqualität und Formgenauigkeit hängen hierbei direkt von den Eigenschaften des Nähgarns und von der Feinheit der Garne ab [111].

So fordert der Nähprozess, insbesondere der Doppelsteppstich, ein geschlossenes Nähgarn. Der Zwirn wird während des Nähvorgangs sehr starken Beanspruchungen ausgesetzt. Die Nähfadenführung verursacht Fadenverschleiß und somit einen Verlust der Fadenfestigkeit, was wiederum zu abgesenkten mechanischen Eigenschaften, vor allem der out-of-plane-Eigenschaften, führt [37].

Die Eigenschaften der Fasern beeinflussen ebenfalls den Nähprozess. Betrachtet man die Nadelerwärmung, die insbesondere bei höheren Nähgeschwindigkeiten auftritt, erkennt man den Nadelverschleiß, der wiederum Einfluss auf die mechanischen Kennwerte des FKV - in Form von Nähgarnschädigungen und den deshalb abgesenkten mechanischen Eigenschaften des Nähgarns - hat. Beschädigte oder verschlissene Nähnadeln führen zusätzlich zur Schädigung des Verstärkungsmaterials im Stichlochbereich. Der Abrieb am Nähfaden während des Stichbildungsvorganges beeinflusst die Lebensdauer umlaufender Teile an der Nähmaschine (Abrasion).

Tabelle 3-2: Übersicht über verschiedene Nähgarne

Eingesetzte Nähgarne	Aufmachungsformen	Vernähbarkeit (OF und UF) und Verfügbarkeit
Polyesterfasernähgarn	Endlosfaserzwirne, Umspinnzwirn, Stapelfasergarn, Texturierte Garne, Multi-Filament-Garne	Uneingeschränkt / Uneingeschränkt
Polyamid 6.6.–Fasernähgarn	Endlosfaserzwirne, Umspinnzwirn, Stapelfasergarn, Texturierte Garne, Multi-Filament-Garne	Uneingeschränkt / Uneingeschränkt
Aramidfasernähgarn	Endlosfaserzwirne und Stapelfasergarne	Automatisierung hinsichtlich Fadenabschneiden kritisch (EP-Schichten schwer verfügbar)
PBO-Fasernähgarn	Multifilamentgarne (teilweise verzwirnt) und Endlosfaserzwirne	Automatisierung hinsichtlich Fadenabschneiden kritisch (Entwicklungsstatus)
Glasfasernähgarn	Endlosfaserzwirne und lufttexturierte Multifilamentgarne	Automatisierung kritisch / nicht uneingeschränkt
Kohlenstofffasernähgarn	Stapelfasergarne und endlose Multifilamentzwirne	Automatisierung kritisch / nur Stapelfaser gegeben

Tabelle 3-2 zeigt eine Auflistung angeführt verschiedener Materialien, die als Nähgarn für FKV eingesetzt werden können. Die Variantenvielfalt ist bei den gängigen Garnwerkstoffen, wie Polyester, sehr hoch, weshalb auf eine vollständige Auflistung verzichtet wird. [112] und [113] dienen als Nachschlagewerke zur Herstellung von synthetischen Faserstoffen bzw. liefern Informationen zu deren Eigenschaften. Für den Einsatz der Konfektionsfäden bei der Herstellung von textilen Verstärkungsstrukturen gibt es zur Garnauswahl keine Standards. Im Sinne der Verbesserung der out-of-plane-Eigenschaften müssen jedoch Verstärkungsnähfäden eingesetzt werden [114]. Die Garneigenschaften bestimmen sowohl die FKV-Eigenschaften, als auch die Prozessparameter während des Preformings bzw. der

Injektion. Zu den wesentlichen Preformparametern in Zusammenhang mit dem eingesetzten Nähgarn zählen Nadelstandzeit, Nähgeschwindigkeit, multidirektionale Nähfähigkeit oder Verschleiß an den Nähmaschinenbauteilen.

Die einzusetzenden Garnfeinheiten sind abhängig von den gewünschten mechanischen Eigenschaften des FKV. Es besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen Garnfeinheit und den G_{IC} -[115] oder G_{IIC} -[116] Kennwerten eines Verbundes. Gegenläufige Eigenschaftsveränderungen können in Bezug auf die in-plane-Eigenschaften, wie beispielsweise Zugmodul, beobachtet werden [33, 32]. Ansätze zur Modellierung des Effekts einer Dickenverstärkung durch Nähen beziehen sich derzeit auf bruchmechanische Kennwerte [117, 38]. Die weitere Durchdringung des Marktes mit Bauteilen, basierend auf konfektionstechnisch hergestellten Preforms, erfordert jedoch ebenso die Vorhersagefähigkeit der in-plane-Eigenschaften [118].

3.2 Nahteinteilung

Die Definition der einzelnen Nahtklassen [119] beschreibt den Unterschied bezüglich der Anforderungen an die Nähte selbst. Eine flächige Vernähung des Halbzeugs, im Sinne einer in-plane-Schadenstoleranzverbesserung, ist nicht Bestandteil dieser Klassifizierung. Bild 3-1 zeigt eine Übersicht der Nahtklassen anhand eines Beispiels. Es handelt sich dabei um eine mittels zwei Rippen versteifte Abdeckhaube aus dem Fahrzeugbau, basierend auf Glasfaser-Gelege-Halbzeugen. Zielrichtung hierbei ist die Bestückung eines „matched-metal“ RTM-Werkzeuges.

Die gezeigte Preform (Bild 3-1) erlaubt es, ihre wesentlichen – die Qualität bestimmenden - geometrischen Eigenschaften zu erläutern. (1) zeigt die Kantenstabilität und Genauigkeit in Bezug auf Formfüllung in der Rippe über deren kompletten Tiefe. (2) zeigt die Endmaßgenerierung an Radien oder Übergängen, (3) die Positionsgenauigkeit der einzelnen Rippen in Bezug auf das Komplettbauteil. Das Zusammenspiel dieser drei genannten Qualitätsmerkmale definiert eine konfektionierte Vorform. Derartige makroskopische Eigenschaften werden zusätzlich durch Prozessanforderungen erweitert. Hierzu zählt hauptsächlich die einzustellende Kompaktierung in den unterschiedlichen Bauteilsektionen. Im folgenden werden nun

die einzelnen Nahtklassen beschrieben. Die benannten Eigenschaftsprofile der Nähte führen zu unterschiedlichen Nahtparametern.

Fixier- und Positioniernah (P)

Diese Nahtklasse beschreibt die wesentliche Prozessstufe bei Anwendung der Konfektionstechnik für FKV. Einzellagen werden positionsgenau zueinander fixiert. Sollen endkonturgenaue Verstärkungsstrukturen, insbesondere Endlosfaserverstärkungen, für FKV hergestellt werden, ist der Verzug der Halbzeuge in der Ebene sowie der Lagenvershub zwischen den einzelnen Lagen bzw. Paketen zu berücksichtigen. Gegebenenfalls müssen Strukturen hinsichtlich ihrer trockenen Schiebefestigkeit verstärkt werden, um die weiteren Montageschritte zu gewährleisten. Hieraus ergeben sich die Anforderungen an das Transportsystem der Nähmaschine bzw. an die Preforming-Schablonen (Werkstückhalter). Die eingebrachten Fäden sind nur als Fertigungshilfe vorgesehen und können im Idealfall nach weiteren Schritten des Preformings wieder aus der textilen Verstärkungsstruktur entfernt werden. Sollen die Nähte gleichzeitig als Montagenah (Werkzeugbestückung) eingesetzt werden, so sind diese mindestens bis zur abgeschlossenen Werkzeugbestückung und Überprüfung bzw. Sicherstellung der Vakuumdichtheit zu belassen.

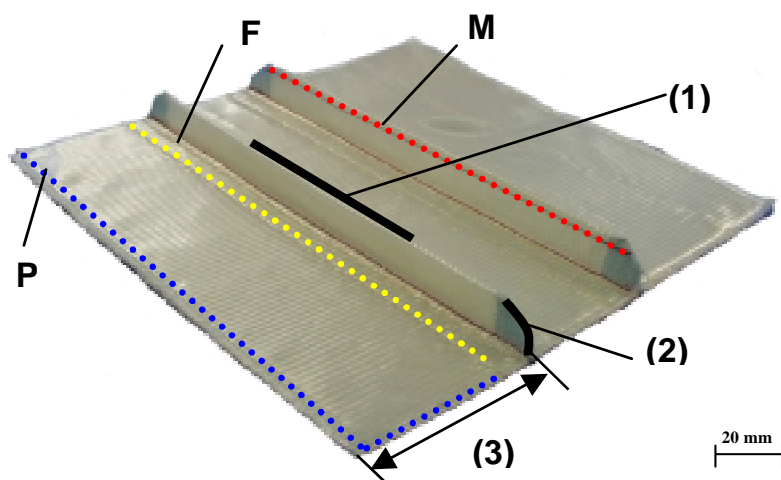


Bild 3-1: Einteilung der Nahtklassen

Montagenah (M)

Nähte dieser Klasse sind vor allem für die Werkzeugbestückung und den Injektionsprozess von Bedeutung. Die Preform ist in ihrer Struktur bereits fixiert.

Nähschablonen sind nicht notwendigerweise erforderlich, dienen jedoch zur Qualitätssteigerung. Montagenähte definieren die Genauigkeit der Formkörperkontur während der Sub-Preform-Herstellung und auch während der Preform-Montage. Beispielsweise sind Montagenähte auch für die Realisierung der echten Bauteildicke während des Preformings vorzusehen (Einstellung der Kompaktierung). Montagenähte bleiben während der Imprägnierung bzw. Konsolidierung in der Preform erhalten, um Verschiebungen der Einzellagen, Ondulationen usw., die durch den Infusionsprozess möglich sind, zu vermeiden. Hier steht nicht die Festigkeitssteigerung im Vordergrund, sondern vielmehr die Verarbeitung der textilen Struktur zum Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoff. Wesentlich ist die Anwendung dieser Nähte zur Optimierung der Werkzeugbestückung. Dies ist insbesondere mit Blick auf komplexe 3D-Geometrien mit Rippen zu sehen. Bei der trockenen, endmaßgenauen Weiterverarbeitung einzelner Sub-Preforms sind zur maßgenauen Endmontage („Final-Preform-Assembly“) ebenfalls Montagenähte zu applizieren.

Füge- oder Verbindungsnaht, Strukturnaht (F)

Hierbei handelt es sich um kraftleitende Nähte, also Strukturnähte. Sie dienen der Kraftübertragung zwischen einzelnen Verstärkungsstruktur-Halbzeugen bzw. Lagen (z. B. Rippen auf Trägerstrukturen) oder der Verbindung von einzelnen Bauteilsektionen (Sub-Preforms). Zur Positionierung von Krafeinleitungen bzw. zur Verbesserung der Anbindung von Inserts an die gesamte Struktur sind ebenfalls Verbindungsnahte vorzusehen. Füge- bzw. Verbindungsnahte durchdringen im allgemeinen die komplette Preform und sind vorzugsweise mit Verstärkungs Nähgarnen auszuführen. Die flächige Verbesserung der out-of-plane Schadenstoleranz wäre ebenfalls in diese Kategorie einzuordnen.

Die Zuordnung von Nähparametern zu den einzelnen Nahtklassen leitet sich aus den Nahtanforderungen und den Prozessbedingungen ab [120]. Tabelle 3-3 weist den wesentlichen Nähparametern - Kompaktierung des Fasermaterials während des Nähens, Fadenkraft und Stichdichte - die einzelnen Nahtklassen zu. Die Abweichungen der Parametersätze zwischen den unterschiedlichen Nahttypen fordern notwendigerweise die Steuerbarkeit der Nähparameter bei automatisierten Prozessen, um wirtschaftlich produzieren zu können.

Tabelle 3-3: Übersicht Nähparameter - Nahtklasse

	Kompaktierung	Fadenkraftniveau / Stichdichte
Fixier- und Positioniernah	Qualität richtet sich nach den Halbzeugeigenschaften	sehr niedrig / gering
Montagenah	für exakte Werkzeugbestückung essentiell	angepasst an die einzustellende Kompaktierung / mittel - hoch
Füge- oder Verbindungnah	angepasst an Bauteildicke zur Vermeidung von Garnkräuseln in der Naht	derzeit keine eindeutige Aussage / hoch

3.3 Funktionserweiterung

Die konfektionstechnische Preformherstellung, welche sich in der Prozesskette direkt an die Halbzeugherstellung anschließt, bietet durch Kombinationsfähigkeit und multidirektionale Nähfähigkeit einer Nähmaschine die Möglichkeit, maßgeschneiderte Preforms herzustellen. Dazu zählen:

- Die Integration von bauteilspezifischen Funktionselementen in die Preform (z. B. Kraffteinleitungspunkte oder Sandwichkerne).
- Zusätzliche, freie Positionierung von weiteren Verstärkungsstrukturen (z. B. Gewebebändchen oder Rovings).
- Einbau von prozessorientierten Elementen (z. B. Fließkanäle oder Verteilermedien).
- Lokale Dickenverstärkung und Kantenschutz.

3.3.1 Funktionselemente

Die hier vorgestellte Methode bietet nun die Möglichkeit zur Herstellung von Teil-Verstärkungsstrukturen mit exakt definierten Konturen („Tailored Reinforcement“, siehe Kapitel 2). Kraffteinleitungselemente können fasergerecht und positionsgenau in die textile Struktur integriert, „eingenäht“, werden. Dies geschieht innerhalb eines voll automatisierten CNC-gesteuerten Nähprozesses mit angepassten Nähwerkzeugen. Die Basis „Tailored Reinforcement“ ermöglicht darüber hinaus die Anpassung der ebenen Faserorientierungen entsprechend des in-plane Spannungszustandes. Eine solche Technologie ermöglicht die festigkeits- und

steifigkeitsgerechte Auslegung der Verbindung zwischen Krafteinleitungselement (z. B. BigHead®) und der textilen Verstärkung (Bild 3-2 a)). Den dreidimensionalen Belastungen wird mit einstellbaren Verstärkungsfaseranteilen in Dickenrichtung (Bild 3-2 b)) entgegengewirkt.

In Bild 3-2 ist schematisch der Unterschied zwischen konventioneller Methode und TR-Methode dargestellt. Während beim Standardeinbau in FKV (eingebettet) Zonen erhöhten Faservolumengehaltes (a1), harzreiche Zonen (b1) und Zonen mit ondulierten und abgetrennten Fasern (c) auftreten, können die Preformingnähte in den TR (d) diese Probleme verhindern. Die eingebrachten Nähte definieren die Kanten des Verstärkungstextils mit einer Toleranz von $\pm 1\text{mm}$ und erlauben so den passgenauen Einbau des Krafteinleitungselementes.

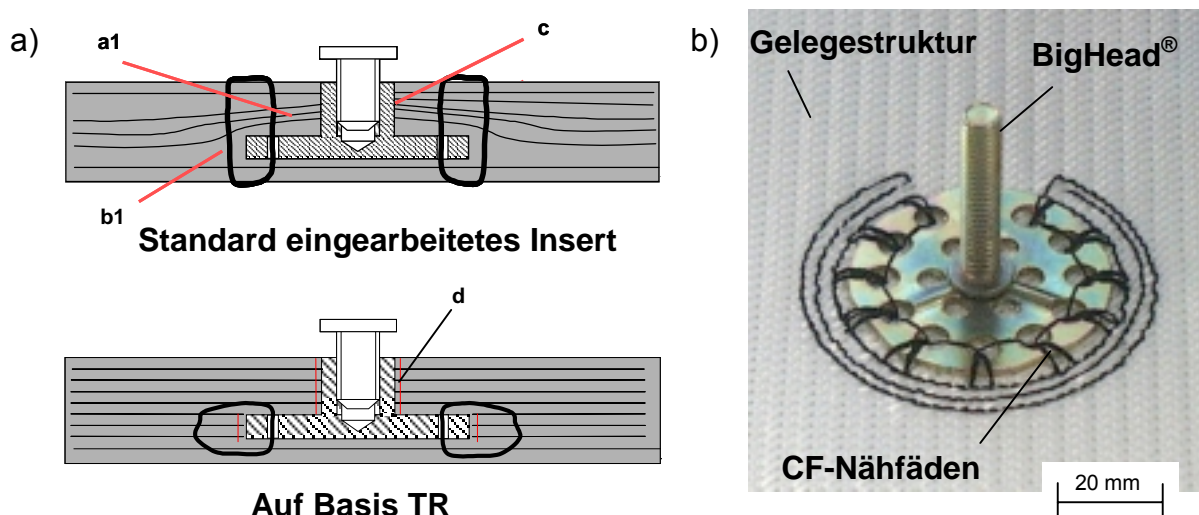


Bild 3-2: Prinzip beim „Annähen von Inserts“ [121], a) Prinzipielle Lage der Verstärkungsnähfäden im Verbund, b) Ansicht eines „angenähten“ Inserts

Die durchgeführten Untersuchungen unterstreichen das Potenzial eines hochautomatisierten CNC-gesteuerten Nähprozesses zur Herstellung von integrierten Verstärkungsstrukturpreforms bei gleichzeitiger Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Insbesondere können im Falle der Integration von Inserts Verbesserungen im Peel-Off- (z. B. Ausreißversuch) und Abscher-Verhalten der Verbindung durch die eingebrachte Dickenverstärkung (Garnmaterial) des Interfaces „metallisches Insert - FKV“ festgestellt werden. Die kritischen Lasten wurden in beiden Fällen um den Faktor > 5 gegenüber nur eingearbeiteten Inserts erhöht. Im Vergleich zu Inserts, bei denen bereits eine mechanische Verankerung über Harztaschen vorgenommen wird (BigHead®), konnten ebenfalls Steigerungen

um den Faktor > 2 festgestellt werden (Bild 3-3). Dem Konstrukteur bietet sich folglich sowohl die Möglichkeit eines dem Spannungszustand angepassten Designs des „annähfähigen Inserts“ als auch die Möglichkeit zur Festlegung der gewünschten Festigkeitswerte anhand der Garn-Materialauswahl und der einzubringenden Fasermenge in Dickenrichtung. Die Vorbereitung des „Tailored Reinforcements“ erfolgt nach Vorgabe des ausgewählten Injektionsprozesses [122].

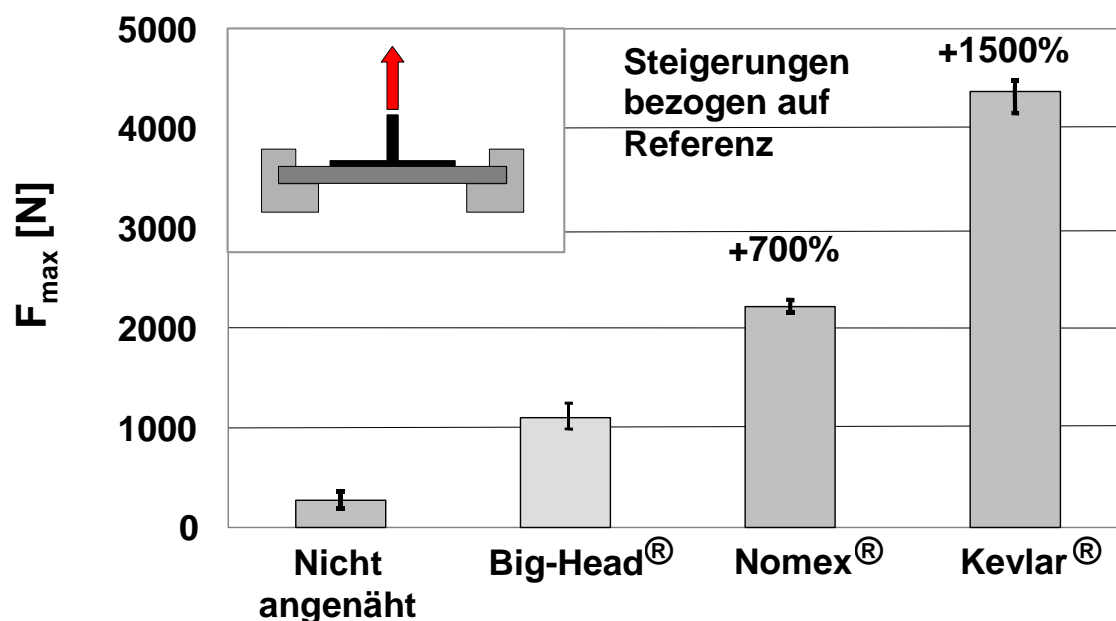


Bild 3-3: Veränderung der Anbindungseigenschaften Insert – FKV durch Einsatz der Nähtechnik (Nähgarn jeweils 60 tex, jeweils 8 Nähstiche pro Insert)

Ähnlich dem Einbau von Krafteinleitungspunkten in die textile Verstärkungsstruktur kann die Positionierung und Fixierung von Kernelementen oder sonstigen Funktionskomponenten erfolgen. Es sind jeweils eine geeignete Anlagentechnik und angepasste Schablonen auszuwählen bzw. zu konstruieren [123, 124]. Die Anforderungen aus den Harzinjektionsprozessen erfordern die Anpassung des Verstärkungsgebildes an den Injektionsprozess. Durch die Möglichkeit der Integration prozessorientierter Komponenten (wie beispielsweise Fließkanäle oder Verteilermedien) wird für die LCM – Technik ein weiteres Potenzial erschlossen [3]. Ebenso ist es möglich, qualitätssichernde Komponenten in die Preform zu integrieren. So ist z. B. der Einbau von SMARTWeave® - Lagen [125] in den komplexen Preformaufbau denkbar. Die Einbettung von weiteren Funktionselementen des späteren Bauteils, z. B. Antennenkomponenten, stellt ebenso eine Option [126] dar. Synergien mit neuen Technologien aus der Bekleidungstechnik sind möglich [127].

3.3.2 Positionierung von zusätzlichen Verstärkungselementen

Über den Stand der Technik wie in Kapitel 2.2 beschrieben hinausgehend, bietet die neuartige Prozesskette auf Basis von „Tailored Reinforcements“ Möglichkeiten zur Positionierung von bandförmigen Halbzeugen, wie beispielsweise UD-Gewebe auf dem Halbzeug. Mittels dieser Technik ist es möglich, unabhängig von Nähmaschinen, maßgeschneiderte textile Preforms herzustellen. Durch geeignete Auswahl der Nähmaschinen kann diese Prozessstufe zur bauteilspezifischen Verstärkung der Komponente bereits an vormontierten Sub-Preforms vorgenommen werden. Dies erhöht die Genauigkeit der hergestellten Preform. Nach dem Arbeitsschritt zur bauteilspezifischen Verstärkung finden keine Umformprozesse o.ä. mehr statt. Somit ist es auch möglich, diesen Schritt des Konfektionierens parallel als Montageschritt einzusetzen [122].

Die Konfektionsschritte zum „Preform-Assembly“ können auf diversen Nähmaschinenbauarten erfolgen. Diese sind bauteil- und preformspezifisch definiert. Nähmaschinenbaugruppen sind nach FKV-spezifischen Anforderungen auszuwählen (siehe Kapitel 4).

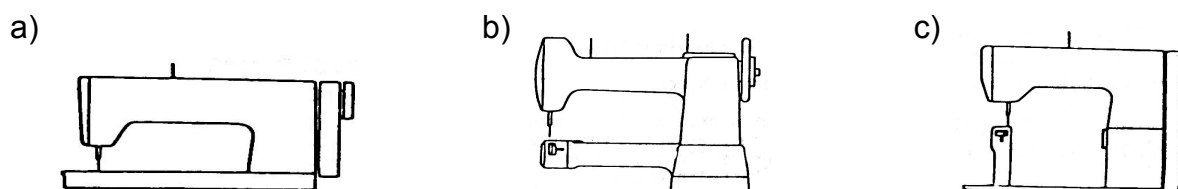


Bild 3-4: Typische Nähmaschinenbauformen: a) Flachbettnähmaschine, b) Freiarmnähmaschine, c) Säulennähmaschine [128]

3.4 Durchgängige Prozesskette

Die Gestaltung der durchzuführenden Näharbeiten ist von der zu erzeugenden 3D-Geometrie der Bauteilpreform abhängig.

Bei der Konstruktion erfolgt zunächst die Auslegung als 3D-Objekt. Dieses Modell stellt die Grundlage zur Erzeugung des Lagenaufbaus des FKV dar. Liegt nun ein Lagenaufbau der FKV-Komponente vor, ist die Struktur in verschiedene Sektionen und Lagenpakete zu unterteilen. Abschließend müssen diese 3D-Subkomponenten in ebene Zeichnungen überführt werden. Dieser Schritt erfolgt mittels gängiger CAD-

Software. 3D-Abwicklungen können derzeit nur ansatzweise automatisch erzeugt werden, Ansätze zur rechnerunterstützten Durchführung sind jedoch vorhanden [129]. Derartige Überlegungen stammen aus dem Bereich der „Maßkonfektion“ in der Bekleidungstechnik. Hat man nun die Geometriedaten der benötigten Einzelteile, sind diese mit den entsprechenden Nähdaten und TR-Prozessdaten zu versehen.

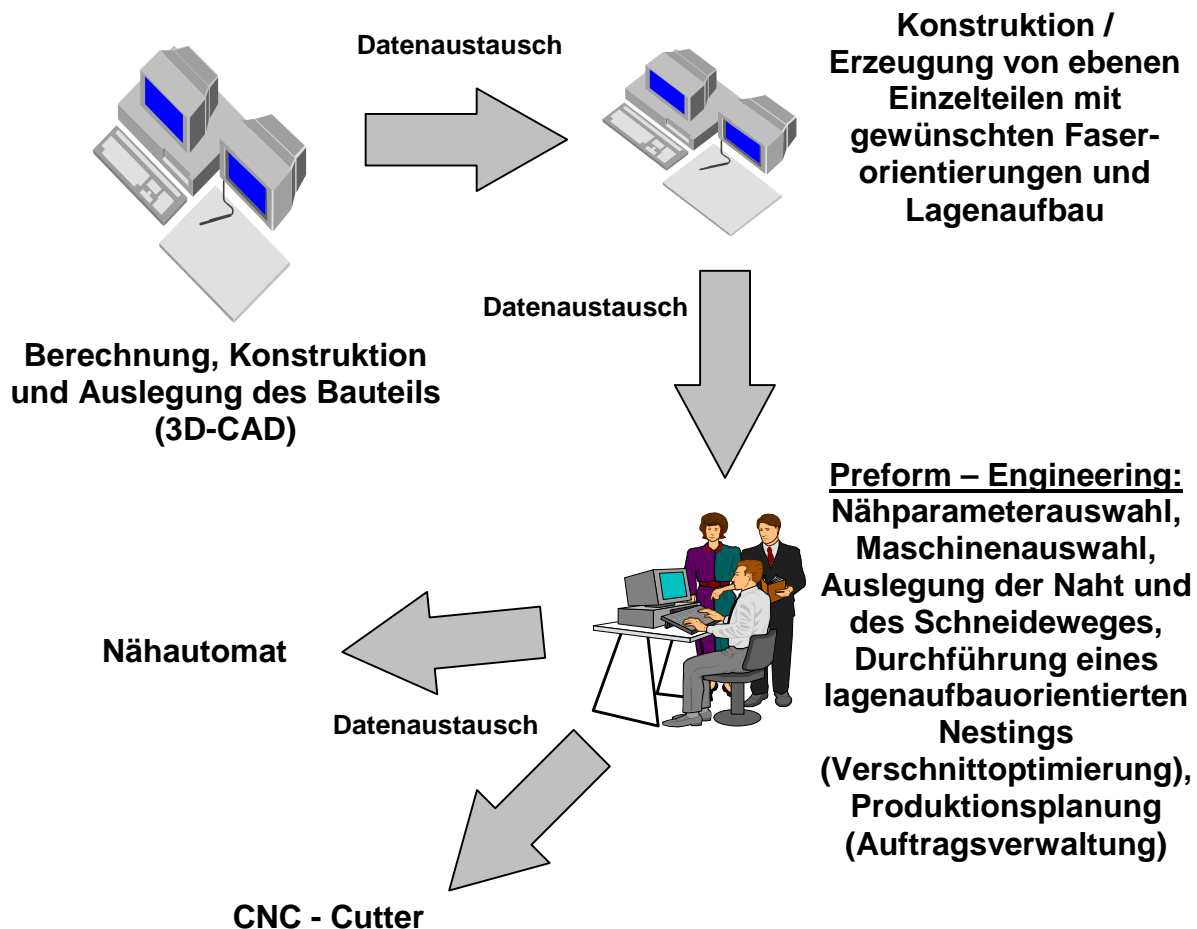


Bild 3-5: Automatisierung in der Herstellung von TR

Am Ende des „Preform-Engineerings“ werden die notwendigen Maschinendaten an die Nähmaschine und an den Cutter weitergeleitet. Bild 3-5 zeigt eine Übersicht über den Datenfluss bei der Herstellung von „Preform-Einzelteilen“. Die Generierung der TR ermöglicht anschließend ein „Reverse-Engineering“. Nach Festlegung des Preformprozesses können nochmals die Konstruktion und die Auslegung überprüft werden. Ordnet man in der Stufe „Preform-Engineering“ verschiedene Nahtklassen den verschiedenen textilen Halbzeugen zu, ist es innerhalb eines datenbankbasierten Systems gleichzeitig möglich, Kenntnisse über die mechanischen Eigenschaften und die injektionsrelevanten Daten, wie z. B. Permeabilität, zu erhalten.

3.5 Ergebnis

Es konnte gezeigt werden, dass die konsequente Anwendung der nähtechnischen Konfektion die Basis für ein maßgeschneidertes Preforming darstellen kann. Die Basis „Tailored Reinforcement“ ist dabei die Grundvoraussetzung für ein eng tolerierbares Preform-Assembly und für die Reproduzierbarkeit des LCM-Prozesses. Die Erarbeitung der Prozesskette fand unabhängig von Nähmaschinenelementen und Injektionsrandbedingungen statt. In den nachfolgenden Kapiteln wird eine Betrachtung nähtechnisch relevanter, aber auch FKV-kritischer Prozesselemente durchgeführt.

4 Bewertung der Nähtechnik aus Sicht der FKV-Verarbeitung

Die Entwicklung der Nähmaschinenteknik wurde in der Vergangenheit intensiv vorangetrieben, wohingegen die Zusammenhänge der reziproken Abhängigkeiten zwischen technischen Nähparametern und dem Endprodukt nur unzureichend erfasst sind [130, 131, 132]. Bei der Erschließung bzw. der Adaption konfektionstechnischer Prozesse für Faser-Kunststoff-Verbunde spielen die wechselseitigen Beeinflussungen von Nähgut, Nähfaden, Nähmaschine und FKV-Eigenschaften eine entscheidende Rolle.

Theoretische Ansätze und ausgewählte mess- und verarbeitungstechnische Fragestellungen gewinnen für Anwendungen im Bereich der technischen Textilien, wie z. B. beim Nähen von Airbags oder beim Nähen von sicherheitsrelevanten Bereichen bei Sitzbezügen im Umfeld des Einbaus von Side-Airbags sowie bei der Gestaltung von „Smart Clothes“, hohe Bedeutung. Im folgenden werden Grundlagen der nähtechnischen Maschenbildung in Bezug auf FKV-spezifische Fragestellungen analysiert.

4.1 Qualitative Wirkpaarungsanalyse

Eine Wirkpaarungsanalyse des Nähprozesses mit der Berücksichtigung FKV-spezifischer Fragestellungen ergibt eine Matrix, die zur Bewertung des Nähergebnisses herangezogen werden kann. Nachstehend sind einige Wirkpaarungen aufgeführt, die aufgrund der technischen Relevanz um die Dimension Nähgut erweitert wurden. In Bild 4-1 ist das Nähgut, im Sinne eines Verstärkungsstrukturhalbzeugs, benannt. Die aufgelisteten Variablen beeinflussen zunächst die Interaktion zwischen Nähmaschine und Preform und haben somit Einfluss auf das Nähergebnis.

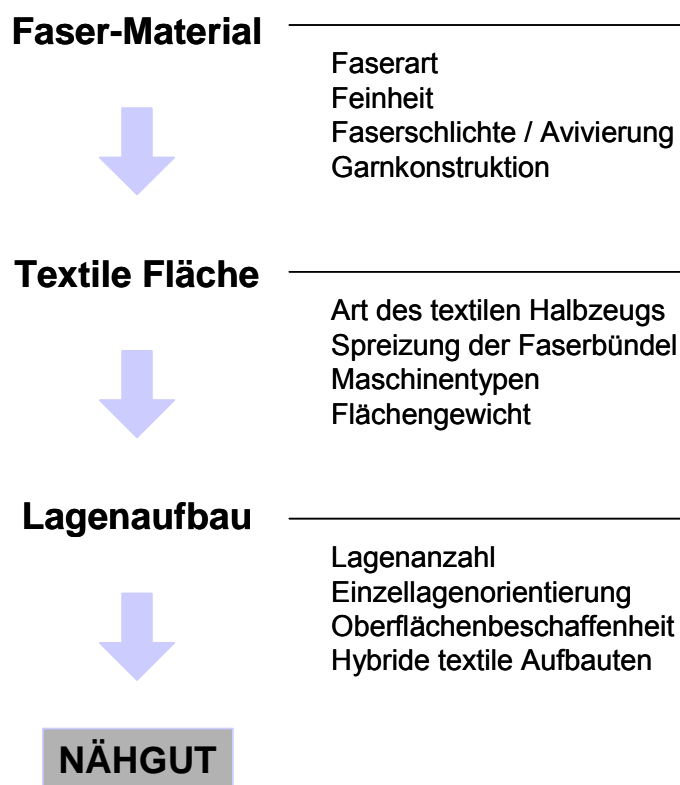


Bild 4-1: Einflussgrößen Nähgut

Einige der in Tabelle 4-1 aufgelisteten Wirkpaarungen wurden in der klassischen Konfektionstechnik hinreichend untersucht [130], jedoch verschiebt sich die Relevanz für FKV-Anwendungen. Konflikte in deren Bearbeitung ergeben sich bei der Betrachtung der Wertschöpfung des entstehenden Produktes. Die Diskussion zur Automatisierung des Nähprozesses in der Bekleidungsindustrie sei an dieser Stelle zwar erwähnt, eine Erörterung unterbleibt jedoch, da sie über den Rahmen der vorliegenden Arbeit hinaus geht [133, 134, 135, 136, 137, 138].

Während in den nähtechnischen Untersuchungen (Maschinenteknik) die Betrachtung der Stichbildung im Zusammenhang mit den zu verbindenden Substraten eine untergeordnete Rolle spielt – es werden in der Regel homogene Ausgangsstoffe (Jeans, Leder) ohne ausgeprägte Vorzugsrichtung eingesetzt –, kommt dieser Wirkpaarung in dem hier diskutierten Anwendungsfall eine entscheidende Bedeutung zu [139, 140].

Tabelle 4-1: Übersicht über die FKV-Relevanz verschiedener Wirkpaarungen

Wirkpaarung	Untersucht in der Bekleidungstechnik	FKV-relevant
Nähmaschinennadel / Nähfaden	x	x
Nähfadenleitelement / Nähfaden	teilweise	x
Fadenbremse / Nähfaden	x	x
Greifer / Nähfaden	x	
Nähmaschinennadel / Nähgut (Verstärkungsmaterial)	x	x
Nähfuß / Nähgut (Verstärkungsmaterial)	x	
Transportbewegung / Nähgut (Verstärkungsmaterial)	x	x
Nähmaschinennadelbewegung / Nähgut (Verstärkungsmaterial)		x
Fadenbremse / Transportbewegung	x	x

Da es sich beim nähenden Konfektionieren bereits um einen Verarbeitungsprozess handelt, fließen die Prozessparameter (nähtechnisch determinierte Preformgrößen; siehe Bild 4-2) dementsprechend als Variablen in die Imprägnierungs- und die Konsolidierungsvorgänge der FKV ein. Die ausschließliche Festlegung der makroskopischen Nähdaten wie Stichdichte, Nährichtung, Nähgarn ist nicht hinreichend. Nähtechnisch determinierte Preformgrößen werden primär bestimmt durch Parameter wie Fadenkraft, Nähgarn, Presserfußgestaltung und –kraft, Transportmechanismus, Nadelbewegung und Vorkompaktierung des Lagenpaketes.

Die Nähmaschinennadel steht in direktem Kontakt mit dem zu verarbeitenden textilen Halbzeug. Erhöhte mechanische und thermische Beanspruchungen können dabei verschiedene Nähstörungen hervorrufen. Thermische Beanspruchungen sind aufgrund reduzierter Nähgeschwindigkeiten bei der Verarbeitung von Verstärkungsstrukturen, basierend auf Glas-, Kohlenstoff- oder Aramidfasern, in der Regel nicht kritisch. Im Falle der Konfektion von Glasfaserhalbzeugen mit Standard Polymer-Nähfaden (z. B. Polyester) können jedoch, insbesondere aufgrund der sehr schlechten Wärmeleitfähigkeit der Glasfasern, Probleme auftreten. Es sei hier auf [141, 142] verwiesen.

**Makroskopische
Preformeigenschaften**

Stichdichte
(Nahtabstand (Spacing) und Stichtlänge)
Flächengewicht des Lagenpaketes
Nähgarn

**Nähtechnisch
determinierte
Preformgrößen**

Verknotungslage
Faserverschiebungen
Faserschädigungen
Lagenpaketdicke
Deaktivierung

Bild 4-2: Makroskopische und nähtechnisch determinierte Preformeigenschaften

Die Nähfadenleitelemente spielen für die Verarbeitbarkeit der Nähfäden die entscheidende Rolle. Durch die entstehenden Reibkräfte wird die Fadenkraft verändert, was wiederum das Nähergebnis und dessen Effekt auf den FKV beeinflusst. Entstehender Fadenabrieb kann sowohl zum Nadelbruch führen, als auch die Standzeit der Nähmaschinenteile herabsetzen.

Obwohl der Sticheinzug für alle Stichtypen unterschiedlich ist, kann er – als dynamisches System mit Bezug zur Armwellendrehbewegung - als kritisches Element identifiziert werden. Während der Sticheinzugsphase werden durch einen Knoten bzw. eine Masche, die durch den Nähstich entsteht, die einzelnen Faserbündel der textilen Struktur beeinflusst und teilweise durch die anliegende Garnspannung in diesem Zustand eingefroren.

Die Kenntnis des Sticheinzugs ist notwendige Voraussetzung für das Verständnis des Zusammenspiels von Nähgut und Nähmaschine. Schwierigkeiten mit der Übertragbarkeit zwischen unterschiedlichen Nähmaschinenbauformen ergeben sich

erst, wenn Standardmaschinen mit berührendem Nähguttransport eingesetzt werden. Hierbei beeinflussen die Transportparameter die Stichbildung in unterschiedlicher Weise, so dass der Sticheinzug nicht exakt modellierbar ist.

Hinzu kommt die Problematik der Mehrlagigkeit der Verstärkungsstrukturpakete. Anforderungen aus der Art des Bauteils gehen auch in die Auswahl der zur Konfektion von Verstärkungsstrukturpaketen notwendigen Maschinen ein. Die Konfektionstechnik kann sowohl ein flexibles Verfahren für semi-strukturelle als auch strukturelle Bauteile - bei gleichzeitiger Variabilität in der Stückzahl - bereitstellen. So kann beispielsweise die manuelle Konfektion mit Standardnähmaschinen eine Form des Preformings darstellen. Jedoch ist zu beachten, dass die prozesstechnischen und bauteilspezifischen Anforderungen von der Fehlertoleranz dieser Vorgehensweise (Handarbeit) abhängig sind.

4.2 Auswahl eines geeigneten Stichtyps für FKV

Die Schwierigkeiten bei der Auswahl eines geeigneten Stichtyps liegen sowohl in der sehr stark diversifizierten Problemstellung des Einsatzes der Nähtechnik für FKV als auch in den ebenso unterschiedlichen Ansätzen zur Preformherstellung (siehe Kapitel 2).

Eine Hauptunterscheidung kann zwischen rein konfektionstechnischem bzw. handhabungsorientiertem Nähen und der Verstärkung der Textilstruktur in Dickenrichtung getroffen werden. Die Grenzen sind hierbei jedoch fließend. Betrachtet werden muss jeweils die konkrete Anwendung. Die Variablen jedes einzelnen Anwendungsfalls werden durch verarbeitungstechnische – im Sinne der Imprägnierung/Konsolidierung sowie durch die Handhabung des fertigen Verstärkungsgebildes – und durch mechanische Fragestellungen definiert. Unabhängig davon treten Einschränkungen bei der Realisierung einer technologisch sinnvollen Lösung auf. Im Wesentlichen werden derzeit 6 Stichtypen für den Einsatz bei FKV diskutiert: Kettenstich, Blindstich, OSS[®], Überwendlichstichtypen, Doppelsteppstich und das Tufting [42]. Die Überwendlichstichtypen werden dabei ausschließlich im Sinne der Konfektion eingesetzt [143, 144].

Während in der Literatur weitgehend Strukturen hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften (siehe Kapitel 2 und 3) untersucht werden, die mit den o.g. Stichtypen vernäht sind, findet man nur ansatzweise Arbeiten, die die Einbindung in eine Preformfertigungskette zum Ziel haben. In der Regel werden in der Literatur Kettenstich und Doppelsteppstich eingesetzt, die aufgrund unterschiedlicher Gegebenheiten – meistens Verfügbarkeit der entsprechenden Maschine - ausgewählt wurden [33]. Die Auswahl des Stichtyps erfolgt dabei nicht unter Bezug auf ein ganzheitliches Fertigungskonzept. Der jeweilige Einsatzzweck beinhaltet ausschließlich singuläre Fragestellungen aus dem Bereich der Dicken-Verstärkung bzw. der räumlichen Preform-Montage.

Darüber hinaus wurde bis dato keine eindeutige Zuordnung der Auswahl des Stichtyps zu veränderten mechanischen Eigenschaften des FKV vorgenommen. Der Einsatz der Nähetechnik als Verarbeitungstechnik zur Herstellung von endkonturgenauen Preforms wurde nur in Ansätzen diskutiert. Vorzugsweise sind diese im Zusammenhang mit Stringer- und Spant-Haut-Anbindungsproblematiken in der Luftfahrt Bestandteil laufender Forschungsarbeiten [145, 146].

Bei der Etablierung einer neuartigen Prozesskette zur Realisierung von Faserpreforms auf Basis konfektionstechnischer Methoden – für die ihrerseits eine lange Entwicklungstradition sowie ein großer Erfahrungsschatz in traditionellen Anwendungsbereichen existieren - dürfen grundlegende Fragestellungen aus der FKV-Verarbeitung auf keinen Fall vernachlässigt werden.

So spielen bei der Herstellung von FKV das Handling der trockenen Faserpakete, die Zugänglichkeit verschiedener Bauteilsektionen und die eigentliche geometrische Dimension der Einzellagen sehr oft die entscheidende Rolle.

Im folgenden soll die Stichbildung selbst - unabhängig von der Nähumgebung (Maschinenbauart, Automatisierungsgrad etc.) - beurteilt werden. Zu beachten ist in dieser Betrachtung, dass für den Einsatz von FKV die Stichbildungsparameter - Fadeneinbringung, Einschnürung der Faserstruktur in der Ebene und in Dickenrichtung des Verstärkungslagenpaketes - entscheidend sind. Weiterhin ist der Tatsache Rechnung zu tragen, dass sich das Verhalten des Lagenpaketes bei der späteren Kompaktierung sowie während des Imprägnier- und Konsolidierungsprozesses aufgrund der unterschiedlichen Fadenlage im Material für

die verschiedenen Sticharten unterscheidet. Zur Beurteilung der Sticharten werden verschiedene FKV-spezifische Beurteilungskriterien (Faservolumengehalt, Flächengewicht etc.) eingesetzt, um zu einer technologisch sinnvollen Auswahl des Stichtyps zu gelangen. Wirtschaftliche Aspekte werden dabei zunächst nicht betrachtet.

4.2.1 Kettenstich

Nähmaschinen auf Basis des „Kettenstichs“ sind seit langem bekannt [147]. Auf der Materialrückseite wird bei diesem Stichtyp eine Schlaufe gebildet, die die Stichreihe - 1- und 2-Faden-Kettenstich - verkettet. Im Falle des 1-Faden-Kettenstichs erfolgt die Stichbildung mittels des Greiferelementes (Fänger), welches die gefangene Schlaufe des Oberfadens zum nächsten Einstich zieht. Dies ermöglicht einerseits eine reduzierte Oberfadenspannung, bietet jedoch durch die vorgegebene Bewegung des Greifers kaum Möglichkeiten, den Sticheinzug zu steuern. Der 2-Fadenkettenstich führt im Gegensatz zur 1-Fadenvariante zu einer zusätzlichen Materialanhäufung im Bereich der Verknotung von Ober- und Unterfaden [148] und zu einer dritten Lage Unterfaden. Der Stich sitzt nach der Stichformation - im Vergleich zum Doppelsteppstich - sehr lose im Material, was im Sinne der späteren Materialweiterverarbeitung zum FKV-Werkstoff Vorteile bietet. Die Dehnfähigkeit bzw. die Drapierfähigkeit der so vernähten Strukturen ist im Vergleich zum Doppelsteppstich größer, was aber gleichzeitig die Verzuggefahr erklärt.

Die Materialöffnung an der Ober- bzw. Unterseite des Lagenpaketes kann durch die beidseitig wirkenden Zugkräfte im Garn nicht vermieden werden. In Bild 4-3 sind Materialober- und unterseite gegenübergestellt. Bei dem gezeigten Substrat handelt es sich um einen Lagenaufbau aus Multiaxial-Gelegen (MAG) (Nährichtung 45° zur Faserrichtung der obersten Lage des MAG). Verwendet wurde hier ein Kohlenstofffasernähgarn (Toray T900 2-ply). Deutlich wird auf der Materialunterseite die Anhäufung des Nähfadens, was die gesteigerte Dehnfähigkeit durch die vorhandene Fadenreserve bewirkt. Nach der Kompaktierung des Lagenaufbaus und vor der Imprägnierung finden Faserdesorientierungen im Lagenaufbau statt. Gleichzeitig bildet sich im Bereich der Verschlaufungen eine harzreiche Zone. Es ist ebenfalls zu beobachten, dass der Knoten in die Verstärkungsstruktur eingezogen

wird. Die exakte Lage des Fadens im Querschnitt des Verbunds kann somit nicht vorhergesagt werden.

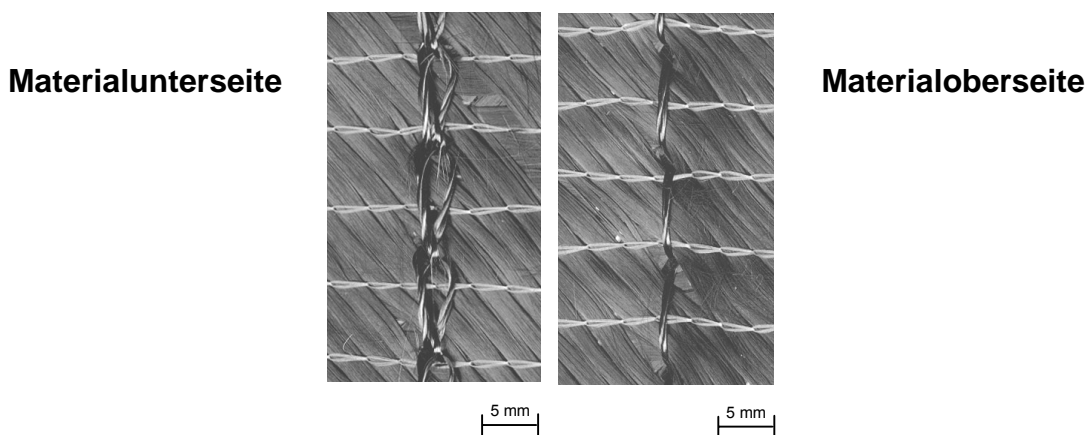


Bild 4-3: Vergleich der Materialober- mit der Materialunterseite einer Doppel-Kettenstich-Naht

Die Fadenanhäufung auf der Ober- bzw. Unterseite des Nähguts, d. h. die 2-fach bzw. 3-fach-Lage des Garnmaterials auf der Materialunterseite, verursacht einen „Kräuseleffekt“, welcher sowohl in der Ebene als auch in Dickenrichtung zu Faser-Desorientierungen führt. Eine solche Anhäufung von Nähfäden findet man insbesondere beim Doppelkettenstich, bei dem auf der Nähgutunterseite dreimal die Stichelänge mitsamt Umschlingungen aufgetragen wird. Diese Hintereinanderreihung von Verschlaufungen mit gleichzeitig teilweise übereinander liegenden Nähfäden führt bei der Harzinjektion zur Ausbildung von Harzkanälen, was in der Regel unerwünscht ist.

Die oben genannten Merkmale sowie die Unsicherheit im Handling – mögliches Aufgehen der Naht – und auch die begrenzte Variabilität hinsichtlich der programmierbaren Stichdichten reduzieren die Einsatzfähigkeit dieses Stichtyps für FKV.

4.2.2 Blindstich

Der Blindstich bietet in seiner klassischen Form die Möglichkeit, Materialien, d. h. Lagenpakete, miteinander zu verbinden, ohne das Paket in Gänze zu durchdringen. In der Bekleidungstechnik wird der Blindstich aus rein optischen Gründen eingesetzt,

da die Fügenaht nur einseitig sichtbar sein soll. Das Material wird dabei von einem Gegenhalter - auf der Rückseite des Materials - und dem Presserfuß fixiert. Die gebogene Nadel durchdringt das Material nur bis zu einer zuvor definierten Tiefe. Um diesen Vorteil für die Verarbeitung von Verstärkungsstrukturen nutzbar zu machen, entwickelte die Firma KSL GmbH, Lorsch, [149, 150, 151] eine Methode, diese Stichbildung ohne den Gegenhalter durchzuführen. Diese Technologie ermöglicht das Aufnähen von zusätzlichen Verstärkungslagen ohne die Notwendigkeit der Materialzugänglichkeit von beiden Seiten. Nach dem gleichen Prinzip arbeiten auch die Verfahren der Firma British Aerospace Public Limited Co., Hampshire, England [152], und der Firma Aerospatiale Societe National Industrielle, Paris, Frankreich [153].

Die Stichbildung selbst erfolgt dabei nach dem Schema der Stichbildung beim Einfaden-Kettenstich. Während der Phase „Nadel in Material“ darf keine Relativbewegung des Nähkopfes zu den Verstärkungslagen stattfinden, d. h., das Transportfenster beginnt, wenn die Bogennadel gänzlich aus dem Material ausgetreten ist. Der Transport erfolgt in Richtung der Nadelorientierung.

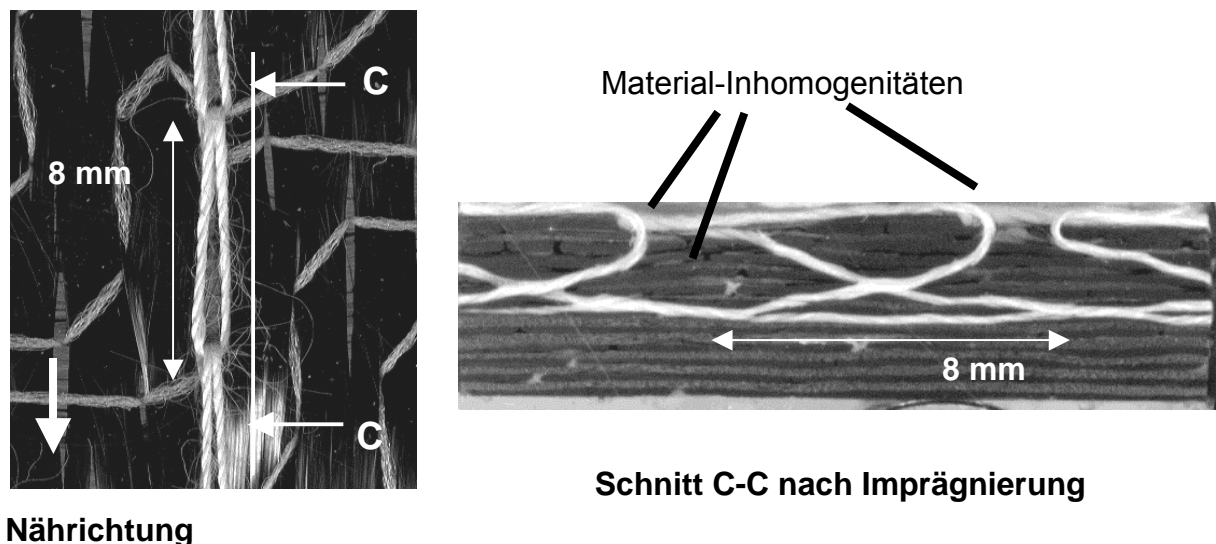


Bild 4-4: Nahtbild (Materialoberseite) und Schliffbild quer zur Nährichtung

Der zum Einsatz kommende Nähkopf, idealerweise an einem Roboter appliziert, komprimiert das Material mit einem Presserfuß bis zu einer bestimmten Höhe, um einen saubereren Sticheinzug zu gewährleisten. Dieser Typus eröffnet die Möglichkeit, Preforming-Applikationen im späteren Injektionswerkzeug vorzunehmen, da auf der

gegenüberliegenden Seite des Nähkopfes nur eine einfache Auflage benötigt wird. Komplizierte Nähschablonen können so entfallen.

Durch die Form der Nadel und die Materialkompaktierung durch den Niederhalter (Presserfuß) ist die Eindringtiefe in den Laminataufbau gegeben. Ist die Materialkompaktierung so eingestellt, dass die Packungsdichte der Fasern ein kritisches Niveau erreicht, können Nadelbahnabweichung und somit Nähfehler auftreten. Deshalb ist die Nadelstärke an den jeweiligen Einsatzfall (Halbzeugart, notwendige Vorkompaktierung usw.) anzupassen.

Durch die 3D-Faseranordnung über die Laminatdicke und das dadurch veränderte Kompaktierungsverhalten des gesamten Lagenpaketes entstehen veränderliche Faservolumenanteile im FKV. Im Schnitt durch ein Laminat (Multiaxialgelege, Aufbau [0/90/+45/-45]_{2s}, Nähfaden: Amann Ackermann Kevlar Nm 50) wird diese Problematik deutlich (Bild 4-4). Im Bereich der nicht im Nahtumfeld liegenden Lagen und der dort geringeren Kompaktierungssteifigkeit (siehe Kapitel 5 und 6) kann entsprechend den Prozessparametern die gewünschte Laminatqualität erzielt werden. Material-Inhomogenitäten treten in den Bereichen innerhalb des Stiches bzw. an den Verschlaufungspunkten auf. Teilweise wurden nicht vollständige Imprägnierung, lokal sehr geringe Faservolumenanteile, aber auch harzreiche Zonen festgestellt. Die Nähfaden-Materialanhäufung im Nahtbereich und die damit verbundene Verdrängung der eigentlichen Verstärkungsfasern führt zur Ausbildung derartiger Fehlstellen und somit zu Spannungskonzentrationen im Laminat. Untersuchungen zur möglichen Eindringtiefe des Stiches in das Laminat und deren Zuordnung zu Laminatqualität und/oder mechanischen FKV-Eigenschaften sind derzeit nicht bekannt.

Um eine Verstärkungswirkung, z. B. zur Verbesserung der out-of-plane Eigenschaften, zu erreichen, ist die Ausnutzung der Nähfäden, die in Dickenrichtung des Laminataufbaus liegen, wichtig. Diese sollen möglichst gestreckt und in einem definierten Winkel zu den eigentlichen Verstärkungslagen angeordnet sein. Sollen nun Verstärkungsnähte gezielt eingebracht werden, muss überlegt werden, die Materialkompaktierung bereits vor der Einbringung der Blindstichnähte durchzuführen. Dies kann jedoch zu zusätzlichen Faserbrüchen führen.

Der Blindstich erscheint für spezielle Montageanwendungen im Injektionswerkzeug als geeignet, jedoch ist der Einsatz als Montage-Naht nur sehr eingeschränkt möglich. Insbesondere die Wirtschaftlichkeit (Nähgeschwindigkeit), das Handling der Preform nach dem Nähen und die starke Beeinträchtigung der textilen Struktur durch die Naht sind hierbei limitierende Faktoren.

4.2.3 OSS® – Nähtechnik

Die Zielrichtung zur Konfektion von Bauteil-Preforms für FKV mit großer Dimension führte in der jüngeren Vergangenheit zur Entwicklung neuartiger Nähstichtypen. Die Firma Altin-Nähtechnik, Altenburg, Deutschland, setzt dazu zwei Nadeln ein, die beide oberhalb des Nähgutes angeordnet sind. Die rückwärtige Seite des Nähgutes ist dabei von der Stichbildung unabhängig zu betrachten, jedoch ist die Konstruktion des Werkstückhalters dem Wirkprinzip der Nadeln angepasst zu gestalten. Prinzipiell erfolgt die Verschlingung nach der Systematik „Kettenstich“. In Bild 4-5 ist schematisch der Ablauf der OSS-Stichbildung [154, 155] dargestellt. Die Beschreibung der Stichbildung findet sich in [154].

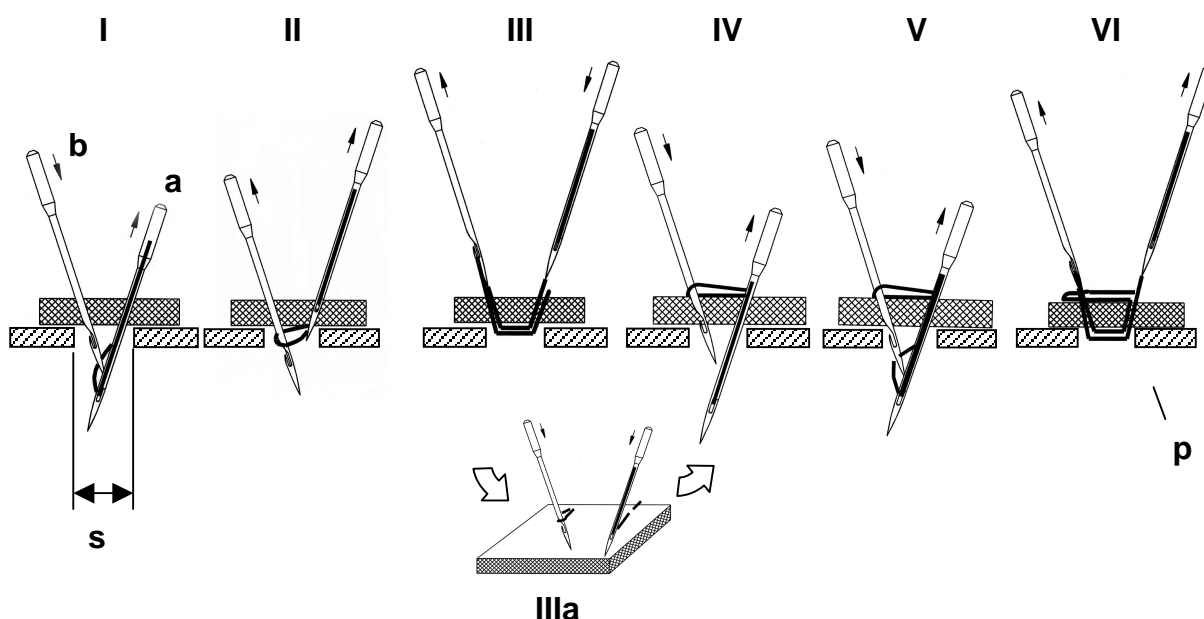


Bild 4-5: Stichbildungsphasen bei OSS® [154]

Die Führung des Einseitennähkopfes kann an Portalsystemen bzw. mittels eines Knickarmroboters erfolgen. Eine Unterscheidung bezüglich der Materialbeeinflussung muss hinsichtlich eines kontinuierlich stattfindenden Nähens bzw. eines intermittierenden Transports getroffen werden. Diese

Anlagenkonfigurationen bieten prinzipiell die Möglichkeit zur Realisierung beider Transportformen. Die Kopplung der Nähmotorachse mit der Steuerung eines Industrieroboters bedarf eines erhöhten Aufwandes. Derzeit angebotene Versionen dieses Nähstichtyps beschränken sich auf die Umsetzung des kontinuierlichen Materialtransports, was die Programmierung erheblich vereinfacht. Die Komplexität dieses Bewegungssystems sowie der Zwang zum Ausgleich der Relativbewegung zwischen Nähgut, Nähadel und Fängernadel führten zum Einsatz einer Ausgleichswelle, die eine pendelnde Nadelbewegung in Nährichtung zur Folge hat. Eine vergleichbare Situation findet man auch bei Applikation eines Blindstichnähkopfes an einem Industrieroboter.

Die Roboterausführung, insbesondere dessen Dimensionierung, mit Bezug zum maximal möglichen Arbeitsradius des „Tool Centre Points“, legt den Arbeitsbereich fest. Theoretisch wäre es möglich, den vollständigen Raum auszunutzen und mehrere Nähwerkstücke mit einem Roboter zu bedienen, jedoch wird dies von nähtechnisch bedingten Eigenheiten, z. B. Überkopfnähen und Werkstückhalterkonstruktion bzw. –bestückung, oft verhindert.

3D-Vernähung bedeutet auch die Handhabung der Nähfäden im freien Raum, was beispielsweise die Nähgarnzuführung zum Nähkopf erschwert. Derzeit beschränken sich erste Anwendungen auf schalenförmige Gebilde bzw. Bauteile, die den Einsatz von Nähmaschinen-Bauformen erfordern, die nur die Materialzugänglichkeit von einer Substratseite gestatten.

Der Gestaltung der Nähgutaufgabe (Bild 4-5, Stichplatte p) kommt bei Anwendung der OSS[®]-Technik eine besondere Bedeutung zu. Das Fangen der Schlinge, die mit Hilfe der Nähadel durch das Material auf die Nähgutunterseite transportiert wurde, muss außerhalb des Nähgutes stattfinden, was die Notwendigkeit des vollständigen Durchdringens des Nähgutes für beide Nadeln bedeutet. Während des Nähvorgangs wird also das Nähgut kurzzeitig nach unten in den Nähspalt gezogen. Das beim Auszug der Nadel möglicherweise auftretende Anheben des Materials wird durch den Niederhalter, der permanent auf dem Material aufsitzt, verhindert. Dies erfordert allerdings gleichzeitig den Einsatz des kontinuierlichen „Vorschubs“ der stichbildenden Nadeln. Die Materialkompaktierung wird durch den aufgesetzten Fuß

eingestellt. Es erscheint jedoch problematisch, das Material auf der offenen „Stichplatte“ definiert zu komprimieren.

Aufgrund des für Schubbeanspruchung in Grenzflächen positiven Effekts von Verstärkungsnähfäden in 45°-Richtung - eingeschlossener Winkel zwischen Laminebene und Dickenrichtungsverstärkung – wird in der Literatur besonders auf die out-of-plane Festig- und Steifigkeitseigenschaften verwiesen [156, 157, 29].

Die Herstellung von Laminaten mit gezielter Verstärkung in Dickenrichtung bedarf der Einbringung eines z-Faseranteils, der im Sinne der Laminattheorie höher sein muss als ein kritischer Faseranteil [158].

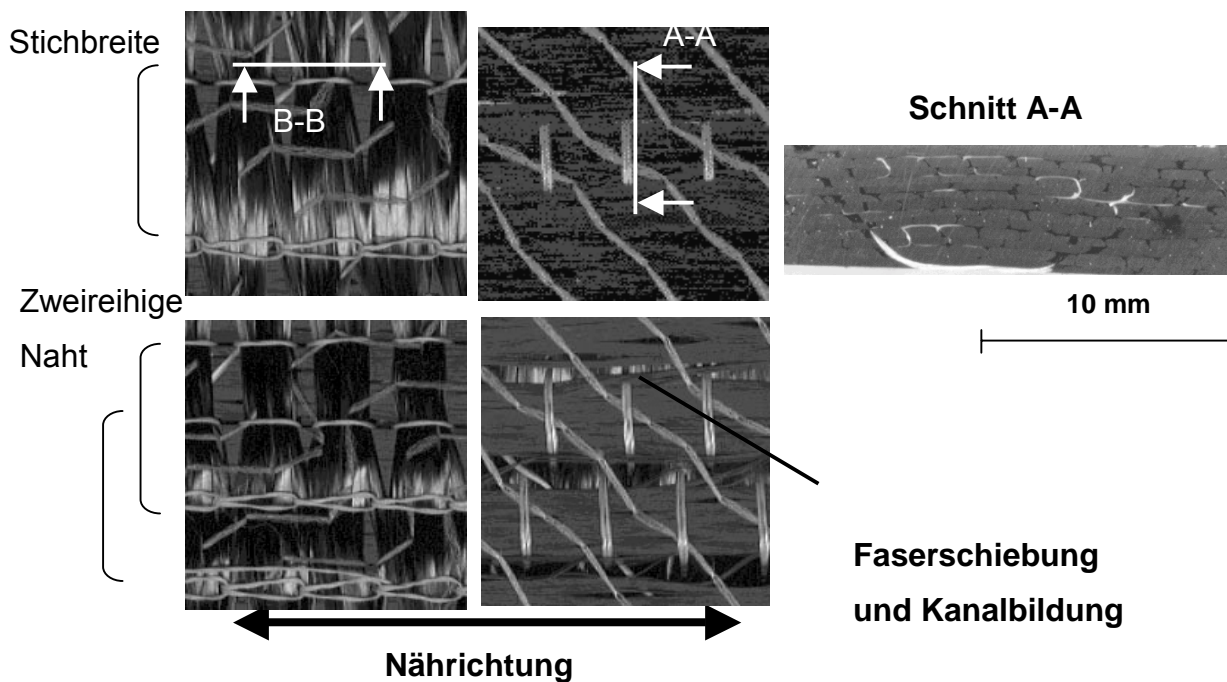


Bild 4-6: Nahtbilder der OSS[®]-Technologie. Obere Reihe: einreihige Naht, untere Reihe: zweireihige Naht, rechts: Schliffbild A-A

Die Charakteristik des OSS[®]-Stichtyps bzw. die dazu notwendige Stichbildungssequenz ist hinsichtlich der möglichen Stichdichten stark eingeschränkt. Die Stichbreite – Abstand zwischen Nähnaedel und Fängereinstich – ist dabei fest, während die Stichlänge ein bestimmtes Mindestmaß überschreiten muss, um eine sichere Nahtbildung zu gewährleisten (min. 2 mm [159]). Eine zweite Nähreihe parallel zur ersten kann z. B. mit minimalem Abstand zur ersten positioniert werden oder aber in die erste verschachtelt sein. Jedoch muss diese Verschachtelung derart

ausgeführt werden, dass die Fängernadel in ihrer Aufwärtsbewegung keinerlei zuvor eingebrachten Nähfäden aufnimmt. Die einstellbare Stichdichte ist demnach beschränkt. Der Effekt der 45°-Dickenrichtungsverstärkung kann nur eingeschränkte Gültigkeit aufweisen, da maximal die Hälfte der eingebrachten Nähfäden in Richtung der anliegenden Schubbeanspruchung positioniert ist. In Nährichtung kann darüber hinaus nicht von einer eingestellten Orientierung der Nähfäden in Dickenrichtung gesprochen werden.

Der Sticheinzug erfolgt jeweils durch das „Nachziehen“ der Schlaufe durch die Fängernadel und zusätzlich durch das Anziehen des Fadenhebels an der Nähadel, d. h. es finden zwei Materialverschiebevorgänge gleichzeitig statt. Zweireihige Verschachtelungen von 2 Nähstichreihen führen zu einer weiteren Umorientierung der Faseranordnung. Bild 4-6 zeigt mit einem Kevlar® - Nähgarn (Amann Ackermann Kevlar 50) ausgeführte Nähte auf einem Multiaxialgelegeaufbau (Quasi-isotrop, $[0/90/+45/-45]_{2s}$), Nährichtung 90°.

Andere Ansätze zur Realisierung von Zwei-Nadel-Kettenstich-Nähvorgängen, wie z.B. nach Moll [160, 161], bieten gegenüber dem hier dargestellten kommerziell verfügbaren Nähkopf zusätzliche Funktionen, wie z. B. Kurvensteuerung in der Ebene für multidirektionales Nähen. Eine weitere Version der Variation „Kettenstich mit Verkettung auf der Oberseite des Materials“, hier jedoch mit einem auf der Materialrückseite angeordneten Greifer, der den Faden von der Näh- in die Fängernadel hängt, ist in [162] beschrieben. Vorteile dieses Stichtyps sind die einstellbare Stichbreite sowie die Lage der Verstärkungsfäden senkrecht zur Laminebene.

Der OSS®-Stichtyp kann für die räumliche Montage von 3D-Geometrien eine geeignete Verfahrenstechnik darstellen. Zum Einsatz in der Vorbereitung der Halbzeuge in der Ebene sind jedoch erhebliche Einschränkungen hinsichtlich der Flexibilität in Kauf zu nehmen.

4.2.4 Überwendlichstiche

Für die Konfektion von mehrlagigen Verstärkungsstrukturen zur optimierten Handhabung wird auch über die Verwendung von Überwendlichmaschinen - in der Regel auf Basis eines Kettenstichs – nachgedacht. Die Aufgabe dieses Stichtyps

besteht darin, die Kanten vorgefertigter Zuschnitte gegen Ausfransen zu sichern. Es liegt deshalb nahe, insbesondere bei mehrlagigen Aufbauten aus sehr schwierig handhabbaren Halbzeugen (z.B. Kohlenstofffasergewebe Atlas 1/4), diese Technologie zu nutzen. Überwendlich-(Overlock)-Maschinen (z.B. Pegasus Pfaff EXT 5214H-05/545K-3x5) arbeiten nach dem Prinzip, dass ein überdimensionierter Zuschnitt auf Endmaß beschnitten und in direktem Anschluss die Nahtbildung über die Kante durchgeführt wird. Hierbei erfolgt die Stichbildung wie „Kettenstich“. Allerdings hat der Greifer die Aufgabe, die Fadenschlinge von der Nähgutunterseite auf die Oberseite zu bringen, was wiederum von der Stichtypunterklasse abhängt.

In Bild 4-7 sind verschiedene Ausführungen der möglichen Überwendlichstiche dargestellt. Mit 1 bzw. 2 sind die Nadelfäden bezeichnet, welche das Material durchdringen. Die Nummerierung a, b ist für Unter- bzw. Greiferfäden eingesetzt.



Bild 4-7: Mögliche Überwendlichstichvarianten (Unterklassen 502, 505 und 507)
nach ISO 4915

Die Kantenproblematik in der Harzinjektionstechnik (aufgrund nicht definierter Kantenabschlüsse der trockenen Verstärkungsstrukturen) kann zu schnellem Harzvorschießen an der Kavitätsskante führen. Zur Behebung dieses Problems werden beispielsweise Quetschkanten eingesetzt, die an der Bauteilkante den Faservolumengehalt erhöhen und somit den Harzfluss an dieser Stelle stark verlangsamen. Ebenso wird die Verwendung von Füllmaterialien in den Kantenabschnitten der Kavität erwogen [143]. Die Einbringung der Nahtschlinge an der Kantensektion des Verstärkungsstrukturpaketes führt zunächst zu einem veränderten Fließverhalten des Harzes bei der Tränkung. Das unterschiedliche Kompaktierungsverhalten des Verstärkungspaketes über der Fläche bedingt im ungünstigsten Fall eine nicht vollständige Kompression des gesamten

Verstärkungsstrukturpaketes aufgrund der nicht auf Endmaß komprimierten Randbereiche.

Zur Reduktion der Materialeinschnürung durch den schlaufenförmigen Einzug des Materials von der trockenen Zuschnittskante und zur Vermeidung der kreisförmigen Bündelung des Lagenpaketes ist der Einsatz der Unterklassen 505 oder 507 anzustreben. Hier wird der Schlingeneinzug um die beschnittene Kante nicht vorgenommen. Durch den Einsatz zusätzlicher Nähfäden entsteht eine Konstruktion um die Lagenpaketkante herum, welche die Materialeinschnürung minimiert. Werden Nähte der Klasse 507 eingesetzt, kann zusätzlich die Schadenstoleranz durch Erhöhung der lokalen Stichdichte und damit des Faseranteils in Dickenrichtung des Laminates heraufgesetzt werden [143, 163, 164, 165].

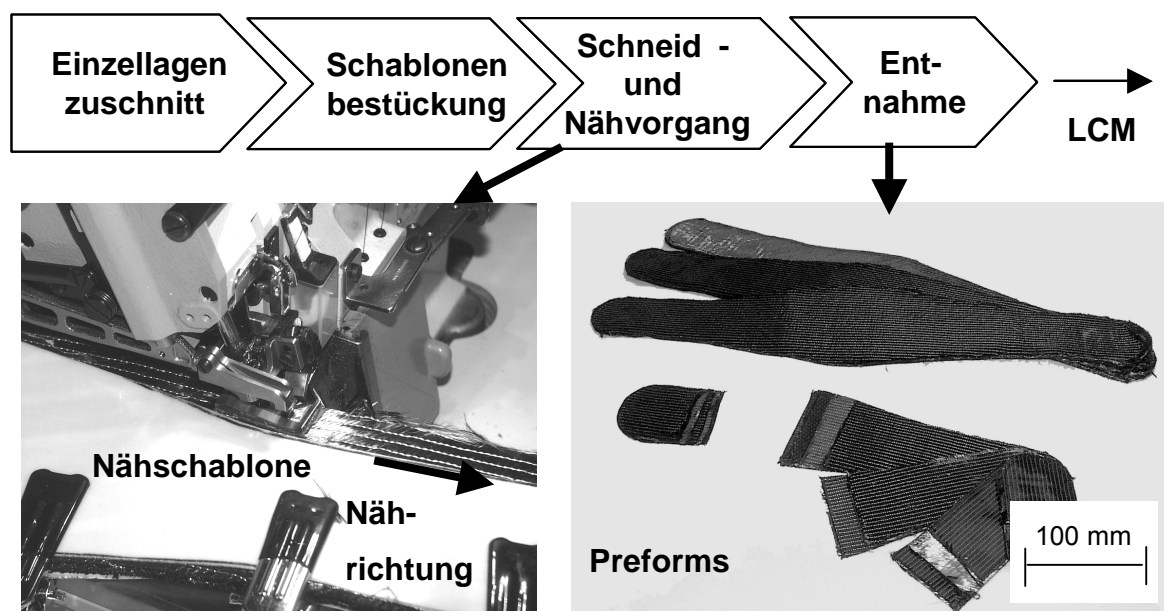


Bild 4-8: Beispiel des Einsatzes eines Überwendlichstichtyps bei der Konfektion der Verstärkungsstruktur für eine HLW – Schwinge

In Bild 4-8 ist der prinzipielle Ablauf zur Konfektion einer ebenen Preform für die Höhenleitwerksschwinge (HLW) des Airbus A340 500-600, ausgehend von einem Lagenaufbau mit Verstärkungsfasergewebe- und Gelegeaufbauten, dargestellt. Nach dem Grobzuschnitt und der Schablonenbestückung erfolgt der kombinierte Schneide- und Nähvorgang. Der Materialdurchgang solcher Maschinen ist im Vergleich zu Standard-Nähmaschinen (z. B. Doppelstepstichmaschinen) gering, was durch die Gestaltung des Greiferhakens bestimmt ist, der das gesamte Lagenpaket umfassen muss. Das Handling dieser Vorformlinge ist als sehr gut zu beurteilen. Das

Ausfransen konnte für die beiden eingesetzten Materialien, Gewebe bzw. Gelege, durch die nun an der Paketkante befindliche Maschenstruktur vermieden werden.

Die Stichbildung selbst ist jedoch als kritisch zu bewerten, da sich die Schlinge am Faserpaket jeweils unterschiedlich in die lockere Faseranhäufung einschnürt. Der Einsatz kann somit im Sinne der Reproduzierbarkeit nur unter Verwendung einer automatisierten Werkstückbewegung erfolgen, wobei zusätzlicher Verschnitt, aufgrund der zunächst mit Übermaß hergestellten Zuschnitte, anfällt. Wird der on-line Kantenbeschnitt eingesetzt, ist der Verschleiß der Schneiden als kritisches Element zu betrachten.

4.2.5 Tufting

Das „Tufting“ im Einsatz zur Dickenverstärkung von FKV wurde aus der klassischen Teppichbodenherstellung übernommen [166, 167, 168]. Das Prinzip von in Reihe geschalteten Nadelbarren bei der Teppichherstellung wird durch den Betrieb einer allein stehenden Nadel ersetzt. Die Bildung der Naht, die im eigentlichen Sinne nicht als Naht bezeichnet werden sollte, da keine Verkettung des Nähfadens erfolgt, basiert auf dem Zusammenspiel von Nähfaden und Nadel mit Nähgut und Nähgutauflage. Letztgenannter kommt wiederum eine zentrale Bedeutung zu. Nach der Penetration des Nähgutes sticht die Nadel in das Trägermaterial ein, wodurch der Nähfaden eingeklemmt wird. Beim Zurückziehen der Nadel bleibt die Schlaufe des Nähfadens (vgl. Nadelhubstellung bei Doppelsteppstich) im Trägermaterial aufgrund der wirkenden Haftreibung zurück. Bild 4-9 a) zeigt dieses Prinzip. Die Rolle des Trägermaterials sowie die Wirkpaarung „Nähfaden und Trägermaterial“ sind nun ersichtlich. Bild 4-9 b) erörtert eine Variante des Einsatzes des „Tuftingstiches“ für FKV.

Die Lage der Verschlaufung kann je nach Einstichtiefe der Nähnel das Nähgut nur partiell in Dickenrichtung penetrieren. Eine dem Belastungsfall angepasste Verstärkung ist nun theoretisch erreichbar. Fall „Einstichtiefe b“ zeigt eine vorliegende Dickenverstärkung über 2/3 der eigentlichen Paketdicke. Der Bereich mit maximaler Schubspannung, der in der Regel in der Mitte des Laminates liegt, wird so in Dickenrichtung verstärkt. Das untere Drittel des Aufbaus ist ungestört und kann

bezüglich der Festigkeit optimal genutzt werden. Als problematisch sind jedoch die veränderten Kompaktierungseigenschaften zu bewerten.

Das „Tufting“ kann – aufgrund der fehlenden Handlingeigenschaften - im Sinne der konfektionstechnischen Preformherstellung nicht eingesetzt werden. Eine tiefgehende Betrachtung dieses Verfahrens unterbleibt deshalb in der vorliegenden Arbeit.

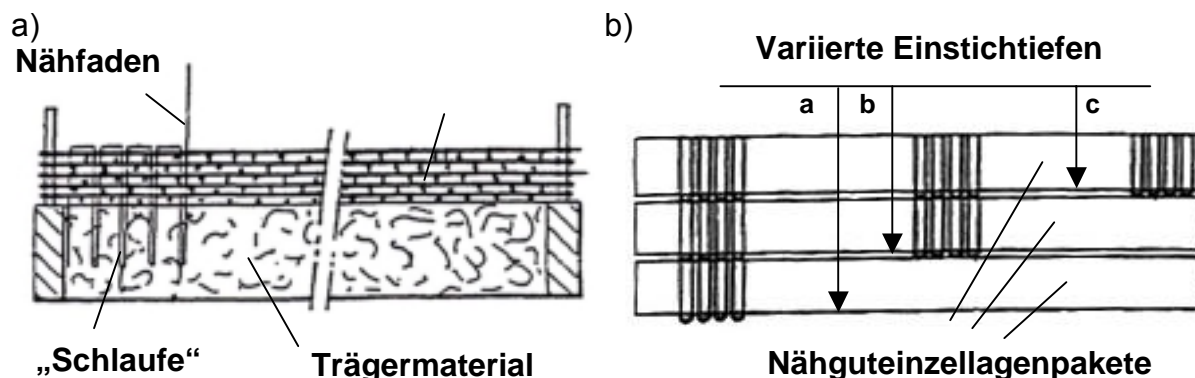


Bild 4-9: Funktionsweise des Tuftings beim Einsatz als Nähstich: a) Stichbildung, b) Variabilität der Dickenverstärkung [169]

4.2.6 Doppelsteppstich

Der Doppelsteppstich ist neben dem Standard-Kettenstich der in der Bekleidungstechnik am häufigsten zum Einsatz kommende Stichtyp. Durchgesetzt hat sich dieser Stichtyp aufgrund der hohen Nahtfestigkeit und der Möglichkeit zur Verwendung unterschiedlicher Farben auf Ober- bzw. Unterseite der verbindenden Textilien. Im Falle der Konfektion bzw. der Dickenverstärkung von FKV-Verstärkungsstrukturen bietet der Doppelsteppstich eine sehr gute Handhabbarkeit der vernähten Halbzeuge. Die Kombination unterschiedlicher Garntypen als Nadel- bzw. Greiferfaden bietet die Möglichkeit, die Verknotung der beiden interagierenden Nähfäden möglichst zu minimieren, was für die Reduktion von Fehlstellen im Laminat essentiell ist. Die Darstellung der Stichbildungsphasen im Doppelsteppstich erfolgt in Kapitel 4.4.

Die zur Verfügung stehenden Nähmaschinenbauarten, die auf Doppelsteppstich beruhen, ist groß. Doppelsteppstichnähte können nur schwer aufgetrennt werden.

Dies ist auch im Falle der Vorbereitung von Verstärkungsstrukturhalbzeugen von großer Bedeutung. Die geringe Dehnfähigkeit der Nähte erlaubt zudem eine sehr exakte Vorbereitung der Preform-Einzelteile, was beispielsweise für den späteren Zuschnitt bzw. die Positionierung von zusätzlichen lokalen Verstärkungsapplikationen wichtig ist. Die reine Nahtbreite beschränkt sich idealerweise auf den Garndurchmesser.

Die weite Verbreitung der Doppelstepstichnähmaschinen führt zu einer sehr großen Palette an verschiedenen Anbietern, Bauarten und Zulieferangeboten von Nähwerkzeugen, die jedoch nur teilweise für den Einsatz bei der Preformherstellung von Interesse sind. Die genaue Kenntnis des Zusammenspiels der „nähenden“ Elemente führte zur Entwicklung von komplett mechanisch entkoppelten Nähkopf (Oberteil)- und Nähmaschinenbett (Unterteil) - Systemen. Gleichzeitig konnte die Möglichkeit zum intermittierenden Transportieren beibehalten werden [170]. Die unabhängige Adaption der zum Nähen notwendigen Nähelemente – Oberteil und Greifer – an ein robotergestütztes Nähsystem erscheint machbar [171]. Drehfähige Nähköpfe zum tangentialen Nähen¹ gehören bei der „Airbag-Konfektion“ in der Automobilbranche zum Standard [151].

Stichbildung beim Doppelstepstich

Von den rund 100 verschiedenen Maschinen-Sticharten ist der Doppelstepstich (Nähstichtyp 301 [172]) der gebräuchlichste. Aufgrund des häufigen Einsatzes dieses Stichtyps ist der Vorgang der Stichbildung detailliert erforscht [173]. Gebildet wird der Doppelstepstich aus zwei Fäden (Bild 4-10). Wie zuvor beschrieben, ist der Einsatzzweck entscheidend für die Auslegung der Naht. In der klassischen nähtechnischen Konfektion ist die Verknotungslage in die Mitte des Nähgutes zu legen, um der Ober- und Unterseite der Naht ein gleiches Aussehen zu verleihen und die Möglichkeit der farblichen Anpassung zu gewährleisten [148].

¹ Tangentiales Nähen: Die Armwelle steht immer senkrecht zur gebildeten Naht. Dies wird entweder durch rotierende oder frei programmierbare Nähguthalter-Systeme erreicht bzw. bei fest eingespanntem Nähgut durch den Einsatz eines drehbaren Nähkopfes.

Der Lage der Naht im Verbund liegt nun bei der Anwendung des Doppelstepstichs für FKV ein verändertes Lastenheft zugrunde. In der Literatur wurde der Effekt der Auslegung des Stiches bezüglich des Einflusses der Verknotungslage auf die mechanischen Eigenschaften des FKV untersucht [174, 175, 176]. Die Verknotungslage ist demnach auf jeweils einer Seite des Nähgutes zu belassen und nicht als Verknotung in das Verstärkungsmaterial einzuziehen. Während in der Bekleidungsbranche der Verknotung eine wesentliche Bedeutung zukommt, dient sie im Falle des Preformings dem besseren Handling. Der Effekt der Verknotung nach dem Imprägnieren wird je nach anliegendem Lastfall unterschiedlich bewertet [177, 178].

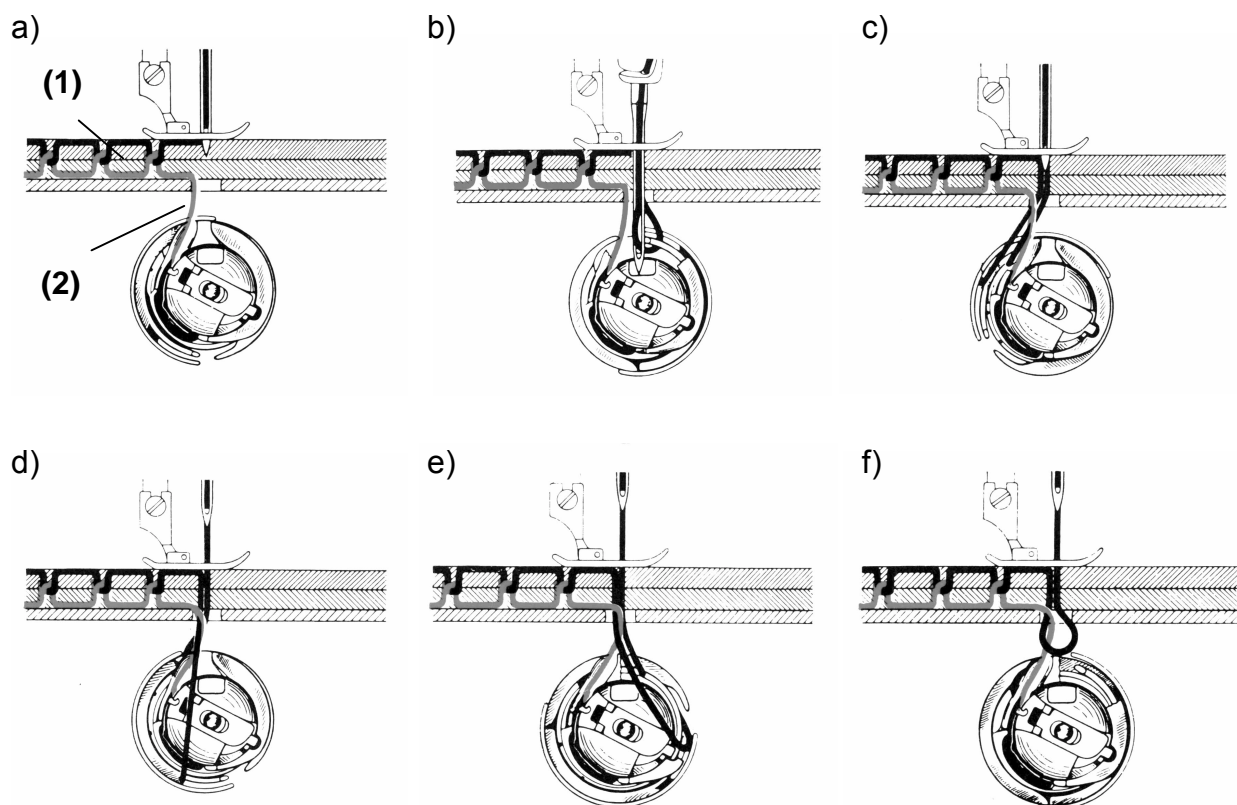


Bild 4-10: Die Bildung eines Doppelstepstichs bei Horizontalgreifer

Setzt man die Notwendigkeit der Justierung der Verknotung an der Materialoberseite voraus [33], ist es möglich, die Nähparameter – innerhalb eines gewissen Fensters - zu variieren. Dieser Effekt hat zunächst Konsequenzen für die Auswahl des Fadenspannungsniveaus und der Nähzwirnmaterialien, die jeweils als Nadel- oder Greiferfaden eingesetzt werden. Geht man von einer nicht tragenden Funktion der Verknotung aus, kann beispielsweise eine Hybridisierung der Naht erfolgen, was bei

geeigneter Nähfadenauswahl die weitere Reduktion z. B. der Oberfadenspannung erlaubt. Zusätzlich kann die „Stichbalance“, also die Lage der Verknotung, an den Lagenaufbau und die zur Verfügung stehende Garnmenge angepasst werden.

In Bild 4-11 sind 3 Fälle eines modifizierten Doppelstepstichs dargestellt, bei dem ausschließlich die Nähparameter variiert wurden. Fall I zeigt die Lage einer Doppelstepstichnaht mit einer zu hohen Oberfadenspannung. Das Material weitet sich auf, jedoch findet keine lokale Kompaktierung statt. Fall II bildet die Situation, die sich durch den Einsatz einer sehr niedrigen Fadenkraft aber hohen Presserkraft einstellt, ab. Fall III zeigt eine Naht in einem Verstärkungsstrukturpaket ohne lokale Einschnürung und ohne Aufweitung des Materials im Stichlochbereich. Dieser letzte Fall ist für FKV-Anwendungen anzustreben.

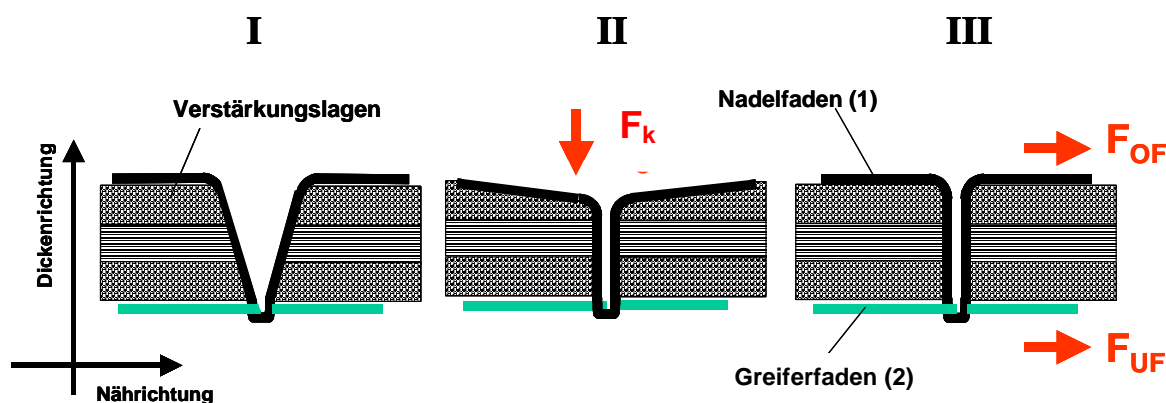
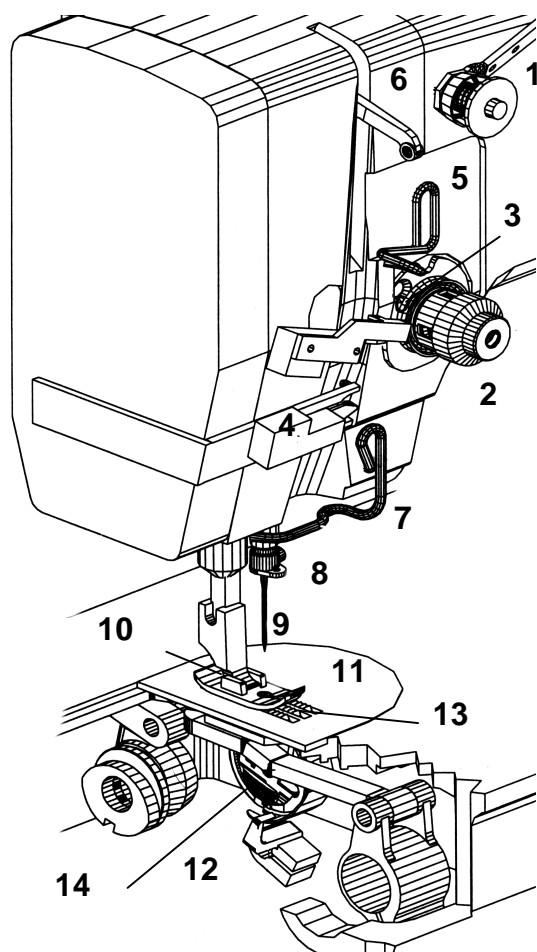


Bild 4-11: Verknotungslage des Doppelstepstichs für FKV-Anwendungen

Diese 3 Abläufe lassen sich maßgeblich durch die Nähkenngößen Fadenkraft – inklusive der Auswahl der Garnkonstruktion –, Presserfußkraft und durch die Art der Materialvorbehandlung - Vorkompaktieren oder Vorverfestigen – einstellen.

Im folgenden soll nun der Vorgang der Stichbildung prinzipiell erläutert werden: Der federbelastete Nähfuß (10) fixiert das Nähgut auf der Stichplatte (11). In ihrer Abwärtsbewegung sticht die Nadel (9) in das Nähgut und das in der Stichplatte befindliche Stichloch ein und zieht so eine Doppellage des Nadelfadens unter die Stichplatte (Bild 4-10 a)). Aufgrund ihrer Formgebung bildet sich bei der Aufwärtsbewegung der Nadel auf der der Greiferspitze zugewandten Seite reibungsbedingt eine Schlinge aus, die von der Greiferspitze erfasst wird (Bild 4-10 b)). Der mit doppelter Drehfrequenz umlaufende Greifer (14) weitet die Schlinge auf und führt sie um die Spulenkapsel mit darin befindlicher Spule und Spulenfaden

herum (Bild 4-10 c,d)). Die Spulenkapsel ist schwimmend im Greiferkörper gelagert (umgekehrtes Gleitlager, [179]) und durch den Anhaltestift gegen Verdrehen gesichert.



- 1 Fadenführung mit Vorfadenbremse
- 2 Hauptfadenbremse
- 3 Anzugsfeder
- 4 Fadenkraftsensor
- 5 Fadenregulator
- 6 Fadenhebel
- 7 Fadenführungshaken
- 8 Nadelhalter und Nadelhalterbohrung
- 9 Nadel und Nadelöhr
- 10 Nähfuß (Presserfuß)
- 11 Stichplatte mit Stichloch
- 12 Kapsellüfter
- 13 Transporteur
- 14 Greifer

Bild 4-12: Wesentliche Bestandteile einer Doppelstepstich-Nähmaschine

Während der Stichbildung auf einer Nähmaschine kommt neben der Steuerung des Nähvorgangs (Nadel-, Greifer- und Transportbewegung) der Gestaltung der fadenführenden Teile der Nähmaschine (Hauptfadenbremse, Fadenhebel, usw.) eine zentrale Bedeutung zu (Bild 4-12).

Bis zum Zeitpunkt der größten Schlingenaufweitung und Umführung um den Greiferkörper hat der Fadenhebel (6) die Aufgabe, genügend Nadelfaden für die Schlingenaufweitung zur Verfügung zu stellen, d. h. die Fadengabe muss größer oder gleich dem Fadenbedarf sein.

Nach beendeter Umführung (Bild 4-10 e)) zieht der Fadenhebel den Nadelfaden zurück (Bild 4-10 f)), bis der Verschlingungspunkt an der vorgesehenen Stelle des

Lagenpaketes zum Erliegen kommt (Sticheinzugsphase). Der Transport des Materials bzw. die Umpositionierung des Nähgutes muss, bevor die Nadel zum nächsten Mal die Oberseite des Nähgutes berührt, abgeschlossen sein. Die variable Dicke der Halbzeugpakete erfordert die Kenntnis der exakten Nadelposition in Abhängigkeit vom Transportfenster, um keine Materialbeschädigungen herbei zu führen. Jegliche Relativbewegung zwischen Fasermaterial und Nadel bei Kontakt dieser Teilsysteme ist zu vermeiden.

Als belastungsabhängiger Fadenspeicher hat die Anzugsfeder (3) nach Fischer von Mollard [180] im wesentlichen die Aufgabe, bestimmte, während der Fadenanzugsphase auftretende hohe Beschleunigungsspitzen des Nadelfadens abzumindern. Die Fadenbremse (2) stellt dabei die für einen sauberen Sticheinzug benötigten funktionsbedingten Kräfte zur Verfügung.

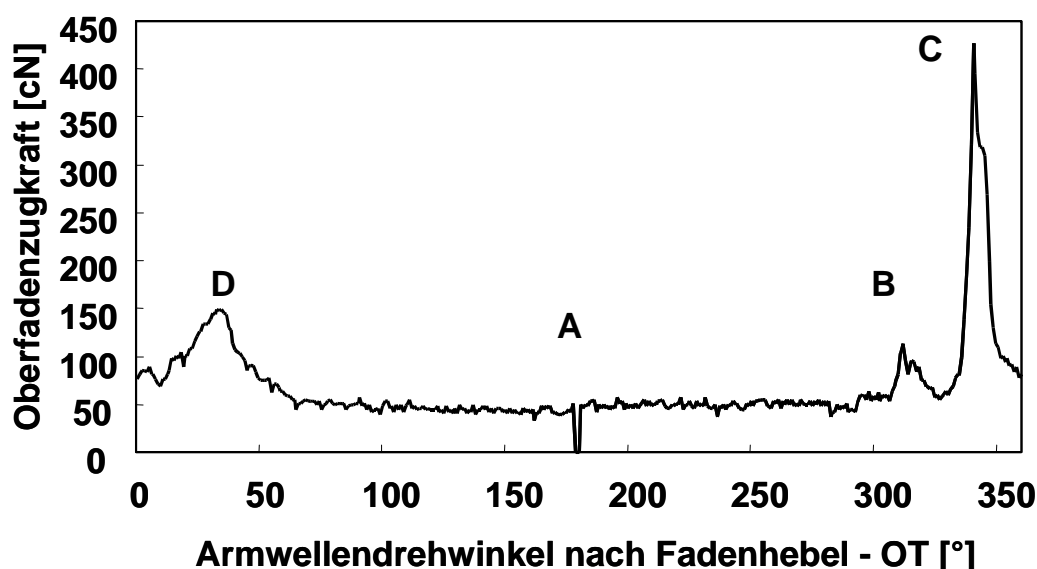


Bild 4-13: Fadenkraftverlauf einer Glasfasergarn-Naht auf einem Preformaufbau

Der durch die Stichbildungsphasen vorgegebene Fadenkraftverlauf kann zur Dokumentation und Beurteilung der Naht eingesetzt werden. Für FKV-Anwendungen ändert sich der Fadenkraftverlauf gegenüber einer Standardnaht maßgeblich durch die Dicke des Paketes und die veränderten Reibungsverhältnisse zwischen Nähgarn und Verstärkungsstruktur. Bild 4-13 zeigt einen gemessenen Fadenkraftverlauf einer Glasfasergarn-Naht (EC 9, 68x2 tex, 1383) auf einem Multiaxialgelege-Aufbau $[0/90/+ /45-45]_{2s}$. Zur Ermittlung der Fadenkraft wurde das Doku-Naht-System der Firma Pfaff Industrie Maschinen GmbH eingesetzt [181]. Die Auswertung der

Fadenkraftverläufe erlaubt bei der Verarbeitung von Verstärkungsstrukturen Rückschlüsse auf die Qualität der vernähten Preform. Im folgenden sind zwei durch veränderte Nähbedingungen beeinflusste Bereiche des Fadenkraftverlaufs dargestellt.

Position A (Schlingenhubposition) gibt immer eine Position mit „Fadenlose“ an, Punkt B wird durch den Schnapper der Anzugsfeder gegeben. Die Ausprägung dieses lokalen Maximums wird durch die Anzugsfedercharakteristik, das dynamisch viskose Garnverhalten und die Reibung zwischen Verstärkungsstruktur und Nähgarn bestimmt. Das Fadenkraftmaximum bei C entsteht bei Sticheinzug durch die maximale Auslenkung der Anzugsfeder (Fadennachzug) und kurz vor der Fadenhebel-OT Stellung. Die Ausprägung ist ebenfalls durch die Materialpaarung definiert. Punkt D entsteht durch mehrere Effekte. Der Eintritt der Nadel in das Nähgut erfolgt bei den hier beschriebenen Anwendungen bereits bei einer Position der Armwelle von 30-60° nach OT. In dieser Phase wird nun der Faden in das Material eingezogen.

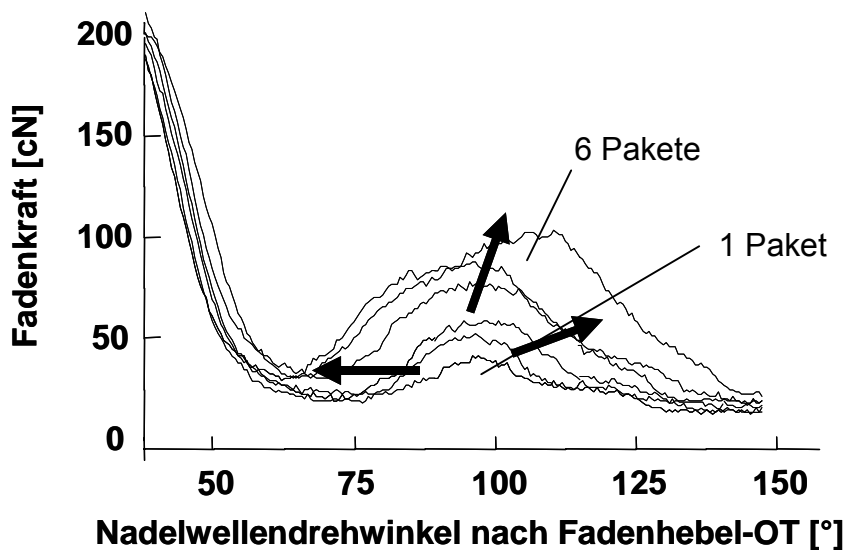


Bild 4-14: Ausschnitt des Fadenkraftverlaufs beim Nähen eines treppenartigen Preformaufbaus (stufenweise Addition von Lagenpaketen)

Der Peak B (Bild 4-13) wird maßgeblich durch die Nähgutdicke verändert. Die veränderte Nähgutdicke bewirkt eine längere Reibstrecke zwischen Nähgarn und Nähgut, was zu einem erhöhten Fadenkraftniveau in dieser Phase der Stichbildung führt. Durch die Ausbildung des Peaks ist die erhöhte Fadenkraft sichtbar, was auf erhöhte Reibung zwischen Nähgarn und Material hindeutet. Dies wiederum führt zu

erhöhtem Garnverschleiß, verstärktem Abrieb und damit zu Fehlstichen. Bild 4-14 zeigt den Effekt anhand experimentell ermittelter Kurven. Als Beispiel wurde eine Variation der Lagenanzahl, z. B. an einem Dickenübergang, simuliert. Glasfaser-Multiaxialgelege mit einem Lagenaufbau $[0/90/90/0]$ lagen jeweils als Mehrlagenpaket vor. In der Darstellung zeigt sich deutlich der frühere Beginn des Fadendruckaufbaus bei gesteigerter Paketanzahl.

Die Verschiebung der lokalen Maxima zu einem späteren Zeitpunkt der Stichbildung deutet auf die Klemmzeit des Garns im Halbzeug hin. Bei den dargestellten Versuchen wurde mit einer konstanten Presserfußkraft am Nähfuß von 45 N gearbeitet. Die Justierung der Presserfußkraft erfolgte mechanisch.

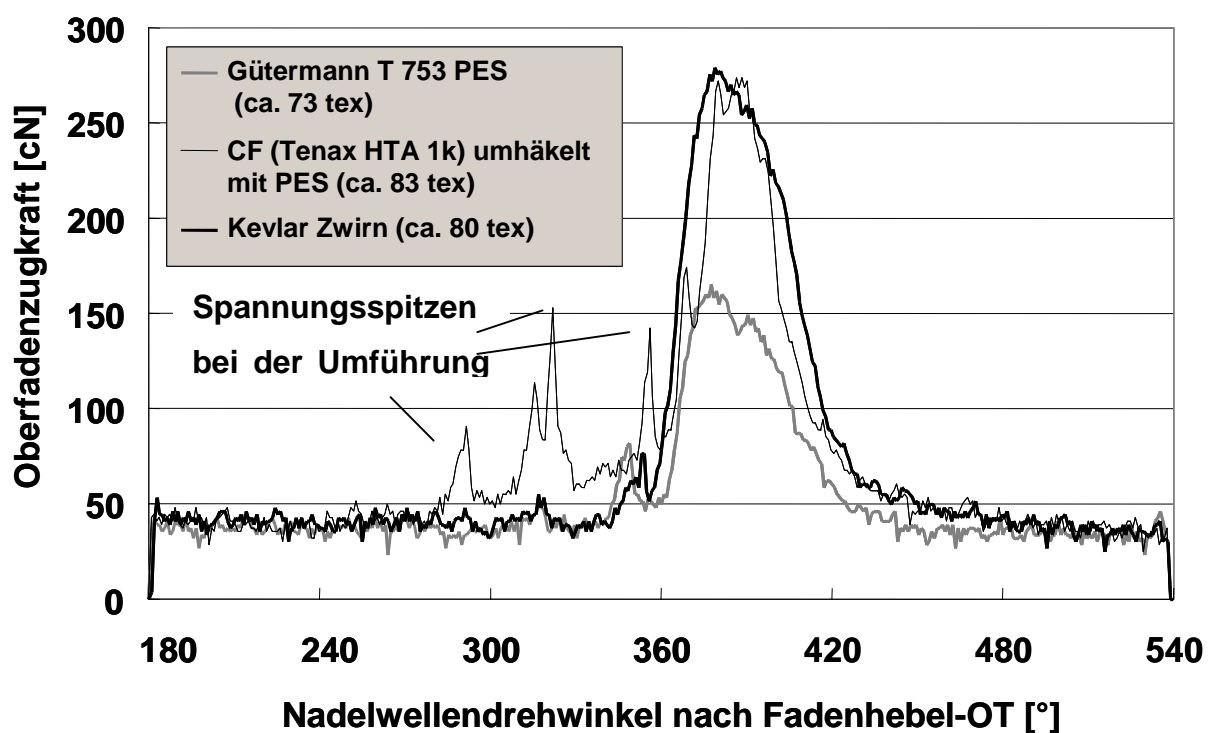


Bild 4-15: Gemessene Fadenkraftverläufe für verschiedene Nähgarne

Werden hochsteife Zwirne, wie beispielsweise Kohlenstofffaser- oder Aramidfasertypen, als Nähgarn eingesetzt, kommt es bei der Umschlingung bzw. Umführung des Greiferkörpers zu Spannungsspitzen. Diese Spannungsspitzen führen bei der Vernähung von hochspröden Kohlenstofffasern zu Fadenbrüchen. Bild 4-15 zeigt anhand gemessener Fadenkraftkurven den Effekt bei der Umschlingung des Greiferkörpers. Ist der Fadenkraftverlauf homogen - d. h. liegt ein ausgeprägtes Maximum beim Sticheinzug vor und sind keine zusätzlichen Ausreißer über dem

Fadenkraftverlauf vorhanden - kann man von einer störungsfreien Vernähbarkeit des Nähgarns ausgehen.

Wie bereits beschrieben, geht die Fadenkraft als wesentlicher Faktor in die Bestimmung der Qualität einer Preform ein. Die Fadenkraft selbst wird nun maßgeblich durch die fadenführenden Elemente der Nähmaschine bestimmt. Die Anforderungen an die Garnführungen sind wiederum abhängig von den Nahtanforderungen.

4.2.7 Vergleich zum Fadenverbrauch

Der Fadenverbrauch bei der Anwendung der Nähtechnik zur Konfektion von Verstärkungsstrukturpreforms ist hinsichtlich der entstehenden Reibkräfte bzw. Geschwindigkeiten an den Fadenleitorganen ein bestimmender Faktor. Durch erhöhte Fliehkräfte, die bei einem gesteigerten Fadenverbrauch auftreten, steigt die Fadenkraft an, was zu einem höheren Spannungsniveau während der Stichbildung führt, aber auch den Verschleiß an den fadenführenden Elementen begünstigt. Im Vergleich zu Standardanwendungen der Nähtechnik treten bei Konfektion von Verstärkungspaketen Materialdicken von 0,4 - 15 mm auf. Dies führt, im Falle der maximalen Ausnutzung des Materialdurchgangs, zu einem stark ansteigenden Fadenbedarf. Die für FKV-Anwendungen vorgesehenen Stichtypen unterscheiden sich hinsichtlich der Lage des Stiches im Verstärkungsstrukturpaket deutlich.

Nähtechnische Preformkonfektion ist nur bei einem Einsatz von Nähgeschwindigkeiten > 500 SPM wirtschaftlich zu betreiben. In Bild 4-16 werden die Grenzen der Einseitennähtechniken aufgezeigt. Um die gemittelte Nähfadengeschwindigkeit (benötigte Fadenmenge pro Zeit) zu berechnen, wurden die jeweiligen Formeln zur Feststellung des Nähfadenverbrauchs (Anhang 2) pro Einzelstich auf die Nähgeschwindigkeit bezogen. Die Berechnung der mittleren Nähfadengeschwindigkeit v_{Faden} erfolgt nach Gleichung 4-1:

$$v_{Faden} = L_{Garn(Einzelstich)} * v_{näh} \quad (Gl. 4-1)$$

Beim Vergleich der auftretenden mittleren Nähfadengeschwindigkeiten der unterschiedlichen Stichtypen muss berücksichtigt werden, dass in der Bekleidungstechnik mittlere Nähfadengeschwindigkeiten von max. 350 mm/s auftreten. Ist bei einem Lagenaufbau mit einer Nähgutdicke von 5 mm (Presserfußhöhe) eine mittlere Nähfadengeschwindigkeit von max. 250 mm/s (Erfahrungswert) möglich, so erreicht man bei Anwendung des Doppelsteppstichs eine Nähgeschwindigkeit von 1150 SPM, bei Doppelkettenstich 800 SPM, bei Blindstich 400 SPM und bei OSS[®] 320 SPM. Stellt man einen Bezug zur Stichdichte her, kann man nun die reale Nähzeit ermitteln. Diese entscheidet über die Wirtschaftlichkeit der nähtechnischen Konfektion von textilen Preforms.

Geht man davon aus, dass zur Herstellung einer Preform mit einem definierten Dickenverstärkungsanteil – Flächengewicht der Dickenverstärkung $\psi_{Z\text{-Gewicht}}$ - eine feste Anzahl an notwendigen Einzelstichen SA erforderlich ist, wird die Relevanz der Nähgeschwindigkeit deutlich. Die Nähzeit $t_{näh}$ errechnet sich nach Gleichung Gl. 4-2.

$$t_{näh} = \frac{v_{näh}}{SA} \quad (\text{Gl. 4-2})$$

Die Nähzeit muss dann als kritisches Moment bewertet werden, wenn man den Wirkungsgrad der einzelnen Stichtypen berücksichtigt. Das erreichte Kosten-Nutzen-Verhältnis wird folglich von der maximal möglichen Nähgeschwindigkeit und dem Wirkungsgrad des Nähstichs determiniert.

Die Darstellung in Bild 4-16 zeigt 3D-Ansichten der Verläufe der mittleren Nähfadengeschwindigkeiten abhängig von Nähgutdicke und Nähgeschwindigkeit. Als Parameter wurde eine Stichlänge von 3 mm angenommen.

Der Unterschied, der zwischen den einzelnen Nähstichvarianten auftritt, wird durch die entsprechenden Formeln zur Ermittlung des Nähfadenverbrauchs pro Einzelstich (Anhang 2) berechnet. Im Vergleich zum Doppelsteppstich, bei dem die Stichlänge nur einfach in die Berechnung eingeht, ist beim Blindstich und OSS[®] die Stichlänge mit dem Faktor 2 respektive 3 in den Berechnungsformeln enthalten.

Im Sinne der wirtschaftlichen Herstellung von Preforms ist ersichtlich, dass der Doppelsteppstich unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen aus der

FKV-Verarbeitung die Möglichkeit bietet, höhere Nähgeschwindigkeiten (> 1000 SPM) zu erreichen. Demzufolge können Sonderstichtypen, wie z. B. Blindstich oder OSS[®], nur für Spezialanwendungen (z. B. Final-Preform-Assembly (FPA) an schwierig zu erreichenden Bauteilsektionen) wirtschaftlich eingesetzt werden.

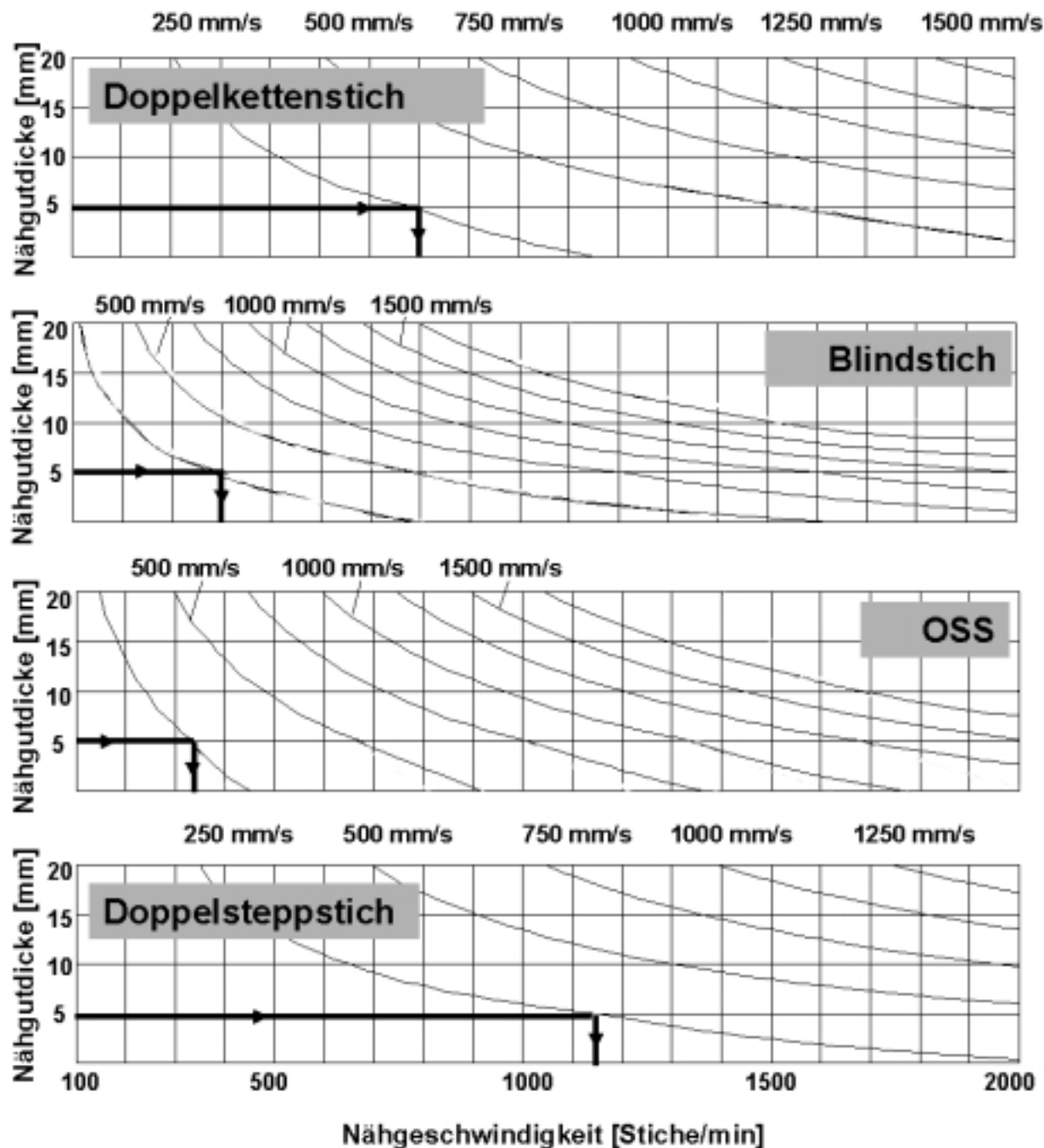


Bild 4-16: Übersicht der relativen Nähfadengeschwindigkeiten für verschiedene Nähstichtypen und Nähgeschwindigkeit bei 3 mm Stichtlänge

4.2.8 Vergleich hinsichtlich Nähstichdichte und Dickenverstärkung

Den Bezug zwischen nähtechnischen Konfektionsparametern und der Herstellung von FKV bildet die Betrachtung der Faservolumenanteile. Zu unterscheiden sind die eingebrachte Fasermenge durch den Nähprozess und der Anteil der eingebrachten Fasermengen in Dickenrichtung des Laminates. Betrachtet man eine Einheitszelle (10 mm x 10 mm Flächensegment eines vernähten Lagenpaketes) und wählt Stichlänge und Nahtabstand, so ergeben sich die Stichdichte und die Fasermengen, die in Dickenrichtung des Laminates eingebracht wurden. Die Berechnung des Flächengewichtes der Nahtstruktur im Laminat erfolgt über die Kenntnis des Fadenverbrauchs pro Einzelstich $L_{\text{Garn(Einzelstich)}}$ der eingebrachten Garnmenge $L_{\text{Garn(Naht)}}$ und des Garngewichtes GW . Dividiert man die eingebrachte Garnmenge durch die Grundfläche der vernähten Fläche A_{Preform} , erhält man das Flächengewicht der Nahtstrecke bezogen auf diese Grundfläche. Die Verstärkungsanteile der Nahtstrecke in Dickenrichtung ergeben sich nach den Faktoren aus Tabelle 4-2. Für das Flächengewicht in Dickenrichtung $\psi_{Z\text{-Gewicht}}$ eines Laminates gilt:

$$\psi_{Z\text{-Gewicht}} = \frac{L_{\text{Garn(Naht)}} * GW * \eta_{\text{Naht}}}{1000 A_{\text{Preform}}} \quad (\text{Gl. 4-3})$$

Der Wirkungsgrad einer Naht η_{Naht} wird durch den möglichen Dickenverstärkungsanteil $L_{\text{Dickenrichtung}}$ pro eingebrachter Gesamtgarnmenge pro Einzelstich $L_{\text{Garn(Einzelstich)}}$ bestimmt.

$$\eta_{\text{Naht}} = \frac{L_{\text{Dickenrichtung}}}{L_{\text{Garn(Einzelstich)}}} \quad (\text{Gl. 4-4})$$

Um eine gewünschte Verstärkung des herzustellenden Laminates in Dickenrichtung zu erzielen, müssen zunächst die Faseranteile in den Hauptrichtungen festgelegt werden. Gemäss Tabelle 4-2 sind die notwendig einzubringenden Garnmengen den jeweiligen Stichtypen zugeordnet, aber unabhängig von der quantitativ einzubringenden Garnmenge abzulesen. Ist der Wirkungsgrad einer Naht z. B. 66 %, werden nur 34 % der Gesamtgarnmenge ohne Funktion in den FKV eingebracht. In Anhang 2 ist eine Auflistung der hier angewandten Formeln zur Berechnung der Garnmengen pro Einzelstich eines Stichtyps respektive einer Zuordnung zu den

jeweils eingebrachten Dickenverstärkungsanteilen gegeben. In Tabelle 4-2 wurde eine Vereinheitlichung der Paketdicke vorgenommen, um den „Wirkungsgrad“ der Naht η_{Naht} zu berechnen. Zur Berechnung wurde jeweils die technologisch bedingt minimale Stichlänge angenommen. Als Nähgutdicke wurde 5 mm gewählt.

Tabelle 4-2: Vergleich der Dickenverstärkungswirkungsgrade verschiedener Stichtypen (Einheitszelle) bei minimaler Stichlänge (Nähgutdicke = 5 mm)

Nähstichtyp	Dickenverstärkungsanteil der Naht η_{naht}
Doppelstepstich	83 % (SL = 1)
Einfadenkettenstich	76 % (SL = 1)
Tufting-Stich	90 % (SL = 1)
Blindstich	54 % (SL = 8 mm)
OSS [®]	55 % (SL = 3 mm)

In Bild 4-17 sind anhand einer schematischen Darstellung einer vernähten Preform die Begriffe Nahtabstand NA und Stichlänge SL erläutert. a und b ergeben die Grundfläche der Preform $A_{Preform}$.

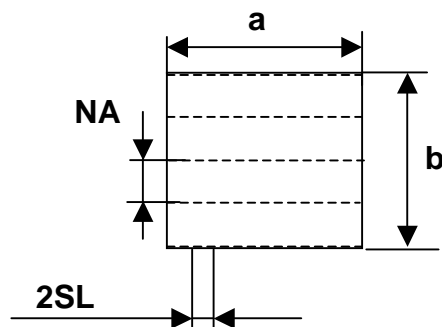


Bild 4-17: Darstellung einer vernähten Einheitszelle

Die Stichdichte SD ergibt sich aus der Stichanzahl pro Fläche, wobei die Stichanzahl SA durch SL und NA bestimmt wird:

$$SA = \frac{a}{SL} * \frac{b}{NA} ; \frac{SA}{A_{Preform}} = SD \quad (\text{Gl. 4-5})$$

Für die Gesamtgarnlänge $L_{\text{Garn(Naht)}}$ ergibt sich somit ein Term (Gl. 4-6), der abhängig vom Garnverbrauch $L_{\text{Garn(Einzelstich)}}$ ist. $L_{\text{Garn(Einzelstich)}}$ variiert gemäß Anhang 2 für die verschiedenen Stichtypen.

$$SD * A_{\text{Preform}} * L_{\text{Garn(Einzelstich)}} = L_{\text{Garn(Naht)}} \quad (\text{Gl. 4-6})$$

Beispiel: Wird ein Garn der Stärke 100 tex für eine Gesamtgarnlänge $L_{\text{Garn(Naht)}}$ von 1000 m eingesetzt, entspricht dies einem Garngewicht von 100 g. Bezogen auf eine Grundfläche der Preform A_{Preform} von 1 m² erreicht man somit ein Nahtflächengewicht von 100 g/m². Bei Anwendung des Doppelsteppstichs und einer Nähgutdicke von 5 mm ergeben sich davon je nach Stichlänge zwischen 38 und 83 % der eingebrachten Garnmenge für die Dickenverstärkung $\psi_{Z\text{-Gewicht}}$, also zwischen 38 und 83 g. Stellt diese Preform einen Aufbau mit einem Gesamtflächengewicht von 6600 g/m² dar, erreicht man damit nach Gleichung Gl. 4-7 einen $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ zwischen 0,5 und 1,2 %.

$$\psi_{Z\text{-Anteil}} = \frac{\psi_{Z\text{-Gewicht}}}{G_{\text{Preform}}} \cdot 100 \quad (\text{Gl. 4-7})$$

In vielen Anwendungsfällen muss in der Verstärkungsstruktur ein zusätzlicher, exakt einstellbarer Faseranteil in Dickenrichtung des Laminates eingebracht werden, um den gewünschten Effekt einer Laminat-Dickenverstärkung zu erreichen. Abhängig von den technologischen Eigenschaften des Stichtyps können, zugeordnet zu den einzustellenden Flächengewichten der Verstärkungsfasermenge in Dickenrichtung $\psi_{Z\text{-Anteil}}$, die makroskopischen Nähparameter (Stichanzahl und Garngewicht) festgestellt werden. Je nach technologischer Gegebenheit ist es nun möglich, diesen gewünschten Verstärkungseffekt zu erzielen.

In Bild 4-18 wurde ein Vergleich der Technologien durchgeführt. Soll ein Dickenverstärkungsanteil $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ von 5 % des Gesamtflächengewichtes erzeugt werden, muss z. B. im Falle des Doppelsteppstichs eine definierte Anzahl an Stichen in die Verstärkungsstruktur eingebracht werden. Die Nähstichdichte führt zur Auswahl der Nähparameter Stichlänge SL und Nahtabstand NA. Die technologischen Eigenschaften des Doppelsteppstichs limitieren jetzt die Freiheit bei der Festlegung bzw. Auswahl von NA und SL. Gleiches gilt für die anderen Nähstichtypen.

Die Anzahl der möglichen, auf einer Grundfläche einzubringenden Stiche ist durch die technologischen Einsatzgrenzen der Nähtechniken definiert. Die Anzahl der Stiche (Stichanzahl SA), die abhängig von der einzusetzenden Technik in eine Preform eingebracht werden müssen, berechnet sich nach Gleichung G. 4-8. Die Stichanzahl ist zunächst unabhängig von der Stichlänge. Es besteht eine direkte Abhängigkeit vom Nahtwirkungsgrad.

$$SA = \frac{\frac{\psi_{Z\text{-Gewicht}}}{GW}}{L_{\text{Garn(Einzelstich)}} \cdot \eta_{\text{Naht}}} \quad (\text{Gl. 4-8})$$

Aus Bild 4-18 kann entnommen werden, dass bei Anwendung des Doppelsteppstichs im Vergleich zu Blindstich oder OSS[®] sehr hohe Dickenverstärkungsanteile $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ erreicht werden können. Vernachlässigt wird die durch den Nähstich selbst erzeugte Faserverdrängung, die zu einer Steigerung des realen Verstärkungsfaseranteils führen würde. Geht man bei der Betrachtung von einer Vernähdichte von 2,5 x 2,5 mm (Stichlänge = 2,5 mm und Nahtabstand = 2,5 mm) aus, bietet das Diagramm die Möglichkeit, im Falle gleicher Paketgewichte, jedoch unterschiedlicher Kompaktierung und Endhöhe des trockenen Faserpaketes, den hierfür zu erreichenden $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ abzulesen. Im Falle der Kompaktierung des Lagenpaketes auf 4 mm kann etwa 3 % = $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ erreicht werden. Diese Betrachtung wurde unabhängig von der späteren Konsolidierungsphase, z. B. während der Harzinjektion, durchgeführt. Für den Fall eines 5 mm FKVs gelangt man durch Kenntnis der Stichanzahl bei einer Vernähdichte von 2,5 x 2,5 mm zu einem Dickenverstärkungsanteil $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ von etwa 5%. Bild 4-18 erlaubt die Ermittlung der notwendigen Stichanzahl zur Herstellung eines bestimmten Dickenverstärkungsanteils zugeordnet zu den Stichtypen. Will man einen Dickenverstärkungsanteil $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ von 14 % einstellen (Punkt A), liest man über die Kurve des entsprechenden Stichtyps (hier: Doppelsteppstich) die notwendige Stichanzahl SA ab (Punkt B). Die Kurvenschar verändert sich entsprechend den eingesetzten Nähgarnen bzw. Halbzeugen und Lagenaufbauten.

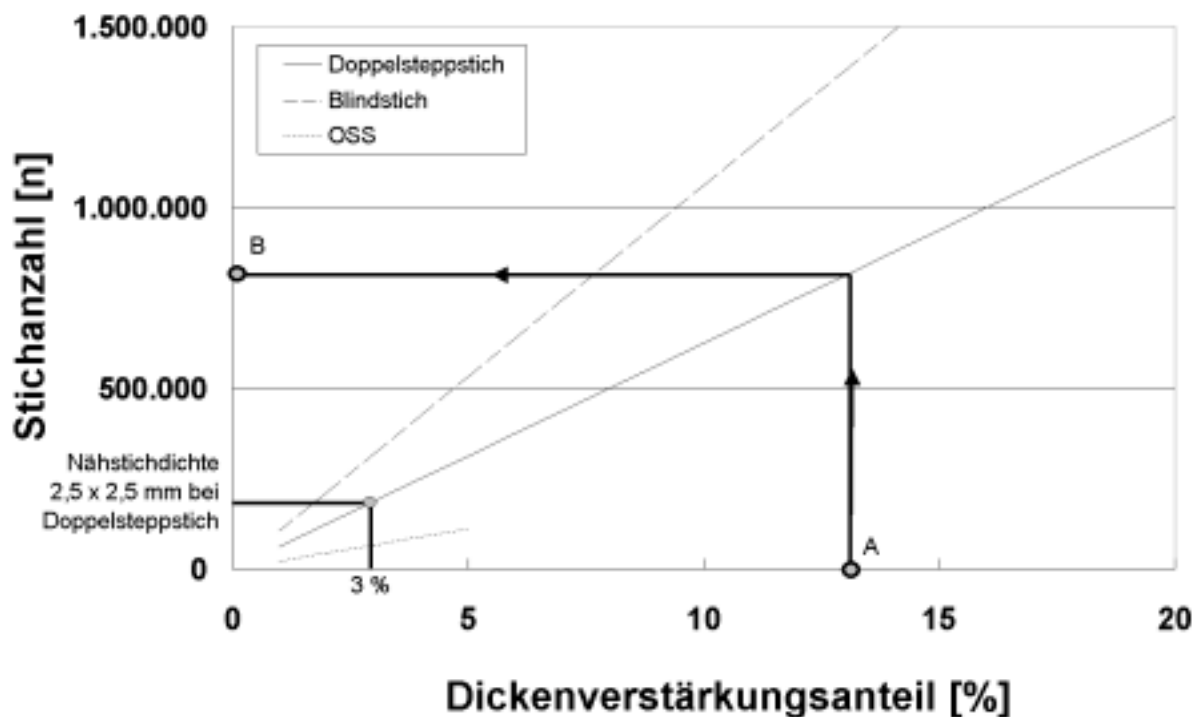


Bild 4-18: Einsatzfähigkeit verschiedener Nähtechnologien zur Erzeugung definierter Flächengewichtsanteile eines Verstärkungsstrukturpaketes in Dickenrichtung (Aufbau: Paketgewicht 5000 g/m², Nähgarn 100 tex, Bezugsfläche $A_{\text{Preform}} = 1 \text{ m}^2$, Laminatdicke = 4 mm)

Betrachtet man im Vergleich zu obigem Beispiel die moderaten Dickenverstärkungsanteile $\psi_{Z\text{-Anteil}}$, die durch den Einsatz der Einseitennähverfahren, Blindstich und OSS[®], erreicht werden können, und korreliert dies mit den technologischen Einschränkungen, wird in diesem Zusammenhang das Potenzial des Doppelstepstichs deutlich. Das Tufting kann als eine idealisierte Variante des Doppelstepstichs angenommen werden und wurde deshalb in Bild 4-19 nicht berücksichtigt. Im Falle des Blindstichs kann ein Dickenverstärkungsanteil $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ von 5 % im diskutierten Fall nur durch Herabsetzung der minimalen Stichelänge erfolgen.

Im Falle OSS[®] ist die Nahtbreite das limitierende Element. Eine Verschachtelung zweier Stichreihen führt zu einer halbierten Stichbreite (6,5 mm), was jedoch hinsichtlich der Erzeugung einer flächigen Dickenverstärkung die Realisierung hoher

Faservolumenanteile in Dickenrichtung $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ nicht möglich macht. Bei einer Stichlänge von 2 mm und einer optimalen Verschachtelung sind im vorliegenden Fall $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ von 3% zu realisieren.

Zudem ist die Frage nach dem einzusetzenden Nähgarn zu klären. Können Verstärkungsnähfäden einer gröberen Feinheit eingesetzt werden, ist es möglich, die Dickenverstärkungsflächenanteile zu erhöhen. Unter Beibehaltung sämtlicher Randbedingungen (Paketflächengewicht 5.000 g/m², Kompaktierungshöhe 4 mm) wurde nun unabhängig vom verwendeten Material ein Garn gröberer Feinheit (200 tex) verwendet. In Bild 4-19 sind wiederum die notwendige Stichanzahl und der zu erreichende Flächengewichtsanteil dargestellt. Durch den Einsatz eines solchen Garntyps wird es möglich, mit der Blindstichttechnologie einen $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ von 5 % unter Annahme einer idealen Faserlage zu erreichen.

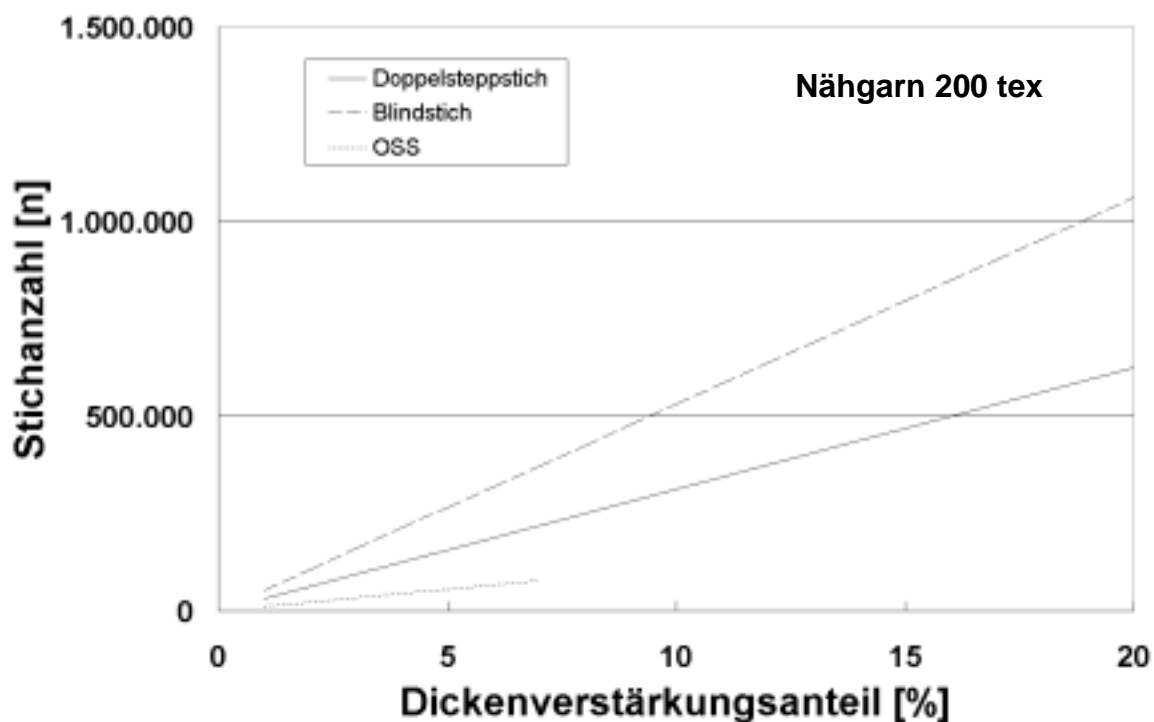


Bild 4-19: Einsatzfähigkeit verschiedener Nähtechnologien zur Erzeugung definierter Flächengewichtsanteile des Verstärkungsstrukturpaketes in Dickenrichtung (Aufbau: Paketgewicht 5000 g/m², Nähgarn 200 tex, Bezugsfläche $A_{\text{Preform}} = 1 \text{ m}^2$, Laminatdicke = 4 mm)

Betrachtet man OSS[®], kann durch das 200 tex Nähgarn ein $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ von etwa 7 % erreicht werden. Die technologisch einfachere Variante des OSS[®] (keine Verschachtelung) ermöglicht die Realisierung von $\psi_{Z\text{-Anteil}} = 3,5$ %. Die Flexibilität des Doppelsteppstichs bietet bei Anwendung der 2,5 x 2,5 mm Nähfläche einen $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ von 11%. Die Faserdesorientierung durch die Sticheinbringung, abhängig vom Maß der Stichdichte, kann durch Reduktion der Stichanzahl vermindert werden.

In Bild 4-20 wird für den Doppelsteppstich der Zusammenhang zwischen Dickenverstärkungsanteil $\psi_{Z\text{-Anteil}}$, Materialdicke, Stichanzahl, Stichelänge und Nahtabstand graphisch dargestellt. Ist für einen Dickenverstärkungsanteil $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ von 5 % in einem Lagenaufbau mit einem Gesamtgewicht von 5000 g/m² eine notwendige Stichanzahl gegeben, kann gemäß Diagramm eine für den FKV optimale Kombination aus Stichelänge und Nahtabstand ermittelt werden. Die Auswahl einer optimalen Stichelänge SL und eines optimalen Nahtabstandes NA ist zunächst im Zusammenhang mit der Nährichtung zu sehen. Zusätzlich können sich durch die Bauteil- bzw. Preform-Konstruktion Forderungen nach einer Vorzugsrichtung der Nähte ergeben, die die Auswahl von SL und NA bestimmen.

Die durch Stichelänge und Nahtabstand definierte Stichanzahl kann ebenso für die Einstellung des Kompaktierungsgrades beim Nähen eingesetzt werden. Zusätzlich können technologische Grenzen in das Diagramm eingetragen werden, die wiederum die Freiheit der Auswahl von SL und NA beschränken. So kann beispielsweise die Reduktion der Stichelänge nur abhängig von der eingesetzten Nähgarnstärke erfolgen. Für sehr feine Nähgarne können ein Nahtabstand und eine Stichelänge von jeweils 1 mm erreicht werden. Größere Nähgarne lassen sich erst ab einer gewissen Mindeststichelänge einsetzen.

Das in Bild 4-20 dargestellte Kennlinienfeld kann an verschiedene Lagenaufbauten und Flächengewichte einer Preform angepasst werden.

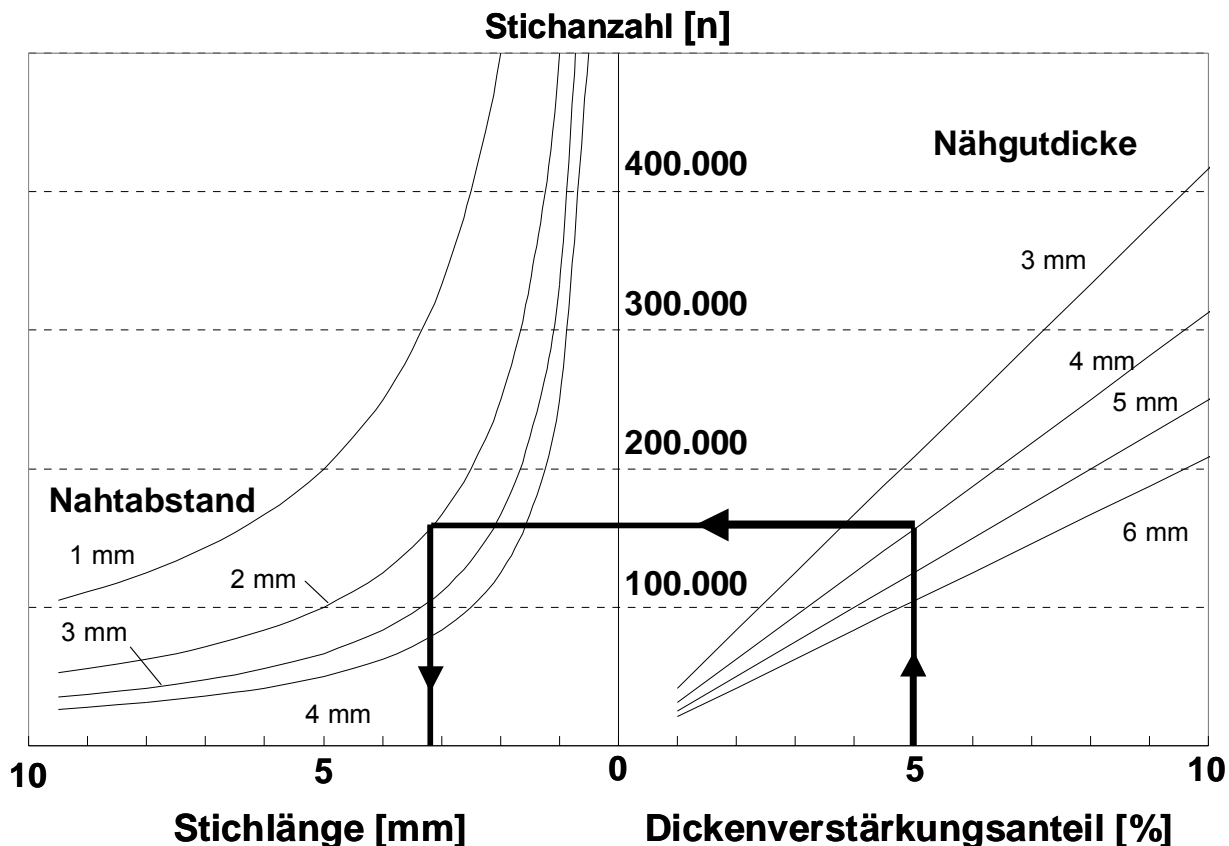


Bild 4-20: Zusammenhang von Dickenverstärkungsanteil $\psi_{Z\text{-Anteil}}$, Materialdicke, Stichanzahl, Stichlänge und Nahtabstand (Aufbau: Paketgewicht 5000 g/m², Nähgarn 100 tex, Bezugsfläche $A_{\text{Preform}} = 1 \text{ m}^2$) für Doppelstepstich

Die eingebrachte Garnmenge ist neben dem eigentlichen Halbzeugflächengewicht die zentrale Größe zur Bestimmung des Gesamtflächengewichtes einer Preform. Sie legt darüber hinaus - abhängig vom eingesetzten Stichtyp - den entsprechenden Dickenverstärkungsanteil fest. Jede Naht bringt zusätzlich zu den bereits diskutierten Dickenverstärkungsfasern einen weiteren, für den FKV nicht notwendigen Garnanteil mit. Unabhängig von der Nahtfunktion in der FKV-Verarbeitung bzw. im späteren Bauteil ist anzustreben, eine möglichst geringe Menge an nicht funktionsgebundenem Garn in den Lagenaufbau einzubringen. Die Veränderung im prozesstechnischen Verhalten von konfektionstechnisch hergestellten Preforms wird in Kapitel 5 ausführlich behandelt.

In Bild 4-21 ist die gesamte Garnmenge verschiedener Stichtypen aufgetragen, die in das Laminat eingebracht wird, um das gewünschte Maß an $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ zu erreichen. Das dargestellte Diagramm basiert auf einem Verstärkungsstrukturpaket mit 5.000 g/m² und einer eingestellten Preformhöhe von 4 mm. Aufgrund der divergierenden Dickenverstärkungsanteile der einzelnen Nähstichtypen wird die relative Zunahme an zusätzlichem Nähfaden mit dem einzustellenden $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ größer. Dies gilt insbesondere für die Nähstichtypen Blindstich und OSS[®]. So wird beispielsweise bei einem gewünschten Faservolumenanteil in Dickenrichtung von 5 % des Gesamtfaservolumengehaltes bei Einsatz der Blindstichtechnik zusätzliches – überschüssiges – Material von 112,5 g/m² eingebracht.

Die nähtechnisch erreichbaren Dickenverstärkungsanteile sowie die real eingebrachten Garnmengen sind im Vergleich zur 3D-Webtechnik [18] bezüglich des Wirkungsgrades weniger effektiv. Jedoch ist die Flexibilität bei Einsatz der Nähtechnik bei ähnlichem Wirkungsgrad - insbesondere bei Einsatz des Doppelsteppstichs - deutlich größer. Diese Flexibilität bleibt zusätzlich bezüglich Lagenaufbau, Richtungsabhängigkeit der Verschlaufungslage und in-plane-Fasergehalt erhalten. Der Bezug in Bild 4-21 wurde für die beschriebenen Parameter und für einen Dickenfadenabstand bei der 3D-Webtechnik von 1 mm hergestellt, um die Vergleichbarkeit mit dem Doppelsteppstich gewährleisten zu können. Im Falle des Doppelsteppstichs bietet sich zur Steigerung der Effektivitätsgrade zusätzlich die Hybridisierung der Naht an, was den Wirkungsgard nochmals steigern kann. Unter der Hybridisierung des Doppelsteppstichs wird daher der Einsatz eines sehr feinen Unterfadens verstanden, der zusätzlich zur Abweichung des Garngewichts von seiner Aufmachungsform und seinem Ausgangsmaterial zum Oberfaden variieren kann.

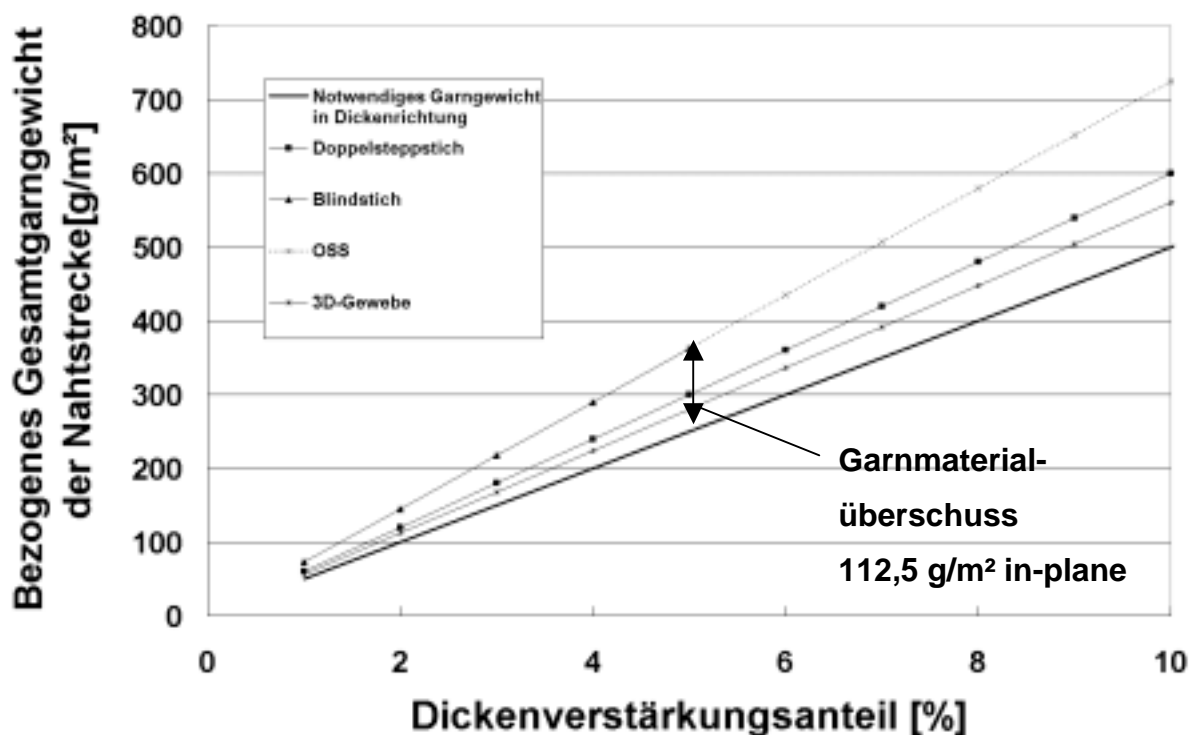


Bild 4-21: Real eingebrachte Garnmenge in Abhängigkeit der Faservolumenanteile in Dickenrichtung $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ (Beispiel: Lagenpaketdicke = 4 mm; Gesamtflächengewicht = 5000 g/m²; Nähgarn 200 tex)

Bei der Berechnung des Wirkungsgrades der Technologie zur Einbringung der Dickenverstärkung geht die Laminatdicke in unterschiedlicher Form in die Gleichung ein, was zu einer Abhängigkeit des Dickenverstärkungswirkungsgrades von der Laminatdicke und der jeweiligen Technologie führt.

In Bild 4-22 ist der Verlauf des Wirkungsgrades der unterschiedlichen Stichtypen abhängig von der Materialdicke aufgetragen. Es wird deutlich, dass der Wirkungsgrad der Nähtechniken mit zunehmender Materialdicke steigt. Da durch die Nähte ein gewisses Maß an Schädigung in die Verstärkungsstruktur eingebracht wird, kann man den Schluss zulassen, dass die gezielte Dickenverstärkung mittels Nähtechnik erst ab Wirkungsgraden von ca. > 0,6 sinnvoll ist. Somit ist ersichtlich, welche Nähtechnologie bei welcher Laminatdicke zur Dickenverstärkung eingesetzt werden kann. Bild 4-22 folgend, kann der Doppelsteppstich bzw. der Einfadenkettenstich bereits ab Laminatdicken von ca. 2 mm mit einem Wirkungsgrad von ca. 0,6 eingesetzt werden. Für Blindstich respektive OSS[®] erreicht man diesen Wirkungsgrad erst bei Laminatdicken von 5 mm bzw. 14 mm.

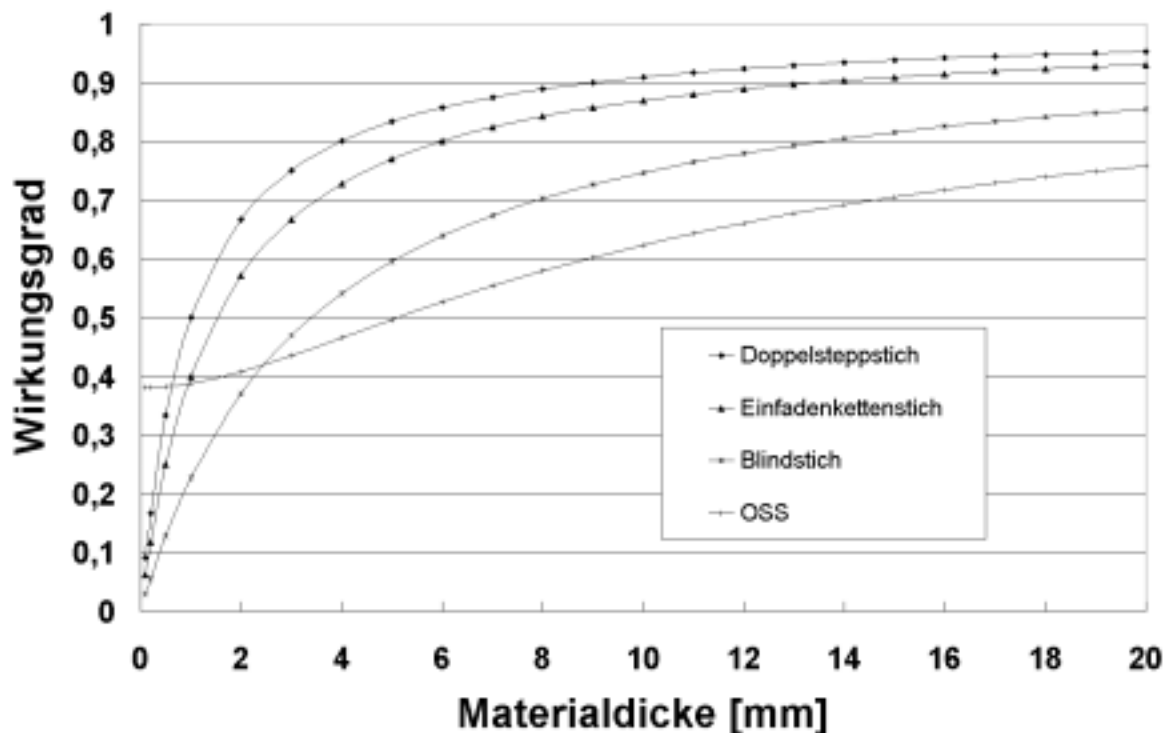


Bild 4-22: Dickenverstärkungswirkungsgrad unterschiedlicher Nähstichtypen abhängig von der Materialdicke (minimale Stichtlänge)

Die Wirkungsgrade des Tufting sowie der 3D-Webtechnik sind etwa dem des Doppelsteppstichs, im Falle einer Nahthybridisierung, gleich. Unterschiede in der technologischen Umsetzung beruhen auf den verarbeitbaren Verstärkungsgarnen auf den entsprechenden Maschinen. Kommerziell verfügbare Kohlenstofffaser-3D-Gewebe mit $\psi_{Z\text{-Anteil}}$ von 5 % beruhen auf der Verwendung von 3k Kohlenstofffaserrovings mit ca. 200 tex als Dickenrichtungsverstärkungsfaser, was allerdings, aufgrund der Aufmachungsform des Textils, stark abgesenkte in-plane Fasergehalte zur Folge hat.

Nahtfestigkeit und Nahtdehnung

Nahtfestigkeit und Nahtdehnung spielen im Falle des Preforming von Verstärkungsstrukturen ebenfalls eine - im Vergleich zu den traditionellen Anwendungsbereichen der Nähtechnik jedoch veränderte - Rolle.

Geht man davon aus, eine geringe Fadenspannung im Oberfaden bewirke begrenzte Faserdesorientierungen in der Ebene, muss bei FKV die Problematik des Garnkräuselns bei anschließendem Kompaktieren der Lagenpakete berücksichtigt werden. Daraus leitet sich die Forderung ab, die Naht so in das Lagenpaket

einzubauen, dass die Kompaktierung bereits im Preformstatus weitgehend erreicht wird, jedoch die Fadenspannung nicht zur Bildung großer Stichlöcher führt. Dies kann durch den Einsatz einer gesteuerten Stichbildung erfolgen, die bei Sticheinzug die Fadenkraft begrenzt. Jedoch muss bei einer derartigen Vorgehensweise die Kompaktierung im Laminat durch ein Fertigungsmittel herbeigeführt werden.

Die Festigkeit der Naht steht somit in konträrem Verhältnis zur FKV-Herstellung. Ziel ist es, die Nahtfestigkeit gering einzustellen, um während des Imprägnierens und Konsolidierens der FKV Fasernesting und Bewegungen der eigentlichen Verstärkungsfasern in der Matrix zu gestatten – z. B. nachträgliches Schließen der Einstichlöcher. Andererseits muss aber auch die Vorkompaktierung ermöglicht und gleichzeitig das Faserpaket handhabbar gemacht werden.

Die Dehnfähigkeit spielt eine untergeordnete Rolle, da durch das „Net-Shape“-Preforming bereits Bauteilendmaß erreicht wird. Für das Einlegen des Verstärkungsstrukturpaketes in die Form sollten die Toleranzen gering sein. Die Drapierfähigkeit der eigentlichen Verstärkungslagen liefert nur eine Basis für die Umformbarkeit. Zusätzlich eingebrachte Nähte verändern deren Drapiercharakteristika [182].

Einfadenkettenstichtypen bieten keine ausreichende Nahtsicherheit. Blindstich und OSS[®] basieren zwar auf Einfaden-Kettenstich-Varianten, sind aber in Bezug auf Nahtsicherheit unkritisch, was vor allem auf die hohen Reibwerte zwischen Nähgarn und Substrat zurück zu führen ist. Berücksichtigt werden muss ebenso die Lage des Fadens im Laminat. Tufting kann nicht in Zusammenhang mit Festigkeit und Dehnfähigkeit gesetzt werden, da im eigentlichen Sinne kein Nahtverbund erzeugt wird. Dies wiederum bedeutet für das Tufting, dass der Kompaktierungsvorgang und die Preformherstellung bereits vor der Einbringung der Tuftingnaht abgeschlossen sein müssen.

4.2.9 Einsatzfähigkeit der Stichtypen für Preformingaufgaben

Die nähtechnische Konfektion zur Herstellung von endkonturgenauen Faser-Preforms erfordert den Einsatz diverser Fertigungsstufen (siehe Kapitel 3). Bei Betrachtung der unterschiedlichen Aufgaben innerhalb dieser Fertigungsstufen wird die Zielrichtung, welche der „Einseiten“-Nähtechnik-Entwicklung zugrunde liegt,

deutlich. Der Weg, die Nähtechnik auch zur vollständigen Konfektion von „Faserpreforms“ einzusetzen, ist - besonders vom wirtschaftlichen Standpunkt aus gesehen – jeweils an die entsprechenden Anforderungen angepasst - zu bewerten. In Tabelle 4-3 wird eine Zuordnung zwischen Nähstichtyp und den unterschiedlichen Konfektionsstufen vorgenommen. Jede der einzelnen Konfektionsstufen steigert den Wertschöpfungsgrad einer Preform.

Tabelle 4-3: Übersicht über den Einsatzbereich der diversen FKV-Nähtechniken

Konfektionsstufe	Kettenstich	Doppelsteppstich	Blindstich	OSS®	Tufting
Vorbereitung der Halbzeuge	+	++	--	--	--
Herstellung von faserorientierten Halbzeugen	-	++	--	-	--
In-plane-Assembly	+	++	-	-	--
Out-of-plane-Assembly (ebenes Nähen)	+	+	+	+	±
Final-Preform-Assembly (FPA) – 3D-Nähen	-	--	++	+	+

Zur Generierung von „maßgeschneiderten Verstärkungsstrukturen“ – „Tailored Reinforcements“ - und zur ganzheitlichen Betrachtung einer „Preforming-Prozesskette“ kommt den ersten Prozessstufen die größte Bedeutung zu. Es ist ersichtlich, dass der Einsatz des Doppelsteppstichs für die Mehrzahl der Anwendungen das größte Potenzial bietet.

Bei der Konfektion von textilen Vorformlingen kann es darüber hinaus notwendig sein, einfache Fixierungen lokaler Verstärkungen oder diverser Einzellagen mit einzelnen Stichen (Riegel) vorzunehmen. Eine Verriegelung auf einer Doppelkettenstichnähmaschine würde zu einer Neunfachlage (im Falle eines 3-Stich Riegels) auf der Nähgutunterseite führen, was einer knotenähnlichen Verdickung des

Unterfadens gleich käme. Kurze Doppelkettenstichnähte bieten zudem für das Preformhandling nur eine ungenügende Nahtsicherheit. Einseitenstichtypen eignen sich für derartige Anwendungen ebenfalls nur sehr bedingt.

Anhang 3 gibt einen Überblick über die zum Einsatz kommenden Nähstichtypen für FKV hinsichtlich des Fadenverbrauchs, der erreichten Handlingfähigkeit, der Faserdesorientierungen und der Kompaktierungsmöglichkeiten.

4.2.10 Zwischenfazit zur Auswahl eines FKV-kompatiblen Stichtyps

Die durch die Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf Realisierbarkeit und Effizienz einer konfektionstechnischen Herstellung von Faserpreforms ergab, dass der Doppelsteppstich als universell einsetzbarer Nähstich Vorteile bietet. Aus FKV-technologischer Sichtweise konnte nachgewiesen werden, dass der Doppelsteppstich aufgrund des hohen Wirkungsgrades bei der Garneinbringung der meistgeeignete Stichtyp ist.

Für die Mehrzahl der diskutierten Preformingaufgaben und im Sinne der erzielbaren mechanischen Eigenschaften ist der Doppelsteppstich derjenige Stichtyp, der technologisch am weitesten entwickelt ist und zudem die Möglichkeit zur optimalen Anpassung an FKV-spezifische Probleme bietet. Die betrachteten Einseitentechniken sind derzeit für den umfassenden Einsatz in der gesamten Preformfertigungskette technologisch nicht in notwendigem Maße verfügbar und weisen konzeptionelle Nachteile auf.

4.3 Auswahl eines Transportsystems für Standardnähmaschinen

Die Erzeugung einer Naht bedingt für alle Stichtypen eine Relativbewegung zwischen den Stichbildungselementen des Nähkopfes und dem Verstärkungsmaterial (Nähgut). Auf Standardnähmaschinen erfolgt diese Bewegung mittels einer Transporteinrichtung (Vorschubeinrichtung), die in direktem Kontakt mit dem Nähgut steht [183]. Die Transportelemente wirken kraftschlüssig, so dass eine Schädigung, mindestens aber eine Beeinflussung des Verstärkungsmaterials erfolgt [184].

In Bild 4-23 sind verschiedene Nähgut-Transportsysteme dargestellt. Bild 4-23 a) zeigt schematisch ein Untertransportsystem, b) ein Unter- und Nadeltransportsystem, c) einen 3-fach Transport mit Unter-, Ober- und Nadeltransport und d) einen Schiebrad-Rollfuß-Transport, der wiederum kontinuierlich oder intermittierend gesteuert werden kann.

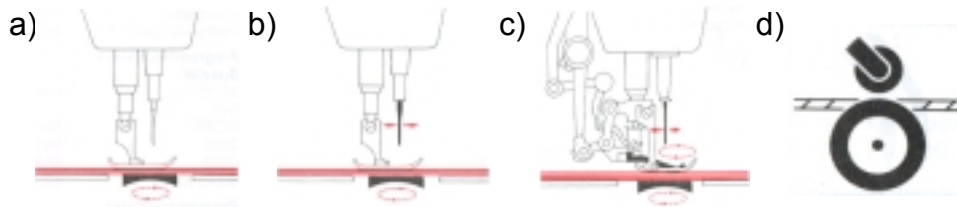


Bild 4-23: Transportarten: a) Unter-Transport, b) Nadel- und Untertransport, c) 3-fach Transport, d) Schiebrad- und Rollfuß-Transport [185]

Die Frage nach Qualität und Genauigkeit des Transports hängt von den Eigenschaften des Nähguts ab. Die Maschinenparameter müssen dem eingesetzten textilen Halbzeug entsprechend angepasst werden. Die Anpresskraft des Stoffdrückers (Hüpfertfuß oder Rollfuß) bestimmt dabei die auftretenden Klemmkraft, welche wiederum den Transport des Nähguts, die Stichlängenechtheit und Transportkräuselneigung beeinflussen. Demnach sind die zwischen der Oberfläche des Transports und des Textils auftretenden Reibkräfte entscheidend für einen optimalen Transport.

Beschreibung der einzelnen Transportsysteme mit FKV-relevanter Bewertung

Untertransport: Dieses System ist prinzipiell für Näharbeiten geeignet, bei denen kein Lagenverschub zu erwarten ist. Materialien, die keine glatte Oberfläche haben, wie beispielsweise Wirmatten, können nicht ohne weitere Hilfsmittel verarbeitet werden. Diese Einschränkung ist prinzipiell auch für andere Hüpferttransportsysteme gültig.

Unter- und Nadeltransport: Hierbei wird der Vorschub des textilen Halbzeugs durch die mitgehende Nadel unterstützt. Durch die entstehende Relativgeschwindigkeit zwischen Nähgut und eindringender Nadel entstehen bei FKV-Anwendungen unerwünschte Stichlochaufweitungen, was zu Harznestern im FKV führt.

Unter-, Nadel- und Obertransport (3-fach Transport): Dieses System ist speziell für die Verarbeitung mehrlagiger Verstärkungstextilien geeignet.

Lagenverschiebungen können ausgeglichen werden. Durch ungeeignete HüpfOberflächen, welche wiederum für einen sicheren Transport und Stichlängenechtheit benötigt werden, können verstärkt Schädigungen am textilen Halbzeug auftreten. Die starke Fixierung der Lagen in den Raumrichtungen während des Nähvorgangs begünstigt Faserbrüche beim Durchdringen des textilen Halbzeugs [184].

Schiebrad- und Rollfußtransport: Schiebrad- und Rollfußtransport werden mit unabhängigen Motoren gesteuert. Die Entkopplung von der Armwelle ermöglicht prinzipiell eine Vergrößerung der Stichlänge. Die Stichloch-Faserschädigung ist durch die auf einer Seite offene Fixierung des Nähguts beschränkt. Ebenfalls bietet diese Bauart - im Falle einer intermittierenden Transportbewegung - die Möglichkeit, die Nadelbewegung je nach gegebener Anforderung unterstützend einzusetzen.

Die in der Praxis auftretenden stark diversifizierten Preformingaufgaben erfordern den Einsatz von unterschiedlichen Nähmaschinenbauformen, seltener einhergehend mit unterschiedlichen Stichtypen. Eine Betrachtung der Wirkpaarung Nähgut – Transportergestaltung muss deshalb jeweils individuell vorgenommen werden. Tabelle 4-4 gibt einen Überblick über die Einsatzbereiche verschiedener Transportsysteme für unterschiedliche Verstärkungsstrukturhalbzeuge.

Tabelle 4-4: Kompatibilität unterschiedlicher Transportsysteme mit verschiedenen textilen Verstärkungshalbzeugen

Halbzeug	Untertransport	Unter- und Nadeltransport	3-fach Transport	Schiebrad- Rollfuß
Verarbeitbarkeit Verstärkungsmaterialien				
Gewebe	--	-	+	++
Gelege	+	+	+	+
Strickware	--	-	+	+
Non-wovens	--	--	--	++
TFP	--	--	-	++
Mehrlagigkeit	--	-	+	+

Die Schiebrad-Rollfuß-Technologie kann dabei für die unterschiedlichsten Materialien eingesetzt werden. Durch die darüber hinaus gehende Möglichkeit zur individuellen Ansteuerung von Ober- und Untertransport können zusätzlich Effekte - wie z. B. Einarbeitung der Mehrweite bei zweilagigen textilen Stoffen - erreicht werden. Auf derartige Potenziale wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter eingegangen.

Um ein möglichst breites Anwendungsspektrum zu ermöglichen, wurde eine Schiebrad-Rollfuß-Maschine ausgewählt und weiter optimiert. Schiebrad-Rollfuß-Maschinen bieten Vorteile bei der Realisierung von positionsgenauen Nähten und bei Nähten an schwierig zugänglichen Stellen einer Preform Vorteile.

Aufgrund der Anisotropie der Verstärkungsfasern bzw. der ebenen Verstärkungshalbzeuge ist bei einem kraftschlüssig wirkenden Transporteur die Umsetzung der Richtungsänderung während des Nähvorgangs mit einer gesteigerten Schädigung des Materials verbunden. Im Falle des modifizierten Schiebrad-Rollfuß-Transports werden Richtungsänderungen sehr materialschonend umgesetzt. Die vorhandene elektrische Steuerung der Schiebrad- und Rollfuß-Schrittmotoren bzw. des Armwellenmotors (Pfaff Klasse 421 [139]) erlaubt die Programmierung von Nahtprogrammen und somit die Einstellung der Presserfußkraft für unterschiedliche Nahtabschnitte [186].

Um genügend Kraft zum Transport des Nähgutpaketes zur Verfügung zu stellen, ist bei Schiebrad-Rollfuß-Transporteuren - die für Standard-Lederanwendungen einen linienförmigen Kontakt zum Nähgut aufweisen - die Kontaktfläche möglichst zu maximieren, was durch die Anpassung des Neigungswinkels am Rollfuß geschieht. Die Wirkrichtungen von Schiebrad und Rollfuß sind dabei parallel zu justieren, um Querverzug zwischen den einzelnen Verstärkungsstrukturlagen zu vermeiden.

Die universelle Einsatzfähigkeit des Schiebrad-Rollfuß-Transporteurs auf Standardnähmaschinen bietet für diverse Preformingaufgaben sehr gute Möglichkeiten. Der Einsatzbereich von Nähmaschinen klassischer Bauart richtet sich zunächst nach der angestrebten Gesamtstückzahl des Endproduktes, aber auch nach dem möglichen Wertschöpfungsgrad. Die Grenzen zwischen dem Einsatz von Nähautomaten bzw. manueller Konfektion sind dabei fließend.

4.4 Materialkompaktierung durch den Nähvorgang auf Standnähmaschinen

Bei vernähten Verstärkungsstrukturpaketen handelt es sich um ein Vorprodukt (Preform), welches mittels eines sich an den Nähprozess anschließenden Imprägnier- und Konsolidiervorgangs (z. B. Harzinjektionstechnik) zum Endprodukt weiterverarbeitet wird. Einflüsse, die in diesem Vorstadium auf das Nähgut einwirken, verändern das Verstärkungspaket nachhaltig. Bei den verarbeiteten Halbzeugen handelt es sich um Gebilde, bestehend aus einzelnen Multi-Filament-Garnen oder Rovings, welche eine gewisse Anordnung oder Packung aufweisen. Diese Anordnung der einzelnen Fasern im Halbzeug kann faserseitig als wesentliches Kriterium für die Imprägniergüte und somit auch für die mechanischen Eigenschaften angesehen werden [187].

Im Bereich eines Nähstiches findet nun eine Einschnürung des textilen Aufbaus statt, welche zu einer Umorientierung der Faserbündel im Stichlochbereich führt. Diese Umorientierung der Fasern, auch Faserondulation genannt, kann als Maß für die Beurteilung der Nähparameter angesehen werden (siehe Kapitel Faserdesorientierung). Im Sinne der Auswahl eines möglichen Transportsystems für Standardnähmaschinen kommt dem Hysterese-Verhalten der Halbzeug-Pakete bei mehrmaligem Komprimieren in Abhängigkeit der Transportcharakteristik besondere Bedeutung zu.

Kompaktiert man mehrmalig, wird der maximal zu erreichende Faservolumengehalt - bzw. die dazu notwendige Kraft - durch eine Erhöhung der Packungsdichte erreicht [188, 189]. Bild 4-24 zeigt die Konsequenz mehrmaliger Kompaktierung anhand des zu erzielenden Faservolumengehaltes bei verschiedenen textilen Halbzeugen. Bei der Beaufschlagung mit gleichen Kompressionskräften während der Imprägnierungs- und Konsolidierungsphase führt - unabhängig von der Konstruktion des textilen Halbzeugs und der Anzahl der zu verarbeitenden Lagen - die mehrmalige Kompression des Gebildes zu höheren Faservolumengehalten. In Bild 4-24 sind Versuchsergebnisse von Kerachni und Gauvin [188] wiedergegeben, bei denen verschiedene Halbzeuge mehrmalig komprimiert wurden. Bei den Materialien handelt es sich um Vetrotex U101 (Wirrfasermatte, 450 g/m², Glasfaser), Owens Corning WR24 (Leinwandgewebe, 814 g/m², Glasfaser) und Saint-Gobain Vetrotex BTI C24

(Bidiagonal-Gelege, 814 g/m², Glasfaser), welche mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min gepresst wurden.

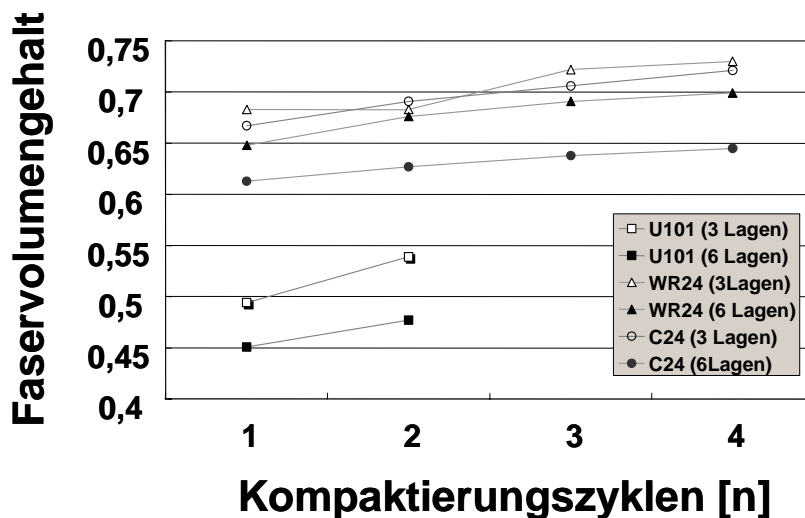


Bild 4-24: Effekt mehrmaliger Kompaktierung von trockenen Faserstrukturen auf den zu erzielenden Faservolumengehalt [188]

Der Schiebrad-Rollfuß-Transport setzt pro Nähstich exakt einmal auf dem Nähgut auf. Die UT-Stellung des Hüpfersfußes definiert dabei die Kompaktierung. Die Nähgeschwindigkeit – und damit die Beschleunigung bei der Kompression – bestimmt die Hysterese des Nestings der Einzelfilamente im textilen Verbund. Je nach Presserfußgestaltung wird das Material, beispielsweise bei einer Stichlänge von 2,5 mm und einer Presserfußauflagefläche 30 mm x 5 mm, zwölfmal komprimiert, bevor es den Bereich des Presserfußes wieder verlässt.

Die ausgewählte Maschinenbauart mit Schiebrad-Rollfuß-Transport vermeidet diese hysteresebehaftete Materialkompaktierung und den Einstich in das bereits kompaktierte Material. Die Kompaktierung findet in einem Abstand von etwa 3 – 5 mm rechts oder links des Einstichbereiches statt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass im eigentlichen Nahtbereich die Vorkompaktierung der Faserstruktur nur durch den eigentlichen Nähfaden und die mit der Stichbildung einhergehende Fadenspannung eingebracht wird. Die mögliche Vorkompaktierung des Materials durch nur eine auf einer Schiebrad-Rollfuß-Maschine hergestellten Naht ist somit eingeschränkt, was die Notwendigkeit einer flächigen Vernähung erklärt. Die rollende Bewegung des Transporteurs bewirkt eine gleichförmige Umorientierung der Faserbündel im Falle eines kontinuierlich eingestellten Nähvorgangs.

Wird zusätzlich mit intermittierendem Transport gearbeitet, ist der Reibwert zwischen Nähgut und Presserfuß die bestimmende Größe [183]. Unabhängig von der Nadelbewegung wird dabei das Material transportiert. Dies geschieht durch die Klemmkräfte, die zwischen Nähgut, Schiebrad und Rollfuß wirken. Dies wiederum führt zu einem gesteigerten Kräfteintrag in die textile Fläche und somit zu einer erhöhten Schädigung des Materials.

Der Einsatz von Nähautomaten und entsprechend konstruierten Nähschablonen vermeidet das mehrmalige Kompaktieren der Verstärkungsstrukturen sowie dadurch auftretende Probleme (z. B. Faserbruch).

4.5 Interpretation des Fadenkraftverlaufs und Ableitung von QM-Elementen

Die verschiedenen Nähelemente, wie Presserfußkraft oder zu vernähendes Halbzeug, beeinflussen die auf den Nähfaden wirkenden Kräfte. Im Umkehrschluss ist es möglich, durch die genaue Kenntnis der Fadenkraft während des Nähens auf die Eigenschaften der späteren Verstärkungslage Rückschlüsse zu ziehen.

Setzt man die Nähtechnik zur Konfektion von Preforms ein, muss der betriebene Aufwand zur Qualitätssicherung an die jeweilige Anforderung des Produktes angepasst werden. Für Anwendungen im Bereich von 25-45 % Faservolumengehalt im FKV kann es beispielsweise ausreichend sein, die vorhandenen Standardsysteme zu benutzen. Voraussetzung hierfür ist die geringe Relevanz von Faserdesorientierung durch das Nähen. Zu den Standard-QS-Elementen einer Nähanlage gehören:

- Ober-Faden-Wächter
- Spulenfaden-Wächter
- NIS (Nadel-im-Stoff)-Steuerung

Durch hohe Anforderungen der Bauteile oder des Folgeprozesses an die Nähte müssen diese in der FKV-Technik insgesamt ein höheres Qualitätsniveau erfüllen, als dies in der Bekleidungstechnik notwendig ist. Im Bereich des Nähens von Airbags wurden bereits Sensoren zur Fadenkraftkontrolle eingeführt [190]. Die Fadenkraftmessung erfolgt dabei mit einem in den Fadenverlauf eingebrachten kalibrierten Sensor.

Diese Sensoren liefern ein Fadenkraftsignal über die Zeit des Stichbildungsvorgangs. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde ein Sensor eingesetzt, der auf Basis des Hall-Effektes arbeitet (System Pfaff Industrie Maschinen GmbH). Diese Art von Sensoren sind sehr robust einerseits, haben aber andererseits den Nachteil, dass keine statischen Fadenkräfte gemessen werden können. Die Kalibrierung muss demnach zu einem exakt bekannten Zeitpunkt erfolgen. Dieser Zeitpunkt wird idealerweise zum Zeitpunkt Fadenhebel – OT gelegt. Zusätzlich zur Abweichung des Messsignals durch den Entladungseffekt des Hall-Sensors ändern sich die geometrischen Verhältnisse durch die Bewegung des Fadenhebels. Die 3-Punkt Anordnung im Fadenverlauf weicht dann von der Position im kalibrierten Zustand ab.

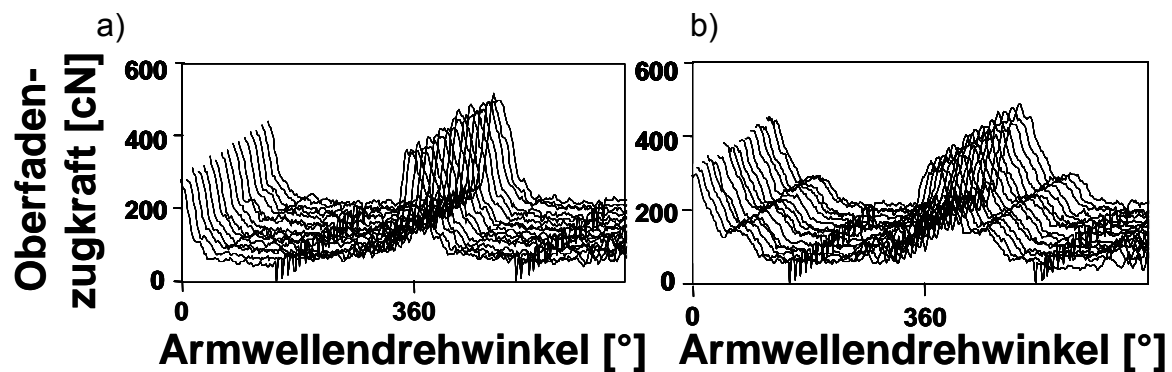


Bild 4-25: Wasserfall-Darstellung der Fadenkraftverläufe für unterschiedliche Nähfadenkombinationen

Mit einer derartigen Messanordnung können nun Fadenkraftverläufe einzelner Stiche erfasst werden. Dies erlaubt zunächst die Kontrolle über den Nähvorgang sowie über die Anzahl der gesetzten Stiche im Laminat. Zur weiteren Verarbeitung der einzelnen „Datenpakete“ müssen diese zunächst zu Datenbündeln zusammengefasst werden. Nach diesem Schritt kann mit einer geeigneten Software eine sinnvolle Datenreduktion vorgenommen werden. In Bild 4-25 sind zwei Nähstichfolgen in einem Wasserfalldiagramm dargestellt. Die erzeugte Naht wurde in 90°-Richtung des Lagenaufbaus durchgeführt (quasiisotroper Lagenaufbau, Glasfasergelege). In Bild 4-25 a) wurde als Nähgarn ein langfasergespinnenes, zweifaches PES – Garn mit 67 tex Feinheit vernäht. Dieser Verlauf entspricht bekannten Fadenkraftverläufen. In Bild 4-25 b) wurde ein PES-Monofilamentgarn ebenfalls mit 67 tex Feinheit ($d \approx 0,25$ mm) verwendet. Im Bereich des Greiferdurchgangs konnten Unregelmäßigkeiten festgestellt werden. Da es sich bei beiden Garnen um ein Polymer gleicher Art

handelt, ist davon auszugehen, dass aufgrund der höheren Dehnfähigkeit des langfasergesponnenen Garns die Stichlochaufweitung geringer ist als bei einem biegesteifen und hochfesten Monofilament. In beiden Fällen wurde ein Glasfasermultifilamentgarn (68 tex) mit gleicher Unterfadenkraft-Einstellung (ca. 80 cN) als UF eingesetzt. Die Verknötungslage wurde so justiert, dass die Verknötung jeweils auf der Materialunterseite liegt.

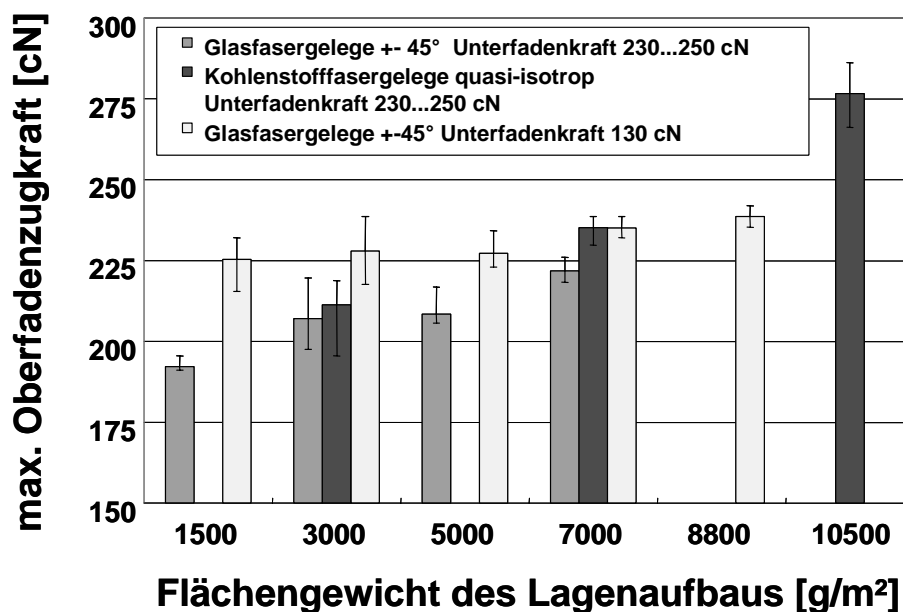


Bild 4-26: Abhängigkeit der max. Nadelfadenkraft vom Flächengewicht des textilen Halbzeugs

Bild 4-26 erklärt anhand maximaler Oberfadenzugkräfte die Notwendigkeit der Regelung der Fadenkraft bei Dickenübergängen. Hierbei ist zu beachten, dass die Reibenergie, die in das Garn eingebracht wird, durch die erhöhte textile Reibung zwischen Verstärkungstextil und Faden stark zunimmt. Das Fadenkraftniveau wird zusätzlich durch den gesteigerten Garnverbrauch erhöht. Muss nun ein Dickenübergang realisiert werden, steigt zunächst der Garnverbrauch, was zu einer erhöhten Fadenkraft führt. Über die max. Oberfadenzugkraft und den E-Modul des Garns ist somit die max. Dehnung des Garns gegeben. Die zur Stichbildung notwendige Garnreserve wird zum Teil, zusätzlich zur Garnentnahme aus dem Faservorrat, aus der Garndehnung entnommen. Die Spannung im Garn bleibt zunächst erhalten, was zur Einschnürung des Paketes führt. Für hochfeste Garne, wie beispielsweise CF-Nähgarn, gilt dieser Zusammenhang nur bedingt, da das Garn eine nur geringe Dehnfähigkeit besitzt. Ein Ausgleich durch Relaxation der Garndehnung ist nicht möglich.

Die genannten Effekte machen die Anpassung der Nähparameter an veränderte Laminatdicken notwendig. In Bild 4-26 ist der Effekt der Abhängigkeit der Nadelfadenkräfte vom Flächengewicht des eingesetzten Halbzeugs dargestellt. Verwendet wurden als Ober- und Unterfaden jeweils ein PES-langfasergesponnenes, zweifaches Nähgarn mit 67 tex Feinheit. Die Verknotungslage wurde jeweils auf die Materialunterseite justiert. Es zeigt sich für alle Materialkombinationen ein Anstieg der Fadenzugkräfte durch die oben beschriebenen Effekte.

Innerhalb einer Nahtstrecke müssen demnach diverse Nähparameter geändert werden. Diese Änderungen treten zusätzlich zu den bereits diskutierten Dickenübergängen auch in Folge von variierten Vorgaben des textilen Halbzeugs oder veränderten Prozessanforderungen auf. Im folgenden sind Materialeinflüsse genannt, die zur Veränderung der Parametersätze während des Nähvorgangs führen können:

- Dickenübergang im Halbzeug → Anpassung Presserfußkraftniveau → Anpassung der Fadenkraft
- Notwendige Permeabilität verändert sich → Anpassung der Stichlänge → Anpassung der Fadenkraft
- Nährichtung ändert sich in einem hochgradig anisotropen Lagenaufbau → Anpassung Stichlänge → Anpassung der Fadenkraft

In Bild 4-27 ist ein geschlossener Regelkreis zur Herstellung von FKV-Preforms dargestellt. Das Preform-Engineering (vgl. Kapitel 3.4) legt dabei nach Maßgabe der vorgegebenen Anforderungsprofile (aus Prozess- oder Bauteildimensionierung) die Nahtparameter fest. Gleichzeitig werden QM-Toleranzen an die fertige Preform, wie z. B. die max. erlaubte Anzahl an Fehlstichen, abgeleitet, die als Vergleichsprotokoll abgelegt werden. Die Nahtanforderungen führen zu einer Sollwertvorgabe, z. B. der Fadenkraft. Für die entsprechenden Materialkombinationen existieren datenbankbasiert, die entsprechenden Stellgrößen für das Stellglied. Im Falle der Fadenkraft erfasst der Fadenkraftsensor die aktuellen Fadenzugkräfte. Auf diese Weise wird ein Istwert gemessen. Im Regelgerät findet ein Vergleich statt, und die Stellgröße wird entsprechend angepasst. Die erfassten Nähparameter werden zunächst dokumentiert und einem Auswertungsalgorithmus unterzogen. Dieser

erstellt ein Protokoll, welches dem im Vergleichsprotokoll aus dem Preform-Engineering gegenüber gestellt wird.

Um zu einer Datenreduktion zu gelangen, muss die Auswertung der Fadenkräfte bei der Herstellung der TR gezielt auf einen bestimmten Bereich des Armwelldrehwinkels begrenzt werden. Findet ein Nähprozess mit 1000 SPM statt, und will man den Fadenkraftverlauf auf 3° des Armwelldrehwinkels genau auflösen, muss eine Messung bereits mit einer Taktfrequenz von 2 kHz arbeiten. Eine Erfassung dieser Genauigkeit ist erforderlich, um den Allising-Effekt auszuschließen. On-line kann die Erfassung und der Vergleich von einem Wert, z. B. Fadenkraftmaxima zur Sicherstellung der Verknotungslage, erfolgen, was für die Ansteuerung des Regelgliedes bzw. die Durchführung des gesamten Nähvorgangs zunächst ausreichend ist.

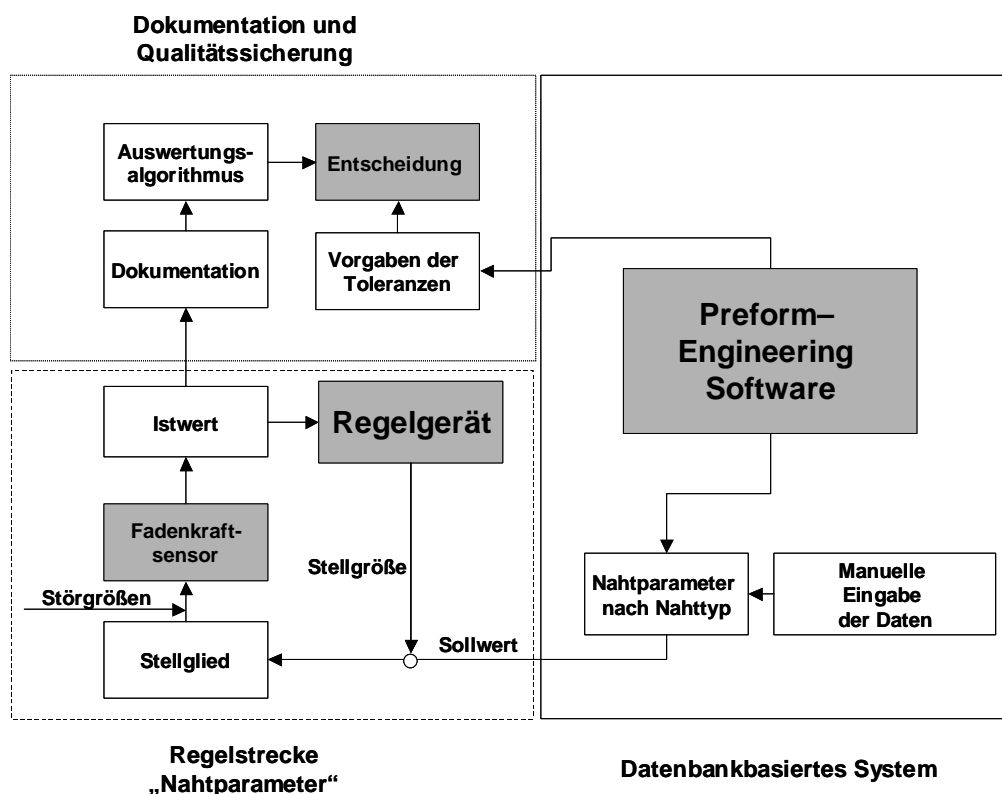


Bild 4-27: Darstellung eines QM-Regelkreises bei der Herstellung von Preforms für FKV

4.6 Fazit zur Selektion von Nähmaschinenelementen

Es konnte gezeigt werden, dass die Nähtechnik für die Anwendung bei FKV zum einen große Potenziale bietet, gleichzeitig aber auch einige Schwierigkeiten und grundlegende Fragestellungen aufwirft. Ebenso wie in der Bekleidungstechnik sind

die benötigten Nähwerkzeuge an den jeweiligen Einsatzzweck anzupassen. Im Vergleich zu den klassischen Einsatzfeldern der Nähtechnik ist jedoch der Wertschöpfungsgrad bei der Preformherstellung höher, was den technologischen Mehraufwand rechtfertigt. Um zu qualitativ hochwertigen Bauteilen zu gelangen müssen die Nähparameter Fadenkraft und Presserfußkraft erfasst werden. Diese Erfassung liefert ein Maß für die quantitative Beurteilung der Qualität einer Preform.

Die Beeinflussung der Folgeprozesse durch die nähtechnische Vorbereitung der Verstärkungsstrukturen wird in den folgenden Kapiteln beschrieben. Der Bezug zwischen den Nähparametern Fadenkraft und Presserfußkraft und den FKV-technologisch relevanten Kompaktierungseigenschaften einer Preform wird in Kapitel 7 aufgezeigt.

5 Beeinflussung der Injektionstechnik durch TR

Die Formfüllung bei Harzinjektionsprozessen wird durch das Gesetz von Darcy [191] beschrieben. Gleichung 5-1 zeigt die eindimensionale Form des Gesetzes.

$$\bar{v} = \frac{dh}{dt} = -\frac{K}{\eta} \frac{\Delta P}{dh} \quad (\text{Gl. 5-1})$$

Demnach ist der Verlauf der Fließfront abhängig von den Eigenschaften des Fließmediums (Viskosität η) und den Prozesseigenschaften (Injektionsdruck und Volumenstrom) sowie der Permeabilität K . Zusätzlich sind die Bauteilgeometrie und -größe sowie die Werkzeuggestaltung (im Sinne von Harzfluss und Wärmekapazität), insbesondere aber die Auswahl und Festlegung der Angüsse und Vakuumschlüsse die bestimmenden Größen. Die Gestaltung des eingelegten Verstärkungsmaterials, die Preform, bestimmt nun das Durchströmungsverhalten. Nach Darcy beschreibt die Permeabilität den Widerstand, den ein poröses Material einer durchströmenden Flüssigkeit entgegen bringt. Die Preformeigenschaften bestimmen folglich die Permeabilität, aber gleichzeitig auch die mechanischen Eigenschaften des späteren Bauteils [192]. Wesentliche Faktoren sind:

- Fasertyp und Garnkonstruktion

- Beschlichtung
- Faservolumengehalt
- Halbzeugkonstruktion
- Faserorientierung.

Durch den Einsatz der Preformingverfahren, wie sie in Kapitel 2 beschrieben werden, verändert man über den vorgeschalteten Verarbeitungsprozess die Eigenschaften der Verstärkungsstruktur. Hauptmerkmale der Veränderung, die durch den Preformingprozess hervorgerufen wird, sind Faserumorientierung und Änderung des Kompaktierungsverhaltens. Im Falle des Binderpreformings ändern sich darüber hinaus die Interface-Eigenschaften zwischen Fasern und Matrix aufgrund der zusätzlich eingebrachten Binderkomponente.

Eine Faserumorientierung kann zum einen durch Drapieren stattfinden sowie durch Umorientierung der Fasern in der Ebene. Bei Geweben handelt es sich hierbei um Gewebescherung, interlaminares Gleiten zwischen den einzelnen Lagen und Gewebestreckung, was zu veränderten Permeabilitäten führt [193]. Diese Veränderungen werden maßgeblich durch Abwandlungen der Faserbettgeometrien und einen neuen Faservolumengehalt des Halbzeugs bedingt [194].

In Bild 5-1 wird der Einfluss der Stichbrückenspannung, die mit steigender Stichlänge zunimmt, auf die lokalen Fasergehalte deutlich. Es ist ersichtlich, dass mit zunehmender Fadenzugkraft, hier ausschließlich durch Variation der Stichlänge verursacht, die Stichbrückenspannung zunimmt. Dadurch entsteht eine größere Öffnung des Verbundes im Bereich des Stichlochs und somit reduzierte Faservolumengehalte. Eine weitere triviale Erkenntnis ist die zusätzliche Reduktion des lokalen Fasergehaltes durch den Einsatz eines Nähgarns mit größerer Feinheit. Die verdrängten Fasern führen zu erhöhten Faservolumengehalten außerhalb des Stichlochbereichs, was weitere Materialinhomogenitäten bedingt.

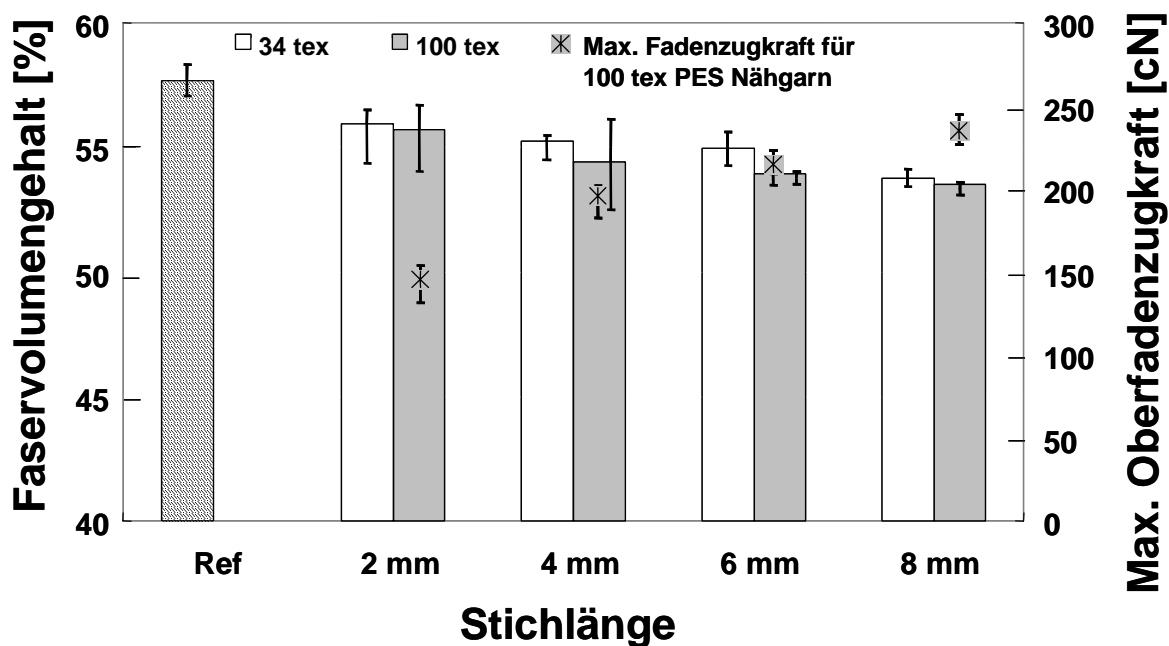


Bild 5-1: Veränderung des lokalen Faservolumengehaltes am Stichloch durch Variation der Stichlänge (Glasfasermultiaxialgelege $[0/90/+45/-45^\circ]_{2S}$; PES Multifilamentnähgarn Amann Serafil 80)

Die in Bild 5-1 dargestellten Faservolumengehalte wurden jeweils an Würfeln ermittelt, die 2 x 2 mm groß waren und mittig um das Stichloch heraus gearbeitet wurden. Eingesetzt wurde ein quasi-isotroper Lagenaufbau aus Glasfasermultiaxialgelege (Aufbau $[[+45/-45/-45/+45]_{\text{Balanced}}]_4$, Flächengewicht des Geleges = 877 g/m²), welcher im Vakuuminjektionsprozess mit einem DOW-Harzsystem (Derakane[®] Momentum 510N, Vinylether-Epoxy) imprägniert wurde.

5.1 Bezug zur Permeabilität

Zur rechnerischen und experimentellen Ermittlung der Permeabilität der Verstärkungsstrukturen für Verbundwerkstoffe existieren verschiedene Ansätze. Bei den Methoden zur experimentellen Bestimmung der Permeabilität muss man Methoden konstanten Volumenstroms oder konstanten Injektionsdrucks sowie 1-dimensionalen oder 2-dimensionalen Harzflusses unterscheiden [193]. Um reale Kennwerte von Verstärkungseinzellagen, teilweise mit unterschiedlichem Lagenaufbau, zu ermitteln, wird häufig der Weg konstanten Injektionsdrucks bei gleichzeitig zweidimensionalem Strömungsverlauf gewählt. Dabei wird die Verstärkungsstruktur mit einem Loch in der Mitte in eine rechteckige Kavität gelegt.

Ein Punktanguss an der mit einem Loch versehenen Stelle versorgt den Prüfkörper mit der Testflüssigkeit. Die radiale Ausbreitung des Fluids wird nun, z. B. mit einer Kamera, überwacht [193]. Diese Situation bildet die meisten realen Füllvorgänge gut ab. Es können auf diese Weise Werte für den 2D-Permeabilitätstensor experimentell bestimmt werden, welche wiederum in die Fließsimulationssoftware Eingang finden. Diese Vorgehensweise dient als Grundlage zur Messung der makroskopischen Permeabilität - gemittelte Permeabilität einer Preform - in Bauteilsektionen.

Über die 2D-Messungen hinaus ist es für eine vollständige Parametrisierung notwendig, die Permeabilität in Dicken-, d. h. in z-Richtung zu kennen. Untersuchungen hierzu liegen in der Literatur vor [195]. Der reale Lagenaufbau des späteren Bauteils kann also untersucht werden. Für beide Fälle (2D- bzw. 3D-Fließen) gilt, dass das vorgeschaltete Preforming die Charakteristika der Permeabilität einer Faserverstärkung bestimmt.

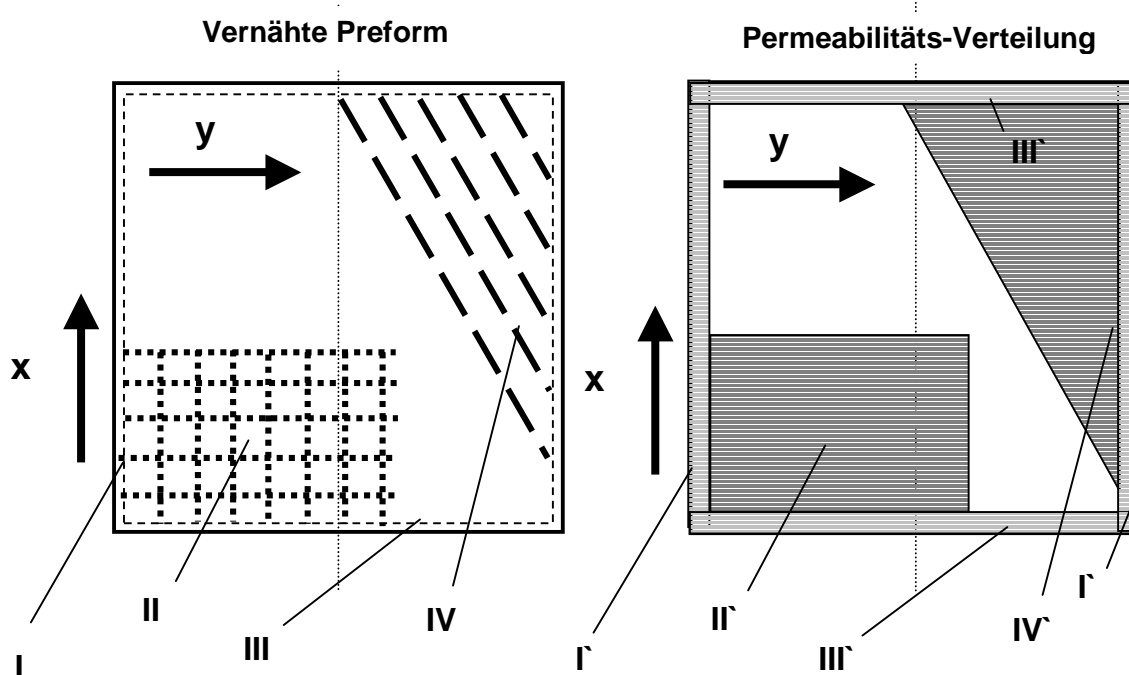


Bild 5-2: Verbindung von Preformparametern und Permeabilität

Die Kenntnis der Permeabilität der einzelnen Verstärkungslagen bzw. der Preform - bei gleichzeitiger Sicherstellung der Preform-Qualität - ist für die Reproduzierbarkeit der Harzinjektionsprozesse zwingend notwendig. Insbesondere wird dies deutlich, betrachtet man zusätzlich zu den flächigen Eigenschaften die Effekte am Rand einer Preform. Hier ändern sich durch Faserauswaschungen, -umorientierungen oder -quetschen die wesentlichen qualitativen Größen der Verstärkungsstruktur. Das hat

zur Folge, dass die Toleranzanforderungen an eine Preform vom Harzinjektionsvorgang vorgegeben sein müssen [196]. Durch die Vernähung im Randbereich entsteht eine definierte Kante in der Preform, die im Umkehrschluss zu veränderten, allerdings definierten Eigenschaften in der Randzone führt.

Folgt man dem Konzept der konfektionstechnischen Herstellung von Preforms, werden unterschiedliche Nähte mit verschiedenartigen Funktionen in die Struktur eingebracht. Deren Parameter beeinflussen die Permeabilität der Gesamtstruktur. In Bild 5-2 wird der Übergang von Preformparametern zur Permeabilitätsbeeinflussung in der Verstärkungsstruktur aufgezeigt. Die vernähte Preform mit unterschiedlichen Nahtbereichen I bis IV zeigt lokal variable Permeabilitäts-Werte. Die Bereiche I und III werden definiert durch Nähte, die ausschließlich zur Kantenfixierung eingebracht wurden. Deren unterschiedliche Permeabilitätskennzahlen K_{xx} und K_{yy} in den Bereichen I' und III' verlangen nach einer Verknüpfung der Werkzeugauslegung (Angussgestaltung) mit der Preformgestaltung. Die eingestellten Nähparameter und die eingesetzten Nähfäden entscheiden über den Harzfluss in diesen Bauteilsektionen. Werden zusätzliche Nähte in ein Bauteil eingebracht (z. B. Sektion II), die einer Dickenverstärkung des Bauteils dienen, kann deren Nährichtung z. B. abhängig von der dort vorherrschenden Fließfront gewählt werden. Diese Nährichtung sowie die Parameter (s.o.) können hierbei so eingestellt werden, dass die Nähte formfüllungsunterstützend oder -bremsend wirken. Dies spiegelt sich wiederum in der Permeabilität des Bereiches II' wider.

Ebenso ist es durch den gezielten Einsatz von Nähten möglich, die Permeabilität einer Verstärkungsstruktur so zu beeinflussen, dass beispielsweise an schwierig zugänglichen Bauteilsektionen die Permeabilität der Verstärkungsstruktur gesteigert wird. Im Beispiel ist dies in Sektion IV dargestellt. Ist es schwierig, die Fließfront in die rechte obere Ecke zu leiten, müsste nun Sektion IV durch Nähen so beeinflusst werden, dass der Permeabilitätstensor bei Sektion IV' das Fließen nach rechts oben erleichtert.

Aufgrund der fehlenden rechnerischen Methoden zur Bestimmung der Permeabilitäten bei beliebigen Lagenaufbauten und Textilstrukturen muss ein experimenteller Ansatz gefunden werden. Lokale Veränderungen der Permeabilität durch die eingebrachten Nähte sind dabei jedoch schwierig zu erfassen. In dem hier

vorgestellten Modell wird versucht, zunächst den Einfluss der Vernähung auf die lokale Kompressibilität und somit auf den möglich einstellbaren Faservolumengehalt zu ermitteln. Ist dieser Zusammenhang gefunden, kann, ausgehend vom Kompaktierungsdruck, auf die Faserpackung rückgeschlossen werden. Diese Information ermöglicht die Berechnung der Permeabilität als Funktion des Faservolumengehaltes [193].

5.2 Bezug zur Kompaktierung und zu Kompaktierungsmodellen

Bei der Betrachtung der Kompaktierung von Verstärkungsstrukturen muss zunächst die Struktur eines Lagenaufbaus - bestehend aus mehreren Einzellagen - erörtert werden. Als Effekt eines solchen Arrangements unter einem Kompressionsdruck tritt eine Umverteilung der einzelnen Faserbündel, die im textilen Halbzeug miteinander verbunden sind, auf. In Bild 5-3 werden die Vorgänge bei der Kompaktierung eines trockenen Lagenaufbaus schematisch dargestellt. Die Einzellagen (hier symbolisch als Gewebe dargestellt) haben vor ihrer Kompaktierung eine Höhe h_i . Die einzelnen Lagen des Paketes sind mit den Ziffern 1 bis 3 versehen. Wird der Kompaktierungsdruck p_k aufgebracht, kommt es zu einer Faserbündeldeformation und zu einer Durchdringung der Einzellagen untereinander, hier als „Interlayer-Movement“ (siehe auch Bild 6-4) bezeichnet. Die Einzellagen erreichen die kompaktierte Höhe h_a .

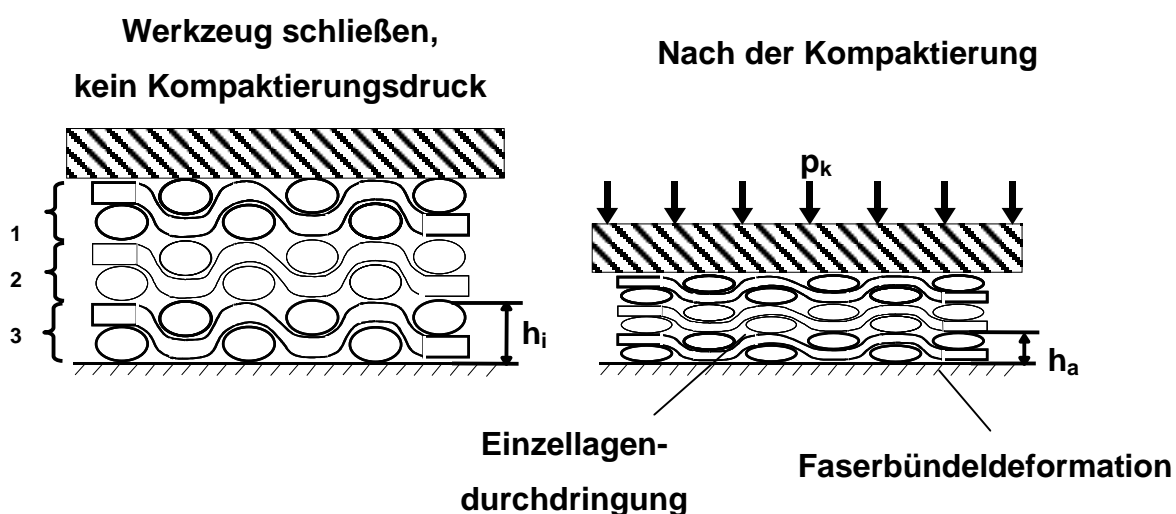


Bild 5-3: Darstellung der Vorgänge bei der Kompaktierung eines mehrlagigen trockenen Faseraufbaus

Durch den Preformprozess wird die Faseranordnung bereits vor der Harzinjektion und der dabei stattfindenden Kompression maßgeblich beeinflusst. Zwei gegenläufige Einstellungen während der Preformfertigung müssen gegeneinander abgewogen werden:

- a) Die zum Erreichen eines bestimmten Faservolumengehaltes einzustellende Faserpackung wird nur durch den Preformprozess eingestellt. Durch die Verfestigung der Preform wird eine zusätzliche Faserbewegung während der Injektion verhindert.
- b) Der Vorformling gestattet nach dem Preformprozess ein weiteres Kompaktieren und Umorientieren der Faserbündel.

Beide Zielrichtungen bieten für die Harzinjektionstechnik individuelle Vorteile. Während bei Umsetzung von a) bereits eine fixierende Komponente in die Preform eingebracht werden muss, um die gewünschte Festigkeit zu erreichen, ist es bei Umsetzung von b) möglich, die notwendigen Nähte nur in geringen Quantitäten einzubringen. Für beide Konzepte ist es notwendig, die jeweilige Anwendung zu berücksichtigen. Insbesondere die Nahtklasse und der zu erreichende Faservolumengehalt sind entscheidende Größen.

Zu berücksichtigen ist zudem der Effekt der Relaxation einer Faserpackung nach dem Preforming, die beispielsweise von Kim et. al in [197] definiert wird. Kim wendet dabei das Viskoelastizitätsmodell nach Maxwell-Wiechert an, welches, experimentell überprüft, sehr gute Ergebnisse liefert.

In der konfektionstechnischen Preformherstellung kann man die Halbzeuge entsprechend der Anwendung auswählen. Die Verschiebungen der Fasern im Textil und die Festigkeit der Naht legen die mikrostrukturellen Veränderungen des Verbundes fest. Bild 5-4 zeigt die Lage einer Naht in einem idealisiert dargestellten Faserverbundaufbau.

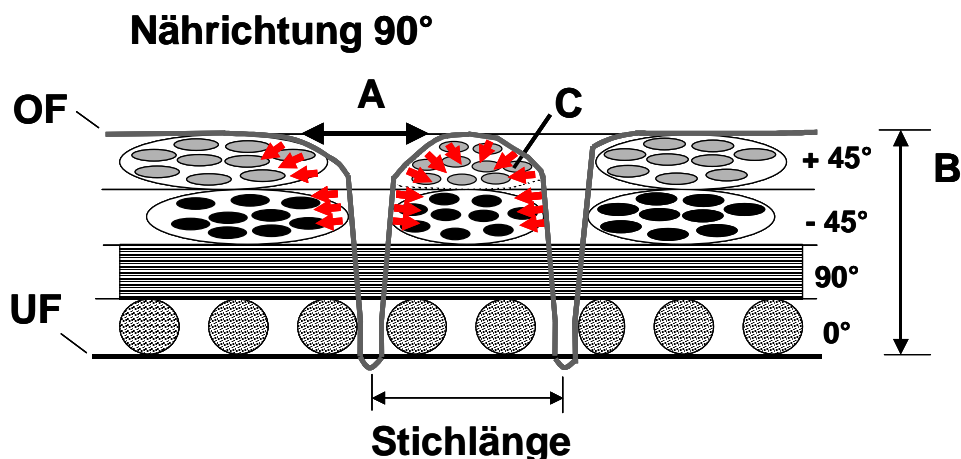


Bild 5-4: Lage einer Naht in einem [+45/-45/90/0] Lagenaufbau

In Bild 5-4 bezeichnet A die Öffnung des Stichlochs (Stichlochaufweitung), B die beim Nähen eingestellte Kompaktierung des Halbzeugs und C die durch die Nahtlage eingestellte Packung des Faserbündels. Es ist ersichtlich, dass die zu wählende Stichlänge abhängig vom textilen Halbzeug – aufgrund der unterschiedlichen Ablage der Verstärkungsfaserbündel - eingestellt werden muss.

Wird nach dem Vernähen der Preform eine weitere Kompaktierung durchgeführt, können zwei verschiedene Fälle auftreten (siehe Bild 5-5).

Fall 1 – Die Preform wurde mit hohen Fadenzugkräften und einem steifen Nähgarn vernäht: Die eingestellten Fadenzugkräfte führten bei der Vernähung bereits zu einer Ausweitung des Stichlochs. Wird nun weiter kompaktiert, drückt das Nähgarn gegen den Lagenaufbau. Die Stichlochöffnung wird erweitert, da die Nahtfestigkeit gegenüber den auftretenden Kräften bei der Re-Orientierung der Faserbündel durch die Kompaktierung größer ist. Das flächige textile Halbzeug setzt dieser weiteren Aufweitung Widerstand entgegen. Dichter gepackte Halbzeuge werden demnach weniger gestört als lose, offene Strukturen, deren Widerstand gegen Aufweitung geringer ist.

Fall 2 – Der Nähfaden wurde als sehr elastisches Element in den Verbund eingebracht: Bei weiterer Kompaktierung wird der steigenden Verdichtung des Verstärkungshalbzeugs durch das Nähgarn kein oder nur ein geringer Widerstand entgegen gesetzt. Das Stichloch wird durch den erhöhten Kompaktierungsdruck nicht

weiter geöffnet, sondern kann zum endgültigen Schließen der Naht durch den Kompaktierungsdruck führen.

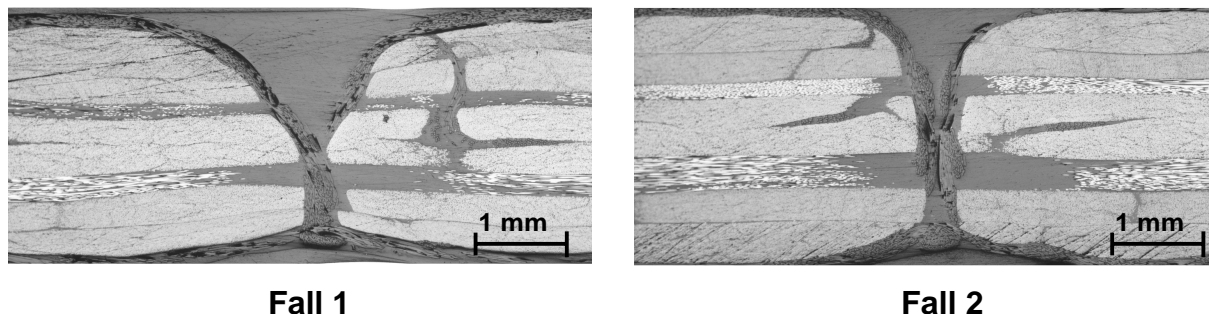


Bild 5-5: Unterscheidung der Fälle beim Kompaktieren einer bereits genähten Preform (Glasfasergewebe Atlas 1/4, Aufbau $(0^\circ, 90^\circ, +45^\circ)_{2S}$, Nährichtung 0° , Nähgarn: Gütermann M132 (No. 220, ca. 83 tex))

Bild 5-6 zeigt Ansichten zweier Nahtoberseiten. Links wurde durch den Einsatz eines steifen Nähgarns (Kevlar[®]) eine große Verschiebung verursacht. In der Ansicht rechts wurde durch eine Hybridisierung der Naht (OF: PA 6.6. Monofilament; UF: E-Glasmultifilament texturiert) ein sehr niedriges Garnspannungsniveau erreicht. Das Nahtbild erscheint bereits vor der letzten Kompaktierung während der Imprägnierung / Konsolidierung sehr geschlossen.

Verschiedene experimentell ermittelte Zusammenhänge zum Deformationsverhalten von Textilien finden sich bei Lekakou et. al [198] und Toll [199]. Die Änderung der Porositäten durch Kompression eines textilen Halbzeugs kann infolge eines applizierten Drucks durch die empirische Beziehung

$$P_k = c(\varphi_f^n - \varphi_a^n) \quad (\text{Gl. 5-2})$$

ermittelt werden. P_k stellt dabei den Kompressionsdruck auf die Faserpackung dar. Für $\varphi_f \gg \varphi_a$ gilt für Gl. 5-2 näherungsweise:

$$P_k = c\varphi_f^n \quad (\text{Gl. 5-3})$$

Die empirischen Größen c und n (Gl. 5-2) ergeben sich aus der Form des Faseraufbaus. Die charakteristischen Eigenschaften werden durch die Faserausrichtung und die Anzahl der statistischen Berührungspunkte – welche die Deformationsfähigkeit und die Schiebefestigkeit festlegen – bestimmt.

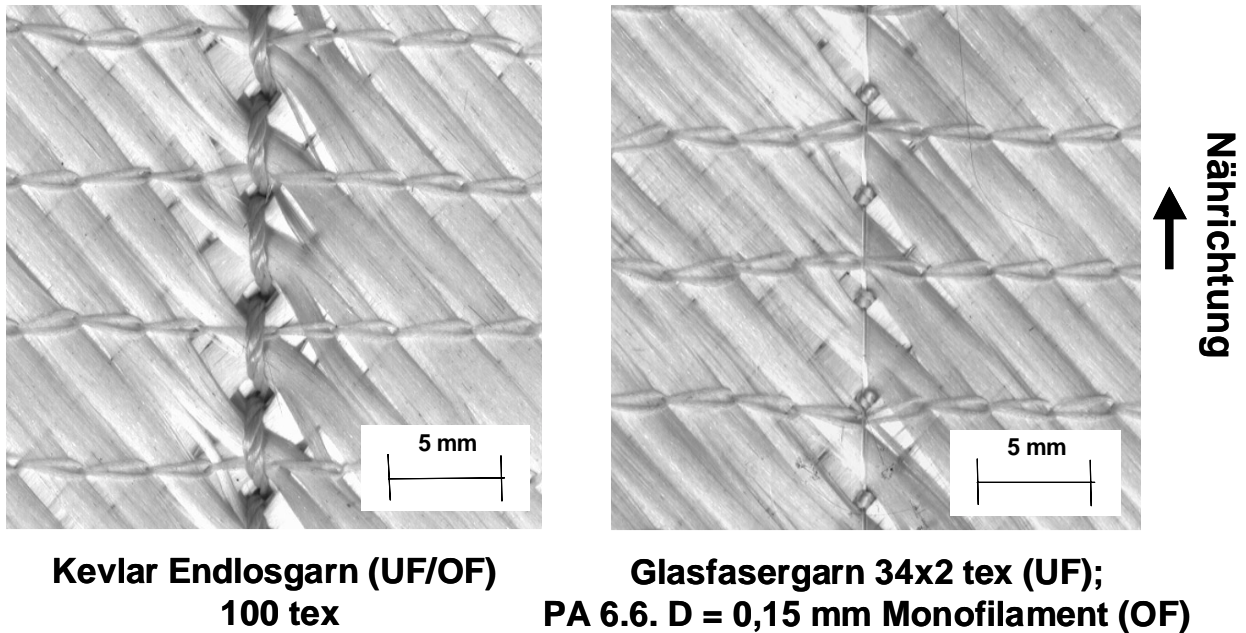


Bild 5-6: Vergleich unterschiedlicher Nähte auf Glasfasermultiaxialgelege $[+/- 45^\circ]_{2s}$:
Oberseite der Preform, Stichelänge 4 mm, Nadel R-Spitze Nm 100, Nährichtung 0°

Robitaille [188] verwendet zur Ermittlung der Kompaktierungseigenschaften den Bezug:

$$\varphi_f = AP_k^B \quad (\text{Gl. 5-4})$$

A gibt bei Robitaille den Faservolumengehalt bei 1 Pa an. B wird definiert als Kompaktierungs-Steifheit ($B < 1$). Robitaille legt somit den zuvor bei Toll noch frei definierten Koeffizienten k mit Einführung von A fest.

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, einen Power-Law-Ansatz (Kraftgesetz-Ansatz) der Form (Gl. 5-4) zu verwenden, um den Einfluss verschiedener Nähparameter auf die Kompaktierungseigenschaften zu beschreiben. Ein Lagenaufbau für FKV besteht i.d.R. aus mehreren Einzellagenpaketen. Jedes dieser Einzellagenpakete wurde durch einen Preformprozess gezielt beeinflusst.

Diese Beeinflussung der Faseranordnung kann sowohl durch den Einsatz der Multiaxialgelegetechnik als auch durch den hier vorgestellten konfektionstechnischen Ansatz geschehen. In Kapitel 7 wird versucht, die Kenntnis des Verhaltens eines einzelnen Verstärkungslagenpaketes in eine Hintereinanderschaltung einzelner Pakete gleicher Charakteristika zu überführen.

5.3 Auswahl wesentlicher Merkmale

Zusammenfassend kann man die Beeinflussung des Fertigungsprozesses und der Bauteileigenschaften durch den Nähprozess auf 2 wesentliche Merkmale fokussieren:

- Die Faserverschiebung, die durch den Nähprozess verursacht wurde.
- Die Kompaktierungseigenschaften einer vernähten Preform.

Die Bauteileigenschaften sind abhängig von der Faserbündelorientierung im FKV, weshalb die Faserverschiebung durch den Nähprozess als zweites, kritisches Element identifiziert wurde. Im Sinne der Kompaktierungseigenschaften sowie der Permeabilität der Verstärkungsstruktur sind die makroskopischen sowie die nähtechnisch determinierten Preformgrößen entscheidend. Der Zusammenhang zwischen den beiden wesentlichen Merkmalen ist über die Kenntnis der Nähparameter, wie z. B. Oberfadenzugkraft, Presserfußkraft, etc., gegeben. Im folgenden werden die oben genannten Größen, Faserverschiebung und Kompaktierungseigenschaften, untersucht.

6 Charakterisierung der Faserverschiebung

Verschiebungen finden durch die Stichlochaufweitung, d. h. durch die Stichbrückenspannung des gebildeten Nähstichs, statt, so dass sie in der Ebene deutlich sichtbar werden. Die zusätzliche Einbringung von Garnmaterial in die Stichbrücke (Fadenreserve zwischen zwei Einstichen) führt zu einer Verschiebung der Fasern in Dickenrichtung des Laminates. Dieser Effekt ist durch eine visuelle Inspektion der Preform nicht sichtbar, spielt aber für die Qualität des späteren Verbundes eine entscheidende Rolle.

6.1 Faserverschiebung in der Ebene

Zur Charakterisierung der Faserverschiebung im Stichlochbereich wurden zwei verschiedene Materialien untersucht:

- Biaxial-Gelege, Lagenaufbau $[0/90/+45/-45]_{2s}$, Gesamtflächengewicht 2×877 g/m²

- Leinwand-Gewebe, Lagenaufbau $[0/90/+45/-45]_{2S}$, Gesamtflächengewicht 4 x 360 g/m²

Nadelstärke

Ziel der Untersuchungen war die Identifizierung der kritischen Elemente bei der Vernähung von Verstärkungsstrukturpaketen. Unabhängig von Nähfaden, Lagenaufbau und Nährichtung wurden 45°-Nähte in den oben genannten Biaxial-Gelegeaufbau eingebracht. Zur besseren Justage wurde eine hybridisierte Naht eingesetzt. Als Oberfaden wurde ein PES-Endlos Garn (Amann Serafil 200/2, ca. 80 tex, gefärbt) eingesetzt. Der Unterfaden war ein rohes, lufttexturiertes PES-Multifilamentgarn. Die Garnspannungen wurden nun eingefroren und lediglich die Nadelstärke variiert. Durch den Einsatz größerer Nadelstärken beim Einstich wird mehr Material verdrängt. Dies führte zu einer stärkeren Störung der Faseranordnung. Bei Sticheinzug mit gleichen Parametern - gleiche Fadenkräfte, gleiche Anzugsfeder, etc. – wird diese Verschiebung im Textil eingefroren.

Bild 6-1 zeigt Aufnahmen eines Stichlochs im oben beschriebenen Laminataufbau. Die Verknotungslage wird auf die Materialoberseite gelegt, um den dynamischen Einfluss des Fadenhebels und der Anzugsfeder bei der Stichlochaufweitung zu minimieren. Die trichterförmige Materialaufweitung wird auf der Materialunterseite besonders deutlich. Durch eine thermische Behandlung der Pakete, z. B. durch Werkzeugheizung, ist aufgrund des zusätzlich auftretenden Materialschrumpfs (bei PES) eine weitere Einschnürung zu erwarten.

Garnkonstruktion

Um den Einfluss der Garnkonstruktion auf die Faserverschiebung zu ermitteln, wurden die Nähparameter Nadel, Nährichtung, Lagenaufbau und Maschineneinstellung, insbesondere die Presserfußkraft, konstant gehalten. Zur Vermeidung des Einflusses der Verknotungslage justierte man diese jeweils - durch Anpassung des Unterfadenspannungsniveaus - auf der Materialunterseite. Variiert wurden die Garnkonstruktion und die Fadenkraft. Um den Einfluss der Richtungsabhängigkeit des textilen Halbzeugs mit Bezug zur Nährichtung möglichst gering zu halten, kam für diese Annäherung ein Leinwandgewebe zum Einsatz

(Einzellagengewicht = 200 g/m²). Der Lagenaufbau war [0/90/+45/-45]_{2S}, Nährichtung 0°.

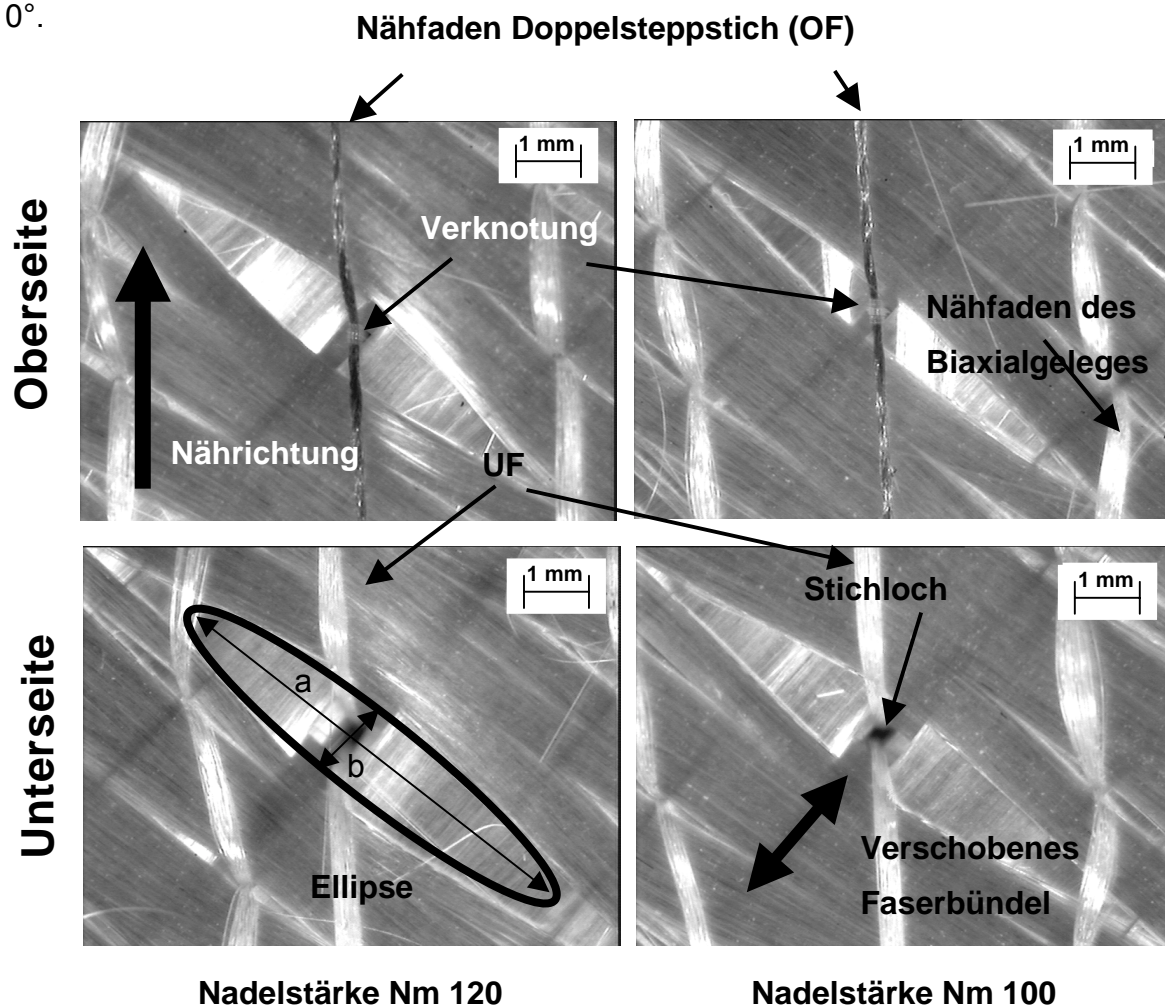


Bild 6-1: Faserverschiebung an einer Doppelsteppstichnaht bei Raumtemperatur

Tabelle 6-1 zeigt die unterschiedlichen Krafniveaus, die zur Ermittlung der Faserverschiebung Verwendung fanden. Die zu untersuchenden Nähfäden wurden jeweils als Ober- und Unterfaden eingesetzt.

Tabelle 6-1: Übersicht über die möglichen Spannungsniveaus bei Einsatz verschiedener PES-Nähgarne (Gütermann T 753, endlosfaser, 73 tex und Gütermann M 132, langfasergesponnen, ca. 83 tex)

	Spannungsniveau 1		Spannungsniveau 2		Spannungsniveau 3	
	(Kraft [cN])		(Kraft [cN])		(Kraft [cN])	
	T 753	M132	T 753	M132	T 753	M132
Oberfadenkraft	160	80	325	372	450	Fadenbruch
Unterfadenkraft	80	115	140	135	176	215

Untersucht wurden 3 Spannungsniveaus bei Festlegung der Verknötungslage „unten“. Bild 6-2 zeigt sowohl die Abhängigkeit der Stichlochaufweitung und damit der Faserverschiebung dieser Niveaus als auch die Abhängigkeit von den eingesetzten Garnkonstruktionen. Die höhere Steifigkeit des PES-Multifilamentgarns führt zu einer - gegenüber dem langfasergesponnenen PES-Garn - größeren Stichlochaufweitung für alle untersuchten Kraftniveaus. Durch eine erhöhte Oberfadenzugkraft nimmt die aufgebrachte Vorspannung im Garn zu, was eine höhere Stichlochaufweitungskraft bedingt. Diese im Garn enthaltene Vorspannung wirkt sich in dem langfasergesponnenen Material weniger stark aus. Dieses Garn besitzt weiterhin eine Flexibilität, die den Verstärkungsfasern im textilen Gebilde weniger Kraft bei deren Rückstellung entgegen setzt.

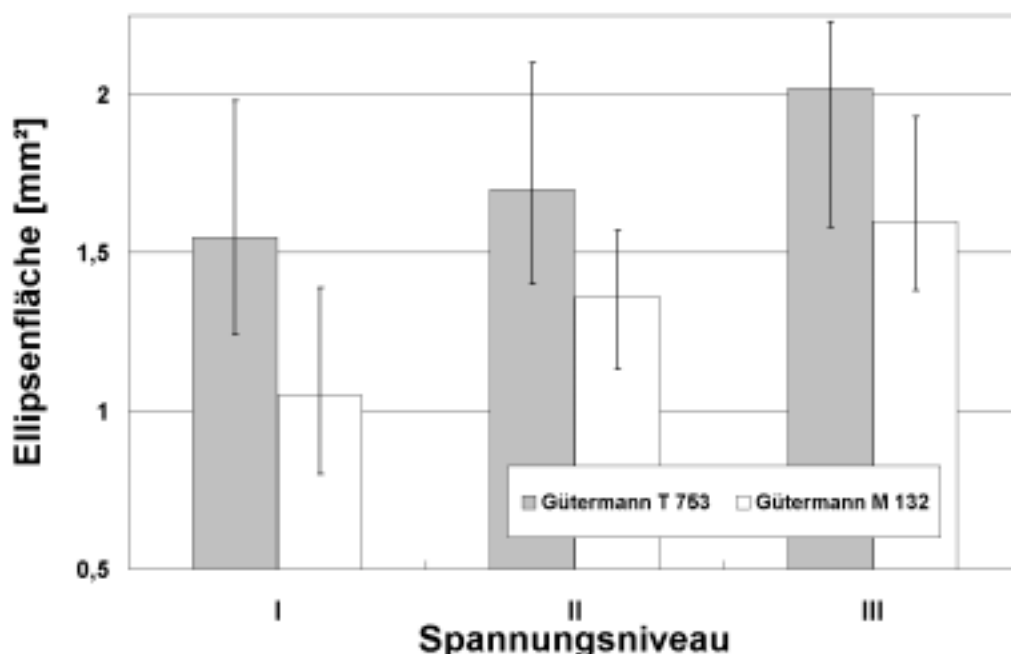


Bild 6-2: Ellipsenfläche der Faserverschiebung im Stichlochbereich

Im Falle von PES kann man von einem visko-elastischen Garnverhalten ausgehen, was für die verschiedenartigen Garnkonstruktionen zu unterschiedlichen Dämpfungskonstanten führt. Ein langfasergesponnenes Garn relaxiert nach aufgebrachter Kraft mit einem größeren Gradienten als ein Multifilamentgarn. Das Garn entspannt sich, und die Stichlochaufweitung wird bis zu einem gewissen Maß zurück gebildet. Eine höhere Dehnung des Garns während der Stichbildung - bei gleichbleibender Einstellung des Garnbedarfs - führt zu einem längeren Fadenabschnitt für die Stichbrücke. Diese Garnreserve, die wiederum selbst

relaxiert, ermöglicht eine weitgehende Rückstellung der Stichlochaufweitung. Eine beim Nähen aufgebrauchte Kompaktierung unterstützt dieses charakteristische Verhalten.

6.2 Faserverschiebung im Querschnitt

Über die Verschiebungen der Fasern in der Ebene hinausgehend, wird durch die lokal wirkenden Fadeneinzugskräfte eine Faserwelligkeit in Dickenrichtung des Laminates erzeugt.

Faserwelligkeit in der Stichbrücke

Die entstehende Faserwelligkeit wird durch den während der Injektion anliegenden Kompaktierungsdruck relativiert. Mindestens jedoch die Dicke des Nähfadens bleibt als minimaler Welligkeitsradius erhalten. Setzt sich der Lagenaufbau aus nur einem Preformpaket zusammen, drückt sich durch den Konsolidierungsdruck das Nähgarn in die Faserpackung. Es entsteht eine Welligkeit entsprechend dem Nähgarn Durchmesser.

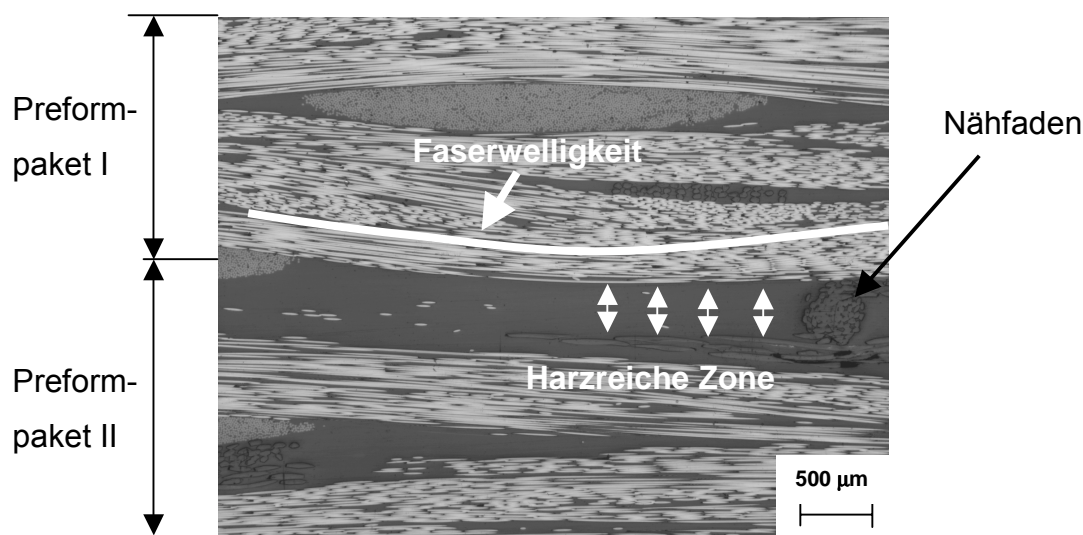


Bild 6-3: Interlaminar erzeugte Welligkeit durch einen Nähfaden

Bild 6-3 zeigt eine Harztasche zwischen 2 Preformpaketen, die den gesamten Lagenaufbau eines FKV darstellen. Durch den entstehenden Kontakt zwischen Nähgarn und Verstärkungsfaserbündel kann es zusätzlich zu Faserbeschädigungen kommen.

Faserverschiebungen im Stichlochbereich

Im Bereich eines Stichlochs tritt über das zusätzlich eingebrachte Garnmaterial hinaus eine aus der Stichbrückenspannung resultierende Kraft auf. Die dadurch entstehende Faserwelligkeit führt in der Regel zu lokal minimal veränderten Faservolumengehalten im Faserbündel. Wie bei den Faserverschiebungen in der Ebene besteht auch hier ein Zusammenhang zwischen Nähgarnmaterial, Nähgarnkonstruktion, Halbzeug und Nähparametern. Bild 6-4 zeigt exemplarisch die Variation der Stichlochtrichter-Ausbildung bei gleichen Prozessparametern und Lagenaufbauten, aber einer veränderten PES-Nähgarnkonstruktion. Das langfasergespinnene Garn verursacht eine geringere Verschiebung der Fasern im Querschnitt (in Nahtichtung) aufgrund der größeren Garnreserve.

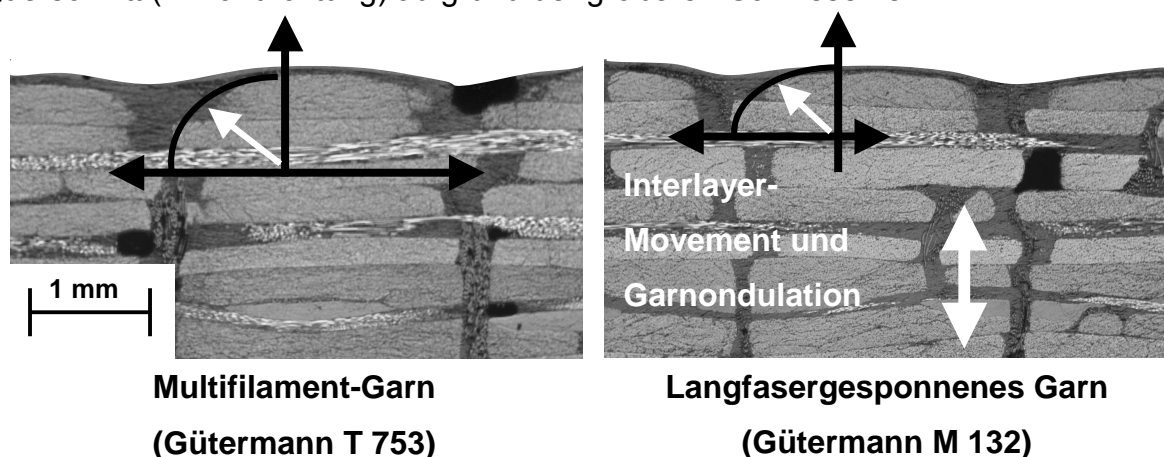


Bild 6-4: Abhängigkeit der Form des Stichlochs von der Garnkonstruktion

6.3 Konsequenzen für das nähtechnische Preforming

Die durchgeführten Untersuchungen definieren die notwendigen Nähparameter, die zur Einstellung der Preform-Paketeigenschaften notwendig sind. Hierzu zählt auch die Auswahl einer entsprechenden Garnkonstruktion. Bei der Auswahl des Nähgarns spielt nicht nur das Ausgangsmaterial des Garns, sondern auch dessen Aufmachungsform eine Rolle.

Zur Auswahl des Nähgarns sollte zunächst eine Definition der Nahtanforderung erfolgen. Gibt man die Zielrichtung „Montage der Pakete“ und „Keine Faserverschiebung“ vor, müssen hoch elastische Garne mit geringer Steifigkeit eingesetzt werden. Darüber hinaus sollte die Feinheit des Garnes möglichst reduziert

werden, um die Grundfaserverschiebung (2 x Garndurchmesser) in der Ebene - in Dickenrichtung des Laminates - zu minimieren.

Um einen Zusammenhang zwischen der Garnselektion, den Nähparametern und den FKV-Eigenschaften finden zu können, sind Kenntnisse über das Verhalten des Faserpaketes in den Folgeprozessen erforderlich. Die Einstellung der Nähparameter muss gemäß den gegebenen Randbedingungen erfolgen. Die Randbedingungen leiten sich aus den Bauteilanforderungen ab.

7 Analyse der Kompaktierungseigenschaften

Die wesentlichen Phasen bei der Überführung von Faserverstärkungsstrukturen zum FKV stellen die erste Kompaktierung zur Endhöhe sowie das Relaxationsverhalten unter einem konstanten Zuhaltedruck dar. Wird während des Preformprozesses die Kompaktierung vollständig durchgeführt, d. h. die endgültige Bauteildicke eingestellt, muss der Relaxationsprozess der Faserbündel bereits in der Preformphase berücksichtigt werden. Es entsteht eine Art „re-bulking“ (aufbauschen) nach dem Kompaktieren, da die Fasern nur bis zu einem gewissen Grad miteinander im Verbund stehen. Der Grund hierfür ist das Spannungs-Dehnungsverhalten der Faser unter Biegung.

Die eingebrachten Nähte und die dadurch entstandenen Faserverschiebungen (siehe Kapitel 6) im einzelnen Lagenpaket bestimmen die Anordnung der Fasern (Faserpackung) nach dem Kompaktieren bzw. dem Relaxieren. Durch die Naht sind die Fasern in ihrer Bewegung behindert, was zu einer inhomogenen Faserverteilung im Verbund führt. Die Naht muss es den Fasern gestatten, bei der Kompaktierung die gewünschte Packungsdichte einzunehmen. Wird nun allerdings die Kompaktierung bereits durch die Nähparameter erreicht, ist die durch die Naht eingestellte Verschiebung eingefroren. Verfolgt man diese Vorgehensweise, ist eine Umorientierung der Faserbündel in den Ausgangszustand nur durch die Entfernung des Nähfadens in eingeschlossenem Zustand, z. B. bei geschlossener Werkzeugform, zu erreichen. Mit Bezug auf die verschiedenen Nahtklassen (siehe Kapitel 3) und den dabei zum Einsatz kommenden Nähfäden werden das lokal über

die Preformfläche unterschiedliche Kompaktierungsverhalten und das Relaxationsverhalten sowie die Anforderungen an beide deutlich.

Die Kompaktierungsphase wird meist nach einem Kraftgesetz approximiert. In der Literatur wird die Kompaktierung in der Regel in zwei Phasen unterteilt. Bis zu einem Grenzfaser volumengehalt ϕ_{fgrenz} kann ein Federgesetz (Hook'sches Gesetz) angewandt werden. Passiert man diesen Wert, steigt durch den erhöhten Faservolumengehalt die Reibung zwischen den Faserbündeln stark an, weshalb ein erhöhtes Kraftniveau zur weiteren Kompaktierung erforderlich ist. Lee und Lee [200] bzw. Carnaby und Pan [201] führen dieses Ansteigen des Kraftniveaus auf mehrere Effekte zurück: Faserverlängerung, Deformation der Faserbündel, eingebrachte Faserwelligkeit und Faserbrüche, die jeweils abhängig von Druck und Faserarchitektur unterschiedlich zu bewerten sind. Diese Effekte stehen in einer Abhängigkeit voneinander, die wiederum durch die Parameter Fasertyp und -länge, Schlichteanteil, Drehung der Faserbündel, Feinheit und Geometrie der Faserbündel, Halbzeugarchitektur und Faserorientierung gegeben ist [202].

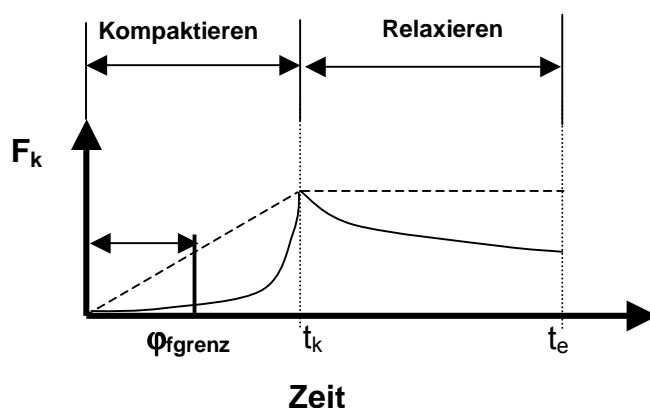


Bild 7-1: Zeitlicher Verlauf der Kompaktierungskraft

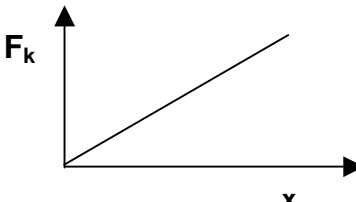
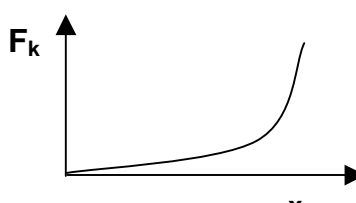
In Bild 7-1 ist der zeitliche Verlauf für ein Kompaktierungszyklus dargestellt. Der Kraftverlauf bis zu einem Zeitpunkt t_k kann dabei durch unterschiedliche Modelle beschrieben werden. Nach dieser Zeit beginnt das Relaxieren der eingeschlossenen Faserpackung bis zu dem Zeitpunkt t_e , bei dem der Härtingszyklus des Harzsystems abgeschlossen ist. Das Relaxationsverhalten ist jedoch für verschiedenartige Matrixwerkstoffe und unterschiedliche Spannungsniveaus in der Preform anders charakterisiert.

Die Untersuchung in dieser Arbeit geht ausschließlich von trockenen Lagenaufbauten aus, bei denen ein Effekt der vorhandenen Matrix ausgeschlossen werden kann. Wechselwirkung von Nähgarn und Matrixwerkstoff und Prozesstemperatur bzw. Temperaturprofil während der Verarbeitung werden nicht berücksichtigt um die Einflüsse durch den Nähprozess auf die Verstärkungsstruktur besser sichtbar zu machen.

In der Regel werden in einer Bauteilsektion unterschiedlich vernähte Teilstrukturen eingesetzt. Jede dieser Einzelstrukturen besitzt eine charakteristische Kompaktierungssteifigkeit.

Durch die konfektionstechnische Vorgehensweise bei der Herstellung von trockenen Faserpreforms liegen in der Regel in einem Bauteilquerschnitt mehrere Einzellagenpakete übereinander. Idealerweise, z. B. im Falle einer ebenen Platte, handelt es sich um nur ein Gesamtlagenpaket. Zunächst wird das Verhalten einzelner Lagenpakete bei der Kompaktierung untersucht. Anschließend werden mehrere solcher Pakete hintereinander geschaltet. Es entsteht ein neues charakteristisches Verhalten der Gesamtstruktur. Das Kompaktierungsverhalten dieser einzelnen Lagenpakete wird experimentell ermittelt. Tabelle 7-1 gibt einen Überblick über die untersuchten analytischen Ansätze.

Tabelle 7-1: Übersicht der angewandten Modelle

Ansatz	Größen	Charakteristisches Verhalten
$F_k = c_l \cdot x$ (Gl. 7-1)	c_l = Kompaktierungssteifigkeit x = Dicke des Lagenpaketes	
$F_k = mx^l$ (Gl. 7-2)	m = charakteristischer Parameter l = charakteristischer Parameter x = Dicke des Lagenpaketes	

Wird eine Hintereinanderschaltung – d. h. Stapeln einzelner TR - verschiedener Lagenpakete durchgeführt, ergibt sich für das Gesamtpaket ein neues Kompaktierungsverhalten.

Im Falle der linearen Vorgehensweise kann das Federmodell angewendet werden. Der gesamte Kompaktierungsweg ergibt sich dabei aus der Summe der jeweiligen Kompaktierungsstrecke der einzelnen Lagenpakete s_i . Für die benötigte Kompaktierungskraft F_k ergibt sich somit:

$$F_k = \frac{\sum_1^n s_i}{\sum_1^n \frac{1}{c_i}} \quad (\text{Gl. 7-3})$$

Für das Potenz-Modell werden die beiden Terme addiert. Es ergibt sich die folgende Gleichung zur Charakterisierung der Kompaktierungseigenschaften:

$$F_k = \sum_1^n [m_i x^l] \quad (\text{Gl. 7-4})$$

Die untersuchten Teilpreforms sind in Tabelle 7-2 aufgelistet. Variiert wurde jeweils die Anzahl der pro Gesamtpaket aufgebauten Lagen. Nach der Ermittlung des Kompaktierungsverhaltens für einen zweilagigen Aufbau wurden die für diesen Aufbau ermittelten Konstanten mittels der beschriebenen Modelle theoretisch für einen vier- bzw. achtlagigen Aufbau berechnet.

Tabelle 7-2: Versuchsschema

Benötigte Lagenanzahl für die Gesamtdicke	Zusammensetzung des Gesamtaufbaus in Teilpreforms		
2	2		
4	2+2	4	
8	2+2+2+2		8

Die wesentlichen, die Kompaktierungseigenschaften einer Preform bestimmenden Einflussgrößen sind:

- Lagenaufbau (Textiles Halbzeug, Fasermaterial, Orientierung)
- Nährichtung
- Stichdichte (Nahtabstand und Stichlänge)

- Fadenkraft
- Presserfußhöhe beim Nähen

Zur Ermittlung der Einsatzfähigkeit der zuvor dargestellten Modelle für vernähte Preforms wurden sämtliche Nähparameter konstant gehalten. Die Kompaktierungsgeschwindigkeit betrug 50 mm/min und die Vorkraft 20 N. Für die hier dargestellten Versuche kam ein Atlas 1/4 Kohlenstofffasergewebe zum Einsatz, welches mit einem langfasergesponnenen PES-Garn vernäht wurde (Gütermann M 132, No. 220, ca. 73 tex).

Der lineare Ansatz nach Gleichung Gl. 7-1 wurde zunächst untersucht. Die Ergebnisse lieferten im Bereich der für die Harzinjektionstechnologie relevanten Kompaktierungsdrücke Werte, die nicht im Bereich der tatsächlich auftretenden Kompaktierungsdrücke liegen. Es wird deshalb auf eine detaillierte Betrachtung dieses Modells verzichtet (siehe Anhang 4).

Bild 7-2 liefert einen Vergleich zwischen dem Modell nach Ansatz der Gleichung Gl. 7.4, basierend auf dem Potenz-Ansatz nach Gleichung Gl. 7-2, mit experimentellen Ergebnissen. Die gemessenen Ergebnisse für den 2x2- bzw. den 1x4- Aufbau liegen bis zu einem Kompaktierungsdruck von etwa 6 bar innerhalb einer Grenze von $\pm 5\%$ Abweichung vom Modell. Das Kompaktierungsverhalten von vernähten Sub-Preforms, die zur späteren Injektion übereinander gestapelt werden, kann somit mittels der Kenntnis einer einzelnen vernähten Sub-Preform angenähert werden.

Zur Berechnung eines achtlagigen Aufbaus kamen die gleichen Parametersätze, die bereits für eine zweilagige Preform jeweils für den linearen Ansatz und den Potenz-Ansatz ermittelt wurden, zum Einsatz. Die Überprüfung fand erneut anhand des linearen Ansatzes bis zu einem Kompaktierungsdruck von etwa 1 bar und für das Potenz-Modell über den gesamten Prüfzyklus statt. Die Ergebnisse der Versuche mit 4 Lagen (Bild 7-2) konnten auch hier bestätigt werden (siehe Anhang 4).

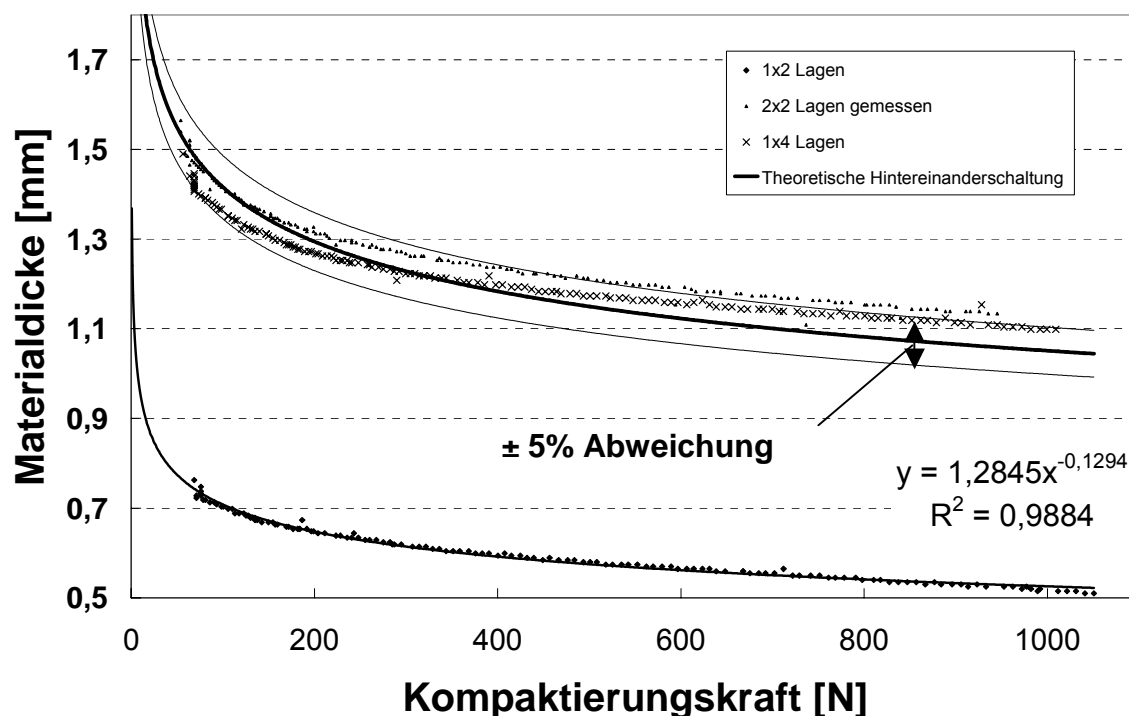


Bild 7-2: Übereinstimmung des Potenz-Ansatzes zur Vorhersage der Kompaktierungseigenschaften mit gemessenen Ergebnissen

7.1 Einfluss von makroskopischen Preformeigenschaften

Die Anordnung der Nähte in einer Preform führt zu lokal veränderten Kompaktierungseigenschaften. In Bild 7-3 sind Versuchsergebnisse dargestellt, die auf der Kompaktierung von Preforms im Nahtbereich basieren. Die sich bei einem Kompaktierungsdruck einstellende Materialdicke wurde jeweils zu einem entsprechenden Faservolumengehalt normiert. Verwendung fand ein quadratischer Stempel der Kantenlänge 10 mm. Die zu untersuchende Naht lag jeweils mittig unter dem Prüfstempel. Die dargestellten Ergebnisse basieren auf Kohlenstofffaser-Gewebeaufbauten (Atlas 1/4, Einzellagengewicht 380 g/m², Lagenaufbau [0/90]_{2s}). Eingbracht wurden Nähte der Stichlänge 2,5 mm und des Nahtabstandes 40 mm, die mit einem PES-langfasergesponnenen Nähgarn (Gütermann M132 (No. 220, ca. 83 tex)) ausgeführt sind.

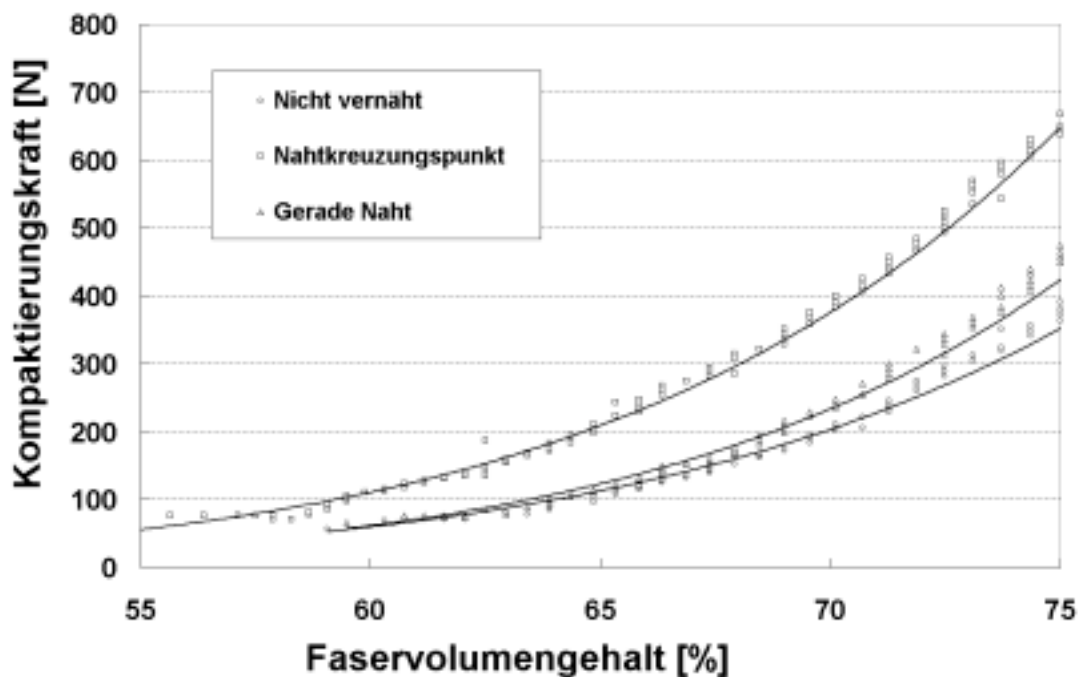


Bild 7-3: Einfluss der Nahtmustergestaltung auf die Kompaktierungseigenschaften, $\pm 45^\circ$ -Nähte auf Lagenaufbau $[0/90]_{2s}$

Als Ansatzfunktion wurde Gleichung Gl. 7-2 ausgewählt. Die ermittelten Parameter m und l der Funktion wurden über 5 Versuche gemittelt. Die $\pm 45^\circ$ Nähte verhindern das freie Gleiten der Faserbündel bei der Kompaktierung, weshalb speziell an den Kreuzungspunkten ein erhöhtes Kraftniveau zum Erreichen eines bestimmten Faservolumengehaltes notwendig ist. An $+45^\circ$ bzw. -45° Nahtstrecken stellt sich dieser Einfluss in abgeschwächter Form dar. Die Faserbündel werden jeweils in einer Richtung in ihrer Bewegungsfreiheit während der Weiterverarbeitung beschränkt.

Der Effekt, der durch die gleichzeitige Einbringung von 0° und 90° - Nähten entsteht, ist im Vergleich zu den $\pm 45^\circ$ -Nähten geringer. Durch die $0/90^\circ$ -Nähte wird die Gewebescherung als mögliche Ausgleichsbewegung nicht behindert, wie dies bei den $\pm 45^\circ$ Nähten der Fall ist. Eine eingebrachte 0° -Naht verändert das Kompaktierungsverhalten der gesamten Preform nur unwesentlich.

7.2 Nähparameter – Presserfußkraft und Fadenkraft

Presserfußkraft

Die Nähparameter Presserfußkraft und -höhe bzw. die Nähfadenkräfte während des Nähvorgangs beeinflussen das Verhalten des Verstärkungsstrukturpaketes nachhaltig. Bei der Auslegung einer Preform muss die einzubringende

Vorkompaktierung durch das Preforming und die noch mögliche Kompaktierung durch das eigentliche Harzinjektionswerkzeug abgewogen werden. Durch die Wahl der Presserfußhöhe und einer entsprechenden Stichdichte kann bereits die zum Erreichen des angestrebten Faservolumengehaltes notwendige Dicke der Preform während des Nähvorgangs eingestellt werden.

Bild 7-4 zeigt die Veränderung des Kompaktierungsverhaltens nach der Nahteinbringung durch die Variation der Presserfußhöhe. Wird bei einem Faservolumengehalt von 62% und dem beschriebenen Lagenaufbau eine Endhöhe des FKV von 3,2 mm erreicht, kann die Presserfußhöhe während des Nähvorgangs an diese Endhöhe angepasst werden. Durch diese Anpassung wird die notwendige Kompaktierungskraft zum Erreichen des Faservolumengehaltes einer vernähten Preform vorweg genommen.

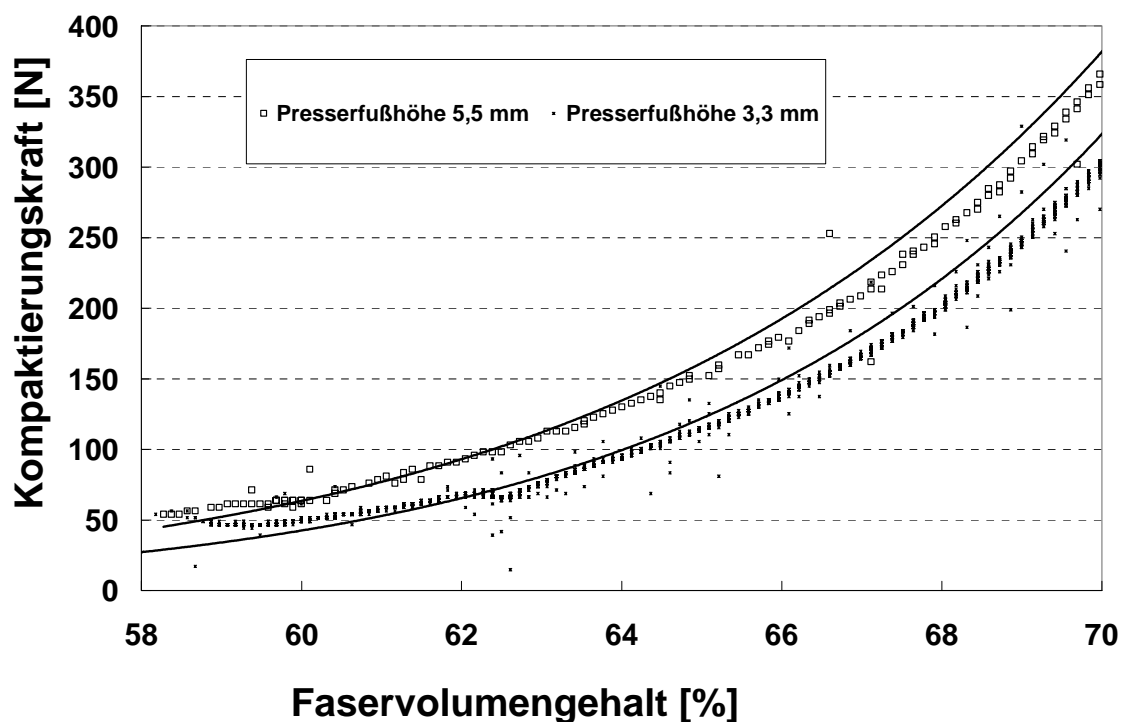


Bild 7-4: Einfluss der Presserfußhöhe auf das Kompaktierungsverhalten einer Preform (Basis: Atlas 1/4 Gewebe; Einzellagengewicht 380 g/m², Lagenaufbau [0/90]_{4s}, Nahtrichtung 0/90°; Nahtkreuzungspunkt; Messstempel 10 x 10 mm)

Fadenkraft

Der Einfluss der Fadenkraft wurde anhand zweier Versuchsreihen mit unterschiedlicher relativer Nahtichtung an einem quasi-isotropen Lagenaufbau untersucht.

Durch die unterschiedlichen Fadenkräfte beim Nähen stellen sich verschiedenartige Faserdesorientierungen und Einschnürungen im Halbzeug ein. Diese Veränderungen führen zu einer Behinderung der Faserreorientierung während der Konsolidierungsphase. Dieser Blockiermechanismus tritt zusätzlich zu den zuvor festgestellten Blockierungen der Faserorientierungen durch die makroskopisch im Verbund positionierte Naht auf.

Bild 7-5 zeigt die Beeinflussung der Verstärkungsstruktur durch variierte Nähparameter bei Nähten in 90°-Richtung. Die Einschnürungsbildung ist dabei abhängig vom Lagenaufbau (siehe Bild 5-5).

Vernäht man ein Lagenpaket bei einem hohen Fadenkraftniveau, führt dies zu einer höheren Kompaktierungskraft zum Einstellen eines definierten Faservolumengehaltes. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bereits während der Preformherstellung die Kompaktierung des Lagenpaketes eingestellt werden muss, um bei vorgegebenen Injektionsparametern den gewünschten Faservolumengehalt zu erreichen.

Bei 0°-Nähten ist die Beeinflussung der Kompaktierungseigenschaften durch die Nahtreihe geringer, als dies bei 90°-Nähten festzustellen ist. Die 90°-Nähte verursachen eine stärkere Nahtaufweitung bzw. Bündelung der oberen Lagen des Aufbaus. Somit ist die Möglichkeit der Reorientierung unter einem Konsolidierungsdruck für diese obere Faserlage stärker eingeschränkt. Unterschiedliche Nahtrichtungen, relativ zum Lagenaufbau des FKV, reagieren unterschiedlich sensibel auf veränderte Nahtparameter.

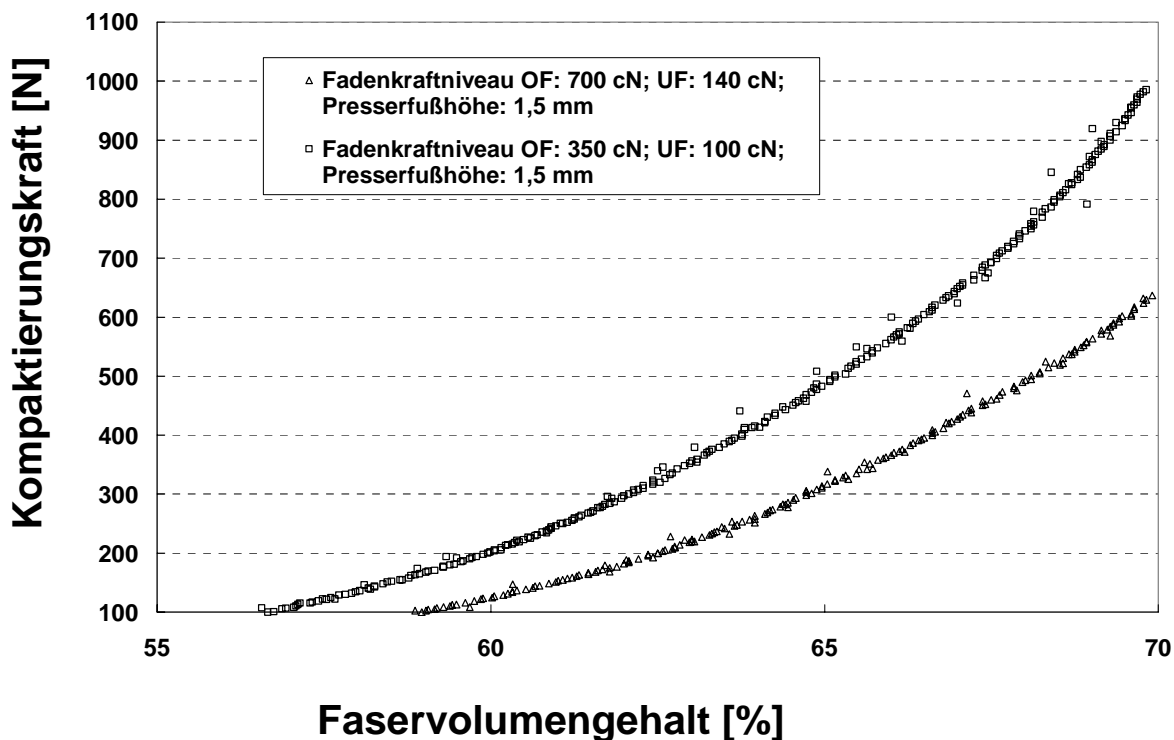


Bild 7-5: Kompaktierungsverhalten eines MAG-Aufbaus $[0/+45/90/-45]_s$ mit 90° -Nähten (Stichlänge = 5 mm; Stichbreite = 5 mm) mit PES-Endlofsasergarn verarbeitet – Vergleich unterschiedlicher Fadenkraftniveaus und PresserfußEinstellungen (Prüfgeschwindigkeit 50 mm/min; Prüfstempel 30 x 30 mm)

7.3 Qualitative Auswertung der Nähparameter

Als Ergebnis lässt sich eine Beziehung zwischen dem benötigten Kompaktierungsdruck zum Erreichen eines bestimmten Faservolumengehaltes, der Presserfußkraft und dem Fadenkraftniveau aufzeigen. Die gegenseitige Abhängigkeit dieser Parameter soll in Tabelle 7-3 qualitativ dargestellt werden. Der Faservolumengehalt wird schematisch auf einen Kompressionsdruck von 1 bar normiert.

Tabelle 7-3: Qualitative Zusammenfassung der Beziehung zwischen Presserfußkraft, Fadenzugkraft und Kompaktierungsdruck

Fall	Presserfußkraft	Fadenkraftniveau	Faservolumengehalt bei 1 bar
I	+	+	+
II	-	-	+ -
III	-	++	-
IV	++	--	++

Fall I beschreibt einen Vorgang während der Preformherstellung, der bei moderatem Fadenkraftniveau, aber hoher Presserfußkraft, zu einem hohen Faservolumengehalt führt. In Fall II erfolgt die Vernähung bei niedrigem Fadenkraftniveau und gleichzeitig geringer Presserfußkraft. Durch die eingebrachte Naht, aber gleichzeitig hoch komprimierte Preform, reicht der Kompressionsdruck von 1 bar nicht aus, einen höheren Faservolumengehalt zu erzeugen. Im Vergleich zu Fall III erlaubt das geringe Fadenkraftniveau von II jedoch eine Reorientierung der Faserbündel, so dass ein gegenüber Fall III höherer Faservolumengehalt erreicht wird.

Fall IV stellt eine ideale Parameterkombination dar. Ein sehr geringes Fadenkraftniveau führt zunächst zu einer geringen Faserdesorientierung. Die hohe Presserfußkraft stellt die benötigte Kompaktierung ein. Der Kompressionsdruck während der Weiterverarbeitung reicht aus, um einen hohen Faservolumengehalt einzustellen.

Die aufgezeigten Alternativen zur Nähmaschineneinstellung verdeutlichen, dass bei Anwendung der nähtechnischen Konfektion von Preforms für die Harzinjektionstechnik eine Verflechtung von Injektions- und Nähparametern gegeben ist. Je nach Anwendungsfall und werkzeug-, prozess- bzw. bauteilspezifischen Gegebenheiten müssen die makroskopischen Preformeigenschaften bzw. nähtechnisch determinierten Größen - insbesondere Presserfuß- und Fadenkraft - ermittelt werden.

8 Betrachtung zur Wirtschaftlichkeit

8.1 LCM-Produktivität und Preforming-Aufwand

Das LCM-Verfahren eröffnet interessante wirtschaftliche Perspektiven, da es mit relativ niedrigen Werkzeugkosten verbunden ist und weitreichende Möglichkeiten für eine funktionsintegrierende Bauweise bietet [203, 204]. Diese Flexibilität kann sowohl auf die Dimensionen der zu realisierenden Bauteile als auch auf das mechanische Anforderungsprofil übertragen werden. Im Injektionsverfahren herstellbare Komponenten reichen so von Kleinst-Komponenten bis hin zu ganzen Schiffsrümpfen mit 30 m Länge [205].

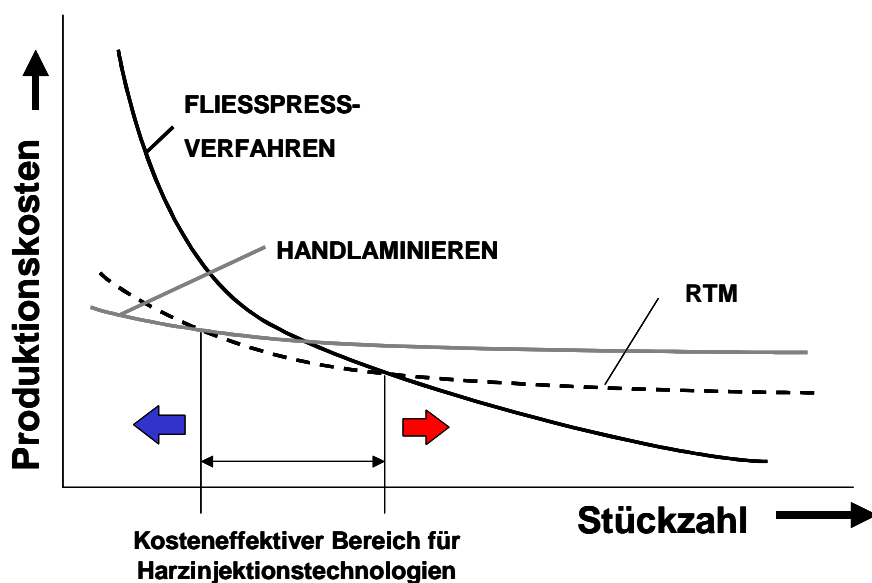


Bild 8-1: Vergleich unterschiedlicher Verfahrensvarianten hinsichtlich Produktionskosten und Stückzahl

Die klassischen Anwendungsfelder der LCM-Technik auf Basis von nicht-orientierten Faserhalbzeugen (Wirrfasermatten oder Endlofaser-matten) verlangen dabei den Einsatz kosteneffizienter Materialien im Werkzeugbau bzw. einfache Werkzeuge im Vergleich zu den konkurrierenden Verfahren wie SMC oder dem klassischen Handlaminat.

Bild 8-1 verdeutlicht die Einsatzgrenzen der LCM-Technologie in den klassischen Anwendungsfeldern anhand eines Vergleichs der Kosten der Verfahren Handlaminieren, RTM – als eine Variante der LCM-Techniken - und Fließpressen (SMC) hinsichtlich der Stückzahl. Während das Handlaminieren das wirtschaftlichste Verfahren bei sehr geringen Stückzahlen darstellt, ist das SMC-Verfahren ab einer

gewissen Größenordnung wirtschaftlicher. Dazwischen etabliert sich das RTM-Verfahren als kostengünstige Alternative. Dieser Bereich liegt in der Regel zwischen einigen 50 und mehreren 10.000 Stck/a. Der Einsatz von preiswerten Werkzeugen trägt zur Kostenreduktion bei [206]. Die Bereitstellung von vorgefertigten Verstärkungsstrukturen erweitert den Bereich der Wirtschaftlichkeit für RTM hin zu größeren Stückzahlen. Eine Absenkung der Zykluszeiten erfolgt durch die Anpassung der Harzsysteme bzw. mittels einer Optimierung des Injektionsprozesses [207, 208, 209].

Beim Übergang in den Bereich von Strukturkomponenten und dem damit verbundenen Aufbau der Struktur mit endlos orientierten Faser-Halbzeugen werden die Rahmenbedingungen abermals verschoben [210]. Für hohe Faservolumenanteile werden beispielsweise auch die Anforderungen an den LCM-Prozess höher. Zusätzlich kommt dem eingesetzten Preformverfahren eine gesteigerte Bedeutung zu [60].

Bild 8-2 illustriert die notwendigen Prozessschritte bei der Herstellung von Hochleistungskomponenten aus FKV mittels Harzinjektionstechnik. Durch den Einsatz einer angepassten Preformtechnik lässt sich der finanzielle Aufwand für die Hauptkostentreiber stark reduzieren. So ergeben sich Vorteile sowohl im folgenden Injektionsprozess als auch durch minimierte mechanische Nachbearbeitung. Angestrebt wird zudem die Verlagerung des Preformingprozesses bereits in die Halbzeugherstellung [211].

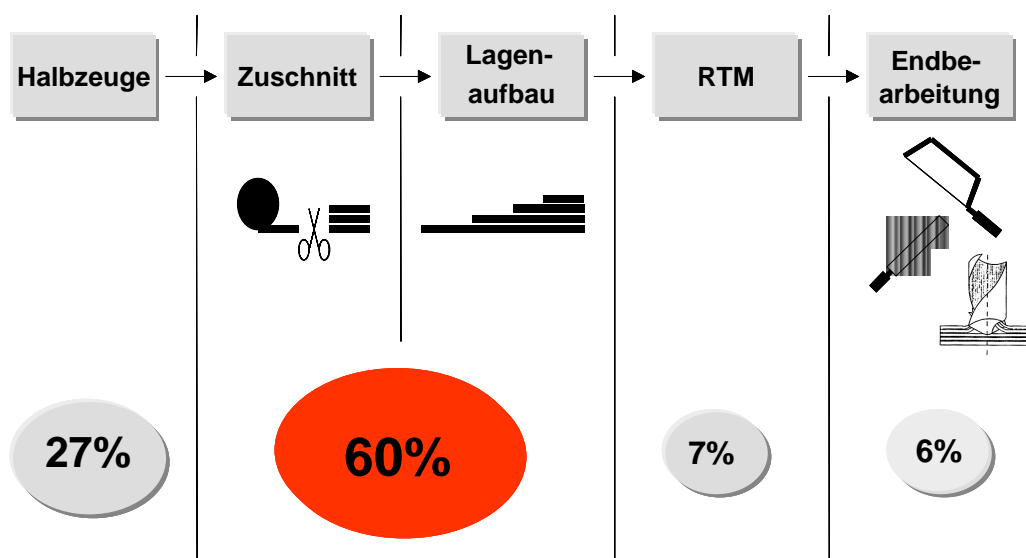


Bild 8-2: Identifikation der Kostentreiber im LCM-Prozess für CFK[212]

Aus den Anforderungsprofilen verschiedener LCM-Techniken und Anwendungsgebiete ergeben sich Ansätze für mögliche Preformingverfahren. Wirtschaftliche Betrachtungsweisen identifizieren den Preformingprozess als erforderlich, stellen aber gleichzeitig Anforderungen an Rahmenbedingungen, die erfüllt sein müssen. Jede einzelne Preformingfertigungsstufe ist ein zusätzlicher Verarbeitungsschritt, der in die Prozesskette eingebracht wird. Die entstehenden Kosten bei der Preformherstellung stehen daher in ursächlichem Zusammenhang mit der gesamten Prozesskette und müssen bezüglich der entstehenden Kosten in Abhängigkeit voneinander interpretiert werden.

Im folgenden wird versucht, die derzeit in vielen Branchen und Anwendungsfeldern zum Einsatz kommenden Preformingverfahren zu bewerten und ihre Chancen bzw. Einschränkungen beispielhaft abzuschätzen. Die Analyse des Preformingverfahrens erfolgt dabei sowohl im Sinne seiner mechanischen Einsatzgrenzen als auch hinsichtlich der erreichbaren Bauteilkomplexität in der Portfoliodarstellung (Bild 8-3).

Auf den Zusammenhang zwischen LCM-Stückzahl und Preformingaufwand ist dabei ein besonderes Augenmerk zu richten. Zentrales Element für eine an den LCM-Prozess angepasste Preformherstellung ist die Beibehaltung der Flexibilität, was mit Bezug auf die Auslastung der Preforminganlagen zu sehen ist. Eine Aufteilung der gesamten Preformfertigungskette in einzelne Sub-Prozesse führt in Konsequenz zur Möglichkeit, ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis zwischen Preform-Aufwand und RTM-Nutzen einzustellen.

Die Bewertung in der vorliegenden Übersicht beruht auf bekannten Anwendungsfeldern und den dort bekannten Limitierungen der Verfahren. Als Preformaufwand wird jener Aufwand angesetzt, der notwendig ist, um die gesetzten Anforderungen zu erfüllen. Bei allen betrachteten Verfahrensvarianten ergeben sich somit individuelle Limitierungen, die im folgenden diskutiert werden sollen.

Auswertung Portfolio-Analyse (Bild 8-3):

„*Direct-Preforming*“: Die „Direct-Preforming“ (z.B. P4-Verfahren) – Methoden bieten für klassische RTM-Prozesse mit einfachen geometrischen Formen, geringen Faservolumengehalten und einem niedrigen mechanischen Anforderungsprofil sehr gute Möglichkeiten. Jedoch ist beim Übergang auf semistrukturale oder strukturelle

Bauteile eine gegensätzliche Bewegung von Aufwand und Nutzen festzustellen [213]. Dieses Problem wird dann zu einem Kostentreiber, wenn die erforderlichen mechanischen Eigenschaften gleichzeitig mit der Bauteilkomplexität steigen. Eine Steigerung an nochmal komplexeren Prozessschritten wäre die Folge.

Umformen von textilen Flächengebilden: Ein ähnliches Szenario ergibt sich für den Einsatz der Vorformtechnik auf Basis des Umformens von z. B. mit Bindern versehenen flächigen textilen Halbzeugen. Unabhängig von den Kosten für die einzusetzenden Halbzeuge resultiert ein zusätzlicher Fertigungsschritt, der jeweils zu einem erhöhten Materialeinsatz führt [214]. Das Verfahren erscheint für den Einsatz bei Baugruppen mit einem niedrigen bis mittleren Anforderungsprofil in Verbindung mit hohen Stückzahlen wirtschaftlich und in hohem Maße reproduzierbar. Jedoch ergeben sich Grenzen im Sinne der Ausnutzung des Leichtbaupotenzials aufgrund eingeschränkter Einsatzfähigkeit der Verstärkungsstrukturen. Komplexe Bauteile können auch hier nur mittels eines sehr hohen Aufwandes realisiert werden. Dieser Effekt steigt nochmals, wenn Bauteile mit hohem Komplexitätsgrad im hohen Stückzahlbereich produziert werden sollen.

OS-Textiltechniken: One-Step-Textiltechniken sind für den Massenmarkt zunächst nicht geeignet. Der Schwerpunkt beim Einsatz solcher Techniken liegt in der kontinuierlichen Fertigung von Standardgeometrien (z. B. Rippelementen). Ist ein solcher Prozess etabliert, kann auf einem bestimmten Niveau der Eigenschaften bzw. der Bauteilkomplexität wirtschaftlich produziert werden. Die geometrischen und prozesstechnischen Anforderungen werden maßgeblich von den eingesetzten 3D-Techniken und den dazu notwendigen Prozessschritten determiniert, wovon letztlich auch die Prozessgeschwindigkeit abhängt.

TR + Assembly: Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt, ist der Ansatz der Tailored Reinforcements mit anschließender Preform-Montage im Sinne der effizienten Ausnutzung sämtlicher textiltechnischer Potenziale für hohe mechanische Eigenschaften prädestiniert. Durch den hohen Wertschöpfungsanteil ergibt sich jedoch im Bereich hoher Stückzahlen und niedrigem, mechanischem Eigenschaftsprofil ein Feld, in dem andere Verfahren, wie beispielsweise das „Direct Preforming“, wirtschaftlicher zu betreiben sind. Das gesamte Potenzial wird für sehr

komplexe Strukturen erschlossen, da dort eine sehr hohe Anzahl individueller Einzelkomponenten im einfachen TR-Prozess hergestellt werden kann.

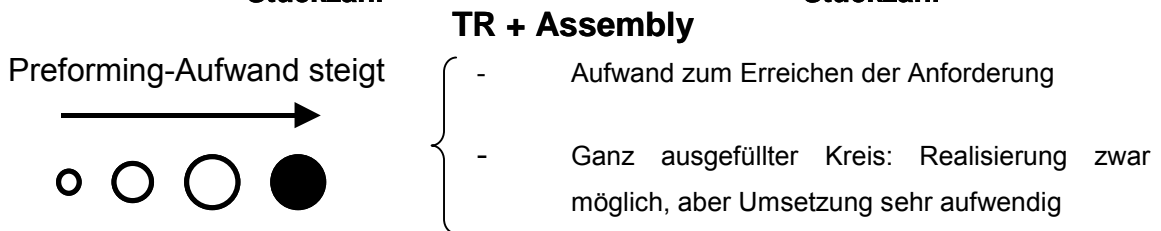
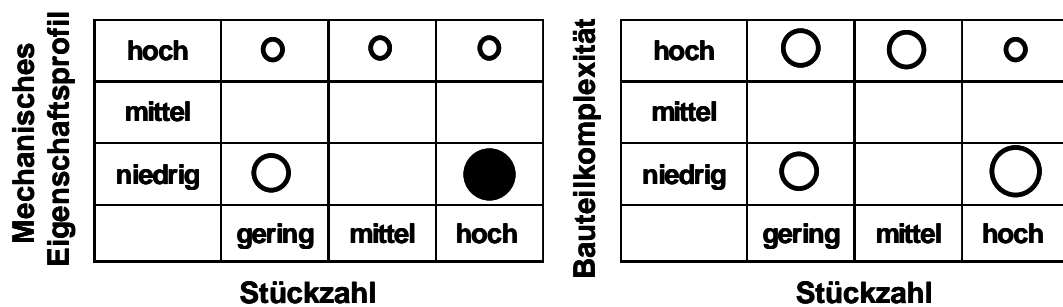
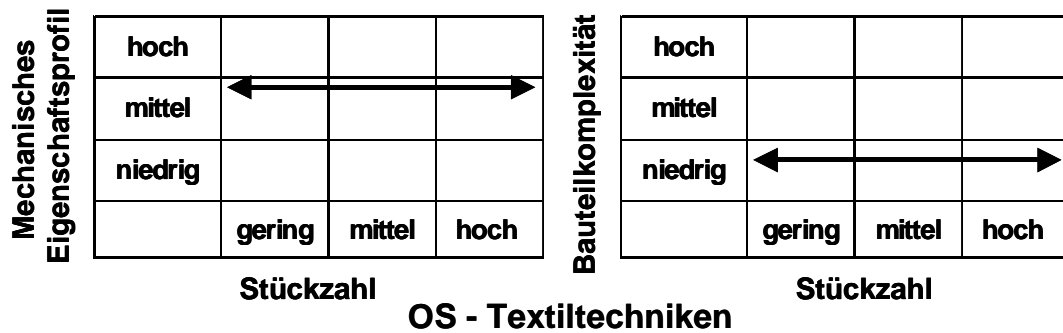
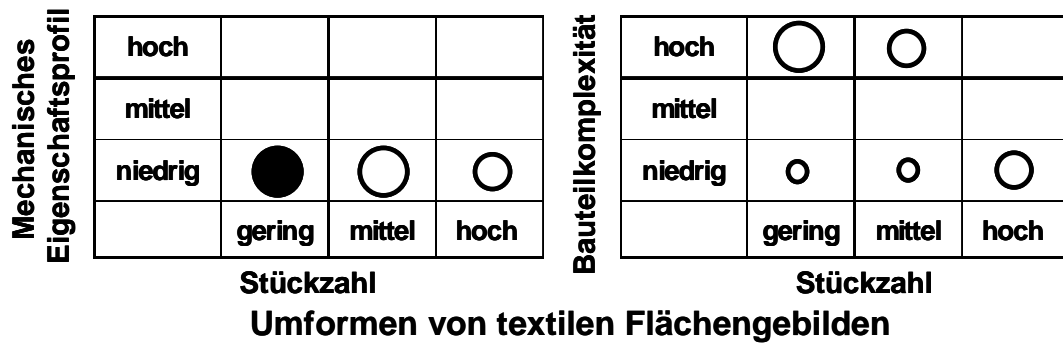
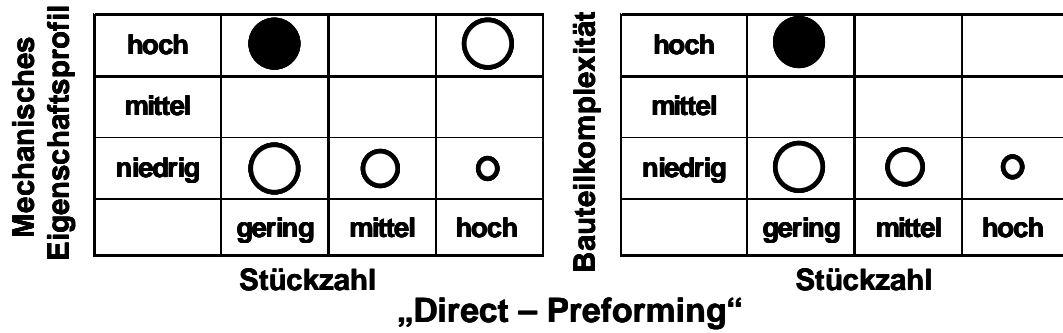


Bild 8-3: Portfolio-Analyse zur Beurteilung der Einsatzgrenzen verschiedener Preformtechniken

Die konfektionstechnische Umsetzung einer durchgängigen Preformingkette erlaubt, angepasst an die jeweiligen Anforderungen, die Wertschöpfungstiefe der gefertigten Preform individuell herzustellen. Die erste Stufe der Preformfertigung im „TR“ - Verfahren, d. h. die Generierung der individuellen Einzelteile, erfolgt dabei ohne den Einsatz von Fertigungshilfsmitteln. Somit wird dieser Preformfertigungsprozess den Flexibilitätsanforderungen des RTM-Prozesses gerecht. Steigen Komplexität und Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften in gewissen Bauteilsektionen, können zusätzliche Preformmontageschritte auf Basis der TR durchgeführt werden.

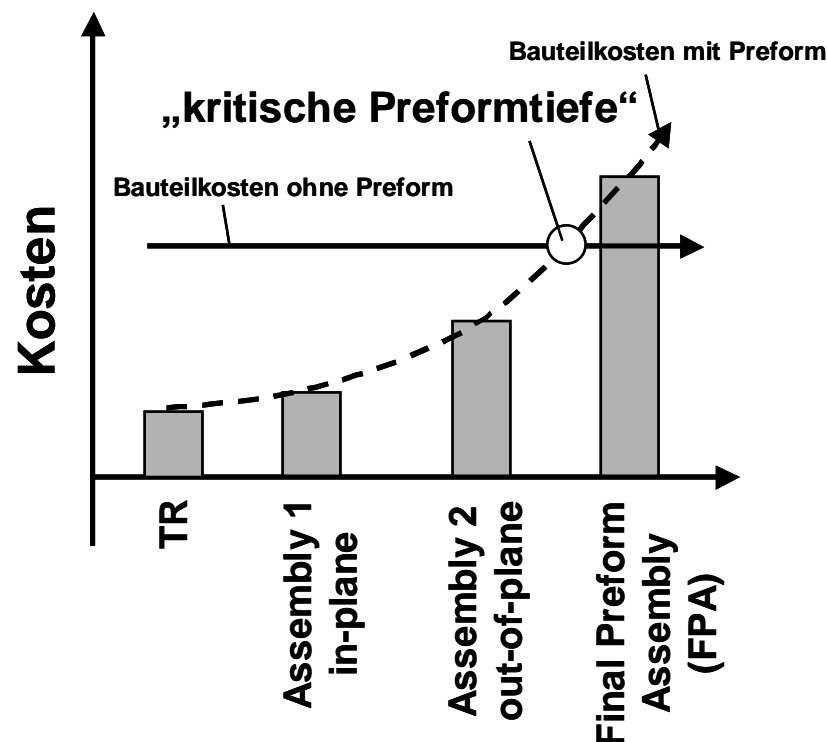


Bild 8-4: Darstellung der wechselseitigen Beziehungen zwischen Bauteilkostenersparnis und Preformingaufwand

Im konkreten Fall bietet also ein flexibles Preformingverfahren die Möglichkeit, auf den RTM-Prozess bzw. die Bauteilanforderungen abgestimmt, die Fertigungstiefe der Preformherstellung anzupassen. Preform-Herstellkosten wachsen mit steigender Komplexität und erhöhten Anforderungen. Mit wachsender Anzahl an notwendigen Konfektionsschritten (Bild 8-4) nimmt die Effizienz - d. h. das Kosten-Nutzen-Verhältnis - ab. Das größte Potenzial zur Kostenreduktion liegt demnach in den ersten Stufen des Preforming. Weitere Steigerungen können nur mit erheblich höherem Aufwand umgesetzt werden.

Bild 8-4 beschreibt qualitativ das Kosten-Nutzen-Verhältnis von LCM-Prozess und Preformingaufwand. Teilt man den Preformingprozess in verschiedene Stufen ein, ist es jetzt möglich, anhand einer Kostenvergleichsrechnung die „kritische Preformtiefe“ zu ermitteln. Diese hängt von den Fixkosten K_{fix} , den variablen Kosten K_{var} , der Zykluszeit t_{zyk} und der Stückzahl ab. Die Tatsache, in mehreren Technologiestufen planen zu können, eröffnet die Möglichkeit, eine - an die Kostenstruktur des Bauteils angepasste - Preformtiefe auszuwählen.

Die hier eingeführte „kritische Preformtiefe“ ist also ein Maß für die Bewertung der wirtschaftlichen Einsatzfähigkeit des nächsttechnischen Preformfertigungsprozesses. Durch die Einführung der TR-Technik und der Möglichkeit der beliebigen Ergänzung der Fertigungskette durch entsprechende Montageschritte bis hin zur bauteilgeometrieentsprechenden Preform ist es aufgrund der Kenntnis der „kritischen Preformtiefe“ möglich, eine Technologieentscheidung zu treffen. Dies kann abhängig von den bauteilspezifischen Anforderungen erfolgen. Mit Bezug auf die LCM-Technik und die relevanten Stückzahlbereiche wird die Relevanz dieser Größe umso deutlicher. Betreibt man das Preforming über den Punkt der „kritischen Preformtiefe“ hinaus, werden die möglichen Kostenvorteile, die durch das Preforming entstehen, wiederum aufgehoben.

Betrachtet man Bild 8-4 vor diesem Hintergrund, wird der Zusammenhang zwischen der Halbzeugbereitstellung, dem Injektionsprozess und dem fertigen Produkt inklusive der notwendigen Nachbearbeitungsschritte deutlich. Der erste formteilunabhängige Schritt des „TR“- Preformprozesses ist direkt an die Halbzeugherstellung angeschlossen. Eine weitere Steigerung der Effektivität des gesamten Vorformprozesses kann mittels der Überführung von Halbzeugherstellung und Generierung der einzelnen TR erreicht werden. Im Vergleich dazu ist die einfache Betrachtung der reinen Halbzeugherstellung im Sinne einer bauteilformgerechten Preform- bzw. Bauteilauslegung nicht ausreichend [215, 16]. Gelingt es, die Halbzeugherstellung als erste Preformstufe „Herstellung der TR“ einzusetzen, kann ein weiterer Schritt in Richtung Wirtschaftlichkeit der Harzinjektionsverfahren getan werden [216].

8.2 Preforming – Kosten

Anhand einer semi-strukturellen Spoilerstruktur aus dem Automobilbau und einem strukturellen Bauteil aus dem Nähmaschinenbau (Bild 8-5 und Bild 8-6) wird die Kostenstruktur verschiedener Preformtiefen erörtert [217]. Betriebswirtschaftliche Berechnungsgrundlagen sind in Anhang 5 zu finden.

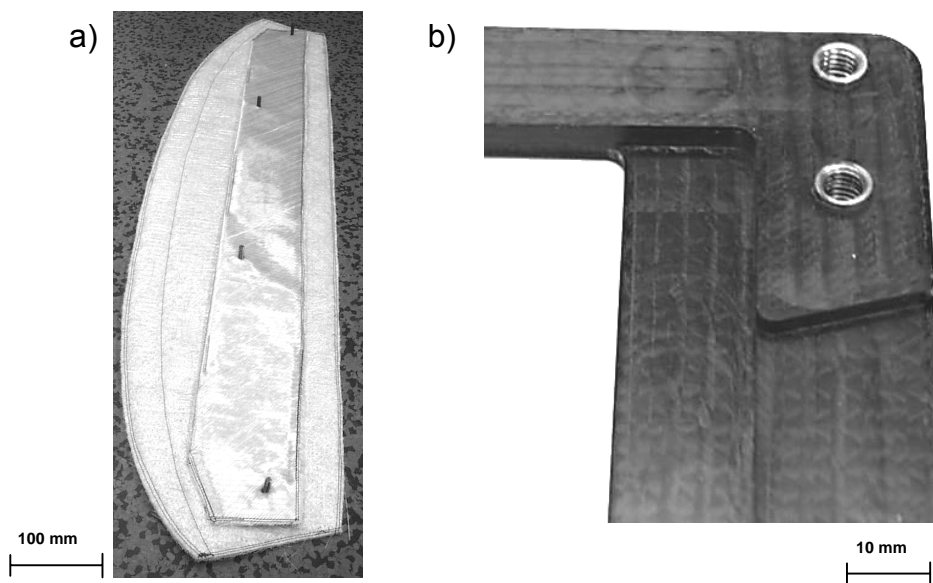


Bild 8-5: a) Spoilerlippenpreform für die Automobilindustrie, b) Nähmaschinen-Spannrahmen (Bauteil)

Die Auswahl der beiden Komponenten „Spoiler“ und „Spannrahmen“ erfolgte aufgrund unterschiedlicher Anwendungsfelder der Harzinjektionstechnik. Der in Bild 8-6 besprochene Spoiler ist dabei hinsichtlich der geforderten Eigenschaften und der zu erzielenden Stückzahlen ein klassisches RTM-Bauteil. Innerhalb der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde zusätzlich der Effekt der Erweiterung der Preformtiefe (siehe Tabelle 8-1) betrachtet. Die Möglichkeit der in-situ Einbringung von Krafteinleitungselementen in die textile Verstärkungsstruktur während des Preformprozesses führte dabei zu einer gesteigerten Ausnutzung LCM-spezifischer Verfahrensvorteile. In dieser Betrachtungsweise wurde lediglich ein Vergleich des maschinentechnischen Aufwandes durchgeführt.

Tabelle 8-1: Übersicht über die betrachteten Preformvarianten

Verfahren	Beschreibung
a	Kein vorgeschaltetes Preforming vor dem eigentlichen RTM- Prozess.
b	Zum Preforming werden Standardnähmaschinen benutzt. Keine Automatisierung.
c	Es findet ein halbautomatisiertes konfektionstechnisches Preforming mit in-plane und out-of-plane Montage statt.
d	Das Preforming ist automatisiert.

Eine ähnliche Situation ergibt sich für Strukturbauteile. Hierbei verschiebt sich die Anforderung an die einzusetzende Preformtechnik. Der zu betreibende Aufwand zur Sicherstellung der Qualität erhöht sich aufgrund der höheren Anforderungen an die textile Verstärkungsstruktur. Die Kostenvorteile ergeben sich in gleichem Maße wie bei semistrukturellen Bauteilen. Für beide Einsatzbereiche der Konfektionstechnik muss die Preformprozesskette näher betrachtet werden, um eine sinnvolle Preformtiefe zu ermitteln.

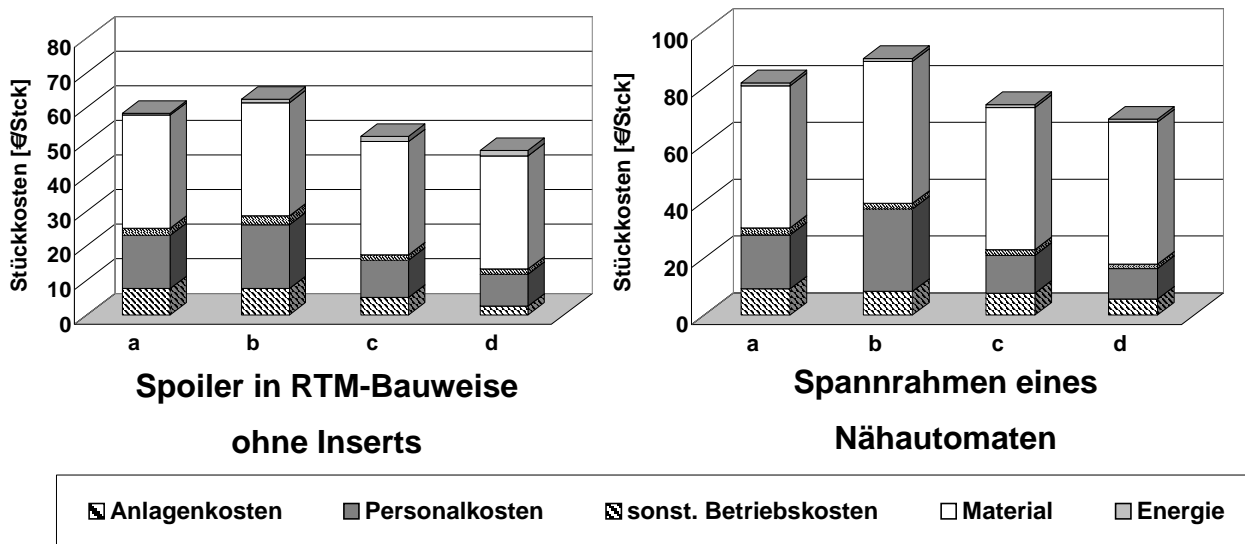


Bild 8-6: Vergleich der veränderten Kostenstruktur für ein Modelljahr „semi-struktureller Spoiler“ und „Spannrahmen“ in RTM-Bauweise bei unterschiedlicher Preformautomatisierung

Für beide unterschiedlichen Anwendungsfelder kann festgestellt werden, dass Preforming erst ab einer definierten Automatisierungsstufe wirtschaftliche Vorteile zeigt. Diese Automatisierungsstufe variiert für unterschiedliche Anwendungen. Durch weiter gesteigerte Automatisierung werden die Kostenvorteile jedoch aufgebraucht, weshalb die „kritische Preformtiefe“ eingeführt wird.

8.3 Kritische Preformtiefe

Anhand eines Beispiels „Lüfterrad“ (Bild 8-7) soll der Begriff der „kritischen Preformtiefe“ bzw. der „kritischen Stückzahl“ für ein bestimmtes Preformverfahren näher erläutert werden. Die Betrachtung einer solchen Struktur erlaubt durch ihren Komplexitätsgrad eine klare Aufteilung der verschiedenen Konfektionsstufen. Die Umsetzung der Blattsegmente sowie der Boden- und Deckelsegmente erforderte mehrere Stufen der Preformfertigung. Die Forderung nach Maßgenauigkeit, d. h. stark reduzierte Nachbearbeitungszeiten, stellt zusätzliche Anforderungen an den Preform- und den Injektionsprozess.

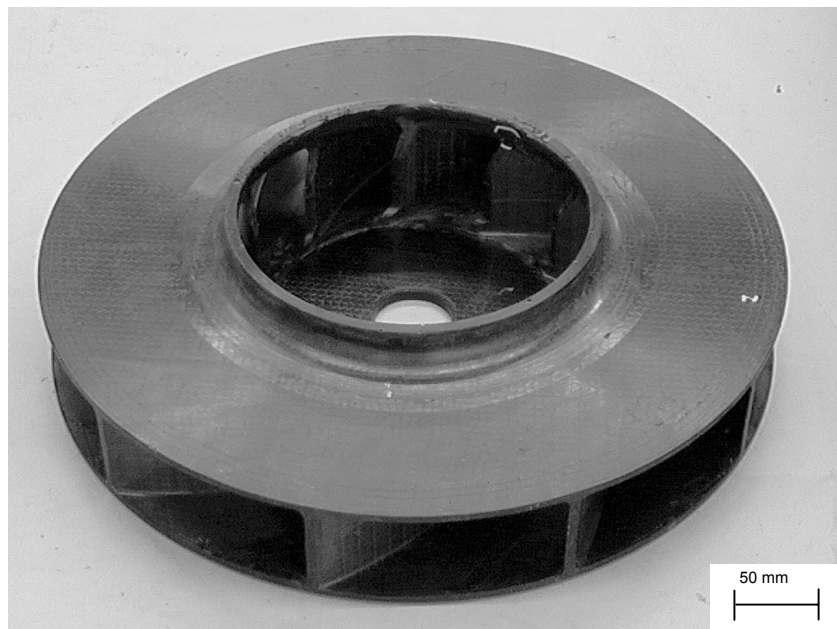


Bild 8-7: Lüfterrad hergestellt im Preform-RTM-Verfahren

Zur Ermittlung der „kritischen Stückzahl“ zur Auswahl eines Preformverfahrens wurden folgende Automatisierungsgrade gewählt:

- 0 – Kein Preforming.
- I – Es findet nur eine Vorbereitung der Einzelteile der zu erzeugenden mehrlagigen Preform statt.
- II – Nach der Stufe I erfolgt ein räumlicher Montageschritt (out-of-plane-assembly).
- III – Nach Abschluss der vorbereitenden Preformstufen (I-II) erfolgt zusätzlich das „Final-Preform-Assembly“ mittels eines Nähroboters.

Der Einsatz unterschiedlicher Preformstufen beeinflusst die Werkzeugbestückungszeit, birgt aber jeweils einen individuellen Preforming-Aufwand. Der Nutzen, der sich durch die Absenkung der Werkzeugbestückungszeit ergibt, wird somit durch die eingesetzte Preformstufe festgelegt.

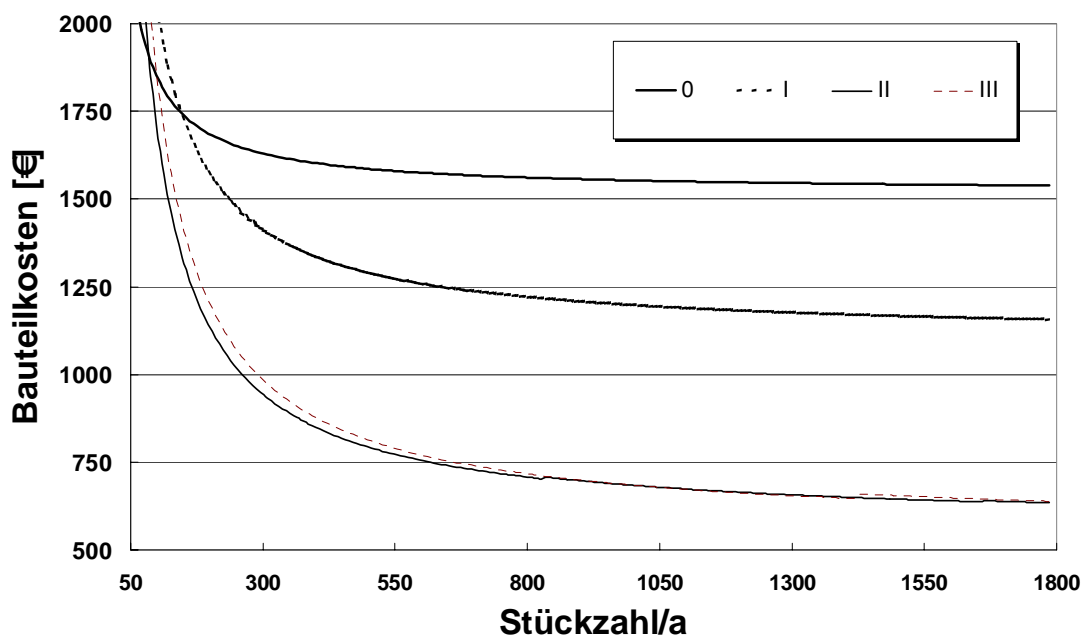


Bild 8-8: Fertigungsaufwand für verschiedene Preformautomatisierungsgrade

Die hier dargestellten Ergebnisse sind unabhängig von technologischen Eigenschaftsverbesserungen zu bewerten. Zusätzlich wird das Fertigungsergebnis als quasi „nachbearbeitungsfrei“ angenommen. Die den Ergebnissen zugrunde liegenden Rechnungen (innerhalb Kapitel 8.3) gehen von einer Abschreibung der Maschinen auf 10 Jahre aus. Jährliche Maschinenabschreibungsaufwendungen

werden auf die zu produzierende Stückzahl (pro Jahr) umgelegt. Fertigungsmittel bedingen eine Standzeit und werden entsprechend ersetzt. Im vorliegenden Diagramm (Bild 8-8) kann bei einer zu produzierenden Stückzahl pro Jahr die wirtschaftlich am sinnvollsten einzusetzende Preformtechnik ermittelt werden. Für das Beispiel ergibt sich, dass Preformvariante II ab einer Stückzahl von 75 Stck/a die wirtschaftlich sinnvollste „Preformtiefe“ darstellt.

Die Möglichkeit zur Auswahl des Automatisierungsgrades in der Preformfertigung gestattet eine flexible Anpassung an den jeweiligen Einsatzzweck und den dort gegebenen Kostenspielraum. Die weitere Auswertung des Diagramms in Bild 8-7 ermöglicht auch die Ermittlung von Daten zur Definition eines Kostenrahmens für die Preformherstellung.

9 Zusammenfassung

Durch die neu entwickelte Prozesskette zur Fertigung von Verstärkungsstrukturpreforms auf Basis der nähtechnischen Konfektion können sowohl die Qualität, die Reproduzierbarkeit als auch die Wirtschaftlichkeit der LCM-Verfahren und der auf diese Weise hergestellten Bauteile gesteigert werden.

Die Nähtechnik bietet das Potenzial, bei gleichzeitiger Steigerung der Funktionalität der Verstärkungsstruktur – z. B. durch Einarbeitung von zusätzlichen Verstärkungselementen oder Kraffteinleitungselementen –, die Eigenschaften der FKV-Bauteile gezielt zu beeinflussen. Die Unterscheidung der Anforderung an die in die Preform eingebrachten Nähte erfordert eine Anpassungsfähigkeit der Nähparameter. Basis für die Erweiterung der preformtechnischen Möglichkeiten und damit des Einsatzspektrums der LCM-Technik durch die Nutzbarmachung der nähtechnischen Preform-Montage ist die Einführung der „Tailored Reinforcements“. Das neu entwickelte Konzept einer Preformfertigungskette führte zur Erweiterung der Anwendungsfähigkeit hin zur positionsgenauen Montage integraler Bauteilpreforms.

Im Sinne der Festlegung der Verarbeitungs- und Bauteileigenschaften wurden die FKV-relevanten Nähmaschinenelemente ermittelt und bewertet. Die Beurteilung der möglichen Stichtypen, Transportarten und anderer Wirkpaarungen hinsichtlich FKV-technologischer Fragestellungen liefert die Grundlage zur Auswahl der Nähwerkzeuge in der Preformfertigungskette.

Als wesentliche, die Preform charakterisierenden Eigenschaften – im Sinne der weiteren Verarbeitung zum FKV - wurden die Faserverschiebung in der Ebene sowie das Kompaktierungsverhalten des Lagenaufbaus identifiziert. Diese Charakteristika werden durch den Nähprozess und die Interaktion von Nähgarn und Nähgut bestimmt. Beide wesentlichen Qualitätsmerkmale lassen sich je nach Anwendungsfall gezielt einstellen. Das Kompaktierungsverhalten von einzelnen Sub-Preforms dient als Grundlage für die rechnerische Abschätzung des Kompaktierungsverhaltens einer Gesamtpreform.

Die nähtechnische Preformfertigungskette - „Tailored Reinforcements“ - von der Herstellung der maßgeschneiderten Einzelteile bis zur Montage der 3D-Geometrie – bietet auf Basis dokumentierter Nähparameter die Möglichkeit zur durchgängigen Beschreibung des gesamten Preformprozesses. Dementsprechend wurde die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Nähdaten und Harzinjektion in ein neuartiges und durchgängiges Qualitäts-Management-System überführt.

Anhand verschiedener Bauteile wurde sowohl die Einsatzfähigkeit als auch die Wirtschaftlichkeit einer derartigen Preformprozesskette bewertet. Die Betrachtung unterschiedlich komplexer Bauteile, die jeweils in verschiedenen Stückzahlen hergestellt werden, verlangt die Einführung der kritischen Preformtiefe zur Findung eines optimalen Preformgrades.

10 Referenzen

- [1] Stauber, R.: Vorwort. In ‚Kunststoffe im Automobilbau‘, VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999, Seiten 1–2.
- [2] N.N.: BMW: Composites to be mass-produced soon. Composites International, No. 46, Juli-August 2001, S. 48-50
- [3] Lorenz T.: Kosteneffektive CFK Fertigungsverfahren der nächsten Generation. 7. Nationales SAMPE Symposium 2001, Erlangen, 22.-23. Februar 2001, S. III.2.1-III.2.10
- [4] Banhardt V.: Scrimp-Verfahren für Großbauteile im Schienenfahrzeugbau. Duroplaste im Schienenfahrzeugbau, Halle, 9.- 10. Mai 2000, S. K/1-K/14
- [5] Mallick, V.: Thermoplastic composite based processing technologies for high performance turbomachinery components. Composites Part A, 32 (2001), S. 1167-1173
- [6] Netting, J.: Brückenschlag für eine feste Verbindung. Spektrum der Wissenschaft. Spezial 2/2002, S. 46-47
- [7] Roesset, J. M.: Bis zum tiefsten Meeresgrund. Spektrum der Wissenschaft. Spezial 2/2002, S. 67-71
- [8] Neitzel, M.; Breuer, U. P.: Die Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1996
- [9] Carter J.; Lo Faro C.: Beyond mechanical performance: Product design for low cost manufacturing of composites for aerospace applications, in Stephan, A. (Hg.): Proceedings of the 1st Stade Composite Colloquium, Stade, 7.-8. September 2000
- [10] Hayse, S.: RTM as the low cost alternative, in Earth, M. A. (Hg.): Proceedings of the 21st International SAMPE Europe Conference of the Society for the advancement of Material and Process Engineering, Paris, France, 18.-20. April 2000, S. 35-46

-
- [11] Wallentowitz, H.; Adam, H.; Bröcking, J.: Potential of fiber reinforced plastic space frame structures. VDI-Tagung Entwicklung im Karosseriebau, Hamburg, 14-15. Mai 1996, S. 477-495
- [12] Beckwith, S.W.: RTM, VARTM and SCRIMP processing infusin technologies. SAMPE 44th ISSE / SAMPE '99', Long Beach, CA, 24.05.1999, Beckwith Technology Group, Murray, Utah, 1999
- [13] Chavka, N.G.; Dahl, J.-S.: P4: Glass Fiber Preforming Technology for Automotive Applications. Resin Transfer Molding SAMPE Monograph No. 3, SAMPE Publications, Covina, 1999
- [14] N.N.: The global composites market. Composites International, No. 38, April/May 2000, S. 19-23
- [15] Merz, P.: Glasfaserverstärkte Kunststoffe. KU Kunststoffe, Vol. 91 (1999), No. 10, S. 354
- [16] Büsgen, W.-A.: Neue Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen Textilien für den Einsatz in Faserverbundwerkstoffen. Dissertation RWTH Aachen 1993
- [17] Feltin, D.: Neue textile Preformtechniken zur kostengünstigen FV-Bauteilherstellung. 2. Internationale AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und Formmassen, Baden-Baden, 12.-13. Okt. 1999, S. B 10
- [18] Bogdanovich, A.; Singletary, J.: 3-D woven preforms and composites: Experimental characterization and predictive analysis. Proceedings of the 5th International Conference on Textile Composites, Leuven, 18.-20. September 2000, S. 4
- [19] Kobayashi, H.; Nakama, N.: Fabrication and mechanical Properties of Braided Composite Truss Joints. Proc. of the 36th International Sampe Symposium, 9.-12. März 1992. S. 1089-1103

-
- [20] Kendal, M.: Keynote on Textile Composites for Automotive Applications. ACP 2000. Automotive Composites and Plastics. Essex, 5.-6. Dezember 2000
- [21] Dürand, D.: Garantierte Qualität. Wirtschafts-Woche, Nr. 32 (2000), S. 91
- [22] Bibo, G. A.; Hogg, P.J.; Backhouse, R.; Mills, A.: Carbon-fiber non-crimp fabric laminates for cost-effective damage-tolerant structures. Composites Science and Technology (1998), No. 58, S. 129-143
- [23] Minguet, P.J.; Fedro, M.J.; Gunther, C.K.: Test methods for Textile Composites. NASA Contractor Report, No. 4609 (1994)
- [24] Warrior, N.A.; Rudd, C.D.; Gardner, S.P.: Experimental studies of embroidery for the local reinforcement of composites structures 1. Stress concentrations. Composites Science and Technology, Vol. 59 (1999), S. 2125-2137
- [25] Matheij, P.; Gliesche, K.; Feltin, D.: Tailored fiber placement - Mechanical properties and applications. Reinforced Plastics and Composites, Vol. 17 (1998), No. 9, S. 774-787
- [26] Hörsting, K.; Huster, M.: Maßgeschneiderte Verstärkungstextilien für Verbundwerkstoffe, in DWI Reports (Hg.): Aachener Textiltagung. Aachen, 25.- 26. November 1998, S. 190-201
- [27] Bischoff, Th.; Wulfhorst, B.: Rundgewirke mit multiaxialen Stehfäden für neue Anwendungsgebiete. Technische Textilien, Vol. 42 (1999), April, S. 151-153
- [28] Laourine, E.; Schneider, M.; Wulfhorst, B.: Production and analysis of 3D braided textiles preforms for composite. Proceedings of the 5th International Conference on Textile Composites, Leuven, 18.-20. September 2000, S. 4

-
- [29] Wittig, J.: Roboted 3-dimensional stitching technology, in Stephan, A. (Hg.): Proceedings of the 1st Stade Composite Colloquium, Stade, 7.-8. September 2000
- [30] Keilmann, R.; Jäger, M.: Präsentation Blindstichttechnologie, in Stephan, A. (Hg.): Proceedings of the 1st Stade Composite Colloquium, Stade, 7.-8. September 2000
- [31] Palmer, R.J.; Dow, M.B.; Smith, D.L.: Development of Stitching Reinforcement for Transport Wing Panels, 1st NASA Advanced Composite Technology Conference, Seattle, WA, 29.10.-1.11.1990, NASA CP-3104, Part 2, S. 621-646
- [32] Mouritz, A.P.; Leong K.H.; Herszberg, I.: A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites. *Composites Part A*, 28A (1997), S. 979-991
- [33] Mouritz, A.P.; Cox, B.N.: A mechanistic approach to the properties of stitched laminates. *Composites Part A*, Vol. 31 (2000), 1, S. 1-27
- [34] Mignery, L.A.; Tan, T.M.; Sun, C.T.: The Use of Stitching to Suppress Delamination in Laminated Composites, in Johnson, W.S.: *Delamination and Debonding*, AST STP 876. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1985, S. 371-385
- [35] Cahuzac, G.; His, S.: AEROTISS 4.5D - A new technology for thick multiply composite panels, in Earth, M. A. (Hg.): Proceedings of the 21st International SAMPE Europe Conference of the Society for the advancement of Material and Process Engineering, Paris, France, 18.-20. April 2000, S. 233-241
- [36] Chung, W.C.; Jang, B.Z.; Chang, T.C.; Hwang, L.R.; Wilcox, R.C.: Fracture Behaviour in Stitched Multidirectional Composites. *Materials Science and Engineering* (1989), A 112, S. 157-173

-
- [37] Moll, K.-U.: Nähverfahren zur Herstellung von belastungsgerechten Fügezonen in Faserverbundwerkstoffen. Dissertation RWTH Aachen 1999
- [38] Mouritz, A.P.; Jain, L.K.: Further validation of the Jain and Mai models for interlaminar fracture of stitched composites. *Composites Science and Technology*, Vol. 59 (1999), S. 1653-1662
- [39] Parnas, R.S.: *Liquid Composite Molding*. München: Hanser Gardner, 2000
- [40] Williams, C.; Summerscales, J.; Grove, S.: Resin infusion under flexible tooling (RIFT): A review. *Composites Part A*, Vol. 27 A (1996), S. 517-524
- [41] Sigle, C.: Neue kostengünstige Fertigungsverfahren für CFK-Strukturen. 4. Nationales SAMPE Symposium, Braunschweig, 12.-13. Mrz. 1998, S. 1-15
- [42] Sigle, C.: Ein Beitrag zur kostenoptimierten Herstellung von großflächigen Hochleistungsverbundbauteilen. Dissertation TU Braunschweig 1998
- [43] Dexter H. B.: Development of textile reinforced composites for aircraft structures. Proceeding of the 4th International Symposium for Textile Composites, Kyoto, 12.-14. October 1998, S. 0-32-1 - 0-32-8
- [44] Rudd, C. D.: *Liquid Moulding technologies*. Suffolk: Woodhead Publishing, 1997
- [45] Parnas, R. S.: *Liquid Composite Moulding*. München: Hanser Gardner, 2000
- [46] Wadsworth, M.: Tooling fundamentals for Resin Transfer Moulding, in Kruckenberg, T.; Paton, R.: *Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures*, London: Chapman & Hall, 1998, S. 282-336
- [47] Lee, J.: Liquid Composite Moulding, in Gutowski, T.G.: *Advanced Composites Manufacturing*, New York: John Wiley Sons, Inc., 1997, S. 393-456

-
- [48] Cox, L.B.: Structural Applications Through Preforming. Proceedings of the 3rd Annual Conference ASM/ESD on Advanced Composites. Detroit, Michigan, 15.-17. September 1987, S. 121-122
- [49] Sonneborn, R.H.; Dietz, A.G.H.; Heyster, A.S.: Fiberglass Reinforced Plastics, First Edition 1954, Reinhold Publishing Corporation, New York, S. 49-54
- [50] Räckers, B.: Introduction to Resin Transfer Moulding, in Kruckenberg, T.; Paton, R.: Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures, London: Chapman & Hall, 1998, S. 1-24
- [51] Ko, F.K.: Three-dimensional fabrics for composites, in Chou, T.-W.; Ko, F.-K.. Textile Structural Composites, Amsterdam: Elsevier, 1989, S. 129-171
- [52] Büsgen, W.-A.: Neue Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen Textilien für den Einsatz in Faserverbundwerkstoffen. Dissertation RWTH Aachen 1993
- [53] Rudd, C.D.; Turner, M.R.; Long, A.C.; Middleton, V.: Tow placement studies for liquid composite moulding. Composites Part A, Vol. 30 (1999), 9, S. 1105-1121
- [54] Turner, M R; Rudd, C D; Long, A C; Middleton, V; McGeehin, P: Net-Shape Preform Manufacture using Automated Fibre Placement. Advanced Composite Letters, Vol. 4 (1995), 4, S. 121-124
- [55] Feltin, D.: Entwicklung von textilen Halbzeugen für Faserverbunde unter Verwendung von Stickautomaten. Dissertation TU Dresden 1997
- [56] Rothe, H.: Formbares, multiaxiales Verstärkungsgebilde; EP 0 567 845 A1, 14.04.1993
- [57] Matheij, P.; Gliesche, K.; Feltin, D.: Tailored fiber placement - Mechanical properties and applications. Reinforced Plastics and Composites, Vol. 17 (1998), No. 9, S. 774-787

-
- [58] Warrior, N.A.; Rudd, C.D.; Gardner, S.P.: Experimental studies of embroidery for the local reinforcement of composites structures 1. Stress concentrations. *Composites Science and Technology*, Vol. 59 (1999), S. 2125-2137
- [59] Crothers, P.J.; Drechsler, K.; Feltin, D.; Herszberg, I.; Kruckenberg, T.: Tailored fiber placement to minimise stress concentrations. *Composites Part A*, Vol. 28A (1997), S. 619-625
- [60] Gembinski, J.C.: The role of preforms in higher volume composites. *Structural Composites - Design and Processing Technologies* (1990), 10, S. 377-391
- [61] Weyrauch, D.: Herstellung dreidimensional vorgeformter Faserstrukturen auf der Basis von Textilglasmatten für den Einsatz in Harzinjektionsverfahren. IKV, RHTW Aachen: Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1993
- [62] Rudd, C.D.; Middleton, V.; Owen, M.J.; Long, A.C.; McGeehin, P.: Design, processing and performance of structural preforms. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 10 (1995), No. 1, S. 89-102
- [63] Steenkamer, D.A.: The Influence of Preform Design and Manufacturing Issues on the Processing and Performance of Resin Transfer Molded Composites. Dissertation University of Delaware 1994
- [64] Rudd, C.-D.; Long, A.-C.; Kendall, K.-N.; Mangin, C.G.E.: *Liquid Moulding Technologies – Resin Transfer Moulding, Structural Reaction Injection and Related Processing Techniques*. Cambridge: Woodhead Publishing, 1997, S. 151-202
- [65] Chavka, N.G.; Dahl, J.S.: P4: Glass Fiber Preforming Technology for Automotive Applications, in Benjamin, W.P.: *Resin Transfer Moulding*. SAMPE Monograph No. 3, 1999, S. 165-174

- [66] Sommer, M.: Recent SMC/BMC Automotive Applications, in IOM Communications (Hg.): ACP 2000. Automotive Composites and Plastics, Ford Motor Company Ltd, Essex, 5.-6. Dezember 2000, S. 129-136
- [67] Clarke, S.: Engineered Textile Preforms for RTM: A Comparison of Braiding, Knitting, and Weaving Technologies, in Benjamin, W.P.: Resin Transfer Moulding. SAMPE Monograph No. 3, 1997, S. 15-23
- [68] Mohamed, M.-H.; Zhang, Z.: US Pat. 5,085,252., 4.2.1992
- [69] <http://www.3tex.com/index/> Website vom 28.12.2001
- [70] Schneider, M.; Pickett, A.K.; Langer, H.: Exemplary CAE design tools for textile reinforced composites by means of FE-analysis, in Stephan, A. (Hg.): Proceedings of the 1st State Composite Colloquium, Stade, 7.-8. September 2000
- [71] Hill, B.J.; McIlhagger, R.; McLaughlin, P.: Weaving multi-layer fabrics for reinforcement of engineering component, in Buckley, J.D. (Hg.): The Sixth Conference on Advanced Engineering Fibers and Textile Structures for Composites, Philadelphia, 27.-29. Oktober 1992
- [72] De Haan, J.; Fischbach, T.; Reber, R.; Mayer, J.; Wintermantel, E.: Comparison of plain weft knitted carbon fiber reinforced thermoplastics and thermosets. The 4th International Symposium for Textile Composites, Kyoto Institute of Technology, 12.-14. Oktober 1998
- [73] Merz, P.: RTM-Teile mit echter Class-A-Oberfläche - die Alternative für PKW-Kleinserien. 2. Internationale AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und Formmassen, Baden-Baden, 12.-13. Oktober 1999, S. A 4
- [74] Breuer, U.P.: Reinforcement of CFRP structures by tailored fibre placement. Polymers & Polymer Composites, Vol. 6 (1998), No. 8, S. 499-504

- [75] Wilson, S.; Wenger, W.; Simpson, D.; Addis, S.: "SPARC" 5 Axis, 3D Woven, Low Crimp Preforms, in Benjamin, W.P.: Resin Transfer Moulding, SAMPE Monograph No. 3, 1998, S. 101-114
- [76] Schneider, M.; Wulfhorst, B.: Micromodelling of yarn architecture in 3D-braids and transfer to macromodelling of composites. The 4th International Symposium for Textile Composites, Kyoto Institute of Technology, 12.-14. Oktober 1998
- [77] Uozumi T.: Recent Development of Braider. The 4th International Symposium for Textile Composites, Kyoto Institute of Technology, 12.-14. October 1998, S. p-9-1 - p-9-4
- [78] Head, A.: New Braid Design Spreadsheet Calculates Fiber Architecture and Areal Weight, Simplifying the Design of Braid Reinforced Composites, in Benjamin, W.P.: Resin Transfer Moulding, SAMPE Monograph No. 3, 1998, S. 51-55
- [79] N.N.: Braiding technology tested on aerospace structures. Reinforced Plastics (1998), Oktober, S. 52-54
- [80] Leong, K.H.; Ramakrishna, S.; Huang, Z.M.; Bibo, G.A.: The potential of knitting for engineering composites - a review. Composites Part A, Vol. 31 (2000), 3, S. 197-220
- [81] Gommers, B.; Verpoest, I.; Van Houtte, P.: Analysis of knitted fabric reinforced composites: Part I. Fibre orientation distribution. Composites Part A, Vol. 29A (1998), S. 1579-1588
- [82] Gommers, B.; Verpoest, I.; Van Houtte, P.: Analysis of knitted fabric reinforced composites: Part II. Stiffness and strength. Composites Part A, Vol. 29A (1998), S. 1589-1601
- [83] Buck, A.: Technische Gestricke im Maschinenbau und Automobilbau. Technische Textilien, Vol. 41 (1998), Juni, S. 103

-
- [84] Godau, U.; Diestel, P.; Offermann, P.: Biaxial-verstärkte Mehrlagengestricke für die Kunststoffarmierung. Technische Textilien, Vol. 41 (1998), November, S. 202-204
- [85] Rohatgi, V.; Lee, J.; Melton, A.: Overview of fiber preforming, in Kruckenberg, T.; Paton, R.: Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures, London: Chapman & Hall, 1998, S. 149-173
- [86] Brandt, J.; Drechsler, K.; Strachauer, F.: Kostengünstige und großserienfähige Herstellung von Verbundwerkstoffen mit textilen Faserstrukturen. Kunststoffe im Automobilbau. Verein deutscher Ingenieure. Mannheim, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998, S. 227-247
- [87] N.N.: Prefabricated preforms to the rescue. Composites Technology (1999), Jan/Feb, S. 20-28
- [88] N.N.: Preforming process adds automation for volume-moulding of composite parts. Composites Technology (1999), 7, S. 27-30
- [89] Mignery, L.A.; Tan, T.M.; Sun, C.T.: The Use of Stitching to Suppress Delamination in Laminated Composites, in Johnson, W.S.: Delamination and Debonding, AST STP 876, Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1985, S. 371-385
- [90] Dow, M.B.; Smith, D.L.: Damage-tolerant Composite Materials produced by stitching Carbon Fabrics. 21st International SAMPE Technical Conference, 25.-28. September 1989, S. 595-605
- [91] Pelstring, R.M.; Madan, R.C.: Stitching to Improve Damage Tolerance of Composites. 34th International SAMPE Symposium, 8.-11. Mai 1989, S. 1519-1528
- [92] Whiteside, J.B.; Delasi, R.J.; Schulte, R.L.: Measurement of Preferential Moisture Ingress in Composite Wing/Spar Joints. Composites Science and Technology, Vol. 24 (1985), S. 123-145

- [93] Madan, R.C.: Composite Transport Wing technology Development, NASA CR 178409, Feb. 1988
- [94] Kullerd, S.M.; Dow, M.B.: Development of Stitched/RTM Composite Primary Structures. 9th Conference on fibrous Comp. Struct. Design, Vol.2, 27.-29. Oktober 1992, S. 689-712
- [95] Palmer, R.J.; Branko, S.: Reinforcing member for composite workpieces and associated methods. US 6,051,089., 18.4.2000
- [96] N.N.: Weiterentwickelt: Textilmaschinen für technische Textilien. Maschen-Industrie (12) 2001, S. 20-22
- [97] Rödel, H.: Analyse des Standes der Konfektionstechnik in Praxis und Forschung sowie Beiträge zur Prozessmodellierung. Aachen: Shaker Verlag, 1996
- [98] Methner-Opel, B.: Roboterarm in Leichtbauweise entwickelt. BW Technics 2/2001, S. 20
- [99] N.N.: Carbon-arm design gives robot greater leverage. High-Performance Composites, September/October 2001, S. 52-54
- [100] Ferret, B.; Anduze, M.; Nardai, C.: Metal inserts in structural composite materials manufactured by RTM. Composites Part A, Vol. 29 A (1998), S. 693-700
- [101] Weimer, C.; Mitschang, P.: Applied sewing technologies for the manufacture of integrated Net-Shape RTM-Preforms, in IOM Communications (Hg.): ACP 2000, Automotive Composites and Plastics, Ford Motor Company Ltd, Essex, 5.-6. Dezember 2000, S. 115-12
- [102] Mitschang, P.; Weimer, C.: Komplexe multi-textile Preforms (Potenziale der Nähtechnik). Kunststoffe 2000, (4), S. 114-116

-
- [103] Brandt, J.; Drechsler, K.; Filsinger, J.: Development Trends in Textile Reinforcements for Composites. Proceeding of the 5th Japan International SAMPE-Symposium, 28.-31.Oktober 1997, Tokyo, S. 617-622
- [104] Hammami A.; Gauvin R.; Trochu F.: Modelling the edge effect in liquid composites moulding. Composites Part A, Vol. 29A (1998), 5/6, S. 603-609
- [105] Von Manitius, S.: Flow in a thick wedge geometry with discontinuous boundary conditions, in Stephan, A. (Hg.): Proceedings of the 1st Stade Composite Colloquium, Stade, 7.-8. September 2000
- [106] Bauer J.: Cost improvement by changing the technology, in Stephan, A. (Hg.): Proceedings of the 1st Stade Composite Colloquium, Stade, 7.-8. September 2000, S. 305-318
- [107] Berndt, E.; Geuer, M.; Wulfhorst, B.: Dreidimensionale Textilstrukturen zur Herstellung von technischen Textilien – Stand 2000. Technische Textilien 44 (2001), S. 270-283
- [108] Buesgen, A.: Gewebte Formen - Stand und Ausblick neuer Webtechnologie, in DWI Reports (Hg.): Aachener Textiltagung, 25.- 26. November 1998, S. 74-85
- [109] Hörsting, K.: Rationalisierung der Fertigung langfaserverstärkter Verbundwerkstoffe durch den Einsatz multiaxialer Gelege. Dissertation RWTH Aachen 1994
- [110] <http://www.saint-gobain.com/en/html/index.asp> (Stand 31.01.2002)
- [111] Reuter, W.: Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunde mit Class-A-Oberflächenqualität für den Einsatz in der Fahrzeugaußenhaut. Institut für Verbundwerkstoffe (IVW-Schriftenreihe Band 19), Dissertation Universität Kaiserslautern 2001

-
- [112] Forné, F.: Synthetische Fasern: Herstellung, Maschinen und Apparate, Eigenschaften; Handbuch für die Anlagenplanung. München, Wien: Hanser, 1995
- [113] Bobeth, W. (Hrsg.): Textile Faserstoffe: Beschaffenheit und Eigenschaften. Berlin: Springer, 1993
- [114] Morales, A.: Structural Stitching of Textile Preforms. 22nd International SAMPE Technical Conference, (11/1990), S. 1217-1230
- [115] Dransfield, K.A.; Jain, L.K.; Mai, Y.-W.: On the effects of stitching in CFRPs-I. mode I delamination toughness. Composites Science and Technology (1998), 58, S. 815-827
- [116] Jain, L.K.; Dransfield, K.A.; Mai, Y.-W.: On the effects of stitching in CFRPs-II. Mode II delamination toughness. Composites Science and Technology (1998), 58, S. 829-837
- [117] Cox, B.N.: A constitutive model for through-thickness reinforcement bridging a delamination crack. Advanced Composites Letters, Vol. 8 (1999), No. 5, S. 249-256
- [118] Roth, Y., Himmel, N.: Berechnungsmodell zur Abschätzung des Steifigkeitsverhaltens vernähter Hochleistungsfaserverbund-Strukturen. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2001. DGLR-JT2001, S. 111
- [119] Weimer, C.; Mitschang, P.; Neitzel, M.: Optimierte Nähmaschinenteknik zur Konfektionierung von textilen Verstärkungsstrukturen. 10th Int. Symposium for Technical Textiles, Nonwovens and Textile Reinforced Materials, TECHTEXTIL, Frankfurt, 12.-15. April 1999
- [120] Weimer, C.; Mitschang, P.: Aspects of the stitch formation process on the quality of sewn multi-textile-preforms. Composites Part A 32 (2001), S. 1477-1484
- [121] Mitschang, P.: Faser-Kunststoff-Verbund-Bauteile mit Inserts; OS DE 198 34 772 A1, 1. August 1998

-
- [122] Weimer, C.; Mitschang, P.: RTM-Process and Part-Function adapted stitched preforms with integrated load bearing elements. Proceedings 11. Techtexil – Symposium, Frankfurt, 23.-26. April 2001, Nr. 228
- [123] Weimer, C.; Kissinger, C.; Mitschang, P.: Near-Net-Shape-Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen. Ingenieur-Werkstoffe. Mannheim, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2000, Heft 4
- [124] Banhardt V.: FVK - Anwendungen in der Bahntechnik. IVW-Kolloquium (2000)
- [125] Produktinformation Holometrix Micromet: SMARTweave Resin Flow Front Analysis System. Holometrix Micromet, 25 Wiggins Ave., Bedford, MA 01730, USA
- [126] N.N.: Dachmodul für das Lkw-Fahrerhaus TG-A XXL im Rahmen der Verleihung des AVK-TV-Innovationspreises, AVK-TV-Tagung Kongresshaus Baden-Baden, 12.-13. September 2000
- [127] Planck, H.: Neue Herausforderungen durch intelligente Textilien. HIGH-TEX Stuttgart – Innovationsforum „Intelligente Bekleidungstextilien“, Stuttgart, S. 11-12, 2001
- [128] DIN 5307: Nähmaschinen – Einteilung und Begriffe
- [129] Magloth, A.H.: Körpernahe 3D-Konstruktion direkt am Bildschirm. Maschen-Industrie (1999), No. 3, S. 32-33
- [130] Nestler, R.; Arnold, J.; Krzywinski, G.; Rödel, H.: Untersuchung spezieller nähtechnischer Probleme. Bekleidung + Wäsche (B+W / B+M): 13/1992
- [131] Egbers, G.: Untersuchung über das Transportverhalten von Maschenstoffen an der Nähmaschine. Maschenindustrie 46 (1996), 7/1996
- [132] Egbers, G.; Bühler, G.; Hennrich, L.: On-line-Überwachung der Nahtbildung. Wirkerei & Strickerei Technik: 43 (1993), 6 / 8 + 9

-
- [133] Kochan, A.: Moll: Sewing to Perfection. Assembly Automation, Vol. 16, No. 1, 1996
- [134] Gebbert, C.; Gebbert, V.: Automationsbarrieren der Bekleidungsmontage: Nähautomation zwischen Wunsch und Wirklichkeit. Bekleidung und Wäsche (1990), No. 4, S. 12-21
- [135] Hanisch, G.; Krockenberger, O.: Flexible Automation: Textile Werkstücke entsprechend handhaben. Bekleidung/ Wear (1994), No. 12, S. 24-28
- [136] Krowatschek, F.; Nestler, R.: Kommen die Nähroboter doch? Grenzen der Automation. Jahrbuch für die Bekleidungsindustrie, 1995, S. 197-218
- [137] N.N.: Roboter-Automation in der Bekleidungsindustrie: Traum oder Realität? Bekleidung/Wear (1993), No. 19, S. 6-8
- [138] Reinheimer, P.: Nähautomation - Grenzen und Chancen, in Technische Universität Dresden (Hg.): 1. Dresdner Textiltagung, Dresden, 25.-26.Juni 1992, S. 512-559
- [139] N.N.: Möglichkeiten und Grenzen der Automatisierung. Bekleidung + Wäsche/Bekleidung + Maschenware (1992), No. 9, S. 35-36
- [140] Wauer, G.: Nähtechnologie für technische Textilien. Maschen-Industrie: 47 (1997), S. 9
- [141] Nestler, R.; Arnold, J.: Beitrag zur Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Nadeltemperatur und Nadeldurchstechkraft während des Stichbildungsprozesses. Textiltechnik Vol. 30 (1980), No. 3, S. 178-183
- [142] Nestler, R.; Arnold, J.: Wärmetechnische Betrachtungen zur Nähmaschinennadel beim Nähprozeß Teil 1-6: Theoretische Betrachtungen zur Nadelerwärmung. Textiltechnik Vol. 36 (1986), No. 1-6, S. 36-41, S. 158-160, S. 211-215, S. 271-322, S. 320-322

-
- [143] Weimer, C.; Preller, T.; Mitschang, P.; Drechsler, K.: Approach to net-shape preforming using textile technologies. Part I: Edges. Composites Part A, Vol. 31 (2000), S. 1261-1268
- [144] Rödel, H.; Herzberg, C.; Födisch, J.; Märker, M.: Nähanlage zum Nähen von Verstärkungstextilien für Hochleistungsrotoren und Einsatzerfahrungen. Chemnitzer Textil-Maschinentagung, Chemnitz, Oktober 1999, S. 122-129
- [145] Kullerd, S.M.; Dow, M.B.: Development of Stitched/RTM Composite Primary Structures. 9th Conference on fibrous Comp. Struct. Design, Vol. 2, 27.-29.Oktober1992, S. 689-712
- [146] Bersuch, L.; Benson, R.; Owens, S.: Affordable composite structure for next generation fighters. 43rd International SAMPE Symposium, Anaheim, California, 31.05.-04.06.1998
- [147] Renters, W.: Der Nähmaschinenfachmann, Band 1, 8. Aufl., Bielefelder Verlagsanstalt, 1957
- [148] Heckner, R.: Die Naht – Nähtechnische Information von Gütermann Nr. 86. Gütermann AG: Gutach-Breisgau 1998
- [149] Keilmann, R.: Blindstich-Nähanordnung, DE 195 38 652 A1; 17.10.1995
- [150] Drechsler, K.: Advanced textile structural composites-needs and current developments. The 5th International Conference on Textile Composites, 18.-20. September 2000, Leuven, S. 4
- [151] Jäger, R.: KSL - Nähanlagen für alle Bereiche der nähenden Industrie. Denkendorfer Kolloquium; Konfektion technischer Textilien, Denkendorf, 8.-9. November 2000, S. 8
- [152] Baxter, S.: Blind Stitching Apparatus and Composite Material Manufacturing Methods, US Patent 5,829,373, 3.11.1998

-
- [153] Darrieux, J.L.: Method and Device for Producing Reinforcement Element Formed of Resistant Fibers, US Patent 5,095,833, 17.3.1992
- [154] Rattay, F.: Nähmaschine, OS DE 197 51 011 A1, 18.11.1997
- [155] Wittig, J.: Robotic Three-Dimensional Stitching Technology, Proc., Int. SAMPE Conference 2001: A Material and Processes Odyssey, Long Beach, California, USA, 6.-10. Mai 2001
- [156] Hufenbach, W.; Rödel, H.; Kroll, L.; Langkamp, A.; Herzberg, C.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum mechanischen Verhalten nähtechnisch eingebrachter z-Verstärkungen in Faser-Kunststoff-Verbunden. Werkstoffwoche 1998, München, Okt. 1998, S. 6
- [157] Drechsler, K.: Beitrag zur Gestaltung und Berechnung von Faserverbundwerkstoffen mit dreidimensionaler Textilverstärkung. Fakultät für Raum- und Luftfahrttechnik, Stuttgart: 1992
- [158] Friedrich, K.: Einführung in die Verbundwerkstoffe. Vorlesungsskript, Universität Kaiserslautern 1994
- [159] <http://www.altin-naehtechnik.de/D/Html/rn820.html> , 31.01.2002
- [160] Moll, K.-U.; Pickel, J.; Wulfhorst, B.: Nähen mit einseitigem Nähnutzangriff. Technische Textilien (1998), November, S. 216-217
- [161] Klopp, K.; Laourine, E.; Wulfhorst, B.: Innovative Stitching Technologies as Joining Methods for Production of Composite Materials. 11. TECHTEXTIL-Symposium, Frankfurt, 23.-26. April 2001, Block 502
- [162] Ketterer, S.: Method for Blind Stitch Sewing. US Patent 3,986.469, 19.10.1976
- [163] Caneva, C.; Olivieri, S.; Santulli, C.; Bonifazi, G.: Impact damage evaluation on advanced stitched composites by means of acoustic emission and image analysis. Composite Structures (1993), 25, S. 121-128

-
- [164] Kang, T.J.; Lee, S.H.: Effect of Stitching on the Mechanical and Impact Properties of Woven Laminate Composite. *Journal of Composite Materials*, No. 16 (1994), Vol. 28, S. 1574-1587
- [165] Liu, D.: Delamination Resistance in Stitched and Unstitched Composite Plates Subjected to Impact Loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* (1/1990), Vol. 9, S. 59-69
- [166] Planck H.; Milwich M.: Innovative Textiltechniken für Faserverbundwerkstoffe. 6. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e.V., Stuttgart, 16.-17. März 2000, S. 45
- [167] Sickinger, C.; Hermann, A.: Structural Stitching as a Method to Design High-Performance Composites in the Future, *Proceedings: 11. Int. TECHTEXTIL-Symposium, Frankfurt, 23.-26. April 2001, Block 501*
- [168] Cahuzac, G.; His, S.: AEROTISS 4.5D - A new technology for thick multiply composite panels, in Earth, M.A. (Hg.): *Proceedings of the 21st International SAMPE Europe Conference of the Society for the advancement of Material and Process Engineering, Paris, 18.-20. April 2000, S. 233-241*
- [169] Cahuzac, G.: Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung einer Verstärkungsplatte für einen Teil Verbundmaterial. EP 0678610 B1, 3.4.1995
- [170] Hägle, F.: „Net-Shape“ für Faserverbundwerkstoffe durch zukunftsweisende Prozessautomation in der Nähtechnik. *Proceedings: 8. Nationales Symposium SAMPE Deutschland. Institut für Verbundwerkstoffe Kaiserslautern, 7.-8. März 2002*
- [171] Keilmann, R.: Nähvorrichtung. EP 0699794A1., 4.9.1995
- [172] DIN 61400: Nähstichtypen
- [173] Leiner, M.: Untersuchung zum Zusammenwirken von Nähmaschine und Faden, Mannheim, Düsseldorf: VDI-Verlag 1993

-
- [174] Mouritz, A.P.; Jain, L.K.: Interlaminar Fracture Properties of Stitched Fibreglass Composites. ICCM-11, Gold Coast, Australia, 14.-18. Juli 1997, S. V-116 - V-127
- [175] Shim, S.B.; Ahn, K.; Seferis, J.C.; Berg, A.J.; Hudson, W.: Cracks and Microcracks in Stitched Structural Composites Manufactured with Resin Film Infusion Process. *Journal of Advanced Materials* (7/1995), S. 48-62
- [176] Moll, K.U.; Wulfhorst, B.: Quality Assessment during Stitching of Reinforcing Textiles for Composites. ICCM-11, Gold Coast, Australia, (7/1997), S. 128-137
- [177] Farley, G.L.; Dickinson, L.C.: Removal of Surface Loop from Stitched Composites Can Improve Compression and Compression-after-Impact Strength. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* (6/1992), Vol. 11, S. 633-643
- [178] Kuo, W.-S.: The role of loops in 3D fabric composites. *Composites Science and Technology* (2000), 60, S. 1835-1849
- [179] Mitschang, P.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Laufverhalten von Nähmaschinengreifern. Dissertation Universität Kaiserslautern 1990
- [180] Fischer von Mollard, C.-E.: Entwicklung von Verfahren zur Untersuchung der Stichbildung bei Industrie-Schnellnähern für Doppelsteppstich. Dissertation TH Braunschweig 1966
- [181] Spickermann, R.: Fadenkraftregelung als nähtechnische Innovation. Proceedings: 8. Nationales Symposium SAMPE Deutschland. Institut für Verbundwerkstoffe Kaiserslautern, 7.-8. März 2002
- [182] Weimer, C.; Wöginger, A.: Dreidimensionale Verstärkungsstruktur für Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe und Verfahren zu deren Herstellung aus einer ebenen Struktur. OS DE 10156875.4.1, 12.11.2001

-
- [183] Mende, S.: Untersuchung des Zusammenwirkens von Transporteur / Nähgut/ Nähfuß/ Stichplatte bei Industrienähmaschinen. *Textiltechnik*, Vol. 32 (1982), No. 5, S. 291-294
- [184] Weimer, C.; Mitschang, P.; Neitzel, M.: Selection and Improvement of a Feeding-System for Minimised Fibre Damage in Stitched Textile Composites. *Proceedings 4th Int. TEXCOMP Symposium*, Kyoto, 12.-14. Oktober 1998
- [185] N.N.: Pfaff Special Service, 1991
- [186] Wauer, G.: Nähmaschine mit programmierbaren Einstellparametern als Betriebsmittel für die Individualproduktion, in *DWI-Reports* (Hg.): Aachener Textiltagung, Aachen, 25.-26. November 1998, S. 395-407
- [187] Gutowski, T.-G. (Hg.): *Advanced Composites Manufacturing*. New York: John Wiley & Sons, 1997
- [188] Robitaille, F.; Gauvin, R.: Compaction of Textile Reinforcements for Composites Manufacturing. I: Review of Experimental Results. *Polymer Composites*, Vol. 19 (1998), 4, S. 198-216
- [189] Kim, Y.R.; McCarthy P.: Compressibility and relaxation of Fiber Reinforcements during composite processing. *Polymer Composites*, Vol. 12 (1991), 1, S. 13-19
- [190] Wauer, G.: Nähmaschine mit programmierbaren Einstellparametern als Betriebsmittel für die Individualproduktion, in *DWI-Reports* (Hg.): Maßgeschneiderte Produkte für den Markt von Morgen. Aachener Textiltagung, Aachen, 25.-26. November 1998
- [191] Darcy, H.: *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, Dalmont, Paris 1856
- [192] Steenkamer, D. A.: The influence of preform design and manufacturing issues on the processing and performance of resin transfer moulded composites (Volumes I and II). *Dissertation Universität Delaware* 1994

-
- [193] Shafi, V.: Beitrag zur Charakterisierung der Permeabilität flächiger Verstärkungsmaterialien, Dissertation Universität Kaiserslautern 1996
- [194] Breuer, U.: Beitrag zur Umformtechnik gewebeverstärkter Thermoplaste, Dissertation Universität Kaiserslautern, VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 2, Nr. 433, 1997
- [195] Stöven, T., Weyrauch, F., Mitschang, P., Neitzel, M.: Continuous Monitoring of Three-Dimensional Resin Flow Through a Fibre Preform. Proceedings International Conference for Manufacturing of Advanced Composites (ICMAC), Belfast, Northern Ireland, 27-28. September 2001, S. 4-13
- [196] Turner, M.R.; Rudd, C.D.; Long, A.C.; Middleton, V.; McGeehin, P.: Net-Shape Preform Manufacture using Automated Fibre Placement. Advanced Composite Letters, Vol. 4 (1995), 4, S. 121-124
- [197] Kim, Y.R.; McCarthy, P.: Compressibility and relaxation of Fiber Reinforcements during composite processing. Polymer Composites, Vol. 12 (1991), 1, S. 13-19
- [198] Saunders, R.A.; Lekakou, C.; Bader, M.G.: Compression and microstructure of fibre plain woven cloths in the processing of polymer composites. Composites Part A, Vol. 29 (1998), 4, S. 443-454
- [199] Toll, S.; Manson, J.A.E.: An analysis of the compressibility of fibre assemblies. Proc. of the 6th Int. Conf. on Fibre Reinforced Composites, Newcastle upon Tyne, London, 29.-31. März 1994, S. 25/1-25/10
- [200] Lee, D. H.; Lee, J.K.: Initial Compressional Behaviour of Fibre Assembly, in Kawabat, S.; Postle, R.; Niwa, M. (Hrsg.): Objective Measurement Applications to Product Design and Process Control. The Textile Machinery Society of Japan, Osaka 1985
- [201] Carnaby, G.A.; Pan, N.: Theory of Compression Hysteresis of Fibrous Assemblies, Textile Research Journal, 59 (1989), S. 275-284

-
- [202] Larose, P.: Observations on the compressibility of pile fabrics. *Textile Research Journal*, 23 (1953), S. 730-735
- [203] Faiz, R.-I.: Net RTM Preforming Process for Cost Effective Manufacturing of Military Ground Vehicle Composite Structure, in Benjamin, W.P.: *Resin Transfer Moulding*, SAMPE Monograph No. 3, 1996, S. 127-138
- [204] N.N.: Dachmodul für das Lkw-Fahrerhaus TG-A XXL im Rahmen der Verleihung des AVK-TV-Innovationspreises, AVK-TV-Tagung, Kongresshaus Baden-Baden, 12.-13. September 2000
- [205] Mosher, P.C.: Cost Effective SCRIMP Applications in the Marine Market. Composites Institute's 51st Annual Conference and Expo, Cincinnati, Ohio (1996), 5.-7. Februar, Session 12-D
- [206] Ruud, N.A.: Rapid tooling for resin transfer moulding, RTM. 6th Int. Conf. Of Rapid Prototyping, Dayton, Ohio, Juni 1995, S. 205-215
- [207] N.N.: Preforming process adds automation for volume-moulding of composite parts. *Composites Technology* (1999), 7, S. 27-30
- [208] McConnell, V.-P.: Rapid evolution in resin transfer moulding - part two: Automatic RTM injection system/sequential multi-port resin injection manifold system. *International Newsletters* (1999), 3, S. 1
- [209] Moore, M.F.: Bland R.J.: RTM Equipment and Process Automation, in Benjamin, W.P.: *Resin Transfer Moulding*, SAMPE Monograph No. 3, 1999, S. 33-40
- [210] Mills, A.; Backhouse, R.: Automation of carbon fiber preform manufacture for aerospace applications. The 4th International Symposium for Textile Composites, Kyoto Institute of Technology, 12.-14. Oktober 1998, S. O-37-1 – O-37-8
- [211] Brosius, D.; Clarke, S.: Textile Preforming Techniques for Low Cost Structural Composites. ICI Fiberite, Salt Lake City, Utah, 30.9-3.10.1991

-
- [212] Graf, J.: Einsatzmöglichkeiten von Preforms. Fertigungs-Technologie-Kolloquium 1997, DASA Bremen, 1997
- [213] Malm, T.: Direct Spray Preforming, in IOM Communications (Hg.): ACP 2000, Automotive Composites and Plastics, Ford Motor Company Ltd, Essex, 5.-6. Dezember 2000, S. 111-114
- [214] Breuer, U.P.: Beitrag zur Umformtechnik gewebeverstärkter Thermoplaste. Fortschr.-Ber. VDI-Reihe 2, Nr. 433, Mannheim, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997
- [215] Hörsting, K.; Huster, M.: Targetting cost reduction by FEA-designed reinforcement textiles. ECCM-8, Neapel, Juni 1998, S. 635-643
- [216] Weimer, C.; Wöginger, A.: Kontinuierliche, bauteil- und prozessorientierte Herstellung von Verstärkungsstruktur-Halbzeugen für Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe, DE 100 05 02, 3. Februar 2000
- [217] Weimer, C., Mitschang, P.: Nähtechnik für Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe. Technische Textilien. Jahrg. 43 (2000), Heft 2, Mai, S. 120-121
- [218] Kissinger, C.: Ganzheitliche Betrachtung der Harzinjektionstechnik – Messsystem zur durchgängigen Fertigungskontrolle. IVW-Schriftenreihe Bd. 28. Dissertation Universität Kaiserslautern. 2001
- [219] Schierenbeck, H.: Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre, 13. Auflage, München: Oldenbourg 1998, S. 324ff.

Anhang 1: Auflistung verschiedener Harzinjektionstechniken

Tabelle A1- 1: Übersicht der Verfahrensvarianten der Harzinjektionstechnik [218]

	VI	RTM	Schlauchblas-RTM	TERTM
Faservolumen-gehalt	40 - 50%	40%, max 60%	bis 60%	höherer Faser- volumengehalt als RTM, 65%
Oberflächen	sehr gut	gut - sehr gut; befriedigend (für zu lackierende Oberflächen)	gut	gut
Lufteinschlüsse, Delamination	luftblasenfrei	möglich	Kompression in Radien problematisch	möglich, durch Kernausdehnung aber gering
Bauteilgröße	begrenzt, Fließwege max. 1 m, durch Modifizierung > 2 m	5 m ²	← anlagentechnische Einschränkungen	
komplexe Geometrien	gut	gut - sehr gut	gut	gut
Inserts	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Rippen	gut	befriedigend, (3° Entformungs- schrägen)		←
Radien	wie RTM	R > 3 mm bei vorgeformten Faserstrukturen R > 5 mm bei Matten und Geweben	Problem: Schlauch muss auch in Ecken kommen, R _{min} = 10 mm	
max. Dicke			← bis 10 mm sinnvoll,	
Formeinschrän- kungen			← allgemein schwierig sind Hinterschnitte (Werkzeugkosten), zu	
Seriengröße pro Jahr	über 2.000	ca. 50.000	ca. 10.000	ca. 50.000
Zykluszeit	5 - 60 min	5 - 25 min	20 - 60 min	6 min (mit speziellen EP-Harzen)
Invest.-aufwand	sehr gering	gering	mittel	mittel
Vorteile / Nachteile	geringe Kosten	Endmaßfertigung (20% weniger Abfall)	Verfahrenstechnik optimieren, konst. Wanddicken- verteilung in stark gekrümmten Bereichen, Querschnitts- änderungen garantieren	Kosten für Vorfertigung von Schaumkernen, leistungsfähige Temperieranlagen notwendig, evtl. Ofen zum Aufheizen

Tabelle A1-1 ff: Übersicht der Verfahrensvarianten der Harzinjektionstechnik

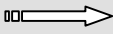


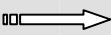
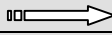

ARTM	Kernausschmelzverfahren	DPRTM / SLI	FIV	
niedriger Faservolumengehalt, 40%	40 - 60%	bis 65%	40 - 50%	Faservolumengehalt
mittel, da hohe Fließgeschwindigkeit	gut - sehr gut, befriedigend (für zu lackierende Oberflächen)	gut - sehr gut	sehr gut (einseitig)	Oberflächen
möglich, da hohe Fließgeschwindigkeit, schnelle Tränkung	Lufteinschlüsse beim Aufeinandertreffen der Fließfronten möglich	luftblasenfrei	luftblasenfrei	Lufteinschlüsse, Delamination
	aufgrund der Fertigungskomplexität begrenzt	durch Autoklav beschränkt	sehr groß (15t)	Bauteilgröße
eingeschränkt (Schließvorgang)	gut	gut	gut – sehr gut	komplexe Geometrien
eingeschränkt	sehr gut	sehr gut	sehr gut	Inserts
stark vereinfacht wird die Herstellung von verrippten Bauteilen durch den Einsatz von Vorformlingen				Rippen
	 wie RTM 			Radien
> 10 mm möglich				max. Dicke
vermeiden sind extrem kleine Radien sowie extreme Dickensprünge				Formeinschränkungen
geschätzt bis 100.000	ca. 50.000	2.000 - 5.000	ca. 1.000	Seriengröße pro Jahr
niedrig, < 5 min	5 - 45 min	30 - 180 min (Autoklav)		Zykluszeit
relativ hoch	mittel	hoch	gering	Invest.-aufwand
aufwändiges Dichtungsprinzip des Werkzeugs	kein Konturbeschnitt nötig	Autoklav stellt Grenzen an Bauteilgröße	geringer Prozessaufwand, manuelle Bearbeitung	Vorteile / Nachteile

Tabelle A1- 2: Übersicht über wesentliche RTM-Prozessparameter

Prozess-Parameter	Auswirkungen auf Verfahren oder Struktur
Viskosität des Harzes	<ul style="list-style-type: none"> • Festlegung der Zykluszeit • Höhere Viskosität – Preform wird nicht komplett getränkt • Niedrigere Viskosität – Bildung von trockenen Stellen und Poren, „Race-Tracking“
Gelierzeit des Harzes	<ul style="list-style-type: none"> • Zu kurz – Harz füllt die Preform nicht • Zu lang – Zykluszeiten werden unnötig verlängert
Injektionsdruck	<ul style="list-style-type: none"> • Trängung auch von dichten Lagenpaketen • Zu schnell oder zu hoch – verschiebt Preform in der Form • Zu hoch – beschädigt Form oder Werkzeug • Zu hoch – kann Verschlüsse herausdrücken und Undichtigkeiten verursachen • Zu niedrig – sehr lange Zykluszeiten • Zu niedrig – Harz kann während der Füllzeit gelieren
Vakuumqualität	<ul style="list-style-type: none"> • Beeinflusst Ausgasungen • Verringert Blasenbildung • Begünstigt die Dichtheit bei zweischaligen Werkzeugen • Wirkt Feuchtigkeit entgegen und entzieht flüchtige Stoffe
Angussgestaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Meist genutzt, um vollständige Harzdurchträngung sicherzustellen • Steuerbares Angusssystem mit mehreren Angüssen erhöht die Prozesssicherheit und Füllzeit • Ausgestaltung ermöglicht das Füllen sehr großer Bauteile
Werkzeuge mit elastischem Kern	<ul style="list-style-type: none"> • Gummieinlagen ermöglichen sehr hohe Kompression • Hohe Faservolumenanteile möglich, > 65 % Faservolumengehalt. • Sehr geringe Blasenbildung • Elastische Kerne müssen hohem Injektionsdruck entgegen wirken • Integration der Dichtungen möglich
Nachdruck	<ul style="list-style-type: none"> • Nach der Imprägnierung wird Druck auf 6-8 bar (bei entsprechenden Zuhaltekräften) erhöht • Vermindert Mikroblasen
Schlichte oder Haftvermittler	<ul style="list-style-type: none"> • Schlichte muss matrixkompatibel sein • Schlichte beeinflusst die Fließgeschwindigkeit (geringere Permeabilität)
Faservolumengehalt	<ul style="list-style-type: none"> • Beeinflusst die Permeabilität des Harzes umgekehrt proportional • Hohe Faservolumenanteile (> 60 %) sind schwer zu imprägnieren (Spezialharze teuer!) • Allgemeine Anwendung – 25 - 50 % Faservolumengehalt. • Anwendung im Flugzeugbau – 50 - 70 % Faservolumengehalt
Eingearbeitete Einsätze und Anschlüsse	<ul style="list-style-type: none"> • Evtl. schlechter Harzfluss um die Anschlüsse • Evtl. trockene Stellen und Blasen

Anhang 2: Stichdichte und Fadenmenge

Beschreibung des Fadenverbrauchs einzelner Stichtypen

Für die in Kapitel 4 ermittelte Größe $L_{\text{Garn(Einzelstich)}}$ wird jeweils der entsprechende Wert der beschriebenen Stichtypen eingesetzt

Modifizierter Doppelsteppstich (siehe Bild 4-11):

Fadenverbrauch pro Stich:

$$L_{\text{Doppelsteppstich}} = L_{\text{Oberfaden(DSS)}} + L_{\text{Unterfaden(DSS)}}$$

Fadenverbrauch bei modifiziertem Doppelsteppstich:

$$L_{\text{Doppelsteppstich}} = [2 * H + SL]_{\text{Oberfaden}} + [SL]_{\text{Unterfaden}}$$

Angenommene minimale Stichlänge = 1 mm

Dickenverstärkungsanteil = 2*H

Dickenverstärkungsrichtung = 90° (Senkrecht auf Laminebene)

Kettenstich:

Fadenverbrauch pro Stich:

Einfadenkettenstich

$$L_{\text{Einadenkettenstich}} = 2 * H + 3 * SL$$

Doppelkettenstich oder 2-Faden-Kettenstich

$$L_{2\text{-Fadenketten}} = L_{\text{Oberfaden(DKS)}} + L_{\text{Unterfaden(DKS)}}$$

$$L_{2\text{-Fadenketten}} = [2 * H + SL]_{\text{Oberfaden}} + [3 * SL]_{\text{Unterfaden}}$$

Angenommene minimale Stichlänge = 1 mm

Dickenverstärkungsanteil = 2*H

Dickenverstärkungsrichtung = 90° (Senkrecht auf Laminebene)

Blindstich:

Fadenverbrauch pro Stich:

$$L_{\text{Blindstich}} = 2[0,5 * [2 * \pi * H_{\text{Einstich}}^2]] + 2 * SL$$

Angenommene minimale Stichlänge = 8 mm

Die Berechnung des Blindstich-Wirkungsgrades erfolgt jeweils auf Basis einer Einstichtiefe von jeweils $\frac{3}{4}$ der gesamten Laminatdicke.

In den Berechnungen wurde jeweils ein Dickenverstärkungsanteil von $\frac{1}{4}$ Bogensegment des im Laminat eingefügten Nähfadens angenommen. Die Orientierung dieser Dickenverstärkung innerhalb des Bogensegments wird – in der Ebene x-z – einen Bereich zwischen 15° und 60° abdecken.

OSS[®]:

Fadenverbrauch pro Stich:

$$L_{\text{OSS}} = (\sqrt{H^2 + 4^2} * 4) + (3 * SL) + (2 * (SB - 8))$$

Angenommene minimale Stichlänge = 3 mm

Der Dickenverstärkungsanteil einer OSS[®]-Naht wird durch den Anteil $\sqrt{H^2 + 4^2} * 4$ der Berechnungsformel gegeben. Die Hälfte dieses Anteils liegt etwa in einem Winkel von 45° - in der x-z-Ebene – im Laminat, während der Rest etwa in einem 90° -Winkel – in der gleichen Ebene – im Laminat eingebracht ist.

Anhang 3: Vergleich verschiedener Stichtypen

Tabelle A3- 1: Übersicht über verschiedene Stichtypen für die Konfektion von textilen Verstärkungsstrukturen

Stichtyp (nach DIN 61400)	Fadenverbrauch	Handling	Faserdesorientierung	Kompaktierung
Standard - Stichtypen				
 2-Faden-Kettenstich	+ geringer Oberfadenverbrauch - hoher Unterfadenverbrauch	+ hohe Dehnfähigkeit - Naht zieht sich leicht auf	+ Geringe Faserverschiebung in der Ebene - Materialanhäufung auf der Rückseite → out-of-plane crimp	+ Loses Maschengebilde ermöglicht leichtes Faserbündelgleiten - Materialeinbringung
 Einfadenkettenstich (Kl. 101)	- hoher Oberfadenverbrauch + kein Unterfaden benötigt	- Naht zieht sich auf - Neigung zum Verzug + Gute Drapierbarkeit	+ Geringe Fadenspannung - Faserverschiebung auf Lagenpaket Ober- und Unterseite	+ Loses Maschengebilde ermöglicht leichtes Faserbündelgleiten - Materialeinbringung
 Doppelsteppstich (Kl. 301)	+ Hybridisierung und hoher Effektivitätsgrad möglich - Hohe Fadenzugkräfte	+ Gute Schiebefestigkeit des Lagenpaketes + Geringe Verzugsneigung	+ Unterschiedliche Faserverschiebung auf der Materialober- bzw. unterseite - Hohe Fadenzugkräfte	+ Exakt einstellbar + Geringe Materialeinbringung

Tabelle A3-1ff

Stichtyp (nach DIN 61400)	Fadenverbrauch	Handling	Faserdesorientierung	Kompaktierung
Einseiten - Techniken				
 <p>Blindstich (Kl. 103)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Fadenbedarf - geringer Effektivitätsgrad + kein Unterfaden notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> - Kein Verbund der Einzellagen über die ganze Dicke + Nähen in einem festen Werkzeug 	<ul style="list-style-type: none"> - Lokale Nähfadenanhäufung → hoher Verschiebungsgrad + Untere Einzellagen ohne Beeinflussung durch den Nähprozess 	<ul style="list-style-type: none"> - Kompaktierung über das Lagenpaket nicht einstellbar - Bei Vorkompaktierung leichte Abweichung der Nadel möglich
 <p>OSS® - Stich</p>	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Fadenverbrauch - Orientierung der Dickenverstärkung unterschiedlich 	<ul style="list-style-type: none"> + gute Verschiebefestigkeit - keine Programmierung von Einzelstichen 	<ul style="list-style-type: none"> - Fadeneinzug wirkt großflächig → Hoher Verschiebungsgrad - Penetration des Materials mit 2 Nadeln 	<ul style="list-style-type: none"> - Stichbreite führt zu großflächiger Materialbeeinflussung
 <p>Tufting</p>	<ul style="list-style-type: none"> + Sehr hoher Effektivitätsgrad bei optimaler Lage im Verbund (ohne Schlaufen) 	<ul style="list-style-type: none"> - keine Verschlaufung → kein Kraftschluss zwischen Einzellagen 	<ul style="list-style-type: none"> - durch grobe Nadelausführungen Verschiebungen im Laminat + Geringe Fadenkräfte 	<ul style="list-style-type: none"> - Fadenkräfte nicht ausreichend zur Einbringung einer Kompaktierungskraft

Anhang 4: Kompaktierungsergebnisse für 8 lagige Preformpakete

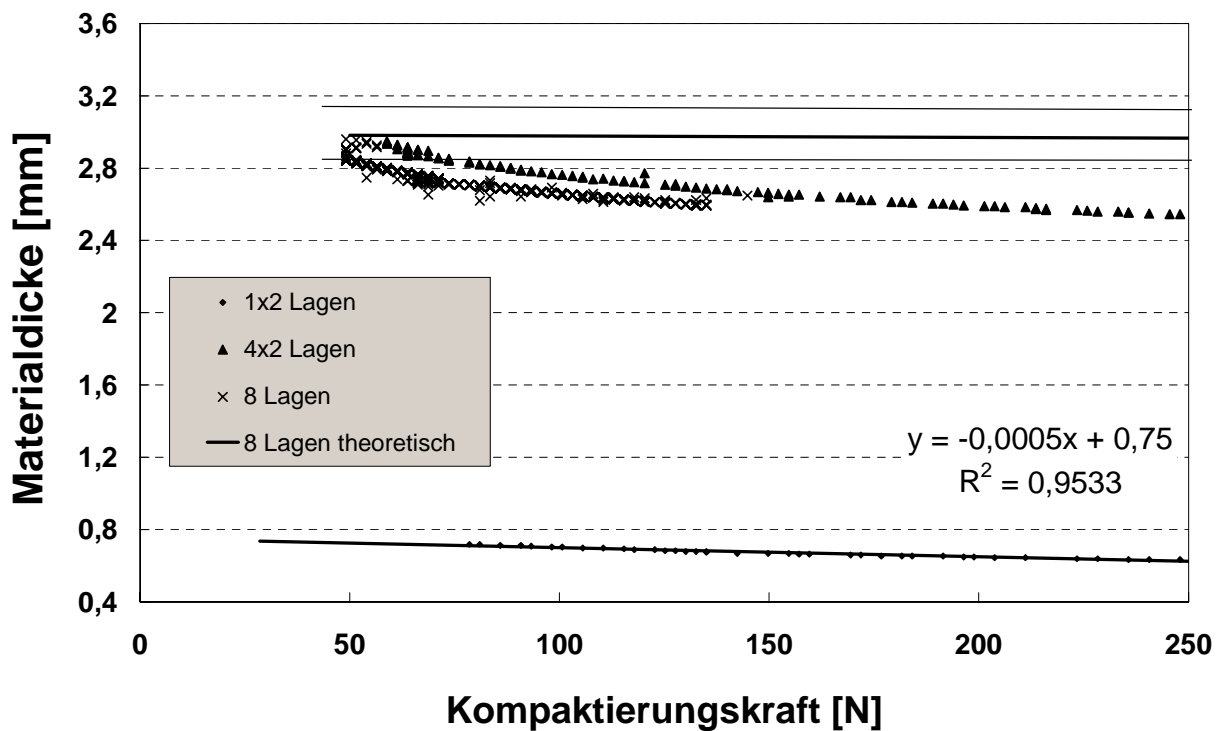


Bild A- 1: Vergleich des linearen Ansatzes zur Vorhersage der Kompaktierungseigenschaften mit gemessenen Ergebnissen (Versuche mit 8 Lagen)

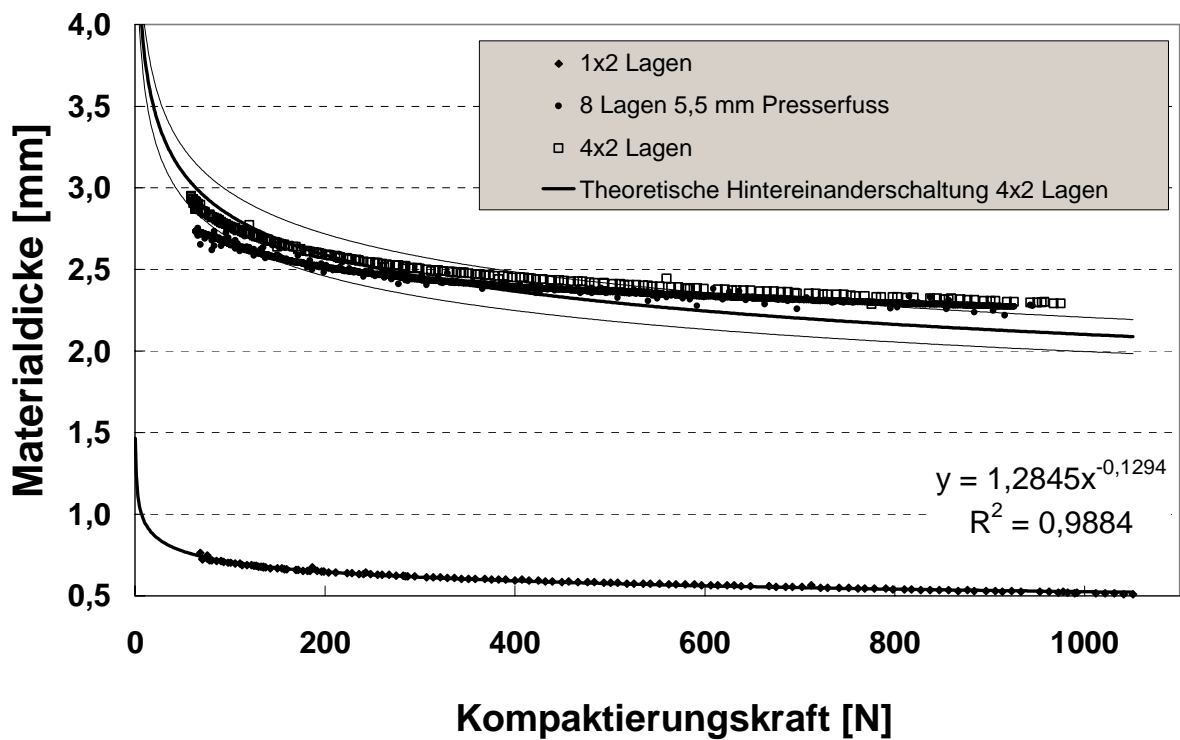


Bild A- 2: Vergleich des Potenz-Ansatzes zur Vorhersage der Kompaktierungseigenschaften mit gemessenen Ergebnissen (Versuche mit 8 Lagen)

Anhang 5: Betriebswirtschaftliche Berechnungsgrunddaten

In Vorbereitung der Kostenvergleichsrechnung sind Grunddaten für die zu betrachtenden Fertigungsverfahren zusammenzustellen. Zu den benötigten Daten zählen

- unternehmensbezogene Grunddaten (Personalkostensätze, kalkulatorischer Zinssatz, Energiekostensatz, Gebäudenutzungssatz etc.),
- anlagenbezogene Informationen/Kostensätze (Platzbedarf, Personalbedarf, Stromverbrauch, Betriebsmittel etc.) sowie
- die Materialkosten der Bauteile.

Da zur Ableitung von Grunddaten zur Wirtschaftlichkeitsanalyse - insbesondere hinsichtlich der anlagenbezogenen bzw. der materialbezogenen Kosten - nur vereinzelt kostenrelevante Informationen aus direkt vergleichbaren, im Industriemaßstab bereits realisierten Fertigungsverfahren vorliegen, gestaltet sich die Zusammenstellung der Daten schwierig.

Die Datenrecherche wurde mittels Interviews bei den Material- bzw. Halbzeugherstellern, den Anlagenbauern und den Herstellern vergleichbarer/ähnlicher Bauteile durchgeführt. Zur Reduktion der Unsicherheiten im Datenmaterial und zum Auffüllen von Informationslücken wurde zusätzlich

- auf vorhandene Erfahrungswerte zurückgegriffen,
- auf Analogiebetrachtungen basierende Abschätzungen vorgenommen bzw.
- plausible Annahmen getroffen.

Kostentheoretische Grundlagen: Statische Kostenvergleichsrechnung

Die Verfahren der Kostenvergleichsrechnung werden in der Regel zum Vergleich von Investitionsalternativen angewendet und lassen sich weiter in die beiden Gruppen der dynamischen und der statischen Verfahren untergliedern [219]. Die Kostenbetrachtung basiert auf Daten eines repräsentativen Modelljahres. Es wird daher auf die statische Kostenvergleichsrechnung zurückgegriffen.

In den Kostenvergleich werden alle durch das jeweilige Investitionsvorhaben verursachten fixen und variablen Kosten einbezogen (Gesamtkosten). Zu den fixen Kosten gehören die Betriebs- und Kapitalkosten. Die Betriebskosten beinhalten u. a. die Wartungskosten, Gebäudenutzungskosten sowie fixe Kosten für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe.

Die Wartungskosten stellen den zeitlichen Aufwand für regelmäßige Instandhaltungsarbeiten an den Fertigungsanlagen dar. Der Gebäudenutzungssatz wird stellvertretend für Energie-, Grundstücks- und Gebäudekosten angesetzt und bezieht sich auf den jeweiligen Raumbedarf einer Fertigungsanlage. Die Kapitalkosten umfassen die kalkulatorischen Abschreibungen und die kalkulatorischen Zinsen auf das durchschnittlich gebundene Kapital. Sie berechnen sich nach den Gleichungen A - 1 und A - 2 [219].

$$AS = \frac{AW - RW_n}{n} \quad (A - 1)$$

$$ZK = i \cdot \frac{AW + RW_{n-1}}{2} \quad (A - 2)$$

Die kalkulatorischen Abschreibungen stellen den Werteverlust der Anlagen dar, der durch Verschleiß und technischen Fortschritt bzw. Veralterung entsteht.

Die kalkulatorischen Zinsen stellen keine real anfallenden Kosten dar, sondern entgangene Gewinne, die bei einer alternativen Verwendung des gebundenen Kapitals auf dem Kapitalgütermarkt erzielbar wären. Bei einer Fremdfinanzierung der Anlage würden die kalkulatorischen Zinsen den Fremdkapitalzinsen entsprechen. Die Kapitalkosten sind fixe Kosten, die unabhängig von der Nutzungsintensität einer Investition anfallen.

Des Weiteren entstehen variable Kosten, die von der jeweiligen Nutzungsintensität einer Investition abhängig sind. Zu ihnen gehören Energiekosten, Materialkosten, Roh- und Betriebsstoffkosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie Personalkosten. Die Energiekosten (Stromverbrauch) entstehen in Höhe der Maschinennennleistung und Maschinenlaufzeit. Materialkosten entstehen durch die Beschaffung von Halbzeugen bzw. Materialien zur Halbzeugherstellung. Die Personalkosten richten sich danach, wie viele Werker bzw. Techniker im Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen und ob im Ein- oder Mehrschichtbetrieb gefertigt wird.

Unternehmensbezogene Annahmen der Kostenbetrachtung

In die Kostenberechnungen fließen folgende, die unternehmensbezogenen Grunddaten betreffende Annahmen mit ein:

- Abschreibungsdauer der Anlagen 8 Jahre
- Kalkulatorischer Zinssatz 6 %
- Raumkostensatz 180 €/m²/a
- Energiekostensatz 0,07 €/kWh
- Personalkostensatz Nähtechniker/in 25 €/h, Näher/in 18 €/h

Anlagenbezogene Grunddaten

Um die kostenrelevanten Informationen für die gesamten Fertigungsverfahren nachvollziehbar abzuleiten, ist es notwendig, diese jeweils in eine Abfolge von relevanten, in sich abgeschlossenen Fertigungsschritten (Prozessketten) zu zerlegen, die für jeden Schritt einzusetzenden Hauptanlagenkomponenten zu identifizieren und die anlagenbezogenen Informationen auf dieser Ebene zu bestimmen. Dies ist insbesondere auch zum hier geforderten Vergleich der Harzinjektionstechnologie mit und ohne Preforming unabdingbar.

Zur besseren Übersicht sind die relevanten Daten aller zu berücksichtigenden Hauptanlagenkomponenten in Tabelle A5-1 zusammengestellt.

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten in Tabelle A5-1 wurden infolge ungenügender praktischer Erfahrungswerte und aufgrund der Kontinuität des Stundensatzes mittels eines auf die kalkulatorische Abschreibung der jeweils betrachteten Anlagen anzusetzenden Zuschlages von 40 % angenommen.

Bei den anlagenbezogenen Hilfs- und Betriebsstoffkosten darf nicht vernachlässigt werden, dass diese unmittelbar von der Anzahl der zu fertigenden Bauteilvarianten sowie den anlagenbezogenen Betriebsstunden abhängen, in dieser Studie allerdings in fixen Kosten innerhalb des Modelljahres ausgewiesen sind, da die zu fertigende Komponenten- bzw. Bauteilstückzahl feststeht.

Materialkosten

Die stückbezogenen Materialkosten ergeben sich aus dem mit Preisen bewerteten mengenmäßigen Verbrauch des materiellen Inputs - je gefertigtem Bauteil. Der mengenmäßige Verbrauch von Materialien je Bauteil lässt sich auf einfache Weise anhand gegebener Gewichtsangaben für die betrachteten Bauteile ermitteln. Verfahrensbedingt kann zusätzlich von einem bestimmten Zuschlag bei der Ermittlung der gesamten Materialkosten ausgegangen werden. Der Materialabfall (bedingt durch Konfektionierung der Halbzeuge vor der Umformung oder sonstigem Randbeschnitt) wird mittels eines Abfallfaktors von 10 % auf die Gesamtmaterialmenge des Modelljahres berücksichtigt.

Das wesentliche Problem bei der Berechnung der Materialkosten liegt in der preislichen Bewertung des Materialinputs. Die Einflussfaktoren auf die Marktpreise sind sehr vielschichtig. Beispielsweise treten erhebliche Preisspannen in Abhängigkeit von den nachgefragten Mengen auf. Auch ggf. notwendige, aber in der Vorplanungsphase noch nicht absehbare Modifikationen der Materialien können einen großen Einfluss auf den Preis haben. Bei den hier vorgenommenen Berechnungen werden die Materialkosten für die Fertigung der betrachteten Bauteile folgendermaßen abgeschätzt:

Epoxidharz: 5 €/kg; Glasfasergelege: 3 €/kg; Kohlenstofffasergelege: 75 €/kg;
Materialverbrauch je Spoiler: 4 kg Harz; 4 kg Glasfasergelege; Materialverbrauch je
Spannrahmen: 1 kg Harz, 1 kg Kohlenstofffasergelege

Tabelle A5- 1 : Daten der berücksichtigten Hauptanlagenkomponenten

	AK	Platzbedarf	Anschlussleistung	W-/Inst.kosten	Hilfs- /Betriebsstoffkosten
	[€]	[m²]	[kW]	[€a]	[€a]
Zuschnitt /Finish					
Portal-Fräsanlage	200.000	24	10	10.000	4.000
Cutter	50.000	10	5	250	2.500
Handschleifer (Entgraten)	60	25	15	3	5
Preforming					
Standard- näähmaschine	5.000	4	10	250	100
Automat	25.000	10	10	1.250	250
Anlage	110.000	10	20	5.500	1.000
RTM-Prozess					
Schließanlage	30.000	10	60	1.500	500
Vakuumpumpe	2.500	1	0,5	124	5
Harzinjektionsanlage	40.000	3	1	2.000	250
RTM-Werkzeug	10.000				
RTM-Pressen	50.000	12	60	2.500	750

Sonstige Grundlagen der Kostenvergleichsrechnung für die Fertigungsverfahren

Zur Durchführung der in den beiden folgenden Kapiteln dargelegten Kostenvergleichsrechnungen sind noch einige weitere Festlegungen zu treffen:

- Bei der Kostenvergleichsrechnung wird von einem Einschichtbetrieb (1.600 h/a Jahresarbeitszeit pro Schicht) ausgegangen.
- Die Kostenbetrachtung bezieht sich auf ein gewähltes Modelljahr. Die den Rechnungen zugrunde gelegten jährlichen Stückzahlen betragen beim Spannrahmen 100 Stck/a, beim Spoiler 1000 Stck/a.
- Es wird von einer Volllauslastung der einzelnen Anlagen ausgegangen.
- Es wird von einer Null-Fehler-Fertigung ausgegangen. Kosten für Ausschuss bzw. nachproduzierte Teile sind zu vernachlässigen.
- Ggf. notwendige Nachbearbeitungsschritte werden ebenso vernachlässigt.

Die betrachteten Komponenten- und Verfahrensvarianten

Unter Berücksichtigung der spezifischen Gegebenheiten der vergleichend zu betrachtenden Verfahren der Harzinjektionstechnologie mit sowie ohne Preforming haben sich einige mögliche Prozessketten herauskristallisiert. Die betrachteten Varianten, für die jeweils unter den oben beschriebenen Annahmen eine Gesamtkostenrechnung durchgeführt wurde, sind im folgenden aufgeführt. Die einzelnen Variantenbetrachtungen beim Spoiler erfolgten jeweils sowohl mit wie auch ohne Berücksichtigung der Einarbeitung von Inserts, beim Spannrahmen nur unter Berücksichtigung der Einarbeitung von Inserts.

Bauteilvarianten:

- Spoiler
- Spannrahmen

Verfahrensvarianten:

- Harzinjektionstechnik mit vorgeschaltetem Preforming
- Harzinjektionstechnologie ohne vorgeschaltetem Preforming

Preformingvarianten:

- Standardnähmaschine
- halbautomatischer Nähautomat
- automatische Nähanlage

Die Prozesszeiten, die jeweils für die einzelnen fertigungstechnisch bedingten Aktionen benötigt werden, sind in folgender Tabelle A5-2 zusammengefasst.

Tabelle A5-2: Zugrunde gelegte Prozesszeiten in Sekunden

	Preforming	Insert- integration	Einlegen	Injektion	Entnahme + Nachb.	Σ
Spoiler						
Ohne Preforming, ohne Inserts	0	0	900	600	600	2.100
Preforming, o. Inserts, Standard	1.800	0	60	600	600	3.060
Preforming, o. Inserts, Automat	300	0	60	600	600	1.560
Preforming, o. Inserts, Anlage	60	0	60	600	600	1.320
Ohne Preforming, mit Inserts	0	480	900	600	600	2.580
Preforming, m. Inserts, Automat	300	480	60	600	600	2.040
Preforming, m. Inserts, Anlage	60	80	60	600	600	1.400
Spannrahmen						
Ohne Preforming	0	480	960	600	600	2.640
Preforming, Automat	1.200	0	60	600	600	2.460
Preforming, Anlage	300	0	60	600	600	1.560

Liste der betreuten Studien- und Diplomarbeiten

1. Christof Grychnik, 1998
Konstruktion eines Garnprüfstandes zur Ermittlung nähtechnisch relevanter Kennwerte, Studienarbeit
2. Jürgen Müller, 1998
Technische und wirtschaftliche Analyse verschiedener Herstellungsverfahren für textile Kohlenstofffaser-Vorformlinge für die Weiterverarbeitung zu Luftfahrzeug-Primärstrukturen im RTM-Verfahren, Diplomarbeit
3. Frank Schöfer, 2000
Integration von Krafterleitungselementen in Preforms für die Herstellung von FKV-Bauteilen mittels Nähtechnik, Diplomarbeit
4. Rudi Velthuis, 2001
Permeability measurements and simulations on non-stitched and stitched non-crimp-fabrics, Diplomarbeit

