

# **Grenzflächen beim Mehrkunststoffspritzgießen**

Von der Fakultät für Maschinenbau der  
Technischen Universität Chemnitz  
genehmigte

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt  
von Dipl.-Ing. Ines Kühnert  
geboren am 14.07.1969 in Dresden

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Günter Mennig  
Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmachtenberg  
Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Platzer

Tag der Einreichung: 04.05.2005  
Tag der Verteidigung: 04.10.2005

URL: <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2005/0166>

ISBN: 3-939382-00-0 (978-3-939382-00-3)



# Bibliographische Beschreibung

Kühnert, Ines

*Grenzflächen beim Mehrkunststoffspritzgießen*

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik, Chemnitz, 2005

123 Seiten, 46 Abbildungen, 10 Tabellen, 91 Literaturzitate

## Referat

Aufbauend auf den Grundlagen der Standard- und Mehrkunststoffspritzgießtechnik sowie der verarbeitungsinduzierten Grenzflächen (Bindenaht, Zwei-K-Grenzflächen) erfolgt eine detaillierte experimentelle Analyse von wichtigen Einflussfaktoren. Dabei werden Material- und Prozessparameter variiert und deren Auswirkungen auf die resultierende Verbundfestigkeit untersucht. Es wird auf das komplexe Zusammenspiel der Formänderungen und dadurch veränderter Wärmetransportbedingungen eingegangen. Im theoretischen Teil der Arbeit werden die experimentellen Erkenntnisse zur Festlegung der Anfangs- und Randbedingungen eines zweidimensionalen Berechnungsmodells angewandt, so dass die für eine Grenzfläche relevanten Abkühl- und Temperaturengleichsabläufe nachgebildet werden können. Schwerpunkt ist dabei die Anpassung der lokal unterschiedlichen Wärmeübergangsbedingungen hinsichtlich der einzelnen Prozessphasen. Im Ergebnis der Analyse der Einflussgrößen konnte ein Beitrag zur Optimierung der Prozessführung und somit der Verbundfestigkeit erbracht werden.

## Schlagworte

Thermoplast, Mehrkomponentenspritzgießen, Mehrkunststoffspritzgießen, Grenzfläche, Bindenaht, Haftung, Verbundfestigkeit, Wärmeleitung, Wärmeübergang



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin und Assistentin am Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik der Technischen Universität Chemnitz.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Mennig, dem Leiter der Professur für Kunststoffverarbeitungstechnik, für die Anregung dieser Arbeit, seine stete Diskussionsbereitschaft sowie die geduldige und inspirierende wissenschaftliche Betreuung. Nicht zuletzt möchte ich ihm für die kritische Durchsicht meiner Dissertationsschrift danken.

Weiterhin möchte ich allen Mitarbeitern der Professur für Kunststoffverarbeitungstechnik aus dem technischen und wissenschaftlichen Bereich, den Studenten (insbesondere Herrn Volker Stoll) und allen sonst am Gelingen dieser Arbeit beteiligten Personen danken.

Ein Teil der Forschungsarbeiten, die dieser Dissertation zugrunde liegen, wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert. Diesen Institutionen sowie den Firmen BASF und Bayer, die kostenlos Versuchsmaterial zur Verfügung gestellt haben, danke ich ebenfalls. Der Firma Arburg danke ich für die Leihgabe einer Zwei-Komponenten-Spritzgießmaschine für das Technikum Kunststoffverarbeitung, wodurch eine Reihe der hier beschriebenen Versuche in Chemnitz stattfinden konnte.

Dem Institut für Polymerforschung (IPF), Dresden, besonders den Herren Dr. Lehmann und Dipl.-Ing. B. Hupfer, gebührt Dank für die Unterstützung bei der Werkzeugentwicklung und bei der Durchführung einiger Mehrkunststoffspritzgießversuche. Ebenfalls wird im Zusammenhang mit der Versuchsdurchführung dem Institut für Konstruktion und Verbundbauweisen (KVB), Chemnitz, gedankt.

Chemnitz, im Mai 2005

Ines Kühnert



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Problemstellung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Einteilung und Begriffsdefinition . . . . .	5
2.2	Standardspritzgießen und Bindenaht . . . . .	6
2.2.1	Prozessablauf . . . . .	6
2.2.2	Strömungsprofil und Quellfluss während der Formfüllung . . . . .	8
2.2.3	Bindenähte . . . . .	10
2.3	Mehrkunststoffspritzgießen und Grenzflächen . . . . .	13
2.3.1	Verbundspritzgießen . . . . .	15
2.3.2	Sandwichspritzgießen . . . . .	17
2.3.3	Biinjektionsspritzgießen . . . . .	18
2.3.4	Grenzflächen . . . . .	20
2.4	Einflussfaktoren auf die Grenzflächenfestigkeit . . . . .	21
2.4.1	Haftungsmechanismen an einer Grenzfläche . . . . .	24
2.4.2	Makroskopische Einflüsse . . . . .	29
2.4.3	Verarbeitungsinduzierte Grenzflächenerscheinungen . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau und Experimente</b>	<b>37</b>
3.1	Untersuchte Werkstoffe . . . . .	37
3.2	Experimentelle Ausrüstung . . . . .	39

3.2.1	Probekörperwerkzeug . . . . .	39
3.2.2	Probekörpergeometrie . . . . .	42
3.2.3	Maschine . . . . .	42
3.2.4	Dokumentation der Prozessparameter . . . . .	43
3.3	Standardspritzgießen - Bindenaht . . . . .	44
3.4	Mehrkunststoffspritzgießen - Grenzfläche . . . . .	44
3.4.1	Prozessablauf . . . . .	45
3.4.2	Grundeinstellung der Parameter und Variationen . . . . .	47
3.5	Prüfmethoden . . . . .	51
3.5.1	Charakterisierungsmethoden . . . . .	51
3.5.2	Mechanische Prüfung . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Analyse von Prozess- und Materialeinflüssen auf Haftungsmechanismen</b>	<b>55</b>
4.1	Ausgangs- und Bindenahtfestigkeit . . . . .	55
4.2	Einflussanalyse . . . . .	56
4.2.1	Verzögerungszeit und Prozesstemperaturen . . . . .	56
4.2.2	Werkzeuginnendruck und Formänderungsverhalten . . . . .	60
4.2.3	Kristallisation . . . . .	66
4.2.4	Weitere Grenzflächenerscheinungen . . . . .	67
4.3	Schlussfolgerungen . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Temperaturverläufe bei der Grenzflächenentstehung</b>	<b>73</b>
5.1	Relevantes thermisches Verhalten . . . . .	73
5.2	Berechnung des Wärmeübergangs an der Grenzfläche . . . . .	75
5.2.1	Grundlagen und Abkühlverhältnisse . . . . .	75
5.2.2	Randbedingungen für die Kernzugtechnik . . . . .	77
5.2.3	Auswahl eines geeigneten FEM-Berechnungsprogrammes . . . . .	86
5.3	Ergebnisse für Temperaturprofile und Abkühlverläufe . . . . .	87



5.3.1	Phase 1: Einspritzen und Nachdruck 1 . . . . .	87
5.3.2	Phase 2: Zwischenkühlphase . . . . .	88
5.3.3	Phase 3: Einspritzen und Nachdruck 2 . . . . .	90
5.3.4	Phase 4: Restkühlphase . . . . .	90
5.4	Schlussfolgerungen . . . . .	93
<b>6</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>95</b>
6.1	Wärmeübergang versus Formänderung . . . . .	95
6.2	Optimale Verbundhaftung oder Nichthaftung . . . . .	97
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>99</b>
	<b>Literatur</b>	<b>103</b>
	<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>109</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>113</b>



# Kapitel 1

## Einleitung und Problemstellung

In der heutigen Produktentwicklung von Kunststoff-Bauteilen spielt die Integration von Funktion und Design eine zunehmend wichtigere Rolle. Dies erfordert oft den Einsatz mehrerer Werkstoffe mit speziellem Eigenschaftsprofil sowie deren Kombination zur Optimierung der Bauteileigenschaften. Wachsender Kostendruck erzwingt darüber hinaus die Einsparung von Montage- und Fügeschritten. Komplettlösungen können die Mehrkomponentenspritzgießverfahren sowohl durch die Inline-Verbindung von Kunststoffen untereinander als auch mit anderen Materialien (z. B. Metallen, Textilien) bieten [1]. Die Mehrkomponententechnik umfasst je nach Materialkombination, Maschinen- und Werkzeugtechnik eine Reihe von speziellen Verfahren. So werden beim Mehrkunststoffspritzgießen unterschiedliche Kunststoffe miteinander verbunden, z. B. ein harter Thermoplast mit einem weichen thermoplastischen Elastomer zur Integration einer Dichtlippe. Eine Schlüsselrolle übernehmen dabei die bei der Entstehung solcher Grenzflächen ablaufenden Haftungsmechanismen, die im wesentlichen durch die Verträglichkeit der kombinierten Materialien sowie den Prozessablauf und dessen Bedingungen beeinflusst werden.

Eine gut haftende Verbindung kann einerseits durch zwei nahezu gleichzeitig in die Kavität eingespritzte Kunststoffe hergestellt werden, so dass die Grenzfläche zwischen zwei schmelzefflüssigen Kunststoffen entsteht und eine Schichtenstruktur gebildet wird. Für dieses entsprechend dem Aufbau des Formteilquerschnitts sog. Sandwichspritzgießen ist die Voraussetzung eine chemische und/oder physikalische Verträglichkeit der Materialien sowie deren Verarbeitungskompatibilität hinsichtlich der Prozesstemperaturen. Ausreichende Molekülbeweglichkeit zur Bildung von Verschlaufungen (Interdiffusion) über die Grenzfläche hinweg ist eine Grundlage für hohe Verbundfestigkeit. Vergleichbar ist die Ausbildung solcher „heißen“ Grenzflächen mit der Entstehung einer Bindaht beim Standardspritzgießen. Diese werden durch das strömungs- bzw.

formfüllbedingte Trennen zweier Schmelzeströme innerhalb des Werkzeughohlraums und deren Wiedervereinigung verursacht. Sie bedeuten meist optische und/oder mechanische Schwachstellen im Bauteil.

Andererseits entstehen „kalte“ Grenzflächen, wenn beim Verbundspritzgießen auf das Formen eines sog. Vorspritzlings in einer dafür abgesperrten Kavität und dessen Abkühlung die Erweiterung des Formhohlraums zum Umspritzen mit einer zweiten schmelzflüssigen Komponente folgt [2]. Während bei der Sandwichtechnologie generell eine gute Haftung benötigt wird, kann bei diesen kalten Grenzflächen auch das Ziel einer Nichthaftung verfolgt werden. Von wachsender Bedeutung ist die gezielte Unterbindung der Haftung bei solchen Montageschritten, bei denen bewegliche Teile integriert werden. Im einfachsten Fall werden hier unverträgliche Polymere benutzt. Vorteilhaft erweist sich aber die Verwendung von ein und demselben Kunststofftyp beidseitig der Grenzfläche in bezug auf uneingeschränkte Recyclingfähigkeit des Bauteils.

Bei der Kombination desselben Materials steht sowohl die Verträglichkeit als auch die Verarbeitungscompatibilität außer Frage. Problematisch ist deshalb die Verhinderung der Haftungsmechanismen, die eine feste Verbindung induzieren. Neben der grundsätzlichen Verträglichkeit sind weitere Faktoren (z. B. Materialeigenschaften, Benetzungsverhalten, Prozessgestaltung, Grenzflächengeometrie) und deren Wechselwirkung entscheidend bei der Entstehung einer Verbindung beteiligt.

Außerdem können bei der Anwendung von Mehrkunststofftechniken haftungsmindernde Einflüsse soweit in den Vordergrund treten, dass sogar verträgliche Materialien zu keinem Verbund kommen oder keine dem Anwendungsfall entsprechende Verbundfestigkeit erreichen [3, 4]. Die Vorgänge und deren Einflüsse auf die resultierende Verbundfestigkeit sind dabei nach wie vor nicht ausreichend geklärt. Eine detaillierte Analyse von materialspezifischen und prozessbedingten Einwirkungen soll deshalb dazu dienen, die bei der Entstehung der Grenzflächen ablaufenden Mechanismen und deren Auswirkungen auf die Verbundfestigkeit des Formteils besser zu verstehen.

Bisherige Untersuchungen zeigen den Haupteinfluss in der Temperaturführung des Prozesses und in der Zeit (Verzögerungszeit), die bis zum Auftreffen der zweiten Komponente verstreicht. Währenddessen schreitet im Vorspritzling die Abkühlung und somit die Erstarrung in Verbindung mit einer Formänderung (Schwindung) fort [5–8]. Danach erfolgt eine Wiedererwärmung eventuell einhergehend mit dem Aufschmelzen der Vorspritzlingsfront. Anschließend kühlen beide Komponenten gemeinsam auf Entformungstemperatur ab. Somit gibt die Verzögerungszeit indirekt einerseits das Resttemperaturprofil des Vorspritzlings vor sowie andererseits die Kontakttemperatur, bei der die Aufwärmung wieder beginnt. Der Vorgang zur Ausbildung von Haftungsme-

chanismen steht demnach in direktem Zusammenhang mit den Wärmeübergangsvorgängen im Bereich der Grenzfläche.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist somit die Analyse derjenigen Grenzbedingungen, die gezielt zu einer sehr guten Verbundfestigkeit oder zur Nichteftung führen. Die Betrachtungen von verarbeitungsinduzierten Wärmetransport- und den resultierenden Formänderungsvorgängen sollen zur Aufklärung der komplexen Wirkmechanismen beitragen.



# Kapitel 2

## Grundlagen

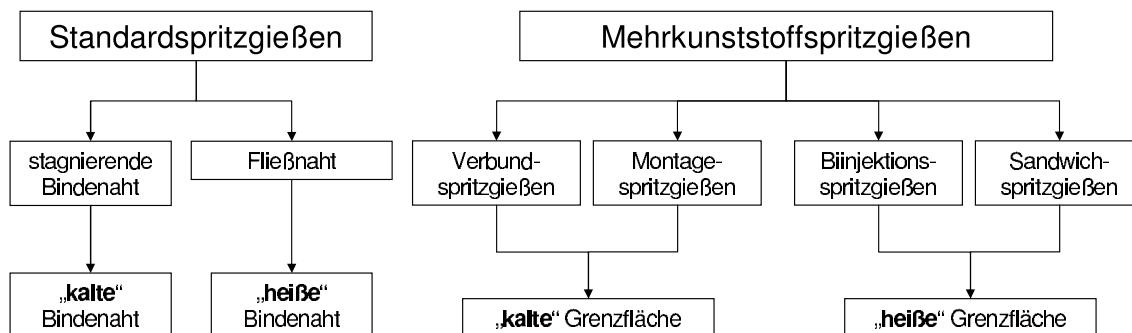
In diesem Kapitel werden zunächst die Begriffe zur Unterscheidung der Grenzflächen nach ihrer Entstehungsart im Spritzgießprozess definiert. Danach erfolgt die Erläuterung der dazugehörigen Verfahrensabläufe des Standardspritzgießens und einer Sonderform, dem Mehrkunststoffspritzgießen. Zu den Grundlagen gehören weiter die Entstehungsmechanismen der aus besonderen Strömungssituationen resultierenden Grenzflächen. Das Kapitel schließt ab mit der Darstellung der Haftungsmechanismen und Grenzflächeneigenschaften inklusive der sie beeinflussenden Faktoren. Neben den aus der Literatur gewonnenen Erkenntnissen werden auch schon eigene Forschungsergebnisse innerhalb dieses Kapitels erwähnt, die bei der späteren Betrachtung der Ergebnisse und für die Schlussfolgerungen von Bedeutung sind.

### 2.1 Einteilung und Begriffsdefinition

In Industrie und Wissenschaft gibt es unterschiedliche Auffassungen über die Bezeichnung von makroskopischen Grenzflächen in Spritzgießformteilen. Im Vorfeld wird deshalb geklärt, wie die im Spritzgießprozess entstehenden Grenzflächenvarianten im weiteren Verlauf der Arbeit bezeichnet werden. Bild 2.1 soll als allgemeine Übersicht dienen, wobei die einzelnen Entstehungsvarianten in den folgenden Abschnitten ausführlicher erläutert werden. Schwierig ist eine klare Trennung zwischen Bindenaht und Grenzfläche, da sich einige Entstehungsmechanismen überlappen. In diesem Fall soll die Trennung ausschließlich nach der Anzahl der verwendeten Einspritzeinheiten erfolgen. Beim Standardspritzgießen mit nur einer Einspritzeinheit können unter bestimmten Bedingungen die so genannten stagnierenden „kalten“ Bindenähte entstehen, deren Hauptmerkmal das frontale Aufeinandertreffen zweier Schmelzeströme mit sofortigem Stillstand

ist. Bewegen sich die Schmelzeströme nach dem Zusammentreffen aber weiter, wird von der Fließnaht bzw. „heißen“ Bindenaht gesprochen. Die Ursachen der Entstehung, Schwächen sowie Möglichkeiten zur Steigerung der Bindenahtfestigkeit werden im Abschnitt 2.2.3 aufgezeigt. Beim Mehrkunststoffspritzgießen entstehen zwangsläufig und meist zwischen mindestens zwei unterschiedlichen Kunststoffen die Grenzflächen, allerdings gibt es auch hier Unterschiede. So werden die Grenzflächen beim Verbundspritzgießen nach Herstellung eines Vorspritzlings und darauf folgender Zwischenkühlphase beim Auftreffen der heißen Schmelze des zweiten Kunststoffes gebildet. Aufgrund der Zwischenkühlphase und der damit verbundenen Erstarrung des zuerst hergestellten Verbundpartners wird die Bezeichnung „kalte“ Grenzfläche verwendet. Dagegen entstehen „heiße“ Grenzflächen unter Schmelze-Schmelze-Kontakt bei den Sandwich- und Biinjektionsverfahren durch gleichzeitiges oder zeitlich minimal versetztes Einspritzen der Komponenten. Differenziert erläutert werden auch diese Verfahren in den folgenden Abschnitten.

Vereinfachend wird im weiteren Verlauf der Arbeit im Fall von Bindenähten - da ohne Zwischenkühlphase - ebenfalls allgemein von „heißen“ Grenzflächen gesprochen und im Fall von Mehrkunststoffgrenzflächen, die mit einer Zwischenkühlphase entstehen, von „kalten“ Grenzflächen.



**Bild 2.1:** Übersicht Kunststoff-Kunststoff-Grenzflächen beim Spritzgießen

## 2.2 Standardspritzgießen und Bindenaht

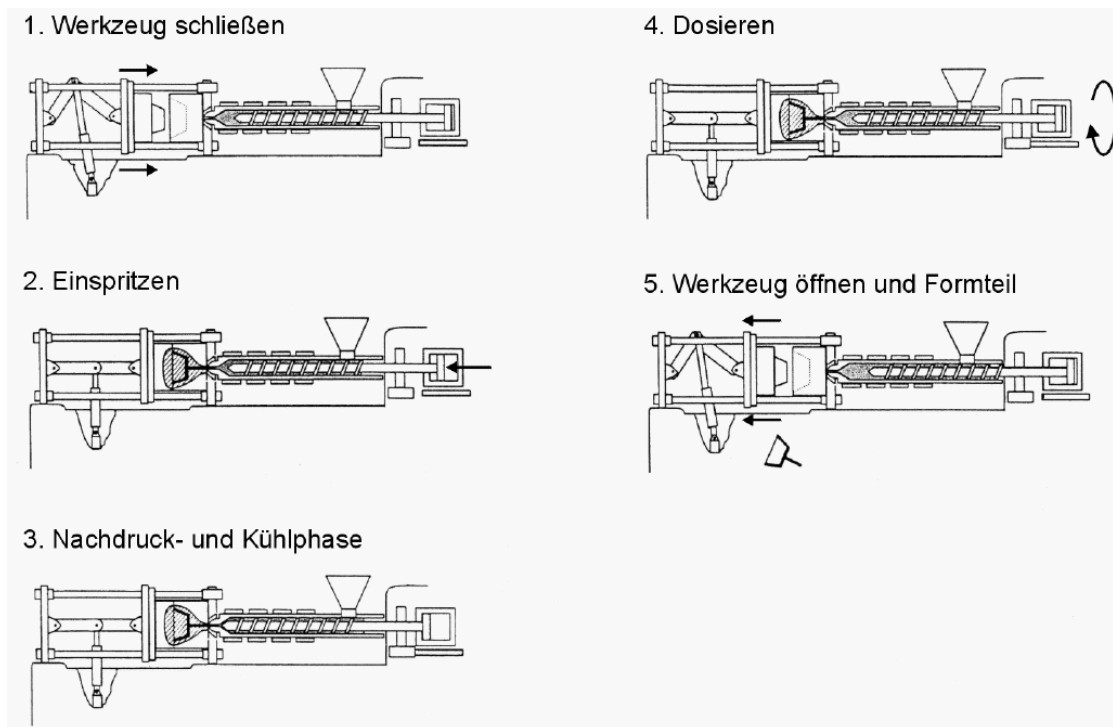
### 2.2.1 Prozessablauf

Thermoplastische Formmassen werden in hohem Maße durch Spritzgießen verarbeitet. Die dabei eingesetzten Schneckenkolben-Spritzgießmaschinen bestehen hauptsächlich aus einer Plastifiziereinheit und der Formschließeinheit sowie dem Antrieb und der Steuerung. Desweiteren



befindet sich in der Formschließeinheit das Spritzgießwerkzeug mit dem Formhohlraum.

In Bild 2.2 sind die einzelnen Verfahrensschritte zur Herstellung eines Spritzgussteils dargestellt. Zunächst wird das Material in Form von Granulat in der Plastifiziereinheit durch Rotation der

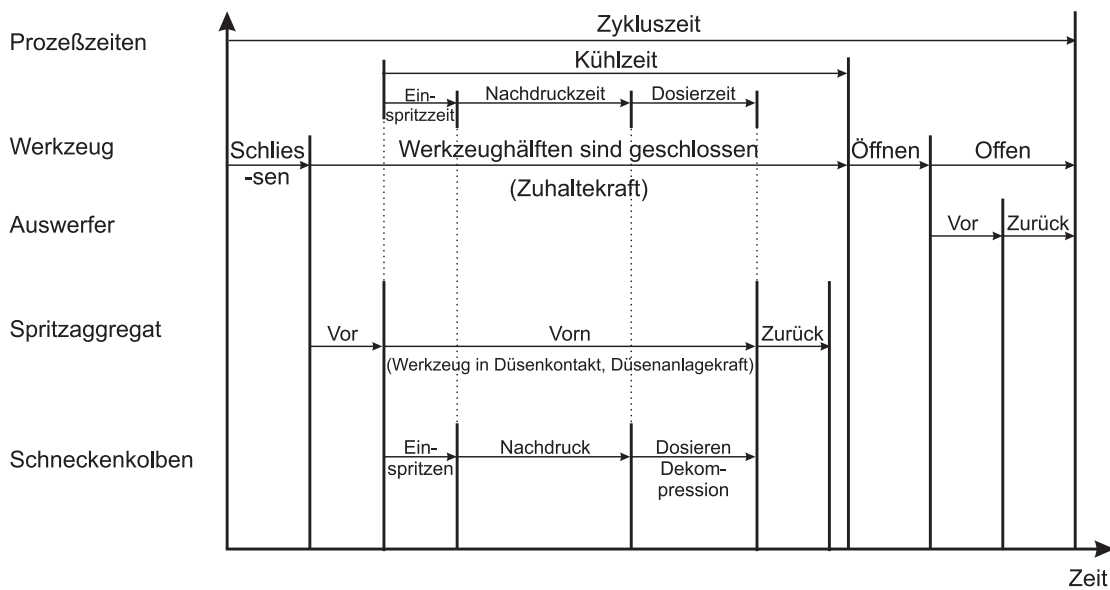


**Bild 2.2:** Verfahrensschritte beim Spritzgießprozess (nach [9])

Schnecke plastifiziert und damit in einen fließfähigen Zustand überführt. Nach dem Schließen des Werkzeuges (Schritt 1) wird der plastifizierte Kunststoff durch Axialbewegung der Schnecke in den im Werkzeug eingebrachten Hohlraum (die sog. Kavität), der der späteren Form des Spritzgussteils entspricht, gedrückt (Schritt 2). Danach wird der Massedruck in Form von Nachdruck (Schritt 3) noch eine bestimmte Zeit aufrecht erhalten, um Volumenverringerungen aufgrund von Abkühlung auszugleichen. Anschließend an die Nachdruckphase und parallel zur Restkühlphase beginnt die Schnecke wieder zu rotieren, wodurch neues Material gefördert und plastifiziert wird, das sich vor der Schneckenspitze staut (Schritt 4). Im Schneckenraum liegt dann ein Staudruck vor, der die Schnecke während des Rotierens langsam um den gleichen Betrag axial rückwärts verschiebt, um den sie während des Einspritzvorganges schnell vorgedrückt wird. Mit Beginn des Einspritzens wird die vorhandene Wärme (Enthalpie) in der Schmelze über die Oberfläche der Formnester an das durch Kühlkanäle im Werkzeug strömende Wärmeträgerme-

dium (üblicherweise Wasser oder Öl) abgeführt. Ist die Erstarrungstemperatur nahezu im gesamten Formteil erreicht, wird die Kühlzeit beendet, das Werkzeug geöffnet und das Spritzgussteil ausgeworfen. Sofort danach beginnt der Zyklus mit dem Schließen des Werkzeuges von vorn.

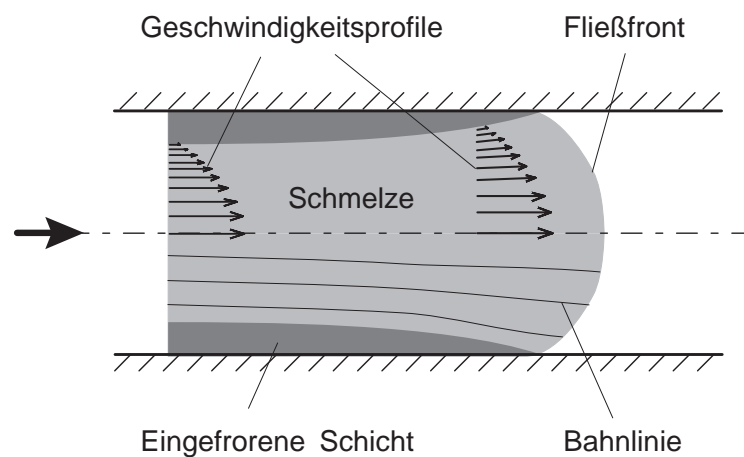
Die skizzierten Verfahrensschritte, die sich zeitlich teilweise überdecken (Bild 2.3), sind Bestandteil in jedem Spritzgießzyklus. Jeder einzelne Produktionsschritt wird durch die Steuereinrichtung der Maschine koordiniert, je nach Aufbau der Maschine werden die Prozessdrücke und Bewegungen hydraulisch oder elektrisch erzeugt. Immer ist es das Ziel der wirtschaftlichen Produktion eines Formteils, die für diesen Ablauf benötigte Zykluszeit soweit wie möglich zu minimieren, um eine hohe Ausstoßleistung zu erreichen. Die Gesamtzykluszeit wird dabei im wesentlichen durch die Abkühlzeit bestimmt, deren Reduzierung daher am nachhaltigsten zur Optimierung des Zyklusses beiträgt. In Bild 2.3 ist die zeitliche Folge der Einzelschritte sowie der Überlappung während des Standardspritzgießvorgangs graphisch dargestellt.



**Bild 2.3:** Zeitlicher Verlauf wichtiger Verfahrensschritte beim Spritzgießen

## 2.2.2 Strömungsprofil und Quellfluss während der Formfüllung

Mit Beginn der Einspritzzeit wird die Schmelze durch eine Vorwärtsbewegung der Schnecke durch die Düse ins Werkzeug gedrückt. Dabei füllt sich die Formhöhle durch Quellströmung der Schmelze, wie das Strömungsprofil in Bild 2.4 zeigt. Aufgrund der wesentlich niedrigeren



**Bild 2.4:** Strömungs- und Geschwindigkeitsprofil beim Formfüllen (nach [10])

Werkzeugtemperatur erstarrt die Masse am Rand schlagartig, und es entsteht eine eingefrorene Randschicht, die als Wärmeisolator wirkt und damit die weitere Füllung im Kern (sog. plastische Seele) gewährleistet. An der Fließfront quillt die Schmelze kontinuierlich von innen nach außen und erstarrt wieder bei Berührung mit der Werkzeugwand. Bei der Betrachtung des Geschwindigkeitsprofils wird von einem Schichtenmodell ausgegangen und davon, dass die Schmelze an der Werkzeugwand und an den bereits erstarrten Bereichen haftet. Es bildet sich somit das bekannte parabolische Geschwindigkeitsprofil aus. Entsprechend wird auch ein Schichtenaufbau bei der Ausrichtung von Füll- und Verstärkungsstoffen induziert. Weiterhin unterteilt sich das Strömungsprofil in Scher- und Dehnströmungsanteile. An der Fließfront werden die Teilchen gedehnt und am Rand zur eingefrorenen Schicht geschert.

### Orientierungen und Eigenspannungen

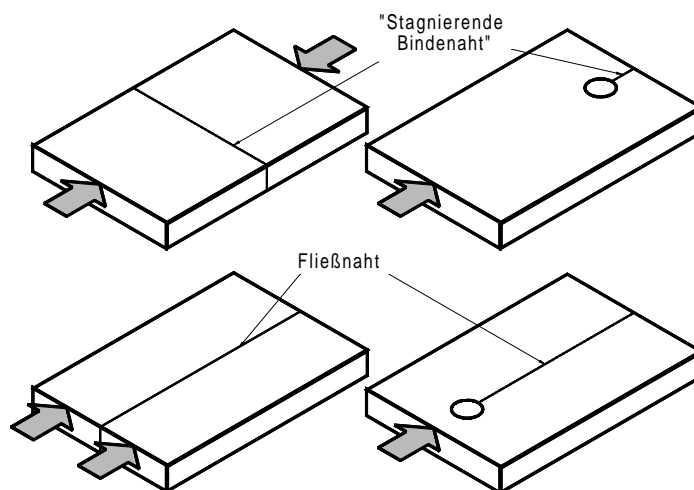
Die oben beschriebene Quellstromsituation und der aus der Abkühlung resultierende Schichtenaufbau beeinflussen die Orientierungs- und Eigenspannungsverteilung im Formteil. In der erstarrten Randschicht an der Werkzeugwand werden die aus der Dehnströmung resultierenden Orientierungen parallel zur Fließrichtung eingefroren. Unmittelbar unterhalb der eingefrorenen Schicht wird die Schmelze besonders stark geschert. Der hier vorliegende hohe Abkühlgradient führt dazu, dass die daraus resultierenden Orientierungen im Formteil eingefroren werden. Andererseits liegen in der Mitte des Schmelzekanal geringe Geschwindigkeitsunterschiede vor, und die Abkühlung läuft wesentlich langsamer ab, so dass die aufgrund des Einspritzvorganges eingebracht-

ten Orientierungen fast vollständig relaxieren können. Allerdings kann auch die Nachdruckphase Orientierungen einbringen, die wegen der bereits stark abgesunkenen Massetemperatur erhalten bleiben. Nach [2] nehmen die Orientierungen in Fließrichtung mit zunehmendem Fließweg über dem Querschnitt ab, da der Anteil der eingefrorenen Randschicht in gleicher Richtung reduziert wird und die Scherkräfte am Fließwegende nur kurz wirken, bevor die volumetrische Füllung vollständig abgeschlossen ist. So ergeben sich vereinfacht drei über den Querschnitt verteilte Orientierungszonen, d. h. in den Randschichten parallel und in der Kernschicht quer zur Fließrichtung.

### 2.2.3 Bindenähte

Im Verlauf des Formfüllprozesses kommt es vor, dass Schmelzeströme aus unterschiedlichen Richtungen aufeinandertreffen [11]. Die dabei entstehenden Bindenähte sind häufig mechanisch schwach und deswegen bei der Auslegung eines Bauteils besonders zu berücksichtigen. Desweiteren bewirken sie eine Veränderung im Glanz und Farbeindruck, insbesondere bei dunklen, brillanten oder transparenten Formteilen mit glatten, hochglanzpolierten Oberflächen.

Bindenähte werden aufgrund ihrer Entstehung in zwei Arten (Bild 2.5) eingeteilt. Einerseits bildet sich beim Aufeinandertreffen von zwei Schmelzeströmen mit anschließendem Stillstand die stagnierende „kalte“ Bindenaht aus. Wenn andererseits die Schmelzefronten nach der Vereini-



**Bild 2.5:** Bindenahtarten (nach [10])

gung weiterfließen, entsteht eine Fließnaht („heiße“ Bindenaht). In beiden Fällen kommt es zum Kontakt von heißem, schmelzflüssigen Material.

Die Ursachen für die Bindenahtentstehung können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Fließhindernisse im Werkzeug trennen den Schmelzestrom, der sich dahinter wieder vereinigt (z. B. Durchbrüche im Formteil).
- Mehrfachangüsse zur Gewährleistung der vollständigen Füllung von großen Formteilgeometrien ergeben Bindenähte zwischen den einzelnen Anschnittstellen (z. B. bei einem Stoßfänger [12]).

Die vorher genannten Entstehungsursachen treten in der Praxis häufig auf und lassen sich schwer oder gar nicht vermeiden. Diese Bindenähte sind deshalb immer wieder Gegenstand von Untersuchungen (z. B. [10–16]). Andererseits sind weitere Ursachen für die Bindenahtentstehung zu nennen, die jedoch durch entsprechend kunststoffgerechte Formteil- und Werkzeuggestaltung oder Prozessführung vermieden werden können:

- Wanddickenunterschiede verursachen das Voreilen in weiteren Hohlräumen gegenüber den schmaleren mit darauf folgendem Zusammentreffen der Schmelzeströme.
- Freistrahleffekt entsteht, wenn die Schmelze beim Austritt aus einem engen (Anschnittkanal) in einen weiteren Querschnitt (Kavität) den Kontakt zur Wand verliert. Es bildet sich ein Strahl, der erst am nächsten Hindernis gestoppt wird, um sich dann mäanderförmig aufeinander zu falten und an den Berührungsflächen Bindenähte zu bilden.

### **Ursachen für die Bindenahtschwächen**

Bei Formteilen mit Bindenähten haben sich häufig optische und/oder mechanische Schwächen aufgrund der beim Zusammentreffen der Fließfronten überlagert ablaufenden Wärmetransport- und Strömungsvorgängen gezeigt. In der Literatur werden dafür drei Teilursachen angegeben [11–13, 17]:

- mangelnde Interdiffusion der Makromoleküle über die Bindenaht hinweg,
- hohe Orientierung der Makromoleküle quer zur Hauptströmungsrichtung (parallel zur Bindenaht),
- umlaufende V-Kerbe an der Oberfläche des Bauteils.

### **Möglichkeiten zur Verbesserung der Bindenahtfestigkeit**

Von [18] wird festgestellt, dass diesem Problem allein durch eine geeignete Formteilgestaltung, wie z. B. durch Verlegen in weniger bzw. unbelastete Bereiche des Bauteils, erfolgreich begegnet werden kann. Die meisten Anwendungsfälle erfordern aber eine umfangreiche und intensive Klärung, ob die aufgrund der Formteilgeometrie und bei Mehrfachanguss zwangsläufig entstehenden Bindenähte in irgendeiner Form im Prozess eliminiert oder deren Schwächen vermindert werden können. Bei unverstärkten Thermoplasten kann eine Erhöhung der Masse- und / oder Werkzeugtemperatur sowohl optische als auch mechanische Effekte der Bindenähte eliminieren. Im Gegensatz dazu ist bei faserverstärkten Thermoplasten die charakteristische Faserorientierung im Bindenahtbereich limitierend und kann nur mittels Durchströmung verändert werden.

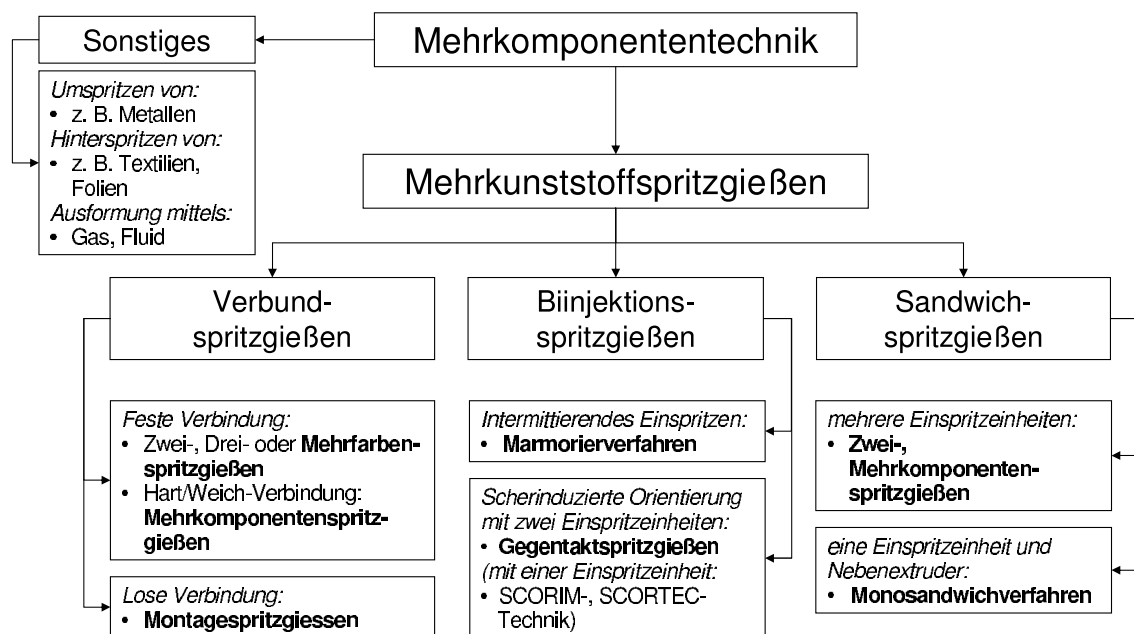
Im Hinblick auf Möglichkeiten zur Verbesserung der Bindenahtfestigkeit wurden in solchen Fällen in den vergangenen Jahren einige Verfahren und Methoden entwickelt, die allerdings z. T. noch keine Verbreitung in der praktischen Anwendung gefunden haben. Seit einiger Zeit werden das Kaskadenspritzgießen und bei einfachen Bauteilen das Gegentakt- oder auch das SCORIM-Verfahren (Shear Controlled Orientation Injection Moulding) eingesetzt bzw. vorgeschlagen [19–21]. Kaskadenspritzgießen bedeutet bei Mehrfachanguss das stufenweise Zuschalten der einzelnen Anschnitte sowie das wechselweise Öffnen oder Schließen. Die beiden anderen Verfahren bedienen sich entweder spezieller hydraulischer Kolbensysteme (SCORIM) oder der Mehrkunststoffspritzgießmaschinenteknik (Gegentaktverfahren, engl. Push-Pull-Moulding), d. h. zweier getrennt voneinander steuerbarer Einspritzeinheiten, um eine Hin- und Herbewegung der plastischen Seele in der Kavität zu erreichen. Meist erfolgt dies solange in der Nachdruckphase, bis aufgrund des Einfrierens keine Schmelzebewegung mehr möglich ist. Alle diese Methoden dienen dem Durchströmen der Bindenaht, wodurch eine bestimmte Bindenahtkontur erzeugt und eine Änderung der Molekül- und Faserorientierung herbeigeführt wird. Die Bindenahtfestigkeiten können dadurch signifikant gesteigert werden, wenn die Materialien empfindlich auf Orientierungseinflüsse reagieren, wie faserverstärkte Materialien [19, 21, 22] und Liquid Crystalline Polymers (LCP) [20].

Das Gegentaktspritzgießen wird im Abschnitt 2.3 den Mehrkunststoffspritzgießverfahren zugeordnet, da es sich derselben Maschinenteknik bedienen. Obwohl letztendlich nur ein und derselbe Materialtyp aufeinandertrifft, wird die Kavität aus zwei getrennten Einspritzzylindern gespeist. Auf diese Weise tritt eine Analogie in der Entstehung von Bindenaht und Grenzfläche auf, wodurch sich eine gemeinsame Betrachtung anbietet.

## 2.3 Mehrkunststoffspritzgießen und Grenzflächen

Aus zahlreichen Publikationen sind die Mehrfarben- oder Mehrkomponentenverfahren seit ca. 30 Jahren als Sonderverfahren der Spritzgießtechnik bekannt [5,7,23–25]. Deren großes Potential bei Rationalisierung und Kostenoptimierung in der Herstellung von komplexen Bauteilen mit Mehrfachfunktionalität wird dabei besonders hervorgehoben [26–32]. Das Mehrfarbenspritzgießen lieferte zunächst die Voraussetzung für eine der ersten Anwendungen, die Telefonwählscheiben. Erweitert wurde diese Technik in den folgenden Jahren vor allem unter dem Gesichtspunkt, Kosten durch Verlagerung meist nachgeschalteter Fertigungs- und Montageschritte in den Spritzgießprozess einzusparen.

Obwohl in zahlreichen Veröffentlichungen Übersichten zur Nomenklatur bei den Mehrkomponententechniken aufgezeigt werden, treten immer wieder verschiedene Begriffe für ein und dasselbe Verfahren auf [5, 7, 8, 25, 33]. Aus diesem Grund soll die Übersicht in Bild 2.6 - zusammengestellt in Anlehnung an vorher genannte Quellen und an das Handbuch von Johannaber [2] -



**Bild 2.6:** Verfahrensvarianten der Mehrkomponententechnik (nach [2, 8, 25])

die Verwendung der Begriffe in den weiteren Ausführungen vorgeben. Hinter den Oberbegriffen „Mehrfarben- und Mehrkomponenten-Spritzgießen“ verbergen sich eine Reihe von Verfahren, bei denen entweder Kunststoffe desselben Typs in unterschiedlicher Einfärbung - Mehrfarbenspritzgießen - oder unterschiedliche Kunststofftypen miteinander - Mehrkunststoffspritzgießen -

verbunden werden. Desweiteren können Kunststoffkomponenten auch mit anderen Werkstoffen oder Halbzeugen, wie Metallen, Folien oder Textilien verbunden werden. In diesen Fällen wird jeweils nur die Kunststoffkomponente durch Spritzgießen verarbeitet und das andere Teil eingelegt. Solche sonstigen Verfahren der sog. Mehrkomponententechnik sind:

- Hinterspritzen von Folien oder Textilien u. a. [34–36]
- Umspritzen von Einlegeteilen (Inserttechnik, Outserttechnik, Hybridtechnik) [37, 38].

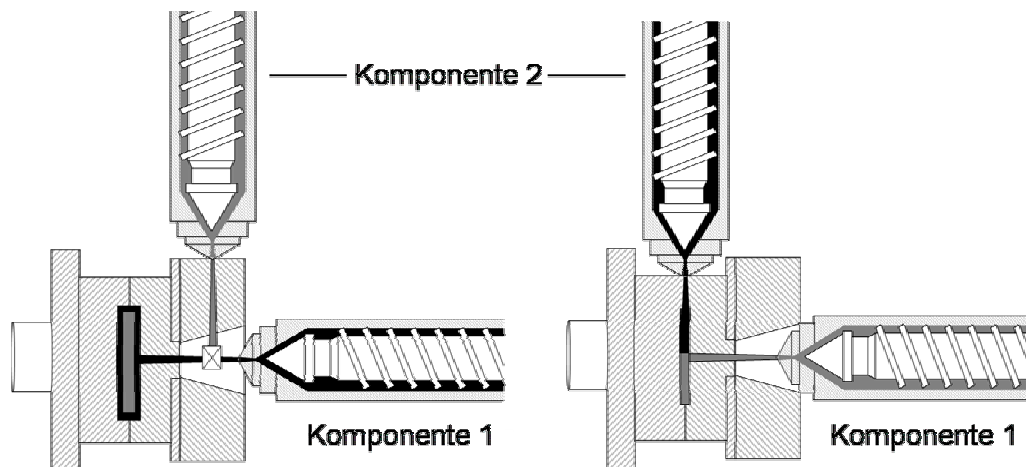
Eine weitere Besonderheit der Mehrkomponententechnik ist die Nutzung von Gasen oder Fluiden zur vollständigen Ausformung der Kavität einerseits bzw. zur Vermeidung von Einfallstellen bei sehr großen Wanddicken im Formteil andererseits. Allgemein werden diese Sondertechniken als Gas- bzw. Wasserinjektionsspritzgießen bezeichnet und dem Sandwichspritzgießen zugeordnet. Anstelle von Kunststoff tritt in diesen Fällen Gas oder Wasser als Kernkomponente [2, 39–42], die im Anschluss an die Ausformung normalerweise wieder entfernt wird.

Beim Mehrkunststoffspritzgießen werden die Verfahren in der Literatur weiter differenziert nach der:

- angewandten Werkzeugtechnik (drehend, nicht drehend) [2] oder der
- Art der Materialpaarung (Hart/Weich, Hart/Hart, Kunststoff/Kautschuk o. a.) [7, 8, 31, 43, 44].

Oft werden heutzutage die einzelnen Verfahrensvarianten modifiziert, erweitert und untereinander kombiniert, um Montageschritte zu Gunsten der Integration weiterer Funktionselemente bis hin zum fertigen Bauteil beim Spritzgießen unterzubringen [45]. Als Hauptunterteilung der Mehrkunststoffverfahren wird für das Aneinander-, Um- oder Überspritzen von Kunststoffen der Oberbegriff „Verbundspritzgießen“ und für das Ineinanderspritzen von Kunststoffen der Oberbegriff „Sandwichspritzgießen“ verwendet (Bild 2.6). Bild 2.7 zeigt die Prinzipdarstellung beider Verfahren. Links ist zu sehen, dass die beiden Komponenten beim Sandwichspritzgießen über einen gemeinsamen Anschnitt ins Werkzeug gelangen. Im Gegensatz dazu wird beim Verbundspritzgießen immer von verschiedenen Angusspositionen aus in die Form eingespritzt. Als ein Exot der Mehrkunststofftechnik wird die Biinjektion in Form einer Intervalltechnik angeführt. Formteile, die auf diese Art hergestellt werden, weisen nicht den aus zwei oder drei klar getrennten Komponenten bestehenden Sandwichaufbau auf wie beim Ineinanderspritzen. Die Komponenten werden quasi gleichzeitig und wie beim Verbundspritzgießen über voneinander getrennte Anschnitte ins





**Bild 2.7:** Prinzipdarstellung Sandwich- (links) und Verbundspritzgießen (rechts)

Werkzeug geleitet. Im Unterschied zum Verbundspritzgießen gibt es aber keine Pause, so dass die Grenzfläche durch Schmelze-Schmelze-Kontakt entsteht. Da sich das Marmorierverfahren und das Gegentaktspritzgießen ebenfalls der Maschinenteknik des Mehrkomponentenspritzgießens bedienen und die Technologie der des Biinjektionsspritzgießens am nächsten kommt, werden sie dieser Gruppe zugeordnet. Der Vollständigkeit halber finden das SCORIM- und SCORTEC-Verfahren bei den Verfahren zur scherinduzierten Orientierung Erwähnung, wobei sie aber nicht zur Mehrkomponententechnik gehören. Im Zusammenhang mit dem Gegentaktspritzgießen sind sie die „Verbindungsstelle“ zur Bindenaht.

Als Maschinenteknik werden beispielsweise Horizontalmaschinen mit mehreren Spritzeinheiten in Parallel- oder Winkelstellung zueinander oder Vertikalmaschinen mit vertikaler Spritzeinheit und seitlich stehenden Spritzeinheiten angeboten. Über die Anordnung der Komponenten im Formteil entscheiden je nach Verfahrensvariante die Düsen- und Werkzeugtechnik.

### 2.3.1 Verbundspritzgießen

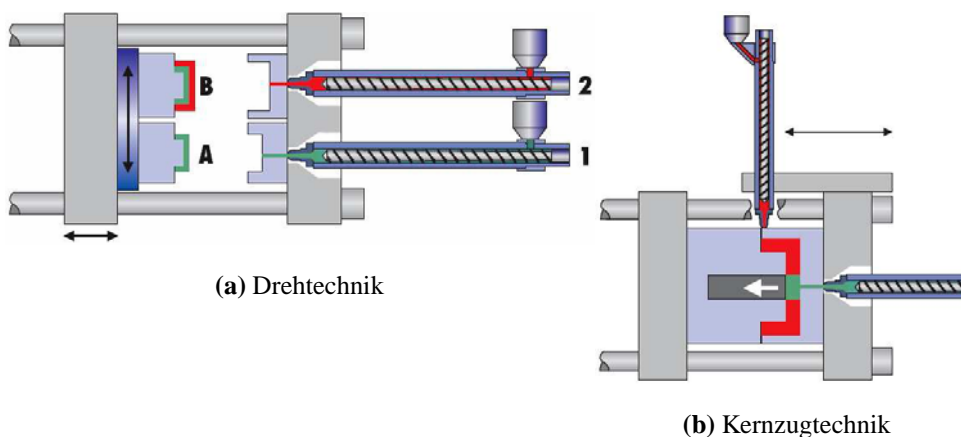
Das Verbundspritzgießen umfasst das Aneinanderspritzen von zwei oder mehr verschiedenen Kunststoffen mit zwischengeschalteter Kühlphase. Kombinationen sind sowohl in der Anwendung von einem Materialtyp in unterschiedlicher Einfärbung als auch von verschiedenen Kunststofftypen umzusetzen. Meist werden die Verfahrensvarianten anhand der angewandten Werkzeugtechnik eingeteilt (Bild 2.8). Dabei sind drehende und nicht drehende Werkzeugsysteme zu unterscheiden [2, 46]. Folgende Varianten sind dabei zu nennen:

### Drehtechnik:

- Drehteller (maschinen- oder werkzeuggebunden, vertikale Drehung) (Bild 2.8a)
- Drehkreuze, Drehkerne, Indexplatten (Teile des Werkzeuges drehen sich vertikal)
- Wendeplatten- bzw. Würfeltechnik, Stack-Mould-Technik (meist horizontale Drehung des mittleren Teils eines Etagenwerkzeuges) [47, 48]

### Transfer- und Schiebertechnik:

- Umsetzen bzw. Einlegen des Vorspritzlings mittels Handlinggerät oder per Hand
- Kernzugtechnik (bei geschlossenem Werkzeug geben Schieber oder Kerne den Rest der Kavität frei; auch Core-Back-Technik genannt) (Bild 2.8b)



**Bild 2.8:** Prinzip drehende und nicht drehende Werkzeugsysteme [46]

Zunächst wird dabei aus der ersten Materialkomponente ein Vorspritzling hergestellt. Nachdem eine Zwischenkühlzeit für ihn abgelaufen ist, wird das Werkzeug geöffnet, und je nach Verfahrensvariante wird der Vorspritzling entweder durch Drehen oder Handling zur Umspritzkavität weiterbewegt. Die Verzögerungszeit (Kühlphase Vorspritzling) bis zum Kontakt mit der zweiten Komponente ist dabei im Allgemeinen größer als bei der Kernzugtechnik. Im Gegensatz zur Dreh- und Transfertechnik arbeitet die Kernzugtechnik mit beweglichen Einsätzen bei geschlossenem Werkzeug. Die Einsätze sperren während der Herstellung des Vorspritzlings die Kavität für

die zweite Komponente ab, um sie dann kurz nach Ende der Nachdruckzeit und einer Zwischenkühlzeit freizugeben. Für die Verbundspritzgießtechnik werden Spritzgießmaschinen verwendet, bei denen die Spritzaggregate in horizontaler oder vertikaler Anordnung parallel oder in Winkelstellung zueinander stehen.

Die Grenzflächen, die beim Verbundspritzgießen entstehen, werden im weiteren als kalte Grenzflächen bezeichnet (s. dazu auch Bild 2.1), da der Vorspritzling erst eine Abkühlphase durchläuft. Die Vorspritzlingsoberfläche ist fest, wenn der Grenzflächenkontakt mit der zweiten Komponente (Schmelze) hergestellt wird. Hinsichtlich der Grenzflächenqualität werden sowohl sehr gut haftende (kompatible), stoffschlüssige Verbindungen (angespritzte Dichtungen, Mehrfarbenteile), als auch gelenkartige, lose Verbindungen angestrebt. Erstere lassen sich mit allen oben genannten Verfahren herstellen, wobei die Voraussetzung die Haftungskompatibilität<sup>1</sup> der Materialien ist (s. auch Kap. 2.4.1). Im zweiten Fall gibt es entweder die Möglichkeit, eine Nichthaftung durch die chemisch-physikalische Unverträglichkeit der Materialien oder durch die entsprechend gezielte Wahl der Prozessparameter zu realisieren. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden einzelne Einflüsse und Untersuchungen diskutiert, die zu den vorher genannten Verbindungsarten führen.

### 2.3.2 Sandwichspritzgießen

Besonderheit dieser Technik ist der meist zweischichtige Aufbau der Formteile. Die sog. Kernkomponente übernimmt dabei eine andere Funktion als die Hautkomponente. Kombinationen wie Hart / Weich werden angewendet, wobei der harte Kern die Stabilität des Formteils unterstützt und die weiche Haut eine angenehme Haptik mit sich bringt. Weiterhin sind Recycling- / Neumaterialkombinationen üblich, bei denen ökonomische und ökologische Gesichtspunkte eine Rolle spielen. Für dickwandige, aber trotzdem leichte Teile werden Kombinationen aus kompakter Hautkomponente und treibmittelhaltigem Kern, der dann im Prozess aufschäumt, eingesetzt. In jedem Fall ergibt sich ein für den Anwendungsfall optimiertes Bauteil, das multifunktional gestaltet ist.

Zum prinzipiellen Prozessablauf des Sandwichspritzgießens sei hier auf Bild 2.7 links verwiesen. Generell wird die Hautkomponente vorgelegt und die Kernkomponente danach eingespritzt, die dann auch die vollständige Füllung der Kavität sowie die Nachdruckphase übernimmt. Am Ende des Zyklusses kann bei einigen Verfahrensvarianten noch etwas Hautmaterial nachgelegt werden, um die Anschnittstelle zu versiegeln und eine Markierung zu entfernen. Eingeteilt werden die Verfahrensvarianten nach [2] folgendermaßen:

<sup>1</sup>Haftungskompatibilität bedeutet die Fähigkeit, einen adhäsiven Verbund einzugehen. [2, 8, 49]

- Zwei-K-(Sandwich)Spritzgießen
- Sandwichspritzgießen mit 2K-Plattensystem [50]
- Mehrschichtspritzgießen von Vorformlingen (für das Streckblasen)
- Sandwichspritzgießen mit einer Spritzeinheit (Addmix-Verfahren, Monosandwichverfahren [51]).

Beim Zwei-K-Sandwichspritzgießen und beim Mehrschichtspritzgießen erfolgt die Haut- / Kernzuführung zum Werkzeug über eine spezielle Maschinendüse, über die eine Trennung der einzelnen Komponenten gewährleistet wird. Wohingegen beim Sandwichspritzgießen mit 2K-Plattensystem die Schmelzuführung über eine entsprechend temperierte, dem Werkzeug vorgeschaltete Platte realisiert wird. Als weitere Variante ist das Monosandwichverfahren bekannt [5], bei dem lediglich eine Spritzeinheit und ein Nebenextruder verwendet werden. Der Nebenextruder befüllt durch eine spezielle Düse den Schneckenorraum der Spritzeinheit mit Hautmaterial, das somit vor der Kernkomponente liegt und beim Einspritzvorgang zuerst in die Kavität gelangt.

Bei allen oben genannten Sandwichverfahren wird die Grenzfläche durch Schmelze-Schmelze-Kontakt (heiße Grenzfläche) gebildet, so dass generell eine gute Haftung erzielt werden sollte.

### 2.3.3 Biinjektionsspritzgießen

Zur Biinjektionstechnik zählen neben dem Marmorierverfahren<sup>2</sup> auch Verfahren, bei denen zwar die Zwei-K-Spritzgießtechnik zum Einsatz kommt, aber das eigentliche Ziel nicht die Herstellung von Verbundteilen ist, sondern die Verbesserung der mechanischen Formteileigenschaften durch gezieltes Durchströmen von Bindenähten bzw. geometrische Veränderung der Grenzflächenkontur (s. auch Kap. 2.2.3). Dabei werden die eigentliche Biinjektionstechnik und ein Sonderfall, das Gegentaktspritzgießen genannt [2, 52].

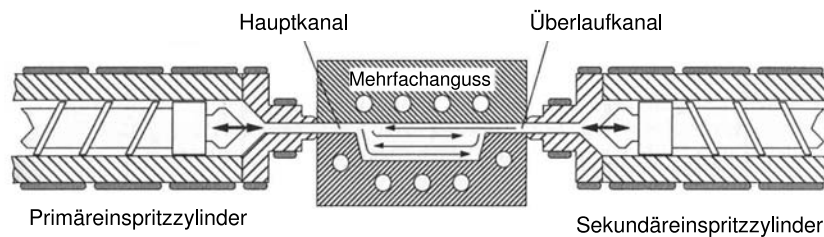
Die Biinjektionstechnik führt zwei verschiedene Schmelzekomponenten über verschiedene Angussysteme gleichzeitig in die Kavität. Es entsteht eine Bindenaht, die durch gezielte Nachdruckführung in ihrer Kontur so geändert wird, dass ein Eindringen der einen Komponente in die

---

<sup>2</sup>Verfahren, bei denen farbliche Inhomogenitäten im Formteil erzeugt werden, die entweder zufällig, nicht reproduzierbar oder reproduzierbar sind. Im Prozess wird während eines Zyklusses eine Farbpartie nach der anderen und in Intervallen in den Formhohlraum gedrückt, um schlierige Vermischungen zu erzielen [2].

andere erfolgt. Im Gegensatz zum Verbundspritzgießen ist eine genaue Festlegung des gesamten Bindaht- bzw. Grenzflächenverlaufs praktisch nicht möglich, und es entsteht somit unter Schmelze-Schmelze-Kontakt eine verwölbte Kontur.

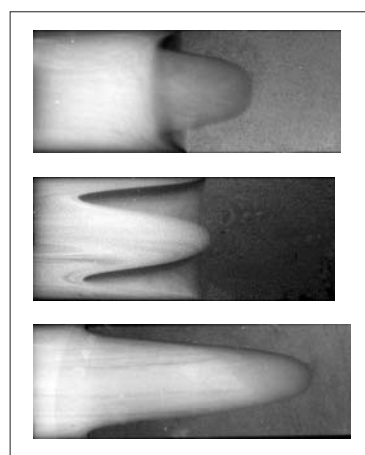
Beim Gegentaktspritzgießen (Bild 2.9) wird die Kavität ebenfalls gleichzeitig aus zwei Spritz-



**Bild 2.9:** Prinzipdarstellung Gegentaktspritzgießen (nach [21])

aggregaten und zwei Anschnitten gefüllt. Danach wird die Schmelzebewegung wechselseitig jeweils nur von einer Spritzeinheit realisiert, so dass Material in die andere Spritzeinheit zurückgedrückt wird. Beide Schnecken oszillieren im Gegentakt. Diese Methode sorgt für ein mehrfaches Durchströmen der Bindaht, wodurch eine Änderung der Orientierungssituation an der Bindaht herbeigeführt wird. Im günstigsten Fall kann die Bindaht sogar ganz eliminiert werden bzw. nicht mehr nachweisbar sein.

Ergebnisse der oben genannten Technologien können modellhaft in einfachen Geometrien dargestellt werden. Zu einzelnen Varianten der möglichen Konturen gibt Bild 2.10 einen Überblick.



**Bild 2.10:** Bindahtkonturen bei unterschiedlichen Gegentakten [16]

Oben und unten im Bild ist eine zungenförmige Verwölbung der Kontur aufgrund von unterschiedlichen Nachdruckniveaus entstanden. Wird ein Nachdruckprofil eingestellt, bei dem die beiden Einspritzeinheiten jeweils alternierend hohen und niedrigen Nachdruck aufbringen, dann kommt es zu einem verzahnten Profil in der Bindenaht. Schließlich werden die beiden Komponenten mehrfach gegeneinander verschoben, bis das Material komplett unterhalb der Glasübergangstemperatur abgekühlt ist.

### 2.3.4 Grenzflächen

Anhand der Ausführungen zu den einzelnen Mehrkunststoffspritzgießverfahren lassen sich auch die Grenzflächen zusammenfassend nach ihrem thermischen Entstehungsmechanismus unterscheiden. Von „heißen“ Grenzflächen wird dann gesprochen, wenn zwei Schmelzekomponenten aufeinandertreffen, was beim Sandwich- und beim Biinjektionsspritzgießen der Fall ist. Charakteristisch für Sandwichgrenzflächen ist eine intensive Verbindung aufgrund der beim Kontakt noch vorhandenen Molekülbeweglichkeit. Voraussetzung dafür ist allerdings eine chemische und / oder physikalische Verträglichkeit (Haftungskompatibilität) der beiden Komponenten, so dass eine Delamination ausgeschlossen werden kann. Bei den Biinjektionstechniken ist bisher wenig über die Kombination unterschiedlicher Materialien bekannt. Deshalb wird davon ausgegangen, dass lediglich ein und derselbe Materialtyp mit eventuell unterschiedlicher Einfärbung zum Einsatz kommt. Die Qualität der Biinjektionsgrenzflächen ist in gleichem Maße wie die der Bindenähte von den bereits genannten Faktoren abhängig.

Das zentrale Problem bei kalten Grenzflächen, die beim Verbundspritzgießen entstehen, ist ebenfalls die Haftung der Werkstoffe aneinander. Wesentliche Voraussetzungen für eine sehr gute Haftung sind die Eigenschafts- und die Verarbeitungscompatibilität<sup>3</sup>. In einer Reihe von Veröffentlichungen werden in diesem Zusammenhang Kompatibilitätsstudien und daraus hervorgegangene Materialpaarungen tabellarisch aufgelistet [2, 7, 8, 40, 49, 52]. Alle diese Studien sind unter bestimmten Prozessbedingungen und mit konkreten Handelsprodukten durchgeführt worden, so dass sie nur als Empfehlung gelten können. Tabelle 2.1 zeigt einen allgemeinen Überblick, welche Materialgruppenkombinationen bereits angewendet werden. Dabei fällt auf, dass neben den herkömmlichen Hart / Hart- und Hart / Weich-Verbindungen auch bisher aufgrund der gegensätzlichen Verarbeitungstemperatur und unterschiedlichen molekularen Grundstruktur unverträgliche Materialkombinationen, wie Thermoplast mit Gummi oder Thermoplast mit Duroplast, untereinander verbunden werden. Problematisch ist dabei vor allem die Anpassung der unterschiedlichen

---

<sup>3</sup>Eigenschaftscompatibilität bezieht sich insbesondere auf unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten und Schwindung. Verarbeitungscompatibilität bezieht sich auf Masse- und Werkzeugtemperatur. [2, 8, 49]

**Tabelle 2.1:** Kombinationen beim Mehrkunststoffspritzgießen

<b>Einstoffkombinationen</b>	<b>Mehrstoffkombinationen (in-/kompatibel)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• verschiedene Farben</li> <li>• Farbe und Transparent</li> <li>• Hart- und Weicheinstellungen (PVC, Gummi)</li> </ul>	<p><b>Hart-Weich</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Thermoplast – Thermoplastisches Elastomer</li> <li>• Thermoplast – Elastomer</li> </ul> <p><b>Hart-Hart</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• verschiedene Thermoplasttypen</li> <li>• Thermoplast - Duroplast</li> </ul>

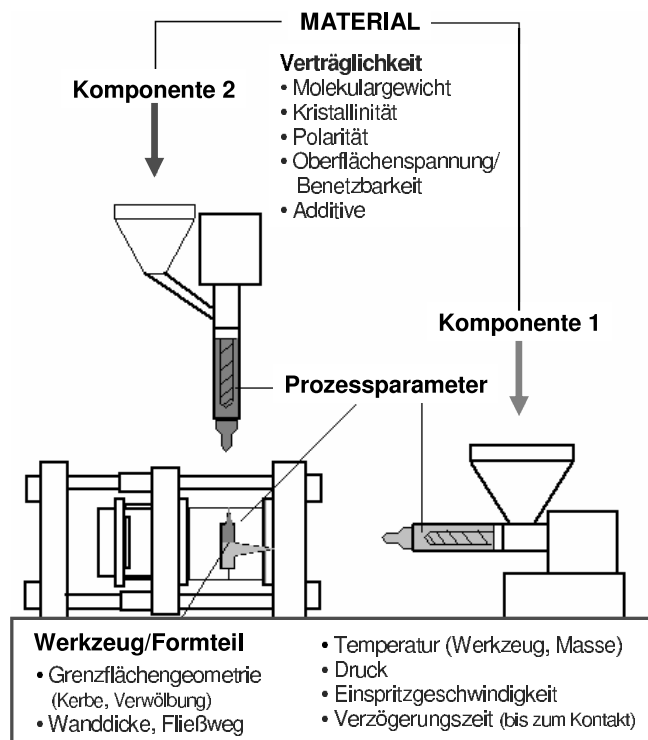
Verarbeitungsbedingungen. Entwicklungen auf dem Gebiet umfassen verschiedene Verfahrensvarianten, um eine Haftung zwischen Gummi und Thermoplast zu erreichen. Es wird entweder zunächst ein Gummiformteil hergestellt und ausvulkanisiert, um danach das Thermoplastteil aufbringen zu können (Fusion Bonding) [53]. Andernfalls wird umgekehrt zuerst der Thermoplast verarbeitet und danach ein Kautschuk als zweite Komponente aufvulkanisiert (K&K-Verfahren) [54]. Nachteilig in beiden Fällen sind die langen Vernetzungszeiten der eingesetzten Kautschuke und die benötigten hohen Verarbeitungstemperaturen, so dass die Auswahl der dahingehend verarbeitungskompatiblen Thermoplaste begrenzt ist. Hier bieten sich neuerdings die Flüssigsilikone aufgrund ihrer kurzen Vernetzungszeiten und guten Verarbeitbarkeit als Alternative an [44]. Weiterhin zeichnen diese sich gegenüber den herkömmlichen Weichkomponenten, den Thermoplastischen Elastomeren (TPE), durch weitere Vorteile in bezug auf Beständigkeit und Einsatzbereich bei höheren Temperaturen aus.

Wie schon vorher im Abschnitt 2.2.3 bei den Bindenähten erwähnt, unterliegen die Grenzflächen in ihren Eigenschaften einer Reihe von Einflussfaktoren, die im folgenden in einem gesonderten Abschnitt erläutert werden sollen.

## 2.4 Einflussfaktoren auf die Grenzflächenfestigkeit

Bei der Verbindung mehrerer Kunststoffkomponenten, ob ungewollt bei den Bindenähten in Form eines vorher geteilten Schmelzestromes oder gezielt bei den Grenzflächen aus unterschiedlichen schmelzeflüssigen Komponenten oder aus Komponenten, die bis zum Kontakt mehrere Zustandsänderungen durchlaufen haben, wird meist eine stoffschlüssige und haftende Vereinigung ange-

strebt. Wie belastungs- und medienunanfällig eine solche Verbindung ist, hängt vom Entstehungsmechanismus und den dabei wirkenden Einflussfaktoren ab. Als technisches Maß für die Haftung der Komponenten untereinander wird im Allgemeinen die Verbundfestigkeit ermittelt. Wird von einer Gesamtfestigkeit des Verbundsystems ausgegangen, dann wird diese durch die Festigkeit der einzelnen Partner und die in der Grenzfläche wirkenden Bindungskräfte bestimmt. Wie in jedem Verbundsystem ist auch hier die Gesamtfestigkeit durch das schwächste Glied, die Binde-naht oder Grenzfläche, vorgegeben. Hauptprüfverfahren ist der Zugversuch an direkt spritzgegossenen Probekörpern oder an aus größeren Modellplatten oder Bauteilen entnommenen Probekörpern. Die im wesentlichen beteiligten Einflussfaktoren sind in Bild 2.11 schematisch dargestellt.



**Bild 2.11:** Einflussfaktoren beim Verbundspritzgießen

Diese sind demnach:

- Material,
- Prozessparameter (Maschineneinstellparameter),
- Werkzeug und Formteilgeometrie (Grenzflächengeometrie, Wanddicke, Fließweg).



Weiterhin wird die Grenzflächenfestigkeit in Analogie zur Bindahtfestigkeit durch die aus den oben aufgezählten Faktoren resultierenden charakteristischen Merkmale einer Grenzfläche beeinflusst, wie

- die Ausbildung der Grenzflächenkontur (eben, verwölbt oder verzahnt) und die damit verbundene Molekül- und Faserorientierungssituation sowie
- die Tiefe und der Öffnungswinkel der an der Oberfläche der Grenzfläche entstehenden umlaufenden Kerbe (V-Naht).

Außerdem ist die Verbundfestigkeit von den zur quantitativen Bestimmung eingesetzten Prüfverfahren und den dazugehörigen Prüfbedingungen (Klima: Temperatur und Feuchtigkeit, Prüfungsgeschwindigkeit) abhängig.

Da weithin das berechtigte Interesse besteht, den Umfang des Einflusses der einzelnen Faktoren schon vor der Herstellung eines Bauteils zu kennen, werden die Zusammenhänge und gegenseitigen Abhängigkeiten immer wieder intensiv analysiert. Ziel solcher Untersuchungen ist es, eine Vorhersagemöglichkeit für die erreichbare Grenzflächenfestigkeit zu finden. Beispiele für solche Untersuchungen sind folgende:

- Einfluss von Materialeigenschaften (Materialgrundstruktur: amorph und teilkristallin [14, 55], Molekulargewicht [56], Benetzung und Oberflächenspannung [7, 57, 58], Additive und Verstärkungsfasern [59–61]),
- Einfluss von Prozessparametern (Masse- und Werkzeugtemperatur, Einspritzgeschwindigkeit, Verzögerungszeit, Nachdruck [4–8]),
- werkzeug- und konstruktiv bedingter Einfluss (Grenzflächengeometrie, Oberflächenrauheit [5, 7, 8], Wanddicke, Fließweg [8]),
- Einfluss der Kerbe und Kontur einer Grenzfläche [14–16, 22, 62].

Durch die bewusste Ausnutzung des Zusammenwirkens aller Faktoren kann eine je nach Anwendungsfall optimal eingestellte Verbindung hergestellt werden. Allerdings liegen die Schwierigkeiten darin, dieses Zusammenwirken zu klären und eine Vorhersage der Qualität der Verbindung zu ermöglichen. Bisher ist das nicht umfassend gelungen, was weitere Untersuchungen zum komplexen Wirkungskreis der Einzelfaktoren erfordert.

### 2.4.1 Haftungsmechanismen an einer Grenzfläche

Einige Autoren erläutern ausführlich theoretische und auch empirisch ermittelte Voraussetzungen für das Zustandekommen von Haftungsmechanismen bei Kleb- und Schweißverbindungen [63–68]. In einigen anderen Arbeiten werden die für das Mehrkunststoffspritzgießen relevanten Theorien und Mechanismen übersichtlich zusammengestellt [6–8]. Grundlage einiger Arbeiten ist es, die Festigkeit adhäsiver Bindungen zu berechnen und sie ergänzend messtechnisch zu erfassen. Dann wird aber ausgewiesen, dass es keine universell anwendbaren Theorien gibt, die sämtliche ermittelten Erkenntnisse einbeziehen und berücksichtigen würden. In der Literatur besteht einheitlich die Meinung, dass aufgrund der Komplexität des Zusammenwirkens der einzelnen Faktoren und Mechanismen keine allgemeingültige Erklärung für die Vorgänge bei der Entstehung von Kunststoffgrenzflächen gefunden werden kann [1, 8, 68, 69].

Zur Illustration der Ausführungen gibt Tabelle 2.2 eine Kurzzusammenfassung der relevanten

**Tabelle 2.2:** Modelle zur Interpretation der Wechselwirkungen bei Kunststoffverbunden (nach [8, 69], Literatur zu Erklärungen [63, 64, 69–71])

Intramolekular	Intermolekular	
<i>Ausbildung chemischer Bindungen bei der Adhäsion:</i> (Hauptvalenz)	<i>Ausbildung von Nebervalenzbindungen:</i> • van der Waals-Bindung (Dipolwechselwirkung, Dispersionskräfte) • Wasserstoffbrückenbindungen	<i>Interdiffusion:</i> Verschlaufungen in der Grenzfläche
<i>Voraussetzung/ Erklärung:</i> Chemisorption, kovalente u. ionische Bindung	<i>Voraussetzung:</i> • Oberflächen- u. Grenzflächenenergie (Benetzung) • Dipolcharakter der Moleküle	<i>Voraussetzung:</i> • Benetzung • Beweglichkeit der Molekülketten • Diffusion von Molekülsegmenten
	<i>Erklärung:</i> • Polarisierungstheorie (de Bruyne) • Thermodynamische Interpretation (Bischof, Wu)	<i>Erklärung:</i> • Molekülkettenverhalten bei der Grenzflächenentstehung (de Gennes) • Diffusionstheorie (Voyutskij)

Modelle zur Interpretation der Wechselwirkungen bei Kunststoffverbunden an. Es kann davon ausgegangen werden, dass die normalerweise innerhalb der Molekülketten wirkenden Hauptva-

lenzbindungen (kovalente Bindungen, intramolekular) nur dann beim Verbundspritzgießen auftreten können, wenn die Materialpartner dahingehend auch nach außen sensibilisiert, d. h. chemisch aktiviert oder modifiziert werden [72]. Ansonsten liegen in den anderen Fällen lediglich die in der Übersicht genannten intermolekularen Wechselwirkungen (Nebervalenzbindungen oder Interdiffusion) vor.

### Thermodynamische Voraussetzungen für Haftungsmechanismen

Das Zustandekommen einer haftenden Verbindung beruht auf intermolekularen Bindungskräften zwischen den Makromolekülketten der beteiligten Partner. Grundvoraussetzung dafür ist eine ausreichende Annäherung der Molekülketten durch eine gute Benetzung, die wiederum von den oberflächenenergetischen Zuständen der Verbundpartner abhängt. Quantifizierbare Zusammenhänge zwischen Oberflächen- und Grenzflächenspannungsmessungen und Änderungen der spezifischen freien Energie des Festkörpers wurden bereits Mitte des 19. Jahrhunderts gesucht. Daraus ging Mitte des 20. Jahrhunderts die Youngsche Gleichung [1, 69] als erweiterte Grundlage für die Charakterisierung der Benetzung einer festen Oberfläche durch eine Flüssigkeit oder Schmelze hervor:

$$\sigma_{SL} = \sigma_S - \sigma_L \cos \Theta \quad (2.1)$$

mit  $\sigma_L$  Oberflächenspannung der Flüssigkeit oder Schmelze,  $\sigma_S$  Oberflächenspannung der festen Oberfläche,  $\sigma_{SL}$  Grenzflächenspannung und  $\Theta$  Randwinkel. Ergänzend zur Gleichung 2.1 sind in Bild 2.12 vereinfachend zwei Beispiele für Grenzfälle guter und schlechter Benetzung dargestellt.



**Bild 2.12:** Beispiel für schlechte (links) und gute (rechts) Benetzung (nach [58])

Der Randwinkel  $\Theta$  kann an einem auf einer Festkörperoberfläche liegenden Tropfen (Bild 2.12) gemessen werden und gibt einen Hinweis auf den Energiezustand der Oberfläche. Mehrere Berechnungsmöglichkeiten der Oberflächenenergie werden in der Literatur angegeben und auch

kontrovers diskutiert [58]. Keine der Methoden ist wirklich perfekt, was dazu geführt hat, dass ständig Erweiterungen der Youngschen Gleichung vorgenommen werden. Dabei werden dann beispielsweise polare und disperse Oberflächenspannungsanteile stärker gewichtet [64].

Betrachtungen bezüglich des Einflusses der Oberflächenspannung von zu verbindenden Kunststoffkomponenten auf die Haftfestigkeit haben ergeben, dass es von Vorteil ist, wenn die Oberflächenspannungen annähernd gleiche Werte haben [7].

Abschließend sei noch bemerkt, dass in der Praxis eine wesentliche Voraussetzung für eine gute Verbindung gleichartiger oder verschiedener Kunststoffe ist, dass die Werkzeugoberflächen (besonders die Kavität) frei von Fett und Trennmittelresten sind, die unter Umständen dafür sorgen könnten, dass es zu keiner Verbindung kommt.

### **Adhäsionstheorien**

Adhäsion ist die Überlagerung von unterschiedlichen Wirkmechanismen, die zur Ausbildung von verschiedenen Bindungskräften führen. Einigkeit herrscht in der Literatur über die Einteilung der Adhäsion in mechanische und spezifische Adhäsion sowie die Diffusion [63,68,69]. Mechanische Adhäsion beruht auf dem Eindringen einer auf die Oberfläche aufgetragenen Komponente in deren Poren oder Mikrorisse und damit auf einer mechanischen Verklammerung. Die spezifische Adhäsion wird anhand von folgenden Theorien erklärt:

- *Polarisationstheorie* (geht zurück auf de Bruyne [70], der die Adhäsion mit den sich ausbildenden Wechselwirkungen begründet. Quintessenz dieser Theorie ist, dass eine gute Haftung zwischen unpolaren und polaren Komponenten nicht möglich ist.),
- *elektrostatistische Theorie* (Diese Theorie wird in der Literatur kontrovers diskutiert, weshalb ihr lediglich eine gewisse Bedeutung bei Metall-Kunststoff-Verbunden zugeschrieben wird [8].).

Oft taucht in der Literatur bei der Diskussion der Adhäsionsmechanismen auch der Begriff der Autohäsion auf. Der Ausdruck Autohäsion oder Selbst-Adhäsion bezieht sich auf die Fähigkeit von zwei sich berührenden Oberflächen ein und desselben Materials, eine feste Verbindung zu bilden. Voraussetzung ist eine große Makromolekülbeweglichkeit, so dass die Autohäsion meist nur bei kautschukelastischen Polymerschichten des gleichen Materials als relevant angesehen wird [63, 68].

Weiterhin wurde die Diffusionstheorie genannt, die im folgenden Unterabschnitt erläutert wird.

## Diffusionstheorie

Wurde bei den Theorien vorher die Adhäsion unter dem Blickwinkel der zwischen den Molekülen wirkenden Kräfte behandelt<sup>4</sup>, so ist es bei der Betrachtung von Polymer-Polymer-Verbunden notwendig, die mögliche Diffusion von Molekülen aus der einen in die andere Phase zu berücksichtigen. Grundgedanke der Diffusionstheorie, die Voyutskij [63] zusammengefasst hat, ist es, dass Makromoleküle stoffliche Brücken zwischen den in Kontakt stehenden Flächen der Kunststoffpartner ausbilden. Ausgehend davon soll sich demnach in der Grenzschicht ein Gemisch aus Molekülteilen oder ganzen Molekülen beider Polymerer befinden. Hintergrund der Diffusion ist eine Kombination aus

- Mischbarkeit und Verträglichkeit bei unterschiedlichen Polymeren,
- Diffusion von Kettenmolekülen und
- Erreichen eines Gleichgewichtszustandes.

Kunststoffe bringen aufgrund ihres strukturellen Aufbaus in bestimmten Temperaturbereichen die notwendige Beweglichkeit (mikro- und makrobrownsche Beweglichkeit<sup>5</sup>) der Moleküle mit sowie einen gewissen Anteil an sogenanntem freiem Volumen<sup>6</sup>, das eine Umlagerung von Kettensegmenten gestattet. Die Molekülbeweglichkeit bestimmt dabei die Diffusionsgeschwindigkeit, bei der ein Konzentrationsausgleich stattfindet und die anhand des zweiten Fickschen Gesetzes in eindimensionaler Form in x-Richtung folgendermaßen beschrieben wird:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D(t) \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

mit  $c$  der Kettenkonzentration und  $D$  dem Diffusionskoeffizienten.

Haufe [14] hat den Zusammenhang der Struktureigenschaften mit Hilfe der Molekülbeweglichkeit betrachtet und in Bezug auf die Entstehung von Bindenähten ausgewertet. Unterschieden wird dabei zwischen dem Zustand in ruhender und strömender Schmelze. Für ruhende Schmelzen resultiert aus dem Röhrenmodell von Rouse [74], dass alle Bewegungsvorgänge auf einem

<sup>4</sup>Das ist ausreichend bei Haftung an einer Metallfläche. [69]

<sup>5</sup>Mikrobrownsche Bewegung ist die thermische Bewegung von Kettensegmenten und Seitenketten zwischen Einfrier- und Fließtemperatur. Oberhalb der Fließtemperatur bewegt sich bei der makrobrownschen Bewegung das ganze Molekül, und Platzwechselforgänge können stattfinden.

<sup>6</sup>Das freie Volumen sind Leerstellen, die als Fehlstellen in der molekularen Packung auftreten und aufgrund von Kettenenden, Faltungen, Verschlaufungen und seitlichen Versetzungen in der Größe kleiner Atome entstehen. [73]

einachsigen Grundmechanismus beruhen, der aufgrund der angenommenen reptilartigen Schlängelbewegung des Moleküls als Reptation bezeichnet wird. De Gennes [71] erweitert diese Annahme, indem er das Verlassen von Kettensegmenten aus der Röhre als eigentliche Reptationsbewegung angibt, wobei die Zeit, in der ein Maximum des Austretens der Kettensegmente erreicht ist, die sogenannte Reptationszeit ist. Angewandt werden kann das Reptationsmodell auf Makromolekülketten, die sich in einem chemisch ähnlichen Umfeld befinden, daher wird auch von Selbstdiffusion gesprochen. Sind allerdings chemisch unterschiedliche Kunststoffe am Verbund beteiligt, so lässt sich dieses Modell nicht ohne weiteres übertragen.

Beim Spritzgießen muss immer davon ausgegangen werden, dass die Vorgeschichte der Strömungs- und parallel dazu ablaufenden Abkühlvorgänge in Form von Viskositätsänderungen, Molekülorientierungen und Eigenspannungen die Diffusion in ihrem Ablauf begünstigen oder behindern. Eine wesentliche Größe für den Ablauf der Diffusion ist hierbei die Zeitspanne, in der das System aus zwei aufeinandertreffenden Schmelzen (Bindenähte und heiße Grenzflächen) oder aus Festkörper-Schmelze-Paarung (kalte Grenzflächen) unter den Bedingungen verweilt, bei denen ausreichend Molekülbeweglichkeit zum Eindringen und Verschlaufen der Kettensegmente von der einen zur anderen Komponente stattfinden kann. Während sich beim Schmelze-Schmelze-Kontakt beide Partner noch im Temperaturbereich oberhalb der Glas temperatur und somit im Bereich makrobrownscher Beweglichkeit befinden, ist es beim Feststoff-Schmelze-Kontakt notwendig, den Feststoff durch Energiezufuhr in diesen Zustand zu versetzen. Dabei gehen die Meinungen über die Mindestschichtdicke der Aufschmelzzone zwischen nm- und  $\mu\text{m}$ -Größenordnungen auseinander [5, 63].

Schließlich können folgende mikroskopische Einflüsse auf den Interdiffusionsprozess zusammengefasst werden, die wiederum aus den makroskopischen Material-, Prozess- und Geometriebedingungen resultieren [6, 63, 69]:

- Molekülstruktur und Polymerisationsgrad (Begünstigung: hohe Beweglichkeit der Ketten bei niedriger Molekülmasse; Behinderung: Diffusion ganzer Molekülschlaufen bei hoher Molekülmasse und sinkender Diffusionsgeschwindigkeit - Quintessenz: optimale Molekülmasse, bei der sich beide Einflüsse die Waage halten bzw. optimal zusammenwirken),
- Molekülstruktur und Kristallisation (Behinderung: die Ausbildung von räumlichen Strukturen, wie Kristalliten, erschwert die Molekülbeweglichkeit - Quintessenz für kalte Grenzflächen: aufgrund des Anschmelzens einer lediglich amorphen Randzone kann dieser Einfluss vernachlässigt werden),

- Orientierung der Molekülketten (Behinderung: Orientierung parallel zur Grenzfläche, da die makrobrownsche Bewegung durch eine ausgeprägte Verstreckung der Moleküle gehemmt ist; Begünstigung: Orientierung senkrecht zur Grenzfläche, da damit die oberhalb der Erweichungstemperatur beweglicheren Kettenenden ein großes Maß an Diffusionsarbeit leisten und dadurch mit höheren Haftfestigkeiten zu rechnen ist - Quintessenz: strömungsbedingt ist die Orientierung beim Spritzgießen generell parallel zur Grenzfläche, so dass es zwangsläufig zur Behinderung kommt.).

## 2.4.2 Makroskopische Einflüsse

Aus den bisherigen Betrachtungen folgt, dass sowohl Geometrie- und Verarbeitungs- als auch Materialeinflüsse auf den Ablauf von Adhäsion und Interdiffusion wirken. Ergänzend sollen deshalb im Anschluss die technologischen Faktoren und dabei die Prozessparameter Geschwindigkeit, Druck und Temperatur betrachtet werden. Allgemein ausgedrückt, begünstigt beispielsweise der Druck das Benetzungsverhalten und eine höhere Temperatur die Beweglichkeit der Kettensegmente und damit eine Interdiffusion. Einigkeit herrscht in der Literatur darüber, dass den Prozesstemperaturen der größte Einfluss zugeordnet werden kann [5–8, 14, 63, 69]. Unterschieden wird beim Verbundspritzgießen lediglich nach dem Einfluss der Massetemperatur der ersten und der zweiten Komponente. Zweitere sollte dabei höher sein, damit ein Aufschmelzen der Vorseitlingsoberfläche überhaupt erfolgen kann. Nachfolgend werden kurz die bisherigen Untersuchungen zu wesentlichen Prozess- und Geometrieinflüssen aus der Literatur zusammengefasst.

### **Einspritzgeschwindigkeit sowie Einspritz- und Nachdruck**

Unterschiedlich wird die Wirkung der Einspritzgeschwindigkeit diskutiert [5,8]. Zum Teil konnte kein signifikanter Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit auf die Grenzflächenfestigkeit nachgewiesen werden, obwohl eine hohe Einspritzgeschwindigkeit aufgrund der höheren Scherung vermutlich auch eine gewisse Temperaturerhöhung mit sich bringt [5,8]. Untersuchungen von [8] an Hart/Hart-Kombinationen (PA6/PA6GF und PA6/PA66GF) beim Verbundspritzgießen haben ergeben, dass eine niedrige Einspritzgeschwindigkeit eine geringe Verbundfestigkeit zur Folge hat.

Bei Untersuchungen des Einspritzdruckes kommt [5] zu dem Schluss, dass dieser nur bis zu einem gewissen Maß und zwar besonders auf die Annäherung der beiden Verbundpartner und deren Benetzung begünstigend wirkt. Wird der Druck jedoch zu hoch gewählt - gleichermaßen

gilt das für den Nachdruck - kommt es laut [8] zu mehr Verstreckungen der Molekülketten und Eigenspannungen, die wiederum in der Grenzfläche zu negativen Auswirkungen auf den Interdiffusionsprozess führen können. In [8] wurde ebenfalls anhand von Versuchen ohne bzw. mit sehr geringem Nachdruck festgestellt, dass ein Mindestdruck vorhanden sein muss, um überhaupt eine Verbindung durch ausreichende Benetzung zu erzielen.

### **Prozesstemperaturen**

Hierbei sollen die Erfahrungen bei Bindenähten und kalten Grenzflächen getrennt erörtert werden, da es sich bei deren Entstehung um prinzipiell unterschiedliche thermische Gegebenheiten handelt.

#### *Düsentemperatur bzw. Massetemperatur*

Bei Bindenähten wird weiter unterschieden zwischen der heißen Fließnaht und der kalten Bindenaht, wobei der Schmelzetemperatur (in der Praxis üblicherweise die Düsentemperatur) der größte Einfluss auf die Bindenahtfestigkeit zugesprochen wird. Bei vielen Materialien vergrößert sich die Binde- oder Fließnahtfestigkeit mit steigender Schmelzetemperatur [11, 14]. Verallgemeinern lassen sich diese Ergebnisse aber nicht, da die Wirkung der Schmelzetemperatur von Material zu Material und auch je nach Bindenahtart unterschiedlich ist. Demnach wird die kalte Bindenaht je nach Materialtyp als kaum temperaturabhängig angesehen. Bei der Vorhersage der Fließnahtfestigkeit stuft [14] aber das mittlere Massetemperaturprofil als eine geeignete Kenngröße ein. Nachweis für eine geringere Anfälligkeit bei erhöhter Massetemperatur sind auch einige Ergebnisse zur Mikrohärtigkeit im Bereich der Bindenaht, die aus eigenen Untersuchungen stammen [16, 75, 76]. Auffällig ist dabei, dass die Lokalisierung der Bindenaht durch einen Abfall der Mikrohärtigkeit in diesem Bereich vorgenommen werden kann. Bei erhöhter Massetemperatur verringert sich die Differenz der Mikrohärtigkeit zwischen Bindenahtzone und angrenzendem Bereich.

Ähnlich wie bei den Bindenähten wird der Schmelzetemperatur auch bei den Grenzflächen die größte Bedeutung beigemessen. Stark abhängig ist dieser Einfluss von der jeweiligen Materialkombination. Während bei Hart/Hart-Verbindungen eine Erhöhung der Massetemperatur eine Verbesserung der Verbundfestigkeit mit sich bringt [4, 8], ist diese Abhängigkeit nicht in gleicher Form für Hart/Weich-Verbindungen gefunden worden [8, 77]. In [8] wurde die Einwirkung der Massetemperatur unter Berücksichtigung der Fließweglänge analysiert. Das Ergebnis ist, dass bei Hart/Hart-Verbindungen der Massetemperaturinfluss mit der Entfernung vom Anschnitt abnimmt. Über den hier angegebenen Einfluss der Schmelzetemperatur wird das Modell der Interdiffusion, die ein Mindesttemperaturniveau erfordert, bestätigt. Andere Autoren finden



ähnliche Abhängigkeiten anhand von Untersuchungen mit unterschiedlichen Materialkombinationen [5, 7, 63]. Fazit der Untersuchungen ist meist, dass der Einfluss der Massetemperatur der zweiten Komponente überwiegt, da diese das Energieniveau vorgibt, bei dem die Verbundfläche der ersten Komponente angeschmolzen werden muss.

#### *Werkzeugtemperatur*

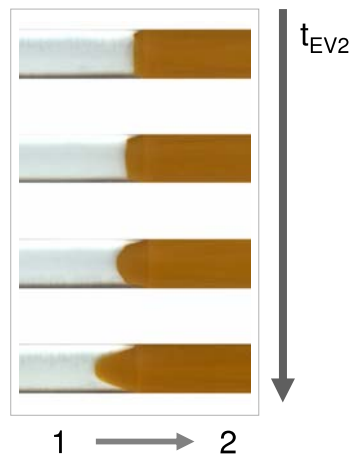
Weiterhin gehört zu den Prozesstemperaturen die Temperatur der Werkzeugoberfläche, die im wesentlichen durch eine kontinuierliche Ab- oder Zufuhr der Wärme mittels Temperiermedium gewährleistet wird. Ziel ist ein ausgewogenes Temperaturniveau über die Formhohlraumoberfläche für gleichmäßige Abkühlbedingungen. Somit entscheidet die Werkzeugoberflächentemperatur zusammen mit der Massetemperatur über die Abkühlgeschwindigkeit.

Bei kalten Werkzeugen werden die Verbundpartner schnell die für die Verbindung (Interdiffusion) notwendige Wärme verlieren. Das kann dann von Vorteil sein, wenn keine Haftung gewünscht ist, z. B. bei Gelenkverbindungen [5, 78]. Besondere Bedeutung gewinnt diese Möglichkeit, eine thermische Nichteftung zu erzeugen, wenn ein und dasselbe Material zur Anwendung kommen soll. Vorteile sind die unkomplizierte Recyclingfähigkeit ohne aufwendige Trennung der Komponenten.

Andererseits kann eine hohe Werkzeugtemperatur bei Bindenähten zur Verbesserung der Festigkeit durch die Verkleinerung oder sogar Eliminierung der maßgeblich am Versagen beteiligten Oberflächenkerbe führen. Es existieren bereits technische Lösungen, die sich bei Kenntnis der Bindenahtlage einer punktuellen Erwärmung der Werkzeugoberfläche an dieser Stelle bedienen [79].

#### **Einspritzverzögerung und Verzögerungszeit**

Im Fall der Bindenaht können unterschiedlich lange Fließwege der Schmelzeströme zu Differenzen in Druck- und Temperaturprofilen führen. Gezielt wurde diese Situation anhand eines Zugstabes nachgestellt, bei dem die Bindenaht frontal über zwei gegenüberliegende Anschnitte gebildet wird. Zur Sichtbarmachung der resultierenden Geometrien wurden zwei verschieden eingefärbte Schmelzeströme von zwei Plastifiziereinheiten (Zwei-K-Spritzgießmaschine) in die Kavität gespritzt [16, 22]. Es konnte so die gezielte Variation der Einspritzverzögerung beider Schmelzeströme vorgenommen werden. Die Folge ist eine Deformation der Bindenahtgeometrie oder / und eine Verschiebung der Lage der Bindenaht (Bild 2.13). Mit der Pfeilrichtung im Bild 2.13 wird angezeigt, dass die transparente Schmelze etwas früher eingespritzt wurde als die eingefärbte, so dass mit deren größerer Einspritzverzögerung ( $t_{EV2}$ ) und dem steigendem Druckunterschied



**Bild 2.13:** Bindahtkonturen mit zunehmender Einspritzverzögerung der eingefärbten Schmelze (Nr. 2) [16]

die Verwölbung zunimmt. Ursache dafür ist möglicherweise der frühere Übergang der ersten Schmelze vom hohen Einspritz- auf den niedrigeren Nachdruck. Ähnliche Geometrien treten auch bei Fließnähten in Abhängigkeit von der Angussentfernung auf und lassen ebenfalls auf Veränderungen im Druck- und Temperaturgefüge der Schmelzefrontverbindung schließen [12]. Bei stagnierenden Bindahten ist eine gezielte Konturerzeugung dann von Vorteil, wenn, wie bereits erwähnt, Materialien sensibel auf Orientierungseinflüsse reagieren und sich dadurch die Bindahtfestigkeit verbessern lässt.

Beim Verbundspritzgießen und somit bei kalten Grenzflächen drückt die Verzögerungszeit<sup>7</sup> indirekt aus, wie stark der Vorspritzling abgekühlt ist, wenn die zweite Komponente mit diesem in Kontakt tritt. So konnte [8] feststellen, dass besonders Hart/Hart-Verbindungen durch die Verzögerungszeit beeinflusst werden. Die Zunahme der Verbundfestigkeit korreliert hier mit der Abnahme der Verzögerungszeit und der damit verbundenen geringeren Abkühlung des Vorspritzlings. Dagegen kann bei Hart/Weich-Verbindungen kein eindeutiger Einfluss erkannt werden. Wird ein vollständig abgekühltes Einlegeteil (sehr lange Verzögerungszeit) verwendet, so sinkt erwartungsgemäß bei beiden Materialkombinationen die Verbundfestigkeit gegenüber kürzeren Verzögerungszeiten ab [8]. In [4] sind für Hart/Hart-Kombinationen mit zunehmender Verzögerungszeit sowohl Erhöhungen als auch Verringerungen der Verbundfestigkeit ermittelt worden.

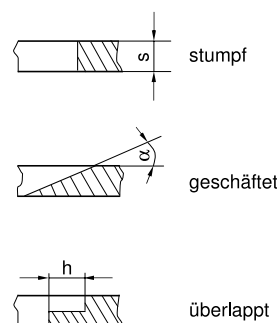
Bisher ist die Verzögerungszeit häufig nicht klar definiert worden, die genannten Untersuchungen zeigen aber, dass mittels dieser Prozessgröße gezielt Einfluss genommen werden kann. Im expe-

<sup>7</sup>Die Verzögerungszeit schließt hier vereinfachend die gesamte Pause zwischen dem Einspritzen der ersten und der zweiten Komponente ein. (Def. s. Kap. 3.4.1)

rimentellen Teil der Arbeit soll deshalb neben den Prozesstemperaturen die Verzögerungszeit genauer definiert und zur Variation des Temperaturprofils im Vorspritzling beitragen.

## Grenzflächengeometrie

Wie bereits oben angesprochen, wurde ein Einfluss der Grenzflächengeometrie auf die Verbundfestigkeit bereits bei Bindenähten in Formteilen aus faserverstärkten Thermoplasten nachgewiesen [22, 62]. Ähnliche Untersuchungen zu Korrelationen hinsichtlich der Erhöhung der Oberflächenrauheit der ersten Komponente und definierter Grenzflächengeometrien wurden u. a. von Jaroschek [5], Brinkmann [7] und Kuhmann [8] durchgeführt. Ziel dieser Veränderungen ist eine Vergrößerung der Kontaktfläche, die meist aus konstruktiver Sicht gleichzeitig mit einer Verbesserung der Verbundfestigkeit eine Erhöhung der Belastbarkeit bringen soll. Beispiele für solche Geometrien sind in Bild 2.14 dargestellt. Ausführlich betrachtet Kuhmann [8] vergleichend für



**Bild 2.14:** definierte Kontaktgeometrien

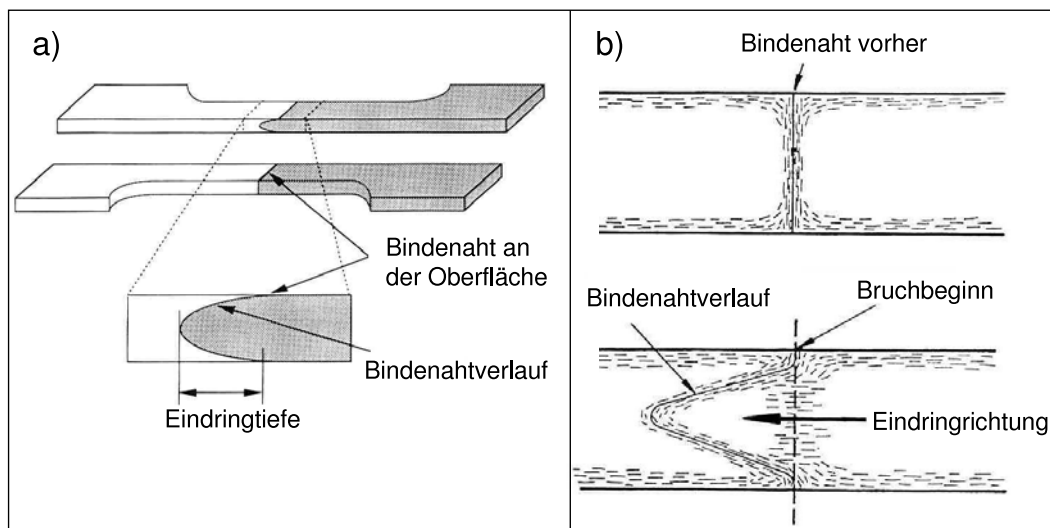
die abgebildeten Geometrievarianten zunächst gemessene Festigkeiten und führt ergänzend eine Berechnung der maximalen Mises-Vergleichsspannungen durch.

Je nach Materialkombination, ob Hart/Hart- oder Hart/Weich-Verbindungen, kommen die Autoren zu unterschiedlichen Aussagen. Zum einen wird eine herkömmliche stumpfe Anbindung favorisiert, da es im Belastungsfall zu keinen Spannungsüberhöhungen kommt. Insbesondere ist zum anderen aber erkennbar, dass bei den Hart/Weich-Verbindungen die Maximalspannungen bei Abweichung von der stumpfen Geometrie deutlich zunehmen.

### 2.4.3 Verarbeitungsinduzierte Grenzflächenerscheinungen

#### Grenzflächenkontur

Die Einflüsse der Kontur wurden bereits in den Abschnitten 2.2.3 und 2.3.3 diskutiert. Ergänzend soll hier nun die Wirkung der Kontur auf die Verbundfestigkeit betrachtet werden. Im Bild 2.15 ist schematisch dargestellt, wie sich beispielsweise die Faserorientierung aufgrund einer zungenartigen Kontur verändert. Anhand dessen ist erkennbar, dass sich mit der zungenartigen Kontur im ehemaligen Bindenahtbereich die Fasern weitgehend in Strömungsrichtung orientieren und somit bei einer Belastung senkrecht zur Bindenaht zu einer wesentlichen Vergrößerung der Festigkeit führen können [19, 21]. Trotzdem sich bei unverstärkten Thermoplasten die Moleküle in gleicher

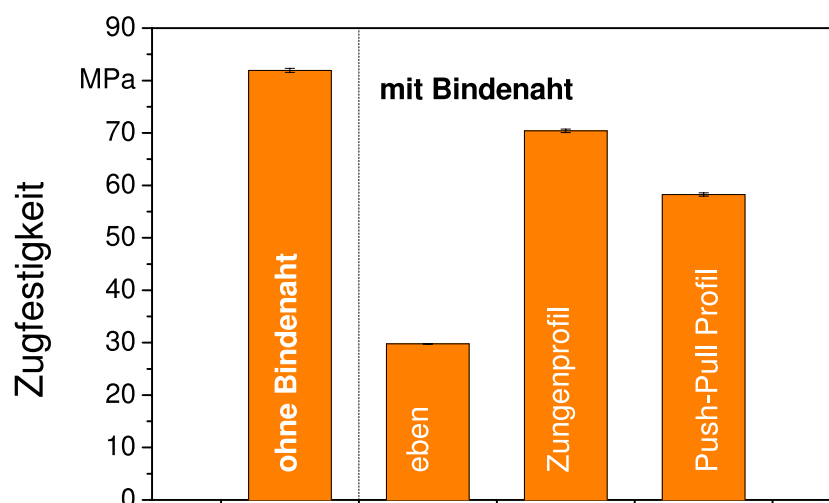


**Bild 2.15:** Veränderung der Faserorientierung im Bindenahtbereich: a) Beispieldarstellung der Lage der Bindenaht in einem doppelseitig angespritzten Zugstab; b) oben: ebene Bindenaht, b) unten: resultierender Bindenahtverlauf (nach [21, 61])

Weise ausrichten, sind bei diesen aus der Literatur keine wesentlichen Steigerungen der Festigkeit bekannt.

Häufig sind die Konturen bei Bindenähten nicht sichtbar. Eine gezielte Beeinflussung ist im Standardspritzgießvorgang nur über die Kaskadentechnik möglich. Das ist im wesentlichen der Grund dafür, warum der Kontur in den meisten Untersuchungen wenig Beachtung geschenkt wird. Generell kann aber davon ausgegangen werden, dass sie Einfluss auf die Bindenahtfestigkeit haben kann.

Abschließend zu diesem Thema sind in Bild 2.16 eigene Messergebnisse der Zugfestigkeit an Probestäben aus kurzglasfaserverstärktem Polypropylen dargestellt. Hierbei wird die Wirkung der umorientierten Fasern anhand einer Verbesserung der Bindahtfestigkeit deutlich erkennbar. Verglichen wird mit der Ausgangsfestigkeit ohne Bindaht. Im weiteren Verlauf des Diagramms (nach rechts) sind Bindahtfestigkeiten bei unterschiedlichen Konturen angegeben. Die Festigkeit einer ebenen stagnierenden Bindaht ist gegenüber der Ausgangsfestigkeit um mehr als 50 % niedriger. Wurde im Prozess nur eine Seite bzw. ein Schmelzestrom mit höherem Nachdruck beaufschlagt (ein Gegentakt), entsteht ein Zungenprofil (s. auch Bild 2.15). Die Zugfestigkeit nimmt dadurch fast bis auf das Niveau der Ausgangsfestigkeit zu. Erfolgt ein weiterer Gegentakt von der anderen Seite, kommt es zum Gegenstrom und die Fasern werden nochmals umorientiert. Im Ergebnis entsteht eine etwas niedrigere Festigkeit verglichen mit dem Zungenprofil, die aber wiederum höher als bei ebener Bindaht ist. [22]



**Bild 2.16:** Ausgangszugfestigkeit ohne Bindaht und Bindahtfestigkeiten in Abhängigkeit von der Bindahtkontur (Beispiel: PP mit 30 % Glasfasern) [22]

### Oberflächenkerbe

Weiterhin findet im Zusammenhang mit der Kontur auch die an der Oberfläche einer Bindaht oder Grenzfläche entstehende umlaufende V-Kerbe Erwähnung [14, 80]. Jegliche Art von Kerben stellen Spannungskonzentratoren dar und können je nach Anfälligkeit des Materials zu vorzeitigem Versagen führen. Untersuchungen sind bisher überwiegend in Bezug auf den Festigkeitseinfluss bei kalten Bindahten durchgeführt worden [19, 81]. Ursachen für die Entstehung

der Oberflächenkerbe werden kontrovers diskutiert und sind bisher nicht vollständig geklärt. Zum einen wird die Luft genannt, die zwischen den aufeinandertreffenden Fließfronten nach außen an die Oberfläche gedrängt wird und dann nicht mehr komplett entweichen kann. Andererseits werden die Verarbeitungsbedingungen und die Viskosität an der Schmelzefront angeführt. Wobei hier die Vorstellung ist, dass sich die praktisch sofort erstarrende Schmelze nicht mehr glatt an die Werkzeugwand anlegen kann, wenn die Schmelzefront stoppt. Dementgegen stehen Untersuchungen, die an den Kerbflanken Abdrücke der Formnestwand nachgewiesen haben. Daraus lässt sich schließen, dass eine Berührung mit der Werkzeugwand stattgefunden haben muss, allerdings im Verlauf der Abkühlung die Kerbe eingesunken ist. Begründung ist dabei die besondere Eigenspannungssituation im Bindenahtbereich. Wie schon erwähnt, können spezielle thermische Verfahren dafür sorgen, dass die Kerbe vollständig verschwindet, was die Vermutung des vorherigen Kontakts mit der Werkzeugwand stützt [82].

Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften erweist sich die Kerbe meist als rissauslösend und kann auch bei duktilen Materialien ein sprödes Versagen herbeiführen. Einige, u. a. auch eigene Arbeiten weisen darauf hin, dass bei Entfernung der Kerbe durch Fräsen die Festigkeit wieder zunimmt [14, 15, 81].

Insgesamt haben die Kerben einen starken Einfluss auf die Festigkeit von Bindenähten, was darauf schließen lässt, dass auch bei anderen Grenzflächensituationen, wie beim Verbundspritzgießen, beim Auftreten von Kerben mit deren festigkeitsminderndem Einfluss zu rechnen ist. Bisher wurden dazu lediglich qualitative Aussagen getroffen, die sich an die Ursachen für die Kerbbildung bei den Bindenähten anschließen [5].

# Kapitel 3

## Versuchsaufbau und Experimente

Aus dem Stand der Technik in Kapitel 2 ist ersichtlich, dass der Haupteinfluss auf die Verbundfestigkeit den Prozesstemperaturen (Masse- und Werkzeugtemperatur) zugeordnet werden kann. Es ergibt sich ein Temperaturprofil im Vorspritzling zu dem Zeitpunkt, an dem die Grenzfläche gebildet wird. In breitem Maße lässt sich dieser Zeitpunkt mit Hilfe der Kernzugtechnik variieren. Insbesondere bei Entfallen eines Öffnungsvorganges zum Formteiltransport ist eine minimale Zwischenkühlzeit einstellbar, die in den Untersuchungen hin zu längeren Zwischenkühlzeiten variiert werden soll. Es werden in diesem Kapitel beginnend mit den verwendeten Materialien die Versuchsausstattung und Probengeometrie sowie die Prozessführung und Prüfverfahren vorgestellt.

### 3.1 Untersuchte Werkstoffe

Um von der Haftungskompatibilität der kombinierten Materialien ausgehen und somit dahingehende Einflüsse ausschließen zu können, wird die Verbindung innerhalb desselben Typs hergestellt. Die folgenden Experimente werden jeweils mit einem Vertreter der teilkristallinen (PP) und amorphen (SAN) Thermoplaste durchgeführt:

- PP: Polypropylen, Novolen 1100 L (PP-H) von der Firma Targor, Mainz
- SAN: Styrol-Acrylnitril-Copolymeres, Luran 378 P von der Firma BASF AG, Ludwigshafen.

Um die späteren Kontaktflächen besser beurteilen zu können und die Konturen sichtbar zu machen, wurde jeweils eine Komponente mittels Masterbatch eingefärbt. Die Überlegung bei der Auswahl der Materialien ist außerdem folgende: Bekanntermaßen sind die Einflüsse der Formänderungsvorgänge beim Durchlaufen der Zustandsänderungen bei amorphen und teilkristallinen Thermoplasten molekular bedingt unterschiedlich stark ausgeprägt. Aus praktischen Anwendungen ist bekannt, dass die Schwindung auch einen Einfluss auf die Grenzflächenfestigkeit haben kann [83].

Weiter weist jeder dieser Kunststofftypen eine unterschiedliche Anfälligkeit gegen Störstellen (Bindenähte) auf. Es ist also zu erwarten, dass es auch entsprechend variierende Verbundfestigkeiten gibt.

### **PP - Polypropylen**

Neben dem weltweit am meisten verbrauchten Polyolefin, dem Polyethylen, wird auch Polypropylen insbesondere im Verpackungs-, Automobil- und Konsumbereich eingesetzt. Das Polypropylen ist ein teilkristallines Polyolefin, das durch stereospezifische Polymerisation mit Ziegler-Natta-Katalysatoren gewonnen wird. Die dieses Olefin kennzeichnende  $\text{CH}_3$ -Gruppe im Makromolekül kann bei der Polymerisation räumlich verschieden angeordnet sein, was wiederum zu unterschiedlichen Eigenschaften führt. Folgende Anordnungen sind möglich:

- isotaktisches Polypropylen - alle  $\text{CH}_3$ -Gruppen befinden sich auf derselben Seite der Kohlenstoffkette
- syndiotaktisches Polypropylen - alternierende Anordnung der  $\text{CH}_3$ -Gruppen
- ataktisches Polypropylen - Anordnung folgt keiner Regel

Technisch bedeutend und auch für diese Untersuchungen eingesetzt ist das teilkristalline, isotaktische Polypropylen. Je höher der isotaktische Anteil, desto größer ist der Schmelzbereich und desto höher sind Kristallisationsgrad, Zugfestigkeit, Steifigkeit und Härte. Der morphologische Aufbau von Polypropylen ist sehr komplex, wobei mehrere Arten von Sphäroliten beobachtet wurden [84].

Die Anfälligkeit gegenüber Bindenähten ist nicht so stark wie bei SAN.



## **SAN - Styrol-Acrylnitril-Copolymere**

Styrolcopolymere sind thermoplastisch verarbeitbare Werkstoffe, die neben Styrol (S) noch mindestens ein weiteres Monomer in der Polymerkette enthalten. Wichtigster Vertreter und Grundbaustein der gesamten Materialpalette sind Styrol-Acrylnitril-Copolymere (SAN). Dieser Werkstoff ist amorph, d. h. die Polymerketten liegen in ungeordneten Knäueln vor und bilden keine kristallinen Bereiche aus. Bei Schlagbeanspruchung verhalten sie sich spröde und zeigen Splitterbruch. Im wesentlichen bestimmen das Molekulargewicht und der Acrylnitrilanteil die Eigenschaften des jeweiligen SAN-Typs. Das relativ polare Acrylnitril bringt als Comonomeres die Verbesserung der Chemikalien- und der Spannungsrissbeständigkeit gegenüber dem Standard-Polystyrol ein [84].

Für die Untersuchungen ist insbesondere die Transparenz und Einfärbbarkeit von Bedeutung, weil dadurch eine eventuelle Deformation der Grenzfläche optisch erkennbar wird. Bindenähte sind bei spröde-amorphen Thermoplasten unter dem Einfluss der Oberflächenkerbe eine besondere Schwachstelle. Als Beispiel für diese Thermoplaste wird deshalb SAN zum Vergleich für die Untersuchungen der Verbundfestigkeit herangezogen.

## **3.2 Experimentelle Ausrüstung**

### **3.2.1 Probekörperwerkzeug**

Zu Beginn der Untersuchungen ergab sich die Notwendigkeit, ein komplexes Zwei-Komponenten-Spritzgießwerkzeug zu bauen (Bild 3.1). Im folgenden sollen die Funktionsweise und Anwendungsmöglichkeiten des eigens für diese Untersuchungen entwickelten Probekörperwerkzeuges vorgestellt werden.

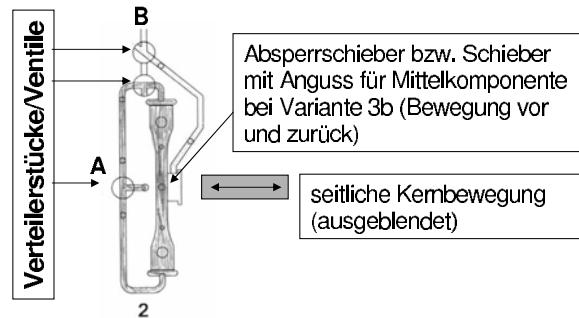
Für die Charakterisierung der Grenzflächen- oder Verbundfestigkeit werden im allgemeinen zwei- oder mehrteilige Zugstäbe durch Verbundspritzgießen [5, 7, 46] hergestellt (Bild 3.1, unten). Das vorliegende Werkzeug arbeitet bei dieser Variante mit der Kernzugtechnik (Core-Back-Technik [5]). Wie schon im Kapitel Grundlagen erwähnt, füllt der erste Teil der Schmelze (A) zunächst nur eine Hälfte der Kavität bis zum Kern aus. Eine Besonderheit des Werkzeuges besteht nun darin, dass gleichzeitig mit dem Zurückziehen des Kerns durch einen Hydraulikzylinder ein zweiter Schieber über eine mechanische Kurvenführung gegen die Düsenseite bewegt wird. Somit wird die Kavität beim Einspritzen der zweiten Komponente (B) zur Seite hin geschlossen gehalten. Das kompliziert aufgebaute Schiebersystem lässt je nach Absperrung im Angusskanal die Herstellung



**Bild 3.1:** Zwei-K-Probekörperwerkzeug (Schließseite) mit Formfüllvarianten

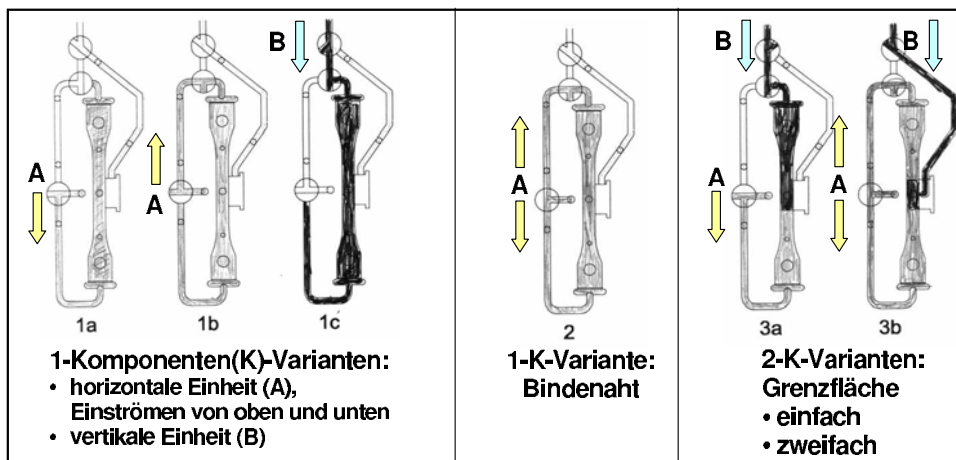
der drei wesentlichen Probekörpertypen (Ein-K-Referenz, Bindenaht, Zwei-K-Verbindung) für Vergleichsuntersuchungen zu.

Durch die Variation der Schiebereinsätze und die Umstellung der Verteilerstücke (Ventile) (Bild 3.2) besteht zunächst die Möglichkeit, als Referenz im Ein-Komponenten-Standardspritzgießverfahren Vielzweckprobekörper (angelehnt an DIN EN ISO 3167) herzustellen (Bild 3.3, links, Nr. 1a-1c). Es können weiter im Standardspritzgießverfahren Probekörper mit zwei gegenüberliegenden Anschnitten entstehen, die eine Bindenaht aufweisen (s. Bild 3.3, Mitte, Nr. 2). Solch eine Bindenaht ist hinsichtlich ihrer Kontur unbeeinflussbar. Wohingegen Variante 3a (rechts im Bild) ohne Kernabspernung und mittels der aus zwei Plastifiziereinheiten kommenden Schmelzeströme eine gezielte Beeinflussung zulässt (vgl. Kap. 2, Gegentaktverfahren und Bindenahtkonturen). Andererseits wird unter Einsatz der Kern- und Schiebertechnik die Herstellung der Varianten 3a und 3b als Zwei-Komponenten-Zugstab realisiert.



**Bild 3.2:** Prinzip der Schmelzeverteilung und Kernzug

Am Rande der Betrachtungen des vorliegenden Werkzeuges sollte nicht unerwähnt bleiben, dass aufgrund der stetigen Weiterentwicklung auf diesem Gebiet in den vergangenen Jahren immer neue Werkzeuge für Mehrkunststoffprobekörper entwickelt wurden. Aus diesen Untersuchungen ist abzuleiten, dass sich Variante 3b (Bild 3.3, ganz rechts) zur praxisrelevanten Beschreibung nur

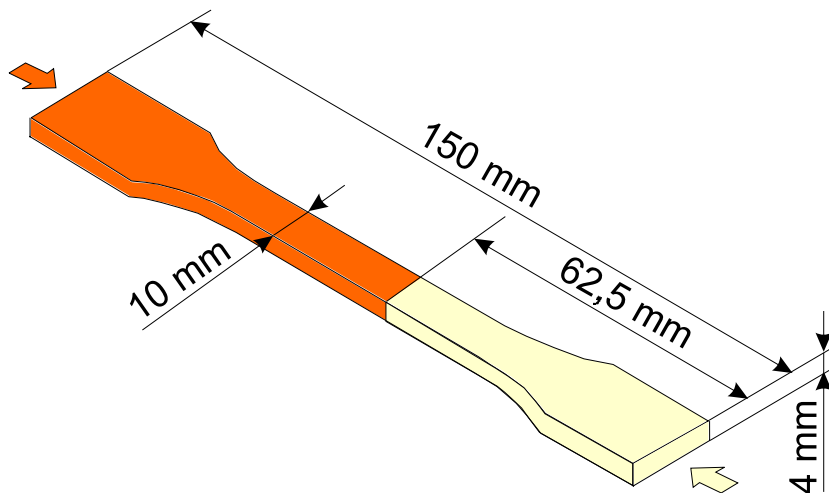


**Bild 3.3:** Probekörpervarianten (mit A - erste Komponente bzw. horizontale Plastifiziereinheit; B - zweite Komponente bzw. vertikale Plastifiziereinheit)

bedingt eignet, da das Einspritzen der zweiten Komponente zwischen zwei getrennte Teile der ersten Komponente zur Bildung von zwei Grenzflächen führt. Der Nachteil besteht im Wesentlichen in der Unsicherheit, ob beide Grenzflächen in ihren Eigenschaften gleich ausgeprägt sein können und es bei den Prüfungen zu eindeutigen Ergebnissen kommen kann. Ein Schälprüfkörper ist für diesen Anwendungsfall wesentlich besser geeignet [44].

### 3.2.2 Probekörpergeometrie

Da es für die Untersuchung einer Zwei-Komponenten-Grenzfläche noch keine Normen gibt, wird der CAMPUS-Stab (DIN EN ISO 3167) zugrunde gelegt. In Bild 3.4 ist die Probekörpergeometrie mit Abmessungen dargestellt. Beide Kavitäten werden über einen Filmanschnitt gefüllt. Als



**Bild 3.4:** Form und Abmaße des Probekörpers

Formteil entsteht ein Probekörper mit einer Grenzfläche (Bild 3.3, rechts, Nr. 3a), deren Kontur stumpf und eben ist. Die erste Komponente (A), im weiteren auch Vorformling genannt, wird immer mittels der horizontalen Einheit von unten in die Kavität eingespritzt.

Nach Herstellung der Probekörper werden diese im Normklima gelagert und anschließend u. a. der Zugprüfung unterzogen. Der abgebildete Probekörper dient ebenfalls zur Gewinnung von Kleinproben für strukturelle Untersuchungen, die bei den Prüfverfahren (s. Kap. 3.5) beschrieben werden.

### 3.2.3 Maschine

Für die Herstellung der genannten Vielzweckprobekörper und der Probekörper mit stagnierender Bindenaht wurde eine Standardspritzgießmaschine der Firma Arburg (Typ Allrounder 270 V) verwendet. Bei der Herstellung der Probekörper mit Grenzfläche und auch der Probekörper mit verschiedenen Grenzflächenkonturen kamen Zwei-Komponenten-Spritzgießmaschinen der Firmen Arburg (Typ Allrounder 320 S) und Engel (Typ ES 200H/80V/50HL2F, Typ ES 650H/200V/

100HL2F) zum Einsatz. Diese Maschinen besitzen jeweils eine horizontal und eine vertikal angeordnete Plastifiziereinheit. Beide Plastifiziereinheiten arbeiten mit einem hydraulischen Antriebskonzept. Beispielfhaft seien einige Maschinendaten der Zwei-Komponenten-Spritzgießmaschine der Fa. Arburg (Typ Allrounder 320 S) in Tabelle 3.1 dargestellt.

**Tabelle 3.1:** Technische Daten Arburg Allrounder 320 S

Bezeichnung	Einheit	Wert
Schließkraft	kN	500
Schneckendurchmesser 1	mm	25
Schneckendurchmesser 2	mm	18
Spritzdruck	bar	2500
Dosiervolumen 1	cm <sup>3</sup>	54
Dosiervolumen 2	cm <sup>3</sup>	20
Steuerung	-	SELOGICA
Baujahr	-	1998

### 3.2.4 Dokumentation der Prozessparameter

Im Werkzeug befinden sich zwei Drucksensoren, so dass jede Komponente innendruckgesteuert von Einspritz- auf Nachdruck umgeschaltet werden kann. Weiterhin ist die Konstanz des Innendruckverlaufs von einem zum nächsten Zyklus ein Indiz für eine stabile Formteilqualität. Die Drucksensoren ermöglichen somit die Überwachung des Prozesses anhand der Werkzeuginnendruckkurve, die entweder am Steuermonitor der Maschine verfolgt oder über ein externes System (DATAFLOW, Fa. Kistler) aufgezeichnet werden kann.

Es wurden folgende Prozessparameter messtechnisch erfasst:

- direkt: Werkzeuginnendruck (je ein Drucksensor pro Komponente bzw. Kavität),
- indirekt: Werkzeugtemperatur (Rücklauftemperatur am Temperiergerät),
- an der Maschine: Hydraulikdruck, Schneckenweg, Zykluszeiten.

Bei allen folgenden Versuchen wurde werkzeuginnendruckabhängig vom Einspritz- auf Nachdruck umgeschaltet. Die Maschinenangaben zum Nachdruck ermöglichen in Form des Hydraulikdrucks eine Abschätzung, wohingegen der Werkzeuginnendruck als Messgröße einen direkten Bezug zu den tatsächlichen Druckverhältnissen im Werkzeug liefert.

Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle der Verzicht auf eine im Werkzeug mögliche Temperaturmessung begründet werden. Solche Messungen ergaben bisher keine hinreichend genaue Grenzflächentemperatur. Für diesen Zweck müsste der Fühler direkt in die Kavität ragen und wäre somit den Strömungseinflüssen ausgesetzt bzw. würde seinerseits die Strömung stören. Andererseits erfolgt häufig eine Umrechnung mittels Wärmeübergangsgleichungen anhand von gemessenen Werkzeugwandtemperaturen. Im Rahmen dieser Arbeit wird später aufbauend auf den experimentellen Erkenntnissen und der damit verbundenen Einflussanalyse ein Modell zur theoretischen Beschreibung der Temperaturverläufe beim Mehrkunststoffspritzgießen aufgestellt. Messungen an verschiedenen Positionen im Werkzeug sind nur punktuell aussagefähig und geben keine Auskunft über Temperaturverteilungen innerhalb des Formteils.

### **3.3 Standardspritzgießen - Bindenaht**

Zur Bewertung der im Mehrkunststoffspritzgießen erreichten Verbundfestigkeit wurden zunächst vergleichsweise mit Hilfe des bereits vorgestellten modularen Spritzgießwerkzeuges Zugstäbe ohne jegliche Störstelle zur Ermittlung der Ausgangsfestigkeit hergestellt. Es entstanden außerdem Vergleichsprobekörper mit Bindenaht. In beiden Fällen wurden die Verarbeitungsparameter in der gleichen Grundeinstellung (im Bereich der Herstellerangaben) verwendet und die Variationen insbesondere bezüglich der Prozesstemperaturen (Masse- und Werkzeugtemperatur) wie bei den Zugstäben ohne Störstelle vorgenommen. Die genauen Angaben befinden sich im später folgenden Abschnitt 3.4.2. Der übrige Ablauf des Prozesses ist bereits im Abschnitt 2.2 vorgestellt worden, ebenso wie die Entstehung der Bindenähte im Allgemeinen. Im vorliegenden Fall werden Probekörper mit stagnierenden Bindenähten zum Vergleich herangezogen (Bild 3.3, Mitte, Nr. 2).

### **3.4 Mehrkunststoffspritzgießen - Grenzfläche**

Wie in Kapitel 2.4 schon ausführlich erläutert, wird die Grenzflächenfestigkeit von vielen Einflussfaktoren und deren Zusammenwirken in sehr komplexer Weise bestimmt. Um die Anzahl dieser Einflussfaktoren bei den folgenden Experimenten zu begrenzen, wurden einige Werte zunächst praxisorientiert optimiert und später konstant gehalten. Variiert wurden die Masse- und Werkzeugtemperatur und damit die Abkühlrate sowie bedingt dadurch die Nachdruckeinstellungen. Außerdem wird die Verzögerungszeit bis zum Auftreffen der zweiten Komponente verän-

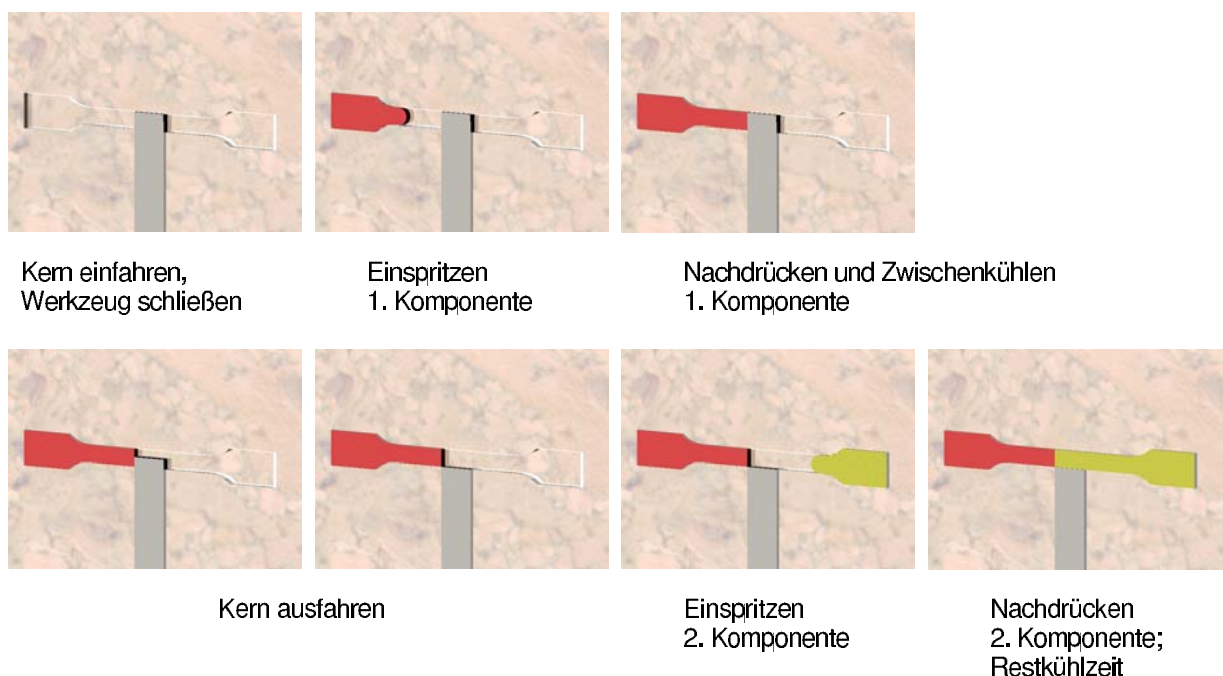
dert. Indirekt erfolgt damit die Variation der Temperatur des Vorspritzlings zum Zeitpunkt des Auftreffens der zweiten Komponente. Diese Verzögerungszeit wird in der Literatur [4, 5, 7, 8] unterschiedlich definiert und soll deshalb im folgenden Abschnitt für diese Arbeit präzise aufgliedert werden.

### 3.4.1 Prozessablauf

Es ergeben sich die folgenden drei Zielrichtungen für die Experimente:

- Eingrenzen des optimalen Zeitpunktes für das Zusammentreffen der beiden Komponenten, um sehr gute, schlechte oder sogar keine Haftung zu erzielen,
- Untersuchen des Einflusses der Prozesstemperaturen und
- Bestimmen des Einflusses des Formänderungsverhaltens.

Zu Beginn wird der schematische Prozessablauf des Kernzugverfahrens in Bild 3.5 am Beispiel des verwendeten Probekörpers (Bild 3.4) vorgestellt. Zusätzlich zur detaillierten Darstellung



**Bild 3.5:** Prozessablauf Kernzugverfahren (schematisch)

seien hier ein paar ergänzende Bemerkungen gemacht. Da sich im Wesentlichen beim Mehrkunststoffspritzgießen mindestens zwei Zyklen des Standardspritzgießens mit

1. Werkzeug schließen, evtl. Kern einfahren,
2. Einspritzen,
3. Nachdrücken,
4. Kühlphase und
5. Werkzeug öffnen, evtl. Kern ausfahren und Formteil auswerfen

aneinanderreihen, ist das Augenmerk ausschließlich auf die sog. Zwischenkühlphase zu legen. Durch die Zwischenkühlzeit wird ein Großteil der Qualität einer solchen Kunststoff-Kunststoff-Verbindung bestimmt. Aus verschiedenen Gesprächen mit der anwendenden Industrie und aus der Literatur [8, 85] ist bekannt, dass der im Bild 3.5 dargestellte Ablauf üblich ist. Der Kern bleibt für einen kontinuierlichen Wärmeabtransport (Werkzeugkühlung) solange in Kontakt mit dem Vorspritzling, bis die Zwischenkühlzeit für diesen absolviert und somit die Ausbildung einer definiert ebenen Grenzfläche gewährleistet ist. Aufgeschlüsselt wird diese Zwischenkühlphase prozessbedingt in die folgenden, zwingend erforderlichen Schritte:

- Zwischenkühlzeit (an verschiedenen Maschinen als Zeitkomponente, auch Restkühlzeit 1 genannt, wählbar),
- Schließkraftabbau, wenn erforderlich,
- Kern ziehen,
- Schließkraftaufbau, wenn erforderlich,
- Einspritzverzögerung Spritzaggregat 2.

Je nach Spritzgießmaschinen- und Werkzeugtyp können die Zeiten für Bewegungen unterschiedlich lang ausfallen. Vom Werkzeugtyp und der Kernzugrichtung hängt es ab, ob ein Schließkraftabbau- und -aufbau erforderlich ist. Unerlässlich ist es, wenn der Kernzug seitlich gezogen wird, da es sonst zur Gefährdung des Werkzeuges und dessen Funktionsfähigkeit kommen kann (Verschleiß am Kern und den anliegenden Platten und Einsätzen). Bewegt sich der Kern aber in Auswerferichtung nach hinten, ist die Schließkraftreduzierung nicht notwendig. Im vorliegenden Fall mit



seitlichem Kernzug konnte eine Bewegungszeit von 1,5 s erreicht werden. In einer Modellversuchsreihe wurde auf die Schließkraftreduzierung ganz verzichtet, so dass nur etwa 0,3 s zwischen dem Ende der Nachdruckzeit für die erste Komponente und dem Beginn des Einspritzens der zweiten Komponente lag. Die Bedeutung für die Untersuchungen liegt in der maximalen Annäherung an den thermisch optimalen Grenzflächenverbund in der Bindenaht, bei der Schmelze mit Schmelze direkt in Kontakt gebracht wird.

Die damit entstehende Zwischenkühlzeit ist Bestandteil der Verzögerungszeit, die definitionsgemäß bereits mit dem Ende des Einspritzens der ersten Komponente beginnt und den Einspritzvorgang der zweiten Komponente mit einschließt. Mit dem Ende des Einspritzens der ersten Komponente kann beim korrekten Spritzgießen davon ausgegangen werden, dass der Kontakt mit dem Kern hergestellt ist und die Abkühlung beginnt. Somit schließt die Verzögerungszeit  $t_{Verz}$  folgende Prozessschritte mit den dazugehörigen Zeitabschnitten in die Formel 3.1 ein:

$$t_{Verz} = t_{N1} + t_{Kzw} + t_{Kernzug} + t_{EV2} + t_{E2} \quad (3.1)$$

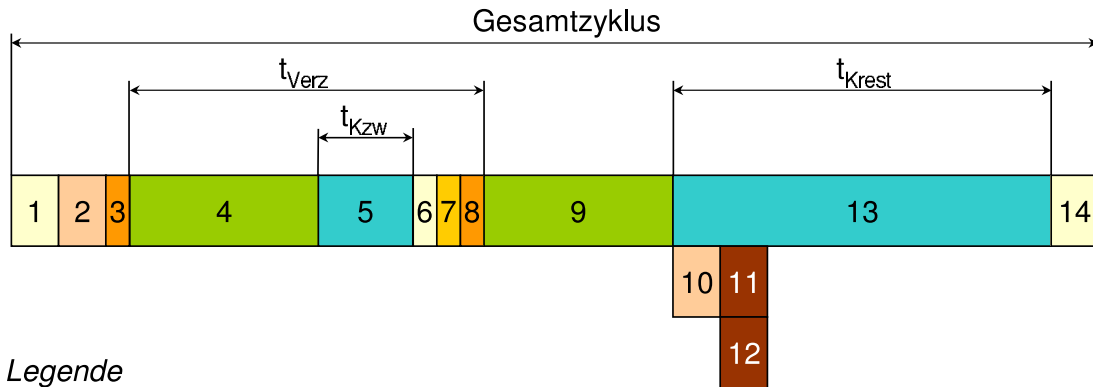
mit

- Nachdruck 1. Komponente  $t_{N1}$ ,
- Zwischenkühlen 1. Komponente  $t_{Kzw}$ ,
- Kern ziehen  $t_{Kernzug} = 0,3 \text{ s}$ ,
- Einspritzverzögerung 2. Komponente  $t_{EV2} = 0 \text{ s}$ ,
- Einspritzen 2. Komponente  $t_{E2}$ .

Das Ziehen des Kerns ist ein konstanter Anteil der Verzögerungszeit. Somit wird die Verzögerungszeit durch Verändern der Zwischenkühlzeit für die erste Komponente variiert. Die Zwischenkühlzeit folgt direkt auf die Nachdruckphase der ersten Komponente (Bild 3.6).

### 3.4.2 Grundeinstellung der Parameter und Variationen

Anhand der Herstellerempfehlungen für die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Materialien wurde ein Verarbeitungsfenster festgelegt. Für die Spritzgießverarbeitung werden meist Temperaturbereiche vorgegeben, die eine flexible zeit- und somit kostenoptimierte Zyklusgestaltung erlauben.



Legende

1) Kern einfahren, Werkzeug schließen		8) Einspritzen Komponente 2	$t_{E2}$
2) Einspritzaggregate 1 und 2 vor		9) Nachdruck Komponente 2	$t_{N2}$
3) Einspritzen Komponente 1	$t_{E1}$	10) Einspritzaggregate 1 und 2 zurück	
4) Nachdruck Komponente 1	$t_{N1}$	11) Dosieren/Plastifizieren Komponente 1	
5) Zwischenkühlen Komponente 1	$t_{KZW}$	12) Dosieren/Plastifizieren Komponente 2	
6) Kern ziehen	$t_{Kernzug} = 0,3 \text{ s}$	13) Restkühlzeit	$t_{Krest}$
7) Einspritzverzögerung Aggregat 2	$t_{EV2} = 0 \text{ s}$	14) Werkzeug öffnen, Auswerfen	

**Bild 3.6:** Gesamtzyklus

**Tabelle 3.2:** Grundeinstellung Spritzgießen (PP, SAN)

Parameter	Wert in
Massetemperatur	220 und 250°C
Werkzeugtemperatur	20 und 40°C
Restkühlzeit	30 s

Die Untersuchungen erforderten eine Variation der Masse- und Werkzeugtemperatur, die wie in Tab. 3.2 angegeben, für PP und SAN gleich eingestellt werden konnte.

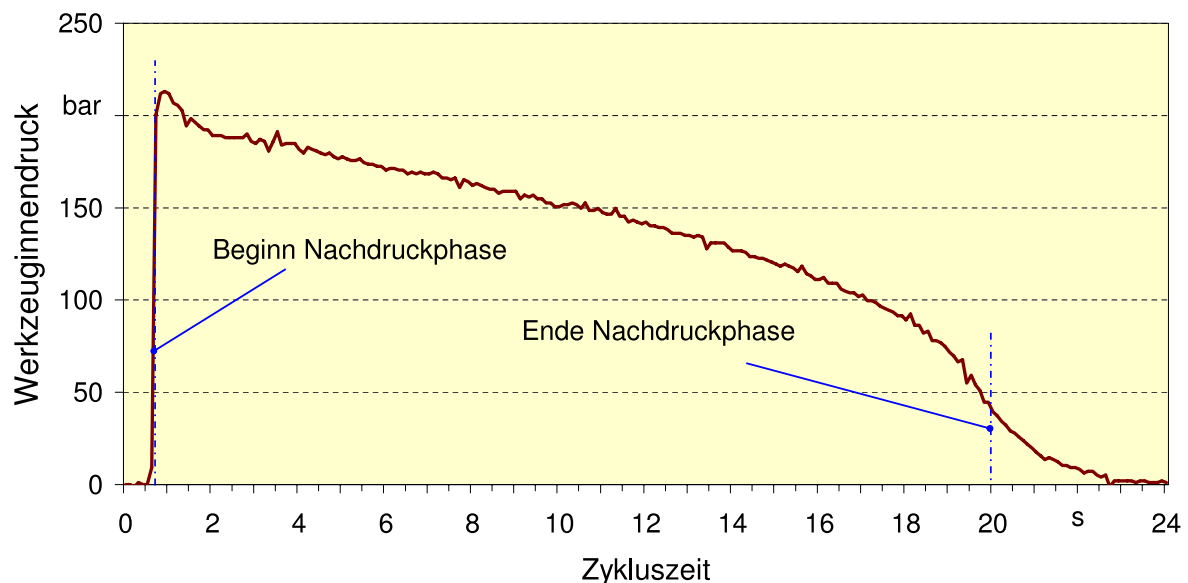
Unter dem Einfluss der eingestellten Temperaturen ergeben sich weitere Prozessgrößen im Verlauf des Zyklusses, sind zu optimieren und werden innerhalb der jeweiligen Versuchsreihe konstant gehalten:

- Einspritzgeschwindigkeit, -druck,
- Umschaltpunkt,
- Nachdruck, Nachdruckzeit,

- Restkühlzeit.

Beim Einspritzen ist darauf zu achten, dass die Einspritzzeiten der beiden Komponenten entsprechend der Fließwege und hinsichtlich einer in etwa übereinstimmenden Fließfrontgeschwindigkeit über den Volumenstrom angepasst werden. Die Optimierung der Größen kann anhand der Werkzeuginnendruckkurve durchgeführt werden. Da während des Mehrkunststoffspritzgießens in der vorliegenden Arbeit besonderes Augenmerk auf den Zustand des Vorspritzlings beim Auftreffen der zweiten Komponente gelegt wurde, soll im folgenden kurz näher auf die Optimierung der Nachdruckphase eingegangen werden. Entscheidend ist, dass die Nachdruckzeit den umfangreichsten Anteil der Kühlzeit für den Vorspritzling ausmacht. Aus diesem Grund spielt die Optimierung hinsichtlich der Zwischenkühlphase eine entscheidende Rolle.

Die Nachdruckwirkung endet mit dem Einfrieren des Anschnitts (Siegelpunkt), was bei teilkristallinen Thermoplasten anhand eines deutlichen Werkzeuginnendruckabfalls erkennbar ist. Bild 3.7 zeigt die Werkzeuginnendruckkurve am Beispiel der Herstellung eines Vorspritzlings



**Bild 3.7:** Werkzeuginnendruckkurve der ersten Komponente (Beispiel: PP,  $T_{M1} = 220^{\circ}C$ ,  $T_W = 20^{\circ}C$ )

(1. Komponente) aus Polypropylen, die auch am Display der Maschine verfolgt werden kann. Eine direkte Optimierung der Nachdruckzeit ist somit in bezug auf die wirtschaftlichen Gesichtspunkte gewährleistet. Nach Erreichen des Siegelpunktes wird der Hydraulikdruck und somit der Nachdruck durch die Maschinensteuerung über eine Druckrampe von 1 s abgebaut. Analog ist der Ablauf für die zweite Komponente.

Desweiteren gibt die Einspritzsequenz die zeitliche Aufeinanderfolge der beiden Komponenten vor. Bei der Bindahtentstehung mit gezielter Einflussnahme durch zwei getrennte Plastifiziereinheiten wird die Einspritzsequenz so eingestellt, dass sich die beiden Schmelzefronten möglichst in der Mitte des Probekörpers treffen. Es werden dabei unterschiedliche Fließwege, die im Angussystem auftreten können, durch die Einspritzverzögerung der einzelnen Komponenten ausgeglichen. Trotzdem ist es aber schwierig, das Zusammentreffen so abzustimmen, dass sich eine ebene Bindahtfläche bildet. Das setzt weiter voraus, dass beide Schmelzefronten mit gleichem Druck aufeinandertreffen und dass außerdem das Umschalten auf den Nachdruck gleichzeitig erfolgt (s. Kap. 2). Beim Mehrkunststoffspritzgießen wird diese zeitliche Aufeinanderfolge durch die bereits oben erwähnten Schritte im Anschluss an die Nachdruckphase bestimmt. Die Summe dieser Einzelschritte ergibt die Verzögerungszeit mit den folgenden konstanten und variablen Anteilen:

1. konstanter Anteil ohne Optimierung und temperaturunabhängig:

- Kern ziehen  $t_{Kernzug} = 0,3 s$  (Minimumwert ohne Schließkraftreduzierung)
- Einspritzverzögerung 2. Komponente  $t_{EV2} = 0 s$

2. konstanter Anteil mit Optimierung je nach Temperatureinstellung:

- Nachdruck 1. Komponente  $t_{N1}$
- Einspritzen 2. Komponente  $t_{E2}$

3. variabler Anteil:

- Zwischenkühlen 1. Komponente  $t_{Kzw}$

Ziel des Prozessablaufes ist es einerseits, die Komponenten so schnell wie möglich in Kontakt zu bringen, um die Restwärme des Vorspritzlings für den optimal zu erwartenden Ablauf der Haftungsmechanismen ausnutzen zu können. Andererseits soll diese Verzögerungszeit zur indirekten Variation des Resttemperaturprofils benutzt werden, also in zeitlichen Stufen zu längeren Zeiten hin variiert werden. Die Zwischenkühlzeit kann direkt an der Maschine eingestellt werden und wird als die Variable der Verzögerungszeit in sekundenweisen Schritten bis zu sechs Sekunden erhöht. Danach werden etwas größere Abstände bis hin zu sehr langen Zwischenkühlzeiten (150 s, 300 s) gewählt. Über die konkrete Aufteilung der Komponenten der Verzögerungszeit gibt Tabelle 3.3 beispielhaft für PP bei  $T_{M1,2} = 220^{\circ}C$  und  $T_W = 20^{\circ}C$  Auskunft.

**Tabelle 3.3:** Komponenten der Verzögerungszeit (PP)

Nachdruck 1: $t_{N1}$	Zwischen- kühlen: $t_{Kzw}$	Kern- ziehen: $t_{Kernzug}$	Einspritzverzö- gerung 2: $t_{EV2}$	Einspritzen 2: $t_{E2}$	Verzöge- rungszeit: $t_{Verz}$
optimiert	variiert	konstant	konstant	optimiert	Summe resultierend
20 s	0 s bis max. 300 s	0,3 s	0 s	1 s	21,3 s bis max. 322,3 s

Laut Tabelle 3.3 wird der Prozess auf nur eine Variable im Zeitablauf (Zwischenkühlzeit) reduziert, die nachfolgend in der Auswertung als Bezugsgröße erscheinen wird. Die Verzögerungszeit selbst stellt eine informative Größe dar, die darauf hinweist, dass die wahre „Zwischenkühlzeit“ für die erste Komponente um einiges länger ist.

## 3.5 Prüfmethoden

### 3.5.1 Charakterisierungsmethoden

Im Allgemeinen stehen sehr viele Methoden für die Charakterisierung von Oberflächen und Werkstoffgefüge in Kunststoffformteilen zur Verfügung. Die Mikroskopie ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Qualitätskontrolle sowie zur Aufklärung von Formteilschäden und Unregelmäßigkeiten im Werkstoffgefüge. Beispielsweise können folgende Details sichtbar gemacht und analysiert werden:

- Verteilungen von Füll- oder Verstärkungstoffen sowie Farbpigmenten,
- Lunker, Bläschen,
- Spannungsrisse,
- Grenzflächenerscheinungen (Oberflächenkerben).

Es können auf diesem Wege sowohl Verarbeitungsfehler als auch belastungs- oder alterungsbedingte Veränderungen identifiziert werden.

Im vorliegenden Fall werden die mikroskopischen Methoden für die Betrachtung folgender Bereiche und mit den dazu angegebenen Zielen eingesetzt:

1. Oberflächenkerbe - Ermittlung der Geometrie und Abschätzung der Kerbtiefe,
2. Übergang zwischen Vorspritzling und zweiter Komponente - Ermittlung von Grenzflächengeometrie, auffälligen Deformationen und Kristallisationsstrukturen im Grenzschichtbereich.

Bezüglich der Oberflächenkerbe wurde neben der mikroskopischen Analyse das Tastschnittverfahren zur quantitativen Bestimmung der Kerbtiefe angewandt. Ziel dieser Untersuchungen war es, die Beeinflussung der Kerbtiefe durch die Prozessvariationen festzustellen und, wenn möglich, diese Ergebnisse mit den Verbundfestigkeiten in Zusammenhang zu bringen. Vorgestellt und diskutiert werden einige Ergebnisse im Abschnitt 4.

Zur weiteren Beurteilung der Grenzfläche wurden von den Polypropylenprobekörpern Dünnschnitte (Dicke 20 - 40  $\mu\text{m}$ ) mit einem Mikrotom (Typ RM 2155, Leica) entnommen und unter einem Lichtmikroskop (LABOVAL, Jenoptik) im Polarisations-Durchlicht betrachtet. Die Schnitte wurden über die Grenzfläche hinweg in verschiedenen Abständen zum Formteilrand entnommen. Im Ergebnis dieser Betrachtungen lassen sich sphärolithische Strukturen des teilkristallinen Materials im polarisierten Licht erkennen. Die Beeinflussung der Kristallisationsstruktur konnte in verschiedenen Bereichen anhand von strömungsbedingten Deformationen sowie unterschiedlicher Ausprägung festgestellt werden. Allerdings ist noch kein quantitativer Zusammenhang herstellbar.

### **3.5.2 Mechanische Prüfung**

Grundlegend für das Verständnis des Werkstoffverhaltens ist die Kenntnis, wie das Material auf mechanische Belastung reagiert. Für Mehrkunststoffgrenzflächen wird der Zugversuch insbesondere bei Hart/Hart-Verbindungen eingesetzt. Dagegen findet der Schälversuch bevorzugt Anwendung bei Hart/Weich-Kombinationen. Bisher liegt keine einheitliche Norm für die Prüfung der Verbundfestigkeit vor.

In der vorliegenden Arbeit wurde entsprechend der Zugversuch nach DIN EN ISO 527-1 mit einer Universalprüfmaschine durchgeführt. Tabelle 3.4 gibt die Parameter der Zugprüfmaschine und Datenerfassung wieder.

**Tabelle 3.4:** Parameter Zugversuch

<b>Parameter</b>	<b>Wert in</b>
Messlänge, incremental	0 mm
Messlänge, analog	50 mm
Vorkraft $F_V$	2 N
Kraftmessdose	50 kN
Bruchabschaltswelle	50 % $F_{max}$
Raumklima	23 °C, 50 % rel. Feuchte
Geschwindigkeit E-Modul	1 $\frac{mm}{min}$
Prüfgeschwindigkeit	5 $\frac{mm}{min}$





# Kapitel 4

## Analyse von Prozess- und Material- einflüssen auf Haftungsmechanismen

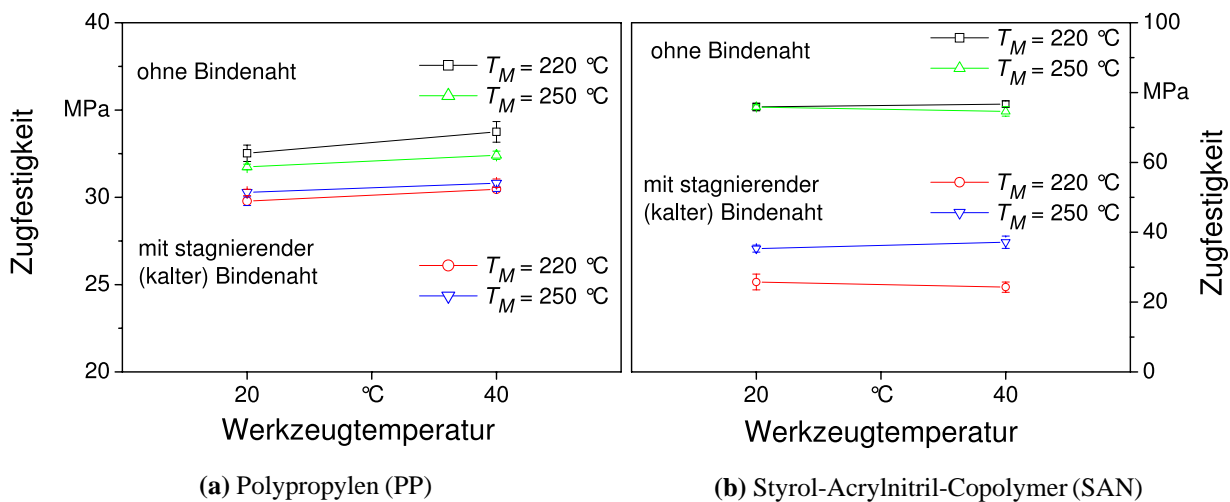
Im folgenden wird anhand von Untersuchungsergebnissen eine Einflussanalyse vorgenommen, die zur festigkeitsoptimierten Prozessführung beitragen soll. Beginnend mit einem Vergleich der Bindehaftfestigkeiten für die eingesetzten Materialien kann darauf aufbauend die erzielte Verbundfestigkeit bewertet werden. Außerdem werden Formänderungsvorgänge und resultierende Grenzflächenerscheinungen, wie die umlaufende Oberflächenkerbe, betrachtet.

### 4.1 Ausgangs- und Bindehaftfestigkeit

Bild 4.1 stellt die beiden in den Versuchen verwendeten Materialien in bezug auf ihre Bindehaftschwäche gegenüber. Zu sehen sind im oberen Teil der Diagramme die Werte für die Ausgangsfestigkeit eines ungestörten Probekörpers. Bei Polypropylen ist dabei die Beeinflussung der Zugfestigkeit durch die Massetemperatur auffallend. Eine hohe Massetemperatur ergibt eine niedrigere Zugfestigkeit gegenüber den Probekörpern, die mit geringerer Massetemperatur verarbeitet wurden. Die Ursache liegt im Wesentlichen in der bekannten Tatsache, dass sich durch zunehmende Relaxation die Molekülorientierung mit steigender Massetemperatur verringert und außerdem die Dicke der orientierten Schicht abnimmt [2]. Im Vergleich zum PP ist diese Abhängigkeit beim SAN nicht so stark zu erkennen, lediglich bei hoher Masse- und Werkzeugtemperatureinstellung deutet sich die gleiche Tendenz an.

Eine vergleichende Betrachtung der Werte für die Bindehaftfestigkeit ergibt, dass SAN eine wesentlich ausgeprägtere Anfälligkeit gegen Bindenähte aufgrund des spröde-amorphen Verhaltens

hat als PP. Die vorgestellten Ergebnisse sind typisch für beide Vertreter der jeweiligen Materialgruppe und werden als Vergleichswerte später den Verbundfestigkeiten gegenübergestellt.



**Bild 4.1:** Bindenahtfestigkeit im Vergleich

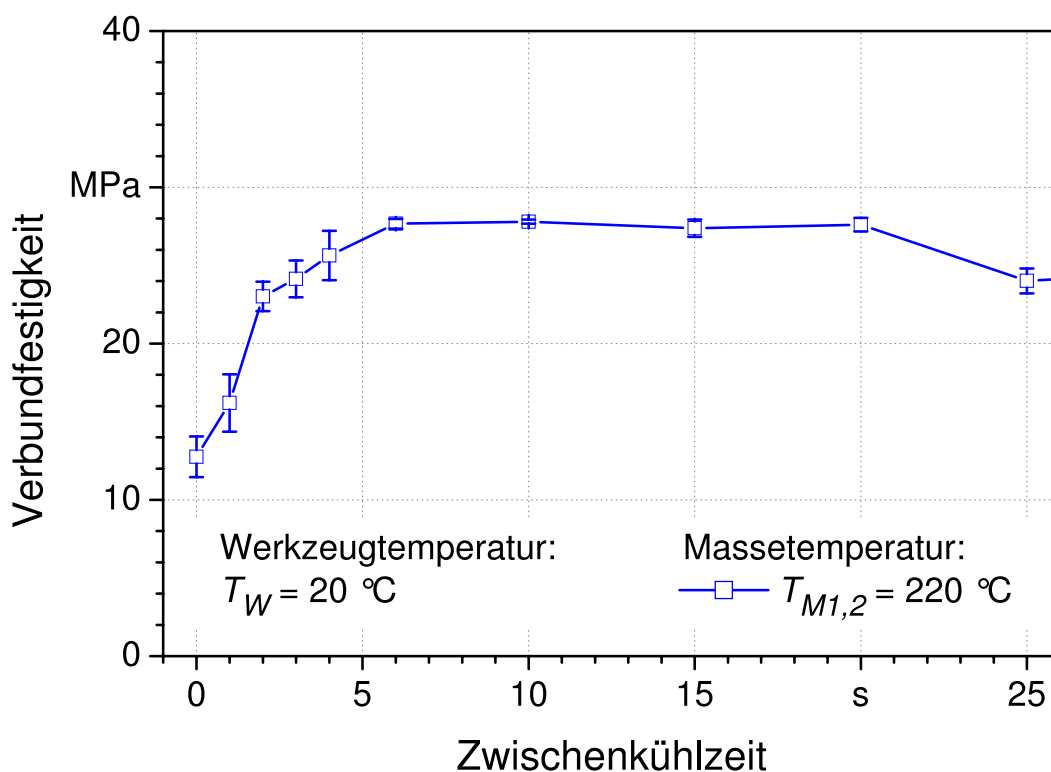
## 4.2 Einflussanalyse

Im Vergleich zur Entstehung einer Bindenaht kommt bei den Mehrkunststoffgrenzflächen unter Ausklammerung der chemisch-physikalischen Verträglichkeit ein wesentlicher Faktor hinzu. Dabei handelt es sich aufgrund der zwischengeschalteten Abkühlung des Vorspritzlings um dessen Zustandsänderung von der Schmelze zum Feststoff, die mit einer Formänderung, der sog. Schwindung, verbunden ist. Desweiteren führt die Wiedererwärmung durch die zweite Komponente überlagernd zu lokalen Ausdehnungen. Diese Kombination verdeutlicht die Komplexität der durch die Variation nur eines Parameters zu erwartenden Veränderungen.

### 4.2.1 Verzögerungszeit und Prozesstemperaturen

In den Abschnitten 3.4.1 und 3.4.2 wurde die Verzögerungszeit definiert und in den Prozessablauf eingeordnet. Demnach kann in der folgenden Auswertung der an der Maschine wählbare und somit variable Bestandteil der Verzögerungszeit, die sog. Zwischenkühlzeit, als Bezugsgröße verwendet werden.

Bei der Ermittlung der Verbundfestigkeit in Abhängigkeit von der Zwischenkühlzeit und damit indirekt von der Kontakttemperatur der beiden Komponenten ergab sich der im Bild 4.2 dargestellte Verlauf für Polypropylen bei niedrigen Prozesstemperaturen. Es geht daraus hervor, dass



**Bild 4.2:** Verbundfestigkeit in Abhängigkeit von der Zwischenkühlzeit (PP/PP)

die Verbundfestigkeit mit steigender Zwischenkühlzeit und somit nach bisheriger Überlegung offenbar bei abnehmender Resttemperatur des Vorspritzlings wächst. Deutlich erkennbar ist, dass die Verbundfestigkeit ab ca. 6 s Zwischenkühlzeit ein annähernd stabiles Niveau erreicht. Bemerkenswert ist die relativ große Streuung im Bereich niedriger Zwischenkühlzeiten. Wenn sich die Zwischenkühlzeit am Minimum befindet, d. h. die zweite Komponente wird nahezu sofort nach dem Ende der Nachdruckzeit der ersten Komponente aufgespritzt, erreicht die Verbundfestigkeit weniger als die Hälfte des Niveaus gegenüber dem Maximalwert bei längeren Zwischenkühlzeiten. Ab einer Zwischenkühlzeit von 20 s beginnt die Verbundfestigkeit wieder zu fallen. Bei langen Abkühlzeiten kann ausschließlich die zweite Komponente auf die Höhe der Verbundfestigkeit einwirken. Diese Tendenz stimmt mit bisherigen Erkenntnissen überein [7, 8].

Andererseits erscheint die Steigerung der Verbundfestigkeit bei geringen Zwischenkühlzeiten aufgrund einer zu diesem Zeitpunkt noch höheren Resttemperatur des Vorspritzlings zunächst

unlogisch. Es ist also anzunehmen, dass zusätzliche Einflussfaktoren bei diesen Versuchsbedingungen auf die Ausbildung der Verbindung einwirken bzw. eine Überlagerung mehrerer Faktoren stattfindet. Denkbar ist z. B. der Einfluss durch die Schwindung, die mit der Zeit zunimmt [86]. Besonders könnte sich die aus der Literatur bekannte Kurzzeitschwindung<sup>1</sup> [83] in diesem Zeitbereich haftungsmindernd auswirken. Weiterhin ist es möglich, dass bei dem hier benutzten teilkristallinen Polypropylen die Kristallisationsvorgänge eine gewisse Rolle spielen. Weitaus naheliegender erscheint es aber, dass im Zusammenhang mit der Schwindung auch die Wärmetransportvorgänge im Werkzeug und Formteil während der einzelnen Phasen des Zyklusses auf den Prozess der Interdiffusion bestimmend einwirken. Einige Quellen weisen experimentell Veränderungen der Wärmeübergangsbedingungen aufgrund von Formänderungen nach [86, 87].

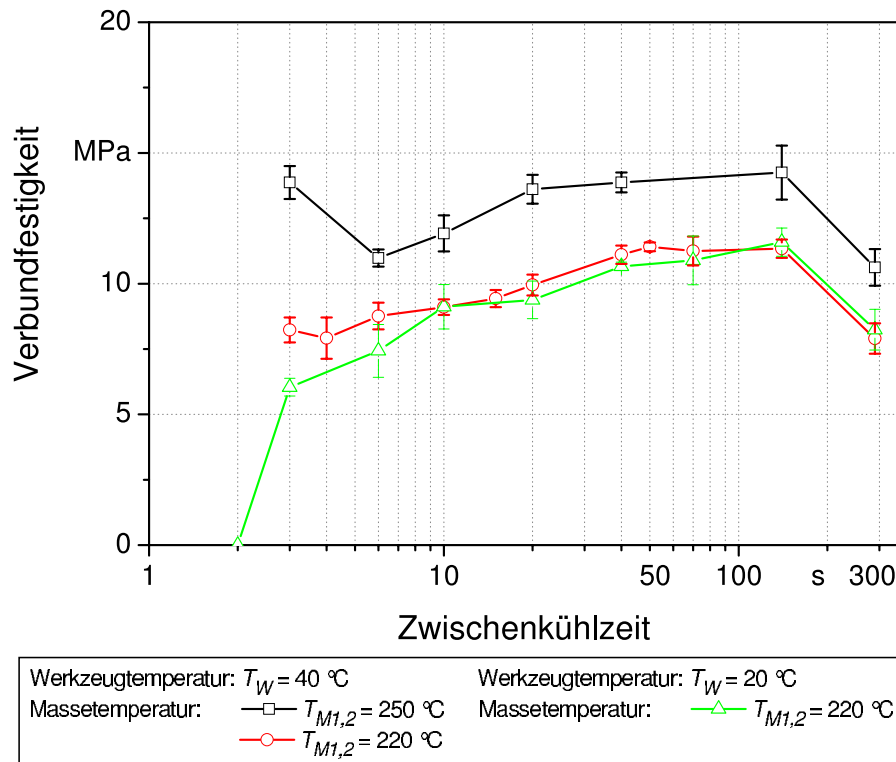
Aus der Literatur sind weiterhin solche auf den ersten Blick unerklärlich erscheinende Tendenzen bekannt [5, 8, 77], wo z. B. die höchste Verbundfestigkeit für die niedrigsten Prozesstemperaturen ermittelt wurde. Zur Klärung solcher Effekte ist eine systematische Analyse der veränderlichen Größen sowie der damit verbundenen abhängigen Veränderlichen notwendig. Im vorliegenden Programm der Versuche wurde eine schrittweise Ausklammerung vermeidbarer Einflussgrößen vorgenommen, wie z. B. die der grundsätzlichen Verträglichkeit der Materialien. Dies soll im Weiteren zur Klärung eines Teils der aufgeworfenen Fragen beitragen.

Beginnend mit dem Einfluss der Schwindung, kann die Gegenüberstellung mit einem schwindungsärmeren Material, wie dem SAN, erste Informationen ergeben. Im Bild 4.3 sind die Verbundfestigkeiten für verschiedene Prozesstemperaturen in Abhängigkeit von der Zwischenkühlzeit aufgezeigt. Die Steigerung der Verbundfestigkeit zwischen Minimum (hier sogar Nichthaftung) und Maximum ist bei niedrigen Prozesstemperaturen ( $T_{M1,2} = 220^\circ\text{C}$ ,  $T_W = 20^\circ\text{C}$ ) ähnlich vorhanden wie beim PP. Unterschiedlich ist dabei der Anstieg, wobei das Maximum für PP bei wesentlich kürzeren Zwischenkühlzeiten entsteht. SAN erreicht dies später und dann im Vergleich zur Ausgangsfestigkeit nicht so hohe Verbundfestigkeiten. Die ausgeprägtere Bindenahtschwäche ließ das schon erwarten. Bei längeren Zwischenkühlzeiten verschlechtert sich die SAN- wie auch die PP-Verbindung.

Zu den Ergebnissen bei hohen Prozesstemperaturen ist zu bemerken, dass die Grenzflächengeometrie bei kurzen Zwischenkühlzeiten durch die zweite Komponente deformiert wird bzw. sogar ein Durchbruch in die erste Komponente erfolgt. Die Zeit, ab der eine ebene Grenzfläche entsteht, liegt unter diesen Versuchsbedingungen ( $T_{M1,2} = 250^\circ\text{C}$ ,  $T_W = 40^\circ\text{C}$ ) bei ca. 6 s. Obwohl

---

<sup>1</sup>Die Kurzzeitschwindung ist der Anteil der Verarbeitungsschwindung, der zu einem bestimmten Zeitpunkt nach dem Ende der Nachdruckzeit einen aktuellen Schwindungswert darstellt [83]. Die Verarbeitungsschwindung wird sonst nach DIN 16901 erst nach 24h Lagerung der Probekörper im Normalklima gemessen.



**Bild 4.3:** Verbundfestigkeit in Abhängigkeit von der Zwischenkühlzeit (SAN / SAN)

der Durchbruch hier zu einer höheren Verbundfestigkeit führt, ist diese Tendenz nicht in jedem Fall zu finden. Die Diskussion solcher Effekte wird in einem separaten Abschnitt vorgenommen.

Im Gegensatz zum Ziel der sehr guten Haftung ergibt sich aus dem Verlauf der Verbundfestigkeit in Bild 4.3 auch die Nichthaftung in einer unerwarteten, aber aus den vorher diskutierten Ergebnissen nachvollziehbaren Richtung. Geklärt werden muss allerdings noch der Mechanismus, der dazu führt. In anderen Versuchen hat sich die Nichthaftung auch bei PP ergeben. Generell trat die Nichthaftung nur bei den niedrigsten Prozesstemperaturen und kurzen (!) Zwischenkühlzeiten auf.

Im Prinzip kann sich die Schwindung in beiden Fällen (PP und SAN) mit ähnlicher Ausprägung auf die Wärmetransportvorgänge auswirken. Bei der Analyse und Beschreibung der Mehrkunststofftechnik ist dieser Effekt ein wesentlicher Gesichtspunkt und soll hier weiter aufgeklärt werden.

Bezugnehmend auf den bisherigen Vergleich zwischen kalter Grenzfläche und Bindaht (heiße Grenzfläche) sind in Tabelle 4.1 die bei den Untersuchungen erreichten Maximalwerte der Festigkeiten für beide Materialien angegeben. Es sind somit die Ausgangs-, Bindaht- und Verbund-

festigkeiten bei hohen Prozesstemperatureinstellungen und bei Zwei-K-Grenzflächen mit optimierten Zwischenkühlzeiten zu finden. Die Faktoren werden als Quotient aus der Bindenaht- oder

**Tabelle 4.1:** Festigkeitsvergleich

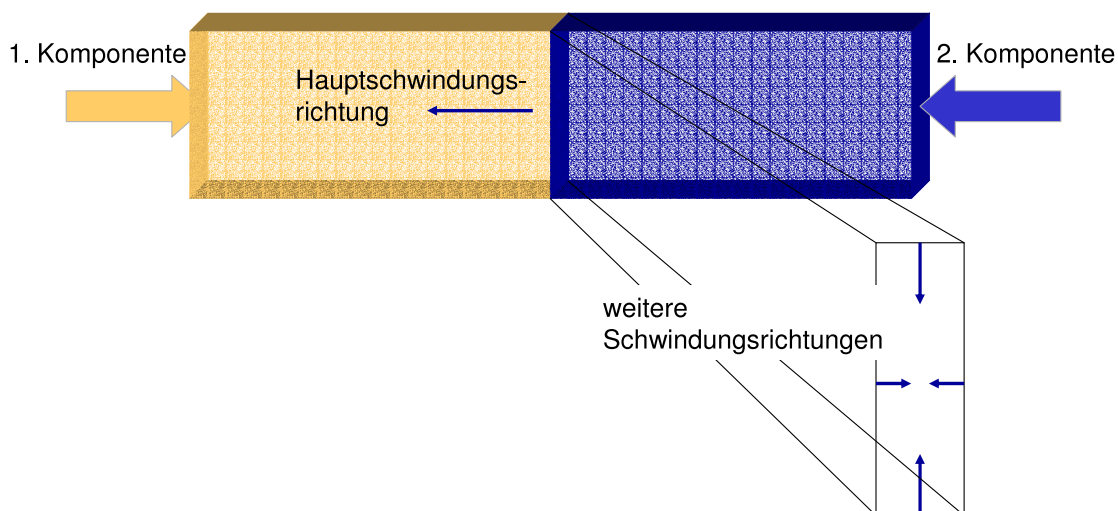
	Wert in	SAN	PP
Ausgangsfestigkeit $\sigma_A$	MPa	76	33
Bindenahtfestigkeit $\sigma_{BN}$	MPa	37,15	30,5
Bindenahtfaktor ( $\frac{\sigma_{BN}}{\sigma_A}$ )	-	0,48	0,92
Verbundfestigkeit $\sigma_V$	MPa	14	27,5
Verbundfaktor ( $\frac{\sigma_V}{\sigma_A}$ )	-	0,18	0,83

Verbundfestigkeit und der bei gleicher Prozesseinstellung gefundenen Ausgangsfestigkeit ermittelt. Ergänzend verdeutlichen diese Faktoren die starke Anfälligkeit eines amorph-spröden Materials gegen solche Störstellen. Dagegen kann das Polypropylen auch beim Mehrkunststoffspritzgießen eine hohe Verbundfestigkeit erzielen.

#### 4.2.2 Werkzeuginnendruck und Formänderungsverhalten

Der Werkzeuginnendruck ist als Messgröße durch zwei Drucksensoren im Werkzeug für jede Komponente einzeln aufgenommen worden. Gesteuert wird der Werkzeuginnendruck über den Nachdruck, der von der Maschinenhydraulik eingestellt wird. In Abhängigkeit von Anguss- und Formteilgeometrie, die als rheologische Widerstände einen Druckverlust erzeugen, erreicht nur noch ein gewisser Anteil des ursprünglichen Nachdruckes das Formteillinnere. Der Nachdruck wird von der Maschinensteuerung während der gesamten Nachdruckphase konstant gehalten. Der mittlere Werkzeuginnendruck hingegen sinkt mit Beginn der Nachdruckphase beständig ab. Dies wird bedingt durch das Abkühlen der Kunststoffschmelze im Werkzeug und den damit verbundenen vom Rand zur Mitte hin fortschreitenden Erstarrungsvorgang. Die Abkühlung geht mit einer Erhöhung der Viskosität und somit einer Reduzierung der Druckübertragungsfähigkeit zum Aufnehmer einher. Überlagert wird dieser Prozess durch eine reduzierte Komprimierbarkeit des Materials mit zunehmender Viskosität. Aufgrund des kontinuierlich absinkenden Werkzeuginnendrucks in der Nachdruckphase wurde mit dem Maximalwert am Ende der Kompressionsphase und somit gleichzeitig zum Beginn des Nachdrucks als maßgebende Einflussgröße gearbeitet.

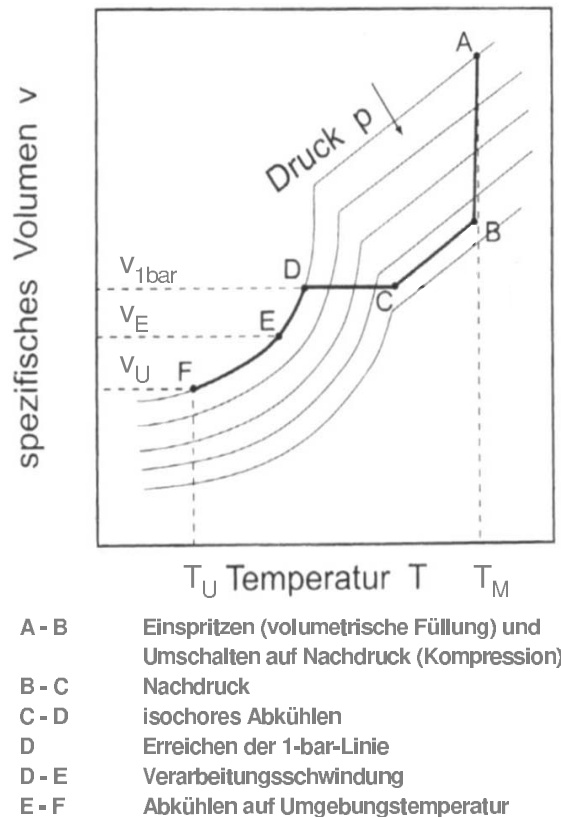
In Versuchen mit variiertem Werkzeuginnendruck sollte hauptsächlich der Einfluss der Schwindung des Vorformlings auf die Ausbildung des Verbundes näher betrachtet werden. Dieser mögliche Einfluss liegt nahe, da während des Überspritzens mit der zweiten Komponente bei sehr geringer Zwischenkühlzeit die Schwindungsvorgänge im Vorformling noch ablaufen. Prinzipiell kann die im Bild 4.4 dargestellte Schwindungssituation eintreten. Aufgrund der Bauteilgeometrie



**Bild 4.4:** Haftungsrelevante Schwindungsrichtungen in der Grenzfläche

können die Schwindungsvorgänge eventuell behindert werden (Formzwang durch z. B. Schultern des Zugstabs) und deshalb in den einzelnen Richtungen (Länge, Breite und Dicke) stark unterschiedlich sein. Hinzu kommt nach dem Aufspritzen der zweiten Komponente eine weitere Formänderung.

Aufgrund der Schwindung des Vorspritzlings kann es bei sehr kurzen Zwischenkühlzeiten dazu kommen, dass sich dessen Kontaktfläche während bzw. kurz nach dem Überspritzen von der zweiten Komponente wegbewegt und verkleinert. Andererseits kann es durch das Aufwärmen ausgehend von der zweiten Komponente lokal zur Ausdehnung des Materials kommen, so dass die Ausbildung der Verbindung sowohl behindert (Formzwang) werden als auch mit der Entstehung von Spannungen einhergehen kann. Aus dem Verlauf des Werkzeuginnendrucks geht der Zeitpunkt hervor, wenn der Umgebungsdruck erreicht wird und somit die Schwindung verbunden mit dem Abheben von der Werkzeugwand einsetzt. Weiterhin kann der Verlauf des spezifischen Volumens beim Spritzgießprozess als Funktion der Temperatur bei verschiedenen Drücken in einem  $p_vT$ -Diagramm ermittelt werden (im Bild 4.5 von Punkt A bis F für einen Zyklus). Üblicherweise werden der Werkzeuginnendruck als gemessene Größe und die Temperatur als eine berechnete



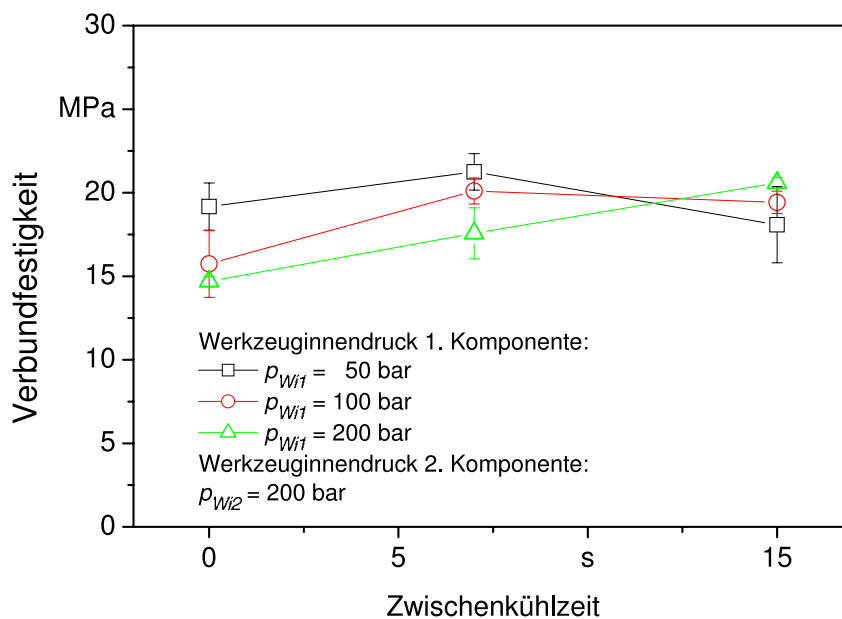
**Bild 4.5:**  $pvT$ - Diagramm mit Darstellung der Prozesslinie (teilkristallin) (nach [2])

Größe abgetragen. Ablesbar sind danach insbesondere die Differenzen des spezifischen Volumens ab Erreichen der sog. „1-bar-Linie“ (Umgebungsdruck) bis zum vollständigen Abkühlen entlang dieser Linie auf Raumtemperatur, die auf eine Volumenschwindung schließen lassen. Es ist zwar bisher noch nicht generell geklärt, wie sich auf der Basis der Änderung des spezifischen Volumens die prozentuale Aufteilung der Formteilschwindung in den einzelnen Richtungen darstellt; es kann aber bei freier Schwindung davon ausgegangen werden, dass die Kontraktion in alle Richtungen erfolgt. Abhängig sind die einzelnen Anteile in Längen-, Breiten- und Dickenrichtung von den verarbeitungsinduzierten Molekülorientierungen, Eigenspannungen und kristallinen Zuständen, so dass eine unterschiedliche Ausprägung der Schwindung leicht zu Verzug im Formteil führen kann.

Für den Vorspritzling liegt der Beginn der Schwindung ebenso am Übergang des Werkzeuginnendrucks auf Umgebungsdruck. Da ein Druckaufnehmer aber eine lokal sehr begrenzte Aussage liefert, ist eine bereits früher beginnende Schwindung an anderen Stellen des Formteils nicht auszuschließen.



Sowohl bei amorphen als auch bei teilkristallinen Thermoplasten gibt die Nachdruckhöhe entscheidend den Grad der Schwindung vor. Je höher der wirkende Nachdruck, desto geringer ist die zu erwartende Verarbeitungsschwindung. Deshalb wurde eine Versuchsreihe unter ergänzender Variation der Maximalwerte des Werkzeuginnendrucks von 50, 100 und 200 bar bei ansonsten gleichen Nachdruckzeiten durchgeführt, um den Einfluss in bezug auf die Verbundfestigkeit des PP-PP-Verbundes festzustellen. Im Ergebnis stellte sich heraus, dass bei höherem Werkzeuginnendruck der ersten Komponente eine niedrigere Verbundfestigkeit zu verzeichnen ist als bei niedrigeren Druckwerten und kurzen Zwischenkühlzeiten (Bild 4.6). Bei längeren Zwischen-



**Bild 4.6:** Verbundfestigkeit in Abhängigkeit vom Maximalwert des Werkzeuginnendrucks (PP/PP)

kühlzeiten ergibt sich ein umgekehrtes Bild. Beim höchsten Druckwert (200 bar) ergibt sich für längere Zwischenkühlzeiten eine klar ansteigende Verbundfestigkeit, die so bei den niedrigeren Drücken nicht bzw. sogar entgegengesetzt verläuft. Überlagert wird der stärker kompensierte Schwindungsverlauf bei höherem Nachdruck durch mehr Eigenspannungen, die sich auch im Verbundbereich auswirken können. Bei kurzen Zwischenkühlzeiten und erhöhtem Nachdruck scheint sich der Einfluss zunehmender Eigenspannungen anhand der niedrigeren Verbundfestigkeit zu bestätigen. Ungeklärt sind allerdings noch die Auswirkungen einer erneuten lokalen Ausdehnung bei Wiedererwärmung durch die zweite Komponente sowie der Kristallisationsvorgänge. Dieses komplexe Zusammenspiel der Einzelmechanismen lässt sich zunächst nicht abschließend auflösen.

Ergänzend soll weiterhin der grundlegende Ablauf der Schwindung in Abhängigkeit von der Zeit betrachtet werden, wobei für die Kurzzeitschwindung des Vorspritzlings hauptsächlich die Zwischenkühlzeit von Bedeutung ist und für die Gesamtschwindung des Formteils zusätzlich die Restkühlzeit. Die Gesamtschwindung für das Formteil - in dem Fall ist nicht die definitionsgemäße Gesamtschwindung aus Verarbeitungs- und Nachschwindung gemeint - ergibt sich aus der Summe der Einzelschwindungen von Vorformling ( $S_1$ ) und dem Teil der zweiten Komponente ( $S_2$ ). Zusätzlich muss die mögliche Kompensation einer bereits abgelaufenen Längenschwindung im Vorspritzling ( $\Delta S_1(t_{K_{zw}})$ ) mit in die Gleichung 4.1 eingehen, so dass sich folgender Zusammenhang für die Längenschwindung ergibt:

$$S_{ges}(t_{K_{zw}}; t_{K_{rest}}) = (S_1 - \Delta S_1(t_{K_{zw}})) + S_2 \quad (4.1)$$

In kurzen Stichpunkten lassen sich folgende Annahmen für den Ablauf der Schwindung treffen:

1. Zu Beginn der Zwischenkühlzeit bei  $t = t_{K_{zw}0} = 0s$ :

- liegt noch keine Schwindung des Vorspritzlings vor ( $S_1(t_{K_{zw}0}) = 0\%$ ) und somit ergibt sich bei sofortigem Anspritzen mit der zweiten Komponente noch keine Kompensation ( $\Delta S_1(t_{K_{zw}0}) = 0\%$ ),

so dass für die Gesamtschwindung nach Ablauf einer Restkühlzeit  $t_{K_{rest}}$  folgendes gilt:

$$S_{ges}(t_{K_{rest}}) = (S_1(t_{K_{rest}}) + S_2(t_{K_{rest}}))$$

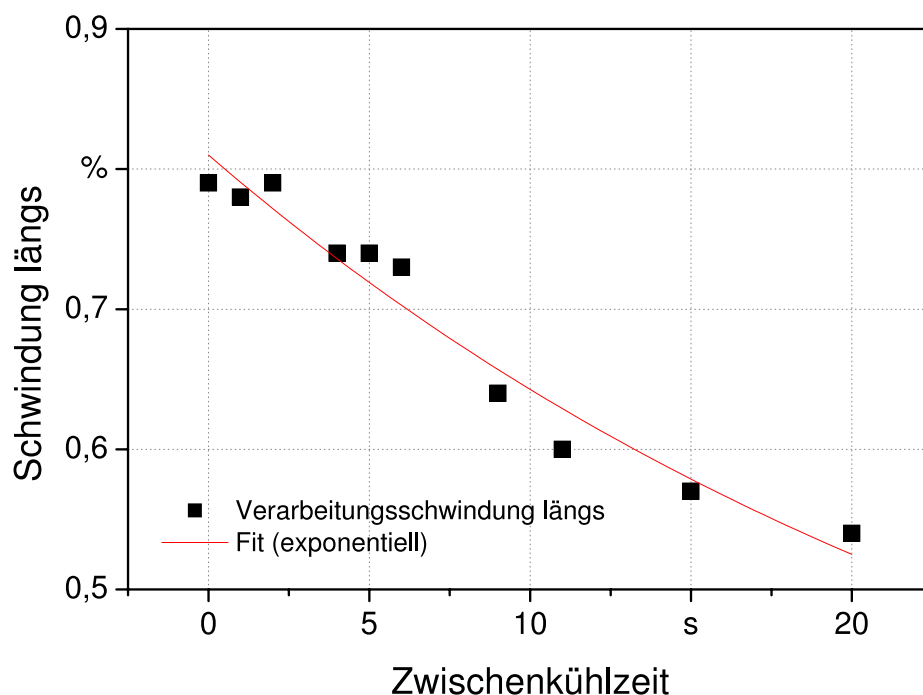
2. Mit zunehmender Zwischenkühlzeit bei  $t = t_{K_{zw}} > 0s$ :

- wird die dann jeweils absolvierte Schwindung des Vorspritzlings  $S_1(t_{K_{zw}}) = n\%$  ( $0 \leq n \leq 100\%$ ) durch die zweite Komponente mit  $\Delta S_1(t_{K_{zw}}) = S_1(t_{K_{zw}})$  kompensiert,

so dass für die Gesamtschwindung dann nach Ablauf einer Restkühlzeit  $t_{K_{rest}}$  folgendes gilt:

$$S_{ges}(t_{K_{zw}}; t_{K_{rest}}) = (S_1(t_{K_{rest}}) - \Delta S_1(t_{K_{zw}})) + S_2(t_{K_{rest}})$$

Offen ist noch, wie hoch der Restanteil der Schwindung des Vorspritzlings im Verhältnis zum kompensierten Anteil und zur Gesamtschwindung ist. Im Ergebnis der Messungen der Gesamtschwindung konnte der Nachweis einer Kompensation erfolgen (s. Bild 4.7). Mit zunehmender



**Bild 4.7:** Längenschwindung  $S_{ges}$  eines Zugstabes abhängig von der Zwischenkühlzeit (PP/PP)

Zwischenkühlzeit sinkt die Längenschwindung des kompletten Zugstabes. Demnach nimmt die zum jeweiligen Zeitpunkt des Aufspritzens der zweiten Komponente vorhandene Kurzzeitlängenschwindung des Vorspritzlings zu. Gleichzeitig wird diese Längenänderung durch die zweite Komponente aufgenommen. In den Messungen konnte demnach eine Verschiebung der Grenzflächenposition festgestellt werden.

Um dem weiter auf den Grund zu gehen, wurden einige Proben einer Warmlagerung unterzogen, so dass der Prozess der Nachschwindung erheblich verkürzt wurde und ein teilweiser Abbau der Eigenspannungen erfolgen kann. Im Ergebnis der Prüfung zur Ermittlung der Verbundfestigkeit entstanden meist deutlich höhere Verbundfestigkeiten bei den warmgelagerten Probekörpern. Einschränkend ist hierbei zu erwähnen, dass ein Tempern bei teilkristallinen Materialien möglicherweise auch zu einer Nachkristallisation führen kann und es zu einer weiteren Ausbildung von Eigenspannungen kommen kann [73]. Eine quantitative Aussage zu den Eigenspannungsanteilen an der Haftungsminde rung ist somit schwer möglich.

## Fazit

Im Zusammenhang mit der abnehmenden Gesamtlängenschwindung des Zugstabes und somit zunehmender Kompensation der Schwindung durch die zweite Komponente bei steigender Zwischenkühlzeit ergeben sich in bezug auf den Vorspritzling folgende Punkte zur weiteren Beachtung:

- Die Schwindung wirkt als Resultat der thermodynamischen Abläufe im Formteil direkt auf die Wärmeübertragungsvorgänge: Mit zunehmender Zwischenkühlzeit erfolgt ein Kontaktverlust aufgrund der gleichzeitig wachsenden Schwindungswerte sowohl zur Werkzeugwand (s. auch [86]) als auch zum Kern.
- Aufgrund der dadurch schlechteren Wärmeübergangsbedingungen zum kühlenden Kern, wird die Oberfläche des Vorspritzlings von innen heraus wieder aufgewärmt. In gleicher Form tritt dieser Effekt bei den Werkzeugdrehtechniken auf, da hier unter Öffnung des Werkzeuges der Vorspritzling mit der schlechter Wärme leitenden Luft in Berührung kommt [5].

Um dies für die Kernzugtechnik aufzuschlüsseln, werden insbesondere die Wärmetransportvorgänge in den einzelnen Phasen eines Zyklusses zur Herstellung von Mehrkunststoffteilen zu betrachten sein.

### 4.2.3 Kristallisation

Ergänzend sollte an dieser Stelle noch kurz auf die Einflussnahme durch Kristallisationsvorgänge im teilkristallinen Material eingegangen werden. In der Literatur wurde der Einfluss auf einen teilkristallinen Verbund bereits beschrieben [5, 8]. Es wird darin darauf hingewiesen, dass beim Auftreffen der zweiten Komponente die vorher abgeschreckte Randschicht des Vorspritzlings nur mit kleinen Sphärolithen versehen ist, die bei erneuter Erwärmung als Kristallisationskeime wirken können. Falls die Energie der zweiten Schmelze nicht ausreicht, um diesen Kontaktbereich genügend anzuschmelzen, kann der Interdiffusionsprozess erheblich behindert werden [8].

Generell kann bei teilkristallinen Materialien davon ausgegangen werden, dass sich aufgrund der hohen Abkühlrate beim Spritzgießprozess eine amorphe Randschicht ausbildet, die allerdings mit Keimen zur Sphärolithbildung bzw. kleinen Sphärolithen versehen sein kann. Dieser Vorgang

lässt sich aber für diese Analyse nicht quantitativ mit der Verbundfestigkeit in Korrelation bringen. Der Einfluss der Kristallisation wird bei ausreichend hoher Schmelzewärme vermutlich bei den haftungsmindernden Faktoren eine eher indirekte Rolle spielen.

Mehr Bedeutung kommt der Kristallisation in bezug auf die Schwindung zu, da es durch sie zu einer größeren Volumenkontraktion bei der Abkühlung von Schmelze- auf Werkzeug- und letztendlich auf Umgebungstemperatur kommt, als das bei amorphen Materialien der Fall ist. Insbesondere die vorher gefundenen unterschiedlichen Anstiege der Verbundfestigkeit im Bereich kurzer Zwischenkühlzeiten können auf Kristallisationsvorgänge zurückzuführen sein. Bekanntermaßen bleibt der Druck aufgrund der vergleichsweise niedrigen Viskosität bei teilkristallinen Materialien länger auf hohem Niveau und fällt nach dem Einfrieren steil ab [2]. Dies ist verbunden mit einer ausgeprägten Volumenkontraktion im Feststoffbereich, hervorgerufen durch die Kristallisation.

#### **4.2.4 Weitere Grenzflächenerscheinungen**

Aufgrund der Erfahrungen bezüglich der Entstehung von Bindenähten (s. Kap. 2 sowie [15, 16, 22]) wurden die Deformation der Grenzfläche und die Oberflächenkerbe als spezielle verarbeitungsinduzierte Erscheinungen mit in die Untersuchungen einbezogen. In der Praxis werden Bauteile mit diesen Effekten oft als Ausschuss eingestuft. Unterschieden werden muss dabei allerdings zwischen einem festigkeitsrelevanten oder einem rein optischen Ausschuss. Um diese Grenzfälle bei der Beurteilung der Verbundfestigkeit mit zu berücksichtigen, werden im folgenden kurz wesentliche Erkenntnisse vorgestellt.

##### **Deformation der Grenzfläche**

In den Versuchen hat sich, wie bereits oben erwähnt, insbesondere bei sehr kurzen Zwischenkühlzeiten und höheren Prozesstemperaturen eine Deformation oder sogar ein Durchbruch der zweiten Komponente (Bild 4.8, rechts) in die erste (Bild 4.8, links) ergeben. Bild 4.8 zeigt die abnehmende Deformation der Grenzfläche mit zunehmender Zwischenkühlzeit. Eine solche mechanische Verankerung der Materialien könnte die Erwartung einer höheren Festigkeit induzieren. Die Ergebnisse haben allerdings gezeigt, dass die im Bild dargestellten Profile eher einer weiteren Störstelle gleichkommen und häufiger zu niedrigeren Festigkeiten führen. Bei genauer Analyse verbessert sich die Festigkeit erst dann wieder, wenn die thermischen Bedingungen überwiegend denen bei der Bindenahtentstehung zwischen zwei Schmelzefronten entsprechen.



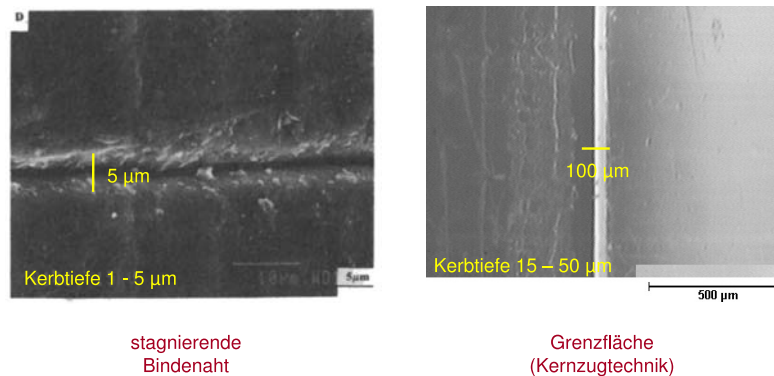
**Bild 4.8:** Grenzflächenprofile bei  $T_{M1,2} = 250^{\circ}\text{C}$  ;  $T_W = 40^{\circ}\text{C}$  mit zunehmender Zwischenkühlzeit (von 0 bis 7 s) (SAN/SAN)

In der Praxis wird in den meisten Fällen eine definiert ebene Grenzfläche verlangt. Bei der Prozessoptimierung ist somit eine Mindestzwischenkühlzeit zu ermitteln, bei der dies gewährleistet werden kann. Verarbeitungstemperaturen im Zusammenhang mit einer optimalen Nachdruckwirkzeit sind dabei die Haupteinflussparameter.

### Oberflächenkerbe

Eine weitere charakteristische Grenzflächenerscheinung ist die Oberflächenkerbe, die bereits im Kap. 2 im Zusammenhang mit Bindenähten diskutiert wurde. Bild 4.9 hebt klar die wesentlichen Unterschiede beim Vergleich einer Kerbe im Bereich einer Bindenaht und einer Grenzfläche hervor, die beim Mehrkunststoffspritzgießen hergestellt wurde. Die Kerbtiefen liegen bei Bindenähten zwischen 1 und 5  $\mu\text{m}$  und bei Grenzflächen zwischen 15 bis zu 50  $\mu\text{m}$ .

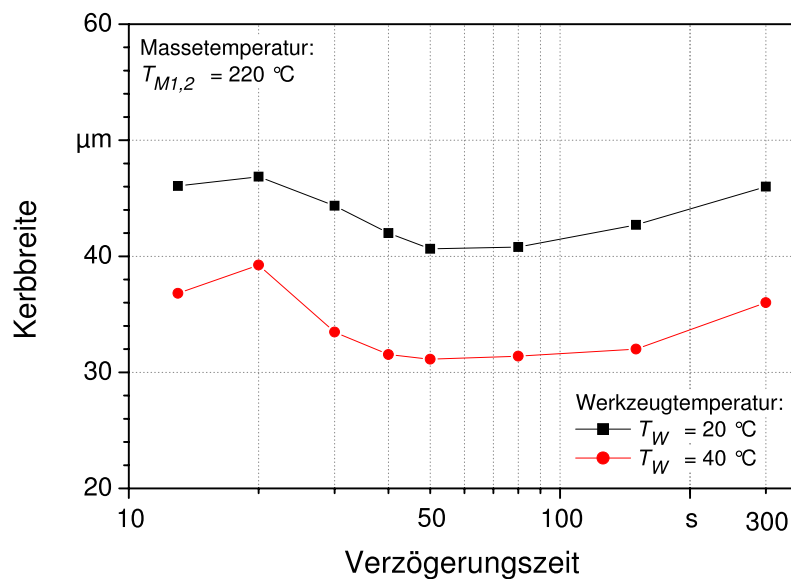
Mit Hilfe des Tastschnittverfahrens ist es möglich, die Kerbbreite (Öffnungsbreite) und Kerbtiefe festzustellen. Allerdings ist eine gewisse Ungenauigkeit aufgrund der spezifischen Kegelgeometrie der Tastnadel hinsichtlich der wahren Tiefe der Kerbe nicht auszuschließen. Hinzu kommt die bei berührenden Messverfahren mögliche Beschädigung der Oberfläche bei weicheren Materialien. Trotzdem ergeben sich Richtwerte, die sich nach der im Bild 4.9 gezeigten mikroskopischen Betrachtung in Form und Tiefe tendenziell wiederfinden lassen. Aufbauend auf dem Einfluss des Formänderungsverhaltens hinsichtlich der Verbundfestigkeit ist es daher denkbar, dass die



**Bild 4.9:** Oberflächenkerbe bei stagnierender Bindaht und Mehrkunststoffgrenzfläche (SAN/SAN)

Kerbgeometrie (Kerbtiefe, -breite) etwas über das Schwindungsverhalten aussagen kann. Ermittelt wurde die Kerbgeometrie immer auf der gleichen Seite und Position der Formteile, da sich aufgrund der Werkzeugtemperierung bzw. Kavitätgestaltung Unterschiede ergeben können.

In Bild 4.10 ist die Kerbbreite in Abhängigkeit von der Verzögerungszeit<sup>2</sup> (s. Kap. 3, Gleichung 3.10)

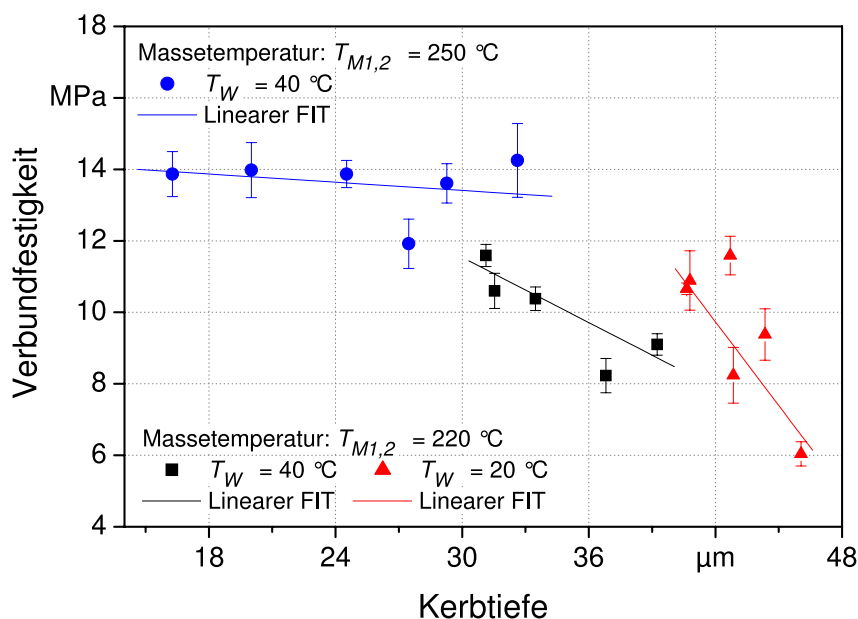


**Bild 4.10:** Kerbbreite in Abhängigkeit von der Verzögerungszeit und der Werkzeugtemperatur (SAN/SAN)

<sup>2</sup>Der Bezug zur Verzögerungszeit bietet sich hier explizit an, da je nach Verarbeitungstemperatur eine individuell notwendige Nachdruckzeit eingestellt werden muss und sich so nicht nur die Zwischenkühlzeit, sondern auch eine weitere Zeitkomponente der gesamten Verzögerungszeit verändert.

chung 3.1) und der Werkzeugtemperatur dargestellt. Erwartungsgemäß ist zu sehen, dass die Kerbbreite mit höherer Werkzeugtemperatur bei allen Verzögerungszeiten geringer ist. Die Erstarrungsvorgänge laufen bei höherer Werkzeugtemperatur langsamer ab, die Druckwirkung wird verlängert und die Schwindungskompensation erhöht. Dadurch entstehen schmalere Kerben. Weiterhin entstehen die größten Kerbbreiten bei sehr kurzen und sehr langen Verzögerungszeiten, analog den ermittelten Verbundfestigkeiten (s. Bild 4.3).

Um des weiteren dem Einfluss von Temperatur und Kerbtiefe auf die Verbundfestigkeit nachzugehen, werden im Bild 4.11 entsprechende Ergebnisse gezeigt. Erwartungsgemäß sinkt die



**Bild 4.11:** Verbundfestigkeit in Abhängigkeit von der Kerbtiefe ( $\sigma = f(PR_f)$ ) bei verschiedenen Masse- und Werkzeugtemperaturen (SAN/SAN)

Verbundfestigkeit mit zunehmender Kerbtiefe. Allerdings ist die Steigung abhängig davon, welcher Prozessparameter (Masse- oder Werkzeugtemperatur) bestimmend für die Verbundfestigkeit ist. Der größte Einfluss der Kerbtiefe liegt vor, wenn sowohl die Werkzeug-, als auch die Masse-temperatur sehr niedrig sind (im Bild 4.11, rote Kurve mit Dreiecksymbolen). Wenig bis kaum anfällig ist der Verbund, wenn er bei hoher Massetemperatur mit gleichzeitig höherer Werkzeugtemperatur hergestellt wurde (im Bild 4.11, blaue Kurve mit Kreissymbolen). Im Verlauf der Verbundfestigkeit über der Kerbtiefe sind dabei kaum Unterschiede festzustellen. Dieser Fakt lässt den Schluss zu, dass die Kerbe zwar rissauslösend ist, aber nicht den Betrag der Festigkeit vorgibt. Der Betrag der Verbundfestigkeit wird hingegen von den Haftungskräften in der Mitte des Zug-



stabes beeinflusst. Aus der Literatur sind außerdem sog. „pore-bonding“-Zonen bekannt [81]. Es wird dabei von drei unterschiedlich dicken Zonen im Querschnitt einer Bindenaht ausgegangen. Eingeteilt wird in die Zone am Rand der Kerbe mit keiner Interdiffusion, worauf die sog. „pore-bonding“-Zone als Zwischenschicht mit wenig Interdiffusion folgt und die Mittelschicht mit der am besten ausgebildeten Interdiffusion. Für die beiden inneren Bereiche ist eine ausreichend lange Zeit oberhalb der Glas- oder Kristallitschmelztemperatur von wesentlicher Bedeutung. Die Molekülketten sind dann frei beweglich, können entgegen ihrer Zwangsorientierung relaxieren und über die Grenzfläche hinweg verschlaufen.

Zusammenfassend ergeben sich aber keine eindeutigen Korrelationen zwischen den Verzögerungszeiten, den damit einhergehenden Temperaturverhältnissen bei der Entstehung der Grenzfläche, der Verbundfestigkeit und der Kerbtiefe. Die im Diagramm gezeigten Kerbtiefen sind in bezug auf die Verzögerungszeit demnach nicht explizit zuzuordnen.

### 4.3 Schlussfolgerungen

Abschließend zu diesem Kapitel und überleitend in das Folgende ist trotz der Einzelbetrachtung der Einflüsse grundsätzlich von deren Zusammenwirken oder gegenseitigem Überlagern auszugehen. Die bisher experimentelle Analyse hat dies nachhaltig gezeigt.

In der theoretischen Überlegung gilt die Temperatur in der Kontaktzone beim Überspritzen als wichtigster Parameter für das Erreichen einer hohen oder niedrigen Verbundfestigkeit. Insgesamt scheinen die thermodynamischen Abläufe durch die Temperatureinstellungen so stark beeinflusst zu werden, dass Vorgaben ganz bestimmter Temperaturkombinationen über eine gute oder schlechte Verbindung entscheiden können. Bei einem amorphen Material sollte die Kontakttemperatur für einen signifikanten Zeitraum über der Glasstemperatur (Erweichungstemperatur) liegen und bei einem teilkristallinen Material über der Kristallitschmelztemperatur. Der Grund ist die notwendige makrobrownsche Beweglichkeit der Molekülketten bzw. Molekülkettensegmente für eine erfolgreiche Interdiffusion. In [5] wird über Ofenversuche mit nahezu drucklosem Fügen die notwendige Interdiffusionstemperatur für verschiedene Materialien anhand der jeweils erreichten Verbundfestigkeit ermittelt. Auf diese Weise kann eine Grenztemperatur angegeben werden, die zur Ausbildung einer Verbindung benötigt wird bzw. eine signifikante Festigkeitssteigerung bewirkt. Für Polypropylen wird demnach eine Mindestinterdiffusionstemperatur von ca. 130 °C angegeben, wobei an dieser Stelle noch nicht die maximale Verbundfestigkeit erzielt wurde. Das Optimum entsteht bei höheren Fügetemperaturen [5].

Zusammenfassend ergibt sich mit den vorher dargestellten Ausführungen, dass eine sinnvolle Beschreibung der Mechanismen nur unter Einbeziehung der Temperaturverläufe und der Formänderungsvorgänge möglich ist. Die Parameter, die auf diese beiden Einflussfaktoren direkt einwirken, wurden diskutiert. Im folgenden Kapitel wird ein Modell aufgestellt, das erstmals die veränderten Wärmeübergangsbedingungen aufgrund von Formänderungsvorgängen berücksichtigt.

# Kapitel 5

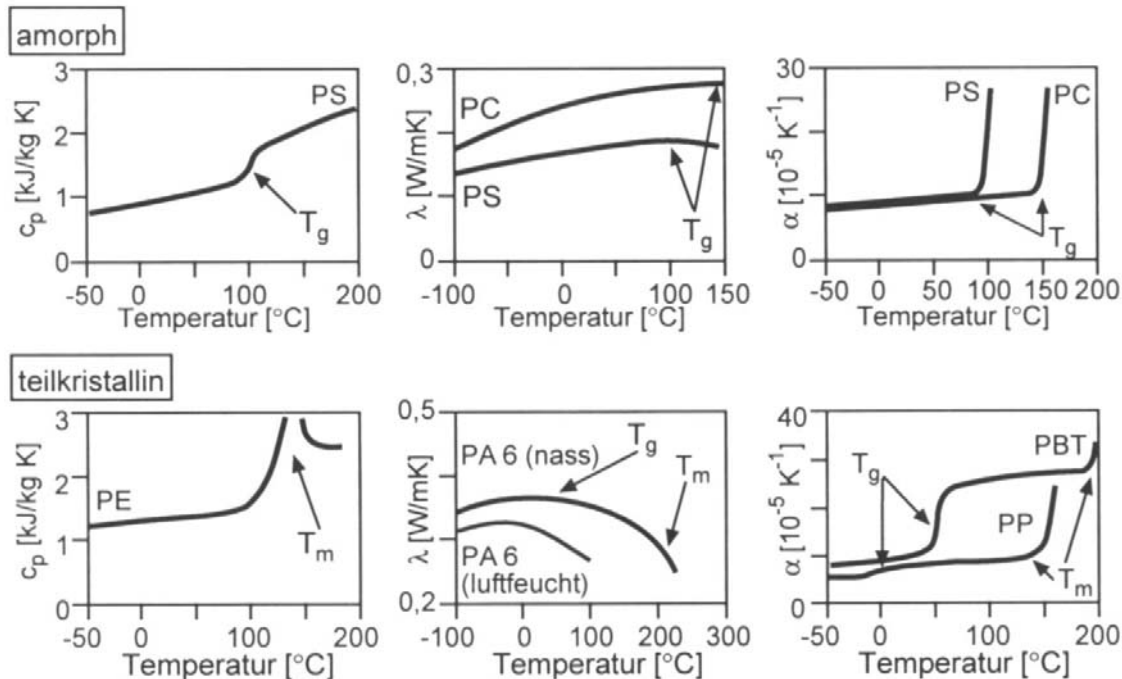
## Temperaturverläufe bei der Grenzflächenentstehung

Bekanntlich durchlaufen die Thermoplaste beim Spritzgießprozess thermisch-mechanische Zustandsänderungen, aus denen Volumenänderungen resultieren. Beim Plastifizieren kommt es zum Erwärmen und Schmelzen mit einer Volumenausdehnung, gleichzeitig mit der Formgebung beginnt das Abkühlen und Erstarren mit einer Volumenkontraktion. Dieser Ablauf hat einen besonderen Einfluss auf die Ausbildung einer Grenzfläche und ihre Eigenschaften, wie das vorangegangene Kapitel deutlich gezeigt hat (s. Kap. 4). Ziel dieses Kapitels ist insbesondere die Analyse der thermischen Situation im Grenzflächenbereich.

### 5.1 Relevantes thermisches Verhalten

Das thermische Verhalten von Kunststoffen wird charakterisiert durch die Wärmeformbeständigkeit, die spezifische Wärmekapazität, thermische Ausdehnung und die Wärmeleitfähigkeit. Bei Kunststoffen sind Materialgrößen, wie die spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, z. T. stark von der Temperatur und dem Druck sowie der daraus resultierenden Dichte abhängig. Außerdem unterscheiden sich amorphe und teilkristalline Thermoplaste in ihrem Verhalten aufgrund der differierenden Grundstruktur (s. Bild 5.1) [73].

Während die spezifische Wärme im Gebrauchstemperaturbereich für die Kunststoffe nur wenig von der Temperatur beeinflusst wird, weisen teilkristalline Thermoplaste einen Steilanstieg im Kristallitschmelzbereich auf. Diese Unstetigkeit kennzeichnet den Wärmebedarf zum Aufschmelzen der Kristallite. Die Wärmeleitfähigkeit ist bei Raumtemperatur für teilkristalline Kunststoffe



**Bild 5.1:** Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$ , der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und des linearen thermischen Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  (mit  $T_g$  als Glasübergangstemperatur,  $T_m$  als Schmelztemperatur) [73]

um so höher, je höher der kristalline Anteil und damit der Anteil an geordneten Molekülbereichen (und somit höherer Dichte) ist. Bis hin zum Kristallitschmelzbereich kommt es zum Auflösen der geordneten kristallinen Anteile und somit zum Abfall der Wärmeleitfähigkeit. Amorphe Thermoplaste haben durch ihren weniger geordneten Strukturaufbau eine geringere Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität als teilkristalline Typen [73, 84, 88, 89].

Für die Mehrkunststofftechnik ist von besonderer Bedeutung, dass die Makromolekülsegmente oberhalb der Erweichungs- und Schmelztemperatur ohne großen Widerstand umgelagert, verformt und gestreckt werden oder aneinander abgleiten können; die Konformation ändert sich ohne intermolekulare Wechselwirkung zu benachbarten Molekülen, und die Ketten nehmen eine mehr oder weniger gestreckte Form an [73]. Dieser Temperaturbereich sollte in der Kontaktzone durch die zweite Komponente erreicht werden, wenn eine hohe Verbundfestigkeit zu erzielen ist.

Der Vorspritzling durchläuft in erster Näherung folgende Zustandsbereiche bzw. Aggregatzustände:

- Phase 1: Erwärmen im Plastifizierzylinder auf Verarbeitungsschmelztemperatur (*Feststoff-*

*Schmelze-Übergang)*

- Phase 2: Nach dem Einspritzen sofort beginnender Abkühlprozess mit zunehmender Erstarrung vom Rand zur Formteilmittle, der während der Nachdruck- und Zwischenkühlphase weiter fortschreitet (*zeit- und ortsabhängiger Schmelze-Feststoff-Übergang*) (fester Zustand: zunehmende Behinderung der Umlagerung von Molekülabschnitten, der Drehungen von C-C-Bindungen oder des Abgleitens der Verschlaufungen sowie von Gestaltsänderungen)
- Phase 3: Nach dem Einspritzen der zweiten Komponente erfolgt an der Grenzfläche ein Wiedererwärmungsprozess, der bei ausreichender Wärmezufuhr zum Aufschmelzen einer gewissen Schichtdicke führt. In dieser Schicht liegt dann die Molekülbeweglichkeit für eine Interdiffusion vor (*Feststoff-Schmelze-Übergang*). Neben der Grenzfläche beginnt der Erstarrungsvorgang auf der Seite der zweiten Komponente an der Werkzeugwand und wird im Vorspritzling auch fortgesetzt (*zeit- und ortsabhängiger Schmelze-Feststoff-Übergang*)
- Phase 4: Mit dem Ende der Nachdruckphase 2 erfolgt die gemeinsame Abkühlung auf Entformungstemperatur (*zeit- und ortsabhängiger weiterer Schmelze-Feststoff-Übergang*)

Die genannten Zustandsänderungen gehen einher mit Volumenkontraktion und Wärmeausdehnung. Als Maß für die Volumenkontraktion wurde die Schwindung bereits diskutiert. Für die Wärmeausdehnung ist der lineare Ausdehnungskoeffizient bekannt, der bei Polyolefinen besonders groß ist [89]. Da bereits die Volumenkontraktion nachweislich einen Einfluss auf die Ausbildung einer Grenzfläche hat, ist möglicherweise auch die Volumenausdehnung von Bedeutung. Eine messtechnische Erfassung dieser Volumenveränderungen innerhalb des Werkzeugs ist kaum bzw. nur mit sehr großem Aufwand realisierbar. Die folgende Berechnung zum Temperaturverlauf im Vorspritzling und Fertigteil soll deshalb zur Abschätzung der eingefrorenen und wieder aufgeschmolzenen Bereiche beitragen.

## **5.2 Berechnung des Wärmeübergangs an der Grenzfläche**

### **5.2.1 Grundlagen und Abkühlverhältnisse**

Die Wärmeübertragung sowie der -übergangswiderstand beim Spritzgießen sind abhängig von unterschiedlichen Randbedingungen, wie

- des Wärmeübergangskoeffizienten und der thermischen Leitfähigkeit der Materialien,
- der Kontaktflächen- bzw. Oberflächenbeschaffenheit (Werkzeugoberflächenrauheit),
- dem Druck, der den Kontakt über eine gewisse Zeit aufrecht erhält, sowie
- der Kühlrate.

Somit wird die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung, Konvektion, Dissipation und Kompression bestimmt. Im Fall der Grenzflächenbildung beim Spritzgießen wird die Berechnung meist auf eindimensionale instationäre Wärmeleitung zwischen zwei unendlich ausgedehnten Platten beschränkt, um analytisch mit relativ geringem Aufwand ein Ergebnis zu erhalten [6]. Es werden die Gleichungsterme für Dissipation, Konvektion und Kompression dabei vernachlässigt und konstante Stoffwerte vorausgesetzt.

Damit folgt die bekannte Differentialgleichung (5.1) der instationären, eindimensionalen Wärmeleitung als

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (5.1)$$

worin  $T$  die Temperatur,  $t$  die Zeit,  $x$  die Laufoordinate ist und sich die Temperaturleitfähigkeit  $a$  als ein Maß für das materialabhängige Fortschreiten von Temperaturänderungen aus der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  (bei konstantem Druck, inkompressibel) und der Dichte  $\rho$  nach

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (5.2)$$

zusammensetzt.

Für kartesische Koordinaten erweitert sich die Gleichung (5.1) bei mehrdimensionaler Betrachtung und unter Berücksichtigung von Gleichung (5.2) zu:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (5.3)$$

Diese Darstellung des Problems bedeutet bekanntermaßen, dass die Beschreibung ebener und räumlicher Temperaturfelder im Vergleich zu eindimensionalen Temperaturverteilungen mit wesentlich höherem mathematischen Aufwand verbunden ist. Meist kann eine Lösung nur mittels

numerisch-graphischer Näherungsverfahren erarbeitet werden. Ausführlich wurden bezogen auf das Spritzgießen bereits analytische und numerische Lösungsmethoden für die genannten Differentialgleichungen zur instationären Wärmeleitung von [86] diskutiert. Da alle Materialeigenschaften, aus denen sich die Temperaturleitfähigkeit  $a$  ergibt, in unterschiedlicher Form von der Temperatur abhängen, müssten diese als Funktionen in die Berechnungen aufgenommen werden. In [86] wird darauf hingewiesen, dass Vereinfachungen nur bei amorphen Kunststoffen zu einer geringen Abweichung zwischen berechneten und experimentellen Abkühlverläufen führen, bei teilkristallinen Materialien dagegen durchaus bis zu 50 % Differenz auftreten können.

### 5.2.2 Randbedingungen für die Kernzugtechnik

Die Berechnung der Teilprozesse, die bei der Kernzugtechnik für die Ausbildung einer Kunststoff-Kunststoff-Grenzfläche von Bedeutung sind, wird nun in folgende Teilabschnitte gegliedert:

1. Füllung der Kavität mit der ersten Kunststoffschmelze (Schmelze 1 genannt<sup>1</sup>) und anschließende Nachdruckphase zur Ausbildung der Grenzfläche Schmelze 1/Kern
2. Ab Erreichen des Umgebungsdruckes zunehmender Kontaktverlust zwischen erkalteter Oberfläche des Vorspritzlings (Schmelze 1) und Werkzeugwand einschließlich des Kerns und dadurch bedingte Reduktion der Wärmeübertragung; nach Ablauf dieser Zwischenkühlphase erfolgt der Kernzug
3. Einspritzen und Nachdrücken der zweiten Kunststoffschmelze (Schmelze 2) in die dadurch frei gewordene Teilkavität zur Formation der endgültigen Grenzfläche Schmelze 1/Schmelze 2
4. Abkühlen der Komponenten in der Restkühlzeit

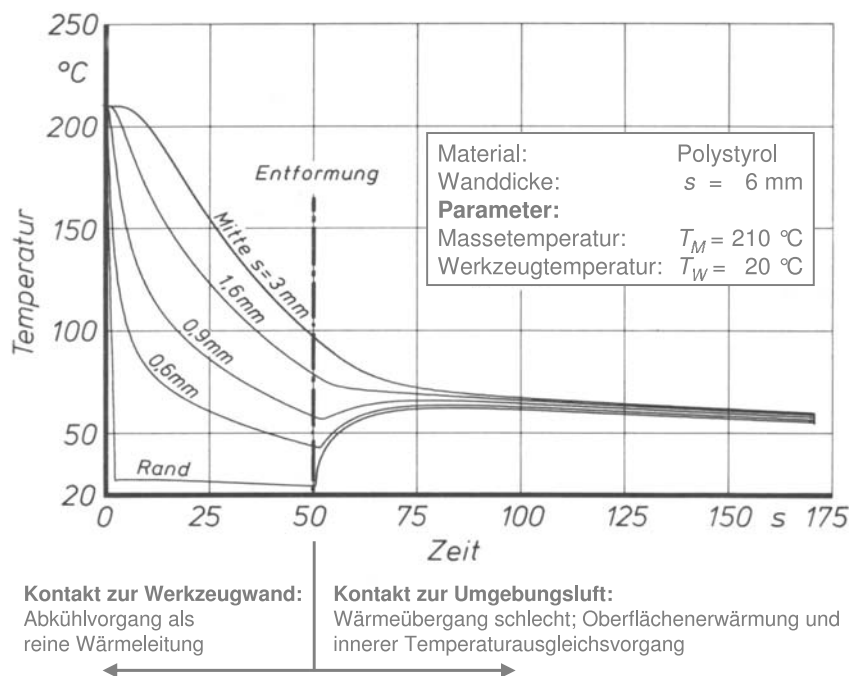
Erster und dritter Teilprozess beinhalten sowohl Strömungs- als auch Wärmetransportvorgänge. Da Spritzgussteile typischerweise dünnwandig sind, vollzieht sich der Strömungsvorgang bei der Ausbildung der Grenzfläche innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde. Außerdem ist die Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen eher schlecht. Das führt im weiteren zu der Annahme, dass die Strömungssituation während der kurzen Einspritzzeit kaum Einfluss auf die Wärmetransportvorgänge an der Grenzfläche ausübt. Zudem liegt die Grenzfläche im Untersuchungsfall am Ende

---

<sup>1</sup>Die Festlegung der Begriffe erfolgt für das Berechnungsprogramm einheitlich. Hinterlegt werden die dazugehörigen Stoffwerte, die für alle Phasen der Berechnung gleichermaßen gelten.

des Fließweges, so dass auch die Strömung während der Nachdruckphase vernachlässigbar ist. So dient das Nachdrücken lediglich dem Ausgleich der Schwindung und gewährleistet auf diese Weise einen guten Kontakt zum Partner (Schmelze 1 zum Kern). Mit abgeschlossener Nachdruckphase führt die ab diesem Zeitpunkt zunehmende Kurzzeitschwindung zu einer Verschlechterung des Kontaktes (vgl. Kap. 4) und damit der Wärmeübertragung. Dies wird in der Berechnung mit einem höheren thermischen Widerstand (kleinerer Wärmeübergangskoeffizient) berücksichtigt.

Ein Beispiel für den Temperaturverlauf an der Formteiloberfläche bei einem erhöhten thermischen Widerstand ist aus [90] entnommen und im Bild 5.2 dargestellt. Deutlich zu sehen ist die



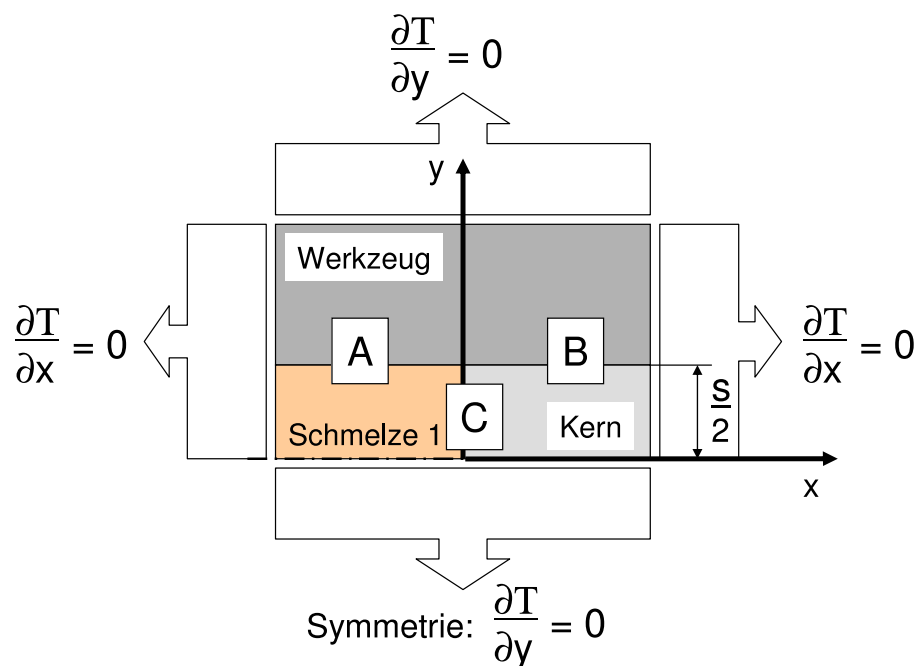
**Bild 5.2:** Temperaturverlauf im Formteil vor und nach der Entformung (nach [90])

nach der Entformung ansteigende Oberflächentemperatur, verursacht durch die schlagartig reduzierte Wärmeübertragung (freie Konvektion) im Kontakt mit der Umgebungsluft. Dies hat zur Folge, dass der innere Abkühlprozess verlangsamt wird, bis schließlich der Temperaturengleich zwischen der Mitte und dem Rand des Formteils erfolgt ist. Danach kann die weitere Abkühlung stattfinden, allerdings wesentlich langsamer als beim Kontakt mit dem viel besser Wärme transportierenden Metall. Hinzu kommt im Spritzgießwerkzeug die kontinuierliche Wärmeabfuhr durch das Temperiersystem mit einem geeigneten Medium (Wasser, Öl), wobei eine gezielte Auslegung für eine gleichmäßige Abkühlung des Formteils bis zur Entformung sorgt.



Gültigkeit hat der im Bild 5.2 dargestellte Temperaturverlauf dann, wenn von einer natürlichen Luftkühlung mit freier Konvektion ausgegangen wird. Unter Einsatz von strömender Kühlluft wird beispielsweise bei thermogeformten Bauteilen eine schnellere Abkühlung erzwungen [87]. Im geschlossenen Spritzgießwerkzeug ist aufgrund der ab einem bestimmten Zeitpunkt beginnenden Schwindung zur Werkzeugwand und zum Kern ebenfalls von einem erhöhten thermischen Widerstand auszugehen. Da es sich bei dem verursachten Spalt nur um einen sehr geringen Abstand handelt, ist immer noch mit einem stärkeren Wärmetransport zu rechnen, als im abgebildeten Fall bei freier Konvektion.

Unter Berücksichtigung einer möglichen Erwärmung der Kontaktfläche des Vorspritzlings während einer bestimmten Zwischenkühlphase vor dem Einspritzen der zweiten Komponente sind auch die im Vorfeld dargestellten Verbundfestigkeiten nachvollziehbar (s. Kap. 4, Bild 4.2). Um die Temperaturverläufe für eine mögliche Korrelation mit der von der Vorspritzlingtemperatur abhängigen Verbundfestigkeit zu ermitteln, wird im folgenden die thermische Situation an einer Grenzfläche als ein instationäres, zweidimensionales Wärmeübertragungsproblem (Bild 5.3) unter Einbeziehung der Kühlwirkung des Werkzeuges betrachtet. Laut Bild 5.3 wird der Einfluss



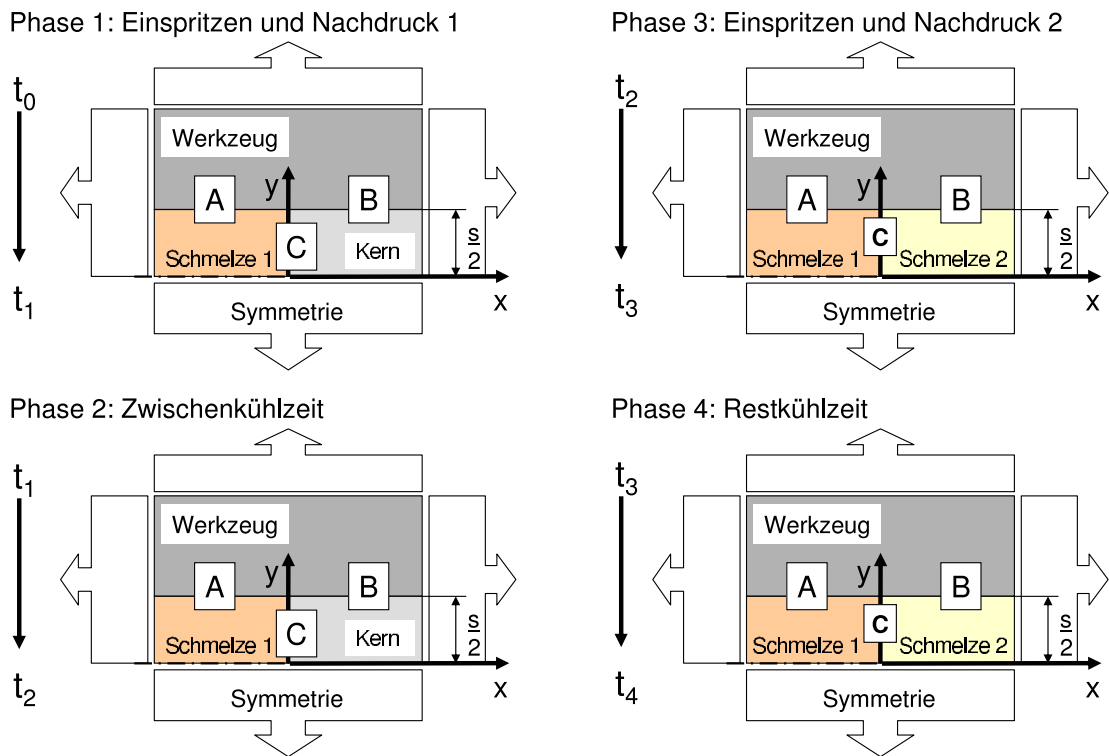
**Bild 5.3:** Prinzip Wärmeübergang 2-dimensional (Kontaktflächen: A - Vorspritzling (Schmelze 1) und Werkzeug; B - Kern oder Fertigspritzling (Schmelze 2) und Werkzeug; C - Vorspritzling und Kern oder Vorspritzling und Fertigspritzling)

der Breite des Formteils als dritte Dimension vernachlässigt, da der wesentliche Wärmetransport in Dickenrichtung ( $y$ ) stattfindet. Weiterhin gilt als allgemeine Randbedingung, dass der Temperaturgradient in genügend großer Entfernung zum betrachteten Gebiet als Null angenommen wird. Die drei angegebenen Grenzflächen A, B und C können bezüglich der Wärmeübergangsbedingungen variiert werden. Aufgrund der Symmetriebedingung geht nur die Hälfte der Formteiwanddicke und Kernbreite in die Betrachtung ein.

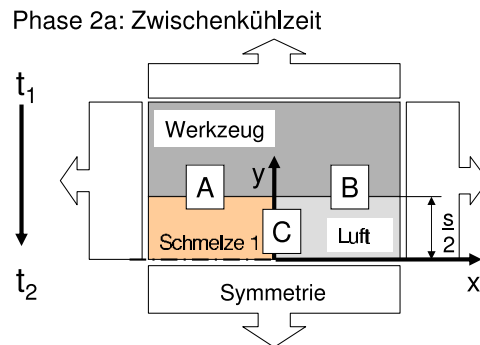
Die rechnerische Behandlung eines Wärmeleitungsproblems besteht darin, die genannte Differentialgleichung (Gl. (5.3)) unter Berücksichtigung von Anfangs- und Randbedingungen zu lösen. Es wird angenommen, dass am Anfang der Betrachtung in der Schmelze und im Werkzeug, einschließlich des Kerns, jeweils eine einheitliche Temperatur vorliegt, die den im Experiment eingestellten Masse- und Werkzeugtemperaturen entspricht. Damit wird die ohnehin geringfügige Abkühlung der Schmelze durch Werkzeug und Kern während der Einspritzphase vernachlässigt. In einigen Veröffentlichungen sind bereits Ergebnisse zum Wärmeübergang an Kunststoff-Kunststoff-Grenzflächen beim Mehrkomponentenspritzgießen aufgezeigt [5, 6, 8]. Oft wird die Kontakttemperatur anhand eines eindimensionalen Temperaturlausgleichsproblems analytisch ermittelt. In [5] werden außerdem numerisch berechnete Temperaturprofile in Vorspritzling und zweiter Komponente in Abhängigkeit von der Zeit nach dem Überspritzen vorgestellt. Generell wird aber für die Nachdruck- und Zwischenkühlphase der gleiche Wärmeübergangskoeffizient zugrunde gelegt, so dass ein vereinfachtes Bild der Temperaturverläufe entsteht.

### **Berechnungsablauf**

Entsprechend dem Prozessablauf gliedert sich die präzisierete Berechnung in vier Stufen (Bild 5.4). In der Zwischenkühlphase kann in der Kontaktfläche C sowohl der Kern (Fall 1) als Übertragungspartner zum Vorspritzling eingesetzt werden als auch Luft (Fall 2). Der Wechsel kann dann von Bedeutung sein, wenn die Wärmeübergangsbedingungen der Dreh- oder Transfertechne vereinfacht nachgestellt werden sollen. Der Vorspritzling wird hier bei geöffnetem Werkzeug zur Fertigspritzstation umgesetzt und steht so teilweise in Kontakt mit der Umgebungsluft. Mit dem vorliegenden Modell können die unterschiedlichen Temperaturprofile ermittelt sowie Vergleiche hinsichtlich der eingefrorenen bzw. später wieder aufgeschmolzenen Zonen gezogen werden.



(a) Fall 1: Kernkontakt



(b) Fall 2: Luftkontakt

**Bild 5.4:** 4-Phasen-Berechnung des Mehrkunststoffspritzgießens (Kontaktflächen: A - Vorspritzling (Schmelze 1) und Werkzeug; B - Kern oder Fertigspritzling (Schmelze 2) und Werkzeug; C - Vorspritzling und Kern oder Vorspritzling und Fertigspritzling)

### Anfangs- und Randbedingungen

Weiterhin sind folgende Anfangs- und Randbedingungen für die einzelnen Phasen festgelegt worden:

1. Phase:  $t_0 \leq t \leq t_1$  mit  $t = t_0 = t_{N1,0} = 0$  als Ende Einspritzen und Beginn Nachdruck Schmelze 1 und  $t = t_1 = t_{N1}$  als Ende der Nachdruckphase Schmelze 1

- bei  $t = t_0 = 0$  gilt:
  - Werkzeugtemperatur:  $T_W(t_0) = T_{W0}$
  - Kerntemperatur:  $T_K(t_0) = T_{W0}$
  - Temperatur der Schmelze 1:  $T_{S1}(t_0) = T_{M1}$  wobei  $T_{M1}$  die Anfangstemperatur der Schmelze 1 ist.
- bei  $t_0 < t \leq t_1$  Nachdruckphase Schmelze 1
  - Wärmefluss an den Kontaktflächen A:  $q_{S1W} = \alpha_1(T_{S1} - T_W)$  und C:  $q_{S1K} = \alpha_1(T_{S1} - T_K)$  mit  $\alpha_1$  als Wärmeübergangskoeffizienten für die Grenzfläche Schmelze 1 / Werkzeug und Schmelze 1 / Kern
  - Kontinuität im Wärmeübergang an der Kontaktfläche B:  $\frac{\partial T_W}{\partial y} = \frac{\partial T_K}{\partial y}$

2. Phase:  $t_1 \leq t \leq t_2$  mit Ergebnisübergabe aus Phase 1 bei  $t = t_1 = t_{N1}$ ; weiter gilt bei:  $t_{Kzw0} = 0$  als Beginn der Zwischenkühlphase und bei  $t = t_2 = t_{Kzw}$  als Ende der Zwischenkühlphase Schmelze 1

- bei  $t = t_1 = t_{Kzw0} = 0$  gilt:
  - Werkzeugtemperatur:  $T_W(t_1) = T_W(t_{N1})$
  - Fall 1: Kerntemperatur:  $T_K(t_1) = T_W(t_{N1})$
  - Fall 2: Lufttemperatur:  $T_L(t_1) = T_U$  mit  $T_U$  als Umgebungstemperatur
  - Temperatur der Schmelze 1:  $T_{S1}(t_1) = T_{S1}(t_{N1})$
- bei  $t_1 < t \leq t_2$  Zwischenkühlphase Schmelze 1 mit dem Wärmefluss an den Kontaktflächen
  - A:  $q_{S1W} = \alpha_2(T_{S1} - T_W)$
  - B (Fall 1): analog Phase 1 bei Kontakt Kern / Werkzeug  $\frac{\partial T_W}{\partial y} = \frac{\partial T_K}{\partial y}$
  - B (Fall 2):  $q_{LW} = \alpha_L(T_W - T_L)$  bei Kontakt Luft / Werkzeug

- C (Fall 1):  $q_{S1K} = \alpha_2(T_{S1} - T_K)$
- C (Fall 2):  $q_{S1L} = \alpha_L(T_{S1} - T_L)$  wobei  $T_L$  die aktuelle Temperatur der Luft ist.

Mit Beenden der Nachdruckphase verringert sich der Wärmeübergangskoeffizient in den Kontaktflächen A und C aufgrund der Schwindung. Der möglicherweise zeitabhängige Schwindungsverlauf (und somit auch der Wärmeübertragung  $\alpha(t)$ ) wird hierbei zur Vereinfachung vernachlässigt. Es wird daher ein konstanter, aber geringerer Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_2$  für die erwähnten Kontaktflächen eingesetzt. In der Variation ist im Gegensatz dazu der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_L$  als nochmals verringert einzusetzen, wenn Umgebungsluft der Kontaktpartner ist.

3. Phase:  $t_2 \leq t \leq t_3$  mit Ergebnisübergabe aus Phase 2 bei  $t = t_2 = t_{Kzw}$ ; weiter gilt bei:  $t_{N2,0} = 0$  als Ende Einspritzen und Beginn Nachdruck Schmelze 2 und  $t = t_3 = t_{N2}$  als Ende der Nachdruckphase Schmelze 2

- bei  $t_{N2,0} = 0$  bzw.  $t = t_2 = t_{N1} + t_{Kzw}$  gilt:
  - Werkzeugtemperatur:  $T_W(t_2) = T_W(t_{N1} + t_{Kzw})$
  - Temperatur der Schmelze 1:  $T_{S1}(t_2) = T_{S1}(t_{N1} + t_{Kzw})$
  - Temperatur der Schmelze 2:  $T_{S2}(t_2) = T_{M2}$  mit  $T_{M2}$  als Anfangstemperatur von Schmelze 2.
- bei  $t_2 < t \leq t_3$  Nachdruckphase Schmelze 2 mit dem Wärmefluss an den Kontaktflächen
  - A:  $q_{S1W} = \alpha_2(T_{S1} - T_W)$
  - B:  $q_{S2W} = \alpha_1(T_{S2} - T_W)$
  - C:  $\lambda_{S1} \frac{\partial T_{S1}}{\partial x} = \lambda_{S2} \frac{\partial T_{S2}}{\partial x}$

mit den Wärmeleitkoeffizienten  $\lambda_{S1}$  und  $\lambda_{S2}$ . Für diese Phase muss weiterhin an der Kontaktfläche Schmelze 1 / Werkzeug der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_2$  gelten, wohingegen an der Kontaktfläche Schmelze 2 / Werkzeug aufgrund der Nachdruckwirkung der geringere thermische Widerstand mit  $\alpha_1$  berücksichtigt wird.

4. Phase:  $t_3 \leq t \leq t_4$  mit Ergebnisübergabe aus Phase 3 bei  $t = t_3 = t_{N2}$ ; weiter gilt bei:  $t_{Krest0} = 0$  als Beginn der Restkühlphase und  $t = t_4 = t_{Krest}$  als Ende der Restkühlphase

- bei  $t_{Krest0} = 0$  bzw.  $t = t_3 = t_{N1} + t_{Kzw} + t_{N2}$  gilt:

- Werkzeugtemperatur:  $T_W(t_3) = T_W(t_{N1} + t_{Kzw} + t_{N2})$
- Temperatur der Schmelze 1:  $T_{S1}(t_3) = T_{S1}(t_{N1} + t_{Kzw} + t_{N2})$
- Temperatur der Schmelze 2:  $T_{S2}(t_3) = T_{S2}(t_{N2})$
- bei  $t_3 < t \leq t_4$  Restkühlphase ohne Nachdruckwirkung mit dem Wärmefluss an den Kontaktflächen
  - A:  $q_{S1W} = \alpha_2(T_{S1} - T_W)$
  - B:  $q_{S2W} = \alpha_2(T_{S2} - T_W)$
  - C:  $\lambda_{S1} \frac{\partial T_{S1}}{\partial x} = \lambda_{S2} \frac{\partial T_{S2}}{\partial x}$

wobei der Unterschied zu Phase 3 lediglich darin besteht, dass sich der Wärmeübergangskoeffizient an der Kontaktfläche Schmelze 2 / Werkzeug mit Beenden der Nachdruckphase für die zweite Komponente ebenfalls aufgrund der Schwindung auf  $\alpha_2$  verkleinert. Unter der Bedingung, dass im vorliegenden Fall dasselbe Material beim Aneinanderspritzen in Kontakt tritt, gilt  $\lambda_{S1} = \lambda_{S2}$ .

### Materialdaten und Prozessparameter in der Berechnung

Obwohl die thermischen Materialdaten, wie Dichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität temperatur- und auch druckabhängige Funktionen sind, wurde vereinfachend mit mittleren Werten gerechnet. Die verwendeten Stoffwerte und Prozessparameter sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Mit der Kenntnis, dass diese Vereinfachung insbesondere bei amorphen Kunststoffen Gültigkeit hat, wird im folgenden die Berechnung beispielhaft mit dem ebenfalls in den Experimenten eingesetzten SAN durchgeführt. Grundsätzlich werden, wie sich im Vergleich der Stoffdaten (Tab. 5.1) bereits andeutet, die berechneten Ergebnisse in den Tendenzen verallgemeinernd auf andere Typen übertragbar sein.

Variabel einstellbar sind neben den Stoffdaten und den bereits angegebenen Prozesstemperaturen auch die Prozesszeiten, die den jeweiligen Temperaturabfall (Abkühlung) oder -anstieg (Wiedererwärmung durch die zweite Komponente) für die einzelnen Phasen der Berechnung begrenzen. Um der Realität Rechnung zu tragen, werden die im Experiment mit SAN optimierten Zeiten eingesetzt. Bei den vorher genannten Prozesstemperaturen (Tab. 5.1) hat sich somit eine Nachdruckzeit von 10 s ergeben. Mit dem Ende der Nachdruckzeit 1 wird eine für beide Fälle (Kern, Luft) konstante Zwischenkühlphase absolviert, an die danach Phase 3 mit Einspritzen und Nachdruck 2 anschließt. Der Prozess wird, wie in der Praxis üblich, mit der Restkühlphase (Phase 4) beendet (Tab. 5.2).

**Tabelle 5.1:** Materialdaten und Prozessparameter (mit Vergleichsangaben für PP) (Stoffdaten aus Literatur [84, 91] sowie Materialdatenbank MOLDFLOW)

Materialdaten	Wert in für	Stahl	Luft	SAN	PP
Dichte $\rho$ (bei Raumtemperatur)	$\frac{kg}{m^3}$	7800	1,17	1080	910
spezifische Wärmekapazität $c_p$	$\frac{J}{kgK}$	460	1007	1300	1730
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	$\frac{W}{Km}$	29	0,026	0,17	0,20
Glastemperatur $T_g$	$^{\circ}C$	-	-	95-105	0-20
Kristallitschmelzbereich $T_K$	$^{\circ}C$	-	-	-	165-175
<b>Prozessparameter</b>					
Massetemperatur $T_{M1,2}$	$^{\circ}C$	-	-	220	220
Werkzeugtemperatur $T_{W0}$	$^{\circ}C$	20	-	-	-
Umgebungstemperatur $T_U$	$^{\circ}C$	-	23	-	-

Die Wärmeübergangskoeffizienten sind nur mit sehr großem Aufwand messtechnisch zu bestimmen (s. auch [86]). Es erfolgt deshalb eine iterative Anpassung anhand der Entformungstemperatur, die an der Oberfläche mittels Infrarotmessgerät bestimmt wurde. Diese Einschränkung

**Tabelle 5.2:** Prozesszeiten für die Berechnung analog dem Experiment (SAN/SAN)

Phase	Zeitdauer
1	$t_{N1} = 10$ s
2	$t_{Kzw} = 10$ s
3	$t_{N2} = 10$ s
4	$t_{Krest} = 30$ s

ermöglicht eine schnelle Trendberechnung, aus der am Ende eine realistische Entformungstemperatur am Rand hervorgehen sollte. Aussagefähig können die ermittelten Temperaturprofile vorerst nicht in den Absolutwerten sein. Dies bedarf genauer messtechnischer Abgleiche mit den realen Temperaturen im Werkzeug und bei der Entformung. Im Ergebnis des Iterationsprozesses und anhand verschiedener Literaturquellen [86, 87] sind die in der Tabelle 5.3 angegebenen Wärmeübergangskoeffizienten für die einzelnen Phasen ausgewählt worden.

**Tabelle 5.3:** Verwendete Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_i$  in  $\frac{W}{m^2K}$

Wärmeübergangskoeffizient	Wert
$\alpha_1$	500
$\alpha_2$	100
$\alpha_L$	30

### 5.2.3 Auswahl eines geeigneten FEM-Berechnungsprogrammes

Bei der Nutzung von kommerzieller Software, die speziell für die Simulation der Formfüll- und Abkühlvorgänge des Spritzgießprozesses entwickelt wurden, tritt ein wesentlicher Nachteil hinsichtlich der Berechnung von Wärmetransportvorgängen auf. Oft sind die Berechnungsgrundlagen bzw. Anfangs- und Randbedingungen in einer „Blackbox“ schwer zugänglich. Dadurch können individuelle Vorgaben nur indirekt über die Auswahl eines in der Datenbank verfügbaren Materials gemacht werden. Außerdem werden Vereinfachungen beim temperatur- und zeitabhängigen Verhalten vorgenommen, die z. B. bei Vergleichsberechnungen mit der Software MOLD-FLOW aufgrund viel zu hoher Wärmeübergangskoeffizienten (bis zu 25.000,00  $\frac{W}{m^2K}$ ) eine wesentlich höhere Abkühlgeschwindigkeit ausgewiesen haben. Bei Kenntnis der realistischen Koeffizienten sollten diese separat angepasst werden.

Zur Lösung der oben erläuterten Wärmetransportvorgänge wurde in dieser Arbeit das Berechnungsprogramm FIDAP (FLUENT Inc.) verwendet. FIDAP ist ein Finite-Elemente-Programm (FEM) zur feldmäßigen Berechnung von Strömungs-, Wärme- und Stoffaustauschvorgängen. Es kann sowohl zur Berechnung von komplexen Strömungsvorgängen mit überlagerten Wärmeaustauschprozessen verwendet werden, als auch, wie in diesem Fall, ausschließlich zur Bestimmung von zeit- und ortsabhängigen Temperaturprofilen von in Kontakt stehenden Materialien. Angewendet wird dabei die oben beschriebene instationäre Wärmeleitung.

Das Berechnungsgebiet wird durch rechteckige Elemente diskretisiert sowie mit feineren Mesh-Abständen in den relevanten Bereichen untersetzt (s. Bild 5.5). Die Approximation der räumlichen Koordinaten und der Temperatur erfolgt in einem bilinearen Ansatz. Zur Integration des zeitabhängigen Terms wird ein Prediktor-Korrektor-Verfahren verwendet, wobei der Prediktor-Schritt nach dem expliziten Euler'schen Schema und der Korrektur-Schritt nach dem impliziten Euler'schen Schema erfolgt. Die Lösung des algebraischen Gleichungssystems erfolgt mit dem Newton-Raphson-Verfahren.



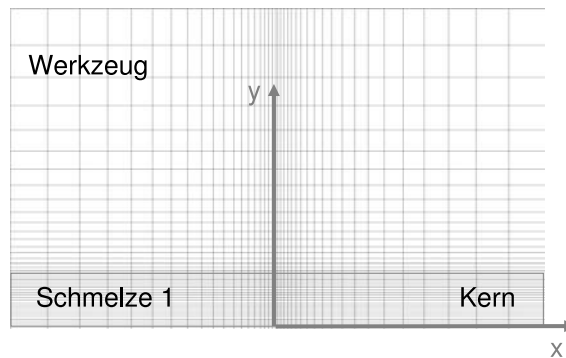


Bild 5.5: FE-Netz in FIDAP

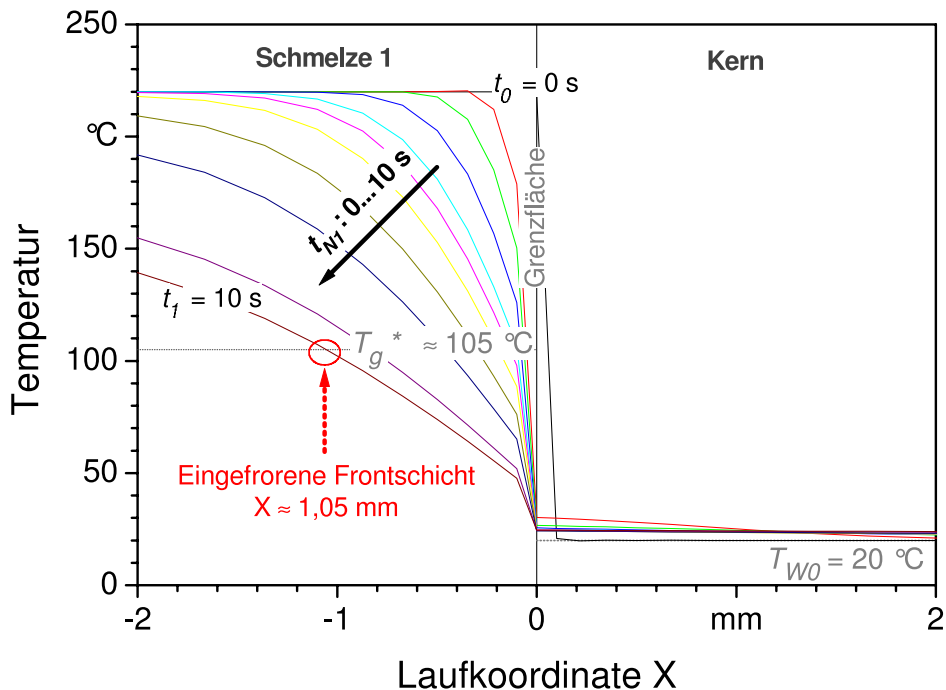
### 5.3 Ergebnisse für Temperaturprofile und Abkühlverläufe

Im folgenden wird ein Vergleich zwischen den beiden Fällen Kern- und Luftkontakt in der Grenzfläche vorgestellt. Dabei bleibt der Vorspritzling einerseits einen festgelegten Zeitraum mit dem Kern in idealem Kontakt und mit Beenden der Nachdruckzeit setzt dann der bereits erwähnte verschlechterte Wärmetransport aufgrund der Schwindung ein. Andererseits wird für denselben Zeitraum ein Ergebnis gegenübergestellt, bei dessen Ermittlung eben dieser Effekt durch Luft als Kontaktpartner mit nochmals verringertem Wärmetransport verstärkt wird. Es werden die resultierenden Temperaturprofile für die genannten vier Phasen dargestellt.

#### 5.3.1 Phase 1: Einspritzen und Nachdruck 1

Die Ergebnisse aus Phase 1 (Einspritzen und Nachdruck 1:  $t_{N0} \leq t \leq t_{N1}$ ) gelten sowohl für Kern- als auch für Luftkontakt als Grundlage, da der Abkühlprozess hier noch für beide Fälle übereinstimmt. Unterschiede treten erst ab der Zwischenkühlphase (Phase 2) auf, so dass dann die Gegenüberstellung der Ergebnisse vorgenommen wird. Bild 5.6 zeigt demnach den für beide Fälle identischen Temperaturverlauf der Phase 1 ( $t_0 \leq t \leq t_1$ ), d. h. dieser Abkühlverlauf für den Vorspritzling wird bei dem folgenden Vergleich zugrunde liegen. Dargestellt ist die berechnete Temperatur über der Laufkoordinate X in der Formteilmittte (bei Koordinate Y=0). Dieses Ergebnis ist wesentlich davon abhängig, wie lang die Nachdruckphase dauert und somit wie stark der Vorspritzling abgekühlt wird.

Aus Bild 5.6 geht weiter hervor, dass mit den zeitlichen Grenzen und unter den genannten Anfangsbedingungen (Prozesstemperaturen) nach 10 s in der Formteilmittte eine Schicht von etwa

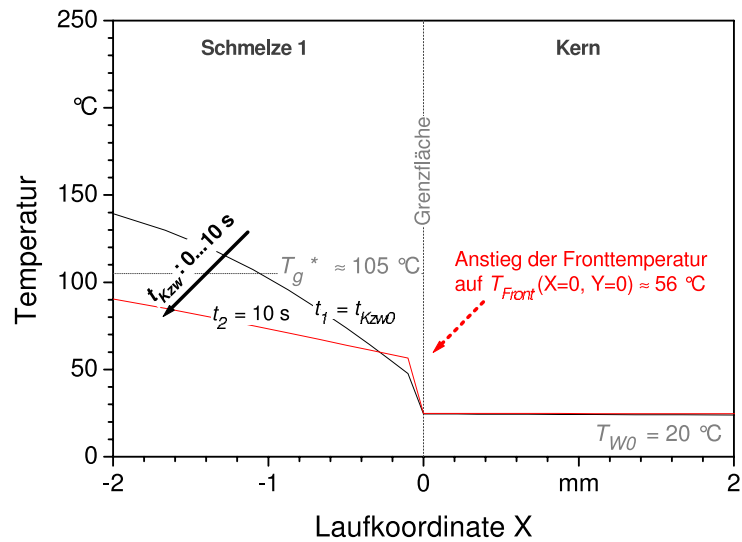


**Bild 5.6:** Temperaturverlauf in der Formteilmittle für Phase 1 ( $t_0 \leq t \leq t_1$ : Einspritzen und Nachdruck 1) (SAN/SAN)

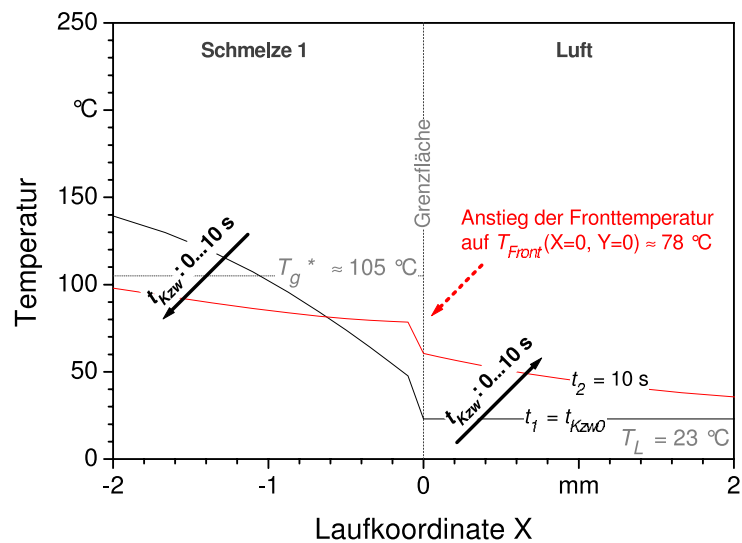
1,05 mm entsteht, wo die Glastemperatur (Literaturwert [91]) unterschritten wird. Für die Praxis bedeutet dies eine Grenze der makrobrownschen Beweglichkeit der Moleküle, einhergehend mit fixierten Molekülorientierungen. Weiterhin ist aus den vorher beschriebenen Versuchen bekannt, dass die Grenzfläche dann eine Deformation erfährt bzw. die zweite Komponente in das Innere des Vorspritzlings durchbricht, wenn diese eingefrorene Frontschicht nicht dick genug ist (vgl. Kap. 4, Bild 4.8). Die eingefrorene Frontschicht wird im Laufe der Zwischenkühlphase bei gutem Wärmetransport weiter anwachsen und die innere Abkühlung des Vorspritzlings fortschreiten. Umgekehrt trägt die innere Restwärme des Vorspritzlings bei verringertem Wärmetransport durch einen höheren thermischen Widerstand zur Wiedererwärmung der Kontaktfläche bei.

### 5.3.2 Phase 2: Zwischenkühlphase

Im Gegensatz zu Phase 1 muss in Phase 2 (Zwischenkühlphase ( $t_{N1} \leq t \leq t_{Kzw}$ )) dem Einfluss unterschiedlicher Wärmeübertragung bei Kern- oder Luftkontakt Rechnung getragen werden. Bild 5.7 zeigt die Ergebnisse für den Temperaturverlauf in einer Gegenüberstellung der beiden Fälle (Kern oder Luft). Sinkt die Temperatur innerhalb des Vorformlings bei Kernkontakt weiter



(a) Fall 1: Kernkontakt



(b) Fall 2: Luftkontakt

**Bild 5.7:** Temperaturverläufe in der Formteilmittle für Phase 2 ( $t_1 \leq t \leq t_2$ : Zwischenkühlphase) (SAN/SAN)

ab, wird der Abkühlprozess dagegen bei Luftkontakt vom Temperaturengleichungsvorgang mit dem Formteilinneren stärker überlagert. Die wesentliche Auswirkung tritt an der Kontaktfläche (Front) auf. Resultierend ergibt sich für Fall 1 unmittelbar vor dem Einspritzen der zweiten Komponente eine Temperatur von  $56\text{ °C}$  und für Fall 2 von  $78\text{ °C}$ , so dass in der folgenden Phase 3 (Einspritzen

und Nachdruck 2) ein weiterer Unterschied bei der Erwärmung durch die zweite Komponente zu erwarten ist.

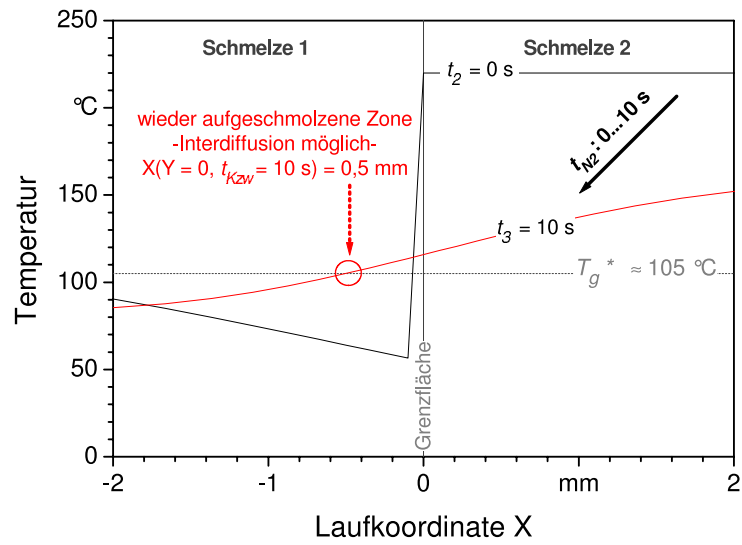
Aus der Darstellung der Verbundfestigkeit im Kapitel 4 (Bilder 4.2 und 4.3), ergab sich im Fall 1 bereits bei einer Zwischenkühlzeit von etwa 10 s (SAN) eine annähernd optimale Verbundfestigkeit. Bleibt der Kern während der Zwischenkühlphase nahe der Front des Vorspritzlings, ist offensichtlich trotzdem eine „Mindesthaltezeit“ erforderlich, bis sowohl Formänderungsvorgänge abgeschlossen sind, als auch das Temperaturniveau günstig ist.

### 5.3.3 Phase 3: Einspritzen und Nachdruck 2

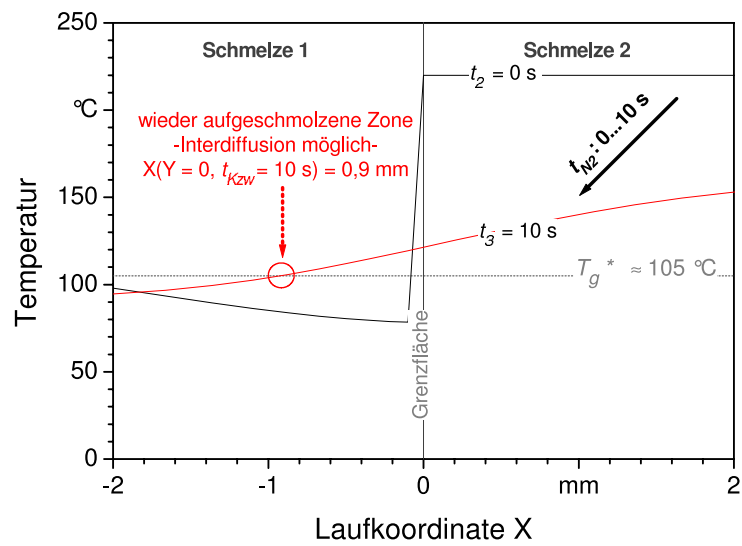
Nachdem der Kern gezogen bzw. im Fall 2 das Werkzeug wieder geschlossen wurde, folgt das Einspritzen der zweiten Komponente. Die Schmelze 2 tritt mit der Front des Vorspritzlings in Kontakt. Unter der Voraussetzung einer guten Benetzung wird ab diesem Zeitpunkt ein Temperaturengleich ablaufen, der in der Berechnung durch die Nachdruckwirkphase 2 und die Restkühlphase ohne jegliche Nachdruckwirkung (Phase 4) weiter untergliedert wird. Im Bild 5.8 sind die Temperaturverläufe jeweils zu Beginn und am Ende der Phase 3 ( $t_2 \leq t \leq t_3$ ) dargestellt. Am Anfang bei  $t_{N2} = 0$  gibt die Berechnung den erwarteten Temperatursprung zwischen der zweiten Komponente und dem Vorspritzling als Anfangswerte an. Nach Ablauf der Nachdruckphase kann der resultierenden Temperaturkurve auf der Seite des Vorspritzlings ein Trend zur wieder aufgeschmolzenen Frontschicht entnommen werden. Der Vergleich ergibt zunächst sowohl für Fall 1 mit Kernkontakt in der Zwischenkühlphase als auch mit Luftkontakt ein Überschreiten der Glastemperatur. Demnach steht in beiden Fällen die für eine Interdiffusion notwendige Molekülbeweglichkeit zur Verfügung. Bei direkter Gegenüberstellung ergibt sich für die Luftvariante eine annähernd doppelt so breite angeschmolzene Zone wie für die Kernvariante. Zusammenfassend kann dieser Unterschied in der Praxis eine größere Grenzschicht ergeben, wobei nachzuweisen ist, ob damit auch eine größere Verbundfestigkeit einhergeht.

### 5.3.4 Phase 4: Restkühlphase

Im Bild 5.9 wird der Temperaturengleichs- und Abkühlvorgang für den Mehrkunststoffspritzgießprozess abgeschlossen. Danach wird das Formteil entformt. Während der Abkühlphase (Phase 4 ( $t_3 \leq t \leq t_4$ )) für beide Seiten der Grenzfläche (Vorspritzling und Fertigformling) wird der Temperaturengleichvorgang durch den vom Rand (Werkzeugwand) erfolgenden Wärmetransport überlagert. Bei einer danach einsetzenden Entformung würde in diesem Beispiel jeweils in



(a) Fall 1: Kernkontakt

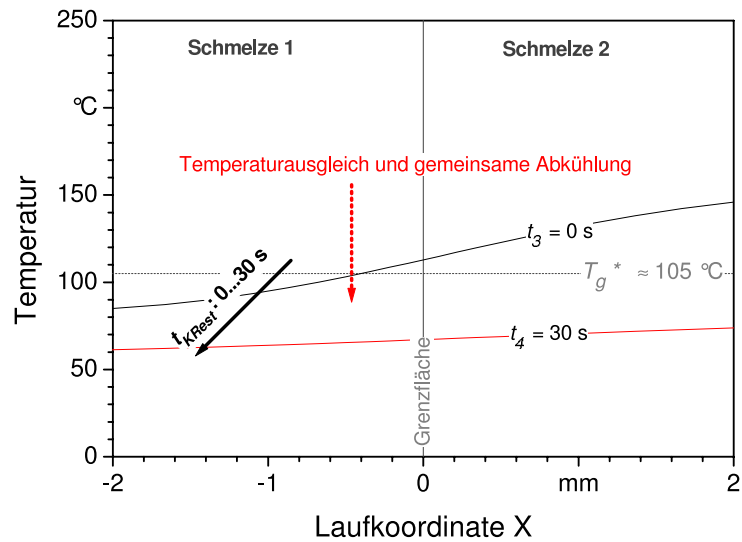


(b) Fall 2: Luftkontakt

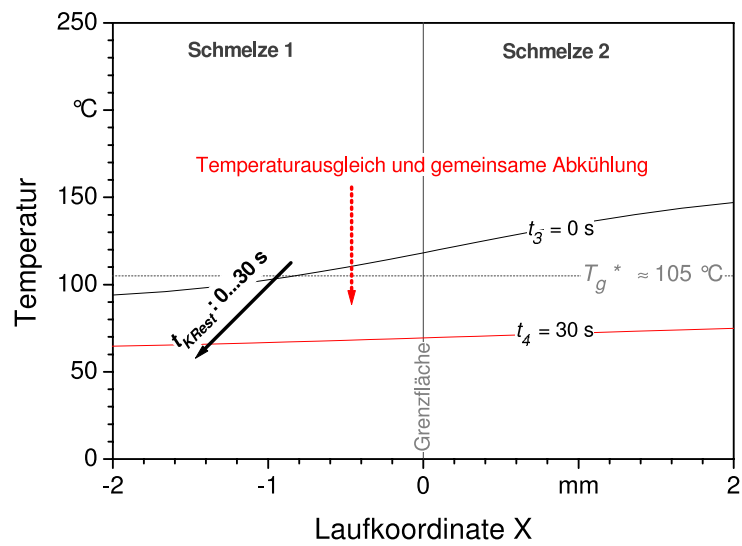
**Bild 5.8:** Temperaturverläufe in der Formteilmittle für Phase 3 ( $t_2 \leq t \leq t_3$ : Einspritzen und Nachdruck 2) (SAN/SAN)

der Mitte ( $Y=0$ ) im Vorspritzling und im Fertigformling annähernd ein identisches Temperaturprofil vorliegen. Obwohl hier gilt, dass die Kühlzeit für den Vorspritzling länger ist, als die des Fertigformlings, erreichen beide Partner am Ende des Zyklusses ein ähnliches Temperaturniveau.

Um die berechnete Temperatur am Ende in bezug auf die Praxisrelevanz einordnen zu können,



(a) Fall 1: Kernkontakt

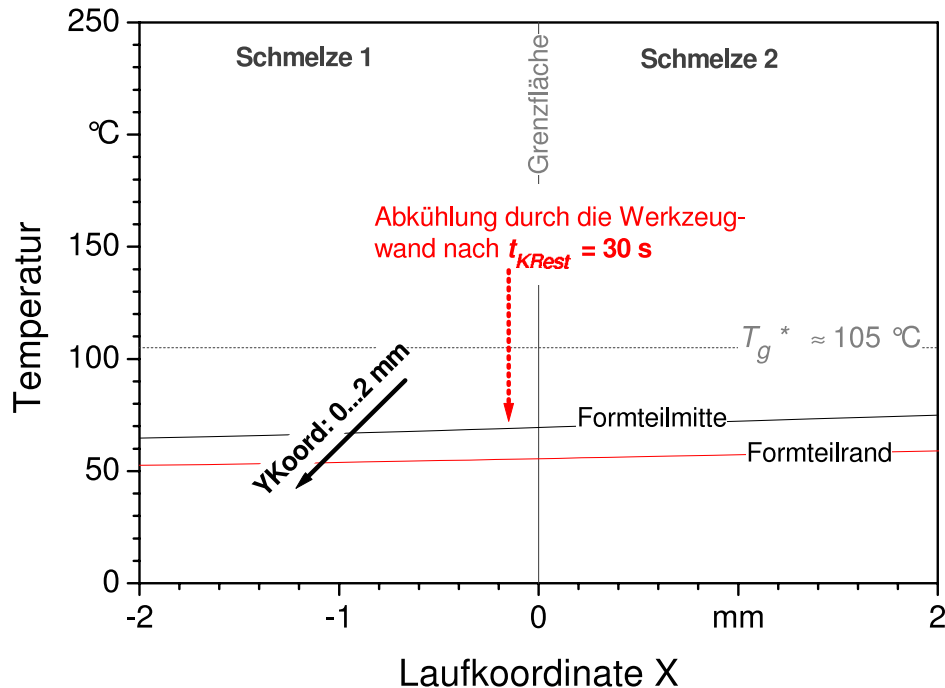


(b) Fall 2: Luftkontakt

**Bild 5.9:** Temperaturverläufe in der Formteilmitte für Phase 4 ( $t_3 \leq t \leq t_4$ : Restkühlphase) (SAN/SAN)

wurde außerdem das Temperaturprofil zwischen Formteilmitte und Werkzeugwand ausgewertet. Bild 5.10 zeigt das dafür erstellte Diagramm der 4. Phase, wobei Fall 2 (Luftkontakt) zugrunde liegt. Deutlich zu sehen ist, dass nach der Entformung zwischen Formteilmitte und -rand kaum ein Temperaturgradient verbleibt. Diese Dauer der Restkühlzeit kann somit als ausreichend an-

gesehen werden. Im Sinne einer wirtschaftlichen Zykluszeit könnte eine weitere Reduktion der Restkühlzeit erfolgen. Darauf wird hier aber verzichtet, da es sich lediglich um eine exemplarische Darstellung handelt und der generelle Temperaturverlauf von vorrangigem Interesse ist.



**Bild 5.10:** Temperaturverlauf über die Grenzfläche am Ende von Phase 4 (Restkühlphase nach 30 s; Phase 2 mit Luftkontakt) (SAN/SAN)

## 5.4 Schlussfolgerungen

Anhand der dargestellten Ergebnisse wird ein realistischeres Bild von den Wärmeübergängen und den daraus resultierenden Temperaturverläufen beim Abkühlen von Spritzgießformteilen gezeichnet, als es Berechnungen unter eindimensionaler Wärmeleitung zu entnehmen ist. Desweiteren wird damit eine gezielte Einstellung der Verbundfestigkeit auf der Basis einer optimalen Kontakttemperaturgestaltung möglich. Voraussetzung ist allerdings die Ermittlung von direkten Korrelationen, die einem Absolutwertvergleich standhalten.

Letztendlich sind folgende Schlüsse aus der Betrachtung der Wärmetransportvorgänge beim Mehrkunststoffspritzgießen zu ziehen:

- Von entscheidender Bedeutung ist die Zwischenkühlphase und dabei insbesondere die Wärmetransportfähigkeit der Kontaktpartner des Vorspritzlings: Steht der Vorspritzling mit einem schlechter Wärme leitenden Partner (z. B. Luft) in Kontakt, kann die Fronttemperatur der späteren Kontaktfläche zur zweiten Komponente höher sein. Zu klären ist aber noch, ob dieser Effekt auch zu höheren Verbundfestigkeiten führt oder ob es zu weiteren haftungsmindernden Formänderungen kommt. Im folgenden ist demnach ergänzend zu ermitteln, wie sich ein nochmals verschlechterter Wärmetransport auf die Verbundfestigkeit auswirkt.
- Es ist weiter davon auszugehen, dass zum Erreichen des optimalen Temperaturniveaus eine Mindestzwischenkühlzeit erforderlich ist.
- Anhand der berechneten Abkühlung und Wiedererwärmung lassen sich Bereiche mit Volumenkontraktion und -ausdehnung abschätzen. Einschränkend ist allerdings zu bemerken, dass diese Formänderungen für einige Zonen mehrfach ablaufen und sich außerdem nicht von anderen Prozessen, wie z. B. den Kristallisationsvorgängen, trennen lassen.
- Weiterhin erfolgt mit dem Auftreffen der zweiten Komponente ein erneuter Energieeintrag in den Vorspritzling, von dem die Dauer und die Eindringtiefe für das Überschreiten der Glas- bzw. bei teilkristallinen Materialien der Kristallitschmelztemperatur vorgegeben wird.



# Kapitel 6

## Diskussion der Ergebnisse

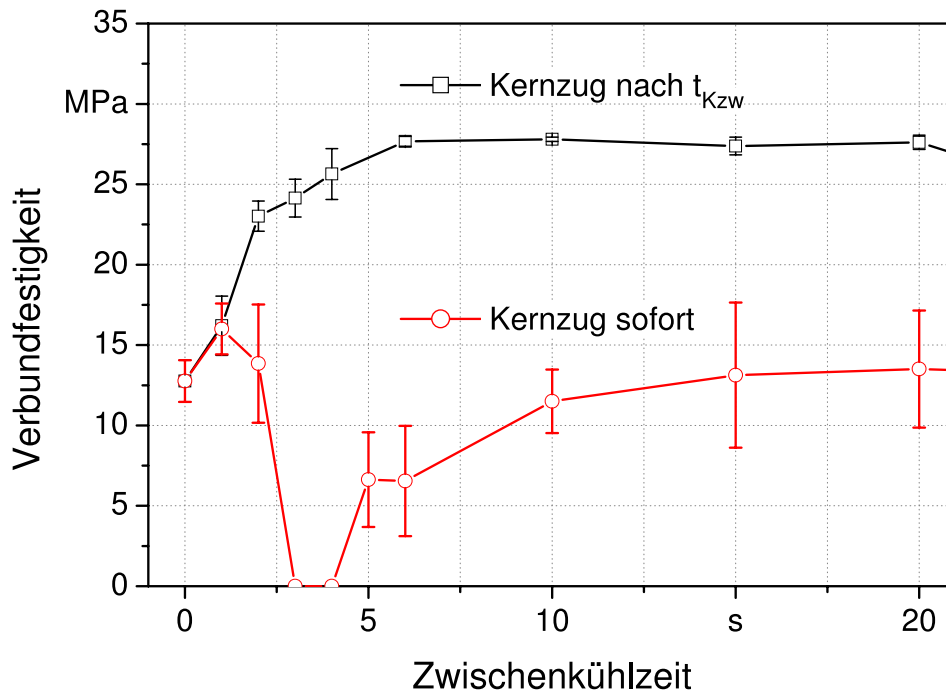
Abschließend sind die in den vorhergehenden Kapiteln ermittelten experimentellen Ergebnisse mit den theoretischen Überlegungen zusammen zu führen. Die Ergebnisse werden sowohl zusammengefasst als auch bewertet.

### 6.1 Wärmeübergang versus Formänderung

Aufbauend auf den erläuterten Unterschieden hinsichtlich der Temperaturprofile bei Kern- oder Luftkontakt mit den resultierenden eingefrorenen und wiederaufgeschmolzenen Zonen, wird eine ergänzende Modellversuchsreihe notwendig. Dabei kann der Luftkontakt simuliert werden, indem der Kern immer sofort mit Beenden der Nachdruckphase 1 und somit vor Beginn der Zwischenkühlphase gezogen wird. Das Berechnungsergebnis induzierte eine eventuell höher zu erwartende Verbundfestigkeit. Bild 6.1 zeigt die experimentell ermittelten Verbundfestigkeiten für Zwischenkühlzeiten von 0 bis 20 s. Erwartungsgemäß folgen beide Kurven zunächst der gleichen Tendenz. Jedoch trennen sich die Kurven ab einer Zwischenkühlzeit von ca. 2 s in entgegengesetzte Richtungen. Bei Luftkontakt fällt die Verbundfestigkeit auf Null, die Probekörper sind bereits lose aus dem Werkzeug zu entnehmen. Mit weiterer Verlängerung der Zwischenkühlzeit steigt die Verbundfestigkeit an und erreicht ein Optimum. Die Werte unterliegen einer starken Streuung. Trotzdem lässt sich in dem Bereich anhand der Mittelwerte erkennen, dass unter diesen Bedingungen nicht dasselbe Festigkeitsniveau zu erhalten ist.

Eine mögliche Erklärung dafür ist die Überlagerung verschiedener Formänderungen. Der Schwindung bei Abkühlung steht die lokale Ausdehnung beim Wiedererwärmungsprozess gegenüber. Dies hat offensichtlich im Fall 2 mit Luftkontakt Auswirkungen auf die Verbundfestigkeit bei

kurzen Zwischenkühlzeiten. Eine wesentlich stärker ausgeprägte Ausdehnung könnte zu erhöhten Spannungen in der Grenzfläche führen. Später folgen auf diese Ausdehnungen bei der Abkühlung wieder Volumenkontraktionen. Bei längeren Zwischenkühlzeiten kommt es dann mit zunehmender Abkühlung nicht mehr zu Maximalwerten in der Kontakttemperatur und zu größerer Streuung bei den Verbundfestigkeiten als bei definiertem Wärmeübergang mit vermindertem Kernkontakt.



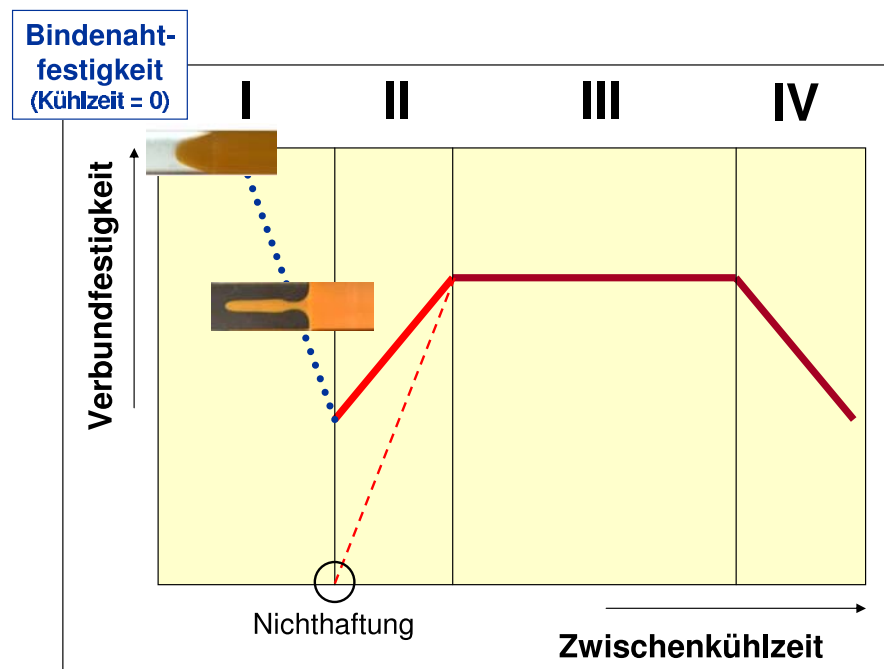
**Bild 6.1:** Vergleich der Verbundfestigkeit bei Kern- (Fall 1) oder Luftkontakt (Fall 2) im Grenzflächenbereich während der Zwischenkühlphase (PP/PP)

Umgekehrt kann die hier erzielte Nichthaftung von praktischem Interesse sein. Vorteilhaft erscheint die prozessbedingte Nichthaftung, weil keine gesonderte Kontaktkühlung erforderlich ist, um gezielt eine niedrige Vorspritzlingstemperatur zu erhalten. Andererseits wurde bereits von [78] am Beispiel einer Polyamid-Polyamid-Kombination nachgewiesen, dass gezielte Kühlung der in Kontakt tretenden Frontfläche des Vorspritzlings zur Haftungsminderung beitragen kann. Neu ist nun in diesem Fall, dass dieses Ziel ohne zusätzliche Werkzeugkühlung im Grenzflächenbereich, lediglich unter Ausnutzung der vorher dargestellten thermodynamischen Zusammenhänge, realisierbar erscheint.

## 6.2 Optimale Verbundhaftung oder Nichthaftung

Anhand des oben gezeigten Verlaufes der Verbundfestigkeit ist erneut deutlich geworden, dass ein komplexes Zusammenwirken von vielen Einflussfaktoren zum Tragen kommt. Offene Fragen ergeben sich dabei in bezug auf die zeit-, orts- und temperaturabhängigen Formänderungen. Es sind weiterhin die global im gesamten Formteil und die lokal im Grenzflächenbereich stattfindenden Formänderungen zu unterscheiden. Im folgenden soll trotz der Komplexität eine vorläufige Verallgemeinerung der Zusammenhänge erfolgen.

Bild 6.2 zeigt eine Darstellung des in den Experimenten gefundenen prinzipiellen Verlaufs der Verbundfestigkeit in Abhängigkeit von der Zwischenkühlzeit<sup>1</sup>. Anhand der experimentellen Er-



**Bild 6.2:** Vergleich der Verbundfestigkeit bei Kern- oder Luftkontakt im Grenzflächenbereich während der Zwischenkühlphase

gebnisse hat sich gezeigt, dass bei sehr kurzen Zwischenkühlzeiten im Bereich I und II verstärkt haftungsmindernde Effekte auftreten können. Dagegen ergibt sich ab einer Mindestzwischenkühlzeit das Optimum der Verbundfestigkeit. Je nach Material und Einflusscharakteristik kann dieses

<sup>1</sup>Alternativ könnte auch eine Temperatur (z. B. die Vorspritzlingtemperatur zum aktuellen Zeitpunkt des Aufeinandertreffens) als Bezugsgröße dienen. Da aber bisher die Zwischenkühlzeit benutzt wurde, soll sie auch abschließend eingesetzt werden.

Optimum auch über ein gewisses Zeitfenster im Bereich III erhalten bleiben. Werden die Zwischenkühlzeiten so stark verlängert, dass im Vorspritzling kein Resttemperaturprofil verbleibt, dann kann lediglich mit einer hohen Massetemperatur der notwendige Energieeintrag zum Aufbau der Haftung geleistet werden. Im Bereich IV ist dann wieder mit abnehmender Verbundfestigkeit zu rechnen.

Folgende Effekte bzw. Vorgänge lassen sich abschließend zuordnen:

- Bereich I:
  - Deformation oder Durchbruch der Grenzfläche
  - Tendenz einer abnehmenden Verbundfestigkeit: hohe Verbundfestigkeit nur dann möglich, wenn ähnliche Kontaktbedingungen wie bei der Bindenaht (Schmelze-Schmelze) vorliegen; Nachteil ist eine deformierte Grenzfläche
  
- Bereich II:
  - Anstieg der Verbundfestigkeit: Überlagerung von Volumenkontraktion und -ausdehnung sowie Temperatenausgleichsvorgängen, zunehmende Schwindungskompensation
  - Nichthaftung möglich
  
- Bereich III:
  - Optimum der Verbundfestigkeit: Bereich optimaler Bedingungen für den Ablauf von Haftungsmechanismen
  - Niveau abhängig von den im Vorfeld ablaufenden Wärmetransportvorgängen und den resultierenden Formänderungen sowohl in der Grenzfläche als auch im gesamten Formteil
  
- Bereich IV:
  - sinkende Verbundfestigkeit: Ausbildung der Verbindung lediglich durch den Energieeintrag der zweiten Komponente beeinflussbar

# Kapitel 7

## Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden thermodynamische Einflüsse auf die Entstehung einer Mehrkunststoffgrenzfläche mit dem Ziel untersucht, die Grenzbedingungen zum Erreichen sehr guter Verbundfestigkeit oder Nichthaftung zu bestimmen.

Aufbauend auf Erkenntnissen über die Entstehungsmechanismen von Bindenähten wurde eine umfassende experimentelle Analyse von Einflussfaktoren auf die Verbundfestigkeit von Kunststoff-Kunststoff-Grenzflächen durchgeführt. Dafür wurde eine Verbundspritzgießtechnik ausgewählt, bei der die qualitätsbestimmende Verzögerungszeit in breitem Maße variiert werden konnte. Die Entwicklung und der Bau eines geeigneten Spritzgießwerkzeuges zur Herstellung der Probekörper (Zugstäbe) ging den Experimenten voraus. In diesem Werkzeug wird die Kavität zunächst für die Formung des Vorspritzlings mit einem Schieber abgesperrt. Danach wird der Formhohlraum durch das Zurückziehen des Kerns (Kernzugtechnik) für die zweite Komponente erweitert, ohne das Werkzeug zu öffnen. Auf diese Weise konnte eine minimale Zwischenkühlphase anschließend an den formfixierenden Nachdruck im Vorspritzling realisiert werden.

Eingehend wurden in den experimentellen Untersuchungen wichtige festigkeitsbeeinflussende Faktoren und deren Zusammenwirken analysiert. Dies umfasste die Betrachtung von Einflüssen durch die Verzögerungszeit und Prozesstemperaturen, Werkzeuginnendruck und Formänderungsvorgängen sowie spezifischer Grenzflächenphänomene, wie der Deformation in der Kontaktfläche und der umlaufenden Oberflächenkerbe. Um dabei die Materialverträglichkeit zu gewährleisten und somit deren Einflüsse auszuschließen, erfolgte die Herstellung der Verbindung aus ein und demselben Kunststofftyp in unterschiedlicher Einfärbung.

Prozessbedingt durchläuft die erste Komponente beim Verbundspritzgießen einen vollständigen Zyklus inklusive einer Kühlphase, die eine feste Kontaktfläche ermöglichen soll. Darauf folgend

wird die zweite Komponente an den abgekühlten Vorspritzling gespritzt. Bekanntlich werden Zustandsänderungen bei Erwärmung und Abkühlung von Volumenausdehnung oder -kontraktion begleitet. Im Ergebnis der Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass sich diese Vorgänge auf die Wärmübertragung auswirken und damit das Temperaturprofil im Vorspritzling bestimmen. Von entscheidender Bedeutung ist dabei die Zwischenkühlphase für den Vorspritzling, während der sowohl die Schwindung als auch die Abkühlung fortschreitet.

Mit zunehmender Kühlzeit des Vorspritzlings stieg die Festigkeit der Verbindung. Dieses Ergebnis erscheint unerwartet, konnte aber anhand der weiteren Analyse aufgeklärt werden: Aufgrund der Volumenschwindung, die mit dem Ende der Nachdruckwirkung und somit bei Erreichen des Umgebungsdruckes, beginnt, kommt es zum Kontaktverlust mit der kühlenden Werkzeug- und Kernoberfläche. Infolgedessen wird der Wärmetransport verringert, so dass ein Wiedererwärmen der Vorspritzlingsoberfläche von innen heraus stattfindet. Tritt die zweite Komponente innerhalb dieser kurzen Zeitabstände mit dem Vorspritzling in Kontakt, sind die Verbundfestigkeiten demnach niedriger. Da der Temperaturanstieg wegen der Verringerung des Gradienten zwischen Innem und Rand des Vorspritzlings begrenzt ist, erreicht die Verbundfestigkeit einen Maximalwert.

In bekannter Komplexität wirken die Prozessparameter Temperatur, Druck und Geschwindigkeit auf das Form- und somit auf das Grenzflächenbildungsgeschehen. Bei hohen Temperaturen steigt die Verbundfestigkeit. Es treten jedoch bei kurzen Verzögerungen zwischen dem Ende der Nachdruckphase der ersten und dem Einspritzen der zweiten Komponente typische Grenzflächenphänomene, wie Deformationen bzw. sogar Durchbrüche der zweiten Komponente in die erste auf. Insbesondere bei solchen Einstellungen ist eine Mindestzwischenkühlzeit für den Vorspritzling erforderlich.

Der Verlauf des Werkzeuginnendrucks gibt Aufschluss über die Dauer der Nachdruckwirkung und somit über die Kompensation der Volumenkontraktion. Für ein Mehrkunststoffspritzgießteil ergibt sich die Gesamtschwindung aus den Teilschwindungen der beiden verbundenen Komponenten. Ergebnisse abnehmender Gesamtlängenschwindung zeigen, dass die bereits absolvierte Schwindung des Vorspritzlings durch eine Verlängerung der zweiten Komponente aufgenommen wird. Im Zusammenhang mit der gleichzeitigen Zunahme der Verzögerungszeit und der bereits absolvierten Formänderung des Vorspritzlings werden neben den verbesserten thermischen Randbedingungen auch weniger Formänderungsspannungen in die Grenzfläche eingebracht. Andererseits ist davon auszugehen, dass aufgrund der Erwärmung der Oberfläche eine lokale Volumenausdehnung zur Überlagerung mit den genannten globalen Volumenkontraktionen der fortschreitenden Abkühlung führt.

Neben der Aufklärung der experimentellen Grenzflächenerscheinungen wurde durch geeignete

Festlegung der Anfangs- und Randbedingungen ein Berechnungsmodell entwickelt, um die realen Wärmetransportvorgänge und Temperaturprofile im Vorspritzling und Fertigformteil nachzubilden. Unter Berücksichtigung der Abkühlwirkung des Werkzeuges sowie der durch Formänderungen wechselnden Wärmeübergangsbedingungen wird die instationäre, zweidimensionale Wärmeleitung zu grunde gelegt. Es erfolgt entsprechend der Zyklusabschnitte beim Verbundspritzgießen eine 4-Phasen-Berechnung. Die Ergebnisse der einzelnen Temperaturprofile im Vorspritzling geben Informationen über die Dicke der Zonen, die einerseits während der Nachdruckphase einfrieren, während der Zwischenkühlphase von Innen heraus aufgewärmt und andererseits beim Überspritzen mit der zweiten Komponente aufgeschmolzen werden. Zusätzlich werden vergleichend zwei charakteristische Varianten der Mehrkunststofftechnik - die Kernzugtechnik (bei geschlossenem Werkzeug) und die Drehtechnik (bei geöffnetem Werkzeug) - gegenübergestellt. Klare Unterschiede zeigen sich in den Temperaturen des Grenzflächenbereichs, wenn Luft den Wärmetransport noch stärker hemmt. Wird im Modell der Kern sofort nach Beenden der Nachdruckphase des Vorspritzlings entfernt, steigt die Kontakttemperatur auf höhere Werte als bei Kernkontakt. Die Verbundfestigkeit zeigt allerdings nicht die zu erwartenden höheren Maximalwerte. Im Gegensatz dazu entsteht sogar bei kurzen Verzögerungen eine Nichthaftung, so dass die Teile bereits lose aus dem Werkzeug fallen. Ursachen können wiederum die überlagerten Formänderungen sein.

Insgesamt können die Einflussparameter auf die Ausbildung der Verbundhaftung beim Mehrkunststoffspritzgießen durch die angewandten experimentellen und theoretischen Methoden detailliert beschrieben werden. Durch die Vereinfachung bezüglich der Materialverträglichkeit ist es erst möglich, die Komplexität des betrachteten Problems teilweise zu reduzieren, ohne die Aussagekraft der Ergebnisse für die Übertragbarkeit auf die Kombinationen unterschiedlicher Kunststoffe zu beeinflussen. Die detaillierten Informationen über die wesentlichen Faktoren und den Temperaturverlauf im Grenzflächenbereich dienen als unverzichtbare Grundlage zur Aufklärung relevanter Phänomene im Zusammenhang mit der Erscheinung von Kunststoff-Kunststoff-Grenzflächen sowie wichtiger Beziehungen zwischen Verbundfestigkeit und Prozessparametern.





# Literatur

- [1] EHRENSTEIN, G. W. (Hrsg.): *Handbuch der Kunststoff-Verbindungstechnik*. München : Carl Hanser, 2004
- [2] JOHANNABER, F. ; MICHAELI, W.: *Handbuch Spritzgießen*. München : Carl Hanser, 2001
- [3] POTENTE, H. ; KOCH, M. ; MORITZER, E. ; KAISER, E. ; RIDDER, H. ; SCHÄFER, M.: Mehrkomponenten-Verfahren richtig anwenden. *Kunststoffe* 95 (2005) 2, S. 44–47
- [4] LÖBEL, P. ; PATZSCHKE, H.: Hart auf hart im 2K-Spritzguss. *Kunststoffberater* (2001) 7-8, S. 38–44
- [5] JAROSCHEK, Ch.: *Spritzgießen von Formteilen aus mehreren Komponenten*, RWTH Aachen, Dissertation, 1994
- [6] GIESE, V. M.: *Adhäsive Kunststoff-Metall- und Kunststoff-Kunststoff-Verbindungen im Hinblick auf die Spritzgießverarbeitung*, Technische Fakultät der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 1995
- [7] BRINKMANN, S.: *Verbesserte Vorhersage der Verbundfestigkeit von 2-Komponenten-Spritzgießbauteilen*, RWTH Aachen, Dissertation, 1996
- [8] KUHMAN, K.: *Prozess- und Materialeinflüsse beim Mehrkomponentenspritzgießen*, Technische Fakultät der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 1999
- [9] MICHAELI, W.: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. 4. Auflage. München : Carl Hanser, 1999
- [10] NGUYEN-CHUNG, T.: *Strömungsanalyse der Bindenahtformation beim Spritzgießen von thermoplastischen Kunststoffen*, Professur Kunststoffverarbeitungstechnik der Technischen Universität Chemnitz, Dissertation, 2001
- [11] MALGUARNERA, S. C.: Weld Lines in Polymer Processing. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 18 (1982), S. 1–45
- [12] MENNIG, G.: Knit-line behaviour of polypropylene and polypropylene-blends. In: KARGER-KOCSIS, J. (Hrsg.): *Polypropylene: Structure, blends and composites*. London : Chapman and Hall, 1995, S. 205–226
- [13] MOSLE, H. G. ; WENIG, W. ; SINGH, D. ; BOTZEN, G.: Weld lines in injection moulded polypropylene parts - Mechanical Properties Morphology Relationships. *Angewandte Makromolekulare Chemie* 179 (1990), S. 35–56
- [14] HAUFE, A.: *Untersuchung zur Vorhersage der Bindenahtfestigkeit in spritzgegossenen Formteilen*, Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Hochschule Darmstadt, Dissertation, 1996

- [15] HAUFE, A. ; KÜHNERT, I. ; MENNIG, G.: Zum Einfluss strömungsinduzierter Fehlerstellen auf das Versagensverhalten in spritzgegossenen Kunststoffbauteilen. *Gummi Fasern Kunststoffe* 52 (1999) 5, S. 354–357
- [16] MENNIG, G. ; KÜHNERT, I.: Festigkeitsbeeinflussende Vorgänge bei der Bindahtentstehung / Deutsche Forschungsgemeinschaft Bonn. 1999 ( Me563/22-1,2). – DFG-Abschlussbericht
- [17] KIM, S. G. ; SUH, N. P.: Performance prediction of weldline structure in amorphous polymers. *Polymer Engineering and Science* 26 (1986) 17, S. 1200–1207
- [18] MICHAELI, W. ; KELLER, H. ; POY, I.: Bindahtprobleme systematisch lösen. *Plastverarbeiter* 47 (1996) 6, S. 82–83
- [19] BECKER, H. ; FISCHER, G. ; MÜLLER, U.: Gegentakt-Spritzgießen technischer Formteile - Auf dem Weg zu spritzgegossenen Composites. *Kunststoffe* 83 (1993) 3, S. 165–169
- [20] KALAY, G. ; ALLAN, P. S. ; BEVIS, M. J.: Scherbedingte Orientierung. *Kunststoffe* 87 (1997) 6, S. 768–772
- [21] LUDWIG, H.-C.: *Gegen-Takt-Spritzgießen - ein neues Verarbeitungsverfahren zur Optimierung der Werkstoffeigenschaften von verstärkten und unverstärkten Thermoplasten*, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde der Universität Stuttgart, Dissertation, 1998
- [22] MEYER, F. ; KÜHNERT, I.: Untersuchungen zur Bindahtfestigkeit von technischen Bauteilen aus kurzfaserverstärkten Thermoplasten / Forschungsheft des Forschungskuratoriums Maschinenbau e. V. . 2001 ( FKM-Heft 265). – AiF-Abschlussbericht
- [23] SCHEFFEL, H.: Zweifarben- oder Zweikomponenten-Spritzen. *Plastverarbeiter* 23 (1972) 9, S. 636–639
- [24] REKER, H. ; ULLMANN, R.: Konstruktion und Fertigung eines Rasierergehäuses in Hart-Weich-Technik. *Kunststoffe* 79 (1989) 2, S. 164–166
- [25] ZIPP, Th.: *Fließverhalten beim 2-Komponenten-Spritzgießen*, RWTH Aachen, Dissertation, 1992
- [26] ECKARDT, H.: Mehrkomponenten-Spritzgießen ermöglicht das Herstellen abgeschirmter Gehäuse mit guter Oberfläche in einem Arbeitsgang. *Kunststoffe* 75 (1985) 3, S. 145–147
- [27] THOMA, H.: Rationalisieren durch Mehrkomponenten-Spritzguss. *Kunststoffe* 78 (1988) 8, S. 665–669
- [28] NEUBERT, T.: Verfahren und Anlagen zur Herstellung komplexer Funktionsteile. *Plastverarbeiter* (1992), S. 34
- [29] JAROSCHEK, Ch.: Herstellkosten senken durch Mehrkomponenten-Spritzgießtechnik. *Kautschuk Gummi Kunststoffe* 47 (1994) 9, S. 672–675
- [30] VANETTA, G.: Montage- und Verbund-spritzguss - Innovative Produktbeispiele. In: KUHMAN, K. (Hrsg.) ; EHRENSTEIN, G. W. (Hrsg.): *Mehrkomponentenspritzgießen* -

- Technologie, Prozess und Verbundeigenschaften.* Düsseldorf : Springer-VDI, 1997, S. 104–126
- [31] JAEGER, A.: Neues vom Mehrkomponenten-Spritzgießen - Verfahrenskombinationen bieten wirtschaftliche Vorteile. *Kunststoffe* 89 (1999) 9, S. 85–89
- [32] KUHMANN, K. ; DRUMMER, D. ; EHRENSTEIN, G. W.: Durch Verbundspritzgießen die Funktionalität erhöhen. *Kunststoffe* 89 (1999) 9, S. 112–116
- [33] BREUER, P.: Spritzgießen mehrerer Komponenten - Verfahrensabläufe, Maschinentechnik und Anwendungen. In: *Innovative Spritzgießverfahren.* Würzburg : DIF, Dt. Industrieforum f. Technologie, 1997, S. 0–49
- [34] ENEWOLDSSEN, P. ; BRAUN, H.: Folienhinterspritzen. *Kunststoffe* 89 (1999) 9, S. 102–104
- [35] KLAUS, W. ; SERAFIN, G.: Hinterspritzen von Kunststofffolien. *Kunststoffe* 89 (1999) 11, S. 88–90
- [36] BROCKMANN, C. ; MITZLER, J.: Weniger Fertigungsschritte, kurze Zykluszeiten - Großflächige dekorierte Formteile im One-Shot-Verfahren. *Kunststoffe* 91 (2001) 8, S. 122–123
- [37] HAACK, U.: Präzisionsformteile in der Outsert-Technik. Acetalcopolymerisat: Ein idealer Werkstoff. *Plastverarbeiter* 35 (1984) 6, S. 29–38
- [38] ZHAO, G.: *Spritzgegossene, tragende Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen, Konstruktion, Prozessanalyse und Charakterisierung,* Technische Fakultät der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2002
- [39] STEVENS, T.: Gas Assist Ready to Explode. *Materials Engineering* 108 (1991)
- [40] EHRITT, J. ; SCHRÖDER, K.: *Gasinnendruck- und Zweikomponenten-Spritzgießverfahren.* 2. Auflage. Heidelberg : Hüthig, 1995
- [41] MICHAELI, W. ; BRUNSWICK, A. ; POHL, T.: Gas oder Wasser? Spritzgießen von Hohlkörpern durch Fluidinjektion. *Kunststoffe* 89 (1999) 9, S. 56–62
- [42] HEIM, H.-P.: *Qualitätsorientierte Betrachtung der Gasinjektionstechnik beim Spritzgießen-Formteilauslegung, Prozessoptimierung und Qualitätsüberwachung,* Universität Paderborn, Institut für Kunststofftechnologie, Dissertation, 2001
- [43] MOLTER, W. ; BERGER, G. ; ZIEGLER, U. ; REIL, F.: Kompatibel zu POM - Hart / Weich-Verbindungen von POM und SEBS-Compounds. *Kunststoffe* 89 (1999) 6, S. 76–78
- [44] RONNEWINKEL, Ch.: *Mehrkomponentenspritzgießen von Flüssigsilikon-Thermoplast-Verbundbauteilen,* RWTH Aachen, Dissertation, 2001
- [45] JAROSCHEK, Ch. ; STEGER, R.: Verbundspritzgießen mit einer Spritzeinheit. *Kunststoffe* 89 (1999) 7, S. 38–39
- [46] Battenfeld Spritzgießtechnik: *Mehr-Rohstoff-Technologie.* 1998. – Firmenschrift

- [47] LANGENFELD, R. M.: Werkzeugtechnik zur Herstellung von Mehrkomponenten-Spritzgießteilen. In: *Fachtagung: Mehr Farben - Mehr Materialien - Mehrkomponenten-Spritzgießtechnik*. Würzburg : Süddeutsches Kunststoff-Zentrum, 1992, S. 83–102
- [48] JAROSCHEK, Ch. ; STEGER, R.: Der horizontale Dreh. *Kunststoffe* 88 (1998) 9, S. 1412–1416
- [49] BASF AG: *Hart/Weich-Verbindungen in der Spritzgießtechnik*. 2001. – Firmenschrift
- [50] Reichert GmbH: *2K-Plattensystem*. 2000. – Firmenschrift
- [51] JAROSCHEK, Ch.: Appetit auf Sandwich? *Kunststoffe* 87 (1997) 1, S. 33–35
- [52] JOHANNABER, F. ; KONEJUNG, K.: Mehrkomponenten-Technik beim Spritzgießen. In: *Fachtagung: Mehr Farben - Mehr Materialien - Mehrkomponenten-Spritzgießtechnik*. Würzburg : Süddeutsches Kunststoff-Zentrum, 1992, S. 7–20
- [53] WRAGG, R. T. ; YARDLEY, J. F. ; NIGHTINGALE, A. F.: Fusion Bonding. *Kautschuk Gummi Kunststoffe* 34 (1981) 8, S. 657–660
- [54] RICHTER, K. P.: Haftvermittlerfreie Kunststoff/Kautschuk-Verbundsysteme. *Kautschuk Gummi Kunststoffe* 42 (1989) 9, S. 800–807
- [55] KUKLA, C. G.: *Rand- und Grenzschichtbildung beim Spritzgießen*, Montanuniversität Leoben, Österreich, Dissertation, 1994
- [56] MENNIG, G.: Zum Einfluss des Molekulargewichts auf die makroskopische Grenzflä-
- che Bindaht. *Angewandte Makromolekulare Chemie* 185, 186 (1991), S. 179–188
- [57] MICHAELI, W. ; HABERSTROH, E. ; SCHREINER, C.: Charakterisierung von Materialkombinationen anhand der Oberflächenspannungen. In: EHRENSTEIN, G. W. (Hrsg.) ; KUHMANN, K. (Hrsg.): *Mehrkomponentenspritzgießen - Technologie, Prozeß und Verbundeigenschaften*. Düsseldorf : Springer-VDI, 1997, S. 83–103
- [58] ANDRE, V.: Polymerschmelzen an Grenzflächen - Charakterisierungsmöglichkeiten und offene Fragen. In: EHRENSTEIN, G. W. (Hrsg.) ; DRUMMER, D. (Hrsg.) ; KUHMANN, K. (Hrsg.): *Mehrkomponentenspritzgießtechnik 2000 - Stand, Anwendung und Perspektiven*. Düsseldorf : Springer-VDI, 2000, S. 65–81
- [59] SANSCHAGRIN, B. ; GAUVIN, R. ; FISA, B. ; VU-KHANH, R.: Weldlines in injection molded polypropylene - Effect of filler shape. *Journal of Reinforced Plastic Composites* (1990) 8, S. 194–208
- [60] FISA, B. ; RAHMANI, M.: Weldline strength in injection molded glass fiber reinforced plastics. *Polymer Engineering and Science* (1991) 31, S. 1330–1336
- [61] AKAY, M. ; BARKLEY, D.: Flow-aberrations and weld lines in glass-fibre reinforced thermoplastic injection mouldings. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications* 20 (1993) 3, S. 137–149
- [62] MENNIG, G. ; KÜHNERT, I.: Untersuchungen und Verbesserung der Bindahtfestigkeit

- von technischen Bauteilen aus kurzfaserverstärkten Thermoplasten / Forschungskuratorium Maschinenbau e. V. (FKM), Frankfurt am Main. 2004 (FKM-Heft 256). – AiF-Abschlussbericht
- [63] VOYUTSKII, S. S.: *Autohesion and Adhesion of High Polymers*. New York : John Wiley and Sons, 1963
- [64] WU, S.: *Polymer Interface and Adhesion*. New York : Marcel Dekker Inc. , 1982
- [65] KIM, Y. H. ; WOOL, R. P.: A theory of healing at a polymer-polymer interface. *Macromolecules* 16 (1983) 7, S. 1115–1120
- [66] WOOL, R. P. ; YUAN, B. L. ; MCGAREL, O. J.: Welding of polymer interfaces. *Polymer Engineering and Science* 29 (1989), S. 1340–1367
- [67] WOOL, R. P.: *Polymer Interfaces*. New York : Carl Hanser, 1995
- [68] HABENICHT, G.: *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 3. Auflage. Berlin : Springer, 1997
- [69] BISCHOF, C. ; POSSART, W.: *Adhäsion - Theoretische und experimentelle Grundlagen*. Berlin : Akademie, 1982
- [70] DE BRUYNE, N. A.: The Physics of Adhesion. *Journal of Scientific Instruments* 24 (1947) 2, S. 29–35
- [71] DE GENNES, P. G.: Reptation of a polymer chain in the presence of fixed obstacles. *J. Chem. Phys.* 55 (1971) 2, S. 572–579
- [72] HUPFER, B. ; LEHMANN, D. ; REINHARD, J.: Modifizieren steigert die Verbundfestigkeit. *Kunststoffberater* 43 (1998) 10, S. 41
- [73] EHRENSTEIN, G. W.: *Polymer-Werkstoffe: Struktur - Eigenschaften - Anwendung*. 2. Auflage. München : Carl Hanser, 1999
- [74] ROUSE, P. E.: A Theory of the linear viscoelastic properties of dilute solutions of coiling polymers. *J. Chem. Phys.* 21 (1953), S. 1272–1280
- [75] GUTIERREZ, M. C. G. ; RUEDA, D. R. ; CALLEJA, F. J. B. ; KUEHNERT, I. ; MENNIG, G.: Microhardness study across the weld line in doubly injection-molded glassy polymers. *Journal of Materials Science Letters* 18 (1999) 15, S. 1237–1238
- [76] BOYANOVA, M. ; CALLEJA, F. J. B. ; FAKIROV, S. ; KUEHNERT, I. ; MENNIG, G.: Influence of processing conditions on the weld line in doubly injection molded glassy polycarbonate and polystyrene: Microindentation hardness study. *Advances in Polymer Technology* 24 (2005) 1, S. 14–20
- [77] POTENTE, H. ; KAISER, E.: Untersuchungen zur Prozessführung beim Overmoulding von 2K Bauteilen im Hinblick auf eine gute Verbundhaftung. In: POTENTE, H. (Hrsg.) ; LIMPER, A. (Hrsg.) ; HEIM, H.-P. (Hrsg.): *Ta-gungsband zur KTP-Jubiläumstagung: 25 Jahre Kunststofftechnologie Paderborn (Band 8)*. Aachen : Shaker, 2005, S. 185–196
- [78] JAROSCHEK, Ch.: Der eiskalte Dreh. *Kunststoffe* 85 (1995) 9, S. 1274–1276
- [79] THIENEL, P. ; BROER, E. ; VITZ, C.: Oberflächenfehler an thermoplastischen Spritzgießteilen, Teil 1. *Plastverarbeiter* 46 (1995) 4, S. 92, 95–97

- [80] MEKHILEF, N. ; AIT-KADI, A.: Injection molding, Mechanical Properties, and Morphology of a Compatibilized Polycarbonate Blend in the Presence of Weld Lines. *Advances in Polymer Technology* 14 (1995) 4, S. 315–326
- [81] TOMARI, K. ; TONOGAI, S. ; HARADA, T.: The V-notch at weldlines in polystyrene injection moldings. *Polymer Engineering and Science* 30 (1990), S. 931–936
- [82] PICCAROLO, S. ; SAIU, M.: Knit-line structure in the injection molding of polystyrene. *Plastics Rubber Processing and Application* 10 (1988), S. 11–16
- [83] KARLINGER, P. ; BÜRKLE, E.: Kurzzeitschwindung beim Mehrkomponenten-Spritzgießen. Kennwerte für die Konstruktion von Werkzeugen. *Kunststoffe* 91 (2001) 1, S. 54–56, 58–59
- [84] EYERER, P. (Hrsg.) ; ELSNER, P. (Hrsg.) ; HIRTH, T. (Hrsg.): *H. Domininghaus: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. 6. neu bearb. u. erw. Auflage. Berlin : Springer-VDI, 2004
- [85] STEINER, G. ; SCHREIMEIER, H.: Ein- und Mehrkomponentenformen für das TPE-Spritzgießen. *Gummi Fasern Kunststoffe* (2004) 7, S. 439–449
- [86] WÜBKEN, G.: *Einfluss der Verarbeitungsbedingungen auf die innere Struktur thermoplastischer Spritzgussteile unter besonderer Berücksichtigung der Abkühlverhältnisse*, RWTH Aachen, Dissertation, 1974
- [87] THRONE, J. L. ; BEINE, J.: *Thermoformen: Werkstoffe, Verfahren, Anwendung*. München : Carl Hanser Verlag, 1999
- [88] RETTING, W. ; LAUN, H. M.: *Kunststoff-Physik*. München : Carl Hanser, 1991
- [89] MENGES, G. ; HABERSTROH, E. ; MICHAELI, W. ; SCHMACHTENBERG, E.: *Werkstoffkunde Kunststoffe*. 5. völlig überarb. Auflage. München : Carl Hanser, 2002
- [90] MENGES, G. ; SARHOLZ, R.: *Spritzgießen: Verfahrensablauf, Verfahrensparameter, Prozessführung*. München : Carl Hanser, 1979
- [91] EHRENSTEIN, G. W. ; RIEDEL, G. ; TRAWIEL, P.: *Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen*. München : Carl Hanser, 1998

# Formelzeichen und Abkürzungen

## Lateinische Buchstaben

$a$	Temperaturleitfähigkeit
$b$	Breite
$c$	Kettenkonzentration
$c_p$	spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck)
$d$	Dicke
$l$	Länge
$l_0$	Ausgangslänge
$p$	hydrostatischer Druck
$p_0$	Referenzdruck (Atmosphärendruck)
$p_{Wi}$	Werkzeuginnendruck
$q$	Wärmefluss
$s$	Wanddicke
$t$	Zeit
$t_E$	Einspritzzeit
$t_{EV}$	Einspritzverzögerung
$t_K$	Kühlzeit
$t_{Kernzug}$	Zeit, die für Bewegung des Kernzugs benötigt wird
$t_{Krest}$	Restkühlzeit für beide Komponenten
$t_{Kzw}$	Zwischenkühlzeit
$t_N$	Nachdruckzeit
$t_{Verz}$	Verzögerungszeit
$v$	spezifisches Volumen
$v_E$	Einspritzgeschwindigkeit
$x$	Laufkoordinate in Längenrichtung, senkrecht zur Grenzfläche
$y$	Laufkoordinate in Dickenrichtung, parallel zur Grenzfläche

$z$	Laufkoordinate in Breitenrichtung
$D$	Diffusionskoeffizient
$E$	Zugmodul
$PR_t$	Profiltiefe
$S$	Schwindung
$S_{ges}$	Gesamtlängenschwindung des Zwei-K-Zugstabes
$T$	Temperatur
$T_0$	Referenztemperatur
$T_g$	Glastemperatur (Glasübergangstemperatur)
$T_g^*$	Glastemperatur (Literaturwert)
$T_E$	Entformungstemperatur
$T_K$	Kerntemperatur
$T_L$	Lufttemperatur
$T_M$	Massetemperatur
$T_S$	Schmelzetemperatur
$T_U$	Umgebungstemperatur (Lufttemperatur)
$T_W$	Werkzeugtemperatur

### Weitere Indizes

...1	bezogen auf erste bzw. zuerst eingespritzte Komponente
...2	bezogen auf zweite bzw. als zweites eingespritzte Komponente

### Griechische Buchstaben

$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient
$\varepsilon$	Dehnung
$\varepsilon_B$	Bruchdehnung
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\rho$	Dichte
$\sigma$	Spannung, Zugfestigkeit
$\sigma_A$	Ausgangsfestigkeit Ein-K-Zugstab (Referenz)
$\sigma_B$	Bruchspannung
$\sigma_{BN}$	Bindenahtfestigkeit



$\sigma_L$	Oberflächenspannung Flüssigkeit oder Schmelze
$\sigma_S$	Oberflächenspannung Festkörper
$\sigma_{SL}$	Grenzflächenspannung
$\sigma_V$	Verbundfestigkeit Zwei-K-Zugstab
$\Theta$	Randwinkel

### Abkürzungen

2K	Zwei-Komponenten
LCP	Liquid Crystalline Polymers
PA6GF	Polyamid 6 gefüllt mit Glasfasern
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
SAN	Styrol-Acrylnitril-Copolymer
SCORIM	Shear Controlled Orientation Injection Moulding
TPE	Thermoplastisches Elastomer



# Lebenslauf

## Persönliche Daten:

Name: Ines Kühnert  
Geburtsdatum, -ort: 14.07.1969 in Dresden  
Familienstand: ledig

## Ausbildung und beruflicher Werdegang:

09.1976 – 08.1986 Polytechnische Oberschule, Coswig  
09.1986 – 08.1988 Erweiterte Oberschule, Meißen (Abschluss: Abitur)  
09.1988 – 08.1989 Studienvorpraktikum an der Zentralen Forschungs- und Entwicklungsstelle für Kunstleder, Coswig  
09.1989 – 11.1994 Studium der Fachrichtung Allgemeiner Maschinenbau und Verarbeitungstechnik, Hauptfach Kunststofftechnik, an der TU Chemnitz (Abschluss: Diplom-Ingenieur)  
06.1995 – 01.2000 Wissenschaftliche Mitarbeiterin und  
seit 02.2000 Wissenschaftliche Assistentin an der TU Chemnitz, Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik/Professur Kunststoffverarbeitungstechnik  
seit 08.2002 Stellvertretung in der Professur Kunststoffverarbeitungstechnik

## Universitäre Selbstverwaltung und Förderverein:

seit 04.2003 Mitglied im Fakultätsrat der Fakultät für Maschinenbau der TU Chemnitz  
seit 2002 Schatzmeisterin und stellvertretende Vorsitzende der Fördergemeinschaft für den Lehrstuhl Kunststofftechnik an der TU Chemnitz e. V.

I. Kühnert

Chemnitz im Mai 2005