

# **IVW - Schriftenreihe Band 73**

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

---

**Robert Lahr**

**Partielles Thermoformen  
endlosfaserverstärkter  
Thermoplaste**

### Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <<http://dnb.ddb.de>>.

Herausgeber: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH  
Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb  
Erwin-Schrödinger-Straße  
TU Kaiserslautern, Gebäude 58  
67663 Kaiserslautern  
<http://www.ivw.uni-kl.de>

Verlag: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

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

D 386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2007

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 978-3-934930-69-8

ISBN 3-934930-69-7

# **Partielles Thermoformen endlosfaserverstärkter Thermoplaste**

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

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

**Dipl.-Wirtsch.-Ing. Robert Lahr**  
aus Idar-Oberstein

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Juli 2007

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich

D386





Für meine Familie

„Wenn du nicht irrst, kommst du nicht zu Verstand.“  
Johann Wolfgang von Goethe

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit ging aus meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (Abteilung Verarbeitungstechnik) an der technischen Universität Kaiserslautern hervor. An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein größter Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang für das mir entgegengebrachte Vertrauen, der Vergabe des Themas und seiner ständigen Diskussionsbereitschaft. Sein Verständnis, mir während meiner Tätigkeit am Institut Teilzeit in der Elternzeit zu gewähren ermöglichte es mir, Beruf und Familie optimal zu verbinden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb danke ich für die bereitwillige Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich für die Übernahme des Korreferats.

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen eines Verbundprojekts (03N3113C) finanziell unterstützt. Den Projektpartnern, insbesondere der Bond-Laminates GmbH und der PFAFF Industrie Maschinen AG danke ich für die Beistellung der Materialien und der Bauteilprüfung.

Bei allen Mitarbeitern des Instituts, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben, möchte ich mich herzlich bedanken. Das kollegiale Umfeld hat entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Besonders danke ich Peter Mang, Luisa Medina, Michael Nast, Tim Noll, Uwe Schmitt, Eric Schott, Rudi Velthuis und Torsten Weick. Für das Korrekturlesen bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Jens Schlimbach und bei meinem langjährigen Freund Timothy Hall.

Ganz besonders danke ich meiner Ehefrau, Dr. rer. nat. Katrin Lahr. Ihr unermüdliches Korrekturlesen, ihre fachfremde kritische Betrachtungsweise und ihr seelischer Beistand haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Meinen Kindern Leonie (5) und Pepe (1) danke ich für ihre unbewussten Ablenkungsmanöver und ihre aufmunternde Art.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meinen Eltern und Freunde, für die mir entgegengebrachte Unterstützung und Ihrem Verständnis während meiner Promotionszeit.



**Inhaltsverzeichnis**

<b>Formel- und Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Das Marktpotenzial thermoplastischer Faser-Kunststoff-Verbunde .....	1
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung .....	3
<b>2 Stand der Technik endlosfaserverstärkter Thermoplaste</b> .....	<b>7</b>
2.1 Prozesskette endlosfaserverstärkter Thermoplaste .....	7
2.2 Thermoplastische Halbzeuge.....	9
2.2.1 Thermoplastische Matrixsysteme .....	9
2.2.2 Verstärkungsfasern .....	11
2.2.3 Herstellprozesse.....	12
2.3 Halbzeugaufheizverfahren .....	13
2.3.1 Heißgas .....	15
2.3.2 Kontakt .....	16
2.3.3 Infrarot- oder Wärmestrahlung .....	16
2.3.4 Laser .....	18
2.3.5 Mikrowelle .....	19
2.3.6 Induktive Erwärmung.....	20
2.3.7 Gegenüberstellung der verschiedenen Aufheizverfahren.....	23
2.4 Thermoformen endlosfaserverstärkter Thermoplaste .....	23
2.4.1 Grundprinzip des Thermoformens (Drapierung).....	23
2.4.2 Globales Umformen.....	26
2.4.3 Partielles Umformen.....	29
2.4.4 Dickenadaptives Umformen .....	30
<b>3 Partielles Thermoformen und Funktionsintegration</b> .....	<b>35</b>

---

3.1	Einleitung .....	35
3.2	Demonstrator .....	36
3.2.1	Ausgangslage – alternative Herstellverfahren .....	36
3.2.2	Bauteilauslegung .....	38
3.3	Induktive Erwärmung zum lokalen Thermoformen .....	40
3.4	Umformmechanismen .....	42
3.5	Integration des Lagerfügens.....	48
<b>4</b>	<b>Experimentelle Versuchsdurchführungen und Ergebnisse .....</b>	<b>51</b>
4.1	Induktive Erwärmung .....	51
4.2	Thermoformen.....	53
4.2.1	Materialtransport .....	55
4.2.2	Umformverhalten beim partiellen Thermoformen (Phase 1).....	56
4.2.3	Funktionsintegration des Lagerfügens in den Thermoformprozess..	64
4.2.3.1	Einseitig unsymmetrischer Lagersitz (Phase 2) .....	67
4.2.3.2	Symmetrischer Lagersitz (Phasen 3 und 4) .....	69
4.3	Lagerfügen .....	83
4.3.1	Vorbehandlungsmethoden .....	83
4.3.2	Ausdrückversuche .....	84
4.4	Bauteilfunktionsprüfung.....	87
4.5	Modellbildung und Vergleichsrechnung .....	91
4.5.1	Geometrische Restriktionen .....	91
4.5.2	Thermische Restriktionen.....	94
<b>5</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....</b>	<b>103</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>109</b>
<b>7</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>111</b>
<b>8</b>	<b>Betreute Studien- und Diplomarbeiten.....</b>	<b>123</b>

---

<b>9 Lebenslauf .....</b>	<b>125</b>
---------------------------	------------

## Formel- und Abkürzungsverzeichnis

### Formeln

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\dot{q}_0$	[W]	Wärmestrom
$\eta_{Gen}$	[1]	Wirkungsgrad des Generators
$T_m^0$	[K]	Gleichgewichtsschmelztemperatur bei einem Druck von 1 bar
$\xi$	[1]	Kristallisationsgrad
$\kappa$	[1]	Halpin-Tsai Variable
$\mu_0$	[1]	Gleitreibungszahl
$\Delta l_x$	[mm]	Differenzbetrag unvollkommen geschlossenes Werkzeug
$\Delta s$	[mm]	Wegspanne
$\Delta t$	[s]	Zeitspanne
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte
$\mu_0$	[V*s/(A*m)]	Permeabilität des Vakuums
$\mu_K$	[1]	Nullstellen der Besselschen Funktion
$\mu_r$	[V*s/(A*m)]	Permeabilität
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Fläche
$a$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Konstante der Simon-Gleichung
$a$	[m <sup>2</sup> /s]	Temperaturleitfähigkeit
$B$	[mm]	Lagerbreite
$b_0$	[J/cm <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> K]	Wärmeeindringzahl Organoblech
$b_w$	[J/cm <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> K]	Wärmeeindringzahl Werkzeug
$c$	[1]	Konstante der Simon-Gleichung
$c_p$	[kJ/kg*K]	Spezifische Wärmekapazität
$D$	[mm]	Lagerdurchmesser
$d_{Lager}$	[mm]	Lagersitzdurchmesser innen
$d_{Loch}$	[mm]	Lochdurchmesser
$d_{LS-oben}$	[mm]	Durchmesser Lagersitz oben
$D_{LS-unten}$	[mm]	Durchmesser Lagersitz unten



$d_{OB}$	[mm]	Organoblechdicke
$E$	[MPa]	Elastizitätskennwert
$E_1$	[MPa]	Elastizitätskennwert in Faserrichtung
$E_2$	[MPa]	Elastizitätskennwert quer zur Faserrichtung
$f$	[1/s]	Frequenz
$F_{Aufweit}$	[N]	Kraft zum Aufweiten des Lagersitzes
$F_{max, Presse}$	[N]	Maximale Presskraft
$F_{Normal}$	[N]	Normalkraft
$F_{Press}$	[N]	Ausdrückkraft
$F_{Umform}$	[N]	Umformkraft
$F_v$	[%]	Faservolumengehalt
$F_{Zug}$	[N]	Zugkraft
$G_{12}$	[MPa]	Schubmodul
$H$	[J]	Enthalpie
$h_{LS}$	[mm]	Lagersitzhöhe
$I_{wirk}$	[A]	Einwirkende Stromstärke
$k$	[€]	Stückkosten
$k$	[1]	Laufvariable der Besselschen Funktion
$K_f$	[€]	Fixen Gesamtkosten
$k_v$	[€]	Variablen Kosten
$m$	[kg]	Masse
$n$	[1/min]	Drehzahl
$n_{max}$	[1/min]	Maximaldrehzahl
$p_0, p_1, p_2,$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Druck
$P_1, P_2$	[1]	Betrachtungspunkte auf dem Laminat
$P_{auf}$	[W]	Aufzubringende Leistung des Generators
$P_J$	[W]	Leistung durch Joulesche Erwärmung
$P_w$	[W]	Heizleistung
$Q$	[J]	Wärmemenge
$R$	[Ω]	Elektrischer Widerstand
$R_a$	[μm]	Mittenrauhwert
$R_{max}$	[μm]	Maximale Einzelrauhtiefe
$R_z$	[μm]	gemittelte Rauhtiefe

$s_1$	[mm]	Position Beginn der Umformbewegung (Werkzeug offen)
$s_2$	[mm]	Position Werkzeug geschlossen
$t$	[s]	Zeit
$t_0$	[s]	Zeitpunkt Werkzeug geschlossen
$t_1$	[s]	Zeit
$t_1$	[s]	Zeitpunkt zu Beginn der Umformung
$t_{A,1}$	[s]	Zeitpunkt Kontakt des Auslöserpins
$t_{A,2}$	[s]	Zeitpunkt Entriegelung des Auslöserpins
$T_c$	[°C]	Kristallisationstemperatur
$T_g$	[°C]	Glasübergangstemperatur
$t_{hz}$	[s]	Heizzeit
$T_K$	[°C]	Kontakttemperatur
$T_{K, Phase 1}$	[°C]	Kontakttemperatur Phase 1
$T_{K, Phase 2}$	[°C]	Kontakttemperatur Phase 2
$T_{K, Phase 3}$	[°C]	Kontakttemperatur Phase 3
$T_m$	[°C]	Schmelztemperatur
$T_O$	[°C]	Organoblechtemperatur
$t_{Umform}$	[s]	Umformzeit
$T_{vcmax}$	[°C]	Temperatur der maximalen Kristallisationswachstumsgeschwindigkeit
$T_W$	[°C]	Werkzeugtemperatur
$u_{ind}$	[V]	Induzierte elektrische Spannung
$V_\infty$	[mm <sup>3</sup> ]	Größtmögliches Volumen eines Thermoplasts
$V_{Ausgangsblech}$	[mm <sup>3</sup> ]	Volumen Ausgangsblech
$V_C$	[mm <sup>3</sup> ]	Volumen Kristalline Phase
$V_{Lagersitz}$	[mm <sup>3</sup> ]	Volumen Lagersitz
$Weg_x$	[mm]	Umformweg entgegengesetzt der Umformbewegung
$x$	[1]	Ausbringmenge
$x$	[mm]	Faserquerschnitt in Wärmeleitrichtung
$y$	[mm]	Faserquerschnitt quer zur Wärmeleitrichtung
$y_{OB}$	[mm]	Abstand von der Laminatmitte

$z$	[mm]	Laufvariable des Umformdorns zum Laminat
$z_K$	[mm]	Laufvariable Ende des Umformkegels
$z_{KL}$	[mm]	Laufvariable Ende des Kugellagers
$z_{x1}$	[mm]	Laufvariable des Punktes P1
$z_{x2}$	[mm]	Laufvariable des Punktes P2
$z_{Zyl}$	[mm]	Laufvariable Ende des zylindrischen Umformdorns
$\alpha$	[°]	Halber Spitzenwinkel des Umformdorns
$\alpha_m$	[K/bar]	Konstante der Simon-Gleichung
$\eta$	[m <sup>2</sup> /s]	Viskosität
$\varphi_F$	[%]	Faservolumengehalt
$\varphi_M$	[%]	Matrixvolumengehalt
$\lambda$	[W/(K*m)]	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_1$	[W/(K*m)]	Wärmeleitfähigkeit quer zur Faserrichtung
$\lambda_2$	[W/(K*m)]	Wärmeleitfähigkeit längs zur Faserrichtung
$\lambda_F$	[W/(K*m)]	Wärmeleitfähigkeit der Faser
$\lambda_M$	[W/(K*m)]	Wärmeleitfähigkeit der Matrix
$\nu$	[1]	Querkontraktionszahl
$\nu_{12}$	[1]	Querkontraktionszahl
$\xi$	[1]	Halpin-Tsai Variable

## Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CA	Celluloseacetat
CBT	Cyclische Butylenterephthalat
CF/PA66	Kohlenstofffaserverstärktes Polyamid 66
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DSC	Dynamisches Differenzkalorimeter

---

EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FKV	Faser-Kunststoff-Verbunde
GMT	Glasmattenverstärkte Thermoplaste
LCM	Liquid Composite Moulding
LFT	Langfaserverstärkte Thermoplaste
PA	Polyamid
PA 66	Polyamid 66
PA 6-GF30	Polyamid 6 mit 30 % Glasfaserverstärkung
PBT	Polybutylenterephthalat
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PET	Polyethylenerephthalat
PFA	Perfluoralkoxylalkan
PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
PS	Polystyrol
PSU	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
RTM	Resin Transfer Moulding
SAN	Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat
SB	Polystyrol schlagfest
TFC®	Tailored Flowable Composite Moulding
UD	Unidirektional

## Abstract

Within this thesis, a process technology has been developed that can enhance the field of application of continuous fibre reinforced thermoplastic polymer in the domain of fast-moving transmission components for mechanical engineering.

For the first time ever, inductive heating was deployed as the source of heat to thermoform carbon fibre reinforced thermoplastics. Hereby, the semi-finished product (CF-PA66) under examination was heated to deformation at two locally limited areas within less than 30 seconds. This local application of energy represents the foundation for the subsequent partial thermoform process, the aim of which is the simultaneous thermoforming of multiple mould cavities on a semi-finished product.

This procedure was coupled with the development of an idea for a tool for thermoforming with in-situ thickness variation, which enables an increase in the thickness of the semi-finished product of up to 200% in the defined area. Within this thesis, bearing carriers with a width of 6mm have been moulded into organic sheets with a thickness of 2mm without either adding material from an external source or externally introducing material to the process. In addition, a procedure to thermoform bearing carriers and simultaneously join metallic bearings has been developed. Furthermore, a model that defines geometrically-possible bearing dimensions in relation to the thickness of organic sheets has been set up.

The combination of redevelopment and enhancement of this process leads to a reduction in the process chain and therefore to a saving of time that results in a decrease in manufacturing costs.

The process chain was exemplarily mapped to a demonstrator component, a fast-moving take-up lever of an industrial sewing-machine. This thread take-up lever possesses two metallic grooved ball bearings that were moulded and joined simultaneously to a previously planed semi-finished product. The component testing resulted both in a net decrease in weight of 50 % compared to the existing aluminium alternative and a reduction of the acoustic emission of up to 1 dB(A). This can be ascribed to the high absorbability of the thermoplastic source material and demonstrates the huge potential of the carbon fibre reinforced thermoplastics in dynamically loaded components.



## 1 Einleitung

### 1.1 Das Marktpotenzial thermoplastischer Faser-Kunststoff-Verbunde

Durch ihre werkstofflichen Vorteile nehmen Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) einen immer größeren Stellenwert in allen Industriebereichen ein. Der Absatzmarkt stieg in den letzten Jahren stetig, wobei der Bereich mit kurz- bzw. langfaserverstärkten FKV, die in Spritz- bzw. Pressprozessen zu Bauteilen verarbeitet werden, derzeit den größten Marktanteil ausmachen. Ein Grund hierfür sind die niedrigen Verarbeitungskosten von z.B. 2 bis 4 € pro kg langglasfaserverstärkter Thermoplaste. Die Aufteilung des europäischen FKV-Marktes in seine Anwendungsbereiche aus dem Jahre 2004 sind in Bild 1.1 dargestellt.

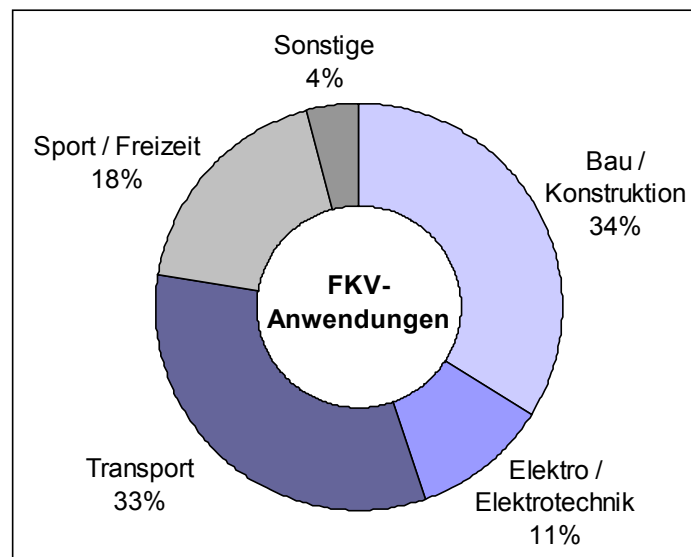


Bild 1.1: Verteilung des europäischen FKV-Marktes in seine Anwendungsbereiche 2004 [1]

Jeweils ein Drittel des Gesamtmarktes nehmen die Bereiche Transport und Bauwesen ein. Im restlichen Drittel dominieren der Sport und Freizeitbereich, sowie die Anwendungen in der Elektroindustrie. Nur ein sehr kleiner Teil (4 %) fällt unter Sonstiges, zu dem auch der klassische Maschinenbau zählt. Dieser, derzeit durch metallische Werkstoffe dominierende Bereich besitzt ein großes Potenzial für den Einsatz von FKV-Bauteilen oder -Baugruppen. Vor allem der Einsatz von FKV mit thermoplastischer Matrix erscheint durch seine hervorragende Schwingungsdämpfung im Vergleich zu Metallen geradezu prädestiniert. Erst mit dem Einsatz von endlosfaser-

verstärkten Materialien kann ein Verbundwerkstoff sein volles Leistungspotenzial ausschöpfen. Diese thermoplastischen endlosverstärkten Faser-Kunststoff-Verbunde erlangen durch ihre prozesstechnischen und werkstofflichen Vorteile (Tabelle 1.1) einen immer größeren Stellenwert in allen Industriebereichen.

Tabelle 1.1: Vorteile endlosfaserverstärkter thermoplastischer FKV [2, 3]

Werkstofflich	Prozesstechnisch
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Leichtbaupotenzial (geringe Dichte)</li> <li>▪ Hohe Steifigkeit bei hoher Duktilität</li> <li>▪ Recyclierbarkeit, Mehrfachverarbeitung</li> <li>▪ Gute Dämpfungseigenschaften (Schwingungsabsorption)</li> <li>▪ Maßschneiderung der Eigenschaften (z. B. Wärmeausdehnungskoeffizienten, elektrische Leitfähigkeit)</li> <li>▪ Hohe bzw. unendliche Lagerstabilität</li> <li>▪ Korrosionsbeständigkeit</li> <li>▪ Gute Schadenstoleranz</li> <li>▪ Hohes Energieabsorptionsvermögen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Großserientaugliche Verarbeitungsverfahren</li> <li>▪ Kurze Zykluszeiten</li> <li>▪ Hohe Tiefziehgrade in einem Umformschritt</li> <li>▪ Mehrfach umformbar</li> <li>▪ Schweißbarkeit, Reparatur</li> <li>▪ Dreidimensionale Formgebung</li> <li>▪ Geringe Arbeitsplatzbelastung durch Schadstoffe</li> </ul>

Durch ihre kurzen Herstellzykluszeiten sind die thermoplastischen FKV besonders für den Einsatz in Anwendungen mit großen Stückzahlen, wie z. B. in der Automobilindustrie geeignet. Deren Schwerpunkt liegt derzeit in der Verarbeitung von kurz- bzw. langfaserverstärkten Pressmassen. Soll hingegen das exzellente Leichtbaupotenzial von FKV stärker ausgenutzt werden, müssen im Werkstoff idealerweise kontinuierliche und gerichtete Fasern vorliegen. Solche stark gerichteten Strukturen können u. a. im duroplastischen Harzinjektionsprozess hergestellt werden. Die erreichbaren Zykluszeiten sind im Vergleich mit thermoplastischen FKV momentan noch nicht konkurrenzfähig. Um das Dilemma der gerichteten Fasern in thermoplastischen FKV zu umgehen, läuft der aktuelle Trend zu einer Kombination aus gezielten Direktblegens imprägnierter Faserbündel und anschließendem Verpressen in einem Schritt [4]. Jedoch kann eine hohe Faserorientierung auch mit dem klassischen Thermoformen von kontinuierlich faserverstärkten thermoplastischen Halbzeugen (Organoblechen) erreicht werden. Einsatzgebiete für diese Technologie in der Serie sind heute z. B. die Anwendung in Crashstrukturen im Bereich von Stoßfängerträgern [5].



Ein großes Potenzial bieten diese FKV im Bereich der Luftfahrtindustrie, in der sich der Kostendruck immer stärker bemerkbar macht [6, 7]. In den letzten Jahren wurde der klassische Flugzeugwerkstoff Aluminium immer mehr durch meist duroplastische FKV verdrängt [8, 9, 10]. Grund hierfür ist das größere spezifische Leichtbaupotenzial dieses Werkstoffes gegenüber den Metallen. In den nächsten Jahren wird der Anteil von FKV in zivilen Flugzeugen weiter ansteigen, was auch die Produktionskosten erhöhen wird. Diese Mehrkosten können durch die geringeren Betriebskosten der Flugzeuge, bedingt durch gesteigerte Nutzlasten bzw. größere Reichweiten amortisiert werden. Weitere Kostensenkungen könnten durch den Einsatz von kontinuierlich faserverstärkten thermoplastischen FKV mit ihren kurzen Herstellzykluszeiten und somit geringeren Bauteilkosten erzielt werden.

Das Thermoformen von thermoplastischen FKV wird bis dato für vielfältige Anwendungen in unterschiedlichen Prozessvarianten eingesetzt. Ausgangspunkt für den formgebenden Umformschritt sind meist voll konsolidierte Halbzeuge mit konstanter Dicke. Über das Umform- bzw. das Drapierverhalten dieser Halbzeuge existieren eine Vielzahl von Untersuchungen sowie einzelne Simulationsprogramme [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Die Schwerpunkte in der Prozessbetrachtung liegen in der durch die Faserarchitektur determinierten, herstellbaren Geometrie, der Vorhersage von Aufdickungen im Material durch faserarchitektonische Verschiebungen, der Betrachtung von Eigenspannungen und des daraus resultierenden Geometrieverzugs, sowie der Temperaturführung während des Prozesses.

Allen Untersuchungen gemeinsam ist die geometrische Form der betrachteten Bauteile, die sich vor allem auf Winkel und Winkelkombinationen bzw. Halbschalen beschränkt. Sollen funktionale Dickenvariationen im Bauteil z. B. zur Kraffteinleitung realisiert werden, so kann das einerseits durch Aufbringen einer gleichartigen Verstärkungslage bzw. eines Verstärkungselements im Tailord-Blanks-Verfahren geschehen [18], oder durch Kombination des Thermoformprozesses von Organoblechen mit fließ- bzw. spritzfähigem Material. Allen gemeinsam ist dabei ein zusätzlicher Prozessschritt.

## **1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung**

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel die beim klassischen Thermoformen durch das Halbzeug und den Umformgrad determinierte Bauteildicke definiert und lokal in-

situ zu beeinflussen. Hierzu muss ein Thermoformprozess entwickelt werden, der aufbauend auf einer lokalen Erwärmung ein partielles Thermoformen von endlosfaserverstärkten Thermoplasten ermöglicht. Dieser Prozess soll einerseits durch eine gezielte Umorganisation der gerichteten Faserstrukturen zu einer Materialdickenerweiterung führen. Andererseits auch die Möglichkeit zur gleichzeitigen Umformung mehrerer, von der Drapierung unbeeinflusster Formnester auf einem Halbzeug realisieren.

Zur Einbringung der lokalen Wärmeenergie in das kohlenstoffaserverstärkte Halbzeug wird das induktive Erwärmen eingesetzt und analysiert. Anhand einer Beispielanwendung kann die Funktionsintegration eines nachgeschalteten Fügeprozesses zu einem Ein-Schritt-Prozess untersucht und daraus ein allgemeines Modell zur Realisierung möglicher Geometrien aufgestellt werden.

In Summe könnte die Realisierung bisher nicht umformbarer Geometrien zur Erweiterung des Produktportfolios von endlosfaserverstärkten Thermoplasten beigetragen. Durch die Integration zweier Prozessschritte lässt sich die Gesamtprozesskette verkürzen (vgl. Bild 1.2), so dass Herstellkosten eingespart werden können [19, 20].

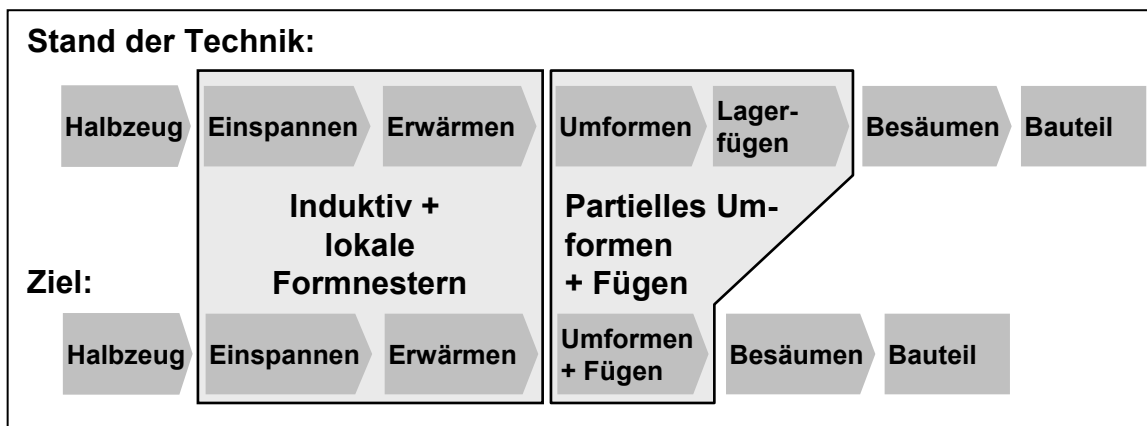


Bild 1.2: Prozesskettenoptimierung des Thermoformprozesses

Die methodische Realisierung dieses Vorhabens zeigt das Schema in Bild 1.3.

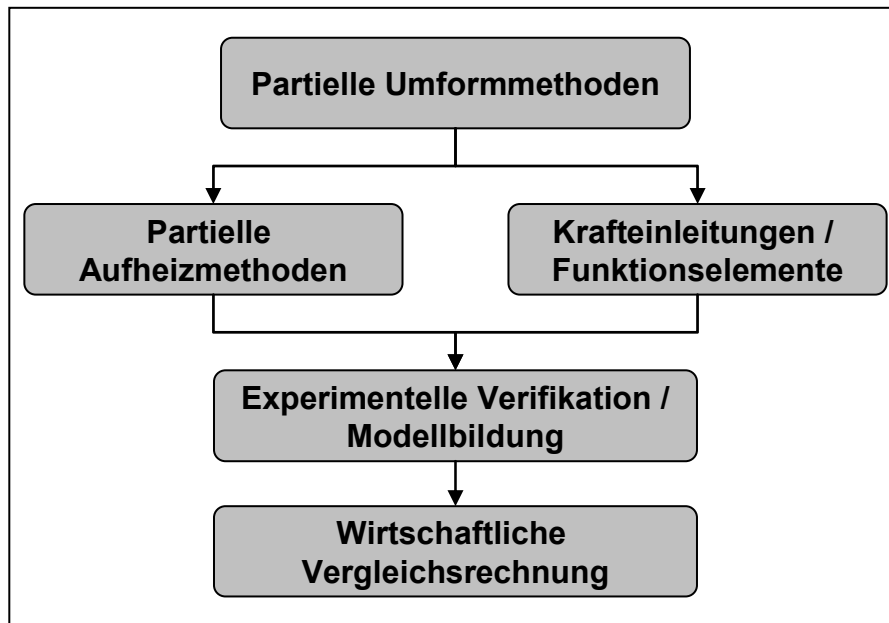


Bild 1.3: Methodik der Prozessanalyse zum partiellen Thermoformen endlosfaserverstärkter Thermoplaste

Ausgehend von der Analyse einer möglichen partiellen Umformmethoden werden in Kapitel 2.3 die realisierbaren partiellen Aufheizmethoden bewertet und das induktive Erwärmen als ein innovatives Verfahren näher betrachtet. Die Möglichkeit der Funktionsintegration von Krafteinleitungs- bzw. Funktionselementen wie z. B. Lager sind in einem getrennten Kapitel dargelegt und die geometrischen und thermischen Verfahrensgrenzen aufgezeigt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden am Beispiel eines Getriebebauteils experimentell verifiziert und ein Modell zur Verfahrensauslegung vergleichbarer Demonstrationsbauteile aufgebaut. Abschließend folgt eine wirtschaftliche Bewertung der Verfahrenskombination des lokalen Umformens und der Funktionsintegration.



## 2 Stand der Technik endlofaserverstärkter Thermoplaste

Endlofaserverstärkte Thermoplaste werden durch ihre material- und verarbeitungsspezifischen Vorteile immer häufiger in unterschiedlichen Industriezweigen eingesetzt. Im Luftfahrtbereich sind bereits verschiedene strukturelle Flugzeugbauteile aus diesen Materialien hergestellt [21, 22]. Im Automobilbereich werden bisher vor allem kurz- und langfaserverstärkte Thermoplaste für die Fertigung von Behältern, Abdeckungen, Frontends oder Bauteilen im Innenraum verwendet [23, 24, 25]. Im Vergleich zu endlofaserverstärkten Duroplasten haben die endlofaserverstärkten Thermoplaste folgende Vorteile: Sie sind lagerbar, schlagzäher und benötigen kürzere Zykluszeiten in der Verarbeitung. Zusätzlich zeigen die endlofaserverstärkten Thermoplaste ein höheres Recyclingpotenzial als duroplastische Werkstoffe (vgl. Tabelle 1.1). Dies ist von besonderem Interesse in Hinblick auf die Altautoverordnung, welche ab 2015 die Forderung nach einer 95 % Wiederverwertbarkeit beinhaltet [26]. Nachteile der endlofaserverstärkten Thermoplaste sind ihre geringe Formbeständigkeit bei höheren Temperaturen, der meist höhere Marktpreis und die bei einigen Thermoplasten vorhandene Feuchtigkeitsaufnahme [27].

### 2.1 Prozesskette endlofaserverstärkter Thermoplaste

Die Prozesskette zur Herstellung von thermoplastischen Bauteilen mit Endlofaserverstärkung zeigt Bild 2.1. Ausgangsprodukt aller Prozesse ist die Verstärkungsfaser sowie die thermoplastische Matrix. Diese werden in einem nachgeschalteten Verarbeitungsschritt zu einem Faser-Kunststoff-Verbund-Halbzeug vereint. Die vollständig imprägnierten Halbzeuge stellen die Ausgangsbasis für den anschließenden Verarbeitungsprozess dar und können in Form von Bändern (thermoplastische Tapes), ebenen Halbzeugen (Organoblechen) sowie durch den Einsatz der Pultrusions- oder Intervallheißpresstechnik in Form von Profilen vorliegen [28, 29, 30, 31]. Die Qualität dieser Ausgangsprodukte wirkt sich entscheidend auf die spätere Bauteileigenschaften aus, da bei den anschließenden Verarbeitungsprozessen eventuelle Fehlstellen in der Faserimprägnierung, bedingt durch die zeitlich begrenzte Verweildauer bei hohen Temperaturen und Drücken, nicht behoben werden können [32]. Je nach Art des Halbzeugs knüpfen sich unterschiedliche Weiterverarbeitungsprozesse an. Einzelne Tapes können im Wickelprozess zu rotationssymmetrischen oder mittels flexibler

Tapelegeeinheiten zu dreidimensionalen oder flächigen Bauteilen weiterverarbeitet werden [33, 34, 35]. Das Tapelegen findet auch zur Herstellung von vorkonfektionierten Halbzeugen beim Thermoformen Anwendung, wobei die Tapes in diesem Prozess nicht vollständig miteinander konsolidiert sein müssen, was die Ablegeschwindigkeit erhöht. Das Ziel ist eine Reduzierung des Verschnittes bei einer gleichzeitigen hohen Faserorientierung [36].

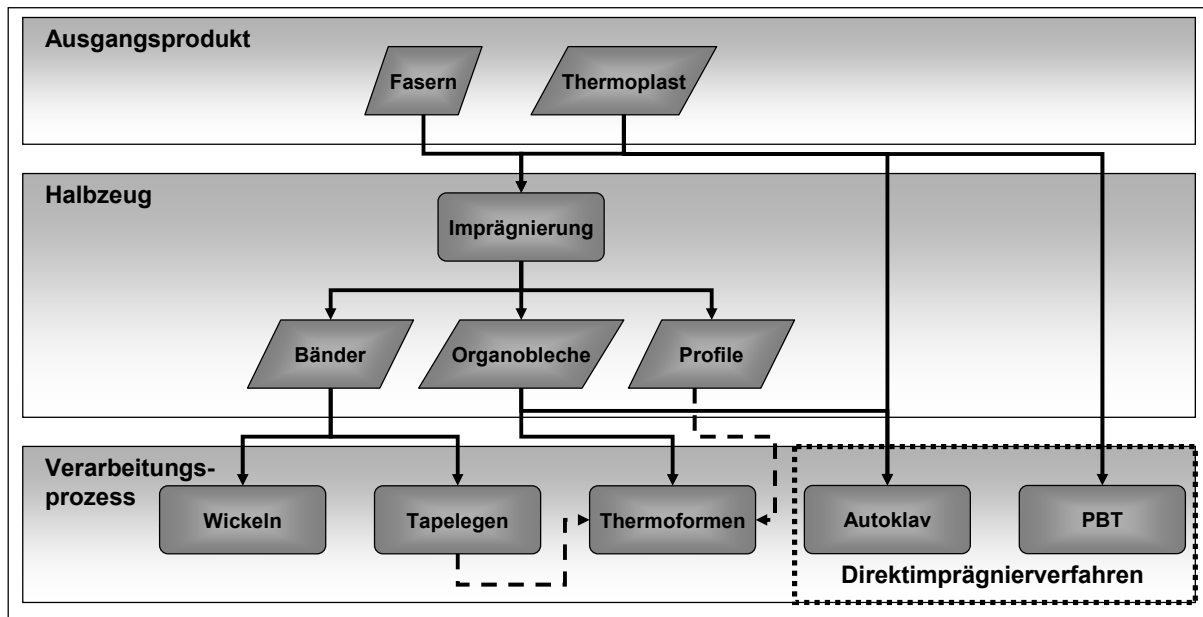


Bild 2.1: Prozesskette endlosfaserverstärkter Thermoplaste

Der erste Schritt stellt die Herstellung des kontinuierlich faserverstärkten Ausgangsmaterials (Organoblech) dar und ist dem eigentlichen Verarbeitungsprozess vorgelagert. Die Veredelung bzw. Weiterverarbeitung dieser ebenen Halbzeuge zu dreidimensionalen Bauteilen wird durch einen Thermoformprozess realisiert. Die Prozesskette zur Herstellung von schaligen Bauteilen ist in Bild 1.2 dargestellt.

Eine Sonderstellung in den Verarbeitungsprozessen nehmen die Direktimprägnierverfahren ein, die ohne Halbzeugvorproduktion auskommen und somit die Gesamtzykluszeit reduzieren. Vor allem in der Thermoplastinjektion wird ein großes Zukunftspotenzial gesehen. Dieses Verfahren erlaubt die hohe Form- und Designfreiheit des duroplastischen LCM-Prozesses (Liquid Composite Moulding) mit den Vorteilen der Thermoplaste zu vereinen [37]. Während des Prozesses werden CBT-Kunststoffe zu einer niederviskosen Schmelze erwärmt und unter Einwirkung eines

Katalysators in den thermoplastischen Polyester Polybutylenterephthalat (PBT) umgewandelt [38].

## 2.2 Thermoplastische Halbzeuge

### 2.2.1 Thermoplastische Matrixsysteme

Die Thermoplaste bilden neben den Elastomeren und Duromeren eine der drei Kunststoffklassen (Bild 2.2) und stellen mit ca. 80 % der Gesamtproduktion den größten Teil der industriell gefertigten Polymere dar. Durch die relative Anordnung der einzelnen Polymere zueinander werden die Thermoplaste in amorphe und teilkristalline Kunststoffe spezifiziert. Teilkristalline Thermoplaste besitzen eine stärkere Anordnung der einzelnen Polymerketten zueinander, wobei diese Ausbildung von der Art, Größe und Regelmäßigkeit der Anordnung der Substituenten sowie von der thermischen Beanspruchung abhängt. Je länger und je unregelmäßiger (ataktischer) die Polymerketten sind, desto geringer ist die Ausbildung von teilkristallin angeordneten Bereichen [27].

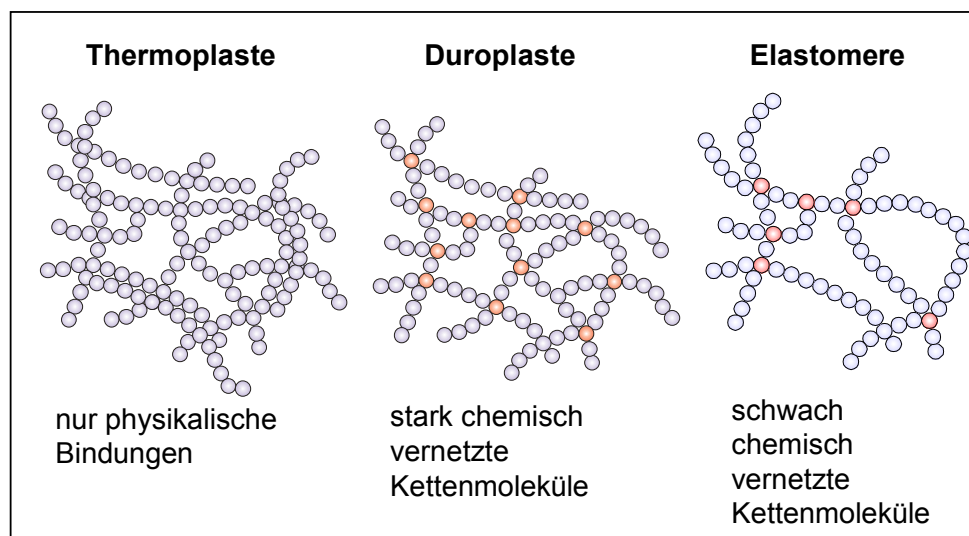


Bild 2.2: Einteilung der Kunststoffe in die drei Kunststoffklassen [39]

Da Polymere praktisch nie vollständig kristallisieren, treten neben stark angeordneten Bereichen auch amorphe auf. Als Maß für den Volumenanteil der kristallinen Phase innerhalb eines kristallisierbaren Stoffes dient der Kristallisationsgrad  $\xi$ , der als Volumenverhältnis zwischen der kristallinen Phase  $V_C$  zum größtmöglichen Vo-

lumenanteil  $V_\infty$  eines Thermoplastes nach unendlich langer Zeit definiert ist (vgl. Gleichung 2.1) [40].

$$\xi = \frac{V_C}{V_\infty} \quad (2.1)$$

Je nach Art des Kunststoffes und thermischer Vorbelastung besitzen die teilkristallinen Kunststoffe unterschiedliche Kristallisationsgrade, so variiert der Kristallisationsgrad von Polyamid 66 (PA 66) zwischen 35 – 45 %, der von Polypropylen (PP) zwischen 60 – 70 % [27].

Hinsichtlich der Verarbeitung unterscheidet sich die kristalline sowie die amorphe Phase grundlegend in ihrem thermischen Verhalten und in ihrer Verarbeitung (vgl. Kapitel 3.4).

In thermoplastischen Halbzeugformen können im Prinzip alle Arten von Thermoplasten eingesetzt werden. Man unterscheidet grob zwei Arten:

- **Thermoplastische Massenkunststoffe**
- **Thermoplastische technische, bzw. Konstruktionskunststoffe**

Unter den Massenkunststoffen werden die vier Hauptkunststoffarten Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC) und Polystyrol (PS) zusammengefasst. Diese machen ca. 85 % der gesamten Thermoplastherzeugung aus. Sie zeichnen sich durch eine kostengünstige Herstellung, geringen Einsatztemperaturen (in der Regel unter 100 °C) und zu technischen Kunststoffen vergleichsweise geringeren mechanischen Eigenschaften aus. Zur Herstellung von leistungsfähigen thermoplastischen Halbzeugen führt hingegen kaum ein Weg an den technischen Kunststoffen wie z. B. Polyamid (PA), Polybutylenterephthalat (PBT), Polycarbonat (PC) Polyphenylensulfid (PPS), Polyetheretherketon (PEEK), Polymethylmethacrylat (PMMA) etc. vorbei. Diese Kunststoffe besitzen gegenüber den Massenkunststoffen Vorteile hinsichtlich der Zähigkeits-, Langzeit-, Warm- und Dauerfestigkeit sowie des Gleit- und Verschleißverhaltens. Bei diesen Werkstoffen muss mit einem höheren Marktpreis von mehreren Dekaden im Vergleich zu den kostengünstigsten Massenkunststoffen gerechnet werden (Bild 2.3).



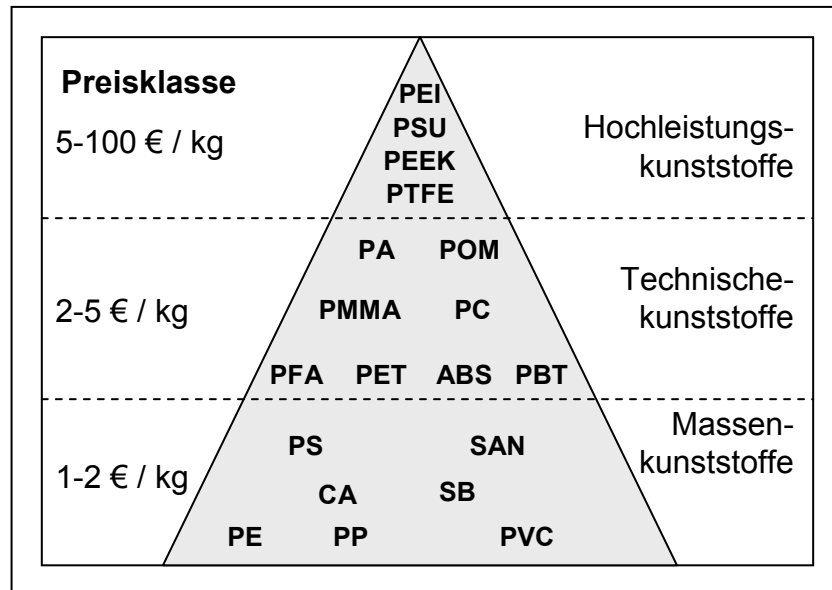


Bild 2.3: Einteilung der thermoplastischen Kunststoffklassen anhand der Marktpreise [41]

### 2.2.2 Verstärkungsfasern

Je nach Anwendungsfall können unterschiedliche Verstärkungsfasern in einem FKV eingesetzt werden, wobei neben der technologischen Performance ebenso die Wirtschaftlichkeit in die Auswahl mit einbezogen wird [42]. Zur kontinuierlichen Faserverstärkung werden heute standardmäßig Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern verwendet. Eine Auflistung der wichtigsten Materialkennwerte der einzelnen Fasertypen zeigt Tabelle 2.1. Eine Sonderstellung nehmen die eigenverstärkten FKV ein, die hinsichtlich der maximal möglichen Festigkeitswerte hinter den Standardfasertypen liegen. Durch ihr Ein-Stoff-System zeigen sie ein ausgezeichnetes Recyclingverhalten [43]. Weiterhin besitzen diese FKV in ihrer Verarbeitung im Thermoformprozess sowie im Tieftemperaturverhalten Vorteile, die derzeit durch das marktpreisspezifische Leichtbaupotenzial relativiert werden.

Tabelle 2.1: Eigenschaften von Verstärkungsfasern

Faser	E-Glasfaser	Kohlenstofffaser	Aramidfaser
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	2,6	1,8 – 2,2	1,44
Zugfestigkeit [MPa]	3400	2700 – 3600	2760
E-Modul [GPa]	73	200 - 380	62 - 124
Bruchdehnung [%]	3 - 4	0,3 – 1,8	2,5 - 4
Durchmesser [µm]	10 - 14	5 – 10	12

Den mit Abstand größten Marktanteil der Verstärkungsfasern aller FKV nehmen die Glasfasern ein [44]. Für Kohlenstofffasern wird in den nächsten Jahren eine Nachfragesteigerung von 13 % pro Jahr erwartet (vgl. Bild 2.4). Die treibende Kraft im Markt ist nicht die Luftfahrtindustrie, sondern die Erweiterung der Anwendungsbereiche und die Substitution metallischer bzw. glasfaserverstärkter FKV Strukturen bei der industriellen Anwendung, wie z. B. Windenergieanlagen, Druckbehälter, Automobil, Elektronikbauteilen und dem allgemeinen Maschinenbau.

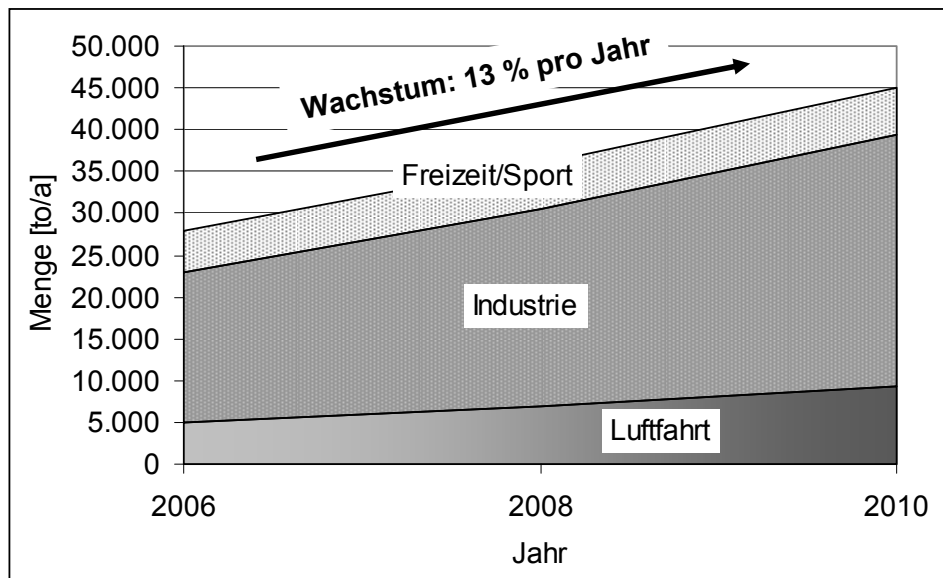


Bild 2.4: Nachfrageprognose für Kohlenstofffasern nach Industriezweige [45, 46]

### 2.2.3 Herstellprozesse

Den Herstellprozess von kontinuierlich faserverstärkten thermoplastischen Halbzeugen (Organoblechen) unterscheidet man in die folgenden drei Phasen [32]:

- Imprägnierung
- Konsolidierung
- Solidifikation

Während der Imprägnierungsphase wird die Matrix durch Temperaturerhöhung in einen fließfähigen Zustand überführt. In der zweiten Phase findet unter Druck die Konsolidierung des Faserkunststoffverbundes statt, indem die niederviskose Matrix in die Rovingzwischenräume hineingepresst wird und ein porenfreies Gefüge mit einer guten Faser-Matrixanbindung entsteht. Die letzte Phase ist die Abkühlphase, bei der das Material durch einen möglichst homogenen Temperaturabtrag zu einem gebrauchsfähigen Halbzeug abkühlt. Die Herstellung kann durch die in Bild 2.5 dargestellten Pressprozesse realisiert werden, wobei die realisierbare Ausbringungsmenge pro Zeiteinheit mit den notwendigen Anlagenkosten korreliert.

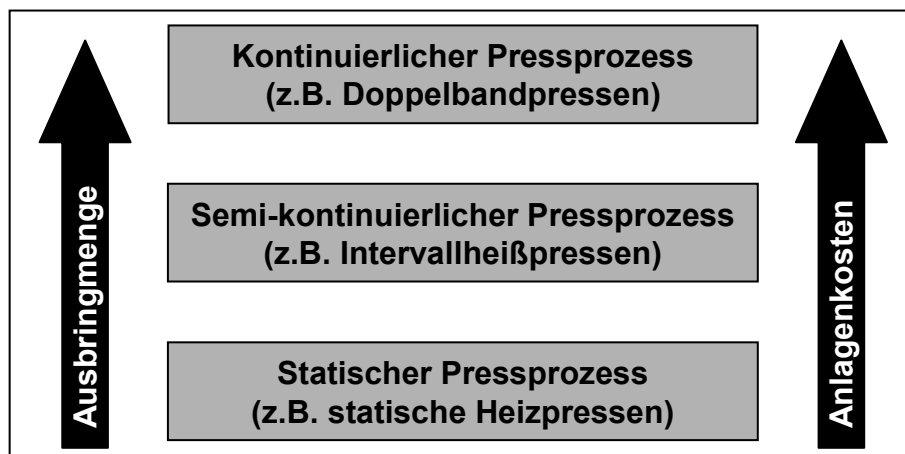


Bild 2.5: Pressprozesse zur Herstellung von Organoblechen

Auf dem Markt werden von mehreren Herstellern eine Vielzahl von Kombinationsvarianten aus Matrix und Faserverstärkung angeboten. In [32] ist eine Auflistung einiger Anbieter gegeben.

### 2.3 Halbzeugaufheizverfahren

Bei der Verarbeitung thermoplastischer FKV ist die Verarbeitungstemperatur des Laminats entscheidend. Diese sollte beim globalen Aufheizen konstant über der gesamten Halbzeugfläche verteilt vorliegen, was durch unterschiedliche Heizstrategien erreicht wird.

Bei allen Aufheizstrategien ist darauf zu achten, dass das Polymer schnell auf Verarbeitungstemperatur gebracht wird und nur eine kurze Zeit auf Verarbeitungstemperatur verweilt, da sonst die thermische Degradationen des Polymers einsetzt (vgl. Bild 2.6) [47].

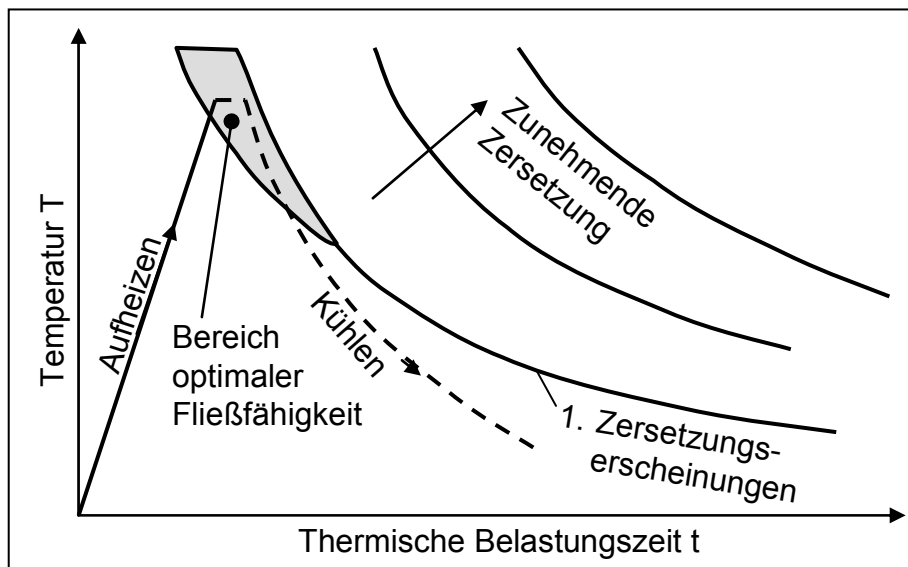


Bild 2.6: Temperatur-Verweilzeitdiagramm von reagierenden Formmassen [48]

Der Schmelzvorgang bei thermoplastischen Polymeren ist theoretisch ein rein physikalischer und somit reversibler Prozess, welcher in der Praxis durch irreversible chemische Prozesse überlagert wird. Letzteres geschieht durch die Oxidation mit Sauerstoff bei dem Kontakt der Schmelze mit dem Luftsauerstoff sowie durch den im Polymer gelösten Sauerstoff (Autooxidation).

Daher soll ein hoher Wärmestrom von der Wärmequelle in das Laminat erfolgen. Dieser Wärmeeintrag kann durch folgende, stoffgebundene sowie -ungebundene Energietransportvorgänge erfolgen [49]:

- Wärmeleitung
- Wärmekonvektion
- Wärmestrahlung

In der Praxis kommt es bei den unterschiedlichen Aufheizstrategien zu Kombinationen aus den verschiedenen Energietransportmethoden, was bei der theoretischen Betrachtung der notwendigen Energiemenge berücksichtigt werden muss [50].

### 2.3.1 Heißgas

Beim Heißgasverfahren erfolgt der Wärmeeintrag in das Halbzeug durch die erzwungene Konvektion eines um das Halbzeug strömenden, temperierten Gasstromes (Bild 2.7). Als Energietransportmedium wird entweder aufgeheizter Stickstoff oder Luft verwendet. Da Gase eine geringe Wärmekapazität besitzen ( $c_p \cong 1$ ) und der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Gas und Halbzeug relativ klein ist, ergibt sich eine geringe Aufheizgeschwindigkeit des Laminats sowie eine niedrige, maximal erreichbare Halbzeugtemperatur. Eine Erhöhung des Energieeintrags kann durch eine höhere Gastemperatur oder durch eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit erreicht werden. Hierbei können die auftretenden Gasturbulenzen zu einer Schädigung des Halbzeugs führen. Die technologischen Vorteile des Verfahrens sind in der homogenen Wärmeverteilung des Gasstroms und der daraus resultierenden Verteilung im Halbzeug zu sehen. Des Weiteren kann durch eine inerte Umgebung z. B. unter Stickstoff, die Degradation des Polymers verringert werden. Das Verfahren bietet prozesstechnisch die Möglichkeit zur Aufheizung mehrerer Laminare in einem kontinuierlichen Durchlaufofen.

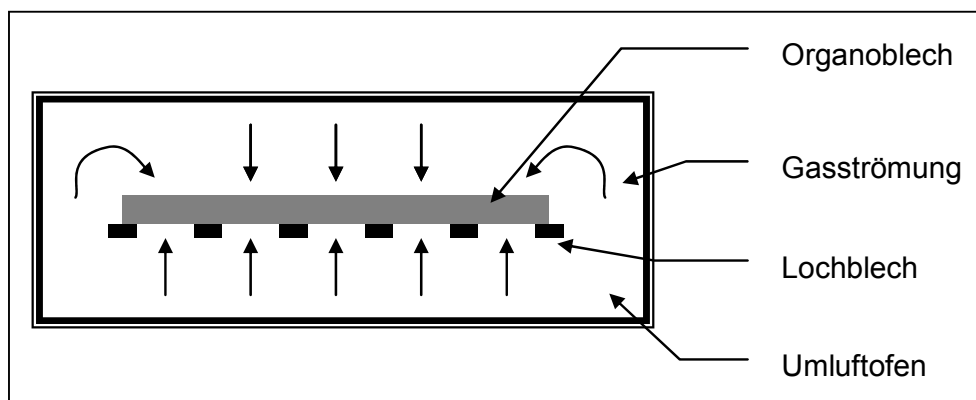


Bild 2.7: Heißgasverfahren

Für den Einsatz beim partiellen Thermoformen ist dieses Aufheizverfahren nur bedingt geeignet, da beim Abgleiten des Gasstroms die benachbarten Regionen des Halbzeugs mit aufgeheizt werden, vgl. Bild 2.8.

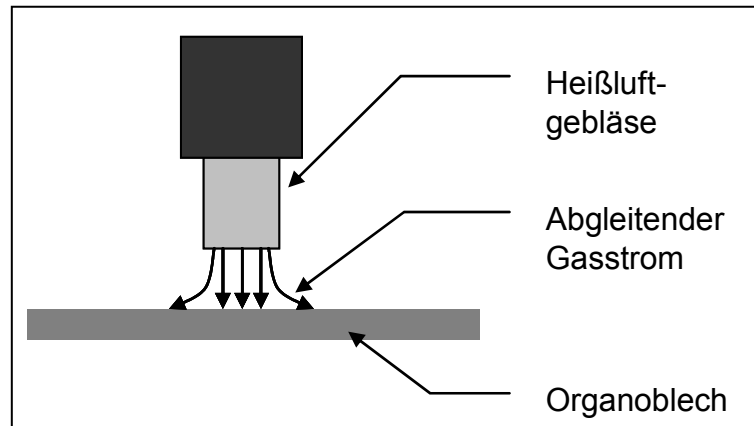


Bild 2.8: Schematischer Aufbau zum lokalen Aufheizen mittels Heißgas

### 2.3.2 Kontakt

Bei der Kontaktheizung erfolgt der Wärmetransport ausschließlich über die Wärmeleitung. Das zu erwärmende Laminat wird zwischen zwei metallische Heizplatten positioniert und leicht angepresst, um den thermischen Übergangswiderstand zu verbessern. Die polymerabhängige Aufheizzeit hängt von den Ausgangstemperaturen, den spezifischen Wärmekapazitäten, den Wärmeleitfähigkeiten der Heizplatten und des Halbzeugs sowie der Halbzeugdicke ab [51]. Durch die geringe Wärmekapazität der metallischen Heizplatten gegenüber der thermoplastischen Matrix (vgl. Tabelle 4.4) besitzt dieses Verfahren eine sehr exakte Temperaturregelung, die Überhitzungen des Laminats verhindert. Problematisch ist die Adhäsion der Thermoplaste, die mit steigender Temperatur zunimmt und zu einem Anhaften der Polymergrenzschichten an den Heizplatten führt. Durch Einsatz eines Trennmittels kann dies verringert werden.

Mit seinem gezielten und hohen Wärmeeintrag eignet sich dieses Verfahren sehr gut zum lokalen Erwärmen von dünnen Laminaten.

### 2.3.3 Infrarot- oder Wärmestrahlung

Ein sehr effizientes Aufheizverfahren für Organobleche ist die Strahlungserwärmung durch Infrarotstrahlung. Hierbei findet die Energieübertragung kontaktfrei über Wärmestrahlung elektromagnetischer Wellen im Spektralbereich zwischen sichtbarem Licht und der langwelligeren Mikrowellenstrahlung statt, was einem Wellenlängenbereich von etwa 780 nm bis 1 mm entspricht. Der für die technische Erwärmung nutzbare Bereich liegt zwischen 800 nm und etwa 6  $\mu\text{m}$ . Durch das gute Absorptions-

spektrum der thermoplastischen Matrix und die raue Oberfläche absorbieren Organobleche hohe Energiemengen. Die elektromagnetischen Wellen regen dabei die Polymermoleküle an, die durch Reibung untereinander das Polymer erwärmen. Der erreichbare Wärmeeintrag hängt dabei wesentlich von der Wellenlänge und dem Absorptionsvermögen des Polymers, welches sich im Wellenlängenbereich von 2  $\mu\text{m}$  bis 15  $\mu\text{m}$  bewegt, ab. Um einen höchstmöglichen Energieeintrag zu erreichen, muss sich die Wellenlänge der Strahler an den Absorptionsgrad des Polymers richten. In [52] wurde eine Änderung des Absorptionsgrades von 29 % bei einer Wellenlänge von 2,1  $\mu\text{m}$  auf bis zu 87 % bei 2,3  $\mu\text{m}$  ermittelt<sup>1</sup>. Je nach Wellenlänge kann die Strahlung bis zu einigen zehntel Millimeter in das Laminat eindringen und durch Wärmeleitung die unteren Schichten erwärmen.

Zum flächigen Aufheizen wird das Halbzeug in einen Spannrahmen befestigt und komplett aufgeheizt (vgl. Bild 2.9 a). Die Strahlungserwärmung kann durch den Einsatz von Abdeckungen und Masken (vgl. Bild 2.9 b) oder durch spezifisch konfigurierten Strahlungsquellen (vgl. Bild 2.9 c) zum lokal begrenzten Wärmeeintrag verwendet werden.

<sup>1</sup> Untersuchungsmaterial: Twintex TPP60 745 AF100

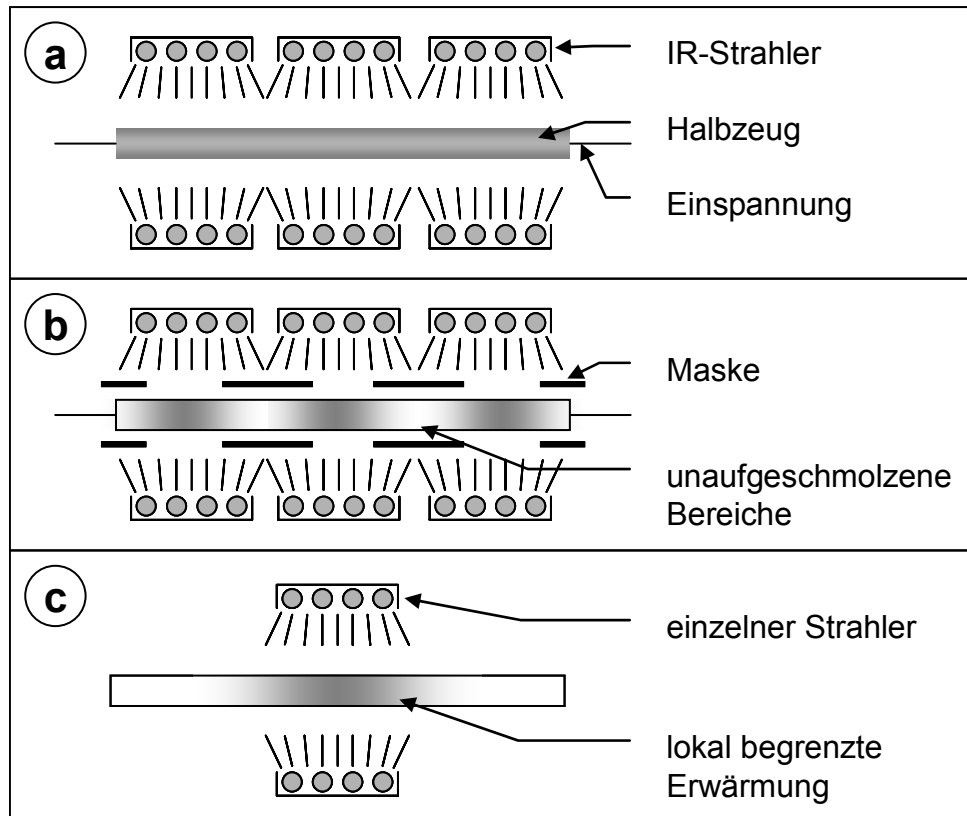


Bild 2.9: Varianten der Strahlungserwärmung  
 a) komplettes Aufheizen des Halbzeugs  
 b) selektives Aufheizen durch eine Maske  
 c) lokales Aufheizen mit spezifisch konfigurierten Strahlern

In [51] wurde ein Modell zur Berechnung der erforderlichen Aufheizzeit beim Einsatz der Infrarotstrahlung aufgestellt. Der vom Halbzeug absorbierte Wärmestrom  $\dot{q}_0$  hängt von mehreren Material- und Prozessfaktoren ab, die nur durch aufwendige Messungen bestimmt werden können. Deshalb werden in der Praxis häufig empirische Parametereinstellungen für eine optimale Erwärmung gewählt.

Durch den schnellen Energieeintrag und die robuste Technik eignet sich diese Erwärmungsmethode besonders zum flächigen Aufheizen der Lamine vor dem Thermoformen. Zusätzlich werden Linienstrahler zum lokalen Aufheizen beim Abkanten eingesetzt.

### 2.3.4 Laser

Um große Wärmemengen in kurzer Zeit in einen kleinen Bereich einzubringen kann ein Laser als Energiequelle eingesetzt werden. Durch seine räumliche Kohärenz ist die Laserstrahlung hoch intensiv und exakt fokussierbar, erwärmt aber nur die obe-



ren Schichten des FKV-Werkstoffes. Zwar kann bei unterschiedlichen Polymeren in Abhängigkeit der Absorptionzahl eine starke Tiefenwirkung erreicht werden, jedoch behindern bei mehrlagigen Organoblechen die Fasern eine Tiefenfokussierung. Die Erwärmung in Dickenrichtung erfolgt analog den vorher aufgeführten Verfahren durch Wärmeleitung, wobei sich durch den hohen Energieeintrag an der Oberfläche ein größerer Temperaturgradient im Werkstoff ausbildet. Dies führt zu einer Reduzierung der maximal möglichen erwärmbaren Laminatdicke, weshalb die Lasertechnologie als Wärmequelle bei der Verarbeitung von FKV ausschließlich bei vollständig konsolidierten einlagigen Tapes im Wickel- bzw. Tapelegeprozess und zum Laserschweißen Verwendung findet [53, 54, 55].

Bei dem partiellen Erwärmen zum Thermoformen ist die Lasertechnologie nur bedingt einsetzbar, da es beim Aufschmelzen von mehrlagigen Laminaten auf einer Fläche von mehreren Quadratzentimetern durch die hohen Anlagekosten und die nur geringe Tiefenwirkung wirtschaftlich unrentabel ist.

### **2.3.5 Mikrowelle**

Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich von 0,3 GHz bis 300 GHz (Wellenlänge von 1 mm bis zu 1 m), die nach den Gesetzen von Maxwell [56] reflektiert oder gebrochen werden und auch interferieren können. Von Metallen und elektrisch leitenden Materialien werden sie reflektiert und nur im geringen Maße absorbiert.

Die Erwärmung mittels Mikrowellen erfolgt durch dielektrische Verluste innerhalb der Materialien und ist nur für elektrisch nicht leitende Materialien geeignet, weshalb kohlenstofffaserverstärkte Halbzeugen ungeeignet sind. Einige Thermoplaste (z. B. PTFE) besitzen eine zu geringe Absorptionseigenschaft, um durch Mikrowellen erwärmt zu werden.

Einsatzgebiete der Mikrowellenerwärmung finden sich beim Aushärten von Klebstoffen oder bei der beschleunigten Aushärtung des Harzinjektionsprozesses [57, 58, 59]. Durch die notwendige Abschirmung der Mikrowellenstrahlung während des Prozesses und die somit komplette Integration des Halbzeugs in die Aufheizvorrichtung bietet sich das Mikrowellenverfahren zur partiellen Aufheizung eines Laminates nicht an.

### 2.3.6 Induktive Erwärmung

Unter elektromagnetischer Induktion wird das Entstehen einer Spannung bzw. eines Stromes zwischen den zwei Enden eines Leiters in einem veränderlichen magnetischen Feld definiert. Dabei ist es unerheblich, ob sich der Leiter bewegt oder ob sich das Magnetfeld verändert [60]. Der innere elektrische Widerstand eines induzierten Leiters erzeugt dabei eine Wärmeentwicklung, die zum Aufschmelzen der Polymermatrix innerhalb eines Laminats zur Verfügung stehen kann.

Bei der Hochfrequenzerwärmung wird das Prinzip der gegenseitigen Induktion von Leitern genutzt. In einer Primärspule, dem Induktor, wird durch Wechselstrom ein hochfrequentes magnetisches Feld erzeugt. Dieses magnetische Feld induziert in den leitenden Sekundärspulen (dem Laminat) elektrische Wechselströme, die als Wirbelströme bezeichnet werden [61]. Im Gegensatz zur Primärspule sind bei der Sekundärspule die Widerstandsverluste gewünscht und werden zur Erwärmung des Laminates eingesetzt. Bei ferromagnetischen Materialien kommen zusätzlich Hystereseverluste hinzu, die mit steigender Frequenz an Bedeutung verlieren [62]. Eine Verstärkung der Erwärmung ist durch die Erhöhung des Eingangsstromes möglich. Dem sind jedoch Grenzen durch die Eigenerwärmung der Induktoren gesetzt, weil damit gleichzeitig die Stromdichte stark ansteigt.

Entscheidende Parameter für den Energieeintrag sind die Frequenz und die Stromstärke der Wechselspannung, sowie der Abstand des Induktors zur Sekundärspule bzw. zum Laminat.

Die Wirbelströme verursachen innerhalb des Leiters aufgrund seines spezifischen Widerstandes eine Joulesche Erwärmung. Dabei gilt für die im Laminat umgesetzte Leistung  $P_J$  der Zusammenhang:

$$P_J = R_{\Omega} \cdot I_{\text{wirk}}^2 \quad (2.2)$$

Innerhalb der Eindringtiefe entstehen Wärmequellen, die durch Wärmeleitung zu einem Temperaturanstieg im Laminat führen. Das Erwärmungsverhalten lässt sich über die Fourier-Gleichungen für instationäre Wärmeleitung berechnen. Dabei sind die spezifische Wärmekapazität, die Dichte sowie die Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Materials von entscheidender Bedeutung.

Die für die Erwärmung einer Materialzone notwendige Wärmemenge  $Q$  errechnet sich mit folgender Formel [62] aus der Masse  $m$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  und dem Zeitintervall  $(t_2 - t_1)$ .

$$Q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \quad (2.3)$$

Unter Berücksichtigung der Heizzeit  $t_{hz}$  beträgt die Leistung im Werkstück:

$$P_w = \frac{Q}{t_{hz}} \quad (2.4)$$

Eine näherungsweise Betrachtung der benötigten Leistung zum Schmelzen einer definierten Materialmenge setzt zudem eine Abschätzung der übertragenen Wirkleistung des Induktors voraus. Diese Wirkleistung wird durch Vergrößerung des Abstandes zwischen dem Induktor und der Erwärmungszone reduziert. Auch die Wärmekapazität  $c_p$  kann nicht als konstant angenommen werden, da die notwendige Schmelzwärme berücksichtigt sein muss. Eine genäherte Abschätzung der aufzubringenden Leistung ermöglicht folgende Gleichung, die auch den Wirkungsgrad  $\eta_{Gen}$  des Generators beinhaltet.

$$P_{auf} = \frac{m \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1)}{\eta_{Gen} \cdot t_{hz}} \quad (2.5)$$

Die Feldfrequenz ist maßgeblich für die erzeugte Wärme und die durch das Magnetfeld induzierte Spannung lässt sich wie folgt bestimmen:

$$u_{ind} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \cdot A \quad (2.6)$$

Die induzierte Wirkleistung, die in kohlenstofffaserverstärkten Laminaten in Wärme umgewandelt wird, errechnet sich nach:

$$P_{ind} = \frac{u_{ind}^2}{R} = \frac{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot \mu_0^2 \cdot \mu_r^2 \cdot H^2 \cdot A^2}{R} \quad (2.7)$$

Die Erwärmungsgeschwindigkeit kann mit einer Erhöhung der Frequenz gesteigert werden. Der Verlauf der Erwärmungszeit in Abhängigkeit zur Frequenz für ein CFK-Gewebe wurde in [63] ermittelt.

Dabei wurden auch Grenzfrequenzen festgestellt, ab denen sich ein Gewebe über eine bestimmte Temperatur hinaus nicht mehr erwärmen lässt. Die durch den Induk-

tor eingebrachte Leistung entspricht dann der Leistung, die an die Umgebung über Strahlungsverluste und Wärmeleitungsprozesse abgegeben wird. Die dabei verwendeten Frequenzen betragen bei dem untersuchten Gewebe ca. 20 KHz.

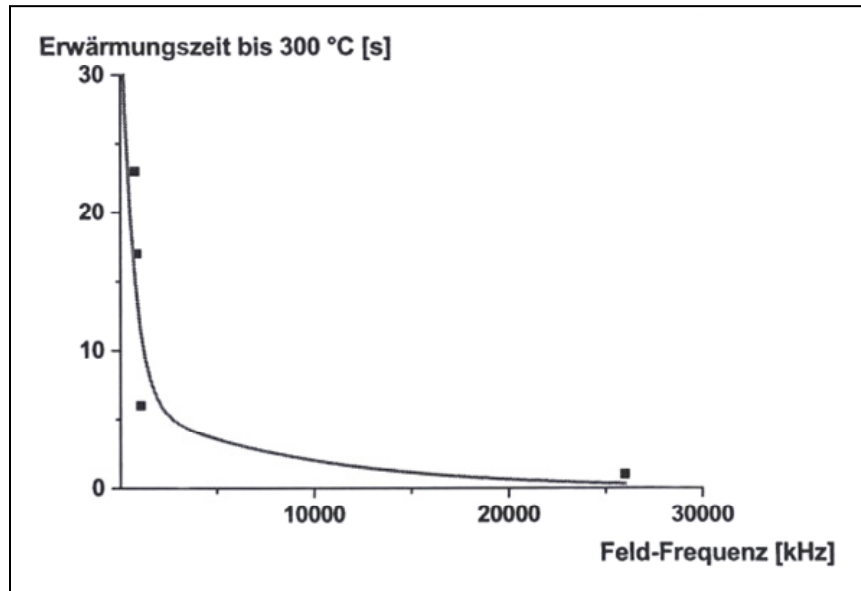


Bild 2.10: Erwärmungszeit über die Frequenz (CFK-Gewebe) [63]

Trotz der komplexen Wirkmechanismen der Erwärmung kohlenstofffaserverstärkter Lamine bietet die Induktionserwärmung einige Vorteile zu den vorher geschilderten, konventionellen Erwärmungsverfahren, vgl. Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2 Vor- und Nachteile induktiver Erwärmung

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmezuführung sehr genau dosierbar</li> <li>• Bis zu 1000 mal schnellere Wärmezuführung als mit Strahlern</li> <li>• In Kunststoff eingebettete, unzugängliche Teile können erwärmt werden</li> <li>• Geringer Platzbedarf für die Induktoren</li> <li>• Wärme entsteht im Material selbst</li> <li>• Hoher Wirkungsgrad, da geringe Abstrahlverluste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Im Regelfall Wasserkühlung der Induktoren notwendig</li> <li>• Durch ungünstige Anordnung können ungewollt Bauteile erwärmt werden</li> <li>• Je höher die Frequenz desto stärker ist die auf den Menschen wirkende elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)</li> <li>• Kenntnisse über Induktorgeometrien und Induktorverwendung notwendig</li> </ul>

Einsatzgebiete der induktiven Erwärmung finden sich in der Verarbeitung von Kunststoffbauteilen zur Unterstützung der Aushärtung von Klebverbindungen [64] sowie

beim Induktionsschweißen von FKV untereinander bzw. zur Erzeugung von Metall-FKV-Hybridverbindungen [63, 65, 66, 67]. Daneben wird in [68] der Einsatz der induktiven Erwärmung zur Beschleunigung des RTM-Prozesses beschrieben, wobei die Induktionserwärmung zur Aufheizung des metallischen Werkzeugs und nicht des Laminates verwendet wurde.

### 2.3.7 Gegenüberstellung der verschiedenen Aufheizverfahren

In Tabelle 2.3 sind die aufgeführten Aufheizverfahren und ihre unterschiedlichen Eigenschaften besonders im Hinblick auf ihr Einsatzpotenzial zur partiellen Aufheizung dargestellt. Wegen der sehr gute Eignung der induktiven Erwärmung zum partiellen aufheizen sowie deren kompakte Bauweise prädestiniert sie sich für die Anwendung zum partiellen Thermoformen.

Tabelle 2.3: Vergleich ausgewählter Aufheizverfahren für ebene Halbzeuge, nach [69]

Verfahren Anforderung	Kontakt	Heißgas	Infrarot	Laser	Induktion*
	Wärme- leitung	Konvektion	Strahlung	Strahlung	Strahlung
Aufheizzeit	+	0	+	++	++
Homogene Temperaturver- teilung	++	++	+	+	0
Tiefenwirkung	+	0	+	-	++
Partielle Aufhei- zung	++	--	0	+	++
Regelbarkeit	+	+	0	++	++
Flexibilität	-	+	+	+	+
Kompakter Auf- bau	+	0	+	++	++
Kosten	+	-	+	--	0

(++ sehr gut geeignet bis -- ungeeignet)

\* bei kontinuierlich kohlenstofffaserverstärkten Materialien

## 2.4 Thermoformen endlosfaserverstärkter Thermoplaste

### 2.4.1 Grundprinzip des Thermoformens (Drapierung)

Thermoformen ist ein Überbegriff für die Gestaltsänderung eines thermoplastischen Halbzeugs zu einem dreidimensionalen Formteil unter zur Hilfenahme von Tempera-

tur und Druck [70]. Die Prozesskette des Thermoformen von Organoblechen verhält sich analog zum Thermoformen von unverstärkten Thermoplasten. Zuerst muss das Material auf die polymerspezifische Verarbeitungstemperatur erwärmt werden (bei amorphen Thermoplasten liegt ein kleineres Verarbeitungsfenster als bei teilkristallinen vor). Anschließend wird das Material an mindestens eine Werkzeugform angepresst und bildet beim Erkalten dessen Form ab. Gegenüber der Verarbeitung von unverstärkten Platten wird der formgebende Prozess durch die Drapiereigenschaft der Verstärkungsstruktur und nicht durch die Streckeigenschaft des Thermoplasts determiniert.

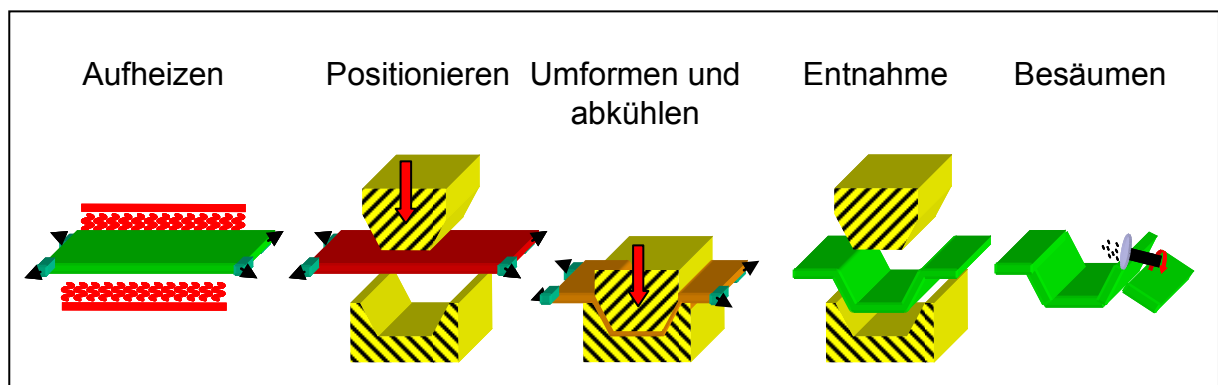


Bild 2.11: Prozessablauf beim Thermoformen von Organoblechen

Die im Organoblech gespeicherte Wärme muss im anschließenden Abkühlprozess an das Werkzeug abgegeben werden, um die Temperatur der Matrix unter die Erstarrungstemperatur abzusenken. Nach dem Abkühlen des Bauteils öffnet die Presse und das Formteil kann entnommen werden. Die erreichbare Taktzeit für einen Umformzyklus liegt bauteilabhängig und vom Aufheizen entkoppelt deutlich unter einer Minute. Nach einem anschließenden Stanz- oder Besäumvorgang, bei dem die überschüssigen Materialreste entfernt werden, ist das Bauteil fertig. Bei geeigneter Geometrie des Bauteils kann das Besäumen auch durch eine in das Werkzeug integrierte Stanzeinheit in den Umformzyklus integriert werden. [51, 71, 72, 73, 74].

Die Drapierung als Kernprozess des Thermoformens wird von unterschiedlichen Methoden beeinflusst. Beim Drapieren von Geweben sind vier Faktoren ausschlaggebend [11]:

- Faserdehnung
- Faserstreckung
- Faserschlupf
- Gewebescherung

In Bild 2.12 sind diese Prinzipien beispielhaft aufgeführt, wobei die Gewebescherung bei Standardfasern (z. B. Glas-, Kohlenstoff-, Aramidfasern, etc.) das Hauptdrapierverfahren darstellt. Werden hingegen elastische Fasern wie z. B. bei eigenverstärkten Materialien eingesetzt, wird die Gewebescherung durch die mögliche Faserdehnung und die Faserstreckung erweitert, und es sind theoretisch größere Umformgrade realisierbar. Jedoch besitzen diese Einstoffsysteme durch die geringeren mechanischen Kennwerte der Fasern ein schlechteres Leichtbaupotenzial [43, 43, 75].

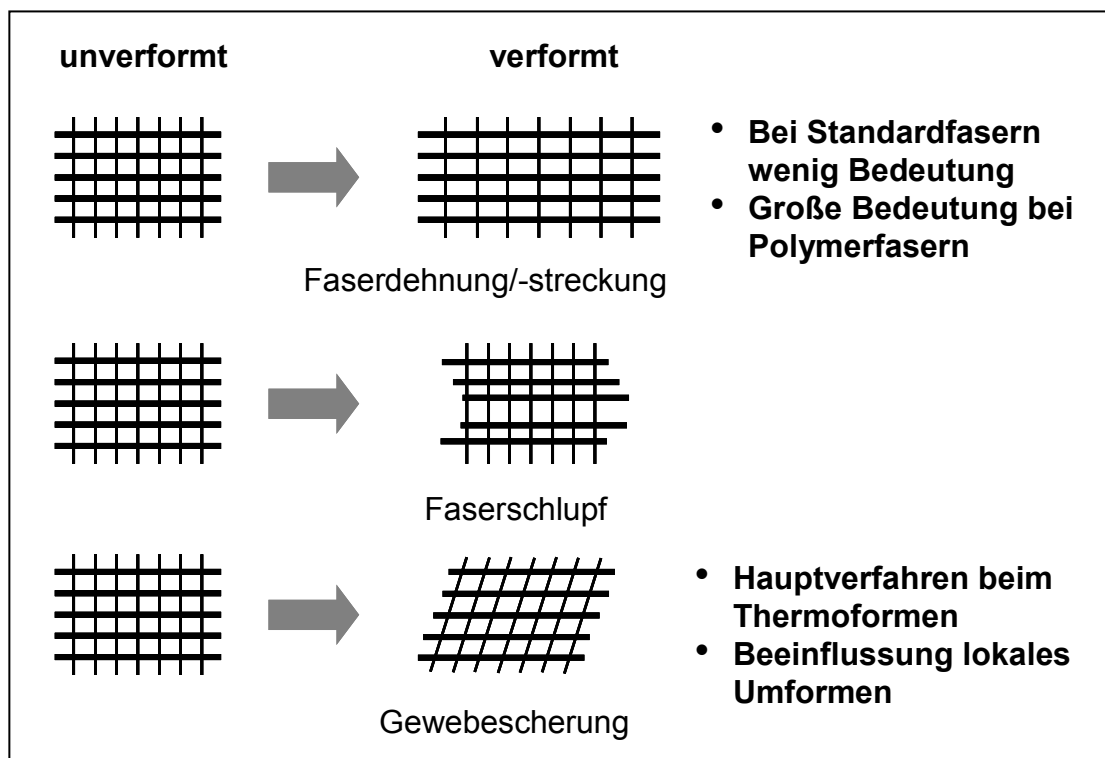


Bild 2.12: Hauptprinzipien der zweidimensionalen Gewebeerformung

Aktuelle Forschungsarbeiten versuchen das Drapier- und somit das Umformverhalten durch Einbringung von hochfesten Nähten zu beeinflussen [76]. Hierbei werden in die trockenen Verstärkungsstrukturen Nähte eingebracht und im Anschluss zu

Halbzeuge imprägniert. Die eingebrachte Nahtstruktur ist von der Bauteilgeometrie abhängig, weshalb die Halbzeuge nur noch für eine spezielle Umformgeometrie eingesetzt werden können. Dennoch weisen die ersten Ergebnisse dieser Technologie ein großes Potenzial vor allem bei der Entkopplung der Drapierbeeinflussung beim Thermoformen einzelner Formnester auf, wie sie auch beim partiellen Thermoformen gegeben ist [77].

Im Folgenden werden detailliert die wirtschaftlich relevantesten Thermoformprozesse analysiert, wobei erst die klassischen Thermoformprozesse des globalen Umformens und daran anknüpfend die verfahrenstechnischen Weiterentwicklungen des partiellen Thermoformens betrachtet werden.

#### **2.4.2 Globales Umformen**

Vor dem formgebenden Umformprozess muss das ebene Plattenhalbzeug auf Verarbeitungstemperatur, d. h. über die Schmelztemperatur des Matrixthermoplasts gebracht werden, vgl. Kapitel 2.3. Hierzu werden meist Infrarot-Strahler verwendet. Bei Erreichen der erforderlichen Temperatur wird das Halbzeug mittels einer Transportvorrichtung unverzüglich in die Presse gefahren, um eine vorzeitige Abkühlung der Laminatoberfläche durch Konvektion zu verhindern. Durch die hohe Steifigkeit selbst im aufgeschmolzenen Zustand der Matrix ist das Handling im Gegensatz zur Verarbeitung von unverstärktem Plattenmaterial vereinfacht.

Der anschließende formgebende Umformprozess kann durch unterschiedliche Werkzeugkonzepte realisiert werden. Allen gemein ist eine möglichst homogene Druckverteilung während des Umformens, um Delaminationen und Fehlstellen zu vermeiden.

Die realisierbaren Umformgrade werden durch verschiedene Faktoren beeinflusst, wobei das Drapierverhalten der gewählten Faserarchitektur den größten determinierenden Faktor darstellt. Während der Umformung kommt es zu Winkeländerungen in der Verstärkungsarchitektur, die sich je nach Matrixgehalt in stark umgeformte Bereiche durch Materialaufdickungen bis zu 100 % bemerkbar machen können. Zur optimalen Werkzeugauslegung bei Verfahren mit starren Kavitäten (z. B. Metallstempelverfahren) ist daher eine der Werkzeugkonstruktion vorangehende Drapiersimulation oder experimentelle Ermittlung der Materialaufdickung zwingend erforderlich. Ferner muss zur Reduzierung bzw. zur Vermeidung von Faltenbildung das Halbzeug wäh-



rend des Thermoformvorganges unter Spannung definiert nachgeführt werden. Dies kann z. B. bei den Stempelumformverfahren durch mechanisch oder pneumatisch gesteuerte Greifer oder durch Federn erfolgen.

Der anschließende formgebende Umformprozess kann durch unterschiedliche Werkzeugkonzepte bzw. Herstellverfahren realisiert werden. In Tabelle 2.4 sind die wirtschaftlich relevantesten Verfahren zum Thermoformen endlosfaserverstärkter Thermoplaste mit ihren Eigenschaften gegenübergestellt.

Tabelle 2.4: Vergleich der wirtschaftlich relevantesten Thermoformverfahren für endlosfaserverstärkte Thermoplaste, nach [52, 78, 79, 80]

Verfahren Eigenschaft	Autoklav	Diaphragma	Hydroformen	Stempelumformverfahren	
				Elastischer Stempel	Harte Stempel
Werkzeugkosten	gering	gering	gering	mittel	hoch
Betriebsmittelkosten	sehr hoch	hoch	hoch	mittel	mittel
Hilfsstoffverbrauch	hoch	hoch	gering	gering	gering
Zykluszeit	sehr hoch	hoch	mittel	niedrig	sehr niedrig
Aufwand Nachbearbeitung	hoch	hoch	hoch	mittel	mittel
Oberflächengüte	formseitig gut	formseitig gut	formseitig gut	formseitig gut	beidseitig gut
Druckverteilung	homogen	homogen	homogen	teils homogen	inhomogen
Druckaufbringung	Gas	Gas	Fluid	Presse / Elastomer	Presse

Grundsätzlich unterscheiden sich diese Verfahren in der Art der Druckaufbringung (Gas, Fluid oder lineare Kraft durch mechanische Pressen) und in den benötigten Zykluszeiten. Die Kombination aus niedrigen Betriebsmittel- und Hilfsstoffkosten sowie niedrigen Zykluszeiten und somit einer hohen Ausbringung sind ein Kennzeichen der Stempelumformverfahren. Somit sind diese Verfahren bei höheren Stückzahlen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten den anderen Verfahren überlegen.

Als Stempelumformverfahren werden Verfahren bezeichnet, welche mit Hilfe von schnell schließenden Pressen das erwärmte Organoblech an exakt definierte Ober-

und Unterstempel umformen. Dieses Verfahren ermöglichen extrem kurze Zykluszeiten von unter einer Minute. Das Stempelumformen wird nach Art des Oberstempels in das reine Metall- und in das Silikonstempelverfahren unterschieden. Beim reinen Metallstempelverfahren bestehen die beiden formgebenden Werkzeughälften aus Metall wobei beim Silikonstempelverfahren eine Werkzeughälfte aus elastischem Material hergestellt wird. Zur Auswahl des am meisten geeigneten Verfahrens sollte eine wirtschaftliche Vergleichsrechnung zwischen den jeweiligen Werkzeugkosten in Relation zu den erwarteten Stückzahlen durchgeführt werden. Die Schließgeschwindigkeit der Presse ist in der Regel zweistufig, wobei die Geschwindigkeit zu Beginn der Umformung von bis zu 40 mm/s auf den letzten 10 mm des Schließvorganges auf 5 mm/s reduziert werden sollte [51, 81].

Beim reinen Metallstempelverfahren ist die Kavität des geschlossenen Werkzeuges durch die festen Werkzeughälften vorgegeben und muss demnach an den drapierabhängigen Aufdickungen während des Thermoformens angepasst sein. Um ein frühzeitiges Erkalten der schmelzflüssigen Matrix zu verhindern, müssen die Werkzeughälften polymerabhängig beheizt werden [82, 83].

Durch die starren Werkzeuge wirken orthogonal zur Pressrichtung keine Presskräfte, weshalb Flächen senkrecht zur Pressrichtung vermieden, bzw. mit einer leichten Formschräge von 3 - 5 ° ausgebildet werden sollten. Dies erleichtert zusätzlich die Entformung der Bauteile. Durch die im Verbundwerkstoff eingebrachten sehr steifen Fasern kann es an der Oberfläche der Werkzeuge zu Abzeichnungen kommen [84], die sich einerseits auf die Oberfläche der Bauteile sowie auf Grund der geänderten Reibverhältnisse auf die Drapierung ausüben kann. Deshalb sollten bei einer angestrebten Anzahl von ca. 5.000 – 10.000 Umformungen bzw. bei hohen Anforderungen an die Oberflächengüte der Bauteile (Class-A-Oberflächen) die Werkzeughälften aus Werkzeugstahl gefertigt werden. Eine zusätzliche Standzeiterhöhung kann durch die Steigerung der Oberflächenhärte (z. B. Einsatzhärten, Nitrieren etc.) erfolgen. Vor der ersten Umformung sowie in regelmäßigen Abständen während des Betriebes sollten die Werkzeughälften mittels eines flüssigen Trennmittels benetzt werden, um ein Anhaften des während der Umformung im schmelzflüssigen Zustand vorhandenen Matrixpolymers zu verhindern.

Beim Einsatz des Silikonstempelverfahrens kann die Oberflächengüte der Bauteile nur einseitig durch die Metallmatrize realisiert werden. Die Vorteile dieses Verfahrens gegenüber dem reinen Metallstempelumformen liegen in der homogenen Aufbringung des Pressdrucks auch orthogonal zur Pressrichtung und in der Realisierung möglicher leichter Hinterschnitte. Die Geometrie des Silikonstempels wird meist im Gießverfahren aus der Unterform hergestellt. Die vom Halbzeug determinierte Kavität muss zuvor durch Aufbringung von Wachsplatten definierter Dicke an der Unterform eingestellt werden. Die Standzeiten sowie die möglichen Umformgrade hängen stark von der Reißfestigkeit und der Reißdehnung des Silikons, sowie von den während der Umformung auftretenden Temperaturen ab [78].

### 2.4.3 Partielles Umformen

Im Gegensatz zu den geschilderten globalen Thermoformverfahren, bei dem das gesamte Halbzeug aufgeschmolzen und durch Druck in eine dreidimensionale Form transferiert wird, grenzt sich das partielle Umformen durch einerseits lokale, nicht aufgeschmolzene und andererseits durch umgeformte Bereiche ab. Einsatzgebiete des partiellen Thermoformens finden sich heute in dem aus der Blechverarbeitung von Metallen übertragenen Abkanten von thermoplastischen FKV über eine lineare Werkzeugkante. Durch das Falten des Materials können dreidimensionale Strukturen ohne den Einsatz kostenintensiver Umformpressen erstellt werden [5, 85].

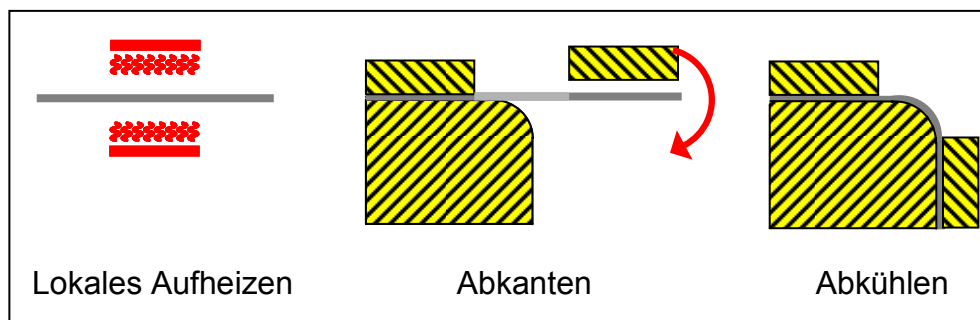


Bild 2.13: Prozessablauf Abkanten mit lokalem Aufheizen

Beim global aufgeheizten Abkanten kann es zu den in Bild 2.14 dargestellten Fasenumorientierungen kommen, bei dem das interlaminare Gleiten der wichtigste Vorgang darstellt [86]. Durch die lokale Aufheizung ist das Abgleiten der einzelnen Schichten aufeinander nicht möglich, weshalb es bei diesem Verfahren zu einer Kombination aus Faserausknicken und Matrixmigration kommt.

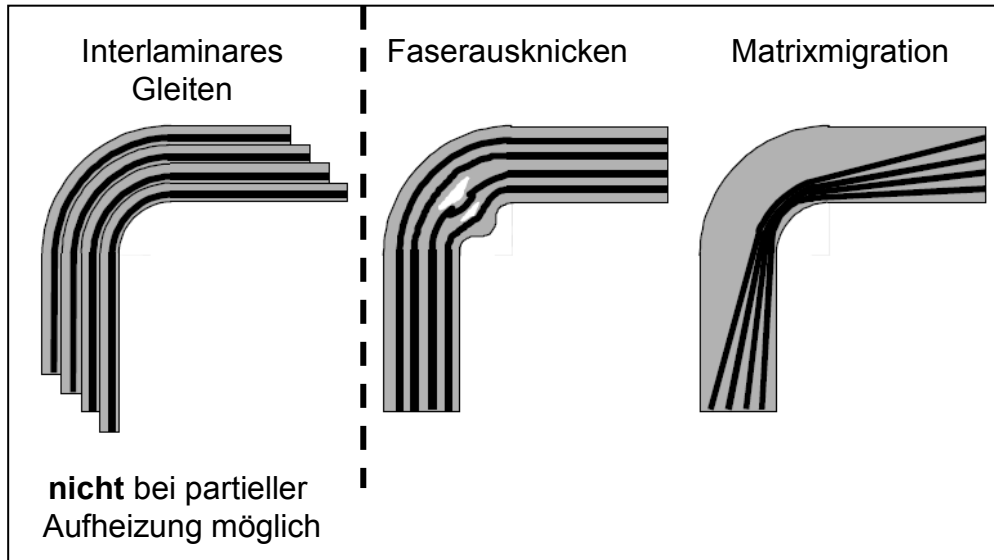


Bild 2.14: Mögliche Faserumorientierungen nach dem Abkanten; nach [87]

Tendenziell stellt sich beim Abkanten von FKV ein kleinerer eingeschlossener Winkel zwischen den Flanken ein, als vom Werkzeug vorgegeben (Spring-Forward-Effekt). Dieses Verhalten ist in den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten in Längs- und in Dickenrichtung der Lamine begründet [88, 89].

#### 2.4.4 Dickenadaptives Umformen

Bei thermogeformten Bauteilen ist die Wanddicke durch den Einsatz von vorkonfektionierten Halbzeugen mit konstanter Dicke vorgegeben. Einen Einfluss auf die Bauteilwanddicke hat zum größten Teil die, durch unterschiedliche Drapierwinkel hervorgerufene Dickenänderung der Faserstruktur. Ein Fließen der Matrix wie es bei der Verarbeitung von kurz- bzw. langfaserverstärkten Polymeren, z. B. GMT-, LFT- oder SMC-Prozesse, auftritt, ist durch die räumliche Fixierung der Fasern unterdrückt. Zur Realisierung unterschiedlicher Dicken innerhalb eines Bauteils z. B. für Lasteinleitungen, können die beiden in Bild 2.15 dargestellten Varianten zum Einsatz kommen.

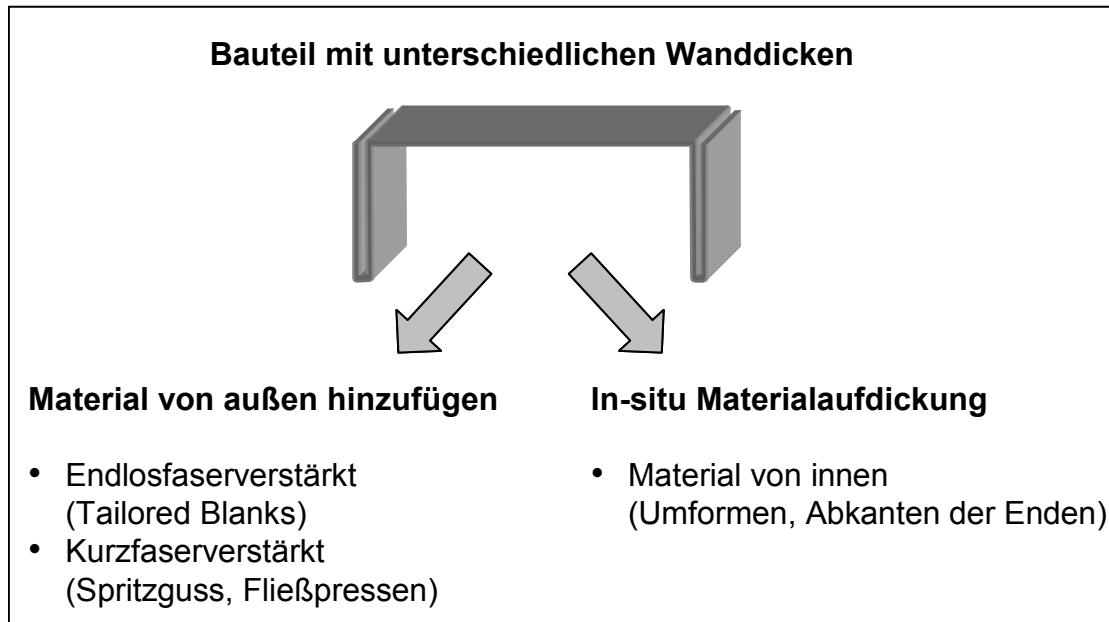


Bild 2.15: Möglichkeiten der dickenadaptiven Umformung

Durch den Einsatz von thermoplastischen Matrices kann während des formgebenden Prozesses eine gleichzeitige Anbindung von außen aufgebracht, polymergleicher Aufdickungselemente stattfinden. Hierbei kann einerseits das Material als endlosfaserverstärktes ebenes Halbzeug an den entsprechenden Stellen positionsgenau während des Umformprozesses (Tailored Blanks) oder andererseits nicht kontinuierlich verstärkte Materialien mittels Urformverfahren (Spritzguss oder Fließpressen) angefügt werden. Die Tailored Blanks Technologie bietet bei der Verarbeitung von thermoplastischen Halbzeugen den Vorteil der flächigen Anbindung der vorkonfektionierten Verstärkungsbleche und durch Diffusionsvorgänge eine Verschmelzung in der Fügezone. Außerdem besteht die Möglichkeit einer Anbindung von geometrisch definierten Verstärkungselementen, z. B. Profilen oder Lasteinleitungen, wie sie in Bild 2.16 dargestellt sind.

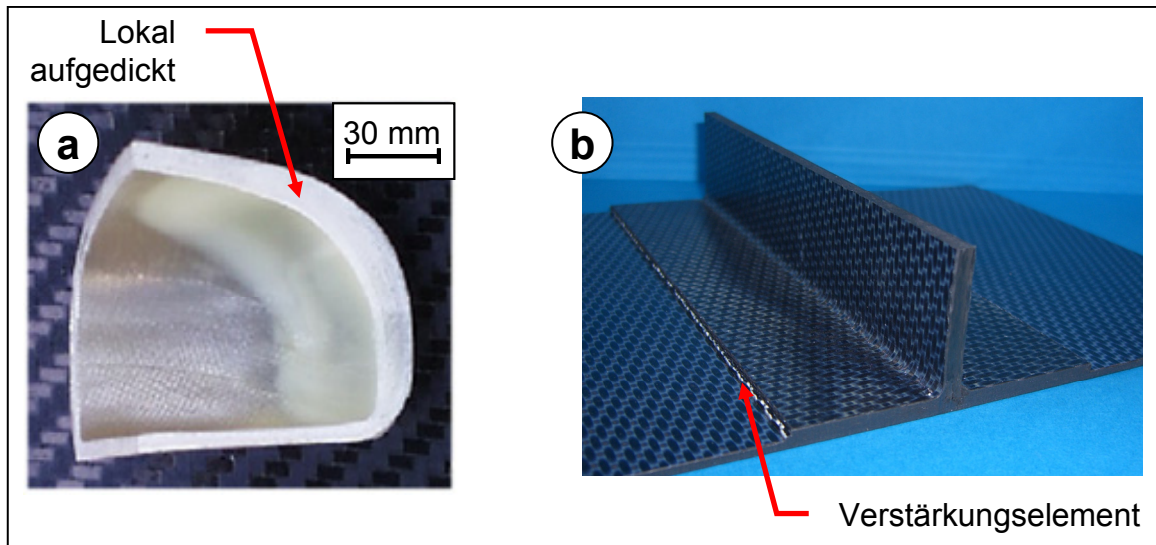


Bild 2.16: Tailored Blanks Bauteile.  
 a) Sicherheitsschuhkappe  
 b) Luffahrt-Demonstratorbauteil

Für eine optimale Verbindung zwischen den Verstärkungselementen (vgl. Bild 2.16b) und dem umgeformten Organoblech, muss die Oberfläche der zu verbindenden Verstärkungsteile vor dem eigentlichen Umformvorgang angeschmolzen werden. Zur Realisierung der lokalen Aufdickungen (vgl. Bild 2.16a) wird das endlosfaserverstärkte Zusatzelement zunächst auf Maß zugeschnitten und anschließend exakt zur späteren Umformposition auf dem Organoblech ausgerichtet. Dies erfordert einen zusätzlichen Arbeitsschritt und verlangt ist eine exakte Positionierung des aufgeheizten Halbzeuges im Bezug auf das Thermoformwerkzeug. Eine gleichmäßige Temperaturführung ist durch die unterschiedlichen Materialdicken erschwert.

Im Gegensatz zum Tailored Blanks Verfahren werden beim TFC<sup>®</sup> (Tailored Flowable Composite Moulding) fließfähige Materialien mit Kurz- bzw. Langfaserverstärkung eingesetzt, die das Ausformen von partiell benötigten Verstärkungs- bzw. Krafteinleitungsstrukturen während des Thermoformens von kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten erlauben [90]. Im Gegensatz zum Tailored Blanks Verfahren gewährt dies eine größere Gestaltungsfreiheit bei der Konstruktion von Dickenvariationen zur Lasteinleitung (vgl. Bild 2.17).

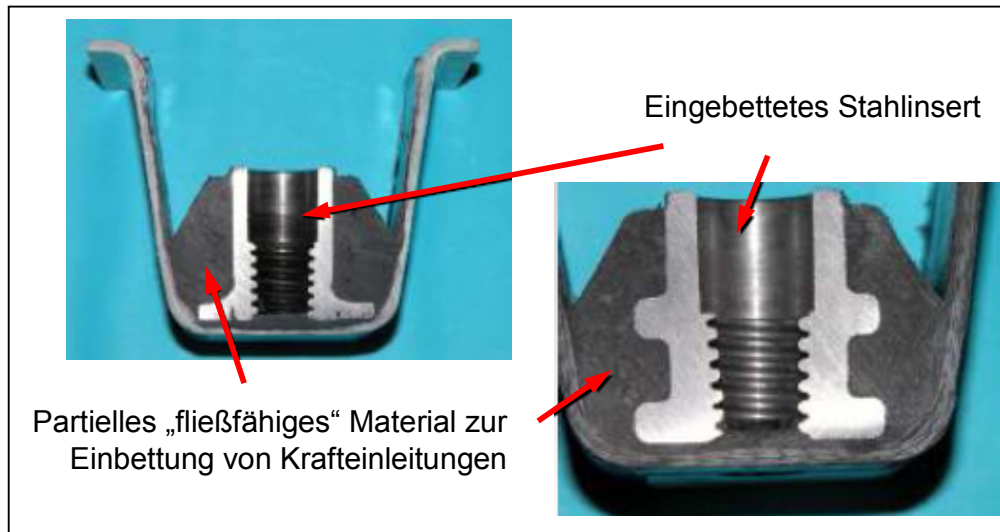


Bild 2.17: Im TFC-Verfahren eingebettetes Stahlinsert zur Kräfteinleitung [91]

Noch mehr Gestaltungsfreiheit bietet die Kombination des Thermoforens mit dem Spritzguss zur Herstellung von Kunststoff-Kunststoff-Hybridstrukturen (vgl. Bild 2.18) [92]. Wobei dieses Verfahren einen komplexen Werkzeugaufbau und eine äußerst komplexe Prozessführung voraussetzt.

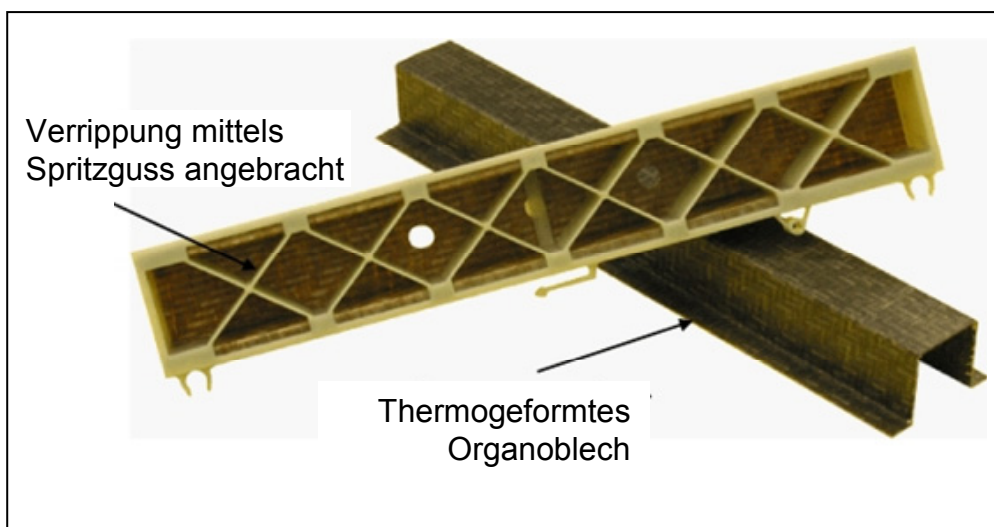


Bild 2.18: Kombiniertes Thermoform und Spritzgussbauteil [93]

All diesen Verfahren gemeinsam ist die Zuführung von mindestens zwei Materialien bzw. Zuschnitten in ein formgebendes Werkzeug, wobei die Materialien sowie die Temperaturführung aufeinander abgestimmt sein müssen. Durch diese Vorkonfektionierung und die zusätzlichen Arbeitsschritte verlängert sich die Kern-Zykluszeit. Die dadurch zusätzlichen entstehenden Kosten werden im Idealfall von den vorhandenen Kostenreduzierungen durch Funktionsintegrationen kompensiert. Für kleinere Um-

formgrade bietet sich neben diesen externen Materialzuführungen auch das partielle in-situ Umformen an. Bei diesem Verfahren können lokal unterschiedliche Materialdicken durch Fließ- und Umformbewegungen senkrecht zu den einzelnen Laminatlagen erreicht werden, was beim klassischen Thermoformverfahren nicht möglich ist. Jedoch besitzt das partielle Thermoformen größere Einschränkungen hinsichtlich der Umformgrade.

Im folgenden Kapitel wird ein Lösungsansatz für solch ein neuartiges Umformkonzept dargestellt.



### 3 Partielles Thermoformen und Funktionsintegration

#### 3.1 Einleitung

Die in Kapitel 2 dargelegten Vorteile des dickenadaptiven Umformens durch partielles Thermoformen werden in diesem Kapitel anhand einer Beispielanwendung veranschaulicht. Hierzu werden in ein flächiges Halbzeug von konstanter Dicke zwei Lagersitze mit einer doppelten Aufdickung zur Ausgangsdicke eingeformt (vgl. Bild 3.1).

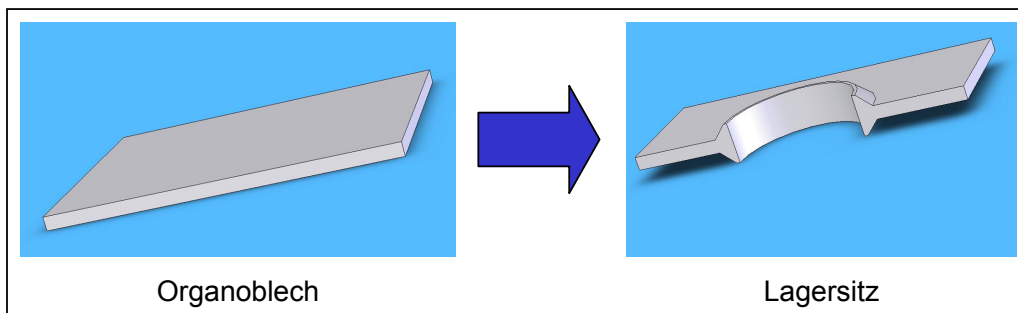


Bild 3.1: Dickenadaptives Umformen eines Lagersitzes (schematisch)

Das im Umformprozess integrierte Lagerfügen, das durch einen Ein-Schritt-Prozess die Prozesskette des Thermoformens verkürzt, wird näher betrachtet.

Die durch das partielle Aufheizen ausgebildeten einzelnen, drapierungsunbeeinflussten Formnestern in einem Organoblech werden genauer analysiert, um anschließend die Umformung mehrere Bauteile gleicher Güte in einem Umformschritt realisieren zu können, vgl. Bild 3.2.

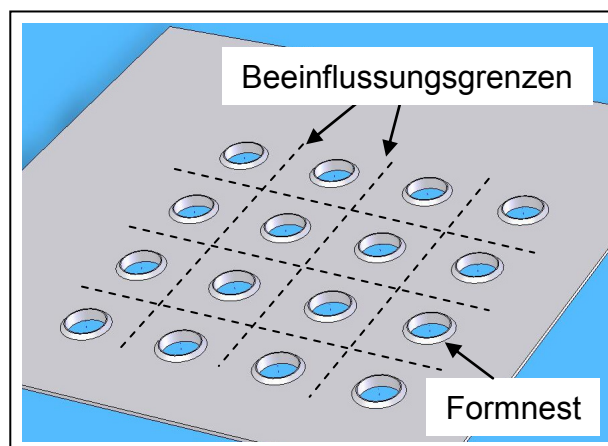


Bild 3.2: Realisierung mehrerer drapierungsunbeeinflusster Formnester auf einem Organoblech

## 3.2 Demonstrator

### 3.2.1 Ausgangslage – alternative Herstellverfahren

Als Demonstrator der Funktionsfähigkeit des Herstellprozesses wurde im Rahmen eines vom BMBF geförderten Projektes<sup>2</sup> ein schnell bewegter Hebel einer Industriemaschine ausgewählt. Dieses dynamisch hoch belastete Bauteil mit bis zu 6.000 Getriebeumläufen pro Minute wird derzeit in Aluminium-Druckguss realisiert (vgl. Bild 3.3).

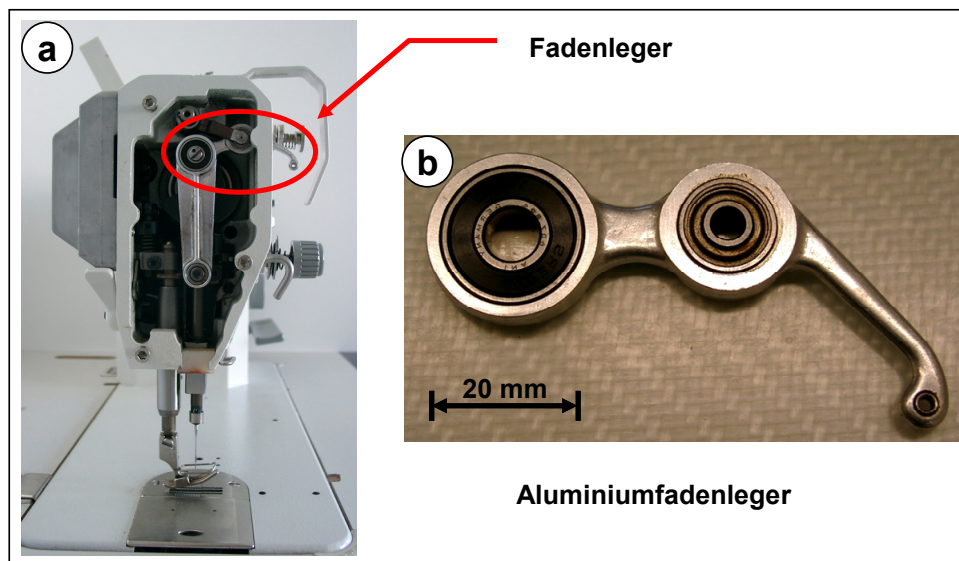


Bild 3.3: a) Nähmaschine mit eingebautem Fadenleger  
b) Detailansicht Aluminiumfadenleger

Für die Bauteilauslegung und zur Entwicklung einer Herstellprozesskette müssen folgenden Kriterien berücksichtigt werden:

- Gewichtsreduzierung des Hebels und somit Reduzierung der auftretenden Beschleunigungen
- Schwingungstechnische Entkopplung der Lagerstellen durch den Einsatz thermoplastischer Matrix
- Schnelles und kostengünstiges Herstellungs-konzept für große Stückzahlen
- Prozesskettenverkürzung durch direktes Fügen der Lager im Herstellprozess

<sup>2</sup> Titel: „Angepasste Faser-Kunststoff-Verbunde durch verfahrensintegrierte Eigenschaftsbeeinflussung“ (Förderkennzeichen 03N3113)

Die aufgeführten Kriterien werden durch das partielle Thermoformen von endlosfaserverstärkten Thermoplasten (Organobleche) erfüllt, wobei ein Hauptaugenmerk auf die spätere Realisierung der Formnestumformung im Serienprozess liegt. Ein Vergleich bezüglich der Vor- und Nachteile des bestehenden Verfahrens (Aluminiumdruckguss) und weiterer möglicher Herstellverfahren sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

Tabelle 3.1: Vergleich möglicher Herstellverfahren für den Fadenleger

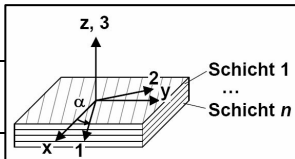
Verfahren	Vorteile	Nachteile
Aluminiumdruckguss (Ausgangszustand)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kostengünstig</li> <li>• Unempfindlich gegen die meisten Öle und Fette</li> <li>• Wärmeleitung vom Lager ins Bauteil</li> <li>• „Stand der Technik“</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Übertragung von Schwingungen</li> <li>• Geräuschemission</li> <li>• Spanende Nachbearbeitung der Lagersitze</li> <li>• Im Vergleich zu CFK geringeres Leichtbaupotenzial</li> <li>• Isotrope Werkstoffeigenschaften</li> </ul>
Harzinjektion RTM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Faserorientierung</li> <li>• Hohes Leichtbaupotenzial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lange Zykluszeit</li> <li>• Hohe Fertigungskosten</li> </ul>
Thermoplastischer Kurzfaserspritzguss	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gutes Dämpfungsverhalten der thermoplastischen Matrix</li> <li>• Kurze Zykluszeit</li> <li>• Hohe Ausbringungsmenge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die erreichbaren Festigkeiten führen zu keiner Gewichtseinsparung</li> <li>• Geringe mögliche Festigkeiten</li> </ul>
Thermoformen mit lokalem Aufdicken (Tailored Blanks)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gutes Dämpfungsverhalten der thermoplastischen Matrix</li> <li>• Hohe Faserorientierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Symmetrischer Aufbau verfahrenstechnisch nur schwer zu realisieren</li> <li>• Exakte Ausbildung der Verstärkungsbleche zur akkuraten Ausbildung des Lagersitzes</li> </ul>
Thermoformen mit integriertem Lagerfügen und lokalem Erwärmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein-Schritt-Prozess</li> <li>• Gutes Dämpfungsverhalten der thermoplastischen Matrix</li> <li>• Herstellung mehrerer Bauteile aus einem Blech</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lageranbindung problematisch</li> <li>• Eingeschränkt bzgl. Bauteildimension und Umformgrad</li> </ul>

### 3.2.2 Bauteilauslegung

Als Halbzeug wurde Polyamid 66 mit einem Körper 2/2 Kohlenstofffasergewebe<sup>3</sup> gewählt. Durch die erwartete hohe Faserumlenkung infolge des Umformprozesses im Bereich der Lagersitze sind für die FE-Analyse und der Berechnung in diesen Regionen die Elastizitätskennwerte des reinen Thermoplastwerkstoffes (PA 66) zugrunde gelegt worden (vgl. Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: Elastizitätskennwerte der UD-Einzelschicht,  $F_v = 44\%$  und des FKV-Werkstoffs im Bereich der Lagersitze (reine PA-66-Matrix)

Elastizitätskennwerte der UD-Einzelschicht, $F_v = 44\%$		
$E_1$	[MPa]	92.000
$E_2$	[MPa]	4.800
$G_{12}$	[MPa]	3.000
$\nu_{12}$	[1]	0,33
Elastizitätskennwerte im Bereich des Lagersitzes		
$E$	[MPa]	3.000
$\nu$	[1]	0,30



Aus den Berechnungen resultiert das als Grundlage zur Umformung herangezogene Bauteildesign (siehe Bild 3.4). Die Einschnürungen im mittleren Bereich zwischen den Lagerstellen werden durch Bauraumrestriktionen determiniert.

<sup>3</sup> TEPEX® dynalite 201-C200, Lieferant Bond-Laminates GmbH, Brilon, Dicke 2 mm, CF-Biaxial-Gewebe,  $F_v = 44\%$ , Aufbau quasi-isotrop  $[(\pm 45)_2/(0/90)_2]_S$ , 8 Lagen

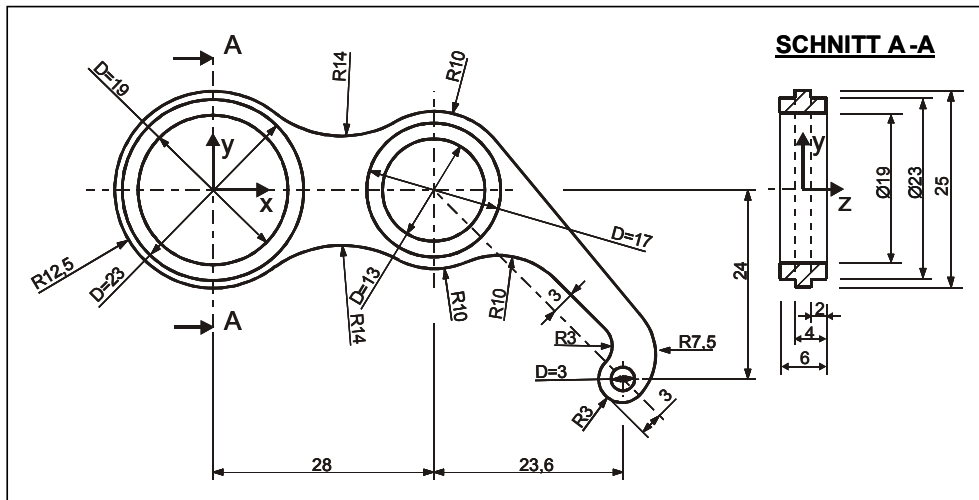


Bild 3.4: Bauteildesign (Angaben in mm)

Die im rechten Abschnitt in Bild 3.4 dargestellte Schnittkontur durch den großen Lagersitz kann verfahrenstechnisch, bedingt durch die starke Rechtwinkligkeit, nicht realisiert werden. Eine mögliche Lagersitzgeometrie ist in Bild 3.5b dargestellt, die einen symmetrischen Kegelstumpfaufbau besitzt.

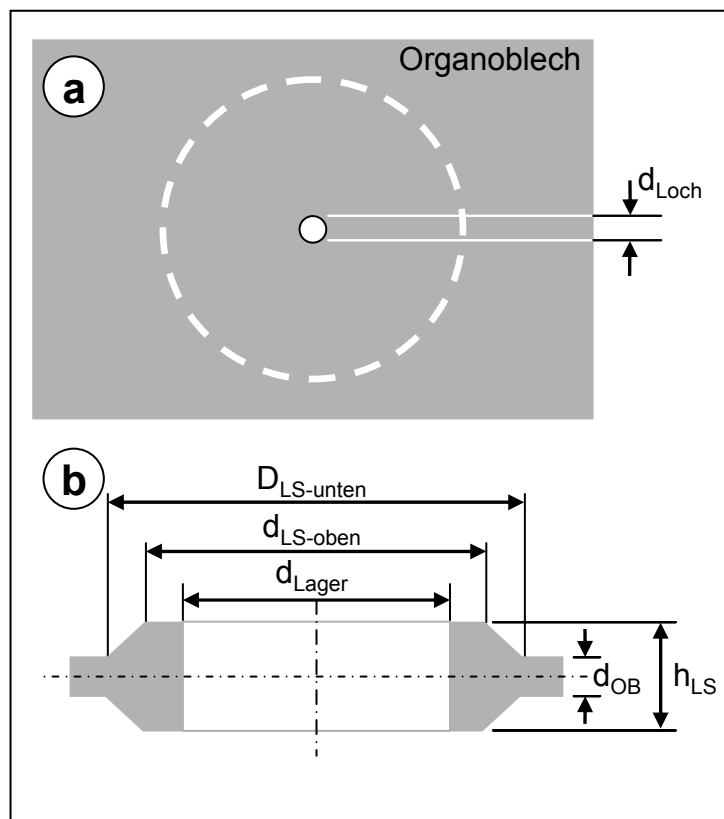


Bild 3.5: Lagersitzberechnung  
 a) Draufsicht  
 b) Schnittdarstellung Lagersitz

Da beim partiellen Thermoformen nur das lokal aufgeschmolzene Material für die Ausfüllung der Kavitäten zur Verfügung steht, muss zur Werkzeugauslegung die Lagersattelgeometrie berechnet werden. Voraussetzung ist, dass die Volumina des Ausgangsmaterials dem des auszuformenden Lagersitzes (Werkzeugkavität) entsprechen bzw. zur Aufbringung eines höheren Druckes und unter Berücksichtigung des höheren Volumens in der Schmelze (vgl. Bild 3.14) etwas größer sind:

$$V_{\text{Ausgangsblech}} \geq V_{\text{Lagersitz}} \quad (3.1)$$

Diese Restriktion wird anhand der Gleichungen 3.2 und 3.3 überprüft.

$$V_{\text{Ausgangsblech}} = \frac{\pi \cdot d_{OB}}{4} (D_{LS\text{-unten}}^2 - d_{Loch}^2) \quad (3.2)$$

$$V_{\text{Lagersitz}} = \frac{\pi \cdot (h_{LS} - d_{OB})}{12} (D_{LS\text{-unten}}^2 + d_{LS\text{-oben}}^2 + D_{LS\text{-unten}} \cdot d_{LS\text{-oben}}) + \frac{\pi \cdot d_{OB}}{4} D_{LS\text{-unten}}^2 - \frac{\pi \cdot h_{LS}}{4} d_{Lager}^2 \quad (3.3)$$

Ausgehend von verschiedenen Lagersitzdurchmessern wurde als Grundlage für die Umformversuche Berechnungen mit unterschiedlichen Abmessungen der beiden Lagersitze (Lageraußendurchmesser 13 und 19 mm) durchgeführt.

### 3.3 Induktive Erwärmung zum lokalen Thermoformen

In Kapitel 2.3 wurden unterschiedliche Aufheizverfahren zum lokalen Thermoformen verglichen und bewertet. Für die innerhalb der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuche ist die Methode der induktiven Erwärmung zum schnellen und räumlich begrenzten Aufheizverfahren angewendet worden (vgl. Tabelle 2.3).

Bezogen auf das Bauteil, müssen die beiden umzuformenden Bereiche der Lagersitze auf Umformtemperatur der thermoplastischen Matrix gebracht werden. Die beiden Aufheizbereiche sind in Bezug zum späteren Bauteildesign in Bild 3.6 dargestellt.

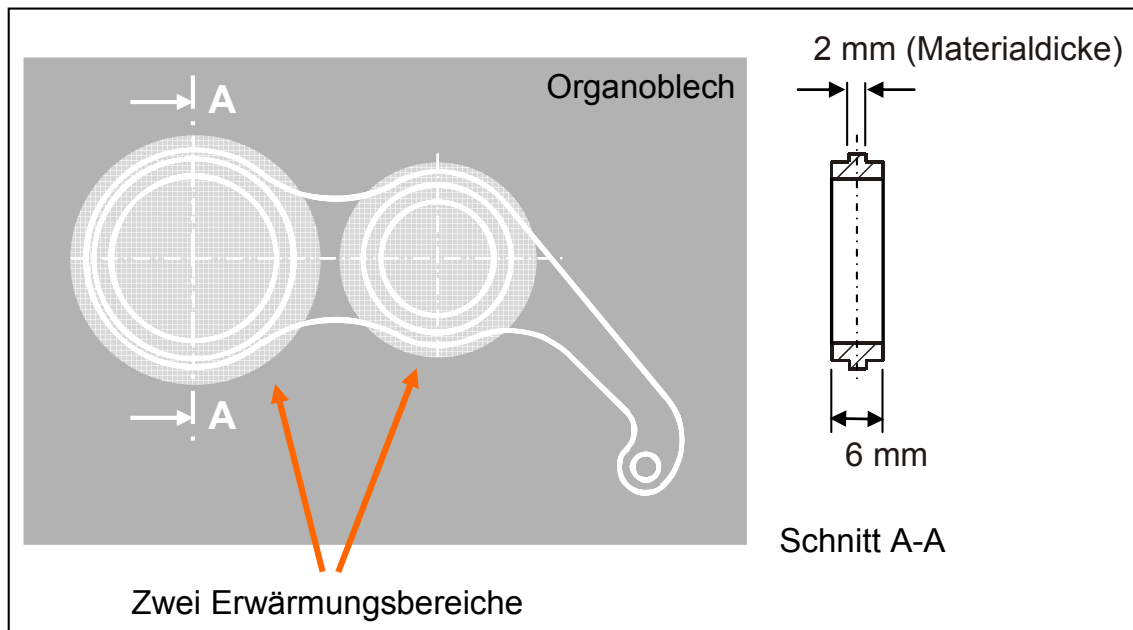


Bild 3.6: Ausgangssituation lokales Aufheizen

Eine gegenseitige Beeinflussung der räumlich sehr dicht zueinander angeordneten Induktoren und deren magnetischen Wechselstromfelder, wird durch eine Steuerung, die die beiden Induktoren wechselnd anregt, weitestgehend unterbunden. Der schematische Versuchsaufbau zum Aufheizen der beiden Umformregionen ist in Bild 3.7 dargestellt.

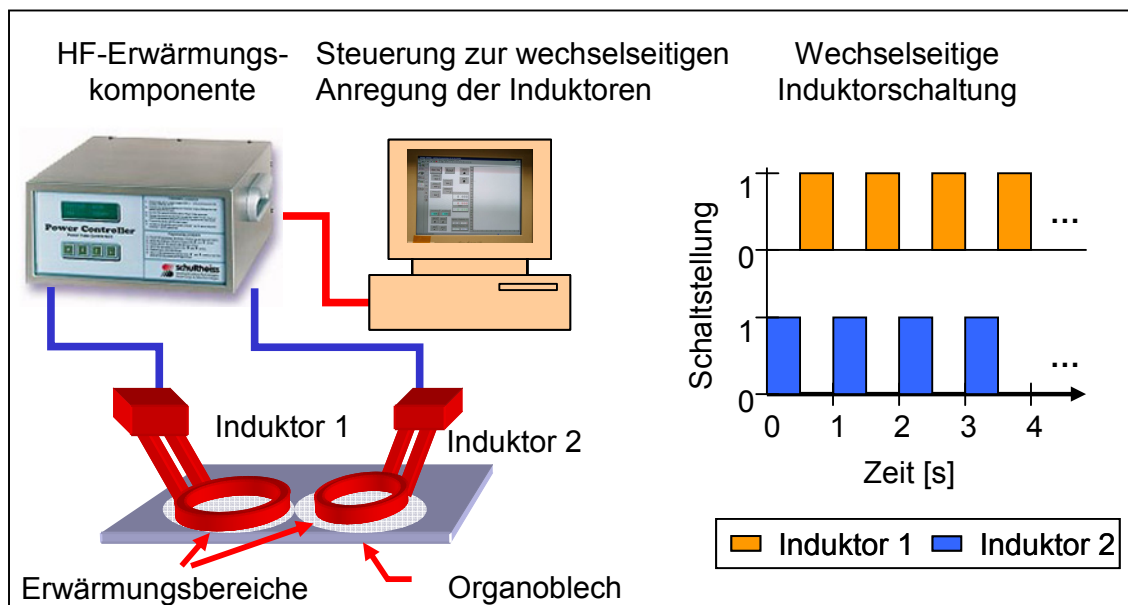


Bild 3.7: Schematischer Versuchsaufbau zur induktiven Erwärmung

Als Induktorform wurde der schematisch in Bild 3.8 a dargestellte Pfannkucheninduktor ausgewählt, der durch seinen Aufbau einen kreisförmigen und in Flächenrichtung einen gleichförmigen Energieeintrag gewährleistet (Bild 3.8 b).

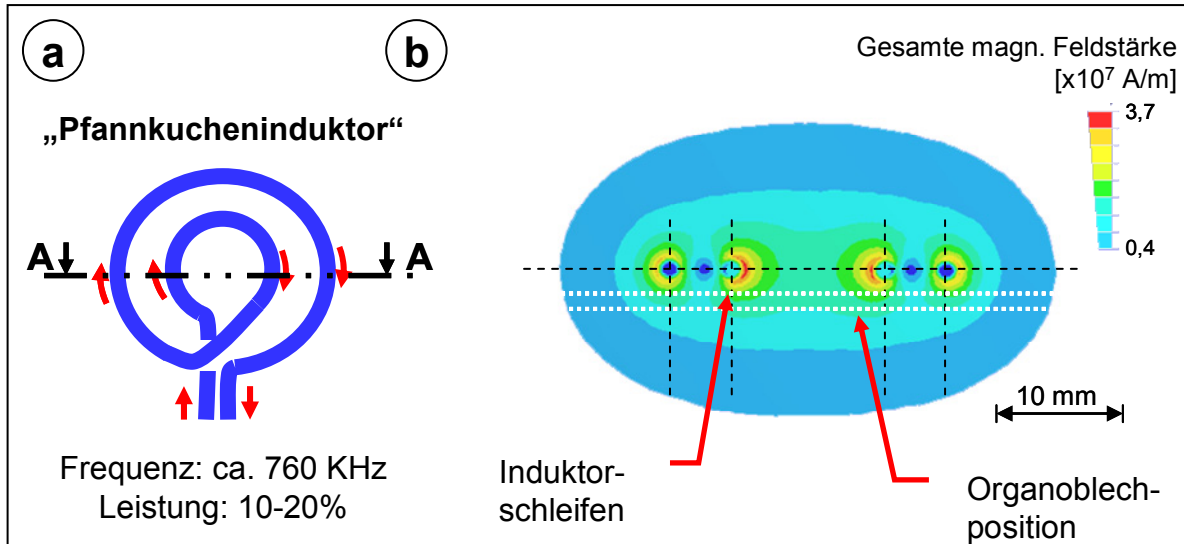


Bild 3.8: a) Induktorform  
b) Simulation der magnetischen Feldstärkeverteilung

Zur Ermittlung des Energieeintrags beim induktiven Erwärmen wurde in [63] eine Prozessmodellierung für die Erwärmung von CFK-Laminaten aufgebaut. Jedoch beinhaltet diese Modellierung keine Temperaturverteilung in Dickenrichtung des Laminats. In [94, 95] findet sich eine Erweiterung dieses Modells, wobei die folgenden drei Erwärmungsmechanismen postuliert wurden:

- Erwärmung der Fasern durch Joulesche Verluste
- Dielektrische Hysterese
- Erwärmung in den Knotenpunkten durch Joulesche Verluste

### 3.4 Umformmechanismen

Der formgebende Prozess bei der Umformung der Lagersitze unterscheidet sich grundlegend zu dem des klassischen Thermoformens (vgl. Kapitel 2.4). Durch das dickenadaptive Umformen findet kein Drapieren, d. h. anschiegen der Verbundarchitektur durch Winkeländerung zwischen den Kett- und Schussfäden, statt. Der formgebende Prozess wird durch komplexe Umform- und Fließvorgänge in Materialdickenrichtung realisiert, die zusätzlich eine Schädigung der Fasern hervorrufen.



Im Gegensatz zum klassischen Thermoformen, bei dem das umzuformende Organoblech global auf Umformtemperatur aufgeheizt wird und somit die Beweglichkeit der Fasern und die Drapierfähigkeit des Gewebes im gesamten Verbund vorherrschen, wirkt beim lokalen Aufheizen die nicht aufgeschmolzene Matrix wie eine feste Einspannung der Fasern (vgl. Bild 3.9). Dies hat den Vorteil, dass benachbarte Bereiche in ihrer Gewebeorientierung unbeeinflusst bleiben. Allerdings können starke Spannungen innerhalb des Materials entstehen. Ist der Umformgrad größer als der, der durch die Umorientierung der Fasern aufgenommen werden kann, kommt es durch die großen Umformkräfte zum zerreißen einzelne Faserbündel.

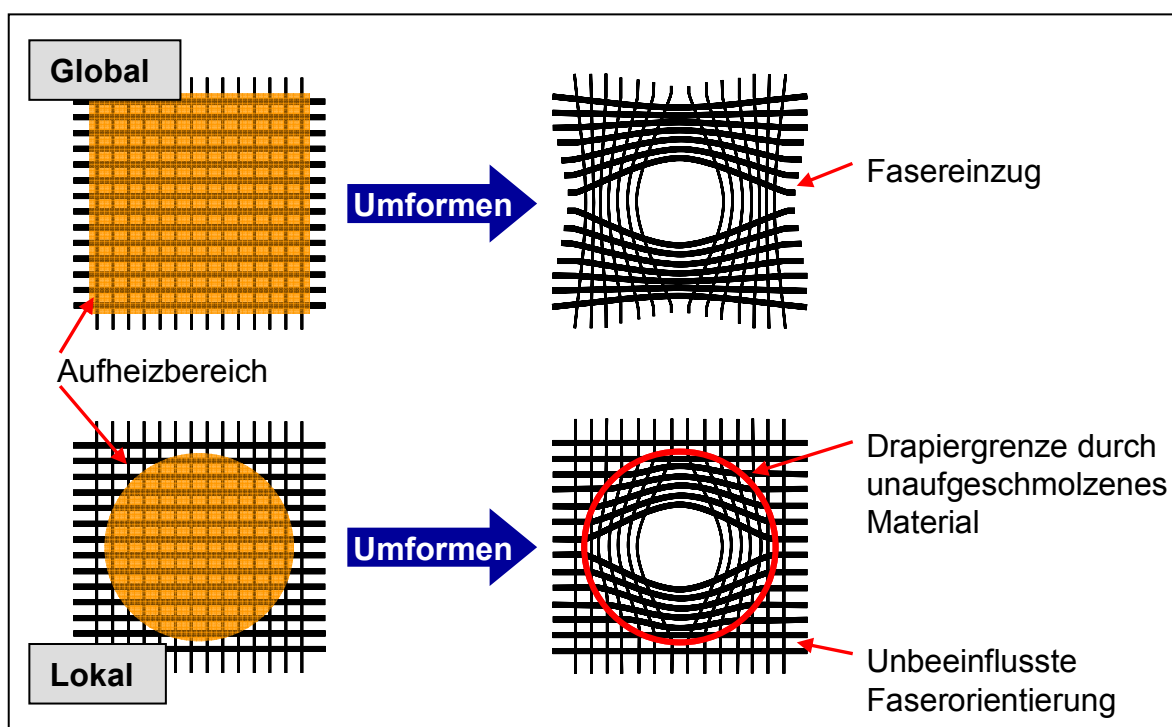


Bild 3.9: Vergleich des Drapierverhaltens zwischen globalem und lokalem Aufheizen

Entscheidend für die Beweglichkeit der Fasern im aufgeschmolzenen Thermoplast ist seine Viskosität. Mit zunehmender Schergeschwindigkeit durch z. B. hohe Umformgeschwindigkeiten nimmt die Viskosität drastisch ab, was die Umformbarkeit begünstigt (vgl. Bild 3.10). Unterhalb des Schmelzpunktes der Matrix können die Fasern nicht ohne große Kraftaufbringung im Verbund frei bewegt werden. Der Schmelzpunkt von Polyamid 66 liegt bei 263°C.

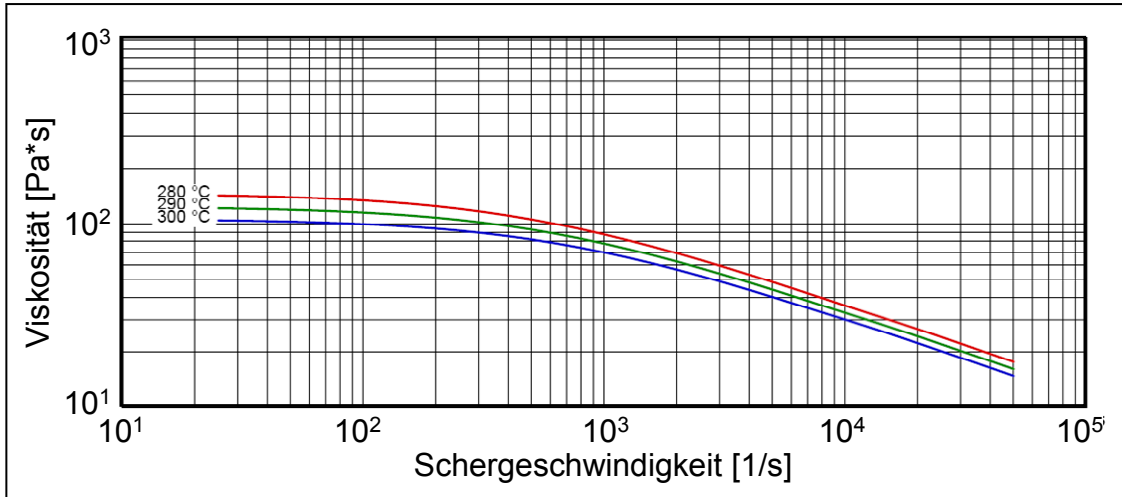


Bild 3.10: Viskositätskurven nach ISO 11443 eines PA 66 [96]

Durch den Temperaturgradienten im Innern des Werkstoffes während und nach dem induktiven Aufheizen entsteht ein Viskositätsgradient innerhalb des Ausgangsmaterials. Bei teilkristallinen Kunststoffen ist im Vergleich zu amorphen Kunststoffen der Viskositätsverlauf sprunghaft (vgl. Bild 3.11).

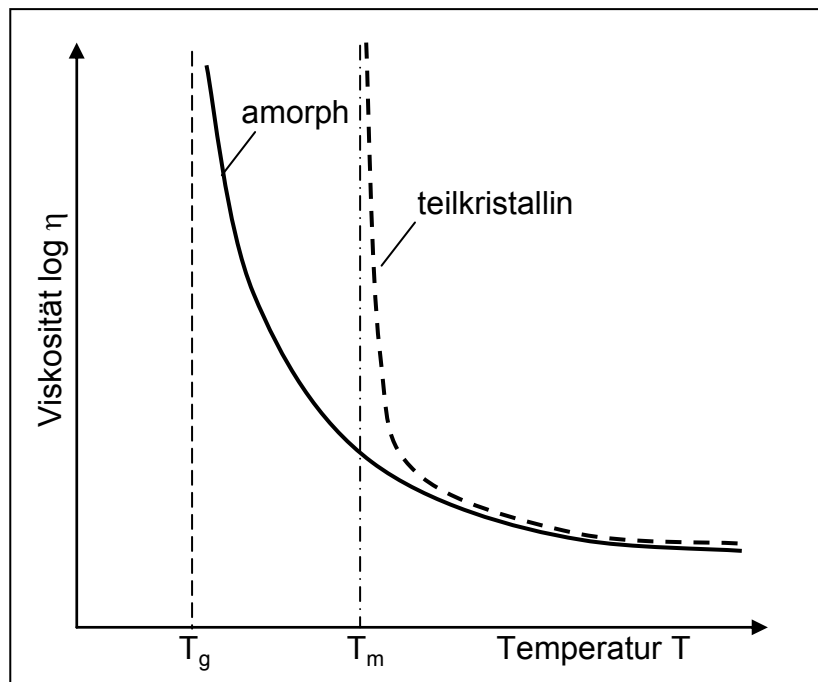


Bild 3.11: Schematische Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur bei amorphen und teilkristallinen Kunststoffen [48]

Zur Analyse der für die Umformung zur Verfügung stehenden Bereiche müssen nur die berücksichtigt werden, deren Temperatur über der Kristallisationstemperatur  $T_c$  liegen. In den umliegenden Bereichen werden die Fasern in ihrer Beweglichkeit be-

hindert und stehen zur Ausbildung des Lagersitzes nicht zur Verfügung. Somit ist die Kristallisationstemperatur eine kritische Temperatur, die während des formgebenden Thermoformprozesses bei der Verarbeitung von teilkristallinen Thermoplasten nicht unterschritten werden sollte. Für das hier untersuchte Polyamid 66 wird in der Literatur eine Kristallisationstemperatur von  $T_c = 235 \text{ °C}$  genannt [27]. Die maximale Kristallisationswachstumsgeschwindigkeit liegt unterhalb dieser Temperatur und über der Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) bei  $T_{vcmax} = 167 \text{ °C}$ , vgl. Bild 3.12.

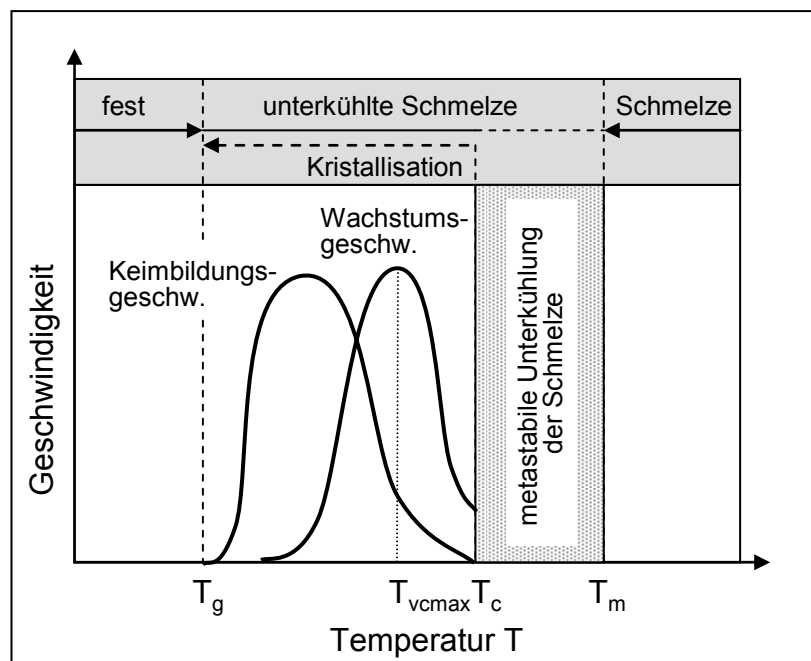


Bild 3.12: Temperaturabhängigkeit der Keimbildungs- und der Kristallitwachstumsgeschwindigkeit beim Abkühlen aus der Schmelze [27]

In Bild 3.13 sind schematisch die sich ergebenden spezifischen Volumina von amorphen und teilkristallinen Thermoplasten in Abhängigkeit des Druckes über der Temperatur dargestellt. Tendenziell führen höhere Drücke zu einer Abnahme des spezifischen Volumens und somit zu einer Erhöhung der Dichte des Werkstoffes.

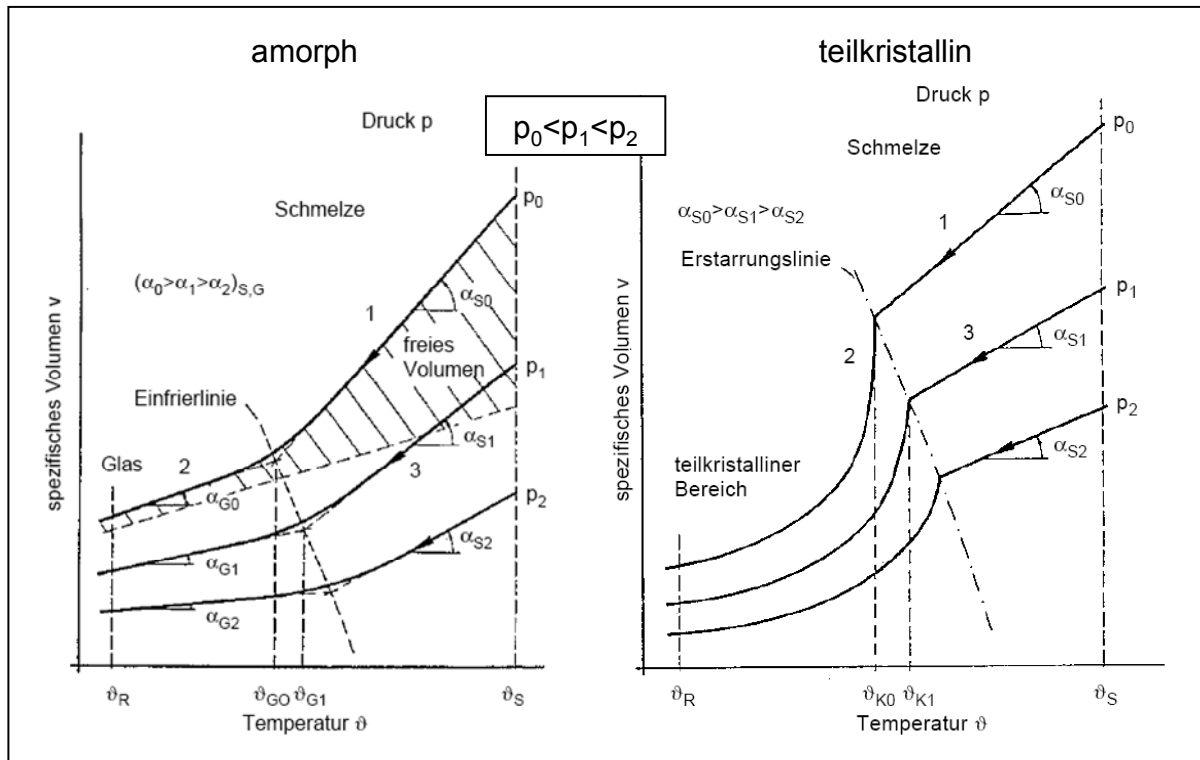


Bild 3.13: Schematisches p-v-T-Diagramm für einen teilkristallinen sowie einen amorphen Thermoplast bei langsamer Abkühlung und unterschiedlichen Drücken [97]

Bei teilkristallinen Thermoplasten ist dieses Verhalten auch von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig. Höhere Abkühlgeschwindigkeiten führen zu einem größeren spezifischen Volumen und in Folge dessen zu einer Abnahme der Dichte (Bild 3.14). Dies ist auf die kurze Zeit, die der Kristallisation zur Verfügung steht, zurückzuführen. Hat sich ein geringer Kristallisationsgrad ausgebildet, kann es im umgeformten Bauteil zu einer Nachkristallisation kommen, die sich wiederum in einer Verringerung des spezifischen Volumens und somit in einer Geometrieschwindung niederschlägt (vgl. Kapitel 2.2.1) [98].

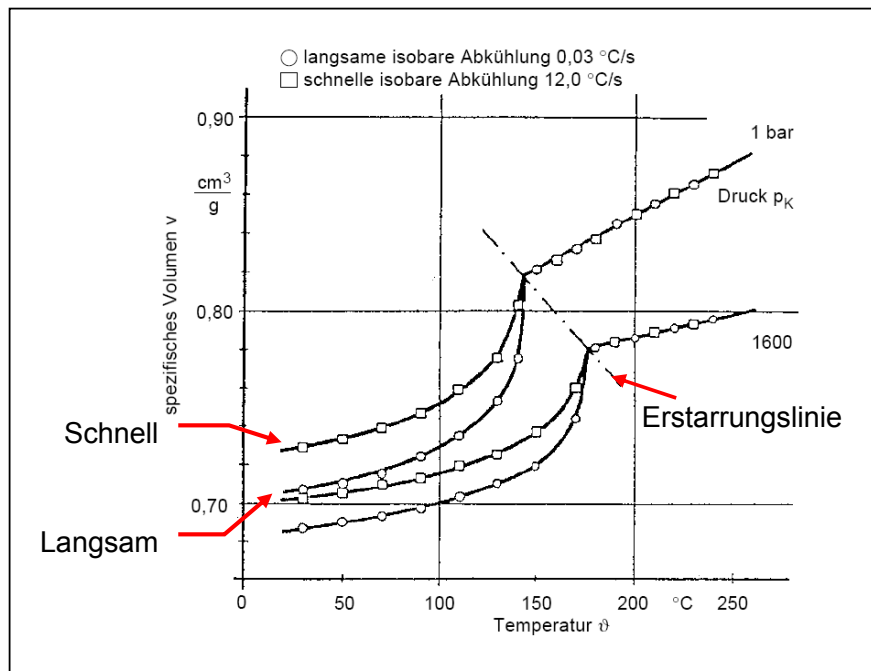


Bild 3.14: Vergleich einer langsamen und schnellen isobaren Abkühlung eines teilkristallinen Thermoplastes bei zwei unterschiedlichen Drücken [97]

Amorphe Thermoplaste besitzen keine ausgebildete Schmelztemperatur, d.h. keine definierte Aggregatzustandsänderungstemperatur, sondern einen Schmelz- bzw. einen Einfriertemperaturbereich (Bild 3.13). Für teilkristalline Thermoplaste spricht man beim Übergang von der Schmelze in den Feststoffbereich bzw. bei dessen Beginn von der Kristallisationstemperatur. Diese Kristallisationstemperatur ist druck-, aber nicht temperaturabhängig. Vergleicht man die Erstarrungstemperaturen der beiden isobaren Abkühlgeschwindigkeiten in Bild 3.14 wird ebenfalls die Unabhängigkeit der Kristallisationstemperatur von der Abkühlgeschwindigkeit ersichtlich, wohingegen sich bei höheren Drücken der Wert der Erstarrungstemperaturen nach oben verschiebt. Diese Abhängigkeit der Schmelztemperatur vom Druck kann durch eine Vereinfachung der Simon-Gleichung beschrieben werden [40]

$$T_m^P = T_m^0 + p \cdot \alpha_m \quad \text{und} \quad \alpha_m = \frac{T_m^0}{c \cdot (a - p^0)} \quad (3.4)$$

mit  $T_m^0$  = Gleichgewichtsschmelztemperatur bei einem Druck von 1 bar

$p$  = Druck

$p^0$  = Normaldruck

$a, c$  = Konstanten der Simon-Gleichung

Die Zahlenwerte der Konstanten  $a$  und  $c$  und somit auch von  $\alpha_m$  sind polymerabhängig. Für Polyamid 66 wird in [40] ein Zahlenwert von  $\alpha_m = 0,023$  K/bar angegeben, wonach bei einem Druck von 1600 bar eine Erhöhung der Schmelztemperatur um ca. 37 K resultiert.

### 3.5 Integration des Lagerfügens

Zur Einbringung der Lager während des Thermoformprozesses sollte an der Grenzfläche zwischen Lager und FKV-Bauteil eine dauerhafte Metall-Polymer-Stoffverbindung entstehen. Die Verbindung zwischen Metallen und Kunststoffen beruht dabei auf der Adhäsion der beiden Partner und kann in folgende Wirkprinzipien unterteilt werden (siehe Bild 3.15).

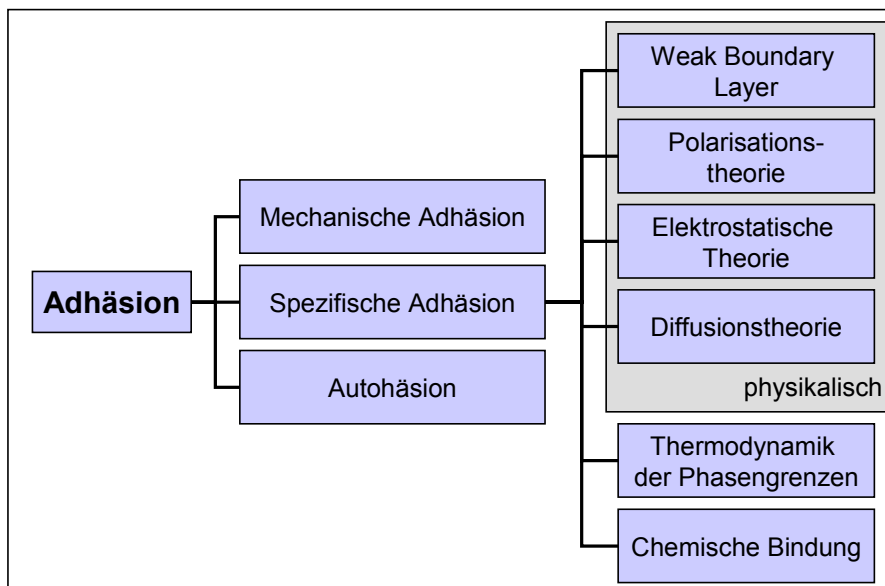


Bild 3.15: Übersicht über die wichtigsten Adhäsionsmodelle [99, 100]

Es werden die drei Adhäsionsarten mechanische und spezifische Adhäsion sowie Autohäsion unterschieden, wobei letztere bei der Herstellung von Metall-Kunststoff-Verbunden nicht zum Einsatz kommt. Vielmehr tritt bei solchen Verbindungen eine Kombination aus mechanischer (Formschluss des Polymers in der rauen Oberflächenstruktur des Metall) und spezifischer Adhäsion auf [101].

Einen großen Einfluss auf die Adhäsion und somit auf die erreichbaren Verbundfestigkeiten hat neben der Vorbehandlungsmethode des Metalls auch dessen Temperatur (siehe Bild 3.16).

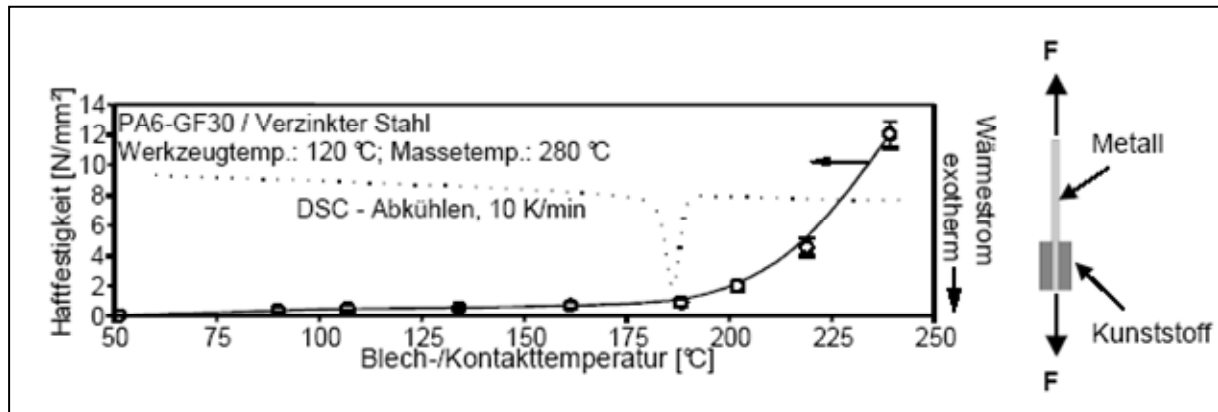


Bild 3.16: Haftung bei Schubbelastung von Metall-Kunststoff-Verbindungen in Abhängigkeit der Blechtemperatur [102]

Bei den Untersuchungen in [102] wurden Hybridverbindungen im Spritzguss-Prozess durch Umspritzen eines metallischen Einlegers hergestellt. Es zeigte sich bei geringeren Temperaturgradienten zwischen Blechtemperatur und Polymerverarbeitungstemperatur ein starker Anstieg der Verbundfestigkeiten. In dem hier vorliegenden untersuchten Fall der Lasteinleitung durch metallische Lager scheidet eine Temperaturerhöhung des metallischen Fügepartners durch die maximale Lagereinsatztemperatur von 80°C aus, weshalb eine Adhäsionsverbesserung alleinig durch Erhöhung der Oberflächenrauigkeit des Lageraußenkäfigs untersucht wird.





## 4 Experimentelle Versuchsdurchführungen und Ergebnisse

### 4.1 Induktive Erwärmung

Der für die Versuche eingesetzte Hochfrequenz-Generator<sup>4</sup> besteht aus einer programmierbaren Steuereinheit und einer Leistungseinheit mit einer maximalen Leistung von 5,2 kW, welche die Erwärmungsköpfe mit den Induktoren ansteuert. Die Ansteuerung der Induktoren erfolgt über das Steuerungsprogramm Diadem<sup>5</sup>, das es erlaubt, die Parameter Induktorleistung, Taktzeiten und Taktpausen getrennt für jeden Induktor einzustellen (vgl. Bild 3.7). Zur Verifikation der Temperaturen ist in das Programmfenster ein Analysetool für die gleichzeitige Temperaturanzeige und Dokumentation über vier Thermoelemente integriert.

Bild 4.1 zeigt drei Wärmebildaufnahmen, die den Temperaturverlauf an der Oberfläche der induktorabgewandten Seite des Organobleches nach dem ersten Pulsen der Induktoren (Bild 4.1a) und nach dem letzten Pulsen (Bild 4.1b) wiedergeben, sowie die spätere Lage der Aufheizzonen in Bezug zu dem Fadenleger (Bild 4.1c). Die Abdeckung der notwendig aufzuheizenden Bereiche des Fadenlegers ist hierbei gut zu erkennen.

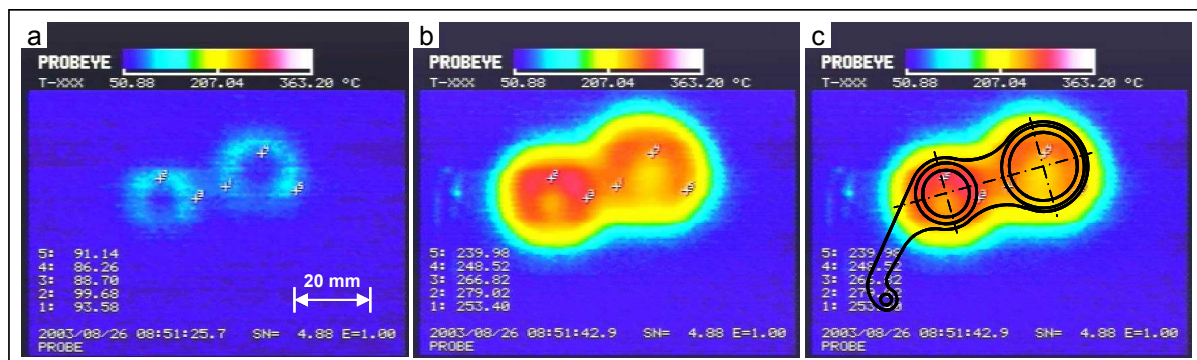


Bild 4.1: Wärmebildaufnahmen nach dem ersten (a) und dem letzten Pulsen (b) und schematische Lage des späteren Fadenlegers (c) (Material: CF/PA66, Aufbau 0°/90°,  $d_{OB} = 2$  mm)

<sup>4</sup> Hersteller: Schultheiss GmbH, Typ: Power Cube 64

<sup>5</sup> Hersteller: National Instruments

Der qualitative Verlauf der Erwärmung über die Organoblechbreite und die Erwärmung an der Organoblechunterseite ist in Bild 4.2 dargestellt. Bei einer Taktrate von 0,5 s und einer Leistungseinstellung von 10 % werden die Aufheizbereiche innerhalb von 30 Sekunden auf Umformtemperatur erwärmt. Eine Erhöhung der Aufheizrate kann durch eine Erhöhung der Leistungsstufe des Verstärkers oder durch eine Verringerung des Induktorabstandes zum Laminat erfolgen. Dies kann zu einer Überhitzung der Matrix an der induktorzugewandten Seite bis hin zur thermischen Oxidation führen.

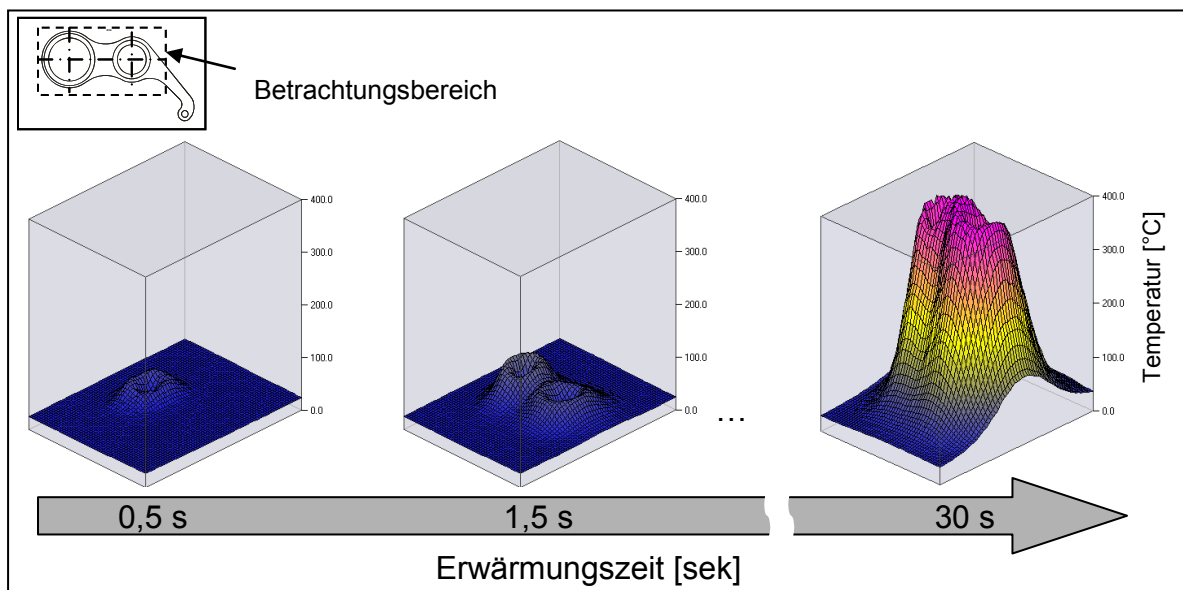


Bild 4.2: Qualitativer Erwärmungsverlauf über die Organoblechbreite der beiden Erwärmungsbereiche (CF/PA66, Aufbau  $0^{\circ}/90^{\circ}$ ,  $d_{OB} = 2$  mm)

Die gleiche Schädigung ergibt sich auch bei einer Erhöhung der Taktzeit. Ab einem dauerhaften Energieeintrag von 1s kommt es bei konstanten Versuchsparametern zu Matrixschädigungen und zu Delaminationen im Laminat, die wiederum den Wärmetransport in Dickenrichtung innerhalb des Laminates behindern.

In Bild 4.3 ist die Größe der aufgeschmolzenen Bereiche im Organoblech ersichtlich. Zur besseren Verdeutlichung der Position wurde ein umgeformtes Organoblech mit eingefügten Lagern gewählt.

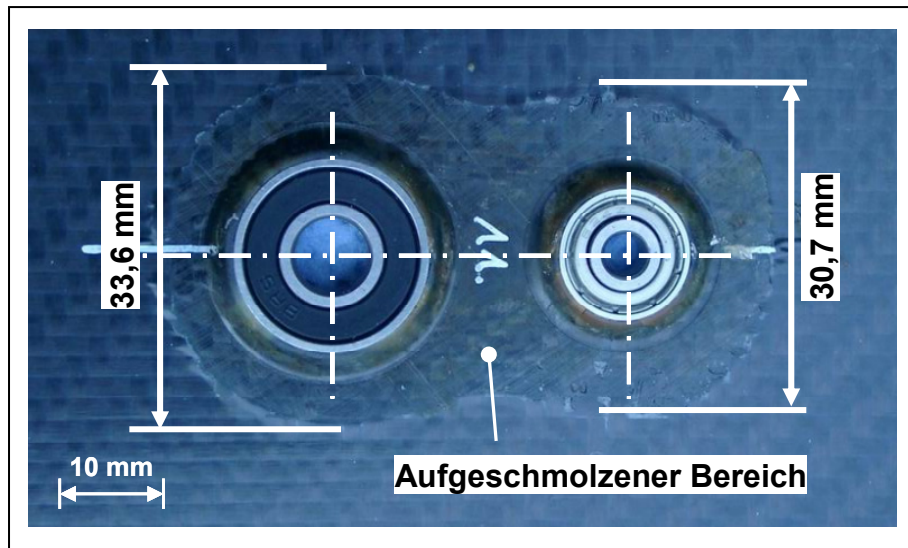


Bild 4.3: Aufgeschmolzene Bereiche nach dem Thermoformen und Lagerfügen (Leistung 10 %, Taktzeit 0,5 s, Material CF/PA66, Aufbau  $0^\circ/90^\circ$ ,  $d_{OB} = 2 \text{ mm}$ )

Da Kunststoffe im viskoelastischen Zustand besonders oxidationsgefährdet sind, können in diesem Zustand thermisch-oxidativen Alterungen eintreten [103]. Nach den Erwärmungsversuchen mit hohem Energieeintrag zeigten sich Bereiche mit einer gelblich bis braunen Verfärbung der Matrix. Die Verfärbung nimmt zu, je höher die erreichte Temperatur ist. In [104] wurden verfärbte Bereiche von extrudierten Proben mittels IR-Spektroskopie untersucht und dabei keine Oxidationsstrukturen gefunden. Daher wird davon ausgegangen, dass die in diesen Versuchen aufgetretenen Verfärbungen nicht auf eine höhere oxidative Schädigung zurückzuführen sind.

## 4.2 Thermoformen

Zur Entwicklung und zur Verifizierung des partiellen Thermoformens mit integriertem Lagerfügen wurden insgesamt vier Versuchsphasen in zwei Themenbereichen durchgeführt.

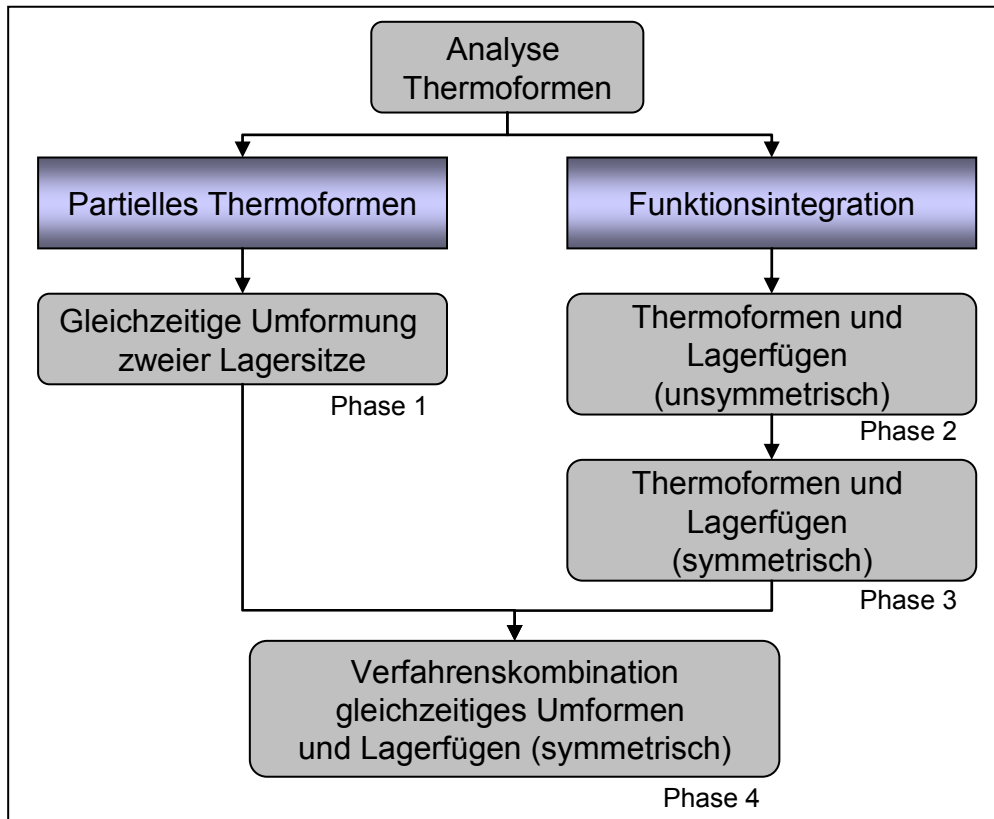


Bild 4.4: Analyse des Thermoformens in vier Thermoformversuchsphasen

Die erste Phase dient der prinzipiellen Machbarkeit des partiellen Thermoformens durch Versuche zum Umformverhalten zweier Lagersitze ohne Hochpressen des Materials und ohne Lagerfügen. In den anschließenden Versuchen wird die Funktionsintegration des Lagerfügens im Thermoformprozess mittels dickenadaptiven Thermoformens analysiert. Aufbauend auf den Ergebnissen der Voruntersuchungen wird eine verfahrenstechnische Kombination beider Prozesse entwickelt, aufgebaut und bewertet. Alle Versuche wurden auf der in Bild 4.5 dargestellte hydraulische Umformpresse<sup>6</sup> durchgeführt, die zur Prozessüberwachung mit einer Kraftmessdose sowie einem Wegmeßsystem ausgestattet ist.

<sup>6</sup> Hersteller: HyPower, Typ: OP 2MI-TR8-115/30

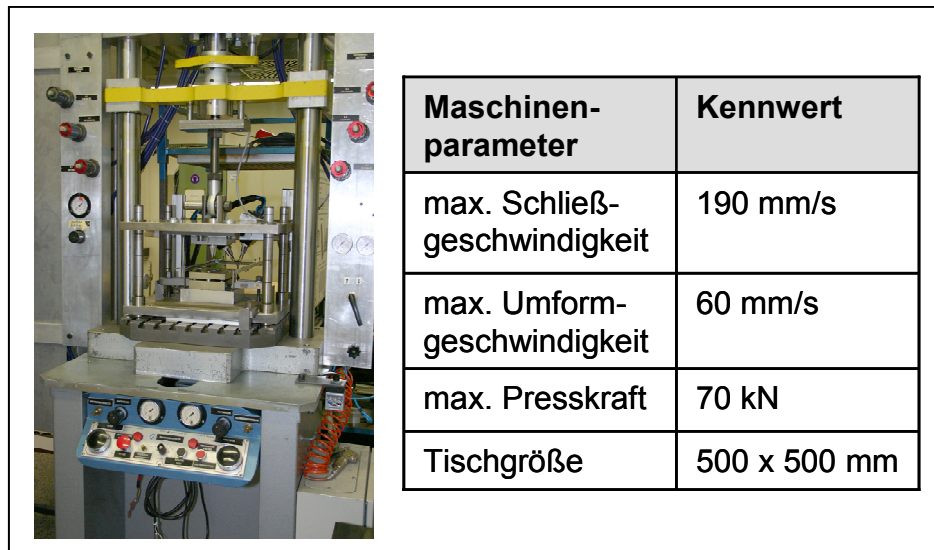


Bild 4.5: Zum Thermoformen verwendete hydraulische Umformpresse

#### 4.2.1 Materialtransport

Das in Kapitel 4.1 dargestellte Verfahren der Aufheizung mittels induktiver Erwärmung wurde bei allen Versuchen angewendet. Die vorkonfektionierten und gebohrten Organobleche mussten hierzu mittels zweier seitlich angebrachter Gleitschlitten eingespannt (vgl. Bild 4.6) werden. Dies erlaubt eine exakte räumliche Positionierung des Organoblechs zu den Induktoren. Der Bohrungsdurchmesser für die Vorbohrungen betrug bei beiden Lagersitzen jeweils  $d_{Loch} = 2$  mm.

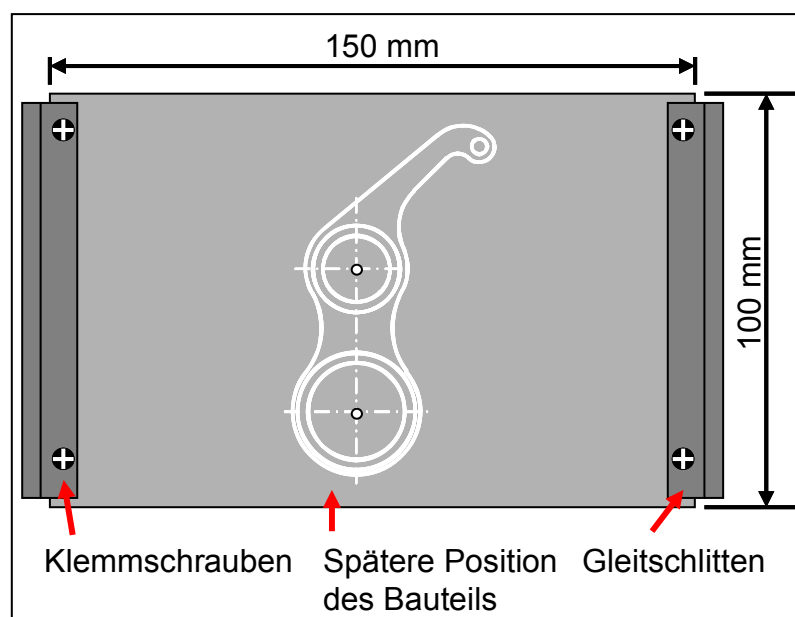


Bild 4.6: Dimensionierung des Versuchsblechs mit Einspannung

Die Aufheizstation ist über zwei Führungsschienen mit dem Thermoformwerkzeug verbunden. Das seitlich in die Gleitschlitten fixierte Organoblech kann dadurch über manuelle Zugstangen nach dem Aufheizvorgang innerhalb von ca. 1 Sekunde zwischen den Werkzeughälften platziert werden (vgl. Bild 4.7). Durch die partielle Aufheizung und die im Vorfeld eingebrachten Bohrungen muss die Zuführvorrichtung eine exakte Positionierung des umzuformenden Materials zu den Umformdornen gewährleisten. Im dargestellten Fall konnten zur optimalen Funktionsgewährleistung eine Lagetoleranz in orthogonaler Ebene zur Pressrichtung von  $\pm 0,5$  mm realisiert werden.

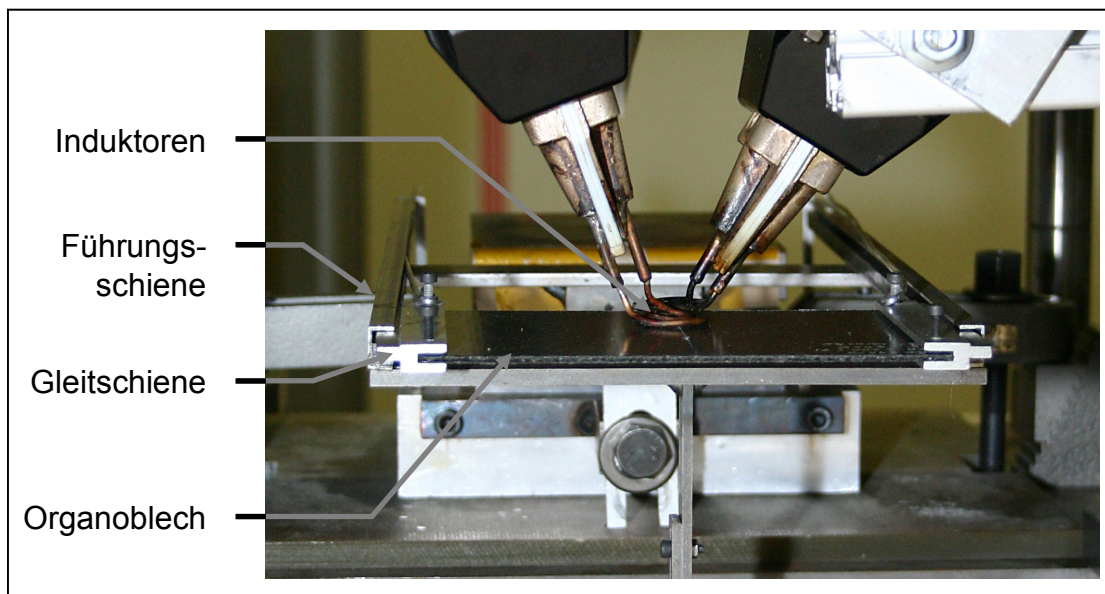


Bild 4.7: Einspann- und Zuführvorrichtung

#### 4.2.2 Umformverhalten beim partiellen Thermoformen (Phase 1)

Prinzipiell lassen sich die beiden in Bild 4.8 dargestellten Versionen zur Aufweitung eines Lagersitzes unterscheiden. Version 1 realisiert die Aufweitung durch das Eindrehen und Eindrücken eines konischen Dornes. Bei Version 2 entfällt die Drehbewegung und die Aufweitung erfolgt ausschließlich durch Druckaufbringung einer linearen Zustellbewegung.



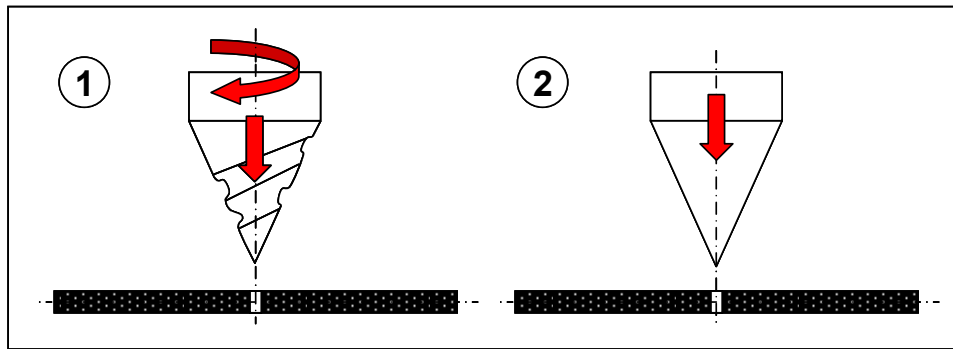


Bild 4.8: Prinzipielle Möglichkeiten der Aufweitung mittels Aufweitdorn

Durch die Kombination zweier Umformbewegungen zeigt Version 1 eine kleinere aufzubringende senkrechte Umformkraft als sie durch einen starren Dorn wie bei Version 2 hervorgerufen wird. Eine aktive Drehbewegung lässt sich nur durch ein mechanisch komplexes Werkzeug realisieren, weshalb für die weiteren Untersuchungen alleinig das Prinzip des nicht drehenden Aufweitdorns (Version 2) angewendet wurde. Die Aufweitung des Materials erfolgt durch die in Bild 4.9 dargestellten Umformschritte, wobei in Schritt 1 durch den kegelförmigen Umformdorn eine kontinuierliche Aufweitung des Materials erfolgt. Zur Ausbildung einer zylindrischen Innenkontur muss das umgeformte Material über einen am Umformdorn vorhandenen zylindrischen Abschnitt im Durchmesser homogenisiert werden. Erst im Anschluss daran kann die Formgebung der Außenkontur erfolgen, da sonst das am kegelförmigen Umformdorn vorhandene überschüssige Material nicht zur Kavitätsausfüllung zur Verfügung steht. Zur Auslegung der Werkzeugkavität muss die Geometrie des Lagersitzes im Vorfeld nach Formel 3.2 und 3.3 in Kapitel 3.2.2 berechnet werden.

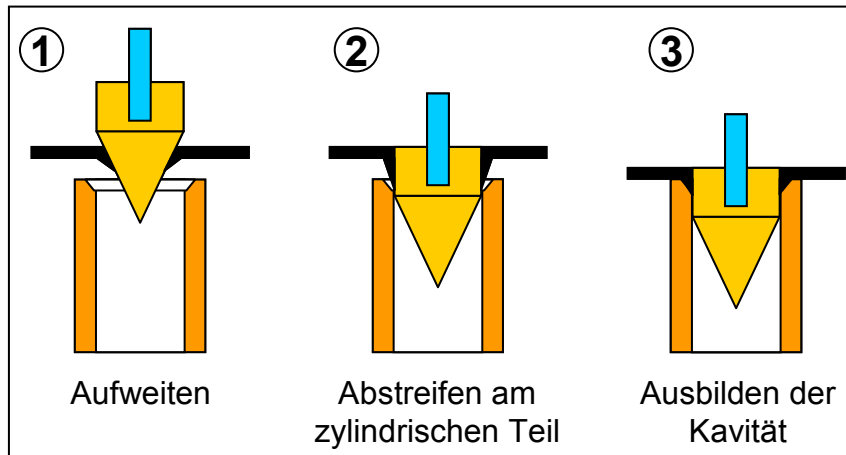


Bild 4.9: Umformbewegung während der Ausbildung eines zylindrischen Lager-sitzes mit einem starren Dorn

Während des Aufweitens des Materials in Schritt 1 erfahren die Fasern durch den Dorn eine starke Umorientierung. Zur Untersuchung des Drapierverhaltens im Bereich der Lagersitze, wurde in das Thermoformwerkzeug eine unimprägnierte Kohlenstofffasergewebelage einlegt und durch Zufahren der Presse an die Umformdorne drapiert (Bild 4.10). Dabei werden die von den Umformdornen beeinflussten einzelnen Faserovings aus dem Gewebeverband herausgezogen wodurch Einschnürungen in den Randbereichen entstehen. Zwischen den beiden Umformbereichen werden die in horizontaler Richtung verlaufenden Kettfäden ( $y$ -Richtung) und die in vertikaler Richtung verlaufenden Schussfäden ( $x$ -Richtung) auseinander geschoben.

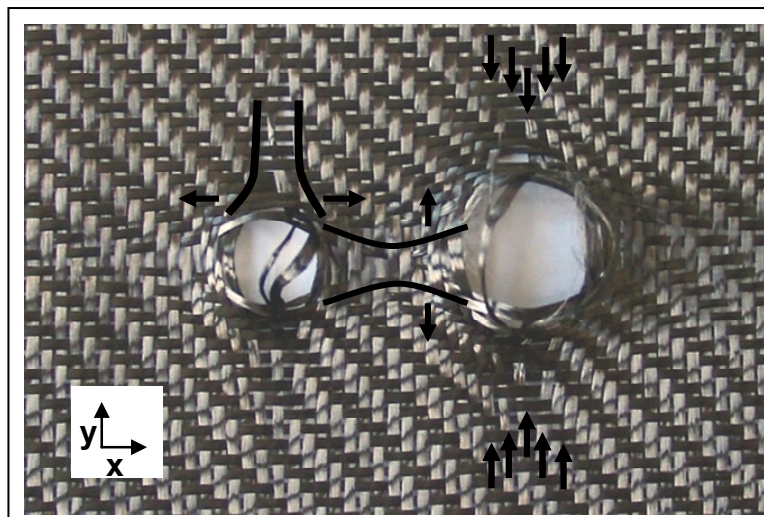


Bild 4.10: Faserorientierung nach der Drapierung zweier Formnester (CF-Körper 2/2 Gewebe)



Diese Drapiereigenschaft kann nicht direkt auf das Umformverhalten während des partiellen Thermoformens übertragen werden, da hier die eingezogenen Rovings durch den unaufgeschmolzenen Bereich am Nachführen verhindert sind (vgl. Bild 4.11). Folglich kommt es mit dem Überschreiten der Dehnrate der Fasern zu Faserbrüchen. Vor Beginn der Umformung wird die Faserarchitektur gezielt durch die Einbringung einer Bohrung im Kegelaufsetzpunkt zerstört, um einerseits das Eindringen des Dorns in den aufgeschmolzenen FKV zu erleichtern und somit die Belastung des Dorns zu verringern. Andererseits werden die am stärksten umgelenkten Faserrovings an dieser Stelle gezielt durchtrennt, um das gewünschte Umformverhalten zu begünstigen. Da die Umformung aus der Mitte heraus selektiv nach außen erfolgt, resultiert eine in diskreten Schritten kontinuierlich aufbauende, notwendige Umformkraft.

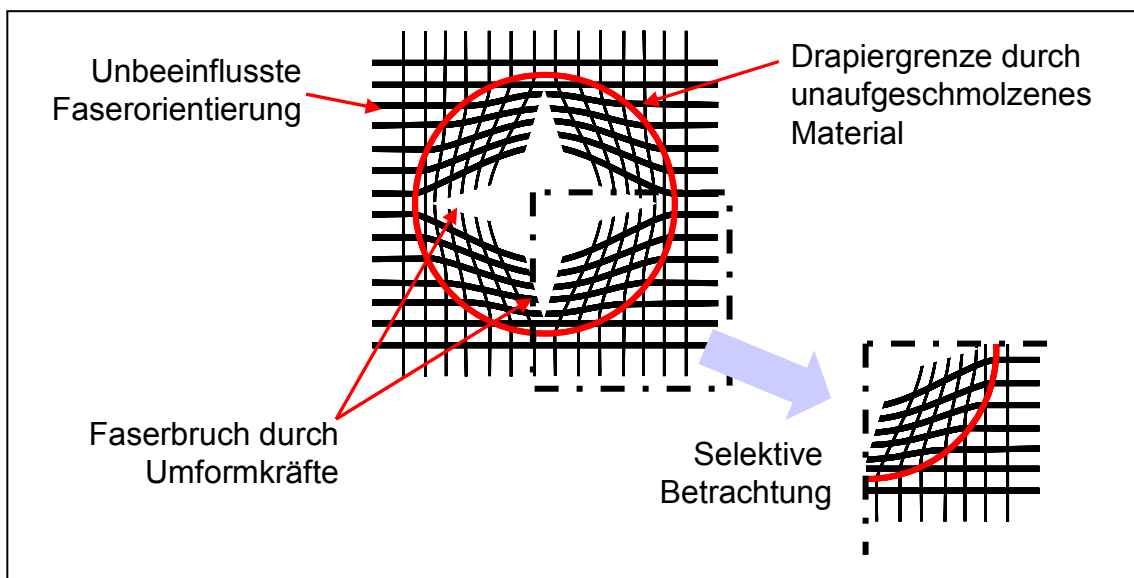


Bild 4.11: Beeinflussung der Fasern beim partiellen Thermoformen

Zur Berechnung der notwendigen Umformkräfte in Schritt 1 (vgl. Bild 4.9) wird das Umformverhalten einer Gewebelage analysiert. Durch den flächigen symmetrischen Aufbau ist zur Berechnung die Reduktion auf nur einen Sektor möglich (Bild 4.11).

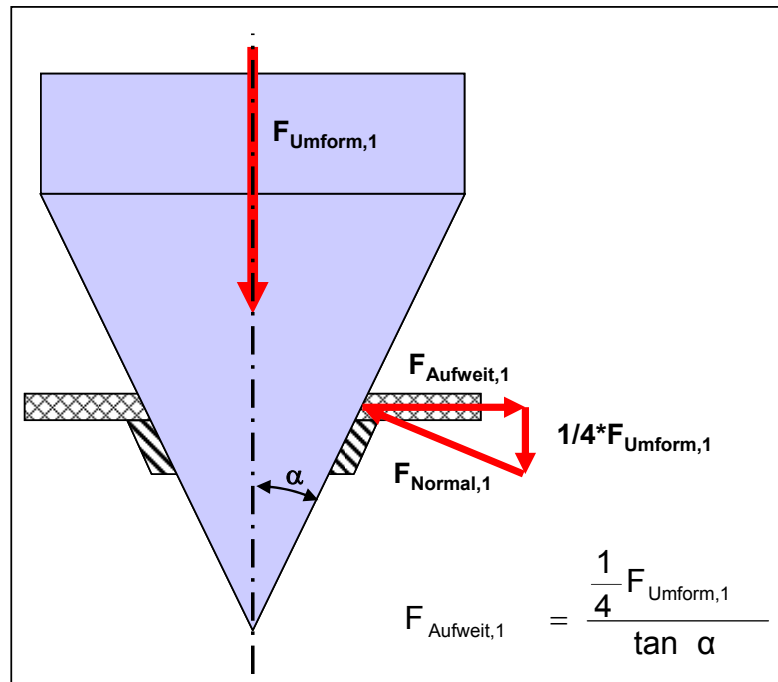


Bild 4.12: Umformkräfte beim Aufweiten ohne Reibkräfte

Durch den notwendigen hohen Kraftaufwand zum Zerreißen der Fasern können die Reibkräfte an der Oberfläche des Stempels zwischen Stempel und aufgeschmolzenem Polymer in der Betrachtung vernachlässigt werden. Die Kraft  $F_{\text{Aufweit},1}$  entspricht daher der Kraft, die zur Aufweitung des Materials und zum Zerreißen der Fasern führt. Bei dem verwendeten Material wird zum Zerreißen eines einzelnen Faserrovings eine maximale Zugkraft von  $F_{\text{Zug}} = 1,7 \text{ kN}$  parallel zur Faserrichtung benötigt. Da während des Umformvorgangs kein linearer Spannungsfall vorliegt, sondern die Kraft seitlich auf die Fasern einwirkt, ist die notwendige Kraft zum Zerreißen der Faserrovings kleiner. Im Verlauf der Versuche wurde ein Anstieg der Umformkraft von bis zu 14 kN während des Aufweitens beider Lagersitze gemessen.

Die Betrachtung des Bereichs zwischen den beiden Formnestern muss differenziert erfolgen, da hier die Fasern nicht durch die unaufgeschmolzene Polymermatrix eingespannt, sondern durch die räumlich benachbarte Umformung in ihrem Nachführverhalten beeinflusst werden (vgl. Bild 4.13).

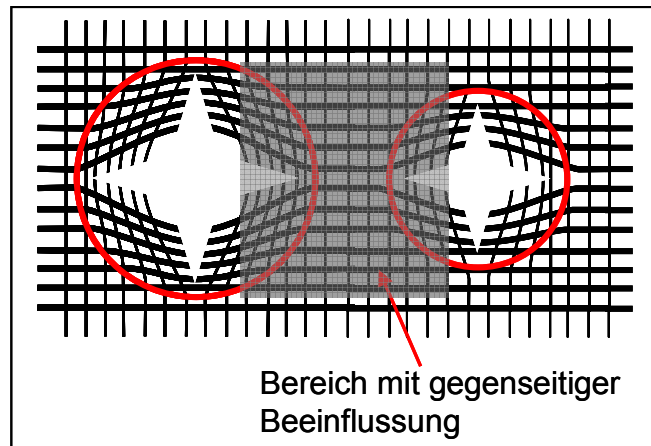


Bild 4.13: Bereich zwischen den beiden Formnestern bei gleichzeitigem partiellen Thermoformen

Zur Validierung der theoretischen Betrachtung wurde ein Versuchswerkzeug zur gleichzeitigen Umformung zweier Formnester mit unsymmetrischen Lagersitzen konzipiert. In erster Iteration konnte eine einseitige Aufdickung von 100 % zur Ausgangsdicke realisiert werden (Lagersitzhöhe  $h_{LS} = 4 \text{ mm}$ ), mit dem Ziel die Verwendbarkeit eines Dornenwerkzeugs zum Umformen von Organoblechen und zur Ausbildung von Lagersitzen zu prüfen.

Der schematische Aufbau des Versuchswerkzeuges ist in Bild 4.14 dargestellt. Die Formgebung erfolgt durch zwei mit dem Oberwerkzeug fest verbundene Metaldornen sowie durch eine eingearbeitete Kavität im Unterwerkzeug. Das Werkzeug selbst besitzt keine weitere Kinematik, so dass die Umformung alleinig durch den linearen Verfahrweg der Umformdorne realisiert wird.

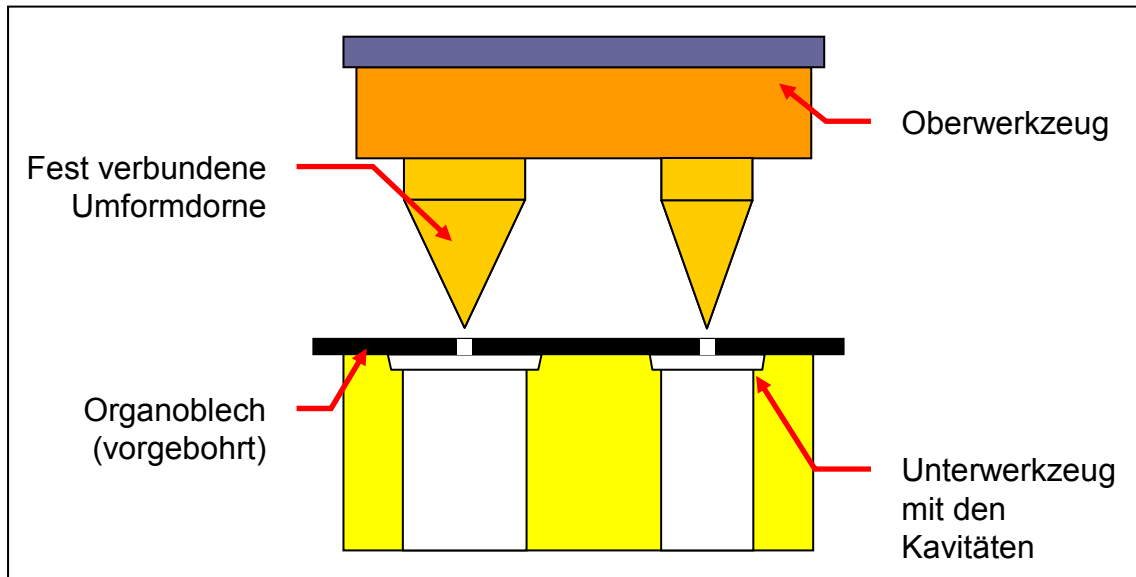


Bild 4.14: Schematischer Aufbau des Versuchswerkzeugs für die gleichzeitige Umformung zweier Formnester (Phase 1)

Die einzelnen Prozessschritte laufen analog zu der in Bild 4.9 dargestellten Umformbewegung ab und sind in die in Bild 4.15 aufgezeigten Schritte übertragbar. Bei einer unzureichenden Ausbildung des zylindrischen Teils kann es zum Abscheren von am Dorn anhaftendem Material kommen, das in Folge dessen der Kavitätsausfüllung nicht mehr zur Verfügung steht. Dennoch konnte mit diesem einfachen Werkzeugkonzept die grundsätzliche Umformbarkeit eines kontinuierlich faserverstärkten Halbzeuges mittels lokaler Erwärmung vorgenommen werden.

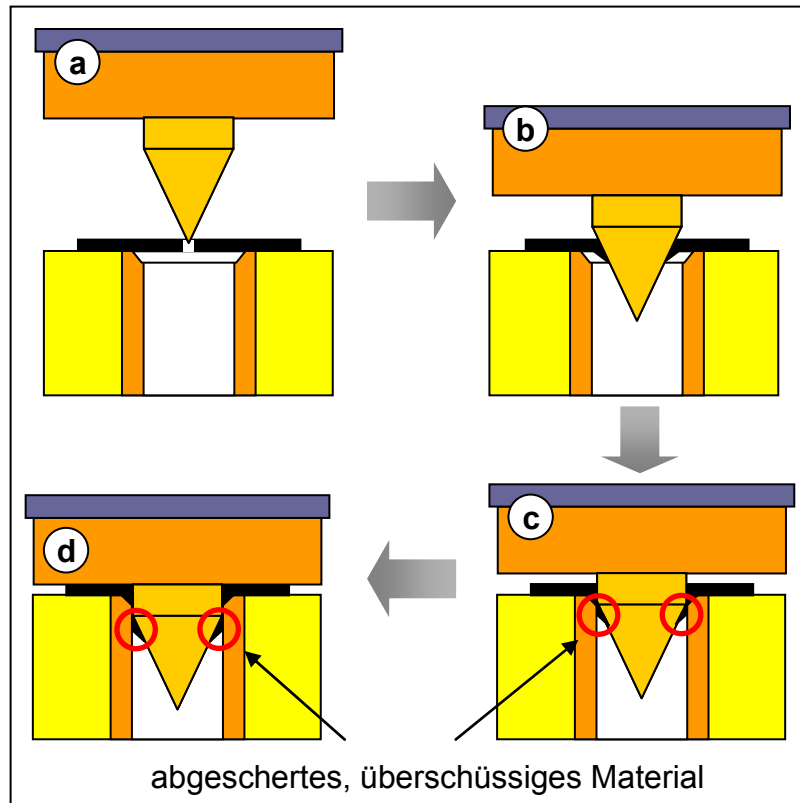


Bild 4.15: Prozessschritte Phase 1 (Lagerfügen als nachgeschalteter Prozess)

Zur Veranschaulichung ist ein umgeformter und mittels Fräsen konturbearbeiteter Fadenhebel in Bild 4.16 mit jeweils einer Unter- und Oberansicht abgebildet.



Bild 4.16: Fadenhebel mit einseitig umgeformten Lagersitzen und gefräster Kontur (Lagersitzhöhe  $h_{LS} = 4 \text{ mm}$ , CF/PA 66)

Trotz einer sehr steilen Ausbildung der Lagersitze wurden die Kavitäten vollständig ausgeformt, wobei im äußeren Randbereich matrixreiche Zonen entstanden. Dies

bestätigt eine lichtmikroskopische Aufnahme von einer schlifftechnisch aufbereiteten Probe des großen Lagersitzes (Bild 4.17). Hierauf sind auch die durch die radiale Aufweitung entstandenen starken Faserverschiebungen zu erkennen.

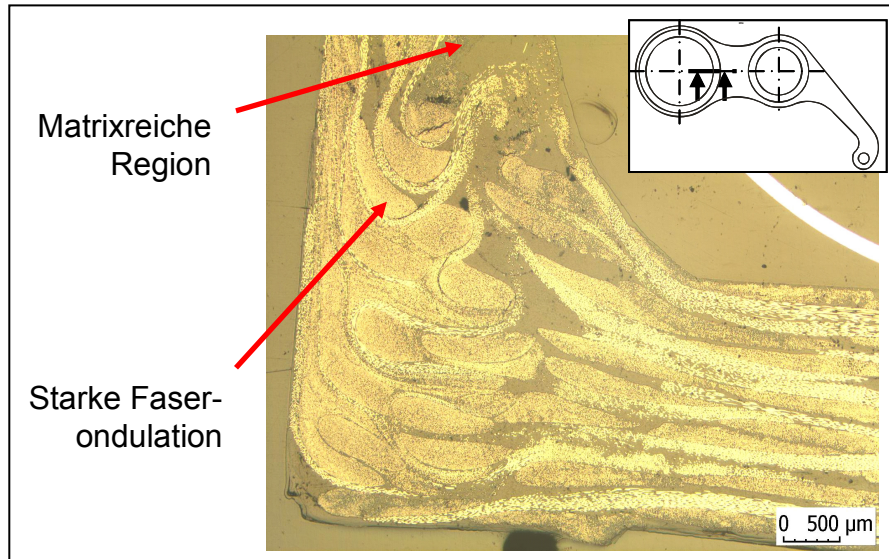


Bild 4.17: Schliffbild einer Detailaufnahme des großen Lagersitzes (Lagersitzhöhe  $h_{LS} = 4 \text{ mm}$ , CF/PA 66)

#### 4.2.3 Funktionsintegration des Lagerfügens in den Thermoformprozess

Die Versuche zum partiellen Thermoformen zweier Formnester bewiesen die prinzipielle Möglichkeit des Aufweitens mittels Umformdorne. Zur Analyse der Funktionsintegration sind weitere Untersuchungen insbesondere zur vollständigen Umschließung möglicher Kraffteinleitungselemente notwendig. Die Position dieser Elemente im Hinblick auf den Materialquerschnitt kann in die in Bild 4.18 dargestellten Varianten klassifiziert werden.

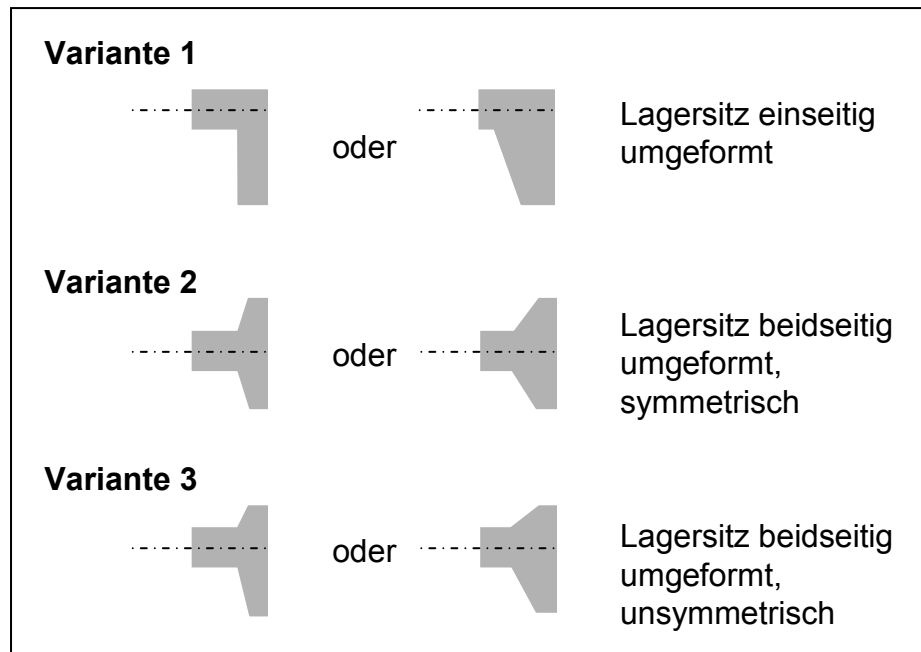


Bild 4.18: Varianten der möglichen Lagersitzgeometrien für das vorgestellte Herstellkonzept

Die Variante 3 ist eine Kombination aus den beiden geometrische extremen Varianten 1 und 2, weshalb im Folgenden nur diese näher untersucht werden.

Da das Lager im umgeformten Lagersitz verbleibt, muss der Dorn einerseits das Material aufweiten und andererseits das Lager positionsgenau einbringen. Der Dorn wird dabei vom Oberwerkzeug gelöst, um das Lager vor der Umformung aufnehmen zu können und nach der Umformung durch Öffnen der Pressen im Lagersitz zu belassen. In Bild 4.19 ist der Verfahrensablauf zur Funktionsintegration dargestellt. Nach der Positionierung des Lagers auf dem Umformdorn (Schritt 1) wird dieser ins Oberwerkzeug eingesetzt (Schritt 2). Um ein Herausfallen zu verhindern kann die Aufnahme entweder durch Presspassung oder durch magnetische Fixierung erfolgen. Nach der Umformung und dem Abkühlen unter Druck (Schritt 3 und 4) öffnet sich die Presse und das umgeformte Halbzeug mit dem gefügten Lager und dem Umformdorn verbleibt im Unterwerkzeug (Schritt 5), woraus sie anschließend entnommen werden.

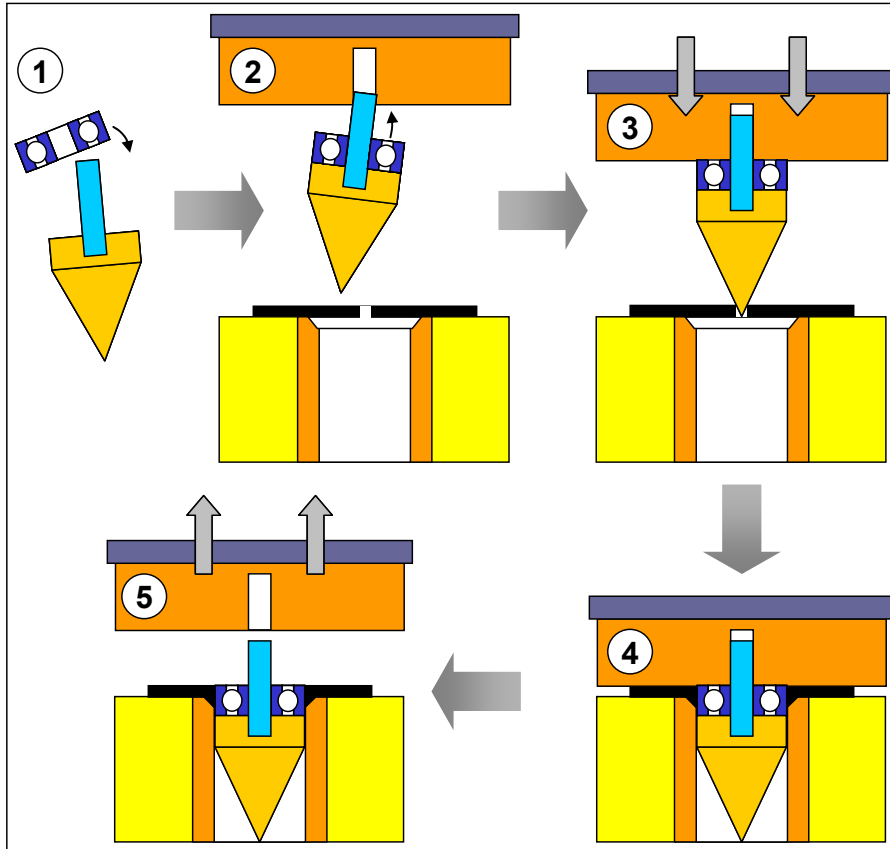


Bild 4.19: Verfahrensablauf integriertes Thermoformen und Lagerfügen

Während des Umformprozesses muss die Umformkraft vom Oberwerkzeug über das Lager auf die Umformdorne übertragen werden. Um Lagerschäden zu vermeiden, darf der Kraftfluss nur über den Lageraußenkäfig erfolgen (Bild 4.20).

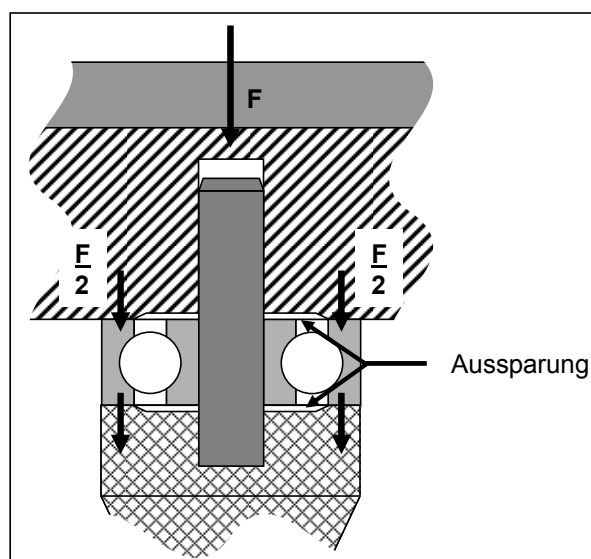


Bild 4.20: Detailansicht der Kraftübertragung zwischen Oberwerkzeug, Lager und Umformdorn



Hierzu wurden in das Oberwerkzeug sowie in den Umformdorn Aussparungen eingebracht, damit das Lager horizontal über den Lageraußenkäfig fixiert ist und der Lagerinnkäfig von der Umformkraft entkoppelt werden kann. Vertikal wird das Lager über einen geschliffenen Stift im Lagerinnenkäfig positioniert.

#### 4.2.3.1 Einseitig unsymmetrischer Lagersitz (Phase 2)

Zur Untersuchung des Thermoformens mit integriertem Lagerfügen eines einseitig unsymmetrischen Lagersitzes diente ein Versuchswerkzeug mit nur einem Formnest. Der schematische Ablauf zur Abformung der in Bild 4.21b aufgezeigten Lagersitzgeometrie verläuft nach Bild 4.19.

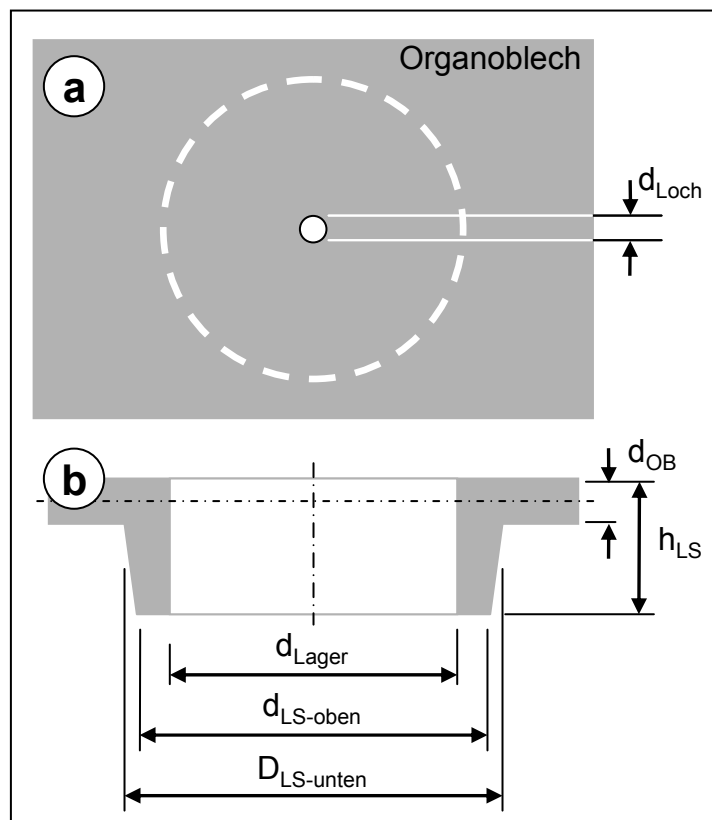


Bild 4.21: Berechnung des Lagersitzvolumens  
a) Draufsicht  
b) Schnitt durch den Lagersitz

Im ersten Schritt muss zunächst eine mögliche Lagersitzgeometrie analog zu der in Kapitel 3.2.2 durchgeführten Rechnungen ermittelt werden, wobei für das Volumen des Lagersitzes nach Gleichung 4.1 gilt:

$$V_{\text{Lagersitz}} = \frac{\pi \cdot (h_{\text{LS}} - d_{\text{OB}})}{12} (D_{\text{LS-unten}}^2 + d_{\text{LS-oben}}^2 + D_{\text{LS-unten}} \cdot d_{\text{LS-oben}}) + \frac{\pi \cdot d_{\text{OB}}}{4} D_{\text{LS-unten}}^2 - \frac{\pi \cdot h_{\text{LS}}}{4} d_{\text{Lager}}^2 \quad (4.1)$$

Bei der geometrischen Auslegung und Berechnung des Lagersitzes sollte darauf geachtet werden, dass das Lager über die komplette Breite mit der gleichen Kraft eingespannt ist. Dies kann durch eine möglichst homogene Dicke des Lagersitzes über die Breite erreicht werden und verhindert somit das Abkippen während des späteren Betriebs. Aus diesen Randbedingungen und einem Lagerdurchmesser von  $D = 19 \text{ mm}$  mit einer Lagersitzhöhe von  $h_{\text{LS}} = 6 \text{ mm}$  ergibt sich die in Bild 4.22 dargestellte Lagersitzgeometrie.

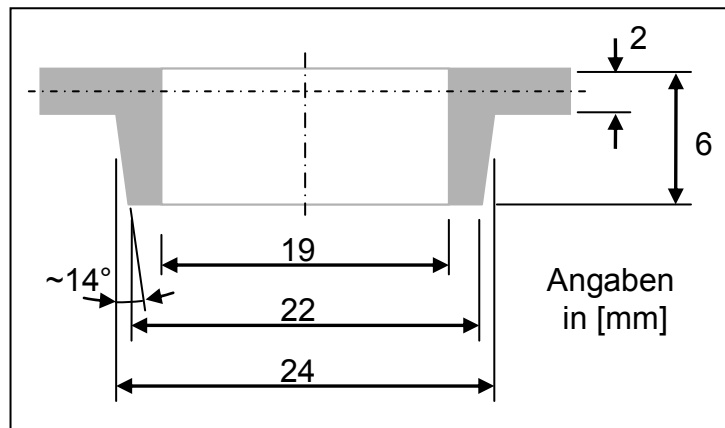


Bild 4.22: Lagersitzgeometrie Variante 1

Die Lagersitzgeometrie wurde in einem Umformwerkzeug realisiert. Die Ergebnisse der Versuche sind in Bild 4.23 dargestellt, wobei es während des Umformprozesses an der Oberkante zu einem Einfließen thermoplastischer Matrix über den Rand des Lageraußenkäfigs kam (Bild 4.23b).

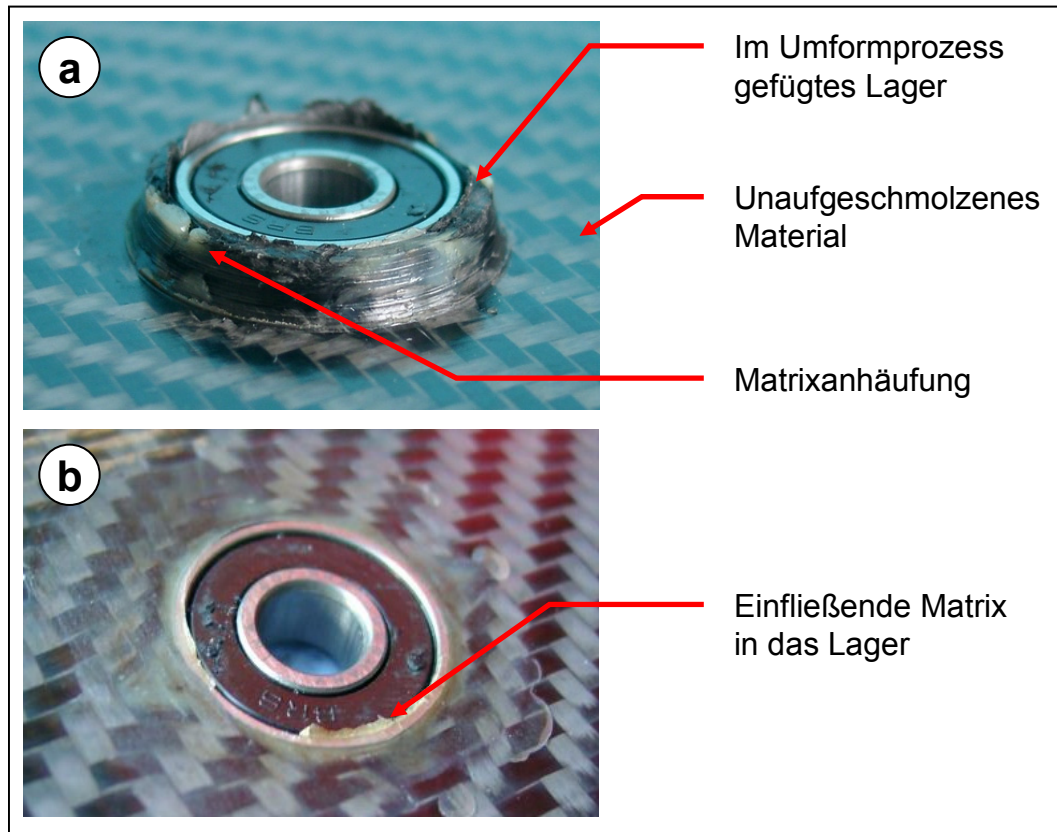


Bild 4.23: Gefügte Lager in eine Richtung umgeformt ( $h_{LS} = 6 \text{ mm}$ )  
 a) Unteransicht  
 b) Draufsicht

#### 4.2.3.2 Symmetrischer Lagersitz (Phasen 3 und 4)

Die bisher dargestellten Thermoformverfahren waren auf die Kavitätsausformung in Pressrichtung beschränkt. Bei Kavitäten entgegengesetzt der Pressrichtung, muss das Material während des Umformprozesses durch Aufbringung einer Gegenbewegung hochgedrückt werden. In Bild 4.24 sind die Prozessschritte zum Ausbilden eines symmetrischen Lagersitzes dargestellt, wobei die Schritte 1 bis 3 der Ausformung eines einseitigen und unsymmetrischen Lagersitzes identisch ist. Die Ausformung der oberen Kavität erfolgt erst im letzten Umformschritt.

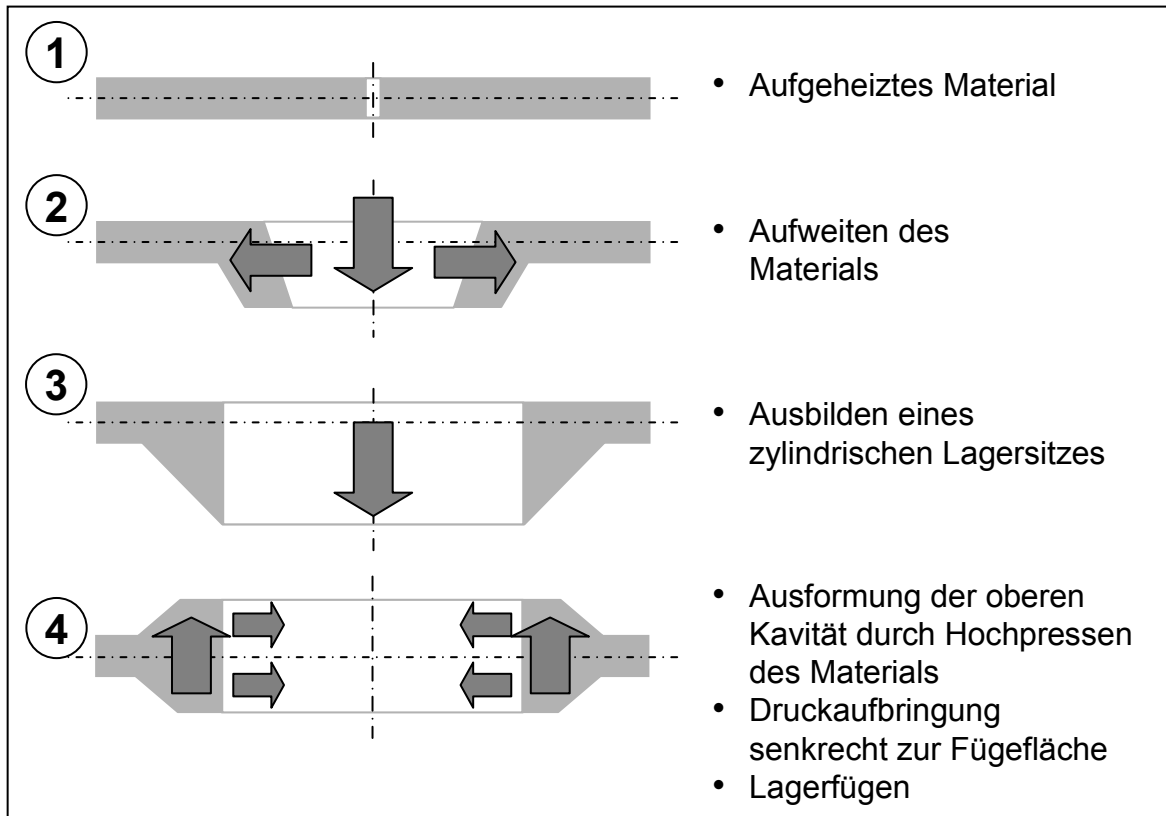


Bild 4.24: Thermoformschritte bei einem symmetrischen Lagersitz

Zum Lagerfügen und zum Ausfüllen der oberen Kavität in Schritt 4 muss sich ein großer Teil der Presskraft auf die Lagersitze konzentrieren. Zur Aufbringung dieser der Umformbewegung entgegengesetzten Kraft können folgende Verfahren eingesetzt werden:

- Mechanisch
- Elektromechanisch
- Pneumatisch/hydraulisch

Die Ansprüche einer hohen Schließgeschwindigkeit des Werkzeuges (Schließzeit < 0,7 s), einem geringen Verfahwege zum Hochpressen des Materials (hier 2 mm) und die für einen Serienprozess notwendige hohe Wiederholgenauigkeit setzen ein eindeutig geführtes, mechanisches System voraus.

Der schematische Aufbau eines solchen Werkzeugkonzeptes ist dem Bild 4.25 zu entnehmen, wobei vor Beginn des Hochpressens die bewegliche Abstreifhülse nach unten durch einen Ringanschlag blockiert wird. Ein Umlenkhebel sorgt dafür, dass die Umformkraft der Schließbewegung entgegengesetzt wird. Nachdem das Material

am zylindrischen Teil des Umformdorns abgestreift wurde, wird die Ausformung der unteren Kavität begonnen und die Abstreifhülse kann der Umformbewegung linear entgegengesetzt bewegt werden. Da das für die Umformung zur Verfügung stehende Volumen des Materials größer ist als der freie Raum der unteren Kavität, wird das Material in die obere freie Kavität gepresst (Bild 4.25 unten).

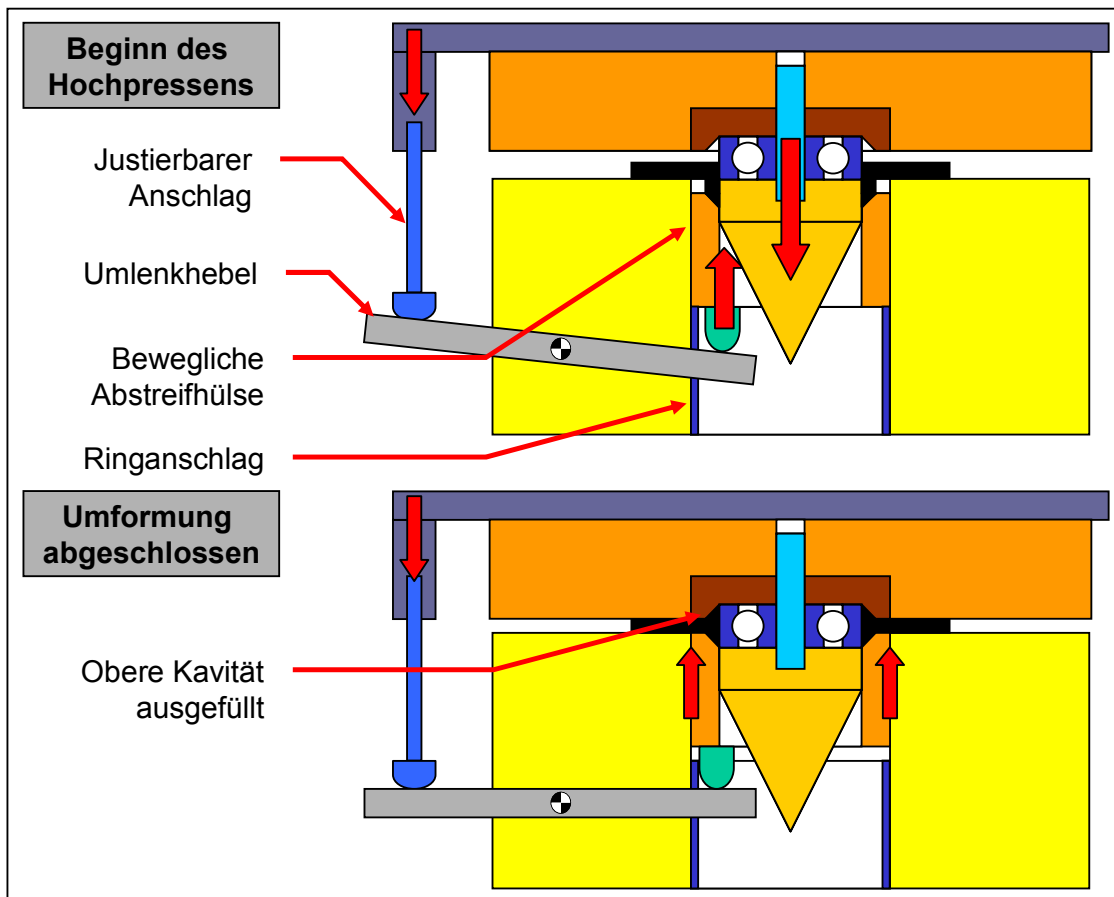


Bild 4.25: Schematischer Aufbau zum Hochdrücken der aufgeschmolzenen Matrix mittels Hebel

Der relative Abstreifweg zwischen Abstreifhülse und zylindrischem Umformdorn und die zur Verfügung stehende Kraft zum Hochdrücken der Abstreifhülse werden durch die Position des Umlenkhebeldrehpunkts definiert. Das Verfahren besitzt den Nachteil, dass nach dem Aufsetzen und somit dem Blockieren des Oberwerkzeugs auf dem Laminat durch die mechanische Kopplung des Oberwerkzeugs mit der Abstreifhülse keine Bewegung mehr realisiert werden kann. Diese Begrenzung der Umformkraft und des –weges bewirken, dass die obere Kavität zwar vollständig ausgefüllt wird, sich aber am oberen Rand des Lagersitzes eine starke unerwünschte Matrixansammlung bildet (Bild 4.26).

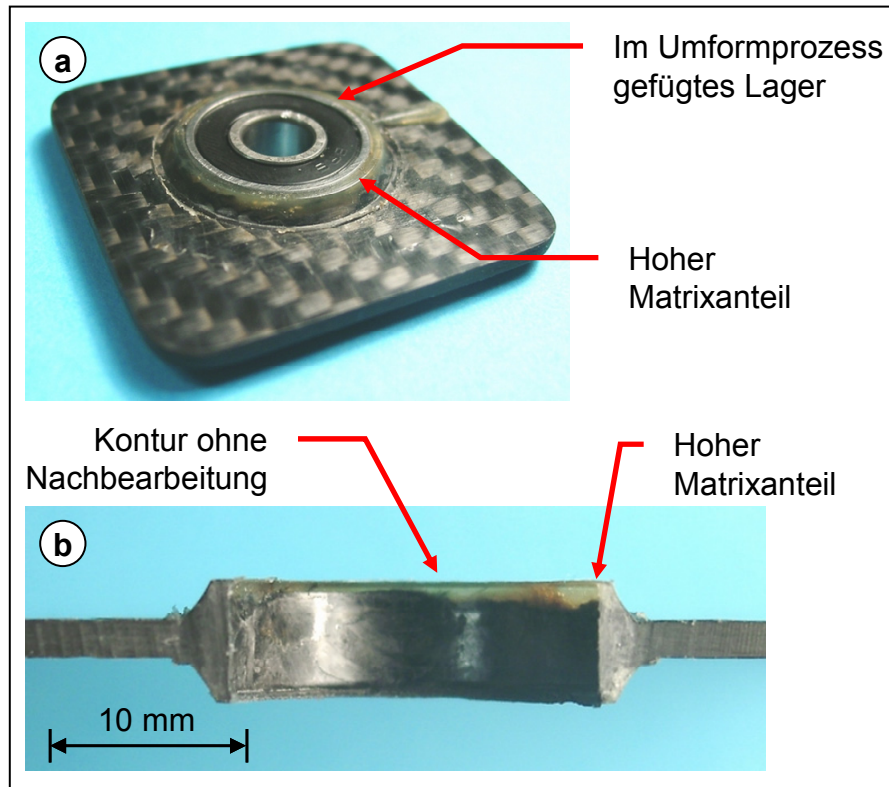


Bild 4.26: a) Lagersitz ( $h_{LS} = 6 \text{ mm}$ ) mittig angeordnet und gefügtes Lager  
b) Schnittansicht (Lager herausgepresst)

Die in Dickenrichtung des Lagersitzes vorherrschende inhomogene Faserverteilung läßt sich auch in der mikroskopischen Betrachtung des Lagersitzes erkennen (Bild 4.27). Hieraus geht hervor, dass die Abstreifhülse nach dem stirnseitigen Aufsetzen auf das Material blockiert und kein weiterer Verfahrweg und kein weiteres Hochpressen mehr möglich ist. Der Differenzbetrag  $\Delta l_x$  ist in dem dargestellten Lagersitz 0,3 mm.

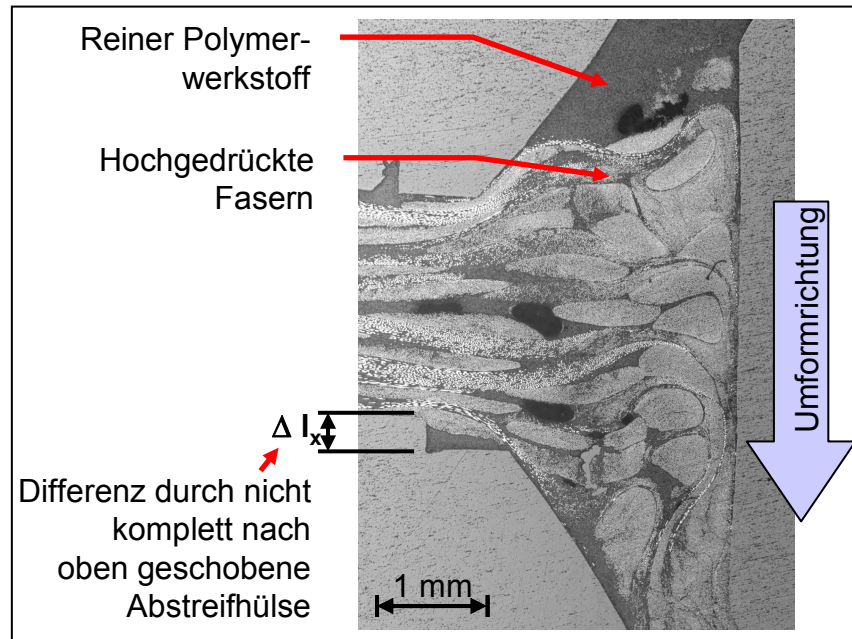


Bild 4.27: Schliffbild eines symmetrisch umgeformten Lagersitzes (Phase 3)

Der Differenzbetrag  $\Delta l_x$  soll durch die Entwicklung eines neuen Werkzeugkonzeptes mit definierter Aufbringung der Gegenbewegung mittels einer gefederten und umformwegspezifisch arretierten Niederhalteplatte eliminiert werden. Hierbei wird der entgegengesetzte Umformweg ( $Weg_x$ ) nicht wie zuvor durch eine bewegte Abstreifhülse (Bild 4.28a) sondern durch die relative Bewegung des Materials zum Umformdorn realisiert (Bild 4.28b).

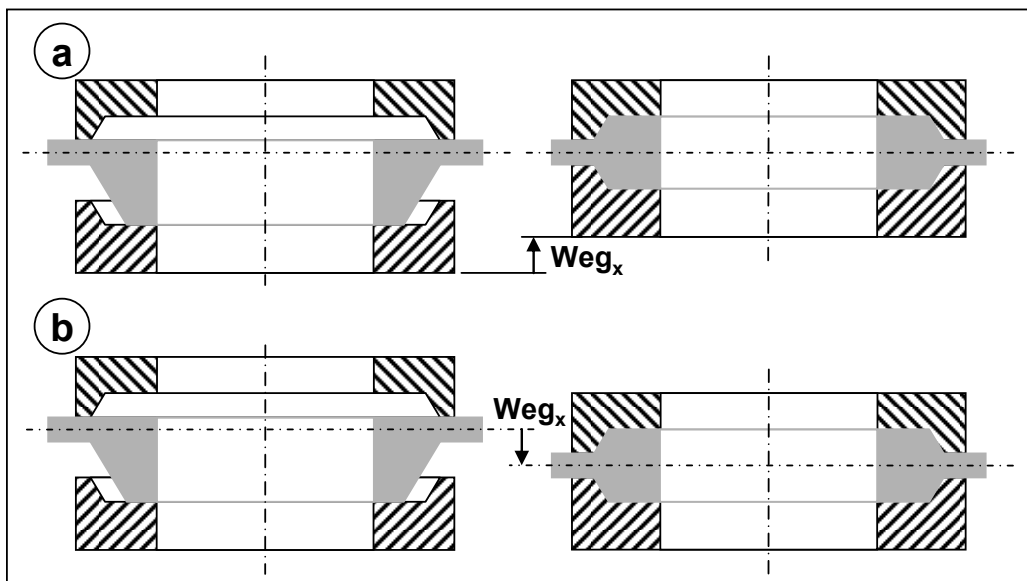


Bild 4.28: Prinzipvarianten zur Aufbringung der Umformbewegung  
 a) fixiertes Material, bewegliche Abstreifhülse  
 b) bewegliches Material, fixierte Abstreifhülse

Um ein vorzeitiges Herunterdrücken des Materials während der in Bild 4.24 aufgezeigten Umformschritte 1 bis 3 zu verhindern und somit die notwendigen Gegenkraft aufzubringen, muss die Materialposition fixiert werden. Erst zu Beginn des Hochpressens darf sich diese Fixierung lösen, was mittels einer gefedert gelagerten und arretierbaren unteren Werkzeugplatte realisiert ist. Die Werkzeugunterplatte nimmt während des Aufweitens und des Ausbildens des zylindrischen Lagersitzes die in das Organoblech eingebrachten Umformkräfte auf. Zur Aufbringung des zum Ausformen der oberen Kavität benötigten Umformdruckes wird die Arretierung gelöst. Dies geschieht durch eine lösbare Plattenarretierung während der Umformung und ermöglicht so einen zweistufigen Thermoformprozess. In Bild 4.29 sind die einzelnen Thermoformprozessschritte dargestellt, wobei ab Schritt c die Fixierung der Werkzeugunterplatte mechanisch gelöst ist. Im Anschluss wird ein Teil der Umformkraft für das Komprimieren der Druckfedern in der unteren Werkzeugplatte benötigt.

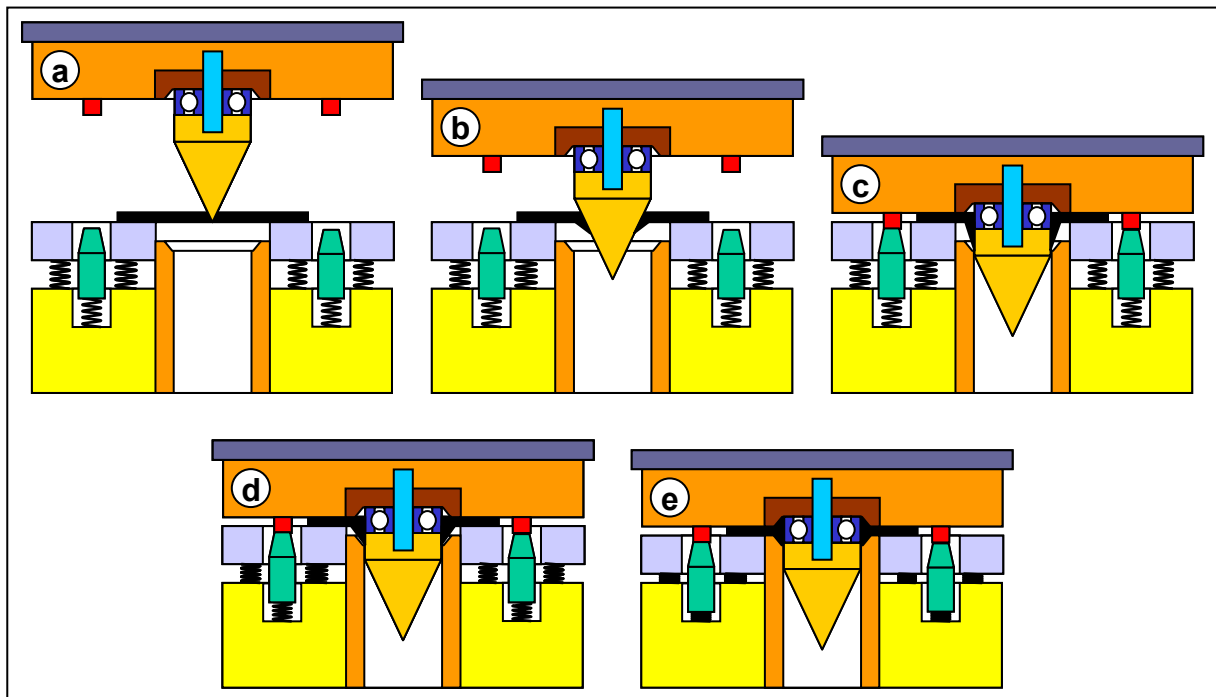


Bild 4.29: Die einzelnen Thermoformprozessschritte (schematisches Werkzeugkonzept)

Die in Bild 4.29 dargestellten Thermoformschritte laufen wie folgt ab:

- a. Transport und Positionierung des aufgeheizten Materials zwischen die Werkzeughälften
- b. Beginn der Umformung mit dem Aufweiten des Materials durch den Umformdorn



- c. Lösung der Arretierung der unteren Werkzeugplatte, Abstreifen des umgeformten Materials am zylindrischen Teil des Umformdorns
- d. Ausformen der unteren Kavität und Beginn des Ausformens der oberen Kavität
- e. Werkzeug komplett geschlossen. Lagersitz geformt und Lager gefügt

Zum Arretieren der unteren Werkzeugplatte und für den Auslösemechanismus wurde ein sich selbsthemmendes Kugelsystem entwickelt (vgl. Bild 4.30).

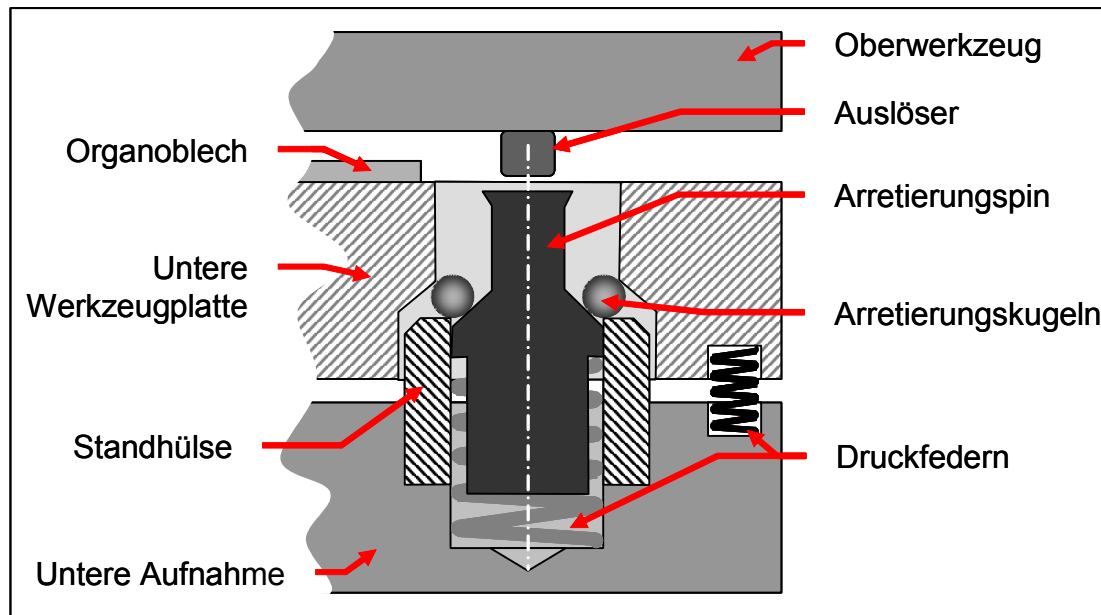


Bild 4.30: Detailansicht des Auslösemechanismus der unteren Werkzeugplatte

Solange die untere Werkzeugplatte arretiert ist (Schritt a und b) werden die Reaktionskräfte über das Organoblech auf die untere Werkzeugplatte abgeleitet. Die Werkzeugplatte bleibt hierbei über die Arretierungspine verriegelt und leitet die Kräfte über die Kugeln auf die Standhülse ab (Bild 4.31a). Nach Kontakt der Auslöser mit den Arretierungspine geben nach einem kurzen Entriegelungsweg die Arretierungspine die Kugeln frei, so dass diese dann nicht mehr im Kraftfluss stehen (Bild 4.31b und c). Ab diesem Zeitpunkt wird die untere Werkzeugplatte durch die über das flächige Organoblech eingeleitete Umformkraft bis zur vollendeten Schließbewegung nach unten bewegt (Bild 4.31d).

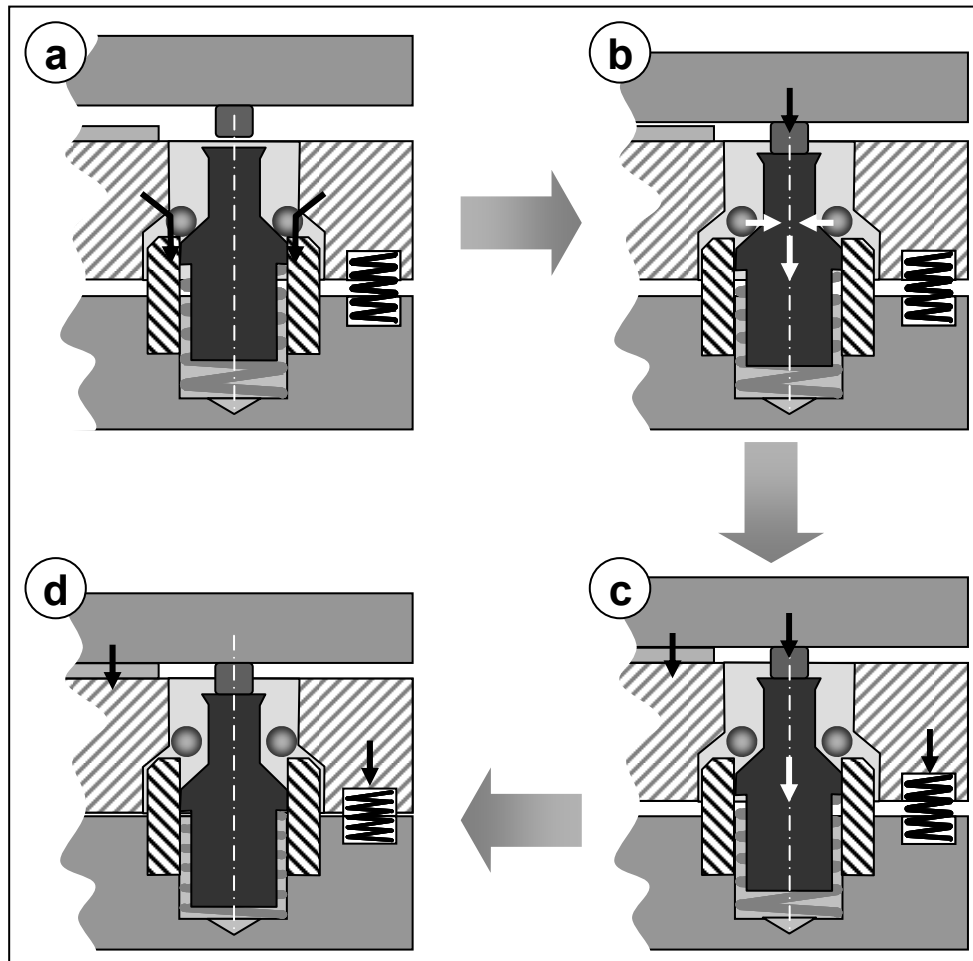


Bild 4.31: Einzelne Phasen des Auslösemechanismus

Die einzelnen schematischen Verfahrwege von Oberwerkzeug, Auslösepin sowie der unteren Werkzeugplatte sind in Bild 4.32 über die Schließzeit dargestellt.

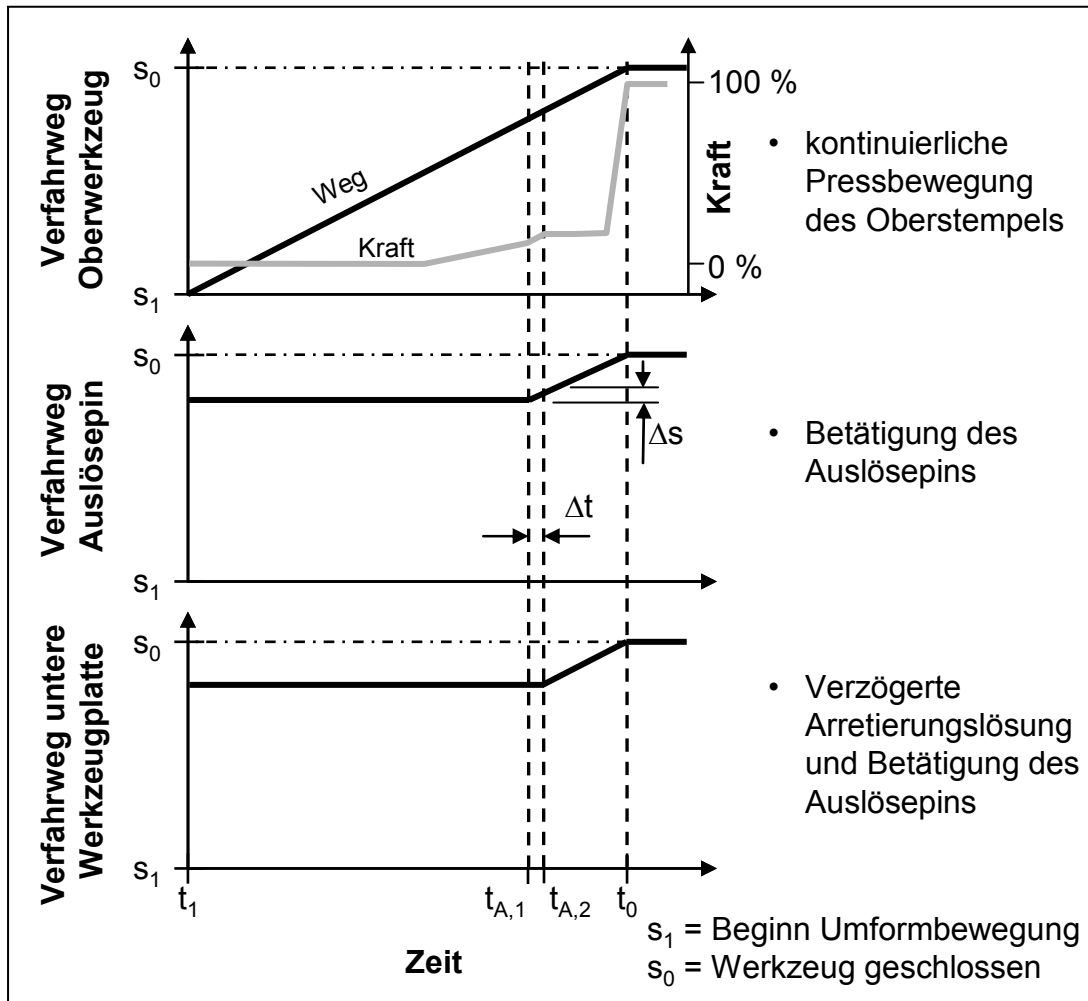


Bild 4.32: Verfahrwege des Oberwerkzeugs, des Auslösepins und der Werkzeugunterplatte sowie der Kraftverlauf über die Schließzeit

Das Oberwerkzeug fährt mit einem kontinuierlichen Verfahrweg nieder und weitet über die Dornen das Material auf, wodurch es zu einer Erhöhung der notwendigen Umformkraft kommt. In der Zeitspanne  $\Delta t$  zwischen dem ersten Kontakt der Auslöser mit den Auslösepins ( $t_{A,1}$ ) und der Entriegelung ( $t_{A,2}$ ) muss das Oberwerkzeug noch den Weg  $\Delta s$  zurücklegen. Ab diesem Zeitpunkt wird die Werkzeugplatte mit der Zufahrbewegung des Oberstempels gekoppelt und das Hochpressen des Materials beginnt.

Dieses Konzept gewährleistet nach Beendigung der Formgebung die Konzentration der Umformkräfte auf die Abstreifhülsen und auf die Formnester (Bild 4.33). In [105] zeigten Versuche, dass der Umformdruck der dominierende Faktor bei der Vermeidung von Fehlstellen während des Thermoformprozesses ist. In dem dargestellten Fall können mit einer maximalen Presskraft von  $F_{max, Presse} = 70 \text{ kN}$  Umformdrücke

von 1950 bar an den Lagersitzen erreicht werden und gewährleistet eine fehlstellenfreie Umformung.

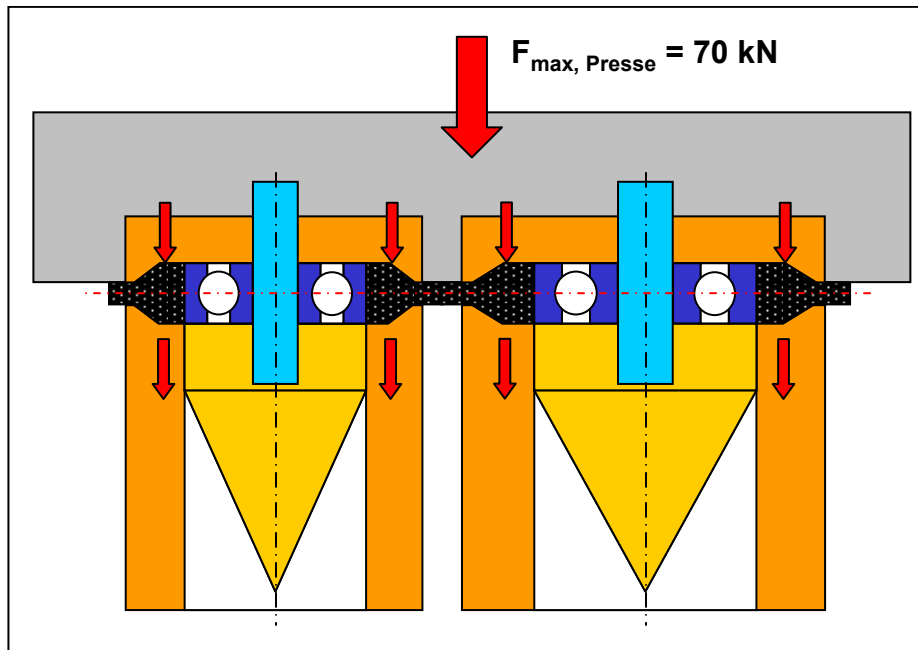


Bild 4.33: Konzentration der Umformkräfte auf die Formnester

Der zuvor beschriebene Auslösemechanismus ist wie in Bild 4.34 dargestellt in das Werkzeug implementiert. Wobei die bewegliche Werkzeugplatte durch vier Druckfedern beim Öffnen des Werkzeugs wieder in die Arretierungsposition gedrückt wird, vgl. Bild 4.30.



Bild 4.34: Umformwerkzeug zum Thermoformen und Lagerfügen (Phase 4)

Die Faserorientierung im Bereich des großen Lagersitzes ist dem Bild 4.35 zu entnehmen. Eine starke Umorientierung der Fasern lässt sich im Bereich des Lagersitzes durch das Hochdrücken des umgeformten Materials in die obere Kavität erkennen. Der Bereich reiner Matrix am oberen Lagersitzende ist hierbei kleiner als bei den vorherigen Versuchen (Bild 4.27). Auch wird die Faserorientierung zwischen den Lagern durch die in diesem Bereich aufgeschmolzene Matrix und die benachbarte Umformung des kleinen Lagersitzes beeinflusst.

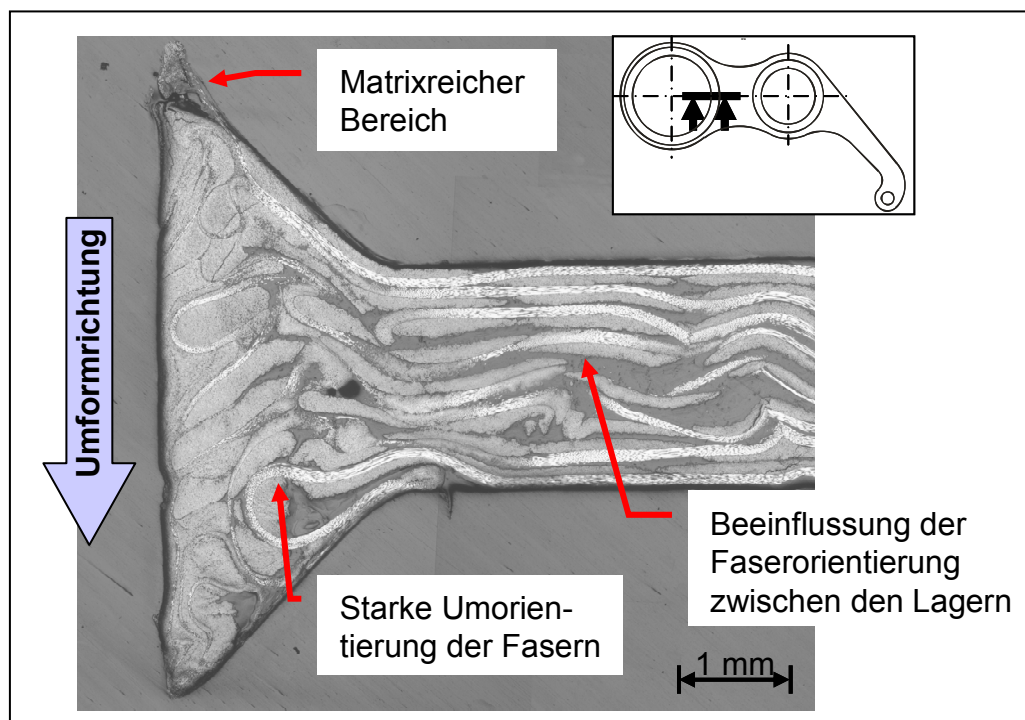


Bild 4.35: Schliffbild eines Lagersitzes (Lagerdurchmesser  $D = 19$  mm, Lager herausgedrückt)

Die Prozessparameter bei den Versuchen lassen sich in den Weg-Zeit-Verläufen in Bild 4.36 ablesen. Während der Schließbewegung fährt der Oberstempel mit einer konstanten Schließgeschwindigkeit von ca. 230 mm/s nieder und formt das Material nach dem ersten Kontakt des Umformdorns innerhalb von  $t_{\text{Umform}} = 0,2$  Sekunden um. Die maschinenseitige, maximale Umformkraft beträgt dabei 70 kN, wobei diese durch die hydraulische Druckaufbauregelung erst nach ca. 0,2 Sekunden erreicht wird und es zu dem in Bild 4.37 dargestellten Kraftkorridor im Einregelbereich kommt. Innerhalb dieser Einregelung wird kurzzeitig eine Maximalkraft von  $F_{\text{max}} = 75$  kN erreicht.

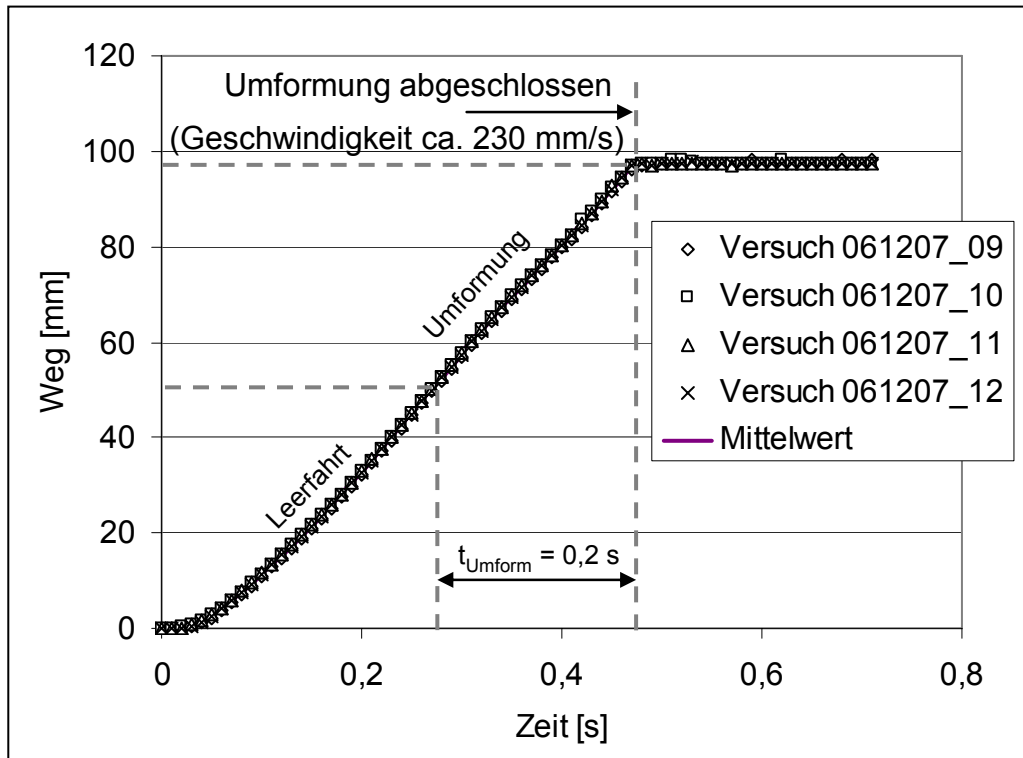


Bild 4.36: Weg-Zeit-Verlauf (Material CF/PA 66, quasi isotrop)

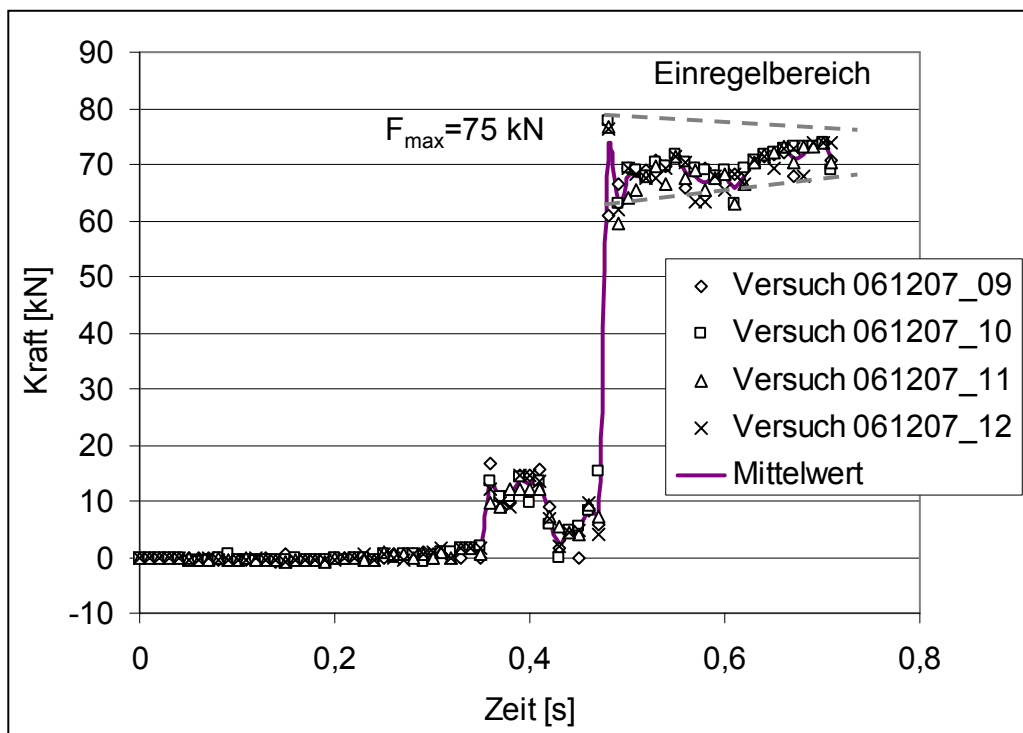


Bild 4.37: Kraft-Zeit-Verlauf mit Einregelbereich (Material CF/PA 66, quasi isotrop)

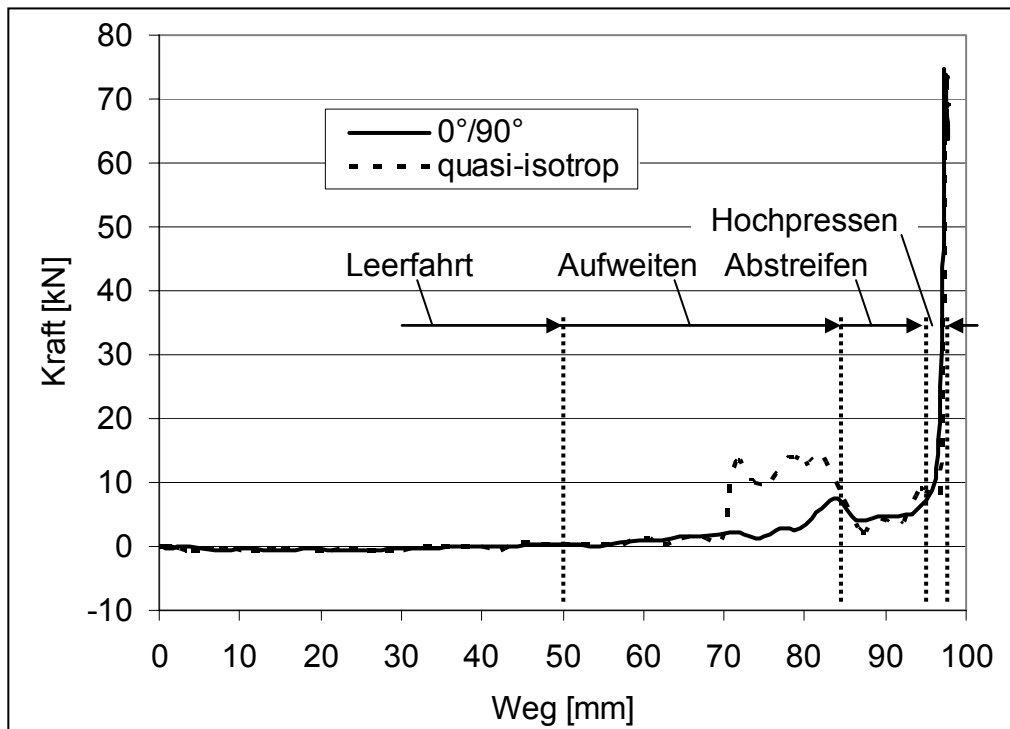


Bild 4.38: Vergleich des Kraft-Weg-Verlaufes zwischen 0°/90° faserorientierten und quasi-isotropen Laminaten

Das Bild 4.38 zeigt den Kraftverlauf in Abhängigkeit des Weges. Aus dem Verlauf lassen sich folgende vier Phasen detektieren: Leerfahrt, Aufweiten, Abstreifen und Hochpressen. Bemerkenswert ist die höhere notwendige Kraft zum Aufweiten des Materials beim quasi-isotropen Material (gestrichelte Linie in Bild 4.38).

Zur Messung des Temperaturverlaufes während der Umformung wurde der Lageraußenkäfig mit einer Nut versehen (Bild 4.39a), in die ein Thermoelement<sup>7</sup> mit Klebstoff<sup>8</sup> fixiert ist (Bild 4.39b). Die Abtastrate der Temperaturmessung ist auf die Mindestzeitspanne von 0,1 s begrenzt.

<sup>7</sup> Typ K (NiCr-Ni-Thermoelement)

<sup>8</sup> Zweikomponenten-Klebstoff auf Epoxidharz-Basis (UHU plus Endfest 300)

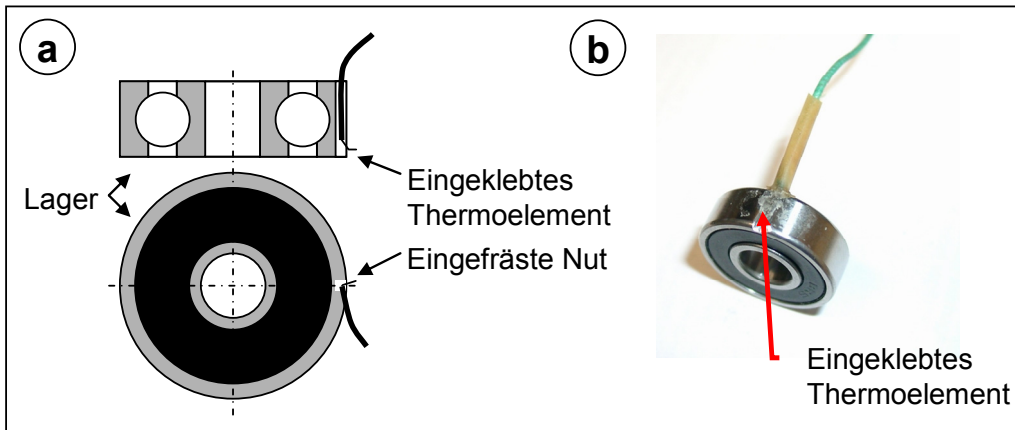


Bild 4.39: a) Position des Thermoelements am Lager  
b) Lageraußenkäfig mit eingeklebtem Thermoelement

Der Temperaturverlauf während des Aufheizens und Umformens zeigt Bild 4.40. Die dargestellte Temperatur des Organoblechs wurde ebenfalls mittels eines Thermoelements Typ K an der Oberseite des Organoblechs aufgezeichnet. Die horizontale Position richtete sich nach dem maximalen Durchmesser  $D_{LS-unten}$  des geformten Lagersitzes (siehe Bild 4.40). Während des Hochpressens löst sich durch die Umformbewegung des Materials dieses Thermoelement, weshalb der Temperaturverlauf ab diesem Zeitpunkt gestrichelt dargestellt ist.

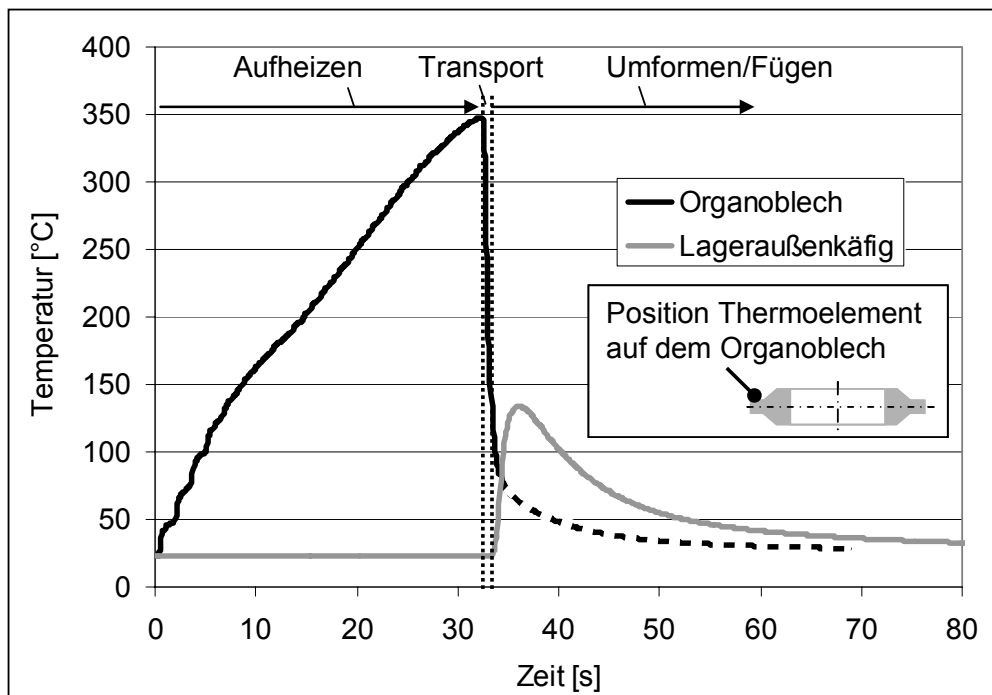


Bild 4.40: Temperaturverlauf während des Aufheizens (Organoblechoberseite) und Thermoformens (Position des Thermoelements am Lageraußenkäfig siehe Bild 4.39)



Innerhalb von 30 Sekunden ist das Laminat auf Umformtemperatur erwärmt. Nach dem Transport von der Aufheizstation zur Umformpresse wird das Organoblech mittels der Dornen aufgeweitet. Während des Prozesses kann wegen der hohen Zufahrtsgeschwindigkeit keine Temperaturmessung des Laminates erfolgen. Erst bei Kontakt des hochgepressten Materials mit dem im Lager integrierten Thermoelement wird die Temperatur wieder aufgezeichnet (graue Kurve in Bild 4.40).

Mit diesem Werkzeug wurde der in Bild 4.41 dargestellte thermogeformte Fadenleger mit integrierten Lagern hergestellt. Die Kontur des Demonstratorbauteils wurde durch Fräsen erzeugt, wobei die ausgeformten Lagersitze keine Nachbearbeitung erforderten. Gegenüber dem Serien-Aluminiumbauteils konnte mit dem CF/PA 66 Fadenheber eine Gewichtseinsparung von 50 % realisiert werden (Bauteilmasse ohne Lager).

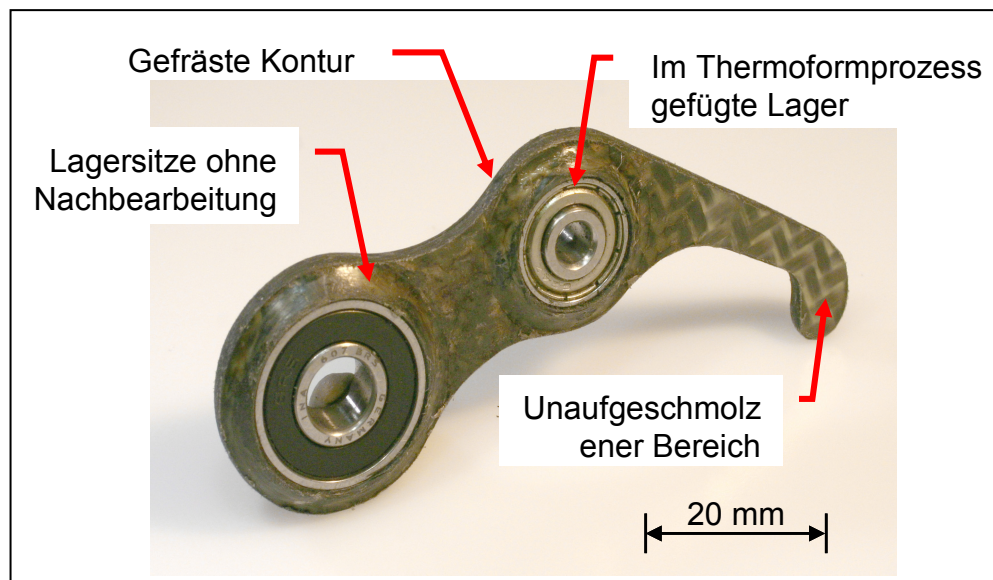


Bild 4.41: Thermogeformter Fadenleger mit eingefügten Lagern (Material CF/PA 66, quasi isotrop)

## 4.3 Lagerfügen

### 4.3.1 Vorbehandlungsmethoden

Die theoretische Betrachtung zur Adhäsion von Metall / Faser-Kunststoff-Verbunden wurde in Kapitel 3.5 erläutert. Zur Analyse der Anhaftung zwischen dem metallischen Rillenkugellager und dem thermoplastischem Lagersitz werden zwei Vorbehand-

lungsmethoden eingesetzt. Zum einen wurden die Lageraußenkäfige entfettet (Aceton gereinigt), zum anderen durch Korundstrahlen<sup>9</sup> mechanisch aufgeraut und im Anschluss mit Aceton entfettet. Bild 4.42 zeigt die Oberflächenstruktur eines ungestrahlten sowie gestrahlten Lageraußenkäfigs. Die gemittelte Rauhtiefe Rz konnte bei den gestrahlten Proben um den Faktor 2,7 auf  $Rz = 19,97 \mu\text{m}$  erhöht werden.

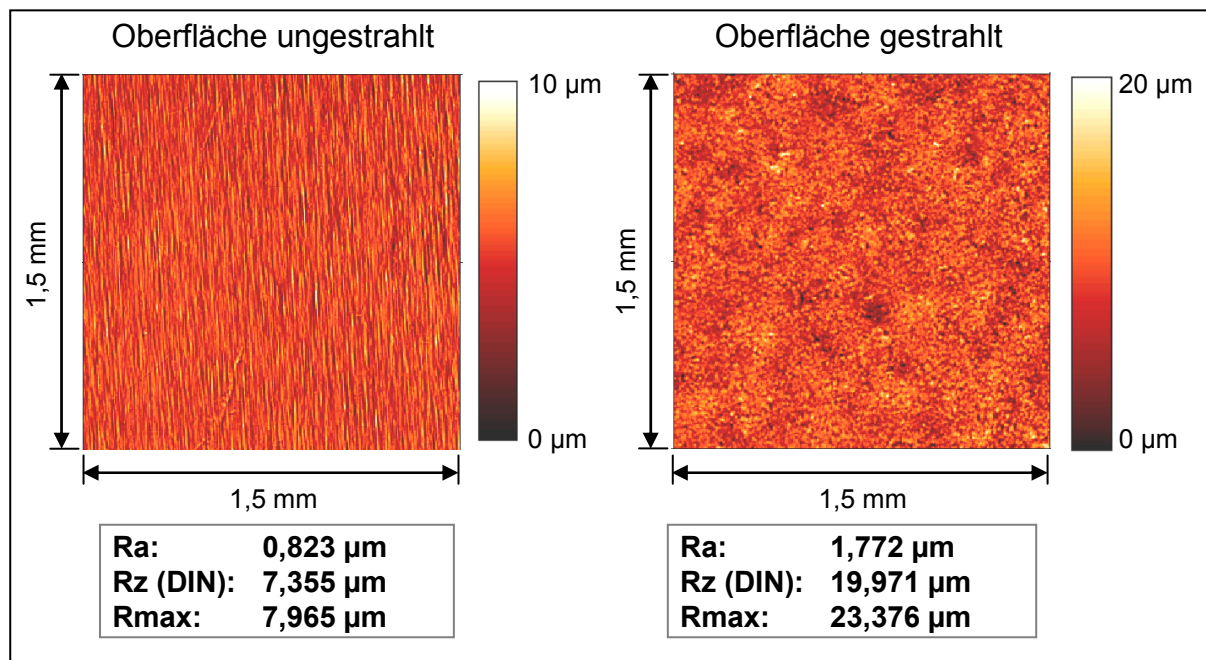


Bild 4.42: Untersuchung des ungestrahlten und korundgestrahlten Lageraußenkäfigs mittels Weißlichtprofilometer und Ebenheitskorrektur (Polynormfilter 2. Ordnung)

Zusätzlich wurden zwei Halbzeuge mit unterschiedlichem Lagenaufbau (Aufbau  $[(\pm 45)_2/(0/90)_2]_s$ , 8 Lagen sowie  $[0/90]$ , 8 Lagen) verwendet.

### 4.3.2 Ausdrückversuche

Zur Ermittlung der Haftung des Lagers in dem umgeformten Lagersitz wurde eine Ausdrückeinheit zur Adaption an eine Zug-Druck-Universalprüfmaschine<sup>10</sup> konstruiert, vgl. Bild 4.43.

<sup>9</sup> Synthetisches Feinstrahlmittel Strahlkorund A 0,25 – 0,5 mm

<sup>10</sup> Hersteller: Zwick, Typ: 1445

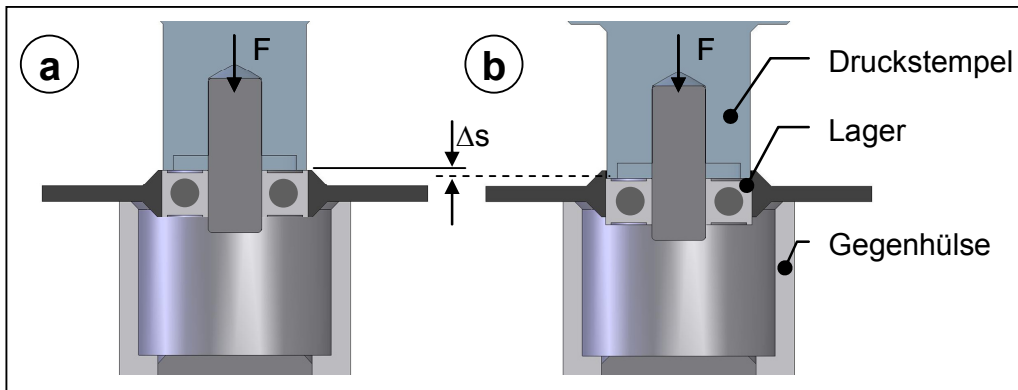
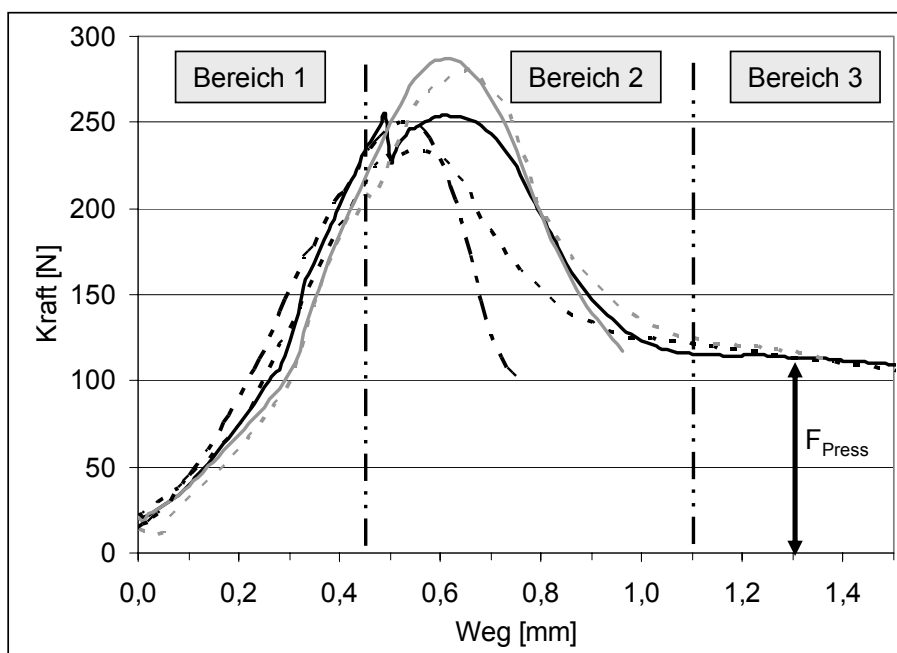


Bild 4.43: Ausdrückeinheit für Universalprüfmaschine

- a) vor der Prüfung  
b) ausgedrücktes Lager

Die Versuche wurden bei einer konstanten Vorspannkraft von 20 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt. Das Bild 4.44 zeigt die Kraft-Weg-Verläufe von fünf Proben (Material:  $0^\circ/90^\circ$ ; Vorbehandlung: entfettet). Die Verläufe lassen sich in folgende drei Bereiche untergliedern:

- Bereich 1: Stetige Zunahme der Kraft über den Weg mit einem parallelen Verlauf für alle Versuche
- Bereich 2: Maximale Kraftaufbringung und Lösen des Lagers
- Bereich 3: Herausdrücken des Lagers aus dem Lagersitz mit einer konstanten Kraft  $F_{Press}$

Bild 4.44: Ausdrückversuche großer Lagersitz (Material  $0^\circ/90^\circ$ , Lager entfettet)

Der Bereich 3 ist als Maß für die durch Schwindung des Polymers im Bereich des Lagersitzes hervorgerufene Presspassung zwischen Lagersitz und Lager anzusehen. Einen weiteren Einfluss auf die Ausdrückkraft  $F_{Press}$  nimmt die Vorbehandlungsmethode und die sich daraus ergebende Änderung der Gleitreibungszahl  $\mu_0$ . In Bild 4.45 wird dies anhand der Kraft-Weg-Verläufe der Mittelwerte aller untersuchten Proben verdeutlicht.

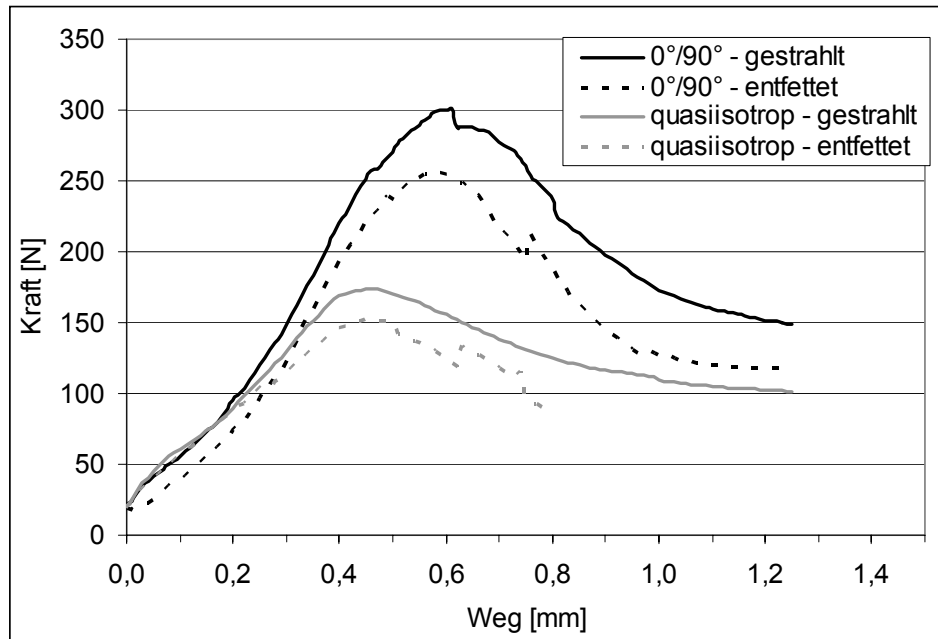


Bild 4.45: Kraft-Weg-Verläufe zweier Materialien und zweier Vorbehandlungsmethoden (Mittelwerte aus 5 Versuchsreihen)

Der sprunghafte Verlauf der Kurven ist auf das vorzeitige Lösen des Lagers aus dem Verbund und dem sich daraus ergebenden Kraftabfall, was zu einem vorzeitigen Prüfabbruch führt, zurückzuführen. Dennoch zeigen die Versuche in allen Bereichen eine niedrigere Ausdrückkraft bei ausschließlich entfetteten (Aceton gereinigten) Proben im Vergleich zu den zusätzlich korundgestrahlten Proben. Bei Vergleich der maximalen Ausdrückkräfte der untersuchten Materialien und Vorbehandlungsmethoden (Bild 4.46), zeigt sich ein geringer Einfluss der Vorbehandlungsmethoden auf die resultierende Verbundfestigkeit. Größeren Einfluss hat die Architektur des Ausgangsmaterials. Da die Materialien den gleichen Faservolumengehalt aufweisen, werden folgende Erklärungsansätze für die variierende Verbundfestigkeit angeführt:

- Unterschiedliche Verteilung der Matrix in der Grenzschicht
- Unterschiedliches Schwindungsverhalten bei den umgeformten Faserarchitekturen und somit unterschiedliche Einspannung der Lager im Verbund

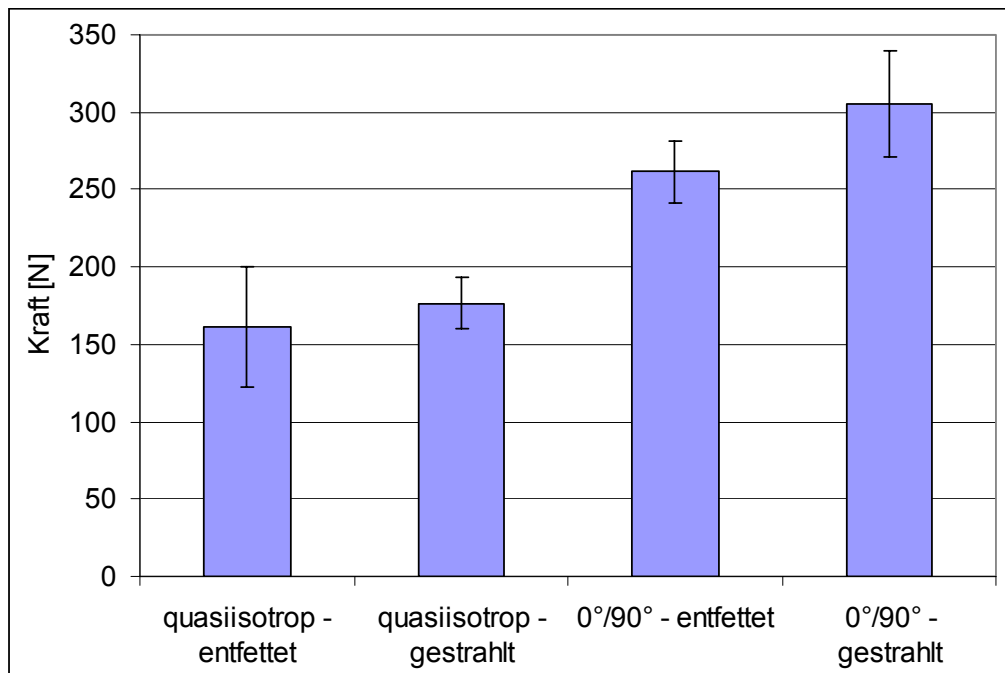


Bild 4.46: Vergleich der Ausdrückkräfte des großen Lagersitzes zu den Vorbehandlungsmethoden

#### 4.4 Bauteilfunktionsprüfung

Zur Bauteilfunktionsprüfung wurden mit den hergestellten Fadenhebeln Nähversuche auf einem Industrieschnellnäher<sup>11</sup> durchgeführt. Während der Versuche wurden die in Tabelle 4.1 aufgeführten Versuchsbedingungen eingehalten.

Tabelle 4.1: Versuchsbedingungen für den Demonstratortest

Parameter	Ausprägung
Drehzahl	In der Einlaufphase $n = 2000/\text{min}$ ; $n_{max} = 5000/\text{min}$
Arbeitstakt	Dauerbetrieb in der Einlaufphase später dann Kurz- und Langzeittakt
Raumtemperatur	24 °C

<sup>11</sup> Hersteller: PFAFF Industrie Maschinen AG, Typ: PFAFF 1163

Zur Analyse der Funktionsfähigkeit dienen folgende vier Überwachungsmethoden:

- Temperaturerfassung
- Antriebsstrommessung
- Lärmemissionsmessung
- Vibrationsmessung

Durch die hohe Lastspielzahl lassen sich direkt am Fadenhebel keine Sensoren zur Temperaturerfassung befestigen, da diese bei Betrieb durch Verfestigungsmechanismen verspröden und brechen würden. Deshalb wurden zur Temperaturüberwachung drei Thermoelemente in den Bereich des sich bewegenden Fadenhebels eingebracht. Dadurch können sich anbahnende Schäden, die durch einen Schwergang der Kugellager entstehen, erfasst werden. Eine zweite Analysemöglichkeit zur Detektion des Bauteile-Schwergangs ist das Messen des elektrischen Stroms in der Zuleitung des Hauptantriebs der Nähmaschine. Die Ergebnisse dieser Betriebsparameter nach 200 Dauerbetriebsstunden sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Alle Werte lagen unter den bei Standard Aluminiumhebeln bisher kritischen Grenzwerten.

Tabelle 4.2: Messergebnisse nach 200 Betriebsstunden

Messort	Ist-Wert	Soll-Wert
Großes Fadenhebel-Kugellager	34 °C	37 °C
Kleines Fadenhebel-Kugellager	35 °C	39 °C
Innenbereich des Nähkopfes	33 °C	36 °C
Strom des Hauptantriebs	0,62 A	0,71 A

Zur Untersuchung des Schalldruckpegels und der Vibrationen wurden Vergleichsnähen zwischen dem Aluminium-Standardhebel und dem CF/PA 66 Fadenhebel durchgeführt. Das Vergleichsnähen fand auf einem Serienobergehäuse der Klasse 1183 statt. Bei gleichen Parametern waren keine Unterschiede in der Nahtqualität zu erkennen.

Bei beiden Konfigurationen ist der Schalldruck bei verschiedenen Drehzahlen aufgenommen worden. Hierzu wurde mit einem Schallpegelanalysator<sup>12</sup> im Hallraum der arbeitsplatzbezogene Emissionswert nach DIN 45635 Teil 48 ermittelt und ausgewertet [106]. Der Detektionsabstand betrug bei den Messungen 0,58 m von dem Bezugspunkt (horizontal 0,5 m vom Nadeleinstichpunkt und vertikal 0,3 m von der Grundplatte). Im oberen Drehzahlbereich konnte mit dem Demonstratorbauteil eine Reduzierung des Schalldrucks um 1dB (A) erreicht werden (siehe Bild 4.47).

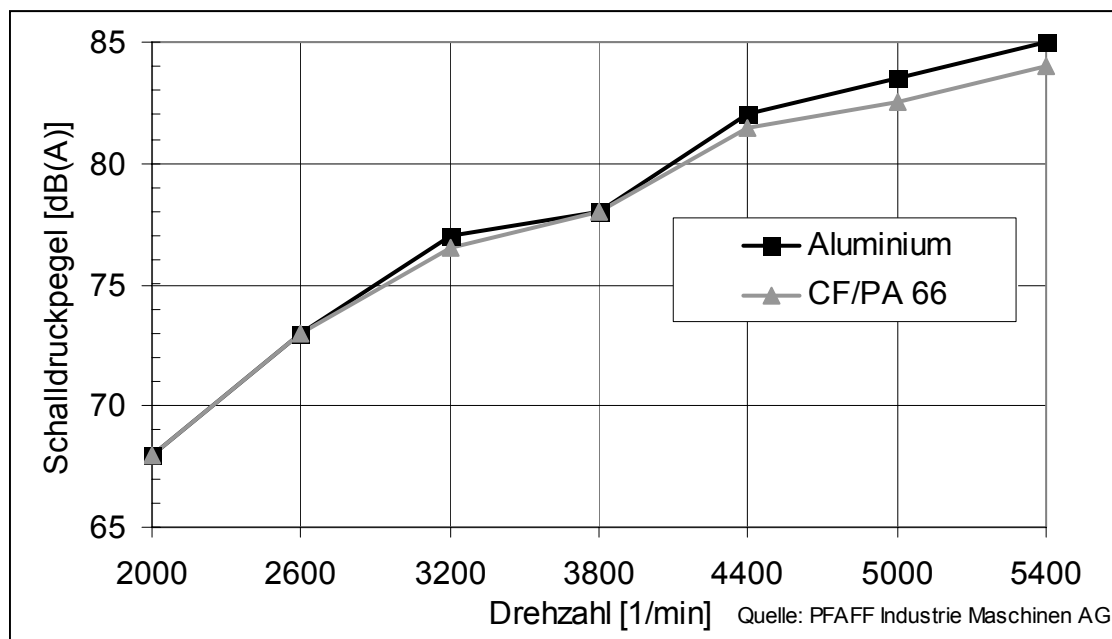


Bild 4.47: Schalldruckpegelmessung im Betrieb

Die gleiche Tendenz zeigten auch die Vibrationsmessungen. Hierzu wurden Schwingungsaufnehmer an der Grundplatte, der Kopfoberseite und der Kopfrückseite der Industrienähmaschine angebracht, um die möglich auftretenden Schwingungen zu messen (vgl. Bild 4.48).

<sup>12</sup> Hersteller: Brüel & Kjær, Typ: 2250

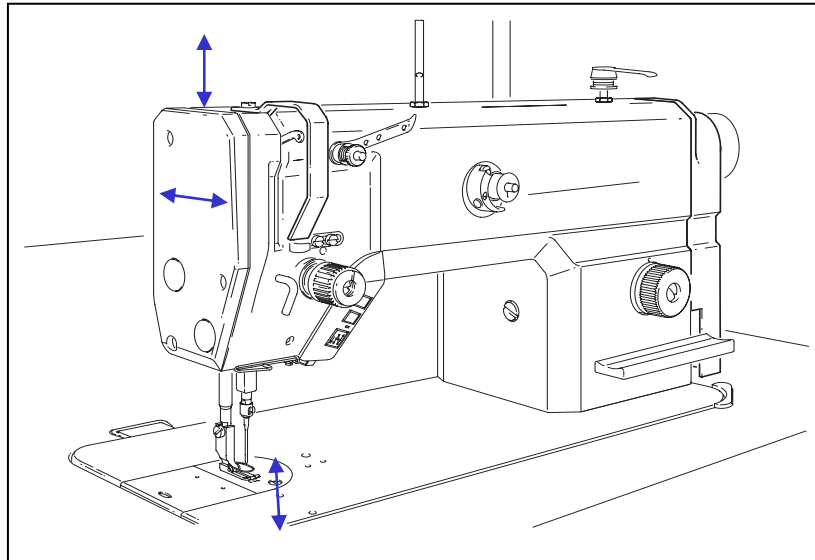


Bild 4.48: Mögliche Schwingungen an einer Industrienähmaschine

Die effektive vertikale Schwinggeschwindigkeit der Grundplatte über der Drehzahl ist in Bild 4.49 exemplarisch für die unterschiedlichen Fadenhebel aufgetragen. Trotz der nicht durchgeführten Massen Anpassung zeigte sich im mittleren Drehzahlbereich eine leichte Verbesserung der vertikalen Grundplattenschwingung.

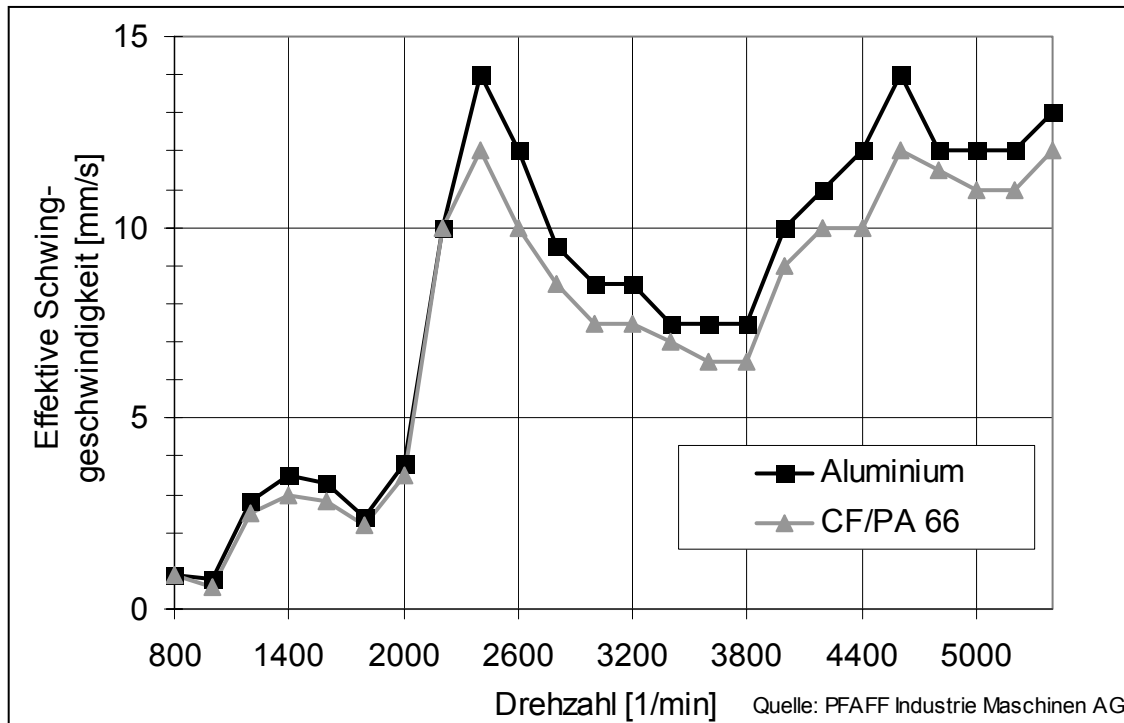


Bild 4.49: Vibrationsvergleich Aluminium- vs. CF/PA 66 Fadenhebel, Grundplatte vertikal



## 4.5 Modellbildung und Vergleichsrechnung

Die aus den vorangegangenen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse beziehen sich explizit auf zwei Lagerdimensionen und Lagersitzgeometrien. In diesem Kapitel werden diese Ergebnisse als Grundlage einer allgemeinen Modellbildung zur Übertragung auf unterschiedliche, geometrische (Materialdicke, Lagerdurchmesser, Lagerhöhe) und thermische (Verarbeitungstemperatur des Thermoplasts) Ausgangsbedingungen herangezogen und ein schematischer Algorithmus zum Einsatz dieser Technologie aufgebaut. Grundsätzlich können dabei zwei Wege aufgezeigt werden:

- Substituierung bestehender Materialien unter Einbehaltung der geometrischen Randbedingungen
- Komplette Neuentwicklung unter Ausnutzung der optimalen Materialperformance und des Herstellprozesses

Bei der Substituierung müssen bestehende Randbedingungen durch den Einsatz des partiellen Thermoformens berücksichtigt werden, wobei die Verfahrensgrenzen stark eingeschränkt sind. Bei einer kompletten Neuentwicklung können hingegen die prozessoptimalen geometrischen und materialspezifischen Parameter zur Bauteilauslegung herangezogen und das Technologiepotenzial voll ausgeschöpft werden.

### 4.5.1 Geometrische Restriktionen

Durch die In-situ Materialaufdickung müssen zur Realisierung unterschiedlicher Geometrien die geometrischen Randbedingungen im Vorfeld abgeklärt werden. Dabei sind die in Bild 4.50 dargestellten Einflussfaktoren zu beachten.

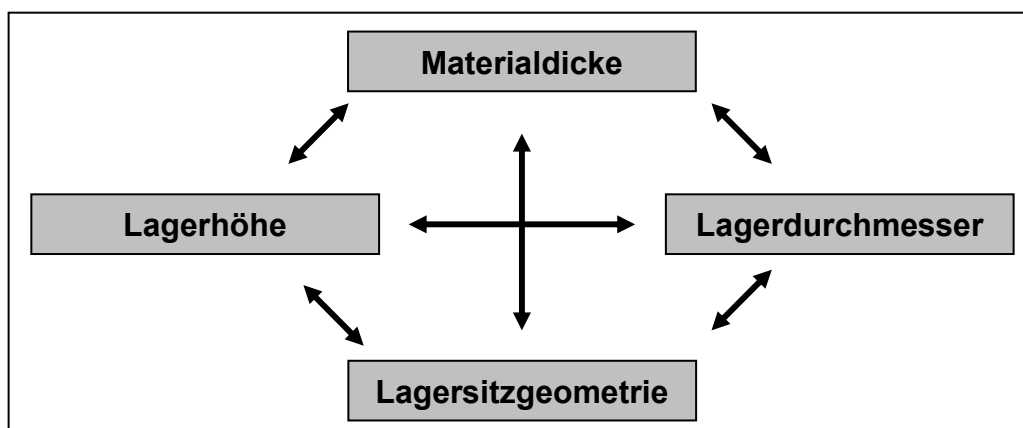


Bild 4.50: Einflussfaktoren auf die geometrischen Restriktionen

Die aufgeführten Einflussfaktoren sind untereinander abhängig und durch den Herstellprozess determiniert. Wobei die einzelnen geometrischen Randbedingungen entweder durch eine Festigkeitsberechnung ermittelt werden müssen, oder durch den Prozess vorgegeben sind.

Die Grundlage aller Berechnungen zur Geometrie ist die Volumenkonstanz (vgl. Kapitel 3.2.2). Die Lagersitzgeometrie kann dabei in drei Varianten ausgeführt werden (vgl. Bild 4.18). Die Variante 1 ist die im Thermoformprozess durch einseitige Umformung am günstigsten realisierbare Geometrie. Bei den Varianten 2 und 3 müssen die in Kapitel 4.2.3 dargestellten kinematischen Grundvoraussetzungen in der Werkzeugauslegung umgesetzt werden und setzen deshalb eine komplexere Werkzeugauslegung voraus.

Aus diesem Grund muss zur Berechnung einer möglichen Lagerintegration die vorgegebene Materialdicke  $d_{OB}$ , sowie die äußeren Abmessungen des Lagerdurchmesser  $D$  und der Lagerbreite  $B$  des einzufügenden Lagers herangezogen werden. Bei einem beidseitig symmetrischen Lagersitzwinkel von  $45^\circ$  ergibt sich aus den Gleichungen 3.2 und 3.1 in Kapitel 3.2.2 folgender Zusammenhang:

$$D = \sqrt{\frac{(B - d_{OB})^3}{4 \cdot d_{OB}} \left( \frac{B - d_{OB}}{d_{OB}} + \frac{4}{3} \right)} + \frac{(B - d_{OB})^2}{2 \cdot d_{OB}} \quad (4.2)$$

mit  $D$  = Lagerdurchmesser [mm]

$B$  = Lagerbreite [mm]

$d_{OB}$  = Materialdicke [mm]

In Bild 4.51 lassen sich für die unterschiedlichen Lagerabmessungen  $B$  und  $D$  die minimal notwendige Materialdicke zur kompletten Ausformung ablesen. Alle Werte links von den jeweiligen Kurven können mit den spezifischen Materialdicken in Bezug auf die Volumenrestriktion realisiert werden. So kann z. B. ein Lager mit einem Außendurchmesser von  $D = 17$  mm und einer Lagerhöhe  $B = 6$  mm erst ab einer Materialdicke von 1,5 mm umformtechnisch eingebunden werden. Ferner lassen sich an der Grafik Schätzwerte der möglich einzubinden Lagerabmessungen bei vorhandener Materialdicke ablesen. So können im vorliegenden Fall bei einer untersuchten Materialdicke  $d_{OB} = 2$  mm Lager mit einer Breite von  $B = 6$  mm ab einem Durchmesser  $D = 9,2$  mm eingebunden werden.

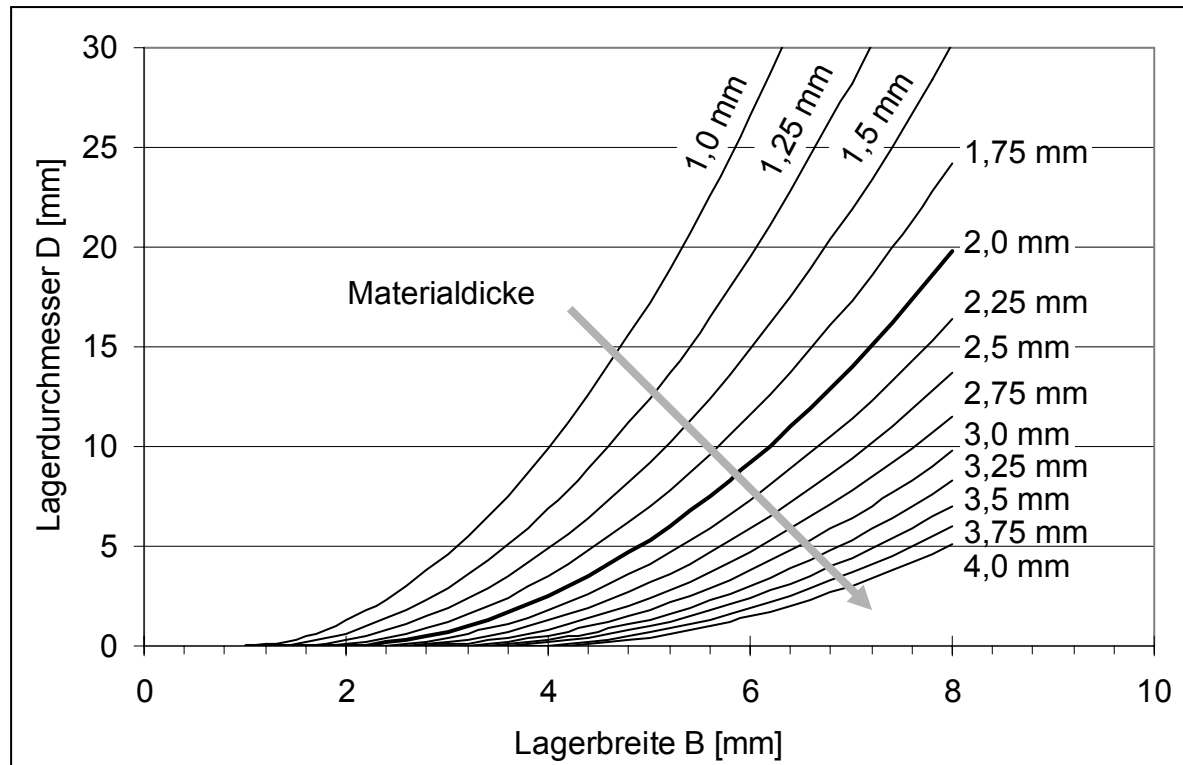


Bild 4.51: Berechnung des minimalen Lagerdurchmessers  $D$  bei unterschiedlichen Lagerbreiten  $B$  und Materialdicken  $d_{0B}$

Bei Abweichungen der Lagersitzgeometrien von den hier betrachteten mit symmetrischem Aufbau, müssen die geometrischen Randbedingungen neu kalkuliert werden. Ausgangsbasis für die geometrische Auslegung ist das durch den Lagerdurchmesser und der Materialdicke determinierte zur Verfügung stehende Ausgangsvolumen (siehe Bild 4.52).

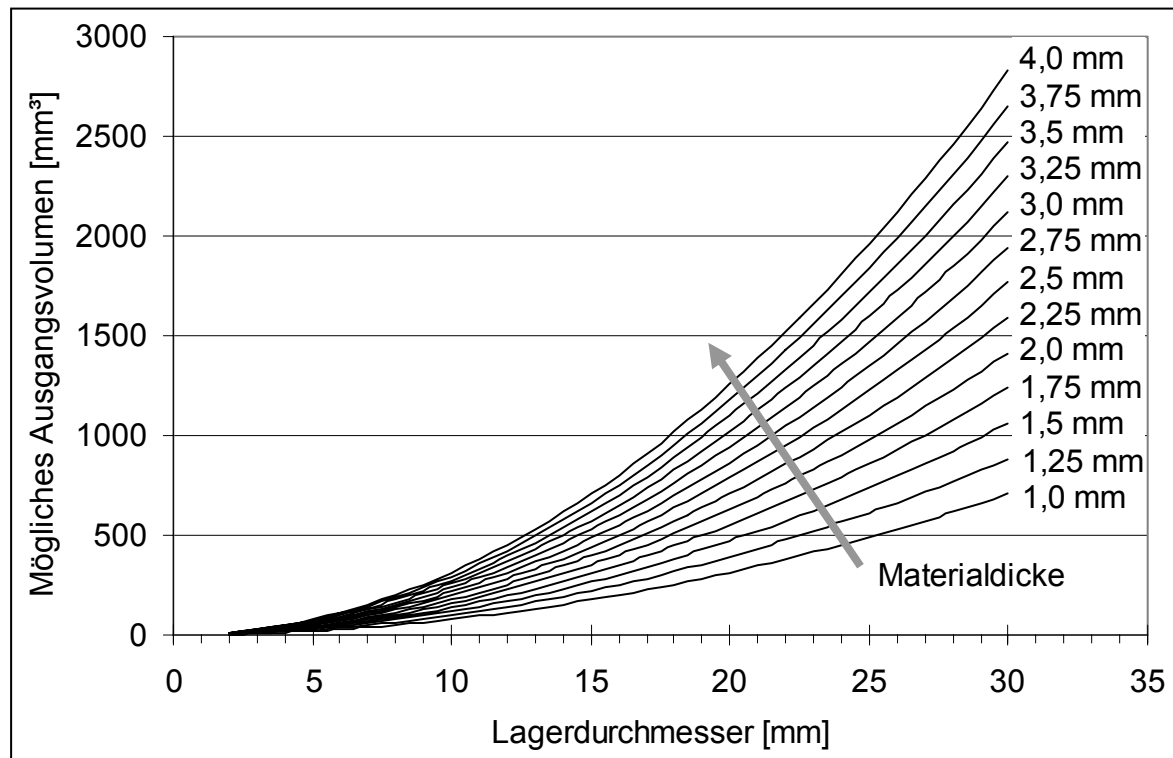


Bild 4.52: Ausgangsvolumen bei unterschiedlichen Lagerdurchmessern und unterschiedlichen Materialdicken

#### 4.5.2 Thermische Restriktionen

Neben den dargestellten geometrischen Restriktionen stellen die material- und verfahrensabhängigen thermischen Einschränkungen einen weiteren reglementierenden Faktor der Technologie dar. Ausgangspunkt für eine Berechnung ist die Polymererstarrungstemperatur, unterhalb derer keine Umformung mehr möglich ist. Sie gibt die minimale Verarbeitungstemperatur und somit den Abschluss der Umformung an. Beeinflusst werden kann diese Temperatur entweder durch eine höhere Laminatausgangstemperatur oder durch einen geringeren Energieabtrag während der Umformung. Die Laminatausgangstemperatur kann jedoch nur in gewissem Rahmen zu höheren Werten verschoben werden, da der Zersetzungsprozess des Matrixpolymers den maximalen Energieeintrag beschränkt.

Während des Thermoformvorganges steht ausschließlich die im Organoblech vorhandene Wärmemenge zur Verfügung. Diese Wärmemenge errechnet sich aus der durch den vorgeschalteten Aufheizprozess in das Laminat eingebrachte Energie abzüglich der durch Wärmestrahlung und Konvektion während des Transportvorgangs bedingten Abkühlung des Laminats. Mit beginnender Umformung kommt es zu einer

Wärmeleitung zwischen Halbzeug und Werkzeugoberfläche. Zwischen dem erwärmten Material und dem Umformdorn kommt es bei der Umformung zu einer Relativbewegung durch das Abgleiten des Materials, was im strengen Sinne eine Wärmeübertragung durch Konvektion bedeutet. Während der Umformung bildet sich eine Grenzschicht zwischen Formteil- und Werkzeugoberfläche [47]. Diese kann thermodynamisch als Kontakt zwischen zwei festen Körpern betrachtet werden, da sich sofort eine dünne, erstarrte Randschicht ausbildet. Während der Abkühlphase wird die Randschicht immer dicker, bis die Matrix vollständig erstarrt [107]. Darüber hinaus ändert sich die wärmeübertragende Kontaktfläche mit der Schließbewegung des Werkzeugs durch das Aufweiten des Materials. In Bild 4.53 ist ein schematisches Modell eines Umformdorns dargestellt, wobei  $z$  die vertikale Schließbewegung des Werkzeugs und  $d_{OB}$  die Materialdicke darstellt.

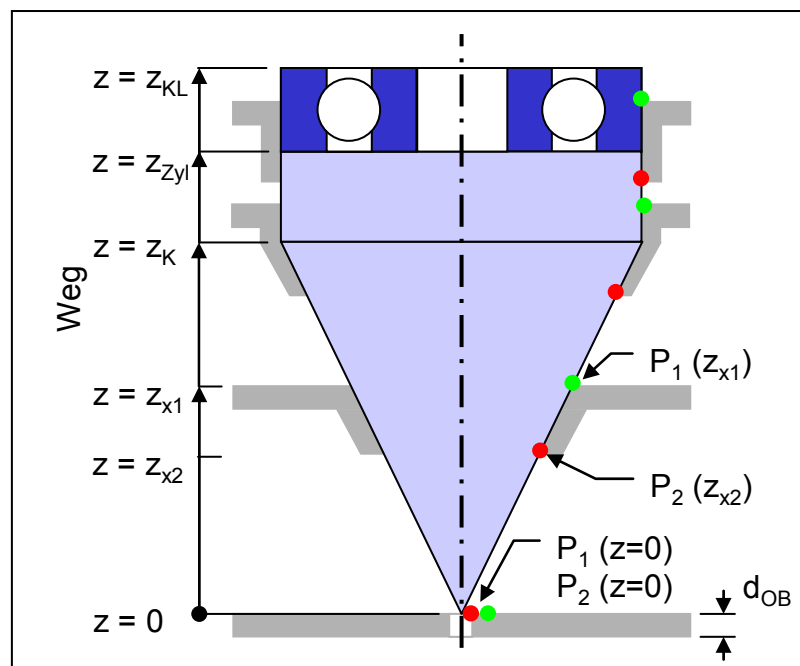


Bild 4.53: Modellhafte Betrachtung der Temperaturverteilung anhand zweier, maximaler Punkten

Zur Vereinfachung der Modellbildung werden die zwei Extremwerte  $P_1$  und  $P_2$  während des Umformvorgangs betrachtet.  $P_1$  entspricht der Eingangstemperatur des Orgoblechs beim ersten Kontakt mit dem Werkzeug. Die Temperatur des Laminats am Punkt  $P_2$  errechnet sich aus der Eingangstemperatur  $P_1$  vermindert um den Wärmeverlust bei dem Umformen.

$$P_2(z_x) = P_1(z_x) - \dot{Q}(z_x) \quad (4.3)$$

Somit stellt die Temperatur an Punkt  $P_2$  die verfahrenskritische Prozesstemperatur dar, die während der gesamten Umformung nicht unterhalb der Erstarrungstemperatur des Matrixpolymers liegen darf.

Im Folgenden wird ein Modell zur Berechnung dieser kritischen Temperatur entwickelt, das die Vorhersage des Wärmeverlustes während des Thermoformens ermöglicht.

Ausgehend von der ersten Berührung des Umformdorns mit dem erwärmten Material ( $z = 0$ ) bis zum vollständigen Schließen des Werkzeugs und der Ausfüllung der Kavität bei  $z = z_{KL}$  wird die Umformung in vier Phasen untergliedert (Tabelle 4.3).

Tabelle 4.3: Umformphasen zur Berechnung

Phase	Anfang	Ende	Zustandsbeschreibung
1	$P_1(0) = P_2(0) \quad z = 0$	$P_1(z) = z_K$	Ständige Aufweitung des Materials bis zum zylindrischen Teil des Umformdorns
2	$P_1(z) = z_K$	$P_2(z) = z_K$	Weiteres Aufweiten und gleichzeitiges Ausbilden des zylindrischen Lager-sitzes
3	$P_2(z) = z_K$	$P_1(z) = z_{Zyl}$	Material kommt in Berührung des Lagers (geänderter Wärmeübergangskoeffizient)
4	$P_1(z) = z_{Zyl}$	$P_1(z) = z_{KL}$	Material wird an das Lager gefügt bis die Umformung abgeschlossen ist

Während den vier Phasen kommt es zu einem Temperatenausgleich zwischen dem Laminat und dem Werkzeug und zu einer Ausbildung einer Kontakttemperatur  $T_K$ . Unter der Annahme zweier halbumendlicher Körper führt der Temperatenausgleich nach unterschiedlichen Einwirkzeiten zwischen Laminat und Werkzeug zu den in Bild 4.54 dargestellten Verläufen.

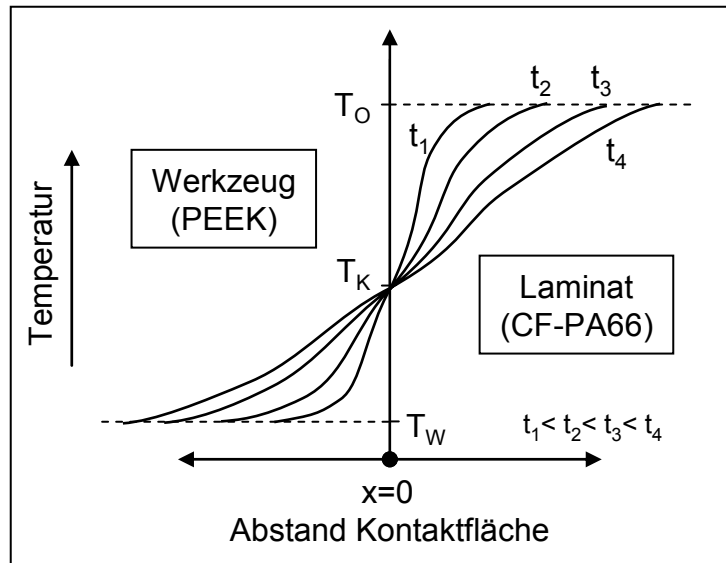


Bild 4.54: Temperaturverläufe zu den Zeiten  $t_1$  bis  $t_4$  beim Kontakt zweier Körper mit unterschiedlicher Temperatur (schematisch), nach [108]

Diese Temperaturverläufe sind nur bei halbumendlichen Körpern gültig, d.h. bei Körpern, die während des konduktiven Temperatenausgleichs die Kerntemperatur nicht ändern. Nach Kontakt des Werkzeugs mit dem Laminat lässt sich der maximale Temperaturabtrag im Laminat durch die konduktiv hervorgerufene Wärmeleitung mittels der folgenden, Fourierschen Differenzialgleichung der Wärmeleitung bestimmen.

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a \frac{\delta^2 T}{\delta y_{OB}^2} \quad (4.4)$$

Wobei  $y_{OB}$  den Abstand von der Laminatmitte bis seiner Oberfläche in Dickenrichtung darstellt. Die Temperaturleitfähigkeit  $a$  des Laminats wird nach Gleichung 4.5 berechnet.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (4.5)$$

mit

- $\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit
- $c_p$  = spezifische Wärmekapazität
- $\rho$  = Dichte des Materials

Hierzu wird die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Verbundes quer zur Faserrichtung ( $\lambda_2$ ) benötigt. Diese unterscheidet sich durch die hohe Anisotropie in der Wärmeleitfähigkeit

der Kohlenstofffasern grundlegend von der Wärmeleitfähigkeit in Längsrichtung ( $\lambda_1$ ), vgl. Bild 4.55.

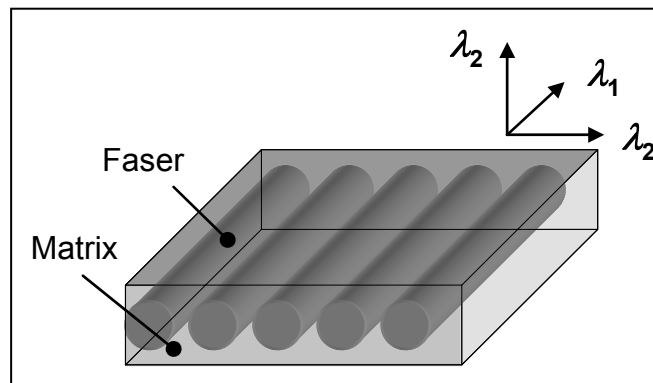


Bild 4.55: Orientierungen der Wärmeleitfähigkeiten im Verbundwerkstoff

Die Wärmeleitfähigkeiten eines Verbundwerkstoffes in Faserrichtung können mit folgender Formel ermittelt werden:

$$\lambda_1 = \varphi_F \cdot \lambda_F + \varphi_M \cdot \lambda_M \quad (4.6)$$

mit:

$\lambda_1$  = Leitfähigkeit des Verbundes in Faserrichtung

$\lambda_F$  = Leitfähigkeit der Faser in Faserrichtung

$\varphi_F$  = Faservolumengehalt

$\lambda_M$  = Leitfähigkeit der Matrix

$\varphi_M$  = Matrixvolumengehalt

Die Halpin-Tsai Approximation in Gleichung 4.7 drückt die Wärmeleitfähigkeit des Verbundes quer zur Faserrichtung aus [18, 109].

$$\lambda_2 = \lambda_M \cdot \frac{1 + \xi \cdot \kappa \cdot \varphi_F}{1 - \kappa \cdot \varphi_F} \quad (4.7)$$

dabei gilt:

$$\kappa = \frac{\frac{\lambda_F}{\lambda_M} - 1}{\frac{\lambda_F}{\lambda_M} + \xi} \quad (4.8)$$



und

$$\xi = \log^{-1} \left( \sqrt{3} \log \frac{x}{y} \right) \quad (4.9)$$

mit:

$x$  = Faserquerschnitt in Wärmeleitrichtung

$y$  = Faserquerschnitt quer zur Wärmeleitrichtung

Für kreisrunde Fasern ist das Verhältnis  $x$  zu  $y$  gleich 1 und somit strebt  $\xi$  ebenso gegen 1.

Nach [47] kann die Fouriersche Differentialgleichung (Gleichung 4.4) durch eine Reihenentwicklung zu der nachfolgenden analytische Näherung aufgelöst werden.

$$T_{(t,y)} = T_W + 2 \cdot (T_O - T_W) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_k \cdot \sin(\mu_k)} \cdot e^{-a \left( \frac{2 \cdot \mu_k}{d_{OB}} \right)^2 \cdot t} \cdot \cos \left( 2 \cdot \frac{\mu_k}{d_{OB}} \cdot y_{OB} \right) \quad (4.10)$$

mit

$T_{(t,y)}$  = Temperatur zum Zeitpunkt  $t$  an der Stelle  $y_{OB}$

$T_W$  = Temperatur Werkzeug

$T_O$  = Temperatur Organoblech

Die Variable  $\mu_k$  stellt dabei die Nullstellen der Cosinus bzw. der Besselschen Funktion dar und wird nach unten stehender Gleichung für  $k = 1, 2, 3, \dots, \infty$  ermittelt.

$$\mu_k = \frac{\pi}{2} \cdot (2 \cdot k - 1) \quad (4.11)$$

Bild 4.56 zeigt die berechnete Temperaturverteilung ( $k = 1, \dots, 10$ ,  $T_O = 350^\circ\text{C}$ ,  $T_W = 25^\circ\text{C}$ , Materialkennwerte aus Tabelle 4.4) über die den maximalen Kontaktzeitraum von  $t_{Umform} = 0,2$  s (vgl. Bild 4.36). Bei sehr kleinen Zeitintervallen (0,02 s) zeigt Gleichung 4.10 durch die Vorzeichenänderung der Sinusfunktion mit zunehmendem  $\mu_k$  eine starke Abweichung von dem zu erwartenden Verlauf (Unschärfebereich).

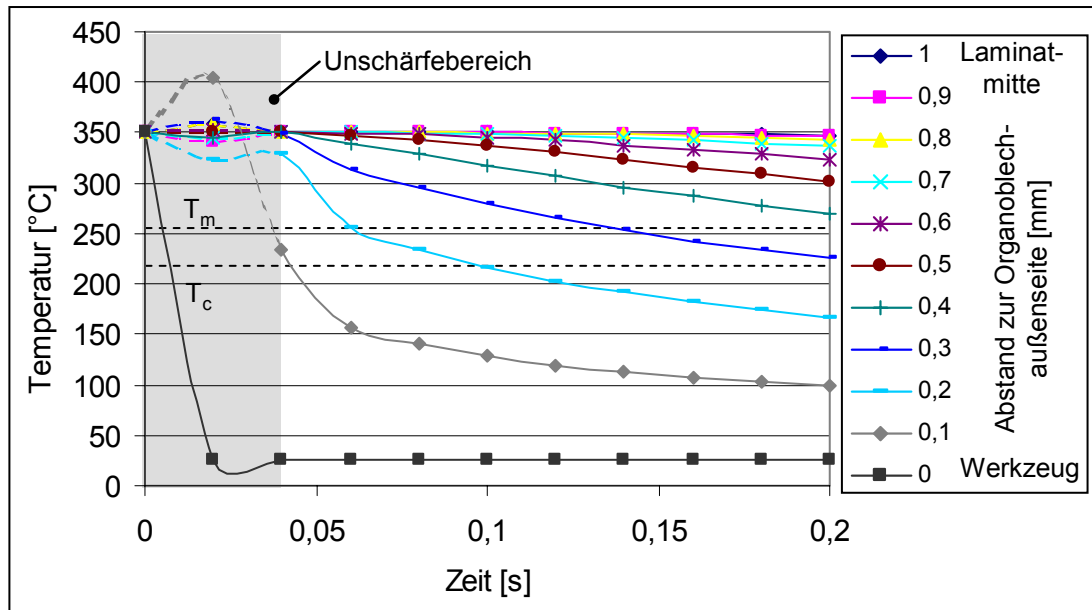


Bild 4.56: Berechnete Temperaturverteilung im Organoblech bei Kontakt mit dem Werkzeug über die Zeit

Nach der maximalen Einwirkzeit von  $t = 0,2$  Sekunden besitzt das Laminat in seiner Mitte nahezu das Ausgangsniveau, wohingegen sich eine erstarrte Randschicht mit einer Dicke von ca. 0,3 - 0,4 mm ausbildet.

Nach diesen Temperaturverläufen ist das Laminat als halbunendlicher Körper anzusehen und die Kontakttemperatur  $T_K$  kann nach Gleichung 4.4 berechnet werden. Sie hängt dabei von den Wärmeeindringkoeffizienten  $b_W$  (Werkzeug) und  $b_O$  (Organoblech) sowie von den Ausgangstemperaturen  $T_W$  und  $T_O$  wie folgt ab [47, 70]:

$$T_K = \frac{b_W \cdot T_W + b_O \cdot T_O}{b_W + b_O} \quad (4.12)$$

mit:

$b_W$  = Wärmeeindringzahl Werkzeug

$b_O$  = Wärmeeindringzahl Organoblech

Die Wärmeeindringzahlen  $b_W$  und  $b_O$  stellen dabei zusammengesetzte Stoffkonstanten dar und müssen für beide Kontaktpartner analog der Gleichung 4.5 berechnet werden. Sie ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der die Wärmemenge abgeleitet werden kann.

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c_p \cdot \rho} \quad (4.13)$$

In der Tabelle 4.4 sind die wichtigsten Kennwerte der eingesetzten Materialien des Umformdorns, des Laminats sowie des Kugellagers (100 CR6 als typischer Lagerwerkstoff für die Außenkäfige von Wälzlagern [110]) und die errechnete Wärmeeindringzahl aufgeführt.

Tabelle 4.4: Materialkennwerte für die Ermittlung der Kontakttemperatur (gemittelte Werte) [18, 111, 112, 113, 114, 115, 116]

	Dorn	Organoblech			Lager
	PEEK (Dorn)	PA66	CF	CF/PA66 $F_V = 44\%$	100Cr6 (1.3505)
<b>Wärmeleitfähigkeit <math>\lambda</math></b> [W/(K*m)]	0,25	0,23	$\lambda_1 = 17$ $\lambda_2 = 1,7$	$\lambda_1 = 0,57$ $\lambda_2 = 0,50$	33-43
<b>Spez. Wärmekapazität <math>c_p</math></b> [kJ/kg*K]	1,34	1,7	0,71	1,16	0,44-0,5
<b>Dichte des Materials <math>\rho</math></b> [g/cm <sup>3</sup> ]	1,32	1,14	1,8	1,45	7,81
<b>Wärmeeindringzahl <math>b</math></b> [J/cm <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> K]	6,65	6,68	/	9,16	118,7

Anhand dieser Kennwerte ergibt sich für den ersten Kontakt des Umformdorns auf das erwärmte Organoblech in Punkt P1 ( $z = 0$ ) nach Formel 4.4 eine Kontakttemperatur von  $T_{K, Phase 1} = 213,3 \text{ °C}$  (vgl. Bild 4.40). Unter der Annahme einer konstanten Laminattemperatur während der Umformung in Phase 1 kann auch die Kontakttemperatur in diesem Bereich als konstant angenommen werden. Ab Phase 2 muss diese Temperatur als neue Ausgangstemperatur für das Organoblech in Formel 4.4 eingesetzt werden. In dieser Phase bis zum ersten Kontakt mit dem Lager ergibt sich eine Kontakttemperatur von  $T_{K, Phase 2} = 133,9 \text{ °C}$ , welche wiederum die maximal mögliche Oberflächentemperatur zu Beginn des Anformens an das metallische Lager (Phase 3) darstellt. Dieser Wert deckt sich mit den versuchstechnisch ermittelten Werten am Lageraußenkäfig von  $134 \text{ °C}$  (Bild 4.40). In Folge der im Vergleich zu dem Organoblech hohen Wärmeleitfähigkeit des Metalllagers kommt es zu einer drastischen Verringerung der Kontakttemperatur auf  $T_{K, Phase 3} = 38,5 \text{ °C}$  und somit zu einem „einfrieren“ der Matrix. Die Temperaturverläufe in Bild 4.56 zeigen, dass die Matrix nur in der äußeren Randschicht diesen starken Temperaturabtrag erfährt.

Durch den schnellen Prozess bleibt die Matrix im Inneren des Materials schmelzflüssig und kann dadurch weiterhin umgeformt werden.

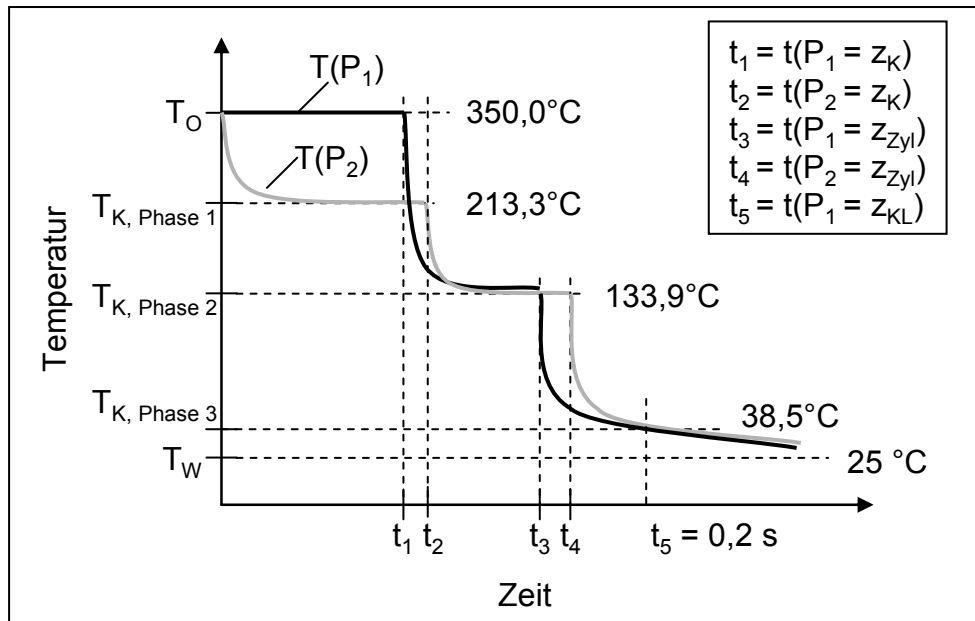


Bild 4.57: Schematische Temperaturverläufe der beiden Extremwerte  $P_1$  und  $P_2$  während des Thermoformens über die Zeit

## 5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Neben der technologischen Umsetzbarkeit einer Prozessvariante steht auch immer deren Wirtschaftlichkeit im Interesse. Vor allem der Grad der Vorteilhaftigkeit einer geplanten technologischen Weiterentwicklung muss durch eine vergleichende Wirtschaftlichkeitsanalyse zum bisherigen Stand der Technik geprüft werden [117]. Hierbei wird ein ökonomischer Prozess als wirtschaftlich bezeichnet, wenn das Verhältnis zwischen Output und Input größer ist als das der vergleichenden Alternativen [118, 119]. Eine solche Wirtschaftlichkeitsanalyse kann Schwerpunktmäßig entweder rein technologisch oder aber auch monetär durchgeführt werden. Die technologische Betrachtung bezieht dabei auf die Verhältnisrechnung des mengenmäßigen Ertrags zu dem mengenmäßigen Einsatz der Produktionsfaktoren. Daran anknüpfend überträgt die betriebswirtschaftliche Vergleichsrechnung diese Optimierung des Produktionsprozesses auf monetäre Größen. In der in dieser Arbeit untersuchten Prozesskettenverkürzung mit Integration eines in der Regel nachgeschalteten Prozessschrittes sowie einer vorher nicht zu realisierenden Bauteilgeometrie kann eine singuläre Betrachtung der Prozesszeiten nicht zu einem Vergleich herangezogen werden. Hieraus ergibt sich eine Erweiterung der technischen Leistungsfähigkeit, die so durch bestehende Technologien bisher nicht erzielt werden konnte. Um jedoch ein mit einem neuen Produktionsprozess erzeugtes Wirtschaftsgut im Markt zu etablieren, bzw. ein bestehendes zu substituieren, muss dessen Leistungs-Kosten-Verhältnis in Konkurrenz mit der bestehenden Zielkostenkurve analysiert werden [1].

Im Folgenden wird daher eine Potenzialanalyse durchgeführt, die den zweistufigen Thermoformprozess mit nachgeschaltetem Fügeprozess der Lager in Verhältnis zu dem hier neu entwickelten Thermoformenprozess mit integriertem Lagerfügen setzt. Hierzu sind die notwendigen Prozessschritte detektiert und bezüglich ihres Anteils an den Prozesszeiten analysiert. Ein Vergleich der Prozessschritte ist in Tabelle 5.1 dargestellt. Der Prozessschritt „Werkzeugvorbereitung zum Lagerfügen“ beinhaltet das Einsetzen der Lager und der Umformdorne in das Werkzeug und ist beim klassischen Thermoformen nicht notwendig. Dahingegen müssen nach dem formgebenden Prozess die Lager gefügt (in diesem Fall durch ein 2-Komponenten-Klebstoffsystem eingeklebt) werden, was zusätzliche Prozessschritte bedeuten. Unberücksichtigt bleiben in dem Vergleich die Materialkosten, sowie die Konturerzeu-

gung, da diese für beide Verfahren identisch sind. Die erforderlichen Zeiten sind für jeden Arbeitsschritt angegeben (Versuchs- sowie Schätzwerte).

Tabelle 5.1: Arbeitsschritte der unterschiedlichen Thermoformprozesse mit Zeitbedarf

Thermoformen mit integriertem Lagerfügen		Thermoformen ohne Lagerfügen		Klassisches Thermoformen		In der Vergleichsrechnung berücksichtigt
Arbeitsschritt	Zeit [s]	Arbeitsschritt	Zeit [s]	Arbeitsschritt	Zeit [s]	
Vorkonfektionieren des Materials	60	Vorkonfektionieren des Materials	60	Vorkonfektionieren des Materials	60	
Einspannen	20	Einspannen	20	Einspannen	20	
Aufheizen (Induktiv)	30	Aufheizen (Induktiv)	30	Aufheizen (Infrarot)	120	
Transport	1	Transport	1	Transport	1	
Werkzeug vorbereiten (Lager einsetzen)	12	-/-	0	-/-		
Umformen / Fügen	2	Umformen	2	Umformen	2	
Abkühlen	45	Abkühlen	45	Abkühlen	60	
Entnehmen	20	Entnehmen	15	Entnehmen	15	
-/-		Lagersitz vorbereiten / Positionieren	10	Lagersitz vorbereiten / Positionieren	10	
-/-		Klebstoff auftragen	20	Klebstoff auftragen	20	
-/-		Einkleben	20	Einkleben	20	
-/-		Aushärten	1800	Aushärten	1800	
<b>Summe</b>	<b>190</b>	<b>Summe*</b>	<b>223</b>	<b>Summe*</b>	<b>328</b>	
Konturerzeugung						Unberücksichtigt
Nachbearbeitung						

\* Summen ohne Aushärtung des Klebstoffes

Bei der Berechnung wird die in Kapitel 3.1 dargestellte Möglichkeit der Formnestumformung mehrerer Bauteile berücksichtigt. Eine mögliche Anordnung für die gleichzeitige Umformung von zwei bzw. vier Bauteilen in einem Arbeitshub zeigt Bild 5.1. Beim klassischen Thermoformen wird das komplette Organoblech auf Umformtemperatur gebracht, weshalb eine Ausformung von mehreren Lagersitzen während des Umformens durch die gegenseitige Drapierbeeinflussung behindert wird. Aus diesem

Grund wird dieses Verfahren in der Vergleichsrechnung nur für die Umformung eines Fadenhebels herangezogen.

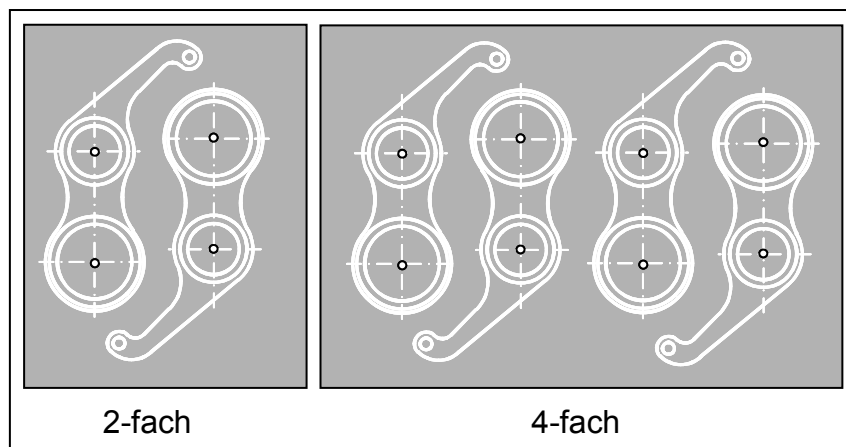


Bild 5.1: Mögliche Position zur Formnestumformung von zwei bzw. vier Hebeln in einem Schritt

Vergleicht man die Zykluszeiten der drei Verfahren (Bild 5.2), zeigt sich gegenüber dem klassischen Thermoformen mit anschließendem Einkleben der Lager ein Einsparpotenzial von bis zu 37 % bei einer gleichzeitigen Umformung von 4 Hebeln in einem Werkzeug und Arbeitshub.

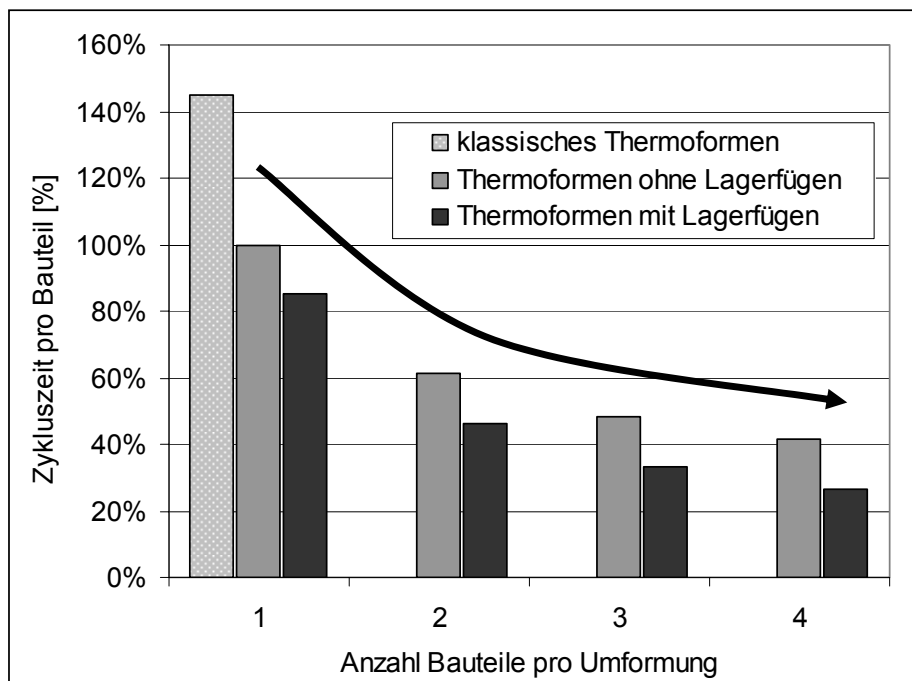


Bild 5.2: Vergleich der realisierbaren Zykluszeiten (normiert) der unterschiedlichen Herstellprozesse

Die höhere Zykluszeit beim klassischen Thermoformen ergibt sich aus der längeren Aufheizzeit mittels IR-Strahler und der längere Abkühlphase des komplett aufgeschmolzenen Materials im Werkzeug. Ferner bietet dieses Verfahren nicht die Möglichkeit der Formnestumformung, d. h. der drapierunbeeinflussten gleichzeitigen Umformung mehrerer Lagersitze wie in Bild 5.1 dargestellt.

Die Zykluszeiten bieten die Grundlage zur Berechnung der Prozessbedingten Stückkosten Da ein reiner Prozessvergleich durchgeführt werden soll, wurden nur die prozessrelevanten Fixkosten sowie die variablen Kosten ohne die anfallenden Materialkosten herangezogen. Die Stückkosten  $k$  errechnen sich aus den fixen Gesamtkosten  $K_f$ , der Ausbringungsmenge  $x$  und den variablen Kosten  $k_v$  nach folgender Gleichung:

$$k = \frac{K_f}{x} + k_v \quad (5.1)$$

Zur Ermittlung der variablen und fixen Kosten wurde das Kostenberechnungstool CoMaCo<sup>13</sup> verwendet [1], wobei als Eingangsgrößen die in Tabelle 5.2 aufgelisteten Daten herangezogen wurden.

Tabelle 5.2: Eingangsgrößen zur Kostenberechnung sowie die errechneten Maschinenstundensätze für die verwendeten Anlagen

Anlage	Anschaffungskosten [€]	Energieverbrauch [kW/h]	Platzbedarf [m <sup>2</sup> ]	Abschreibungsdauer [Jahre]	Maschinenstundensatz [€/h]
Umformpresse	30.000	15	3	10	3,00
Induktionserwärmungskomponente	15.000	15	0,5	5	2,42
Infrarot-Strahlerfeld	7.000	15	0,4	5	1,13
Umformwerkzeug ohne Lagerfügen	4.000	-	0,3	3	0,97
Umformwerkzeug mit Lagerfügen	6.000	-	0,3	3	1,46
Kleborrichtung	2.000	-	0,5	3	0,49

<sup>13</sup> CoMaCo - **Composite Manufacturing Costs**, Version 1.0, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH



Die in Bild 5.2 zu erkennende verringerte Zykluszeit spiegelt sich auch in den realisierbaren Herstellkosten in Abhängigkeit der Ausbringungsmenge wieder. Bild 5.3 zeigt die Herstellkosten pro Teil für die in Tabelle 5.1 aufgelisteten Verfahren zur Herstellung des in dieser Arbeit untersuchten Demonstratorbauteils.

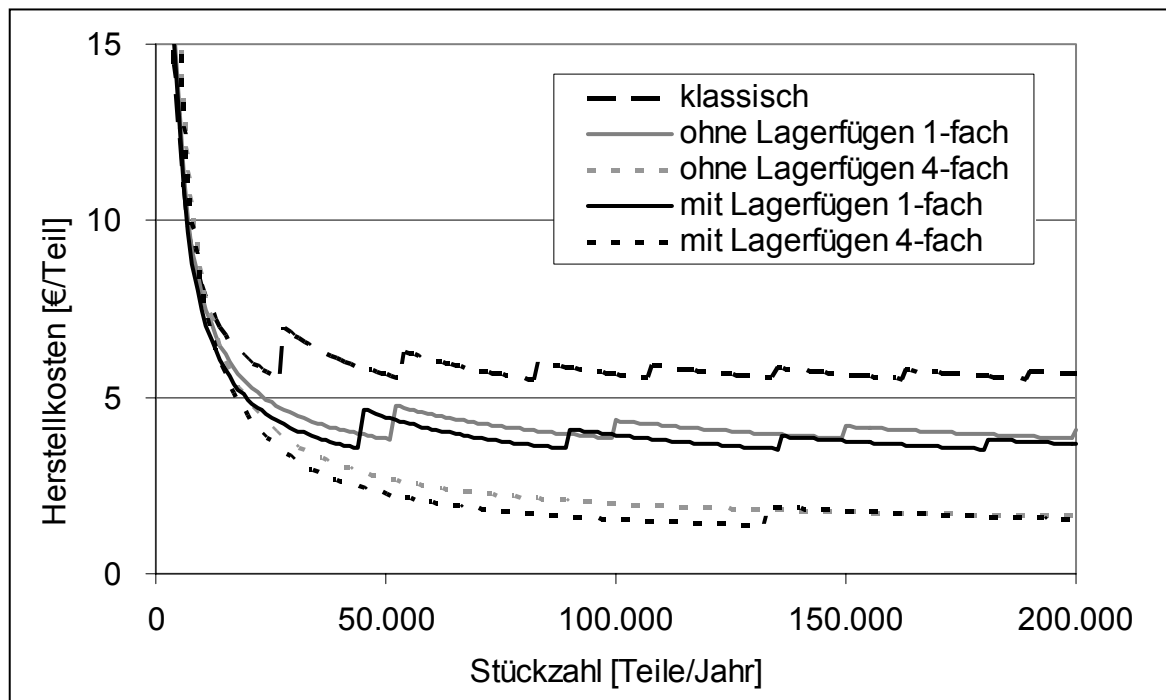


Bild 5.3: Herstellkostenvergleich zwischen dem klassischen Thermoformen und dem partiellen Thermoformen ohne und mit integriertem Lagerfügen (jeweils 1-fach und 4-fach)

Der Sprunghafte Verlauf der Kurven wird durch eine kapazitätsengpassinduzierte Zusatzinvestition hervorgerufen. Die Kurvenverläufe zeigen deutlich das Einsparpotenzial des integrierten Thermoformprozesses, wobei die größte Stückkostenverringern durch den Einsatz von Mehrfachwerkzeugen realisiert werden kann.



## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte eine Prozesstechnologie entwickelt werden, die das Einsatzgebiet von endlosfaserverstärkten Thermoplasten (Organoblechen) auf den Bereich von schnellbewegten Getriebebauteilen im Maschinenbau erweitert.

Zum Thermoformen von kohlenstofffaserverstärkten Thermoplasten wurde erstmals die **induktive Erwärmung** als Heizquelle eingesetzt. Dies ermöglicht die Erwärmung des untersuchten Halbzeuges (CF/PA66) an zwei lokal begrenzten Bereichen in weniger als 30 Sekunden auf Umformtemperatur. Dieser lokale Energieeintrag bietet die Grundlage für den anschließenden **partiellen Thermoformprozess**, mit dem Ziel der gleichzeitigen Umformung mehrerer Formnester auf einem Halbzeug.

Durch Koppelung dieses Verfahren mit einem Werkzeugkonzept zur **dickenadaptiven Umformung** war eine Erhöhung der Halbzeugdicke in definierten Bereichen um bis zu 200 % möglich. In Organobleche mit einer Dicke von 2 mm wurden Lagersitze mit einer Lagersitzbreite von 6 mm eingeformt, ohne dass Material von außen nachgeführt oder extern dem Prozess zugeführt werden musste. Auch ein Verfahren zum Ausformen von Lagersitzen und dem **gleichzeitigen Fügen** metallischer Lager wurde realisiert und ein Modell von geometrisch möglichen Lagersitzdimensionen in Abhängigkeit der Organoblechdicke erstellt.

Die Kombination aus Prozess Neu- und Weiterentwicklungen führt zu einer **Prozesskettenverkürzung** mit einer daraus resultierenden Prozesszeiteinsparung von bis zu 37 % gegenüber dem partiellen Thermoformen, was entscheidend zur Kostensenkung bei der Herstellung beiträgt.

Die Prozesskette wurde an einem Demonstratorbauteil, einem schnellbewegten Hebel (Fadenhebel) einer Industrienähmaschine, exemplarisch abgebildet. Dieser Fadenhebel besitzt zwei metallische Rillenkugellager, die in einem Schritt in ein zuvor ebenes Halbzeug eingeformt und gefügt wurden. Bei der Bauteilprüfung zeigte sich neben einer Netto-Gewichtsreduzierung von 50 % gegenüber der bestehenden Aluminiumvariante eine Reduzierung der Schallemission um bis zu 1 dB(A). Dies ist auf das hohe Dämpfungsvermögen des thermoplastischen Ausgangsmaterials zurückzu-

führen, und unterstreicht das große Potenzial dieser Werkstoffklasse in dynamisch belasteten Bauteilen.

## 7 Literatur

- [1] Schlimbach, J.: Ökonomische Prozessanalyse und Modellintegration zur Kostenberechnung von Faser-Kunststoff-Verbunden. IVW-Schriftenreihe Band 64, Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb (Hrsg.) 2006
- [2] Neitzel, M.; Mitschang, P.: Handbuch Verbundwerkstoffe. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2004
- [3] Brandt, J.; Richter, H.: Hochleistungsverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix. Kunststoffe, 77 (1987), Nr. 1, S. 40-44
- [4] Rüegg, A.; Ziegler, S.; Jaggi, D.; Stötzer, N.: E-LFT process - a new mass-production process for structural lightweight parts. JEC Composites Magazine, Nr. 14 (2005), S. 43-46
- [5] Strauß, O.: Organoblech – Alternative zu Stahl und Aluminium. Industrieanzeiger, Ausgabe 42 (2006), S. 46
- [6] Diaz, J.; Rubio, L.: Developments to manufacture structural aeronautical parts in carbon fibre reinforced thermoplastic materials. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 143-144 (2003), S. 342-346
- [7] Fernández, I.; Blas, F.; Frövel, M.: Autoclave forming of thermoplastic composite parts. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 143-144, (2003), S. 266-269
- [8] N.N.: Hochleistungskunststoffe für die Luft- und Raumfahrt. [www.ensinger-online.com/prospekte/pdfdownload.php?ID=116](http://www.ensinger-online.com/prospekte/pdfdownload.php?ID=116) (26.04.2007)
- [9] Ehrenstein G. W.: Faserverbundkunststoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2006
- [10] Scharr, G.; Pospischil, L.: Verbundwerkstoffe – Werkstoffe im Flugzeugbau auch Werkstoffe der Zukunft für schnelle Schiffe?. 6. Schiffbautag M-V, Sonderheft der Schiffbauforschung 2/2002, (2002)

- [11] Hörsting, K.; Wulfhorst, B.: Neuartiges Testverfahren zur Prüfung der Drapierbarkeit biaxialer Verstärkungstextilien für FVW. Technische Textilien, 46. Jahrgang (1993), S. T221-T223
- [12] Michaeli, W.; Biswas, A.: Fabric reinforced thermoplastics – Towards a simulation of the forming process. Plastics: Gateway to the future (SPE Technical Papers) (1994), S. 2337-2341
- [13] Cherif, C.; Kaldenhoff, R.; Wulfhorst, B.: Computer simulation of the drapability of reinforcement textiles for composites using the finite element method. 29th International SAMPE Technical Conference (1997), S. 108-121
- [14] Möller, F.: Materialmodellierung für die Umformsimulation gewebeverstärkter thermoplastischer Halbzeuge. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1998
- [15] Liu, L.; Chen, J.; Li, X.; Sherwood, J.: Two-dimensional macro-mechanics shear models of woven fabrics. Composites: Part A, Vol. 36 (2005), S. 105-114
- [16] Bergsma, O. K.: Approximation of Mechanical Properties of Sheared Fabrics. Journal of thermoplastic composite materials, Vol. 15 (2002), S. 65-75
- [17] Flyer Pam-Form, Fa. ESI Group  
[http://www.esi-group.com/SimulationSoftware/Plastics\\_Forming\\_simulation/](http://www.esi-group.com/SimulationSoftware/Plastics_Forming_simulation/)  
(3.5.2007)
- [18] Nowacki, J.: Prozessanalyse des Umformens und Fügens in einem Schritt von gewebeverstärkten Thermoplasten. IVW-Schriftenreihe Band 24, Prof. Dr.-Ing. Manfred Neitzel (Hrsg.) 2001
- [19] Aurich, J. C.; Naab, C.; Rößing, M.: Transparente Strukturen verkürzen die Durchlaufzeit. WB Werkstatt und Betrieb online 1-2 (2007), S. 68-71
- [20] Warnecke, G.; Eifler, D.; Aurich, J. C.; Mauren, F.; Klein, M.: Investigation of Interactions within Manufacturing Process Chains. Production Engineering XII (2005), S. 85-90

- [21] Fernández, I.; Blas, F.; Frövel, M.: Autoclave forming of thermoplastic composite parts. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143-144 (2003), S. 266-269
- [22] Vodicka, R.: Thermoplastics for Airframe Applications A Review of the Properties and Repair Methods for Thermoplastic Composites.  
<http://www.dsto.defence.gov.au/publications/2293/> (08.04.2006)
- [23] Pratt, C.: On the move: knowledge and new products help compounding grow. *JEC Composite Magazine*, Nr. 30 (2007), S. 31-33
- [24] Sommer, M.: Eigenschaftserweiterung von LFT-Fließpresshalbzeugen. IVW-Schriftenreihe Band 63, Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb (Hrsg.) 2006.
- [25] Jacobs, W.: Entscheidungskriterien zur Materialauswahl für Innenraumteile. 9. Internationale AVK-Tagung, Essen, 19.-20. September (2006), S. A1-1-A1-8
- [26] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
[http://www.bmu.de/pressearchiv/13\\_legislaturperiode/pm/854.php](http://www.bmu.de/pressearchiv/13_legislaturperiode/pm/854.php)  
(25.04.2006)
- [27] Ehrenstein, G.W.: *Polymer Werkstoffe*. München: Carl Hanser Verlag, 1999
- [28] Wiedmer, S.; Manolesos, M.; Friedrich, K.: Pultrusion Process of Carbon Fiber Reinforced Polyamide 12 Yarn. IVW-Kolloquium 2004, IVW Schriftenreihe Band 48, Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb (Hrsg.) 2004, S. 226-231
- [29] Wiedmer, S.; Angelov, I.; Evstatiev, M.; Friedrich, K.; Mennig, G.: Pultrudierte Profile aus Naturfasern und thermoplastischer Matrix. In: Mennig, G., Wagenknecht, U., Bloß, P.: *Tagungsband, Technomer 2005*, Chemnitz, 10.-12. November 2005
- [30] Bechtold, G.: Pultrusion von geflochtenen und axial verstärkten Thermoplast-Halbzeugen und deren zerstörungsfreie Porengehaltsbestimmung. IVW-Schriftenreihe Band 8, Prof. Dr.-Ing. Manfred Neitzel (Hrsg.) 2000

- [31] Scholl, S.; Schürmann, H.: Das Profil-Armierungs-Ziehen: Ein kostengünstiges Verfahren zur Herstellung von hochbelastbaren, endlosfaserverstärkten Profilen mit thermoplastischer Matrix. Tagungsband 11. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e.V., Darmstadt, 2005
- [32] Wöginger, A.: Prozesstechnologien zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter thermo-plastischer Halbzeuge. IVW-Schriftenreihe Band 41, Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb (Hrsg.) 2004
- [33] Schlottermüller, M.: Eigenspannungen beim Thermoplastwickeln. IVW-Schriftenreihe Band 62, Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb (Hrsg.) 2006
- [34] Junglen, D.; Schledjewski, R.; Schlarb, A. K.: Prozesssimulation für faserverstärkte thermoplastische Tapes. Tagungsband, 15. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Kassel. M. Schlimmer (Hrsg.), 6.-8. April 2005, S. 467-472
- [35] Beresheim, G.: Thermoplast-Tapelegen - ganzheitliche Prozessanalyse und -entwicklung. IVW-Schriftenreihe Band 32, Prof. Dr.-Ing. Manfred Neitzel (Hrsg.) 2002
- [36] Burkhart, A.; Cramer, D.: Continuous-fibre reinforced thermoplastic tailored blanks. JEC Composites Magazine, Nr. 22 (2006), S. 41-43
- [37] Wakeman, M. D.; Zingraff, L.; Bourban, P.-E.; Manson, J.-A. E.; Blanchard, P.: Stamp forming of carbon fibre/PA12 composites – A comparison of a reactive impregnation process and a commingled yarn system. Composites Science and Technology 66 (2006), S. 19-35
- [38] Pressemitteilung Cyclics Corporation vom 17.03.2005  
[http://www.cyclics.com/content.php?page=Press-2\)\\_Recent\\_Press\\_Releases.on&p=36](http://www.cyclics.com/content.php?page=Press-2)_Recent_Press_Releases.on&p=36) (14.01.2007)
- [39] Schlarb, A. K.: Einführung in die Kunststoffe, Vorlesungsskript, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Technische Universität Kaiserslautern, 2006



- [40] Moneke, M.: Die Kristallisation von verstärkten Thermoplasten während der schnellen Abkühlung und unter Druck. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2001
- [41] Fleischhauer, M.; Schürmann, H.: Qualifizierung und Erprobung eines thermoplastischen Matrixsystems für Strukturbauteile in der Verkehrstechnik. Tagungsband 11. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e.V., Darmstadt, 2005
- [42] Zepf, H.-P.: Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix. Expert Verlag, Renningen, 1997
- [43] Schimanski, T.: High-performance polypropylene structures for eco-friendly, fully recyclable composites. Dissertation, Technische Universität Eindhoven, 2002
- [44] AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., Marktdaten vom 19.09.2006  
[http://www.avk-tv.de/www\\_avktv/marktdaten\\_27\\_27\\_0\\_f.htm](http://www.avk-tv.de/www_avktv/marktdaten_27_27_0_f.htm) (14.01.2007)
- [45] N. N.: Carbon fibre: fast-growing production capacities. JEC Composite Magazine, Nr. 31 (2007), S. 22-23
- [46] Toho Tenax Europe GmbH, Pressemitteilung vom 20.04.2006  
<http://www.tenax-fibers.com/deutsch/main/aktuelles/PM%20200406.pdf> (21.10.2006)
- [47] Stitz, S.; Keller, W.: Spritzgießtechnik / Verarbeitung – Maschine – Peripherie. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2001
- [48] Menges, G.: Werkstoffkunde der Kunststoffe, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1979
- [49] Polifke, W.; Kopitz, J.: Wärmeübertragung – Grundlagen, analytische und numerische Methoden. München: Pearson Studium 2005

- [50] Reußmann, T.: Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Langfasergranulat mit Naturfaserverstärkung. Dissertation, Technischen Universität Chemnitz, 2003
- [51] Breuer, U. P.: Beitrag zur Umformtechnik gewebeverstärkter Thermoplaste. Fortschrittsberichte VDI-2/433, Düsseldorf: VDI-Verlag 1997
- [52] Pohl, C. G.: Umformen endlosfaserverstärkter, thermoplastischer Kunststoffe durch Differenzdruck bei nicht-isothermer Prozessführung. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technische Hochschule Aachen, 1999
- [53] Schulz, J.E.: Werkstoff-, Prozess- und Bauteiluntersuchungen zum Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technische Hochschule Aachen, 2002
- [54] Eichler, J.; Eichler, H. J.: Laser – Grundlagen, Systeme, Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1990
- [55] Klein, M.: Laserschweißen von Kunststoffen in der Mikrotechnik. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technische Hochschule Aachen, 2001
- [56] Grehn, J. (Hrsg.): Metzler Physik. 2. Auflage, Stuttgart: J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung und Carl Ernst Poeschel Verlag, 1990
- [57] Hahn, O.; Meyer, Th.; Sauer, H.M.: Fügen von Mischbau-Komponenten mit nanopartikelmodifizierten Klebstoffen durch Mikrowellen-Erwärmung. 12. Paderborner Symposium Fügetechnik, 23.-24. November (2005), S. 22-38
- [58] Informationsdienst Wissenschaft, Leistungsstärkste Mikrowelle hilft Materialwissenschaftlern der Universität Jena bei der Verbesserung von Faserverbundwerkstoffen  
<http://idw.tu-clausthal.de/pages/de/news147019> (20.09.2006)
- [59] N.N.: HEPHAISTOS –Innovative Verbundwerkstofffertigung mit homogenen 2.45 GHz Mikrowellen  
[http://www.fzk.de/fzk/groups/ihm/documents/internetdokument/id\\_035067.pdf](http://www.fzk.de/fzk/groups/ihm/documents/internetdokument/id_035067.pdf) (9.3.2007)

- [60] Tipler, Paul A.: Physik, 3. korrigierter Nachdruck der 1. Auflage 1994, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 2000
- [61] Hagmann, G.: Grundlagen der Elektrotechnik, 11. korrigierte Auflage, Wiebelsheim: AULA Verlag GmbH Verlag für Wissenschaft und Forschung, 2005
- [62] Benkowsky, G.: Induktionserwärmung. 5. Auflage. Berlin: Verlag Technik GmbH, 1990
- [63] Rudolf, R.: Entwicklung einer neuartigen Prozess- und Anlagentechnik zum wirtschaftlichen Fügen von Faser-Kunststoff-Verbunden. IVW-Schriftenreihe Band 10, Prof. Dr.-Ing. Manfred Neitzel (Hrsg.) 2000
- [64] Kaimann, A.: Verkürzung der Prozesszeiten durch Aushärtung von Klebverbindungen mittels induktiver Erwärmung. Dissertation, Universität Paderborn, 2001
- [65] Lahr, R.; Mang, P.; Mitschang, P.; Schlarb, A.K.: Induktionsschweißen - Ein innovatives Verfahren zum drei-dimensionalen Fügen von thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden. In: IVW-Kolloquium 2006, IVW-Schriftenreihe Band 68, Schlarb, Alois K. (Hrsg.). Kaiserslautern, 4.-15. November 2006, 2006, S. 118-131
- [66] Moser L.; Lahr, R.; Velthuis, R.; Mitschang, P.; Schlarb, A. K.: Three-Dimensional Induction Welding of Fiber Reinforced Thermoplastic Polymers. Sampe Europe International Conference, Paris (2007), S. 624-629
- [67] Suwanwatana, W.; Yarlagadda, S.; Gillespie Jr.; J. W.: Hysteresis heating based induction bonding of thermoplastic composites. Composites Science and Technology 66 (2006), S. 1713-1723
- [68] Guichard, A.; Feigenblum, J.: Induction heating for high speed RTM process. JEC Composite Magazine, Nr. 31 (2007), S. 40-43
- [69] Schmidt, R.: Einsatz von Hochleistungslasern für die Fertigung von Faserverbundbauteilen mit thermoplastischer Matrix im Wickelverfahren; VDI-Verlag, Düsseldorf 1994

- [70] Throne, J. L.; Beine, J.: Thermoformen: Werkstoffe – Verfahren – Anwendung. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1999
- [71] Nowacki, J.; Neitzel, M.: Bauteilherstellung mittels Umformen von kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten. In ‚Moderne Werkstoffe‘. Bartz, W.J. (Hrsg.). Renningen: expert verlag 2000, S. 282-295
- [72] Nowacki, J.; Schuster, J.; Mitschang, P.; Neitzel, M.: Thermoformen von GFK. Kunststoffe. 89, Nr. 6 (1999), S. 56-60
- [73] Nowacki, J.; Neitzel, M.: Thermoforming of Reinforced Thermoplastic Stiffened Structures. Polymer Composites 21, Nr. 4 (2000)
- [74] Nowacki, J.; Neitzel, M.: Fahrzeug-Außenteile aus Organoblechen. Kunststoffe 87, Nr. 9 (1997), S. 1154–1156
- [75] Klimke, J.: Starker Verbund – Eigenverstärkte Thermoplaste eröffnen neue Anwendungsfelder. Kunststoffe 92, Nr. 9 (2002), S. 45-49
- [76] Molnár, P.; Ogale, A.; Lahr, R.; Mitschang, P.: Textile preforms for efficient production of fiber reinforced thermoplastic polymer composites. EUROMAT 2005, Prag, Tschechische Republik, 5.-8. September, 2005
- [77] Molnár, P.; Ogale, A.; Lahr, R.; Mitschang, P.: Influence of drapability by using stitching technology to reduce fabric deformation and shear during thermoforming, eingereicht und angenommen Composite Science and Technology
- [78] Berthold, U.: Beitrag zur Thermoformung gewebeverstärkter Thermoplaste mittels elastischer Stempel. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2002
- [79] Zampaloni, M. A.; Pourboghrat, F.; Yu, W.R.: Stamp Thermo-hydroforming: A New Method for Processing Fiber-reinforced Thermoplastic Composite Sheets. Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 17 (2004), S. 31-50

- [80] N.N.: AVK-TV Handbuch 2004, Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe-Technische Vereinigung e.V., Frankfurt, 2004
- [81] Jehrke, M.: Umformen gewebeverstärkter thermoplastischer Prepregs mit Polypropylen- und Polyamidmatrix im Preßverfahren. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technische Hochschule Aachen, 1995
- [82] Hou, M.: Zum Thermoformen und Widerstandsschweißen von Hochleistungsverbundwerkstoffen mit thermoplastischer Matrix. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1993
- [83] Scherer, R.: Charakterisierung des Zwischenlagenabgleitens beim Thermoformen von kontinuierlich faserverstärkten Polypropylen-Laminaten. Fortschrittsberichte VDI-5/288, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992
- [84] Blinzler, M.: Werkstoff- und prozesseitige Einflussmöglichkeiten zur Optimierung der Oberflächenqualität endlosfaserverstärkter thermoplastischer Kunststoffe. IVW-Schriftenreihe Band 36, Prof. Dr.-Ing. Manfred Neitzel (Hrsg.) 2002
- [85] Marissen, R.; van der Drift, L. Th.; Sterk, J. C.: Folding of continuous fibre thermoplastic composites. Applied Composite Materials, Vol. 4, Nr. 5 (1997), S. 273-282
- [86] Johnston, N.J.; Towell, T.W.; Hergenroth, P.M.: Physical and mechanical properties of high-performance thermoplastic polymers and their composites. Carlsson, L.A. (Hrsg.): Thermoplastic composite materials. Amsterdam, New York: Elsevier Science Publishers 1991, S. 27-71
- [87] Henninger, F.: Beitrag zur Entwicklung neuartiger Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen aus kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2005
- [88] Wijskamp, S.; Lamers, E.A.D.; Akkerman, R.: Effects of out-of-plane properties on distortions of composite panels. Gibson, A.G. (Hrsg.): Proceedings of Fibre Reinforced Composites 2000. Woodhead Publishing 2000, S. 361-368

- [89] Wijskamp, S.; Lamers, E.A.D.; Akkerman, R.: Spring-forward in composite plate elements, in: Proceedings of the 8th Esaform Conference on Material Forming, Cluj-Napoca (Rumänien), 2005, S. 943-946
- [90] Wacker, M.: ECOLITE. CTI-Tagung „Frontend und Vorderwagen“, München, 2006
- [91] Wacker, M.: Crashstrukturen. DFG-Workshop 524, Kaiserslautern, 2005, S. 33
- [92] Müller, N.; Ehrenstein, G. W.: Untersuchungen zur werkstoff- und prozessoptimierten Herstellung von tragenden Hybridstrukturen. VDI-Seminar Tragende Hybridstrukturen mit Kunststoffen, Fürth, 2003
- [93] Beschreibung Teilprojekt B3 des SFB 396  
<http://www.sfb396.uni-erlangen.de/extern/projekte/BereichB/B3/b3.html>  
(02.12.2006)
- [94] Kim, H. J.; Yarlagadda, S.; Shevchenko, N. B.; Fink, B. K.; Gillespie, J. W.: Development of a Numerical Model to Predict In-Plane Heat Generation Patterns During Induction Processing of Carbon Fiber-Reinforced Prepreg Stacks. Journal of Composite Materials, Vol. 37, Nr. 16 (2003), S. 1461-1483
- [95] Kim, H.; Yarlagadda, S.; Gillespie, J. W.; Shevchenko, N. B.; Fink, B. K.: A Study on the induction heating of carbon fiber reinforced thermoplastic composites. Advanced Composite Materials, Vol. 11, Nr. 1 (2002), S. 71–80
- [96] Produktdatenblatt Lanxess  
<https://techcenter.lanxess.com/scp/emea/de/products/datasheet/viscosity.pdf?docId=62938&pdfDocId=62896> (11.12.2006)
- [97] N., N.: Prozeßgrößen beim Spritzgießen von Thermoplasten als Produktionskostenfaktoren – Schmelze-, Werkzeug-, Entformungstemperatur, Zykluszeit, p-v-T-Diagramme – Anwendungstechnische Information ATI 916, Bayer AG (1.12.1994)
- [98] Zöllner, O.: Grundlagen zur Schwindung von thermoplastischen Kunststoffen. Anwendungstechnische Information ATI 1120d, Bayer AG (29.6.2004)

- [99] Seidel, C.: Verbunde aus Hochtemperaturthermoplasten und Kupfer für flexible Schaltungsträger. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2006
- [100] Gleich, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2004
- [101] Velthuis, R.; Mitschang, P.; Schlarb, A.K.: Prozessführung zur Herstellung und Eigenschaften von Metall / Faser-Kunststoff-Verbunden, DGM-Tagung
- [102] Zhao, G.: Spritzgegossene, tragende Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2002
- [103] Kramer, E.; Schmitter, A.: Stabilisierung von Kunststoffen. In: Thermische Einsatzgrenzen von Technischen Kunststoffbauteilen. Springer VDI Verlag, 1998
- [104] Pongartz, S.; Duriau-Montagne, F.; Ehrenstein, G.: Einfluss der Verarbeitung auf den Abbau von PA und PP. Kunststoffe, Jahrgang 90, Nr. 2 (2000), S. 52-55
- [105] Baudry, F.; Wakeman, M. D.; Blanchard, P.; Manson, J-A. E.: Void evolution during the Stamp-Forming of Thermoplastic Composite Sheets. Sampe Europe International Conference, Paris (2006), S. 434-441
- [106] DIN 45635-1 "Geräuschmessung an Maschinen; Luftschallemission, Hüllflächenverfahren; Rahmenverfahren für 3 Genauigkeitsklassen"
- [107] Brunotte, R.: Die thermodynamischen und verfahrenstechnischen Abläufe der in-situ-Oberflächenmodifizierung beim Spritzgießen. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2006
- [108] Zöllner, O.: Optimierte Werkzeugtemperierung. Anwendungstechnische Information ATI 1104, Bayer AG (30.11.1997)

- [109] Halpin, J. C.; Kardos, J. L.: The Halpin-Tsai Equations: A Review. *Polymer Engineering and Science*, Vol. 16, Nr. 5 (1976), S. 344-352
- [110] N.N.: Wälzlager  
<http://www.netzwelt.de/lexikon/W%E4lzlager.html#Lagerwerkstoffe>  
(25.02.2007)
- [111] Datenblatt PEEK der Kern GmbH  
<http://www.kern-gmbh.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=1701&lng=1> (25.02.2007)
- [112] Technisches Datenblatt PEEK der Amsler & Frey AG  
[http://www.amsler-frey.ch/pdf/td\\_peek.pdf](http://www.amsler-frey.ch/pdf/td_peek.pdf) (25.02.2007)
- [113] Datenblatt Tepex dynalite 201-C200 der Bond-Laminates GmbH  
[http://www.bond-laminates.de/medien/pdf/pmds/pmds\\_201-c200-48.pdf](http://www.bond-laminates.de/medien/pdf/pmds/pmds_201-c200-48.pdf)  
(25.02.2007)
- [114] Technisches Datenblatt PA 66 der Amsler & Frey AG  
[http://www.amsler-frey.ch/pdf/td\\_pa66.pdf](http://www.amsler-frey.ch/pdf/td_pa66.pdf) (25.02.2007)
- [115] Datenblatt 100CR6 bei WST  
<http://www.wst-center.de/pdf/13505.pdf> (25.02.2007)
- [116] DFG-Ergebnisbericht des Sonderforschungsbereiches 570, Teilprojekt C1  
<http://www.sfb570.uni-bremen.de/Ergebnisberichte/C1-Bericht.pdf>  
(25.02.2007)
- [117] Schierenbeck, H.: *Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre*. 14. Auflage, München: R. Oldenbourg Verlag, 1999
- [118] Horváth, P.: *Wirtschaftlichkeit neuer Produktions- und Informationstechnologien*, Stuttgart: Schaeffer-Poeschel Verlag, 1988
- [119] Corsten, H.: *Lexikon der Betriebswirtschaftslehre*. 3. Auflage, München: R. Oldenbourg Verlag, 1995



## **8 Betreute Studien- und Diplomarbeiten**

Michael Schmitt: Integration des induktiven Erwärmens in den Prozess des partiellen Thermoformens. Studienarbeit, Kaiserslautern 2004

Sascha Scherrer: Entwicklung eines Umformwerkzeugs für die Verarbeitung von thermoplastischen Wickelkörpern. Diplomarbeit, Kaiserslautern 2005

Jörg Walter: Entwicklung einer Induktionsschweißvorrichtung zum kontinuierlichen Fügen faserverstärkter Thermoplaste. Diplomarbeit, Kaiserslautern 2006



## 9 Lebenslauf

Name	Robert Lahr
Geburtstag, -ort	19.11.1973, in Idar-Oberstein
Familienstand	Verheiratet, 2 Kinder
Staatsangehörigkeit	deutsch

### Werdegang

1980 – 1984	Grund- und Hauptschule Algenrodt
1984 – 1990	Realschule Idar-Oberstein
1990 – 1993	Technisches Gymnasium Kaiserslautern
1993 – 2001	Studium des Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität Kaiserslautern, Fachrichtung: Maschinenbau
April 1994 – März 1995	Wehrdienst als Stabsdienstsoldat in Birkenfeld / Nahe
Dez. 2001 – Nov. 2006	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH im Bereich Verarbeitungstechnik
Seit Dez. 2006	Stabsstelle im Bereich Projektkoordination an der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

### Praktika

Juli 1993 – Aug. 1993	Buderus Guss GmbH im Bereich spanlose Fertigung
Feb. 1995 – März 1995	G. M. Pfaff AG im Bereich spanende Fertigungsverfahren
Juli 1996 – Aug. 1996	Johann Hay GmbH & Co. KG im Bereich Qualitätssicherung
Aug. 1996 – Sep. 1996	August Bilstein GmbH im Bereich Betriebsmittelkonstruktion
Aug. 1998	OIE AG im Bereich Rechnungswesen