

Schlussbericht vom 01.01.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 22195 N

Thema

Steigerung der Materialeffizienz im Thermoformen durch den Einsatz von Schaumfolie-
Prozessanalyse und Untersuchung der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der
Dichtereduktion

Berichtszeitraum

01.01.2022 bis 31.12.2023

Forschungsvereinigung

Kunststoffverarbeitung

Forschungseinrichtung(en)

Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen - IKV

Gefördert durch:

KURZZUSAMMENFASSUNG

Eine Möglichkeit der Materialeinsparung im Thermoformen ist der Einsatz von geschäumten Halbzeugen. Der Einsatz von Schwerschaumfolien, die nur leicht geschäumt werden und vergleichsweise hohe mechanische Eigenschaften aufweisen können, ist bisher kaum untersucht. Herausforderungen stellen die Herstellung des Schwerschaums und die anschließende Verarbeitung im Tiefziehprozess dar, da sich z.B. das Aufheizverhalten und die möglichen Verstreckungsgrade der Folien deutlich verändern. In diesem Forschungsvorhaben wurden daher verschiedene Schaumfolien aus Polystyrol und Polypropylen mit unterschiedlichen Schichtsystemen und Dichtereduktionen hergestellt. Anschließend wurden die Folien unter verschiedenen Prozessbedingungen und mit unterschiedlichen Stempelgeometrien thermogeformt. An den hergestellten Becherformteilen erfolgte eine Messung der Wanddickenverteilung, der Topload-Stabilität sowie der Sauerstoffbarriere.

Bei den hergestellten Schaumfolien zeigten sich innerhalb der beiden Materialklassen große Unterschiede hinsichtlich der Oberflächen-, Mechanik- und Schäumeigenschaften. Die Eigenschaften können durch Variation des Schichtaufbaus und des Aufschäumgrades bzw. der Dichteinsparung eingestellt werden, um eine Modifikation der Halbzeuge für die Weiterverarbeitung im Thermoformprozess zu ermöglichen. Bei der Weiterverarbeitung im Thermoformprozess zeigt sich in der Regel mit zunehmender Gewichtsreduktion eine Veränderung der Wanddickenverteilung. Durch Variation der Stempelgeometrie konnte die Wanddickenverteilung mit dem Ziel einer homogenen Wanddickenverteilung an den Aufschäumgrad angepasst werden. Nachfolgende Topload- und Sauerstoffbarrieremessungen zeigen erwartungsgemäß eine absolute Abnahme der gemessenen Eigenschaften, zeigen jedoch gewichtsspezifisch das Potenzial geschäumter Kunststoffhalbzeuge für die Weiterverarbeitung im Thermoformen.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

VORWORT UND DANK

Die nachfolgend beschriebenen und erläuterten Untersuchungen wurden im Rahmen des IGF-Vorhabens 22195 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Der vorliegende Bericht ist der Schlussbericht des Forschungsvorhabens.

Ein wesentlicher Teil der Ergebnisse wurden von Marius Stieglitz, M. Sc. und Daniel Grüber, M. Sc. erarbeitet und teilweise von Studierenden der RWTH Aachen in Form von studentischen Arbeiten niedergelegt. Diese Arbeiten sind nicht zur Veröffentlichung vorgesehen, können aber in der Bibliothek des Instituts für Kunststoffverarbeitung eingesehen werden. Eine Gesamtdarstellung des Themenkreises, zu dem dieses Forschungsvorhaben gehört, wird in einem technisch-wissenschaftlichen Bericht des Instituts für Kunststoffverarbeitung nach Abschluss der Arbeiten erfolgen.

Dem Deutschen Bundestag, dem BMWK und der AiF-Mitgliedsvereinigung „Kunststoffverarbeitung“ gilt unser Dank. Darüber hinaus gilt unser Dank allen Firmen, die durch Bereitstellung von Kunststoffen, Maschinen und sonstigen Sach- und Dienstleistungen diese Arbeit unterstützt haben.

Danken möchten wir auch den Mitarbeitern der Fachbeiratsgruppe „Extrusion“, die durch Rat und Tat die Untersuchungen unterstützt haben.

1	ZUSAMMENFASSUNG	3
2	EINLEITUNG	5
3	STAND DER TECHNIK	6
3.1	Eigenschaften geschäumter Kunststoffe.....	6
3.2	Schaumbildungsprozess	6
3.3	Einsatz von Schäumen im Thermoformen	8
4	ZIEL UND VORGEHEN DES FORSCHUNGSVORHABEN	9
5	VERSUCHSUMGEBUNG UND ANALYSEMETHODEN	11
6	UNTERSUCHUNG DER WIRKZUSAMMENHÄNGE BEI DER HERSTELLUNG VON MONOLAYER-SCHAUMFOLIEN	18
7	HERSTELLUNG DER SCHAUMFOLIEN UND UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DES SCHICHTAUFBAUS UND DICHTEREDUKTION AUF DIE SCHAUMSTRUKTUR, OBERFLÄCHENGÜTE SOWIE DIE MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN	23
8	HERSTELLUNG VON FORMTEILEN AUS GESCHÄUMTEN HALBZEUGEN IM THERMOFORMVERFAHREN	32
8.1	Untersuchungen zum Einfluss des Umformvorgangs und des Schichtaufbaus auf die Formteileigenschaften	32
8.1.1	Einfluss auf die Wanddickenverteilung	32
8.1.2	Einfluss auf das Topload-Verhalten	44
8.1.3	Einfluss auf die Sauerstoff-Barriere Eigenschaften.....	55
9	FAZIT UND AUSBLICK	59
10	ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT	61
10.1	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	61
10.2	Durchgeführte Transfermaßnahmen des Vorhabens.....	61
10.3	Geplante Maßnahmen nach Abschluss des Forschungsvorhabens	64
10.4	Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzeptes	64
11	WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER UND WIRTSCHAFTLICHER NUTZEN DER ERZIELTEN ERGEBNISSE FÜR KMU	66
11.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen	66
11.2	Wirtschaftlicher Nutzen	66
12	ERGÄNZENDE HINWEISE ZUM FORSCHUNGSVORHABEN	68
12.1	Einsatz von Geräten und wissenschaftlich-technischem Personal	68
12.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	69

13	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES	71
13.1	Abkürzungen	71
13.2	Formelzeichen und Indizes	71
14	LITERATUR	72
15	ANHANG	75
15.1	Liste der Veröffentlichungen	75
15.2	Wanddickenverteilungen PS	75
15.3	Wanddickenverteilungen PP	79

1 ZUSAMMENFASSUNG

Deskriptoren: Folien, Schaumstruktur, Verstrecken, Werkstoffprüfung

Schlagnworte: Thermoformen, Schaumfolie, Extrusion, Halbzeuge

Beim Thermoformen von Verpackungsanwendungen werden bis zu 70 % der Gesamtkosten durch das Material bestimmt [Mos13,TB99], wodurch die Steigerung der Materialeffizienz ein großes wirtschaftliches Potenzial bietet. Die Materialersparnis wirkt sich des Weiteren positiv auf die Umwelt aus. Eine Möglichkeit zur Materialeinsparung besteht im Einsatz von geschäumten Halbzeugen. Leichtschaumfolien werden bereits bei Food-Trays eingesetzt. Allerdings sind bei diesen Folien die mechanischen Eigenschaften stark herabgesetzt, sodass nur wenige Anwendungen in Frage kommen. Der Einsatz von Schwerschaumfolien, die nur leicht geschäumt sind und höhere mechanische Eigenschaften aufweisen, ist bislang kaum verbreitet und untersucht. Dabei führt bei Massenartikeln wie Joghurtbechern bereits eine geringe Dichtereduktion zu großen Einsparpotenzialen. Herausforderung sind die Schwerschaumherstellung und deren anschließende Verarbeitung im Thermoformen, da sich bspw. das Aufheilverhalten und die möglichen Verstreckgrade der Folien signifikant ändern. Daher wurden in diesem Forschungsprojekt verschiedene Schaumfolien aus Polystyrol und Polypropylen mit unterschiedlichen Schichtsystemen und Dichtereduktionen hergestellt. Die Folien wurden anschließend unter verschiedenen Prozessbedingungen sowie mit verschiedenen Stempelgeometrien thermogeformt. Nachfolgend erfolgte eine Messung der Wanddickenverteilung, Topload-Stabilität sowie der Sauerstoffbarriereigenschaften der hergestellten Becherformteile.

Hinsichtlich der hergestellten Schaumfolien ergaben sich große Unterschiede in Bezug auf die Oberflächen-, Mechanik- und Schaum-Eigenschaften innerhalb der beiden Materialklassen. Die Eigenschaften können durch Variation des Schichtaufbaus und des Schäumgrads bzw. der Dichteinsparung eingestellt werden, um eine Modifikation der Halbzeuge für die Weiterverarbeitung im Thermoformen zu ermöglichen. Bei der Weiterverarbeitung im Thermoformverfahren zeigte sich im Allgemeinen mit zunehmender Gewichtsreduktion eine veränderte Wanddickenverteilung. So nimmt bei sinkender Dichte die Becherwanddicke im Wandbereich zu und am Boden ab. Durch eine Variation der Stempelgeometrie konnte die Wanddickenverteilung mit dem Ziel einer homogenen Wanddicke an den Schaumgrad angepasst werden. An-

schließende Topload- und Sauerstoffbarrieremessungen zeigen erwartungsgemäß eine absolute Abnahme der gemessenen Eigenschaften, zeigen jedoch gewichtsspezifisch das Potenzial geschäumter Kunststoffhalbzeuge zur Weiterverarbeitung im Thermoformen auf.

2 EINLEITUNG

Mit ca. 40 % der weltweiten Kunststoffgesamtproduktion von 400 Mio. Tonnen hat der Verpackungsbereich einen großen Anteil, wobei der Folienbereich und die Weiterverarbeitung von Folien zu Verpackungsprodukten dominieren [NN12a, URL24a]. Ein Großteil der produzierten Folien wird für die Weiterverarbeitung im Tiefziehverfahren verwendet, welches eines der wichtigsten Verfahren zur Herstellung von Verpackungsprodukten ist. Insbesondere vor dem Hintergrund der neuen Verpackungsverordnung rücken die Aspekte Nachhaltigkeit und Recycling immer mehr in den Fokus der Verpackungsmittelhersteller [Leo17, URL24c]. Neben den gesetzlichen Anforderungen ist es für die Unternehmen von großer Relevanz, die Produktionskosten stetig zu senken und die Produktentwicklungszeiten zu verkürzen, um schnell auf neue Kundenwünsche und Kundenanforderungen reagieren zu können. Der Einsatz von Schaumfolien bietet beim Thermoformen weiteres Materialeffizienzpotenzial.

Je nach Produkt werden beim Thermoformen zwischen 70 und 90 % der Produktkosten durch die Materialkosten bestimmt [Mos13, TB99], so dass hier ein besonders großes Potenzial zur Verbesserung des Verfahrens und zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit des gesamten Thermoformprozesses besteht. Eine materialeffiziente Produktion ist daher unabdingbar [Mos13, TB99].

Um die Materialeffizienz von Thermoformprodukten weiter zu steigern, können geschäumte Folien eingesetzt werden. Durch den Einsatz verschiedener Schäumverfahren kann bei gleicher Foliendicke die Dichte des Folienhalbzeugs reduziert und somit Material eingespart werden. Bisher werden jedoch nur Leichtschäumfolien für Food-Trays eingesetzt. Problematisch ist die starke Abnahme der mechanischen Eigenschaften bei zunehmendem Schäumgrad. Daher können solche Schäume nicht universal eingesetzt werden [AM83, TB99, Wir04]. Eine mögliche Lösung besteht darin, Schwerschäume einzusetzen, die nur gering geschäumt sind. Diese weisen vergleichsweise hohe mechanische Eigenschaften auf. Bisher wurde der Einsatz von Schwerschäumen kaum systematisch untersucht. Insbesondere die Oberflächenqualität von Monofolien ist problematisch. Daher besteht großes Optimierungspotenzial durch Anpassung der Verarbeitungsprozesse und Herstellung verschiedener Folienaufbauten. Außerdem ist das Wissen über die Herstellung geeigneter Halbzeuge und deren Weiterverarbeitung für Unternehmen kaum zugänglich. Das Ziel dieses Vorhabens ist es, entsprechendes Prozesswissen für die industrielle Anwendung zu generieren und so bestehende Anwendungen zu verbessern beziehungsweise neue Anwendungsfelder zu erschließen.

3 STAND DER TECHNIK

Eine Möglichkeit, die Materialeffizienz von Kunststoffen zu erhöhen, ist die Dichtereduktion durch den Einsatz geschäumter Kunststoffe. Im Folgenden werden grundlegende Begriffe, Eigenschaften, der Schaumbildungsprozess sowie der Einsatz von Schäumen im Thermoformen vorgestellt.

3.1 Eigenschaften geschäumter Kunststoffe

Ein Schaumstoff ist nach ISO 472 ein „Kunststoff, dessen Dichte durch die Anwesenheit zahlreicher, in seiner Masse verteilter, kleiner offener oder geschlossener Hohlräume (Zellen) verringert ist“ [NN13]. Durch eine Reduktion der Dichte lassen sich Rohstoffe in der Produktion einsparen [HK17]. Kunststoffschäume haben neben der Dichtereduktion weitere Vorteile gegenüber Kompaktmaterialien, was zu einer weiten und stetig wachsenden Verbreitung geführt hat [Bon20]. Offenzellige Schäume weisen zum Beispiel eine schalldämpfende Wirkung auf, wogegen sich geschlossenzellige Schäume aufgrund des mangelnden Gasaustauschs hervorragend als Wärmeisolator eignen [Abt20]. Zudem zeichnen sich geschäumte Kunststoffe durch eine geringe Wasserdampfdurchlässigkeit und eine reduzierte Feuchtigkeitsaufnahme aus [Bon20]. Schaumstoffe werden aufgrund dieser Eigenschaften besonders oft als Verpackungs-, Isolier-, Schalldämm- und Polstermaterial verwendet [Bon20].

Neben den vielen positiven Eigenschaften haben geschäumte Kunststoffe jedoch auch Nachteile im Vergleich zu Kompaktmaterialien. Durch das Einbringen von Hohlräumen in das Material nehmen die absoluten mechanischen Kennwerte ab. Eine steigende Zellgröße wirkt sich negativ auf die Belastbarkeit des Materials aus, was zu einer Verbreitung von mikrozellulären Schäumen geführt hat [Sta06].

3.2 Schaumbildungsprozess

In der Kunststofftechnik wird das Schäumen durch den Zusatz eines Treibmittels erreicht. Je nach der Wirkungsweise wird zwischen chemischem und physikalischem Schäumen unterschieden. Beim chemischen Schäumverfahren wird ein chemisches Treibmittel in Form eines Masterbatches zugesetzt, das nach einer chemischen Reaktion zum Aufschäumen des Kunststoffs führt. Der Vorteil der Verwendung von chemischen Treibmitteln ist, dass sie in konventionellen Extrusionsanlagen eingesetzt werden können und im Vergleich zu physikalischen Treibmitteln eine vereinfachte Prozesssteuerung ermöglichen [Dau08]. Beim

physikalischen Schäumen wird ein flüssiges oder gasförmiges Treibmittel (z. B. Stickstoff oder Kohlendioxid) direkt in die Kunststoffschmelze injiziert. Dies erfordert jedoch eine spezielle Extrusionstechnik und ist mit herkömmlichen Extrusionsanlagen nicht durchführbar.

Die Theorie des Schaumbildungsprozesses gilt sowohl für das chemische als auch für das physikalische Schäumen und gliedert sich in vier Stufen.

Der Prozess beginnt mit der Bildung einer einphasigen Polymer-Gas-Lösung, die durch eine gute Durchmischung des Treibgases und der Polymerschmelze erreicht wird. Die Löslichkeit des Gases in der Polymerschmelze hängt von der Temperatur, dem Druck und den Wechselwirkungen zwischen Polymer und Gas ab. Ungelöstes oder überschüssiges Gas führt zur Bildung von großen Hohlräumen im Extrudat. Neben der Löslichkeit ist die Diffusion eine wesentliche Voraussetzung für die Bildung einer einphasigen Polymer-Gas-Lösung. Die Diffusion beschreibt den Verteilungsmechanismus des Gases innerhalb der Polymerschmelze und wird durch Konzentrationsunterschiede in der Mischung getrieben [Sta06, Zha10].

Bei der Zellkeimbildung werden in der Polymer-Gas-Lösung stabile, wachstumsfähige Zellkerne gebildet. Die Keimbildung wird durch eine Änderung des thermodynamischen Gleichgewichts in Form eines Druckverlusts am Düsenaustritt oder eines Temperaturanstiegs ausgelöst [Zha10]. Die Änderung führt zu einer verringerten Löslichkeit des Gases in der Polymerschmelze. Teile des Gases lösen sich aus der Schmelze und bilden eine Gasphase [Sta06]. Besonders wichtig für eine ausreichende Nukleierungsrate ist ein möglichst hoher Druckgradient (Pa/s) am Werkzeugaustritt [PBS95]. Dieser Druckgradient lässt sich z.B. über die Scherviskosität, den Massedurchsatz oder durch die Düsenaustrittsgeometrie einstellen. Die Nukleierungsrate lässt sich zudem durch eine sogenannte heterogene Nukleierung weiter erhöhen [LP14], die durch feinverteilte Partikel in der Polymer-Gas-Lösung ausgelöst wird [CS87, Zha10]. Durch eine Steigerung der Nukleierungsmittelkonzentration sowie Verringerung der Partikelgröße lässt sich die Nukleierungsrate erhöhen [Zha10].

Nach Erreichen des kritischen Zellradius ist von stabilem Zellwachstum die Rede. Dieses ist weitgehend diffusionsgesteuert und abhängig vom Gasaustausch der Zelle mit der umgebenden Polymermatrix sowie dem rheologischen Verhalten der Polymermatrix [Kos96].

Damit die Schaumstruktur so fein wie gewünscht ist, müssen die wachsenden Schaumzellen rechtzeitig stabilisiert werden. Dies geschieht, indem die Viskosität der Polymerschmelze durch Abkühlung erhöht wird. Eine schnelle Schmelzeabkühlung führt zu einem raschen Viskositätsanstieg und einer kurzen Wachstumsphase. In dieser Zeit diffundieren nur Teile des Gases in die Zellen, und es wird ein geringer Schäumgrad mit kleinen Zellen erreicht. Ein

weiterer Effekt, der bei schneller Schmelzekühlung vorliegt, ist, dass ein Gasaustausch zwischen einzelnen Zellen sowie der Kollaps vermieden wird [Lan95, Sta06].

3.3 Einsatz von Schäumen im Thermoformen

Die Verarbeitung von Schwerschäumen im Tiefziehverfahren wurde bisher kaum untersucht. Insbesondere für Schwerschäume mit bis zu 20 % reduziertem Raumgewicht ($\approx 840 \text{ kg/m}^3$ PS) gibt es kaum Informationen. Leichtschäume (bis 300 kg/m^3) wurden dagegen von *Tron und Wirz* [TB99, Wir04] ausführlich behandelt. *Wirz* beschreibt das Spannungs-Dehnungs-Verhalten verschiedener Leichtschäume beim Thermoformen detailliert. Dichteänderungen führen zu unterschiedlichen Zugverhältnissen. Die Dichte des Schaums hängt stark vom verwendeten Material ab und variiert je nach Aufschäumgrad. Des Weiteren ist beschrieben, dass die Zellstruktur des Schaums durch die Formluft deutlich verändert wird, wenn eine Verdichtung der Schaumstruktur unter Druck erfolgt. Die Struktur des Schaums beeinflusst die Formgebung wesentlich. Daher kann die Wanddickenverteilung einer Schaumfolie nicht mit der einer Kompaktfolie gleichgesetzt werden. Auch von gleichen mechanischen Eigenschaften kann nicht ausgegangen werden, da diese mit abnehmender Dichte absolut abnehmen und gewichtsmäßig zunehmen. Leichtschäume finden bereits Verwendung in Burgerverpackungen, Einwegbehältern für Suppen sowie bei der Herstellung von technischen Bauteilen, wie beispielsweise Armaturentafelteilen im Automobil [URL24b, Wir04]. Anders als beim Thermoformen kann hierbei jedoch nicht von einer Volumenkonstanz ausgegangen werden. Während des Umformprozesses werden die Zellen gedehnt, können reißen und werden anschließend mithilfe von Umformluft komprimiert [TB99]. Durch die biaxiale Verstreckung ändert sich nicht nur die Dicke, sondern die Folie kann auch in Dickenrichtung gestaucht werden, wenn die Umformluft aufgebracht wird. Nach dem Recken im erwärmten Zustand kann die Dicke der Thermoformteile sogar zunehmen, was bei kompakten Folien nicht der Fall ist [Wir04]. Das Reckverhalten muss an das Vorreckwerkzeug oder die Prozessführung angepasst werden. Dabei müssen die genannten Aspekte berücksichtigt werden, um die Wanddickenverteilung gezielt beeinflussen zu können und Engpässe zu vermeiden [AM83, IS16, TB99].

4 ZIEL UND VORGEHEN DES FORSCHUNGSVORHABEN

Wie der Stand der Technik zeigt, sind die Schaumstruktur und die mechanischen Eigenschaften beim Schäumen von Kunststoffen von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängig. Besonderen Einfluss nimmt der Thermoformprozess, da dieser durch eine biaxiale Verstreckung der Folie gekennzeichnet ist. Für gleichbleibende Produkteigenschaften unter Materialeinsparung ist die Kenntnis dieser Einflüsse von großer Bedeutung.

Das Ziel des Forschungsprojekts war daher, die Steigerung der Materialeffizienz im Thermoformprozess zu ermöglichen, indem die klassischen kompakten Halbzeuge mit geringfügig geschäumten Halbzeugen (Dichtereduktion unter 20 %, sogenannte Schwerschäume) substituiert werden. Durch die Reduktion der Dichte der eingesetzten Folie soll eine Materialersparnis von mindestens 5 % erreicht werden können, ohne dass die mechanischen Eigenschaften des Produkts unter die Anwendungsanforderungen sinken.

Hierzu wurde Prozesswissen über die Verarbeitung von Schwerschäumen im Thermoformverfahren generiert. Das Ziel der Untersuchungen war zu prüfen, inwieweit die Prozessführung und die Stempelgestaltung beim Thermoformen an den Einsatz von Schaumfolie angepasst werden müssen. Andererseits wurde bestimmt, welche Dichtereduktionen ohne unzulässige Verschlechterung der mechanischen Bauteileigenschaften (Topload) möglich sind. Neben der Analyse des Thermoformprozesses wurde auch die Herstellung der Schaumhalbzeuge in der Extrusion betrachtet, da diese maßgeblich die Thermoformbarkeit beeinflusst. Der Kern der Untersuchungen bestand in der Analyse der Halbzeuge und Weiterverarbeitung von verschiedenen Schwerschäumfolien, die sich in Schichtaufbau, Dicke sowie in der Dichtereduktion unterscheiden.

Da je nach Anwendung verschiedene Halbzeugmaterialien beim Thermoformen eingesetzt werden, wurden die Untersuchungen mit für das Thermoformen üblichen Materialien durchgeführt. Dazu wurden sowohl Polystyrol- als auch Polypropylenfolien untersucht. Es wurden drei verschiedene Dichtereduktionen pro Material und Schichtaufbau eingestellt. Dabei wurden Folien mit Dichtereduktionen von bis zu 20 % extrudiert und geprüft, wie stark die mechanischen Eigenschaften der Bauteile in Abhängigkeit des Schäumgrads sinken. Auch die Diffusionseigenschaften ändern sich in Abhängigkeit der Schäumgrade, sodass diese mittels Wasserdampf- und Sauerstofftransmissionsrate analysiert wurden. Die verschiedenen Halbzeugvarianten wurden weiterhin hinsichtlich ihres Thermoformverhaltens untersucht. Wesentli-

che Aspekte, die untersucht wurden, sind hierbei das Nachexpansionsverhalten beim Aufheizen, das Verstreckverhalten beim Thermoformen (Wanddickenverteilung, Schaumstruktur nach dem Umformen) und die resultierenden mechanischen Eigenschaften (Topload).

5 VERSUCHSUMGEBUNG UND ANALYSEMETHODEN

Im Folgenden werden die verwendeten Materialien, die Anlagentechnik und alle eingesetzten Analysemethoden beschrieben, welche für die Herstellung, Untersuchung und Weiterverarbeitung der geschäumten Folie zum Einsatz kamen.

Materialien

In der Anwendung geschäumter Halbzeuge fürs Thermoformen werden hauptsächlich Polypropylen sowie Polystyrol eingesetzt. Entsprechend wurden in diesem Vorhaben beide Materialien untersucht. Für die erste Versuchsreihe wurde das Polypropylen vom Typ PP 520 P der Firma Saudi Basic Industries Corp. (Sabic), Riad, Saudi-Arabien und das Polystyrol Styrolution 153F der Firma Ineos Ltd., London, Vereinigtes Königreich verwendet. In der zweiten Versuchsreihe wurden Mischungen diverser Materialien verwendet, eine detaillierte Aufstellung findet sich in Kapitel 7.

Bei dem eingesetzten chemischen Treibmittel handelte es sich um ein Hydrocerol CF 40 E der Firma Avient, Avion Lake, Ohio, USA. Hydrocerol ist ein chemischer Schaumbildner und zeitgleich ebenfalls Nukleierungsmittel, welches sich besonders für die Herstellung feinzelliger Schäume eignet. In Tabelle 5.1 ist eine Übersicht relevanter Eigenschaften aufgelistet.

Eigenschaft von Hydrocerol CF 40 E	Zahlenwert/Spezifikation
Trägersubstanz [-]	Polyethylen niedriger Dichte
Schäumsubstanz [-]	Effektive Komponenten: 40 % Natriumbicarbonat/Zitronensäure-Basis
Schmelzpunkt [°C]	> 110
Zersetzungstemperatur [°C]	160

Tabelle 5.1: Ausgewählte Eigenschaften des verwendeten chemischen Treibmittels [NN20]

Extrusionsanlage zur Herstellung von geschäumten Halbzeugen

Die verwendete Flachfolienextrusionsanlage besteht aus einem Laborextruder (Schnecken-durchmesser $D = 19$ mm, Länge der Dreizonenschnecke von $25 D$) der Brabender GmbH & Co. KG, Duisburg, und dem Glättwerk Typ 136-350 von der Collin Lab & Pilot Solutions GmbH, Maitenbeth. Für die Schmelzeustragung kommt ein Monofolienwerkzeug mit Kleiderbügelverteiler der Fa. Brabender GmbH & Co. KG, Duisburg, zum Einsatz (Austrittspaltbreite = 150 mm, Austrittspalthöhe = 0,2-1,2 mm).

Treibmitteldosierung

Für das chemische Schäumen wurde das Treibmittel im Dosierer zugegeben, wobei die Anteile variiert wurden. Das Treibmittel liegt granulatförmig vor und kann mit dem Kunststoffgranulat der Mittelschicht vor der Zugabe in die Dosierer batchweise vermischt werden.

Anlagentechnik zur Umformung der Halbzeuge und Prozessparameter

Für die Durchführung der Versuche wird eine Labor-Einstationenformanlage mit ausgelagerter Heizstation vom Typ KD 20/25 der Kiefel GmbH, Freilassing, verwendet. Der schematische Aufbau ist in Abb. 5.1 dargestellt.

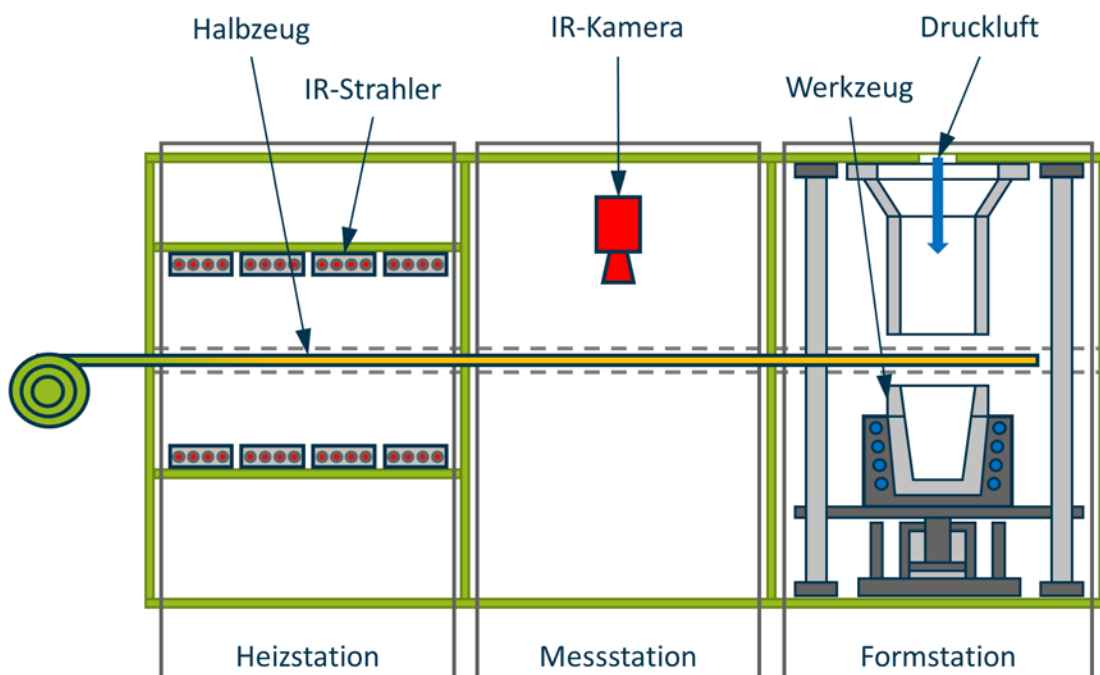


Abb. 5.1: Schematische Darstellung der Laborthermoformanlage des Typs Kiefel KD 20/25

Für den Umformprozess wird mit einer Negativform gearbeitet. Das Halbzeug wird im Spannrahmen fixiert, um die Folie zwischen Aufheizen und Werkzeug umsetzen zu können. Der Spannrahmen kann horizontal zwischen Form- und Heizstation verfahren. In der Heizstation wird das eingespannte Halbzeug beidseitig mit jeweils zwölf Quarzstrahlern vom Typ FSK mit 375 W Leistung der Technical Quartz Solutions GmbH, Mainz-Kastel erhitzt, um es auf eine Verarbeitungstemperatur zu bringen, die eine ausreichende Ver Streckung ermöglicht. Die Temperaturverteilung auf der Folie wird homogen eingestellt. Hierzu kann die Leistung der einzelnen Heizelemente oder die Gesamtleistung variabel angepasst werden, was die Temperatur und auch die Aufheizzeit beeinflusst. Die Temperatur wird mittels IR-Pyrometers vom Typ optris CT LT der Optris GmbH, Berlin in der Heizstation gemessen. Zusätzlich wird sie mit

einem Kontaktthermometer des Typs testo 922 der Testo SE & Co. KGaA, Lenzkirch mit angeschlossenen Oberflächenfühler vom Typ K überprüft, da die IR-Messungen durch Streustrahlung in der Heizstation verfälscht werden können.

Nach dem Erhitzen der Folie wird der Spannrahmen mittig unterhalb des Blaskastens positioniert, in dem sich der Vorstreckstempel befindet. Der Blaskasten dient der Zufuhr der Formluft. Anschließend wird das Werkzeug geschlossen und der Vorstreckstempel von oben in die Folie gefahren. So wird das Material vorgestreckt, bevor die Formluft zugeschaltet wird. Die Druckluft löst das Material vom Vorstreckstempel, verformt die Folie final und das Formteil wird mit der Kavität abgekühlt, sodass es formstabil entformt werden kann. Danach wird das Werkzeug geöffnet und das fertige Formteil entnommen. Während der Versuche wird das Werkzeug mit einem Wassertemperiergerät vom Typ 90S der Aic-Regloplas GmbH, München auf eine Temperatur von 30 °C erwärmt.

Die Verstreckgeschwindigkeit wird auf den Maximalwert der Fertigungsanlage (450 mm/s) eingestellt, was in einer realen Geschwindigkeit von maximal 275 mm/s resultiert. Nach mehrmaligen Formen wird der Stempel durch das Halbzeug so weit erwärmt, dass eine Gleichgewichts-Stempeltemperatur von ca. 35 °C erreicht wird. Im weiteren Versuchsverlauf wird die Temperatur der Folie je nach Schichtaufbau so weit nach oben angepasst, dass das Formteil vollständig ausgeformt wird. Tabelle 5.2 fasst die verwendeten (konstanten) Prozesseinstellungen der Versuche mit Stempelvorstreckung zusammen.

Parameter	Einheit	Wert
Stempelverstreckweg	[mm]	37,8
Verstreckgeschwindigkeit	[mm/s]	275
Verzögerung der Druckluftaktivierung	[-]	Nach 100 % des Stempelvorstreckwegs
Formdruck	[bar]	5
Haltedauer des Formdrucks	[s]	3
Stempeltemperatur	[°C]	35

Tabelle 5.2: Konstante Prozesseinstellungen

Je eingesetztem Stempel werden insgesamt fünf Becher ausgeformt, welche im Anschluss auf die Qualitätsmerkmale Wanddickenverteilung (WDV), Schaummorphologie, Oberflächengüte, Sauerstoffbarriere und Topload untersucht werden.

Werkzeuggeometrie und Vorstreckstempel:

Die Vorstreckstempel werden aus Hytac-W, einem syntaktischen Schaum der CMT Europe BV, Kaatsheuvel, Niederlande hergestellt. Dieser syntaktische Schaum ist ein Verbundwerkstoff, der aus einer Duroplast-Matrix besteht. Diese Matrix ist mit Mikrohohlkugeln aus Glas gefüllt. Das Material besitzt eine geringe Wärmeleitfähigkeit und einen geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten [Heg04, HKB16, URL24d]. Somit behält die Folie bei Kontakt des Stempels ihre Verstreckfähigkeit und kühlt vergleichsweise wenig ab. Abb. 5.2 zeigt die verwendeten Stempel- und Werkzeuggeometrien. Aus Kombination der Wandschräge (α in Grad) sowie des Kantenradius (R in mm) ergeben sich vier verschiedenen Stempelgeometrien (Stempel 1: $4^\circ R3$, Stempel 2: $4^\circ R9$, Stempel 3: $8^\circ R3$, Stempel 4: $8^\circ R9$).

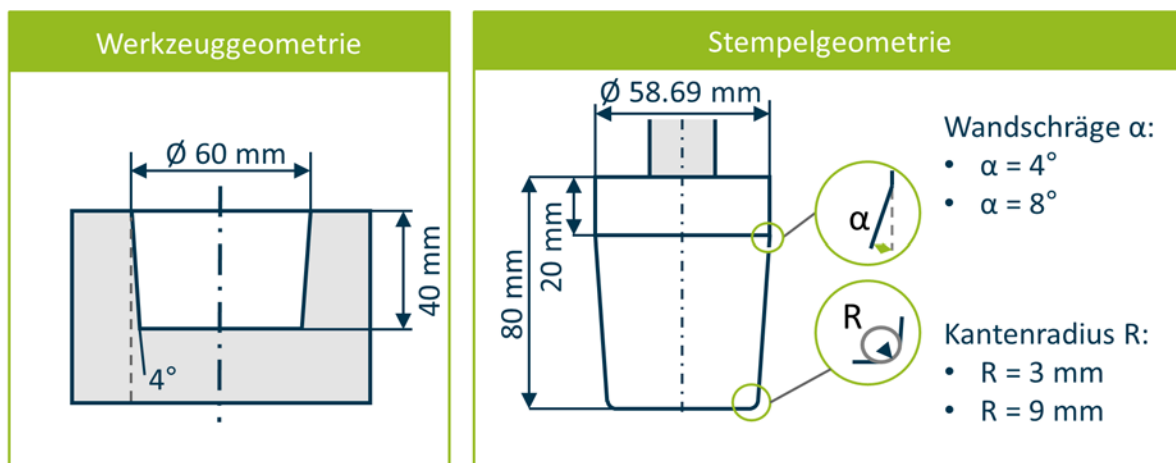


Abb. 5.2: Schematische Darstellung eingesetzten Werkzeug- und Stempelgeometrien

Analysegeräte, -methoden und Prüfvorschriften

Bestimmung der Foliendichte

Die Bestimmung der Dichte der Folien erfolgte mittels Probenentnahme von drei Kreisausschnitten. Auf die Ausschnitte wurden zwölf äquidistant verteilte Messpunkte über den Durchmesser von 11 cm in einem Abstand von 30° aufgetragen. Dies ermöglichte die Berücksichtigung der Zellverteilung innerhalb der Folie. Unter der Annahme eines idealen Zylinders ließ sich durch Mittelung der gemessenen Werte auf das Volumen der Kreisscheibe schließen. Anschließend wurden die Proben mittels Feinwaage gewogen.

Bestimmung der Schaumstruktur der Folien

Es wurden von wenigen ausgewählten Proben Computertomographie (CT)-Aufnahmen mit Hilfe des SkyScan 1172 system, der Firma Bruker mikroCT, Aartselaar, erzeugt. Durch rechner-

basierte Auswertung einer Vielzahl aus verschiedenen Richtungen aufgenommener Röntgenaufnahmen eines Objektes wurden somit digitale Schnittbilder rekonstruiert. Dies erlaubt unter anderem die Darstellung der geschäumten Folien im Querschnitt. Da für die Ermittlung der Schaumstruktur im Folienquerschnitt nur vereinzelte Folienproben untersucht wurden, wurden die Schaumstrukturen lediglich subjektiv verglichen.

Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Die Ermittlung der mechanischen Kennwerte der hergestellten Folienproben erfolgte mit Fallturm CEAST 9350 der Firma Instron, Nordwood USA im Durchstoßversuch. Für jeden Versuchspunkt wurden fünf Proben der Abmessung 60 mm * 60 mm vorbereitet. Die Versuche verliefen nach ISO 6603-2, mit einer 4,5 kN Kraftmesszelle, Schlagenergie von 78,4 N und 4,4 m/s Fallgeschwindigkeit. Die Ergebnisse ergaben die maximale Durchschlagkraft für jede Probe.

Messverfahren zur Analyse der Oberflächentopographie

Die Oberflächenrauheit wurde mit dem Gerät MarSurf M 310 der Firma Mahr GmbH, Esslingen, Deutschland, gemessen. Es besteht aus einem verstellbaren Messtativ und einer Grundplatte, auf der die Probe eingespannt wird. Pro Prüfpunkt werden drei Messungen durchgeführt, von denen der Mittelwert zur Auswertung herangezogen wird. Nach DIN EN ISO 4287 und DIN 4768 werden die Rauheitsparameter R_a und R_z zur Bestimmung der Oberfläche verwendet.

Messung und Bewertung der Wanddickenverteilung umgeformter Formteile

Zur Messung der Wanddicke der geformten Becher kam das Dickenmessgerät Magna Mike 8600 der Olympus Europa SE & Co. KG, Hamburg, zum Einsatz. Hierfür wurden insgesamt 27 Messpunkte (MP) linienförmig über den Becherquerschnitt definiert. Der Becher wird mit der Außenseite auf der magnetischen Messsonde platziert. Im Inneren des Bechers befindet sich eine Messkugel mit einem Durchmesser von 1,5875 mm. Mithilfe dieser Messkugel lässt sich eine Auflösung von 1 μm und eine Messgenauigkeit von $\pm 5 \mu\text{m}$ erzielen [NN15]. Die 27 MP werden nacheinander abgetastet und das Messgerät ermittelt unter der Ausnutzung des Halleffekts die lokale Wanddicke des Bechers. Um genaue Messergebnisse zu erzielen, wird das Gerät alle fünf Messungen neu kalibriert. Die sich gegenüberliegenden MP werden aufgrund der Symmetrie des Formteils zu einem Punkt zusammengelegt und es wird der Mittelwert beider Punkte verwendet. Abb. 5.3 verdeutlicht die Anordnung der Messpunkte und zeigt beispielhaft die WDV eines Bechers, welcher mit einem 8°R3-Stempel umgeformt wurde.

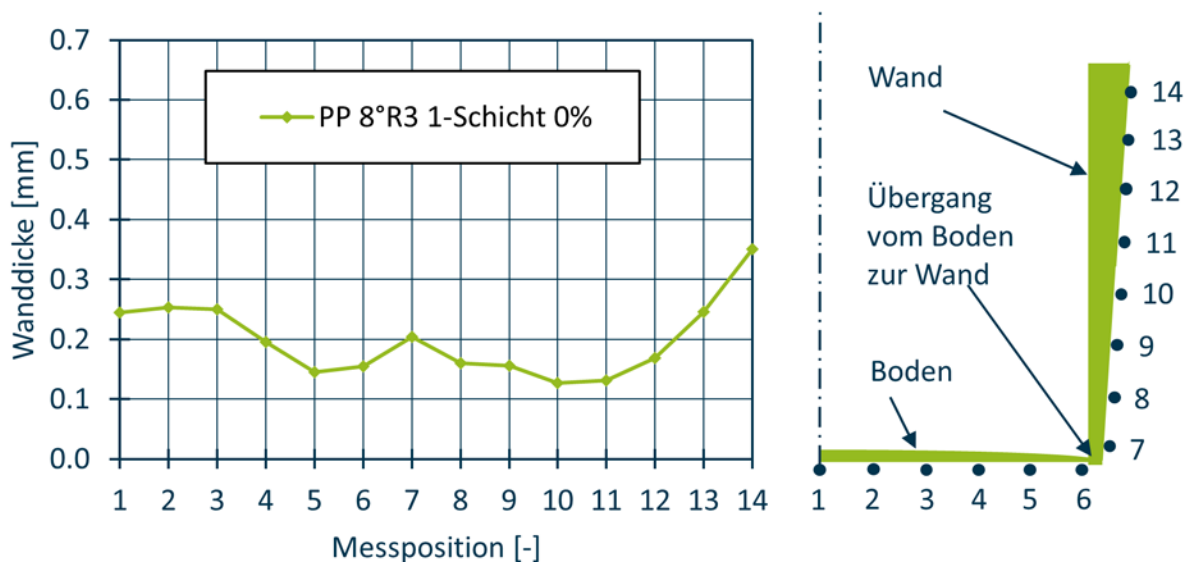


Abb. 5.3: Schematische Darstellung der Wanddickenverteilung eines mit einem 8°R3-Stempel umgeformten PS-Formteils

MP 1 liegt mittig am Boden des Bechers und MP 14 an der oberen Kante nahe der Becheröffnung. Im Übergang vom Boden des Bechers zu seiner Wandschräge befinden sich MP 6 und MP 7. In diesem Übergangsbereich ist die Verstreckung charakteristisch hoch und die Wanddicke dementsprechend gering (kritischer Bereich des Bechers) [HB19].

Homogenität der Wanddickenverteilung:

Um die Qualität der geformten Becher beurteilen und quantifizieren zu können, wird die Homogenität der WDV als Kriterium herangezogen. Alternativ kann eine Betrachtung der minimalen Wanddicke kann als Kriterium erfolgen. Da diese jedoch lokal an unterschiedlichen Becherbereichen auftreten können, wird hierauf aufgrund geringer Vergleichbarkeit verzichtet. Eine Methode zur Bestimmung der Homogenität des Formteils ist die Betrachtung der maximalen Wanddickendifferenz Δd der dicksten (d_{max}) und dünnsten (d_{min}) Wanddicke des Bauteils [HB19]. Je kleiner die Wanddickendifferenz Δd , desto homogener ist das Bauteil. Die Homogenität wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\Delta d = | d_{max} - d_{min} | \quad (Gl. 5.1)$$

Messung der Topload-Stabilität der hergestellten Formteile

Bei der Topload Messung wird die mechanische Stabilität der geformten Becher mittels eines Druck- bzw. Stauchversuchs geprüft. Die Versuche wurden mit der Z010-Maschine der Zwick-Roell GmbH & Co. KG, Ulm und einem 10 kN Kraftsensor in Anlehnung an DIN 55440-1 durchgeführt [NN19]. Anschließend wurden die Ergebnisse mit dem Programm TestXpert II dokumentiert.

Bei der Messung wurden die Becher zwischen zwei Druckplatten platziert und mit einer stetig wachsenden Kraft belastet, bis das erste Mal ein Kraftabfall von 10 % des maximalen Wertes auftritt. Abb. 5.4 zeigt den schematischen Aufbau des Stauchversuchs und das entstehende Kraft-Stauchungs-Diagramm. Auf der X-Achse wird der Weg der Stauchung in mm angegeben und die Y-Achse zeigt die dazugehörige Kraft in N an. Der Topload eines Bechers ist dementsprechend das Kraftmaximum einer Messung. Die ermittelten Werte werden der Vergleichbarkeit halber im Anschluss gemittelt.

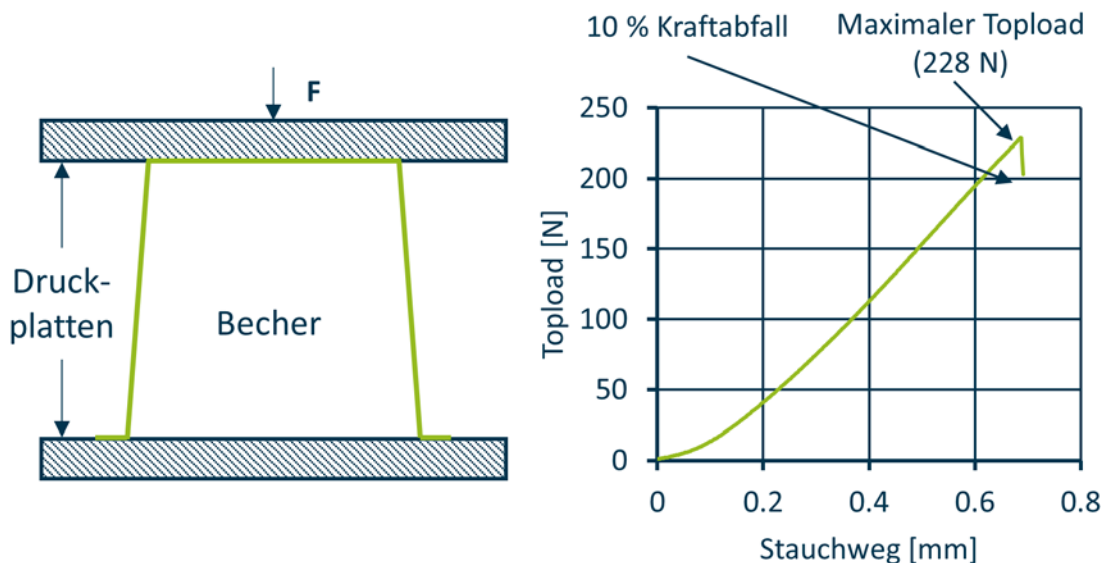


Abb. 5.4: Schematische Darstellung und Kraftverlauf der Toploadmessung

Bestimmung der Sauerstoffdurchlässigkeit

Sauerstoff kann eine Vielzahl chemischer Reaktionen auslösen, die häufig zu einer Qualitätsminderung des Füllgutes führen. Bei einigen Lebensmitteln können bereits geringste Mengen Sauerstoff zu einer Qualitätsminderung (Verfärbung, sensorische Beeinträchtigung) führen, weshalb die Oxygen Transmission Rate (OTR) als Maß für die Sauerstoffdurchlässigkeit der Formteile herangezogen wurde.

Zur Messung der OTR der herzustellenden Formteile wird ein O₂-Durchlässigkeitsmessgerät vom Typ M8700 der Firma Systeck Instruments Ltd., Thame, UK verwendet. Alle Messungen werden bei konstanter Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit ($23,0 \pm 0,1$ °C) in Übereinstimmung mit DIN 53380-3 und ASTM D3985 durchgeführt [NN98, NN17]. Für jeden Prüfpunkt werden mindestens zwei Proben getestet.

6 UNTERSUCHUNG DER WIRKZUSAMMENHÄNGE BEI DER HERSTELLUNG VON MONOLAYER-SCHAUMFOLIEN

In einem ersten Arbeitsschritt wurden Monolayer-Schaumfolien mit verschiedenen Dichtereduktionen hergestellt. Die Halbzeuge wurden mit den in Kapitel 5 vorgestellten Anlagen und Materialien hergestellt. Neben geschäumten Folienhalbzeugen der Dicke 0,8 mm wurden als Referenz für nachfolgende Analysen außerdem kompakte Folien hergestellt. Ziel ist die Untersuchung des Einflusses des Hydrocerol-Anteils und der Werkzeugtemperatur auf die resultierende Gewichtsreduktion und sich ausbildende Schaumstruktur. Tabelle 6.1 zeigt den durchgeführten Versuchsplan zur Ermittlung der Zusammenhänge.

Versuchspunkt	Werkzeugtemperatur [°C]	Zylindertemperatur [°C]	Hydrocerolanteil [Gew.-%]
1	230	230	1
2	230	230	3
3	230	230	5
4	230	230	7
5	240	240	5
6	250	250	5
7	210	230	5
8	190	230	5

Tabelle 6.1: Versuchsplan zur Ermittlung des Treibmittelanteils und der Werkzeugtemperatur auf die erzielbare Dichtereduktion und die resultierende Schaumstruktur

Zunächst erfolgte die Einflussuntersuchung des chemischen Treibmittelanteils im Verhältnis zum eingesetzten Kunststoff auf die Dichtereduktion und die sich ausbildende Schaumstruktur. Abb. 6.1 zeigt die resultierenden Dichten der produzierten Polypropylen (PP)-Folien. Es wird deutlich, dass kein linearer Zusammenhang zwischen dem Hydrocerolanteil und der erzielten Dichtereduktion besteht. Die höchste Dichtereduktion von ca. 10 % konnte bei einem Anteil von 1 % und 7 % erzielt werden.

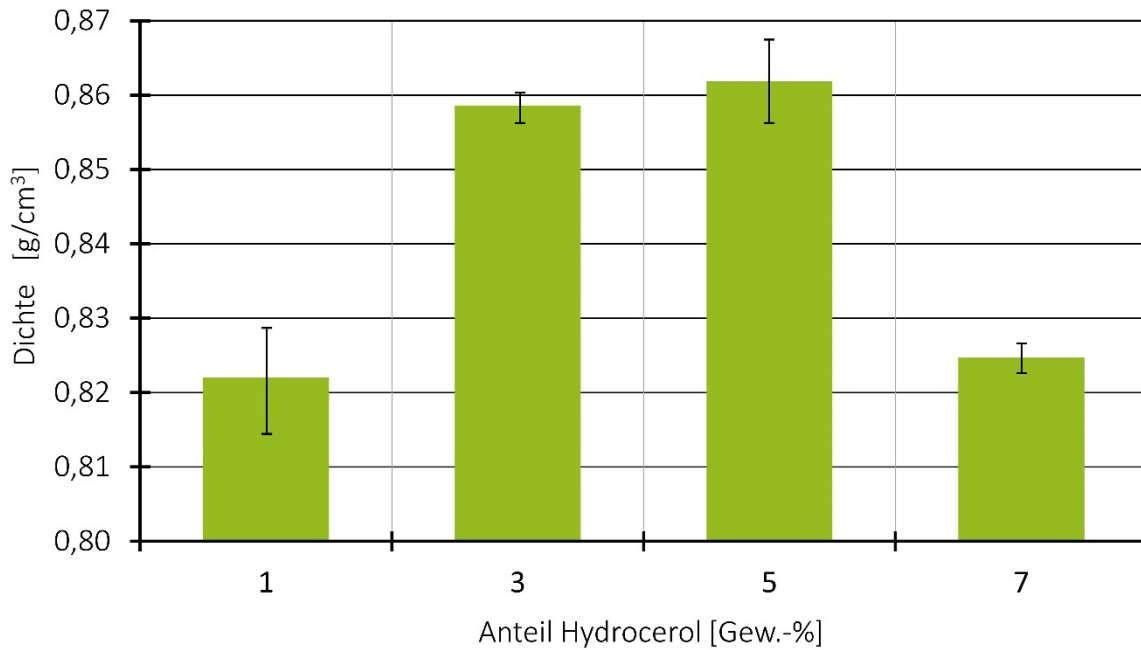


Abb. 6.1: Erzielte Dichten der PP-Schaumfolie in Abhängigkeit des Treibmittelanteils (VP 1-4)

Neben dem Schäumgrad bzw. der Dichtereduktion der Folien besitzt die Schaummorphologie einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Produkts. Die Schaumstrukturen wurden mittels CT-Aufnahmen ausgewertet. Durch die rechnerbasierte Auswertung der Röntgenaufnahmen der Proben wurden digitale Schnittbilder rekonstruiert. Diese erlauben unter anderem die Darstellung der geschäumten Folien im Querschnitt und die Analyse der Anzahl sowie Form der Zellen. Abb. 6.2 zeigt die CT-Aufnahmen der nach Tab. 1 hergestellten PP-Schaumfolien mit variierendem Treibmittelanteil im Querschnitt.

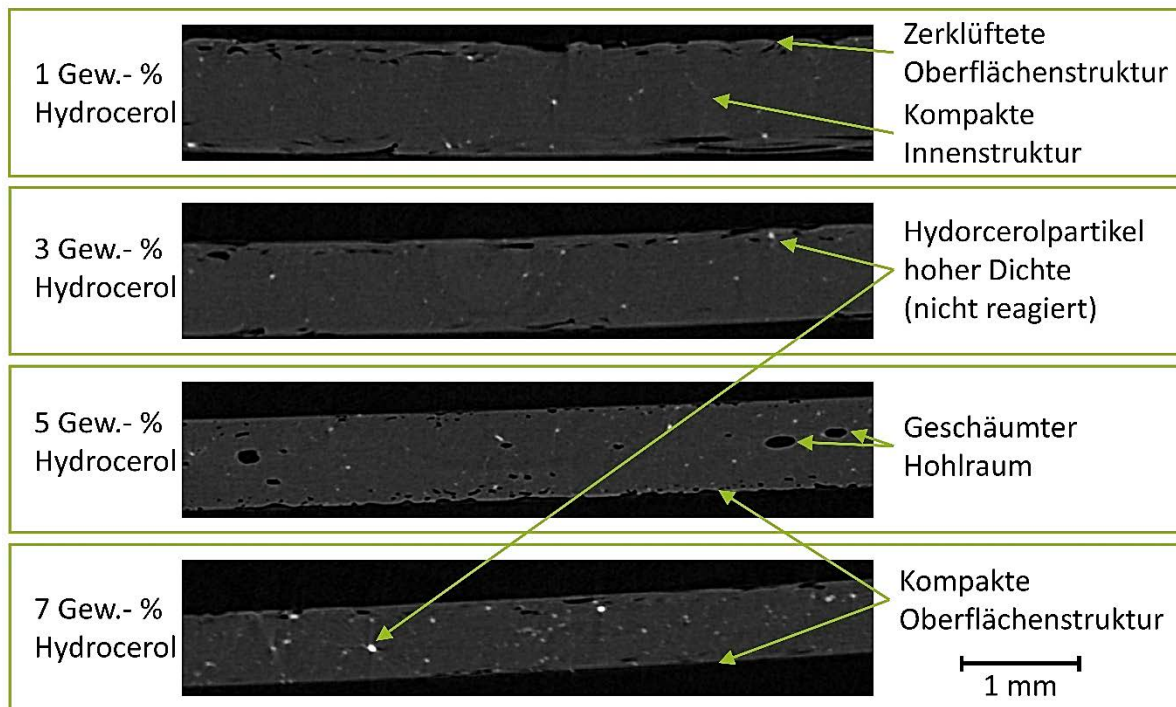


Abb. 6.2: CT- Aufnahmen der Schaumfolie mit unterschiedlichen Schäumgraden

Es ist ersichtlich, dass sich je nach eingesetztem Hydrocerolanteil deutlich unterschiedliche Schaumstrukturen ausbilden. So ist bei 1 Gew.-% und 3 Gew.-% Hydrocerol ersichtlich, dass sich an den Oberflächen der Folie eine Schaumstruktur ausbildet, nicht jedoch im Inneren der Folie. Weiterhin ist auffällig, dass die Oberfläche eine zerklüftete Struktur aufweist. Bei einem Hydrocerolanteil von 5 Gew.-% ist erstmalig eine Schaumstruktur im Inneren bei einer glatten Oberflächenstruktur nachzuweisen. Eine weitere Steigerung auf 7 Gew.-% hat gemäß der Dichtemessung keinen positiven Einfluss auf eine Dichtereduktion. Weiterhin ist darauf hinzuweisen, dass die Hydrocerolpartikel, welche im Bild als weiße Spots hoher Dichte erkennbar sind, im Extruder gut distribuiert werden konnten, jedoch teilweise nicht reagierten.

Der zweite Teil des Versuchsplans beschäftigte sich mit dem Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die Dichte und Schaumstruktur der Schaumfolien. Dazu wurden Schaumfolien mit einem Hydrocerolanteil von 5 %, bei einer Zylindertemperatur von 230 °C und einem Walzenspalt von 0,8 mm gemäß der gewünschten Halbzeugdicke unter Variation der Werkzeugtemperatur hergestellt. Abb. 6.3 zeigt die resultierenden Dichten der produzierten Schaumfolien. Es wird deutlich, dass ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Werkzeugtemperatur und der erzielten Dichtereduktion besteht. Die höchste Dichtereduktion von ca. 25 % kann bei einer Werkzeugtemperatur von $T_w = 180$ °C erzielt werden, was auf den Druckgradienten am Werkzeugaustritt zurückzuführen ist. Eine Reduktion der Werkzeugtemperatur führt neben einer

Steigerung der Löslichkeit des Gases zu einer Erhöhung der Viskosität der gasbeladenen Schmelze und somit zu einem Anstieg des Druckverlusts im Werkzeug.

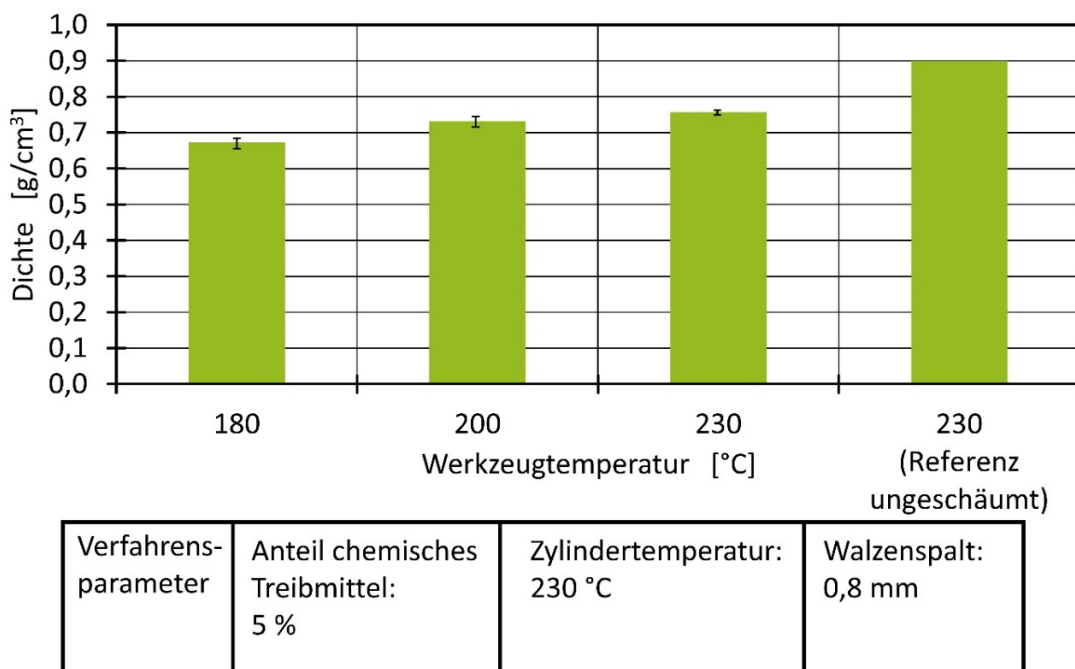


Abb. 6.3: Erzielte Dichten der PP-Schaumfolie in Abhängigkeit der Werkzeugtemperatur

Die Dichtereduktion korreliert antiproportional mit der Zellgröße. Dabei sind gleichmäßig und möglichst kleinzellige Schaumzellen zielführend, da dies zu besseren mechanischen Eigenschaften führt. In Abb. 6.4 ist ersichtlich, dass sich je nach Werkzeugtemperatur deutlich unterschiedliche Schaumstrukturen ausbilden. So ist bei 180 °C eine deutlich gröbere Zellstruktur zu erkennen. Das spiegelt sich auch in dem aufgelisteten Kennwert der Zellgröße von $1,076 \times 10^4 \mu\text{m}^2$ wider. Jedoch ist die generelle Zelldichte mit 12,93 % die höchste aller drei Versuchspunkte. Durch die Erhöhung der Werkzeugtemperatur nimmt die Zellfläche sowie der Anzahl an Schaumzellen ab. Bei der Werkzeugtemperatur von 230 °C ergibt sich somit eine Zellgröße von $0,6875 \times 10^4 \mu\text{m}^2$ mit einer Zelldichte von 9,24 %. Generell ist der Zusammenhang zwischen Dichte und Schaumzellengröße/Zelldichte antiproportional, was auf die Anzahl der Zellen sowie Zellwände zurückzuführen ist. Die Werkzeugtemperatur weist einen signifikanten Einfluss auf die Bildung der Schaumblasen auf und kann bei gleichbleibendem Treibmittelanteil und konstanter Zylindertemperatur zur Einstellung der Schaummorphologie sowie des Schäumgrades genutzt werden. Eine erhöhte Werkzeugtemperatur lässt aufgrund der reduzierten Zellfläche eine höhere Festigkeit vermuten.

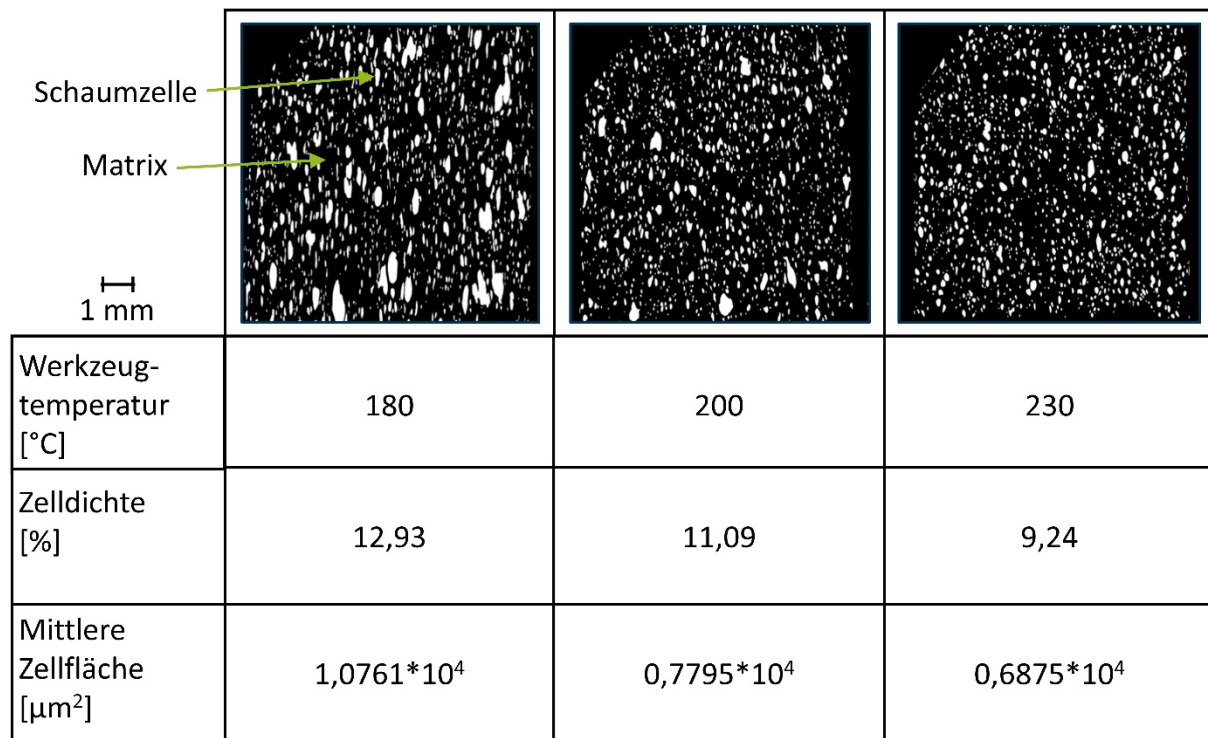


Abb. 6.4: CT-Aufnahmen und Kennwerte der Schaummorphologie bei variierender Werkzeugtemperatur

Weiterführende Untersuchungen zeigten ebenfalls dass neben dem Anteil des Hydrocerols und der Werkzeugtemperatur ebenfalls der Walzenspalt einen großen Einfluss auf die Dichtereduktion aufweist. Je enger der Walzenspalt eingestellt ist, desto eher werden die entstehenden Schaumzellen nach Austritt der Schmelze aus dem Werkzeug mechanisch durch die Anpresskraft der Walzen wieder zerstört. Eine Einstellung des Walzenspalts auf die gewünschte Foliendicke von 0,8 mm stellte sich als optimal für die Ausbildung einer homogenen Schaumstruktur bei einer guten Oberflächenstruktur heraus.

7 HERSTELLUNG DER SCHAUMFOLIEN UND UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DES SCHICHTAUFBAUS UND DICHTEREDUKTION AUF DIE SCHAUMSTRUKTUR, OBERFLÄCHENGÜTE SOWIE DIE MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN

In der Industrie werden auch häufig Mehrschichtfolien eingesetzt. Die Vorteile solcher Folien liegen in der besseren Haptik sowie Optik, die durch die kompakte Außenschicht erzeugt werden. Deshalb wurden Folien mit drei verschiedene Schichtaufbauten für die weiteren Untersuchungen hergestellt (siehe Abb. 7.1). Neben der Monofolie wurde ein „AB“-Schichtaufbau hergestellt. Beide Schichten bestehen jeweils aus Polypropylen oder Polystyrol, allerdings wird eine Außenschicht (A) mit kompaktem Kunststoff extrudiert, während die zweite Schicht (B) geschäumt wurde. Die B-Schicht wurde unterschiedlich stark geschäumt, damit unterschiedliche Dichteinsparungen untersucht werden konnten. Des Weiteren wurde eine 3-Schicht-Folie mit dem Schichtaufbau ABA hergestellt. Diese Folie weist zwei kompakte Außenschichten auf, während die innere B-Schicht geschäumt wurde. Dabei wurden die kompakten Schichten dünn extrudiert um eine möglichst hohe Gewichts- sowie Materialeinsparung zu erzielen. Die Herstellung der Folien übernahm der Projektpartner Avient Colorants Germany GmbH, Ahrensburg. Bei allen Schichtaufbauten wurde jeweils eine kompakte Folie sowie zwei unterschiedliche Dichtereduktionen hergestellt.

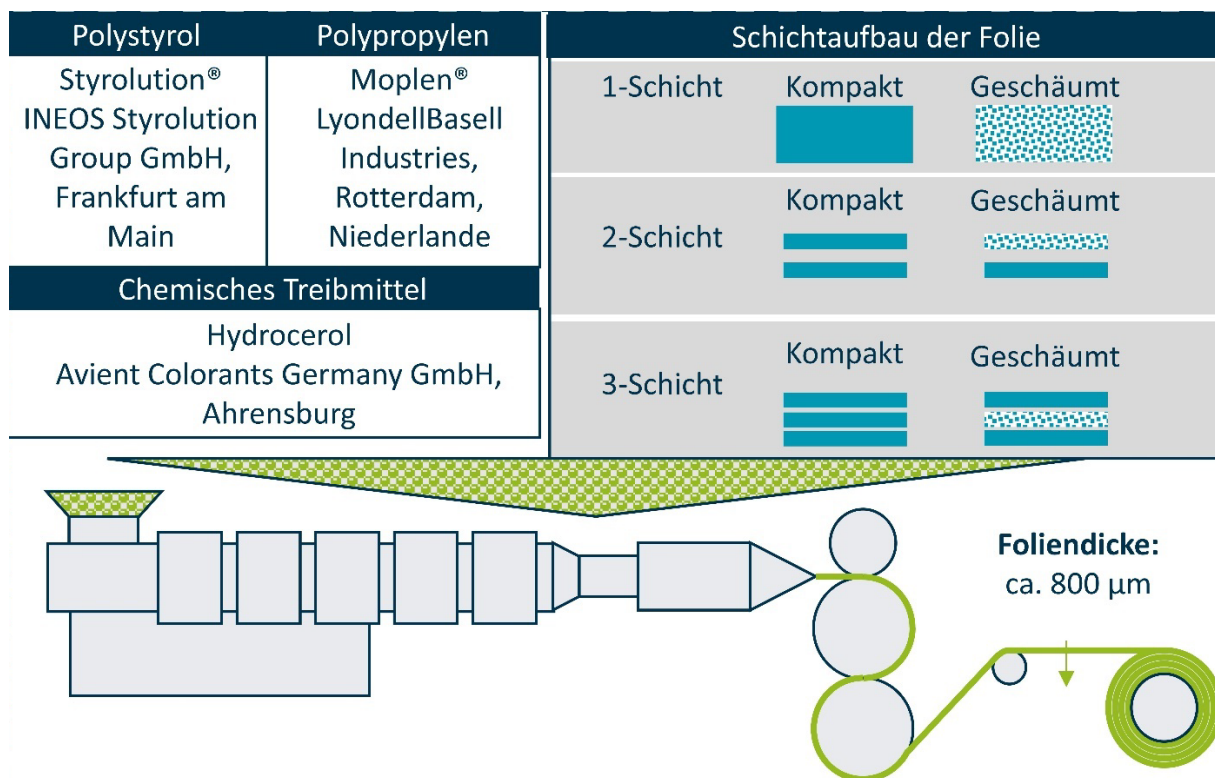


Abb. 7.1: Versuchsaufbau zur Herstellung der Mehrschichtschaumfolien

Die Herstellung erfolgte mit einer Flachfolienextrusionsanlage der Firma Collin Lab & Pilot Solutions GmbH, Maitenbeth. Die Maschinenparameter zur Einstellung des Schichtaufbaus wurden angepasst. Die Extruder- sowie Werkzeugtemperaturen (PP:220 °C, PS 230 °C) und die Kühlwalzentemperatur (PP:90 °C, PS: 80 °C) wurden materialspezifisch eingestellt. Angaben zu Rezepturen der PP-Folien und der Schichtaufbau befinden sich in Tabelle 7.1 und äquivalent dazu für PS in Tabelle 7.2.

Schichtaufbau (in Anteilen)									
Versuchspunkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Struktur	B	B	B	A-B	A-B	A-B	A-B-A	A-B-A	A-B-A
Schicht A				0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
Schicht B	1	1	1	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
Schicht A							0,2	0,2	0,2
Rezeptur Schicht A (in Anteilen)									
PP HP640J				1	1	1	1	1	1
Rezeptur Schicht B (in Anteilen)									
PP EP240H	1	0,99	0,98	1	0,99	0,98	1	0,99	0,98
Hydrocerol 591		0,01			0,01			0,01	
Hydrocerol CF20E			0,02			0,02			0,02
Dichte [g/cm ³]	0,90	0,87	0,82	0,90	0,85	0,78	0,91	0,78	0,72
Gewichtsreduktion in %		4,5	10,4		16,7	27,2		7,2	16,1

Tabelle 7.1: Rezepturen der geschäumten PP-Schaumfolien mit Angabe des Versuchspunkts

Schichtaufbau (in Anteilen)									
Versuchspunkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Struktur	B	B	B	A-B	A-B	A-B	A-B-A	A-B-A	A-B-A
Schicht A				0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
Schicht B	1	1	1	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
Schicht A							0,2	0,2	0,2
Rezeptur Schicht A (in Anteilen)									
GPPS 158N				0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
HIPS ESCRimo				0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Rezeptur Schicht B (in Anteilen)									
GPPS 158N	0,5	0,495	0,4935	0,5	0,495	0,4935	0,5	0,495	0,4935
HIPS ESCRimo	0,5	0,495	0,4935	0,5	0,495	0,4935	0,5	0,495	0,4935
Hydrocerol 583		0,01	0,013		0,01	0,013		0,01	0,013
Dichte [g/cm ³]	1,04	0,60	0,57	1,04	0,77	0,74	1,04	0,71	0,68
Gewichtsreduktion in %		42,3	45,0		25,6	29,0		31,4	34,3

Tabelle 7.2: Rezepturen der geschäumten PS-Schaumfolien mit Angabe des Versuchspunkts

Das Aufschäumen der Folien verändert deren Eigenschaften, sodass in einem weiteren Schritt die Folien hinsichtlich der Oberflächenrauheit, der maximalen Durchstoßkraft sowie der Schaumstruktur analysiert wurden. Die Ergebnisse sollen bei der Auswahl eines Schichtaufbaus sowie der maximal möglichen Gewichtseinsparung bei vertretbarer Verringerung der Eigenschaften unterstützen. In der weiteren Darstellung der Ergebnisse gibt das Symbol „+“ die ungeschäumte Folie mit einer hohen Dichte, das Symbol „o“ Folien mit geringen Aufschäumgrad und das Symbol „-“ den höchsten Aufschäumgrad an.

Oberflächenrauheit

Bei Verpackungsanwendungen ist die Haptik der Folien von Bedeutung. Durch die sich bildenden Schaumzellen verschlechtert sich meistens die Oberflächenstruktur und wird mit zunehmenden Aufschäumgrad rauer. Durch die Einkapselung der Schaumschicht durch kompakte

Außenschichten (Schichtaufbau ABA) kann dies vermieden werden. In Abb. 7.2 sind die Rauheitswerte R_z (links) und R_a (rechts) der PP-Schaumfolien im Vergleich zwischen den Schichtaufbau A, AB (auf der geschäumten Seite gemessen) und ABA aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass unabhängig von den Schichtaufbauten die Rauheit mit dem Aufschäumgrad zunimmt. Das liegt daran, dass der gebildete Schaum sich durch die kompakte Struktur durchdrücken kann und unebene Stellen auf der Folienoberfläche verursacht. Bei der Monofolie ist ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen dem Aufschäumgrad und der Rauheit festzustellen. Der R_z -Wert steigt von 2,78 μm auf 16,99 μm . Bei dem Schichtaufbau ABA zeigt die Variation des Aufschäumgrads keinen Einfluss auf den Rauheitswert. Durch das Aufschäumen wird sofort ein Rauheitswert von 17,47 μm bzw. 17,19 μm erreicht, wobei dieser Wert sogar leicht über der Monofolie liegt.

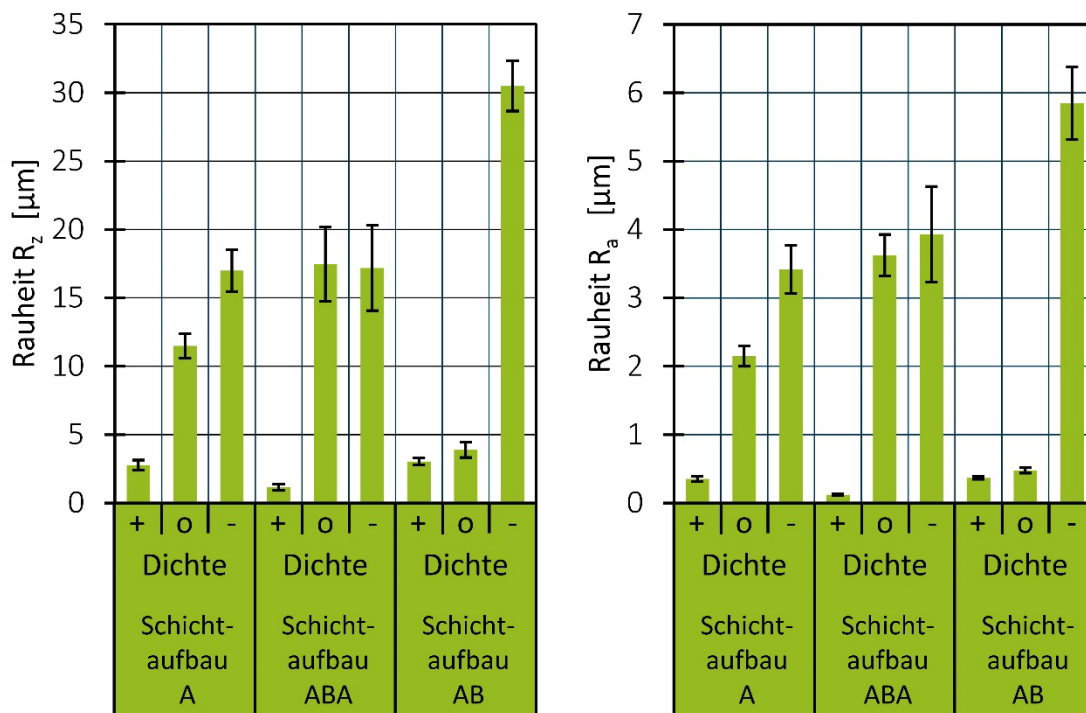


Abb. 7.2: Oberflächenrauheit R_z und R_a für die PP-Schaumfolie

Bei der Betrachtung der PS-Schaumfolien ergaben sich leicht andere Ergebnisse. In Abb. 7.3 sind die beiden Rauheitswerte R_z und R_a aufgetragen. Für die kompakte Monofolie wird ein Rauheitswert R_z von 3,2 μm erreicht. Bei beiden Dichtereduktionen ergibt sich eine enorme Erhöhung der Rauheit mit einem R_z -Wert von 60 μm . Bei dem Schichtaufbau ABA ist der gleiche Effekt zu erkennen. Jedoch kann die Einkapselung mit kompakten Schichten beim niedrigen Aufschäumgrad (R_z -Wert: 15,09 μm) sowie hohem Aufschäumgrad (R_z -Wert: 12,63 μm) die Verschlechterung der Oberfläche verbessern.

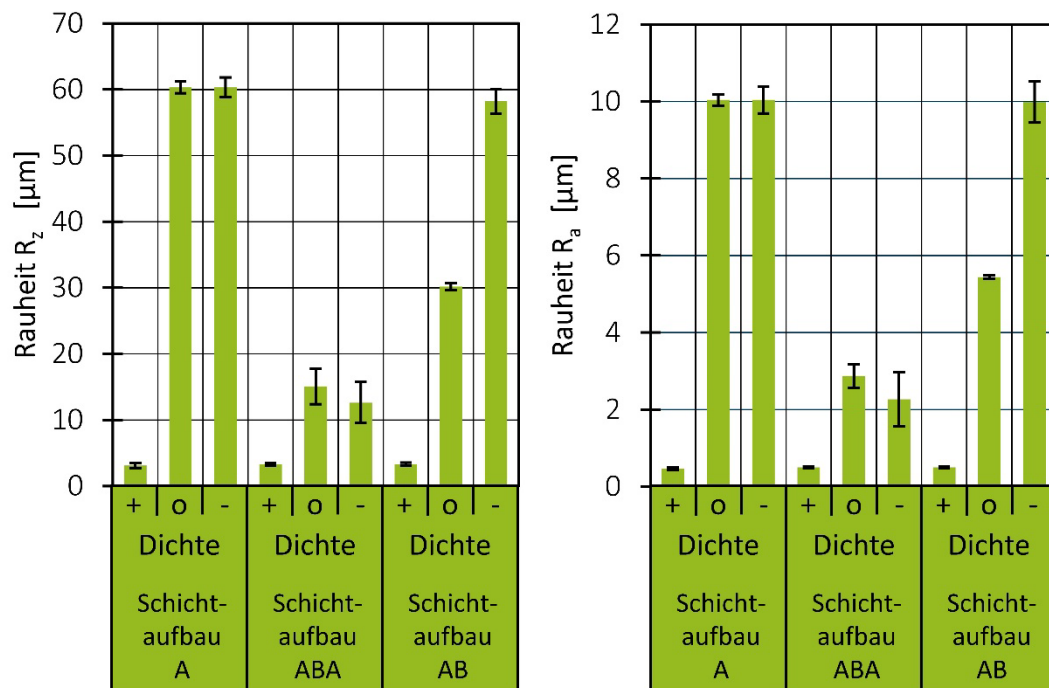


Abb. 7.3: Oberflächenrauheit R_z und R_a für die PS-Schaumfolie

Bei den geschäumten PS-Folien ist auffällig, dass der Grad des Aufschäumen keinen Einfluss auf die Rauheit nimmt. Bei der PP-Folie ist dies nur beim Schichtaufbau ABA der Fall. Dahingegen erzielt die Einkapselung der geschäumten Schicht nur bei der PS-Folie eine Verbesserung der Oberflächenrauheit. Dies ist wahrscheinlich auf den sehr hohen Schäumgrad bzw. Dichtereduktion bei der PS-Folie zurückzuführen.

Maximale Durchstoßkraft

Eine weitere wichtige Folieneigenschaft ist die mechanische Widerstandskraft bei punktueller Belastung der Folien. Um die Folien in einem möglichst verarbeitungsnahen Szenario zu testen, wurden die PP- und PS-Schaumfolien mittels Durchstoßversuch gemessen. Dieser Versuch zeichnet sich durch einen biaxialen Belastungsfall aus. Für den Vergleich der Aufschäumgrade und Schichtaufbauten wurde die maximale Durchstoßkraft herangezogen. In Abb 7.4 (PP) und 7.5 (PS) sind die maximalen Durchstoßkräfte für die drei Schichtaufbauten (A/AB/ABA) und Aufschäumgrade (kompakt/gering/hoch) aufgetragen. Bei der PP-Folie lässt sich bei der Monofolie sowie bei dem Schichtaufbau ABA eine nahezu lineare Abnahme der Durchstoßkraft erkennen. Auffällig dabei ist, dass die Abnahme bei der Monofolie weniger stark verläuft. Die Zweischichtfolie AB erreicht bei einem geringen Aufschäumgrad fast dieselbe Durchstoßkraft wie die kompakte Folie. Erst beim hohen Aufschäumgrad fällt die Durchstoßkraft auf 291 N im Vergleich zur kompakten Folie mit 773 N.

Die geschäumte PS-Folien zeigen im Hinblick auf die Durchstoßfestigkeit ein anderes Bild. Über alle drei Schichtaufbauten hinweg, setzt eine deutliche Erniedrigung der Durchstoßkraft mit Einbringung einer Schaumstruktur ein. Dabei verringert sich bei der Monofolie die maximale Durchstoßkraft von 486 N auf 75 N, bei der AB-Folie von 445 N auf 221 N und bei der ABA-Folie von 445 N auf 139 N.

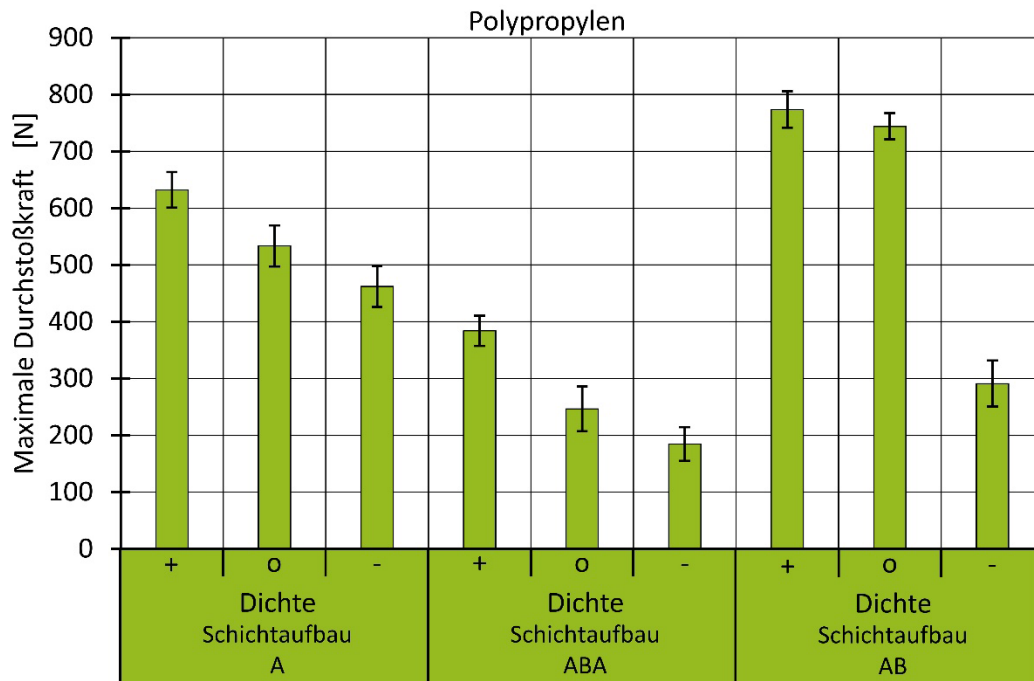


Abb. 7.4: Maximale Durchstoßkraft für die PP-Schaumfolie

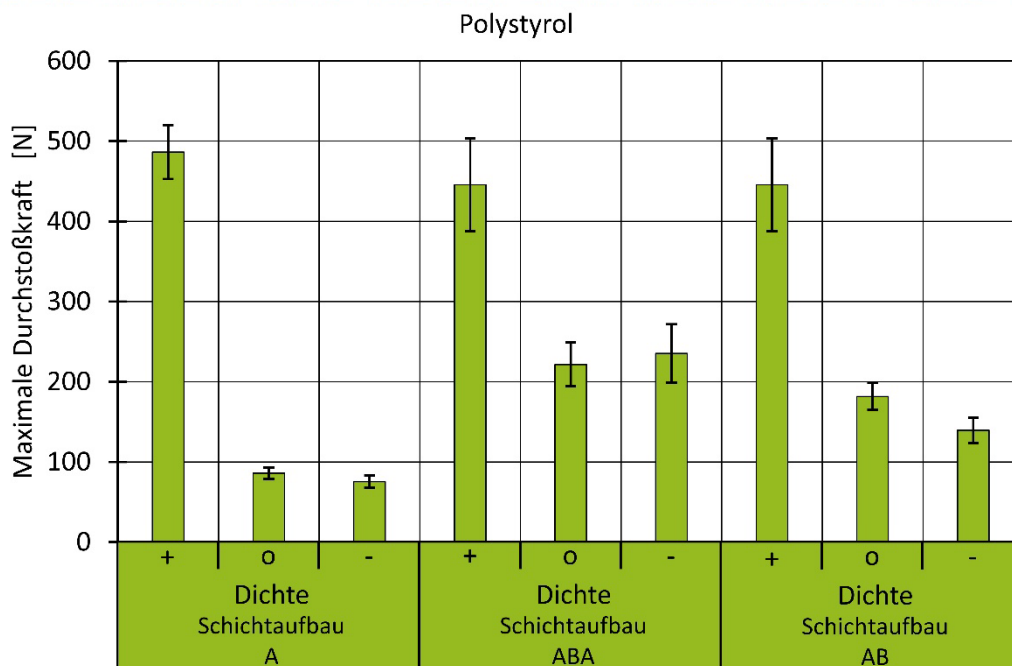


Abb. 7.5: Maximale Durchstoßkraft für die PS-Schaumfolie

Schaummorphologie

Die hergestellten CT-Scans der Folienhalbzeuge ermöglichten die Auswertung der Kennwerte mittlere Zellgröße sowie Zellanteil. Besonders wichtig ist hierbei der Kennwert Zellgröße, da dieser mit den mechanischen Eigenschaften korreliert. Kleine Zellen führen zu guten mechanischen Eigenschaften, während große Zellen die Mechanik verschlechtern. Um kompakte Materialien durch geschäumte Produkte ersetzen zu können, ist das Einhalten der geforderten Eigenschaften das wichtigste Kriterium.

In Abb. 7.6 werden die mittlere Zellgröße sowie der Zellanteil für PP über verschiedene Schichtaufbauten und Dichteinsparungen dargestellt. Bei allen drei Schichtaufbauten ergibt sich durch die Zugabe eines höheren Anteils an Treibmitteln bzw. Gewichtsreduktion ein Anstieg der Zellgröße. Die größten Zellen mit einem Mittelwert von 1,6 mm treten bei der 3-Schichtfolie mit der geringsten Dichte auf. Durch einen höheren Anteil an Treibmittel entsteht einerseits ein größerer Gasdruck innerhalb der Schmelze, was zu größeren Zellen führt. Andererseits wird durch einen höheren Treibmittelanteil die Viskosität der Schmelze weiter abgesenkt, wodurch ebenfalls die Schmelzefestigkeit sinkt und größere Zellen entstehen können.

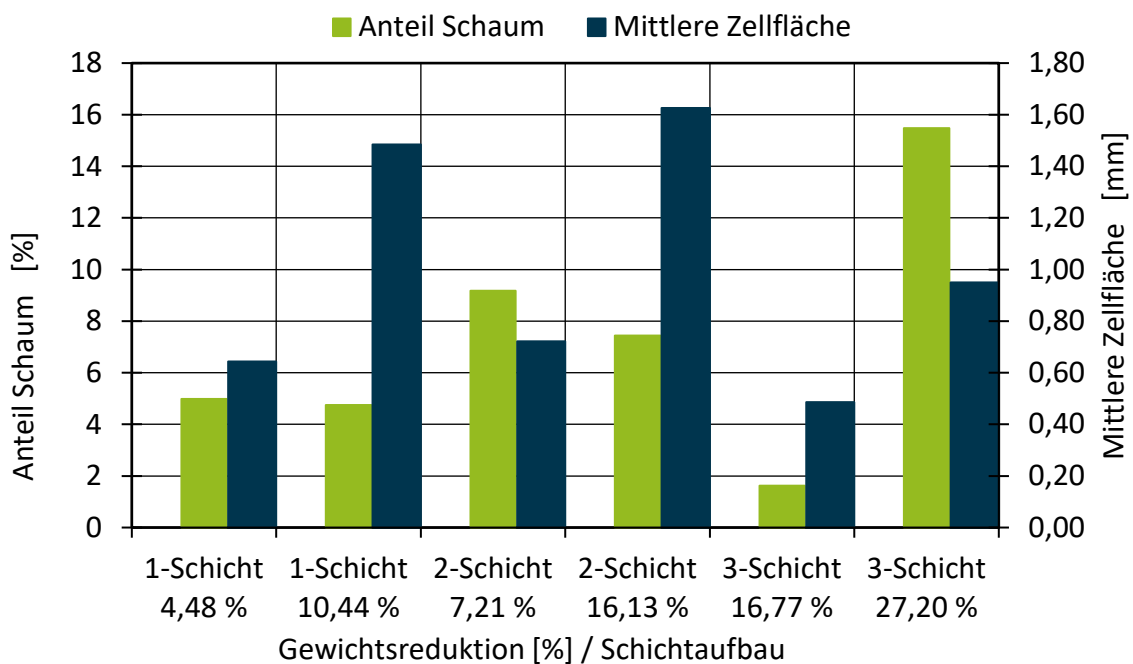


Abb. 7.6: Schaummorphologie der PP-Schaumfolie

Bei Betrachtung des Zellanteils zeigt sich bei der 1-Schicht- sowie 3-Schichtfolie kein signifikanter Unterschied im Vergleich zu den Erwartungen. Dies ist auf die Größe der Zellen zurückzuführen. Kleine Zellen weisen bei gleicher Fläche mehr Zellwände auf, was zu einer höheren Dichte führt. Eine Erhöhung des Schaumanteils kann durch einen höheren Druckgradienten in der Extrusionsdüse erreicht werden, was jedoch in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt

wurde (Durchsatz = konstant). Bei der 2-Schicht Folie ist dieser Zusammenhang nicht zu erkennen. Hier führt ein höherer Schaumgrad zu einer größeren mittleren Zellgröße sowie einem höheren Schaumanteil. Ein beispielhafter CT-Scan der 1-Schicht PP-Folie ist in Abb. 7.7 zu sehen. Hier lassen sich auch die größeren Zellen bei höheren Aufschäumgrad erkennen.

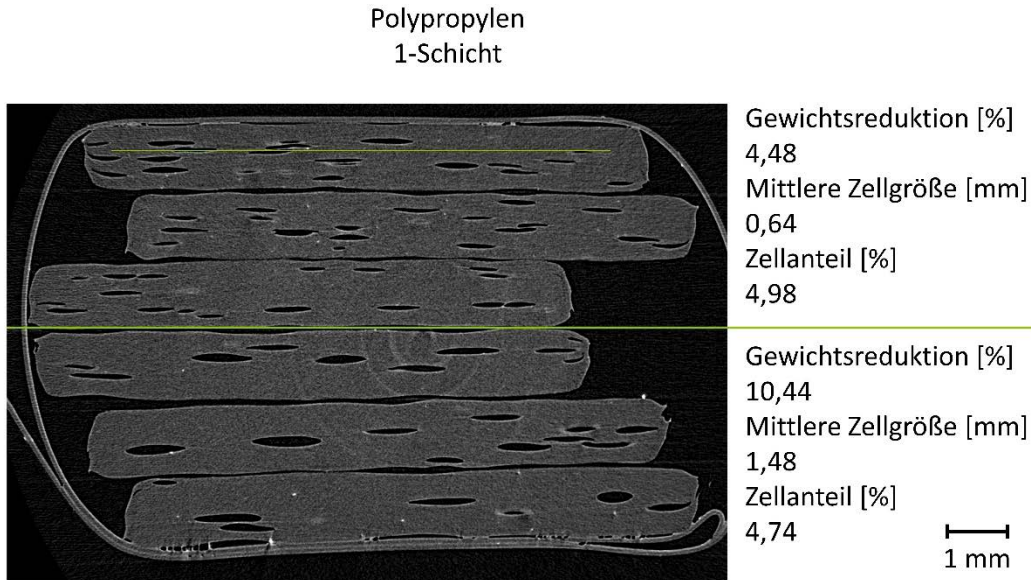


Abb. 7.7: Beispielhafte CT-Scans der PP-Schaumfolie

Die Ergebnisse der PS-Folien sind in Abb. 7.8 dargestellt. Es konnten keine klaren Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Schichtaufbauten festgestellt werden. Es lassen sich keine klaren Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Schichtaufbauten feststellen. Der Schaumanteil bleibt nahezu konstant über alle Dichteeinsparungen hinweg (25,85 % - 45,00 %). Im Gegensatz dazu schwankt die mittlere Zellgröße um etwa 20 % von 0,36 - 0,43 mm. Allerdings ist die Zellgröße deutlich geringer als bei der PP-Folie.

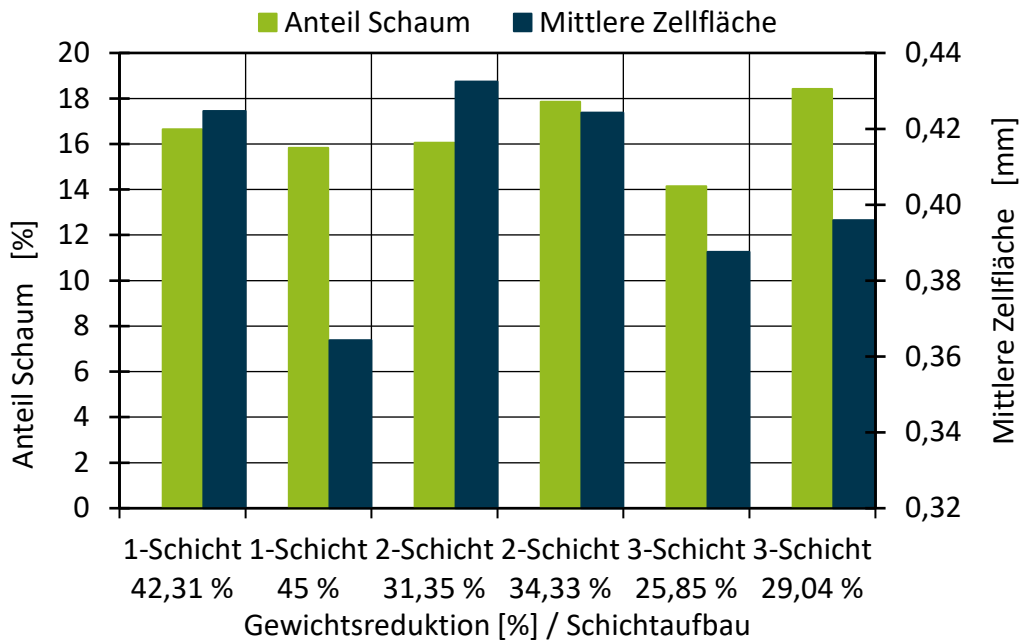


Abb. 7.8: Schaummorphologie der PS-Schaumfolie

Generell gibt es große Unterschiede in Bezug auf die Oberflächen-, Mechanik- und Schaumeigenschaften innerhalb der beiden Materialklassen. Die Eigenschaften können durch Variation des Schichtaufbaus und des Schäumgrads bzw. der Dichteinsparung eingestellt werden, um eine Modifikation der Halbzeuge für die Weiterverarbeitung im Thermoformen zu ermöglichen. Es ist zu beachten, dass das Aufschäumen die Oberflächenqualität negativ beeinflusst. Insbesondere höhere Schäumgrade führen zu einer höheren Oberflächenrauheit. Bei beiden Materialien wird im Durchstoßversuch eine Reduktion der Mechanik erzielt, was auf die Substitution von kompaktem Kunststoff durch Schaumzellen zurückzuführen ist. Bei der PP-Folie nimmt die Dichte linear ab, während bei der PS-Folie ein konstanter, hoher Abfall festzustellen ist. Es konnte keine eindeutige Korrelation zwischen der erzielten Schaummorphologie und dem Schichtaufbau sowie dem Aufschäumgrad festgestellt werden.

8 HERSTELLUNG VON FORMTEILEN AUS GESCHÄUMTEN HALBZEUGEN IM THERMOFORMVERFAHREN

8.1 Untersuchungen zum Einfluss des Umformvorgangs und des Schichtaufbaus auf die Formteileigenschaften

Um den Einfluss verschiedener Stempelgeometrien auf die WDV zu beurteilen, werden vier verschiedene Vorstreckstempel mit unterschiedlichen Stempelwinkeln und -radien ($4^\circ R3$, $8^\circ R3$, $4^\circ R9$ und $8^\circ R9$) hergestellt. Abb. 5.2 visualisiert die Geometrien der eingesetzten Vorstreckstempel. Jede hergestellte Schaumfolie gemäß des Versuchsplans nach Tab. 7.2 und Tab. 7.3 wird entsprechend den Beschreibungen nach Kap. 5.4 fünfmalig mit jedem der beschriebenen Stempel zu einem Becherformteil umgeformt. Pro Versuchspunkt liegen somit insgesamt 20 Formteile zur Verfügung, welche nachfolgend mit verschiedenen Analysemethoden untersucht werden, um den Einfluss des Materials (PS bzw. PP), der Gewichtsreduktion sowie der Stempelgeometrie auf die Qualität der Formteile beurteilen zu können. Ziel ist die Substitution von kompakten Halbzeugen durch geringfügig geschäumte Schäume (Schwerschaumfolie).

8.1.1 Einfluss auf die Wanddickenverteilung

Im Folgenden wird der Einfluss des Materials, des Schichtaufbaus sowie der Gewichtsreduktion des Halbzeugs auf die WDV dargelegt. Aufgrund einer übersichtlichen Darstellung werden die Ergebnisse je Schichtaufbau hinsichtlich der erzielbaren Homogenität der WDV dargestellt und diskutiert. Die detaillierten Verläufe der WDV aller Vorstreckstempel an den jeweiligen Messpunkten (MP 1 bis MP 14) sind dem Anhang in Kap. 15.2 und Kap. 15.3 zu entnehmen. Weiterhin sei darauf hingewiesen, dass das Analyseziel einer hohen Homogenität der WDV des Formteils hinsichtlich einer Minimierung des Materialeinsatzes (minimale Halbzeugdicke) zielführend ist, jedoch möglicherweise eine inhomogene WDV beispielsweise für einen hohen Topload notwendig ist.

1-Schicht-Folie:

Abb. 8.1 zeigt die erzielte Wanddickendifferenz Δd unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie. Es ist ersichtlich, dass sowohl das kompakte Halbzeug ($\Delta d = 0,15$ mm) als auch das Halbzeug mit einer Gewichtsreduktion von 45 % ($\Delta d = 0,17$ mm) unter Einsatz des $8^\circ R9$ -Stempel zu Form-

teilen mit der höchsten Homogenität umgeformt werden können. Bei einer Gewichtsreduktion von 42,31 % wird die geringste Abweichung der gemessenen Wanddicken im Formteil bei Verwendung des 8°R3-Stempels mit $\Delta d = 0,14$ mm erzielt. Auch der 8°R9-Stempel führt mit einer Wanddickendifferenz von $\Delta d = 0,17$ mm zu einer hohen Homogenität.

Es lässt sich formulieren, dass Stempelgeometrien mit einer geringen Stempelbodenoberfläche (8°-Stempel) die zur höchsten Homogenität der WDV führen. Stempelgeometrien mit einer hohen Oberfläche am Stempelboden führen dagegen zu einer erhöhten Formteihinomogenität.

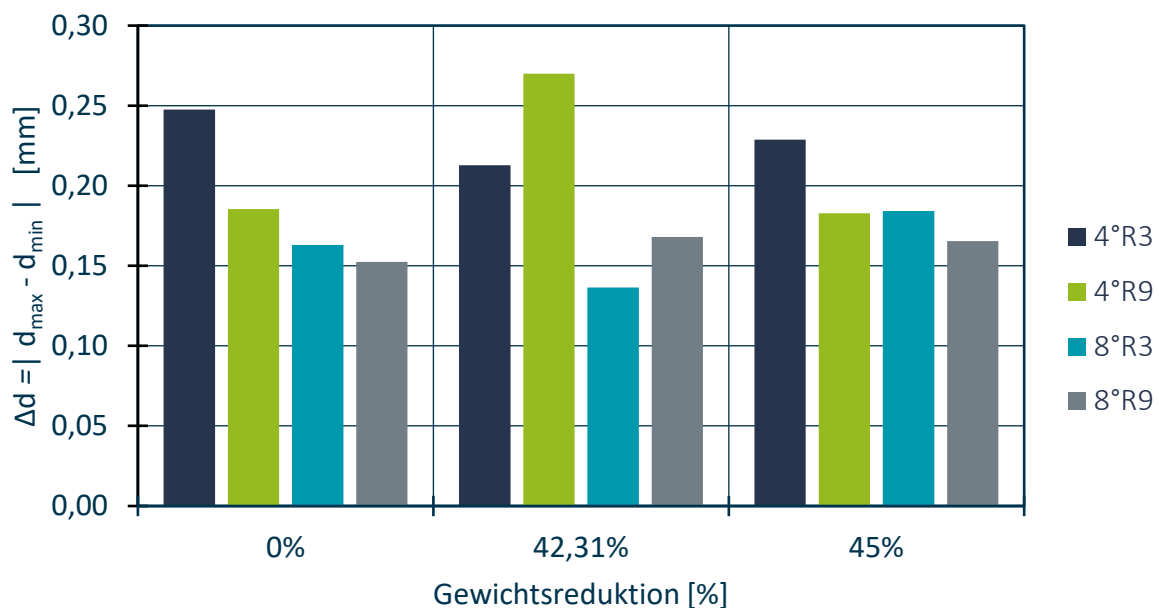


Abb. 8.1: Erzielte Wanddickendifferenz Δd unter Einsatz 1-Schicht-Folie aus Polystyrol in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie

Dies führt zur Hypothese, dass die Inhomogenität der WDV unter Einsatz der 4°-Stempel auf eine Materialansammlung an bestimmten Stellen des Formteils zurückzuführen ist. Abb. 8.2. zeigt exemplarisch die Wanddickenverteilung unter Einsatz der vier Vorstreckstempel und einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 42,31 %. Es ist ersichtlich, dass die Wandstärken bei Verwendung der 4°-Stempel zwischen MP 8 und MP 11 höher sind als bei den 8°-Stempeln. Die formulierte Hypothese kann damit als zutreffend bezeichnet werden. Bei den Materialansammlungen handelt es sich um „Schreckmarken“, welche auf eine schlagartige Abkühlung des Halbzeugs durch den Kontakt dessen Kontakt mit dem Halbzeug zurückzuführen sind.

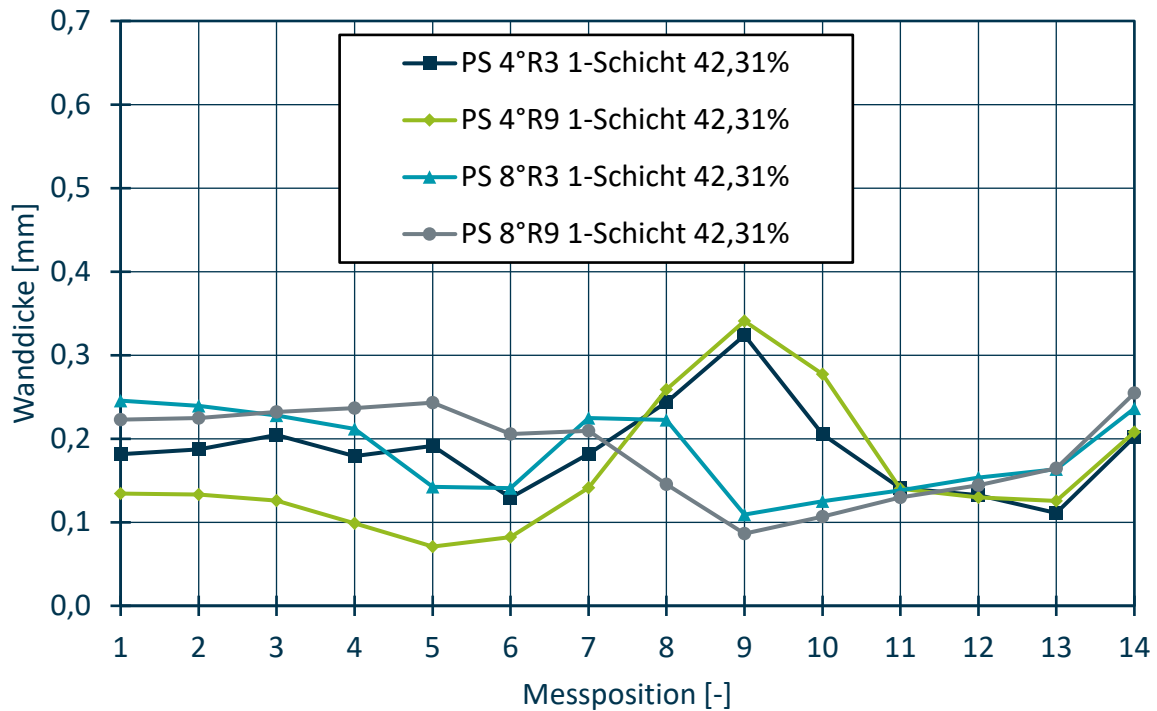


Abb. 8.2: WDV unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 42,31 %

Es lässt sich insgesamt festhalten, dass die Homogenität der Formteile unter Einsatz geschäumter Halbzeuge ohne Anpassung der Stempelgeometrie tendenziell abnimmt. Durch die Anpassung der Stempelgeometrie kann die Homogenität der Formteile jedoch auf ein ähnliches Niveau wie beim kompakten Halbzeug eingestellt werden.

Abb. 8.3 zeigt die erzielte Wänddickendifferenz Δd unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie. Es ist ersichtlich, dass analog zum kompakten Halbzeug aus Polystyrol (vgl. Abb. 8.1) unter Einsatz des 8°R9-Stempels die höchste Homogenität der Formteile hinsichtlich der WDV erzielt werden kann ($\Delta d = 0,19$ mm). Ein anderes Verhalten zeigt sich beim Einsatz geschäumter Halbzeuge (4,48 % und 10,44 % Gewichtsreduktion), bei welchen die geringste Abweichung der Wänddicken mit dem 4°R9-Stempel erzielt werden kann. Es wird deshalb vermutet, dass sich der Verstreckwiderstand des Materials durch die eingebrachte Schaumstruktur im Vergleich zum kompakten Halbzeug ändert. Der 4°R9-Stempel weist im Vergleich zu den anderen eingesetzten Stempels die geringste Stempelbodenberfläche auf.

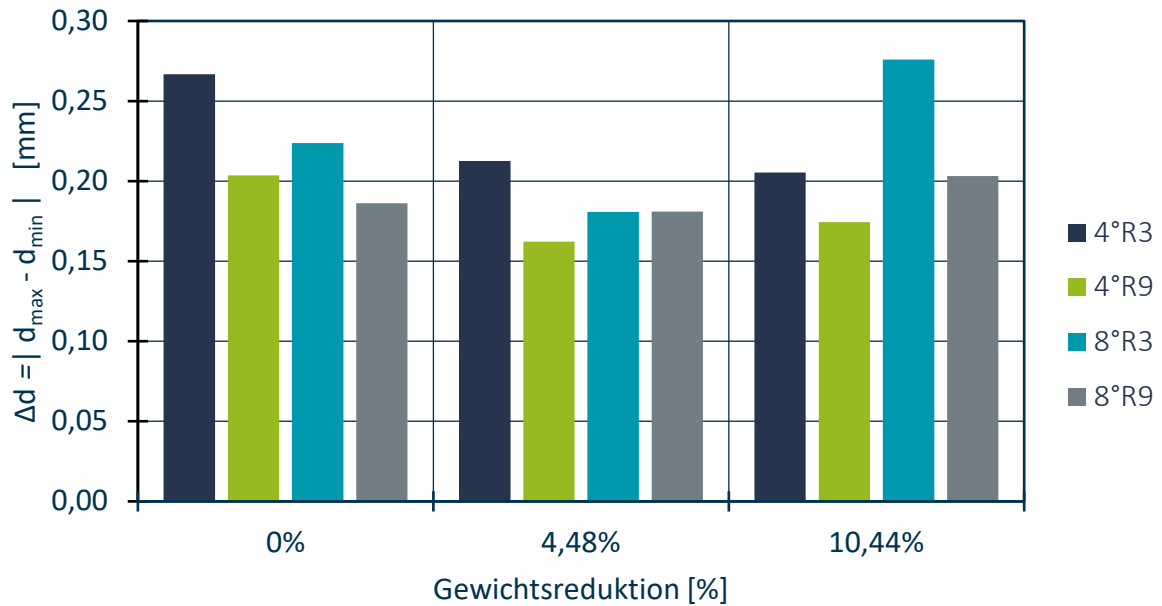


Abb. 8.3: Erzielte Wanddickendifferenz Δd unter Einsatz 1-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie

Abb. 8.4. zeigt exemplarisch die Wanddickenverteilung unter Einsatz der vier Vorstreckstempel und einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 10,44 %.

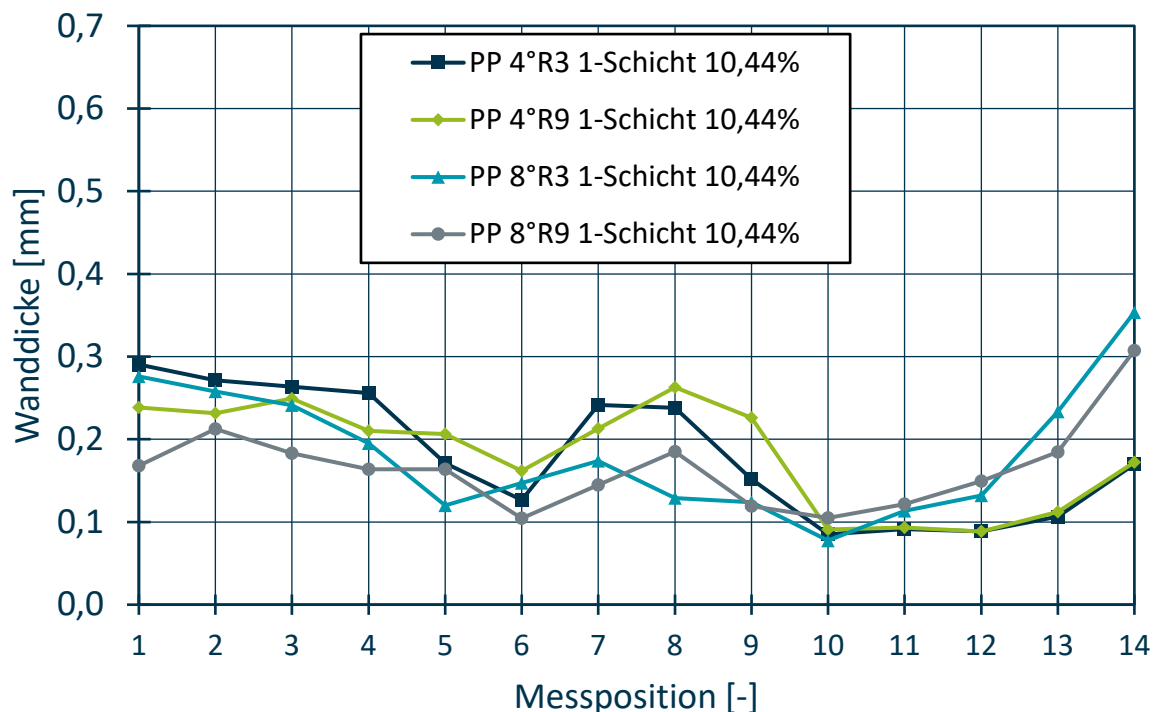


Abb. 8.4: WDV unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus Polypropylen in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 10,44 %

Es wird deutlich, dass sich durch den 4°R9-Stempel wiederum Schreckmarken im Bereich des Übergangs zwischen Becherboden und Becherschräge (MP 7 bis MP 10) ausbilden, wodurch sich eine geringe Wanddicke an der Becherschräge ausbildet. Insgesamt ist der Einsatz der 8°-Stempel vorteilhaft für die Vermeidung von Schreckmarken bei der Verarbeitung von geschäumter 1-Schicht-Folie aus PS und PP.

2-Schicht-Folie:

Die 2-Schicht-Folien bestehen gemäß Tab. 7.2 und Tab. 7.3 bei beiden Grundmaterialien (PS und PP) zu je 70 % aus einer geschäumten Schicht und zu 30 % aus einer kompakten Deckschicht. Die kompakte Deckschicht soll so ein einwandfreies Erscheinungsbild auf der Außenseite des Formteils hinsichtlich einer glatten Oberfläche und einer glatten Haptik ermöglichen. Auch können die mechanischen Eigenschaften durch die kompakte Deckschicht möglicherweise verbessert werden. Die Umformung erfolgt deshalb in der Ausrichtung der geschäumten Seite zum Vorstreckstempel. Es wird die Hypothese aufgestellt, dass sich durch das 2-Schicht-System ein verändertes Umformverhalten ausbildet, da die geschäumte Schicht einen geringeren Verstreckwiderstand aufweist als die kompakte Deckschicht.

Abb. 8.5 zeigt die erzielte Wanddickendifferenz Δd unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie. Es ist ersichtlich, dass unter Einsatz des 8°R9-Stempels die höchste Homogenität der WDV sowohl bei einer Gewichtsreduktion von 21,35 % ($\Delta d = 0,19$ mm) als auch bei 34,33 % ($\Delta d = 0,17$ mm) erzielt werden kann. Auch bei der Umformung der 1-Schicht-Folie (vgl. Abb. 8.1) ist der 8°R9-Stempel für eine homogene WDV erforderlich, weshalb die formulierte Hypothese zunächst nicht bestätigt werden kann. Trotz eines erhöhten Anteils kompakten Materials am Halbzeug (30 %) ist der Verstreckwiderstand des frei verstreckbaren Materials weiterhin gering, sodass die Oberfläche des Stempelbodens hoch gewählt werden muss, um ausreichend Material in tieferliegende Bereiche der Kavität und damit in den Formteilboden zu verbringen.



Abb. 8.5: Erzielte Wändickendifferenz Δd unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie

Die geringste Homogenität der WDV kann wiederum unter Einsatz der 4°-Stempel erzielt werden. Dies lässt analog zur 1-Schicht-Folie die Vermutung zu, dass die Oberfläche des Stempel zu gering ist, um ausreichend Material in den Becherboden zu verbringen.

Abb. 8.6 zeigt exemplarisch die WDV unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 34,33 %. Es wird deutlich, dass durch den Einsatz der 8°-Stempel im Vergleich zu den 4°-Stempeln das Material homogener in die Bodenbereiche des Bechers verbracht werden kann. Gemäß der WDV der 1-Schicht-Folie sind Schreckmarken im Übergangsbereich zwischen Becherboden und -Schräge bzw. auf der Becherschräge zu beobachten.

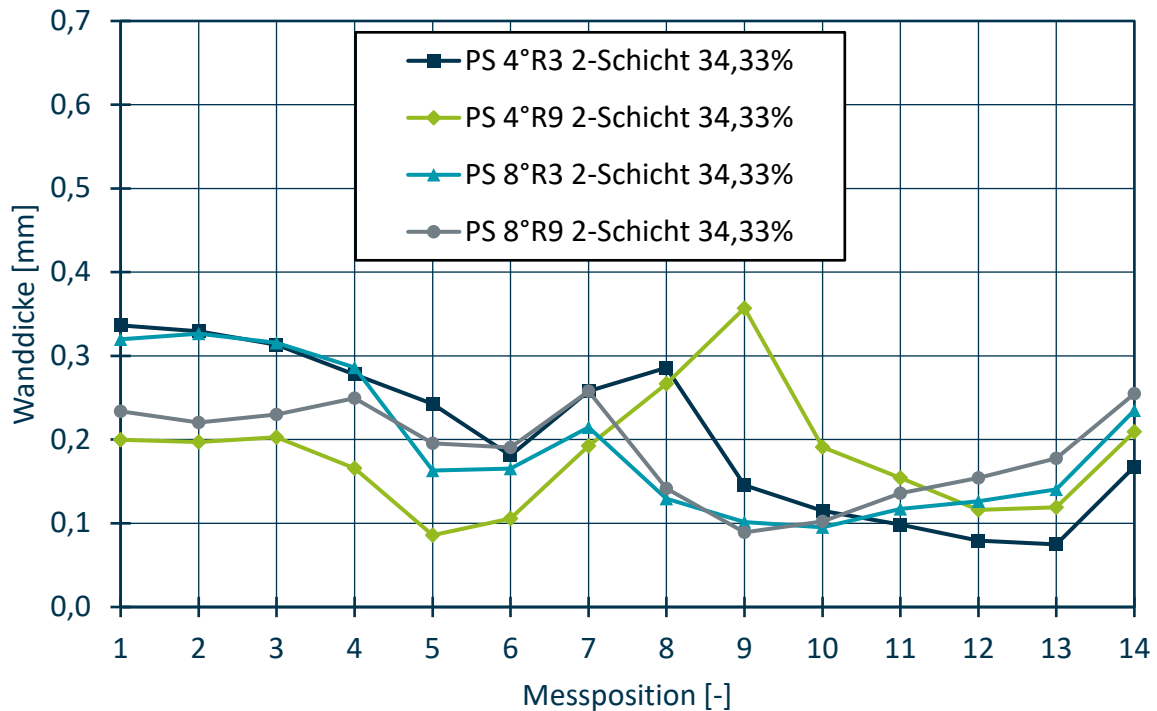


Abb. 8.6: WDV unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 34,33 %

Abb. 8.7 ist die erzielte Wanddickendifferenz Δd unter Einsatz 2-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie dargestellt. Analog zum Verhalten der 1-Sicht-Folie aus PP zeigt sich ein gänzlich anderes Materialverhalten im Vergleich zur 2-Schicht-Folie aus PS. Bei der kompakten 2-Schicht-Folie (0 % Gewichtsreduktion) zeigt sich die homogenste WDV ($\Delta d = 0,17$ mm) unter Einsatz des 4°R9-Stempels, welcher eine vergleichsweise hohe Oberfläche zum Halbzeug aufweist. Auch bei einer Gewichtsreduktion von 7,21 % sowie 16,13 % führt der 4°R9-Stempel mit $\Delta d = 0,21$ mm bzw. $\Delta d = 0,18$ mm zu der gleichmäßigsten WDV. Dies lässt in Zusammenhang mit den Ergebnissen nach Abb. 8.5 den Schluss zu, dass der Verstreckwiderstand in erster Linie vom Material abhängig ist. Nachrangig wird die Homogenität der WDV durch die Gewichtsreduktion bestimmt. Durch Auswahl des geeigneten Stempels ist es somit möglich, das generelle Materialverhalten hinsichtlich einer homogenen WDV zu beeinflussen. Der bei PS geeignetste Stempel (4°R3) führt bei PP zu der geringsten Homogenität.

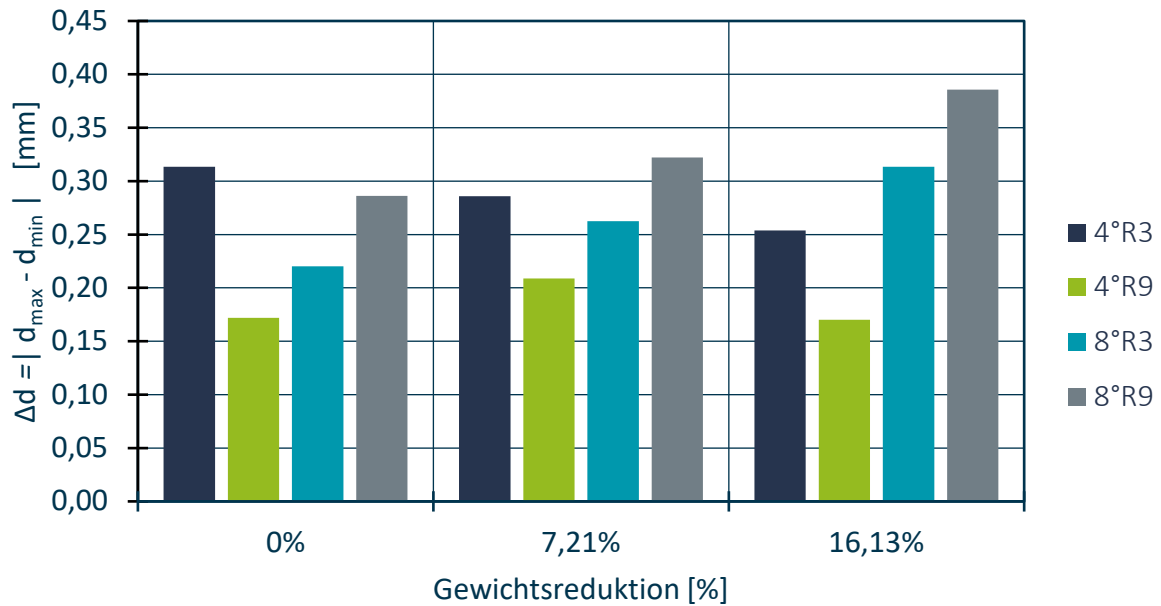


Abb. 8.7: Erzielte Wanddickendifferenz Δd unter Einsatz 2-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie

Abb. 8.8 zeigt exemplarisch WDV unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 7,21 %. Es wird deutlich, dass unter Einsatz der 4°-Stempel tendenziell am meisten Material in den Bodenbereich des Formteils verbraucht werden kann. Diese weisen im Vergleich zu den 8°-Stempeln eine höhere Oberfläche auf, wodurch mehr Material in tiefergelegene Kavitätsbereiche verbraucht werden kann. Weiterhin kommt es wiederum bei Verwendung der 4°-Stempel zu einer Ausbildung von Schreckmarken (vgl. MP 7 und MP 8). Trotz der Schreckmarke am MP 8 ist die homogenste WDV mit dem 4°R9-Stempel zu erzielen.

Größere Unterschiede ergeben sich bei den 8°-Stempeln. Während der 8°R9-Stempel einen dünnen Becherboden ausbildet, ist dieser beim 8°R3-Stempel als dick zu bezeichnen. Erstmals hat der Stempelradius demnach einen signifikanten Einfluss auf die WDV. Durch den höheren Kantenradius des 8°R9-Stempels kann mehr Material während des Verstreckvorgangs vom Stempelboden über den Stempelradius in frei verstreckbare Bereiche abgleiten.

Das Beispiel macht deutlich, dass unter Verwendung der 4°-Stempel zwar die höchste Homogenität der WDV erzielt werden kann, es jedoch gleichzeitig zu einer Ausprägung von Schreckmarken kommen kann. Die definierte Homogenität Δd sollte deshalb nicht ausschließlich zur Auswahl einer geeigneten Stempel-Halbzeug-Kombination herangezogen werden.

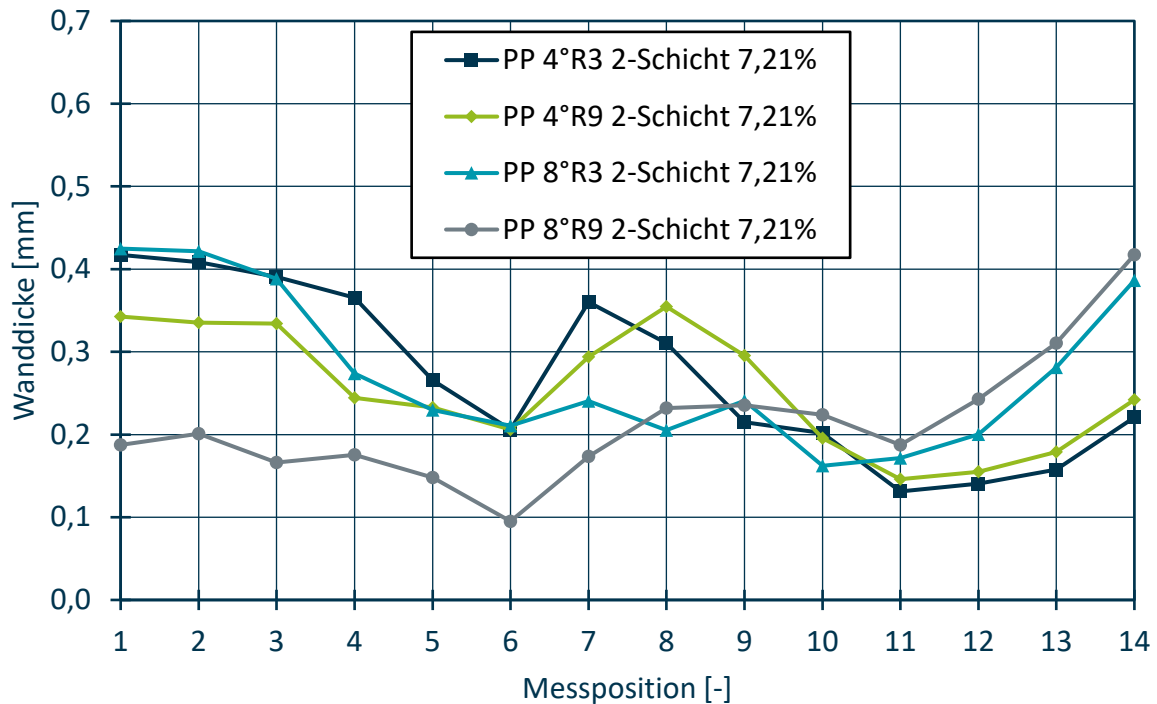


Abb. 8.8: WDV unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 7,21 %

3-Schicht-Folie:

Die untersuchte 3-Schicht-Folie besteht für PS und PP gemäß Tab. 7.2 und Tab. 7.3 aus einer geschäumten Innenschicht (60 %), welche beidseitig von einer kompakten Außenschicht (jeweils 20 %) umschlossen wird. Die 3-Schicht-Folie weist demnach sowohl an der Formteilaußenseite als auch an der Formteilinnenseite eine hohe optische und haptische Qualität auf. Der Vorteil einer hohen Oberflächenqualität im Inneren des Formteils liegt in der einfachen Entleerbarkeit des Füllguts im Verpackungsbereich.

Abb. 8.9 visualisiert die erzielte Wanddickendifferenz Δd unter Einsatz 3-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie.

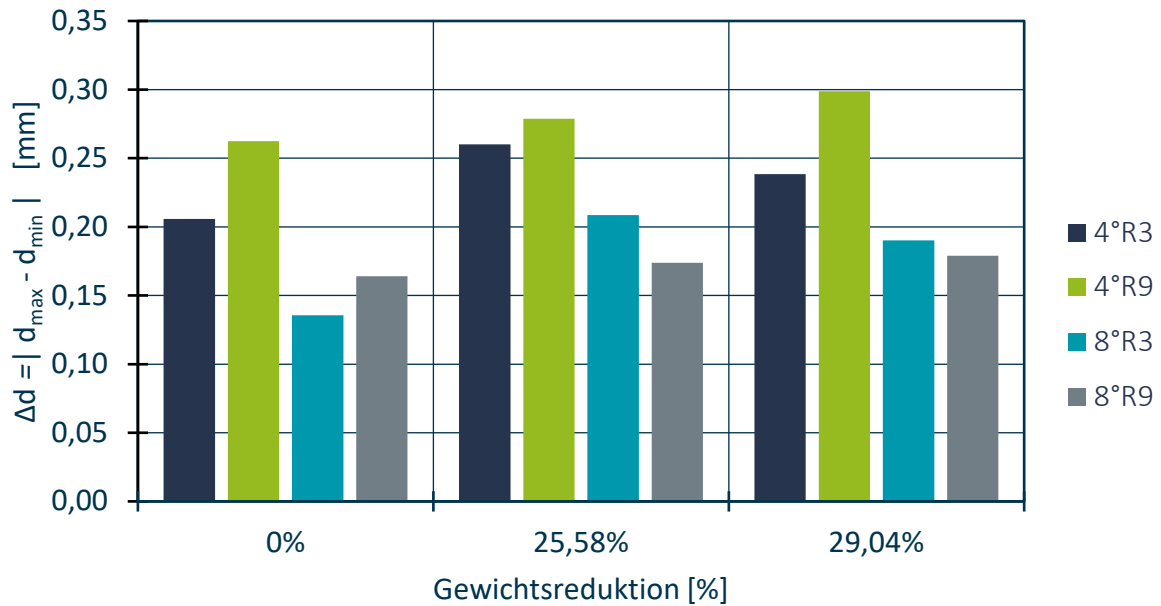


Abb. 8.9: Erzielte Wanddickendifferenz Δd unter Einsatz 3-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie

Es ist ersichtlich, dass sich beim kompakten Schichtaufbau analog zum kompakten Material des 1-Schicht-Aufbaus mit den 8°-Stempeln die homogenste WDV hergestellt werden können ($\Delta d = 0,14$ mm, 8°R3-Stempel). Auch bei einer erzielten Gewichtsreduktion von 25,58 % ($\Delta d = 0,17$ mm, 8°R9-Stempel) und 29,04 % ($\Delta d = 0,18$ mm, 8°R9-Stempel) ist der Einsatz der 8°-Stempel vorteilhaft. Es zeigt sich demnach bezüglich der Homogenität der WDV kein signifikanter Einfluss des Schaumgrades auf das Verstreckverhalten des Halbzeugs. Es lässt sich jedoch festhalten, dass die Homogenität insgesamt mit dem Schaumgrad abnimmt.

Abb. 8.10 zeigt exemplarisch die WDV unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 25,58 %. Es ist ersichtlich, dass es gemäß den Erkenntnissen der 1- und 2-Schicht-Folien zu einer Ausbildung von Schreckmarken unter Einsatz der 4°-Stempel kommt (MP 8 bzw. MP 9). Der 4°R9-Stempel bildet, aufgrund der Möglichkeit des Halbzeugs über den großen Stempelradius abzugleiten, einen dünnen Becherboden aus, während das Material beim 4°R3-Stempel im Bodenbereich des Bechers verbleibt. Es ist zu bedenken, dass der 8°R9-Stempel zwar zu der homogensten WDV führt, jedoch auch zu einer Dünnstelle des Formteils am MP 9 mit $d = 0,95$ mm führt.

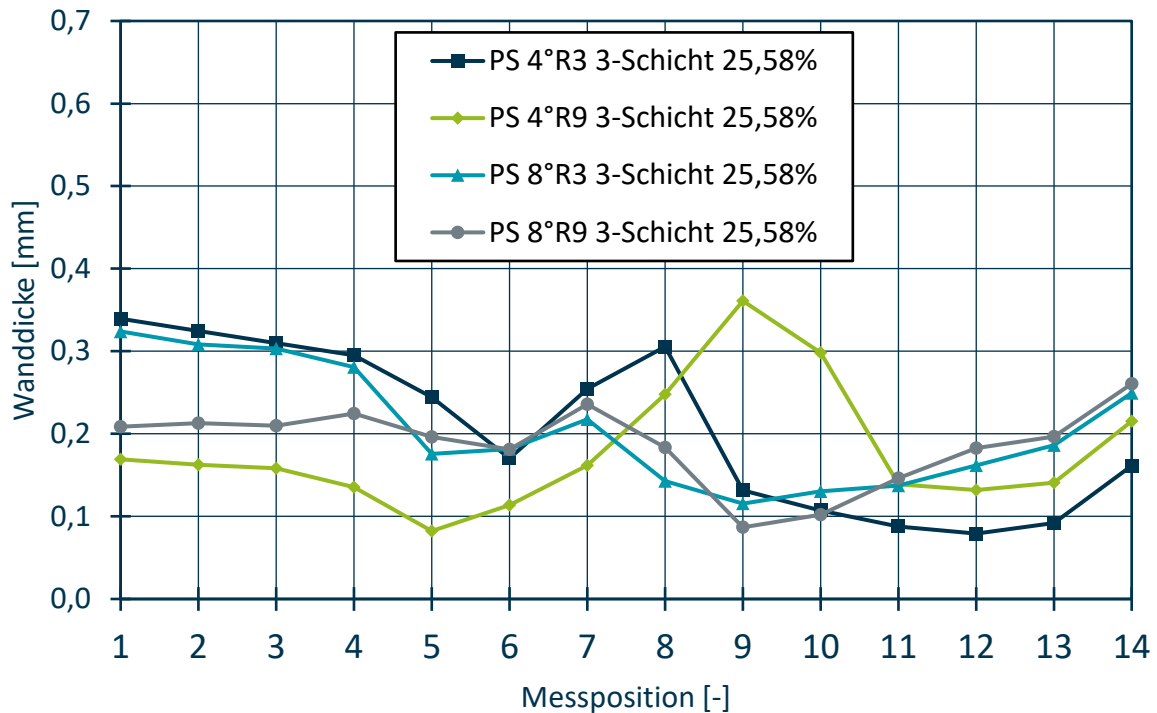


Abb. 8.10: WDV unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 25,58 %

In Abb. 8.11 ist die erzielte Wänddickendifferenz Δd unter Einsatz 3-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie dargestellt.

Im Vergleich zum Einfluss der Stempelgeometrie auf die Homogenität der WDV aus PS zeigt sich bei PP-Halbzeugen ein verändertes Verstreckverhalten der Halbzeuge. Das kompakte 3-Schicht-Halbzeug kann unter Verwendung der 8°R9-Stempel ($\Delta d = 0,14$ mm) und 4°R9-Stempel ($\Delta d = 0,15$ mm) mit der höchsten Homogenität verstreckt werden. Wird der Schaumgrad erhöht (Gewichtsreduktion 16,77 %), sind erstmalig die Stempel mit einer 4°-Schräge zielführend für eine homogene WDV. Durch die höhere Oberfläche des Stempels kann mehr Material in tieferliegende Bereiche der Kavität verbracht werden. Unter Einsatz der 8°-Stempel zeigt sich ein signifikanter Anstieg der WDV an der Becherwand, was zu einer inhomogenen WDV führt. Durch eine weitere Erhöhung der Gewichtsreduktion (27,2 %) kann eine hohe Homogenität des Formteils mit dem 4°R9-Stempel erzielt werden. Insgesamt zeigt sich bei der 3-Schichtfolie eine gute Homogenität der WDV unter Verwendung des 4°R9-Stempels.

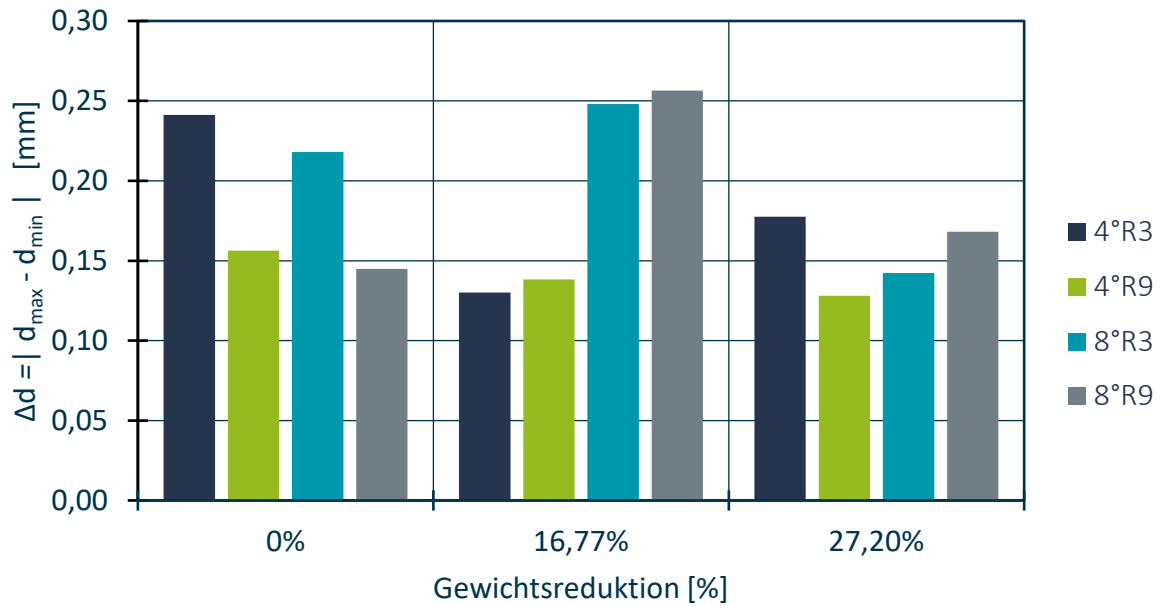


Abb. 8.11: Erzielte Wanddickendifferenz Δd unter Einsatz 3-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie

Abb. 8.12 zeigt die WDV unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 27,2 %. Es ist ersichtlich, dass die inhomogene WDV des 4°R3-Stempels auf die Ausbildung einer Schreckmarke (MP 7 bis MP 9) zurückzuführen ist. Trotz einer Materialansammlung im gleichen Messbereich bietet der 4°R9-Stempel die höchste Homogenität der WDV im Vergleich.

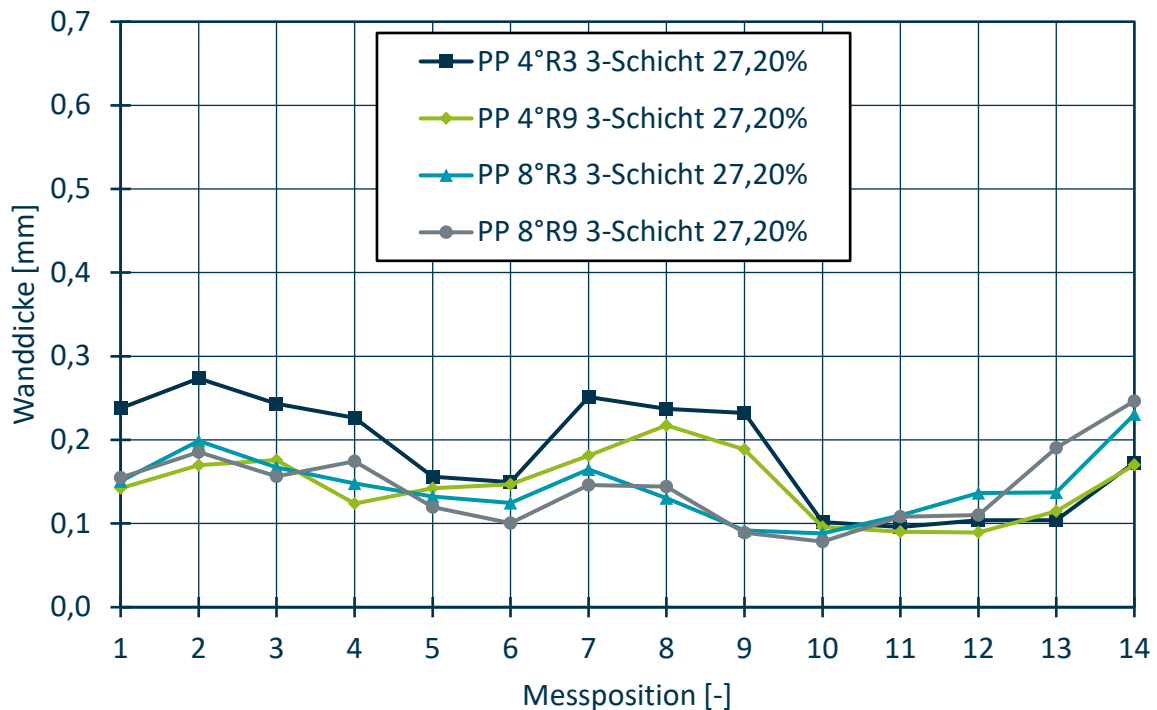


Abb. 8.12: WDV unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 27,20 %

8.1.2 Einfluss auf das Topload-Verhalten

Ein weiteres Kriterium für die Bewertung der geformten Becher ist neben der Homogenität der Wanddicke ihre mechanische Stabilität (Topload). Die Becher werden im weiteren Verlauf ihres Produktlebenszyklus für den Transport z. B. in Trays aus Pappe übereinandergestapelt. Sie müssen aus diesem Grund eine gewisse Stabilität aufweisen, damit das Gewicht der gestapelten Becher die untersten Becher nicht zerdrückt [CK11].

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Topload-Versuche für jeden Schichtaufbau in Abhängigkeit der eingesetzten Stempelgeometrie dargestellt. Für einen exemplarischen Schaumgrad wird für den höchsten und erzielten Topload die WDV herangezogen, um zu ermitteln, in welchem der drei Becherbereiche (Boden, Übergangsbereich und Wand) eine erhöhte Wandstärke zu einer Verbesserung des Toploads führt. Das in Kap. 8.1.1 angesetzte Zielkriterium einer homogenen WDV geht deshalb nicht zwingend mit einem guten Topload einher.

1-Schicht-Folie:

Abb. 8.13 zeigt den erzielten Topload unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie. Erwartungsgemäß kann der höchste Topload mit 77,85 N bei der kompakten Folie (0 % Gewichtsreduktion) erzielt werden. Durch eine Gewichtsreduktion um 42,31 % bzw. 45 %, sinkt der Topload auf 36,5 N bzw. 35,7 N. Dies entspricht einer Reduktion des Topload um ca. 53 % bzw. 54 %. Es ist damit anzunehmen, dass das Verhältnis zwischen der Gewichtsreduktion und des Topload nicht linear ist.

Abb. 8.14 ist exemplarisch die erzielte WDV unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 42,31 % (höchster und geringster Topload) zu entnehmen. Es wird deutlich, dass die hergestellten Becher unter Einsatz des 4°R3-Stempels eine Schreckmarke am MP 9 aufweisen. Hinsichtlich der Homogenität der WDV stellt dies einen Qualitätsmangel dar, wirkt jedoch hinsichtlich des erzielbaren Topload versteifend am unteren Ende der Becherwand. Formteile, die mit dem 8°R9-Stempel hergestellt wurden, weist insgesamt weniger Material in der Becherwand zugunsten eines dickeren Becherbodens auf, was in einem geringeren Topload resultiert.

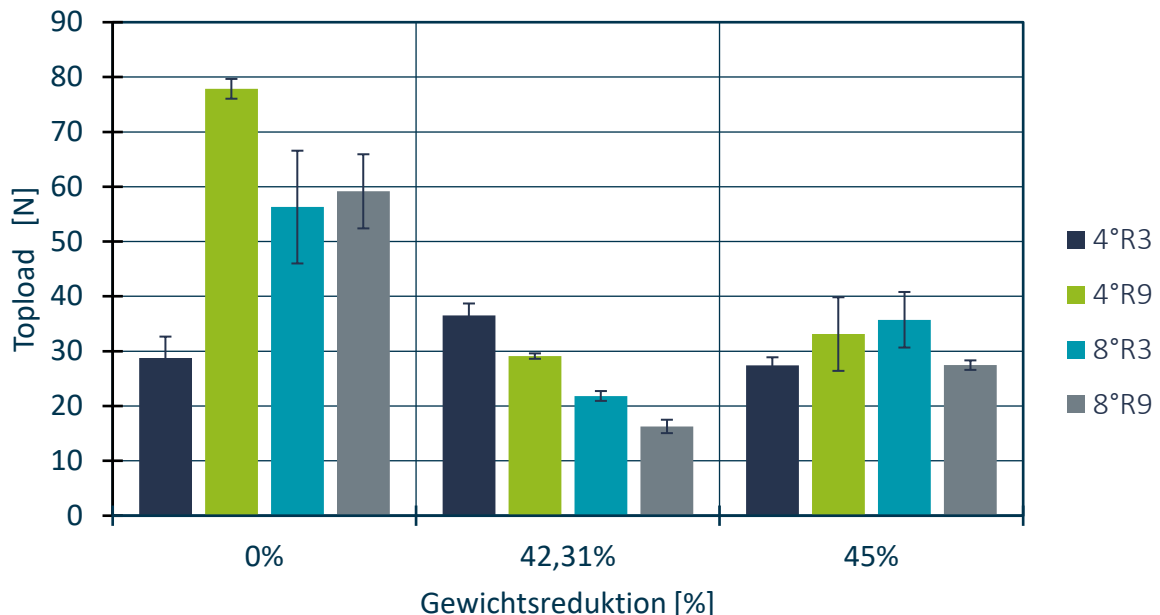


Abb. 8.13: Erzielter Topload unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie

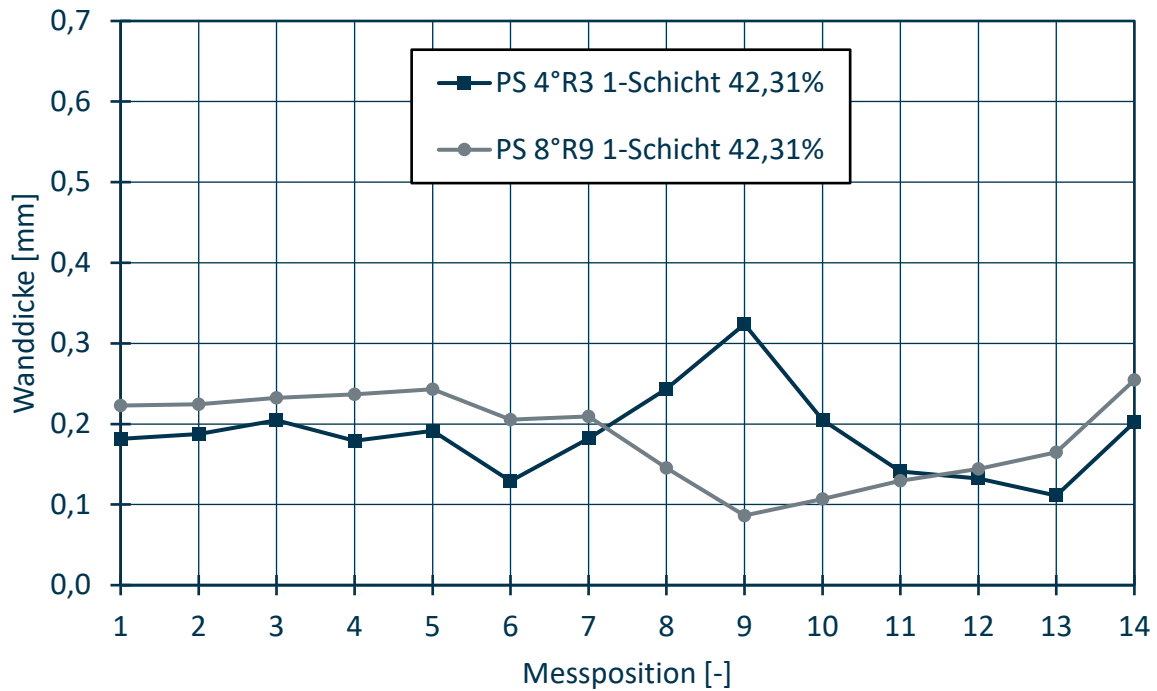


Abb. 8.14: Erzielte WDV unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 42,31 % (höchster und geringster Topload)

Abb. 8.15 ist der erzielte Topload unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie zu entnehmen. Auffällig ist, dass geschäumte Formteile im Vergleich zum kompakten Halbzeug eine geringe Reduktion des Topload aufweisen. So kommt es bei Betrachtung des jeweils höchsten Topload bei einer Gewichtsreduktion von 4,48 % (32 N) bzw. 10,44 % (27,8 N) zu einer Reduktion des Topload von 23,8 % bzw. 33,8 % im Vergleich zum kompakten Halbzeug (42 N).

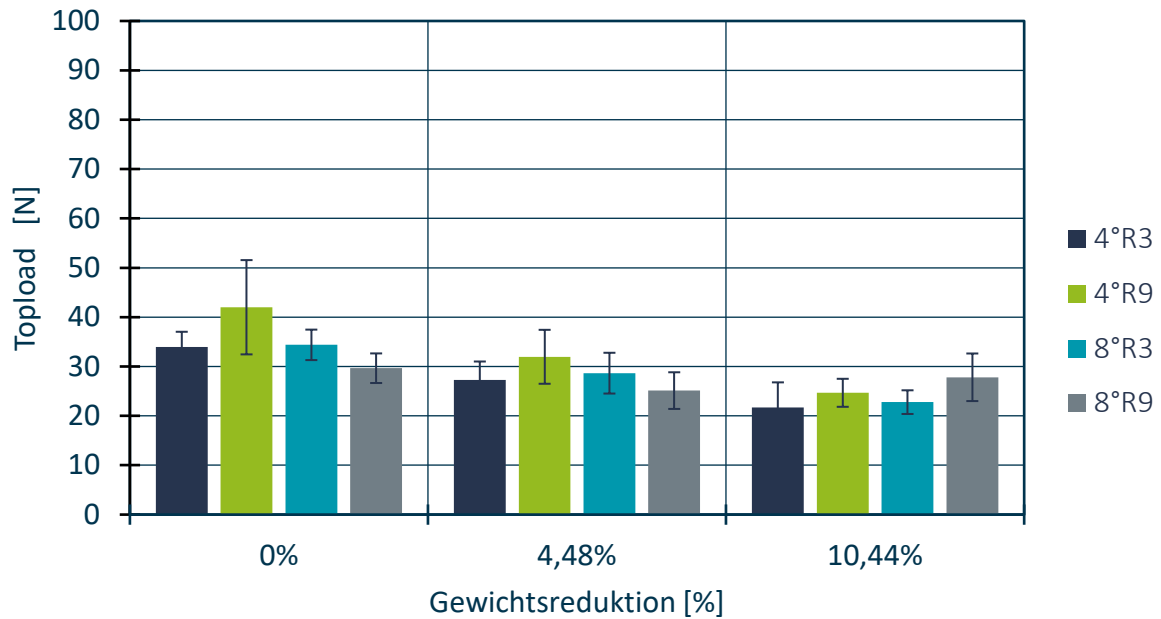


Abb. 8.15: Erzielter Topload unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie

Abb. 8.16 zeigt exemplarisch die erzielte WDV unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 4,48 % (höchster und geringster Topload). Es wird deutlich, dass das Formteil unter Einsatz des 4°R9-Stempels wiederum zu einer Materialansammlung am unteren Ende der Becherschräge führt (hoher Topload). Formteile, welche mit dem 8°R9-Stempel hergestellt wurden, weisen hingegen einen dickeren Boden und einen dickeren oberen Wandbereich auf (geringer Topload). Das Beispiel macht deutlich, dass der untere Wandbereich des Formteils maßgeblich für einen hohen Topload beiträgt.

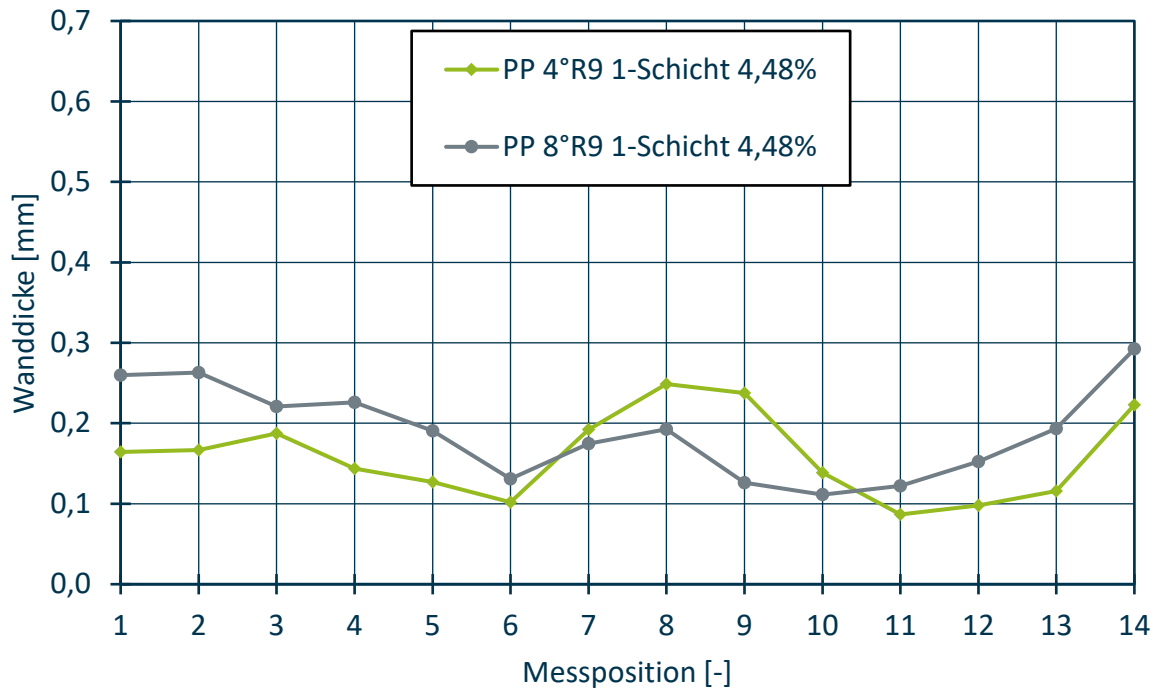


Abb. 8.16: Erzielte WDV unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 4,48 % (höchster und geringster Topload)

2-Schicht-Folie:

In Abb. 8.17 ist der erzielte Topload unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie dargestellt. Da die kompakte 2-Schicht-Folie (0 % Gewichtsreduktion) nicht zur Verfügung steht, kann kein direkter Vergleich des Topload mit Halbzeugen steigender Gewichtsreduktion vorgenommen werden.

Ersatzweise wird deshalb die kompakte 1-Schicht-Folie als Referenz herangezogen, welche einen maximalen Topload (4°R9-Stempel) von 42 N erzielt. Im Vergleich zu diesem Halbzeug weist die 2-Schicht-Folie mit einer Dichtereduktion von 31,35 % bzw. 34,33 % einen maximalen Topload von 29,9 N bzw. 35,7 N auf. Dies entspricht einer Reduktion des Topload von 28,8 % bzw. 15 %. Da beide Halbzeuge unter Einsatz des 4°R9-Stempels verarbeitet wurden und damit den höchsten Topload aufweisen, ist die Abweichung 5,8 N nicht zu erklären. Bei Betrachtung der entsprechenden WDV stellt sich eine vergleichbare Dickenverteilung ein. Da ein erhöhter Schaumgrad bei gleicher WDV mit einer Reduktion des Topload einhergehen sollte, kann auch der leicht ansteigende Schaumgrad (von 31,35 % auf 34,33 %) nicht als Erklärung herangezogen werden.

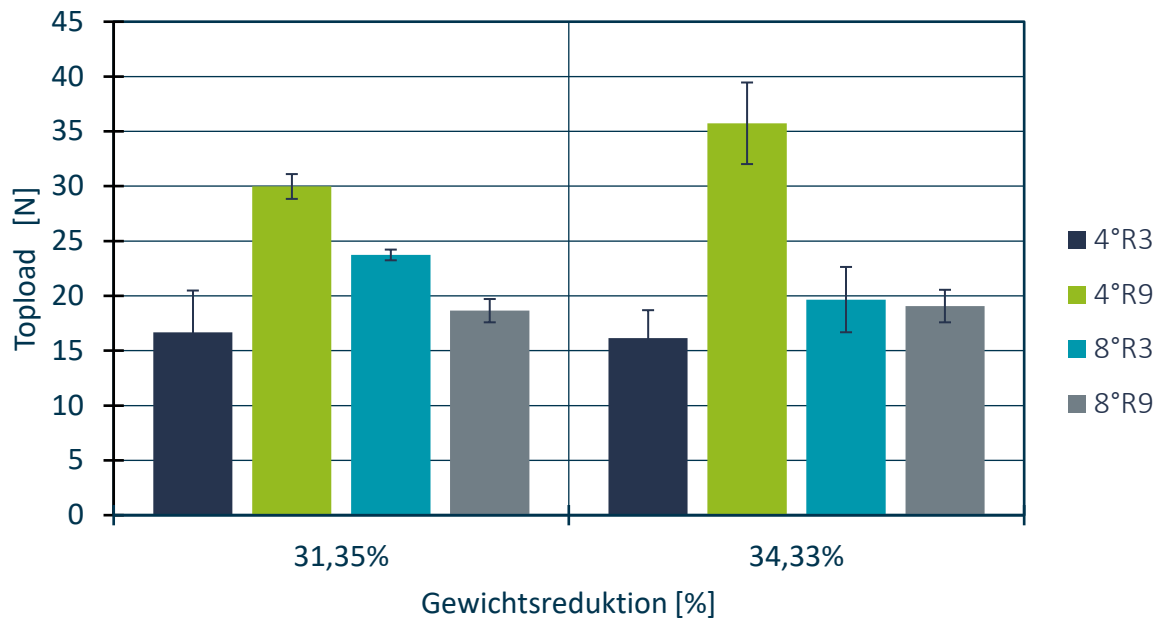


Abb. 8.17: Erzielter Topload unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie

Abb. 8.18 zeigt exemplarisch die erzielte WDV unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 34,33 % (höchster und geringster Topload). Es ist ersichtlich, dass Formteile, welche mit dem 4°R9-Stempel hergestellt wurden und den höchsten Topload aufweisen, eine erhöhte Wanddicke im (insbesondere unteren) Wandbereich aufweisen. Im Vergleich weist das Formteil, welches mit dem 4°R3-Stempel hergestellt wurde und den geringsten Topload aufweist, einen vergleichsweise dicken Bodenbereich auf, welcher keinen signifikanten Einfluss auf den Topload aufweist. Die Erkenntnisse der 1-Schicht-Folie können somit bestätigt werden.

Abb. 8.19 ist der erzielte Topload unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie zu entnehmen. Es ist ersichtlich, dass es im Vergleich zur kompakten 2-Schichtfolie (0 % Gewichtsreduktion) zu einer Erhöhung des maximalen Topload mit steigender Gewichtsreduktion kommt. So kann bei der kompakten 2-Schicht-Folie ein maximaler Topload von 69,7 N unter Einsatz des 4°R9-Stempels erzielt werden. Bei einer Gewichtsreduktion von 7,21 % bzw. 16,13 % wird ein maximaler Topload von 78 N (4°R9-Stempel) bzw. 93,9 N (4°R3-Stempel) erzielt, was einer Steigerung des Topload von 11,9 % bzw. 34,7 % entspricht. Der Anstieg lässt sich auf eine zunehmende Verschiebung des Materials in den Wandbereich des Formteils mit steigender Ge-

wichtsreduktion erklären. Durch die reduzierte Auflagefläche des Halbzeugs am Stempelboden (Schaumstruktur) gleitet mehr Material bei gleicher Stempelgeometrie in die frei verspreckbaren Randbereiche (Wandbereiche) ab, was sich positiv auf den Topload auswirkt.

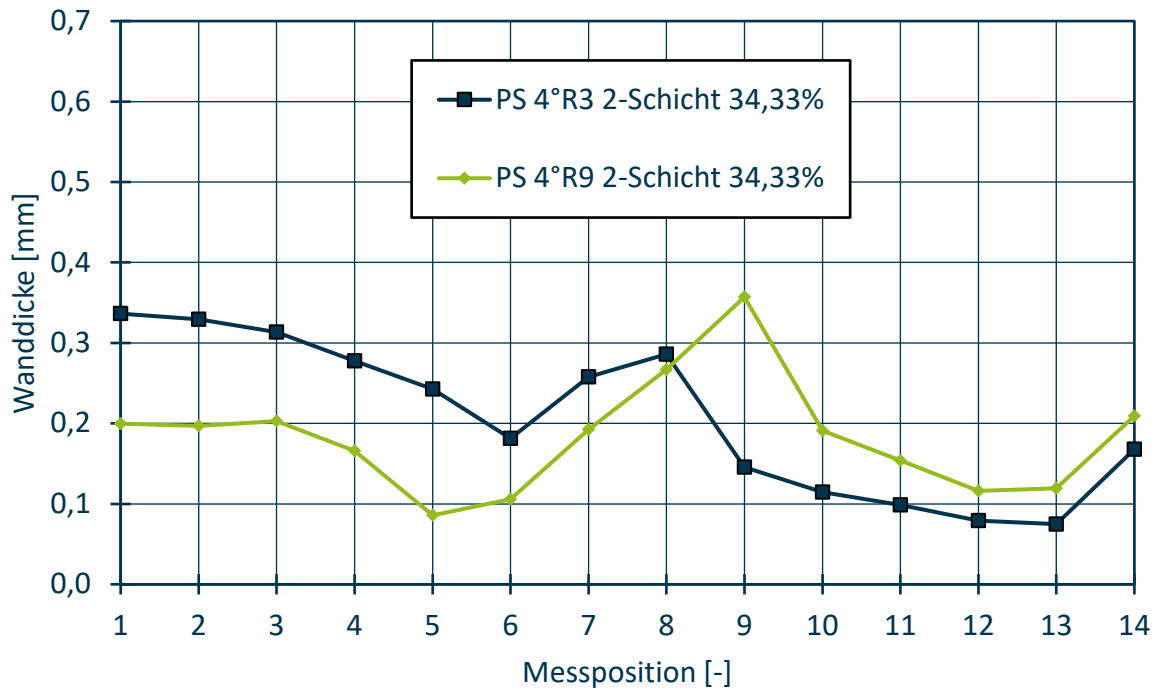


Abb. 8.18: Erzielte WDV unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 34,33 % (höchster und geringster Topload)

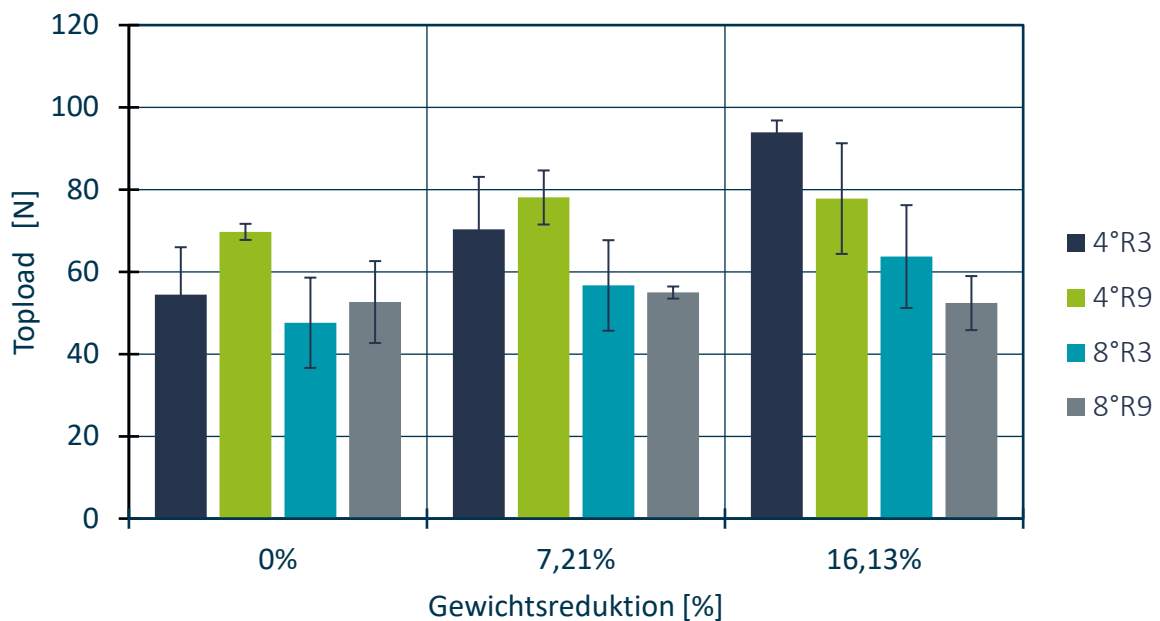


Abb. 8.19: Erzielter Topload unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie

Abb. 8.20 zeigt exemplarisch die erzielte WDV unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 16,13 % (höchster und geringster Topload). Der Vergleich der WDV macht deutlich, dass insbesondere der Übergangsbereich zwischen Becherboden und -Wand den Topload maßgeblich bestimmt. Formteile, welche mit dem 8°R9-Stempepl hergestellt wurden, weisen zwar einen dicken Wandbereich auf, jedoch ist die Wanddicke in den entscheidenden Bereichen (MP 7 bis MP 9) nicht hoch genug, um einen hohen Topload zu erzielen.

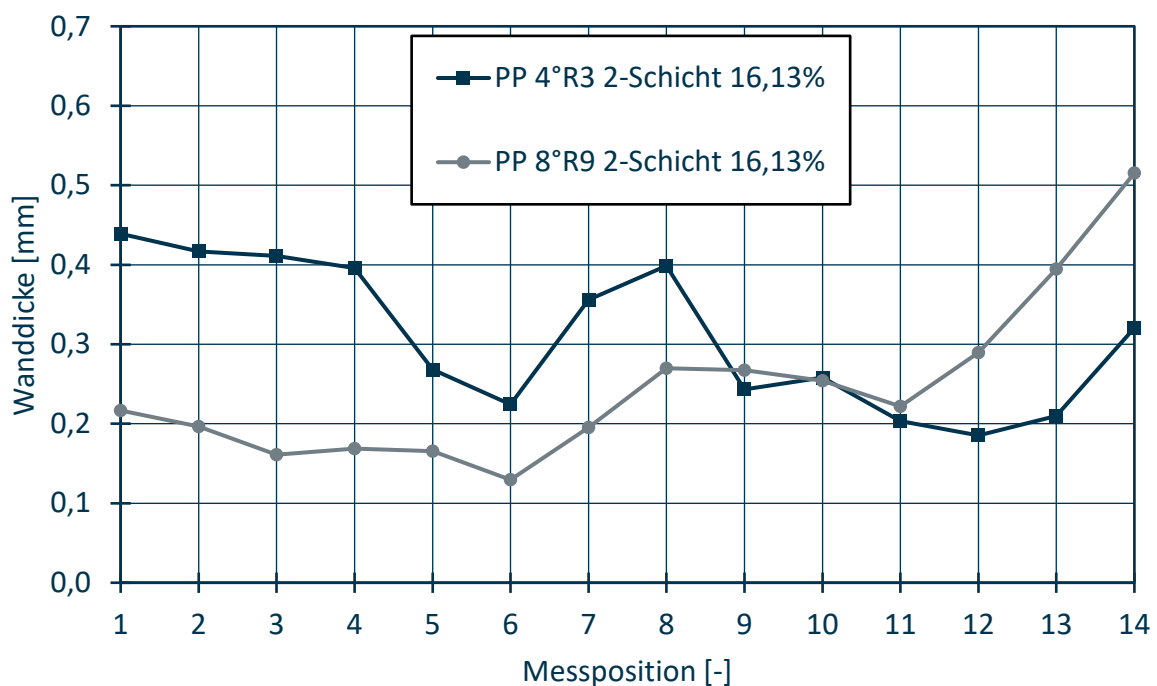


Abb. 8.20: Erzielte WDV unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 16,13 % (höchster und geringster Topload)

3-Schicht-Folie:

In Abb. 8.21 ist der erzielte Topload unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie dargestellt. Es ist ersichtlich, dass das kompakte Halbzeug erwartungsgemäß den höchsten Topload unter Einsatz des 4°R9-Stempels aufweist (81,9 N). Bei Erhöhung der Gewichtsreduktion auf 25,85 % bzw. 29,04 % fällt der maximale Topload auf 50 N (4°R9-Stempel) bzw. 62,2 N (4°R9-Stempel) ab, was einem Abfall von 38,9 % bzw. 24,1 % entspricht. Anders als die 2-Schicht-Folie weist die 3-Schicht-Folie beidseitig eine kompakte Schicht auf, weshalb eine geänderte Topologie des Halbzeugs durch den Schaumgrad keinen Einfluss ein gesteigertes Abgleiten des Halbzeugs vom Stempel hat.

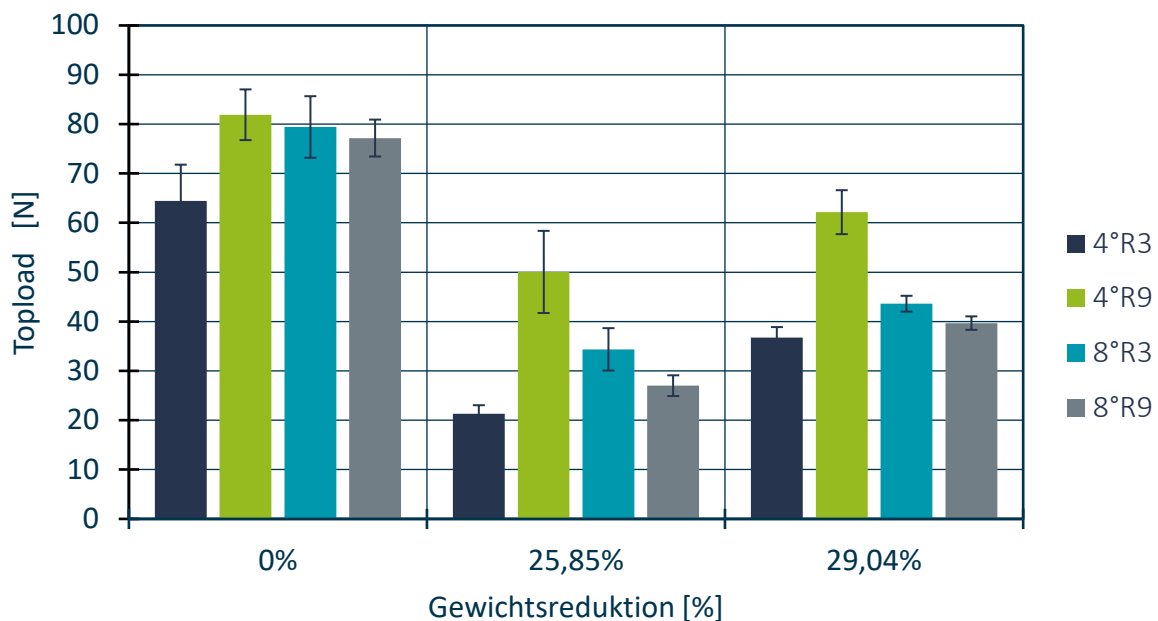


Abb. 8.21: Erzielter Topload unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie

Abb. 8.22 ist exemplarisch die erzielte WDV unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 25,58 % (höchster und geringster Topload) zu entnehmen. Es ist ersichtlich, dass Formteile, welche mit dem 4°R9-Stempel hergestellt wurden (hoher Topload), einen dicken Wandbereich aufweisen. Insbesondere wirkt sich die Schreckmarke am MP 9 positiv auf den Topload aus. Formteile mit geringstem Topload innerhalb der Versuchsreihe (4°R9-Stempel) weisen einen verhältnismäßig dicken Bodenbereich auf, welcher keinen signifikant positiven Einfluss auf den Topload aufweist.

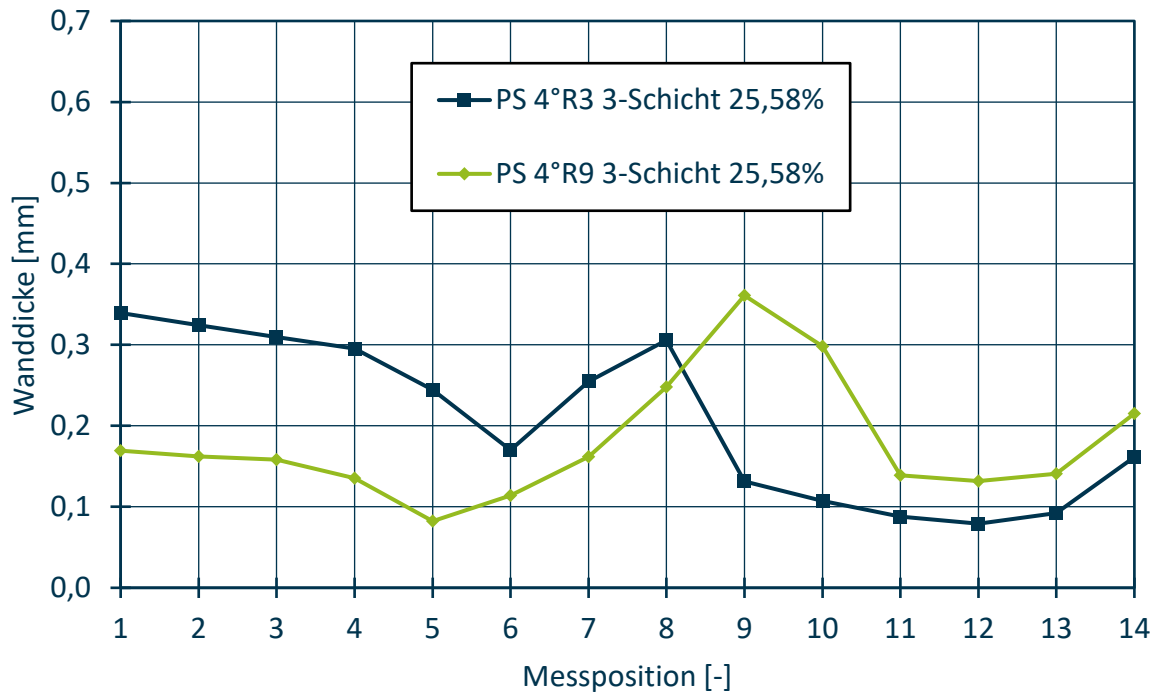


Abb. 8.22: Erzielte WDV unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 25,58 % (höchster und geringster Topload)

Abb. 8.23 zeigt den erzielten Topload unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie. Es ist ersichtlich, dass es durch eine Erhöhung der Gewichtsreduktion von 0 % auf 16,77 % zu einer Erhöhung des maximalen Topload von 27,35 N (8°R9-Stempel) auf 47,9 N (4°R9-Stempel). Bei weiterer Erhöhung der Gewichtsreduktion auf 27,2 % fällt der maximale Topload wiederum auf 25,47 N (4°R3-Stempel) ab. Die Erhöhung des Topload bei mittlerer Gewichtsreduktion lässt sich an dieser Stelle wissenschaftlich nicht nachvollziehen. Möglicherweise sind die Ergebnisse auf Messfehler in der Topload-Messung zurückzuführen.

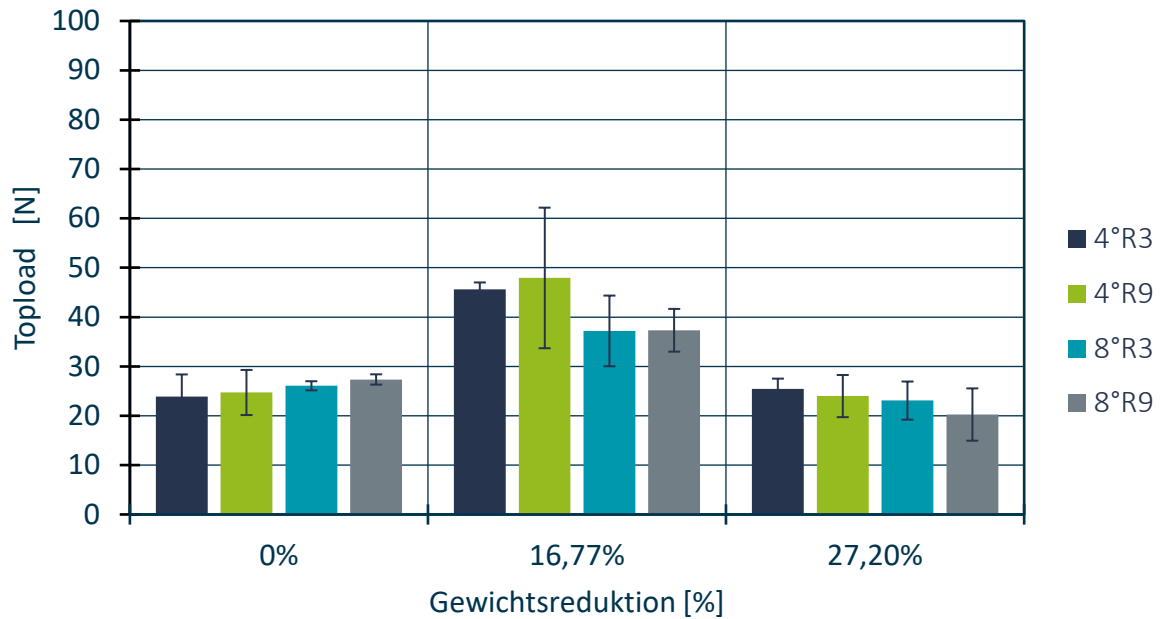


Abb. 8.23: Erzielter Topload unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Gewichtsreduktion des Halbzeugs und der Vorstreckstempelgeometrie

In Abb. 8.24 ist die erzielte WDV unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 16,77 % (höchster und geringster Topload) dargestellt. Formteile, welche mit dem 4°R9-Stempel hergestellt wurden (maximaler Topload) weisen insbesondere im Übergangsbereich zwischen Boden und Wand des Bechers eine Materialanhäufung auf, welche sich positiv auf den Topload auswirkt. Höhere Wandstärken oberhalb des Übergangsbereichs weisen keinen verstärkenden Effekt auf (8°R3-Stempel).

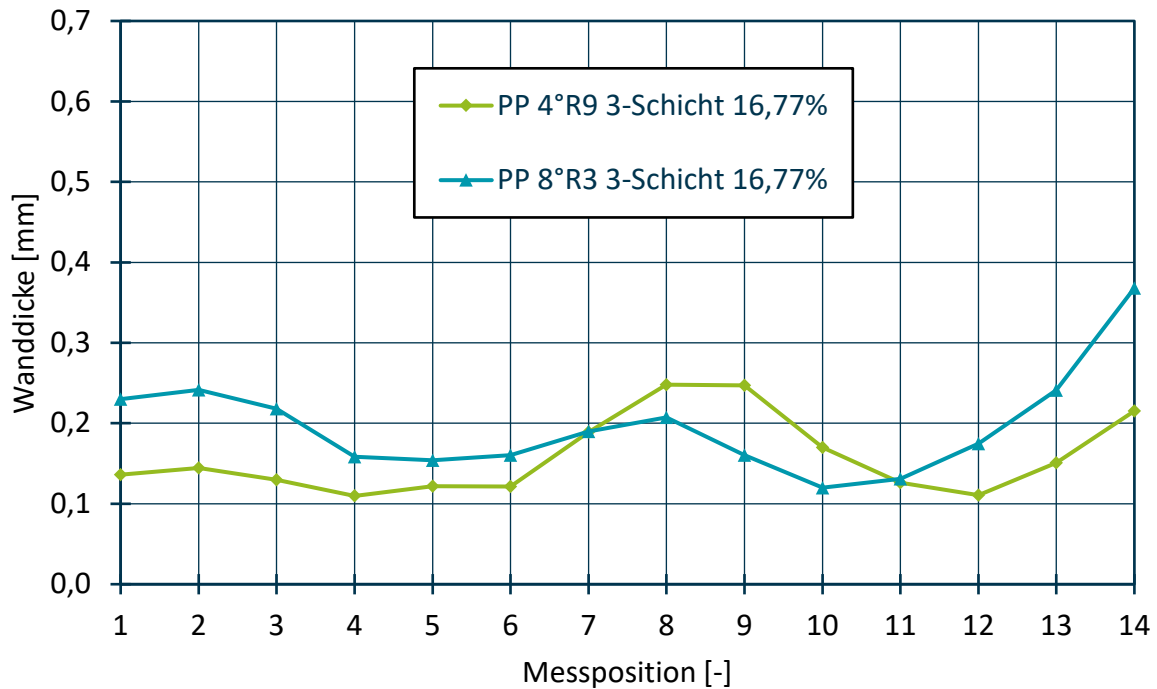


Abb. 8.24: Erzielte WDV unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 16,77 % (höchster und geringster Topload)

8.1.3 Einfluss auf die Sauerstoff-Barriere Eigenschaften

Sauerstoff kann eine Vielzahl chemischer Reaktionen auslösen, die häufig zu einer Qualitätsminderung des Füllgutes führen. Bei einigen Lebensmitteln können bereits geringste Mengen Sauerstoff zu einer Qualitätsminderung (Verfärbung, sensorische Beeinträchtigung) führen, weshalb im Folgenden die OTR (Oxygen Transmission Rate) als Maß für die Sauerstoffdurchlässigkeit der Formteile herangezogen wird [AWD22]. Die Auswertung erfolgt exemplarisch an den aus PP hergestellten Formteilen.

Es wird die Hypothese aufgestellt, dass die OTR mit steigender Gewichtsreduktion der Halbzeuge durch den chemischen Schäumprozess ansteigt und diese weiterhin mit der geringsten Wandstärke des Formteils korreliert.

1-Schicht-Folie:

Abb. 8.25 zeigt die OTR der Formteile unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie und der Gewichtsreduktion. Bei kompakten Formteilen stellt sich erwartungsgemäß aufgrund deren hohen Dichte eine im Vergleich geringe OTR ein. Unter Einsatz des 8°R9-Stempels beträgt die OTR $0,505 \text{ cm}^3/(\text{Becher} \cdot \text{Tag} \cdot \text{bar})$. Bei einer Erhöhung der Gewichtsreduktion auf 4,48 % bzw. 10,44 % stieg die OTR auf $0,7 \text{ cm}^3/(\text{Becher} \cdot \text{Tag} \cdot \text{bar})$

(4°R9-Stempel) bzw. $0,805 \text{ cm}^3/(\text{Becher} \cdot \text{Tag} \cdot \text{bar})$ (4°R3-Stempel) an. Dies lässt darauf schließen, dass bereits eine geringe Dichtereduktion zu einem Anstieg der OTR führt. Eine weitere Erhöhung der Gewichtsreduktion auf 10,44 % führt zu keiner signifikanten Erhöhung der OTR.

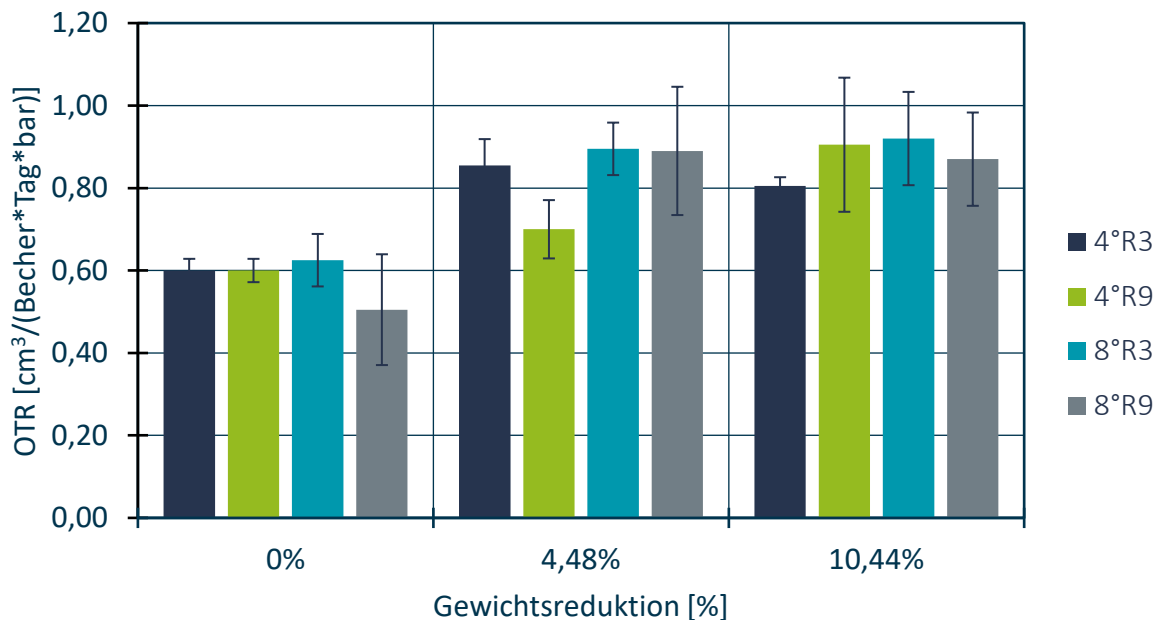


Abb. 8.25: OTR der Formteile unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie und der Gewichtsreduktion.

Tabelle 8.1 sind die mittleren, minimalen Wanddicken im Formteil der 1-Schicht-Folie (PP) zu entnehmen. Die Hypothese, dass die OTR neben dem Schaumanteil ebenfalls durch die geringste Wandstärke im Formteil beeinflusst wird, kann nicht eindeutig bestätigt werden. Lediglich bei einer Gewichtsreduktion von 10,44 % weisen die Formteile mit der höchsten OTR (8°R9-Stempel) ebenfalls die geringste Wandstärke in der Vergleichsgruppe auf.

0 % Gewichtsreduktion				4,48 % Gewichtsreduktion				10,44 % Gewichtsreduktion			
4°R3	4°R9	8°R3	8°R9	4°R3	4°R9	8°R3	8°R9	4°R3	4°R9	8°R3	8°R9
0,105	0,128	0,127	0,144	0,106	0,087	0,099	0,111	0,085	0,089	0,078	0,104

Tabelle 8.1: Mittlere minimale Wanddicke im Formteil [mm] (1-Schicht-Folie, PP)

2-Schicht-Folie:

Abb. 8.26 ist die OTR der Formteile unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie und der Gewichtsreduktion zu entnehmen. Kompakte Formteile weisen unter Einsatz des 4°R9-Stempels die geringste OTR mit einem Wert von $0,45 \text{ cm}^3/(\text{Becher} \cdot \text{Tag} \cdot \text{bar})$ auf. Eine Gewichtsreduktion des Formteils um 7,21 % führt zu kei-

ner signifikanten Erhöhung der geringsten OTR auf $(0,465 \text{ cm}^3/(\text{Becher} \cdot \text{Tag} \cdot \text{bar}))$, 4°R9 -Stempel). Erst bei einer weiteren Steigerung der Gewichtsreduktion auf 16,13 % kommt es zu einem negativen Einfluss der Schaumstruktur auf die OTR, welche auf einen Wert von $0,825 \text{ cm}^3/(\text{Becher} \cdot \text{Tag} \cdot \text{bar})$ ansteigt (4°R3 -Stempel). PP weist demnach bei geringem Schaumgrad eine höhere Sauerstoffdurchlässigkeit auf als Formteile aus PS

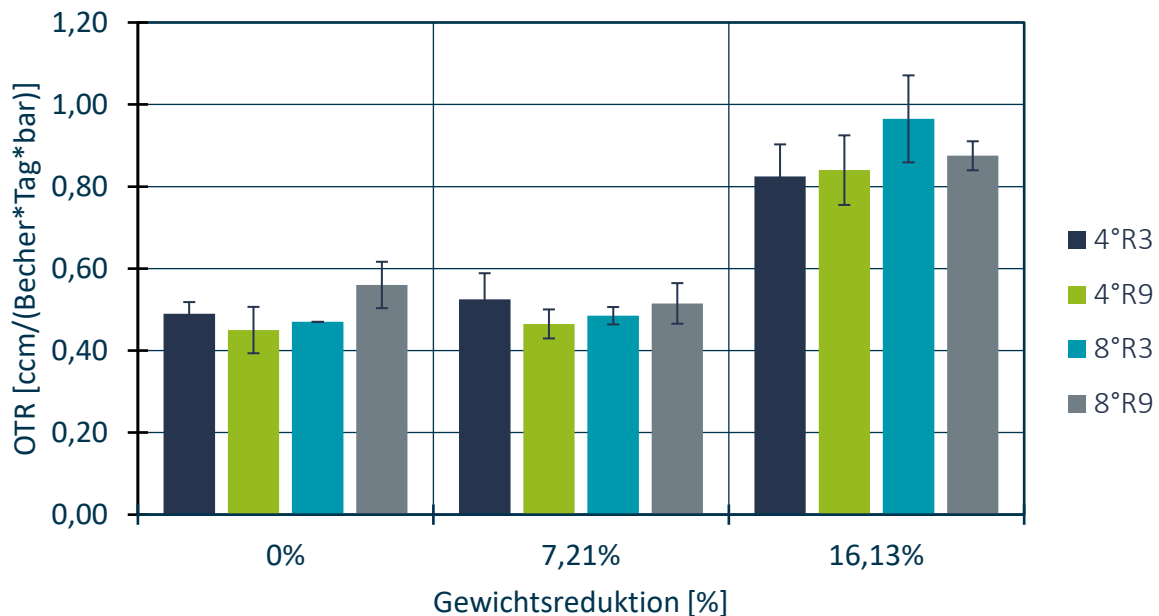


Abb. 8.26: OTR der Formteile unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie und der Gewichtsreduktion.

Tabelle 8.2 zeigt die mittleren, minimalen Wanddicken im Formteil der 2-Schicht-Folie (PP). Es ist ersichtlich, dass keine Korrelation zwischen einer abfallenden Wanddicke der Formteile mit einer ansteigenden OTR besteht.

0 % Gewichtsreduktion				7,21 % Gewichtsreduktion				16,13 % Gewichtsreduktion			
4°R3	4°R9	8°R3	8°R9	4°R3	4°R9	8°R3	8°R9	4°R3	4°R9	8°R3	8°R9
0,131	0,146	0,179	0,136	0,131	0,146	0,162	0,095	0,185	0,196	0,169	0,130

Tabelle 8.2: Mittlere minimale Wanddicke im Formteil [mm] (2-Schicht-Folie, PP)

3-Schicht-Folie:

Abb. 8.27 zeigt die OTR der Formteile unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie und der Gewichtsreduktion. Bei kompakten Formteilen stellt sich erwartungsgemäß aufgrund deren hohen Dichte eine im Vergleich geringe OTR ein. Unter Einsatz des 4°R9 -Stempels beträgt die OTR $0,59 \text{ cm}^3/(\text{Becher} \cdot \text{Tag} \cdot \text{bar})$. Bei einer Erhöhung

der Gewichtsreduktion auf 16,77 % bzw. 27,20 % beträgt die OTR (bei den jeweils vorteilhaftesten Stempelgeometrien) $0,585 \text{ cm}^3/(\text{Becher} \cdot \text{Tag} \cdot \text{bar})$ (4°R3 -Stempel) bzw. $0,91 \text{ cm}^3/(\text{Becher} \cdot \text{Tag} \cdot \text{bar})$ (4°R3 - und 8°R9 -Stempel) an. Dies lässt darauf schließen, dass eine geringe Dichtereduktion, ähnlich zur 2-Schicht-Folie, zu keinem signifikanten Anstieg der geringsten OTR führt. Erst eine weitere Erhöhung der Gewichtsreduktion auf 27,20 % führt zu einer signifikanten Erhöhung der OTR. Insgesamt lässt dies den Schluss zu, dass kompakte Außenschichten (wie bei der 3-Schicht und 2-Schichtfolie) den signifikanten Anstieg der OTR zu höheren Dichtereduktionen verschiebt.

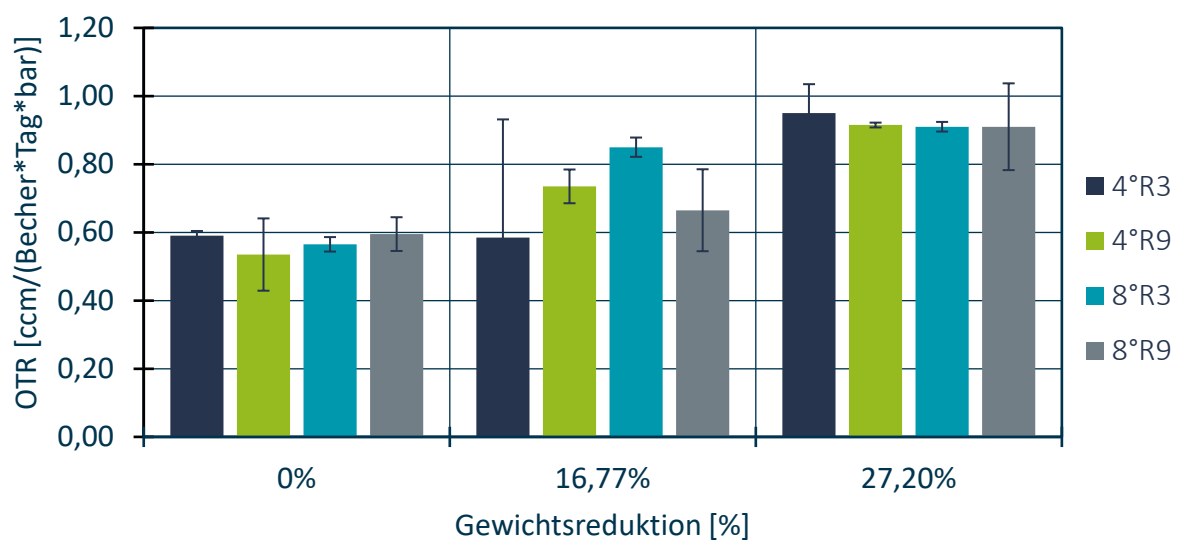


Abb. 8.27: OTR der Formteile unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie und der Gewichtsreduktion.

Tabelle 8.3 zeigt die mittleren, minimalen Wanddicken im Formteil der 3-Schicht-Folie (PP). Es ist ersichtlich, dass wiederum keine Korrelation zwischen einer abfallenden Wanddicke der Formteile mit einer ansteigenden OTR besteht. Die eingangs beschriebene Hypothese einer Korrelation der dünnsten Wanddicke im Formteil mit den Sauerstoffbarriereigenschaften wird verworfen.

0 % Gewichtsreduktion				16,77 % Gewichtsreduktion				27,20 % Gewichtsreduktion			
4°R3	4°R9	8°R3	8°R9	4°R3	4°R9	8°R3	8°R9	4°R3	4°R9	8°R3	8°R9
0,087	0,083	0,103	0,105	0,100	0,110	0,120	0,105	0,096	0,089	0,088	0,078

Tabelle 8.3: Mittlere minimale Wanddicke im Formteil [mm] (3-Schicht-Folie, PP)

9 FAZIT UND AUSBLICK

Ziel des Forschungsvorhabens war es, den KMU-lastigen Thermoformbetrieben eine weitere Steigerung der Materialeffizienz ihrer Prozesse zu ermöglichen, indem die klassischen kompakten Halbzeuge mit geschäumten Halbzeugen substituiert werden. Das übergeordnete Ziel der Untersuchungen war der Aufbau von Prozesswissen in der Herstellung geschäumter Halbzeuge, der Weiterverarbeitung im Thermoformen sowie der Charakterisierung der Halbzeuge und Formteile.

Der Kern der Untersuchungen bezüglich der Herstellung von Schwerschaumfolien im Extrusionsprozess war die systematische Ermittlung der Wirkzusammenhänge zwischen Dichtreduktion und Schichtaufbau mit den Folieneigenschaften wie der Oberflächenrauigkeit, der Durchstoßfestigkeit und der Schaummorphologie. Um eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf verschiedene Werkstoffklassen und Anwendungsgebiete gewährleisten zu können, wurden die Untersuchungen mit den weit verbreiteten (Thermoform-)Materialien PP und PS durchgeführt. Generell gibt es große Unterschiede in Bezug auf die Oberflächen-, Mechanik- und Schaumeigenschaften innerhalb der beiden Materialklassen. Die Eigenschaften können durch Variation des Schichtaufbaus und des Schäumgrads bzw. der Dichteinsparung eingestellt werden, um eine Modifikation der Halbzeuge für die Weiterverarbeitung im Thermoformen zu ermöglichen. Es ist zu beachten, dass das Aufschäumen die Oberflächenqualität negativ beeinflusst. Insbesondere höhere Schäumgrade führen zu einer höheren Oberflächenrauheit. Bei beiden Materialien wird im Durchstoßversuch eine Reduktion der Mechanik erzielt, was auf die Substitution von kompaktem Kunststoff durch Schaumzellen zurückzuführen ist. Bei der PP-Folie nimmt die Dichte linear ab, während bei der PS-Folie ein konstanter, hoher Abfall festzustellen ist. Es konnte keine eindeutige Korrelation zwischen der erzielten Schaummorphologie und dem Schichtaufbau sowie dem Aufschäumgrad festgestellt werden.

Weiterhin wurde untersucht, inwiefern die Prozessführung und das Stempeldesign beim Thermoformen beim Einsatz von Schaumfolie anzupassen sind, da sich mit steigendem Schaumgrad der Verstreckwiderstand der Folie signifikant ändert. Es lässt sich insgesamt festhalten, dass die Homogenität der Formteile unter Einsatz geschäumter Halbzeuge ohne Anpassung der Stempelgeometrie tendenziell abnimmt. Durch Anpassung der Stempelgeometrie kann die Homogenität der Formteile jedoch auf ein ähnliches Niveau wie beim kompakten Halbzeug eingestellt werden. Die hergestellten Formteile wurden anschließend hinsichtlich ihrer Sauerstoff-Permeation sowie des Topload-Verhaltens untersucht. Unter Betrachtung der WDV wurde festgestellt, dass sich analog zu Bechern aus kompakten Halbzeugen insbesondere eine

erhöhte Wanddicke im Übergangsbereich zwischen Becherboden und -wand positiv auf die Topload-Beständigkeit der Formteile auswirkt. Die Topload-Untersuchungen zeigen bei allen Dichte- und Schichtaufbauvariationen erwartungsgemäß eine absolute Abnahme der gemessenen Eigenschaften, zeigen jedoch gewichtsspezifisch das Potenzial geschäumter Kunststoffhalbzeuge zur Weiterverarbeitung im Thermoformen auf. Beispielsweise weist die kompakte 3-Schicht-Folie aus PS einen maximalen Topload von 81,9 N bei einer Dichte von $1,04 \text{ g/cm}^3$ auf. Hingegen erreicht die geschäumte 3-Schicht-Folie aus PS einen maximalen Topload von 62,2 N bei einer Dichte von $0,68 \text{ g/cm}^3$. Bei Vergleich des gewichtsspezifischen Topload ergibt sich eine um 16 % verbesserte Ausnutzung des Materialeinsatzes. Insbesondere bei mittleren Schaumgraden stellt PP eine hervorragende Alternative zu PS hinsichtlich des maximalen Topload dar.

Am Ende des Forschungsvorhabens steht somit ein umfangreiches Werkstoffverständnis und Prozesswissen über die Herstellung sowie das Thermoformen von Schwertschaumfolien zur Verfügung, das den KMU den Einstieg in die Verarbeitung zu bspw. Joghurtbechern erleichtert. Insbesondere hinsichtlich der erzielten OTR sind jedoch beispielsweise Beschichtungen notwendig, um die erforderliche Barriere gegen Sauerstoff im Lebensmittelbereich zu erzielen. In weiteren Untersuchungen können die gewonnenen Erkenntnisse auf weitere Werkzeuggeometrien übertragen werden, um das Anwendungsgebiet geschäumter Folien zu vergrößern. Dies ist v.a. im Hinblick auf auch die Materialeinsparung sowie nachhaltiger Produkte notwendig.

10 ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT

10.1 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Zur Sicherstellung des Transfers der Forschungsergebnisse waren verschiedene Maßnahmen während der Laufzeit des Projekts und nach dessen Abschluss geplant. Diese werden im Folgenden dargestellt.

10.2 Durchgeführte Transfermaßnahmen des Vorhabens

Maßnahme: Projektbegleitender Ausschuss	Während der Laufzeit 14.03.2022/30.06.2023/12.12.2023
<i>Während der Projektlaufzeit haben drei Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses stattgefunden (14.03.2022 - 30.06.2023 - 12.12.2023). Der Dialog mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses auch außerhalb der stattgefundenen Treffen hat entscheidend zum Fortgang und Erfolg des Projektes beigetragen. Darüber hinaus haben Mitglieder das Projekt durch Bereitstellung von Materialien und der Diskussion der Ergebnisse unterstützt, ein optimales Projektergebnis zu erzielen.</i>	
Maßnahme: Fachbeiratsgruppe	Während der Laufzeit Jährlich im November 07-08.11.2022/06-07.11.2023
<i>Innerhalb der Laufzeit des Forschungsprojektes haben zwei Sitzungen der Fachbeiratsgruppen des IKV stattgefunden (07-08.11.2022 und 06-07.11.2023). Bei der FBG 2022 wurde das Forschungsvorhaben den Fachbeiratsgruppen „Extrusion“ (Teilnehmer: 19) mit Industrievertretern diskutiert. Bei der FBG 2023 (Teilnehmer: 25) wurde das Projekt in Form eines Vortrages vorgestellt.</i>	
Maßnahme: Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft	Während der Laufzeit 08-09.11.2021/07-08.11.2022/08-11.09.2022/06-08.09.2022

Innerhalb des Projektzeitraumes konnte durch den Austausch mit verschiedenen Unternehmen aus der Folienindustrie bei der jährlich stattfindenden Fachbeiratsgruppe Extrusion (2022,2023) des IKV in Aachen sowie bei dem im September 2022 stattgefundenen 31. Internationalen Kolloquium Kunststofftechnik (06.-08.09.2022), viele Fragen, Anregungen und Ergebnisse ausgiebig diskutiert werden.

/Maßnahme:

Akademische Lehre / Personaltransfer

Während der Laufzeit

kontinuierlich

Einige der Untersuchungen, die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführt wurden, sind durch die Unterstützung von Studenten entstanden. So befindet sich derzeit eine wissenschaftliche Arbeit durch einen Studierenden in Arbeit. Die erarbeiteten Erkenntnisse fließen zusätzlich in Lehrveranstaltungen, wie beispielsweise die Vorlesung und Übung „Kunststoffverarbeitung II“ und „Werkzeuge in der Kunststoffverarbeitung II“ ein und wurden auch auf diesem Wege Bestandteil der wissenschaftlichen Ausbildung junger Ingenieure.

Bachelorarbeit

Wienold, S.: Einfluss der Schaumstruktur und des Schichtaufbaus von geschäumten Halbzeugen auf die Verarbeitbarkeit im Thermoformverfahren und die mechanischen Eigenschaften der Formteile.

Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2024 – Betreuer: D. Grüber

Maßnahme:

Vorträge und Posterpräsentationen

Während der Laufzeit

07./08.09.2022

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes sind im Rahmen des 31. Internationalen Kolloquium Kunststofftechnik (07./08.09.2022) durch Vorträge und Posterpräsentationen vorgestellt worden.

Maßnahme:

Wissenschaftliche Publikationen

Zwischenergebnisse nach einem Jahr und Abschlussveröffentlichung nach Projektende

Durch Publikationen in Fachzeitschriften wurden die Ergebnisse einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden in Form von Veröffentlichungen in nationalen Fachzeitschriften einem breiten Publikum vorgestellt:

<p>HOPMANN, CH.; STIEGLITZ, M.; GRÜBER, D.; LEUCHTENBERGER, L.: Thermoformen im Leichtgewicht durch geschäumte Folienschicht. <i>Plastverarbeiter</i> (2024)</p> <p><u>Abschlussveröffentlichung:</u> HOPMANN, CH.; STIEGLITZ, M.; GRÜBER, D.; LEUCHTENBERGER, L.: Schaumige Halbzeuge: Verarbeitung und Festigkeit im Blick. <i>Extrusion</i> (erscheint 06/2024)</p>	
<p>Maßnahme:</p> <p>Hinweise in der Fachpresse</p>	<p>Während der Laufzeit</p>
<p><i>Über die IKV eigene Abteilung für Öffentlichkeitsarbeit wurde das Projekt in Form von Pressemitteilungen und Fachartikeln einer breiten Öffentlichkeit bekannt gemacht. Derzeit umfasst der Verteiler über 40 Fachzeitschriften im Bereich der Kunststofftechnik und des Maschinenbaus.</i></p>	
<p>Maßnahme:</p> <p>Richtlinienarbeit</p>	<p>Zeitraumen:</p> <p>Während der Laufzeit</p>
<p><i>Durch projektbegleitende Diskussionen in der Fachwelt konnte ein breites Interessentenspektrum angesprochen und Ideen und Anregungen zum Thema gesammelt werden.</i></p>	
<p>Maßnahme:</p> <p>Forschungsbericht</p>	<p>Zeitraumen:</p> <p>1. Quartal nach Abschluss des Forschungsvorhabens</p>
<p><i>Die Ergebnisse sind in einem Zwischenbericht sowie in dem vorliegenden Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben zusammengefasst. Dieser Forschungsbericht steht interessierten Unternehmen zur Verfügung, wodurch die erzielten Ergebnisse für die Öffentlichkeit zugänglich sind.</i></p>	
<p>Maßnahme:</p> <p>Beratung von Unternehmen</p>	<p>Zeitraumen:</p> <p>Während der Laufzeit</p>
<p><i>Das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erarbeitete Wissen floss in die Beratungstätigkeiten des IKV ein. Im Berichtszeitraum wurden zahlreiche bi- und multilaterale Gespräche geführt.</i></p>	

10.3 Geplante Maßnahmen nach Abschluss des Forschungsvorhabens

Maßnahme: Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft	Nach Abschluss des Forschungsvorhabens
<i>Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden auch nach Abschluss des Forschungsvorhabens mit Firmen der Folien- und Thermoformindustrie diskutiert. Dabei werden Unternehmen, die zum potenziellen Nutzerkreis des Vorhabens gehören, gezielt angesprochen.</i>	
Maßnahme: Multiplikatoren	Nach Abschluss des Forschungsvorhabens
<i>Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde die Wechselwirkungen zwischen dem Material, der Dichteinsparung, den resultierenden Schaumeigenschaften sowie Thermoformbarkeit untersucht. Durch ein geeignetes Scale-up-Modell ist die Möglichkeit eines Transfers der Untersuchungen in die Industrie als hoch einzustufen.</i>	
Maßnahme: Akademische Lehre/Personaltransfer	Nach Abschluss des Forschungsvorhabens
<i>Nach Abschluss der Forschungsvorhabens werden die erzielten Ergebnisse in die Ausbildung junger Ingenieure wie beispielsweise die Vorlesung und Übung „Kunststoffverarbeitung II“ und „Werkzeuge in der Kunststoffverarbeitung II“ übernommen, sodass die Studenten das erarbeitete Wissen später als junge Ingenieure in die betriebliche Praxis übernehmen können.</i>	
Maßnahme: Dissertation	Nach Abschluss des Forschungsvorhabens
<i>Es besteht für die bearbeitenden wissenschaftlichen Mitarbeiter der Forschungsstelle die Möglichkeit zur Promotion auf dem Thema Extrusion von Schaumfolien.</i>	

10.4 Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzeptes

Innerhalb der drei Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses, der Darstellung der Ergebnisse auf den IKV-Fachbeiratsgruppensitzungen sowie durch direkten Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft war es möglich, den Projektfortschritt und die Projektergebnisse kontinuierlich

und direkt Vertretern interessierter Industrieunternehmen zu kommunizieren und zu diskutieren. Durch Hinweise in der Fachpresse, wissenschaftliche Publikationen in Form von Veröffentlichungen, den Forschungsbericht sowie durch Vorträge konnte zusätzlich ein breites Fachpublikum angesprochen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sind darüber hinaus in die Lehre eingeflossen, um angehenden Ingenieuren und Ingenieurinnen potenzielle Möglichkeiten neuer Technologien und Verfahren vorzustellen. Sowohl in Lehrveranstaltungen als auch studentischen Arbeiten konnten sich die Studierenden umfassend mit der Thematik vertraut machen und ihre ingenieurtechnischen Fähigkeiten vertiefen.

Mit dem breitgefächerten Transferkonzept konnte somit das Ziel erreicht werden, die im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeiteten Ergebnisse einem breiten industriellen Nutzerkreis vorzustellen und als Grundlage für weitere Entwicklungsarbeiten zur Verfügung zu stellen. In Zukunft werden darüber hinaus die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens die Grundlage für bilateraler Industrieprojekte oder Beratungen zur Optimierung bestehender Folien sowie Thermoformprodukte darstellen. Die Realisierbarkeit des vorgeschlagenen Konzeptes ist somit gegeben.

11 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER UND WIRTSCHAFTLICHER NUTZEN DER ERZIELTEN ERGEBNISSE FÜR KMU

11.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Am Ende des Forschungsprojekts wurden interessierte Unternehmen durch den Abschlussbericht, Veröffentlichungen und Präsentationen ausführlich über die Ergebnisse informiert, so dass sie die gewonnenen Erkenntnisse in ihre eigenen Entwicklungsprozesse einfließen lassen können. Interessierten Unternehmen ist es nun möglich, die Herstellung geschäumter Folien am IKV zu erproben und ihre Produktpalette effizienter zu gestalten. Das breite Spektrum potenzieller Anwendungen und Produkte in einer Vielzahl von Sektoren legen nahe, dass die Ergebnisse innerhalb der nächsten fünf Jahre nach Abschluss des Projekts auf konkrete Produkte angewendet werden kann.

11.2 Wirtschaftlicher Nutzen

In Zeiten des vermehrten Fokus auf eine nachhaltige Produktion bei gleichzeitig hohem Kostendruck ist es für den Verarbeiter von großer Bedeutung, möglichst zeit- und materialeffizient zu arbeiten. Durch die systematische Untersuchung des Prozesses der Folienextrusion sowie des Thermoformens können die Unternehmen mit den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens bereits im Vorfeld die richtige Dichtereduktion identifizieren und ihre Prozessführung gezielt anpassen.

Vor allem kleine und mittlere Unternehmen (KMU) profitieren direkt von dem Forschungsvorhaben, da sie die Kosten für die Entwicklung des benötigten Prozesswissen nicht selbst aufbringen können und von den Erfahrungen, die im Vorhaben gesammelt werden, bei der späteren industriellen Umsetzung profitieren können. Mit dem Aufbau eines besseren Prozess- und Materialverständnisses können die Folienhersteller mit geringen Investitionen ihr Produktportfolio auf geschäumte Folien zu erweitern. Den Herstellern von Thermoformartikeln hilft dies Ihren Materialkosten, welche den größten Kostenpunkt von etwa 80 % entspricht, deutlich zu reduzieren.

Ausgehend von einer Thermoformanlage mit einem 20-Kavitätenwerkzeug, bis zu 45 Takte pro Minute und einer Taktzeit von 1,5 s ermöglicht dies die Herstellung einer Jahresproduktion von ca. 345 Mio. Bechern. Mit einem Gewicht von 4,5 g (150ml PS-Becher) kann mit einer geschäumten Folie mit guten mechanischen Eigenschaften 5 % Material eingespart werden.

Dies bedeutet für den Verpackungshersteller bei aktuellen Materialpreisen für PS-Folien/Platten von 1.700 €/t, eine jährliche Kosteneinsparung von ca. 147.000 € pro Thermoformanlage.

12 ERGÄNZENDE HINWEISE ZUM FORSCHUNGSVORHABEN

12.1 Einsatz von Geräten und wissenschaftlich-technischem Personal

- **Einsatz von wissenschaftlich-technischem Personal gemäß Einzelansatz A.1 des Einzelfinanzierungsplans:**

FE 1 IKV: Insgesamt 21 PM

Der wissenschaftliche Mitarbeiter war erforderlich, um die wissenschaftliche Fragestellung zu erarbeiten, die Problemstellungen in Abstimmung mit Vertretern aus Wirtschaft und Industrie zu diskutieren und Studierende zu betreuen, die im Rahmen des Projekts studentische Arbeiten durchführten. Dieser Personeneinsatz war für den Projekterfolg zwingend erforderlich.

- **Einsatz von Geräten gemäß Einzelansatz B des Einzelfinanzierungsplans:**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist gemäß dem begutachteten und befürworteten Antrag die Herstellung von geschäumten Folienhalbzeugen im Flachfolienprozess vorgesehen. Diese werden im Thermoformprozess weiterverarbeitet, um den Einfluss des Aufschäumgrades des Halbzeugs auf die Wanddickenverteilung des Formteils im Vergleich zum konventionellen Prozess zu untersuchen. Zu diesem Zwecke sollten gemäß Antrag Vorstreckstempel beschafft werden, welche eine weitere Homogenisierung der Wanddickenverteilung ermöglichen. Im Projektverlauf vorliegende Forschungsergebnisse des IGF-Forschungsvorhabens Nr. 21300 N („Verkürzung der Vorstreckstempelauslegung beim Thermoformen durch Simulation – Ermittlung von Reibwerten für die Umformsimulation mit Vorstreckstempel mittels eines Reverse-Engineering-Ansatzes durch Aufbau von Prozesswissen bei der Vorstreckstempelherstellung“) zeigen, dass die Oberflächenrauigkeit der Stempel bei gleichbleibender Stempelgeometrie einen signifikanten Einfluss auf die Wanddickenverteilung des Formteils aufweist. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden bereits mehr als 20 Vorstreckstempel unterschiedlicher Oberflächengüten, Materialien und Geometrien beschafft, mit welchen eine Anpassung der Wanddickenverteilung der Formteile aus geschäumter Folie auf Basis der Forschungsergebnisse angepasst werden konnte. Auf eine Neubeschaffung der Stempel wurde daher verzichtet.

Die Herstellung der Schaumfolie erfolgte auf der Flachfolienextrusionslinie des IKV. Bereits beim Rüsten des Glättwerks vom Typ 136-350 der Dr. Collin GmbH & Co. KG, Ebersberg, mit der geeigneten Kühlwalze ist eine Beschädigung der hochglänzend verchromten Oberfläche

aufgefallen. Folgend wurde festgestellt, dass die Oberfläche des damit hergestellten Folienhalbzeugs zur Weiterverarbeitung im Thermoformprozess den Oberflächendefekt abformt. Weiterhin entsteht dadurch eine mechanische Schwachstelle während des Umformvorgangs, welche in einer Dünnstelle resultiert und das Umformergebnis nachhaltig beeinträchtigt. Wissenschaftlich stichhaltige Schlussfolgerungen waren nicht möglich.

Gemäß dem Änderungsantrag (Aktenzeichen 62402/005-06#195) wurde deshalb eine „Verchromung einer Walze“ zur Herstellung einwandfreier Folienhalbzeuge statt einer Herstellung von „Vorstrecker für Schaumfolien“ in Auftrag gegeben, um einwandfreie Halbzeuge herstellen zu können. Die Änderung des Finanzierungsplans war in dieser Hinsicht zwingend für den Projekterfolg erforderlich. Erfolgte über Fa. J.van Baal GmbH am 05.07.2023 in Höhe von 2.975,00 €.

- **Einsatz von Leistungen Dritter gemäß Einzelansatz B des Einzelfinanzierungsplans:**

Für dieses Vorhaben wurden keine Leistungen Dritter beauftragt.

12.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Ziel des Forschungsprojektes war die Steigerung der Materialeffizienz im Thermoformen durch den Einsatz von Schaumfolie.

Daher wurden systematisch sowohl eine Prozessanalyse der Flachfolienextrusionsanlage und der Thermoformanlage als auch eine Untersuchung der Halbzeug- und Bauteileigenschaften durchgeführt. In diesen Untersuchungen wurden abhängig von der Dichteinsparung der verschiedenen Materialien, die sich einstellenden Schaumstrukturen und -eigenschaften bewertet. Die Schaumstruktur ist dabei neben den Materialeigenschaften auch von der Prozessführung abhängig. Daher wurde außerdem der Einfluss verschiedener Prozessparameter wie beispielsweise die Temperaturführung Extrusionswerkzeug auf die Dichtereduktion sowie Schaummorphologie untersucht. Weiterhin wurde der Einfluss der Nachexpansion der Halbzeuge beim Aufheizen, die generelle Thermoformbarkeit und die resultierenden Bauteileigenschaften untersucht. Über einen Vergleich der Eigenschaften zwischen kompakten und geschäumten Folien wurde eine Abschätzung gegeben, welche Dichteinsparung die effizienteste Lösung bei Berücksichtigung der Mechanik ist.

Es konnten Erkenntnisse gewonnen werden, die sowohl einen einfacheren Einstieg in den Bereich der Flachfolienschaumextrusion ermöglichen als auch die Prozessführung verbessern

können. Ebenfalls geben die Ergebnisse Auskunft über geeignete Thermoformprozessparameter sowie die sich einstellenden Bauteileigenschaften. Eine Übertragung auf andere Anwendungsgebiete der Kunststofftechnik ist in jedem Fall möglich.

Die Vielzahl der durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die geleistete Arbeit und der Einsatz der Ressourcen angemessen und notwendig waren. Die Arbeiten entsprachen dem begutachteten und bewilligten Antrag gemäß Art und Umfang.

13 ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES

13.1 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CT	Computertomographie
IKV	Institut für Kunststoffverarbeitung
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
LDPE	Low Density Polyethylen
MP	Messpunkt
O ₂	Sauerstoff
OTR	Oxygen Transfer Rate (Sauerstoffpermeation)
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
WDV	Wanddickenverteilung

13.2 Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
d_{\max}	[mm]	Höchste Wanddicke im Formteil
d_{\min}	[mm]	Niedrigste Wanddicke im Formteil
R_a	[μm]	Mittenrauwert
R_z	[μm]	Rautiefe
T_w	[°C]	Werkzeugtemperatur
Δd	[mm]	Wanddickendifferenz ($d_{\max} - d_{\min}$)

14 LITERATUR

- [Abt20] ABTS, GEORG: *Kunststoff-Wissen für Einsteiger: Grundlagen, Eigenschaften und Recycling polymerer Werkstoffe*. München: Carl Hanser Verlag, 2020.
- [AM83] ASHBY, M.; MEDALIST, M.: The Mechanical Properties of Cellular Solids. *Metallurgical Transactions A*, 14A (1983) 7, S. 1755-1769
- [AWD22] ALIZADEH, P.; WILSKI, S.; DAHLMANN, R.: Definitive screening design for the development of alkali resistant PECVD coatings for returnable PET bottles. *Progress in Organic Coatings* 172 (2022)
- [Bon20] BONTEN, CHRISTIAN: *Kunststofftechnik: Einführung und Grundlagen*. München: Carl Hanser Verlag, 2020.
- [CS87] COLTON, J. S.; SUH, N. P.: The nucleation of microcellular thermoplastic foam with additives. Part 1: Theoretical considerations. *Polymer Engineering and Science* 27 (1987) 27, S. 485-492
- [CK11] COLES, R.; KIRWAN, M.J.: *Food and beverage packaging technology*. West Sussex, UK: Wiley-Blackwell, 2011, ISBN: 978-1-444-39217-3
- [Dav08] DAUCH, M.: IKV-Fachtagung „Kunststoffschäume - Neues aus Spritzgießen und Extrusion“ *Chemische Treibmittel - Eine Einführung in das Schäumen von Polymeren*, 2008
- [HB19] HOPMANN, CH.; BALCEROWIAK, D.: Optimierung der Stempelvorstreckung im Thermoformen zur Steigerung der Materialeffizienz. *Extrusion* 25 (2019) 5, S. 38–42
- [Heg04] HEGEMANN, B.: *Deformationsverhalten von Kunststoffen beim Thermoformen - experimentelle und virtuelle Bestimmung*. Universität Stuttgart, Dissertation, 2004
- [HK17] HOPMANN, C.; KRAUS, L.: Physikalisch geschäumte Mehrschichtblasfolien. *Extrusion* 5 (2017), S. 30-33
- [HKB16] HOPMANN, CH.; KARATZIAS, C.; BÖTTCHER, A.: Syntaktische Schäume zur einstufigen Sandwichherstellung von FVK. *Lightweight Design* 9 (2016) 2, S. 44–51
- [IS16] ILLIG, A.; SCHWARZMANN, P.: *Thermoformen in der Praxis*. München: Hanser Verlag, 2016, ISBN: 978-3-446-44403-4
- [Kos96] KOSCHMIEDER, M.: *Untersuchung verschiedener Einflussgrößen bei der Schaumextrusion von Polyethylen mit CO₂ als Treibmittel*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Diplomarbeit, 1996 – Betreuer: D. Kropp
- [Leo17] LEOPOLD, T.: Unser Ziel bis 2030 heißt Faktor 3. *K-Profi* 9 (2017) 6, S. 6-8

- [LP14] LEE, S.T., PARK, C.B.: *Foam Extrusion – Principles and Practice Second Edition*, Boca Raton: CRC Press, 2014
- [Lan95] LANDROCK, A. H.: *Handbook of plastic foams: types, properties, manufacture and applications*: Noyes Publications, 1995
- [Mos13] MOSER, A.: *Nutzung von Prozesswissen beim Thermoformen von Verpackungen*. Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2013
- [NN98] N.N.: *DIN 53380-3: Prüfung von Kunststoffen- Bestimmung der Gasdurchlässigkeit – Teil 3: Sauerstoffspezifisches Trägergas Verfahren zur Messung an Kunststoff-Folien und Kunststoff-Formteilen*. Berlin: Beuth Verlag, 1998
- [NN12a] N.N.: *Statistisches Jahrbuch 2012*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2012, ISBN: 978-3-8246-0989-5
- [NN13] N.N.: *DIN EN ISO 472:2013-06: Kunststoffe – Fachwörterverzeichnis*. Berlin: Beuth Verlag, 2013
- [NN15] N.N.: *Das neue Magna-Mike*. Datenblatt, Olympus Deutschland GmbH, Hamburg, 2015
- [NN17] N.N.: *ASTM D 3985: Bestimmung der Sauerstoff/Gasdurchlässigkeitszahl bei Kunststofffolien mit dem coulometrischen Messfühler*. Berlin: Beuth Verlag, 2017
- [NN19] N.N.: *DIN 55440-1: Packmittelprüfung - Ermittlung des Stauchwiderstands – Teil 1: Prüfung mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit*. Berlin: Beuth Verlag, 2019
- [NN20] N.N.: *Hydrocerol CF 40 E*. Datenblatt, Avient Corporation, USA, 2020
- [PBS95] PARK, C.B.; BALDWIN, D.F.; SUH, N.P.: Effect of the pressure drop rate on cell nucleation in continuous processing of microcellular polymers. *Polymer Engineering & Science* 35 (1995) 5, S. 432-440
- [Pfe13] PFENNIG, W.: *Trendbarometer: Portrait der deutschen Kunststoffverarbeiter*. *Plastverarbeiter* 64 (2013) 6, S. 16-19
- [Sta06] STANGE, J.; *Einfluss rheologischer Eigenschaften auf das Schäumverhalten von Polypropylenen unterschiedlicher molekularer Struktur*. Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2006
- [TB99] THRONE, J.; BEINE, J.: *Thermoformen Werkstoffe – Verfahren – Anwendungen*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1999
- [URL24a] N.N.: *Plastic Europe- Plastic. The facts 2022*, URL: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/>, 25.01.2024

- [URL24b] N.N.: Leichter(e) Auto(s) fahren. URL: <https://www.kunststoffmagazin.de/spritzgiessen/geschaeumte-kunststoffe---leichter-e--auto-s--fahren.htm>, 25.01.2024
- [URL24c] N.N.: *Neue Verpackung*. URL: <http://www.neueverpackung.de/texte/anzeigen/6999/Die-zehn-wichtigsten-Trends-in-der-Verpackungsindustrie>, 25.01.2024
- [URL24d] N.N.: *HYTAC® Stempelmaterialauswahl*. URL: <https://www.cmtmaterials.eu/selection-tool-thin-gauge-thermoforming/>, 25.01.2024
- [Wir04] WIRTZ, J.: *Thermoformen von Schäumen und mehrschichtigen Verbunden mit Schaumfolie*. RWTH Aachen, Dissertation, 2004, ISBN: 3-86130-501-1
- [Zha10] ZHANG, H.: *Scale-Up of Extrusion Foaming Process for Manufacture of Polystyrene Foams Using Carbon Dioxide*. Universität Toronto, Dissertation, 2010

15 ANHANG

15.1 Liste der Veröffentlichungen

HOPMANN, CH.; STIEGLITZ, M.; GRÜBER, D.; LEUCHTENBERGER, L.: Thermoformen im Leichtgewicht durch geschäumte Folienschicht. *Plastverarbeiter* (2024)

HOPMANN, CH.; STIEGLITZ, M.; GRÜBER, D.; LEUCHTENBERGER, L.: Schaumige Halbzeuge: Verarbeitung und Festigkeit im Blick. *Extrusion* (erscheint 06/2024)

Studentische Arbeiten: Bachelorarbeit:

Wienold, S.: Einfluss der Schaumstruktur und des Schichtaufbaus von geschäumten Halbzeugen auf die Verarbeitbarkeit im Thermoformverfahren und die mechanischen Eigenschaften der Formteile.

Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2024 – Betreuer: D. Grüber

15.2 Wändickenverteilungen PS

1-Schicht-Folie:

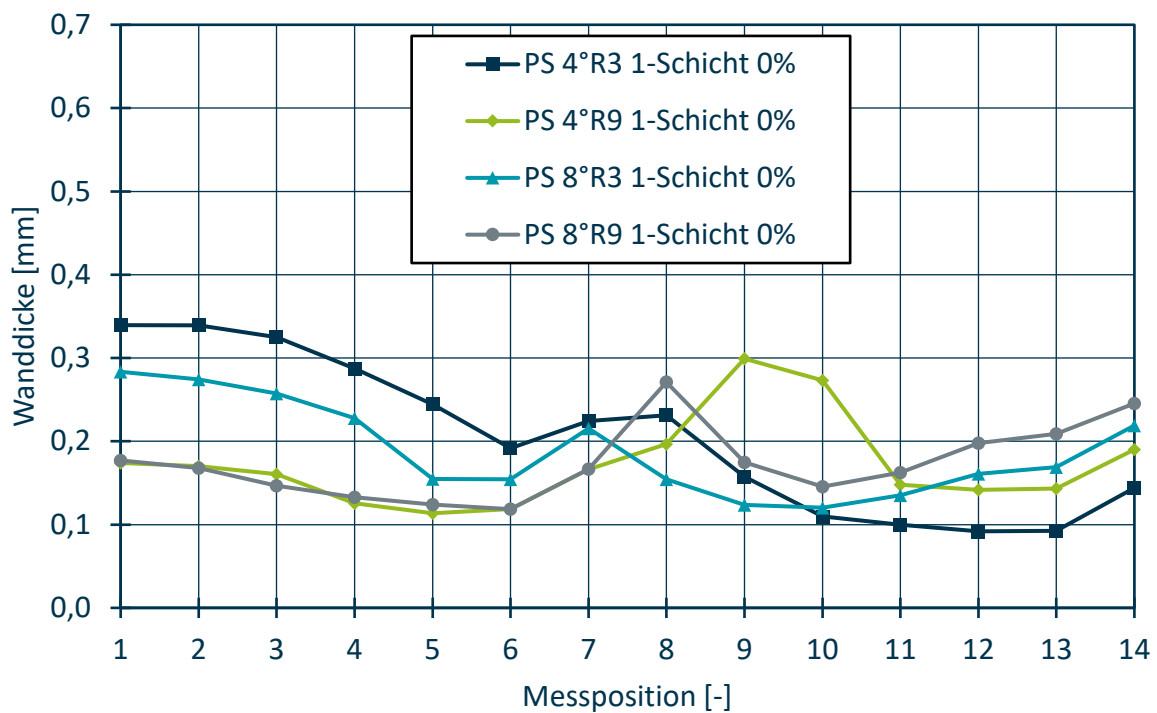


Abb. 15.1: WDV unter Einsatz der kompakten 1-Schicht-Folie aus Polystyrol in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie

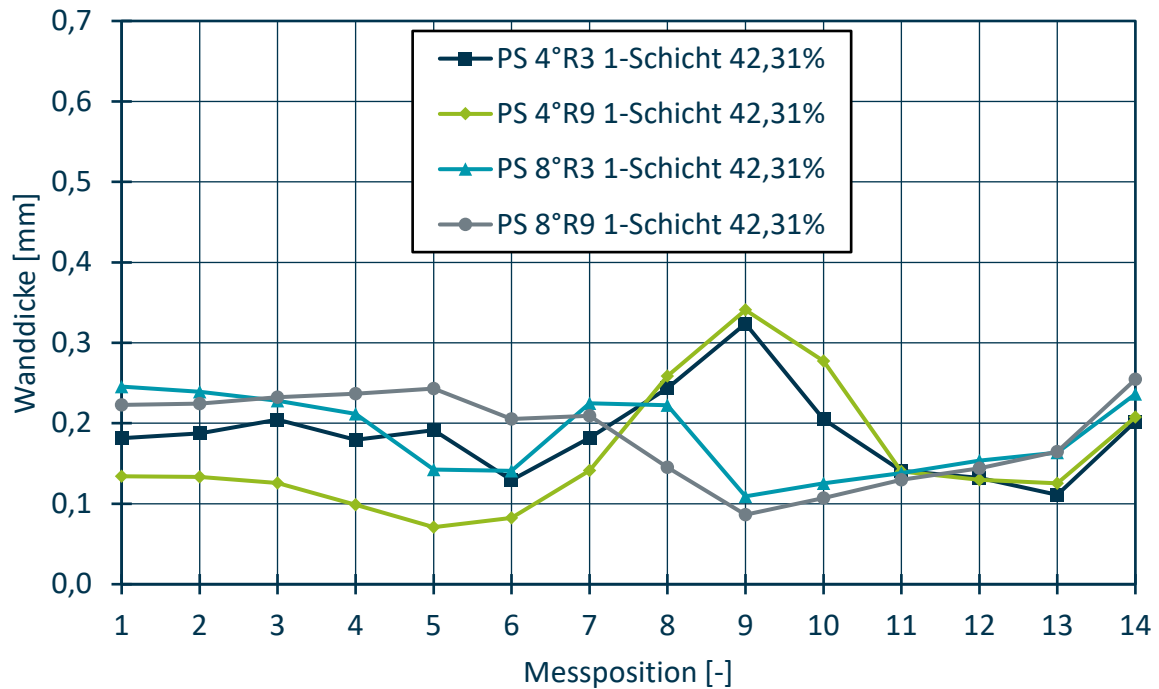


Abb. 15.2: WDV unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 42,431 %

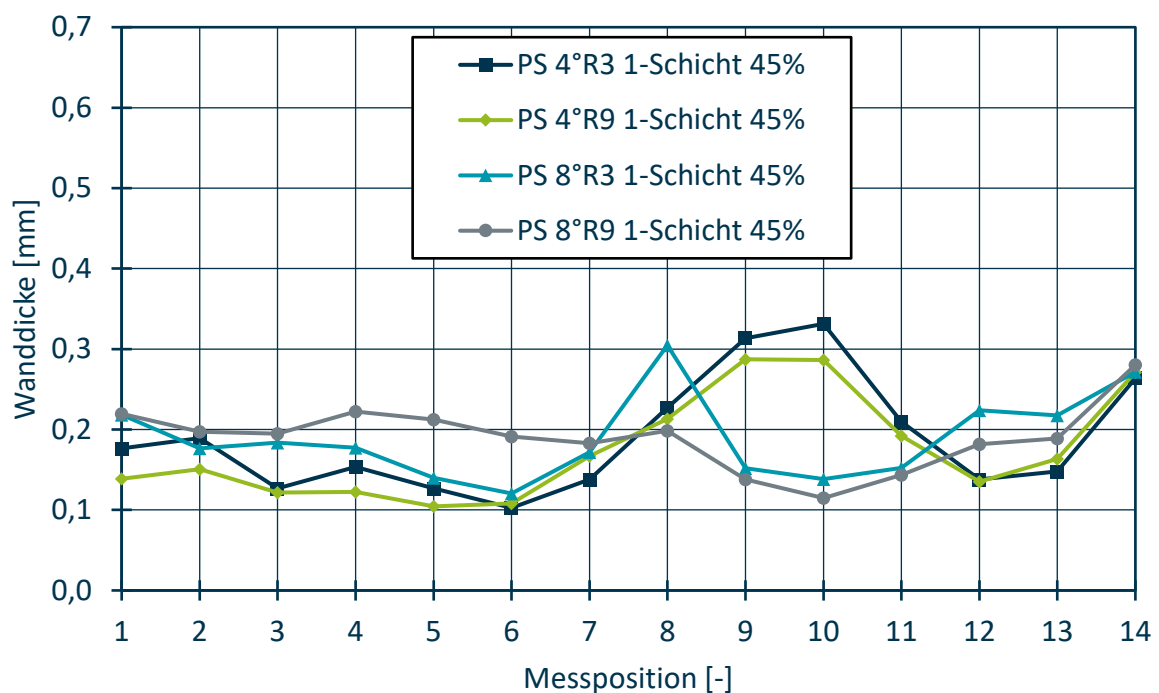


Abb. 15.3: WDV unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 45 %

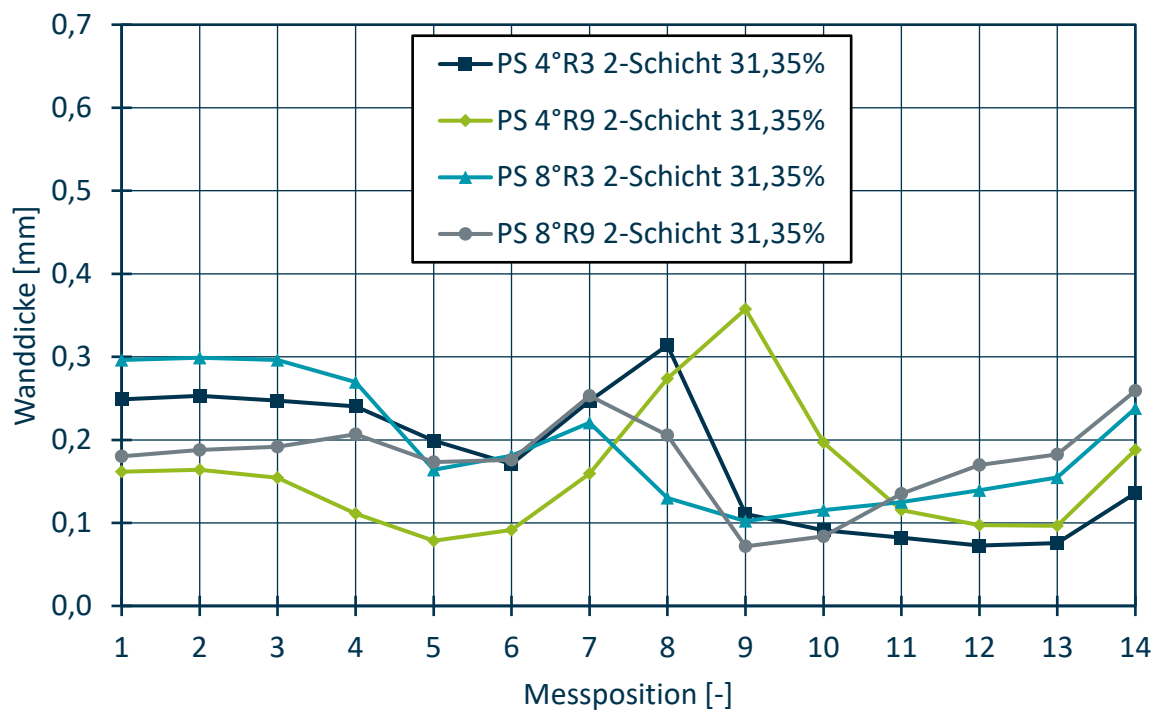
2-Schicht-Folie:

Abb. 15.4: WDV unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 31,35 %

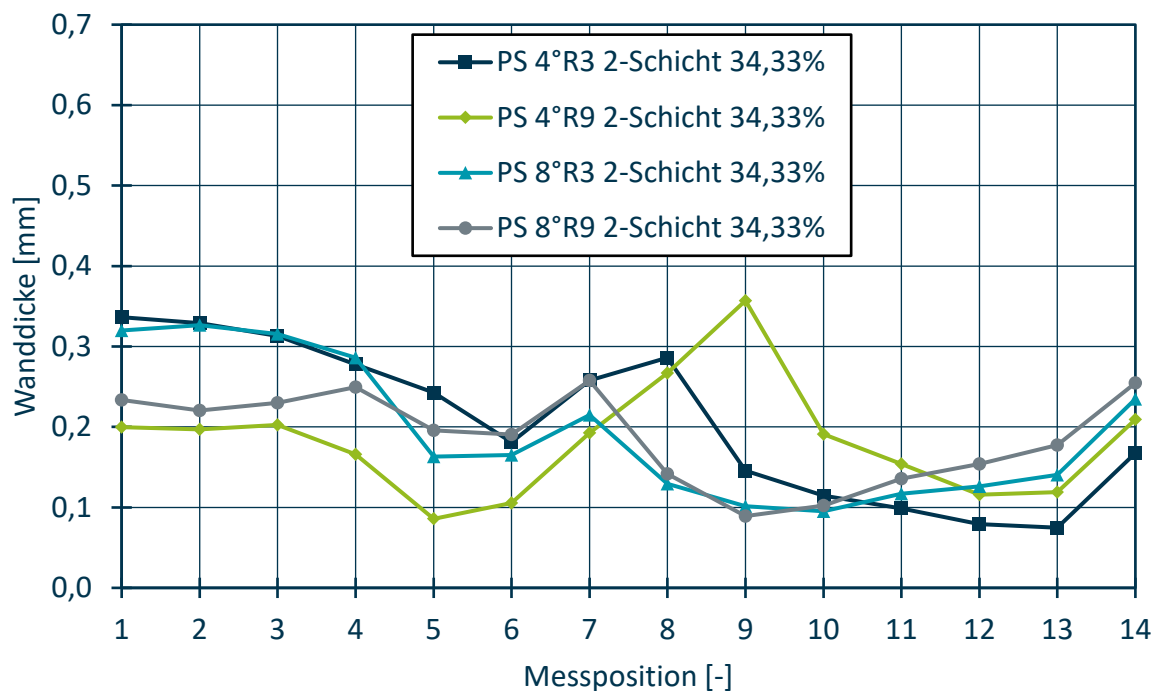


Abb. 15.5: WDV unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 34,33 %

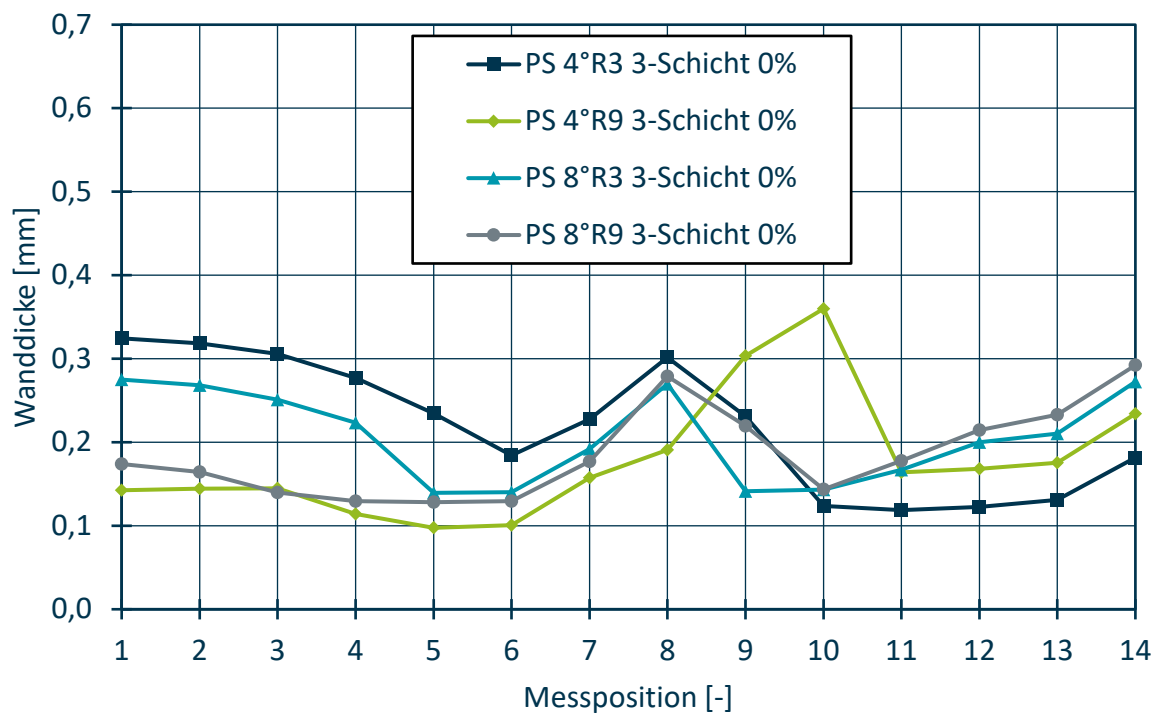
3-Schicht-Folie:

Abb. 15.6: WDV unter Einsatz der kompakten 3-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie

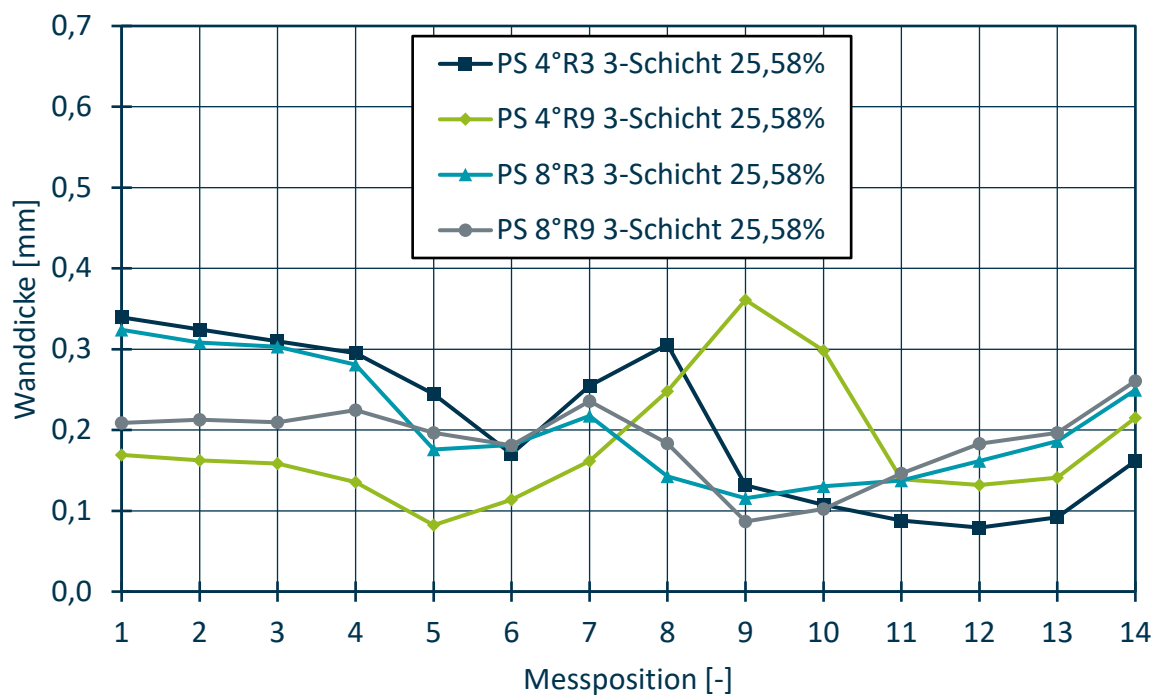


Abb. 15.7: WDV unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 25,58 %

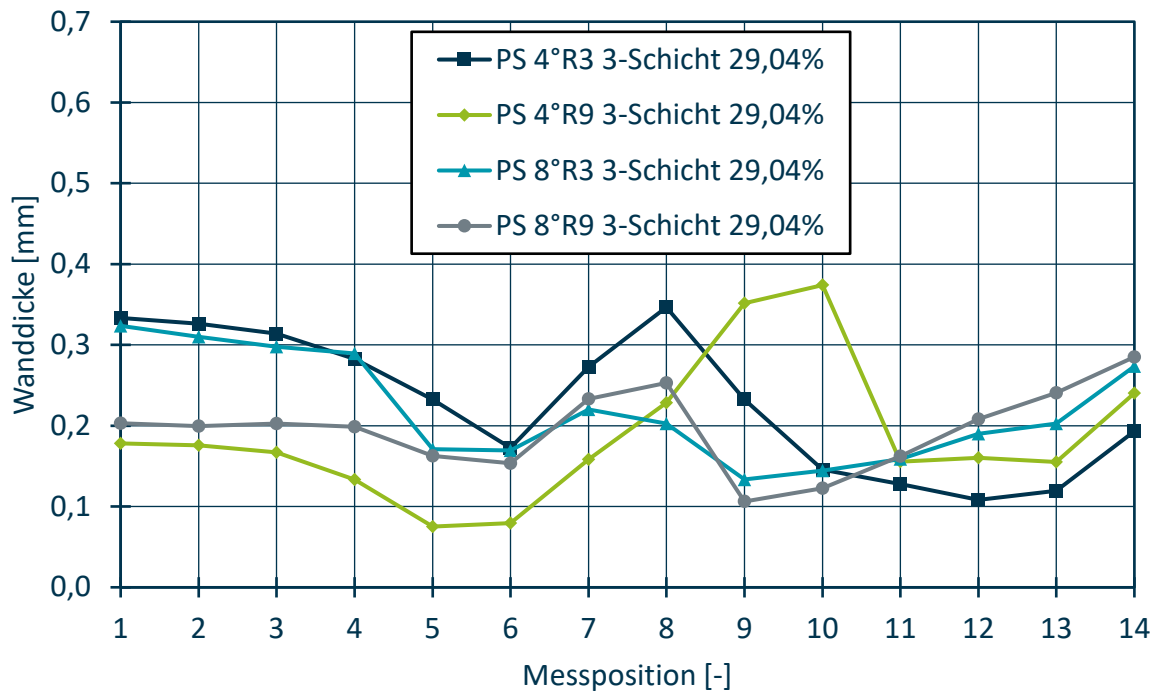


Abb. 15.8: WDV unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PS in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 29,04 %

15.3 Wanddickenverteilungen PP

1-Schicht-Folie:

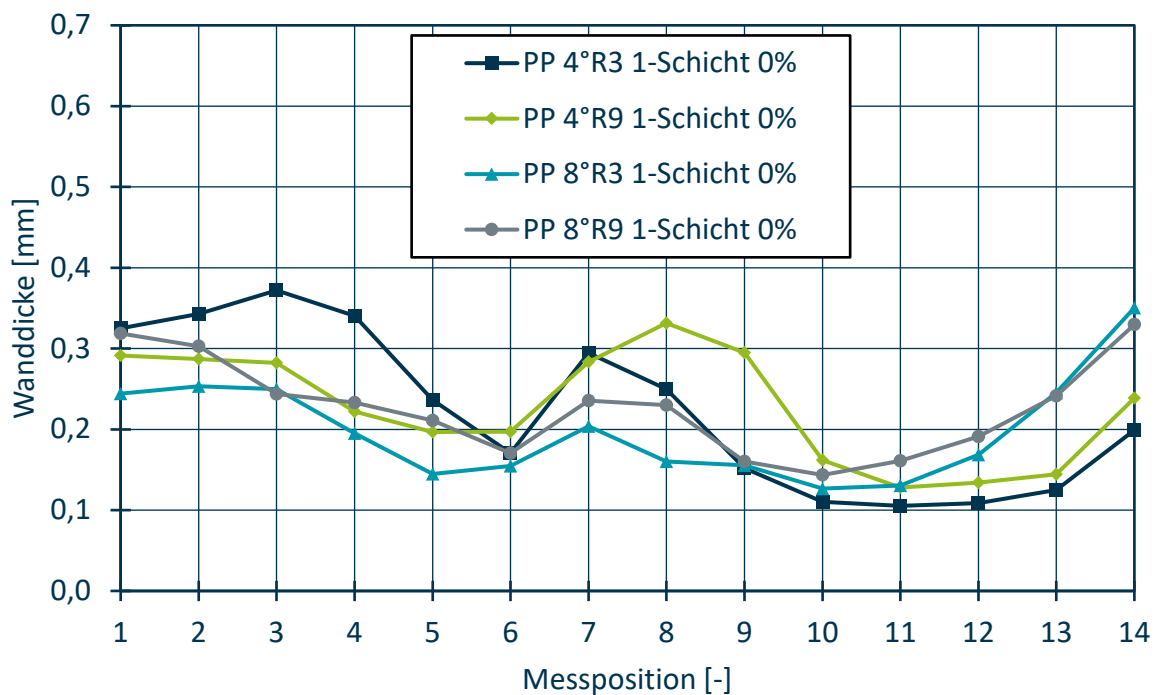


Abb. 15.9: WDV unter Einsatz der kompakten 1-Schicht-Folie aus Polypropylen in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie

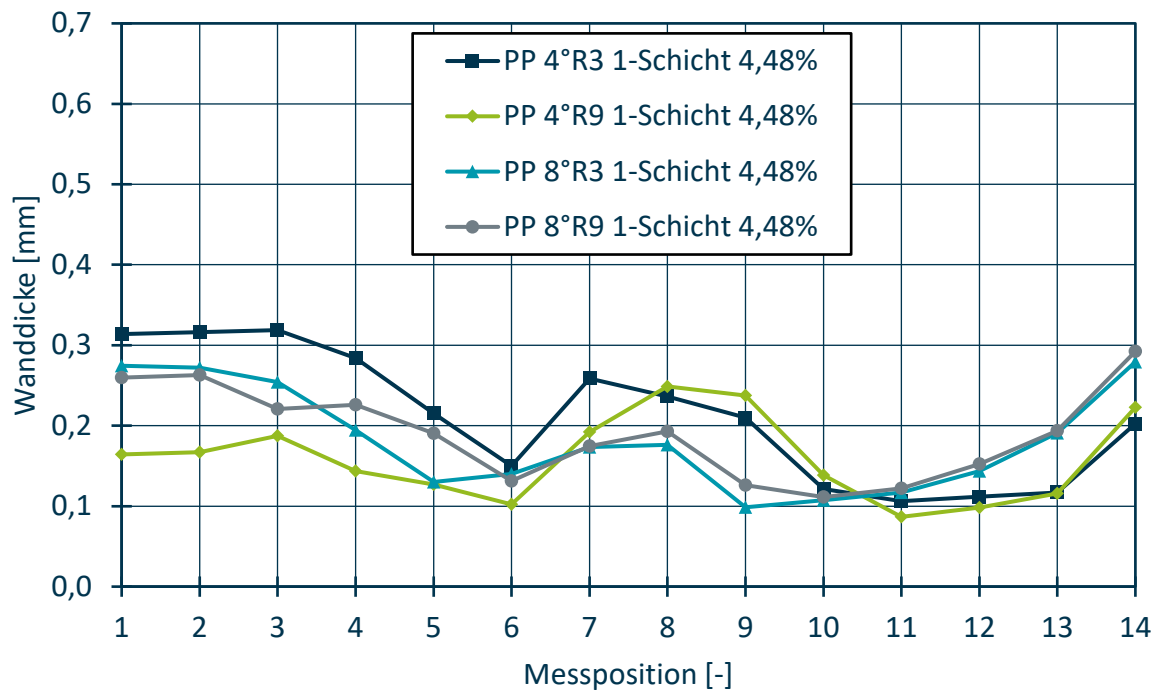


Abb. 15.10: WDV unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 4,48 %

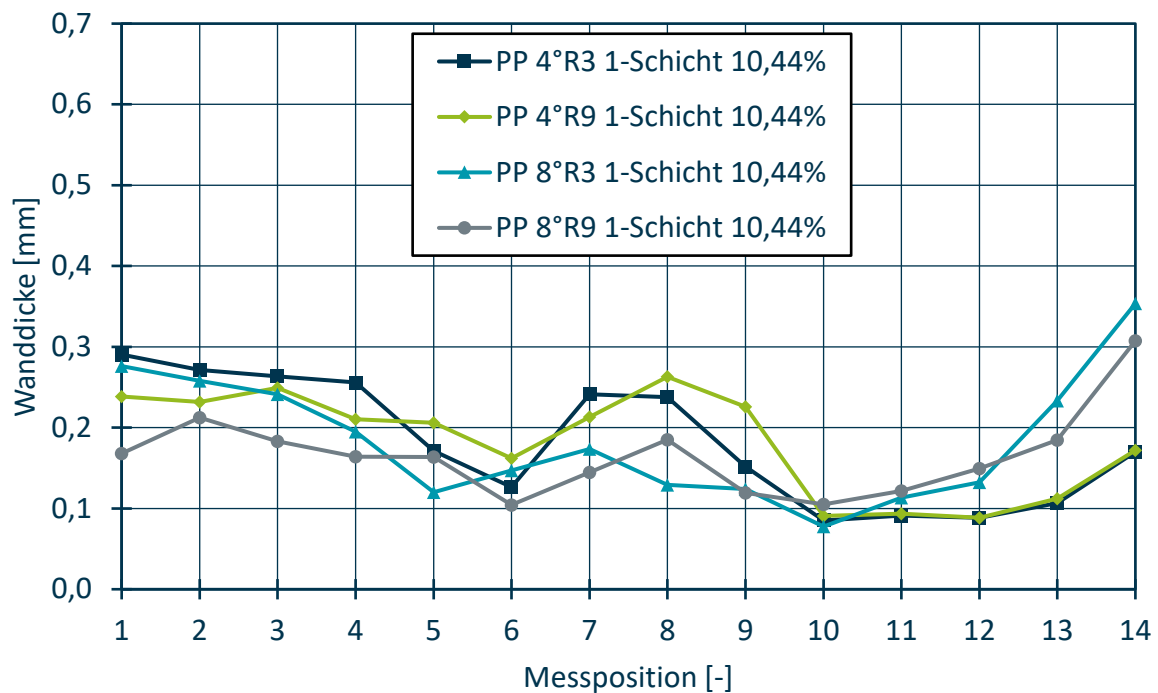


Abb. 15.11: WDV unter Einsatz der 1-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 10,44 %

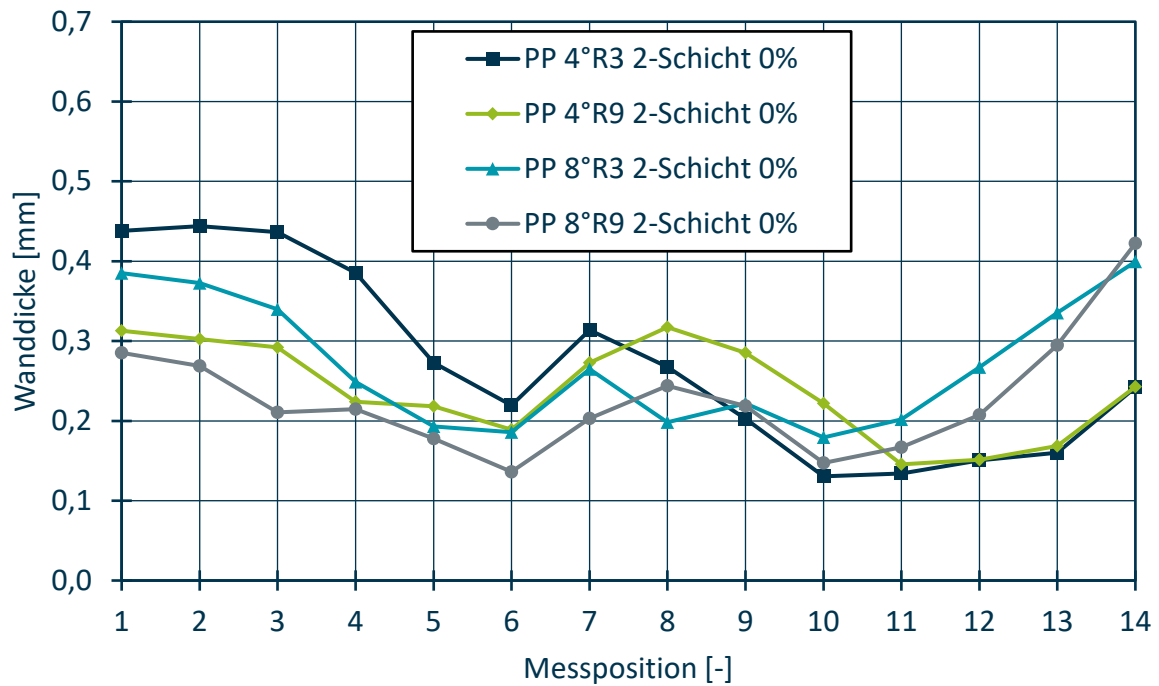
2-Schicht-Folie:

Abb. 15.12: WDV unter Einsatz der kompakten 2-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie

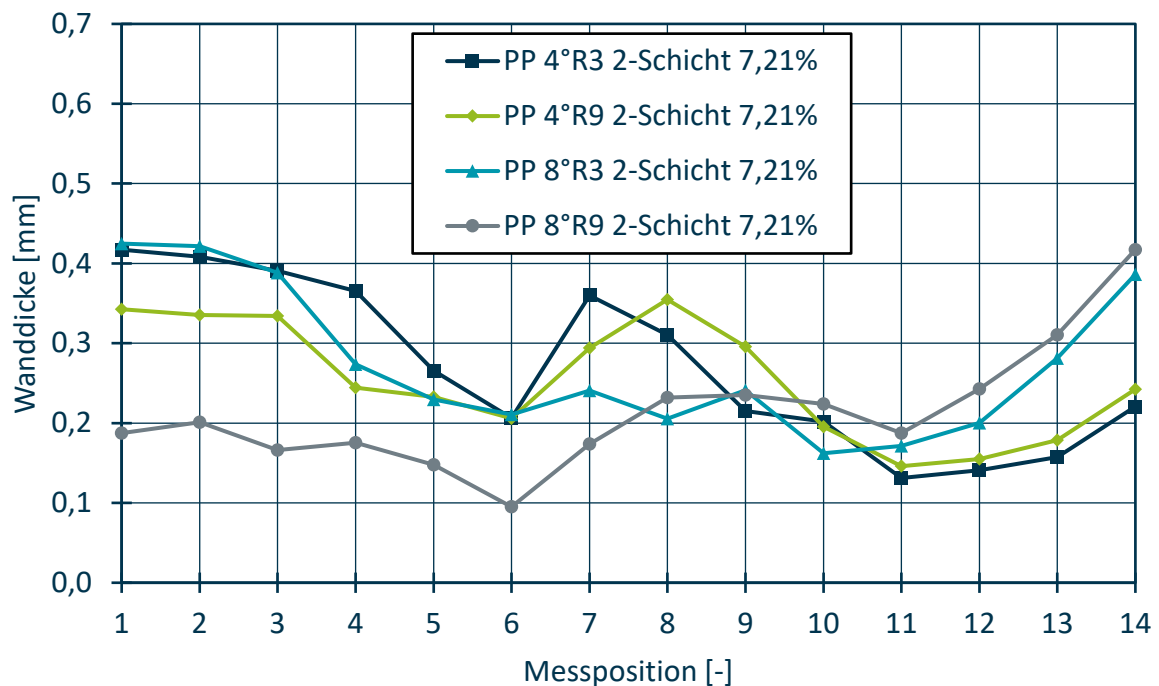


Abb. 15.13: WDV unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 7,21 %

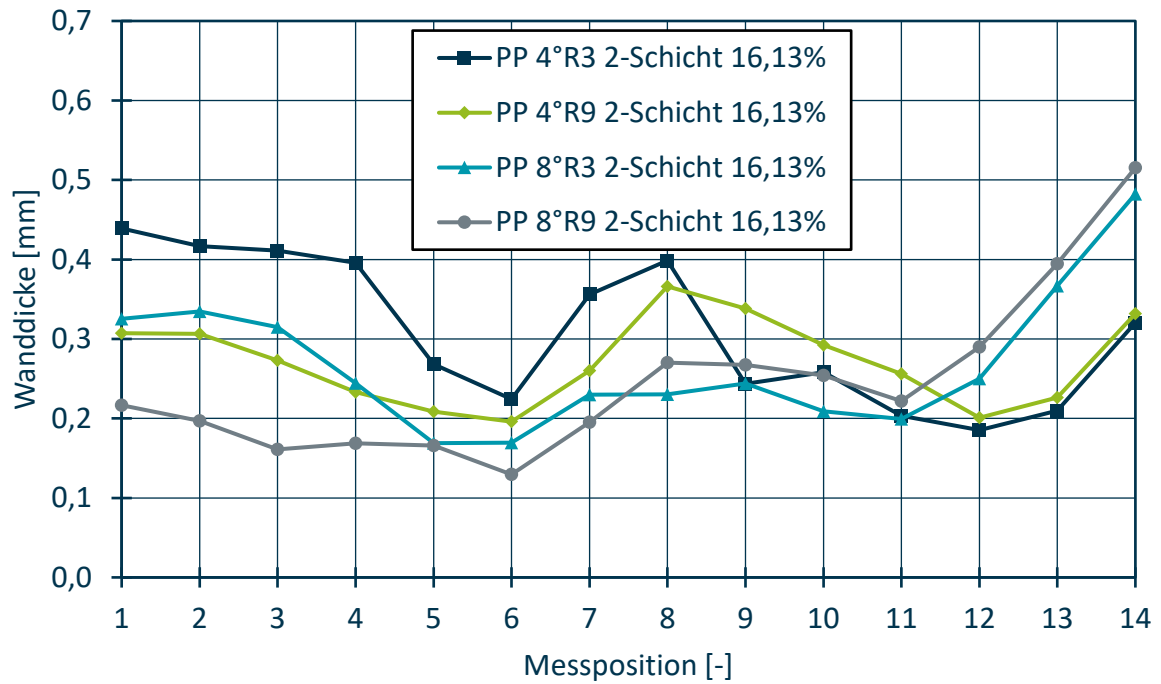


Abb. 15.14: WDV unter Einsatz der 2-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 16,13 %

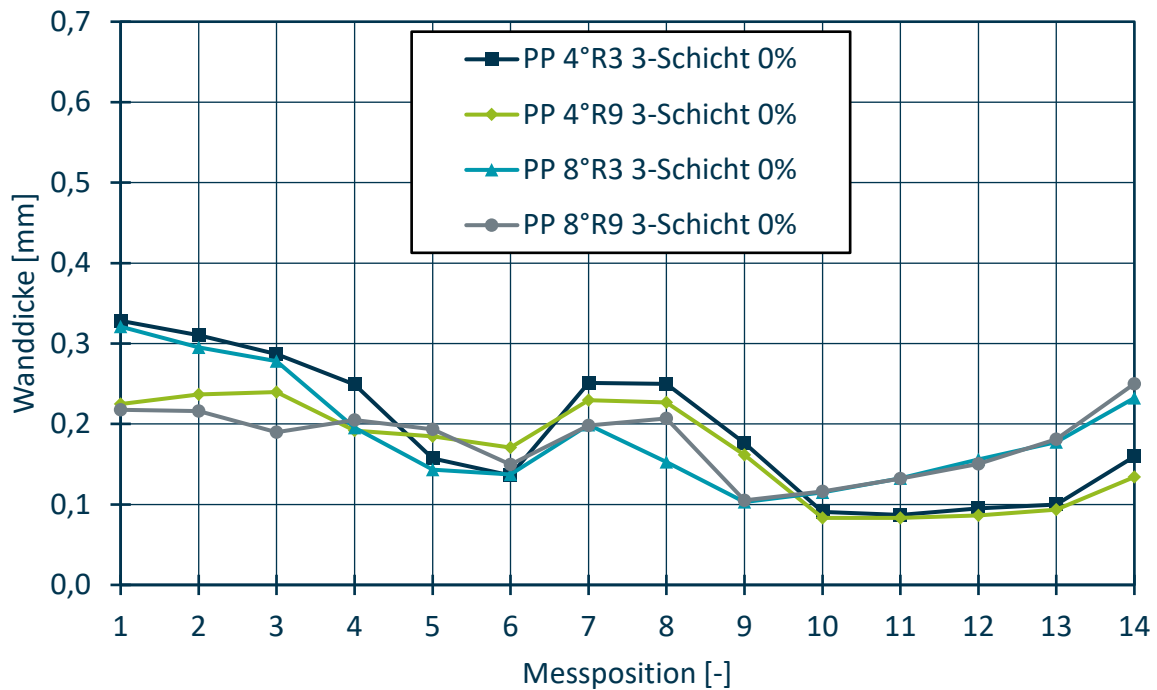
3-Schicht-Folie:

Abb. 15.15: WDV unter Einsatz der kompakten 3-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie

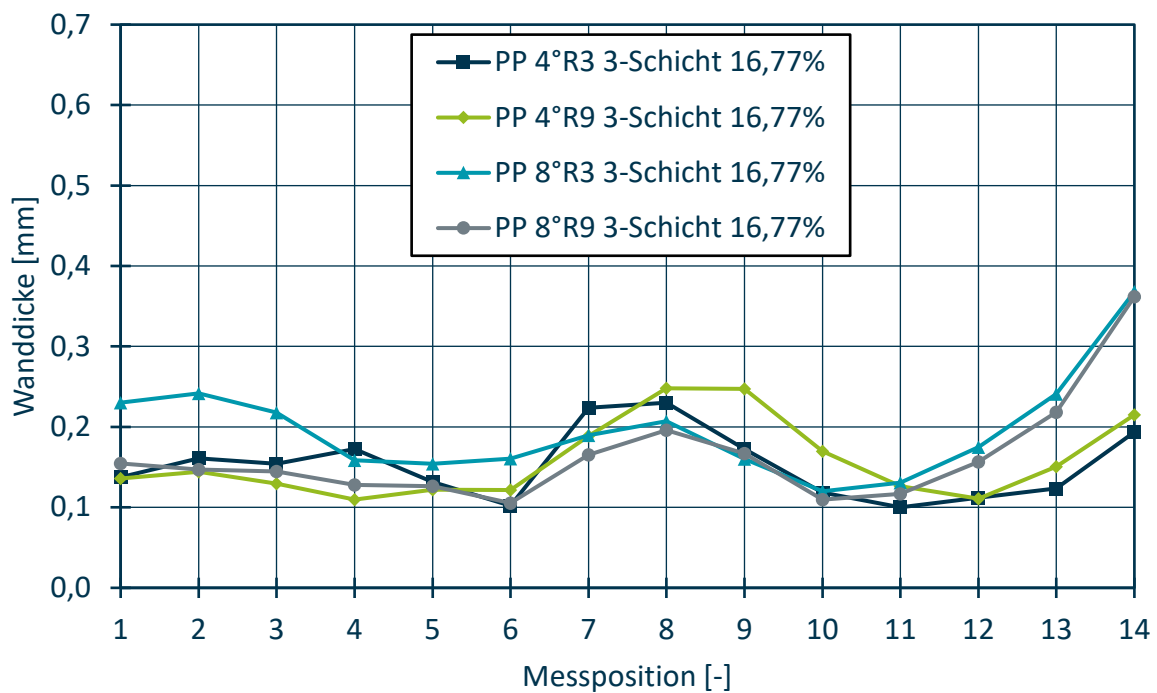


Abb. 15.16: WDV unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstempelgeometrie bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 16,77 %

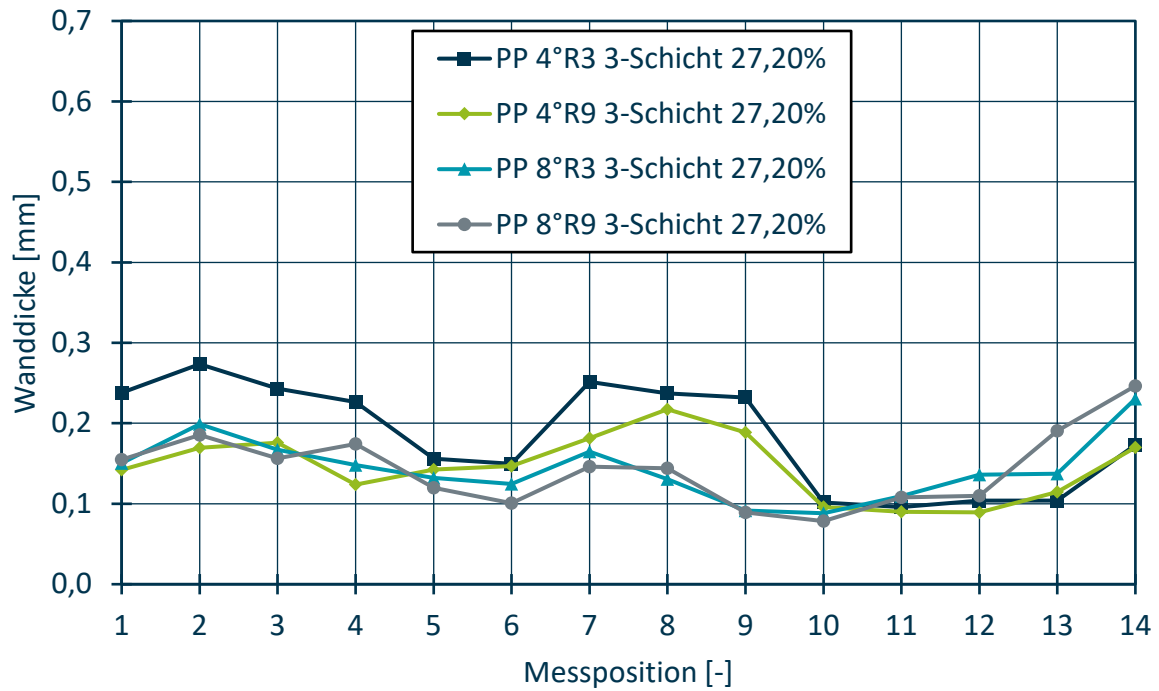


Abb. 15.17: WDV unter Einsatz der 3-Schicht-Folie aus PP in Abhängigkeit der Vorstreckstemperatur bei einer Gewichtsreduktion des Halbzeugs von 27,20 %