

Schlussbericht vom 30.11.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 21185 N

Thema

Aufbau eines verbesserten Material- und Prozessverständnisses für die Herstellung physikalisch geschäumter Mehrschichtblasfolien durch die Identifizierung von Wirkzusammenhängen zwischen der Materialstruktur und den Schaumeigenschaften

Berichtszeitraum

01.10.2020 bis 31.09.2022

Forschungsvereinigung

Kunststoffverarbeitung

Forschungseinrichtung(en)

Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen e.V.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

4 KURZZUSAMMENFASSUNG

Die Wirtschaftlichkeit industrieller Produktionsketten steht unmittelbar in Zusammenhang mit der Ressourcenschonung durch Erhöhung der Materialeffizienz innerhalb des Herstellungsprozesses. Diese Kausalität führt in direkter Konsequenz zu einer Verringerung der Produktionskosten sowie einer geringeren Umweltbelastung. Der Aspekt der Nachhaltigkeit steht auch in der Kunststoffindustrie im Vordergrund [Toe18], weshalb die Produktion dünner (Mehrschicht)-Folien in der Blasfolienextrusion seit längerem Entwicklungsgegenstand ist. Zur weiteren Reduktion des Gewichtes der Folien kann die Blasfolie noch zusätzlich geschäumt werden.

Ziel des Forschungsvorhabens war, die Zusammenhänge zwischen dem molekularen Aufbau des Kunststoffes und des Prozesses mit der resultierenden Schaumstruktur näher zu untersuchen. Diese sind für die Prozessführung von entscheidender Bedeutung, da die Molekülstruktur bspw. die dehnreologischen Eigenschaften der treibmittelbeladenen Schmelze stark beeinflusst und nur dadurch können kmU auf effiziente Weise geeignete Materialien für ihre Prozesse auswählen und die richtigen Prozesseinstellungen identifizieren.

Dazu wurden systematisch unterschiedliche Materialien der Polyolefine ausgewählt und hinsichtlich ihres molekularen Aufbaus charakterisiert. Die Materialien zeigten innerhalb der Materialtype Unterschiede in Bezug auf Molekulargewicht, -verteilung, Verzweigungsgrad und Dehn- und Scherviskosität. Für das Erreichen einer guten Zellstruktur wird vielfach auf den Einsatz von Nukleierungsmitteln zurückgegriffen. Daher wurden für die Materialien zudem geeignete Nukleierungsmittel identifiziert und erprobt. Hierbei stellte sich ein talkumbasiertes Nukleierungsmittel als ideal heraus und erzielte die feinzelligste Schaumstruktur. Die Schaumstruktur ist dabei neben den Materialeigenschaften auch von der Prozessführung abhängig. Den größten Einfluss auf die Dichtereduktion sowie Schaummorphologie nehmen die Prozessparameter Schmelzetemperatur und Schichtdickenverhältnis zwischen Außen- und Mittelschicht. In einem weiteren Schritt wurde ein Vergleich zwischen konventionell hergestellten und geschäumten Dreischichtfolien vorgenommen, um die Rohstoffeinsparung und den wirtschaftlichen Vorteil geschäumter Folien zu ermitteln. Als Ergebnis ergab sich eine Gewichtseinsparung von zwei Dritteln bei einer massenunabhängigen Steigerung der Zugfestigkeit sowie fünffachhöherer Isolationsfähigkeit. Bei der Ermittlung der Wirkzusammenhänge zwischen molekularem Aufbau des Kunststoffes und der Schaummorphologie konnte eine Zusammenspiel der verschiedenen Materialcharakterisierungskennwerte festgestellt werden. Die Materialien PE-LD und PE-LLD zeichnete sich durch die längeren Verzweigungen und hohe Dehnviskosität als ideal.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

VORWORT UND DANK

Die nachfolgend beschriebenen und erläuterten Untersuchungen wurden im Rahmen des IGF-Vorhabens 21185 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 Lars Kraus 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 Sachmitteln 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
4	ZIEL UND VORGEHEN DES FORSCHUNGSVORHABEN	9
5	VERSUCHSUMGEBUNG UND ANALYSEMETHODEN	10
5.1	Materialien	10
5.2	Extrusionsanlage	11
5.3	Treibmitteldosierung und Gasinjektionseinheit	11
5.4	Analysegeräte, -methoden und Prüfvorschriften.....	12
5.4.1	Bestimmung des Massedurchsatzes.....	12
5.4.2	Bestimmung der Foliendickenschwankung	12
5.4.3	Bestimmung der Foliendichte	12
5.4.4	Bestimmung der Schaumstruktur der Folien	13
5.4.5	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften.....	13
5.4.6	Bestimmung der thermischen Eigenschaften.....	14
6	ERMITTLUNG DER EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE SCHAUMSTRUKTUR GESCHÄUMTER MEHRSCHICHTBLASFOLIEN.....	15
6.1	Nukleierungsmittel	15
6.2	Düsendesign	15
6.3	Prozessparameter	16
6.4	Materialeigenschaften	16
7	AUSWAHL UND CHARAKTERISIERUNG DER EINGESETZTEN MATERIALIEN.....	18
7.1	Ermittlung der Scherviskosität mittels Hochdruck-Kapillarrheometer	19
7.2	Ermittlung der Dehnviskosität mittels Membran-Inflation-Rheometer	21
7.3	Ermittlung des molekularen Aufbaus mittels Gelpermeationschromatographie.....	23
8	UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DES DÜSENDESIGNS AUF DIE SCHAUMEIGENSCHAFTEN	25
8.1	Konstruktion und analytische Untersuchungen von verschiedenen Blasfoliendüsen	25
8.2	Extrusionsversuche mit unterschiedlichen Düsendesigns.....	26
8.3	Einfluss der Düsendesigns auf die Schaumstruktur	27
9	UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES VERSCHIEDENER NUKLEIERUNGSMITTEL AUF DIE SCHAUMEIGENSCHAFTEN	28
9.1	Nukleierungsmittel für PP und PE-HD	28
9.2	Nukleierungsmittel für PE-LD und PE-LLD.....	29

10	ERMITTLUNG DER WIRKZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN MATERIALSTRUKTUR UND SCHAUMMORPHOLOGIE.....	31
11	UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DIVERSEER PROZESSPARAMETER AUF DIE SCHAUMSTRUKTUR.....	34
1.1.1	Auswertung der Dichte bezüglich der Prozessparameteranalyse.....	35
1.1.2	Auswertung der Zellfläche bezüglich der Prozessparameteranalyse.....	35
1.1.3	Auswertung der Zugfestigkeit bezüglich der Prozessparameteranalyse.....	35
1.1.4	Auswertung des E-Moduls bezüglich der Prozessparameteranalyse.....	36
1.1.5	Ergebnis der Prozessparameteranalyse.....	36
12	VERGLEICH KOMPakter UND GESCHÄUMTER FOLIE.....	37
13	EINSATZ VON REZYKLAT IN GESCHÄUMTER MEHRSCICHTBLASFOLIE	38
1.2	Versuchsbeschreibung	38
1.3	Einfluss des Rezyklatanteils.....	39
14	FAZIT UND AUSBLICK	41
15	ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT	43
15.1	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	43
15.2	Durchgeführte Transfermaßnahmen des Vorhabens:	43
15.3	Geplante Maßnahmen nach Abschluss des Forschungsvorhabens:	46
15.4	Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzeptes.....	47
16	WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER UND WIRTSCHAFTLICHER NUTZEN DER ERZIELTEN ERGEBNISSE FÜR KMU	48
16.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen	48
16.2	Wirtschaftlicher Nutzen.....	48
17	ERGÄNZENDE HINWEISE ZUM FORSCHUNGSVORHABEN.....	49
17.1	Einsatz von Geräten und wissenschaftlich-technischem Personal	49
17.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	50
18	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES.....	51
18.1	Abkürzungen	51
18.2	Formelzeichen und Indizes	51
19	LITERATUR.....	52
20	ANHANG.....	54
20.1	Liste der Veröffentlichungen.....	54
20.2	Liste der studentischen Arbeiten	54

1 ZUSAMMENFASSUNG

Deskriptoren: Blasfolien, Schaumstruktur, Materialcharakterisierung, Nachhaltigkeit

Schlagnworte: Dehnviskosität, molekularer Aufbau, Materialeinsparung

Die Wirtschaftlichkeit industrieller Produktionsketten steht unmittelbar in Zusammenhang mit der Ressourcenschonung durch Erhöhung der Materialeffizienz innerhalb des Herstellungsprozesses. Diese Kausalität führt in direkter Konsequenz zu einer Verringerung der Produktionskosten sowie einer geringeren Umweltbelastung. Der Aspekt der Nachhaltigkeit steht auch in der Kunststoffindustrie im Vordergrund [Toe18], weshalb die Produktion dünner (Mehrschicht)-Folien in der Blasfolienextrusion seit längerem Entwicklungsgegenstand ist. Zur weiteren Reduktion des Gewichtes der Folien kann die Blasfolie noch zusätzlich geschäumt werden. Das Einbringen einer Schaumstruktur in bestehende Produkte lässt sowohl Materialeinsparungen als auch das Einbringen von neuen Funktionen in die Folie zu wie z. B. eine bessere thermische Isolation oder höhere mechanische Dämpfung.

Ziel des Forschungsvorhabens war, die Zusammenhänge zwischen dem molekularen Aufbau des Kunststoffes und des Prozesses mit der resultierenden Schaumstruktur näher zu untersuchen. Diese sind für die Prozessführung von entscheidender Bedeutung, da die Molekülstruktur bspw. die dehnreologischen Eigenschaften der treibmittelbeladenen Schmelze stark beeinflusst und nur dadurch können kmU auf effiziente Weise geeignete Materialien für ihre Prozesse auswählen und die richtigen Prozesseinstellungen identifizieren.

Dazu wurden systematisch unterschiedliche Materialien der Polyolefingruppen PE-LD, PE-LLD, PE-HD sowie PP ausgewählt und hinsichtlich ihres molekularen Aufbaus charakterisiert. Die Materialien zeigten innerhalb der Materialtype große Unterschiede in Bezug auf Molekulargewicht, -verteilung, Verzweigungsgrad und Dehn- und Scherviskosität.

Für das Erreichen einer guten Zellstruktur wird vielmals auf den Einsatz von Nukleierungsmitteln zurückgegriffen. Daher wurden für die unterschiedlichen Materialien zudem geeignete Nukleierungsmittel identifiziert und erprobt. Hierbei stellte sich ein talkumbasiertes Nukleierungsmittel als ideal heraus und erzielte die feinzelligste Schaumstruktur. Die Schaumstruktur ist dabei neben den Materialeigenschaften auch von der Prozessführung abhängig. Den größten Einfluss auf die Dichterduktion sowie Schaummorphologie nehmen die Prozessparameter Schmelztemperatur und Schichtdickenverhältnis zwischen Außen- und Mittelschicht.

In einem weiteren Schritt wurde ein Vergleich zwischen konventionell hergestellten und geschäumten Dreischichtfolien vorgenommen, um die Rohstoffeinsparung und den wirtschaftli-

chen Vorteil geschäumter Folien zu ermitteln. Als Ergebnis ergab sich eine Gewichtseinsparung von zwei Dritteln bei einer massenunabhängigen Steigerung der Zugfestigkeit sowie fünf-fachhöherer Isolationsfähigkeit.

Bei der Ermittlung der Wirkzusammenhänge zwischen molekularem Aufbau des Kunststoffes und der Schaummorphologie konnte ein Zusammenspiel der verschiedenen Materialcharakterisierungskennwerte festgestellt werden. Generell ließen sich mit den Materialien PE-HD und PP aufgrund ihrer niedrigen Dehnviskosität und damit verbundenen schlechten Schmelzefestigkeit keine geschäumte Mehrschichtblasfolie hergestellt werden. Bei den Materialien PE-LD und PE-LLD zeichnete sich ein länger verzweigtes Material mit hoher Dehnviskosität als ideal.

2 EINLEITUNG

Steigende Energiekosten und regulative Erschwernisse lassen die Preise von Kunststoff-Neuware ansteigen und erfordert die ständige Weiterentwicklung der gesamten Branche. Um weltweite Produktionsmengen von zuletzt rund 370 Mio. Tonnen im Jahr 2020 erzielen zu können, rücken vermehrt die Ressourcenschonung sowie die Senkung der Produktionskosten in den Fokus der Unternehmen [URL21]. Rund 30 % der Gesamtmenge des in Deutschland im Jahr 2019 verarbeiteten Kunststoffes von 14,2 Mio. Tonnen wurden dabei für die Produktion von Verpackungsmaterialien verwendet [URL20]. Materialeinsparungen zeigen somit ein großes Potential innerhalb der Blasfolienextrusion, welche meist für die Herstellung von Folien im Bereich der Lebensmittelindustrie sowie für Medizinprodukte verwendet wird. Neben der Entwicklung von biobasierten und biologisch abbaubaren Kunststoffen als auch der Verwendung von Rezyklat, kann auch durch das Schäumen von Polyolefinen der Materialverbrauch gesenkt werden.

Geschäumte Kunststoffe zeichnen sich vor allem durch ihre thermische und akustische Isolierwirkung, gute mechanische Dämpfungseigenschaften und einer erheblichen Gewichtseinsparung durch ihre geringe Dichte aus [Bon20]. Bei Mehrschichtfolien der Blasfolienextrusion wird dies mittels geschäumter Mittelschicht realisiert. Die kompakten Außenschichten weisen Vorteile wie deren Bedruckbarkeit oder eine Sperrwirkung gegenüber Wasserdampf auf [URL22]. Aus der adaptierbaren Kombination von „kompakt“ und „geschäumt“ resultiert eine Anpassungsfähigkeit der Folie an die geforderten Eigenschaften des Endproduktes.

Eine große Herausforderung beim Schäumen von Kunststoffen stellt die Herstellung einer möglichst feinzelligen und homogen verteilten Schaumstruktur dar. Die Kombination aus Mehrschicht-Blasfolienextrusion und der Technologie des Schäumens ist noch weitestgehend unerforscht. Der Einfluss verschiedenster Parameter wie beispielsweise der Prozessführung oder der eingesetzten Materialien konnte bislang nicht bewertet werden. Besonders die im Bereich der Verpackung mit einem Gesamtanteil von rund 72 % [NN16] dominierenden Polyolefine sind dabei interessant, sodass besonders für diese Materialien die Integration einer Schaumstruktur das wirtschaftliche Potential erweitert.

Aus diesem Gründen beschäftigte sich dieses Forschungsvorhaben mit der Identifikation und Untersuchung verschiedener Einflüsse auf die Schaummorphologie und die Folieneigenschaften geschäumter Mehrschichtfolie. Dabei wurde ein großes Augenmerk auf die Ermittlung der Wirkzusammenhänge zwischen der Materialstruktur bzw. molekularen Aufbau und der Schaummorphologie gelegt.

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 und der Schaumbildungsprozess 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 noch weitere Vorteile gegenüber Kompaktmaterialien, was zu einer weiten und immer noch 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 auch 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 die Einbringung 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 microzellulären Schäumen geführt hat [Sta06].

Die Vorteile geschäumter Produkte lassen sich auch in mittels Blasfolienextrusion hergestellten Produkten nutzen. Durch Einbringen einer geschäumten Mittelschicht zwischen den kompakten Außenschichten lässt sich Material in der Folienproduktion einsparen. Die geschäumte Folie hat dabei ähnliche mechanische Kennwerte wie eine kompakte Folie [HK18]. Zusätzlich können die dämpfenden und isolierenden Eigenschaften geschäumter Folie für die Entwicklung neuartiger Produkte genutzt werden.

3.2 Schaumbildungsprozess

In der Kunststofftechnik wird das Schäumen durch den Zusatz eines Treibmittels erreicht. 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. In früheren Forschungsarbeiten am IKV [MH10] wurde eine kostengünstige Nachrüstmöglichkeit zum Aufschäumen der Mittelschicht einer Mehrschichtblasfolie entwickelt. Der Aufwand für die zusätzliche Extrusionstechnik beim physikalischen Schäumen wird durch die deutlich höhere Dichterduktion im Vergleich zum chemischen Schäumen kompensiert.

Die Theorie des Schaumbildungsprozesses gilt sowohl für das chemische als auch für das physikalische Schäumen und gliedert sich in folgende vier Stufen (Bild 3.1).

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 Gases 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 angetrieben [Sta06, Zha10].

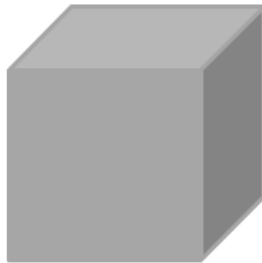
Bei der Zellkeimbildung werden in der Polymer-Gas-Lösung stabile, wachstumsfähige Zellkerne gebildet. Die Keimbildung wird durch eine Änderung des thermodynamischen Gleichgewichts in Form eines Druckverlusts am Düsenaustritt oder eines Temperaturanstiegs ausgelöst [Zha10]. Die Änderung führt zu einer 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/m) 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 und Partikel als sogenannte Nukleierungsmittel in die Polymerschmelze eingebracht [CS87, Zha10]. Durch eine Steigerung der Nukleierungsmittelkonzentration sowie Verringerung der Partikelgröße lässt sich die Nukleierungsrate erhöhen [Zha10].

Sobald ein sogenannter kritischer Zellradius erreicht ist, spricht man von stabilem Zellwachstum. Dieses ist weitgehend diffusionsgesteuert und abhängig vom Gasaustausch der

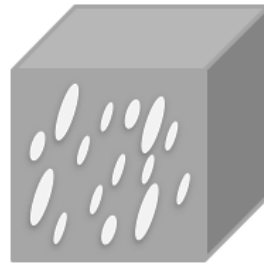
Schematische Darstellung des Ablaufs des Schaumbildungsprozesses

Schaumbildungsprozess

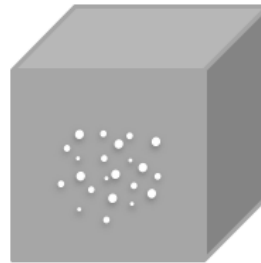
- Bildung einphasiger Kunststoff-Gas-Lösung durch Durchmischung und Diffusion
- Nukleierung durch Verschiebung des thermodyn. Gleichgewichtes
- Zellwachstum durch Gasaustausch der Zellen mit Polymermatrix
- Stabilisierung der Zellen durch Abkühlung bei gewünschter Zellgröße



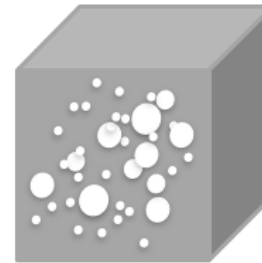
Kunststoffschmelze



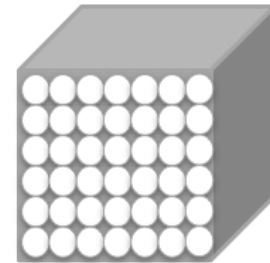
Kunststoff-Gas-Mischung



Nukleierung



Zellwachstum



Schaum

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].

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Dehnviskosität des Materials. Generell gilt, dass eine hohe Dehnviskosität das Zellwachstum hemmt. Der Zusammenhang zwischen Dehnviskosität und der Schaumstruktur durchläuft ein Optimum. Bei geringer Dehnviskosität ist der Widerstand der Folie nicht ausreichend, um das Zellwachstum zu stoppen und große Zellen zu verhindern. Eine hohe Dehnviskosität führt somit zu einer feinzelligeren Zellstruktur mit kleineren Zellen. Nach dem Erreichen der optimalen Dehnviskosität senkt eine noch höhere Dehnviskosität die Qualität der Schaumstruktur. Der Widerstand der Folie wird zu groß, um die Zellen zu entstehen zu lassen. Die Zellen sind in diesem Fall klein, jedoch entstehen deutlich weniger Zellen durch den großen Widerstand [Sta06].

Neben dem bereits erwähnten Druckverlust hängt die Schaumstruktur auch von der Prozessführung ab. Die Herstellung dünner Folien mit kleinen Zellen kann konventionell durch hohe Aufblas- und Abzugsverhältnisse erreicht werden. Allerdings sind diese Verhältnisse bei Blasfolien sehr begrenzt. So führen z.B. Abzugsverhältnisse größer als zwei zu einer sehr starken Streckung und damit Vergrößerung der Schaumzellen. Eine Zusammenstellung der Haupteinflussfaktoren auf die Schaumstruktur umfasst die Foliendicke, den Druckgradienten, die Nukleierung, die Menge des Treibmittels, die Art des Treibmittels, die Temperaturführung, sowie die Dehnviskosität in Abhängigkeit von der Molekulargewichtsverteilung sowie dem Verzweigungsgrad.

4 ZIEL UND VORGEHEN DES FORSCHUNGSVORHABEN

Wie der Stand der Technik zeigt, ist die resultierende Schaumstruktur beim Schäumen von Kunststoffen von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängig. Besonderen Einfluss auf die Ausbildung einer homogenen und feinzelligen Schaumstruktur nehmen die Zellnukleierung und die Zellwachstumsphase in Abhängigkeit von dem molekularen Aufbau.

Das Ziel des Forschungsprojektes 21185 N war daher, die Zusammenhänge zwischen dem molekularen Aufbau des Kunststoffes und dem Prozess mit der resultierenden Schaumstruktur näher zu untersuchen. Diese sind für die Prozessführung von entscheidender Bedeutung, da die Molekülstruktur bspw. die dehn rheologischen Eigenschaften der treibmittelbeladenen Schmelze stark beeinflusst.

Dazu wurden systematisch sowohl Materialcharakterisierungen als auch Extrusionsversuche mit in der Blasfolienextrusion typischen Materialtypen durchgeführt, die sich hinsichtlich Molekulargewicht, -verteilung, Verzweigungsgrad und Dehnviskosität unterscheiden. In diesen Untersuchungen wurden abhängig von dem molekularen Aufbau die sich einstellenden Schaumstrukturen und -eigenschaften bewertet. Die Schaumstruktur ist dabei neben den Materialeigenschaften auch von der Prozessführung abhängig. Daher wurden außerdem der Einfluss verschiedener Prozessparameter wie beispielsweise der Treibmittelanteil oder die Temperaturführung im Extruder und im Blaskopf auf die Dichtereduktion sowie Schaummorphologie untersucht. Für das Erreichen einer guten Zellstruktur wird vielfach auf den Einsatz von Nukleierungsmitteln zurückgegriffen. Daher wurden für die unterschiedlichen Materialien zudem geeignete Nukleierungsmittel identifiziert und erprobt werden. Als wirtschaftliches Ergebnis wurde die mögliche Höhe der Materialeinsparung bei der Folienherstellung ermittelt, die eine Reduktion der Kosten bei ähnlichen (Mechanik) und verbesserten (Isolation) Folieneigenschaften ermöglicht. Über den Vergleich der Eigenschaften zwischen kompakten und geschäumten Folien wurde eine Abschätzung gegeben, welche Menge an Material eingespart werden kann. Die Kosteneffizienz ließ sich durch den Einsatz von recyceltem Material weiter steigern. Während der Produktion kann es durch z. B. Anfahrprozesse oder Folienabrisse zur Herstellung von Ausschuss kommen. Um die durch die Dichtereduktion erzielte Kosteneffizienz weiter zu erhöhen, ist es sinnvoll, diesen Ausschuss dem Prozess wieder zuzuführen. Die erneute thermische und mechanische Belastung führt in der Regel zu einem Abbau der Molekülketten, welcher die rheologischen Eigenschaften der Schmelze verändert [AK02, BCPG03, JLN05]. Da die molekulare Struktur eines Polymers die Schaumstruktur jedoch beeinflusst, wurde untersucht, wie viel recycliertes Material dem Prozess zugeführt werden kann, ohne dabei signifikanten Einfluss auf die Schaumstruktur zu nehmen.

5 VERSUCHSUMGEBUNG UND ANALYSEMETHODEN

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

5.1 Materialien

In der Folienextrusion werden hauptsächlich Polyolefine eingesetzt. Entsprechend wurden in diesem Vorhaben jeweils drei PE-LD, PE-LLD, PE-HD sowie PP untersucht. Für jedes dieser Materialien wurden ebenfalls geeignete Nukleierungsmittel eingesetzt. Nukleierungsmittel haben die Aufgabe, die Zellbildung zu initiieren und zu steuern, um die Schaumstruktur gezielt beeinflussen zu können. Für eine detaillierte Aufschlüsselung wird auf Kapitel 7 verwiesen.

Als kostengünstiges, inertes, nicht brennbares und einfach zu handhabendes physikalisches Treibmittel wurde überkritisches CO₂ verwendet, da es bei der Schaumextrusion häufig Anwendung findet und im Vergleich zu Stickstoff eine deutliche bessere Löslichkeit in PE-LD aufweist [CJ98]. Das CO₂ mit einer Reinheit von 99,5 % wurde von der Linde AG, Pullach bezogen. In Tabelle 5.1 ist eine Übersicht ausgewählter Eigenschaften des als physikalisches Treibmittel verwendeten CO₂ aufgeführt. Für CO₂ ist die Verdampfungsenthalpie gleich Null, da die Schäumtemperatur oberhalb der kritischen Temperatur liegt.

Eigenschaft von CO ₂	Zahlenwert
Molekulargewicht [g/mol]	44,01
Siedepunkt bei 1 bar [°C]	-78,4
Dampfdruck bei 20 °C [kPa]	5700
Kritischer Druck [bar]	74
Kritische Temperatur [°C]	31
Molare Verdampfungsenthalpie bei 130 °C [KJ/mol]	0

Tabelle 5.1: Ausgewählte Eigenschaften des verwendeten physikalischen Treibmittels

Bei dem eingesetzten chemischen Treibmittel handelte es sich um ein Hydrocerol CF 40 E der Firma Avient, Avion Lake, Ohio, USA, verwendet. Hydrocerol ist ein chemischer Schaumbildner und zeitgleich ebenfalls Nukleierungsmittel, welches sich besonders für die Herstellung feinzelliger Schäume eignet. In Tabelle 5.2 ist eine Übersicht relevanter Eigenschaften aufgelistet.

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

Tabelle 5.2: Ausgewählte Eigenschaften des verwendeten chemischen Treibmittels

5.2 Extrusionsanlage

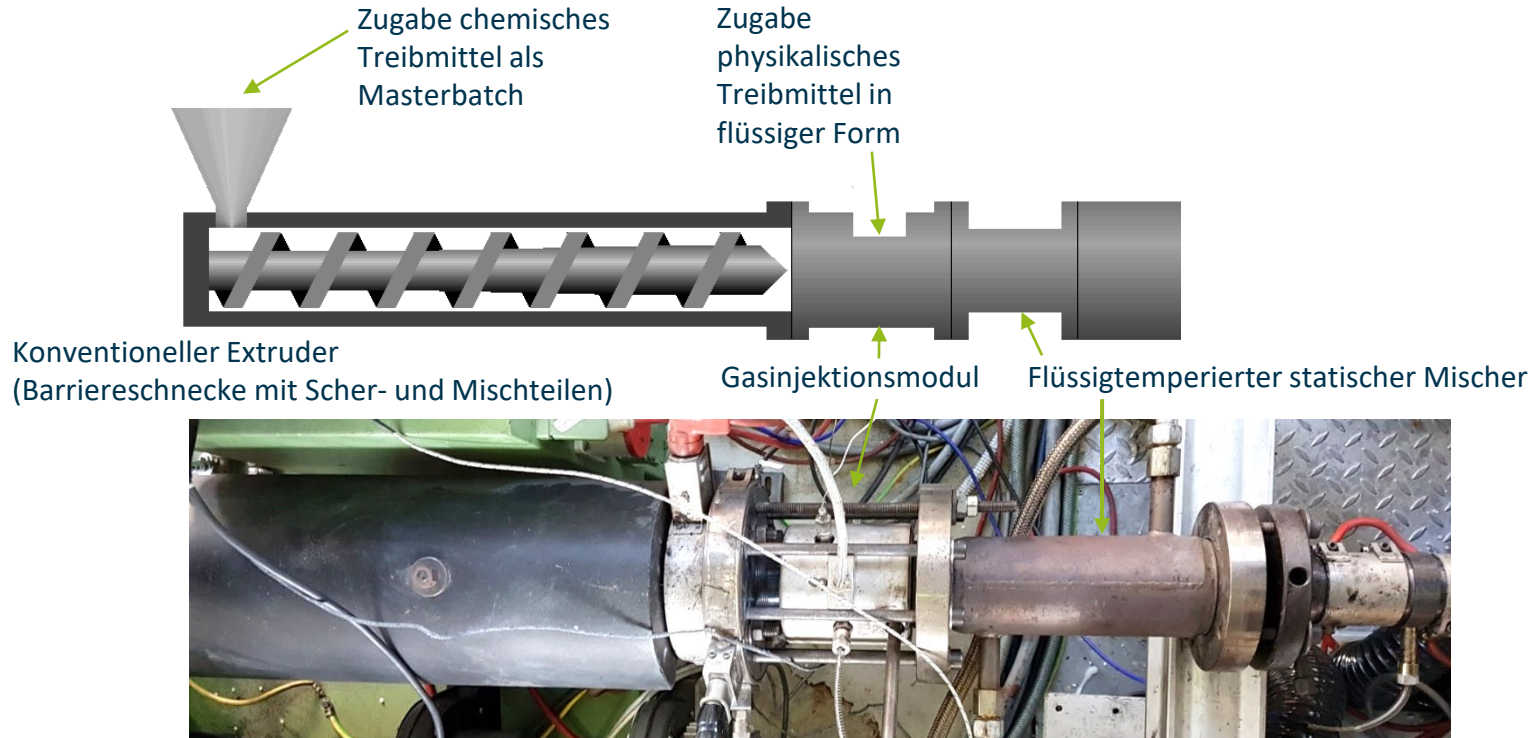
Die verwendete Blasfolienextrusionsanlage besteht aus drei Einschnckenextrudern der Fa. Kuhne Anlagenbau GmbH, St. Augustin, vom Typ KFB 45/600 mit nachfolgenden Blaskopf. Die Extruderschnecken A und C haben einen Schneckendurchmesser von 45 mm bei einem L/D-Verhältnis von 24, Extruderschnecke B besitzt einen Durchmesser von 35 mm bei einem L/D-Verhältnis von 20. Alle Extruder verwenden 3-Zonen-Schnecken mit Scher- und Mischelementen und sind mit einer Nutbuchse ausgestattet.. Die Dosierung erfolgt über drei gravimetrische Dosiereinheiten der Fa. PlastControl GmbH, Remscheid. Von den Extrudern wird die Schmelze über eine kurze starre Schmelzeleitung in einen Radialwendelverteiler geführt. Der Austrittsdurchmesser des Radialwendelverters beträgt 80 mm. Die Düsenpaltbreite kann durch verschiedene Einsätze variiert werden. Der Wärmeentzug aus der Folienblase wird über einen Doppellippenkühlring realisiert. Die Zuluft für diesen wird mit Hilfe eines Kühlaggregats der Fa. LAUDA Dr. R. Wobser GmbH & Co KG, Lauda-Königshofen heruntergekühlt. Die Temperatur am Austritt des Kühlaggregats wird über alle Versuche so gewählt, dass die Zuluft im Doppellippenkühlring auf einem konstanten Wert von 20 °C gehalten wird.

5.3 Treibmitteldosierung und Gasinjektionseinheit

Für das chemische Schäumen wurde das Treibmittel im Dosierer zugegeben (Bild 5.1). Das Treibmittel liegt granulatförmig vor und kann mit dem Kunststoffgranulat der Mittelschicht vor der Zugabe in die Dosierer batchweise vermischt werden.

Die Injektion des physikalischen Treibmittels erfolgte in einem Teil der Versuche über eine Hochdruckpumpe der Firma ProMinent Deutschland GmbH, Heidelberg. In dem anderen Teil der Versuche wurde eine gravimetrisch geregelte Doppelkolbenmembranpumpe der Lewa GmbH, Leonberg, verwendet.

Anlagentechnik – Treibmittelzufuhr und statischer Mischer



Das physikalische Aufschäumen der Mittelschicht erfolgte mit einem OptiFoamTM-System, des Unternehmens Promix Solutions AG, Winterthur, Schweiz, welches an den Extruder der Mittelschicht angeschlossen (Bild 5.1) ist. Das Herzstück des Systems ist eine speziell entwickelte Fluidinjektionsdüse, die aus einer ringförmigen Öffnung mit porösen Sintermetallwänden auf beiden Seiten besteht. Das gesinterte Metall hat eine halbdurchlässige Oberfläche. Sie ermöglicht die Injektion des Treibmittels in die Schmelze und verhindert gleichzeitig, dass die Kunststoffschmelze in den Einlass eindringt. Der eingesetzte Torpedo wandelt die Schmelze von einer rohrförmigen in eine ringförmige Strömung um. Dadurch vergrößert sich die Oberfläche, die für die Treibmittelinjektion genutzt werden kann. Anschließend wird das Schmelze-Treibmittel-Gemisch in einem flüssigtemperierten statischen Mischer, ebenfalls der Firma Promix Solutions AG, Winterthur, Schweiz, homogenisiert. Dieser ist öltemperiert, um die Viskositätsverringerung aufgrund der Treibmittelbeladung durch eine Temperatursenkung zu kompensieren. Sowohl das Opti-FoamTM-System als auch der statische Mischer sind für einen maximalen Innendruck von max. 300 bar ausgelegt.

5.4 Analysegeräte, -methoden und Prüfvorschriften

5.4.1 Bestimmung des Massedurchsatzes

Der Massedurchsatz wurde von Hand bestimmt. Zur Bestimmung des Massedurchsatzes wurde die extrudierte Folie über einen Zeitraum von 120 Sekunden entnommen und anschließend auf einer Waage der PCE Deutschland GmbH, Meschede gewogen.

5.4.2 Bestimmung der Foliendickenschwankung

Die Messung der Foliendicke erfolgte mit einer analogen Dickenmessuhr der Fa. Käfer Messuhrenfabrik GmbH, Villing-Schwenningen. Die Messuhr hat eine Ablesegenauigkeit von 5 µm. Die Dickenmessung erfolgte an 20 Punkten über den Umfang der Blasfolie und wurde an drei Stellen in Extrusionsrichtung wiederholt.

5.4.3 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.

5.4.4 Bestimmung der Schaumstruktur der Folien

Für die Auswertung der Schaumstruktur wurden die Proben mittels Kamera IMX 264 (COE-050-M-POE-IR-C) sowie eines bi-telezentrischen Objektivs (TC23036) mit einem Vergrößerungsfaktor von 0,234, jeweils von der Opto Engineering, Mantova, Italien, aufgenommen. Der aufgezeichnete Bildbereich entspricht 3,5 cm * 2,93 cm bei 2448 * 2048 Pixeln, wodurch sich 699,4 Pixel/cm ergeben. Ausgewertet wurden 5 Aufnahmen je Versuchspunkt. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Zellstrukturen und der somit erforderlichen Anpassungen in Form von Belichtung, Zoomeinstellungen und Bildbearbeitungsmaßnahmen war eine automatische Analyse nicht möglich. Die Aufnahmen wurden händisch mit der Software ImageJ des National Institute of Health, Bethesda, Maryland, USA ausgewertet. Mit Hilfe des Programms wurden Linien in die Zellen gelegt und die Pixelanzahl entlang dieser gezählt. Die Pixelanzahl wurde mit einer Skalierung in eine metrische Länge überführt. Pro Bild wurden vier Zellen vermessen. Je Versuchspunkt wurden folglich 20 Zellen ausgewertet. Aus den resultierenden Werten wurde ein Mittelwert gebildet und die Zellmaße bestimmt. Für eine Bewertung der Zellstruktur, wurden die Parameter Zellver Streckung Z_{Ver} und Zellfläche Z_F eingeführt. Für den Faktor Z_{Ver} wurden die Zellmaße entlang und in horizontaler Richtung zur Abzugsrichtung miteinander verglichen (Gl. 5.1). Dabei steht Z_A für das Zellmaß entlang der Abzugsrichtung und Z_{hor} für das Zellmaß horizontal zur Abzugsrichtung.

$$Z_{Ver} = \frac{Z_A}{Z_{hor}} \quad (\text{Gl. 5.1})$$

Das Optimum für Z_{Ver} stellt der Wert 1 dar, welcher einem perfekten Kreis entspricht. Für die Berechnung der Zellflächen Z_F wird die Zelle als Ellipse angenähert (Gl. 5.2).

$$Z_F = \frac{Z_A * Z_{hor} * \pi}{4} \quad (\text{Gl. 5.2})$$

5.4.5 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Die Ermittlung der mechanischen Kennwerte der hergestellten Folienproben erfolgte mit einer Universalprüfmaschine vom Typ Zwick Z10 der Firma Zwick GmbH & Co KG, Ulm im Zugversuch. Die zu prüfenden Probekörper wurden nach DIN EN ISO 527-3 Typ 2 hergestellt. Die Proben hatten eine Breite von 15 mm und eine Länge von 100 mm. Die Proben wurden in Extrusionsrichtung entnommen. Der Versuchsablauf erfolgte nach DIN EN ISO 527-1. Die Einspannlänge der Proben betrug 50 mm. Die Proben wurden mit einer konstanten Traversengeschwindigkeit von 200 mm/min belastet. Das aufgezeichnete Kraft-Weg-

Diagramm wurde mit der Querschnittsfläche der Kunststoffprobe ins Verhältnis gesetzt, um die technische Bruchspannung zu ermitteln. Für jeden Versuchspunkt wurden 5 Proben geprüft.

Die Messung der Durchschlagskraft wurde mit einem Fallturm CEAST 9350 der Firma Instron, Nordwood USA, durchgeführt. 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 Durchschlagskraft für jede Probe.

5.4.6 Bestimmung der thermischen Eigenschaften

Die Wärmeleitfähigkeit wurde mit dem „ThermoProof“ von der Firma Mergenthaler GmbH, Neu-Ulm, ermittelt. Für die Messung der Versuchspunkte wurden Kreisscheiben mit 10 cm Durchmesser vorbereitet und pro Versuchspunkt auf eine Probenhöhe von 2 mm gestapelt und zwischen zwei Platten geklemmt. Die untere Platte wurde auf 18 °C temperiert. Die obere Platte wurde auf 28 °C temperiert. Die Toleranz der Temperatureinstellung betrug 0,1 °C. Die Messzeit betrug 120 min.

6 ERMITTLUNG DER EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE SCHAUMSTRUKTUR GESCHÄUMTER MEHRSCICHTBLASFOLIEN

Die entscheidende Fragestellung beim Schäumen von Mehrschichtblasfolie ist, wie eine möglichst geringe Dichte bei gleichzeitig feiner Zellstruktur zu erreichen ist, denn vor allem diese Merkmale sind ausschlaggebend für die mechanischen Eigenschaften und die erreichbare Dichte der Folie [HK18]. Diese Folieneigenschaften sind von einer Vielzahl verschiedener Parameter abhängig. Dazu zählen neben Materialeigenschaften des eingesetzten Kunststoffes wie z.B. der Verstreckfähigkeit und Schmelzeviskosität sowie den zugegebenen Nukleierungsmittel auch prozesstechnische Parameter wie Schmelzetemperatur, Verstreckverhältnis oder Massedurchsatz. Eine Zusammenstellung einiger beeinflussenden Parameter ist in Bild 6.1 dargestellt und gibt einen Überblick über die Komplexität. Die in diesem Forschungsvorhaben ausgewählten und untersuchten Einflussfaktoren werden im Folgenden vorgestellt.

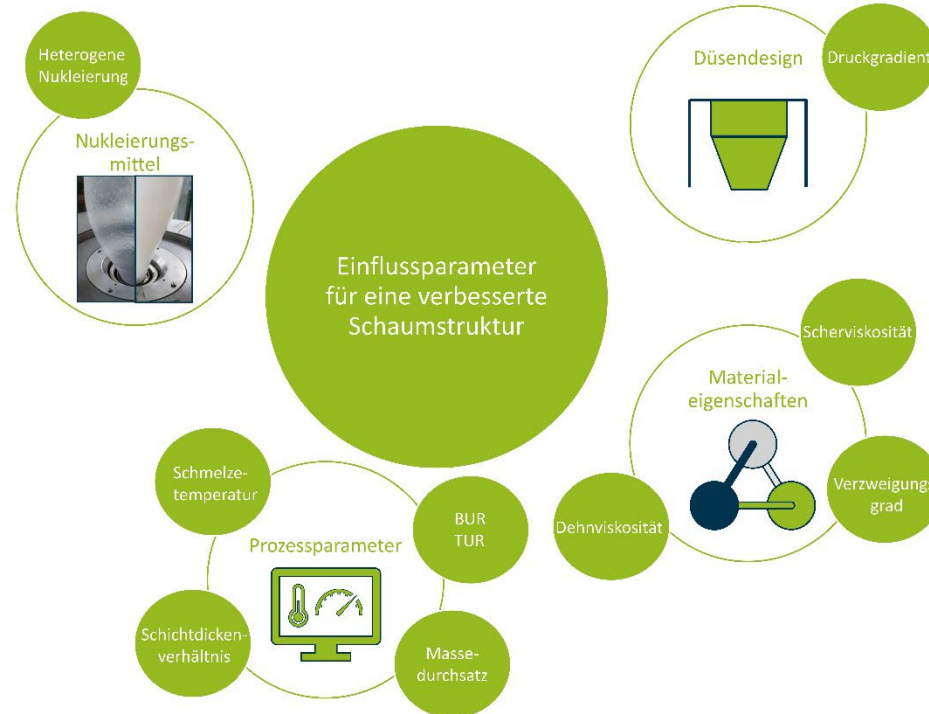
6.1 Nukleierungsmittel

Nukleierungsmittel werden beim Schäumen hinzugegeben, um die zur Nukleierung notwendige Energie herabzusetzen. Dies resultiert in einer feinzelligen Schaumstruktur. Anorganische Partikel stellen in der Schmelze eine weitere Phase dar, deren Grenzfläche als Ausgangspunkt zur Nukleierung genutzt werden kann. Einfluss auf die Wirkung hat die Größe und Form der Partikel. Eine kleine Partikelgröße ist vorzuziehen, da sie eine feinzellige und gleichmäßige Schaumstruktur erzeugt. Aus diesem Grund liegen die Partikelgrößen üblicher anorganischer Nukleierungsmittel, wie Talkum und Siliziumoxid, im Mikrometerbereich [Wol17]. Neben den anorganischen Nukleierungsmitteln existieren auch organische Komponenten, welche es ermöglichen, die Schaumstruktur zu beeinflussen. Die organischen Nukleierungsmittel sind in der Kunststoffschmelze gelöst und formen beim Übergang in den festen Zustand Kristalle aus. Insbesondere Amide, Amine und Ester bzw. Salz der Carbonsäure eignen sich als organische Komponenten [SVK14].

6.2 Düsendesign

Der Aufbau des Blaskopfes und vor allem der Düsenaustritt nehmen einen großen Einfluss auf das Druckgefälle beim Ausströmen der Kunststoffschmelze. Bei der Schaumextrusion kann mit diesem Parameter die Schaumstruktur beeinflusst werden. Dabei führt ein größerer Druckverlust am Düsenaustritt zu einer höheren Zelldichte bei einer gleichzeitigen Abnahme der Zellgröße [Hei02]. Dies ist auf die Keimbildungsrate zurückzuführen, die exponentiell mit dem längenbezogenen Druckverlust ansteigt [Kos96]. Die Zunahme der Zelldichte bzw. Abnahme der Zellgröße nimmt mit zunehmendem Druckgradient weiter ab. Ist der

Einflussparameter für eine verbesserte Schaumstruktur



Druckgradient jedoch gering, werden nur wenige Zellkerne gebildet. Generell führt ein Druckverlust über eine kurze Strecke sowie in kurzer Zeit zu einer besseren Schaumstruktur [Hei02].

6.3 Prozessparameter

Während des Prozesses kann Einfluss auf die Schaumqualität genommen werden. Dies ist über diverse Prozessparameter möglich.

Temperaturführung

Einer der veränderbaren Prozessparameter ist die die Extruder- bzw. Schmelzetemperatur. Durch die Schmelzetemperatur wird der Löslichkeitskoeffizient und der Diffusionskoeffizient verändert. Das führt zur Veränderung der einphasigen Kunststoff-Gas-Lösung und legt damit die Basis des Schäumprozesses. Ebenfalls nimmt die Temperatur an der Düse einen großen Einfluss auf das Zellwachstum. Bei zu hoher Düsentemperatur besitzt das Material eine niedrige Dehnviskosität und es liegt eine hohe Diffusionsneigung vor. Das kann dazu führen, dass die Zellen den Druck nicht mehr aufrechterhalten können und die Zellen kollabieren (siehe Bild 6.2). Eine zu geringe Düsentemperatur und somit hohe Dehnviskosität hemmt jedoch die Zellbildung und die Diffusion des Gases stark. In beiden Fällen besitzt das Extrudat eine ungewollt hohe Dichte [Ker14]. Nach Düsenaustritt kann über die Kühlung nochmals Einfluss auf die Schaumqualität genommen werden.

Druckgradient

Ebenfalls entscheidend für eine feinzellige Schaumstruktur ist der Druckgradient am Düsenaustritt. Der Druckgradient ergibt sich einerseits durch die Druckdifferenz zwischen Extruder und Umgebung und andererseits durch die Länge des Fließwegs. Ein erhöhter Massedurchsatz hat einen höheren Druckgradienten zur Folge und ermöglicht eine feinzellige Schaumstruktur. Der Grund ist die Nukleierungsrate, die exponentiell mit dem Druckabfall steigt. Bei einer hohen Nukleierungsrate bilden sich viele Schaumzellen. Durch die hohe Anzahl an Schaumzellen ist die Ausdehnung jeder Zelle räumlich begrenzt und die Zellen bleiben klein [HK18].

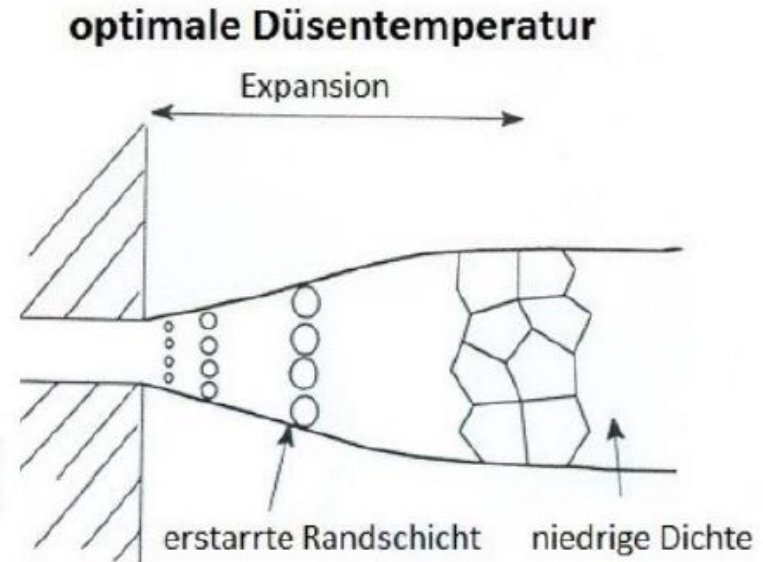
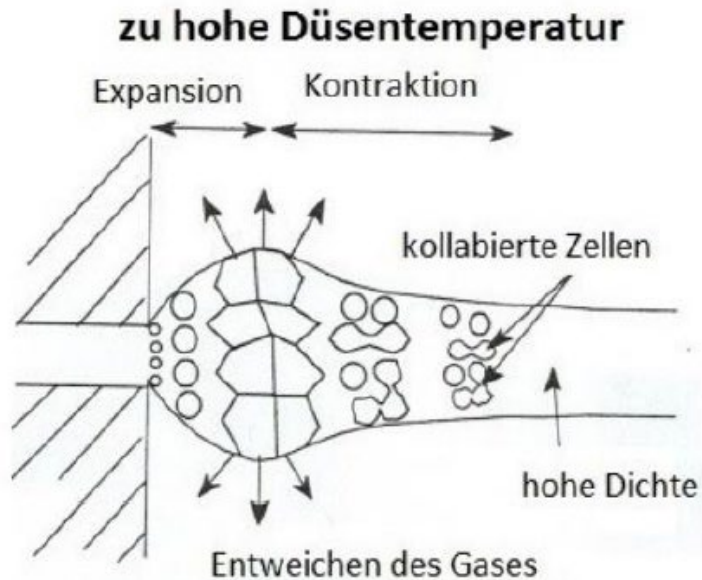
Treibmittelmenge

Ein weiterer wichtiger Prozessparameter ist die Treibmittelmenge. Die Menge des zugefügten Treibmittels nimmt direkten Einfluss auf den Aufschäumgrad. Dabei steht die Treibmittelmenge in Wechselwirkung zur Viskosität des Kunststoff-Gas-Gemisches. Mit steigender Treibmittelbeladung nimmt die Viskosität stark ab und muss im Prozess berücksichtigt und ausgeglichen werden.

6.4 Rheologische Eigenschaften

Das verwendete Material spielt für den Schäumprozess ebenfalls eine wichtige Rolle. Eine gewisse Vorauswahl lässt sich mittels Materialgruppen treffen, die einander bis zu einem

Einfluss der Düsentemperatur



[Ker14]

gewissen Grad ähneln. Um eine genauere Aussage treffen zu können, wie sich die Materialien verhalten, müssen Materialparameter wie Viskositäten oder der Verzweigungsgrad untersucht werden.

Scherviskosität

Das Fließverhalten von Fluiden wird durch die Viskosität der entsprechenden Fluide beschrieben. Je viskoser ein Fluid, desto zähflüssiger ist es. Anders ausgedrückt steigt mit der Viskosität auch der innere Widerstand gegenüber äußeren Belastungen. Die Art der Belastung, Scher- oder Dehnbeanspruchung, spielt für die Viskosität eine entscheidende Rolle. Deswegen wird zwischen Scherviskosität und Dehnviskosität unterschieden. Bei der Kombination aus Schaumextrusion und Blasfolienextrusion resultiert eine Veränderung der Scherviskosität in einer Veränderung der Schaumzellen. Die Scherviskosität ist stark temperaturabhängig und steht somit in Wechselwirkung zur Schmelzetemperatur.

Dehnviskosität

In der Blasfolienextrusion stellt die Dehnung die vorherrschende Form der Verformung dar. Im Unterschied zur Scherviskosität ist der innere Widerstand keine Scherspannung, sondern eine Zugspannung. Aus diesem Grund wird die Dehnviskosität, statt über Scherung bzw. Schergeschwindigkeit, über die Dehnung bzw. Dehngeschwindigkeit aufgetragen. Die Dehnviskosität ist ebenfalls stark temperaturabhängig. Bei steigender Temperatur verringert sich die Dehnviskosität signifikant. Dies führt zu einer ungleichmäßigen Blase und resultiert anschließend in einer ungleichen Dickenverteilung [Lim12]. Ein stabilisierender Effekt im Schäumprozess ist die Erhöhung der Dehnviskosität. Durch die Viskositätserhöhung steigt der Widerstand des Kunststoffes gegen Verformung und lässt die Schaumzellen nicht weiter expandieren. Hierbei ist jedoch eine zu hohe Dehnviskosität ebenfalls nicht zielführend, da die Widerstandskraft für die Zellbildung auch zu groß sein kann. Ein Anstieg der Dehnviskosität tritt auch häufig in Form einer Dehnverfestigung auf [Sta06].

Länge der Seitenketten

Der Einfluss der Länge der Seitenketten auf das Schäumverhalten wurde in zahlreichen Untersuchungen der klassischen Schaumextrusion auf Basis eines Polypropylens untersucht. Die Länge der Seitenketten nimmt direkten Einfluss auf die Schmelzefestigkeit sowie auf das dehn rheologische Verhalten. Dabei konnte gezeigt werden, dass durch längere Seitenketten eine signifikante Erhöhung der Schmelzefestigkeit erreicht wird. Ebenfalls bewirkt eine Dehnverfestigung bei fortschreitender Dehnbeanspruchung eine Erhöhung des Deformationswiderstandes, was neben einer Erhöhung der Schmelzefestigkeit auch zu einer sehr homogenen Schaumbildung führt [HM94, Sug01, GM03].

7 AUSWAHL UND CHARAKTERISIERUNG DER EINGESETZTEN MATERIALIEN

In einem ersten Schritt wurden zunächst zum Schäumen geeignete Materialien identifiziert. Aufgrund der Tatsache, dass die Materialdatenblätter wenig Auskunft über den molekularen Aufbau des Kunststoffes zulassen, erfolgte die Materialauswahl mit der Expertise von Materialherstellern (Sabic Europe, Geleen, Niederlande/ Lyondellbasell, Rotterdam, Niederlande), welche im projektbegleitenden Ausschuss vertreten waren.

Als Materialien wurden verschiedene Typen PE-LD, PE-LLD, PE-HD sowie PP ausgewählt. Für jeden Materialtyp wurden drei Materialien identifiziert. Neben der Auswahl des Kunststoffs wurden zusätzlich geeignete Nukleierungsmittel ermittelt, um durch eine heterogene Nukleierung eine ausreichende Schaumstruktur zu erzielen. Dazu wurden für jeden Kunststoff drei geeignete Nukleierungsmittel identifiziert. Eine Zusammenstellung der entsprechenden Materialien mit zugehörigen Nukleierungsmittel ist in Tabelle 7.1 dargestellt.

Kunststoff						
Art	LDPE			LLDPE		
Type	2102XO	2420F	1800H	318BE	VM006	7118NE
Hersteller	Sabic	Lyondell Basell	Lyondell Basell	Sabic	Sabic	Sabic
Art	HDPE			PP		
Type	F04660	F4520	GX5028	240H	EP490H	X1965A
Hersteller	Sabic	Sabic	Lyondell Basell	Lyondell Basell	Lyondell Basell	Lyondell Basell
Nukleierungsmittel (alle A.Schulmann)						
Art	LDPE			LLDPE		
Type	PBH FPE 30T	PSL50	RA 295	PBH FPE 30T	CLR122	AF1083
Art	HDPE			PP		
Type	CLR122	PBH FPE 30T	RA 295	CFPP 0260 NU	PBH NA 10944	PBH FPE 30T

Tabelle 7.1: Ermittelte geeignete Materialien und Nukleierungsmittel

Im zweiten Schritt wurden die Materialien hinsichtlich ihrer Molekülstruktur und Materialeigenschaften untersucht. Die genaue Charakterisierung der Materialien war für die spätere Analyse der Wirkzusammenhänge zwischen molekularem Aufbau und Schaummorphologie (Kapitel 10) wichtig, da die Schaumstruktur besonders von dem molekularen Aufbau und der sich daraus bestimmten Dehnviskosität (Dehnfestigkeit) abhängig ist [Kro98, Sta06]. Im Bereich der rheologischen Materialeigenschaften wurden die Scher- sowie Dehnviskosität ermittelt und mittels Gelpermeationschromatographie das Molekulargewicht, die Molekulargewichtsverteilung und der Verzweigungsgrad.

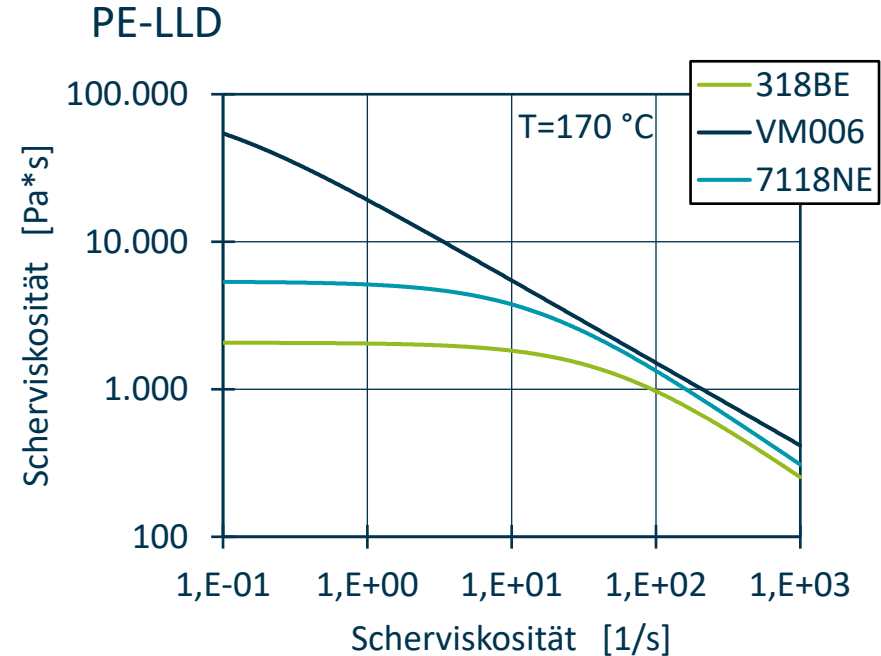
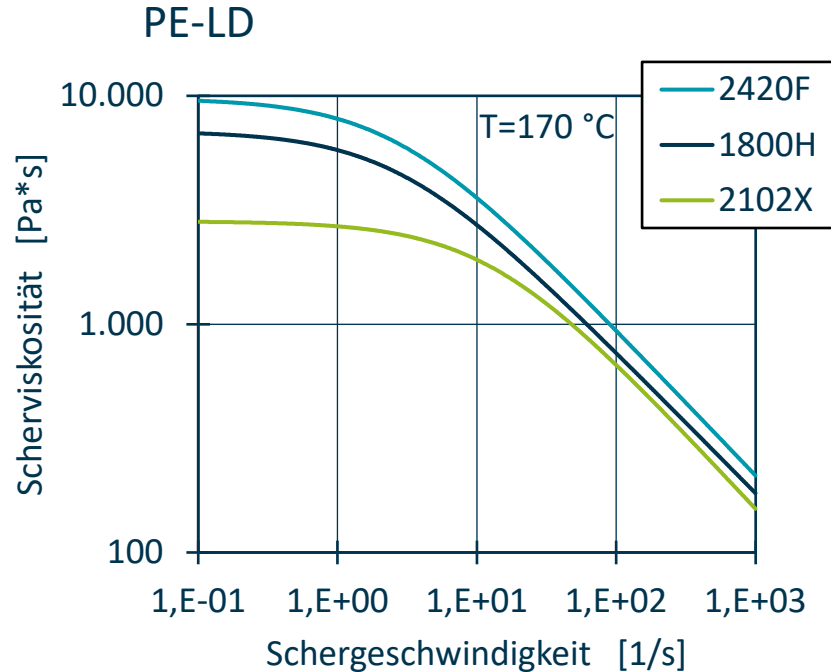
7.1 Ermittlung der Scherviskosität mittels Hochdruck-Kapillarrheometer

Zur Messung der Scherviskositäten wurde das Kapillarrheometer Rheograph 2002 der Firma Göttfert, Buchen verwendet. Es handelt sich dabei um ein Rheometer mit einstellbarer Scherrate, wechselbaren Düsen und einem Extrusionsdruckaufnehmer. Mit Hilfe des Kapillarrheometers können Viskositäten und Schubspannungen in Abhängigkeit von Schergeschwindigkeiten und Temperaturen ermittelt werden. Die Messungen an einem Kapillarrheometer werden pro Messung mit konstanten Schergeschwindigkeiten durchgeführt. Das resultiert in einer diskreten Verteilung der Messwerte. In realen Prozessen tritt ein breites Spektrum an Scherraten auf. Somit ist eine mathematische Beschreibung der Scherviskosität in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit nötig. Dafür wird das Modell von Carreau-Winter benutzt. Mit vorheriger Bagley-Korrektur zur Berücksichtigung möglicher Einlaufdruckverluste können daraufhin die Parameter der Carreau-Winter Gleichung bestimmt werden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Scherviskositäten der verschiedenen Materialien vorgestellt. In Bild 7.1 (links) ist die Scherviskosität der PE-LD über die Schergeschwindigkeit aufgetragen. Die Scherviskositäten liegen bei einer Schergeschwindigkeit von 50 s^{-1} für 2102X bei $1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ bei 1800H bei 1100 und für 2420F bei $1500 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Die Grenzscherrate ist bei 2102X0 höher, die charakteristische Relaxationszeit damit kürzer [GMS+11]. Die Nullscherviskosität von 2102X0 liegt bei ca. $3000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Die Grenzscherrate ist bei 2420F und 1800H geringer, und die Nullscherviskosität deutlich höher als bei 2102X0 bei ca. $10000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ für 2420F und bei ca. $7000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Es ist für die Daten der LLDPEs (Bild 7.1 rechts) anzumerken, dass die Versuchspunkte mit geringeren Stempelgeschwindigkeiten am HKR gefahren wurden. Der Versuchspunkt mit höchster Stempelgeschwindigkeit wurde ausgelassen und stattdessen durch einen Versuchspunkt mit geringerer Stempelgeschwindigkeit ersetzt. Die Scherviskositäten für VM006 weichen bei geringen Schergeschwindigkeiten deutlich von den anderen Materialien

Scherviskositätsverläufe für PE-LD und PE-LLD



ab. Die Nullscherviskosität liegt bei ca. 90000 1/s und ist damit über 10-mal so hoch wie andere Materialien. Ein Messfehler ist jedoch ausgeschlossen, da die Messungen für dieses Material erneut durchgeführt wurden und ähnliche Ergebnisse ergaben. Das Material ist modifiziert worden, um bei höheren Temperaturen extrudiert werden zu können, was den abweichenden Verlauf im Bereich der Nullscherviskosität erklärt. Die Nullscherviskositäten von 318BE und 7118NE liegen bei 2000 bzw. 5000 Pa*s. Die Grenzscherate ist bei 7118NE geringer als bei 318BE. Deshalb nähern sich die Scherviskositäten im Übergangsbereich an. 7118BE hat über den gesamten Schergeschwindigkeitsbereich eine höhere Scherviskosität.

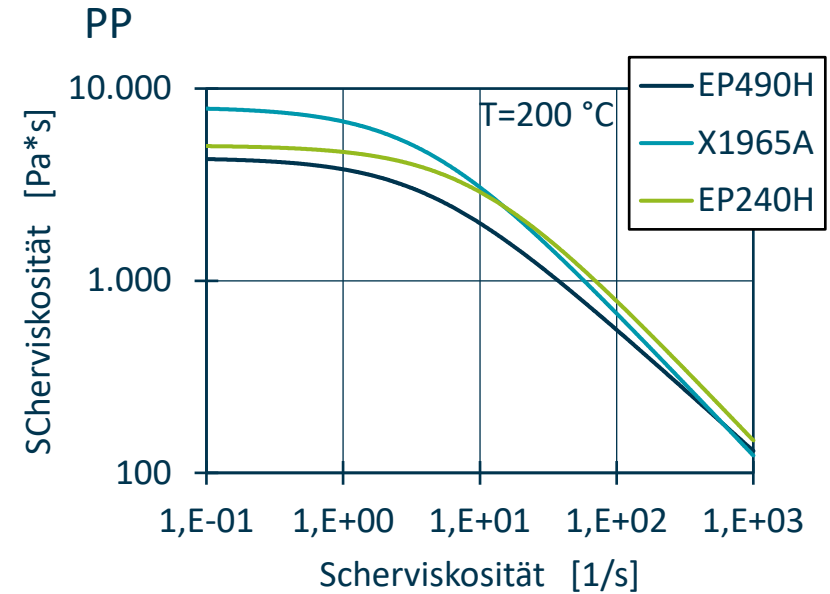
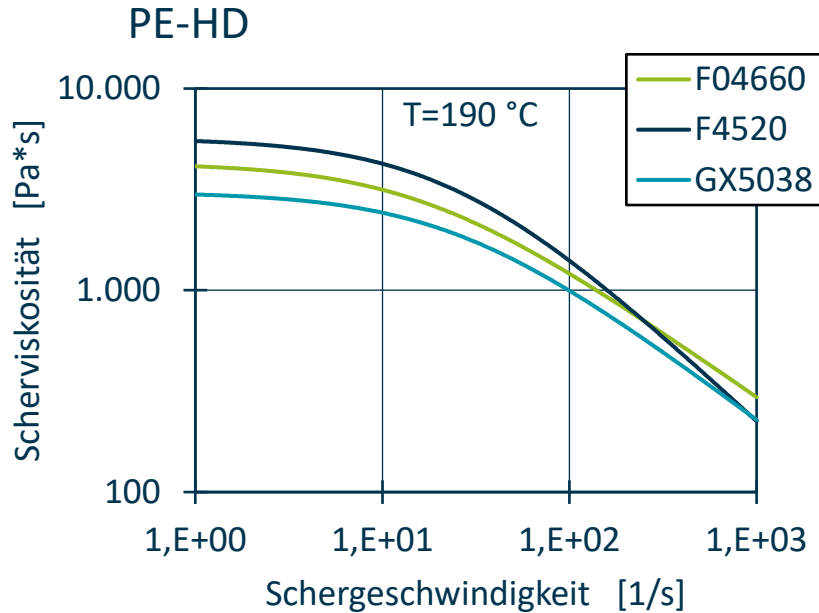
Die Nullscherviskosität der HDPEs liegt, wie in Bild 7.2 (links) zu sehen, zwischen 3000 und 6000 Pa*s. Bei allen Materialien liegt der Übergang vom Newton Plateau zum Übergangsbereich bei einer Schergeschwindigkeit von ca. 10 s^{-1} . Beim strukturviskosen Verhalten der Materialien ist auffällig, dass die Scherviskosität von F4520 bei steigenden Schergeschwindigkeit deutlich stärker abfällt als bei den beiden anderen Materialien. Da es jedoch die höchste Nullscherviskosität besitzt, ist die Scherviskosität von F4520 erst bei ca. 250 s^{-1} geringer als F04660 und bei 1000 s^{-1} geringer als GX5038. Die Materialien F04660 und GX5038 verlaufen über den gesamten Schergeschwindigkeitsbereich ungefähr parallel zueinander. Bei der in der Blasfolienextrusion vorherrschenden Schergeschwindigkeit von ca. 50 s^{-1} besitzt F04660 die höchste Scherviskosität.

Die Nullscherviskosität der PP Materialien liegt zwischen 4000 Pa*s für EP490H und 8000 Pa*s für X1965A (siehe Bild 7.2 (rechts)). Das Newton Plateau endet für diese beiden Materialien bereits bei einer Schergeschwindigkeit von ca. 2 s^{-1} . Beim EP240H beginnt der Übergang zum strukturviskosen Verhalten erst bei ca. 1 s^{-1} . Wie stark die Scherviskosität im strukturviskosen Bereich abfällt, ist stark materialabhängig. Alle Materialien haben eine unterschiedliche Steigung in diesem Bereich. Trotz der höchsten Nullscherviskosität von X1965A ist die Scherviskosität im Bereich zwischen 10 s^{-1} und 100 s^{-1} zwischen der der anderen Materialien. Grund dafür ist der im Vergleich zu den anderen Materialien starke Abfall der Scherviskosität. Den geringsten Abfall der Scherviskosität besitzt EP490H. Das Material hat jedoch auch die geringste Nullscherviskosität und ist somit bis 1000 s^{-1} das Material mit geringster Scherviskosität.

In Tabelle 7.2 sind die Nullscherviskositäten sowie die Übergangsschergeschwindigkeiten jedes Materials zusammengestellt.

Art	LDPE			LLDPE		
Type	2102XO	2420F	1800H	318BE	VM006	7118NE
A [Pa*s]	2.805	9.504	6.834	2.071	100.000	5.353
1/B [s]	10	8	9	31	0,1	12

Scherviskositätsverläufe für PE-HD und PP



Art	HDPE			PP		
Type	F04660	F4520	GX5028	240H	EP490H	X1965A
A [Pa*s]	4.104	5.468	2.974	5.010	4.291	7.836
1/B [s]	15	50	32	10	6,1	3,5

Tabelle 7.2: Ergebnisse der Scherviskositäten für alle Materialtypen

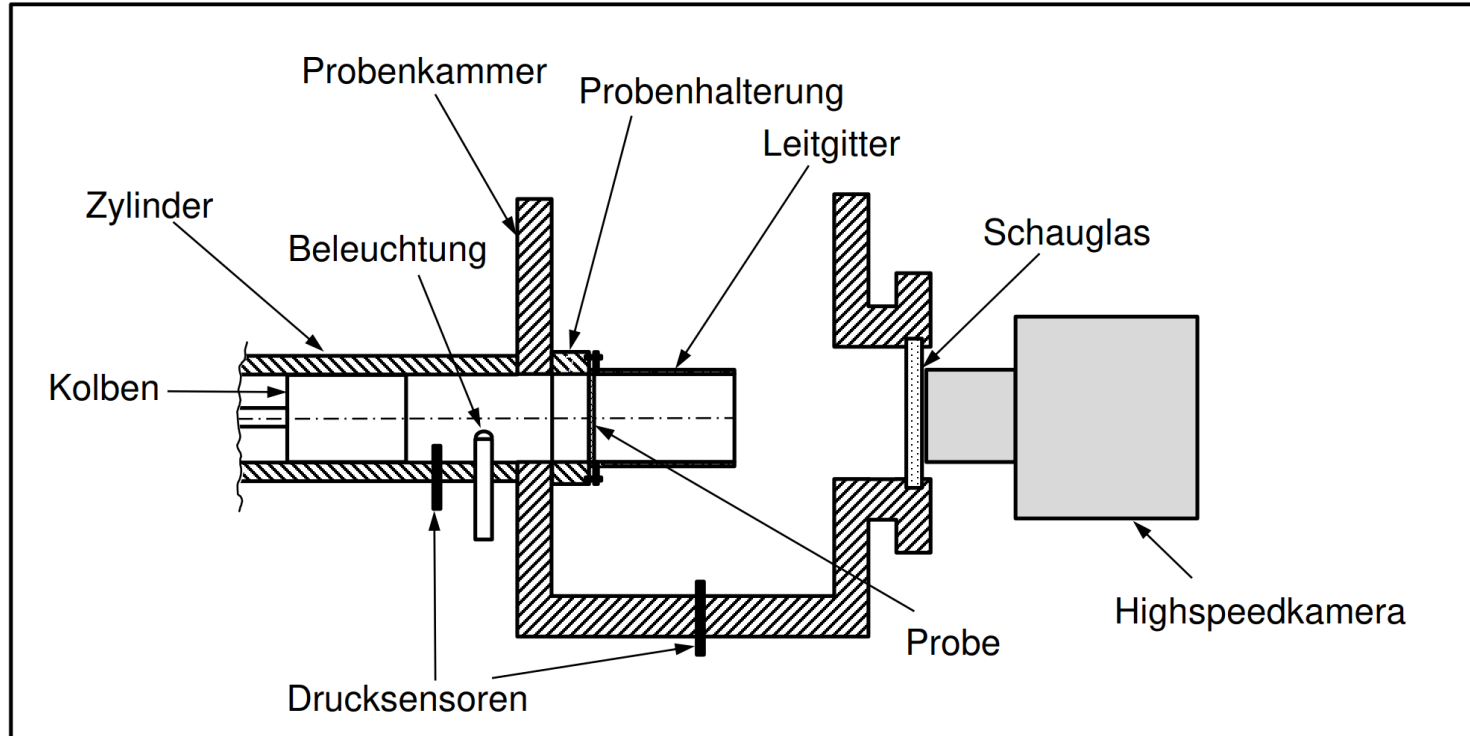
7.2 Ermittlung der Dehnviskosität mittels Membran-Inflation-Rheometer

Die Ermittlung der biaxialen Dehnviskosität, biaxialen Bruchspannung und maximalen biaxialen Streckung erfolgt mit Hilfe eines Membrane-Inflation-Rheometer (MIR). Dafür wird eine im Blasfolienprozess hergestellte Kunststoffolie zwischen einem ölgefüllten Zylinder und einem weiteren Tank mit Kamera eingespannt (siehe Bild 7.3). Im Zylinder befindet sich ein Verdrängerkolben, welcher verfahren werden kann. Bewegt sich der Kolben auf die Folienprobe zu, wird diese von dem verdrängten Öl aufgeblasen und wölbt sich in den Kamertank. Durch zwei hitzebeständige Borosilikatgläser kann die Probendeformation von vorne und von der Seite beobachtet werden. Über die Verformung und den für die Verformung notwendigen Druck lässt sich über mathematische Modelle die Dehnviskosität der Probe ermitteln [Det01]. Eine Dehngeschwindigkeitsüberlagerung der biaxialen Verstreckung des Schmelzeschlauchs innerhalb der Schlauchbildungszone der Blasfolienextrusion mit der Zellbildung bildet eine Dehngeschwindigkeit von 10 1/s den Prozesszustand ab [MSM05].

Die Dehnviskositätsverläufe von 2420F und 1800H zu 2102X0 (siehe Bild 7.4 (links)) sind deutlich verschieden. Die maximale Dehnung von 2102X0 ist mit ca. 120 % das dreifache der Dehnung von den beiden anderen Materialien. Die Dehnviskosität von 2420F steigt auf 3000 Pa*s und die Dehnviskosität von 1800H auf 1750 Pa*s bei einer Dehnung von ca. 15 % an. Im Vergleich dazu, ist der erste Anstieg von 2102X0 bei einer Dehnung von 6 % und halb so großer Dehnviskosität (1500 Pa*s) deutlich früher als bei 2420F. Die Dehnviskosität von 2420F sinkt nach Erreichen des Maximums recht konstant bis zum Bruch bei 35 % Dehnung auf 1000 Pa*s ab. Die Dehnviskosität von 2102X0 steigt verhältnismäßig langsam exponentiell ab 20 % Dehnung bis auf 2000 Pa*s beim Bruch (120 % Dehnung) an. In dem für die Blasfolienextrusion interessanten Bereich von ca. 25 % Dehnung ist die Dehnviskosität von 2420F und 1800H höher wie bei 2102X0.

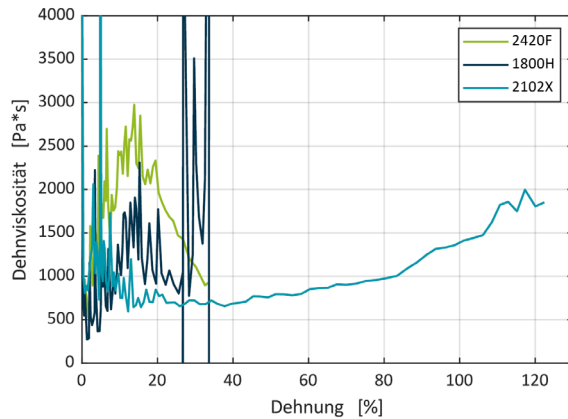
In Bild 7.4 (rechts) ist der gesamte Dehnviskositätsverlauf der LLDPE Materialien zu sehen. Da sich 7118NE und VM006 jedoch sehr lange dehnen und bei hohen Dehnungen auch hohe Dehnviskositäten erreichen, ist der für die Blasfolienextrusion interessante Bereich in Bild 7.4 (rechts) mit geänderten Achsen dargestellt. Bis ca. 20% Dehnung sind die Messungenauigkeiten sehr groß. Es ist erkennbar, dass 318BE bei ca. 25% Dehnung das Dehnviskositätsmaximum mit ca. 1000 Pa*s erreicht. Anschließend sinkt die Dehnviskosität auf 500 Pa*s bei 100% Dehnung

Schematischer Aufbau des Membran-Inflations-Rheometer



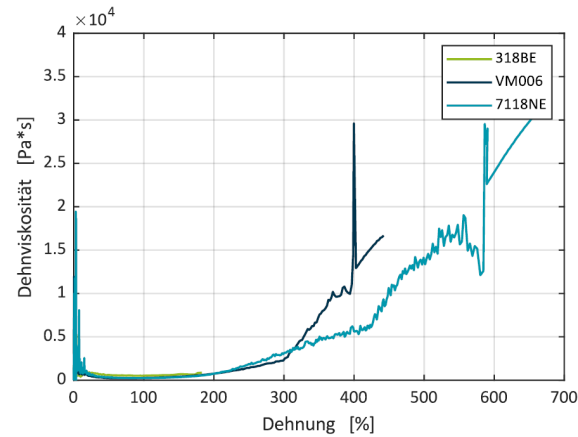
Dehnviskositätsverlauf für PE-LD und PE-LLD

PE-LD

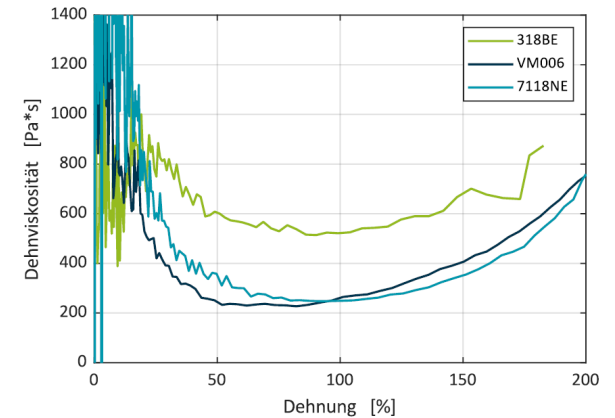


$$\dot{\epsilon} = 10^{-1} \text{ s}$$

PE-LLD



Ausschnitt aus dem Dehnviskositätsverlauf von LLDPE



wieder ab und steigt danach wieder an bis zum Bruch. 7118NE und VM006 besitzen bis 300% Dehnung einen sehr ähnlichen Dehnviskositätsverlauf. Die Dehnviskosität sinkt ab 20% Dehnung schnell ab auf 200 Pa*s. Ab dem Punkt verläuft die Kurve parallel zu 318BE mit einem konstanten Abstand von ca. 300 Pa*s.

Die Dehnviskosität (siehe Bild 7.5 (links)) des PE-HD F4520 steigt bei geringer Dehnung von ca. 15 % bereits auf 4500 Pa*s an. Damit ist der erste Anstieg deutlich ausgeprägter im Vergleich zu den anderen beiden Materialien. Bei GX5038 ist dieser Anstieg sehr kurz und bei F04660 nicht so ausgeprägt. Der anschließende Verlauf ist ebenfalls bei allen Materialien sehr verschieden. F4520 steigt sehr schnell wieder an, bis das Material bei 50 % Dehnung und einer Dehnviskosität von 4500 Pa*s bricht. Die Dehnviskosität von F04660 sinkt auf minimal 1300 Pa*s bei 50 % Dehnung und steigt anschließend bis auf fast 5000 Pa*s beim Bruch bei 100 % Dehnung an. GX5038 besitzt über die gesamte Dehnung die geringste Dehnviskosität. Bis 130 % Dehnung liegt diese unterhalb von 1000 Pa*s. Der Bruch liegt bei 230 % Dehnung und einer Dehnviskosität von 3500 Pa*s.

In Bild 7.5 (rechts) sind die Verläufe der Dehnviskosität der PP dargestellt, und es sind starke Schwankungen im Verlauf zu erkennen. Besonderheit bei den Messungen der PP-Materialien am MIR ist, dass die Aufnahmen zwischenzeitlich dunkel werden. Dadurch werden die Punktmittelpunkte nicht mehr als solche erkannt und die Werte streuen vereinzelt. Dieser Effekt wird besonders beim EP240 deutlich. Die anschließenden periodischen geringeren Schwankungen gehen auf das Messrauschen des Druckaufnehmers zurück. Die Ausschläge nach unten sind die Abweichungen vom realen Druck. Alle Materialien besitzen bis zu einer Dehnung von 100% einen recht linearen Verlauf. Die Dehnviskosität ist für alle Materialien verhältnismäßig gering.

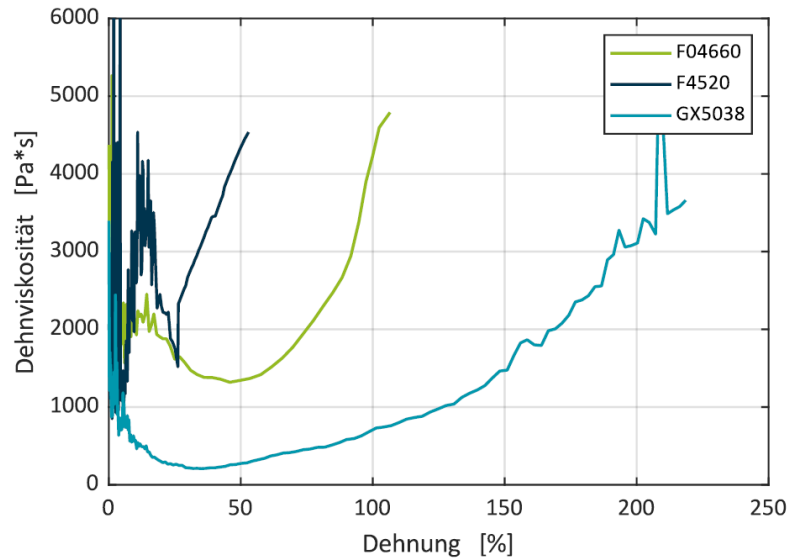
Eine Zusammenstellung aller Kennwerte der MIR-Messungen ist in Tabelle 7.3 zu finden.

Art	LDPE			LLDPE		
Type	2102XO	2420F	1800H	318BE	VM006	7118NE
Dehn.-Visc.bei 20% [Pa*s]	773,02	1963,09	1770,92	801,09	528,30	849,75
Max. Dehn. [%]	122,42	33,43	34,14	182,76	442,24	668,57
Art	HDPE			PP		
Type	F04660	F4520	GX5028	240H	EP490H	X1965A
Dehn.-Visc. bei 20% [Pa*s]	1878,13	2290,73	303,70	859,71	233,14	1116,22
Max. Dehn. [%]	106,55	52,94	218,59	193,31	138,20	130,88

Tabelle 7.2: Ergebnisse der Dehnviskositäten für alle Materialtypen

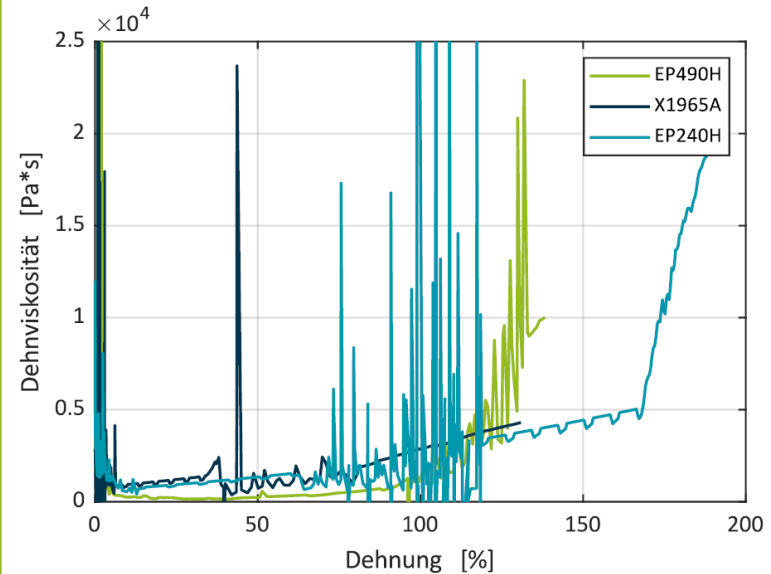
Dehnviskositätsverläufe für PE-HD und PP

PE-HD



$$\dot{\epsilon} = 10^{-1} \text{ s}$$

PP



7.3 Ermittlung des molekularen Aufbaus mittels Gelpermeationschromatographie

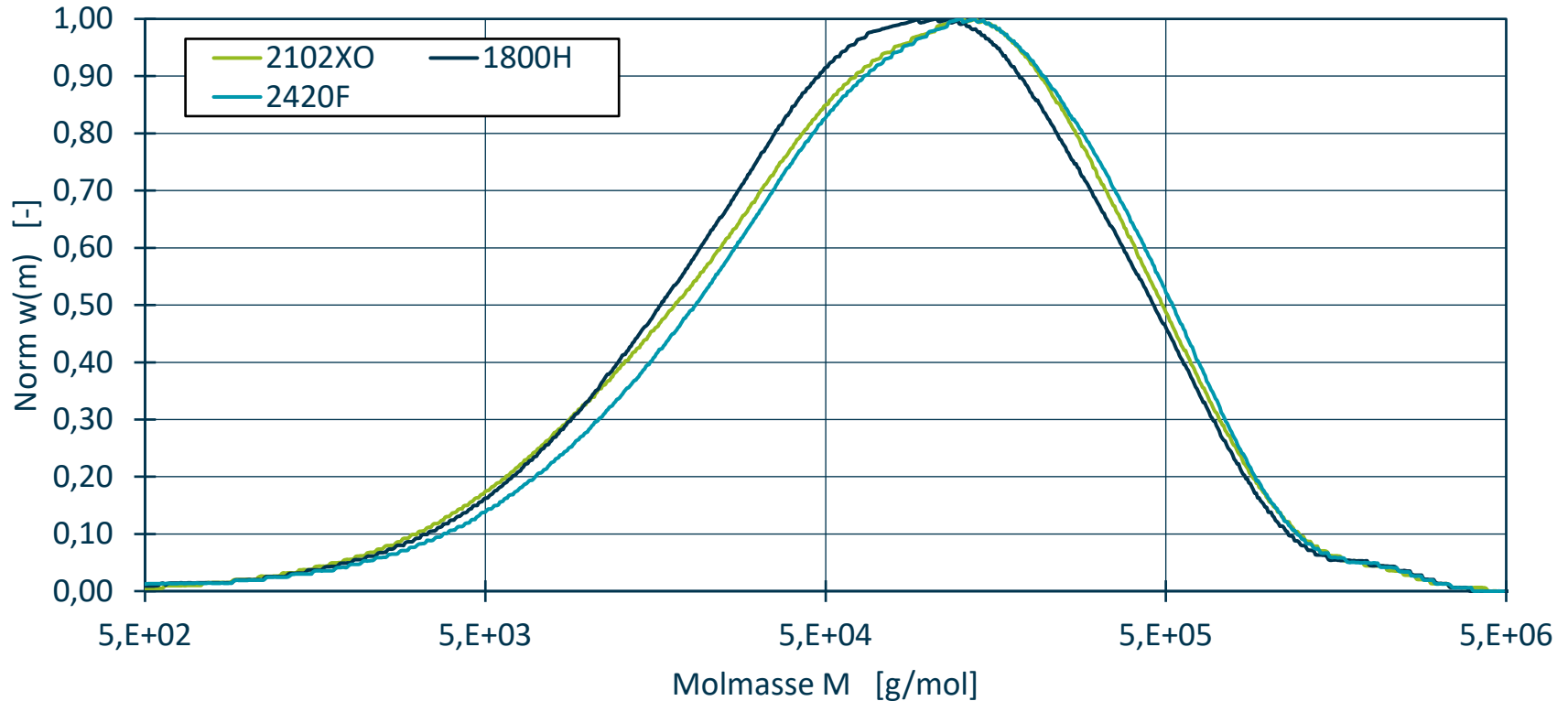
Wichtige einflussnehmende Parameter auf die Schmelzerheologie von Kunststoffen sind die Molmasse, die Molmassenverteilung (Polydispersität) sowie der Verzweigungsgrad (Molekültopologie). Dazu wurden die Materialien mittels Hochtemperatur Gel-Permeations-Chromatographie (HT-GPC) mit IR6- und Viskosimeter-Detektor analysiert. Bei dem verwendeten Analysegerät handelt es sich um eine Erweiterung des HT-GPC Basisgerätes der Firma Agilent Technologies, Inc., Santa Clara, Vereinigte Staaten durch die Firma Polymer Char/Polymer Characterization S.A., Valencia, Spanien. Die Echtzeit-Datenerfassung sowie die automatische und interaktive Analyse der Polymere erfolgt mittels WinGPC UniChrom Software der Firma PSS Polymer Standards Service GmbH, Mainz. Die Beschreibung und Erläuterung der Ergebnisse der HT-GPC-Ergebnisse wird exemplarisch am der Materialgruppe der PE-LD vorgestellt. Die relevanten Kennwerte aller Materialien finden sich in Tabelle 7.3.

Art	LDPE			LLDPE		
Type	2102XO	2420F	1800H	318BE	VM006	7118NE
M_w [g/mol]	183000	193000	179000	115000	127000	124000
PDI [-]	8,05	8,17	8,96	3,6	2,44	2,47
α [-]	0,5753	0,5455	0,5474	0,7394	0,7235	0,7651
Art	HDPE			PP		
Type	F04660	F4520	GX5028	240H	EP490H	X1965A
M_w [g/mol]	91200	88600	161000	340000	535000	1070000
PDI [-]	6,85	15,24	6,84	5,82	33,96	16,22
α [-]	0,7966	0,6859	0,7917	0,7606	0,6726	0,7160

Tabelle 7.3: Ergebnisse der HT-GPC für alle Materialtypen

In Bild 7.6 sind die Molekulargewichtsverteilungen der drei PE-LD aufgetragen. Das Molekulargewicht der einzelnen Materialien zeigt keine großen Unterschiede. Das 1800H liegt mit einem Molekulargewicht von 179000 g/mol unter den Materialien 2102XO (183000 g/mol) und 2420F (193000 g/mol). Das Molekulargewicht nimmt dabei direkten Einfluss auf die Viskosität und diese steigt aufgrund der Wechselwirkungen der längeren Polymerketten bei

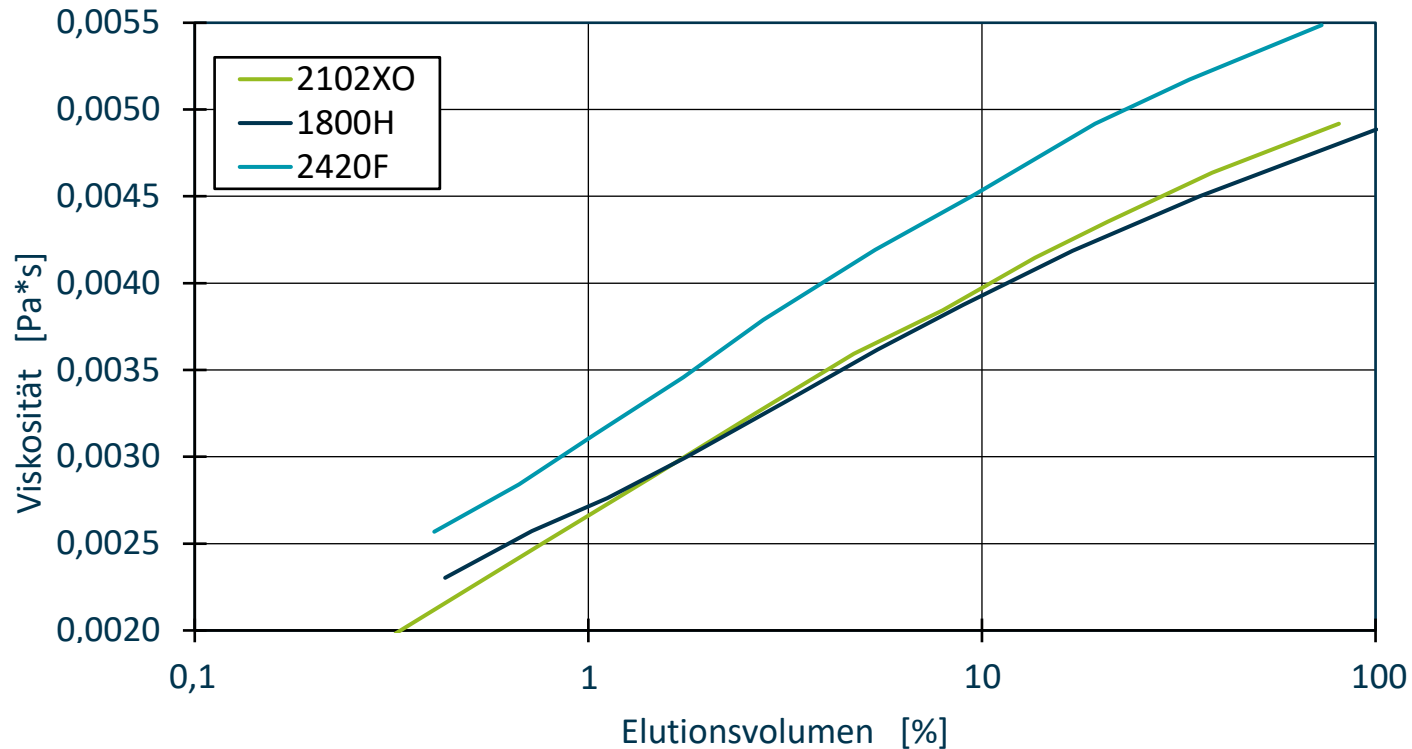
Ergebnisse der HT-GPC für PE-LD - Molekulargewichtsverteilung



steigender Molmasse. Die Polydispersität beschreibt die Breite der Verteilung und wird aus einem Quotienten aus gewichtsmittleren Molmasse und zahlenmittleren Molmasse gebildet. Die im oben genannten Bild erkennbare Verteilung des 1800H ist deutlich breiter (8,96) als die Materialien 2102XO (8,05) und 2420F (8,17). Ein Material mit höherer Polydispersität verhält sich strukturviskoser. Ebenso beeinflusst die Molekültopologie das makroskopische Verhalten des Polymermaterials in hohem Maße. Insbesondere die langkettige Verzweigung beeinflusst die Dehnviskosität des Materials. Um dies zu untersuchen, wurde ein Mark-Houwink-Plots erstellt. Durch Auftragen der intrinsischen Viskosität im Verhältnis zur molaren Masse gibt die Steigung des Diagramms Aufschluss über die Verzweigung. Die Steigung nimmt ab, wenn die Anzahl der Verzweigungen zunimmt. Bild 7.7 zeigt die Mark-Houwink-Diagramme für die drei verschiedene PE-LD. Die beiden Materialien 1800H und 2420F weisen eine gleiche Steigung von 0,54 auf. Das Material 2102XO ist mit einer Steigung von 0,57 leicht höher und weist somit auf eine geringere Kettenverzweigung.

Generell weisen die Materialien PE-HD und PP (Bild 7.5) eine sehr geringe Dehnviskosität mit gleichzeitig hoher Steigung des Mark-Houwink-Diagramms auf. Dies lässt vermuten, dass sich die Materialien im kombinierten Prozess auf Blasfolien- und Schaumextrusion nur schwierig verarbeiten lassen.

Ergebnisse der HT-GPC für PE-LD - Molekültopologie



8 UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DES DÜSENDESIGNS AUF DIE SCHAUMEIGENSCHAFTEN

Um hohe Verstreckungsgrade zu vermeiden, die zu einer Ausdünnung der Folie und einer Verstreckung der Schaumzellen führen und um die Schaumstruktur weiter zu optimieren, ist es notwendig, den Einfluss verschiedener Düsengeometrien genauer zu untersuchen. Das Erreichen einer feinzelligen Schaumstruktur ist wichtig, um eine maximale Dichtereduzierung bei gleichzeitig guten mechanischen Folieneigenschaften zu erreichen. Das Ziel war daher die Bestimmung eines besonders gut geeigneten Düsendesigns.

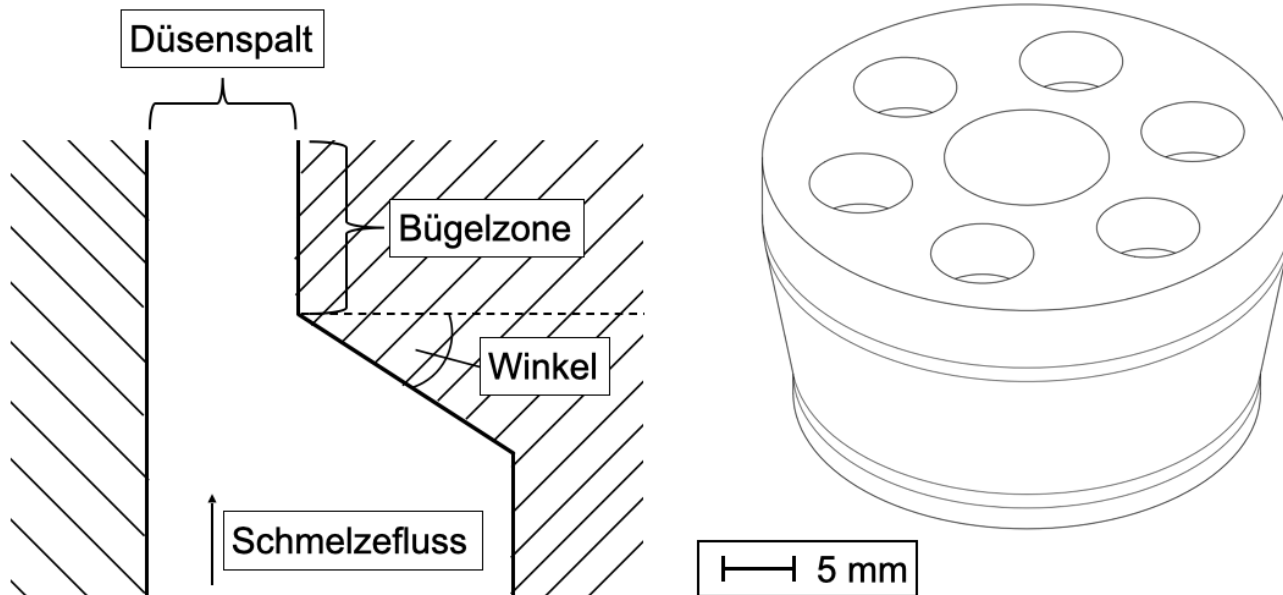
8.1 Konstruktion und analytische Untersuchungen von verschieden Blasfoliendüsen

In einem ersten Schritt wurde die nicht für das Schäumen optimierte Standarddüsenkonstruktion eingehend untersucht und Überlegungen angestellt, wie die Düsenkonstruktion variiert werden sollte. Der Austritt einer Extrusionsdüse für die Blasfolienextrusion besteht in den meisten Fällen aus einer Reduzierung des Durchmessers in einem bestimmten Winkel, einer Bügelzone sowie dem Düsenpalt. Diese drei Konstruktionsparameter, die in Bild 8.1 dargestellt sind, beeinflussen das Verhalten der Kunststoffschmelze in der Extrusionsdüse. Die Bügelzone bezeichnet den Bereich im Düsenpalt, in dem keine Durchmesserabnahme mehr erfolgt. Der Düsenpalt ist also über die Bügelzone konstant. Der Düsenpalt bestimmt die initiale Dicke des aus der Düse austretenden ungeschäumten Folienschlauches. Der Winkel bestimmt, wie schnell sich der Durchmesser zum endgültigen Düsenpalt ändert. Es wurden fünf neue Düsen konstruiert und mit Hilfe analytischer Berechnungen untersucht. Für die analytischen Berechnungen wird die Düse als Ringspalt betrachtet und weitere Vereinfachungen werden nach [HM16] vorgenommen. Der äußere Düsendurchmesser beträgt 80 mm und wurde ebenso konstant gehalten wie der Massedurchsatz von 15 kg/h. Die Berechnungen basieren auf den Materialparametern von PE-LD 1800H.

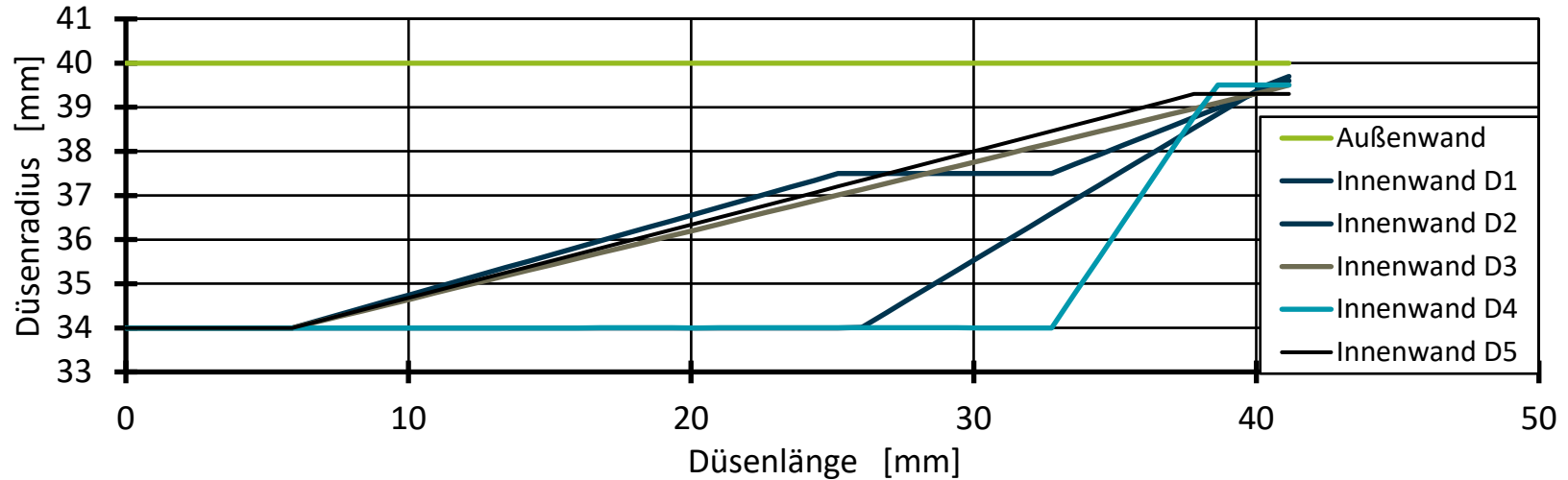
Bild 8.2 zeigt die Strömungsverläufe aller fünf Düsen. Diese unterscheiden sich voneinander durch die Länge der Bügelzone, die Breite des Austrittspalt und den Winkel.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der analytischen Berechnungen in Bild 8.3 für die Düse mit dem 0,3 mm (D1/links) und für die Düse mit den 0,7 mm (D5/rechts) Austrittsspalt beispielhaft dargestellt. In einem Vergleich der Diagramme für den 0,3-mm-spalt mit denen für den 0,7-mm-spalt, ist zu erkennen, dass bei der Düse D1 der Druckverlust in einem deutlich kürzeren Bereich und in einer kürzeren Zeit auftritt. Die analytischen Berechnungen zeigen, dass bei der Düse D5 sogar ein größerer Werkzeugdruck entsteht, der sich jedoch über einen längeren Zeitraum/eine längere Strecke abbaut. Für die Herstellung von geschäumten

Konstruktionsparameter der Extrusionsdüse

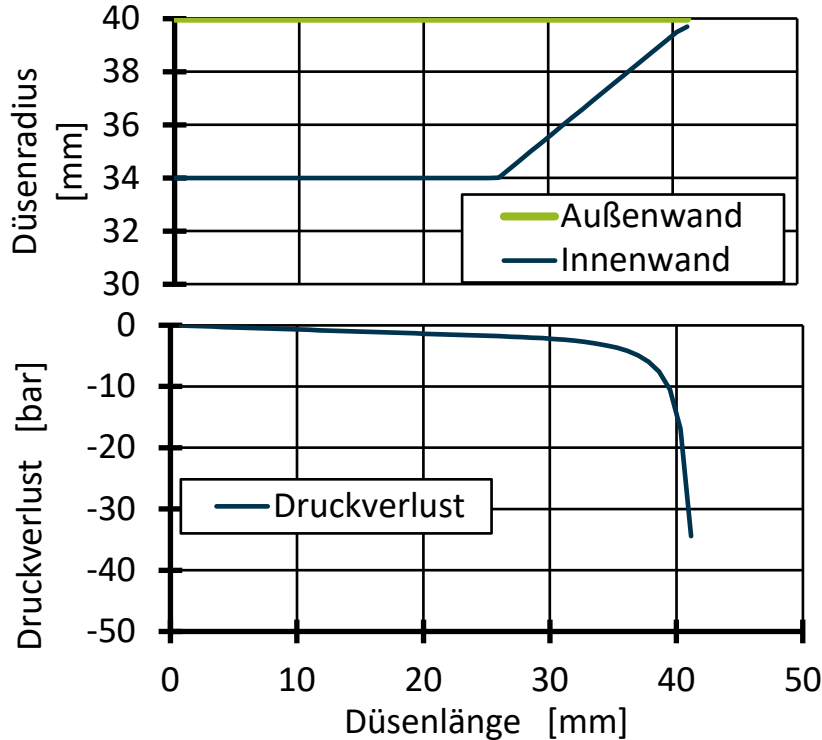


Düsendesign der verschiedenen Einsätze

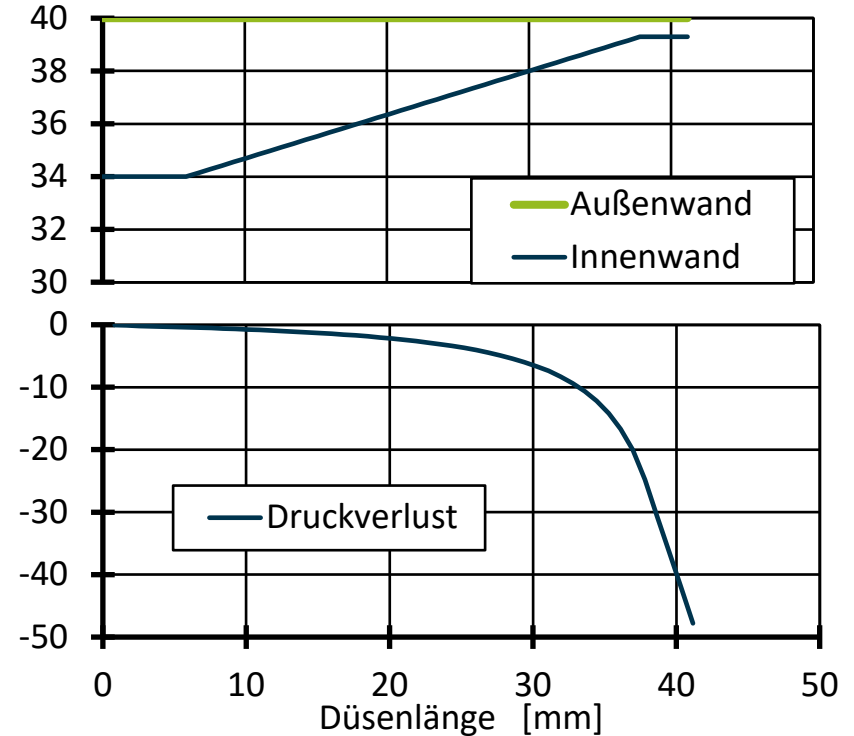


Geometrie	D1	D2	D3	D4	D5
Düsenpalt	0,3 mm	0,4 mm	0,5 mm	0,5 mm	0,7 mm
Bügelzonenlänge	0,0 mm	7,5 mm	3,4 mm	0,0 mm	4,0 mm
Winkel	70 °	2 stufig: 76 °/80 °	45 °	80 °	80 °

Ergebnis der analytischen Untersuchungen



Düsenstap: 0,3 mm; Winkel: 70° ; Bügelzone: 0 mm



Düsenstap: 0,7 mm; Winkel: 80° ; Bügelzone: 4 mm

Blasfolien ist zu erwarten, dass insbesondere die Düse D1 durch eine gute Schaumstruktur auszeichnet, da der Druckgradient bei dieser Düse deutlich höher ist.

8.2 Extrusionsversuche mit unterschiedlichen Düsendesigns

Zur Validierung der analytischen Untersuchung und zur Bewertung der Prozessfähigkeit der Düsen wurden Extrusionsversuche durchgeführt. Der Einfluss der Düsenkonstruktion auf die Schaumstruktur wurde aufgrund eines Defektes der physikalischen Treibmitteldosierpumpe und in Absprache mit dem PbA in einem chemischen Schäumungsprozess durchgeführt. Hierfür wurde 7 Gew.-% Hydrocerol eingesetzt. Es wurde ein Polyethylen niedriger Dichte 2102X0 von Sabic Europe, Geleen, Niederlande, verwendet.

Um den Druckverlust an der Düse nicht über den Extruderdruck der Mittelschicht abschätzen zu müssen, wurde ein neues Düsengehäuse konstruiert und gefertigt, das die Messung des Schmelzedrucks und der Schmelzetemperatur ca. 60 mm vor dem Austritt der Schmelze ermöglicht. Für die nachfolgenden Analysen der Schaumstrukturen wurden Blasfolien hergestellt. Die Parameter der Versuchsreihen sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst. Für jede Düsengeometrie werden die Massenströme in zwei Stufen (8/11 kg/h) variiert, da sie auch einen Einfluss auf den Druckgradienten und damit auf die Zellgröße haben. Für die einzelnen Prozesspunkte wurden die Parameter konstant gehalten. Während der Versuche zeigten die Düsen D1, D2 sowie D3 eine verschlechterte Prozessstabilität. Die Düsen mit einem Auslass von 0,3 mm (D1) und 0,4 mm (D2) wiesen eine erhöhte Anzahl von Folienrissen auf, und es war nicht möglich, einen stationären Prozess einzurichten. Dennoch wurden Folienproben entnommen, um die Schaumstruktur nachträglich beurteilen zu können.

Versuchsparameter	Ausprägung
Material	PE-LD 2102X0
Hydrocerolanteil [Gew.-%]	7
Durchsatz [kg/h]	8/11
Massenverhältnis Außen:Innen:Außen	1:2:1
Massetemperatur [°C]	170
Foliendicke [µm]	125

Tabelle 8.1: Versuchsparameter für die Untersuchung des Düsendesigns

8.3 Einfluss der Düsendesigns auf die Schaumstruktur

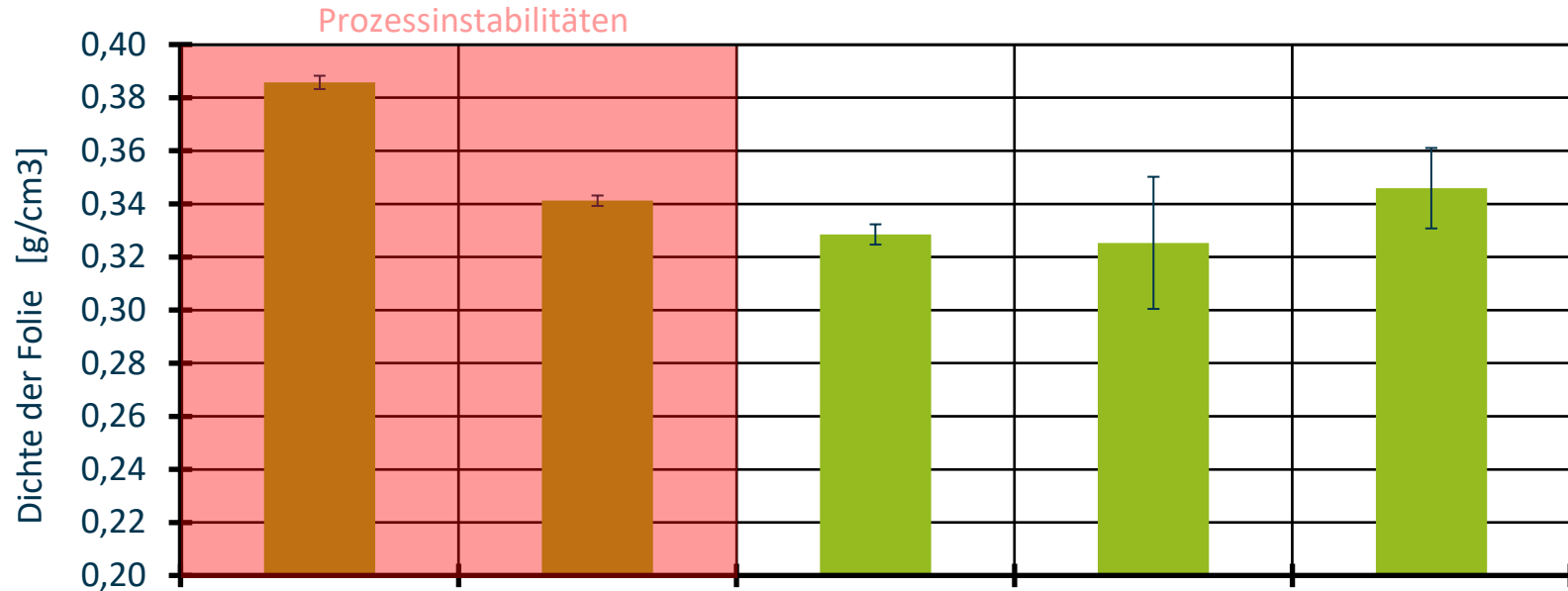
Die Schaumstruktur von geschäumten Blasfolien ist neben der Prozessstabilität während der Extrusion der wichtigste Faktor für die Bewertung der Düsenkonstruktionen. Es wurde eine feinzellige, homogene Schaumstruktur angestrebt. Die beiden wichtigsten Parameter zur Beurteilung der Schaumqualität sind die Dichte der Blasfolie und die Zellgröße.

Mit Hilfe der Dichte kann die Materialeinsparung bewertet werden. Die Dichte der Folie lässt jedoch keine direkten Rückschlüsse auf die Zellgröße oder das Volumen einer einzelnen Zelle zu. Die Gesamtdichte der Mehrschichtfolie schwankte für alle Düsen zwischen $0,325 \text{ g/cm}^3$ und $0,386 \text{ g/cm}^3$, so dass sich die Dichten relativ wenig voneinander unterscheiden (siehe Bild 8.4). Der höchste ermittelte Wert ($0,386 \text{ g/cm}^3$) trat bei der Düse D1 auf und die beiden niedrigsten Werte von etwa $0,325$ und $0,328 \text{ g/cm}^3$ wurden von den Düsen mit einem Düsenspalt von $0,5 \text{ mm}$ (D3, D4) erreicht. Da eine niedrige Dichte auch mit großen Zellen erreicht werden kann, war der nächste Schritt die Untersuchung der Zellgröße.

Ein Vergleich der Bilder der Schaumstruktur (siehe Bild 8.5) mit den in Bild 8.6 ermittelten Zellgrößen verdeutlicht, dass die Düsen mit den geringsten Auslassdurchmessern (D1, D2) zu den kleinsten Zellgrößen führen. Die Bilder zeichnen sich durch eine sehr feine und homogene Schaumstruktur aus. Dies war zu erwarten, da der Druckgradient im Düsenspalt mit einem kleineren Düsenspalt zunimmt. Die Düsen D3 und D4, die die geringste Foliendichte erzeugten, erreichten eine durchschnittliche Zellgröße. Allerdings liegt die D4 ohne Parallelzone etwa $0,4 \text{ mm}^2$ unter den anderen Düsen. Der Düse (D5) erreicht auf den Bildern die schlechteste Schaumstruktur mit der höchsten Zellgröße im Vergleich zu den anderen Strukturen. Die relativ geringe Standardabweichung (siehe Bild 8.6) aller Schaumstrukturen deutet auf eine sehr homogene Verteilung der Zellgrößen hin.

Aufgrund der schlechten Prozessstabilität der Düsen (D1, D2) sind beide Fließkanal designs für die weitere Verwendung bei der Herstellung von Blasfolien nicht geeignet. Da sich die Düse (D4) im Vergleich zu den anderen Düsen durch die kleinste Zellgröße ($1,84 \text{ mm}^2$), eine geeignete Prozessstabilität und die niedrigste Gesamtdichte ($0,33 \text{ g/cm}^3$) auszeichnet, wurde sie als endgültige Düse ausgewählt.

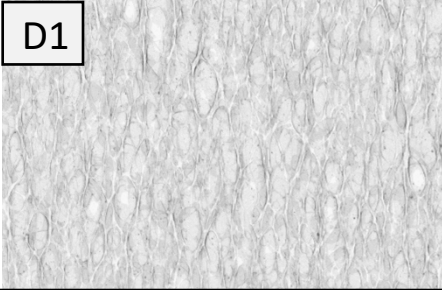
Einfluss des Düsendesigns auf die Dichte des Mehrschichtfolie



Geometrie	D1	D2	D3	D4	D5
Düsenspalt	0,3 mm	0,4 mm	0,5 mm	0,5 mm	0,7 mm
Bügelzonenlänge	0,0 mm	7,5 mm	3,4 mm	0,0 mm	4,0 mm
Winkel	70 °	2 stufig: 76 °/80 °	45 °	80 °	80 °

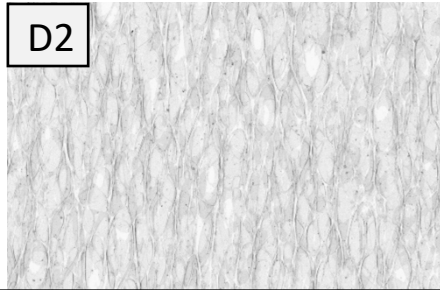
Bilder der Schaumstruktur der verschiedenen Düsendesigns

D1



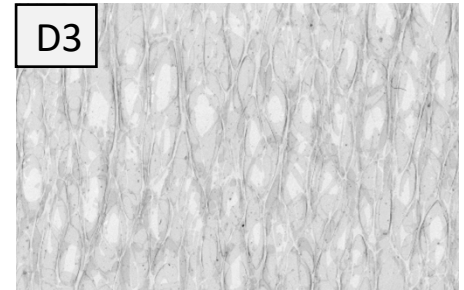
$D_S: 0.3 \text{ mm}$ $L_{Bü}: 0 \text{ mm}$ $\angle: 70^\circ$

D2



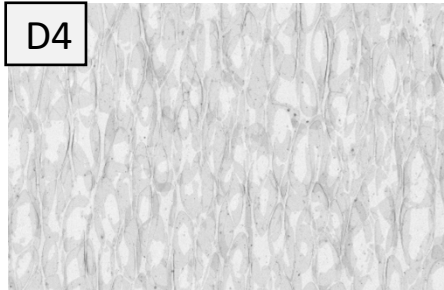
$D_S: 0.4 \text{ mm}$ $L_{Bü}: 7.5 \text{ mm}$ $\angle: 76-80^\circ$

D3



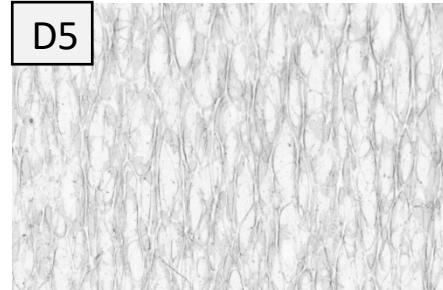
$D_S: 0.5 \text{ mm}$ $L_{Bü}: 3.36 \text{ mm}$ $\angle: 45^\circ$

D4



$D_S: 0.5 \text{ mm}$ $L_{Bü}: 0 \text{ mm}$ $\angle: 80^\circ$

D5

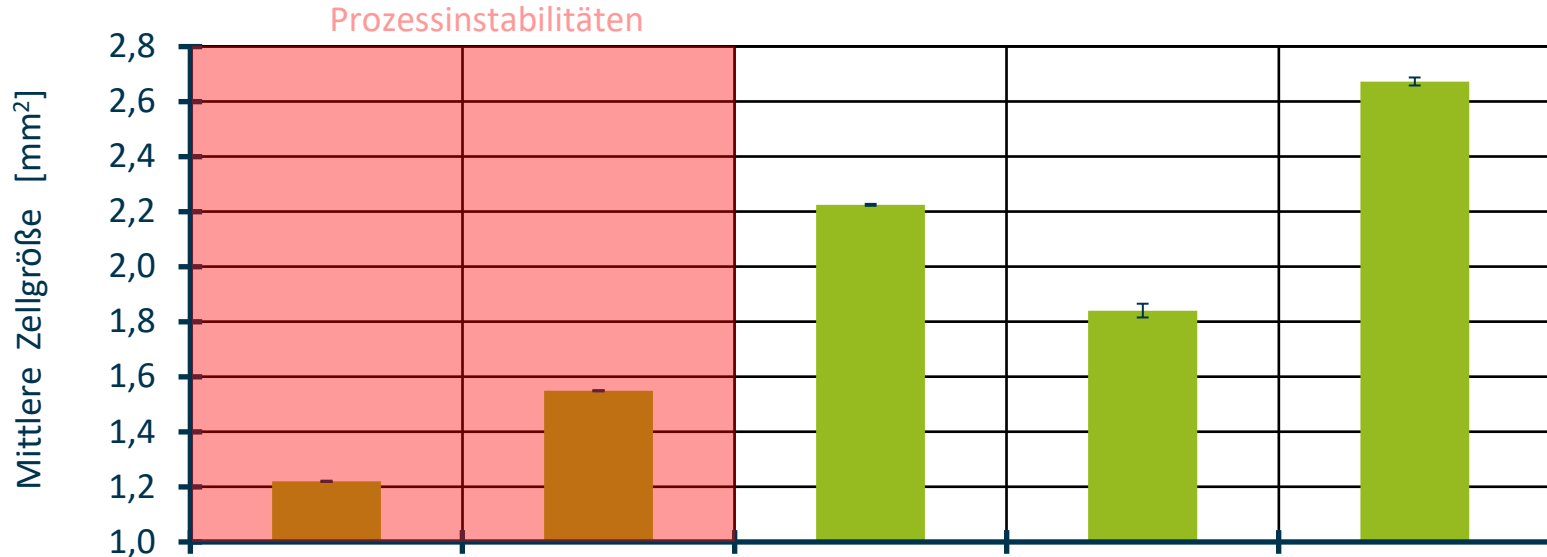


$D_S: 0.7 \text{ mm}$ $L_{Bü}: 4 \text{ mm}$ $\angle: 80^\circ$

5 mm

↑
Extrusions-
richtung

Einfluss der Düsendesigns auf die mittlere Zellgröße



9 UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES VERSCHIEDENER NUKLEIERUNGSMITTEL AUF DIE SCHAUMEIGENSCHAFTEN

Bei der Schaumextrusion thermoplastischer Kunststoffe wird der Schmelze in der Regel ein Nukleierungsmittel zugesetzt. Nukleierungsmittel haben die Aufgabe, die Zellbildung zu initiieren und zu steuern, um die Schaumstruktur gezielt beeinflussen zu können. Bei Nukleierungsmitteln handelt es sich in der Regel um mineralische Feststoffe, wie Talkum, mit Partikelgrößen im Bereich von Mikrometern. Zur Herstellung verschiedenster Schaumstrukturen wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens die in Bild 7.1 aufgeführten Nukleierungsmittel verwendet.

Unter Einsatz von Nukleierungsmitteln kann eine Verringerung der Zellflächen sowie eine homogenere Verteilung Zellen erreicht werden. Der Einfluss des Nukleierungsmittels auf die Keimbildung und Anlagerung des Treibgases in der Schmelze steht dabei im Vordergrund dieser Untersuchung. Unter einer Vorauswahl an Nukleierungsmitteln wird deren Anteil in der Mittelschicht in verschiedenen Prozentstufen variiert. Dazu werden ebenfalls verschiedene zu schäumende Trägermaterialien eingesetzt. Eine abschließende Analyse der Folien gibt Aufschluss über die Kombinationsmöglichkeiten aus Nukleierungsmitteln und Polyolefinen. Hierzu wird die Größe der Zellflächen vermessen, die Dichte der Folie bestimmt und die Homogenität der Zellverteilung beurteilt.

Versuchsparameter	Ausprägung
Düsenpalt [mm]	0,5 – D4
Treibmittelanteil [kg/h]	0,1 - 0,02
Durchsatz [kg/h]	8
Massenverhältnis Außen:Innen:Außen	1:2:1
Massetemperatur [°C]	180
Foliendicke [µm]	100

Tabelle 9.1: Versuchsparameter für die Untersuchung des Nukleierungsmittels

9.1 Nukleierungsmittel für PP und PE-HD

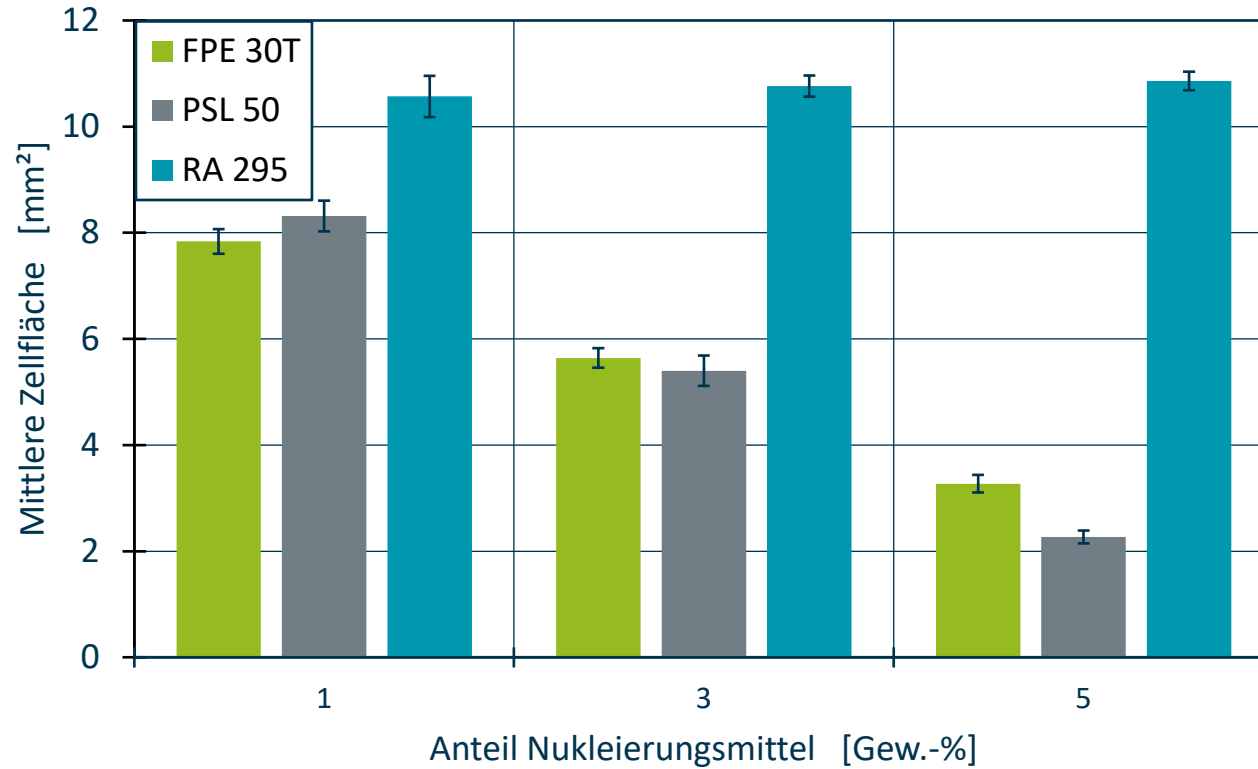
Die Bildung eines stabilen Prozesses ist für Polypropylen nicht möglich. Innerhalb des Prozessfensters wird nur eine unzureichende Schmelzestabilität erreicht. Die Zufuhr von Treibgas verringert die Viskosität dabei weiter. Eine Möglichkeit diesem Effekt entgegenzuwirken und die Stabilität des Prozesses zu erhöhen, besteht im Herunterkühlen des Werkzeuges und der Düse.

Für die durchgeführten Versuche erzielen diese Maßnahmen jedoch keinen positiven Effekt. Eine reproduzierbare Herstellung von geschäumter Blasfolie war nicht möglich, daher wird auf eine weitere Auswertung hinsichtlich der Foliendichte und Schaumstruktur verzichtet. Dasselbe Verhalten ist bei der Verarbeitung des PE-HD aufgetreten. Diese schlechte Eignung in diesem Prozess ist auf die sehr geringe Dehnviskosität des PP und PE-HD zurückzuführen. Aus diesen Gründen wird im weiteren Verlauf des Forschungsvorhaben auf die Betrachtung dieser beiden Materialtypen verzichtet.

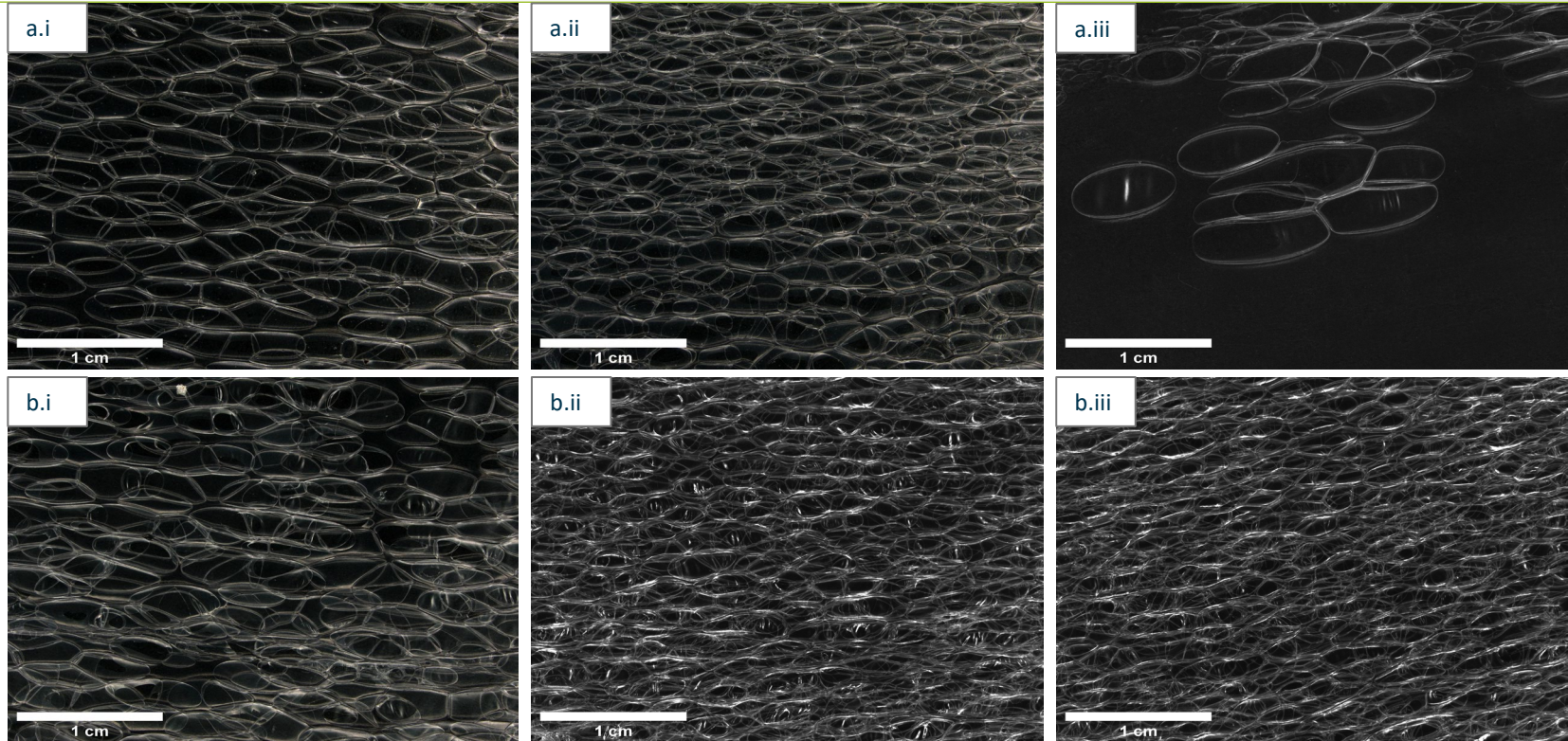
9.2 Nukleierungsmittel für PE-LD und PE-LLD

In Bild 9.1 werden die ermittelten mittleren Zellflächen der verschiedenen Nukleierungsmittel für das PE-LD 2102XO dargestellt. Mit steigendem Anteil an organischem Nukleierungsmittel RA 295 geht keine Verringerung der mittleren Zellflächen einher. Die Tendenz ist von 10,57 auf 10,86 mm² sogar leicht steigend. Die Dichte verringert sich dabei minimal von 0,520 auf 0,486 g/cm³, was den Ansprüchen geschäumter Kunststoffe im Allgemeinen nicht gerecht wird. Ähnliche Werte lassen sich generell auch ohne den Einsatz von Nukleierungsmitteln erzielen, weshalb sich RA 295 nicht für das Schäumen von Blasfolien eignet. Alle Werte unterliegen ebenfalls aufgrund starker Inhomogenität der Zellverteilung einer großen Standardabweichung. Diese Inhomogenität zeigt sich ebenfalls in Bild 9.2 a.iii. Einige Bereiche weisen dabei im Vergleich mit a.i und a.ii große Zellflächen auf, während andere sich nur durch geringe Zellflächen oder der Abstinenz von Schaumblasen auszeichnen. In Kombination mit dem speziell für Schaumanwendungen entwickelten 2102XO zeigen die beiden anorganischen Nukleierungsmittel PBH FPE 30T und PSL 50 mit steigendem Anteil eine starke Reduktion der Zellfläche. Für PBH FPE 30T verringert sich diese, wie in Bild 9.1 erkennbar ist, von 7,84 auf 3,27 mm² um rund 58 %. Die Dichte der Folie steigt dabei geringfügig von 0,257 auf 0,299 g/cm³. Eine Steigerung von 1 auf 5 Gew.-% PSL 50 führt zu einer Abnahme der Zellfläche um ca. 73 % und zu einer Zunahme der Dichte von 0,263 auf 0,319 g/cm³. Für beide Nukleierungsmittel zeigt sich mit dessen erhöhtem Anteil eine Steigerung der Homogenität der Schaumstruktur. PBH FPE 30T und PSL 50 zeigen unter Verwendung von 2420F als Trägermaterial vergleichbare Ergebnisse. Die Dichte von PBH FPE 30T bleibt über die Versuchsreihen annähernd konstant um 0,297 g/cm³. Nach Bild 9.3 ist dabei eine Reduktion der Zellfläche von 8,13 auf 2,80 mm² um 66 % möglich. Am stärksten ist diese dabei für eine Steigerung des Anteils des Nukleierungsmittels von 3 auf 5 Gew.-%. Für PSL 50 zeigt sich dieser Effekt hingegen bereits bei einer Erhöhung dessen Anteils von 1 auf 3 Gew.-%. Des Weiteren reduziert sich die Zellfläche von 7,45 auf 2,36 mm² um bis zu 68 %. Die Dichte der Folie nimmt dabei von 0,322 auf 0,294 g/cm³ ab. Die Bilder 9.2 b.i) bis b.iii) zeigen dabei beispielhaft für PSL 50 die zunehmende Homogenität der Zellverteilung für verschiedene Gewichtsanteile an Nukleierungsmittel. Dieser Effekt ist bei einer Erhöhung von 1 auf 3 Gew.-%

Vergleich der ermittelten mittleren Zellflächen bei Variation des Nukleierungsmittels für 2102XO



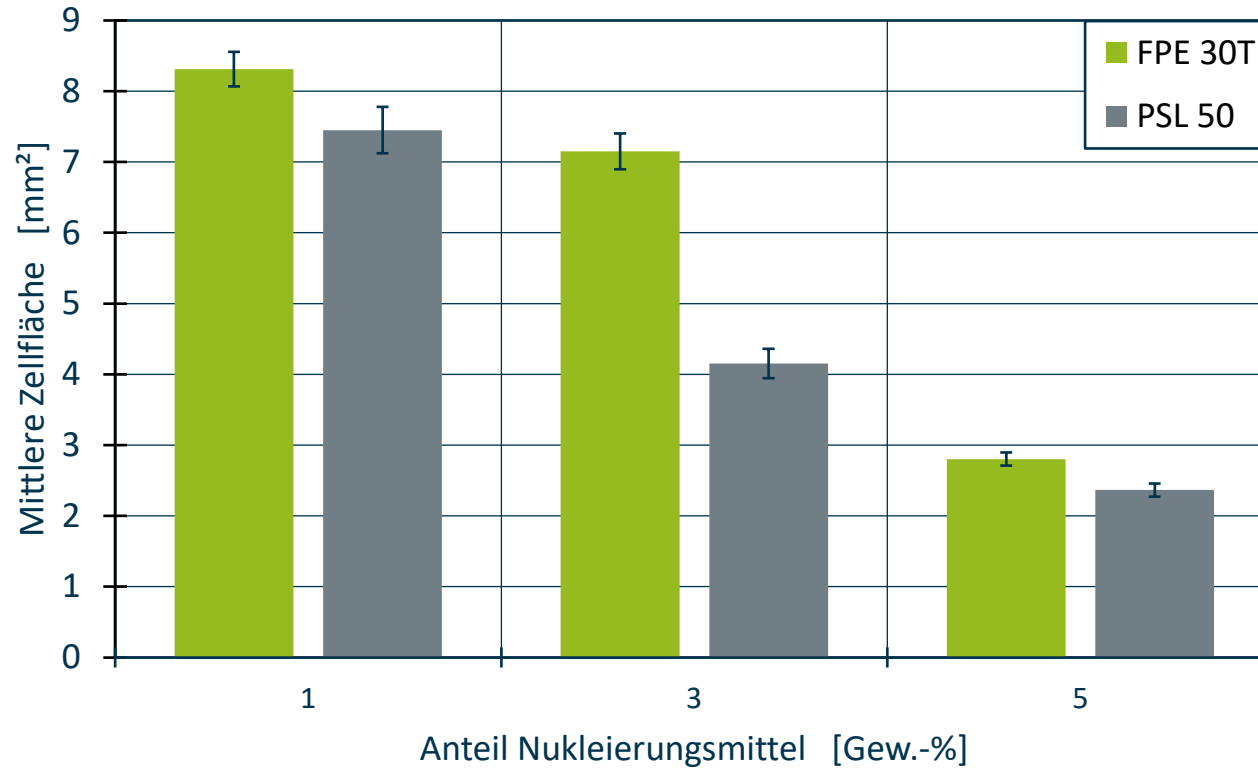
Einfluss des Nukleierungsmittels auf die Schaumstruktur



a) 2102XO, 3 Gew.-% Nukleierungsmittel i) FPE 30T ii) PSL 50 und iii) RA 295

b) 2420F, PSL 50 i) 1 ii) 3 und iii) 5 Gew.-% Nukleierungsmittel

Vergleich der ermittelten mittleren Zellflächen bei Variation des Nukleierungsmittels für 2420F

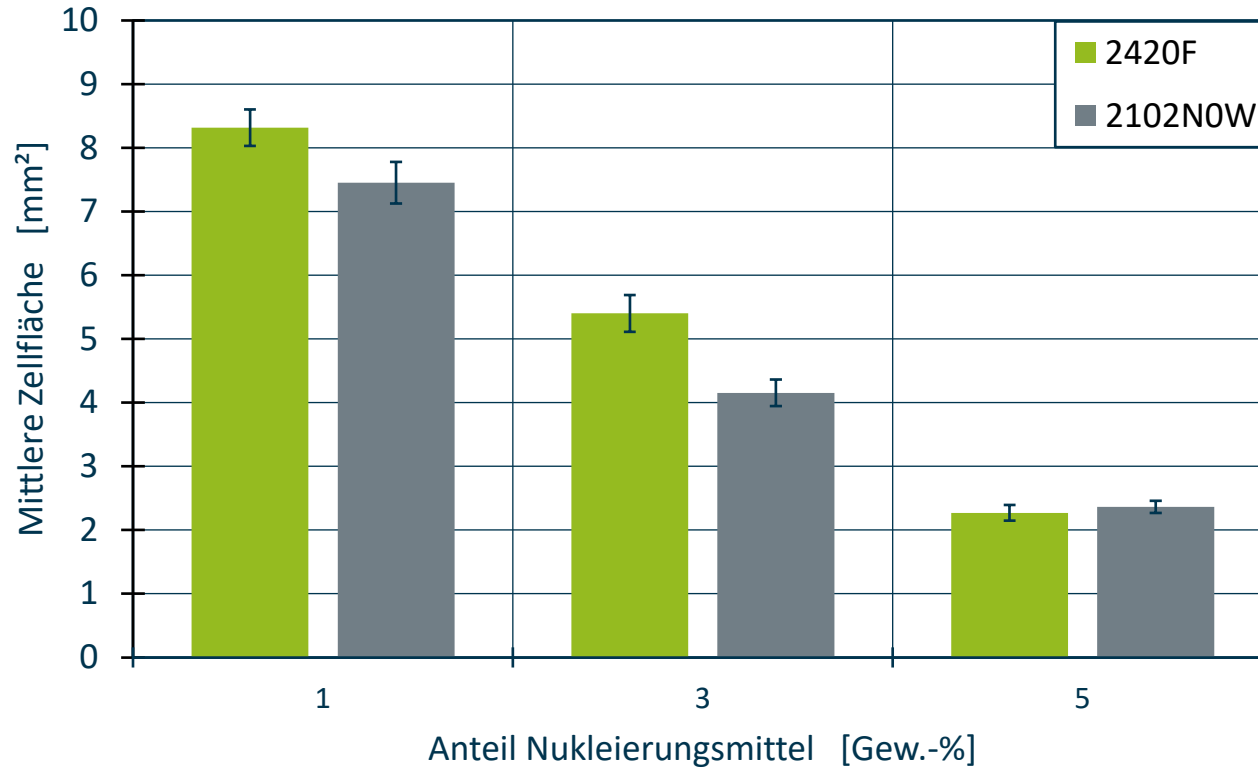


% Nukleierungsmittel am größten und gleicht dabei vor allem ungeschäumte/internukleierte Fehlstellen aus. Daraus resultieren nach Bild 9.3 ebenfalls starke Reduktionen der Standardabweichungen. PSL 50 und PBH FPE 30T zeigen somit für beide LDPEs ähnliche Ergebnisse. Tendenziell ermöglicht PSL 50 dabei eine stärkere Verringerung der Zellflächen. Im Vergleich zu kompakter Folie ist eine Reduktion der Dichte um bis zu 68 % möglich. Der Vergleich der ermittelten Zellflächen bei Variation des LDPEs für PSL 50 nach Bild 9.4 zeigt, dass die Unterschiede innerhalb der verschiedenen Trägermaterialien gering sind. Wenngleich 2102XO zufolge speziell für Schaumanwendungen entwickelt wurde, zeigen die Versuche hinsichtlich der Schaumstruktur ähnliche Ergebnisse wie 2420F.

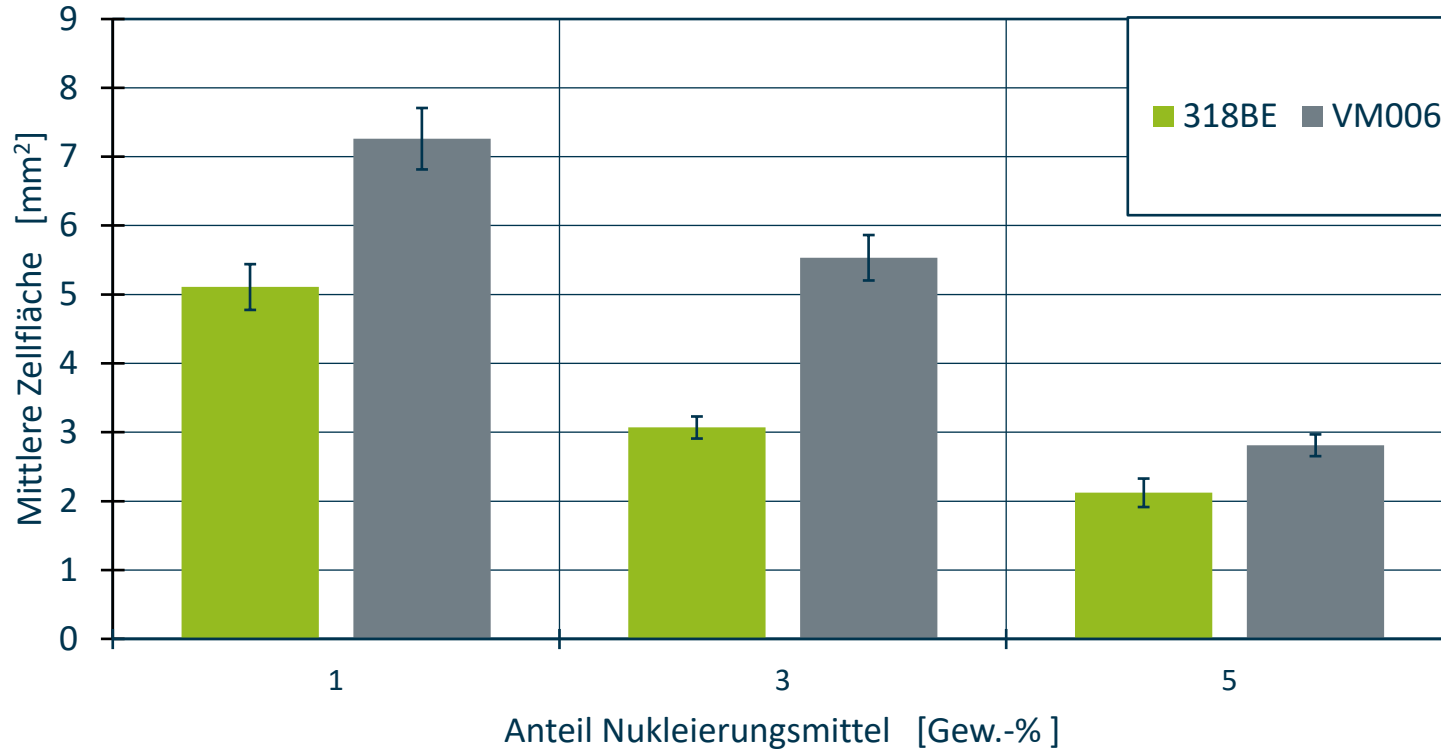
Mit angepasstem Temperaturprofil ist eine hinreichend stabile Prozessführung für das PE-LLD möglich. Während der Versuche wird der CO₂-Gehalt von 0,1 kg/h auf 0,02 kg/h schrittweise reduziert. Diese Notwendigkeit resultiert einerseits aus einer subjektiven Analyse der Folie, welche an der Außenseite den Kollaps einzelner Zellen aufzeigt, andererseits aus einem hörbaren Austritt des Treibgases an der Düse. Für das PE-LLD wurden drei verschiedene Nukleierungsmittel getestet. Das CLR122 sowie das AF1083 ergaben in den drei untersuchten Zugabemengen (1 %, 3 %, 5 %) keine Nukleierung. Die beiden Additive wurden vom Hersteller als Nukleierungsmittel empfohlen. Das dritte Nukleierungsmittel ist das auf Talkum basierende FPE30T und erreichte eine sehr gute Nukleierung. In Bild 9.5 ist die deutliche abnehmende mittlere Zellfläche für die Materialien 318BE sowie VM006 zu erkennen. Dabei ist die mittlere Zellfläche des Materials 318BE immer geringer und erreicht ein Minimum von 2,12 mm² bei einer Zugabe von 5 % des Nukleierungsmittels FPE30T.

Generell zeigt sich eine große Abhängigkeit von der Wahl des Nukleierungsmittels und dessen zugeführten Gewichtsanteils. Die Homogenität der Schaumstruktur, die Dichte der Folie und die mittlere Größe der Zellflächen konnte dabei im Wesentlichen verbessert werden. Die Dichte der Folie blieb innerhalb der Versuche für ein Nukleierungsmittel weitestgehend konstant, ließ sich jedoch für die getesteten anorganischen Nukleierungsmittel im Vergleich zur Dichte des kompakten Materials um bis zu 71 % reduzieren. Die Homogenität der Verteilung der Zellflächen zeigt eine starke Abhängigkeit von der Wahl des Nukleierungsmittels, ließ sich jedoch durch dessen steigenden Anteil in allen Folien optimieren. Eine verbesserte Zellnukleierung und stabilere Zellbildung konnte durch die Zugabe von Nukleierungsmitteln in allen Versuchsreihen nachgewiesen werden.

Vergleich der ermittelten mittleren Zellflächen bei Variation des LDPEs für PSL 50



Vergleich der ermittelten mittleren Zellflächen bei Variation des LLDPEs für FPE30T



10 ERMITTLUNG DER WIRKZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN MOLEKULAREN AUFBAU UND SCHAUMMORPHOLOGIE

Für die Ermittlung der Wirkzusammenhänge zwischen dem molekularen Aufbau und der Schaummorphologie wird auf die Ergebnisse der vorherigen Kapitel zurückgegriffen. Dazu wurden mit den in Kapitel 7 bestimmten Kunststoffe mit der in Kapitel 8 ausgewählten Düsengeometrie sowie den in Kapitel 9 ausgewähltem Nukleierungsmittel Extrusionsversuche durchgeführt. Die entstandene Schaumstruktur wurde daraufhin mit dem molekularen Aufbau korreliert.

Es wurden die Wirkzusammenhänge für jeweils zwei PE-LD und PE-LLD untersucht, welche sich stark in ihrem molekularen Aufbau oder Anwendungsgebiet unterscheiden. Die Herstellung der geschäumten Mehrschichtblasfolie wurde unter den in Tabelle 10.1 dargestellten Versuchsparameter durchgeführt.

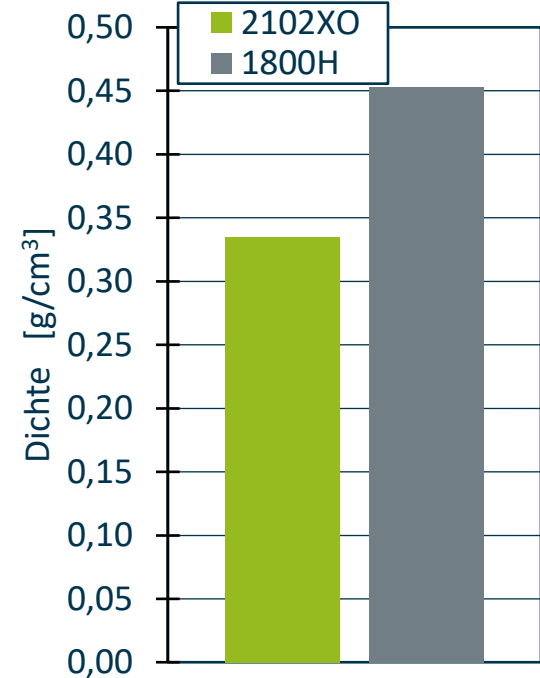
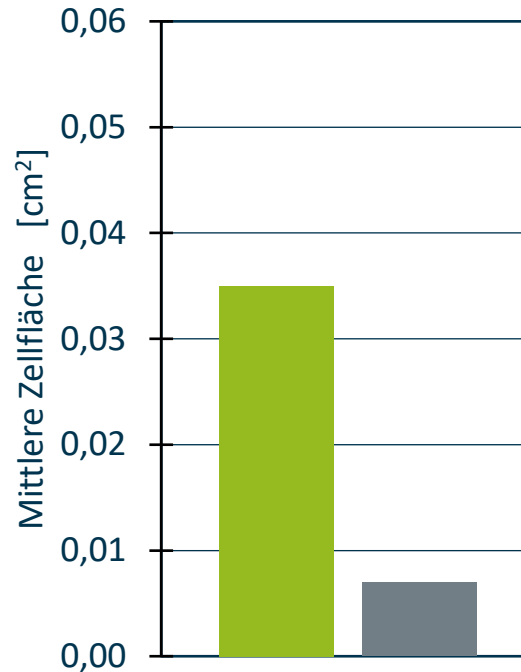
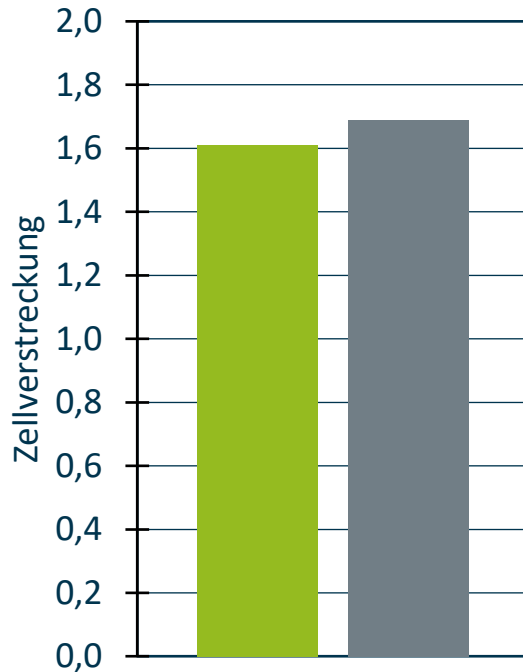
Versuchsparameter	Ausprägung
Düsenspalt [mm]	0,5 – D4
Treibmittelanteil [kg/h]	0,08
Durchsatz [kg/h]	7,5
Massenverhältnis Außen:Innen:Außen	1:1:1
Massetemperatur [°C]	180
Foliendicke [µm]	180
Nukleierungsmittel	5 % PSL 50

Tabelle 10.1: Versuchsparameter für die Ermittlung der Wirkzusammenhänge

10.1 Wirkzusammenhänge bei PE-LD

Bei der Bewertung der Schaumstruktur der hergestellten Folien wurden auf die Kennwerte Zellver Streckung, mittlere Zellfläche und Dichte der Folie zurückgegriffen. Die Ergebnisse der beiden PE-LD (1800H, 2102XO) sind in Bild 10.1 abgebildet. Auf die Untersuchung des Materials 2420F wurde in Absprache mit dem PbA verzichtet, da in der Materialcharakterisierung keine großen Unterschiede zu den anderen Materialien erkennbar waren. Bei dem Material 2102XO handelt es sich um ein für die Schaumextrusion angepasstes Material. Die Zellver Streckung der beiden Materialien ist nahezu identisch. Der Vergleich der mittleren Zellflächen ergibt größere Unterschiede. Das Material 2102X0 erzielt eine Zellgröße von $0,035 \text{ mm}^2$ und liegt deutlich über der Zellgröße von 1800H mit $0,008 \text{ mm}^2$. Eine kleiner

Schaumkennwerte zur Ermittlung der Wirkzusammenhänge bei PE-LD



Wert der Zellgröße resultiert aufgrund der höheren Anzahl an Zellwänden auf der gleichen Fläche in einer höheren Dichte. Somit liegt die Dichte des 1800H bei $0,45 \text{ g/cm}^3$ im Vergleich zur Dichte des 2102XO mit $0,325 \text{ g/cm}^3$. Zur Ermittlung der Wirkzusammenhänge zwischen dem molekularen Aufbau und der Schaummorphologie sind die Ergebnisse der Materialcharakterisierung und hier ermittelten Schaumkennwerte in Bild 10.2 zusammengefasst.

Generell gilt, dass eine höhere Scherviskosität zu einer höheren Dehnviskosität führt. Dieses Abhängigkeit wird auch über das Trouton-Verhältnis beschrieben. Diese Abhängigkeit bilden die Ergebnisse sehr gut ab. Die deutliche niedrigere Übergangsschergeschwindigkeit des 1800H spiegelt sich in der Polydispersität wider. Hier weist eine breite Verteilung auf ein früheres Einsetzen der Scherverdünnung hin. Der Alpha-Wert des Mark-Houwink-Plots zeigt eine leichte Tendenz des 1800H zu längeren Seitenketten, welche die erhöhte Dehn- sowie Scherviskosität begründen kann.

In der Korrelation dieser Zusammenhänge mit der resultierenden Schaummorphologie ist die geringere Zellfläche des 1800H auf die höhere Scher- sowie Dehnviskosität zurückzuführen. Die Höhe der Dehnviskosität liegt bei dem Material 1800H für das Schäumen von Blasfolie in einem idealen Bereich. Das für das Schäumen entwickelte Material 2102XO zeichnet sich durch eine deutlich höhere maximale Dehnung aus, welche jedoch in Kombination aus Schaumextrusion und Blasfolienextrusion keinen Einfluss nimmt.

10.2 Wirkzusammenhänge bei PE-LLD

Für die Untersuchung des PE-LLD wurden ebenfalls in Absprache mit dem PbA zwei Materialien ausgewählt, welche sich in ihrem molekularen Aufbau unterscheiden. Dabei handelt es sich um die Materialien 318BE sowie VM006. Die ermittelten Ergebnisse der Schaumuntersuchungen sind in Bild 10.3 dargestellt. Die Schaumkennwerte Zellverstreckung und Zellgröße sind bei beiden Materialien nahezu identisch. Die Zellfläche des 318BE liegt mit $0,0271 \text{ cm}^2$ leicht über der Zellfläche des VM006 mit $0,0225 \text{ cm}^2$. Eine geringe Zellfläche resultiert in einer höheren Dichte aufgrund der erhöhten Anzahl an Zellwänden. Dies ist jedoch nur bei gleichzeitiger Betrachtung der Zellanzahl gültig. Die Schaumstruktur des VM006 weist eine feinzelligere Schaumstruktur bei gleichzeitig geringerer Dichte ($0,265 \text{ g/cm}^3$) auf. Zur Ermittlung der Wirkzusammenhänge zwischen dem molekularen Aufbau und der Schaummorphologie sind die Ergebnisse der Materialcharakterisierung und hier ermittelten Schaumkennwerte in Bild 10.4 zusammengefasst.

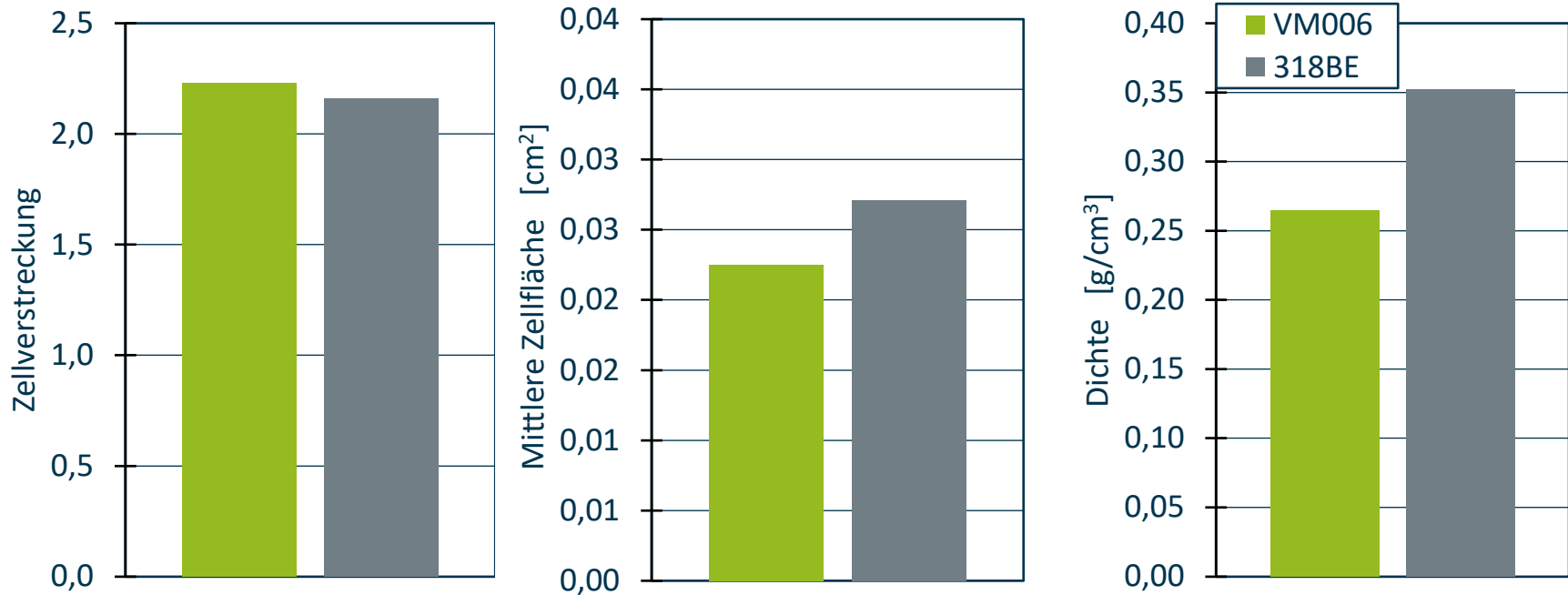
Das Material VM006 ist ein modifiziertes Material, damit es bei höheren Temperaturen verarbeitet werden kann. Daher besitzt es eine sehr hohe Scherviskosität. Die Korrelation zwischen hoher Scherviskosität und hoher Dehnviskosität ist nicht gegeben. Jedoch weist das

Zusammenstellung der Materialcharakterisierung und Schaummorphologie für PE-LD

Materialstruktur		
	1800H	2102X0
Nullviskosität [Pa*s]	7.000	3.000
Übergangsschergeschwindigkeit [1/s]	3	10
Dehnviskosität bei 20% [Pa*s]	1770	773
Max. Dehnung [%]	34,14	122,42
Molmasse [g/mol]	179.000	183.000
Polydispersität [-]	8,96	8,05
α -Mark-Houwink [-]	0,5474	0,5753

Schaummorphologie		
	1800H	2102X0
Zellver Streckung [-]	1,69	1,61
Zellfläche [cm ²]	0,007	0,035
Dichte [g/cm ³]	0,453	0,335

Schaumkennwerte zur Ermittlung der Wirkzusammenhänge bei PE-LLD



Zusammenstellung der Materialcharakterisierung und Schaummorphologie für PE-LLD

Materialstruktur		
	VM006	318BE
Nullviskosität [Pa*s]	100.000	2.071
Übergangsschergeschwindigkeit [1/s]	0,1	100
Dehnviskosität bei 20% [Pa*s]	528,30	801,09
Max. Dehnung [%]	442,24	182,76
Molmasse [g/mol]	127.000	115.000
Polydispersität [-]	2,44	3,6
α -Mark-Houwink [-]	0,7235	0,7394

Schaummorphologie		
	VM006	318BE
Zellver Streckung [-]	2,23	2,16
Zellfläche [cm ²]	0,0225	0,0271
Dichte [g/cm ³]	0,265	0,352

Material eine sehr hohe Scherverdünnung auf, wodurch die Scherviskosität bei höheren Schergeschwindigkeiten nahe bei der Scherviskosität des 318BE liegt. Die hohe Scherverdünnung spiegelt sich in der sehr geringen Übergangsschergeschwindigkeit und der sehr breiten Molekulargewichtsverteilung wider. Die Kettenverzweigung der beiden Materialien unterscheidet sich kaum.

Die Wirkzusammenhänge zwischen molekularen Aufbau und Schaummorphologie können nur für den sich unterscheidenden Kennwert Zellfläche beschrieben werden. Die geringe Zellfläche des VM006 ist auf die höhere Scherviskosität zurückzuführen. Der Unterschied in der Dehnviskosität der beiden Materialien VM006 (528,30 Pa*s) und 318BE (801,09 Pa*s) ist zu gering, dass dieser einen Einfluss nimmt. Ebenfalls konnte festgestellt werden, dass eine hohe Polydispersität zu einer kleineren Zellfläche führt. Dieser Wirkzusammenhang konnte schon beim Material PE-LD 1800H festgestellt werden.

11 UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DIVERSE PROZESSPARAMETER AUF DIE SCHAUMSTRUKTUR

In der Schaumextrusion und vor allem im Bereich der Schaumbildung sind die Faktoren Schmelztemperatur, Durchsatzverhältnis und Treibmittelbeladung sehr dominant [LP14], weshalb deren Einfluss im Folgenden untersucht wird. Dabei wurden die Einflüsse der drei Prozessparameter in Bezug auf die Kenngrößen Zellgröße, E-Modul, Zugfestigkeit, Durchschlagskraft und Dichte ausgewertet. Die Prozessparameteranalyse wird repräsentativ mit Hilfe des Materials 2102X0 vorgestellt, da die molekularen Strukturen der PE große Ähnlichkeiten aufweisen. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 11.1 aufgeführt.

Versuchsparameter	Ausprägung
Düsenspalt [mm]	0,5 – D4
Treibmitteldurchsatz[kg/h]	0,06-0,08
Durchsatz [kg/h]	7,5
Massenverhältnis Außen:Innen:Außen	1:1:1 – 1:2:1
Massetemperatur [°C]	160 - 180
Foliendicke [µm]	180
Nukleierungsmittel	5 % PSL 50

Tabelle 11.1: Versuchsparameter für die Untersuchung der Prozessparameter

11.1 Auswertung der Durchschlagskraft

Die Durchschlagsversuche ergaben keine eindeutigen Ergebnisse unter den einzelnen Versuchspunkten. Die Auflösung und der Einsatz der am IKV vorhandenen 4,5 kN Kraftmesszelle des Fallturms war nicht geeignet, um Unterschiede in den Messwerten abhängig von den verschiedenen Schaumstrukturen zu messen. Die ermittelten Durchschlagskräfte bei dem Versuchspunkt 160 °C ergeben beim Material 2102XO $72,02 \text{ N} \pm 7,12 \text{ N}$. Die Ergebnisse der Durchschlagskraft beim Versuchspunkt 160 °C und 2102XO ergab die Werte $73,12 \text{ N} \pm 9,32 \text{ N}$. Die Standardabweichungen überschneiden sich deutlich und die Ergebnisse liegen alle auf einem gleichen Niveau der Durchschlagskraft. Die Untersuchung der Durchschlagskraft ergibt somit keine aussagekräftigen Werte und kann in dieser Form nicht genutzt werden.

11.2 Auswertung der Dichte

Im Bild 11.1 ist die Dichte der geschäumten Blasfolie aus dem Material 2102X0 bei verschiedener Prozessparameter aufgetragen. Der Einfluss durch eine Veränderung des Massenverhältnisses von 1:1:1 auf 1:2:1 ergibt die größte Dichtereduzierung von $0,417 \text{ g/cm}^3$ auf $0,315 \text{ g/cm}^3$. Die Dichtereduzierung resultiert aus der Verdopplung der Mittelschicht, welche geschäumt wird. Die Erhöhung der Schmelztemperatur zeigt eine geringere Dichtereduzierung von $0,417 \text{ g/cm}^3$ auf $0,347 \text{ g/cm}^3$. Bei einer höheren Schmelztemperatur sinkt die Dehnviskosität des Materials, wodurch größere Blasen wachsen. Im Bild 11.2 sind die Schaumstrukturen von 160°C und 180°C abgebildet. Die Schaumstruktur b) 2102X0 180°C ; 1:1:1; $0,08 \text{ kg/h}$ zeigt eindeutig größere Zellen. Bei größeren Zellen werden weniger Zellwände pro Volumen gebildet und die Folie besitzt eine niedrigere Dichte als eine feinzelligere Schaumstruktur. Die Massenströme des Treibmittels (Bild 11.1) besitzen keinen großen Einfluss. Die Dichte steigt von $0,335 \text{ g/cm}^3$ auf $0,347 \text{ g/cm}^3$.

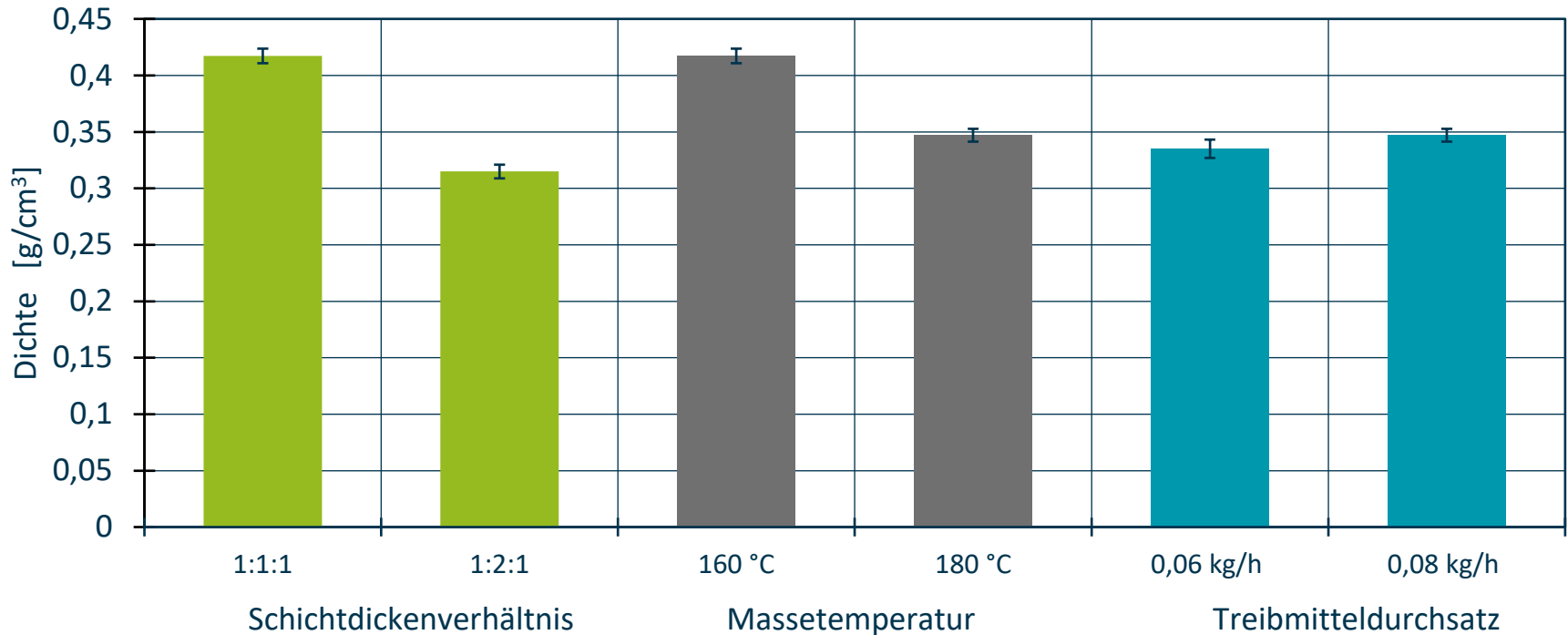
1.1.1 Auswertung der mittleren Zellfläche

Im Bild 11.3 ist die Zellfläche geschäumter Blasfolien aus dem Material 2102X0 bei verschiedener Prozessparameter aufgetragen. Es zeigt, dass die Erhöhung der Schmelztemperatur fast eine Vervierfachung der mittleren Zellfläche von $0,010 \text{ cm}^2$ auf $0,038 \text{ cm}^2$ bewirkt. Die Schmelztemperatur wirkt sich auf die Zellgröße aus, da die Dehnviskosität des Materials und somit die Schaumbildung beeinflusst wird. Die Veränderung der Prozessparameter Massenverhältnis und Massenstrom zeigen einen deutlich kleineren Einfluss. Die Standardabweichungen bei dem Vergleich der zwei Massenverhältnisse und Massenströme überschneidet sich. Bei einer Verdopplung der Mittelschicht wird die Zellgröße tendenziell größer von $0,017 \text{ cm}^2$ auf $0,025 \text{ cm}^2$ und bei einer Erhöhung des Treibmittelmassenstroms wird die Zellfläche tendenziell geringer von $0,038 \text{ cm}^2$ auf $0,025 \text{ cm}^2$.

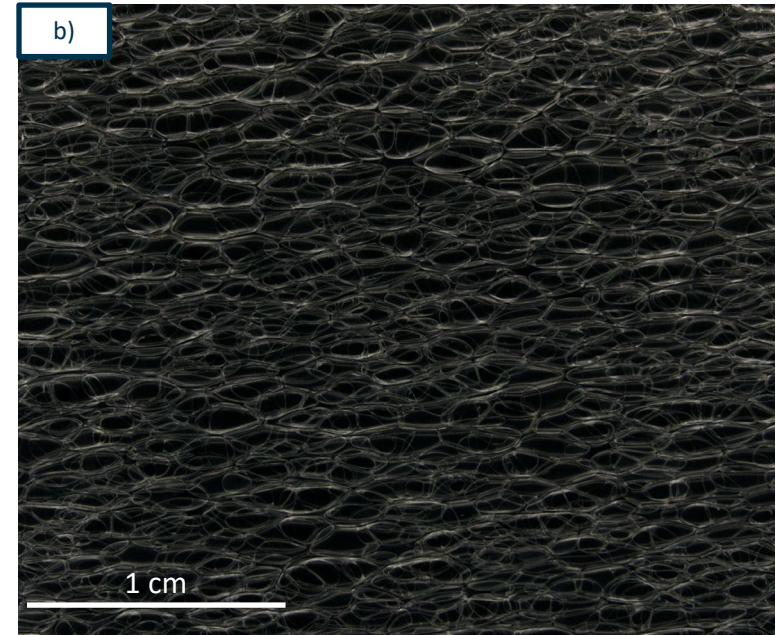
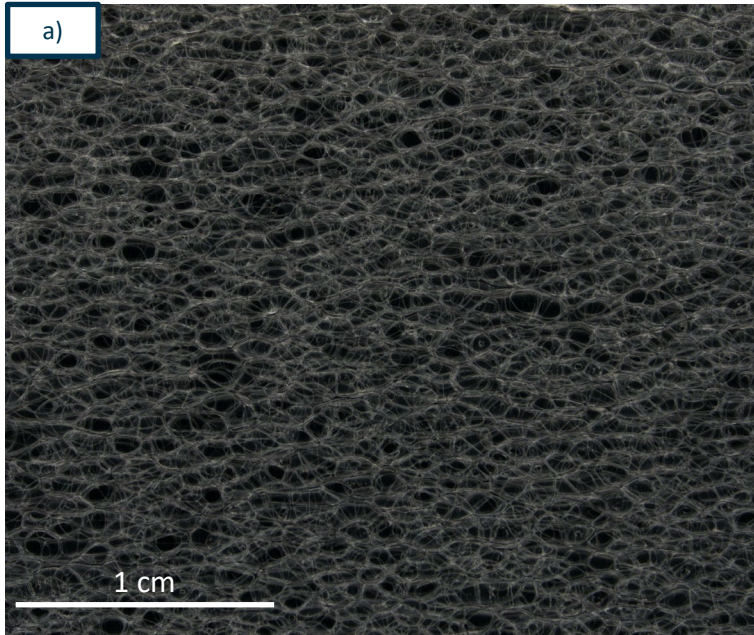
1.1.2 Auswertung der Zugfestigkeit

Im Bild 11.4 ist die Zugfestigkeit bei verschiedenen Prozessparametern dargestellt und zeigt Einflüsse aller drei Prozessparameter auf die Zugfestigkeit. Dabei wird die Zugfestigkeit durch eine Verdoppelung der Mittelschicht von $6,54 \text{ MPa}$ auf $4,77 \text{ MPa}$ verringert. Die geschäumte Mittelschicht ist weniger stabil und hält mechanische Beanspruchung schlechter stand. Die Erhöhung der Schmelztemperatur und die Erhöhung des Treibmittelmassenstroms wirken sich weniger stark auf die Zugfestigkeit aus. Dennoch ist eine Tendenz bei Erhöhung der Schmelztemperatur und Erhöhung des Treibmittelmassenstroms in eine Verschlechterung der Zugfestigkeit von $6,54 \text{ MPa}$ auf $5,55 \text{ MPa}$ und $5,55 \text{ MPa}$ auf $4,77 \text{ MPa}$ zu erkennen.

Einfluss der Prozessparameter auf die Dichte des Materials 2102X0

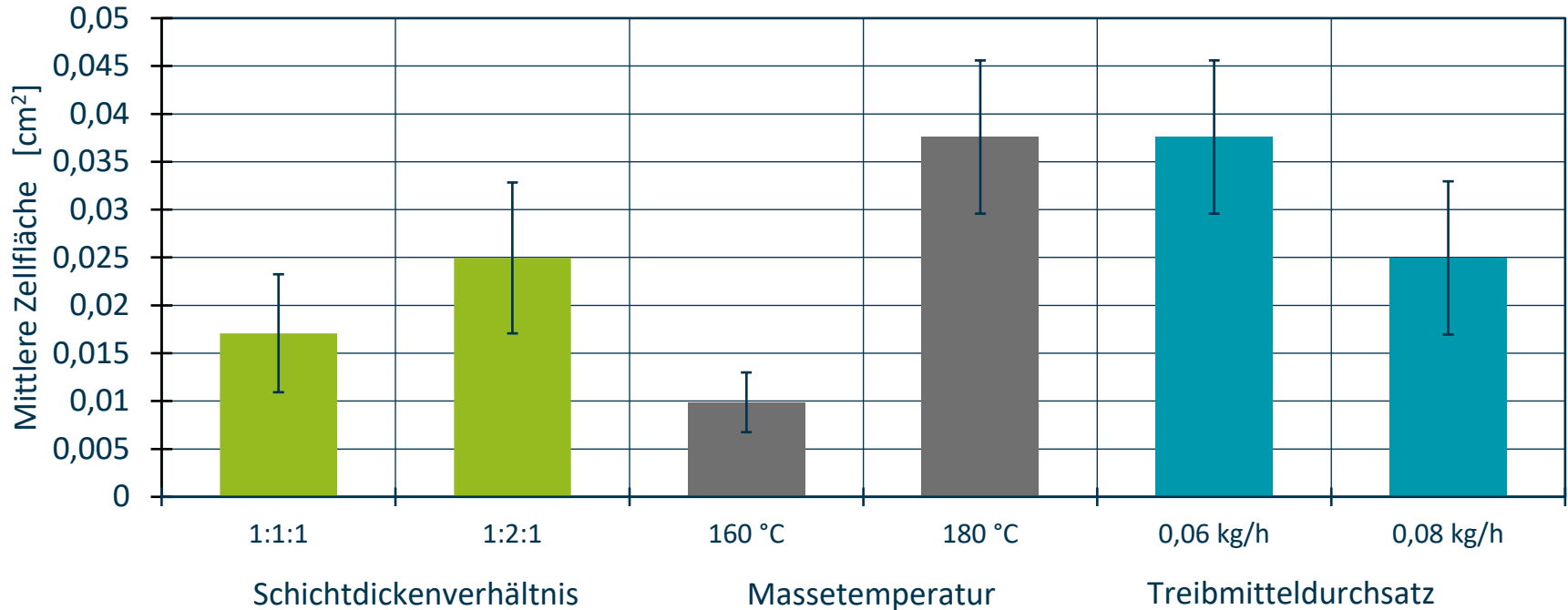


Einfluss der Schmelzetemperatur auf die Schaumstruktur

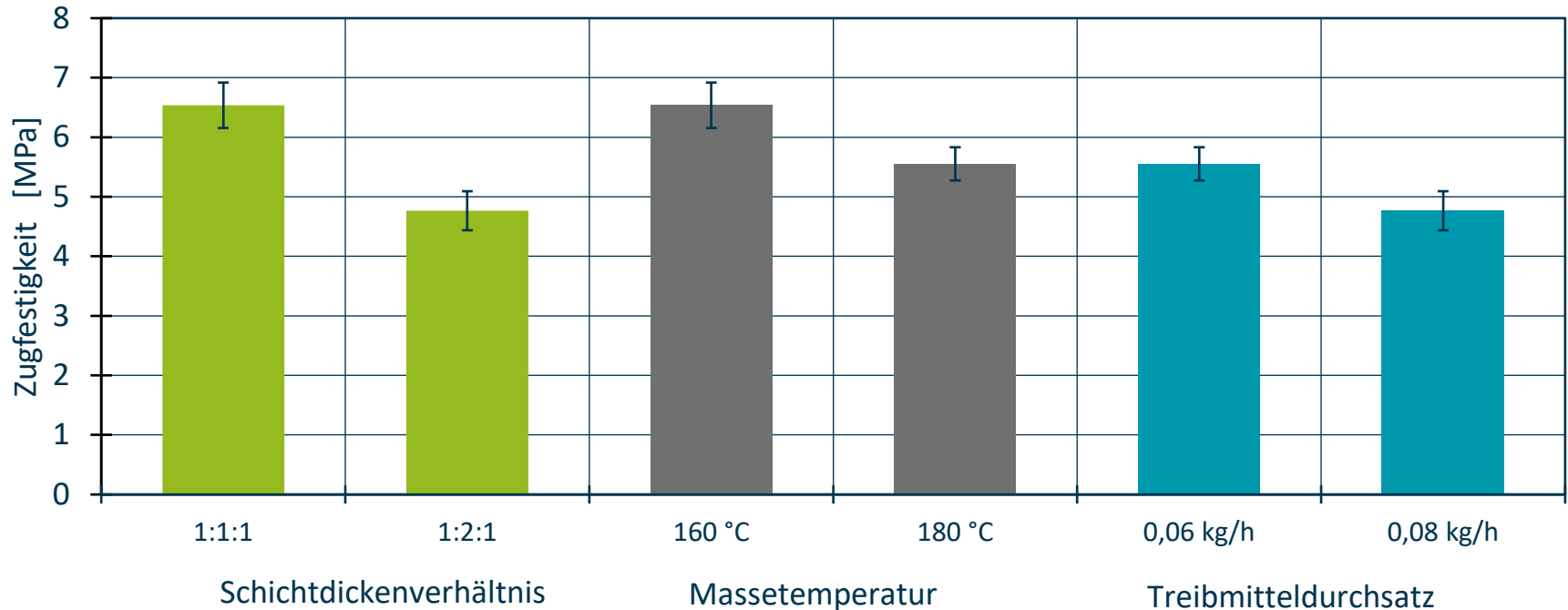


- a) 2102X0 160 °C; 1:1:1; 0,08 kg/h
- b) 2102X0 180 °C; 1:1:1; 0,08 kg/h

Einfluss der Prozessparameter auf die mittlere Zellfläche des Materials 2102X0



Einfluss der Prozessparameter auf die Zugfestigkeit des Materials 2102X0



1.1.3 Auswertung des E-Moduls

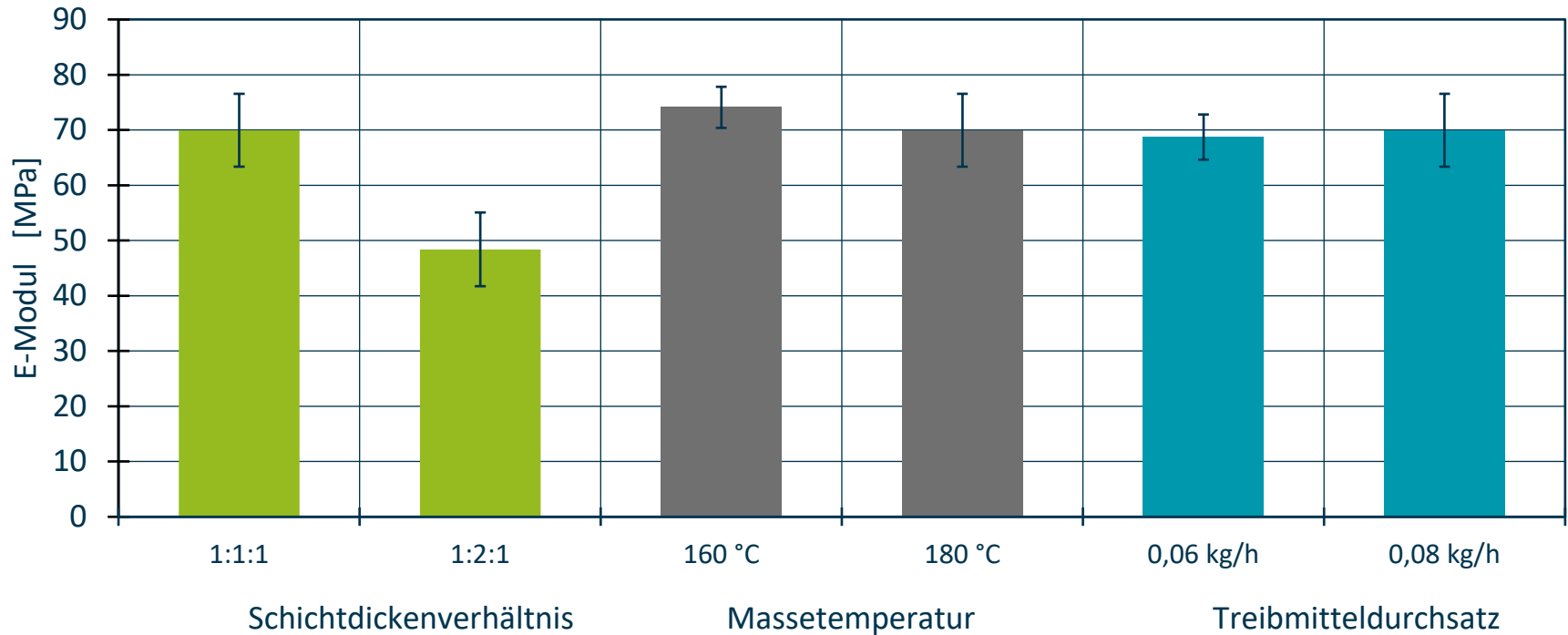
Im Bild 11.5 ist das E-Modul bei verschiedenen Prozessparametern aufgetragen. Das E-Modul verringert sich wenn der Anteil der Mittelschicht verdoppelt wird, von 69,95 MPa auf 48,38 MPa. Die Prozessparameter Schmelztemperatur und Massenstrom weisen sehr geringe Einflüsse auf das E-Modul auf. Die Werte liegen bei den jeweiligen Prozessparametern innerhalb der Standardabweichungen. Es lässt sich keinen Einfluss dieser beiden Prozessparameter erkennen.

1.1.4 Zusammenfassung der Prozessparameteranalyse

Das Massenverhältnis nimmt sehr großen Einfluss auf die Eigenschaften der geschäumten Blasfolie. Geringere Dichten können mit dem Massenverhältnis von 1:2:1 erzielt werden. Somit lässt sich durch das Massenverhältnis eine große Materialeinsparung erzielen. Bei den mechanischen Eigenschaften wirkt sich das Massenverhältnis 1:2:1 allerdings negativ aus. Der doppelte Anteil der geschäumten Mittelschicht bringt einen größeren Anteil der wenig belastbaren Mittelschicht ein und die mechanischen Eigenschaften verschlechtern sich. Der Prozessparameter Schmelztemperatur hat einen großen Einfluss auf die Zellgröße. Dabei haben unterschiedliche Schmelztemperaturen Auswirkungen auf die Löslichkeit des Treibmittels und somit auch auf die Zellbildung. Bei einer Schmelztemperatur von 180 °C bilden sich größere Zellen als bei 160°C. Eine mögliche Erklärung für die größeren Zellflächen ist, dass die Erhöhung der Temperatur einerseits zu einer längeren Schaumwachstumsphase und andererseits durch die Viskositätsniedrigung zu einer geringeren Schmelzestabilität führt, welche dem Wachstum der Blasen unterstützt, sodass die Temperaturerhöhung zu der Ausbildung größeren mittleren Zellflächen führt. Zugleich hat die Zellgröße wiederum Auswirkungen auf die Dichte. So kann mit größeren Zellgrößen eine geringere Dichte erreicht werden. Der Prozessparameter Treibmittelmassenstrom wirkt sich nur geringfügig auf die Eigenschaften geschäumter Blasfolien aus.

Die Korrelation der Foliendichte mit der Zellfläche zeigt, dass ein Kompromiss zwischen Materialeinsparung durch Dichtereduktion und geringer Zellgröße eingegangen werden muss. Für den Verarbeiter stellt sich die Frage, wie er diesen Zielkonflikt auflösen muss, da er bestrebt ist die geforderten mechanischen Folieneigenschaften bei minimalen Materialaufwand zu erreichen.

Einfluss der Prozessparameter auf das E-Modul des Materials 2102X0



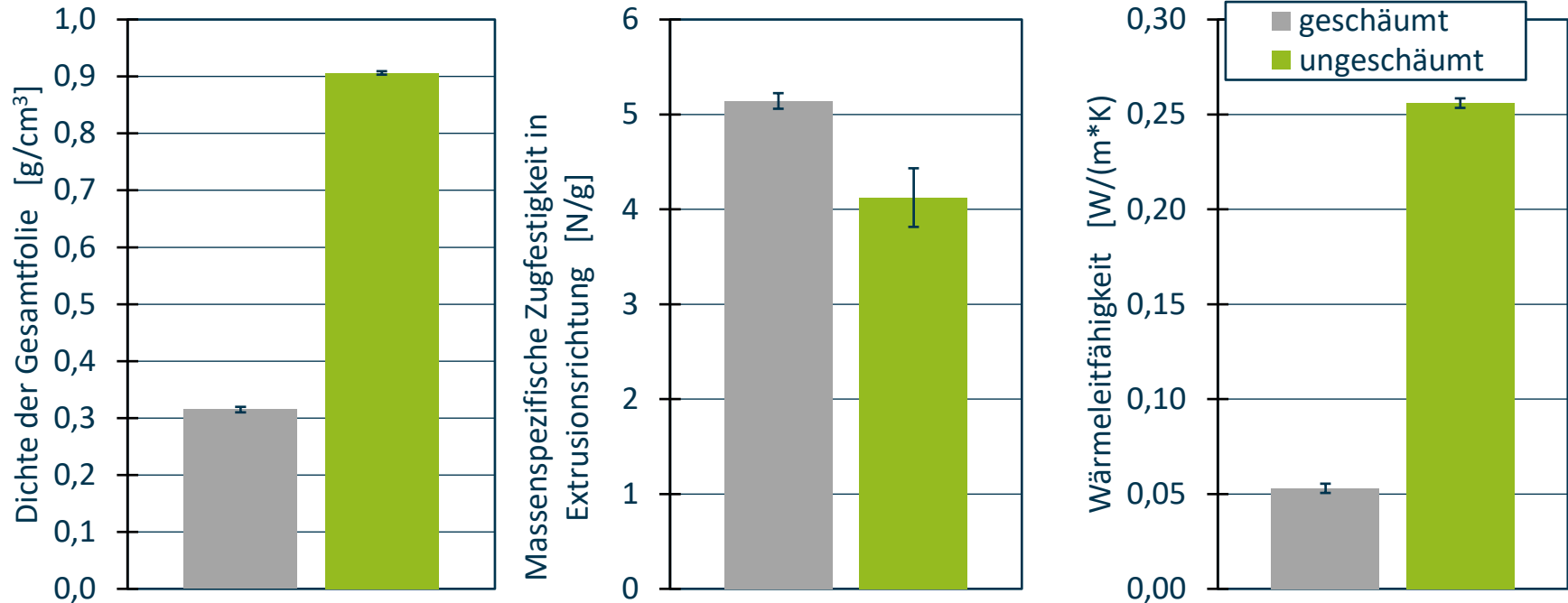
12 VERGLEICH KOMPAKTER UND GESCHÄUMTER FOLIE

In einem weiteren Schritt wurde ein Vergleich zwischen konventionell hergestellten und geschäumten Dreischichtfolien vorgenommen, um die Rohstoffeinsparung und den wirtschaftlichen Vorteil geschäumter Folien zu ermitteln. Hierzu wurden konventionelle, kompakte Blasfolien nach denselben Versuchsparametern wie in Kapitel 10 hergestellt.

Für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit der kombinierten Technologie aus Blasfolienextrusion und Schaumextrusion wurde neben der Dichte auch die Zugfestigkeit im Zugversuch sowie die Wärmeleitfähigkeit mittels „Parallel-Plate“-Technik gemessen. Ein Vergleich der Dichten der geschäumten und ungeschäumten Folie zeigt das Potenzial einer Materialeinsparung in Höhe von 62 % (Bild 12.1 links). Im mittleren Diagramm auf Bild 12.1 sind die erreichten Zugfestigkeiten der geschäumten und ungeschäumten Folie in Bezug auf das Probengewicht gegenübergestellt. Aufgrund der eingebrachten Schaumstruktur verringert sich die Zugfestigkeit der Folie. Hierbei ergibt sich jedoch kein proportionaler Zusammenhang zwischen Dichte- beziehungsweise Materialeinsparung und Abnahme der Festigkeit, sodass eine höhere Zugfestigkeit bei gleichem Materialeinsatz erreicht werden kann. Eine konventionelle kompakte Folie erzielt eine massenspezifische Zugfestigkeit von 4,1 N/g und liegt somit unter der massenspezifischen Zugfestigkeit zur geschäumten Folie (5,1 N/g). Ebenfalls konnte eine Erweiterung der Funktionalität der thermischen Isolation erreicht werden. Hier weist die geschäumte Folie eine fünffach geringere Wärmeleitfähigkeit mit 0,05 W/m*K im Vergleich zur ungeschäumten Folie mit 0,25 W/m*K auf (Bild 12.1 rechts). In diesem Vergleich wird gezeigt, dass bei der Folienherstellung eine Materialeinsparung und somit eine Reduktion der Kosten bei ähnlichen (Mechanik) und verbesserten (Isolation) Folieneigenschaften ermöglicht wird.

Bei Verarbeitungs- und Materialkosten von rund 2,29 €/kg (1,62 € Material / 0,67 € Verarbeitung) [SSW18] lassen sich mit einer Materialeinsparung von 20 % etwa 33 ct/kg einsparen. Dies ist ein enormer Kostenvorteil und im vereinfachten Fall des chemischen Schäumens treten nur weitere Kosten des chemischen Treibmittels auf. Bei einer Zugabe von 5% chemischen Treibmittels werden pro Kilogramm Neuware nur 50 Gramm benötigt. Eine Kosteneinsparung liegt dann vor, wenn das chemische Treibmittel unter einem Preis von 8 €/kg liegt.

Vergleich zwischen geschäumter und ungeschäumter Blasfolie



13 EINSATZ VON REZYKLAT IN GESCHÄUMTER MEHRSCHICHTBLASFOLIE

Die durch das Schäumen erzielbaren Rohstoffeinsparungen führen durch die Reduzierung der Herstellkosten zu einer gesteigerten Kosteneffizienz. Um diese Kosteneffizienz weiter zu steigern, kann in der Mittelschicht Post-Industrial-Rezyklat (PIR) verwendet werden.

Dazu wurde der Einsatz und die Beeinflussung eines Rezyklateinsatzes beim Schäumen der Mehrschichtblasfolie untersucht. Dazu wurde ein PE-LD als Neumaterial mit einem Rezyklatanteil von 0 % sowie mit 50 % und 100 % Rezyklatanteil verarbeitet.

Um die Auswirkungen auftretender Effekte beim Einsatz von Rezyklaten in der Mittelschicht möglichst deutlich zu machen, sind diese Anteile als Extremwerte gewählt und weichen deutlich von üblichen Rezyklatzusätzen unter Produktionsbedingungen ab [Säc07].

Die Außenschichten bestanden aus Neumaterial des gleichen Kunststoffes, der auch in der Mittelschicht verwendet wurde. Um nur die Auswirkungen des Rezyklates auf die Folieneigenschaften zu untersuchen, wurde von der Zugabe weiterer Additive abgesehen. Die mittlere Schicht der Dreischichtblasfolie wurde in einem Verhältnis von 93 % Kunststoff mit 7 % des chemischen Treibmittels Hydrocerol CF40E abgemischt.

13.1 Versuchsbeschreibung

Damit ein möglichst industrienaher Prozess in den Versuchen nachgebildet werden konnte, wurde aus Neukunststoff zunächst ein Material mit rezyklatähnlichen Eigenschaften hergestellt. Es bot sich an, den Weg, zum Beispiel eines Schnittabfalls, durch eine Blasfolienanlage im realen Betrieb zu verfolgen und diesen bestmöglich zu simulieren. Dabei durchläuft das Material verschiedene Stationen, die von unterschiedlichen thermischen und mechanischen Bedingungen geprägt sind [Can19]. Der Kunststoff ist dabei Scherung, thermischer Belastungen, Zug, schlagartiger Abkühlung und Schreddern ausgesetzt.

Die Rezyklatherstellung für die folgenden Versuche orientierte sich an dem beschriebenen Ablauf der Blasfolienextrusion. Im ersten Schritt fand eine Extrusion mit direktem Materialaustritt statt. Der austretende Schmelzestrang wurde in regelmäßigen Abständen abgetrennt, die so entstandenen Stücke von Hand abgenommen und auf Gittern abgekühlt. Die Kunststoffstücke wurden in einem Schredder der Firma RAPID GRANULATOR AB, Bredaryd, Schweden zerkleinert. Das Produkt daraus waren polymorphe Schnitzel von maximal fünf Millimetern Länge und noch kleinerer Breite, die damit klein und flexibel genug waren, um vom Extruder eingezogen zu werden.

In einem weiteren Schritt wurden geschäumte Folien mit Rezyklateinsatz produziert. Die entsprechenden Versuchsparameter sind in Tabelle 12.1 aufgelistet.

Versuchsparameter	Ausprägung
Düsenspalt [mm]	0,5 – D4
Masterbatchanteil [Gew.-%]	7
Durchsatz [kg/h]	Massedurchsatz M1: 8 Massedurchsatz M2: 11
Massenverhältnis Außen:Innen:Außen	1:2:1
Massetemperatur [°C]	180
Foliendicke [µm]	120

Tabelle 12.1: Versuchsparameter für die Untersuchung des Rezyklateinsatzes

13.2 Einfluss des Rezyklatanteils

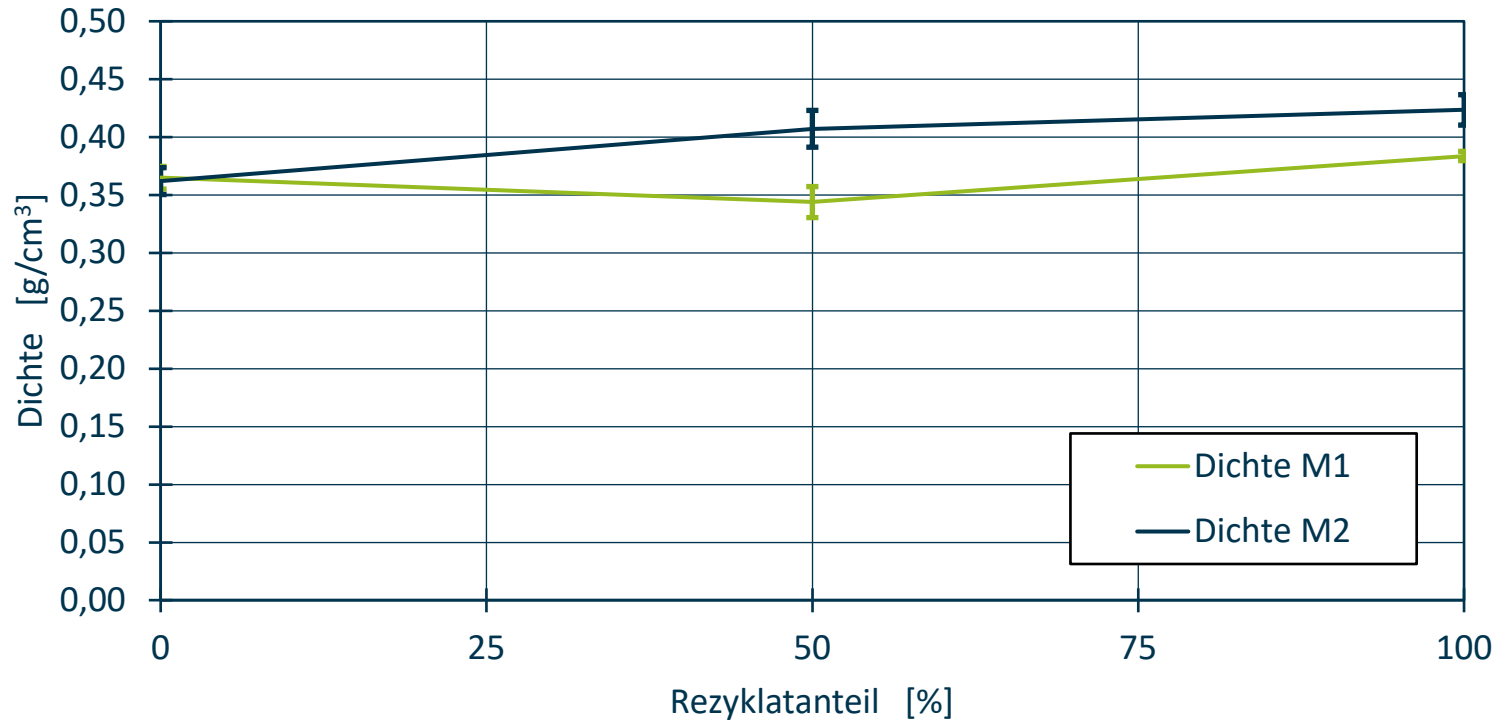
Die hergestellten Folienproben wurden hinsichtlich ihrer Dichte und ihrer Schaumstruktur ausgewertet. Zusätzlich wurde in diesem Versuch besonders die Handhabung des Prozesses betrachtet, da der Einsatz von Industrierezyklaten gerade auch in hocheffizienten Produktionsanlagen relevant ist. Deshalb ist das Prozesshandling neben guten Folieneigenschaften ebenso wichtig.

Durch das Einbringen von CO₂ in die Mittelschicht der Dreischichtblasfolie soll eine Dichtereduktion bei LDPE-Folien bis auf minimal 0,35 g/cm³ möglich sein [Weg05]. Mit der ausgewählten Düsengeometrie wurde mit Neumaterial eine minimale Dichte von 0,325 g/cm³ erreicht. In der Messreihe zur Untersuchung des Rezyklateinflusses wurde hingegen eine leicht abweichende minimale Dichte von 0,344 g/cm³ gemessen.

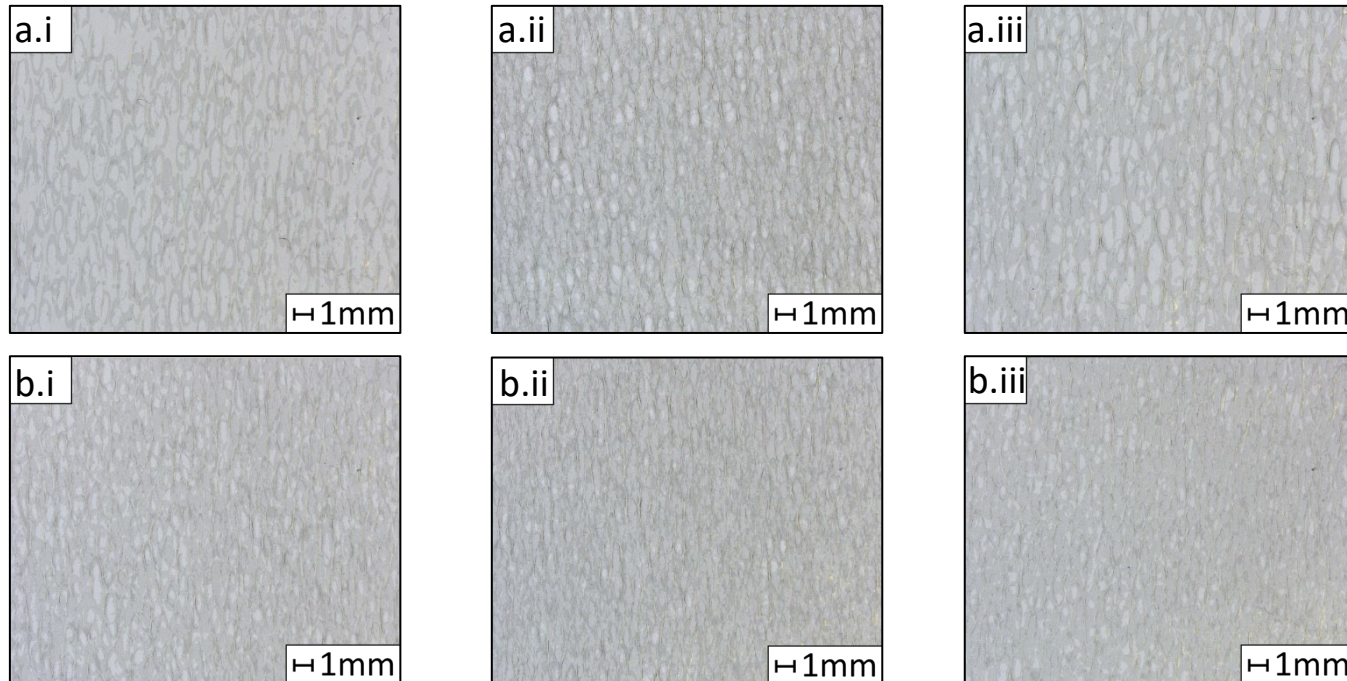
Wie in Bild 13.1 sichtbar, wirkt sich der Rezyklatanteil nicht signifikant auf die Dichte der Schaumblasfolie aus. Die maximal Dichte von 0,423 g/cm³ wurde bei hohem Massendurchsatz und einem Rezyklatanteil von 100 % an der Kunststoffmasse gemessen. Jedoch lässt sich weder ein Trend der Dichteerhöhung hin zu hohem Massendurchsatz noch zu hohem Rezyklatanteil feststellen. Mit einer maximalen Standardabweichung von 0,015 g/cm³ weichen zudem alle Messdaten kaum voneinander ab. Scheinbar hat die Zugabe PIR im Vergleich mit Neukunststoff keine Auswirkung auf die Dichte von Schaumblasfolien.

In Bild 13.2 die sehr diffuse Größenverteilung der Schaumzellen zu erkennen. Eine eindeutige Auswertung der Auswirkungen des Rezyklatanteils auf diese ist aufgrund der hohen Standardabweichungen nicht möglich. Im Vergleich zwischen maximaler und minimaler Blasengröße findet sich ein Faktor von 2,6, um den sich die Blasengrößen unterscheiden. Von

Einfluss des Rezyklatanteils auf die Dichte geschäumter LDPE Mehrschichtfolie



Einfluss des Rezyklatanteils auf die Schaumstruktur geschäumter PE-LD Mehrschichtfolie



Schäumen mit 7% Gewichtsanteil Hydrocerol CF 40 E unter Verwendung der Düsengeometrie D4

- a) mit einem Massendurchsatz von 8 kg/h und einem Rezyklatanteil von i) 0%, ii) 50% und iii) 100%
- b) mit einem Massendurchsatz von 11 kg/h und einem Rezyklatanteil von i) 0%, ii) 50% und iii) 100%

einer durchgehend kleinzelligen Schaumstruktur kann damit nicht ausgegangen werden. Der Rezyklatanteil hat auch hierauf keinen signifikanten Einfluss.

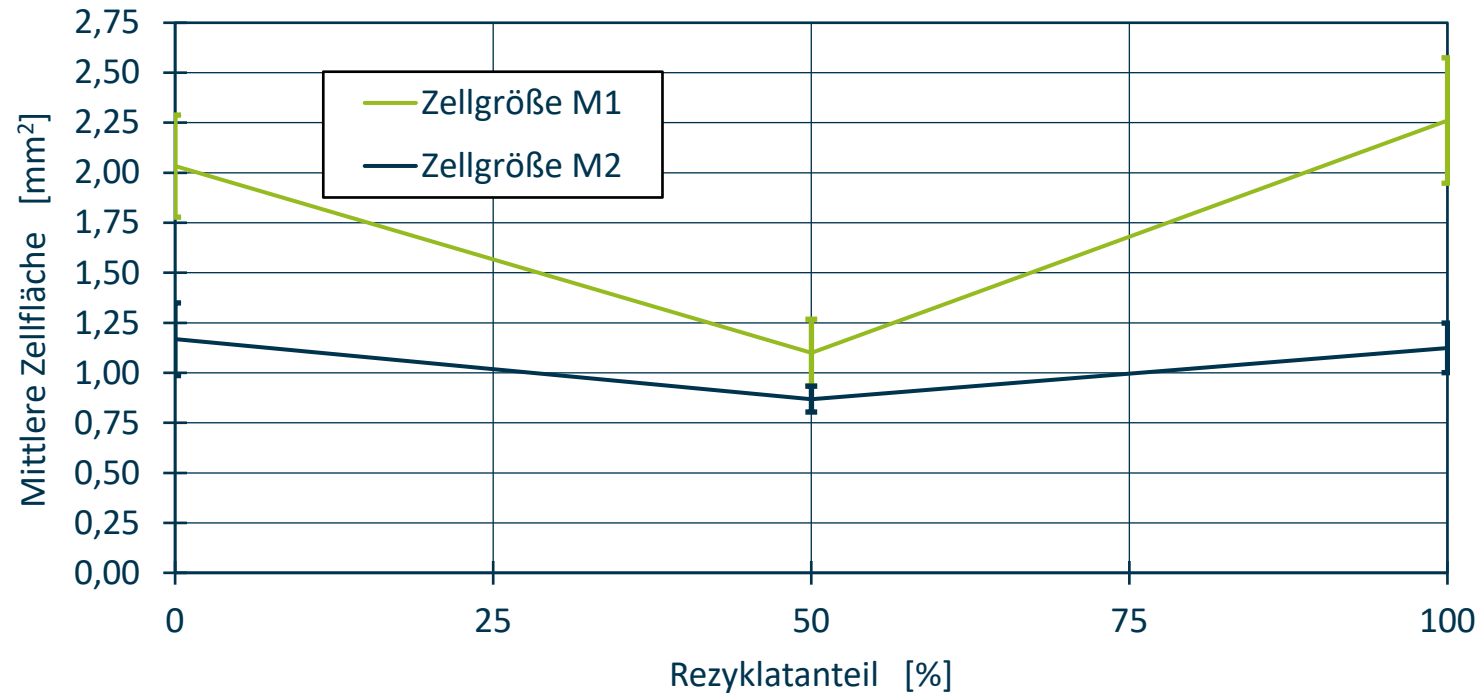
Lediglich die beiden Massendurchsätze zeigen Auswirkungen auf die Schaumstruktur. Bei jeweils gleichem Rezyklatanteil liegt die gemessene Schaumzellengröße für den höheren Massendurchsatz von 11 kg/h deutlich niedriger (Bild 13.3). Die Schaumstruktur ist kleinzelliger. Zusätzlich zeichnen sich diese Ergebnisse auch durch jeweils geringere Standardabweichungen aus.

Ausschlaggebend für die kleineren Zellgrößen könnte der Druckgradient sein. Wie in Bild 13.4 ersichtlich, tritt bei einem höheren Durchsatz auch ein deutlich höherer Druckgradient auf. Die dadurch höhere Nukleierungsenergie ermöglicht die Bildung von mehr Zellen, die eine kleinere Zellfläche aufweisen.

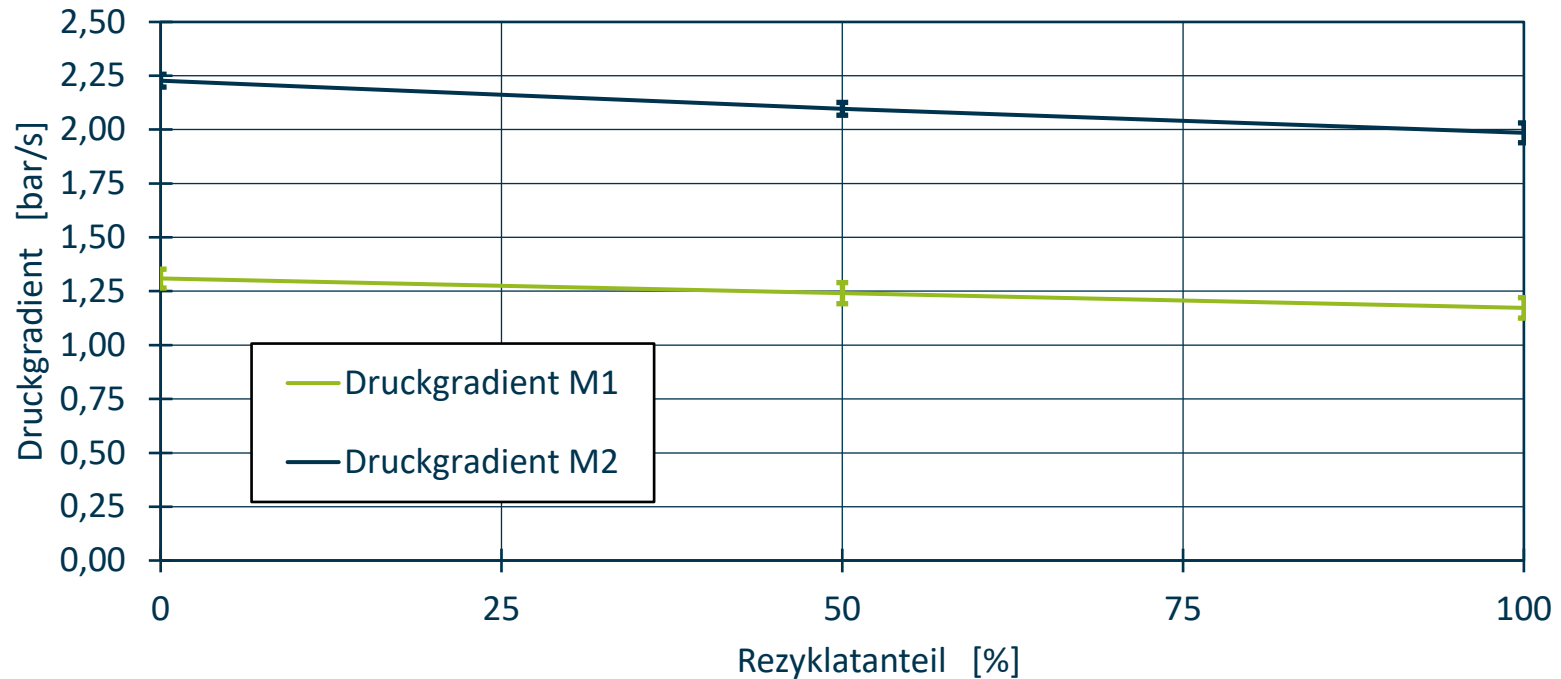
Zu beachten ist auch die beinahe lineare Abnahme des Druckgradienten mit steigendem Rezyklatanteil. Eine mögliche Begründung dafür ist ein verminderter Werkzeuginnendruck infolge einer Viskositätsabnahme des Rezyklats. Diese könnte beim Rezyklieren aufgrund von thermischen und mechanischen Schädigungen der Makromoleküle im Kunststoff aufgetreten sein. Dennoch hat dieser Verlauf keine ersichtlichen Auswirkungen auf die Zellfläche.

Die Verarbeitung des PIR zeichneten sich durch eine sehr einfache Handhabung aus. Korrekturen an der Temperatureinstellungen sowie am Schichtdickenverhältnis waren nicht nötig, um einen stabilen Prozess zu erreichen. Problematisch verhielt sich lediglich das geschredderte Rezyklat. Bei einem Rezyklatanteil von 96 % verklumpte die Kunststoffmasse im Einzug von Extruder B. Ein Dosieren mittels der Gravimetrie war nichtmehr möglich. Es kam zur Brückenbildung, wobei der Extruder leer lief. Um dennoch Messproben zu erhalten, wurde bei konstanter Schneckendrehzahl in kleinen Batches nachgefüttert. Dieses Problem entsteht durch die polymorphe Gestalt des geschredderten Rezyklats. Das einfache voneinander abgleiten, wie es bei annähernd rundem Granulat beobachtet werden kann ist mit dieser Form nicht möglich. Ein Lösungsansatz, um formbedingte Brückenbildung zu vermeiden wäre das Rezyklat zu regranulieren. Generell ist ein PIR-Einsatz sehr gut möglich und es treten keine Auswirkungen auf die Schaumeigenschaften bei gleichem Druckgradienten auf.

Einfluss des Rezyklatanteils auf die mittlere Zellfläche geschäumter LDPE Mehrschichtfolie



Einfluss des Rezyklatanteils auf den Düsendruckgradient geschäumter LDPE Mehrschichtfolie



14 FAZIT UND AUSBLICK

Ziel des Forschungsvorhabens 21185 N war, die Zusammenhänge zwischen dem molekularen Aufbau des Kunststoffes und des Prozesses mit der resultierenden Schaumstruktur näher zu untersuchen. Dazu wurde nach Auswahl einer Vielzahl an Materialien eine Materialcharakterisierung hinsichtlich Molekulargewicht, -verteilung, Verzweigungsgrad und Scher- und Dehnviskosität durchgeführt. Nach einer Ermittlung einiger relevanter Einflussfaktoren auf die Schaumstruktur wurde im ersten Schritt die Düsengeometrie des Blaskopfes analytisch sowie experimentell untersucht. Als Ergebnis stand eine neue Düsengeometrie zur Herstellung dünner Schaumfolien mit geringer Zellgröße und Dichte bei gleichzeitiger guter Prozessstabilität. Für das Erreichen einer guten Zellstruktur wird weiterhin auf den Einsatz von Nukleierungsmitteln zurückgegriffen. Daher wurden für die unterschiedlichen Materialtypen geeignete Nukleierungsmittel identifiziert und erprobt. Dabei zeigte sich für die Materialien PE-LD und PE-LLD ein Talkum als ideal geeignet.

In einer weiteren Untersuchungsreihe wurden abhängig von dem molekularen Aufbau die sich einstellenden Schaumstrukturen und -eigenschaften bewertet und Wirkzusammenhänge abgeleitet. Die Schaumstruktur ist neben den Materialeigenschaften auch von der Prozessführung abhängig. Daher wurden außerdem der Einfluss verschiedener Prozessparameter wie der Treibmittelanteil, die Schmelztemperatur und das Massenverhältnis variiert. Eine Reduktion der Schmelztemperatur resultierte in einer kleineren Zellfläche. Eine Ausdünnung der Mittelschicht wirkte sich (wie erwartet) negativ auf die Dichte der Folie aus. Die Variation des Treibmittelanteils ergab keine signifikanten Ergebnisse.

Als wirtschaftliches Ergebnis wurde die mögliche Höhe einer Materialeinsparung durch einen Vergleich mit kompakter Folie ermittelt. Dabei ergab sich eine Reduktion der Kosten bei masseunabhängig besseren Werten im Zugversuch und eine deutlich verbesserte Wärmeisolation.

Mit einem Einsatz von recyceltem Material aus Produktionsabfällen wurde die Steigerung der Kosteneffizienz weiter untersucht. Während der Produktion kann es durch z. B. Anfahrprozesse oder Folienabrisse zur Herstellung von Ausschuss kommen. Deshalb wurde untersucht, wie viel recyceltes Material dem Prozess zugeführt werden kann, ohne dabei signifikanten Einfluss auf die Schaumstruktur zu nehmen. Die Untersuchungen zeigten, dass selbst bei einem Anteil von 100 % keine verschlechterte Schaumstruktur einstellte. Einzig der Druckverlust bei Einsatz höherer Rezyklatanteile nahm leicht ab.

In zukünftigen Forschungsprojekten könnte die Untersuchung des PIR-Einsatzes in geschäumter Blasfolie durch den Einsatz verschiedener Post-Consumer-Rezyklate (PCR) erweitert werden. Durch die starke Vermischung verschiedenster PE-LD sowie PP im PCR wird

hierbei eine Überlagerung der Molekularstruktur erwartet. Eine Charakterisierung und nachfolgende Ermittlung der Wirkzusammenhänge zur Schaumstruktur würde die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens weiter stützen. Der Einsatz eines PCR in geschäumter Mehrschichtblasfolie verbessert die materialseitige Ökobilanz der Folie vermutlich deutlich.

15 ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT

15.1 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.

15.2 Durchgeführte Transfermaßnahmen des Vorhabens:

Maßnahme: Projektbegleitender Ausschuss	Während der Laufzeit 19.02.2021/15.03.2022/29.09.2022
<i>Während der Projektlaufzeit haben drei Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses stattgefunden (19.02.2021 - Teilnehmer: 12 / 15.03.2022 - Teilnehmer: 15, 29.09.2022 - Teilnehmer: 12). 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 08-09.11.2021/07-08.11.2022
<i>Innerhalb der Laufzeit des Forschungsprojektes haben zwei Sitzungen der Fachbeiratsgruppen des IKV stattgefunden (08-09.11.2020 und 07-08.11.2021). Bei der FBG 2020 wurde das Forschungsvorhaben den Fachbeiratsgruppen „Extrusion“ (Teilnehmer: 32) mit Industrievertretern diskutiert. Bei der FBG 2021 (Teilnehmer: 23) 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
<i>Innerhalb des Projektzeitraumes konnte durch den Austausch mit verschiedenen Unternehmen aus der Folienindustrie bei der jährlich stattfindenden Fachbeiratsgruppe Extrusion (2021,2022) des IKV in Aachen sowie bei dem im September 2020 stattgefundenen 30. Internationalen Kolloquium Kunststofftechnik (08.-11.09.2020) des IKV und im September</i>	

2022 stattgefundenen 31. Internationalen Kolloquium Kunststofftechnik (06.-08.09.2022), viele Fragen, Anregungen und Ergebnisse ausgiebig diskutiert werden.

/Maßnahme:

Während der Laufzeit

Akademische Lehre / Personaltransfer

Einige der Untersuchungen, die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführt wurden, sind durch die Unterstützung von Studenten entstanden. So konnten mehrere wissenschaftliche Arbeiten durch Studenten angefertigt werden. Die erarbeiteten Erkenntnisse flossen 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.

Forschungslabor:

RIEDER, D.: *Untersuchungen zum Einsatz verschiedener Nukleierungsmittel in geschäumter Mehrschichtfolie.* Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichtes Forschungslabor, 2022 – Betreuer: M. Stieglitz

Projektarbeit:

LONY, B; HESTERT, S.: *Untersuchung der Dehn- und Scherviskosität verschiedener Polyolefine und deren Einfluss auf geschäumte Blasfolie.* Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Projektarbeit, 2022 – Betreuer: M. Stieglitz

JUNGE, H; PÄBLER, L.: *Untersuchung des Einflusses des Düsendesigns und des Rezyklatanteils auf die Schaumstruktur geschäumter Mehrschicht-Blasfolie.* Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Projektarbeit, 2022 – Betreuer: M. Stieglitz

Bachelorarbeit

ENBLE, S.: *Untersuchung des Einflusses der Materialstruktur und der Prozessparameter auf die Schaumeigenschaften geschäumter Mehrschichtblasfolie.* Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2022 – Betreuer: M. Stieglitz

Maßnahme:

Während der Laufzeit

Vorträge und Posterpräsentationen

<i>Die Ergebnisse des Forschungsprojektes sind auf nationalen Fachtagungen und Konferenzen durch Vorträge und Posterpräsentationen vorgestellt worden.</i>	
Maßnahme: Wissenschaftliche Publikationen	Zwischenergebnisse nach einem Jahr und Abschlussveröffentlichung nach Projektende
<i>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:</i> HOPMANN, CH.; STIEGLITZ, M.: Influence of the die design on the foam structure of foamed multilayer blown films. <i>31th International Colloquium Plastics Technology</i>. Düren: Shaker Verlag, 2020 HOPMANN, CH.; STIEGLITZ, M.; SCHÖN, M.: Ein Traum von Schaum. <i>Neue Verpackung</i> (2022) (Abschlussveröffentlichung)	
Maßnahme: Hinweise in der Fachpresse	Während der Laufzeit
<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>	
Maßnahme: Richtlinienarbeit	Zeitraumen: Während der Laufzeit
<i>Durch projektbegleitende Diskussionen in der Fachwelt konnte ein breites Interessentenspektrum angesprochen und Ideen und Anregungen zum Thema gesammelt werden.</i>	
Maßnahme: Forschungsbericht	Zeitraumen: 1. Quartal nach Abschluss des Forschungsvorhabens
<i>Die Ergebnisse sind in zwei Zwischenberichten sowie in dem vorliegenden Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben zusammengefasst. Dieser Forschungsbericht steht interessierten Unternehmen zur Verfügung, wodurch die erzielten Ergebnisse für die Öffentlichkeit zugänglich sind.</i>	
Maßnahme: Beratung von Unternehmen	Zeitraumen: Während der Laufzeit

Das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erarbeitete Wissen floss in die Beratungstätigkeiten des IKV ein. Im Berichtszeitraum wurden zahlreiche bi- und multilaterale Gespräche geführt.

15.3 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 Folienindustrie 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 der Materialstruktur und den resultierenden Schaumeigenschaften 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 den bearbeitenden wissenschaftlichen Mitarbeiter der Forschungsstelle die Möglichkeit zur Promotion auf dem Thema Extrusion von Schaumfolien</i>	

15.4 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 Folienprodukten darstellen. Die Realisierbarkeit des vorgeschlagenen Konzeptes ist somit gegeben.

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

16.1 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. Es ist auch möglich, geschäumte Folien am IKV herzustellen. 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.

16.2 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 das derzeit fehlende Verständnis über die Wirkzusammenhänge zwischen den Schaumeigenschaften und dem molekularen Aufbau können die Unternehmen mit den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens bereits im Vorfeld die richtigen Materialien zum Schäumen 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 diese Technologie zur Nachrüstung bestehender Produktionsanlagen einsetzen, um mit geringen Investitionen ihr Produktportfolio auf geschäumte Mehrschichtblasfolien zu erweitern. Mit der von kmU häufig genutzten Strategie, kundenorientiert flexible Lösungen anzubieten, bietet der Einsatz dieser weiterentwickelten Technologie somit einen Wettbewerbsvorteil gegenüber großen Unternehmen und Mitbewerbern aus dem Ausland. Dies ermöglicht das Erzielen eines hohen Return on Investment bezüglich der notwendigen Modifikationen der Extrusionsanlage (Treibmittelinjektionsmodul, Schmelzekühlung), was wiederum bedeutet, dass ein großes Potenzial für die Umsetzbarkeit der Technologie vorhanden ist. Ausgehend von einer jährlichen Betriebszeit von 6048 Stunden und einer kleinen Anlage mit 150 kg/h [SSW18] können Einsparungen von über 350.000 € erreicht werden. Eine entsprechende Anlagentechnik zum physikalischen Schäumen hat sich dabei schnell refinanziert und auch die Kosten für ein Nukleierungsmittel oder chemisches Treibmittel (Annahme 4 €/kg) liegen mit 180.000€ deutlich unter der Ersparnis.

17 ERGÄNZENDE HINWEISE ZUM FORSCHUNGSVORHABEN

17.1 Einsatz von Geräten und wissenschaftlich-technischem Personal

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

2020:

2021:

2022:

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. Darüber hinaus hat ein Techniker die Forschungsarbeiten bei der Installation und Bedienung der Anlagentechnik unterstützt. Dieser Personeneinsatz war für den Projekterfolg zwingend erforderlich.

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

Für dieses Vorhaben wurden keine Geräte beschafft.

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

Die im Bewilligungsbescheid zum Forschungsvorhaben vorgesehenen Investitionsausgaben zur Analyse des zahlen- und gewichtsmittleren Molekulargewichtes, der Molekulargewichtsverteilung, des Verzweigungsgrades sowie der Polydispersität konnten wie geplant genutzt werden. Diese Kenntnisse waren für eine industrielle Umsetzung der Technologie zur Herstellung geschäumter Mehrschichtblasfolien von entscheidender Bedeutung. Durch die Bestimmung dieser Werte war eine Korrelation der resultierenden Schaumstruktur mit der Struktur des Kunststoffes möglich. Die Bestimmung erfolgte mittels Gel-Permeations-Chromatographie. Es wurden sowohl das gewichtsmittlere Molekulargewicht MW , das zahlenmittlere Molekulargewicht MN als auch der Verzweigungsgrad bestimmt. Aus dem Quotienten MW und MN ließ sich weiterhin die Polydispersität D bestimmen. Mit Größe konnte eine Aussage über die Breite der Molekulargewichtsverteilung gemacht werden. Die Durchführung der GPC-Messung war daher für die erfolgreiche Durchführung des Forschungsvorhabens zwingend notwendig.

17.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Ziel des Forschungsprojektes war die Zusammenhänge zwischen dem molekularen Aufbau des Kunststoffes und des Prozesses mit der resultierenden Schaumstruktur näher zu untersuchen.

Daher wurden systematisch sowohl Materialcharakterisierungen als auch Extrusionsversuche mit in der Blasfolienextrusion typischen Materialtypen durchgeführt, die sich gezielt hinsichtlich Molekulargewicht, -verteilung, Verzweigungsgrad und Dehnviskosität unterscheiden. In diesen Untersuchungen wurden abhängig von dem molekularen Aufbau, 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 der Treibmittelanteil oder die Temperaturführung im Extruder und im Blaskopf auf die Dichtereduktion sowie Schaummorphologie untersucht. Weiterhin wurde der Einfluss verschiedener Düsengeometrien und der Einsatz von Nukleierungsmittel näher betrachtet. Über einen Vergleich der Eigenschaften zwischen kompakten und geschäumten Folien wurde eine Abschätzung gegeben, welche Menge an Material eingespart werden konnte. Die Kosteneffizienz ließ sich durch den Einsatz von recyceltem Material weiter steigern.

Es konnten Erkenntnisse gewonnen werden, die sowohl einen einfacheren Einstieg in die Blasfolienschaumextrusion ermöglichen als auch die Prozessführung verbessern können. 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.

18 ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES

18.1 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
IKV	Institut für Kunststoffverarbeitung
MIR	Membrane-Inflations-Rheometer
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
PE-LD	Low density Polyethylen
PE-LLD	Linear low density Polyethylen
PE-HD	High density Polyethylen
PP	Polypropylen
PIR	Post-Industrial-Rezyklat
HT-GPC	Hochtemperatur-Gelpermeationschromatographie
KmU	Kleine und mittelständische Unternehmen

18.2 Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
Z_{ver}	[-]	Zellverstreckung
Z_A	[mm]	Zellmaß in Abzugsrichtung
Z_{hor}	[mm]	Zellmaß horizontal zur Abzugsrichtung
Z_F	[mm ²]	Zellfläche
D ₁ -D ₅	[-]	Düse 1 – Düse 5

19 LITERATUR

- [Abt20] ABTS, GEORG: *Kunststoff-Wissen für Einsteiger: Grundlagen, Eigenschaften und Recycling polymerer Werkstoffe*. München: Carl Hanser Verlag, 2020.
- [AK02] AHMED, N.; KHAN, J.H.: Effect of recycling of Thermoplastics: Evaluation of the Properties of Mixture of Virgin and Recycled High-Density Polyethylene. *The 6th Saudi Engineering Conference*. Dhahran, Saudi Arabien, 2002
- [Bon20] BONTEN, CHRISTIAN: *Kunststofftechnik: Einführung und Grundlagen*. München: Carl Hanser Verlag, 2020.
- [BCPG03] BONARDI, A.; CILLONI, R.; PAGANUZZI, V.; GRIZZUTI, N.: Effects of Degree of Recycling on the Rheology and Processability of Thermoplastic Polymers. *Journal of Polymer Engineering* 23 (2003) 2, S. 79-94
- [Can19] CANTOR, K.: *Blown Film Extrusion 3rd Edition*. München: Hanser Publishers, 2019
- [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
- [CJ98] CHAUDHARY, B.I.; JOHNS, A.I.: Solubilities of Nitrogen, Isobutane and Carbon Dioxide in Polyethylene. *Journal of Cellular Plastics* 34 (1998) 4, S. 312-328
- [Dau08] DAUCH, M.: IKV-Fachtagung „Kunststoffschäume - Neues aus Spritzgießen und Extrusion" *Chemische Treibmittel - Eine Einführung in das Schäumen von Polymeren*, 2008
- [GM03] GABRIEL, C.; MÜNSTEDT, H.: Strain hardening of various polyolefines in uniaxial elongational Flow, *Journal of Rheology* 47: 619-630 (2003)
- [HK17] HOPMANN, C.; KRAUS, L.: Physikalisch geschäumte Mehrschichtblasfolien. *Extrusion* 5 (2017), S. 30-33
- [HK18] HOPMANN, C.; KRAUS, L.: Konventionelle Anlagen kostengünstig nachrüstbar. *Extrusion* 5-2018, S. 40-44
- [Hei02] HEINZ, R.: *Prozessoptimierung bei der Extrusion thermoplastischer Schäume mit CO₂ als Treibmittel*. RWTH Aachen, Dissertation, 2002 – ISBN: 3-89653-995-7
- [HM94] HINGMANN, R.; MARCZINKE, B.: Shear and elongational flow properties of polypyrrolene melts, *Journal of Rheology* 38 (1994), S. 573-587
- [HM16] HOPMANN, CH.; MICHAELI, W.: *Extrusion Dies for Plastics and Rubber - Design and Engineering Computations (4th Edition)*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2016
- [JLN05] JOSHI, J.; LEHMAN, R.; NOSKER, T.: Selected Physical Characteristics of Polystyrene/High Density Polyethylene Composites Prepared from Virgin and Recycled Materials. *Journal of Applied Polymer Science* 99 (2005) 5, S. 2044-2051
- [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
- [Ker14] KERSCHBAUMER, R.: *Optimierung der Wärmeleitfähigkeit von kompakten Polyethylen in Hinblick aufgeschäumte Dämmstoffe*. Universität Leoben, Dissertation, 2014
- [Kro98] KROPP, D.: *Extrusion thermoplastischer Schäume mit alternativen Treibmitteln*. RWTH Aachen, Dissertation, 1998
- [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

- [Lim12] LIMPER, A.: *Verfahrenstechnik der Thermoplastextrusion*. München: Carl Hanser Verlag, 2012.
- [MH10] MICHAELI, E.H.W.; HILDEBRAND, T.: Schaumextrusion mit OptiFoam – Potenzi-ale physikalischer Treibmittel (2010)
- [MSM05] MÜNSTEDT, H., STEFFL, T., MALMBERG, A.: Correlation between rheological be-haviour in uniaxial elongation and film blowing properties of various polyethylenes. *Rheologica Acta* 45, (2005), S. 14-22
- [NN13] N.N.: *DIN EN ISO 472:2013-06: Kunststoffe – Fachwörterverzeichnis*. Berlin: Beuth Verlag, 2013
- [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 Enginee-ring & Science* 35 (1995) 5, S. 432-440
- [SSW18] SPALDING, M. A., SUN, X., WOMER, T. W.: Cost Analysis for Installing New and Optimized Screws for Single-Screw Extrusion lines. *SPE ANTEC Tech. Papers, Orlando, 2018*
- [Sta06] STANGE, J.: *Einfluss rheologischer Eigenschaften auf das Schäumverhalten von Polypropylenen unterschiedlicher molekularer Struktur*. Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2006
- [SVK14] SENGUPTA, P.; DE VOS, R. F. G. M.; KRIST, J. M.: US2014/0155505 A1 2014.06.05 Process for physically foaming a masterbatch. *Patentschrift, United States Patent Application Publication*, 05.06.2014
- [SMTK01] SUGIMOTO, M.; MASUBUCHI, Y.; TAKIMOTO, J.; KOYAMA, K.: Melt rheology of polypropylene containing small amounts of high molecular weight chain.. Shear flow, *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics* 39 (2001): S. 2692-2704
- [Säc07] SÄCHTLING, H.: *Sächtling Kunststoff Taschenbuch*. München: Carl Hanser Ver-lag, 2007
- [URL20] N.N.: *Anteil ausgewählter Branchen an der Gesamtverarbeitungsmenge von Kunststoff in Deutschland im Jahr 2019*. URL: de.statista.com/statistik/daten/stu-die/194752/umfrage/verwendung-von-kunststoff-nach-einsatzgebieten/, 2020
- [URL21] N.N.: *Weltweite und europäische Kunststoffproduktion in den Jahren von 1950 bis 2020*. URL: de.statista.com/statistik/daten/studie/167099/umfrage/weltpro-duktion-von-kunststoff-seit-1950/, 2021
- [URL22] N.N.: *Mehrschichtfolien – Darum machen mehrschichtige Folien Sinn*. URL: www.weilederverpackt.de/2017/12/04/mehrschichtfolien-darum-machen-mehr-schichtige-folienverpackungensinn/, 2022
- [Wol17] WOLF, M.: *Untersuchung des Materialeinflusses auf die Schaumstruktur physikalisch geschäumter Mehrschicht-Blasfolien*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2017 – Betreuer: L. Kraus
- [Zha10] ZHANG, H.: *Scale-Up of Extrusion Foaming Process for Manufacture of Polysty-rene Foams Using Carbon Dioxide*. Universität Toronto, Dissertation, 2010

20 ANHANG

20.1 Liste der Veröffentlichungen

HOPMANN, CH.; STIEGLITZ, M.: Influence of the die design on the foam structure of foamed multilayer blown films. *31th International Colloquium Plastics Technology*. Düren: Shaker Verlag, 2020

HOPMANN, CH.; STIEGLITZ, M.; SCHÖN, M.: Ein Traum von Schaum. *Neue Verpackung* (2022) (Abschlussveröffentlichung)

20.2 Liste der studentischen Arbeiten

Forschungslabor:

RIEDER, D.: *Untersuchungen zum Einsatz verschiedener Nukleierungsmittel in geschäumter Mehrschichtfolie*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichtes Forschungslabor, 2022 – Betreuer: M. Stieglitz

Projektarbeit:

LONY, B; HESTERT, S.: *Untersuchung der Dehn- und Scherviskosität verschiedener Polyolefine und deren Einfluss auf geschäumte Blasfolie*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Projektarbeit, 2022 – Betreuer: M. Stieglitz

JUNGE, H; PÄBLER, L.: *Untersuchung des Einflusses des Düsendesigns und des Rezyklatanteils auf die Schaumstruktur geschäumter Mehrschicht-Blasfolie*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Projektarbeit, 2022 – Betreuer: M. Stieglitz

Bachelorarbeit

ENBLE, S.: *Untersuchung des Einflusses der Materialstruktur und der Prozessparameter auf die Schaumeigenschaften geschäumter Mehrschichtblasfolie*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2022 – Betreuer: M. Stieglitz