

Untersuchungen zu Schwindung und Verzug von Schachtelformteilen mit verschiedenen Wanddickenkombinationen

Diplomarbeit

von

Peter Zaucher

erstellt für die

Polymer Competence Center Leoben GmbH

durchgeführt am

**Institut für Kunststoffverarbeitung
an der Montanuniversität Leoben**

MONTANUNIVERSITÄT
LEOBEN 



Betreuung:

Dipl.-Ing. Thomas Lucyshyn

Dipl.-Ing. Dr.mont. Konrad Fischer

Begutachtung:

Em. O. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günter R. Langecker

Leoben, im Oktober 2007

Danksagung

Für das Zustandekommen und die Durchsicht dieser Arbeit sowie für die kritischen Anmerkungen bei der Korrektur möchte ich dem emeritierten Vorstand des Institutes für Kunststoffverarbeitung, Herrn Em. O. Univ. Prof. Dr.-Ing. Günter R. Langecker, herzlich danken.

Für ihre Geduld, ihr Wohlwollen und ihre Unterstützung möchte ich den Betreuern dieser Arbeit, Herrn Dipl.-Ing. Thomas Lucyshyn und Herrn Dipl.-Ing. Dr.mont. Konrad Fischer, meinen größten Dank aussprechen.

Die vorliegende Arbeit wurde für die Polymer Competence Center Leoben GmbH im Rahmen eines K_{plus} -Projektes mit dem Titel "Durchgängigkeit der Werkzeugkonstruktion vom Bauteildesign bis zum maßgerechten Werkzeug für hochwertige Bauteile" durchgeführt. Als Teil des Kompetenzzentren-Programms K_{plus} des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie unter Beteiligung der Montanuniversität Leoben, der Technischen Universität Graz, der Johannes Kepler Universität Linz, der Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH und der Upper Austrian Research GmbH wurde diese Arbeit mit Mitteln des Bundes und der Länder Steiermark und Oberösterreich gefördert.

Mein Dank gilt auch den Projektpartnern dieses Projektes, welche ein Zustandekommen dieser Arbeit ermöglicht haben. Den Mitarbeitern des Institutes für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben und der Polymer Competence Center Leoben GmbH möchte ich für die Bereitstellung von Gerätschaften und Räumlichkeiten, ihre Unterstützung und ihr herzliches Entgegenkommen danken.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Direkt oder indirekt aus fremden Quellen übernommene Gedanken wurden als solche gekennzeichnet.

Leoben, 7. November 2007

Peter Zaucher

Kurzfassung

Die Abmaße von spritzgegossenen Formteilen stellen ein wichtiges Qualitätsmerkmal dar. Nur die genaue Einhaltung der Maßtoleranzen gewährleistet die Funktionalität von Kunststoffbauteilen. Durch den Prozessablauf ist dies nur bedingt möglich, was oft Werkzeugkorrekturen notwendig macht. Bereits während der Werkzeugkonstruktion müssen Schwindung und Verzug richtig abgeschätzt und berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Arbeit werden geometrie- und prozessabhängige Untersuchungen zur Verarbeitungs- und Nachschwindung an einem amorphen und einem teilkristallinen Thermoplasten durchgeführt. Die Ergebnisse der Verarbeitungsschwindung werden mit Ergebnissen aus *Moldflow Plastics Insight 6.1 Revision 1* (MPI™) verglichen.

Zu diesem Zweck werden schachtelförmige Bauteile mit unterschiedlichen Wanddicken hergestellt. Diese werden mit den Materialien *ABS Urtal M122* der Firma ENICHEM POLIMERI (San Donato Milanese, I) und *Hostacom BR 735 G* der Firma Basell Polyolefines (Hoofddorp, NL) abgemustert. Das Schachtelformteil hat eine quadratische Grundfläche von 100,05 mm x 100,05 mm und eine Höhe von 40 mm. Durch verschiedene Formeinsätze werden die Seitenwanddicke sowie die Bodenwanddicke verändert. Die Dicken betragen jeweils 1 mm und 3 mm, wodurch sich vier unterschiedliche Wanddickenkombinationen ergeben. Schwindung und Verzug werden mit dem hochauflösenden optischen Digitalisierungssystem ATOS II SO der Firma GOM mbH, an ausgewählten Stellen ermittelt.

Die Simulationsberechnungen werden mit den zur Verfügung stehenden Modellen (Midplane, Fusion und 3D) durchgeführt. Bei den Berechnungen werden die tatsächlichen Prozessparameter, die softwareinternen Stoffdaten und Standardeinstellungen verwendet.

Die Gegenüberstellungen der Mess- und Berechnungsergebnisse wird für die qualitative und quantitative Bewertung von Ergebnissen in *MPI™* herangezogen.

Der Vergleich einer simulierten und experimentellen Füllstudie wird auch gezeigt. Die Simulationsergebnisse der Kompressions- und Nachdruckphase werden mit realen Druckverläufen exemplarisch verglichen und bewertet.

Zusätzlich werden ausgewählte Formteile einer mechanischen Bearbeitung unterzogen, wobei der Schachtelboden weggefräst, die Ecken der Schachtel aufgefräst und die Schachtel in der Mitte durchgeschnitten wird. Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, innere Spannungen freizusetzen, um die Kopplung von Schwindung und Verzug zu studieren. Die Ergebnisse vor der Bearbeitung werden mit den Ergebnissen nach der Bearbeitung verglichen.

Die Arbeit soll die Auswirkung unterschiedlicher geometrischer Anordnungen auf Schwindung und Verzug aufzeigen. Die Gegenüberstellung mit der Simulation soll weiters aufzeigen, welches Modell für die Berechnung von Schwindung und Verzug besser geeignet ist.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Schwindung	3
2.2	Verzug	6
2.2.1	Einflussgrößen auf Schwindung und Verzug	8
2.3	Theoretische Grundlagen der Spritzgießsimulation	10
2.3.1	Beschreibung der Füllphase in Moldflow Plastics Insight MPI™	10
2.4	Modelle in MPI™	11
2.4.1	Midplane - Modell [8]	12
2.4.2	Fusion - Modell [8]	13
2.4.3	3D - Modell [8]	13
2.5	Berechnung von Schwindung und Verzug in MPI™	14
3	Experimentelles	16
3.1	Verwendetes Spritzgussformteil	16
3.2	Untersuchte Kunststoffe	17
3.3	Maschinen und Geräte	20
3.3.1	Spritzgießmaschine und Peripherie	20
3.3.2	Messsensoren und Messdatenerfassung	21
3.3.2.1	Messsensoren	21
3.3.2.2	Messdatenerfassungssystem	21
3.3.3	3D-Digitalisiersystem ATOS II SO	21
3.4	Spritzgießversuche	23
3.4.1	Versuchsplanung	23
3.4.2	Durchführung der Spritzgießversuche	23
3.5	Bestimmung der Schwindungsmaße	26
3.6	Simulationsrechnung mit MPI™	27
3.6.1	Verwendete Geometriemodelle	28
4	Ergebnisse und Diskussion	29
4.1	Experimentelle und berechnete Formteilmfüllung	29
4.2	Gemessener und berechneter Werkzeuginnendruckverlauf	31
4.3	Schwindungs- und Verzugsergebnisse von Hostacom BR 735 G	33
4.3.1	Vergleich zwischen Verarbeitungs- und Gesamtschwindung	33
4.3.2	Einfluss der Wanddickenkombination auf die Schwindung	37
4.3.3	Einfluss der Nachdruckhöhe auf die Schwindung	40
4.3.4	Einfluss der Massetemperatur auf die Schwindung	41
4.3.5	Vergleich der berechneten Ergebnisse mit den vermessenen Bauteilen	44
4.4	Schwindungs- und Verzugsergebnisse von ABS Urtal M122	47
4.4.1	Vergleich zwischen Verarbeitungs- und Gesamtschwindung	47
4.4.2	Einfluss der Wanddickenkombination auf die Schwindung	49
4.4.3	Einfluss der Nachdruckhöhe auf die Schwindung	51
4.4.4	Einfluss der Massetemperatur auf die Schwindung	52
4.4.5	Vergleich der berechneten Ergebnisse mit den vermessenen Bauteilen	54

4.5	Zusätzliche Untersuchungen zu Schwindung und Verzug	57
4.5.1	Einfluss der Bodenfläche auf Schwindung und Verzug	59
4.5.2	Einfluss der Schachtecken auf Schwindung und Verzug	60
4.5.3	Schwindungs- und Verzugsergebnisse an einer durchgeschnittenen Schachtel	62
4.5.3.1	Untersuchungen an der Waddickenkombination B3W3	62
4.5.3.2	Untersuchungen an der Waddickenkombination B3W1	64
5	Zusammenfassung und Ausblick	67
	Literatur	69
	Anhang	70

1 Einleitung und Zielsetzung

In zunehmendem Maß finden Kunststoffbauteile als Präzisionsteile Verwendung. Dabei ist das Einhalten bestimmter Abmessungen und Maßtoleranzen für die spezifische Funktionalität von höchster Bedeutung. In erster Linie werden die Abmessungen durch die Werkzeugkavität festgelegt. Einen weiteren wesentlichen Einfluss haben das Material und die Prozessführung. Durch das Zusammenwirken dieser Größen wird die Qualität der Bauteile beeinflusst.

Durch Schwindung und Verzug kommt es in unterschiedlichem Ausmaß zu einer Abweichung von der Sollgeometrie. Diese Abweichung ist in Abhängigkeit der Geometrie und der Prozessparameter unterschiedlich stark ausgeprägt. Erste Anhaltspunkte für die zu erwartende Schwindung liefern Angaben der Rohstoffhersteller sowie Erfahrungswerte. Bei diesen wird jedoch auf die Angabe der dazugehörigen Prozessparameter sowie die Beschreibung der Formteilgeometrie weitgehend verzichtet. Dadurch ist eine qualitative und quantitative Aussage über das Schwindungs- und Verzugsverhalten nur schwer möglich.

Die computergestützte Auslegung von Spritzgießwerkzeugen gewinnt immer mehr an Bedeutung. Durch Simulationsberechnungen können auftretende Prozessgrößen ermittelt werden. Weiters erlauben die Simulationsberechnungen Aussagen über Schwindung und Verzug der Formteile.

In der vorliegenden Arbeit werden geometrie- und prozessabhängige Untersuchungen zur Verarbeitungs- und Nachschwindung an einem amorphen und einem teilkristallinen Thermoplasten durchgeführt. Zu diesem Zweck werden schachtelförmige Bauteile mit unterschiedlichen Wanddicken hergestellt. Diese werden mit den Materialien *ABS Urtal M122* der Firma ENICHEM POLIMERI (San Donato Milanese, I) und *Hostacom BR 735 G* der Firma Basell Polyolefines (Hoofddorp, NL) abgemustert.

Das Schachtelformteil hat eine quadratische Grundfläche von 100,05 mm x 100,05 mm und eine Höhe von 40 mm. Durch verschiedene Formeinsätze werden die Seitenwanddicke sowie die Bodenwanddicke verändert. Die Dicken betragen jeweils 1 mm und 3 mm, wodurch sich vier unterschiedliche Wanddickenkombinationen ergeben. Die Untersuchungen erfolgen im Rahmen des Projektes 3.1 „Durchgängigkeit der Werkzeugkonstruktion vom Bauteildesign bis zum maßgerechten Werkzeug für hochwertige Bauteile“ der Polymer Competence Center Leoben GmbH (Leoben, A).

Die Schwindung und der Verzug der Schachteln werden an ausgewählten Stellen mit einem hochauflösenden optischen Digitalisiersystem vermessen. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen der geometrischen sowie der prozesstechnischen Einflüsse auf das Schwindungs- und Verzugsverhalten für die beiden Materialien aufzuzeigen und den Ergebnissen aus *Moldflow Plastics Insight 6.1 Revision 1* (MPI™) gegenüber zu stellen. Es werden die geometrischen Einflüsse der verschiedenen Wanddickenkombinationen, sowie die prozesstechnischen Einflüsse der Nachdruckhöhe und der Massetemperatur untersucht. Diese werden weiters mit den einzelnen Simulationsmodellen (Midplane, Fusion, 3D) in MPI™ verglichen.

Die Arbeit soll dazu beitragen, Schwindungs- und Verzugphänomene bei unterschiedlichen geometrischen Anordnungen besser zu verstehen. Die Gegenüberstellung mit der Simulation soll weiters aufzeigen, welche Modelle für die Berechnung von Schwindung und Verzug besser geeignet sind.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Schwindung

In der Spritzgießtechnik versteht man unter dem Begriff Schwindung die Verringerung der Dimension eines Spritzgießteiles in eine beliebige Richtung, nachdem es aus dem Werkzeug entformt wurde. Die Schwindung ist eine relative Größe und wird, wie in Gleichung 2.1 dargestellt, in Prozent angegeben [3].

$$S = \frac{L_W - L_{FT}}{L_W} * 100 \quad (2.1)$$

S lineare Schwindung in Prozent
 L_W Maß des Werkzeuges
 L_{FT} Maß des Formteils

Die Ursache von Schwindung und Verzug ist das thermische und druckabhängige Ausdehnungsverhalten des Kunststoffes. Die Auswirkungen dieser Materialeigenschaften können mit Hilfe des p - v - T -Diagramms gezeigt werden. In Abbildung 2.1 wird das p - v - T -Diagramm eines amorphen Thermoplasten (A) dem eines teilkristallinen Thermoplasten (B) gegenübergestellt. Teilkristalline Thermoplaste weisen aufgrund der Kristallisation eine größere lineare Schwindung auf als amorphe Thermoplaste [7].

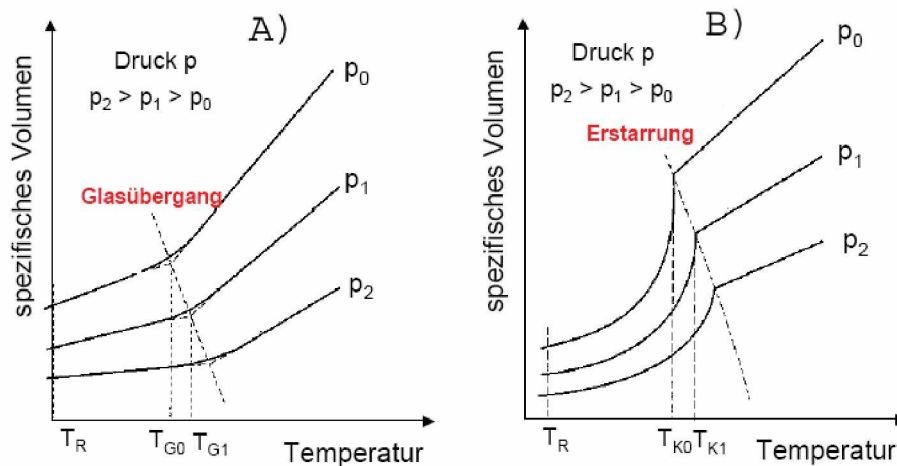


Abbildung 2.1: p - v - T -Diagramm eines amorphen (A) und eines teilkristallinen (B) Thermoplasten [10]

Im p - v - T -Diagramm wird die Änderung des spezifischen Volumens v von Kunststoffen unter dem Einfluss von Druck p und Temperatur T veranschaulicht. Die Abbildung 2.2 zeigt ein p - v - T -Diagramm eines amorphen Kunststoffes. Darin ist der Spritzgießprozess schematisch dargestellt (Punkte 0 bis 5 in Abbildung 2.2). Bei Punkt 0 beginnt die Füllphase. Bei isothermer Füllung ist die Kavität in Punkt 1 volumetrisch gefüllt und der maximale Einspritzdruck wird erreicht. Daran anschließend findet die Kompressionsphase statt, welche je nach eingestellter Druckhöhe in Punkt 2 endet. Im Idealfall läuft die daran anschließende Nachdruckphase entlang einer Isobaren bis zum Punkt 3. Dort tritt die

Versiegelung (Siegelpunkt) der Kavität ein. Danach kühlt das Formteil isochor bis zum Punkt 4 ab. In diesem Punkt hat der Druck im Werkzeug den Atmosphärendruck erreicht und das Formteil schwindet von der Werkzeugwand weg. Nach der Restkühlzeit und Entformung und weiterer Abkühlung auf Raumtemperatur endet die Schwindung in Punkt 5.

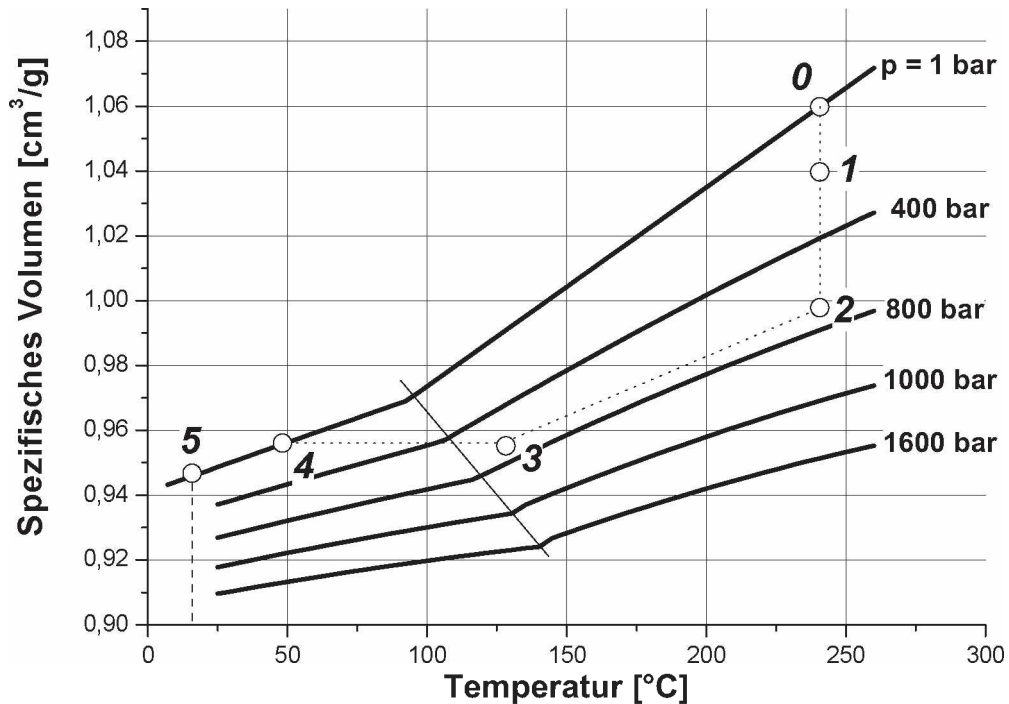


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Spritzgießprozesses im p - v - T -Diagramm eines amorphen Thermoplasten [4]

Setzt man in die Gleichung 2.1 statt Dicken- oder Längenmaßen die Volumina der Werkzeugkavität und die des Formteils ein, so spricht man von Volumenschwindung. Die Volumenschwindung lässt sich näherungsweise aus dem p - v - T -Diagramm (siehe Abbildung 2.2) bestimmen.

$$S_V = \frac{V_W - V_{FT}}{V_W} * 100 = \frac{v_4 - v_5}{v_5} * 100 \quad (2.2)$$

- S_V Volumenschwindung in Prozent
- V_W Volumen des Werkzeuges
- V_{FT} Volumen des Formteiles
- v_4 spezifisches Volumen im Punkt 4
- v_5 spezifisches Volumen im Punkt 5

Die zuvor definierte lineare Schwindung beträgt bei isotropen Werkstoffen etwa 1/3 der Volumenschwindung. Wird die Vermessung 16 Stunden nach der Fertigung durchgeführt, so spricht man von der sogenannten Verarbeitungsschwindung VS (nach DIN 16901), welche nach Gleichung 2.3 bestimmt wird.

$$VS = \frac{L_W - L}{L_W} * 100 \quad (2.3)$$

- VS Verarbeitungsschwindung in Prozent
 L_W Werkzeugmaß
 L Formteilmaß nach 16-stündiger Lagerung im Normklima

Die darüber hinausgehenden Maßänderungen am Spritzgießformteil werden unter dem Begriff Nachschwindung zusammengefasst (Gleichung 2.4).

$$NS = \frac{L - L_1}{L_W} * 100 \quad (2.4)$$

- NS Nachschwindung in Prozent
 L_W Werkzeugmaß
 L Maß des Formteils nach 16-stündiger Lagerung im Normklima
 L_1 Maß des Formteils nach längerer Lagerung oder nach Warmlagerung

Besonders bei teilkristallinen Kunststoffen tritt infolge der Nachkristallisation eine Nachschwindung auf. Verarbeitungsschwindung VS und Nachschwindung NS ergeben zusammen die Gesamtschwindung GS .

$$GS = VS + NS \quad (2.5)$$

In Abbildung 2.3 werden die definierten Schwindungen graphisch dargestellt.

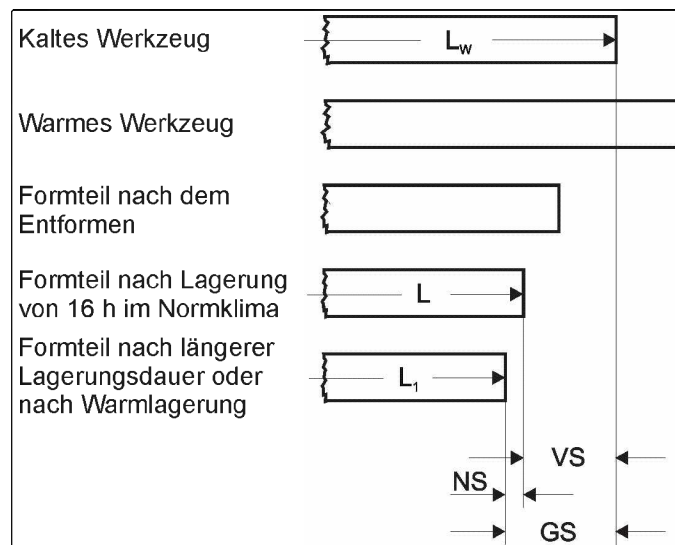


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung von Verarbeitungsschwindung VS , Nachschwindung NS und Gesamtschwindung GS [9]

Die Geometrie des Formteiles und die geometrischen Randbedingungen des Maßes im Werkzeug sind maßgebend für die Schwindungsart. In Dickenrichtung spricht man von freier Schwindung, liegt dagegen im Werkzeug eine Teilfixierung eines Maßes vor, so bezeichnet man diese Art der Schwindung als behinderte. Wenn beispielsweise eine Länge im Werkzeug aufgrund eines Kernes fixiert ist, liegt eine verhinderte Schwindung vor (siehe Abbildung 2.4). Eine eindeutige Einordnung von Maßen in diese Unterteilung ist bei komplexen Formteilen meist schwierig bzw. nicht möglich.

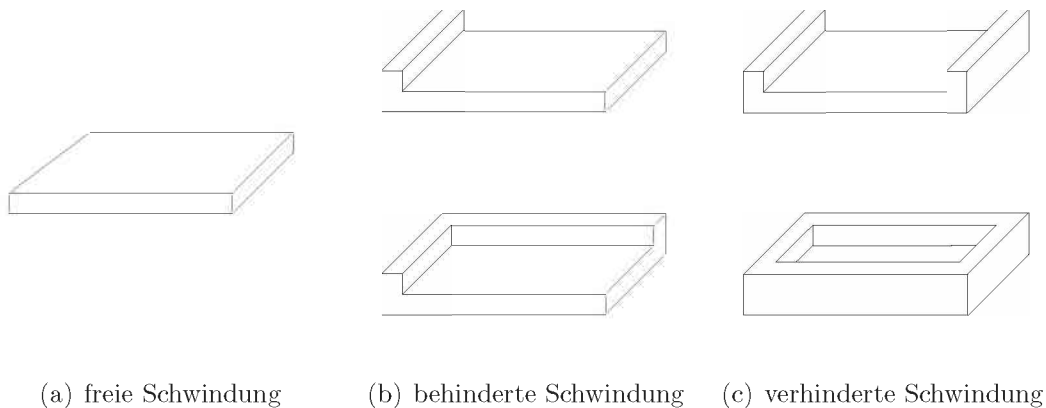


Abbildung 2.4: Schwindungsarten an einfachen Bauteilen [1]

2.2 Verzug

Unter Verzug wird die Abweichung der Gestalt des Formteiles von der Sollgestalt verstanden, wenn sich Flächen verwölben und verwinden oder sich Winkelmaße ändern. Ursache für den Verzug sind immer Schwindungsunterschiede im Formteil. Diese werden durch

- lokal unterschiedliche Temperaturverhältnisse
- lokal unterschiedliche Druckverhältniss und
- Werkstoffanisotropien

verursacht, wobei sich die einzelnen Effekte überlagern [7].

Die Abbildung 2.5 zeigt einen Überblick über einige schwindungs- und verzugsrelevante Phänomene. Im Folgenden wird insbesondere auf das Phänomen Winkelverzug eingegangen (rechte untere Ecke in Abbildung 2.5), da diese Art des Verzuges bei der in dieser Arbeit untersuchten Schachtel meist beobachtet werden kann.

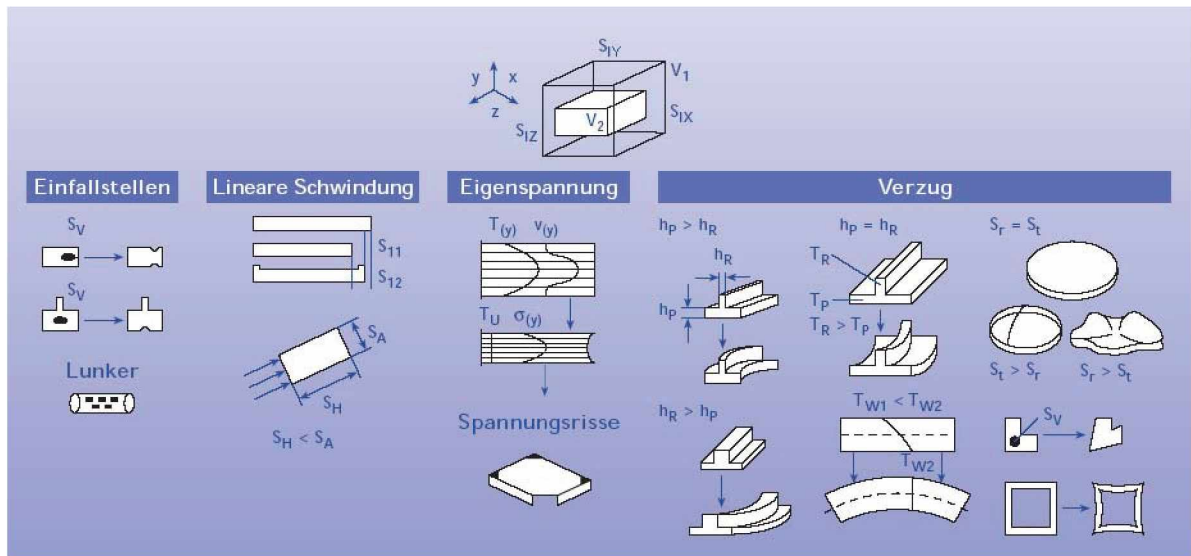


Abbildung 2.5: Überblick über einige schwindungs- und verzugsrelevante Phänomene [13]

In Abbildung 2.6 wird der Winkelverzug dargestellt, bei welchem es zu einer Änderung der Winkelmaße kommt. Aufgrund der kleineren für die Wärmeabfuhr zur Verfügung stehenden Fläche in den Eckbereichen (Inneneite), findet dort eine ungleichmäßigere Kühlung statt. Dadurch schwindet die Innenseite stärker, was zu lokal unterschiedlicher Schwindung führt (Abbildung 2.6 oben). Ein vorhandener Schmelzerückstand, ebenfalls in Abbildung 2.6 ersichtlicht, führt zu inneren Kontraktionskräften und schließlich zur Deformation des Formteiles in Form von Winkelverzug.

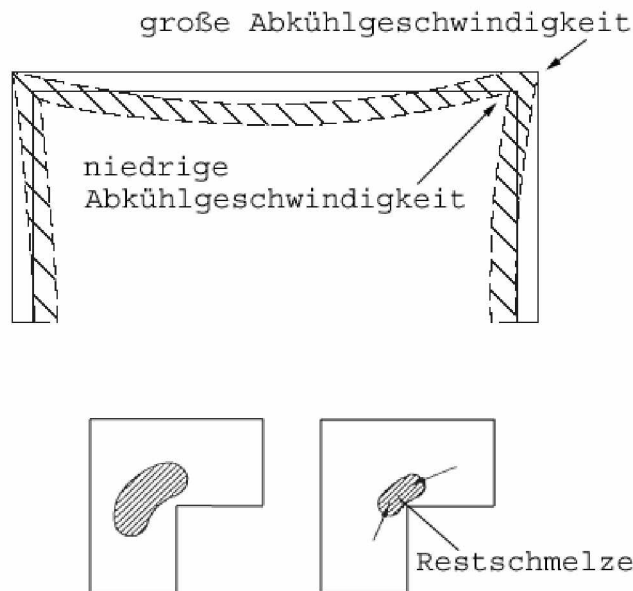


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung des Winkelverzuges [6]

2.2.1 Einflussgrößen auf Schwindung und Verzug

Die Einflussgrößen auf das Schwindungs- und Verzugsverhalten von thermoplastischen Spritzgießteilen sind sehr weitläufig. Das gegenseitige Zusammenwirken dieser Größen ist komplex und vielfach nicht einfach vorherzusagen. Die Einflussgrößen lassen sich, wie in Abbildung 2.7 dargestellt, unterteilen.

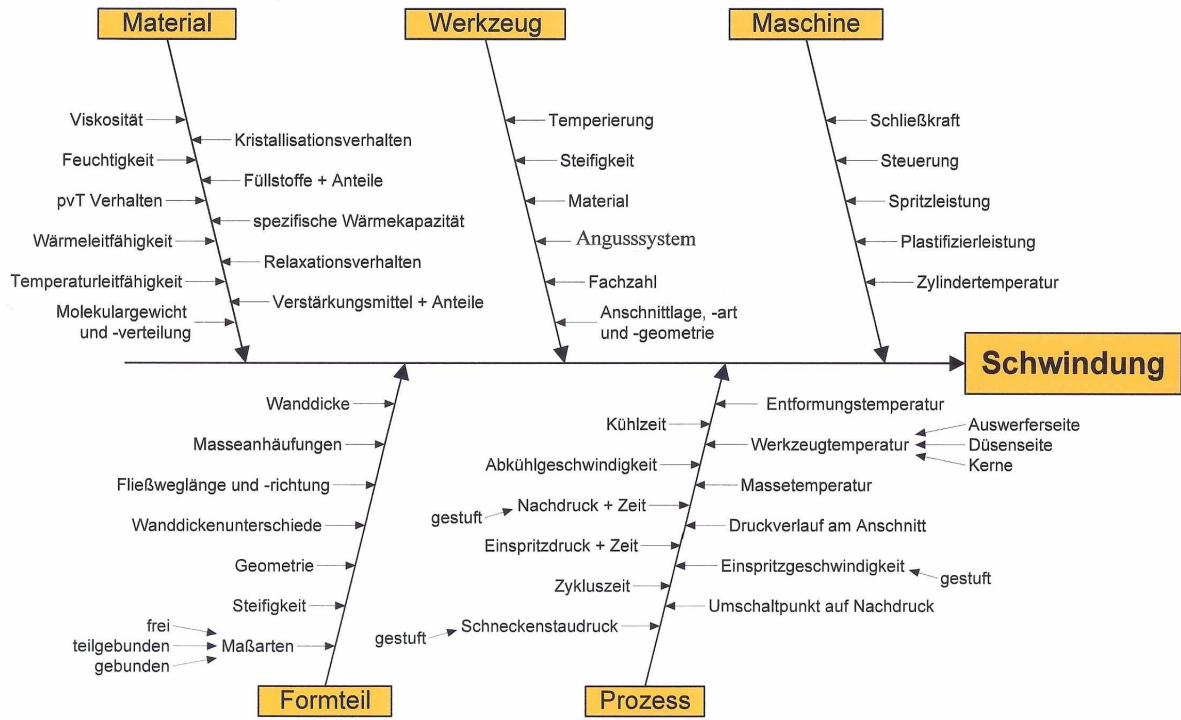


Abbildung 2.7: Übersicht der Einflussgrößen auf die Schwindung [5]

In Abbildung 2.8 werden die Auswirkungen der verschiedenen Prozesseinflüsse auf die Schwindung qualitativ dargestellt. Die Kurven gelten unter der Voraussetzung, dass jeweils nur ein Prozessparameter geändert wird und die restlichen gleich bleiben. Hier sei anzumerken, dass die tatsächlichen Zusammenhänge in Abhängigkeit des Materialtyps von diesen idealisierten Kurven mehr oder weniger abweichen können.

In den folgenden Abschnitten soll auf die Verarbeitungparameter Nachdruckhöhe und Massetemperatur sowie den Geometrieparameter Wanddicke näher eingegangen werden, da im Kapitel 4 deren Einflüsse auf das Schwindungs- und Verzugsverhalten zweier Werkstoffe aufgezeigt und diskutiert werden.

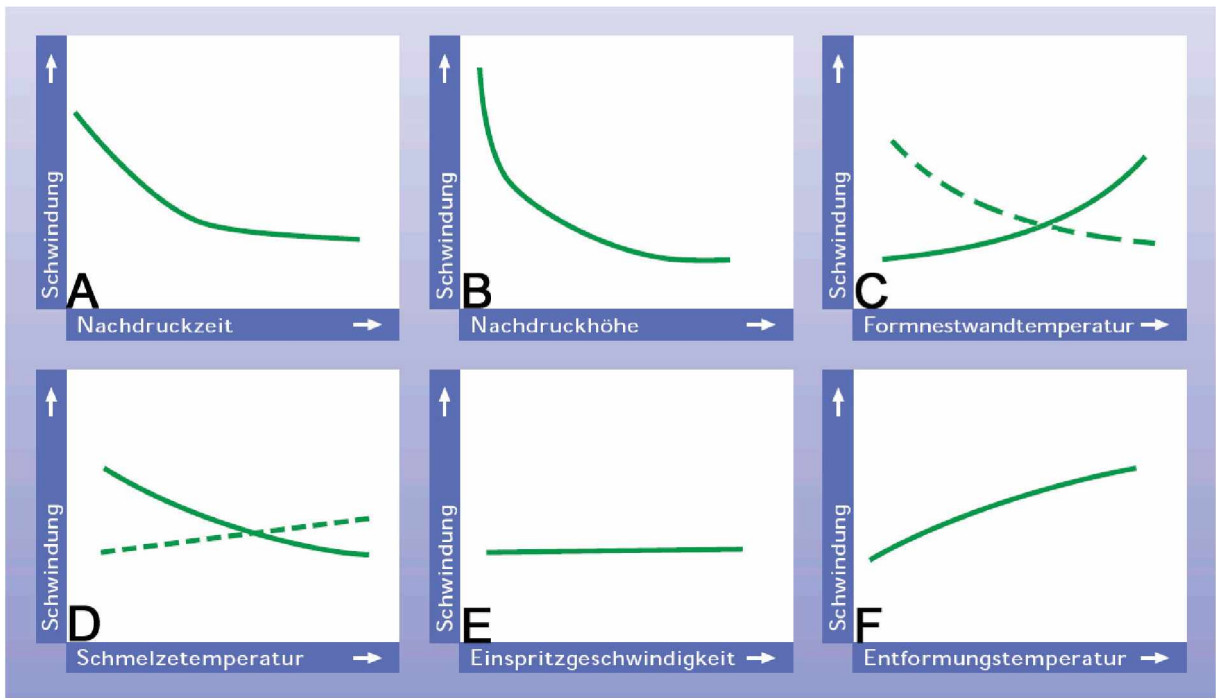


Abbildung 2.8: Prozesseinflussgrößen auf die Schwindung [13]

- Nachdruckhöhe

Sowohl bei amorphen als auch bei teilkristallinen Thermoplasten hat die Nachdruckhöhe einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Schwindung. Je höher der wirkende Nachdruck, desto geringer wird die Verarbeitungsschwindung. Allerdings ist dieses Verhalten degressiv. Mit Zunahme des Nachdrucks wird die Schwindungsreduktion geringer. Bei optimaler Auslegung des Angussystems und des Formteils kann bei Erhöhung des Nachdrucks bei teilkristallinen Thermoplasten eine Verringerung der Schwindung um bis zu 0,5% erreicht werden. Aufgrund des geringeren Schwindungspotentials werden bei amorphen Kunststoffen Werte von bis zu 0,2% erreicht [13].

- Massetemperatur

Bei der Massetemperatur gibt es zwei entgegengerichtete Wirkungen. Zum einen führt eine Erhöhung der Massetemperatur zu einer Verringerung der Schmelzeviskosität. Dadurch erhöht sich die Druckübertragung ins Formteil, welche sich in einer Schwindungsreduktion äußert (durchgezogene Kurve in Abbildung 2.8 D). In der Regel wird dieser Kurvenverlauf gemessen und beobachtet. Zum anderen führt eine erhöhte Schmelzetemperatur zu einem erhöhten thermischen Kontraktionspotential der Masse (gestrichelte Linie in Abbildung 2.8 D). Bei ungünstigen Wanddickenverhältnissen und schlechter Druckübertragung kann man dann bei Erhöhung der Massetemperatur eine Erhöhung der Schwindung feststellen [6].

- Wanddicke

Mit zunehmender Wanddicke ist eine Zunahme der Schwindung zu beobachten. Dies rührt daher, dass das Bauteil in Dickenrichtung keine Behinderung bei der Schwindung erfährt. Da mit steigender Dicke ein höheres Kontraktionspotential (mehr Formmasse) vorliegt, steigt so auch die Schwindung [6].

2.3 Theoretische Grundlagen der Spritzgießsimulation

2.3.1 Beschreibung der Füllphase in Moldflow Plastics Insight MPI™

Moldflow Plastics Insight™ (MPI™) unterscheidet zwischen 2,5D- und 3D-Berechnungen. In diesem Kapitel sollen die wesentlichen Unterschiede dieser beiden Berechnungsvarianten erläutert werden. Betrachtet man die Strömungsverhältnisse in einfachen Spritzgießteilen, kann man mehrere Zustände unterscheiden, welche in Abbildung 2.9 schematisch dargestellt sind. In ebenen Bereichen, in denen die Fließfront bereits weiter fortgeschritten ist, kommt es zur sogenannten Hele-Shaw-Strömung. Diese Art der Strömung wird dadurch charakterisiert, dass sie keine Geschwindigkeitskomponente in z -Richtung aufweist. Die Hele-Shaw-Strömung wird als Basis der Füllsimulation von Spritzgießteilen herangezogen, da diese häufig aus großflächigen und ebenen Strukturen aufgebaut sind. Für die Hele-Shaw-Strömung gilt die 2,5D-Berechnung. Es wird eine ebene Strömung angenommen, was einer 2D-Berechnung gleichkommt. Zusätzlich wird über die Dicke ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil berechnet, welches sich aus dem strukturviskosen Fließverhalten der Kunststoffschmelze und der Randbedingung des Wandhaftens ergibt. Der Ansatz der 2,5D-Berechnung stellt somit einen Kompromiss zwischen einer 2D- und einer 3D-Berechnung dar. Es erfolgt eine dreidimensionale Beschreibung der Strömung, allerdings ohne Berücksichtigung der dritten Geschwindigkeitskomponente, wodurch der Rechenaufwand erheblich gesenkt wird ohne Ungenauigkeiten in Kauf nehmen zu müssen. Die Diskretisierung in Finite Elemente erfolgt über ebene Elemente (Dreiecke), denen als Attribut die Dicke zugewiesen wird [8].

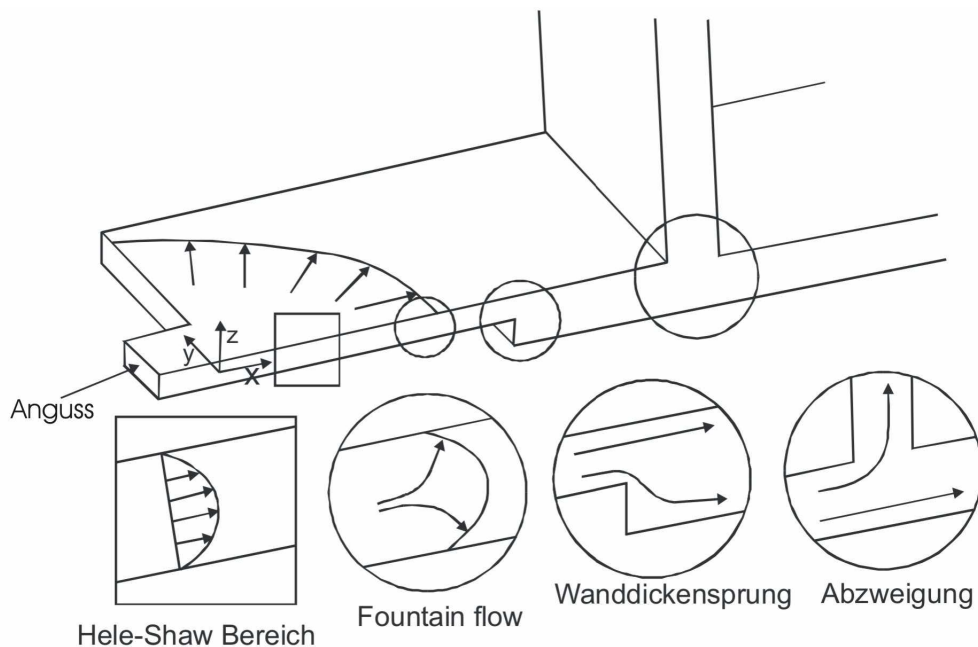


Abbildung 2.9: Strömungsvorgänge in einer Spritzgießkavität [8]

Bei anderen Fließphänomenen reicht es jedoch nicht aus, eine 2,5D-Berechnung zu verwenden, da auch eine z -Geschwindigkeitskomponente vorliegt. Hier ist es erforderlich, eine exakte 3D-Berechnung zu verwenden, um dreidimensionale Strömungsvorgänge, wie sie zum Beispiel bei einer Quellströmung (fountain flow) vorkommen, hinreichend genau beschrei-

ben zu können. Zu dreidimensionalen Strömungsvorgängen kommt es auch bei Wanddickensprüngen, Abzweigungen und bei der Freistrahlbildung. Bei der 3D-Berechnung erfolgt die Diskretisierung in Finite Elemente nicht über ebene Elemente, sondern über Tetraeder. Um eine hinreichende Genauigkeit der Berechnung zu erzielen, muss über die Bauteildicke fein vernetzt werden, was in weiterer Folge zu erhöhtem Rechenaufwand führt. In Tabelle 2.1 werden die wichtigsten Unterschiede zwischen 2,5D- und 3D-Berechnung nochmals zusammengefasst. Es sei hier jedoch darauf hingewiesen, dass es sich dabei um Angaben von MPITM handelt. In der Praxis sind bei der Modellierung verschiedenster Formteile Kompromisse in Kauf zu nehmen, da sie aufgrund ihrer Geometrie nicht immer eindeutig zu einer der beiden Berechnungsvarianten zuzuordnen sind [8].

Tabelle 2.1: Unterschiede zwischen 2,5D- und 3D-Strömungssimulation [12]

2,5D-Berechnung	3D-Berechnung
Hele-Shaw-Strömung keine z-Geschwindigkeitskomponente flächige Bauteile ohne Wanddickensprünge Breiten-/Höhen-Verhältnis: $b/h > 4$ ebene Elemente (Dreiecke) Rechenaufwand gering	Dreidimensionale Strömung z-Geschwindigkeitskomponente Quellströmung, Wanddickensprünge usw. dickwandige Formteile: $b/h < 4$ dreidimensionale Elemente (Tetraeder) großer Rechenaufwand

2.4 Modelle in MPITM

In diesem Kapitel werden die im Programm *Moldflow Plastics Insight* (MPITM) zur Verfügung stehenden Modelle mit ihren Charakteristika und Anwendungsmöglichkeiten vorgestellt. Wie schon in Kapitel 2.3.1 gezeigt, wird in MPITM zwischen 2,5D- und 3D-Berechnungen unterschieden. Für die 2,5D-Berechnung stehen zwei Modelle zur Verfügung:

- Das Midplane - Modell und
- das Fusion - Modell.

Für dreidimensionale Anwendungen gibt es die Möglichkeit, das sogenannte

- 3D - Modell

zu verwenden.

2.4.1 Midplane - Modell [8]

Das Midplane-Modell stellte bis vor wenigen Jahren den gängigsten Weg der Modellvorbereitung in Moldflow dar. Dabei wird das Formteil durch zweidimensionale Ebenen abgebildet. Diese Ebenen beschreiben die Mittelflächen der Bauteilgeometrie. Den Flächen wird als Attribut eine bestimmte Dicke h zugewiesen, die der Formteildicke an der jeweiligen Stelle entspricht. So wird aus dem 2D-Modell ein 2,5D-Modell geschaffen. Die Mittelflächen werden von Moldflow durch Dreieckselemente vernetzt, um eine FEM-Berechnung durchführen zu können. Das von MPITM generierte Netz muss gegebenenfalls von Hand verbessert werden, um eine reibungslose Berechnung zu ermöglichen. Flächige Bereiche, bei denen die Dicke h klein im Vergleich zur Breite b des Fließkanalquerschnittes ist ($b > 4h$), bereiten keine Probleme.

Die Modellierung dickwandiger Formteile sowie dünnwandiger Formteil mit partiellen Verdickungen bereitet Probleme. Eine automatische Generierung der Mittelflächen ist bei komplexen Bauteilen nicht möglich. Ein Beispiel dafür wird in Abbildung 2.10 gezeigt.

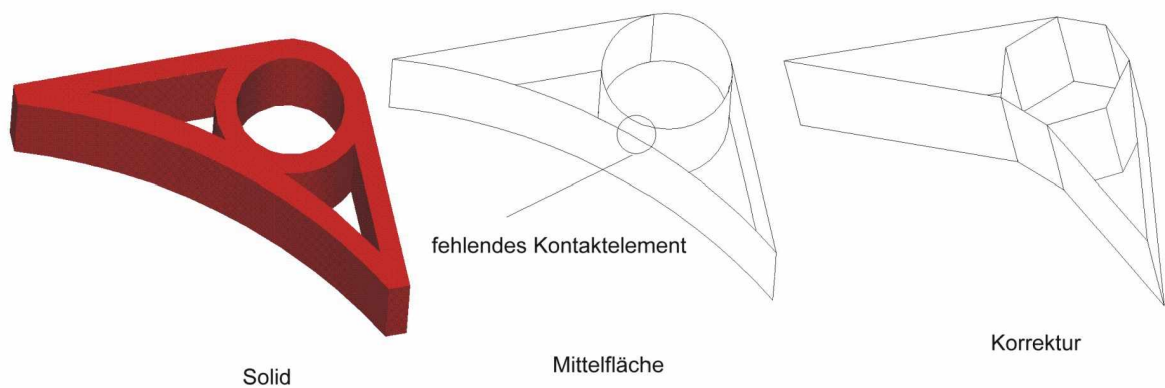


Abbildung 2.10: Probleme bei der Modellierung eines Midplane - Modells [8]

In diesem Fall müssen Bereiche wie etwa der zylindrische Teil in Abbildung 2.10 durch andere geometrische Lösungen realisiert werden (Korrektur in Abbildung 2.10). Um die Berechnung zu starten, sind folgende Schritte durchzuführen:

- Konstruktion des Mittelflächenmodells in einem CAD-Programm
- Export des CAD-Modells
- Import in MPITM
- Vernetzung des Flächenmodells mit 2D-Dreieckselementen
- Kontrolle des FE-Netzes
- Korrekturen am FE-Netz
- Überprüfung der Orientierung des FE-Netzes
- Zuweisung der Wanddicken
- Modellierung des Angussystems

2.4.2 Fusion - Modell [8]

Um den Zeitaufwand für die Erstellung eines Mittelflächenmodells zu minimieren, gibt es in MPITM mittels des Fusion-Modells die Möglichkeit, direkt dreidimensionale CAD-Daten zu verwenden. Es wird jedoch nicht dreidimensional gerechnet, da jeweils nur gegenüberliegende Flächen des Formteils zur Berechnung herangezogen werden. Hierbei müssen beide Flächen vernetzt werden. Diese Vernetzungstechnik wird als *Dual Domain Technology* bezeichnet und bietet folgende Vor- und Nachteile:

- Vorteile
 - Geringerer Zeitaufwand beim Generieren des Berechnungsmodells
 - Bessere Berücksichtigung der Wanddicken
- Nachteile
 - FE - Netz beinhaltet bei gleicher Netzdichte doppelt so viele Elemente wie bei Midplane-Modell
 - Nichtlineares Verzugverhalten nicht berechenbar

Die Vorgehensweise für das Erstellen eines Fusion-Modells wird im Folgenden zusammengefasst:

- 3D-Modell in CAD-Programm erstellen
- Export des CAD-Modells
- Import des Modells in MPITM
- Vernetzen der Oberflächen mit 2D-Dreieckselementen
- Kontrolle und Korrektur des FE-Netzes
- Modellierung des Angussystems

2.4.3 3D - Modell [8]

Bauteile, die sehr dickwandig im Vergleich zu den übrigen Abmessungen sind, bzw. große Wanddickensprünge aufweisen, können durch die eben vorgestellten Modelle nicht hinreichend genau beschrieben werden. In solchen Fällen muss ein 3D-Modell verwendet werden. Das Formteil wird mit Tetraederelementen vernetzt. Aufgrund der erhöhten Anzahl der Elemente und Knoten werden bei 3D-Berechnungen große Rechnerleistungen benötigt. Für Standardspritzgießteile bietet dieses Verfahren keinen Vorteil gegenüber dem 2,5D-Modell. Bei sehr dünnen Bauteilen ist das 3D-Modell ungenauer, da bei begrenzter Elementanzahl die Diskretisierung über die Formteildicke viel gröber ist, als bei vergleichbaren 2,5D-Modellen. Die Begründung dafür liegt in der Forderung nach einer geringen Verzerrung (*aspec ratio*) der einzelnen Elemente. Die Abbildung 2.11 zeigt eine schematische Darstellung des *aspec ratio*, wobei hier der zweidimensionale Fall abgebildet ist. Das *aspec ratio* (AR) ist durch das Verhältnis der Länge l der längsten Seite des Dreieckselements zur Höhe h auf dieser Seite definiert. Es gilt sowohl für 2,5D- als auch 3D-Modelle als Qualitätskriterium des FE-Netzes in MPITM.

Für die numerische Berechnung bereiten Elemente, deren *aspect ratio* größer als 10 ist, Probleme. Standardmäßig wird in MPITM mit 6 Tetraederelementen über die Formteildicke vernetzt. Bei dünnen großflächigen Formteilen bedeutet dies eine sehr kurze Elementlänge über die Formteildicke. Um die Verzerrungen der Elemente in Längsrichtung des Formteils nicht zu groß werden zu lassen, muss gegenüber einem Fusion- oder Midplane-Modell eine wesentlich höhere Elementanzahl vorgesehen werden. Aufgrund des limitierenden Faktors der Rechnerleistung sind solche Modelle jedoch nicht mehr berechenbar.

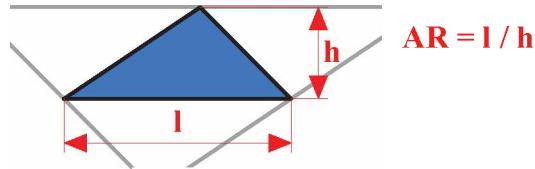


Abbildung 2.11: Darstellung des *aspect ratio* eines Dreieckselementes [2]

2.5 Berechnung von Schwindung und Verzug in MPITM

Zur Schwindungsberechnung wird in MPITM ein Ansatz herangezogen, der die gesamte Schwindung nach folgenden vier Einflussgrößen unterteilt, welche in Summe zur resultierenden Schwindung beitragen.

- Volumenschwindung
- Kristallisation
- Geometriebedingte Schwindungsbehinderung
- Orientierungseffekte

Für die Berechnung der Verzuges mit MPITM werden zwei verschiedene Berechnungsansätze verwendet, wobei letzterer immer mehr an Bedeutung gewinnt:

- Schwindung infolge Restdehnung
- Schwindung infolge Restspannung

Ein spezielles Berechnungsmodell, welches die Schwindung infolge Restspannung bestimmt, ist das sogenannte *Corrected Residual In-Mold-Stress* - Modell (*CRIMS* - Modell). Dabei wird für jedes Element des FEM-Netzes die Restspannungsverteilung berechnet, wobei sich für jedes Element die Spannungsverteilung parallel und normal zur Fließrichtung ergibt. Die Deformation des gesamten Formteils ist damit berechenbar. Das konventionelle Modell der Restspannungsverteilung beruht auf theoretischen Betrachtungen und ist daher unabhängig von gemessenen Schwindungswerten. Zusätzliche Schwindungswerte können die Berechnungen allerdings erheblich verbessern, indem korrigierte Spannungswerte errechnet werden. Beim *CRIMS* - Modell werden zusätzlich zum rein theoretisch-mathematischen Berechnungsmodell gemessene Schwindungswerte in die Berechnung mit

einbezogen. Daher kommt auch der Name dieses Hybrid - Modells. Die Schwindungswerte werden seitens der Firma Moldflow ermittelt und für das jeweilige Material zur Verfügung gestellt.

Der schematische Berechnungsablauf in MPITM unter Verwendung des *CRIMS* - Modelles ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

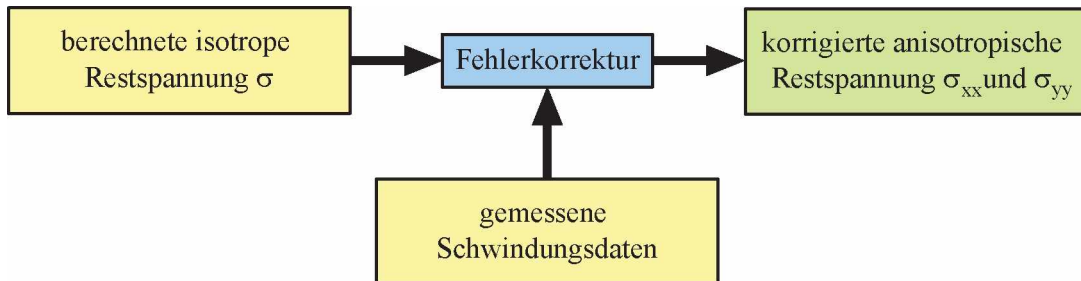


Abbildung 2.12: Schematischer Berechnungsablauf des *CRIMS* - Modells (nach [8])

Das *CRIMS* - Modell wird mit gutem Erfolg verwendet, da es eine bessere Übereinstimmung zwischen Berechnung und Realität liefert, als Modelle, die ohne experimentell ermittelte Schwindungsdaten rechnen. Solche Uncorrected Residual Stress - Modelle bringen Ungenauigkeiten mit sich und erlauben nur Aussagen über Trends und nicht Absolutwerte der Deformation. An dieser Stelle wird jedoch darauf hingewiesen, dass in MPITM derzeit nur für wenige Materialien *CRIMS* - Daten vorhanden sind. Aus diesem Grund muss häufig mit Uncorrected Residual Stress-Modellen gerechnet und deren Ungenauigkeiten in Kauf genommen werden [8]. Ein Grund für diese Ungenauigkeiten ist vermutlich auch die Verwendung von p - v - T -Daten, die standardmäßig bei deutlich geringeren Abkühlraten gemessen werden, als sie im Spritzgießprozess auftreten.

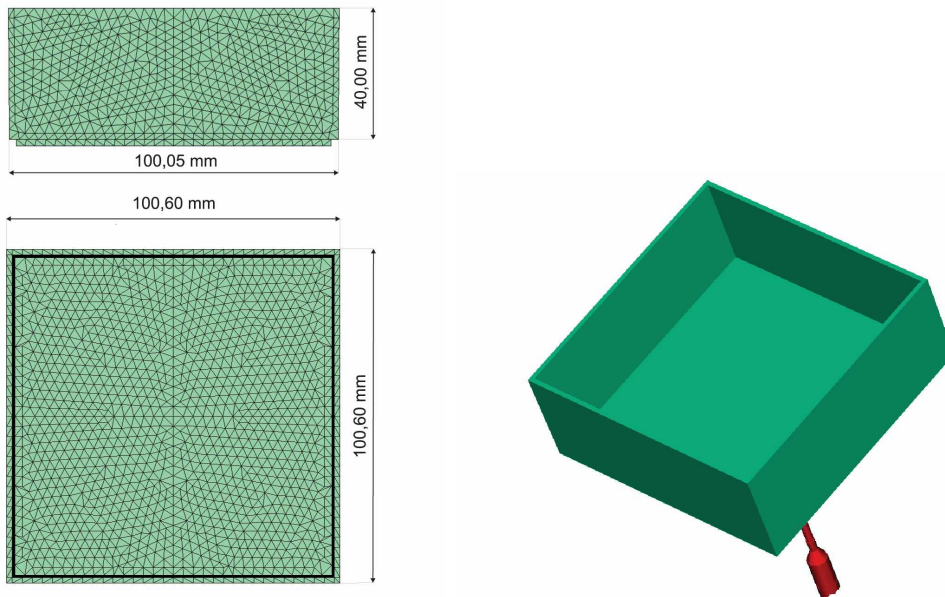
3 Experimentelles

3.1 Verwendetes Spritzgussformteil

Die geometrie- und prozessabhängige Verarbeitungs- und Nachschwindung wurde anhand eines Schachtelformteils untersucht. Dieses wurde laut Versuchsplan mit 48 verschiedenen Versuchseinstellungen im Spritzgießprozess abgemustert (s. Kap 3.4.1).

Das zentral über einen Heißkanal angespritzte Schachtelformteil zeichnet sich durch seine relativ einfache Geometrie aus. Die Abmessungen der Grundfläche der Schachtel betragen 100,05 mm x 100,05 mm und deren Höhe beträgt 40,00 mm. Bedingt durch die Entformungsschräge beträgt das Außenmaß an der Oberseite des Formteils 100,60 mm.

Durch verschiedene Formeinsätze ist es möglich, die Bodenwanddicke und die Seitenwanddicke zu verändern (siehe Tabelle 3.4). An diesem Formteil können teilgebundene und gebundene Maße (vgl. Kap. 2.2) hinsichtlich ihrer linearen Schwindung untersucht werden. Des Weiteren erlaubt die Schachtel Untersuchungen des Verzuges. Bei diesem Formteil äußert sich dieser vor allem in einem Einfallen der Seitenflächen. In Abbildung 3.1(a) sind der Grund- und Aufriss sowie in Abbildung 3.1(b) die 3D-Ansicht des Formteiles dargestellt.

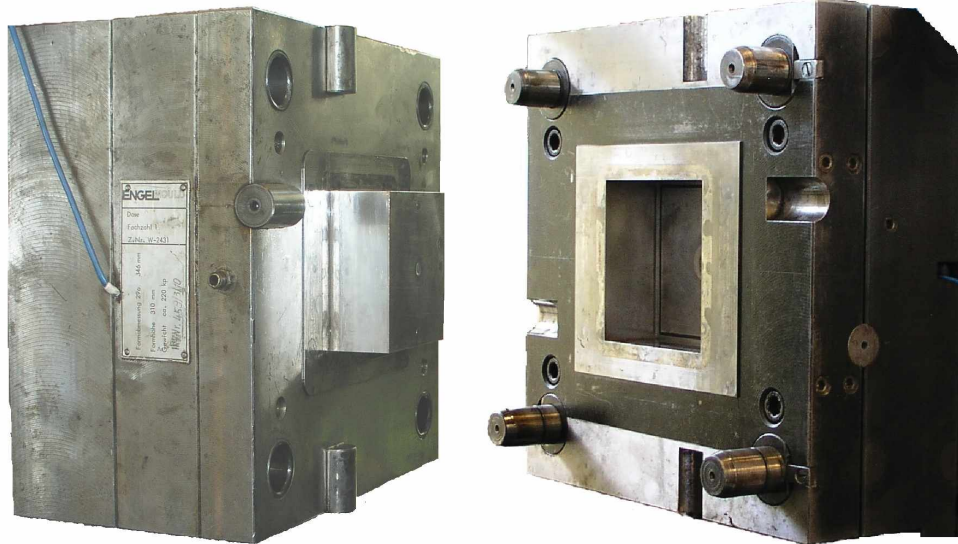


(a) Schachtelformteil 100,05 x 100,05 mm

(b) Schachtelformteil 3D-Ansicht

Abbildung 3.1: Schachtelformteil 100,05 mm x 100,05 mm x 40 mm zentral über Heißkanal angespritzt

Die Abmusterung des Schachtelformteiles erfolgte mittels des in Abbildung 3.2 gezeigten Heißkanalwerkzeuges (I.Nr.: 458/3/10, Institut für Kunststoffverarbeitung, Leoben, A).



(a) Schachtelwerkzeug Auswerferseite

(b) Schachtelwerkzeug Düsenseite

Abbildung 3.2: Düsenseite und Auswerferseite des Schachtelwerkzeuges

3.2 Untersuchte Kunststoffe

Im Rahmen dieser Arbeit wird das prozess- und wanddickenabhängige Schwindungsverhalten eines amorphen und eines teilkristallinen Kunststoffes untersucht. Die Viskositätskurven und p - v - T -Diagramme sind für beide Materialien in den Abbildungen 3.3 und 3.4 dargestellt.

Die Polymertypen *ABS Urtal M122*, der Firma ENICHEM POLIMERI (San Donato Milanese, I), ist ein Acrylnitril-Butadien-Styrol Copolymer, welches sich durch hohe Wärmeformbeständigkeit und Schlagzähigkeit auszeichnet. Es wird vorzugsweise in den Bereichen Elektronik/Elektrotechnik, Haushaltsartikel, Fahrzeug- und Lichttechnik verwendet [5].

Die Polymertypen *Hostacom BR 735 G* der Firma Basell Polyolefines (Hoofddorp, NL), ist ein UV stabilisiertes, mit 20% Mineral gefülltes, Polypropylen Copolymer. Durch seine hohe Kratzfestigkeit wird es vorwiegend für Innenanwendungen im Automobilbereich verwendet [14].

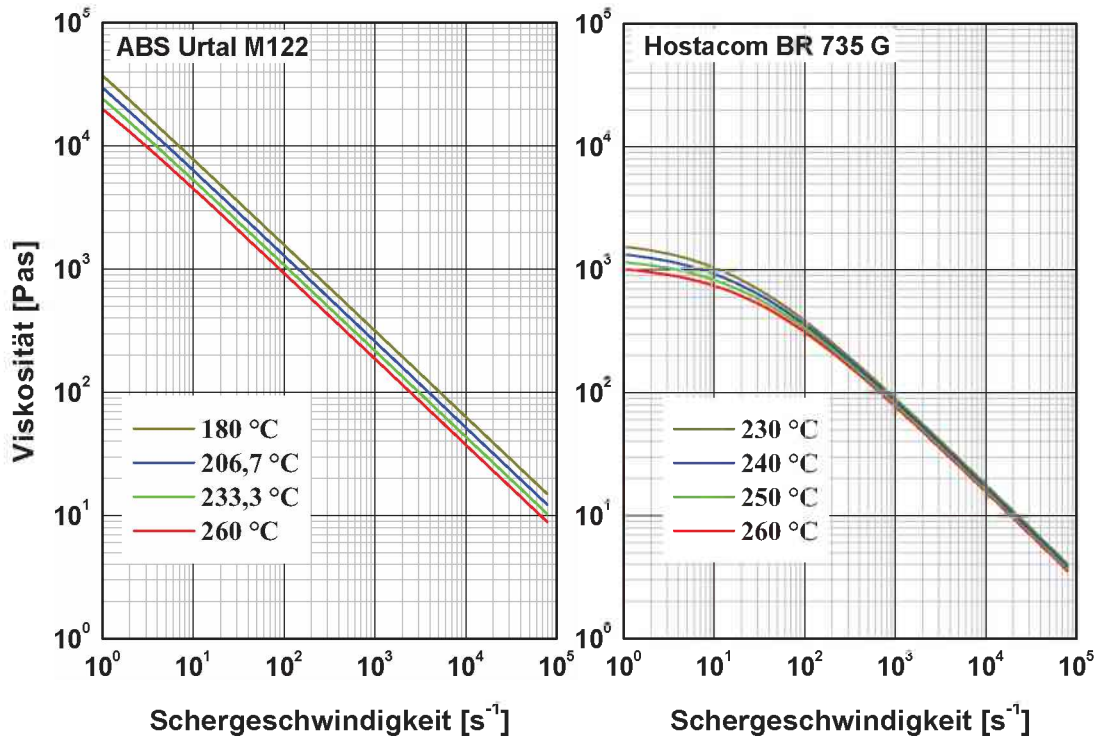


Abbildung 3.3: Viskositätskurven von *ABS Urtal M122* und *Hostacom BR 735 G* [12]

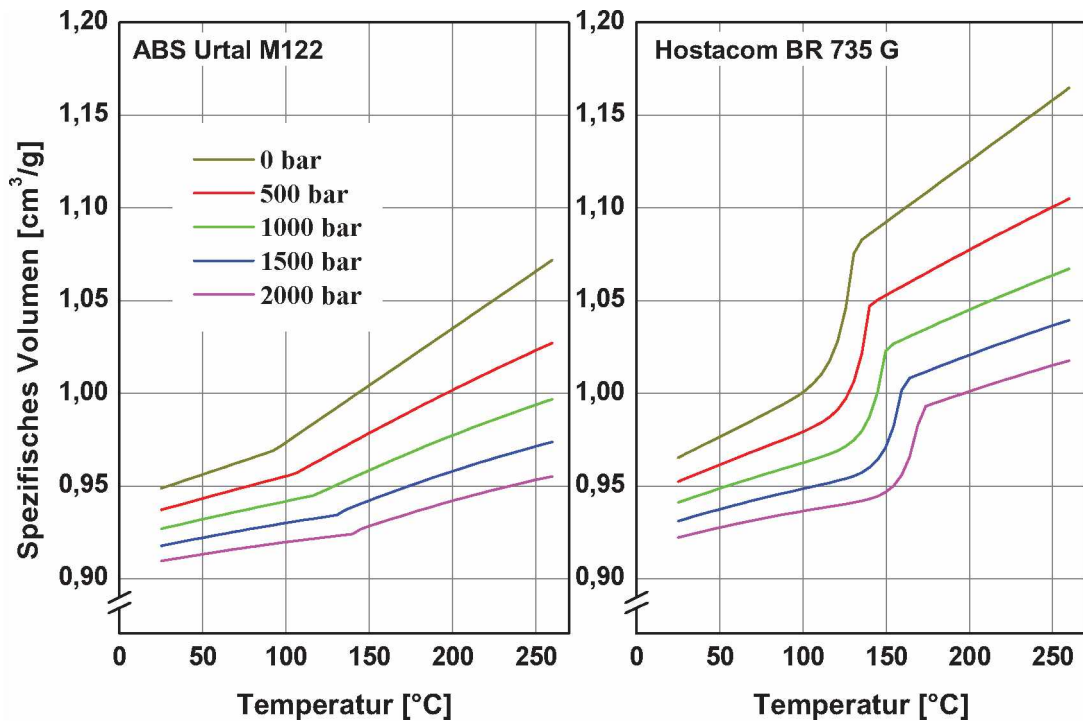


Abbildung 3.4: *p-v-T*-Diagramme von *ABS Urtal M122* und *Hostacom BR 735 G* [12]

Wichtige Materialdaten sind in Tabelle 3.1 ersichtlich, weitere materialspezifische Kennwerte können dem Anhang (Tab. A1 - A5) entnommen werden.

Tabelle 3.1: Materialdaten von *ABS Urtal M122* und *Hostacom BR 735 G* nach [5, 12, 14]

Eigenschaft	Einheit	Materialtype		Quelle
		Urtal	Hostacom	
Feststoffdichte	in g/cm^3	1,05	1,04	Hersteller
Schmelzedichte	in g/cm^3	0,94	0,86	Hersteller
Wärmeleitfähigkeit	in W/mK	0,11	0,18	Hersteller
Massetemperaturbereich	in $^{\circ}\text{C}$	(bei 240°C) 220 - 260 (max. 280)	(bei 230°C) 230 - 260 (max. 280)	MPI (Empfehlung)
Werkzeugwandtemperatur	in $^{\circ}\text{C}$	40 - 80	20 - 70	MPI (Empfehlung)
Entformungstemperatur	in $^{\circ}\text{C}$	140	110	MPI (Empfehlung)
Verarbeitungsschwindigkeit	in %	max. 0,6	max. 1,0	Hersteller
CRIMS-Modell		nein	nein	
Farbe		grau	schwarz	

3.3 Maschinen und Geräte

3.3.1 Spritzgießmaschine und Peripherie

Zur Herstellung der Spritzgussteile wurde die Spritzgießmaschine vom Typ Battenfeld 1000/200 CDK-SE des Instituts für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben verwendet (Abbildung 3.5). Bei dieser handelt es sich um eine vollelektrische Spritzgießmaschine mit Mikroprozessorsteuerung UNILOG TC 40-SE. Die Temperierung der beiden Formhälften erfolgte mit zwei Druckwassertemperiergeräten der Type TT-139 der Firma TOOL-TEMP AG, Sulgen, Schweiz. Düsen- und Auswerferseite wurde mit je einem Kühlgerät getrennt voneinander temperiert. In Tabelle 3.2 werden die technischen Daten der Spritzgussmaschine dargestellt.



Abbildung 3.5: Spritzgießmaschine Typ Battenfeld 100/200 CDK-SE

Tabelle 3.2: Technische Daten der Battenfeld 1000/200 CDK-SE Spritzgießmaschine

Eigenschaft	Einheit	Wert
Schließkraft	in kN	1000
Schneckendurchmesser	in mm	30
Maximaler Einspritzdruck	in bar	1825
Errechnetes Hubvolumen	in cm ³	99
Schnecke L/D Verhältnis		21
Maximaler Schneckenweg	in mm	140
Maximale Schneckendrehzahl	in min ⁻¹	228
Maximaler Einspritzvolumenstrom	in cm ³ /s	75
Maximale Einspritzgeschwindigkeit	in mm/s	106

Um das Vorhandensein eines hohen Restfeuchtegehaltes im Granulat ausschließen zu können, wurden die Materialien im Trockenlufttrockner vorgetrocknet. Bei beiden wurde laut Herstellerangaben eine Trocknungszeit von 6 h bei 80 °C eingehalten.

3.3.2 Messsensoren und Messdatenerfassung

3.3.2.1 Messsensoren

Während der Spritzgießversuche wurden drei Messwerte online mit verfolgt und aufgezeichnet:

- Werkzeugwandtemperatur (düsen- und auswerferseitig)
- Werkzeuginnendruck (angussnah)

Zur Messung der Werkzeugwandtemperaturen wurden Thermoelemente des Typs K verwendet. Es wurden die auswerfer- und düsenseitigen Werkzeugwandtemperaturen angussfern aufgezeichnet.

Der Werkzeuginnendruck wurde unter Verwendung eines Unisens-Quarzsensors des Typs 6157 der Firma Kistler Instrumente AG (Winterthur, CH) gemessen. Der Sensor weist zwischen 0 bar und 2000 bar eine Empfindlichkeit von $9,4 \text{ pC}/\text{bar}$ mit einer Linearität von maximal $\pm 1\%$ auf. Nach dem piezoelektrischen Prinzip übersetzt der Quarzsensor den anliegenden Druck in eine dem Druck proportionale elektrische Ladung, welche in weiterer Folge im Verstärker (Typ 5001, Kistler Instrumente AG) in eine Spannung von 0...10 V umgewandelt wird. Die Auswertung dieser Spannung erfolgt durch das nachgeschaltete Messdatenerfassungssystem *Spider 8* der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (Darmstadt, D).

3.3.2.2 Messdatenerfassungssystem

Zur Messdatenerfassung und Signalauswertung kam das Messdatenerfassungssystem *Spider 8* der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (Darmstadt, D) zum Einsatz. Die Aufzeichnung der Messdaten wurde mit Hilfe des Softwarepakets *catman Easy v1.01* (Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) und einem Mess-Laptop durchgeführt.

3.3.3 3D-Digitalisiersystem ATOS II SO

Die Vermessung der Schachtelformteile wurde mit dem optischen 3D-Digitalisierungssystem ATOS II SO der Firma GOM mbH (Braunschweig, D) durchgeführt (Abbildung 3.6(a)). Der Streifenprojektionssensor ATOS II SO basiert auf dem Triangulationsprinzip. Mittels einer Weißlicht-Projektionseinheit werden unterschiedliche Streifenmuster auf das zu vermessende Objekt projiziert und von zwei im Messkopf integrierten Kameras erfasst (s. Abb. 3.6). Mit Kenntnis der Abbildungsgleichungen der Optik können die 3D-Koordinaten für jeden der etwa 1.300.000 Kamerapixel automatisch und hochpräzise im Rechner ermittelt werden [11].

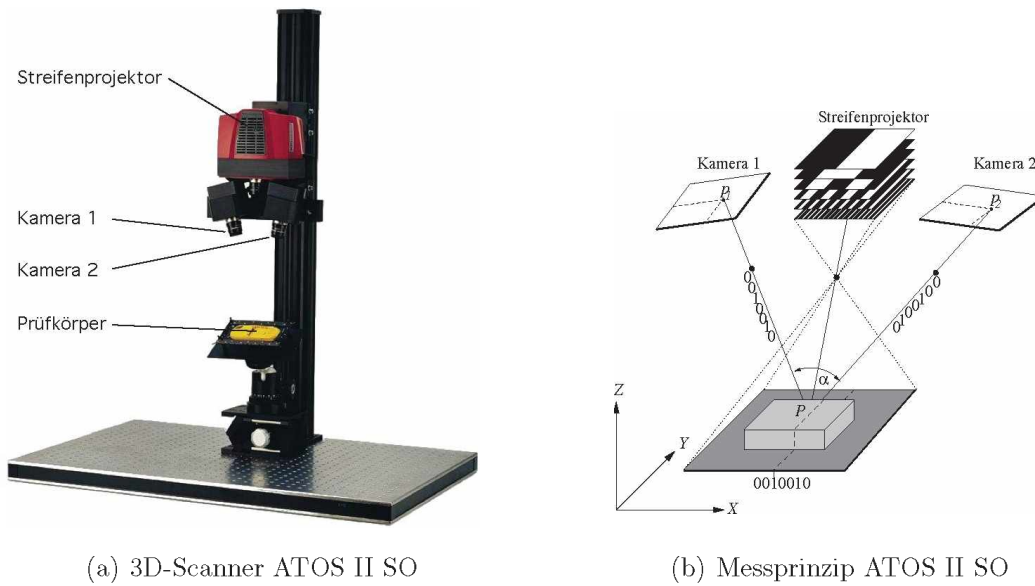


Abbildung 3.6: Messaufbau und Messprinzip des 3D-Digitalisiersystems ATOS II SO [11]

Die Messergebnisse werden direkt auf dem Monitor dargestellt. Jede weitere Messung wird vollautomatisch in ein gemeinsames Objektkoordinatensystem transformiert. Das System überwacht sowohl seine Kalibrierung, als auch den Einfluss von Umgebungsbedingungen (z.B. Erschütterungen oder Lichtveränderungen) selbst. Der erstellte 3D-Datensatz kann zur weiteren Verarbeitung in gängige Formate exportiert werden.

Die technischen Spezifikationen des optischen 3D-Digitalisiersystems ATOS II SO sind in Tabelle 3.3 zusammengestellt.

Tabelle 3.3: Technische Daten des optischen 3D-Digitalisiersystems ATOS II SO [11]

Eigenschaft	Einheit	Wert
Messvolumen	in mm^3 /Messung	35 x 28 x 15 - 200 x 160 x 160
verwendetes Messvolumen	in mm^3 /Messung	200 x 160 x 160
Messabstand	in mm	290
Messpunkte	in Punkte/7 Sekunden	1300000
Messpunktabstand	in mm	0,027 - 0,15 (abh. v. Messvolumen)
Messrauschen	in mm	0,001 - 0,004

3.4 Spritzgießversuche

3.4.1 Versuchsplanung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss der Prozessparameter

- Nachdruckhöhe p_N ,
- Massetemperatur T_M ,

sowie der

- Wanddickenkombinationen

auf das Verarbeitungs- sowie Nachschwindungsverhalten des in Kapitel 3.1 beschriebenen Formteils gezeigt. Die Einflüsse werden mittels eines vollfaktoriellen Versuchsplanes untersucht. Tabelle 3.4 zeigt eine Zusammenstellung der Einflussparameter der Spritzgießversuche.

Tabelle 3.4: Einflussparameter der Spritzgießversuche

Einflussbereich	Einflussfaktor	Stufen	Anmerkungen
Werkzeug	Wanddicke der Seitenflächen	2	1,0 und 3,0 mm
	Wanddicke der Bodenflächen	2	1,0 und 3,0 mm
Material	Polymerwerkstoff	2	ABS Urtal M 122 Hostacom BR 735 G
Prozessführung	Massetemperatur	2	niedrig, hoch
	Nachdruckhöhe	3	niedrig, mittel, hoch
Anzahl der Versuche (vollfaktorieller Versuchsplan)		48	

Aus der Anzahl der Einflussfaktoren und der Anzahl der Planstufen laut Tabelle 3.4 ergeben sich bei vollfaktoriellem Versuchsplan 48 Versuche.

3.4.2 Durchführung der Spritzgießversuche

Die Spritzgießversuche wurden im Technikum des Institutes für Kunststoffverarbeitung der Monanuniversität Leoben durchgeführt. Eine detaillierte Auflistung der Versuchsparameter zeigen die Tabellen 3.5 und 3.6.

Der Dosiervorgang der Kunststoffschmelze erfolgte mit angelegter Maschinendüse. Um einen unkontrollierten Materialaustritt der Schmelze zu verhindern, wurde zwischen den Arbeitsschritten Dosieren und Werkzeugöffnen ein Dekompressionshub durchgeführt. Während des gesamten Zykluses wurde die Maschinendüse nicht von der Werkzeughülse abgehoben. Der Einspritzvorgang wurde geschwindigkeitsgeregelt durchgeführt, wobei in Abhängigkeit der Wanddickenkombinationen und der verwendeten Materialien unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile vorgegeben wurden. Die Umschaltung von Einspritz- auf Nachdruck erfolgte volumenabhängig.

Tabelle 3.5: Versuchsplan für *ABS Urtal M122*

Vers. Nr.	T_M (°C)	p_N (% $p_{E,max}$)	Dickenk. ¹ (mm)	Vers. Nr.	T_M (°C)	p_N (% $p_{E,max}$)	Dickenk. ¹ (mm)
1	240	80	B1-W1	13	280	80	B1-W1
2	240	60	B1-W1	14	280	60	B1-W1
3	240	40	B1-W1	15	280	40	B1-W1
4	240	80	B1-W3	16	280	80	B1-W3
5	240	60	B1-W3	17	280	60	B1-W3
6	240	40	B1-W3	18	280	40	B1-W3
7	240	80	B3-W3	19	280	80	B3-W3
8	240	60	B3-W3	20	280	60	B3-W3
9	240	40	B3-W3	21	280	40	B3-W3
10	240	80	B3-W1	22	280	80	B3-W1
11	240	60	B3-W1	23	280	60	B3-W1
12	240	40	B3-W1	24	280	40	B3-W1

Tabelle 3.6: Versuchsplan für *Hostacom BR 735 G*

Vers. Nr.	T_M (°C)	p_N (% $p_{E,max}$)	Dickenk. ¹ (mm)	Vers. Nr.	T_M (°C)	p_N (% $p_{E,max}$)	Dickenk. ¹ (mm)
25	240	80	B1-W1	37	280	80	B1-W1
26	240	60	B1-W1	38	280	60	B1-W1
27	240	40	B1-W1	39	280	40	B1-W1
28	240	80	B1-W3	40	280	80	B1-W3
29	240	60	B1-W3	41	280	60	B1-W3
30	240	40	B1-W3	42	280	40	B1-W3
31	240	80	B3-W3	43	280	80	B3-W3
32	240	60	B3-W3	44	280	60	B3-W3
33	240	40	B3-W3	45	280	40	B3-W3
34	240	80	B3-W1	46	280	80	B3-W1
35	240	60	B3-W1	47	280	60	B3-W1
36	240	40	B3-W1	48	280	40	B3-W1

Die jeweilige Nachdruckhöhe wurde in Anhängigkeit des maximalen Massedruckes im Schneckenorraum während des Einspritzens ermittelt. Der maximale Einspritzdruck ($p_{E,max}$) wurde jeweils für die Versuchseinstellungen mit hoher und niedriger Massetemperatur festgestellt.

Die relative Nachdruckhöhe wurde entsprechend der jeweiligen Versuchseinstellung auf 40 %, 60 % und 80 % des entsprechenden maximalen Einspritzdruckes gesetzt. Die Bestimmung der Nachdruckzeiten erfolgte durch die Aufnahme der Siegelkurven. Diese wurden für beide Materialien jeweils für die Versuchsstufen mit einer relativen Nachdruckhöhe von 80 % des maximalen Einspritzdruckes ermittelt.

¹ Kombination der Wanddicken. B1-W3 bedeutet: Bodenwanddicke = 1 mm, Seitenwanddicke = 3 mm

Die Abbildung 3.7 zeigt exemplarisch die Ermittlung der Nachdruckzeit aus der Siegelkurve für die Versuchsnummer 13. Dazu wurde schrittweise die Nachdruckzeit erhöht, bis sich die Formteilmasse nicht mehr änderte, womit der Siegelpunkt definiert ist.

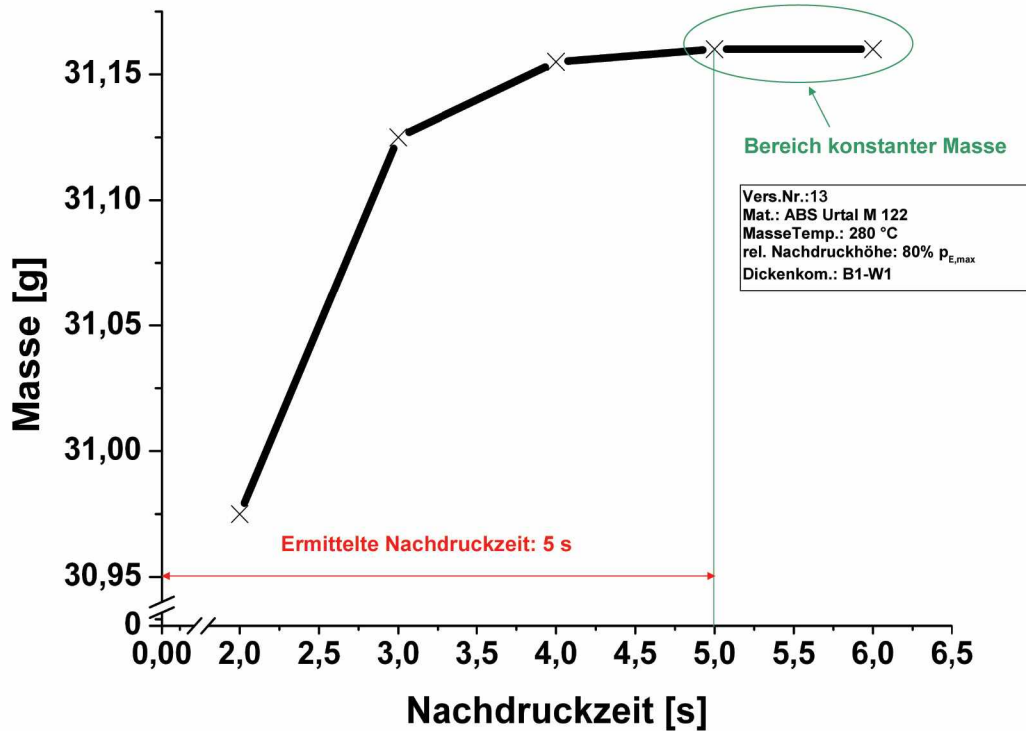


Abbildung 3.7: Siegelkurve Wanddickenkombination B1-W1 (Vers.Nr. 13)

Die empfohlenen Verarbeitungstemperaturen für *ABS Urtal M122* liegen bei 220 °C bis max. 280 °C und für *Hostacom BR 735 G* bei 230 °C bis max. 280 °C. Die Versuchsplanstufen der Massetemperaturen wurden mit 240 °C und 280 °C für beide Materialien festgelegt. Dazu wurden die Zylinderwandtemperaturen von der Einzugszone bis hin zur Düse ansteigend eingestellt, wobei die Düsentemperatur auf die Massetemperatur gemäß Versuchsplan gesetzt wurde. Die tatsächliche Massetemperatur wurde im Ausspritzversuch mit Hilfe eines Einstichthermometers gemessen.

Die Werkzeugwandtemperaturen wurden über die Vorlauftemperatur des Temperiermediums eingestellt. Die beiden Werkzeughälften wurden unterschiedlich temperiert um eine sichere Entformung zu gewährleisten (bei gleicher Temperierung blieb das Formteil in der düsenseitigen Werkzeughälfte hängen). Für *ABS Urtal M122* wurde die Düsenseite mit 55 °C und die Auswerferseite mit 45 °C temperiert. Für *Hostacom BR 735 G* wurde die Düsenseite mit 40 °C und die Auswerferseite mit 30 °C temperiert. Die Temperaturen befinden sich jeweils innerhalb der von den Herstellern empfohlenen Temperaturgrenzen (siehe Tabelle 3.1).

3.5 Bestimmung der Schwindungsmaße

Das Formteil wurde an den in Abbildung 3.8 gezeigten Stellen vermessen.

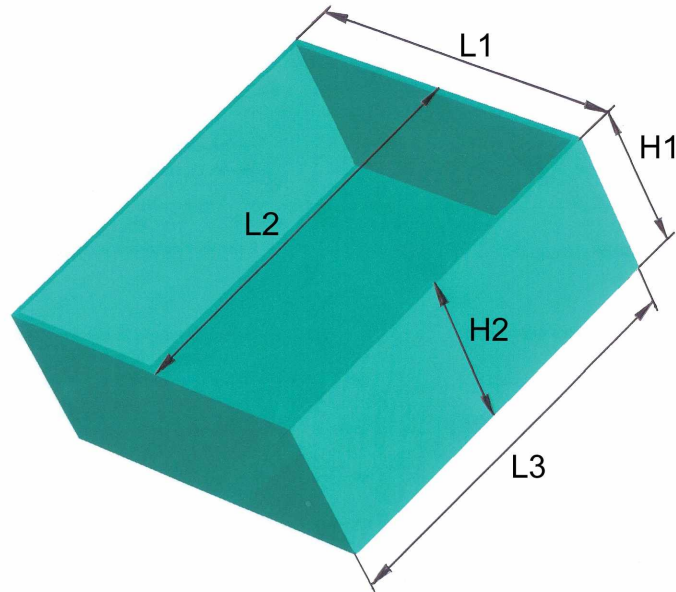


Abbildung 3.8: Definition der Maße zur Schwindungsermittlung am Schachtelformteil

Die Vermessungsaufgaben wurden mit dem 3D-Digitalisiersystem ATOS II SO der Firma GOM mbH (vgl. Kapitel 3.3.3) durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten an insgesamt fünf Prüfmaßen, welche das Schwindungs- und Verzugsverhalten des Formteiles charakterisieren. Das Maß L_1 verläuft entlang der oberen Seitenkante, wobei bei jeder Schachtel alle vier Seitenkanten vermessen wurden, und daraus der arithmetische Mittelwert dieser Länge ermittelt wurde. Diese Mittelwertbildung erfolgte auch für die Maße L_3 (Seitenkante an der Unterseite), H_1 (Formteilhöhe in der Ecke der Schachtel) und H_2 (Formteilhöhe in der Mitte der Schachtel). Das Prüfmaß L_2 (Außenmaß an der Mitte der Oberseite) wurde zweimal pro Schachtel ermittelt, um daraus das Zahlenmittel der beiden Werte zu berechnen. Durch das Maß L_2 kann der für dieses Bauteil charakteristische Verzug (Einziehen der Seitenflächen) beschrieben werden.

Für die Vermessung wurden pro Versuchseinstellung fünf Schachteln entnommen. Von diesen wurde jeweils die Masse bestimmt. Jene Schachtel, die dem arithmetischen Mittelwert der Masse am nächsten lag, wurde an den oben genannten Stellen vermessen.

Der Ablauf der Untersuchungen wird in Abbildung 3.9 dargestellt. 16 Stunden nach der Abmusterung erfolgte die Ermittlung der Verarbeitungsschwindung. Die Gesamtschwindung wurde nach der Auslagerungsdauer von 168 Stunden bei 80 °C ermittelt.

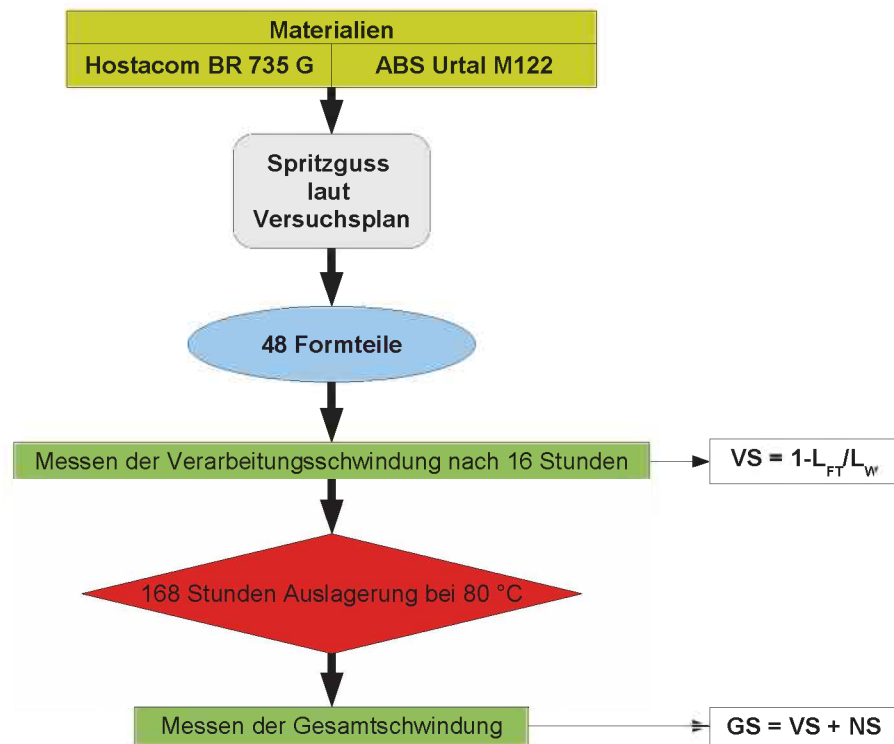


Abbildung 3.9: Ablauf der Untersuchungen am Formteil

3.6 Simulationsrechnung mit MPI™

Zusätzlich zu den im Kapitel 3.5 beschriebenen experimentellen Untersuchungen wurden Spritzgießsimulationsrechnungen mit *Moldflow Plastics Insight™ 6.1 Revision 1* durchgeführt. Mit Hilfe der Simulationen sollen die an den Bauteilen auftretenden Schwindungs- und Verzugphänomene verifiziert, und deren Ergebnisse diskutiert werden. Einen schematischen Überblick über den Ablauf der Simulationsberechnungen gibt Abbildung 3.10.

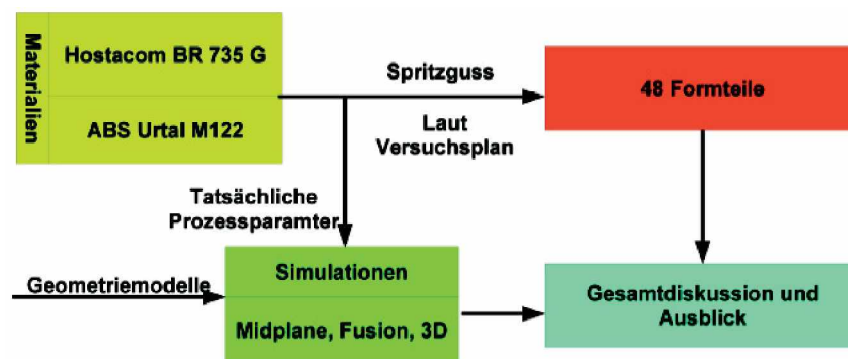


Abbildung 3.10: Ablauf der Simulationsberechnungen und Verifizierung der Experimente für beide Formteile

3.6.1 Verwendete Geometriemodelle

Für die Spritzgießsimulationen wurden für jede Wanddickenkombination jeweils Midplane-, Fusion- und 3D-Modelle erstellt (s. Kap. 2.4). Es wurden insgesamt 144 Simulationsberechnungen durchgeführt. Die Tabelle 3.7 zeigt die modellspezifische Anzahl der Dreiecks- bzw. Tetraederelemente, die Knotenpunktanzahl und das mittlere *aspect ratio* (siehe Kap. 2.4.3).

Tabelle 3.7: Netzstatistik der unterschiedlichen Modelle

Wanddickenkombination	MPI-Modell	Elemente	Knoten	mittleres Aspect ratio
B1-W1	Midplane	6912	3493	1,33
	Fusion	14728	7784	1,50
	3D	154112	29355	17,44
B1-W3	Midplane	6912	3493	1,33
	Fusion	14168	7504	1,49
	3D	140685	27057	10,54
B3-W3	Midplane	6912	3493	1,33
	Fusion	13640	7240	1,46
	3D	135509	26175	6,67
B3-W1	Midplane	6912	3493	1,33
	Fusion	14084	7462	1,47
	3D	139650	26973	12,27

4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel wird das Verarbeitungs- und Nachschwindungsverhalten für das Schachtelformteil dargestellt. Dies erfolgt hinsichtlich der verschiedenen Wanddickenkombinationen (Geometrieparameter) sowie der Masstemperatur und Nachdruckhöhe (Prozessparameter). Die experimentellen Schwindungsuntersuchungen werden mit den Ergebnissen aus Moldflow Plastics InsightTM(MPITM) verglichen.

Die Gegenüberstellungen (Realität - Simulation) zeigen den Einfluss der Verwendung unterschiedlicher Modellansätze (Midplane, Fusion und 3D) auf die Berechnungsergebnisse.

Die folgenden Auswertungen beziehen sich jeweils auf die tatsächlich gemessenen Masstemperaturen. Diese wurden für jede Planstufe unter Verwendung eines Einstichtemperaturfühlers ermittelt. Eine Übersicht über die gemessenen Masstemperaturen gibt die Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der gemessenen Masstemperaturen T_M und der Masstemperaturen T_M laut Versuchsplan für *ABS Urtal M122* und *Hostacom BR 735 G*

Material	T_M lt. Versuchsplan (°C)	T_M gemessen (°C)
ABS Urtal M122	240	230
ABS Urtal M122	280	260
Hostacom BR 735 G	240	220
Hostacom BR 735 G	280	250

Neben den Schwindungsuntersuchungen erfolgt in Kapitel 4.1 der Vergleich einer experimentellen Füllstudie mit der Füllphase der verwendeten Simulationsberechnungen.

Hier sei angemerkt, dass aufgrund der Datenvielfalt die Gesamtheit aller durchgeführten Auswertungen nicht gezeigt werden kann. Die Beschreibung der Ergebnisse erfolgt durch einige exemplarische Darstellungen, welche repräsentativ für alle durchgeführten Untersuchungen sind.

4.1 Experimentelle und berechnete Formteifüllung

Die Abbildung 4.1 zeigt die experimentell bestimmten Füllbilder für das Material *Hostacom BR 735 G* und die Wanddickenkombination B1W3². Die Masstemperatur beträgt 250 °C. Die Abbildung 4.2 zeigt die Füllbilder der Simulation für das Fusion-Modell für die gleichen Parameter. Es zeigt sich hier eine gute Übereinstimmung zwischen der Simulation und der Realität.

² Wanddickenkombination von B1W3 bedeutet: Bodenwanddicke = 1 mm, Seitenwanddicke = 3 mm

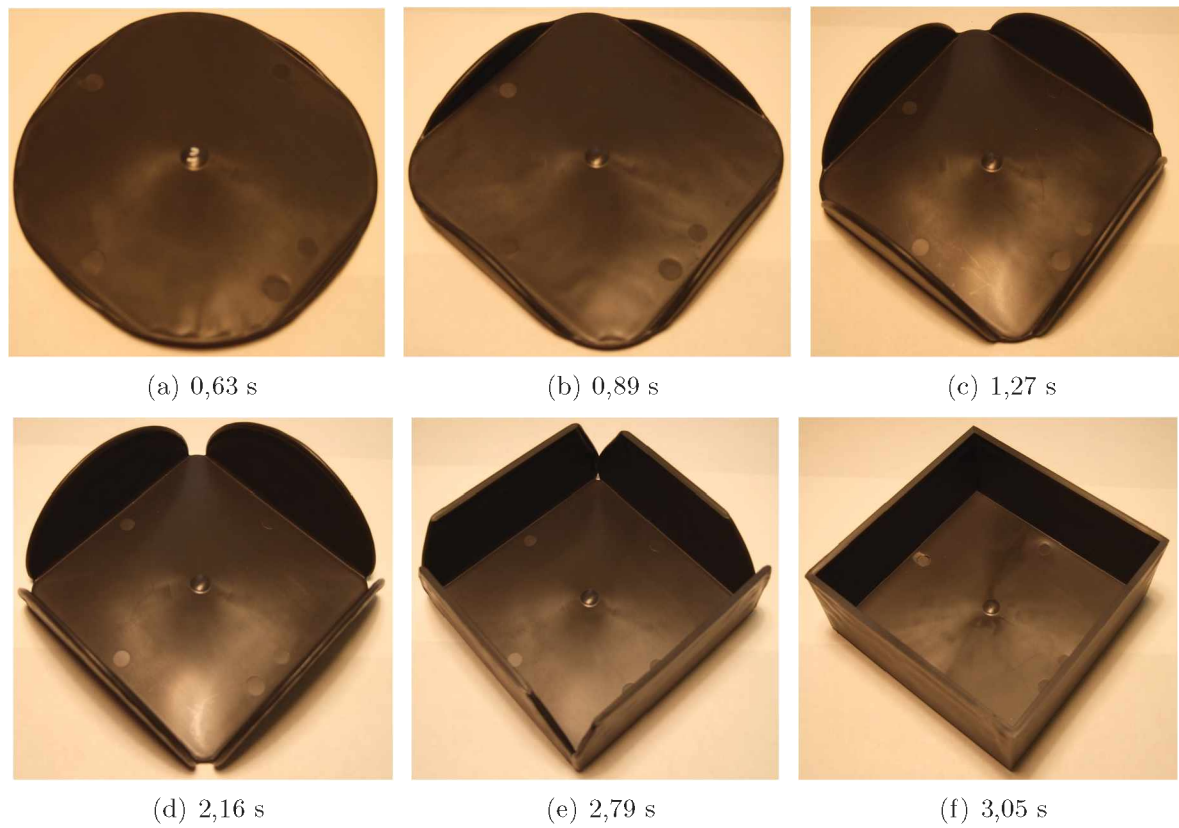


Abbildung 4.1: Füllstudie Experiment, B1W3, $T_M = 250^\circ\text{C}$, *Hostacom BR 735 G*

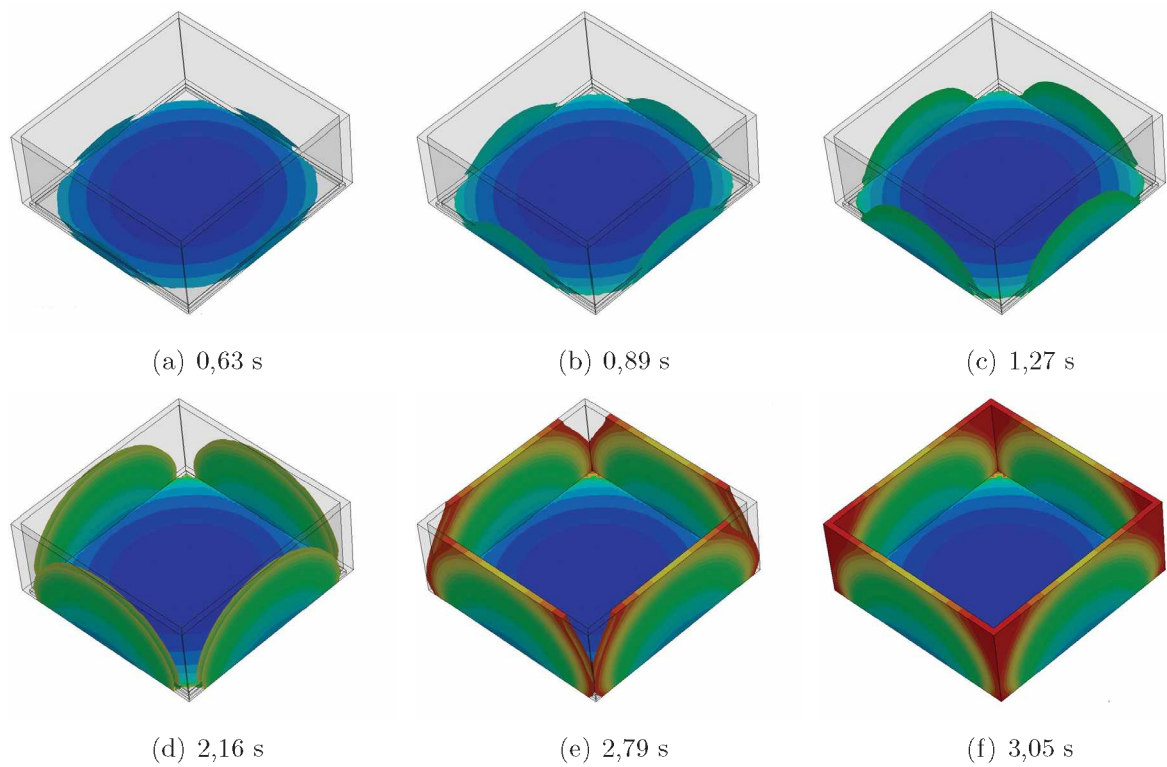


Abbildung 4.2: Füllstudie Simulation (Fusion-Modell), B1W3, $T_M = 250^\circ\text{C}$, *Hostacom BR 735 G*

Die Abbildung 4.3 zeigt den Fließfrontfortschritt im Bereich der Seitenflächen der Schachtel für das Midplane-, Fusion-, und 3D-Modell nach 2,79 s. Das Midplane- und das Fusion-Modell zeigen ein ähnliches Füllverhalten. Beim 3D-Modell ist zu erkennen, dass die Formteilfüllung unregelmäßig erfolgt. Die Berechnung der Oberflächentemperaturen der Seitenwände liefern hier geringfügig andere Werte. Dies ist vermutlich der Grund für die ungleichmäßige Formteilfüllung.

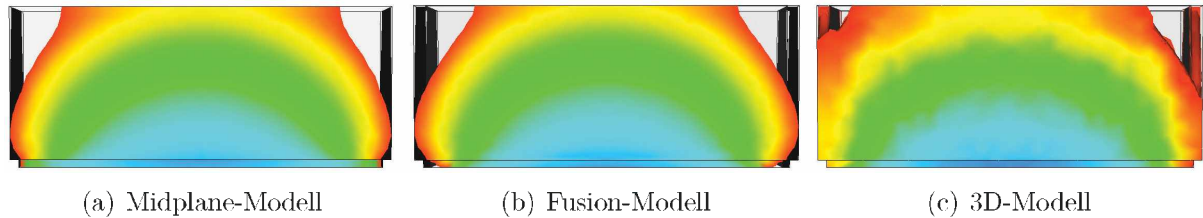


Abbildung 4.3: Qualitativer Vergleich der Formteilfüllung nach 2,79 s für Midplane-, Fusion-, und 3D-Modell B1W3, $T_M = 250^\circ\text{C}$, *Hostacom BR 735 G*

4.2 Gemessener und berechneter Werkzeuginnendruckverlauf

Die Abbildung 4.4 zeigt die Gegenüberstellung von experimentell ermittelten Forminnendruckkurven mit den Berechnungsergebnissen aus MPITM des Formteils (Wanddickenkombination B3W3, $T_M = 260^\circ\text{C}$) für das Material *ABS Urtal M122*.

Der Forminnendrucksensor befindet sich beim Formteil an der in Abbildung 4.5 dargestellten Position, ca. 40 mm vom Anspritzpunkt entfernt.

Es ist zu erkennen, dass keines der Simulationsmodelle dem jeweiligen realen Kurvenverlauf entspricht. Die Druckwirkzeiten werden bei allen Modellen unterschätzt. Der Grund dürfte hier in der Qualität der internen Materialdaten liegen, die von MPITM verwendet werden. Hier sei auf das *Konzept der Übergangstemperatur* [8] hingewiesen. Diese ist definiert als Temperatur, bei der der Kunststoff effektiv aufhört zu fließen. Es wird davon ausgegangen, dass unterhalb der Übergangstemperatur die Viskosität unendlich groß ist, was einem Festkörper entspricht. Die Übergangstemperaturen, mit welchen die Berechnungen durchgeführt wurden, sind hier zu hoch. Dies bedeutet, dass der Nachdruck nicht die gesamte eingestellte Nachdruckzeit wirken kann, da die Schmelze bereits früher erstarrt. Beim 3D-Modell könnte weiters noch der Anguss einen Einfluss auf die Druckergebnisse haben. Der Übergang von eindimensionalen Beam-Elementen auf dreidimensionale Tetraelemente könnte hier ein Grund für die Berechnungsabweichungen sein.

Das maximale Druckniveau wird bei keinem Simulationsmodell erreicht. Der Grund dürfte darin liegen, dass die hinterlegten Materialdaten von den realen Daten abweichen.

Dass nach dem Ende des Nachdrucks der Sensorwert nicht auf null abfällt, hat folgenden Grund: Das Werkzeug verformt sich beim Aufbringen des Nachdrucks aufgrund seiner Steifigkeit. Nach Ende des Nachdrucks bildet sich diese Verformung wieder zurück. Die Schwindung ist aber noch nicht so groß, dass sich das Formteil von der Werkzeugwand abhebt. Das Formteil drückt daher auf den Drucksensor, und dieser liefert einen Druckwert. In der Simulation wird die Werkzeugsteifigkeit nicht berücksichtigt (Werkzeug unendlich

steif). Daher wird auch kein Restdruck aufgrund der Werkzeugverformung berechnet.

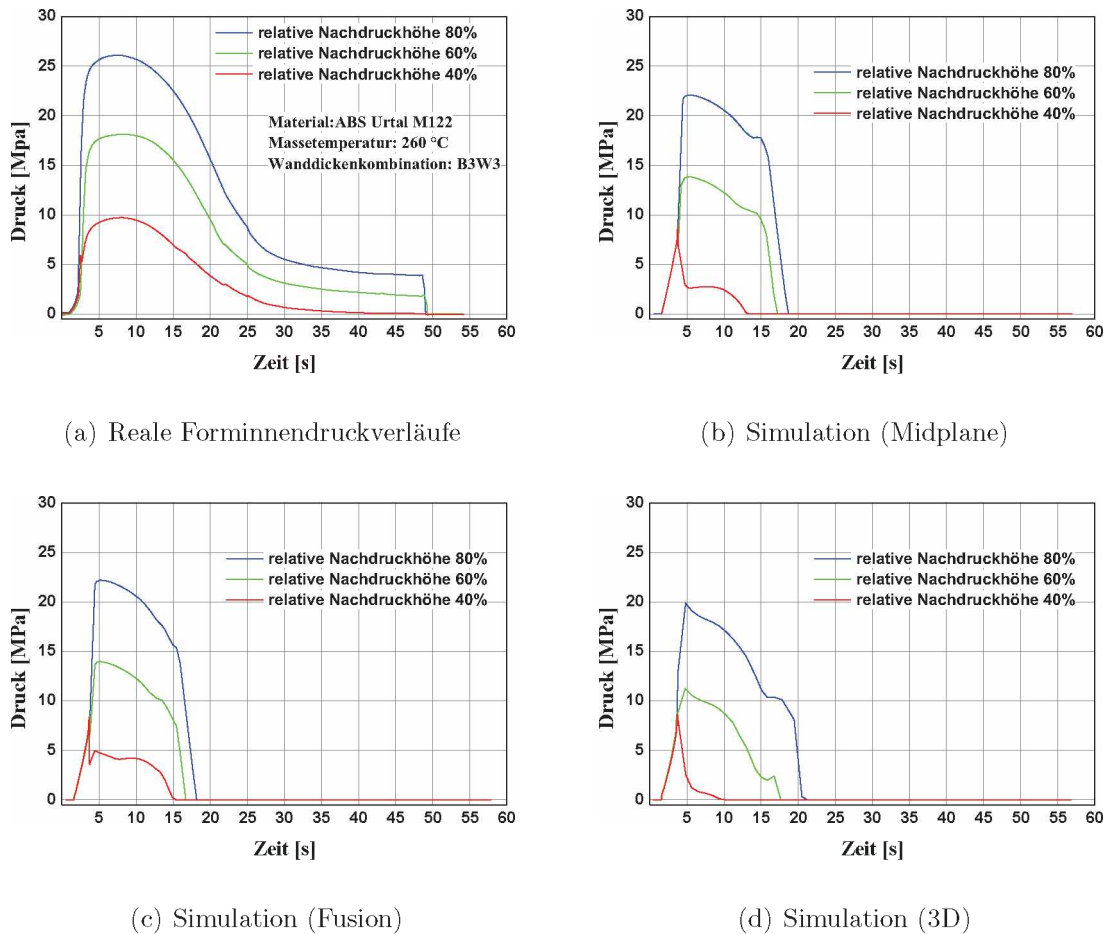


Abbildung 4.4: Vergleich der real gemessenen Forminnendruckverläufe mit den Simulationsergebnissen (Material *ABS Urtal M122*)

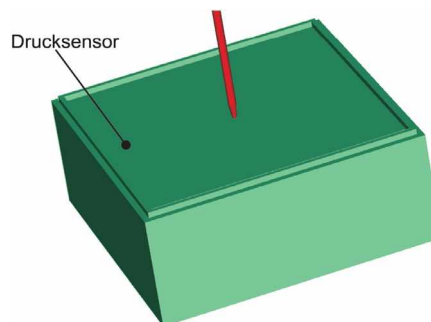


Abbildung 4.5: Position des Forminnendruckensors am Schachtelformteil

4.3 Schwindungs- und Verzugsergebnisse von Hostacom BR 735 G

Aufgrund der Fülle der Ergebnisse werden hier nur einige wenige dargestellt. Diese repräsentieren die Gesamtheit der Untersuchungen. Alle Ergebnisse finden sich im Anhang tabellarisch aufgelistet. Die hier untersuchten Maße sind in Abbildung 3.8 dargestellt. Von den jeweiligen Einzelmessungen wurde der arithmetische Mittelwerte gebildet, sowie die daraus resultierende Standardabweichung in den Diagrammen miteingezeichnet.

4.3.1 Vergleich zwischen Verarbeitungs- und Gesamtschwindung

In der Abbildung 4.6 ist die Verarbeitungs- und Gesamtschwindung für das gebundene Schwindungsmaß L1 bei der Wanddickenkombination B1W1 dargestellt. Die Darstellung erfolgt in Abhängigkeit der relativen Nachdruckhöhe. In der linken Abbildung ist die Abhängigkeit bei der niedrigen, in der rechten die Abhängigkeit bei der hohen Masse-temperatur abgebildet. Es ist zu erkennen, dass die lineare Schwindung mit zunehmenden Nachdruckhöhe abnimmt. Durch den höheren Nachdruck kann mehr Material zur Schwindungskompensation in das Formnest eingebracht werden. Des weitern ist zu erkennen, dass mit der Auslagerung die Schwindungswerte bei beiden Masse-temperaturen zunehmen. Der Unterschied zwischen Verarbeitungs- und Gesamtschwindung beträgt hier im Mittel ca. 0,5 %.

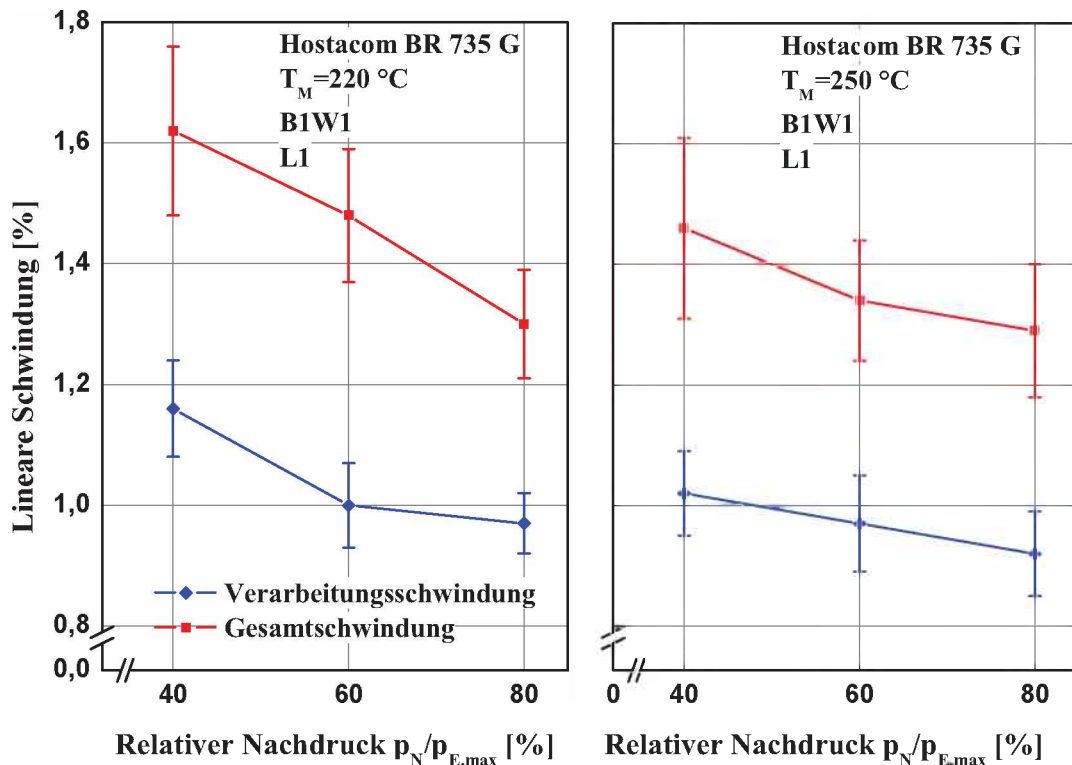


Abbildung 4.6: Vergleich Verarbeitungsschwindung - Gesamtschwindung für das gebundene Schwindungsmaß L1, Hostacom BR 735 G, B1W1, bei unterschiedlichen Nachdrücken

In der Abbildung 4.7 ist die Verarbeitungsschwindigkeit und die Gesamtschwindigkeit für das Maß L2 bei der Wanddickenkombination B3W1 ersichtlich. Dieses Maß ist kein reines Schwindungsmaß, da es u.a. den Einfluss des Einziehens der Seitenflächen der Schachtel beschreibt (siehe Kapitel 3.5). Aus diesem Grund wird im Folgenden vom Deformationsmaß L2 gesprochen. Wie schon in Abbildung 4.6, erfolgt die Darstellung in Abhängigkeit der relativen Nachdruckhöhe. In der linken Abbildung ist wiederum die Abhängigkeit bei der niedrigen und in der rechten Abbildung die Abhängigkeit bei der hohen Masse-temperatur dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Werte für die relative Maßänderung mit der Auslagerung abnehmen. Da die Werte negativ sind, bedeutet dies, dass sich die Seitenwände nach außen biegen. Der Grund dafür ist folgender: schon bei der Verarbeitungsschwindigkeit sind die Werte negativ. Bedingt durch die Schwindung des Bodens beim Auslagern wirken Druckkräfte auf die Seitenwände. Diese bewirken, dass sich die Seitenwände weiter nach außen biegen. Bei den anderen Wanddickenkombinationen nimmt die relative Maßänderung zu. Der Grund hierfür ist der gleiche, nur mit dem Unterschied, dass die Werte bei der Verarbeitungsschwindigkeit von Anfang an positiv sind. Der Unterschied zwischen Verarbeitungs- und Gesamtschwindigkeit beträgt hier im Mittel ca. 2,5 %.

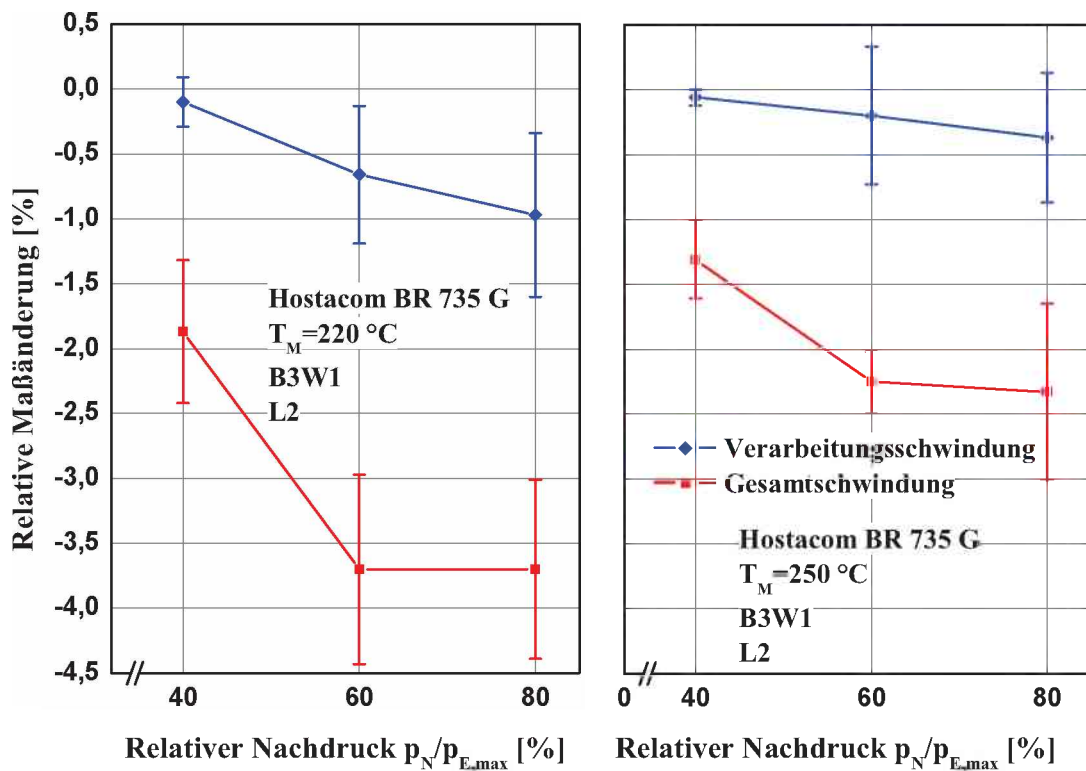


Abbildung 4.7: Vergleich Verarbeitungsschwindigkeit - Gesamtschwindigkeit für das Deformationsmaß L2, *Hostacom BR 735 G*, B3W1, bei unterschiedlichen Nachdrücken

Die Abbildung 4.8 zeigt den 3D-Vergleich zwischen der Verarbeitungsschwindigkeit und der Gesamtschwindigkeit für das in Abbildung 4.7 dargestellte Verhalten ($T_M = 250^\circ\text{C}$).

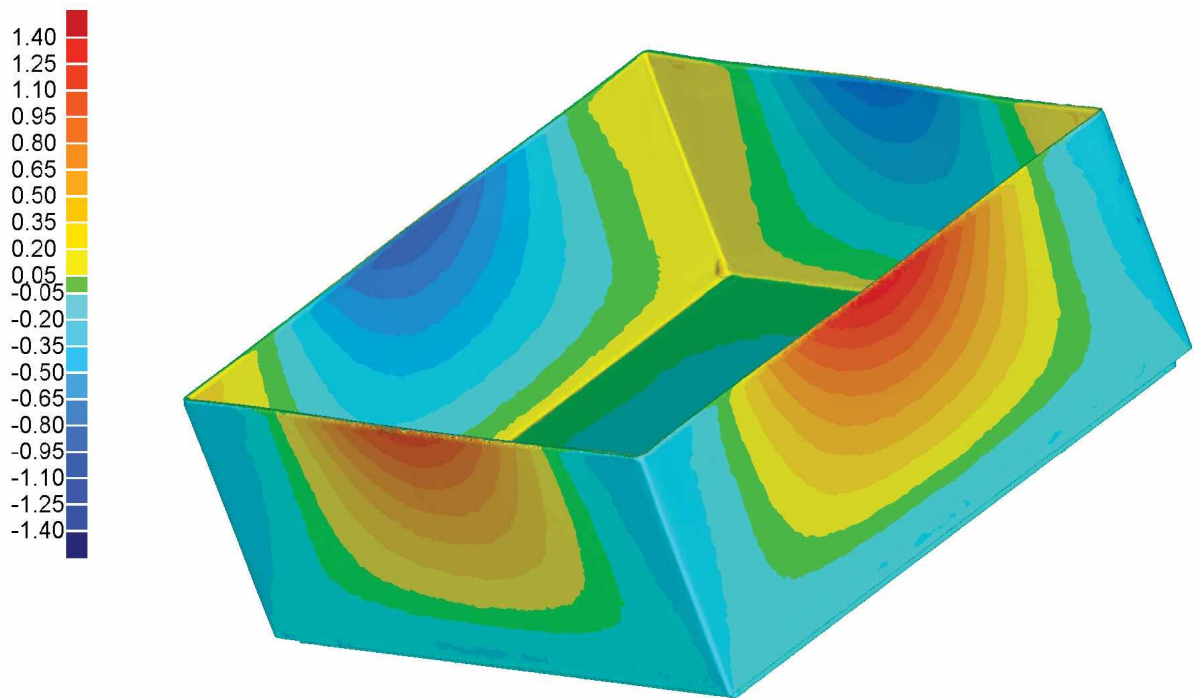


Abbildung 4.8: 3D-Gegenüberstellung der Verarbeitungsschwindigkeit mit der Gesamtschwindigkeit (Vers.Nr.: 48)

In der Abbildung 4.9 ist zum besseren Verständnis dargestellt, wie die Abbildung 4.8 zu interpretieren ist. O_1 und O_2 sind die Oberflächen des Referenzteils. O'_1 und O'_2 sind die Oberflächen des Testteils. Weiters sind die zur jeweiligen Oberfläche gehörenden Normalvektoren eingezeichnet. O'_1 weicht in positiver Normalrichtung ($+z$) von der Referenz ab. Das heißt, die Oberfläche des Testteils entfernt sich von der Oberfläche der Referenz. O'_2 weicht in negativer Normalrichtung ($-z$) von der Referenz ab. Das bedeutet, dass die Oberfläche des Testteils in die Oberfläche der Referenz hineinragt.

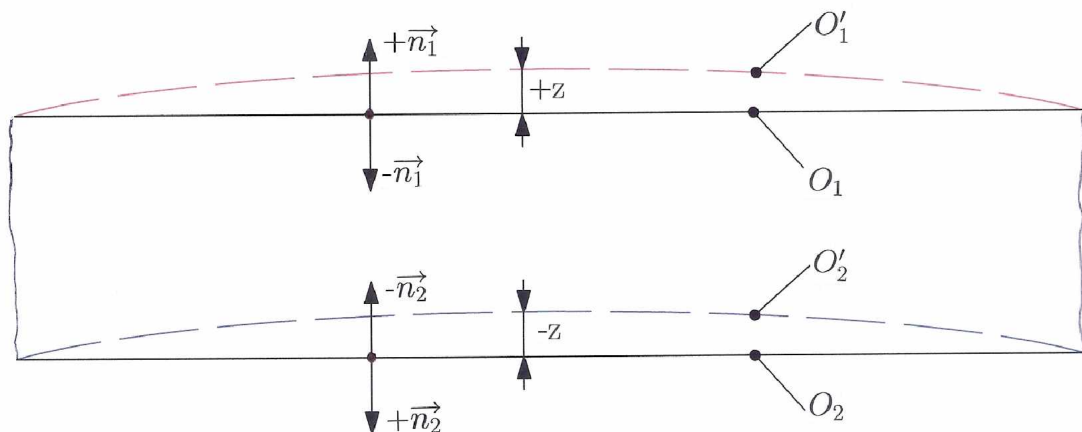


Abbildung 4.9: Skizze zur Erklärung des 3D-Vergleiches

In der Abbildung 4.8 wird die Geometrie der Verarbeitungsschwindung als Referenzteil und jene der Gesamtschwindung als Testteil betrachtet. Die Überlagerung (best fit) beschreibt die Gestaltsänderung des Formteils zwischen den beiden Vermessungszeitpunkten. Der Bereich der hier vorliegenden Skala reicht von -1,4 mm (blau) bis +1,4 mm (rot). Die grünen Bereiche liegen sehr nahe ($\pm 0,05$ mm) an der Referenzgeometrie. Würde keine Unterschied zwischen Verarbeitungs- und Gesamtschwindung bestehen, so wären alle Bereiche (bei der hier vorliegenden Skalierung) grün. Die gelb bis roten Bereiche entfernen sich in positiver Normalrichtung von der Referenz, die blauen Bereiche entfernen sich in negativer Normalrichtung von der Referenz. Es ist zu erkennen, dass sich die Bereiche in der Mitte der Seitenwände nach außen biegen.

4.3.2 Einfluss der Wanddickenkombination auf die Schwindung

In der Abbildung 4.10 ist der Einfluss der Seitenwanddicke für das teilgebundene Schwindungsmaß H1 (vgl. Abbildung 3.8) bei hoher Masstemperatur und konstanter Bodenwanddicke (1 mm) in Abhängigkeit des relativen Nachdrucks dargestellt. Das linke Diagramm zeigt die Verarbeitungsschwindung, das rechte die Gesamtschwindung. Aus den Diagrammen ist zu entnehmen, dass die Gesamtschwindung größer als die Verarbeitungsschwindung ist. Weiters ist zu erkennen, dass mit steigendem Nachdruck die Schwindungswerte abnehmen. Hier sei auf das Kapitel 4.3.3 hingewiesen, in welchem dieser Einfluss beschrieben wird. Des weiteren ist ersichtlich, dass mit steigender Seitenwanddicke, bei konstanter Bodenwanddicke, die Schwindungswerte steigen. Dies stimmt mit der Theorie überein wonach bei höherer Dicke ein höheres Kontraktionspotential zur Verfügung steht. Der Unterschied zwischen Verarbeitungsschwindung und Gesamtschwindung beträgt hier im Mittel ca. 0,1 %.

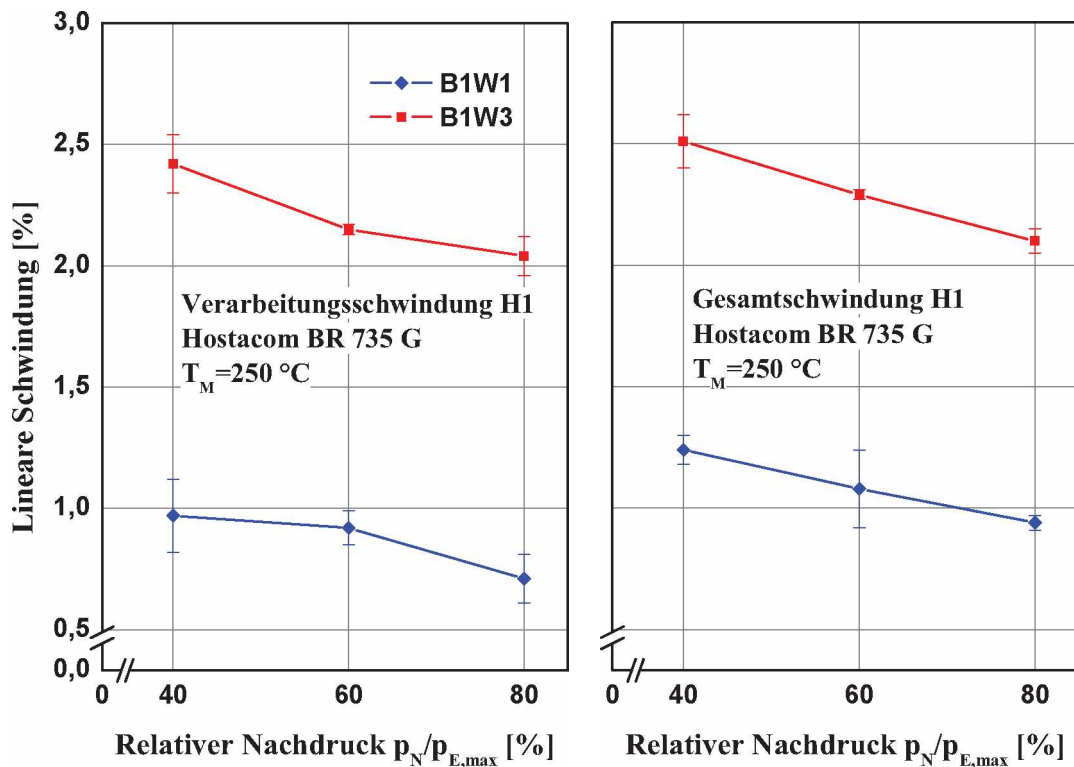


Abbildung 4.10: Einfluss der Seitenwanddicke auf das teilgebundene Schwindungsmaß H1 für *Hostacom BR 735 G* (Bodenwanddicke = 1 mm konst., $T_M=250\text{ °C}$) bei unterschiedlichen Nachdrücken

In der Abbildung 4.11 ist der Einfluss der Bodenwanddicke für das teilgebundene Schwindungsmaß H1 (vgl. Abbildung 3.8) bei hoher Massetemperatur und konstanter Seitenwanddicke (3 mm) in Abhängigkeit des relativen Nachdrucks ersichtlich. Wie schon in der Abbildung 4.10, zeigt sich, dass die Gesamtschwindung größer als die Verarbeitungsschwindung ist. Wiederum ist den Diagrammen zu entnehmen, dass die Schwindungswerte mit zunehmendem Nachdruck sinken. Des Weiteren ist zu erkennen, dass mit steigender Bodenwanddicke, bei konstanter Seitenwanddicke, die Schwindungswerte sinken. Dies lässt sich damit erklären, dass durch die größere Dicke im Bodenbereich die Nachdruckwirkung verbessert wird. Dies führt dazu, dass mehr Material zur Schwindungskompensation in das Formnest eingebracht werden kann. Der Unterschied zwischen Verarbeitungsschwindung und Gesamtschwindung beträgt hier im Mittel ca. 0,1 %.

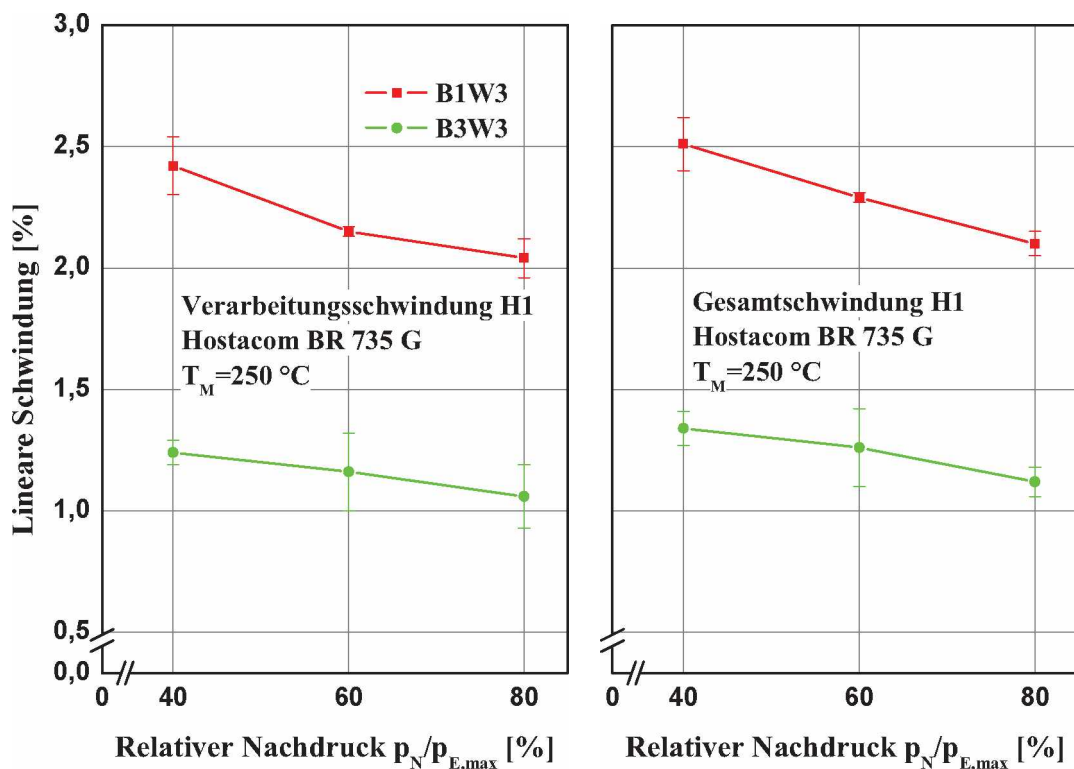


Abbildung 4.11: Einfluss der Bodenwanddicke auf das teilgebundene Schwindungsmaß H1 für *Hostacom BR 735 G* (Seitenwanddicke = 3 mm konst., $T_M=250\text{ °C}$) bei unterschiedlichen Nachdrücken

In weiterer Folge sind in den Diagrammen jeweils alle vier Wanddickenkombinationen für ein Maß und eine Masstemperatur dargestellt. Die Abbildung 4.12 zeigt den Einfluss der Wanddickenkombinationen auf das gebundene Schwindungsmaß L3 bei hoher Masstemperatur in Abhängigkeit des relativen Nachdrucks. Wie schon bei den teilgebundenen Maßen, ist zu erkennen, dass eine Erhöhung der Seitenwanddicke bei konstanter Bodenwanddicke zu höheren Schwindungswerten führt. Umgekehrt führt eine Erhöhung der Bodenwanddicke bei konstanter Seitenwanddicke zu kleineren Schwindungswerten. Hier ist der Unterschied zwischen der Verarbeitungsschwindung und der Gesamtschwindung um einiges höher (im Mittel ca. 0,4%) als beim Maß H1. Der Grund dürfte in dem höheren Schwindungspotential (Bodenbereich der Schachtel) dieses Maßes liegen.

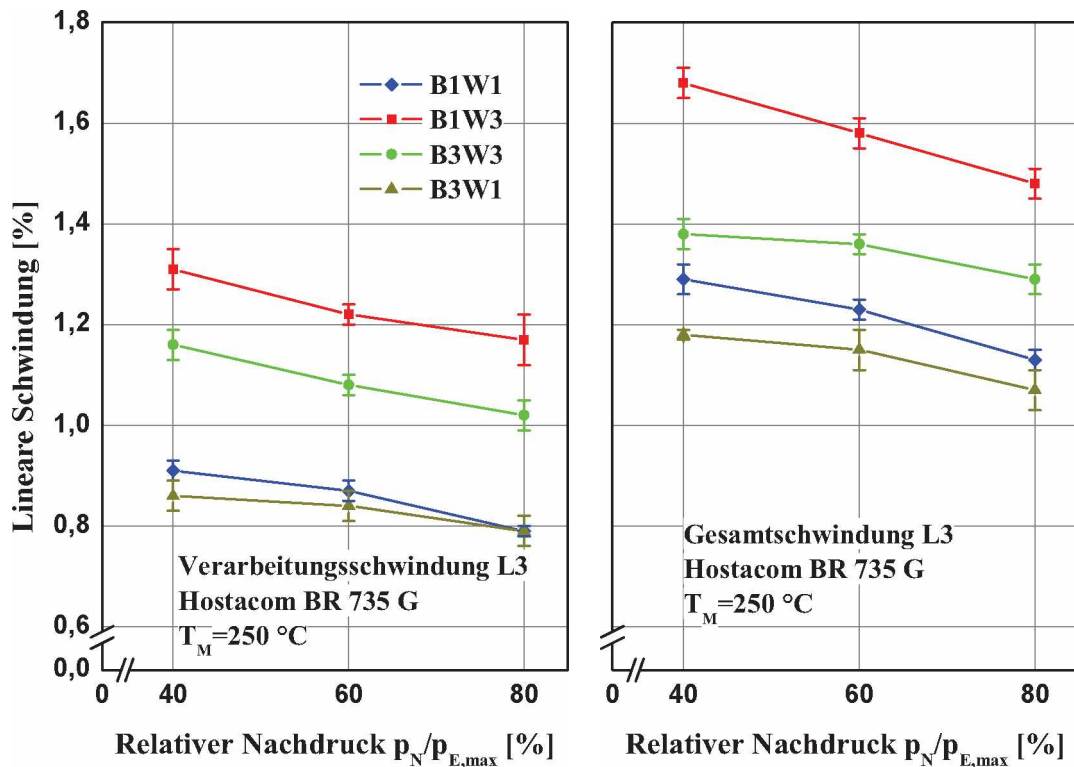


Abbildung 4.12: Einfluss der Wanddickenkombination auf das gebundene Schwindungsmaß L3 für *Hostacom BR 735 G* ($T_M=250\text{ °C}$) bei unterschiedlichen Nachdrücken

4.3.3 Einfluss der Nachdruckhöhe auf die Schwindung

In der Abbildung 4.13(a) ist der Einfluss der Nachdruckhöhe auf das gebundene Schwindungsmaß L1 bei der Wanddickenkombination B1W1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine Erhöhung des Nachdrucks, sowohl bei der Verarbeitungs- als auch Gesamtschwindung zu kleineren Schwindungswerten führt. Durch den höheren Nachdruck kann mehr Material zur Schwindungskompensation in das Formnest eingebracht werden.

In der Abbildung 4.13(b) ist der Einfluss der Nachdruckhöhe auf das teilgebundene Schwindungsmaß H1 bei der Wanddickenkombination B3W3 abgebildet. Auch hier nehmen die Schwindungswerte bei der Verarbeitungs- und Gesamtschwindung mit zunehmendem Nachdruck ab. Der Grund für dieses Verhalten ist der selbe wie beim gebundenen Maß L1.

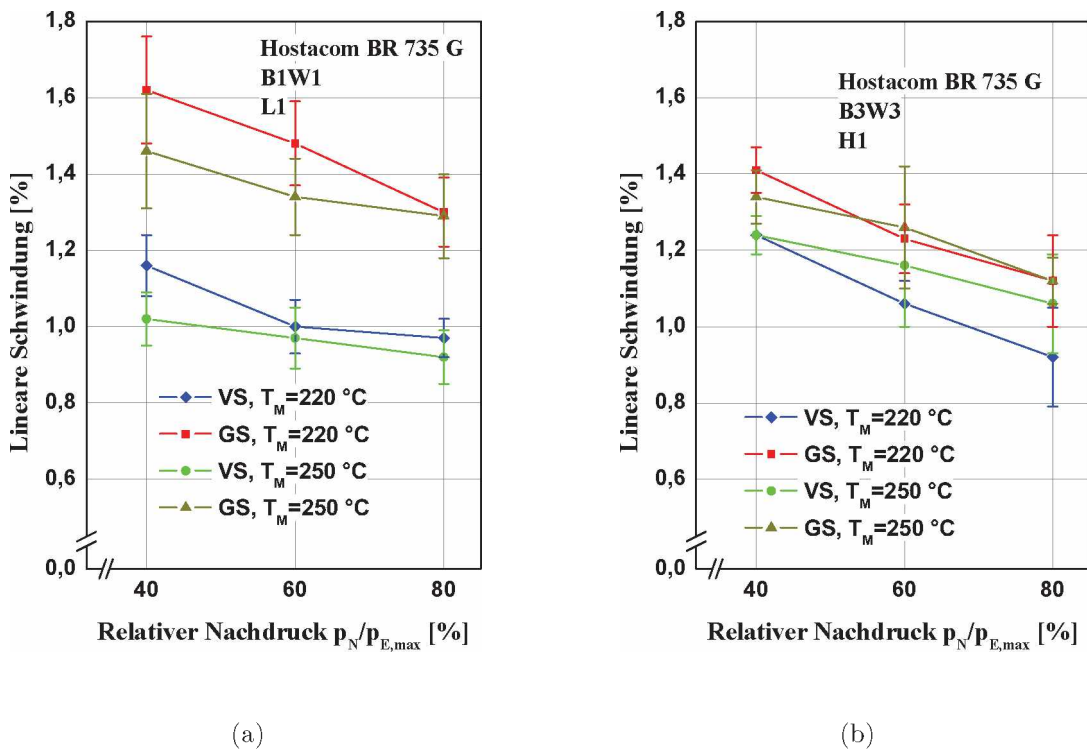


Abbildung 4.13: Nachdruckabhängigkeit der linearen Schwindung für die Maße L1 und H1 (*Hostacom BR 735 G*) bei unterschiedlichen Nachdrücken

4.3.4 Einfluss der Massetemperatur auf die Schwindung

Die Abbildung 4.14 zeigt den Einfluss der Massetemperatur auf das Schwindungsverhalten für das teilgebundene Schwindungsmaß H2 bei der Wanddickenkombination B1W3. Es ist zu erkennen, dass bei allen Nachdruckstufen mit steigender Massetemperatur die Schwindungswerte sinken. Der Grund hierfür ist die verbesserte Nachdruckwirkung aufgrund der niedrigeren Schmelzeviskosität. Außerdem verlängert sich die Abkühlzeit des Bodens. Dadurch verlängert sich auch die Zeit, in der der Nachdruck wirken kann.

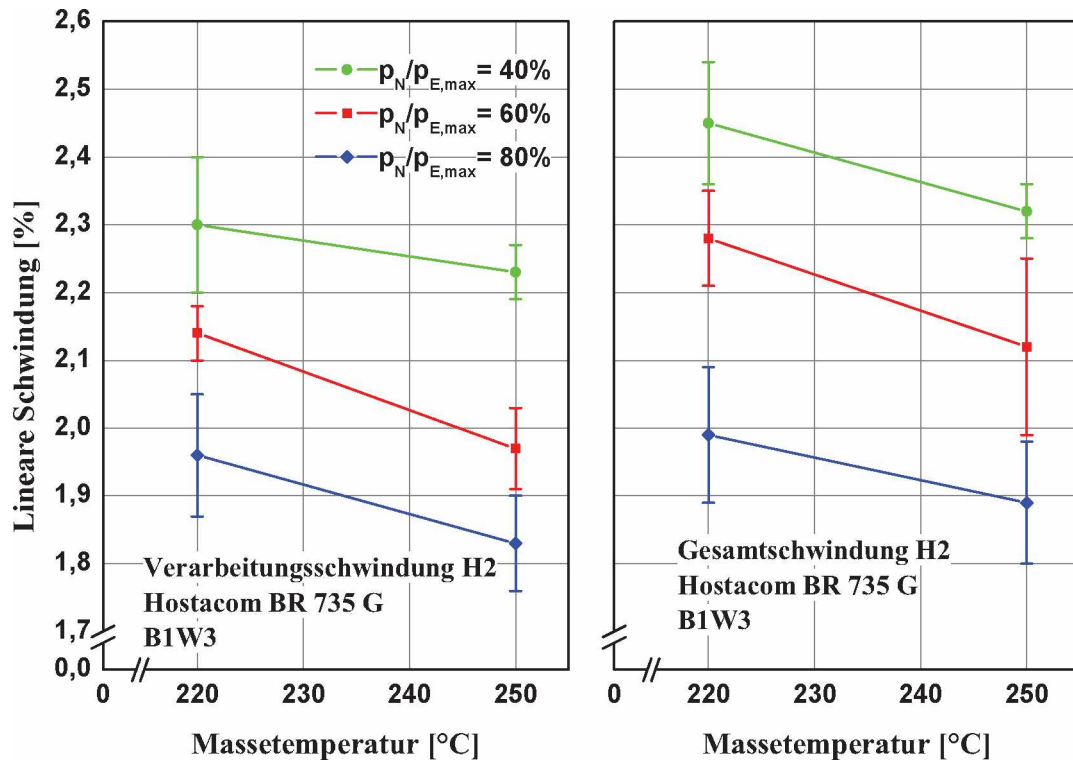


Abbildung 4.14: Einfluss der Massetemperatur auf das teilgebundene Schwindungsmaß H2 für *Hostacom BR 735 G*, B1W3, bei unterschiedlichen Nachdrücken

Die Abbildung 4.15 zeigt den Einfluss der Massetemperatur auf das Schwindungsverhalten für das teilgebundene Schwindungsmaß H1 und die Wanddickenkombination B3W1. Hier ist zu erkennen, dass bei allen Nachdruckstufen mit steigender Massetemperatur die Schwindungswerte steigen. Der Grund hierfür ist das größere Schwindungspotential, welches durch die höhere Massetemperatur bedingt ist. Dieser Effekt wirkt hier stärker als die verbesserte Nachdruckwirksamkeit in Folge der kleineren Schmelzeviskosität.

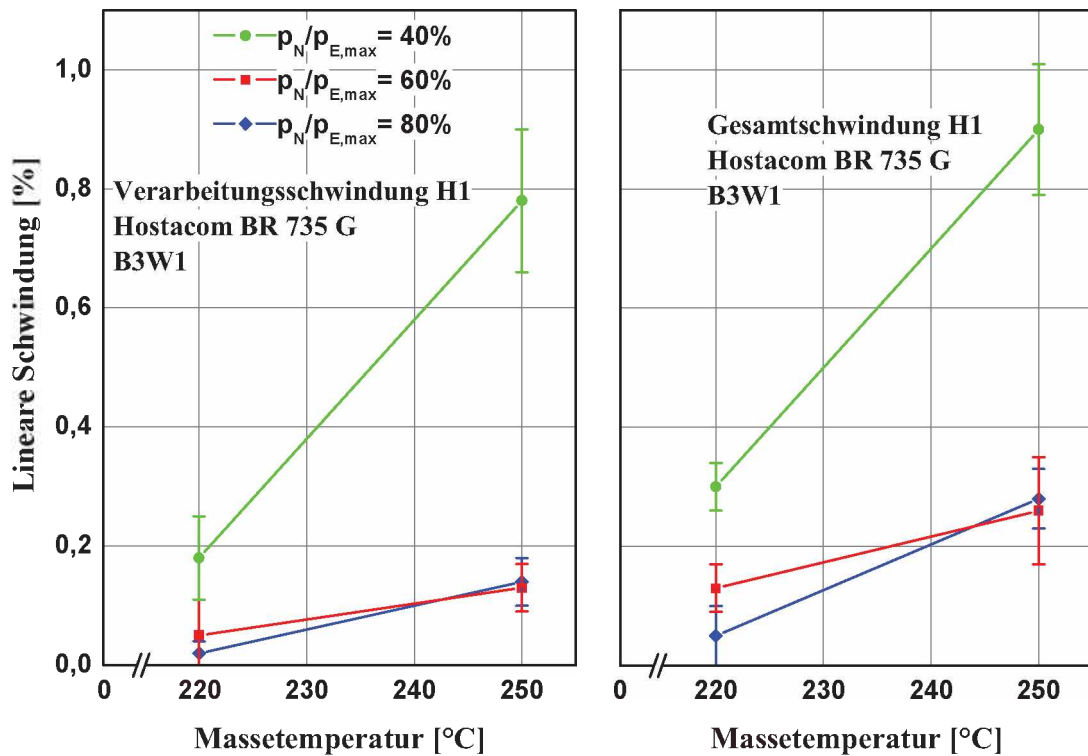


Abbildung 4.15: Einfluss der Massetemperatur auf das teilgebundene Schwindungsmaß H1 für *Hostacom BR 735 G*, B3W1, bei unterschiedlichen Nachdrücken

Die Abbildung 4.16 zeigt den Einfluss der Massetemperatur auf das Schwindungsverhalten für das gebundene Schwindungsmaß L3 und die Wanddickenkombination B1W1. Es zeigt sich, dass mit steigender Massetemperatur die Schwindungswerte sinken. Der Grund hierfür ist wieder die verbesserte Nachdruckwirksamkeit in Folge der kleineren Schmelzeviskosität. Dieser Effekt nimmt mit steigendem Nachdruckniveau ab. Bei hohem Nachdruck hat eine Erhöhung der Massetemperatur keinen Einfluss auf das Schwindungsverhalten.

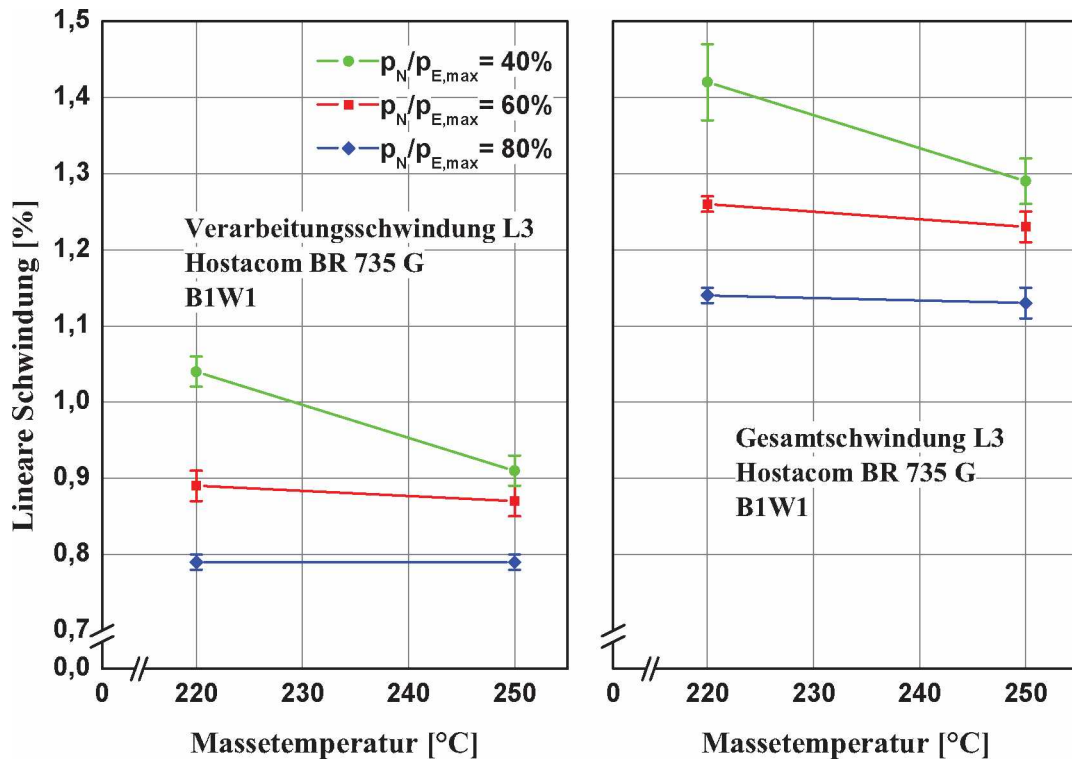


Abbildung 4.16: Einfluss der Massetemperatur auf das gebundene Schwindungsmaß L3 für *Hostacom BR 735 G*, B1W1, bei unterschiedlichen Nachdrücken

Abschließend sei hier aufgelistet wie der Prozess zu führen ist, um die Schachteln möglichst verzugsarm herzustellen:

- B1W1: niedriger Nachdruck, niedrige Massetemperatur
- B1W3: mittlerer Nachdruck, hohe Massetemperatur
- B3W1: niedriger Nachdruck, hohe Massetemperatur
- B3W3: hoher Nachdruck, hohe Massetemperatur

Bei diesen Betrachtungen wird nur auf das Einfallen der Seitenflächen Rücksicht genommen. Die Schwindung der Schachtelmaße wird bei diesen Empfehlungen nicht notwendigerweise minimiert.

4.3.5 Vergleich der berechneten Ergebnisse mit den vermessenen Bauteilen

Die Abbildung 4.17 zeigt das Schwindungsverhalten des Bauteils und der drei Simulationsmodelle (Midplane, Fusion, 3D) für das teilgebundenen Schwindungsmaß H1 bei der Wanddickenkombination B3W3. Die Darstellung erfolgt in Abhängigkeit der relativen Nachdruckhöhe. In der linken Abbildung ist die Abhängigkeit bei der niedrigen, in der rechten Abbildung die Abhängigkeit bei der hohen Massetemperatur dargestellt. Alle drei Simulationsmodelle haben einen ähnlichen Kurvenverlauf wie die vermessenen Formteile, jedoch liegen die Werte weit unter denen der Realität.

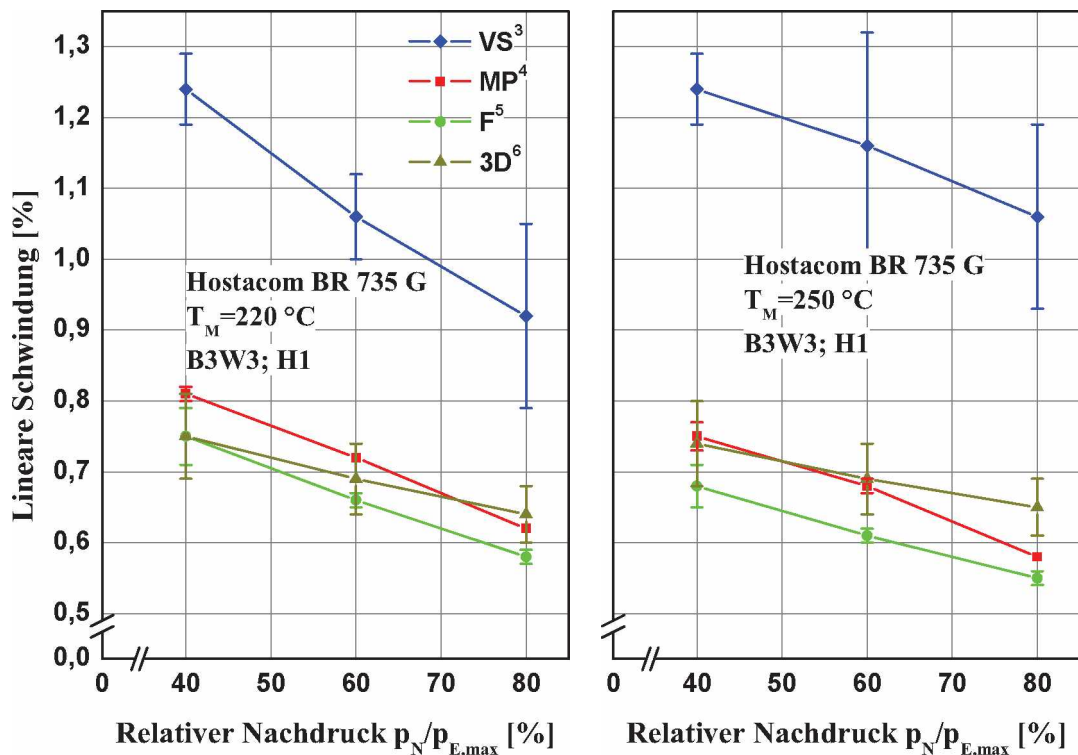


Abbildung 4.17: Vergleich: Realität - Simulation, teilgebundenes Schwindungsmaß H1 für *Hostacom BR 735 G*, B3W3, bei unterschiedlichen Nachdrücken

³ Verarbeitungsschwindigkeit

⁴ Midplane-Modell

⁵ Fusion-Modell

⁶ 3D-Modell

Die Abbildung 4.18 zeigt das Schwindungsverhalten des gebundenen Schwindungsmaßes L3 des Bauteils und der Simulationsmodelle bei der Wanddickenkombination B3W3. Wie schon bei den teilgebundenen Maßen haben die Kurven einen ähnlichen Verlauf, jedoch wird auch hier die Realität stark unterschätzt.

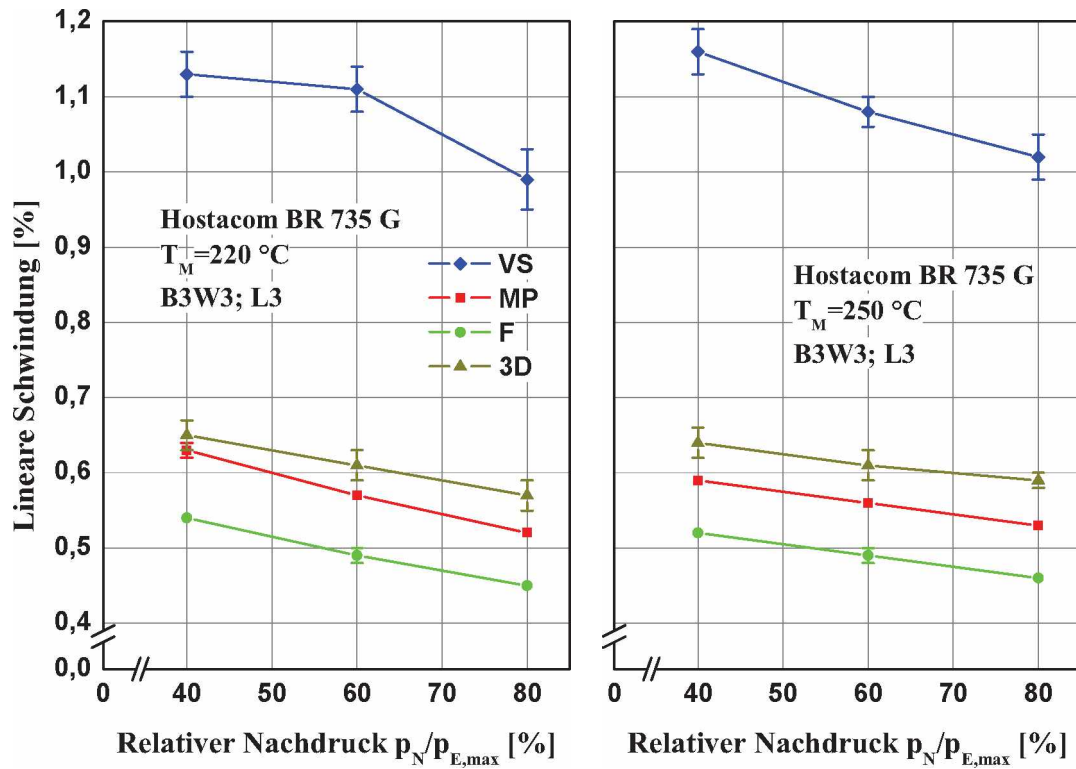


Abbildung 4.18: Vergleich: Realität - Simulation, teilgebundenes Schwindungsmaß L3 für *Hostacom BR 735 G*, B3W3, bei unterschiedlichen Nachdrücken

Die Ergebnisse der Simulationen sind in hohem Maß von der Wanddickenkombination abhängig. Für die hier durchgeführten Untersuchungen werden folgende Empfehlungen für die Berechnungen abgegeben:

- B3W3:
Ein Überblick über die Gesamtheit der Ergebnisse zeigt, dass für diese Wanddickenkombination das 3D-Modell für die Berechnung zu bevorzugen ist. Bei den meisten betrachteten Maßen liegen die Berechnungsergebnisse des 3D-Modells näher an den gemessenen Werten, als die Ergebnisse der beiden 2,5D-Modelle. Die Druck- und Massetemperaturabhängigkeit der Schwindung wird vom 3D-Modell im wesentlichen richtig beschrieben.
- B1W3:
Wie schon bei der Wanddickenkombination B3W3 wird auch für diese Wanddickenkombination das 3D-Modell empfohlen. Für die Empfehlung sind auch die gleichen Gründe ausschlaggebend.
- B3W1:
Auch bei dieser Wanddickenkombination wird das 3D-Modell für die Berechnungen empfohlen. Wie bei den Wanddickenkombinationen B3W3 und B1W3 liegen die Berechnungsergebnisse der meisten Maße des 3D-Modells näher an den gemessenen Werten, als die Ergebnisse der beiden 2,5D-Modelle. Auch die Druck- und Massetemperaturabhängigkeit der Schwindungsmaße wird vom 3D-Modell meist besser vorausberechnet als von den Midplane- und Fusion-Modellen.
- B1W1:
Für diese Wanddickenkombination zeigen die Ergebnisse, dass das Fusion-Modell für die Berechnung zu bevorzugen ist. Durch das Fusion-Modell werden hier Berechnungsergebnisse erzielt, die den realen Schwindungswerten sehr nahe kommen. Die Druck- und Massetemperaturabhängigkeit der Schwindung wird vom Fusion-Modell ebenfalls gut beschrieben.

4.4 Schwindungs- und Verzugsergebnisse von ABS Urtal M122

Aufgrund der Fülle der Ergebnisse werden hier nur einige wenige dargestellt. Diese repräsentieren die Gesamtheit der Untersuchungen. Alle Ergebnisse finden sich im Anhang tabellarisch aufgelistet. Die hier untersuchten Maße sind in Abbildung 3.8 dargestellt. Von den jeweiligen Einzelmessungen wurde der arithmetische Mittelwerte gebildet, sowie die daraus resultierende Standardabweichung in den Diagrammen miteingezeichnet.

4.4.1 Vergleich zwischen Verarbeitungs- und Gesamtschwindung

In der Abbildung 4.19 ist die Verarbeitungs- und Gesamtschwindung für das gebundene Schwindungsmaß L3 bei der Wanddickenkombination B1W1 dargestellt. Wie schon in Kapitel 4.3.1 erfolgt die Darstellung in Abhängigkeit der relativen Nachdruckhöhe. In der linken Abbildung ist die Abhängigkeit bei der niedrigen, in der rechten die Abbildung bei der hohen Massetemperatur abgebildet. Es ist ersichtlich, dass die lineare Schwindung mit zunehmender Nachdruckhöhe abnimmt. Weiters ist zu erkennen, dass mit der Auslagerung die Schwindungswerte bei beiden Massetemperaturen zunehmen. Der Unterschied zwischen Verarbeitungs- und Gesamtschwindung beträgt hier im Mittel ca. 0,2 %.

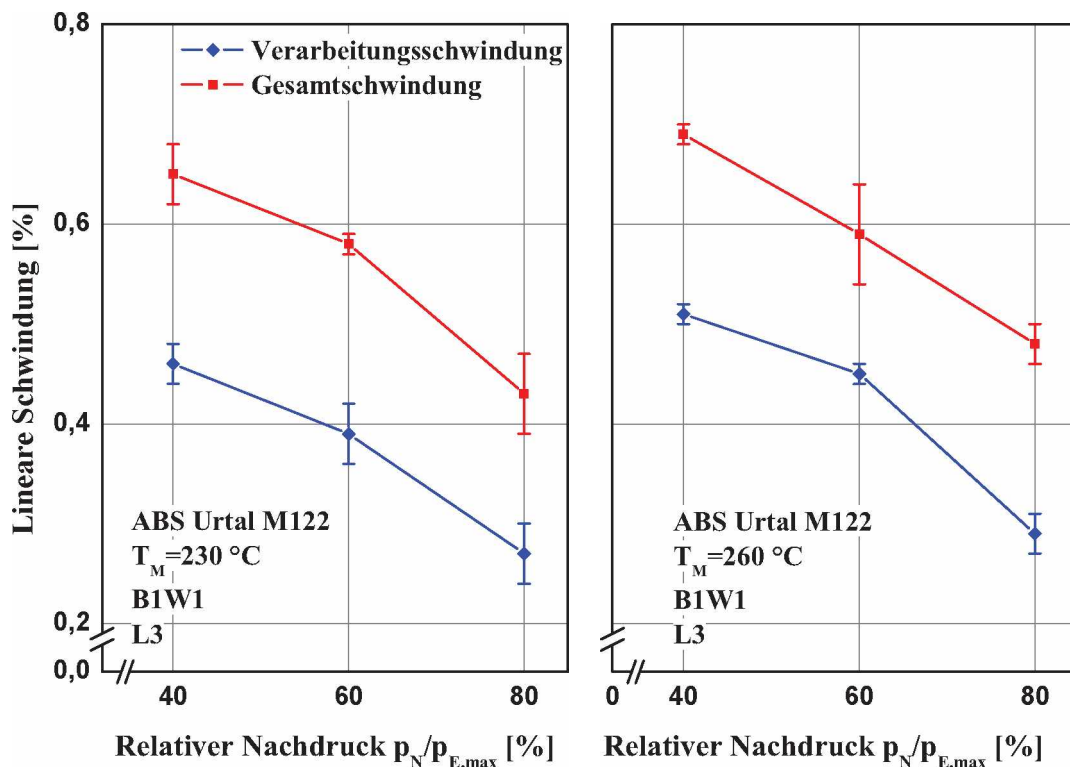


Abbildung 4.19: Vergleich Verarbeitungsschwindung - Gesamtschwindung für das gebundene Schwindungsmaß L3, ABS Urtal M122, B1W1, bei unterschiedlichen Nachdrücken

In Abbildung 4.20 ist die Verarbeitungs- und Gesamtschwindigkeit für das teilgebundene Maß H1 bei der Wanddickenkombination B1W3 dargestellt. Es zeigt sich hier ein ähnliches Verhalten wie in Abbildung 4.19. Der Unterschied zwischen Verarbeitungs- und Gesamtschwindigkeit beträgt hier im Mittel ca. 0,1 %.

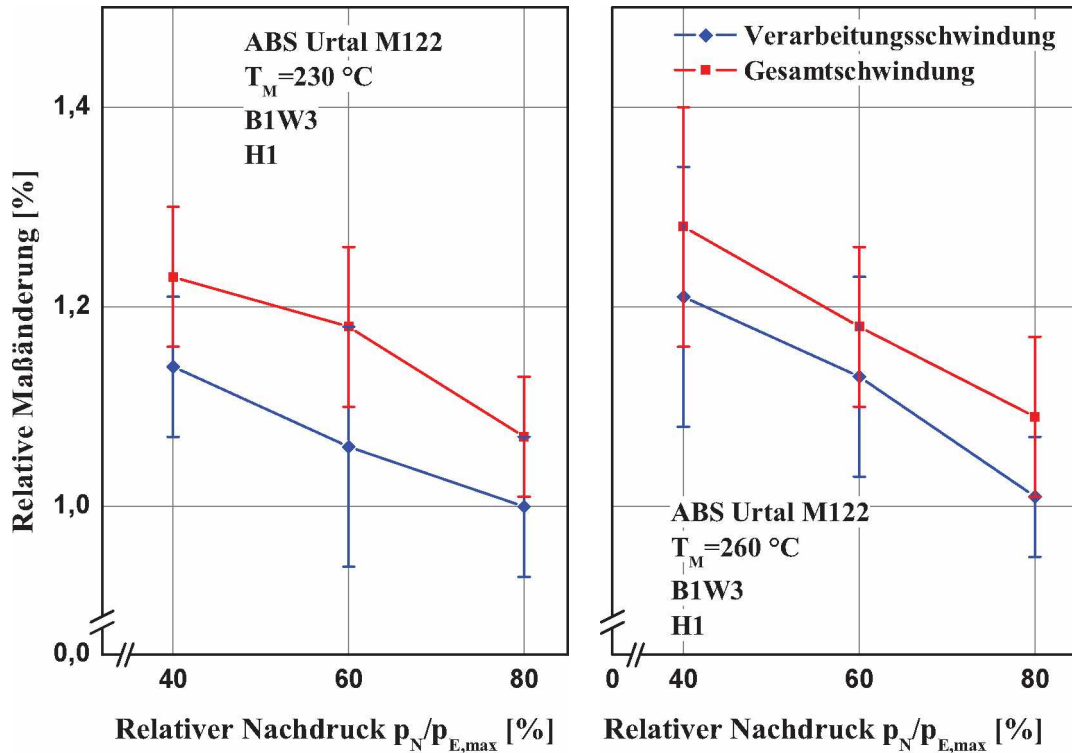


Abbildung 4.20: Vergleich Verarbeitungsschwindigkeit - Gesamtschwindigkeit für das teilgebundene Maß H1, *ABS Urtal M122*, B1W3, bei unterschiedlichen Nachdrücken

4.4.2 Einfluss der Wanddickenkombination auf die Schwindung

In Abbildung 4.21 ist der Einfluss der verschiedenen Wanddickenkombinationen für die teilgebundenen Schwindungsmaße am Maß H1 bei hoher Massetemperatur in Abhängigkeit des relativen Nachdruckes dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Schwindungswerte mit steigendem Nachdruckniveau sinken. Auch ist aus dem Diagramm zu entnehmen, dass die Gesamtschwindung höher als die Verarbeitungsschwindung ist. Bei konstanter Bodenwanddicke (z.B. B1W1 und B1W3) führt eine Erhöhung der Seitenwanddicke zu größeren Schwindungswerten. Umgekehrt führt eine Erhöhung der Bodenwanddicke (z.B. B1W3 und B3W3) bei konstanter Seitenwanddicke zu kleineren Schwindungswerten. Der Unterschied zwischen Verarbeitungs- und Gesamtschwindung beträgt hier im Mittel ca. 0,1 %.

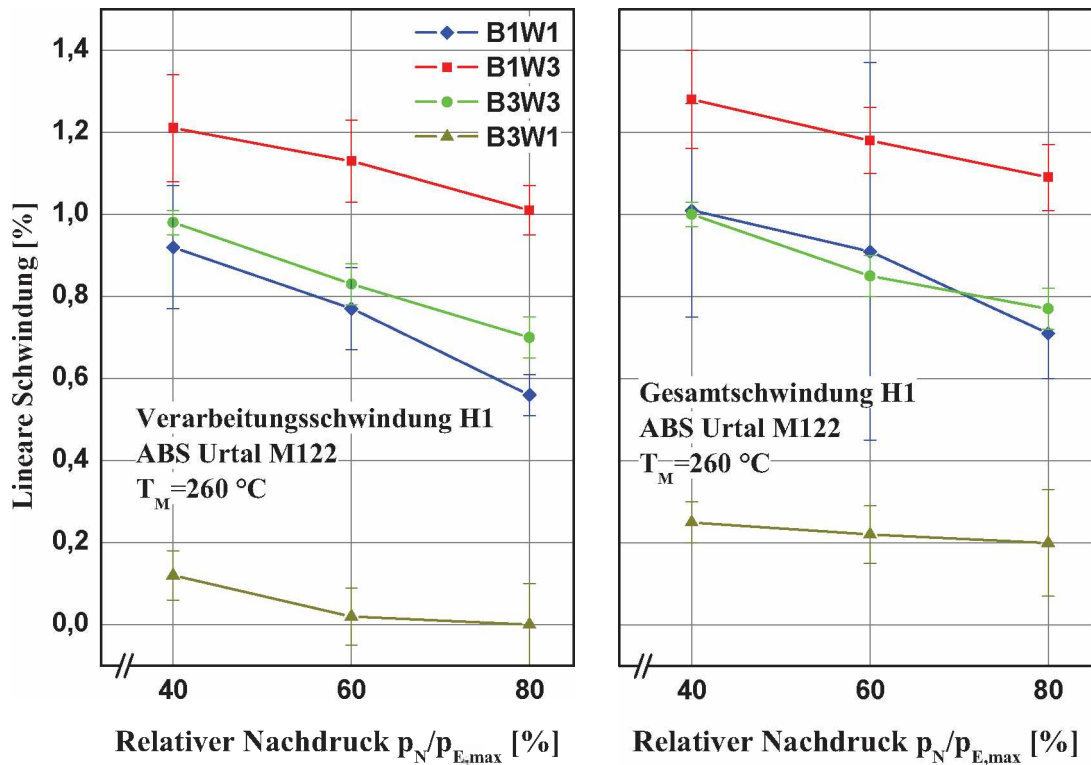


Abbildung 4.21: Einfluss der Wanddickenkombination auf das teilgebundene Schwindungsmaß H1 für *ABS Urtal M122* ($T_M = 260 \text{ }^\circ\text{C}$) bei unterschiedlichen Nachdrücken

In der Abbildungen 4.22 ist der Einfluss der verschiedenen Wanddickenkombinationen auf das gebundene Schwindungsmaß L3 bei niedriger Massetemperatur dargestellt. Hier zeigt sich für die Veränderung der Seitenwanddicke das gleiche Bild wie bei den teilgebundenen Maßen. Die Schwindungswerte nehmen bei konstanter Bodenwanddicke mit steigender Seitenwanddicke zu.

Bei konstanter Seitenwanddicke ist folgendes ersichtlich: Bei der Gesamtschwindung führt eine Erhöhung der Bodenwanddicke, wie schon bei den teilgebundenen Maßen, zu kleineren Schwindungswerten. Bei hoher Seitenwanddicke ist dieses Verhalten bei der Verarbeitungsschwindung nicht zu erkennen. Beim niedrigen und mittleren Nachdruck erkennt man, dass die Schwindungswerte bei der Kombination B3W3 geringfügig größer sind als bei der Kombination B1W3. Hier wirkt sich die größere Massenanhäufung (größere Bodenwanddicke) stärker auf die Schwindung aus, als die verbesserte Nachdruckwirksamkeit. Beim hohen Nachdruck kehrt sich dieses Verhalten um. Dieser Einfluss ist auch bei der kleinen Bodenwanddicke zu erkennen. Die Nachdruckwirkung steigt mit steigender Nachdruckhöhe. Der Unterschied zwischen Verarbeitungs- und Gesamtschwindung beträgt hier im Mittel ca. 0,2%.

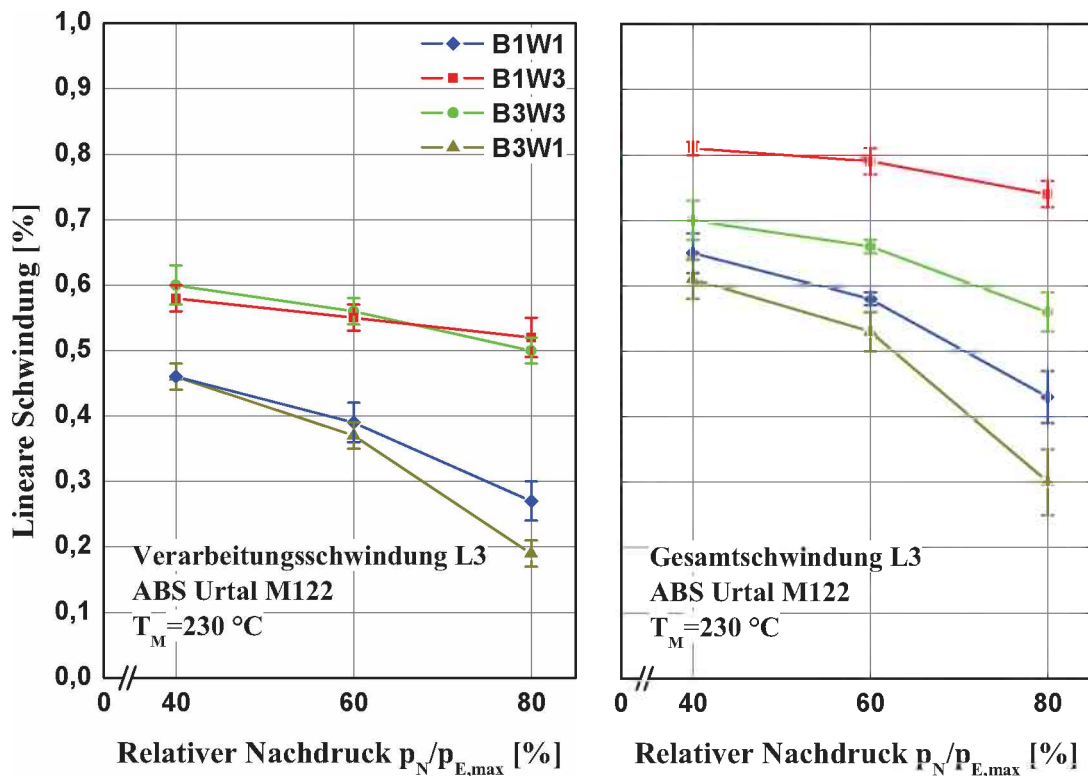


Abbildung 4.22: Einfluss der Wanddickenkombination auf das gebundene Schwindungsmaß L3 für *ABS Urtal M122* ($T_M=230\text{ °C}$) bei unterschiedlichen Nachdrücken

4.4.3 Einfluss der Nachdruckhöhe auf die Schwindung

In Abbildung 4.23(a) ist der Einfluss der Nachdruckhöhe auf das gebundene Schwindungsmaß L3 bei der Wanddickenkombination B3W1 abgebildet. Es ist zu erkennen, dass eine Erhöhung des Nachdrucks, sowohl bei der Verarbeitungs- als auch bei der Gesamtschwindung, zu kleineren Schwindungswerten führt.

In der Abbildung 4.23(b) ist der Einfluss der Nachdruckhöhe auf das teilgebundene Schwindungsmaß H2 bei der Wanddickenkombination B1W1 dargestellt. Auch hier nehmen die Schwindungswerte bei der Verarbeitungs- und Gesamtschwindung mit zunehmendem Nachdruck ab. Der Grund für dieses Verhalten ist der selbe wie für das Material *Hostacom BR 735 G*, und wurde in Kapitel 4.3.1 beschrieben.

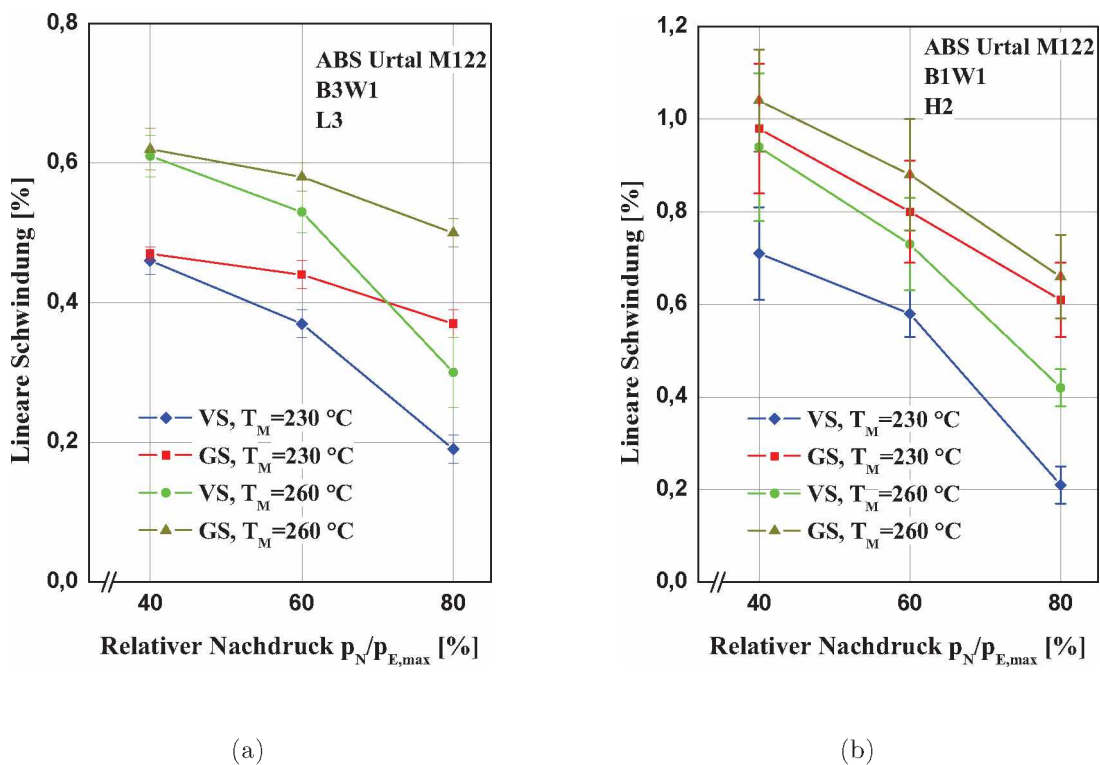


Abbildung 4.23: Nachdruckabhängigkeit der linearen Schwindung für die Maße L3 und H2 (*ABS Urtal M122*) bei unterschiedlichen Nachdrücken

4.4.4 Einfluss der Massetemperatur auf die Schwindung

Die Abbildung 4.24 zeigt den Einfluss der Massetemperatur auf das Schwindungsverhalten für das teilgebundene Maß H1 bei der Wanddickenkombination B1W3. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Massetemperatur bei allen Nachdruckstufen die Schwindungswerte steigen. Grund hierfür ist das höhere thermische Kontraktionspotential der Masse, welches stärker zum Tragen kommt, als die verbesserte Nachdruckwirksamkeit aufgrund der kleineren Schmelzeviskosität.

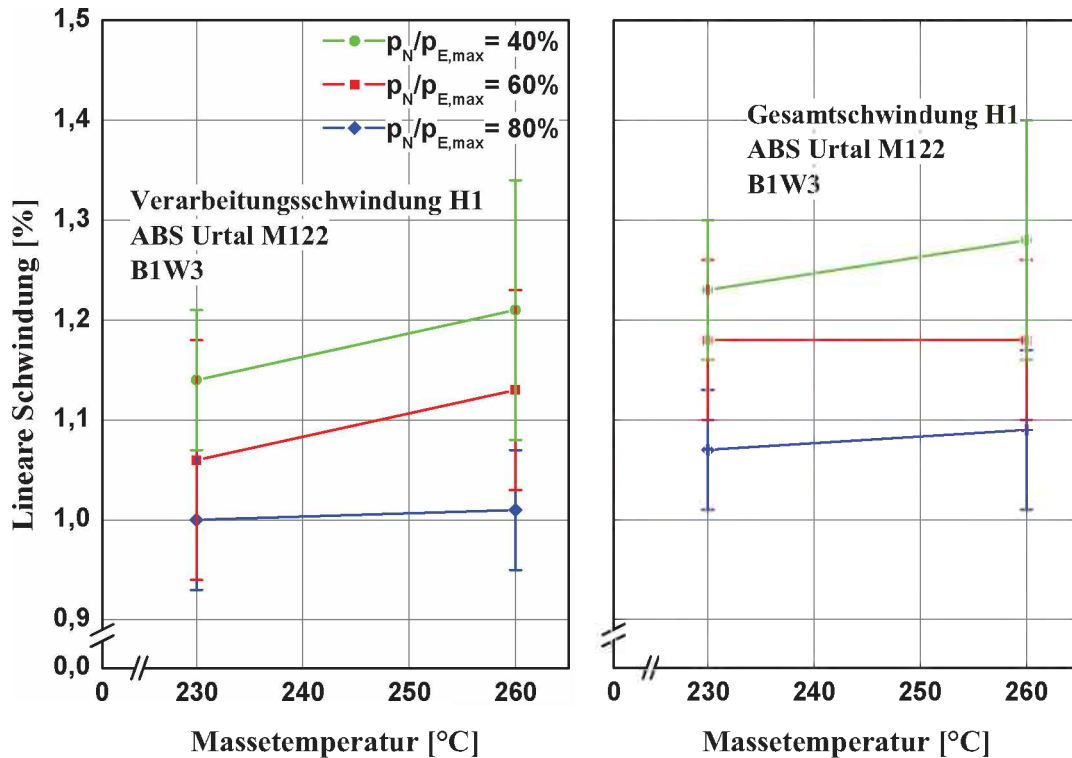


Abbildung 4.24: Einfluss der Massetemperatur auf das teilgebundene Schwindungsmaß H1 für *ABS Urtal M122*, B1W3, bei unterschiedlichen Nachdrücken

Die Abbildung 4.25 zeigt den Einfluss der Massetemperatur auf das Schwindungsverhalten für das gebundenen Maß L1 bei der Wanddickenkombination B1W1. Es zeigt sich, wie schon bei den teilgebundenen Maßen, dass mit steigender Massetemperatur die Schwindungswerte ansteigen.

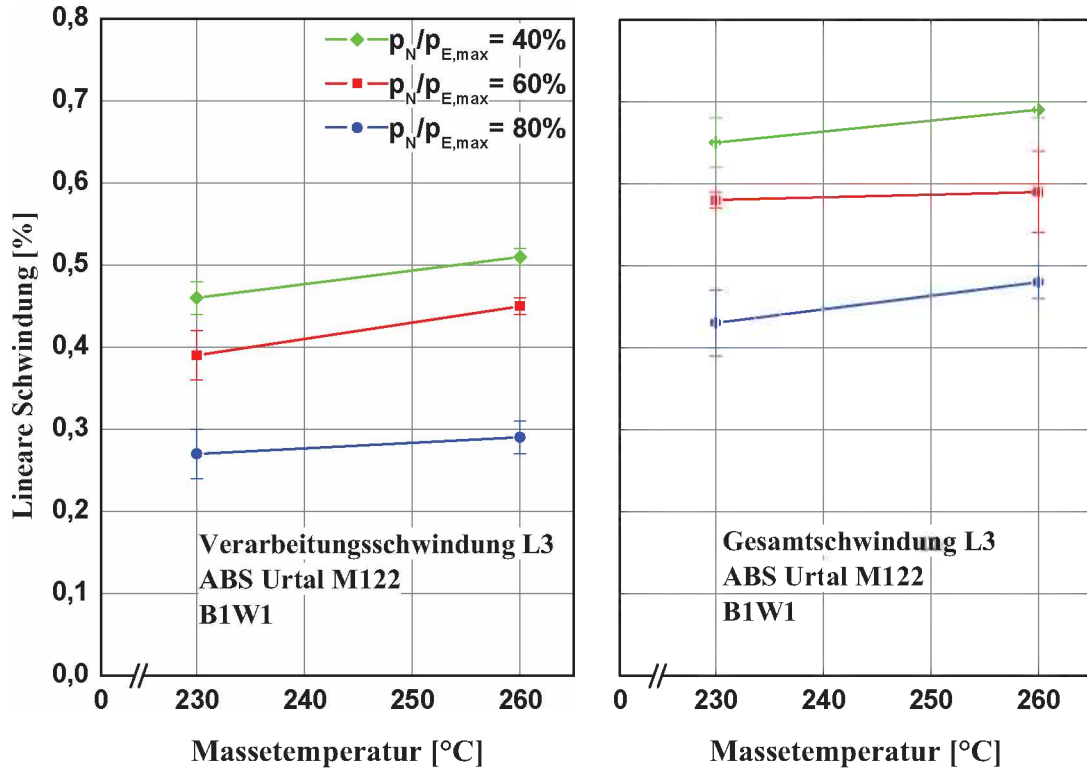


Abbildung 4.25: Einfluss der Massetemperatur auf das gebundene Schwindungsmaß L3 für *ABS Urtal M122*, B1W1, bei unterschiedlichen Nachdrücken

Abschließend sei hier aufgelistet wie der Prozess zu führen ist, um die Schachteln möglichst verzugsarm herzustellen:

- B1W1: mittlerer Nachdruck, niedrige Massetemperatur
- B1W3: niedriger Nachdruck, hohe Massetemperatur
- B3W1: niedriger Nachdruck, niedrige Massetemperatur
- B3W3: niedriger Nachdruck, niedrige Massetemperatur

Bei diesen Betrachtungen wird nur auf das Einfallen der Seitenflächen Rücksicht genommen. Die Schwindung der Schachtelmaße wird bei diesen Empfehlungen nicht notwendigerweise minimiert.

4.4.5 Vergleich der berechneten Ergebnisse mit den vermessenen Bauteilen

Die Abbildung 4.26 zeigt das Schwindungsverhalten der Verarbeitungsschwindung und der drei Simulationsmodelle (Midplane, Fusion, 3D) für das teilgebundene Schwindungsmaß H1 bei der Wanddickenkombination B1W3. Es ist zu erkennen, dass das Midplane- und Fusionmodell höhere und das 3D-Modell kleinere Schwindungswerte liefern als die realen Messungen. Das Midplane- und Fusionmodell haben einen ähnlichen Kurvenverlauf wie die vermessenen Formteile. Die Ergebnisse werden jedoch weit überschätzt. Die Werte des 3D-Modells hingegen liegen nahe an der Realität, der Kurvenverlauf wird jedoch ungenau berechnet.

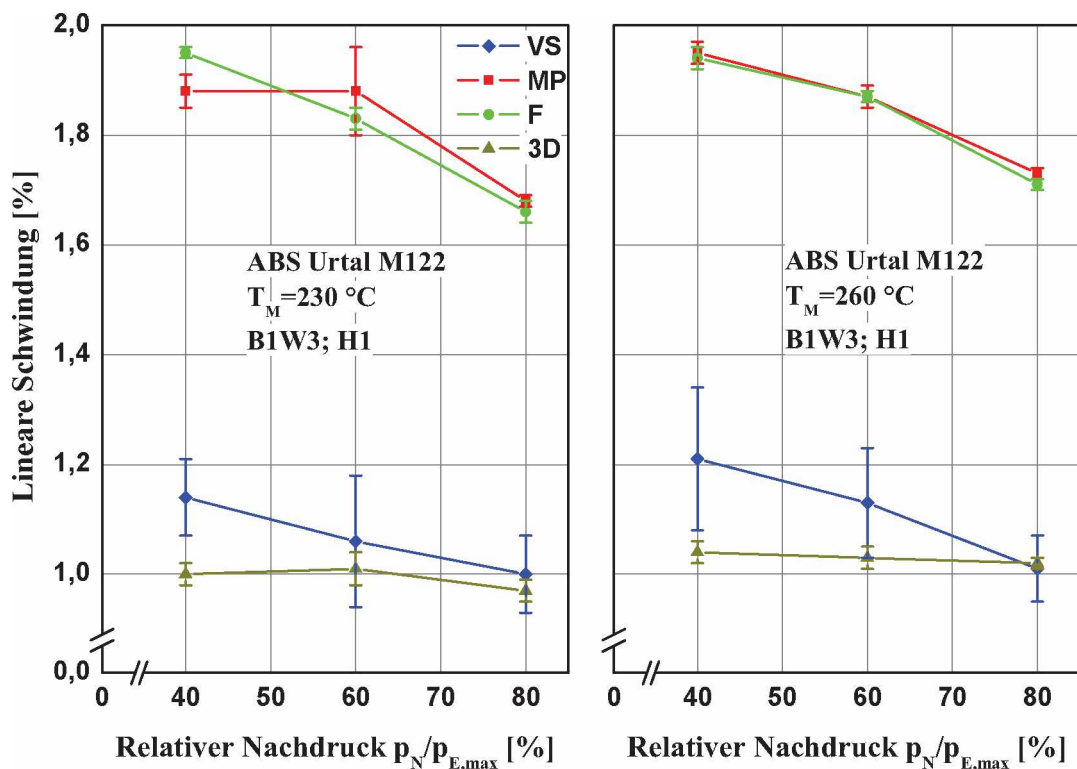


Abbildung 4.26: Vergleich: Realität - Simulation, teilgebundenes Schwindungsmaß H1 für *ABS Urтал M122*, B1W3, bei unterschiedlichen Nachdrücken

Die Abbildung 4.27 zeigt das Schwindungsverhalten der Verarbeitungsschwindigkeit und der drei Simulationsmodelle (Midplane, Fusion, 3D) für das gebundene Schwindungsmaß L3 bei der Wanddickenkombination B1W1. Hier ist zu erkennen, dass die Werte aller drei Simulationsmodelle über den realen Werten liegen. Der Kurvenverlauf wird hier von allen drei Modellen gut beschrieben. Das Ergebnisse des Midplane- und Fusionmodells überschätzen die Realität jedoch stark. Die Werte des 3D-Modells liegen hier nahe an denen der Realität.

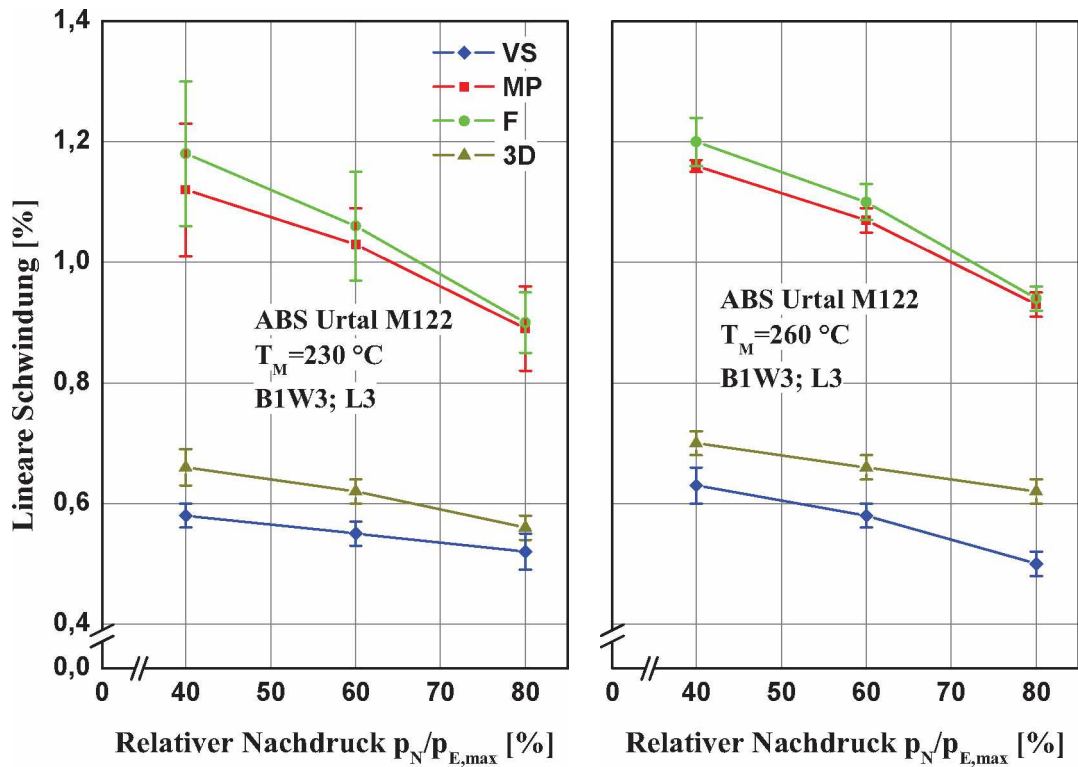


Abbildung 4.27: Vergleich: Realität - Simulation, gebundenes Schwindungsmaß L3 für *ABS Urtal M122*, B1W3, bei unterschiedlichen Nachdrücken

Die Ergebnisse der Simulationen sind in hohem Maß von der Wanddickenkombination abhängig. Für die hier durchgeführten Untersuchungen werden folgende Empfehlungen für die Berechnungen abgegeben.

- B1W3:
Für diese Wanddickenkombination zeigt der Überblick über die Gesamtheit der Ergebnisse, dass das 3D-Modell für die Berechnung zu bevorzugen ist. Beim Großteil der betrachteten Maße liegen die Berechnungsergebnisse des 3D-Modells näher an den gemessenen Werten, als die Ergebnisse der beiden 2,5D-Modelle. Die Druck- und Massetemperaturabhängigkeiten der Schwindung werden vom 3D-Modell im wesentlichen richtig beschrieben.
- B1W1:
Wie schon für die Wanddickenkombination B1W3 wird auch für diese Wanddickenkombination das 3D-Modell empfohlen. Für die Empfehlung sind auch die selben Gründe ausschlaggebend.
- B3W3:
Ein Überblick über alle Ergebnisse zeigt, dass für diese Wanddickenkombination das 3D-Modell für die Berechnung verwendet werden sollte. Durch die Verwendung des 3D-Modells werden Berechnungsergebnisse erzielt, die der realen Bauteilschwindung sehr gut entsprechen. Auch die Druck- und Massetemperaturabhängigkeiten der betrachteten Maße werden vom 3D-Modell in guter Übereinstimmung zur Realität wiedergegeben.
- B3W1:
Hier wird auch für alle Schwindungsmaße das 3D-Modell empfohlen. Die Gründe sind die gleichen wie bei allen anderen Wanddickenkombinationen.

4.5 Zusätzliche Untersuchungen zu Schwindung und Verzug

Bei der Polymertype *Hostacom BR 735 G* wurden noch weitere zusätzliche Untersuchungen durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen wurden die Schachteln mechanisch bearbeitet und danach neuerlich auf ihr Schwindungs- und Verzugsverhalten untersucht.

Die Schachtelformteile wurden folgenden mechanischen Bearbeitungen unterzogen:

- Abtrennen des Bodens von den Seitenwänden
- Wegfräsen der Eckbereiche
- Durchschneiden der Formteile in der Mitte

Die Untersuchungen wurden folgendermaßen durchgeführt:

Für jede einzelne mechanische Bearbeitung wurden zwei Schachteln untersucht. Zuerst wurden beide Schachteln vermessen. Danach wurde eine Schachtel ausgelagert. Die Auslagerungszeit betrug wie schon bei den anderen Versuchen 168 Stunden bei 80 °C. Nach der Auslagerung wurde diese Schachtel abermals vermessen. Als nächstes folgte die mechanische Bearbeitung beider Schachteln. Nach der jeweiligen Bearbeitung wurden die Schachteln wiederum vermessen. Von den jeweiligen Einzelmessungen wurde der arithmetische Mittelwert gebildet, sowie in den Diagrammen die Standardabweichung mitangegeben.

Es wurden die Wanddickenkombinationen B3W3 (alle drei Bearbeitungen) und B3W1 (nur durchgeschnitten) untersucht.

Die Abbildung 4.28(a) zeigt die Lage des Schnittes für die Formteile, die mittig durchgeschnitten wurden. Weiters sind die Fräslinien in den Eckbereichen dargestellt. In Abbildung 4.28(b) ist die Fräslinie für die Formteile, bei denen der Boden entfernt wurde, eingezeichnet. Zum besseren Verständnis sind in der Abbildung 4.29 die Schachteln nach der Bearbeitung abgebildet.

Das Durchschneiden wurde mit einer Bandsäge durchgeführt. Der Fräserdurchmesser betrug 3 mm.

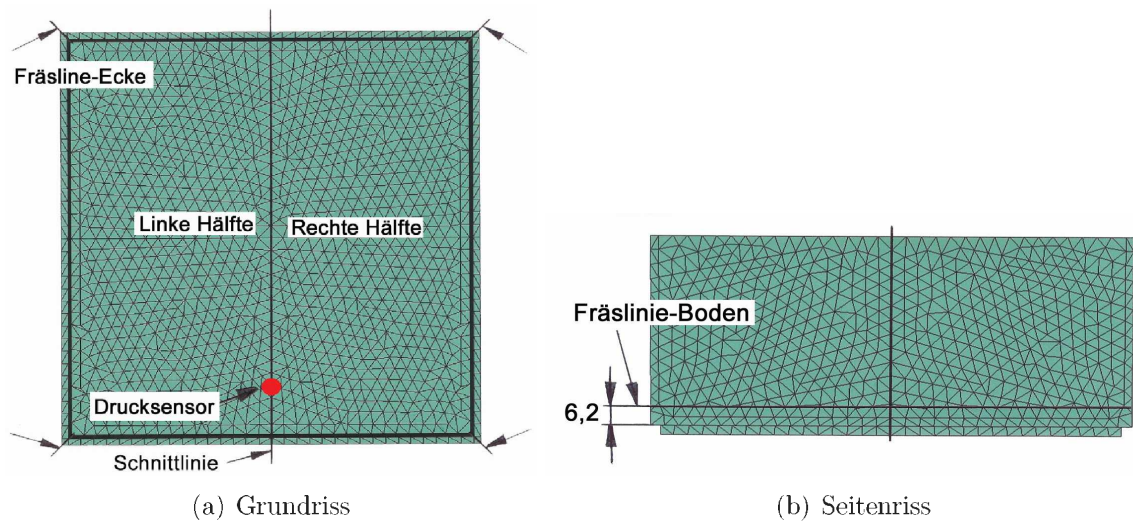


Abbildung 4.28: Übersicht der Lage des Schnittes und der Fräslinien

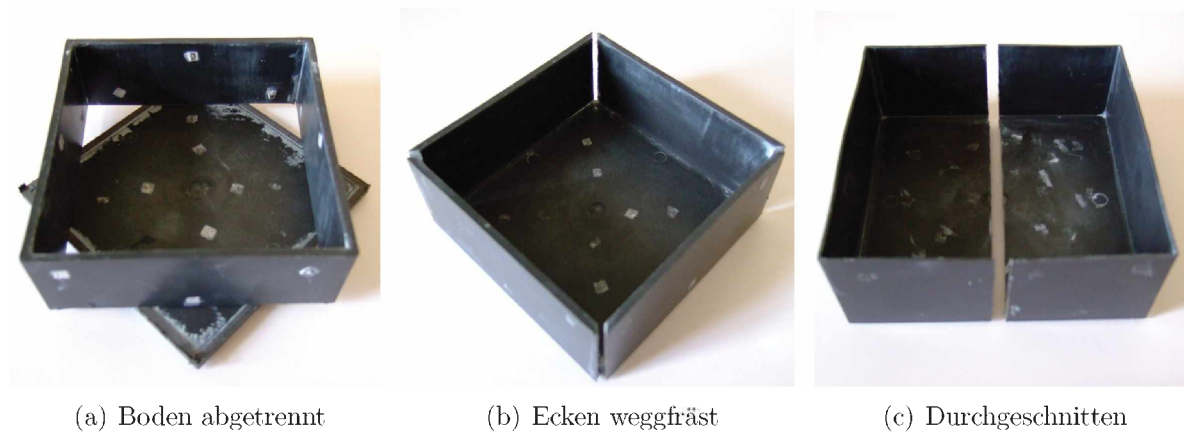


Abbildung 4.29: Bearbeitete Formteile aus *Hostacom BR 735 G*

4.5.1 Einfluss der Bodenfläche auf Schwindung und Verzug

Die Abbildung 4.30 zeigt den Einfluss des entfernten Bodens auf das gebundene Schwindungsmaß L1 bei der Wanddickenkombination B3W3. Es ist ersichtlich, dass der fehlende Boden kaum einen Einfluss auf die Schwindungswerte hat. Die Seitenwände sind hier in sich so steif, dass eventuell frei werdende Spannungen kaum eine Auswirkung auf das Maß L1 haben.

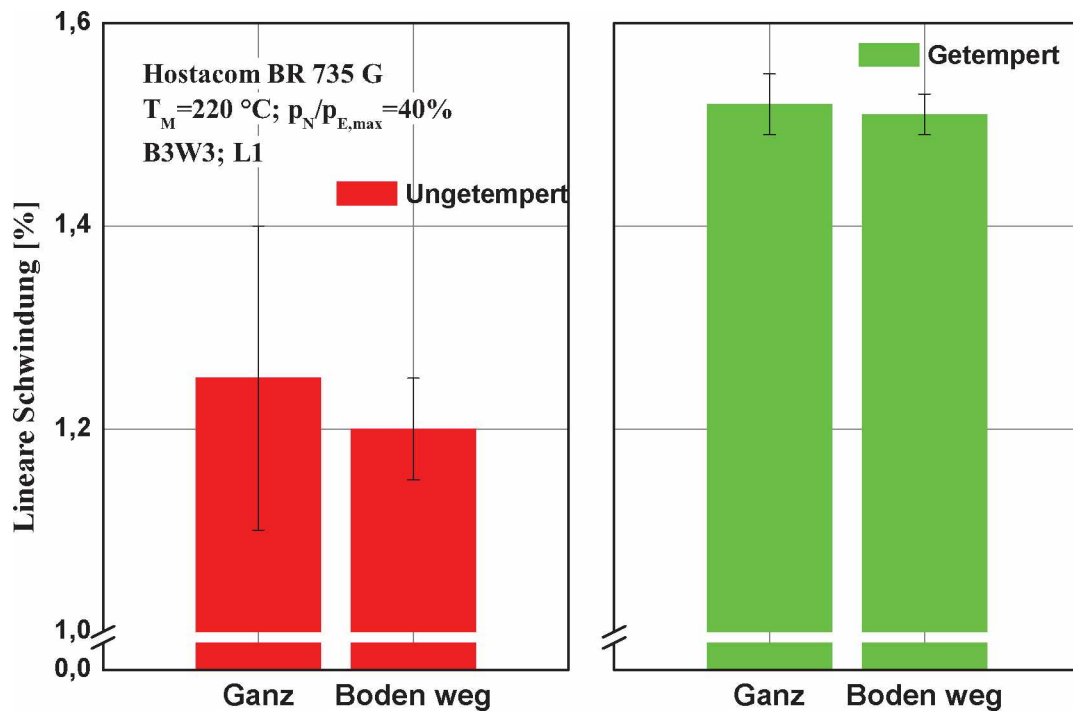


Abbildung 4.30: Einfluss des fehlenden Bodens auf das gebundene Schwindungsmaß L1 für *Hostacom BR 735 G*, B3W3

4.5.2 Einfluss der Schachtecken auf Schwindung und Verzug

Hier wird die relative Winkeländerung der Seitenflächen von jenen Schachteln untersucht, bei denen die Ecken weggefräst wurden. Diese wurde zwischen der Innenseite der Seitenwand und der Innenseite des Bodens bestimmt. Die Berechnung wurde mit der folgenden Formel durchgeführt:

$$RW = \frac{W_W - W_{FT}}{W_W} * 100 \quad (4.1)$$

RW relative Winkeländerung in Prozent

W_W Winkelmaß des Werkzeuges

W_{FT} Winkelmaß des Formteils

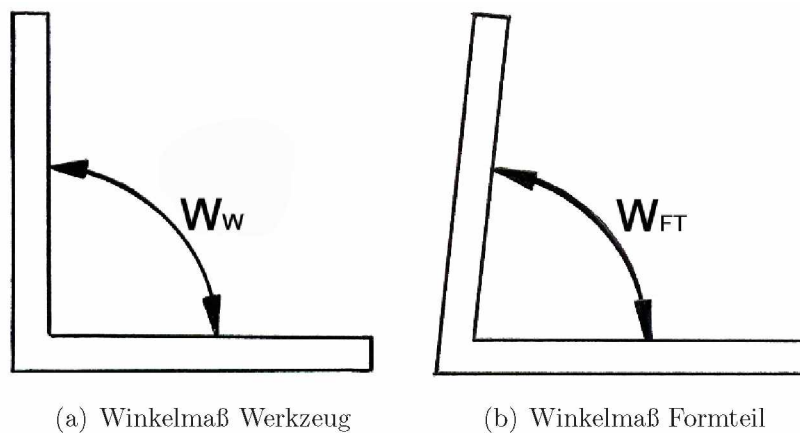


Abbildung 4.31: Schematische Darstellung der Winkel zur Bestimmung der relativen Winkeländerung

Um die Ergebnisse mit den geschnittenen Formteilen vergleichen zu können, wurden nur die linke und die rechte Seitenwand des Formteils zur Untersuchung herangezogen. Die Abbildung 4.32 zeigt den Einfluss der fehlenden Ecken auf die relative Winkeländerung der Seitenflächen für die Wanddickenkombination B3W3. Beim ungetemperten Formteil steigt die relative Winkeländerung. Es sind innere Spannungen vorhanden, die bewirken, dass sich die Seitenwand nach innen biegt. Die Eckbereiche verhindern dies bis zu einem gewissen Grad. Ihr Fehlen führt nun dazu, dass sich die Seitenwände noch weiter nach innen biegen können. Beim getemperten Formteil führt ein Fehlen der Ecken zum gegenteiligen Effekt. Die relative Winkeländerung sinkt. Beim Tempern relaxieren die inneren Spannungen. Dies führt nun dazu, dass sich die Seitenwände wieder in die vom Werkzeug vorgegebene Position zurückbiegen. Auch hier verhindern die Eckbereiche dies bis zu einem gewissen Grad. Fehlen die Ecken, so verschwindet diese Behinderung. Die Seitenwände können sich weiter zurückbiegen.

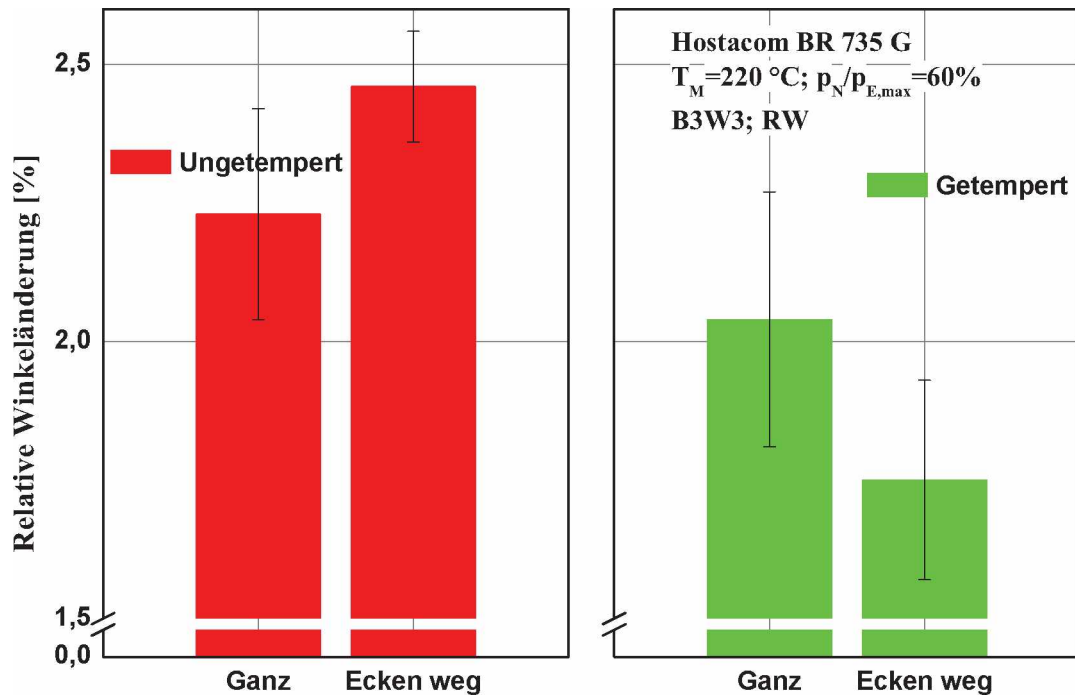


Abbildung 4.32: Einfluss der fehlenden Ecken auf die relative Winkeländerung für *Hostacom BR 735 G*, B3W3

4.5.3 Schwindungs- und Verzugsergebnisse an einer durchgeschnittenen Schachtel

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse jener Schachteln betrachtet, die in der Mitte durchgeschnitten wurden.

4.5.3.1 Untersuchungen an der Wanddickenkombination B3W3

Die Abbildung 4.33 zeigt den Einfluss des Durchschneidens auf das gebundene Schwindungsmaß L1. Sowohl beim ungetemperten als auch beim getemperten Formteil hat ein Durchschneiden eine Abnahme der Schwindungswerte zur Folge. Das Durchschneiden setzt innere Spannungen frei, die zu einer Abnahme dieser führen. Der Grund dafür ist, dass die Seitenwände und der Boden sich gegenseitig abstützen. Nach dem Durchschneiden ist dies nicht mehr möglich. Das gleiche Verhalten zeigt sich für das zweite gebundene Schwindungsmaß L3.

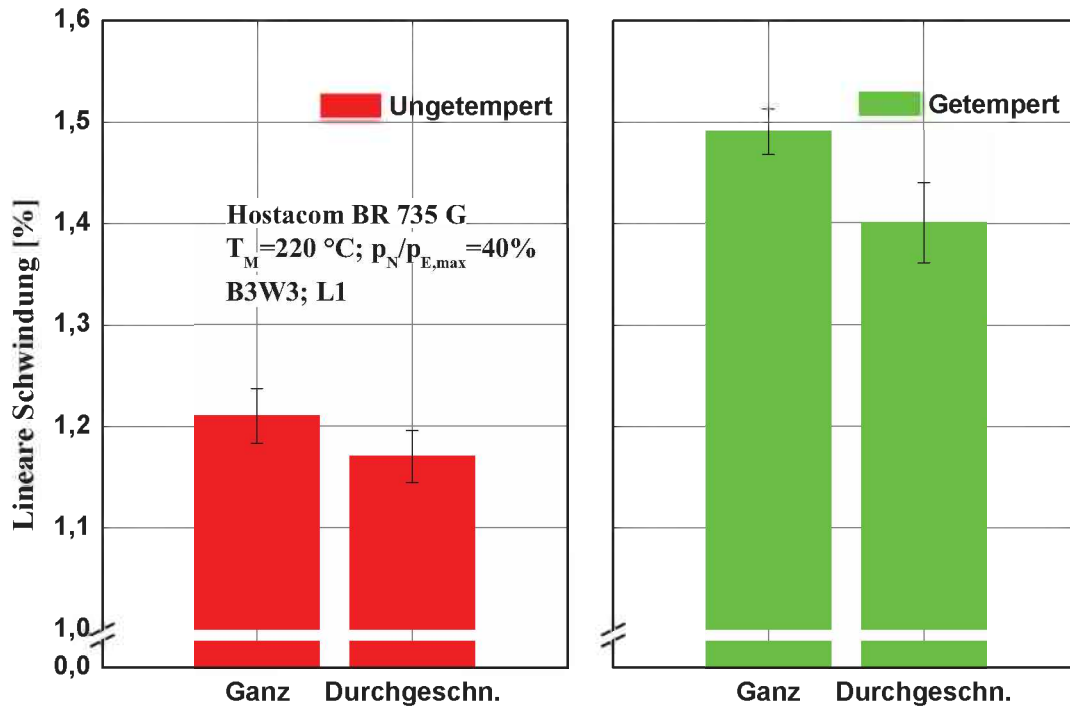


Abbildung 4.33: Einfluss des Durchschneidens auf das gebundene Schwindungsmaß L1 für *Hostacom BR 735 G*, B3W3

Die Abbildung 4.34 zeigt den Einfluss des Durchschneidens auf die relative Winkeländerung. Das Durchschneiden führt zu einer Verringerung der relativen Winkeländerung. Die Seitenwand strebt wieder in die vom Werkzeug vorgegebene Position zurück. Es tritt hier ein ähnliches Verhalten wie bei den gebundenen Schwindungsmaße (L1 und L3) auf. Nach dem Durchschneiden stützen sich der Boden und die Seitenwände nicht mehr gegeneinander ab. Die nach innen gebogene Seitenwand strebt nach dem Durchschneiden wieder in die vom Werkzeug vorgegebene Position.

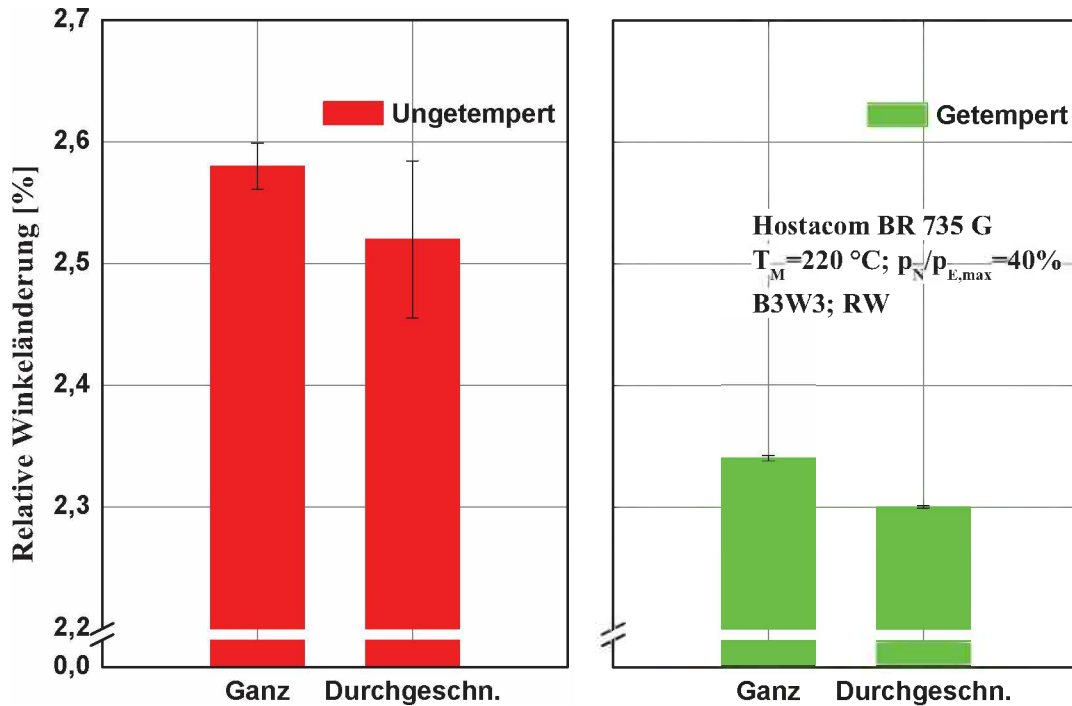


Abbildung 4.34: Einfluss des Durchschneidens auf die relative Winkeländerung für *Hostacom BR 735 G*, B3W3

4.5.3.2 Untersuchungen an der Wanddickenkombination B3W1

Die Abbildung 4.35 zeigt den Einfluss des Durchschneidens auf das gebundene Schwindungsmaß L1. Beim ungetemperten Formteil hat ein Durchschneiden eine Zunahme der Schwindungswerte zur Folge. Durch das Durchschneiden werden innere Spannungen frei, die zu einer höheren Schwindung führen. Beim getemperten Formteil führt ein Durchschneiden zum Sinken der Schwindungswerte. Durch das Auslagern relaxieren hier die innere Spannungen. Dies führt dazu, dass nach dem Durchschneiden der Schwindungswerte sinken. Der Grund für dieses Verhalten ist, wie in Kapitel 4.5.3.1 angesprochen, das gegenseitige Abstützen von Boden und Seitenwänden. Das gleiche Verhalten zeigt sich für das zweite gebundene Schwindungsmaß L3.

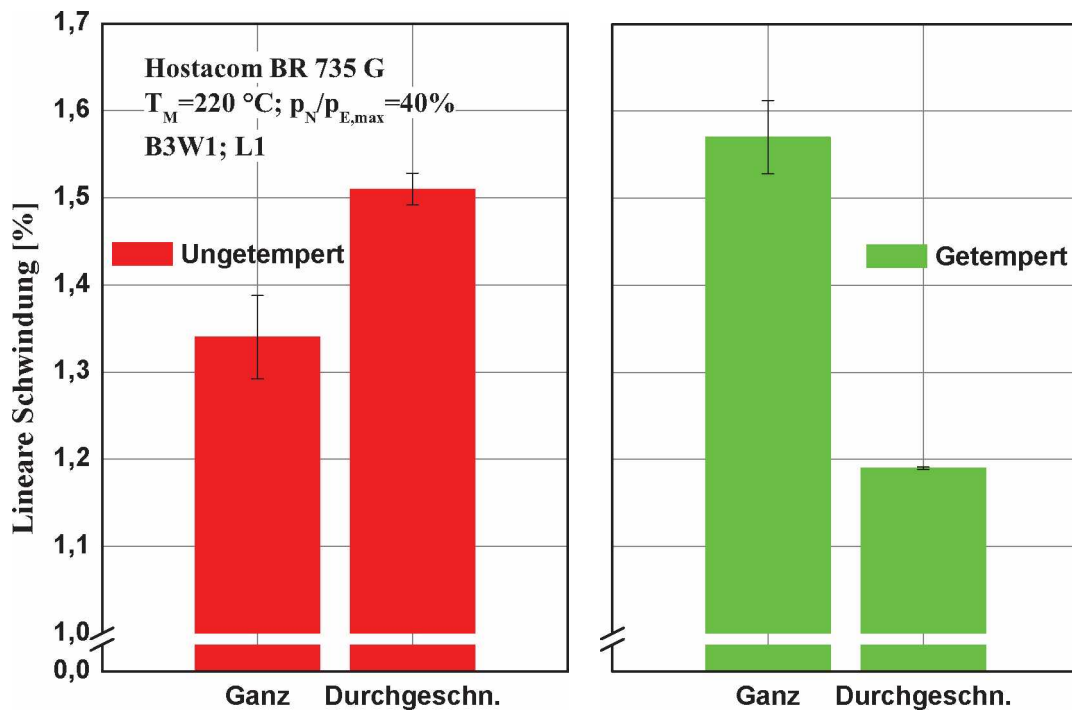


Abbildung 4.35: Einfluss des Durchschneidens auf das gebundene Schwindungsmaß L1 für *Hostacom BR 735 G*, B3W1

Die Abbildung 4.36 zeigt den Einfluss des Durchschneidens auf die relative Winkeländerung. Beim ungetemperten Formteil hat ein Durchschneiden eine Abnahme der relativen Winkeländerung zur Folge. Die negativen Werte bedeuten, dass sich die Seitenwand nach außen biegt. Durch das Durchschneiden werden innere Spannungen frei die eine Verringerung der relativen Winkeländerung hervorrufen. Die Seitenwand biegt sich weiter nach außen. Beim getemperten Formteil tritt der umgekehrte Effekt auf. Die nach außen gebogene Seitenwand biegt sich nach dem Durchschneiden in die vom Werkzeug vorgegebene Position zurück. Die relative Winkeländerung steigt. Dieses Verhalten ist auf die gleichen Effekte wie bei den gebundenen Schwindungsmaßen zurückzuführen.

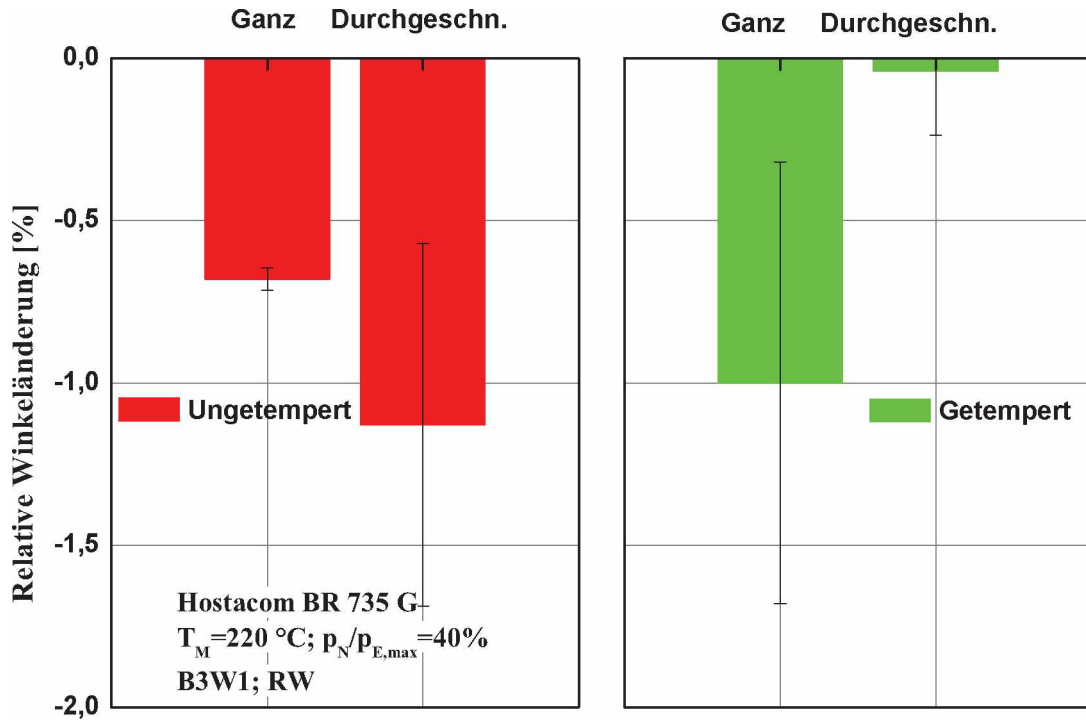


Abbildung 4.36: Einfluss des Durchschneidens auf die relative Winkeländerung für *Hostacom BR 735 G*, B3W1

In der Abbildung 4.37 wird der Einfluss des Durchschneidens auf die relative Winkeländerung noch einmal anders dargestellt. Hier wird ein 2D-Vergleich zwischen dem ganzen und dem durchgeschnittenen Formteil durchgeführt. Das ganze Formteil wird als Referenzteil und das durchgeschnittene Formteil als Testteil betrachtet. Das Referenzteil hat die schwarze Formteilkontur, das Testteil die farbige Formteilkontur. Die Überlagerung beschreibt die Gestaltänderung zwischen dem ganzen und dem durchgeschnittenen Formteil. In der Abbildung 4.37(a) ist das ungetemperte Formteil dargestellt. Schneidet man dieses in der Mitte durch, so biegt sich die Seitenwand nach außen. Die relative Winkeländerung nimmt ab. Das getemperte Formteil wird in Abbildung 4.37(b) dargestellt. Wird dieses durchgeschnitten, so biegt sich die Seitenwand nach innen. Die relative Winkeländerung nimmt zu.

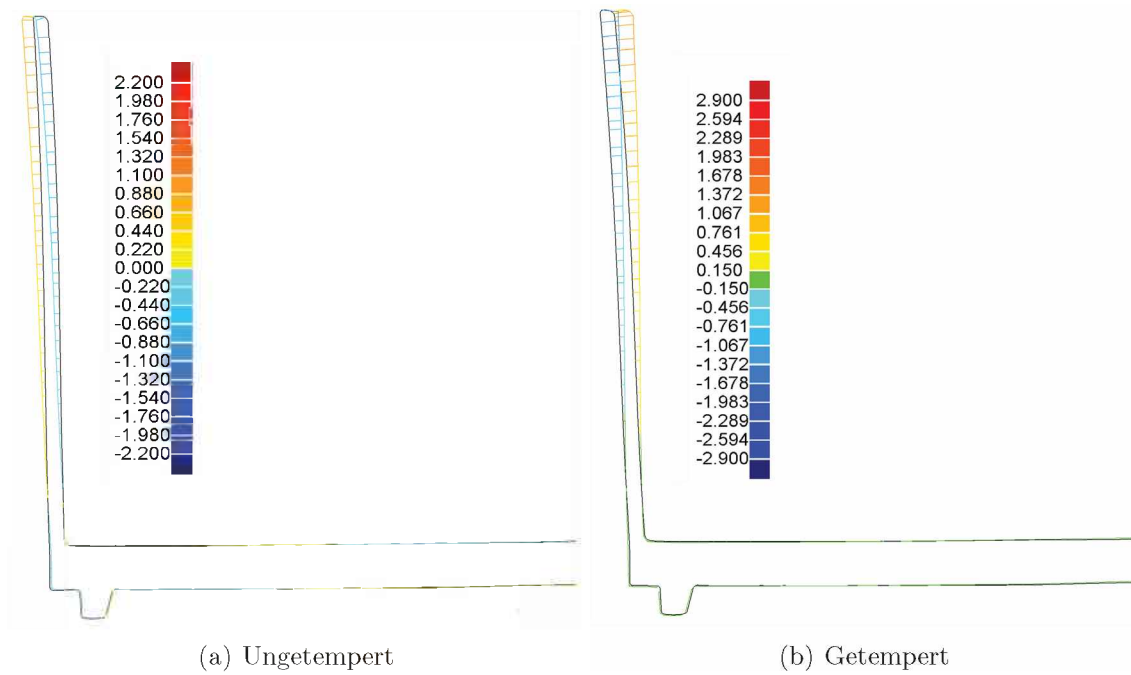


Abbildung 4.37: 2D-Gegenüberstellung, linke Formteilhälfte, durchgeschnitten für *Hostacom BR 735 G*

Durch die mechanische Bearbeitung wurde versucht, die Schwindung vom Verzug abzugrenzen. Es hat sich gezeigt, dass dies nicht möglich ist. Speziell bei den durchgeschnittenen Formteilen hat sich gezeigt, dass eine Änderung der Schwindung (Maße L1 und L3) mit einer Änderung des Verzuges (relative Winkeländerung) einhergeht.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Einhaltung der geforderten Qualitätskriterien ist bei technischen Bauteilen aus Kunststoff von zentralem Interesse. Nur dann kann die gewünschte Funktionalität im Einsatz gewährleistet werden. Im Zuge der qualitätsorientierten Fertigung ist es daher notwendig, das Schwindungsverhalten bereits bei der Werkzeugauslegung zu kennen und dementsprechend zu berücksichtigen.

In der vorliegenden Arbeit wurden experimentelle Untersuchungen mit den Ergebnissen der Spritzgießsimulationsoftware *Moldflow Plastics InsightTM 6.1 Revision 1* verglichen. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt in geometrie- und prozessabhängigen Untersuchungen der Verarbeitungs- und Nachschwindung für einen amorphen und einen teilkristallinen Kunststoff.

Zur Untersuchung der geometrie- und prozessabhängigen Schwindungsphänomene wird ein Schachtelformteil verwendet. Dieses hat eine quadratische Grundfläche von 100,05 mm x 100,05 mm und eine Höhe von 40 mm. Durch verschiedene Formeinsätze werden die Seitenwanddicke sowie die Bodenwanddicke verändert. Die Dicken betragen jeweils 1 mm und 3 mm, wodurch sich vier unterschiedliche Wanddickenkombinationen ergeben. Das Formteil wird in den Materialien ABS Urtal M122, der Firma ENICHEM POLIMERI (San Donato Milanese, I) und Hostacom BR 735 G der Firma Basell Polyolefines (Hoofddorp, NL) abgemustert.

Die Simulationsberechnungen in *MPITM 6.1 R1* werden jeweils mit Midplane-, Fusion- und 3D-Modellen unter Verwendung der tatsächlichen Prozessparameter durchgeführt. Die Berechnungen erfolgen mit den Stoffdaten der Softwaredatenbank unter Standardbedingungen.

Vergleicht man die experimentell ermittelte Füllstudie mit dem Ergebnis der Simulation, so erkennt man eine gute Übereinstimmung. Die Druckwirkzeiten werden bei allen Simulationsmodellen und Materialien unterschätzt. Auch entsprechen die Druckkurvenverläufe nicht denen der real gemessenen Verläufe. Weiters werden die maximalen Druckniveaus bei allen Simulationsmodellen unterschätzt.

Bei beiden Materialien wirken sich die unterschiedlichen Wanddickenkombinationen auf die Verarbeitungs- und Gesamtschwindung aus. Beim Großteil der Versuche führt eine höhere Bodenwanddicke zu kleineren Schwindungswerten, und eine höhere Seitenwanddicke zu höheren Schwindungswerten. Eine Erhöhung des Nachdrucks führt zu kleineren Schwindungswerten. Die Erhöhung der Massetemperatur bewirkt beim *ABS Urtal M122* eine Steigerung der Schwindung und beim *Hostacom BR 735 G* eine Verringerung der Schwindung. Der Vergleich der Verarbeitungsschwindung mit der Nachschwindung zeigt, dass die Schwindungswerte mit der Auslagerung zunehmen. Nur beim Deformationsmaß L2 und der Wanddickenkombination B3W1 zeigt sich der gegenteilige Effekt. Das Nachschwindungspotential ist bei beiden Materialien hoch. Beim amorphen Polymer betrug dies bis zu 0,41 % und beim teilkristallinen Polymer bis zu 0,60 % (nur Schwindungsmaße).

Der Vergleich zwischen Verarbeitungsschwindigkeit und Simulationsergebnissen für *ABS Urtal M122* zeigt, dass die Simulationsergebnisse über denen der Verarbeitungsschwindigkeit liegen.

Der Vergleich zwischen Verarbeitungsschwindigkeit und Simulationsergebnissen für *Hostacom BR 735 G* zeigt, dass die Simulationsergebnisse unter denen der Verarbeitungsschwindigkeit lagen.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen werden Empfehlungen gegeben, wie weitere Berechnungen durchzuführen sind. Die Aussagekraft und Qualität der Simulationsberechnungen hängt sehr stark von der Qualität der zugrunde liegenden Stoffdaten ab. Dazu zählen insbesondere *pvT*-Daten und Viskositätskurven.

Der Vergleich der Formteile vor und nach der mechanischen Bearbeitung (Schachtelboden weggefräst; Ecken der Schachtel aufgefräst; Schachtel in der Mitte durchgeschnitten) lieferte einige Rückschlüsse bezüglich der Kopplung von Schwindung und Verzug. Es zeigt sich, dass hier eine Beseitigung der geometrischen Behinderung eine Änderung des Verzuges hervorruft. Da hierbei nur ein kleiner Teil der Versuchseinstellungen untersucht wurde, sollten weitere Untersuchungen dieser Art durchgeführt werden.

Für die Zukunft sollte noch eine Vielzahl weiterer Formteile betrachtet werden, welche sich in ihren Geometrien und verwendeten Materialien voneinander unterscheiden. Weiters sollten zusätzliche Materialuntersuchungen, wie z.B. *p-v-T*-Daten bei höheren Abkühlgeschwindigkeiten, durchgeführt werden, um die Berechnungsergebnisse zu verbessern.

Literaturverzeichnis

- [1] Jannasch A.: *Schwindungssteuerung beim Spritzgießen thermoplastischer Kunststoffe*, Dissertation an der technische Universität Chemnitz, 1990
- [2] Peinhopf W.: *Auslegung von Spritzgießwerkzeugen mittels der Methode der finiten Elemente*, Dissertation an der Montanuniversität Leoben, 2000
- [3] Pötsch H. G.: *Prozesssimulation zur Abschätzung von Schwindung und Verzug thermoplastischer Spritzgussteile*, Dissertation, RWTH Aachen, D; 1991
- [4] Fertschej A.: *Experimentelle Bestimmung und Berechnung des Winkelverzuges an einem speziellen thermoplastischen Winkelformteil*, Diplomarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2000
- [5] Ebner G. J.: *Prozess- und wanddickenabhängige Schwindungsuntersuchungen an rechteckigen Formteilen und Vergleiche mit Simulationsrechnungen*, Diplomarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2005
- [6] Wassertheurer M.: *Rechnerische und experimentelle Untersuchungen zu Schwindung und Verzug von teilkristallinen Kunststoffen*, Diplomarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2006
- [7] Erhard G.: *Konstruieren mit Kunststoffen*, Carl Hanser Verlag, 1993
- [8] Lucyshyn T.: *Computerunterstützte Auslegung von Spritzgießwerkzeugen*, Vorlesungsskriptum, Montanuniversität Leoben 2004
- [9] Steinbichler G.: *Fertigungsgerechtes Konstruieren von Spritzgussteilen*, Vorlesungsskriptum, Universität Erlangen-Nürnberg, D; 2006
- [10] Wortberg J.: *Konstruktionslehre III*, Begleitunterlagen zur Vorlesung, Universität Duisburg-Essen, D; 2005
- [11] N.N.: *Qualitätssicherung und 3D-Digitalisierung mit Photogrammetrie und Streifenprojektion*, GOM Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH, D; 2005
- [12] N.N.: *Programmhilfe von Moldflow Plastics InsightTM 6.1 Revision 1*, Moldflow Cooperation Headquarters, Wayland, MA 01778, USA
- [13] Zöllner O.: *Grundlagen zur Schwindung von thermoplastischen Kunststoffen*, Anwendungstechnische Information ATI 1120, Bayer AG Leverkusen, D; 2003
- [14] N.N.: *Materialdatenblatt Hostacom BR 735 G*, Product Data and Technical Information, Basell Polyolefines, NL; 2007

Anhang

Materialspezifische Kennwerte in MPI™

Tabelle A1: Empfohlene Prozessparameter in MPI™

Kenngröße	Einheit	Material	
		ABS Urtal M122	Hostacom BR 735 G
empf. Werkzeugtemperatur	in °C	60	40
empf. Schmelzetemperatur	in °C	240	250
min. Werkzeugtemperatur	in °C	40	20
max. Werkzeugtemperatur	in °C	80	700
min. Schmelzetemperatur	in °C	220	230
max. Schmelzetemperatur	in °C	260	260
max. Schmelzetemperatur (abs.)	in °C	280	280
max. Entformungstemperatur	in °C	140	110
max. Scherbeanspruchung	in MPa	0,3	0,25
max. Schergeschwindigkeit	in s ⁻¹	50000	100000

Tabelle A2: Mechanische Kennwerte in MPI™

Kenngröße	Einheit	Material	
		ABS Urtal M122	Hostacom BR 735 G
E-Modul (Fließrichtung)	in MPa	2240	2200
E-Modul (Querrichtung)	in MPa	2240	1650
Poisson-Zahl ν_{12}	–	0,392	0,4
Poisson-Zahl ν_{23}	–	0,392	0,4
Schubmodul	in MPa	805	715

Tabelle A3: Thermische Kennwerte in MPI™

Kenngröße	Einheit	Material	
		ABS Urtal M122	Hostacom BR 735 G
spezifische Wärmekapazität	in J/kgK	1436 (bei 240 °C)	2420 (bei 230 °C)
Wärmeleitfähigkeit	in W/mK	0,109 (bei 240 °C)	0,178 (bei 230 °C)

Tabelle A4: TAIT-pvT-Modellkoeffizienten in MPI^{TM}

Kenngröße	Einheit	Material	
		ABS Urtal M122	Hostacom BR 735 G
b5	in K	366,03	404,26
b6	in K/Pa	2,55E-7	1,943E-7
b1m	in m ³ /kg	0,0009692	0,00108
b2m	in m ³ /kgK	6,139E-7	6,575E-7
b3m	in Pa	2,03208E8	1,082E8
b4m	in 1/K	0,005269	0,004026
b1s	in m ³ /kg	0,0009692	0,001013
b2s	in m ³ /kgK	3,021E-7	4,496E-7
b3s	in Pa	2,54252E8	1,6384E8
b4s	in 1/K	0,004331	0,005971
b7	in m ³ /kg	0	6,726E-5
b8	in 1/K	0	0,1189
b9	in 1/Pa	0	2,528E-8

Tabelle A5: Cross-WLF-Viskositätskoeffizienten in MPI^{TM}

Kenngröße	Einheit	Material	
		ABS Urtal M122	Hostacom BR 735 G
n	–	0,3021	0,2812
τ^*	in Pa	10555,7	30097,4
D1	in Pas	1,4764E15	1,58345E14
D2	in K	373,15	249,03
D3	in K/Pas	0	0
A1	–	30,494	30,359
A2	in K	51,6	51,6
Transition temperature	in °C	150	125

Prozessparameter

Die in diesem Kapitel aufgelisteten Prozessparameter wurden im Spritzgießversuch ermittelt und für die Berechnungen in MPI^{TM} herangezogen.

Tabelle A6: Prozessparameter für *ABS Urtal M122*

Vers.Nr.	Wanddickenkombination	T_M (°C)	T_{TM-DS} (°C)	T_{TM-AS} (°C)	$p_{E,max}$ (bar)	p_N (bar)	p_N (%)	t_N (s)	$t_{K,Rest}$ (s)	t_{ein} (s)	t_{zykl} (s)
1	B1-W1	230	55	45	1150	920	80	5	20	1,84	39,7
2	B1-W1	230	55	45	1150	690	60	5	20	1,84	39,7
3	B1-W1	230	55	45	1150	460	40	5	20	1,84	39,7
4	B1-W3	230	55	45	950	760	80	6	34	3	56,8
5	B1-W3	230	55	45	950	570	60	6	34	3	56,8
6	B1-W3	230	55	45	950	380	40	6	34	3	56,8
7	B3-W3	230	55	45	600	480	80	19	25	2,69	54,45
8	B3-W3	230	55	45	600	360	60	19	25	2,69	54,45
9	B3-W3	230	55	45	600	240	40	19	25	2,69	54,45
10	B3-W1	230	55	45	690	550	80	15	50	2,57	76,06
11	B3-W1	230	55	45	690	415	60	15	50	2,57	76,06
12	B3-W1	230	55	45	690	280	40	15	50	2,57	76,06
13	B1-W1	260	55	45	880	700	80	5	20	1,75	39,6
14	B1-W1	260	55	45	880	530	60	5	20	1,75	39,6
15	B1-W1	260	55	45	880	350	40	5	20	1,75	39,6
16	B1-W3	260	55	45	750	600	80	6	34	3	56,8
17	B1-W3	260	55	45	750	450	60	6	34	3	56,8
18	B1-W3	260	55	45	750	300	40	6	34	3	56,8
19	B3-W3	260	55	45	430	340	80	21	25	2,79	57,37
20	B3-W3	260	55	45	430	260	60	21	25	2,79	57,37
21	B3-W3	260	55	45	430	170	40	21	25	2,79	57,37
22	B3-W1	260	55	45	485	385	80	21	60	2,53	93,97
23	B3-W1	260	55	45	485	290	60	21	60	2,53	93,97
24	B3-W1	260	55	45	485	195	40	21	60	2,53	93,97

Tabelle A7: Prozessparameter für *Hostacom BR 735 G*

Vers.Nr.	Wanddickenkombination	T_M (°C)	T_{TM-DS} (°C)	T_{TM-AS} (°C)	$p_{E,max}$ (bar)	p_N (bar)	p_N (%)	t_N (s)	$t_{K,Rest}$ (s)	t_{ein} (s)	t_{zykl} (s)
25	B1-W1	220	40	30	640	510	80	5	20	1,91	39,8
26	B1-W1	220	40	30	640	390	60	5	20	1,91	39,8
27	B1-W1	220	40	30	640	260	40	5	20	1,91	39,8
28	B1-W3	220	40	30	600	480	80	6	29	3,03	51,8
29	B1-W3	220	40	30	600	360	60	6	29	3,03	51,8
30	B1-W3	220	40	30	600	240	40	6	29	3,03	51,8
31	B3-W3	220	40	30	380	300	80	21	30	2,94	61,76
32	B3-W3	220	40	30	380	230	60	21	30	2,94	61,76
33	B3-W3	220	40	30	380	150	40	21	30	2,94	61,76
34	B3-W1	220	40	30	345	275	80	22	55	2,46	89,83
35	B3-W1	220	40	30	345	210	60	22	55	2,46	89,83
36	B3-W1	220	40	30	345	140	40	22	55	2,46	89,83
37	B1-W1	250	40	30	470	380	80	5	25	2,53	45,5
38	B1-W1	250	40	30	470	280	60	5	25	2,53	45,5
39	B1-W1	250	40	30	470	190	40	5	25	2,53	45,5
40	B1-W3	250	40	30	520	420	80	6	34	3,04	56,85
41	B1-W3	250	40	30	520	310	60	6	34	3,28	57,09
42	B1-W3	250	40	30	520	210	40	6	34	3,28	57,09
43	B3-W3	250	40	30	320	255	80	22	35	3,22	68,04
44	B3-W3	250	40	30	320	190	60	22	35	3,22	68,04
45	B3-W3	250	40	30	320	130	40	22	35	3,22	68,04
46	B3-W1	250	40	30	285	230	80	25	60	2,45	97,86
47	B3-W1	250	40	30	285	170	60	25	60	2,45	97,86
48	B3-W1	250	40	30	285	115	40	25	60	2,45	97,86

Ergebnisse der experimentellen Schwindungsuntersuchungen

Tabelle A8: Verarbeitungsschwindungen *VS* für *ABS Urtal M122*

Vers.Nr.	Wanddicken- kombination	Schwindung in %					Standardabw. in %				
		L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]	L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]
1	B1-W1	0,64	1,45	0,27	0,49	0,21	0,05	0,08	0,03	0,09	0,04
2	B1-W1	0,68	0,11	0,39	0,74	0,58	0,02	0,04	0,03	0,10	0,05
3	B1-W1	0,68	0,48	0,46	0,79	0,71	0,02	0,09	0,02	0,07	0,10
4	B1-W3	0,76	0,89	0,52	1,00	0,86	0,02	0,10	0,03	0,07	0,04
5	B1-W3	0,73	0,77	0,55	1,06	1,08	0,04	0,01	0,02	0,12	0,14
6	B1-W3	0,74	0,67	0,58	1,14	1,19	0,04	0,02	0,02	0,07	0,08
7	B3-W3	0,63	0,95	0,50	0,62	0,49	0,01	0,07	0,02	0,03	0,03
8	B3-W3	0,67	1,02	0,56	0,75	0,61	0,02	0,09	0,02	0,03	0,04
9	B3-W3	0,68	1,01	0,60	0,86	0,77	0,03	0,12	0,03	0,03	0,03
10	B3-W1	0,60	0,31	0,19	0,27	0,13	0,01	0,10	0,02	0,06	0,02
11	B3-W1	0,66	0,34	0,37	0,06	0,07	0,03	0,19	0,02	0,12	0,15
12	B3-W1	0,67	0,02	0,46	0,03	0,04	0,02	0,05	0,02	0,05	0,06
13	B1-W1	0,64	0,42	0,29	0,56	0,42	0,03	0,08	0,02	0,05	0,04
14	B1-W1	0,71	0,38	0,45	0,77	0,73	0,01	0,06	0,01	0,10	0,10
15	B1-W1	0,73	0,56	0,51	0,92	0,94	0,01	0,00	0,01	0,15	0,16
16	B1-W3	0,74	0,71	0,50	1,01	0,96	0,01	0,05	0,02	0,06	0,04
17	B1-W3	0,73	0,64	0,58	1,13	1,18	0,03	0,05	0,02	0,10	0,18
18	B1-W3	0,74	0,64	0,63	1,21	1,31	0,04	0,04	0,03	0,13	0,21
19	B3-W3	0,63	1,03	0,57	0,70	0,59	0,02	0,07	0,01	0,05	0,06
20	B3-W3	0,66	1,07	0,61	0,83	0,73	0,03	0,08	0,01	0,05	0,01
21	B3-W3	0,73	1,06	0,66	0,98	0,84	0,02	0,11	0,01	0,03	0,04
22	B3-W1	0,65	-0,07	0,37	0,00	0,02	0,03	0,23	0,02	0,10	0,13
23	B3-W1	0,63	-0,25	0,44	0,02	0,05	0,05	0,07	0,02	0,07	0,04
24	B3-W1	0,66	-0,13	0,47	0,12	0,07	0,02	0,08	0,01	0,06	0,03

Tabelle A9: Gesamtschwindung *GS* für *ABS Urtal M122*

Vers.Nr.	Wanddicken- kombination	Schwindung in %					Standardabw. in %				
		L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]	L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]
1	B1-W1	0,76	1,06	0,43	0,67	0,61	0,03	0,53	0,04	0,09	0,08
2	B1-W1	0,82	1,42	0,58	0,85	0,80	0,12	0,89	0,01	0,16	0,11
3	B1-W1	0,80	1,66	0,65	0,92	0,98	0,12	1,14	0,03	0,28	0,14
4	B1-W3	0,87	0,99	0,74	1,07	0,97	0,03	0,10	0,02	0,06	0,06
5	B1-W3	0,89	1,07	0,79	1,18	1,15	0,05	0,00	0,02	0,08	0,12
6	B1-W3	0,88	0,93	0,81	1,23	1,30	0,03	0,04	0,01	0,07	0,06
7	B3-W3	0,69	1,05	0,56	0,67	0,53	0,03	0,11	0,03	0,05	0,05
8	B3-W3	0,76	1,19	0,66	0,88	0,74	0,01	0,09	0,01	0,03	0,01
9	B3-W3	0,79	1,21	0,70	0,96	0,85	0,04	0,16	0,03	0,06	0,04
10	B3-W1	0,71	0,51	0,30	0,67	0,54	0,03	0,08	0,05	0,07	0,13
11	B3-W1	0,78	0,43	0,53	0,29	0,23	0,03	0,39	0,03	0,14	0,12
12	B3-W1	0,81	-0,24	0,61	0,33	0,26	0,01	0,08	0,03	0,02	0,03
13	B1-W1	0,78	1,07	0,48	0,71	0,66	0,05	0,28	0,02	0,11	0,09
14	B1-W1	0,84	1,20	0,59	0,91	0,88	0,04	0,37	0,05	0,46	0,12
15	B1-W1	0,86	1,37	0,69	1,01	1,04	0,04	0,41	0,01	0,26	0,11
16	B1-W3	0,87	0,85	0,73	1,09	0,99	0,04	0,04	0,02	0,08	0,09
17	B1-W3	0,85	0,84	0,80	1,18	1,25	0,05	0,19	0,04	0,08	0,11
18	B1-W3	0,88	0,88	0,81	1,28	1,34	0,02	0,11	0,04	0,12	0,20
19	B3-W3	0,73	1,24	0,65	0,77	0,64	0,03	0,12	0,02	0,05	0,03
20	B3-W3	0,76	1,26	0,69	0,85	0,71	0,02	0,09	0,01	0,05	0,04
21	B3-W3	0,81	1,31	0,72	1,00	0,83	0,03	0,15	0,02	0,03	0,04
22	B3-W1	0,77	-0,17	0,50	0,20	0,26	0,04	0,42	0,02	0,13	0,11
23	B3-W1	0,82	-1,23	0,58	0,22	0,15	0,02	0,33	0,02	0,07	0,08
24	B3-W1	0,84	-0,77	0,62	0,25	0,26	0,02	0,14	0,03	0,05	0,04

[‡] Mittelwert aus den jeweiligen vier Maßen des Formteils

[§] Mittelwert aus den jeweiligen zwei Maßen des Formteils

Tabelle A10: Verarbeitungsschwindungen VS für *Hostacom BR 735 G*

Vers.Nr.	Wanddicken- kombination	Schwindung in %					Standardabw. in %				
		L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]	L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]
25	B1-W1	0,97	3,81	0,79	0,83	1,05	0,05	0,29	0,01	0,06	0,07
26	B1-W1	1,00	3,85	0,89	1,02	1,38	0,07	0,40	0,02	0,05	0,09
27	B1-W1	1,16	1,50	1,04	1,18	1,71	0,08	0,02	0,02	0,06	0,12
28	B1-W3	1,04	1,90	1,10	2,18	1,96	0,04	0,12	0,02	0,21	0,09
29	B1-W3	1,06	1,82	1,22	2,33	2,14	0,01	0,21	0,04	0,03	0,04
30	B1-W3	1,08	1,84	1,32	2,69	2,30	0,05	0,31	0,02	0,20	0,10
31	B3-W3	0,88	1,83	0,99	0,92	1,05	0,06	0,11	0,04	0,13	0,06
32	B3-W3	1,04	1,88	1,11	1,06	1,20	0,03	0,24	0,03	0,06	0,07
33	B3-W3	1,06	1,93	1,13	1,24	1,40	0,02	0,38	0,03	0,05	0,08
34	B3-W1	0,90	-0,97	0,73	0,02	0,02	0,04	0,63	0,04	0,17	0,18
35	B3-W1	0,93	-0,66	0,79	0,05	0,12	0,08	0,53	0,04	0,06	0,13
36	B3-W1	1,07	-0,15	0,87	0,18	0,34	0,03	0,19	0,02	0,07	0,06
37	B1-W1	0,92	3,37	0,79	0,71	1,10	0,07	0,58	0,01	0,10	0,11
38	B1-W1	0,97	3,22	0,87	0,92	1,37	0,08	0,99	0,02	0,07	0,14
39	B1-W1	1,02	3,49	0,91	0,97	1,49	0,07	0,82	0,02	0,15	0,10
40	B1-W3	1,02	1,49	1,17	2,04	1,83	0,06	0,28	0,05	0,08	0,07
41	B1-W3	1,02	1,32	1,22	2,15	1,97	0,07	0,11	0,02	0,02	0,06
42	B1-W3	1,05	1,41	1,31	2,42	2,23	0,06	0,14	0,04	0,12	0,04
43	B3-W3	0,89	1,82	1,02	1,06	1,15	0,02	0,11	0,03	0,13	0,06
44	B3-W3	0,95	2,13	1,08	1,16	1,38	0,04	0,05	0,02	0,16	0,06
45	B3-W3	1,01	2,18	1,16	1,24	1,38	0,02	0,05	0,03	0,05	0,05
46	B3-W1	0,85	-0,37	0,79	0,14	0,02	0,15	0,50	0,03	0,04	0,16
47	B3-W1	1,01	-0,20	0,84	0,13	0,18	0,03	0,53	0,03	0,04	0,07
48	B3-W1	0,99	-0,10	0,86	0,78	0,81	0,08	0,06	0,03	0,12	0,14

Tabelle A11: Gesamtschwindung GS für *Hostacom BR 735 G*

Vers.Nr.	Wanddicken- kombination	Schwindung in %					Standardabw. in %				
		L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]	L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]
25	B1-W1	1,30	5,17	1,14	0,91	1,22	0,09	0,18	0,01	0,05	0,01
26	B1-W1	1,48	5,90	1,26	1,28	1,71	0,11	0,15	0,01	0,11	0,11
27	B1-W1	1,62	6,70	1,42	1,22	1,85	0,14	1,08	0,05	0,10	0,16
28	B1-W3	1,32	2,53	1,45	2,25	1,99	0,04	0,17	0,04	0,22	0,10
29	B1-W3	1,36	2,42	1,61	2,42	2,28	0,01	0,18	0,05	0,04	0,07
30	B1-W3	1,34	2,46	1,69	2,80	2,45	0,02	0,20	0,03	0,24	0,09
31	B3-W3	1,22	2,16	1,29	1,12	1,21	0,06	0,25	0,04	0,12	0,09
32	B3-W3	1,37	2,27	1,33	1,23	1,40	0,04	0,24	0,02	0,09	0,04
33	B3-W3	1,41	2,35	1,40	1,41	1,52	0,04	0,34	0,02	0,06	0,07
34	B3-W1	1,50	-3,70	1,15	0,05	0,21	0,03	0,69	0,10	0,05	0,12
35	B3-W1	1,53	-3,70	1,13	0,13	0,29	0,15	0,73	0,02	0,04	0,15
36	B3-W1	1,55	-1,87	1,19	0,30	0,39	0,03	0,55	0,05	0,04	0,02
37	B1-W1	1,29	4,82	1,13	0,94	1,42	0,11	0,24	0,02	0,03	0,08
38	B1-W1	1,34	4,55	1,23	1,08	1,59	0,10	1,08	0,02	0,16	0,12
39	B1-W1	1,46	5,26	1,29	1,24	1,81	0,15	1,18	0,03	0,06	0,13
40	B1-W3	1,33	2,13	1,48	2,10	1,89	0,08	0,36	0,03	0,05	0,09
41	B1-W3	1,34	1,94	1,58	2,29	2,12	0,05	0,14	0,03	0,02	0,13
42	B1-W3	1,39	1,92	1,68	2,51	2,32	0,04	0,18	0,03	0,11	0,04
43	B3-W3	1,19	2,22	1,29	1,12	1,23	0,02	0,21	0,03	0,06	0,07
44	B3-W3	1,28	2,58	1,36	1,26	1,37	0,04	0,13	0,02	0,16	0,05
45	B3-W3	1,32	2,69	1,38	1,34	1,50	0,03	0,10	0,03	0,07	0,04
46	B3-W1	1,38	-2,33	1,07	0,28	0,28	0,06	0,68	0,04	0,05	0,17
47	B3-W1	1,45	-2,25	1,15	0,26	0,45	0,06	0,23	0,04	0,09	0,11
48	B3-W1	1,42	-1,31	1,18	0,90	1,05	0,07	0,30	0,01	0,11	0,10

Ergebnisse der Schwindungsberechnungen in MPI™

Tabelle A12: Schwindungswerte Midplane für *ABS Urtal M122*

Vers.Nr.	Wanddicken- kombination	Schwindung in %					Standardabw. in %				
		L1 [†]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [†]	H2 [‡]	L1 [†]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [†]	H2 [‡]
1	B1-W1	0,99	1,32	0,57	0,81	0,76	0,09	0,07	0,05	0,09	0,06
2	B1-W1	1,00	1,45	0,67	0,83	0,81	0,12	0,09	0,08	0,12	0,10
3	B1-W1	1,01	1,54	0,75	0,85	0,84	0,13	0,08	0,08	0,14	0,10
4	B1-W3	1,66	2,58	0,89	1,68	1,46	0,04	0,14	0,07	0,01	0,05
5	B1-W3	1,87	2,91	1,03	1,88	1,65	0,11	0,00	0,06	0,08	0,03
6	B1-W3	1,87	2,93	1,12	1,88	1,68	0,08	0,26	0,11	0,03	0,08
7	B3-W3	0,92	1,40	0,62	0,88	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	B3-W3	1,06	1,67	0,72	1,00	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	B3-W3	1,45	2,25	0,83	1,30	1,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	B3-W1	1,27	1,57	0,45	0,79	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	B3-W1	1,34	1,78	0,56	0,87	0,88	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
12	B3-W1	1,28	1,87	0,68	0,88	0,90	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
13	B1-W1	1,18	1,94	0,72	0,97	0,91	0,01	0,03	0,01	0,00	0,01
14	B1-W1	1,25	2,14	0,85	1,04	1,01	0,01	0,03	0,01	0,00	0,01
15	B1-W1	1,26	2,27	0,96	1,06	1,07	0,01	0,04	0,01	0,00	0,01
16	B1-W3	1,73	3,01	0,93	1,73	1,54	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01
17	B1-W3	1,87	3,27	1,07	1,87	1,68	0,02	0,05	0,02	0,02	0,01
18	B1-W3	1,92	3,42	1,16	1,95	1,75	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01
19	B3-W3	0,90	1,63	0,62	0,86	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	B3-W3	1,04	1,89	0,67	0,96	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	B3-W3	1,89	2,95	0,93	1,68	1,36	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
22	B3-W1	1,28	1,80	0,47	0,79	0,80	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
23	B3-W1	1,36	1,97	0,54	0,86	0,88	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
24	B3-W1	1,43	2,15	0,62	0,93	0,95	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00

Tabelle A13: Schwindungswerte Midplane für *Hostacom BR 735 G*

Vers.Nr.	Wanddicken- kombination	Schwindung in %					Standardabw. in %				
		L1 [†]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [†]	H2 [‡]	L1 [†]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [†]	H2 [‡]
25	B1-W1	0,86	1,39	0,42	0,52	0,40	0,00	0,09	0,00	0,01	0,00
26	B1-W1	1,01	1,89	0,53	0,65	0,52	0,00	0,11	0,01	0,02	0,01
27	B1-W1	1,40	2,73	0,72	1,01	0,83	0,01	0,24	0,00	0,02	0,02
28	B1-W3	1,24	2,74	0,73	1,37	1,51	0,02	0,10	0,01	0,02	0,02
29	B1-W3	1,25	2,93	0,74	1,32	1,51	0,02	0,17	0,01	0,03	0,02
30	B1-W3	1,37	3,48	0,95	1,35	1,12	0,01	0,62	0,01	0,01	0,03
31	B3-W3	0,84	1,39	0,52	0,62	0,49	0,02	0,09	0,00	0,00	0,01
32	B3-W3	0,95	1,64	0,57	0,72	0,54	0,02	0,09	0,00	0,00	0,01
33	B3-W3	1,06	1,89	0,63	0,81	0,61	0,03	0,11	0,01	0,01	0,01
34	B3-W1	1,38	1,61	0,41	0,55	0,55	0,00	0,16	0,00	0,02	0,01
35	B3-W1	1,53	1,86	0,45	0,61	0,61	0,00	0,21	0,00	0,02	0,02
36	B3-W1	1,72	2,23	0,50	0,75	0,72	0,00	0,28	0,00	0,02	0,01
37	B1-W1	0,86	1,73	0,48	0,66	0,49	0,00	0,16	0,00	0,01	0,01
38	B1-W1	1,05	2,15	0,57	0,77	0,58	0,00	0,18	0,00	0,01	0,01
39	B1-W1	1,27	2,67	0,71	0,89	0,78	0,01	0,25	0,00	0,00	0,02
40	B1-W3	1,15	3,06	0,71	1,19	1,38	0,01	0,36	0,01	0,02	0,01
41	B1-W3	1,18	3,16	0,77	1,21	1,39	0,01	0,40	0,02	0,04	0,01
42	B1-W3	1,27	3,83	0,90	1,25	1,02	0,01	1,07	0,02	0,07	0,04
43	B3-W3	0,79	1,46	0,53	0,58	0,45	0,02	0,08	0,00	0,00	0,01
44	B3-W3	0,87	1,67	0,56	0,68	0,51	0,03	0,08	0,00	0,01	0,01
45	B3-W3	0,95	1,85	0,59	0,75	0,56	0,04	0,07	0,00	0,02	0,01
46	B3-W1	1,29	1,64	0,39	0,49	0,51	0,00	0,14	0,00	0,01	0,01
47	B3-W1	1,40	1,79	0,43	0,59	0,61	0,00	0,21	0,00	0,00	0,01
48	B3-W1	1,55	2,11	0,46	0,71	0,71	0,01	0,26	0,00	0,00	0,01

Tabelle A14: Schwindungswerte Fusion für *ABS Urtal M122*

Vers.Nr.	Wanddicken- kombination	Schwindung in %					Standardabw. in %				
		L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]	L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]
1	B1-W1	1,07	1,12	0,60	0,94	0,84	0,07	0,19	0,06	0,02	0,06
2	B1-W1	1,03	1,18	0,68	0,91	0,87	0,13	0,24	0,10	0,11	0,11
3	B1-W1	1,04	1,27	0,76	0,93	0,90	0,15	0,23	0,10	0,12	0,11
4	B1-W3	1,58	2,06	0,90	1,66	1,46	0,05	0,13	0,05	0,02	0,05
5	B1-W3	1,78	2,30	1,06	1,83	1,64	0,08	0,21	0,09	0,02	0,07
6	B1-W3	1,92	2,47	1,18	1,95	1,77	0,10	0,31	0,12	0,01	0,08
7	B3-W3	0,75	1,01	0,56	0,80	0,71	0,13	0,00	0,00	0,17	0,07
8	B3-W3	0,85	1,18	0,65	0,91	0,80	0,16	0,01	0,00	0,18	0,09
9	B3-W3	1,11	1,58	0,75	1,20	0,99	0,27	0,00	0,00	0,16	0,11
10	B3-W1	1,20	1,35	0,40	0,75	0,75	0,00	0,04	0,01	0,00	0,02
11	B3-W1	1,28	1,57	0,52	0,83	0,83	0,00	0,04	0,02	0,00	0,01
12	B3-W1	1,34	1,75	0,64	0,90	0,89	0,00	0,06	0,03	0,00	0,02
13	B1-W1	1,15	1,43	0,71	0,97	0,90	0,02	0,02	0,02	0,00	0,01
14	B1-W1	1,22	1,59	0,84	1,03	1,00	0,02	0,00	0,02	0,01	0,02
15	B1-W1	1,23	1,72	0,94	1,04	1,05	0,02	0,01	0,03	0,01	0,03
16	B1-W3	1,65	2,28	0,94	1,71	1,53	0,01	0,04	0,02	0,01	0,03
17	B1-W3	1,83	2,52	1,10	1,87	1,70	0,03	0,07	0,03	0,01	0,03
18	B1-W3	1,90	2,62	1,20	1,94	1,78	0,03	0,09	0,04	0,02	0,04
19	B3-W3	0,73	1,07	0,56	0,78	0,68	0,13	0,01	0,00	0,15	0,08
20	B3-W3	0,82	1,23	0,60	0,89	0,75	0,16	0,01	0,00	0,15	0,09
21	B3-W3	1,13	1,71	0,70	1,24	0,97	0,28	0,00	0,00	0,11	0,11
22	B3-W1	1,22	1,52	0,44	0,76	0,76	0,00	0,04	0,02	0,00	0,02
23	B3-W1	1,28	1,68	0,51	0,83	0,82	0,00	0,06	0,02	0,00	0,00
24	B3-W1	1,37	1,84	0,59	0,90	0,89	0,00	0,07	0,03	0,01	0,01

Tabelle A15: Schwindungswerte Fusion für *Hostacom BR 735 G*

Vers.Nr.	Wanddicken- kombination	Schwindung in %					Standardabw. in %				
		L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]	L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]
25	B1-W1	0,95	1,18	0,44	0,64	0,52	0,02	0,11	0,00	0,01	0,07
26	B1-W1	1,09	1,48	0,56	0,78	0,63	0,01	0,06	0,00	0,01	0,07
27	B1-W1	1,39	2,01	0,70	1,03	0,85	0,01	0,06	0,01	0,01	0,06
28	B1-W3	1,36	2,18	0,75	1,31	1,38	0,04	0,37	0,00	0,02	0,02
29	B1-W3	1,25	2,15	0,88	1,26	1,44	0,00	0,03	0,02	0,02	0,04
30	B1-W3	1,35	2,33	0,98	1,29	1,13	0,01	0,02	0,08	0,01	0,01
31	B3-W3	0,63	0,90	0,45	0,58	0,43	0,10	0,03	0,00	0,01	0,00
32	B3-W3	0,68	1,03	0,49	0,66	0,47	0,13	0,05	0,01	0,01	0,01
33	B3-W3	0,75	1,20	0,54	0,75	0,52	0,16	0,07	0,00	0,04	0,02
34	B3-W1	1,28	1,31	0,36	0,54	0,54	0,00	0,07	0,01	0,01	0,06
35	B3-W1	1,48	1,48	0,40	0,57	0,62	0,00	0,08	0,01	0,01	0,06
36	B3-W1	1,66	1,73	0,44	0,71	0,72	0,00	0,12	0,01	0,02	0,06
37	B1-W1	0,82	1,23	0,48	0,66	0,52	0,01	0,11	0,01	0,00	0,06
38	B1-W1	1,03	1,59	0,56	0,78	0,61	0,00	0,09	0,01	0,01	0,06
39	B1-W1	1,26	2,02	0,71	0,93	0,82	0,01	0,06	0,01	0,01	0,07
40	B1-W3	1,22	2,12	0,74	1,11	1,33	0,03	0,27	0,02	0,01	0,01
41	B1-W3	1,17	2,22	0,78	1,12	1,40	0,02	0,15	0,01	0,03	0,02
42	B1-W3	1,26	2,35	0,93	1,15	1,04	0,02	0,06	0,09	0,03	0,01
43	B3-W3	0,59	0,90	0,46	0,55	0,40	0,10	0,04	0,00	0,01	0,00
44	B3-W3	0,64	1,01	0,49	0,61	0,44	0,12	0,06	0,01	0,01	0,01
45	B3-W3	0,68	1,13	0,52	0,68	0,47	0,14	0,07	0,00	0,03	0,02
46	B3-W1	1,20	1,30	0,35	0,50	0,51	0,00	0,08	0,01	0,01	0,05
47	B3-W1	1,35	1,43	0,39	0,56	0,62	0,00	0,09	0,01	0,01	0,05
48	B3-W1	1,49	1,62	0,41	0,67	0,71	0,01	0,13	0,01	0,01	0,06

Tabelle A16: Schwindungswerte 3D für *ABS Urtal M122*

Vers.Nr.	Wanddicken- kombination	Schwindung in %					Standardabw. in %				
		L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]	L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]
1	B1-W1	0,32	0,02	0,23	0,22	0,25	0,03	0,02	0,02	0,04	0,05
2	B1-W1	0,36	0,07	0,28	0,25	0,29	0,03	0,01	0,02	0,04	0,04
3	B1-W1	0,40	0,11	0,45	0,31	0,36	0,10	0,10	0,02	0,04	0,08
4	B1-W3	0,91	1,04	0,56	0,97	0,84	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01
5	B1-W3	0,94	1,08	0,62	1,01	0,88	0,03	0,00	0,02	0,03	0,02
6	B1-W3	0,93	1,07	0,66	1,00	0,88	0,02	0,00	0,03	0,02	0,02
7	B3-W3	0,43	0,56	0,44	0,50	0,45	0,01	0,07	0,01	0,02	0,03
8	B3-W3	0,51	0,67	0,49	0,56	0,50	0,01	0,09	0,01	0,03	0,01
9	B3-W3	0,89	1,03	0,64	0,86	0,71	0,02	0,13	0,02	0,04	0,10
10	B3-W1	0,71	1,89	0,31	0,45	0,39	0,04	0,80	0,00	0,01	0,05
11	B3-W1	0,86	2,02	0,37	0,48	0,48	0,03	1,35	0,02	0,05	0,10
12	B3-W1	0,61	1,78	0,50	0,45	0,41	0,07	0,71	0,03	0,03	0,05
13	B1-W1	0,32	0,06	0,43	0,27	0,32	0,15	0,06	0,04	0,12	0,10
14	B1-W1	0,36	0,13	0,49	0,29	0,35	0,16	0,09	0,04	0,11	0,11
15	B1-W1	0,49	0,27	0,57	0,40	0,45	0,09	0,07	0,02	0,07	0,06
16	B1-W3	0,97	1,13	0,62	1,02	0,90	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02
17	B1-W3	0,98	1,15	0,66	1,03	0,92	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
18	B1-W3	0,98	1,15	0,70	1,04	0,92	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
19	B3-W3	0,49	0,66	0,48	0,55	0,49	0,01	0,09	0,01	0,02	0,01
20	B3-W3	0,66	0,83	0,52	0,70	0,56	0,02	0,11	0,01	0,03	0,04
21	B3-W3	1,11	1,25	0,81	1,07	0,88	0,02	0,16	0,02	0,04	0,19
22	B3-W1	0,73	1,83	0,34	0,49	0,43	0,02	0,74	0,00	0,01	0,05
23	B3-W1	0,76	1,89	0,39	0,54	0,48	0,02	0,77	0,01	0,01	0,05
24	B3-W1	0,75	1,91	0,70	0,57	0,56	0,03	0,78	0,01	0,02	0,06

Tabelle A17: Schwindungswerte 3D für *Hostacom BR 735 G*

Vers.Nr.	Wanddicken- kombination	Schwindung in %					Standardabw. in %				
		L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]	L1 [‡]	L2 [§]	L3 [‡]	H1 [‡]	H2 [‡]
25	B1-W1	0,68	0,39	0,49	0,51	0,52	0,14	0,13	0,03	0,03	0,07
26	B1-W1	0,70	0,40	0,61	0,55	0,57	0,12	0,07	0,04	0,04	0,04
27	B1-W1	0,70	0,46	0,77	0,55	0,62	0,15	0,14	0,05	0,06	0,07
28	B1-W3	1,26	1,58	0,65	1,35	1,13	0,02	0,09	0,02	0,01	0,01
29	B1-W3	1,39	1,68	0,78	1,43	1,23	0,01	0,07	0,02	0,01	0,02
30	B1-W3	1,52	1,82	0,94	1,59	1,34	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
31	B3-W3	0,54	0,85	0,57	0,64	0,54	0,02	0,13	0,02	0,04	0,02
32	B3-W3	0,59	0,91	0,61	0,69	0,57	0,02	0,15	0,02	0,05	0,03
33	B3-W3	0,64	0,99	0,65	0,75	0,60	0,03	0,18	0,02	0,06	0,05
34	B3-W1	0,88	2,27	0,49	0,54	0,50	0,01	1,98	0,00	0,01	0,12
35	B3-W1	1,06	1,81	0,52	0,63	0,63	0,01	1,35	0,01	0,01	0,09
36	B3-W1	1,24	1,77	0,56	0,84	0,80	0,01	1,13	0,00	0,02	0,08
37	B1-W1	0,51	0,28	0,53	0,37	0,43	0,17	0,12	0,05	0,06	0,07
38	B1-W1	0,66	0,43	0,67	0,48	0,54	0,18	0,12	0,05	0,07	0,07
39	B1-W1	1,00	0,69	0,76	0,74	0,75	0,02	0,07	0,02	0,01	0,04
40	B1-W3	1,36	1,69	0,73	1,42	1,20	0,02	0,09	0,02	0,01	0,03
41	B1-W3	1,45	1,77	0,82	1,48	1,28	0,01	0,06	0,03	0,01	0,02
42	B1-W3	1,59	1,91	0,98	1,64	1,38	0,01	0,06	0,03	0,03	0,04
43	B3-W3	0,54	0,89	0,59	0,65	0,54	0,02	0,13	0,01	0,04	0,02
44	B3-W3	0,58	0,94	0,61	0,69	0,56	0,02	0,15	0,02	0,05	0,03
45	B3-W3	0,62	1,01	0,64	0,74	0,59	0,03	0,17	0,02	0,06	0,04
46	B3-W1	0,93	1,97	0,49	0,56	0,54	0,01	1,56	0,01	0,01	0,10
47	B3-W1	1,12	1,84	0,52	0,68	0,67	0,01	1,26	0,00	0,01	0,09
48	B3-W1	1,15	2,01	0,48	0,64	0,67	0,08	2,10	0,05	0,09	0,18

Tabelle A18: Ergebnisse: Boden weggefräst, Schwindung, B3W3

Formteilnummer	Bearbeitungsschritt	Maß	UG/G**	Schwindung in %	Standardabw. in %
33.3	Ganz	L1	UG	1,25	0,15
	Boden weg	L1	UG	1,20	0,05
33.5	Ganz	L1	UG	1,30	0,05
	Ganz	L1	UG	1,52	0,03
	Boden weg	L1	G	1,51	0,02

Tabelle A19: Ergebnisse: Ecken weggefräst, relative Winkeländerung, B3W3

Formteilnummer	Bearbeitungsschritt	UG/G**	Relative Winkeländerung in %	Standardabw. in %
32.1	Ganz	UG	2,23	0,20
	Ecken weg	UG	2,47	0,09
32.2	Ganz	UG	2,42	0,06
	Ganz	G	2,04	0,23
	Ecken weg	G	1,75	0,18

Tabelle A20: Ergebnisse: Durchgeschnitten, Schwindung, B3W3

Formteilnummer	Bearbeitungsschritt	Maß	UG/G**	Schwindung in %	Standardabw. in %
33.1	Ganz	L1	UG	1,21	0,03
	durchgeschnitten	L1	UG	1,18	0,02
	Ganz	L3	UG	1,31	0,01
	durchgeschnitten	L3	UG	1,27	0,01
33.4	Ganz	L1	UG	1,27	0,02
	Ganz	L1	G	1,50	0,02
	durchgeschnitten	L1	G	1,40	0,04
	Ganz	L3	UG	1,36	0,02
	Ganz	L3	G	1,50	0,03
	durchgeschnitten	L3	G	1,49	0,03

Tabelle A21: Ergebnisse: Durchgeschnitten, relative Winkeländerung, B3W3

Formteilnummer	Bearbeitungsschritt	UG/G**	Relative Winkeländerung in %	Standardabw. in %
33.1	Ganz	UG	2,59	0,02
	durchgeschnitten	UG	2,52	0,06
33.4	Ganz	UG	2,61	0,03
	Ganz	G	2,35	0,01
	durchgeschnitten	G	2,30	0,00

Tabelle A22: Ergebnisse: Durchgeschnitten, Schwindung, B3W1

Formteilnummer	Bearbeitungsschritt	Maß	UG/G**	Schwindung in %	Standardabw. in %
36.2	Ganz	L1	UG	1,34	0,05
	durchgeschnitten	L1	UG	1,51	0,02
	Ganz	L3	UG	1,03	0,01
	durchgeschnitten	L3	UG	1,23	0,02
36.4	Ganz	L1	UG	1,31	0,00
	Ganz	L1	G	1,57	0,04
	durchgeschnitten	L1	G	1,19	0,00
	Ganz	L3	UG	1,04	0,06
	Ganz	L3	G	1,21	0,02
	durchgeschnitten	L3	G	1,01	0,05

Tabelle A23: Ergebnisse: Durchgeschnitten, relative Winkeländerung, B3W1

Formteilnummer	Bearbeitungsschritt	UG/G**	relative Winkeländerung in %	Standardabw. in %
36.2	Ganz	UG	-0,68	0,03
	durchgeschnitten	UG	-1,14	0,56
36.4	Ganz	UG	0,08	0,18
	Ganz	G	-1,00	0,68
	durchgeschnitten	G	-0,04	0,20

** UG bedeutet *ungetempert*, G bedeutet *getempert*