

**VORHERSAGE DER MECHANISCHEN FOLIENEIGENSCHAFTEN
BEI DER SCHLAUCHFOLIENEXTRUSION**

**PREDICTING THE MECHANICAL FILM PROPERTIES
IN BLOWN FILM EXTRUSION**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur Friedrich Ohlendorf
aus Hildesheim

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. W. Michaeli
Univ.-Prof. Dr.-Ing. E. Haberstroh

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Januar 2004

D82 (Diss. RWTH Aachen)

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

IKV Berichte aus der Kunststoffverarbeitung

Herausgeber:

Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. W. Michaeli

Friedrich Ohlendorf

Vorhersage der mechanischen Folieneigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion

ISBN: 3-86130-490-2

1. Auflage 2004

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung ist ohne die Zustimmung des Herausgebers außerhalb der engen Grenzen des Urhebergesetzes unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Vertrieb:

1. Auflage 2004

© Verlagsgruppe Mainz GmbH Aachen

Süsterfeldstr. 83, 52072 Aachen

Tel. 0241/87 34 34

Fax 0241/875577

www.Verlag-Mainz.de

Herstellung:

Druck und Verlagshaus Mainz GmbH Aachen

Süsterfeldstraße 83

52072 Aachen

Tel. 0241/873434

Fax 0241/875577

www.DruckereiMainz.de

www.Druckservice-Aachen.de

Satz: nach Druckvorlage des Autors

Umschlaggestaltung: Druckerei Mainz

printed in Germany

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen in den Jahren 1998 bis 2003.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. W. Michaeli gilt mein ganz besonderer Dank für die stete Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit und den mir gewährten großen Forschungsfreiraum. Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Haberstroh danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Ferner danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IKV für die vielfältige kollegiale Unterstützung. Insbesondere danken möchte in den Kollegen aus der Abteilung Extrusion. Viele Ideen entstanden durch die stete Diskussion mit Euch. Mein besonderer Dank gilt auch den studentischen Hilfskräften meiner Arbeitsgruppe Daniel Bühl, Bart van den Esschert, Ralf Gärtner, Juan Gruber, Marcel Heming, Thorben Keller, Jens Krüger, Erik Kuhnel und Andreas Wichards. Ohne Euren unermüdlichen Einsatz wäre das Entstehen dieser Arbeit nicht denkbar gewesen. Für die kritische Durchsicht meiner Arbeit danke ich Peter Blömer, Dr.-Ing. Jochen Hauck, Dr.-Ing. Jochen Hennes und Sven Wenigmann.

Die Untersuchungen wurden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) mit der Fördernummer 12531 N finanziell gefördert. Die Untersuchungen wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanziell gefördert. Für die Spende der verwendeten Materialien danke ich den Firmen Basell und ExxonMobilChemical, für die Bereitstellung der Schlauchfolienextrusionsanlagen danke ich den Firmen Kiefel Extrusion und Kuhne.

Ein abschließender ganz besonderer Dank gilt an dieser Stelle zum einen meinen Eltern, die mich stets auf meinem Lebensweg unterstützt haben, und zum anderen meiner Frau, die mir mit viel Verständnis den Rücken frei gehalten hat. Beide haben somit auf ihre Weise zum Entstehen dieser Arbeit einen entscheidenden Beitrag geleistet.

Königswinter, im März 2004

1	EINLEITUNG	1
1.1	Die Schlauchfolienextrusion.....	1
1.1.1	Markt und Entwicklung	1
1.1.2	Erklärung des Prozesses.....	2
1.2	Einführung in die Problematik und Zielsetzung.....	4
1.3	Stand der Forschung	6
1.3.1	Einfluss einzelner Parameter auf die Folieneigenschaften.....	7
1.3.2	Einfluss der Molekülstruktur auf die Folieneigenschaften.....	8
1.3.3	Berechnung der Folieneigenschaften	11
1.4	Vorgehensweise	13
2	EXPERIMENTELLE ANALYSE	15
2.1	Versuchsanlagen und Versuchsmaterialien.....	15
2.2	Bestimmung der Prozessparameter	16
2.2.1	Digitales Bildverarbeitungssystem.....	17
2.3	Bestimmung der mechanischen Folieneigenschaften.....	21
2.3.1	Zugversuch.....	21
2.3.2	Schrumpfversuch	21
2.4	Bestimmung der Doppelbrechung.....	22
2.4.1	Natur der Doppelbrechung.....	22
2.4.2	Physik der Messmethodik	24
2.4.3	Messung der Doppelbrechung	31
2.5	Bestimmung des Kristallisationsgrades	33
3	MECHANISCHE FOLIENEIGENSCHAFTEN	35
3.1	Entstehung der Schlauchfolieneigenschaften	35
3.2	Einfluss der Orientierungen.....	38
3.2.1	Beschreibung mittels Schrumpf	38
3.2.2	Beschreibung mittels Doppelbrechung	39
3.2.2.1	Veränderliche Doppelbrechung unter Deformation	40
3.2.2.2	Eingefrorene Doppelbrechung ohne Deformation.....	44
3.3	Einfluss der Kristallisation.....	46
3.4	Fazit.....	49
4	BERECHNUNGSMODELL	51
4.1	Theorie der Modellbildung	51
4.1.1	Statistische Modellbildung.....	52
4.1.2	Physikalische Modellbildung	52
4.2	Entwurf eines Eigenschaftsmodells	53

5	STATISTISCHES EIGENSCHAFTSMODELL	57
5.1	Vorgehensweise	57
5.1.1	Versuchspläne	59
5.1.2	Maschinenparameter und Prozessparameter	61
5.1.3	Dimensionslose Prozesskennwerte	63
5.2	Einfluss der Prozesskennwerte auf die Folieneigenschaften	64
5.2.1	E-Modul	65
5.2.2	Zugfestigkeit	70
5.2.3	Schrumpf	76
5.2.4	Fazit	80
5.3	Berechnungsgleichungen	82
5.3.1	Mathematik der Modellbildung	82
5.3.2	Ergebnisse	85
5.3.3	Fazit	89
5.4	Übertragung auf andere Materialien	90
5.4.1	Lupolen 2420 D	93
5.4.2	Lupolen 2441 D	97
5.4.3	Lösungsansatz zur Verbesserung der Übertragbarkeit	100
5.4.4	Fazit	102
5.5	Übertragung auf andere Anlagen	103
5.5.1	Schlauchfolienanlage Kiefel Extrusion	104
5.5.2	Schlauchfolienanlage Kuhne	108
5.5.3	Fazit	111
5.6	Fazit	112
6	AUSBLICK	114
7	ZUSAMMENFASSUNG / SUMMARY	117
7.1	Zusammenfassung	117
7.2	Summary	118
8	ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN	120
8.1	Abkürzungen	120
8.2	Formelzeichen	120
9	LITERATUR	122

1 EINLEITUNG

1.1 Die Schlauchfolienextrusion

1.1.1 Markt und Entwicklung

Folien aus thermoplastischen Kunststoffen sind sehr wichtige Produkte der kunststoffverarbeitenden Industrie. Nach Erhebungen des britischen Marktforschungsinstituts Applied Marketing Information (AMI), Bristol, gehen nahezu 30 Prozent der in Westeuropa verbrauchten Kunststoffe in die Produktion von Folien [NN'98]. Dies entspricht einer Menge von weit über 7,7 Mio. t insgesamt. Davon werden in Deutschland nach Recherchen von AMI knapp 1,3 Mio. t zu Folien verarbeitet. Bei der Betrachtung der verarbeiteten Werkstoffe ergibt sich folgendes Bild. Von den rund 250 untersuchten Unternehmen in Deutschland extrudieren nach Recherchen von AMI rund 80 % PE-Folien. LDPE und LLDPE haben mit 836.000 t den größten Anteil. Es folgen PP mit annähernd 180.000 t und HDPE mit gut 110.000 t [NN'97]. Die Haupteinsatzgebiete von Folien liegen dabei in den Bereichen Verpackung, Informationsträger, Landwirtschaft und Bauwesen, wobei die Verpackungsindustrie dabei sicherlich den größten Anteil stellt [Nen'00].

Die Herstellung von Kunststofffolien erfolgt hauptsächlich, auch werden vereinzelt Folien durch Gießprozesse hergestellt, durch Kalandrieren, Flachfolienextrusion und Schlauchfolienextrusion. Beim Kalandrieren wird das vom Extruder plastifizierte Material direkt auf ein Walzwerk gegeben, und von diesem zur fertigen Folie ausgeformt. Dieses Verfahren wird im Wesentlichen bei der Verarbeitung von PVC eingesetzt [KRKV'92]. Bei der Folienextrusion erfolgt eine Ausformung der Schmelze in einem Extrusionswerkzeug. Die Art des eingesetzten Folienextrusionsverfahrens richtet sich im Allgemeinen nach den gewünschten Produktanforderungen und muss immer für den konkreten Fall entschieden werden [Kel'89, MD'98]. Die Vorteile der Flachfolienextrusion liegen in der optischen Folienqualität und auf Grund der Feedblocktechnologie in der Flexibilität, wenn es um Mehrschichtfolien und deren Schichtanzahl und -aufteilung geht. Bei der Schlauchfolie ist dafür die Breite in weiten Bereichen variabel und es kann häufig ohne Randbeschnitt gearbeitet werden [Her'98].

Das Verfahren der Schlauchfolienextrusion hat sich von den Anfängen in den 30er Jahren - die erste Produktionsanlage, mit der Polyethylenschlauchfolien hergestellt wurden, ist wahrscheinlich 1939 in den USA gebaut worden [Sch'63] - kontinuierlich weiterentwickelt [Kni'96, Lou'88]. Durch ständige Modifikationen und Verbesserungen weisen Schlauchfo-

lienanlagen heute einen hohen Entwicklungsstand bezüglich Maschinen-, Prozess- und Automatisierungstechnik auf [Nen'96, NN'91]. Während die Weiterentwicklungen zu Beginn hauptsächlich auf eine Steigerung des Massedurchsatzes abzielten, in diesem Zusammenhang ist z.B. die Entwicklung der Blaseninnenkühlung zu nennen [Gab'98], ist in den letzten Jahren die Qualität der Folie und deren Verbesserung immer weiter in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Die Steigerung der Folienqualität ist dabei größtenteils auf den hohen Automatisierungsgrad der Schlauchfolienanlagen zurückzuführen. Hierzu zählen vor allen Breiten- und Dickenregelung. Letztere führt in der Verbindung mit einem reversierenden Abzug zu hohen Wickelqualitäten bezüglich der Zylindrizität. Außerdem hat die Einführung der Dickenregelung durch Automatikwerkzeuge [FS'87] oder segmentierte Kühlringe [SC'95] die Homogenität der Folieneigenschaften erheblich verbessert. Parallel zu der Steigerung der mechanischen und optischen Folienqualität verlief die Zunahme verschiedener funktionaler Eigenschaften der Folien wie z.B. Verbesserung der Sperrwirkung durch Medienbarrieren. Technologisch geht dies einher mit der Einführung der Coextrusion. Durch diese Technologie lässt sich das Eigenschaftsbild der Folien durch Kombination verschiedener Werkstoffe auf das Anforderungsprofil bezüglich mechanischer oder Barriereigenschaften [Wir'91] einstellen.

Da die Materialkosten über 70 % der Produktionskosten ausmachen [Fei'89], ist das vorrangige Ziel der Weiterentwicklung bei der Schlauchfolienextrusion die Reduzierung des Rohstoffeinsatzes bei gleich bleibender oder verbesserter Folienqualität insbesondere in Hinblick auf die mechanischen und die Barriereigenschaften. Dies wird zum einen durch die Reduzierung der Foliendicke und zum anderen durch den Einsatz verbesserter Polymere, wie z.B. solcher auf Basis Metallocene [Nen'97], erreicht. Von daher stehen die mechanischen Folieneigenschaften als entscheidender Schlüssel auf dem Weg zu dünneren Folien heute mehr denn je im Blickpunkt des Interesses.

1.1.2 Erklärung des Prozesses

Bei der Schlauchfolienextrusion wird die vom Extruder zur Verfügung gestellte Thermoplastschmelze im Blaskopf (Schlauchfolienwerkzeug mit ringspaltförmigem Schmelzeaustrittsquerschnitt) zu einem Schlauch ausgeformt (Bild 1). Für die Verteilung der Schmelze im Werkzeug hat sich dabei der Wendelverteiler etabliert. Am Markt verfügbar sind Wendelverteiler hauptsächlich axialer, aber auch radialer und konischer Bauart [Mic'03]. Der ausgeformte Schlauch wird nach Austritt von innen mit Luft aufgeblasen. Am oberen Ende der Folienblase wird der aufgeblasene Folienschlauch durch geeignete Führungseinrichtungen kontinuierlich flachgelegt und von einem Walzenpaar abgezogen. Hinter den Abzugswalzen folgt ein System von Umlenk- und Breitstreckwalzen, die die Schlauchfolie an der Seite des

Turms nach unten zum Wickler führen. Ggf. verfügt die Schlauchfolienanlage über einen reversierenden Abzug mit Wendestangen [Wor'88], der die Dickentoleranzen verlegt.

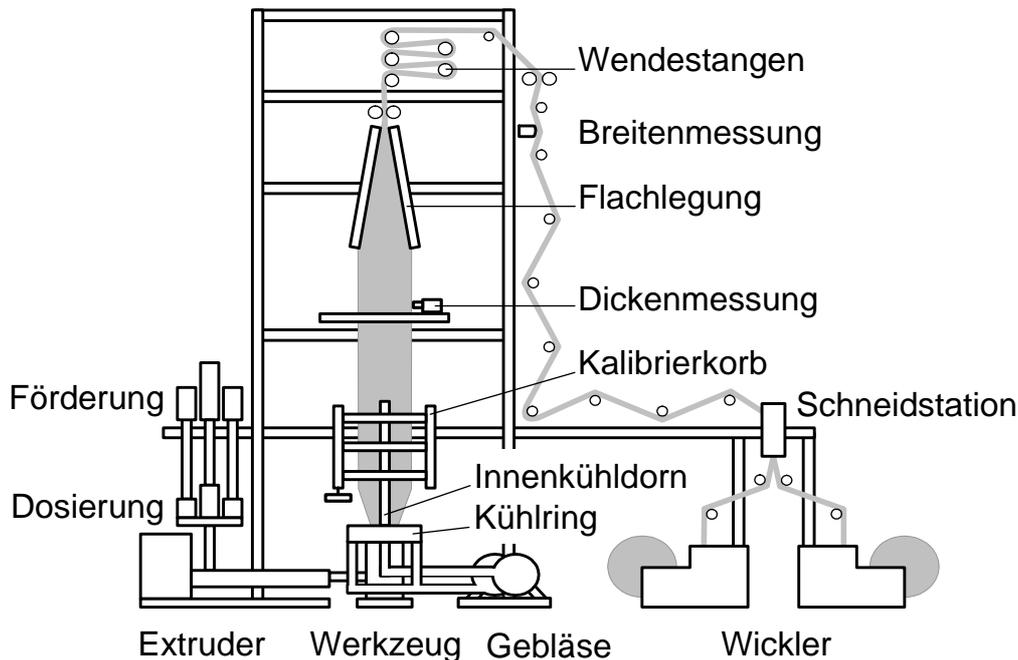


Bild 1: Der Schlauchfolienextrusionsprozess

Fig. 1: The blown film extrusion process

Durch Einblasen von Blasluft in das Innere des Schlauchs wird der schmelzeflüssige Folienschlauch auf den gewünschten Durchmesser aufgeweitet. Im Inneren des Folienschlauchs herrscht dabei ein konstanter geringer Überdruck. Der Quotient aus Enddurchmesser des Schlauchs und Austrittsdurchmesser des Werkzeugs wird dabei als Aufblasverhältnis bezeichnet. Gleichzeitig zur Querverstreckung während Aufweitung wird der Schlauch durch die Abzugswalzen am oberen Ende mit einer gegenüber der Schmelzeaustrittsgeschwindigkeit erhöhten Geschwindigkeit auf die gewünschte Foliendicke längsverstreckt. Hierbei bezeichnet der Quotient aus Abzugsgeschwindigkeit und Austrittsgeschwindigkeit das Abzugsverhältnis. Die Abzugswalzen bringen dabei zum einen die zur Längsverstreckung notwendige Axialkraft auf, und hindern zum anderen das im Folienschlauch abgeschlossene Luftvolumen am Austritt. Durch die beschriebene und überlagerte Quer- und Längsverstreckung des Folienschlauchs findet also eine biaxiale Dehnung der Kunststoffschmelze nach dem Verlassen des Werkzeugs statt.

Der schmelzeflüssige Folienschlauch wird ab dem Düsenaustritt intensiv mit Luft gekühlt. Dies geschieht mit Hilfe eines Kühlrings, der den Schlauch von außen radial mit Kühlluft anbläst. Zur Stabilisierung des Folienschlauchs im turbulenten Luftstrom wird dieser weiter oben durch einen Kalibrierkorb geführt. Bei größeren Schlauchfolienanlagen hat sich heute

eine zusätzliche Innenluftkühlung mit Luftaustausch etabliert. Unter dem Einfluss der Kühlung erfolgt der Übergang der Folie von dem schmelzflüssigen in den festen Zustand, welcher durch die so genannte Frostlinie markiert wird. Die Höhe der Frostlinie, sprich der Ort bzw. der Zeitpunkt des Einfrierens des Kunststoffes, lässt sich durch die Menge an zugeführter Kühlluft variieren. Hierbei führen ein erhöhter Luftvolumenstrom auf Grund der verbesserten Kühlwirkung zum Absinken der Frostlinie und ein erniedrigter Luftstrom zum Steigen der Frostlinie. Befindet sich die Frostlinie sehr weit oberhalb des Werkzeugaustritts, bildet die Schmelze nach Verlassen des Werkzeugs zunächst einen längeren zylindrischen Bereich aus, die Aufweitung der Blase erfolgt dann erst kurz vor Erreichen der Frostlinie. Man spricht hierbei von der Fahrweise mit langem Hals. Diese Fahrweise kommt fast ausschließlich bei dünnen (6-30 μm) HDPE-Folien zum Einsatz. Den schmelzflüssigen Bereich des Folienschlauches zwischen dem Düsenaustritt und der Frostlinie bezeichnet man als Schlauchbildungszone. Oberhalb der Frostlinie sind der Durchmesser des Folienschlauches und die Foliendicke quasi fixiert, mit Ausnahme der Abnahme der Foliendicke aufgrund der mit der weiteren Abkühlung einhergehenden Dichteänderung. Die beschriebene biaxiale Dehnung des Folienschlauches findet nun nicht mehr statt, da der Kunststoff nicht mehr fließfähig ist und die wirkenden Kräfte zu gering sind.

1.2 Einführung in die Problematik und Zielsetzung

Wie in der Einleitung dargelegt, rücken die Folieneigenschaften bei der Weiterentwicklung des Schlauchfolienextrusionsprozesses immer mehr in den Vordergrund. Neben den optischen und den Barriereeigenschaften sind es vor allem die mechanischen Eigenschaften, die häufig als Qualitätskriterium herangezogen werden. Nicht zuletzt aus dem Grund immer dünnere Folien produzieren zu wollen, um die Materialkosten zu senken. Daher sind die Einflussgrößen auf die mechanischen Folieneigenschaften seit langem Ausgangspunkt vieler Untersuchungen [BLPS'94, BNCC'96, BP'93a, Fis'86, GCL'96b, GHP'87, HKC'91, PB'93, SH'94, Vri'83]. Hierbei sind zwei Fragen von besonderem Interesse. Welche Einflussgrößen des Schlauchfolienextrusionsprozesses bestimmen die Folieneigenschaften? Und lässt sich der Einfluss der Größen auf die Folieneigenschaften quantitativ beschreiben? Bis heute existiert allerdings noch kein allgemeingültiges und anerkanntes Berechnungsmodell für die mechanischen Folieneigenschaften beim Schlauchfolienextrusionsverfahren.

Hieraus ergibt sich eine große Unwägbarkeit für den Folienhersteller bei der Vorhersage der Schlauchfolieneigenschaften bei der Entwicklung eines neuen Produkts, einem Wechsel des Materials oder der Produktionsanlage. Insbesondere eine Prozessoptimierung hinsichtlich der Verringerung des Materialeinsatzes oder der Erhöhung des Durchsatzes bei gleichzeitiger

Konstanz der mechanischen Eigenschaften der Folie, sowie eine gezielte Verbesserung dieser Eigenschaften durch eine Veränderung der Prozessparameter, ist in der Regel nur nach Durchführung empirischer Untersuchungen möglich. In der Konsequenz bedeutet dies für den Hersteller, dass er auf kosten- und vor allem materialintensive Versuchsreihen angewiesen ist. Es wäre daher von großem Vorteil, wenn man die mechanischen Schlauchfolieneigenschaften im Vorfeld der Produktion berechnen könnte. Ein solches Berechnungsmodell würde den Zeit- und Kostenaufwand des Folienherstellers erheblich reduzieren. Das Aufstellen eines derartigen Berechnungsmodells zur Vorhersage der mechanischen Kennwerte bei der Schlauchfolienextrusion ist daher Inhalt und Ziel dieser Arbeit.

Bei der Aufstellung eines Berechnungsmodells für die Schlauchfolieneigenschaften besteht dabei die Schwierigkeit in der Allgemeingültigkeit des Modells. Ein solches Berechnungsmodell muss nämlich die komplette Wirkungskette der Schlauchfolieneigenschaften berücksichtigen, um allgemeingültig und somit übertragbar zu sein. Eine derartige Wirkungskette liegt in der Regel bei vielen technischen Prozessen vor und lässt sich wie folgt erklären. In einem Beispielprozess bewirkt der Maschineneinstellparameter Druck eine bestimmte Reaktion, wie z.B. einen Temperaturanstieg. Die Ursache für die Ausbildung bzw. Änderung der Eigenschaften des Produkts des Beispielprozesses kann nun genau die Reaktion des Prozesses (der Temperaturanstieg) und nicht die Einstellung des Maschinenparameters Druck sein. Übertragen auf den Schlauchfolienextrusionsprozess bedeutet dies, dass z.B. nicht das Absenken des Kühlluftvolumenstroms zu veränderten Schlauchfolieneigenschaften führt, sondern die dadurch hervorgerufene Änderung des Prozesszustands, nämlich die Änderung der Halslänge. Die Änderung der Maschineneinstellparameter wirkt sich jedoch auf unterschiedlichen Anlagen nicht identisch auf den Prozesszustand der Schlauchbildungszone und damit auf die resultierenden Folieneigenschaften aus. Für das Beispiel bedeutet dies, dass der Einfluss der Absenkung des Kühlluftvolumenstroms zum Großteil von der Kühlringgeometrie abhängt, die jedoch auf unterschiedlichen Anlagen nicht identisch sein muss. Berechnungsmodelle, die nun als Eingangsgrößen die Maschinenparameter wählen, und als Ausgangsgrößen die Folieneigenschaften haben, verbergen den Zwischenschritt der Wirkungskette, den Prozesszustand der Schlauchbildungszone, meist im Modell. Solche Modelle können zwar durchaus richtige Berechnungsergebnisse liefern, diese Ergebnisse sind jedoch prinzipiell auf die Anlage beschränkt, auf der das Modell entwickelt wurde. Dies bedeutet, dass die Übertragbarkeit der Berechnungsergebnisse auf andere Anlagen nicht gegeben ist. Diese Modelle sind nicht allgemeingültig.

Für das Berechnungsmodell, das in dieser Arbeit entwickelt werden soll, leitet sich aus diesen Überlegungen die Forderung ab, die komplette Wirkungskette der mechanischen Eigenschaf-

ten bei der Schlauchfolienextrusion zu berücksichtigen. Die Wirkungskette, ausgehend von den Maschineneinstellungen über den sich einstellenden Prozesszustand in der Schlauchbildungszone hin zu den resultierenden Schlauchfolieneigenschaften, wird in Kapitel 3 noch eingehend behandelt. Diese Voraussetzung soll die Allgemeingültigkeit und dadurch die Übertragbarkeit des Berechnungsansatzes gewährleisten.

1.3 Stand der Forschung

Auf dem Gebiet der Schlauchfolienextrusion sind in den letzten drei Jahrzehnten vielfältige Untersuchungen durchgeführt worden, die die Erweiterung des Prozessverständnisses des Schlauchfolienextrusionsprozesses zum Ziel hatten und haben, z.B. [AC'92, CC'86, CH'90, HH'84, LT'85, MP'70, PPD'77, Sch'95, SSW'81, YW'87]. In diesem Kapitel wird eine Literaturübersicht dieser Untersuchungen wiedergegeben. Die Literaturstellen werden hierbei in verschiedene Forschungsschwerpunkte der Schlauchfolienextrusion eingeteilt. Ein Forschungsschwerpunkt lag dabei auf der Entwicklung eines physikalischen Prozessmodells für den Schlauchfolienextrusionsprozess, welches den sich einstellenden Prozesszustand der Schlauchbildungszone bei gegebenen Materialeigenschaften, Maschinenparametern und Randbedingungen berechnet. Da diese Arbeiten sich nicht direkt mit den Schlauchfolieneigenschaften sondern mit dem Prozesszustand in der Schlauchbildungszone beschäftigen, werden sie an dieser Stelle nicht weiter erläutert. Einen Überblick findet man bei *Tas* [Tas'94] und *Hauck* [Hau'99].

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt auf dem Gebiet der Schlauchfolienextrusion lag auf der experimentellen Untersuchung des Zusammenhanges zwischen den Materialeigenschaften, Maschinenparametern und Randbedingungen, den sich einstellenden Prozesszustand der Schlauchbildungszone und den daraus resultierenden Folieneigenschaften. Zu dieser Thematik gibt es vielfältige Untersuchungen, die sich hinsichtlich der untersuchten Folieneigenschaften in zwei Hauptgruppen gliedern. Zum einen werden die optischen Eigenschaften wie z.B. Glanz, Transparenz und Trübung erforscht, z.B. [BKPS'94, BSB'85, CT'89, LP'93, SCL+'96, SSW'81]. Zum anderen und weitaus größeren Teil werden die Entstehung und Ausprägung der mechanischen Eigenschaften einer Schlauchfolie untersucht. Da die optischen Folieneigenschaften nicht Thema dieser Arbeit sind, werden die entsprechenden Untersuchungen in dieser Literaturübersicht nicht näher berücksichtigt. Die Literaturquellen, deren Autoren sich mit den mechanischen Eigenschaften beschäftigen, werden detailliert in den Kapiteln 1.3.1 bis 1.3.3 besprochen.

1.3.1 Einfluss einzelner Parameter auf die Folieneigenschaften

Bei einem Großteil der Untersuchungen der mechanischen Folieneigenschaften des Schlauchfolienextrusionsprozesses werden jeweils nur einzelne Einflussgrößen betrachtet (siehe Tabelle 1). Zu den untersuchten Einflussgrößen zählen dabei sowohl Prozessparameter, wie z.B. Aufblas- und Abzugsverhältnis, als auch Maschinenparameter, wie Massedurchsatz oder Spaltweite. Diese Einflussgrößen werden dann mit den Folieneigenschaften korreliert. Die Ergebnisse dieser Korrelationen gelten jedoch nur für den Einzelfall und sind nicht übertragbar. Während die Ergebnisse der Korrelationen zwischen den Maschinenparametern und den Folieneigenschaften, wie oben dargelegt, prinzipiell nicht übertragbar sind, gelten auch die Ergebnisse der Korrelationen zwischen einzelnen Prozessparametern und den Folieneigenschaften nur für den Einzelfall. Zur allgemeingültigen Beschreibung der Folieneigenschaften mit den Prozessparametern ist es daher notwendig, alle den Prozess beeinflussenden Parameter auch zu berücksichtigen. Korrelationen nur zwischen dem Abzugsverhältnis und den Folieneigenschaften verbergen nämlich alle anderen Einflussgrößen in dem gefundenen Zusammenhang. Untersuchungen, die den Einfluss einzelner Parameter auf die Folieneigenschaften zum Thema haben, sind im Folgenden aufgeführt. All diesen Untersuchungen fehlt zudem eine Formel zur Berechnung der Folieneigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion. Daher dienen sie eher der Erweiterung des Prozessverständnisses als der Berechnung der Folieneigenschaften.

Bei den Untersuchungen des Einflusses einzelner Parameter auf die mechanischen Folieneigenschaften wurden oftmals die beiden Größen Aufblas- und Abzugsverhältnis, und damit der biaxiale Deformations- und Orientierungszustand, variiert und mit den sich einstellenden Festigkeitseigenschaften korreliert. Dabei stellen verschiedene Autoren für unterschiedliche teilkristalline Werkstoffe (LDPE, LLDPE, HDPE) eine Zunahme der Zugfestigkeit in Verstreckrichtung mit zunehmendem Abzugsverhältnis fest [BP'93a, HK'83, Kan'87, SS'87]. Quer zur Extrusionsrichtung können bei einer Erhöhung des Aufblasverhältnisses ähnliche Beobachtungen gemacht werden [BP'93a, GHP'87, HK'83, Kan'87, PB'93, PBWK'94, PW'92, SS'87]. Weitere Größen, die Gegenstand der Untersuchungen waren, sind zum Beispiel der Folienschumpf [LGC+'98, MW'71, PBWK'94, Ple'90, PPD'77, Sch'92, SS'87] oder weitere mechanische Kennwerte, wie der E-Modul [Bes'90, Gha'99, LGC+'98, PB'93, PBWK'94, PW'92, SH'94] oder die Durchstoßfestigkeit [Bes'90, BLPS'94, BP'93a, BP'92, Fis'88, Fis'86, Gha'99, HKC'91, Kan'87, PB'93, PBWK'94, Ple'90, PPD'77, PW'92, Sch'92, SS'87].

Auch die Fahrweise mit langem Hals wurde untersucht. In [Bes'90, HKC'91, Kan'87, PPD'77] wird ein Anstieg der Durchstoßfestigkeit mit Zunahme der Halslänge bei der Verarbeitung

von HDPE festgestellt. Analoge Beobachtungen findet man auch in [BLPS'94, Fis'88, Fis'86, Ple'90], die durch die für LDPE- bzw. LLDPE-Folien unübliche Fahrweise mit langem Hals sogar eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften bei gleichem Aufblas- und Abzugsverhältnis erreichen. Den Einfluss der Verarbeitungstemperatur auf die Folieneigenschaften untersuchen [BP'92, Gha'99, LGC+'98, MW'71, Sch'92]. Von einigen wird eine Zunahme des Folienschumpfs und der Durchstoßfestigkeit mit abnehmender Masstemperatur festgestellt. Eine Übersicht über alle besprochenen Untersuchungen gibt Tabelle 1.

1.3.2 Einfluss der Molekülstruktur auf die Folieneigenschaften

Die mechanischen Kennwerte der Folie korrelieren neben dem verarbeiteten Polymer an sich jedoch nicht nur mit den Maschinen- oder Prozessparametern sondern auch mit der Anordnung der Molekülketten, wie Orientierung und Kristallstruktur. Zur Untersuchung dieses Zusammenhanges gibt es zahlreiche Arbeiten. Dabei wurden die Orientierungen untersucht mittels

- Röntgenstrahlen (Wide Angle X-ray Analysis, WAXS; Small Angle X-ray Analysis, SAXS; Wide Angle X-ray Diffraction, WAXD)
[CSW'82, FSNS'95, FSNS'94, GHP'87, GSH'93a, GSH'93b, KHV'88, LSR'00, Suk'98],
- Elektronenmikroskopie (Transmission Electron Microscopy, TEM)
[FSNS'95, FSNS'94, LSR'00, Suk'98],
- Infrarotspektroskopie (Infrared Dichroism)
[LPWF'88, LSR'00, PBWK'94, Suk'98],
- Schrumpf [PBWK'94] und
- Lichtdoppelbrechung [BP'93a, BP'93b, CSW'82, CWS'80, GCL'96a, GCL'97a, GCL'97b, GCL'95, GCL'96b, Gha'99, GHP'87].

Allgemein betrachtet ergeben sich hierbei eine Zunahme der Orientierung mit dem Dehngrad der Folie und eine Zunahme der Festigkeit mit steigendem Orientierungsgrad. Weiterhin zeigt sich, dass die mechanischen Eigenschaften von verstreckten teilkristallinen Folien in sehr viel stärkerem Maße von den eingebrachten Orientierungen beeinflusst werden als von dem Kristallisationsgrad [Sam'76, Sam'85, Vri'83, Vri'81, Vri'82, YKT'81].

Quelle	Material	Untersuchte Größen	Folieneigenschaften
[Bes'90]	HMW-HDPE LDPE LLDPE	Aufblasverhältnis Frostlinienhöhe	E-Modul Streckgrenze Elmendorf Reißfestigkeit Durchstoßfestigkeit
[BLPS'94]	LLDPE	Massedurchsatz Werkzeugspaltweite Aufblasverhältnis Frostlinienhöhe	Elmendorf Reißfestigkeit Durchstoßfestigkeit
[BP'92]	LLDPE	Schmelztemperatur	Zugfestigkeit Elmendorf Reißfestigkeit Durchstoßfestigkeit
[BP'93a]	LLDPE	Massedurchsatz Schmelztemperatur Aufblasverhältnis Frostlinienhöhe	Elmendorf Reißfestigkeit Durchstoßfestigkeit
[Fis'86] [Fis'88]	LDPE	Werkzeugspaltweite Frostlinienhöhe	Zugfestigkeit Durchstoßfestigkeit
[Gha'99]	LDPE LLDPE	Schmelztemperatur Aufblasverhältnis Abzugsverhältnis Frostlinienhöhe	E-Modul Streckgrenze Durchstoßfestigkeit
[GHP'87]	HDPE	Aufblasverhältnis Frostlinienhöhe Foliendicke	Zugfestigkeit Zugdehnung Streckgrenze
[HK'83]	LDPE	Aufblasverhältnis Abzugsverhältnis	Zugfestigkeit
[HKC'91]	HMW-HDPE	Blaseninnenkühlung Frostlinienhöhe	Zugfestigkeit Zugdehnung Streckgrenze Elmendorf Reißfestigkeit Durchstoßfestigkeit
[Kan'87]	HMW-HDPE	Aufblasverhältnis Abzugsverhältnis Frostlinienhöhe	Zugfestigkeit Durchstoßfestigkeit
[LGC+'98]	LDPE LLDPE mLDPE	Massedurchsatz Schmelztemperatur Aufblasverhältnis Abzugsverhältnis	E-Modul Zugfestigkeit Schrumpf

Quelle	Material	Untersuchte Größen	Folieneigenschaften
[MW'71]	PE	Werkzeugspaltweite Schmelzetemperatur Aufblasverhältnis Abzugsverhältnis Frostlinienhöhe Foliendicke	Schrumpf
[PB'93]	LLDPE	Werkzeugspaltweite Aufblasverhältnis	E-Modul Zugfestigkeit Elmendorf Reißfestigkeit Durchstoßfestigkeit
[PBWK'94]	LLDPE	Werkzeugspaltweite Aufblasverhältnis Abzugsverhältnis	E-Modul Zugfestigkeit Elmendorf Reißfestigkeit Durchstoßfestigkeit Schrumpf
[Ple'90]	LDPE	Werkzeugspaltweite Abkühlbedingungen Frostlinienhöhe	Zugfestigkeit Zugdehnung Durchstoßfestigkeit Schädigungsarbeit Schrumpf
[PPD'77]	HDPE	Aufblasverhältnis Frostlinienhöhe	Durchstoßfestigkeit Schlagzugzähigkeit Schrumpf
[PW'92]	HMW-HDPE	Massedurchsatz Abkühlbedingungen Aufblasverhältnis Frostlinienhöhe Abzugsgeschwindigkeit	E-Modul Streckgrenze Zugfestigkeit Zugdehnung Elmendorf Reißfestigkeit Durchstoßfestigkeit
[Sch'92]	LDPE	Schmelzetemperatur Abkühlbedingungen	Zugfestigkeit Zugdehnung Streckgrenze Durchstoßfestigkeit Schrumpf
[SH'94]	HDPE	Aufblasverhältnis Abzugsverhältnis Frostlinienhöhe	E-Modul
[SS'87]	HMW-HDPE	Dehnverhältnisse in Maschinen- und Querrichtung	Zugfestigkeit Durchstoßfestigkeit Schrumpf

Tabelle 1: Experimentelle Untersuchungen von Schlauchfolieneigenschaften

Table 1: Experimental investigations of blown film properties

1.3.3 Berechnung der Folieneigenschaften

Während es vielfältige Untersuchungen und Ergebnisse zu dem Zusammenhang zwischen einzelnen Parametern und den Folieneigenschaften gibt, ist der Zusammenhang, und hier insbesondere der quantitative Zusammenhang, zwischen dem sich einstellenden Prozesszustand der Schlauchbildungszone und den resultierenden Folieneigenschaften noch weitestgehend ungeklärt. Es gibt nur wenige Arbeiten, in denen der Versuch einer Berechnung der mechanischen Folieneigenschaften mittels einer mathematischen Funktion unternommen wird. Im Folgenden wird eine Literaturübersicht dieser Untersuchungen wiedergegeben. Dabei haben die Autoren bei der Berechnung der mechanischen Eigenschaften grundsätzlich zwei verschiedene Wege eingeschlagen: erstens statistische Modelle zur Korrelation des Zusammenhanges zwischen Materialeigenschaften, Maschinenparametern und Prozessbedingungen und den sich einstellenden Folieneigenschaften (siehe Tabelle 2), und zweitens physikalische Modelle (siehe Tabelle 3).

Statistische Modelle finden sich bei *Cantor et al.* [CH'90], *Menges et al.* [MP'70] und *Pendley et al.* [PW'92]. Da bei diesen Untersuchungen allerdings anlagenspezifische Maschinenparameter zur Berechnung verwendet werden, sind die aufgestellten Gleichungen nur für den speziell untersuchten Anwendungsfall gültig und können nicht als allgemeingültig angesehen werden. Eine Übersicht über die gewählten Einfluss- und Zielgrößen der durchgeführten statistischen Versuchplanungen gibt Tabelle 2.

Quelle	Einflussgrößen	Zielgrößen
[CH'90]	Schneckendrehzahl Abzugsgeschwindigkeit Blasendurchmesser Frostlinienhöhe	Durchstoßfestigkeit
[MP'70]	Verweilzeit der Schlauchbildungszone Abzugsverhältnis Aufblasverhältnis Schmelzetemperatur	Schrumpf in Längsrichtung Schrumpf in Querrichtung Schädigungsarbeit
[PW'92]	Kühlringgeometrie Massedurchsatz Aufblasverhältnis Einstellung der Irisblende Abzugsgeschwindigkeit	Elmendorf Reißfestigkeit Durchstoßfestigkeit Streckgrenze Zugfestigkeit Zugdehnung E-Modul

Tabelle 2: Statistische Modelle zur Berechnung der Folieneigenschaften

Table 2: Statistical models for calculation of film properties

Physikalische Modelle finden sich z.B. bei *Tas* [Tas'94]. Er untersucht unterschiedliche LDPE-Typen, die sich hinsichtlich ihrer Fließfähigkeit (verschiedene MFR-Werte) unterscheiden. Bei der Auftragung des gemessenen E-Moduls über den sich an der Frostlinie einstellenden berechneten Spannungen in der Folie liegen die Kurven hingegen für alle LDPE-Typen übereinander. Das gleiche Bild zeigt sich bei der Auftragung der Zugfestigkeit, Streckspannung und der Zugdehnung. Demzufolge stellt die Spannung an der Frostlinie einen wichtigen Prozessparameter dar, der sich mit den Folieneigenschaften korrelieren lässt. *Kuijk et al.* [KTN'98, KTN'99] haben diese Untersuchungen später bestätigt und auf LDPE/LLDPE-Blends erweitert. Eine analoge Beziehung wie für die eingebrachte Spannung an der Frostlinie gilt für die in der Schlauchbildungszone eingebrachte Dehnung und den mechanischen Eigenschaften, wie *Babel et al.* zeigen [BC'93a, BC'93b, BC'94, BNCC'96]. Hier werden die Folieneigenschaften von LDPE und LLDPE über der berechneten Dehnung an der Frostlinie aufgetragen. Beide vorgestellten physikalischen Berechnungsmodelle zeichnen sich dadurch aus, dass die Folieneigenschaften nicht direkt mit dem Modell berechnet werden, sondern als Zwischenschritt die Spannung bzw. Dehnung an der Frostlinie berechnet wird, welche dann experimentell mit den Folieneigenschaften korreliert wird. Es liegt also ein kombiniertes physikalisch-statistisches Modell vor. Eine Übersicht zu physikalisch-statistischen Modellen aus der Literatur zeigt Tabelle 3.

Quelle	Physikalisches Modell	Statistisches Modell
[Tas'94] [KTN'98] [KTN'99]	Berechnung der Spannungen: Kombination aus gemessener Kinematik im Experiment und rheologischer Zustandsgleichungen	Korrelation der Spannungen mit E-Modul Zugfestigkeit Streckspannung Zugdehnung
[BNCC'96] [BC'93a] [BC'93b] [BC'94]	Berechnung der Dehnungen: Kombination aus gemessener Kinematik im Experiment und rheologischer Zustandsgleichungen	Korrelation der Dehnungen mit Zugfestigkeit Elmendorf Reißfestigkeit E-Modul Streckgrenze Durchstoßfestigkeit

Tabelle 3: Physikalisch-Statistische Modelle zur Berechnung der Folieneigenschaften

Table 3: Physical-statistical models for calculation of film properties

Für die Berechnung des Folienschrumpfs wurde auch eine Möglichkeit der rein physikalischen Modellbildung vorgestellt. *Fischer* [Fis'81, Fis'83] und später auch *Tas* [Tas'94] berechnen den Folienschrumpf mit einer modifizierten rheologischen Zustandsgleichung. Diese modifizierte Zustandsgleichung ist dabei vom gleichen Typ wie diejenige, mit der zuvor die Spannungen an der Frostlinie berechnet wurden. In der modifizierten Zustandsgleichung sind

diese berechneten Spannungen nun die Startbedingungen und anstatt der Dehnung wird nun die Retardation als Äquivalent zum Folienschrumpf berechnet. Allerdings berechnen diese Modelle auch nur den Schrumpf und keine weiteren mechanischen Kennwerte.

1.4 Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist die Vorhersage der mechanischen Folieneigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion. Hierfür soll ein Berechnungsmodell entwickelt werden, welches allgemeingültig und übertragbar ist. Die Vorgehensweise hierzu gliedert sich wie folgt.

Kapitel 3: Mechanische Folieneigenschaften

Zum Einstieg in die Thematik wird die Entstehung der Schlauchfolieneigenschaften beschrieben. Hierzu wird zunächst der Einfluss der Materialeigenschaften und Maschineneinstellparameter auf den sich ausbildenden Prozesszustand der Schlauchbildungszone erklärt. Hierbei sind es vor allem die Vorgänge auf molekularer Ebene, die zum einen den Prozesszustand beschreiben und zum anderen die Schlauchfolieneigenschaften festlegen. Die Auswirkungen dieser molekularen Struktur auf die Folieneigenschaften, insbesondere sind hier Orientierungszustand und Kristallisationsgrad zu nennen, werden beschrieben und untersucht.

Kapitel 4: Berechnungsmodell

Im weiteren Vorgehen werden die Grundlagen eines Berechnungsmodells erarbeitet. Hierzu werden zunächst zwei Arten der Modellbildung, statistische und physikalische, miteinander verglichen. Es werden prinzipielle Vor- und Nachteile und Nutzen und Grenzen der Modelle gegenübergestellt. Des Weiteren wird verdeutlicht, auf welchem Weg die Eigenschaften berechnet werden können und welche Größen dabei berücksichtigt werden müssen. Auf diesen Grundlagen aufbauend wird dann ein Modell zur Berechnung der mechanischen Folieneigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion entwickelt.

Kapitel 5: Statistisches Eigenschaftsmodell

Anschließend wird das entwickelte Berechnungsmodell der Folieneigenschaften in Form eines statistischen Modells umgesetzt. Hierzu werden experimentelle Untersuchungen an einer Schlauchfolienextrusionsanlage des IKV durchgeführt. Bei den Untersuchungen werden durch Variation des Prozesszustandes unterschiedliche Betriebspunkte eingestellt und die dazugehörigen Prozessparameter gemessen. Im Anschluss an die Versuchsdurchführung werden die mechanischen Kennwerte der Folie ermittelt. Mit Hilfe mathematischer Analysemethoden wie z.B. der linearen Regression werden die quantitativen Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und den mechanischen Kennwerten der Folie in statistische

Berechnungsmodelle überführt. Mit Hilfe dieser Modelle wird es dann möglich sein, die mechanischen Kennwerte der Folie aus den Prozessparametern des Schlauchfolienextrusionsverfahrens zu berechnen. Zur Verifikation und Untersuchung der Übertragbarkeit der gefundenen Zusammenhänge werden experimentelle Untersuchungen mit zwei weiteren Materialien und an zwei weiteren Schlauchfolienextrusionsanlagen bei Maschinenherstellern durchgeführt.

2 EXPERIMENTELLE ANALYSE

2.1 Versuchsanlagen und Versuchsmaterialien

Die experimentellen Untersuchungen wurden auf der Schlauchfolienanlage des IKV, Aachen, durchgeführt. Diese Anlage wurde zur Verfügung gestellt von der Firma Kuhne, St. Augustin. Die Typbezeichnung lautet KFB 45/600. Kernstück dieser Anlage ist ein 45-mm-Extruder mit wassergekühlter Nutbuchse. Bei der Schnecke handelt es sich um eine Barrierschnecke mit Stiftmischteil mit einer Länge von 24 D. Zur Schmelzeverteilung im Blaskopf dient ein axialer Wendelverteiler mit 180 mm Durchmesser. Dieser Durchmesser wird bis zum Werkzeugaustritt auf 80 mm reduziert. Der Kühlring besitzt zwei Austrittsspalte, die nebeneinander angeordnet sind und von denen der äußere verstellbar ist, während der Versuche aber vollständig verschlossen blieb, so dass nur ein Kühlringsspalt vorlag.

Zur Verifikation und Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse der Versuche der Anlage am IKV wurden experimentelle Untersuchungen ebenfalls auf Schlauchfolienextrusionsanlagen bei Maschinenherstellern durchgeführt. Zu diesem Zweck stellten die Firmen Kiefel Extrusion, Worms, und Kuhne, St. Augustin, ihre Technikumsanlagen zur Verfügung. Beide Anlagen verwenden ebenfalls einen axialen Wendelverteiler zur Schmelzeverteilung im Blaskopf. Eine Übersicht über alle drei verwendeten Anlagen zeigt Tabelle 4.

	IKV	Kiefel Extrusion	Kuhne
Schneckendurchmesser	45 mm	80 mm	60 mm
Werkzeugaustrittsdurchmesser	80 mm	225 mm	250 mm
Werkzeugspaltweite	1,5 mm	1,4 mm	1,5 mm
Anzahl Kühlringsspalte	1	2	2
Blaseninnenkühlung	Nein	Ja	Nein
Maximale Nutzbreite des Wickler	650 mm	1.700 mm	1.300 mm

Tabelle 4: Verwendete Schlauchfolienextrusionsanlagen

Table 4: Used blown film extrusion lines

Bei den verwendeten Versuchsmaterialien handelt es sich um drei unterschiedliche LDPE-Typen. Die Versuchsmaterialien wurden zur Verfügung gestellt von den Firmen Basell, Frankfurt am Main, und ExxonMobilChemical, Machelen Belgien. Eine Übersicht über alle verwendeten Typen gibt Tabelle 5.

Typ	LDPE	LDPE	LDPE
Hersteller	Basell	Basell	ExxonMobil
Handelsname	Lupolen	Lupolen	-
Typ	2441 D	2420 D	LD 150 AC
Dichte [g/cm ³]	0,923	0,923	0,923
MFR (190/2,16) [g/10 min]	0,28	0,23	0,68

Tabelle 5: Verwendete Versuchsmaterialien

Table 5: Used test materials

2.2 Bestimmung der Prozessparameter

Die mechanischen Eigenschaften der Schlauchfolie sollen mittels eines statistischen Modells aus den Prozessparametern berechnet werden. Daher ist es notwendig, diese Prozessparameter während des Experimentes zu messen. Im Folgenden werden die benötigten Prozessparameter aufgezählt, und anschließend die Methodik der Messung des jeweiligen Parameters erklärt.

Am Werkzeugaustritt	<ul style="list-style-type: none"> • Schmelzgeschwindigkeit • Schmelztemperatur • Blasendurchmesser • Foliendicke • Massedurchsatz
An der Frostlinie	<ul style="list-style-type: none"> • Foliengeschwindigkeit • Folientemperatur • Blasendurchmesser • Foliendicke • Frostlinienhöhe
Am Kühlringaustritt	<ul style="list-style-type: none"> • Luftvolumenstrom • Lufttemperatur

Der Massedurchsatz wird mit einer Masse/Drehzahl-Messung bestimmt. Hierzu wird die in einem bestimmten Zeitintervall aus dem Werkzeug austretende Masse -d.h. der Massedurchsatz- gewogen und in Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl des Extruders dargestellt. Die Durchsätze sind dabei in dem gewählten Drehzahlbereich linear zur Schneckendrehzahl, da es sich bei dem Extruder um einen fördersteifen Extruder handelt. Foliendicke und Blasendurchmesser am Werkzeugaustritt ergeben sich aus der Düsengeometrie des Blaskopfs und werden mit Spaltweite und Düsendurchmesser gleichgesetzt. Die Schmelztemperatur am

Werkzeugaustritt ist während des laufenden Prozesses messtechnisch nur schwer zugänglich, da Temperatursonden im Fließkanal unweigerlich zu Dünnstellen in der Folie führen würden. Aus diesem Grund wird für die Modellbildung die Schmelzetemperatur mit der Blaskopftemperatur gleichgesetzt. Die Schmelzegeschwindigkeit am Werkzeugaustritt ergibt sich rechnerisch aus Massedurchsatz, Düsengeometrie und Schmelzedichte, wobei die Schmelzedichten der verwendeten Materialien mittels pVT-Messungen ermittelt werden. Hierbei wird der Effekt des Schwellens, der direkt nach dem Werkzeugaustritt zu einer Abnahme der Schmelzegeschwindigkeit führt, vernachlässigt.

Der Prozesszustand an der Frostlinie wird mit einem digitalen Bildverarbeitungssystem ermittelt (siehe Kapitel 2.2.1). Dieses System misst die Frostlinienhöhe, den Blasendurchmesser und die Foliengeschwindigkeit. Letztere entspricht bei der Schlauchfolienextrusion der Geschwindigkeit der Abzugswalzen. Die Foliendicke an der Frostlinie ergibt sich rechnerisch aus Massedurchsatz, Foliengeschwindigkeit, Blasendurchmesser und Dichte, wobei die Dichten wiederum mittels pVT-Messungen bestimmt werden. Die Folientemperatur wird mit einem Infrarot-Strahlungspyrometer gemessen. Der Kühlluftvolumenstrom wird über den Luftdruck bestimmt, der im Zufuhrrohr vom Gebläse zum Kühlring gemessen wird [Wal'96].

2.2.1 Digitales Bildverarbeitungssystem

Das digitale Bildverarbeitungssystem besteht aus den Komponenten CCD-Kamera, Frame-Grabber, Rechner und Software. Während des Experimentes werden zunächst Aufnahmen von der Schlauchbildungszone gemacht. Die eigentliche Bestimmung der Größen Frostlinienhöhe, Blasendurchmesser und Foliengeschwindigkeit an der Frostlinie wird offline, d.h. nach dem Experiment, mit einer Auswertungssoftware durchgeführt.

Während für die Ermittlung der Schlauchkontur und der Frostlinienhöhe eine einzige Aufnahme ausreicht, werden für die Ermittlung der Foliengeschwindigkeitsverteilung mehrere Aufnahmen der Schlauchbildungszone in zeitlich konstanten Abständen benötigt. Hierzu speichert eine Aufnahmesoftware die einzelnen, aufeinander folgenden Bilder auf einer Festplatte. Für die nachträgliche Erfassung der Größen Frostlinienhöhe, Blasendurchmesser und Foliengeschwindigkeit wird diese gespeicherte Bilderserie in einer Auswertungssoftware geöffnet und bearbeitet. Die Auswertung der Bilderserie hat dabei zwei Aufgaben. Zum einen muss der Rand der Blase erkannt werden, da er die Blasenkontur, und damit den Blasendurchmesser an der Frostlinie, definiert. Zum anderen muss aus der Bilderserie die lokale Foliengeschwindigkeitsverteilung, und damit die Foliengeschwindigkeit an der Frostlinie, ermittelt werden.

Zur Bestimmung der Blasenkontur muss der Rand des Folienschlauches von dem digitalen Bildverarbeitungssystem erkannt werden. Die Aufgabe, die für das menschliche Auge bei der Betrachtung des Schlauchfolienextrusionsprozesses einfach erscheint, ist für die Auswertungssoftware zunächst keine triviale Anforderung. Die CCD-Kamera liefert der Software als Information ein zweidimensionales Bild mit 256 unterschiedlichen Graustufen. Ein Rand kann dann mit den Augen des Rechners nur da erkannt werden, wo eine Änderung der Graustufen stattfindet, also ein Wechsel von Hell nach Dunkel oder umgekehrt. Diese Wechsel treten aber bei der Betrachtung der Schlauchbildungszone sehr häufig auf, bei transparenten Folien zudem auch vermehrt durch die freie Sicht auf Hintergrundobjekte.

Für die Aufnahmen der Schlauchbildungszone wurde daher darauf geachtet, durch eine entsprechende Beleuchtungstechnik den Helligkeitsunterschied zwischen dem Folienschlauch und der Umgebung zu erhöhen und die störenden Hintergrundobjekte auszublenden. Die entwickelte Lösung entspricht dabei dem Prinzip der Gegenlichtaufnahme, bei der die Lichtquelle in Form einer Neonröhre von der Kamera aus gesehen hinter dem Folienschlauch positioniert ist (Bild 2). Als Ergebnis dieser Beleuchtungstechnik liefert die Kamera ein Bild, auf dem der Folienschlauch ganz hell erscheint und der Hintergrund dunkler (Bild 3).

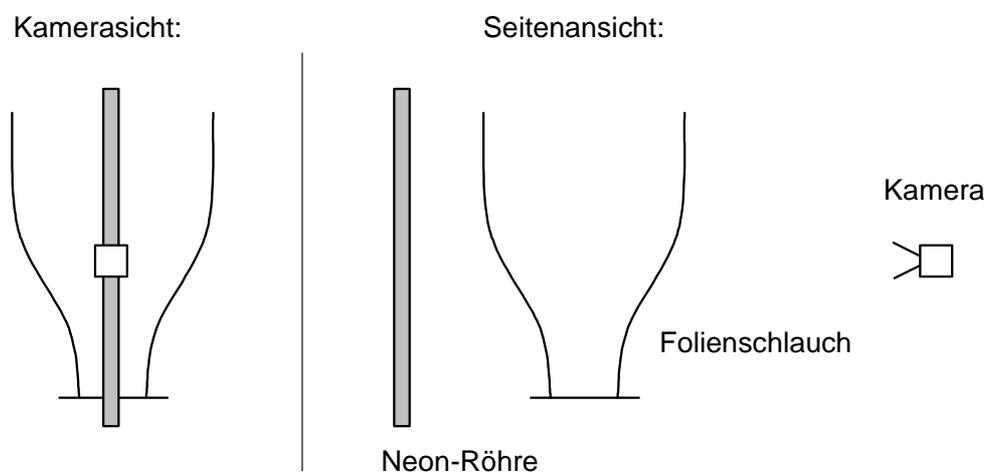


Bild 2: Räumliche Anordnung von Kamera und Leuchte bei der Gegenlichtaufnahme

Fig. 2: Local layout of camera and light at backlighted photo technique

Untersuchungen mit dieser Beleuchtungstechnik an industriellen Anlagen haben zwei Erkenntnisse gebracht: Die Technik der Gegenlichtaufnahme funktioniert umso besser, je dunkler die Umgebung ist. Helle Hallenbeleuchtung oder seitliche Sonneneinstrahlung kann das Ergebnis beträchtlich beeinflussen. Bei Anlagen mit Innenluftaustausch versperrt der Kühldorn die Sicht der Kamera auf die dahinter positionierte Lampe. Dadurch fällt nicht mehr genug Licht in die Kamera. Abhilfe schaffen hierbei zwei Neonröhren, die nicht mehr zentral hinter dem Werkzeug sondern aus Sicht der Kamera rechts und links des Kühldorns angeord-

net sind. Bei dieser Anordnung ist zu beachten, dass kein Licht direkt in die Kamera fällt, d.h. dass die Lampen aus Sicht der Kamera noch hinter der Folienblase verschwinden.

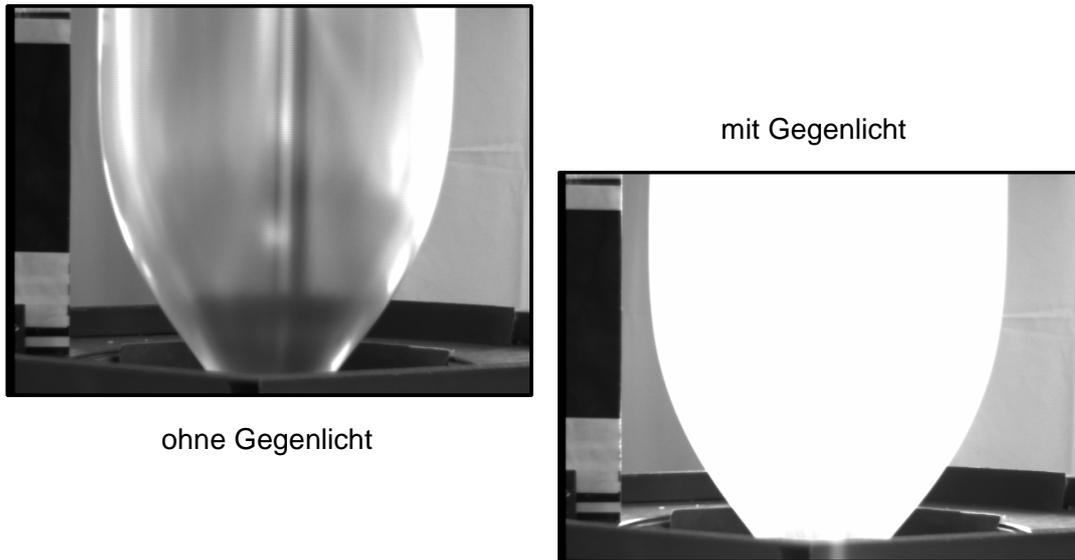


Bild 3: Vergleich des Kamerabildes ohne und mit Gegenlicht

Fig. 3: Comparison of normal and backlighted camera picture

Das Ergebnis der Gegenlichtaufnahme ist demnach eine Art Schwarz-Weiß-Bild. Für die Auswertungssoftware bedeutet dies nun einen eindeutigen Wechsel der Graustufen, so dass die Blasenkontur von dem Programm erfasst werden kann (Bild 4). Der Blasendurchmesser an der Frostlinienhöhe und die Frostlinienhöhe selbst werden an dem Punkt ermittelt, an dem die Aufweitung des Folienschlauches abgeschlossen ist.

Zur Bestimmung der Foliengeschwindigkeitsverteilung wird auf dem Folienschlauch eine Markierung in Form eines Klebestreifens aufgebracht. Diese Markierung befindet sich an der Stelle auf dem Umfang des Schlauches, die aus Sicht der Kamera den Rand bildet. Die Markierung wird kurz nach dem Austritt der Schmelze aus dem Werkzeug mit der Hand auf den Schlauch aufgeklebt und bewegt sich dann zusammen mit der Folie nach oben (Bild 5). Das Bildverarbeitungssystem nimmt parallel zu dieser Bewegung der Markierung Bilder in zeitlich diskreten Abständen auf. Aus der Beziehung zwischen der Positionsänderung der Markierung auf zwei aufeinander folgenden Bildern und dem zeitlichen Abstand zwischen den Bildern lässt sich dann die lokale Foliengeschwindigkeit ermitteln. Dabei berechnet sich der zurückgelegte Weg der Markierung nach dem Satz des Pythagoras aus den Differenzen der Koordinaten der zurückgelegten Wege in Höhen- und Breitenrichtung. Die Foliengeschwindigkeit an der Frostlinienhöhe entspricht der lokalen Foliengeschwindigkeit an dem Punkt, an dem die Aufweitung des Folienschlauches abgeschlossen ist.

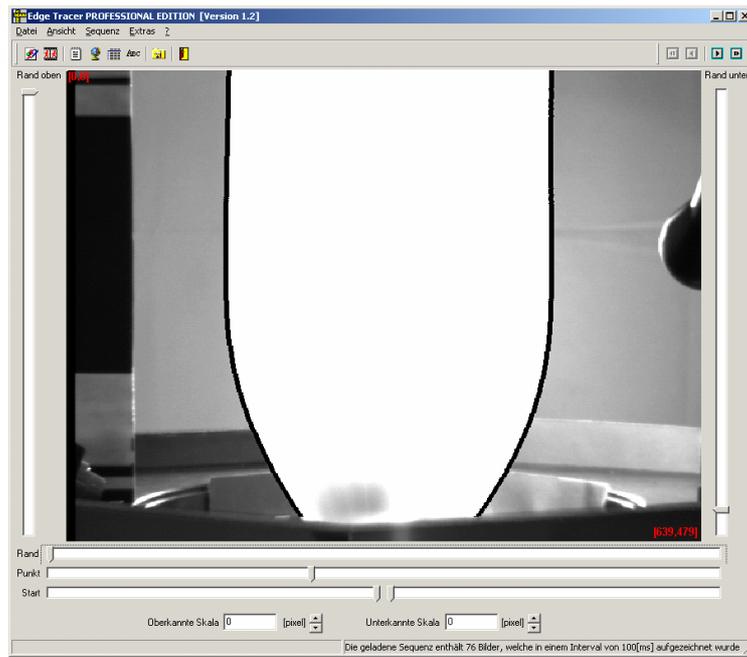


Bild 4: Erkennung der Blasenkontur

Fig. 4: Detection of bubble contour

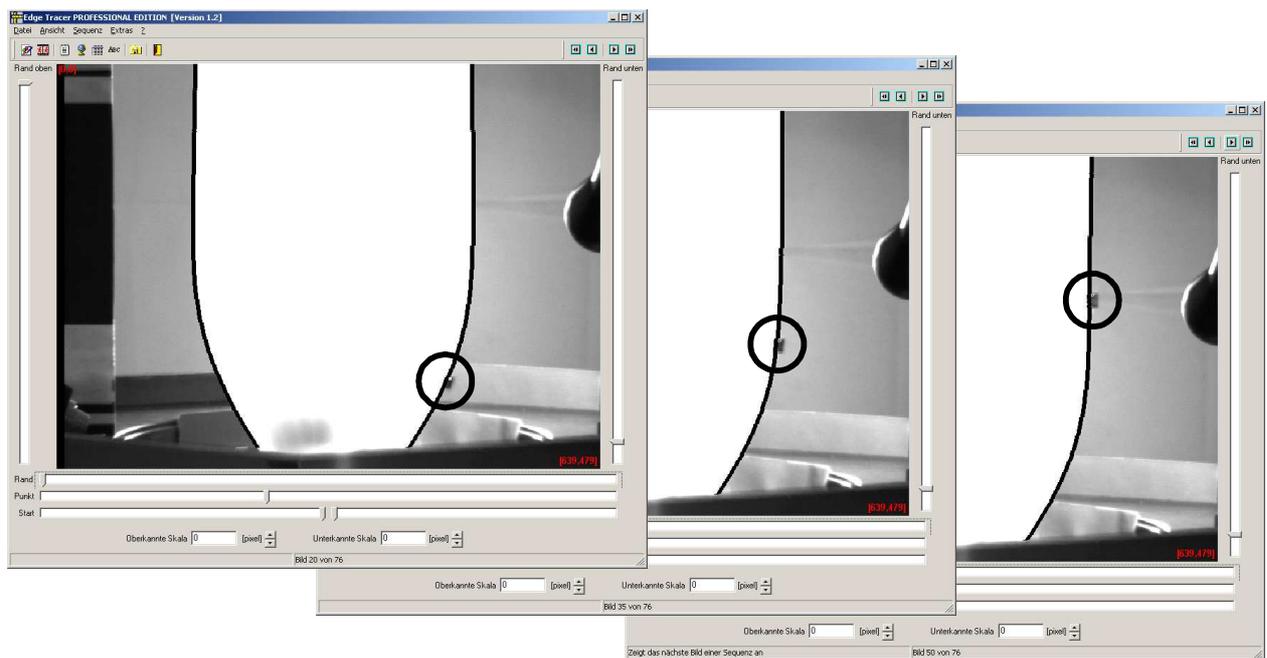


Bild 5: Erkennung der lokalen Foliengeschwindigkeit

Fig. 5: Detection of local film velocity

2.3 Bestimmung der mechanischen Folieneigenschaften

2.3.1 Zugversuch

Es werden Zugversuche nach DIN EN ISO 527 durchgeführt. Die Folienbreite entspricht der in der DIN empfohlenen Breite von 15 mm. Die Einspannlänge beträgt 20 mm. Zum Einspannen der Probe werden pneumatische Spannvorrichtungen verwendet. Die Abzugsgeschwindigkeit wird auf 100 %/min bzw. 20 mm/min eingestellt. Der Zugversuch liefert als Ergebnis ein Kraft/Weg-Diagramm, welches mittels des Probenquerschnitts und der Einspannlänge in ein Spannung/Dehnungs-Diagramm umgerechnet wird. Aus diesem Diagramm lassen sich dann der E-Modul, die Spannung bei 100 % Dehnung und die Zugfestigkeit ermitteln. Alle Größen werden jeweils in Extrusions- und in Umfangsrichtung gemessen. Pro Versuchspunkt werden beim Zugversuch sieben Proben untersucht und die Messwerte gemittelt. Um bei der Auswertung des E-Moduls eventuelle Einlauf- und Setzungseffekte der Probekörper in den Einspannungen zu eliminieren, wird der E-Modul erst ab einer Dehnung von 1 % bestimmt. Außerdem werden alle Kurven bei der Auswertung des E-Moduls bis zu dem gleichen Wert der Dehnung (5 %) betrachtet, um untereinander vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Demnach entspricht der E-Modul im Rahmen dieser Arbeit dem Sekantenmodul des Kurvenabschnitts der Spannung/Dehnungs-Kurve zwischen 1 % und 5 % Dehnung.

2.3.2 Schrumpfversuch

Der Schrumpfversuch nach DIN 53 543 empfiehlt die Schrumpfung eines streifenförmigen Probekörpers in einem temperierten Ölbad. Dieses Verfahren hat in der Vergangenheit allerdings eine sehr breite Streuung der Versuchsergebnisse gezeigt. Die Gründe hierfür liegen zum einen beim Eintauchen der Probe in das Ölbad. Anstatt sofort in dem Ölbad zu versinken, legt sich die Probe auf Grund von Oberflächenspannungen erst auf der Öloberfläche ab, bevor sie anschließend versinkt. Hierbei erfährt sie eine erste undefinierte thermische Beeinflussung. Auch die Beschwerung eines Endes der Folienprobe durch eine Büroklammer, wie in der DIN empfohlen, verhindert diesen Effekt nicht. Zum anderen ist die Probe nach der Schrumpfung in dem Ölbad stark gewellt, wodurch das Messen der Schrumpflänge mit einem linearen Maßstab erschwert wird. Daher wurde eine alternative Methode zur Schrumpfung von Folien entwickelt. Hierbei werden die streifenförmigen Prüfkörper anstatt im temperierten Ölbad in einem heißen Luftstrom geschrumpft. Die Versuchsanordnung ist auf Bild 6 zu sehen. Sie besteht aus einem Rohr, dessen Durchmesser der doppelten Probenbreite entspricht. In dieses Rohr wird mittels einer Heißluftpistole ein heißer Luftstrom eingeleitet.

Nach einer Einlaufstrecke trifft die Heißluft auf die Probe. Dabei wird die Probe längs angeströmt. Zur Positionierung der Probe in dem Rohr wird diese mit einem Draht gehalten, der durch die Probe und zwei Bohrungen in dem Rohr gesteckt wird. Die Probe hat eine Breite von 15 mm und eine Gesamtlänge von 130 mm. Die Messlänge beträgt in Anlehnung an DIN 53 543 100 mm, so dass die Schrumpfung in dem Bereich der Messlänge weder durch den Draht noch durch Randeffekte am Ende der Probe beeinflusst wird. Der Schrumpf wird jeweils in Extrusions- und in Umfangsrichtung gemessen. Pro Versuchspunkt werden beim Schrumpfversuch neun Proben untersucht. Zur Bestimmung des Schrumpfwerts werden der größte und der kleinste Messwert einer Versuchreihe herausgestrichen, die übrigen sieben Messungen werden gemittelt.

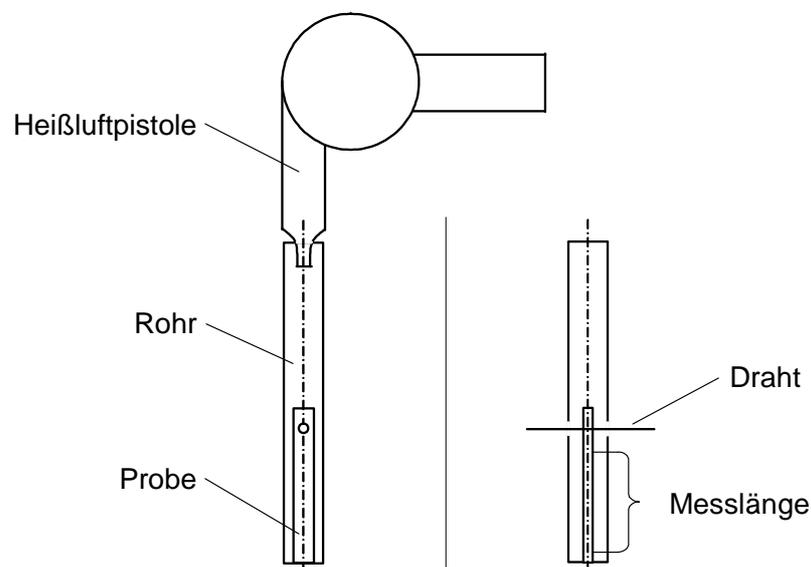


Bild 6: Versuchsanordnung beim Schrumpfversuch

Fig. 6: Test layout at shrinkage experiment

Die Streuung der Versuchsergebnisse der alternativen Schrumpfmethode im Heißluftstrom liegt unter der der Messwerte der Schrumpfung im heißen Ölbad. Dies ist hauptsächlich auf die verringerte Wellung der Folienproben, und die dadurch verbundene genauere Messung der Schrumpflänge, zurückzuführen.

2.4 Bestimmung der Doppelbrechung

2.4.1 Natur der Doppelbrechung

Alle optisch anisotropen Materialien zeigen Doppelbrechung. Dabei zählen zu den optisch anisotropen Medien (Materialien) neben orientierten Kunststoffen auch viele Kristalle. Die Ursache für die doppelbrechende Eigenschaft ist die Unterschiedlichkeit der Brechungsindi-

zes je nach Raumrichtung, denn optisch anisotrope Materialien besitzen naturgemäß auch richtungsabhängige Brechungsindizes. Dennoch gibt es auch in anisotropen Medien Symmetrie-Vorzugsrichtungen. Diese Vorzugsrichtungen werden optische Achsen genannt und entsprechen bei orientierten Kunststoffen den Orientierungsrichtungen. Dabei handelt es sich bei den optischen Achsen um Richtungen in jedem Punkt des doppelbrechenden Mediums.

Liegt ein doppelbrechender Kristall auf einem Stück bedrucktem Papier, so sieht man die Schrift durch den Kristall doppelt. Diese Erscheinung beruht darauf, dass eine Lichtwelle bei Eintritt in ein optisch anisotropes Medium in zwei Teilwellen aufgeteilt wird, den ordentlichen (o) und den außerordentlichen (ao) Strahl (Bild 7). Diese beiden Teilwellen besitzen zwei orthogonale Schwingungsrichtungen, d.h. sie sind senkrecht zueinander polarisiert. Die Schwingungsebene des außerordentlichen Strahls liegt immer im Hauptschnitt der Ebene, die durch das Einfallslot und die optische Achse aufgespannt wird. In Bild 7 entspricht der Hauptschnitt der Zeichenebene. Die Schwingungsrichtung des ordentlichen Strahls verläuft senkrecht zum Hauptschnitt, also auch senkrecht zur optischen Achse. Der ordentliche und der außerordentliche Strahl passieren das Medium mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, da in Richtung der jeweiligen Schwingungsrichtung unterschiedliche Brechungsindizes vorliegen, und der Brechungsindex per definitionem die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lichtwelle im Vakuum im Verhältnis zur Ausbreitungsgeschwindigkeit in dem betreffenden Medium beschreibt. So liegt zwischen den beiden Teilwellen nach Verlassen des Materials ein Gangunterschied Γ vor, wobei der Gangunterschied als der Abstand zweier Intensitätsmaxima der beiden Teilwellen definiert ist. Die Doppelbrechung in Form der doppelten Schrift ist mit dem Auge jedoch nur dann sichtbar, wenn das einfallende Licht schräg zur optischen Achse eintritt. Tritt das Licht senkrecht zur optischen Achse ein, liegen ordentlicher und außerordentlicher Strahl übereinander (Bild 7). Das Phänomen der doppelten Schrift ist nun nicht mehr erkennbar, die Doppelbrechung und somit der Gangunterschied bleiben jedoch [SK'79].

Der Gangunterschied ist abhängig von Probendicke d und den Brechungsindizes in Richtung des ordentlichen (n_o) und des außerordentlichen (n_{ao}) Strahls. Er berechnet sich wie folgt [Sch'90]:

$$\Gamma = d \cdot |n_{ao} - n_o| \quad (1)$$

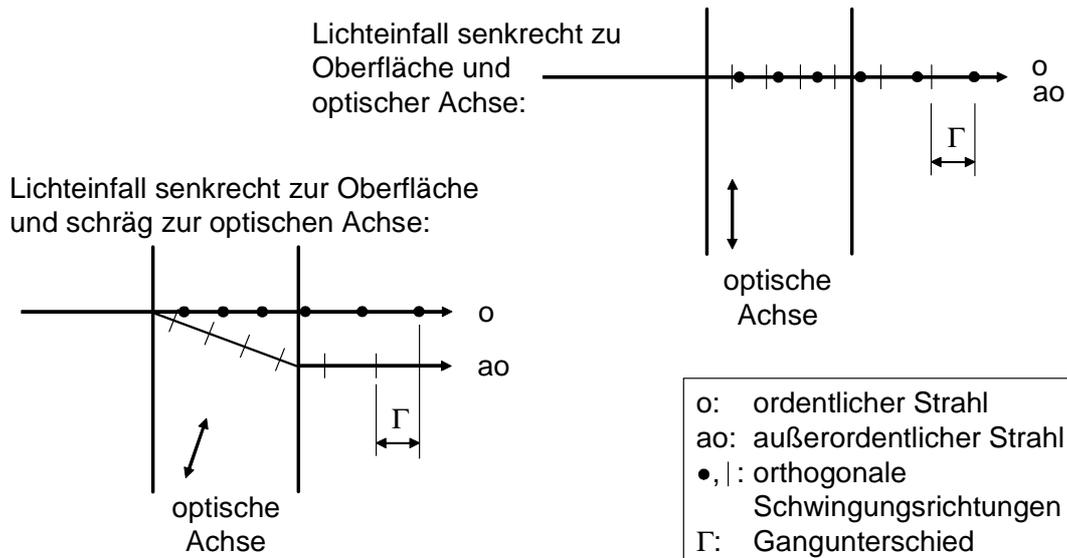


Bild 7: Doppelbrechung bei optisch anisotropen Medien

Fig. 7: Birefringence in anisotropic media

Eine Methode zur Bestimmung der Doppelbrechung eines anisotropen Mediums, in diesem Fall einer orientierten Kunststoffolie, ist die Messung des optischen Gangunterschieds den das Medium erzeugt. Aus dem gemessenen Gangunterschied lässt sich dann mit Kenntnis der Probendicke nach Gl(1) die Differenz der Brechungsindizes bestimmen, welche per definitionem die Doppelbrechung ist. Der optische Gangunterschied, den die Kunststoffolie erzeugt, wird hierzu in einem speziellen Versuchsaufbau vermessen, dessen physikalisch optische Grundlagen zunächst erläutert werden.

2.4.2 Physik der Messmethodik

Die Polarisation von Lichtwellen, wie sie bei der Entstehung des ordentlichen und außerordentlichen Strahls durch Doppelbrechung auftritt, ist ein wichtiges Merkmal optischer Strahlung. Neben dem natürlichen, unpolarisierten Licht unterscheidet man drei verschiedene Polarisationszustände: linear, elliptisch und zirkular polarisiert (Bild 8). Linear polarisiertes Licht schwingt in einer Ebene. Allgemein erhält man linear polarisiertes Licht durch Doppelbrechung bei einem Gangunterschied Γ von einer halben Wellenlänge bzw. dem Vielfachen der halben Wellenlänge: $\Gamma = m \cdot \lambda/2$ ($m = 0, 1, 2, \dots$). Bei dieser Wellenform liegen die Knotenpunkte des ordentlichen und des außerordentlichen Strahls übereinander. Elliptisch und zirkular polarisiertes Licht schwingt im Gegensatz zu linear polarisiertem Licht in zwei Ebenen, die senkrecht zueinander stehen. Es hängt nun vom Amplitudenverhältnis und dem Gangunterschied zwischen ordentlichem und außerordentlichem Strahl ab, ob das Licht elliptisch oder zirkular polarisiert ist. Allgemein erhält man zirkular polarisiertes Licht durch

Doppelbrechung bei gleichen Amplituden der beiden Strahlen und bei einem Gangunterschied Γ von $\lambda/4$ bzw. dem ungeradzahligen Vielfachen hiervon: $\Gamma = m \cdot \lambda/4$ ($m = 1, 3, 5, \dots$). In allen anderen Fällen entsteht durch Doppelbrechung elliptisch polarisiertes Licht.

Schwingungsrichtung in der Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung:

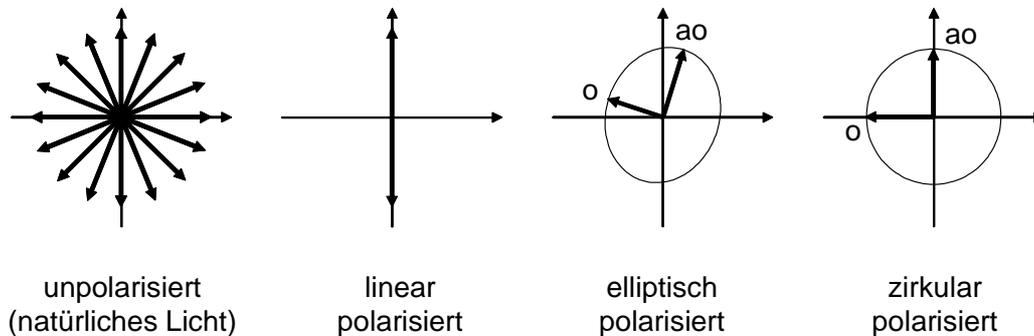


Bild 8: Linear, elliptisch und zirkular polarisiertes Licht

Fig. 8: Linearly-, elliptically- and circularly-polarized light

Bei unpolarisiertem (natürlichem) Licht sind die Schwingungsrichtungen der kurzen und voneinander unabhängigen Wellenzüge regellos verteilt. Daher bezeichnet man natürliches Licht als inkohärent (lat. unzusammenhängend). Für die Polarisation durch z.B. Doppelbrechung von natürlichem Licht bedeutet das, dass sich an der ständigen Änderung der Schwingungsrichtungen vor dem doppelbrechenden Medium hinter dem Medium nichts ändert. Auch hinter dem Medium schwankt der Gangunterschied völlig regellos. Ein schwankender Gangunterschied ist jedoch messtechnisch nicht zu erfassen, daher arbeitet man bei optischen Messungen häufig mit linear polarisiertem Licht. Die festgelegte Schwingungsrichtung vor dem doppelbrechenden Medium führt dann folglich auch zu einem festen Gangunterschied hinter dem Medium.

Tritt nun linear polarisiertes Licht in ein doppelbrechendes Medium ein, so kann die aus beiden Teilwellen (o , ao) resultierende Welle wiederum linear, elliptisch oder zirkular polarisiert sein. Maßgebend für den Polarisationszustand sind, wie oben erläutert, der Gangunterschied und das Amplitudenverhältnis von ordentlichem und außerordentlichem Strahl. In einem Dunkelfeld zwischen Polarisator und Analysator, d.h. Polarisator und Analysator sind um 90° verdreht bzw. gekreuzt, ergibt elliptisch polarisiertes Licht keine Dunkelstellung (Bild 9) im Analysator. Vielmehr ist durch den Analysator die resultierende Welle zu sehen, die sich aus den Komponenten des elliptisch polarisierten Strahls zusammensetzt, die parallel zum Analysatorgitter schwingen.

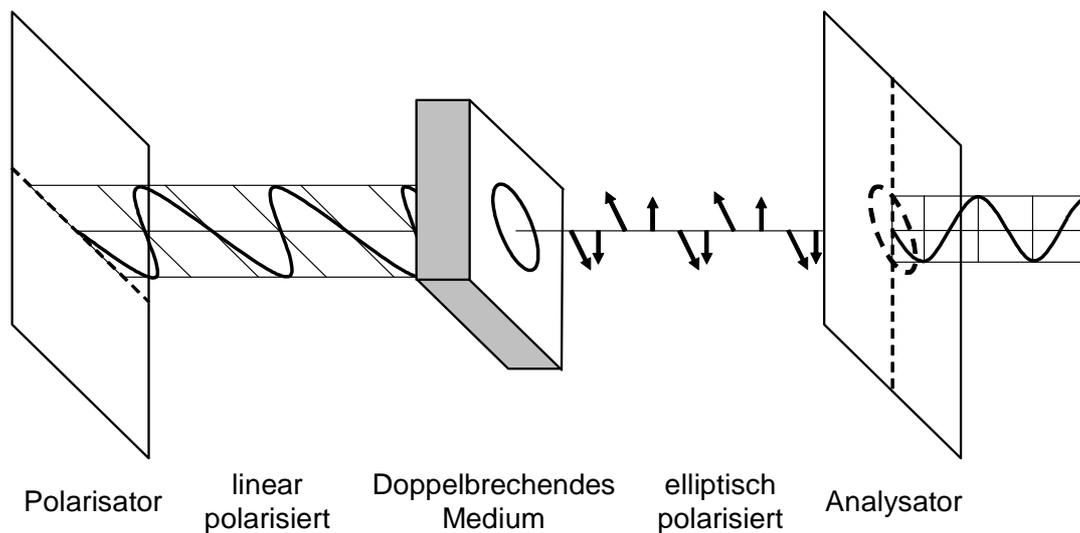


Bild 9: Doppelbrechendes Medium im Dunkelfeld gekreuzter Polarisatoren

Fig. 9: Birefringent medium in the dark field of crossed polarizers

Die Intensität des Lichts, welches den Analysator passiert, I_A ist dabei abhängig von dem Gangunterschied Γ und von dem Winkel α zwischen der einfallenden, linear polarisierten Welle und der optischen Achse und berechnet sich nach folgender Gleichung, die im Dunkelfeld zwischen gekreuzten Polarisatoren gilt [Wah'69].

$$I_A = I_0 \cdot \sin^2(2 \cdot \alpha) \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot \Gamma\right) \quad (2)$$

Die Intensität I_A kann den Wert 0 annehmen für den Fall, dass die Schwingungsebene der linearisierten Welle des Polarisators parallel zur optischen Achse des doppelbrechenden Mediums ausgerichtet ist ($\alpha = 0^\circ$). In diesem Fall wird der Lichtstrahl nicht gebrochen, der Analysator bleibt dunkel. Die Intensität wird maximal für $\alpha = 45^\circ$ und einen Gangunterschied Γ von $\lambda/2$. In diesem Fall ist die auslaufende Welle linear polarisiert und senkrecht zur einfallenden, so dass sie parallel zum Analysator schwingt, und somit durch diesen sichtbar ist.

Die Bestimmung des Gangunterschieds, den eine Kunststoffolie hervorruft, soll im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls im Dunkelfeld gekreuzter Polarisatoren erfolgen. Eine sehr genaue Methode zur Bestimmung des Gangunterschieds bei geringem Präparationsaufwand ist die Kompensationsmethode [Wil'70], die hier gewählt wird. Als Kompensator kommt ein Wollaston-Prisma zum Einsatz, das nach seinem Erfinder *William Hyde Wollaston* (1766 - 1828) benannt ist (Bild 10). Es besteht aus zwei Kristallkeilen gleichen Materials und mit identischen Brechungsindizes. Die optischen Achsen der beiden Keile verlaufen jeweils parallel zur Kathetenfläche und stehen senkrecht aufeinander. Die Keile liegen an den Hypotenuseflächen aufeinander, so dass die Kathetenflächen paarweise zueinander parallel

verlaufen. In der Regel sind die beiden Kristallkeile miteinander verklebt. Da der Gangunterschied abhängig von der Dicke b ist, ergibt sich beim Wollaston-Prisma eine Abhängigkeit des Gangunterschieds vom Ort x .

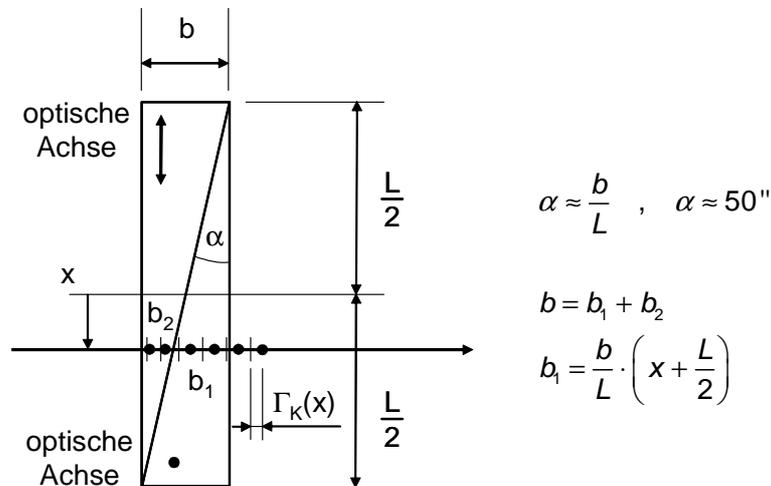


Bild 10: Wollaston-Prisma

Fig. 10: Wollaston prism

Trifft nun linear polarisiertes Licht, dessen Schwingungsrichtung nicht parallel zu den optischen Achsen der Kristallkeile verläuft, auf das Wollaston-Prisma, so entstehen im Kompensator durch Doppelbrechung der ordentliche und der außerordentliche Strahl. Da der Lichteinfall lotrecht zu den optischen Achsen erfolgt, liegen beide Strahlen übereinander. Die Winkelabweichung der Strahlen an der schrägen Grenzfläche kann vernachlässigt werden, da der Winkel α bei dem verwendeten Wollaston-Prisma sehr klein ist, ca. 50 (Bogen) Sekunden. Für den linken Keil berechnet sich der Gangunterschied Γ_1 zwischen ordentlichem und außerordentlichem Strahl nach Gl(1) wie folgt:

$$\Gamma_1 = b_1 \cdot |n_{ao} - n_o| \quad (3)$$

Beim Übergang der beiden Strahlen vom linken in den rechten Kristallkeil, findet eine erneute Doppelbrechung statt, wodurch ordentlicher und außerordentlicher Strahl ihre Rollen vertauschen. Der ordentliche Strahl schwingt jetzt in Richtung des außerordentlichen Strahls und umgekehrt. Für den Gangunterschied Γ_2 im rechten Kristallkeil bedeutet dies einen Vorzeichenwechsel.

$$\Gamma_2 = -b_2 \cdot |n_{ao} - n_o| \quad (4)$$

Der gesamte Gangunterschied Γ_K des Kompensators ist demnach:

$$\Gamma_K = \Gamma_1 + \Gamma_2 = (b_1 - b_2) \cdot |n_{ao} - n_o| \quad (5)$$

Da die Breiten b_1 und b_2 an jeder Stelle des Kompensators einen anderen Wert annehmen, verändert sich somit auch der Gangunterschied Γ_K des Kompensators mit dem Ort x . Aus geometrischen Beziehungen (siehe Bild 10) folgt für den Gangunterschied $\Gamma_K(x)$ an der Stelle x :

$$\Gamma_K(x) = \frac{2b}{L} \cdot |n_{ao} - n_o| \cdot x \quad (6)$$

Einsetzen von Gl(6) in Gl(2) ergibt für einen festen Winkel α :

$$I_A = I_0(\alpha) \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{2b}{L} \cdot |n_{ao} - n_o| \cdot x \right) \quad (7)$$

Die Abhängigkeit des Gangunterschieds des Wollaston-Prismas vom Ort x äußert sich im Dunkelfeld zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren in einem Streifenbild ähnlich dem Interferenzspektrum durch Beugung z.B. an einem optischen Gitter (Bild 11). Dieses Streifenbild ist auf die Abhängigkeit der Intensitätsverteilung des Analysators von der \sin^2 -Funktion nach Gl(7) zurückzuführen. In der Kompensatormitte ($x = 0$) wird durch die Kompensation der Gangunterschiede der beiden Kristallkeile der gesamte Gangunterschied zu null. Dies führt zu einer Auslöschung (Dunkelstelle) des Lichts im Streifenbild an dieser Stelle. Dieser Streifen wird im Folgenden als Nullkompensationslinie bezeichnet. Die anderen dunklen Streifen im Streifenbild des Analysators ergeben sich an den Stellen x , an denen der Gangunterschied betragsmäßig den Wert λ oder ein Vielfaches von λ annimmt, da die \sin^2 -Funktion an diesen Stellen Nullstellen besitzt. Man spricht von den Nullstellen höherer Ordnung. Anschaulich bedeutet dies, dass die den Kompensator verlassenden Wellen linear polarisiert sind und senkrecht zum Analysator schwingen, so dass sie diesen nicht passieren können.

Die Übergangsbereiche zwischen den dunklen Streifen erscheinen auf Bild 11 als Helligkeitsverläufe von schwarz nach weiß. Hier ist zu erwähnen, dass die Aufnahmen mit einer Schwarz-Weiß-Kamera gemacht werden. In der Realität ergeben sich bei der Verwendung von weißem Licht als Leuchtquelle, wie es hier der Fall ist, bunte Farbverläufe, bei denen jede einzelne Farbe des weißen Lichts durch die Brechung als entsprechender farbiger Streifen auf dem Bild erscheint. Der Ort des farbigen Streifens ist dabei nach Gl(7) abhängig von der Wellenlänge λ der jeweiligen Farbe. Rotes Licht, mit einer größeren Wellenlänge als blaues Licht, wird hierbei stärker gebrochen. Daher liegt der rote Streifen näher an der Nullkompensationslinie als der blaue Streifen. Da die Streifen der einzelnen Farben jedoch nahtlos

ineinander übergehen erscheinen die Nullstellen höherer Ordnung auf dem Schwarz-Weiß-Bild der Kamera als ein grauer Streifen, wobei die Streifen mit zunehmender Ordnung zum einen heller und zum anderen breiter werden.



Bild 11: Wollaston-Prisma im Dunkelfeld gekreuzter Polarisatoren

Fig. 11: Wollaston prism in the dark field of crossed polarizers

Die verwendete Kompensationsmethode zur Bestimmung des Gangunterschieds basiert auf der Grundlage, dass der durch die Doppelbrechung hervorgerufene Gangunterschied der Kunststofffolie Γ_F durch das Wollaston-Prisma, das ebenfalls doppelbrechende Eigenschaft hat, vergrößert, verringert oder vollständig kompensiert wird. Den schematischen Versuchsaufbau bei der Kompensationsmethode zeigt Bild 12 [Bro'84]. Die Realisierung des Versuchsaufbaus erfolgt im Strahlengang eines Makroskops der Firma Wild, Heerbrugg, Schweiz, Typ M 420. Als Lampe dient eine Weißlichtquelle. Das Wollaston-Prisma und die Folie werden in den Strahlengang zwischen die beiden Polarisatoren eingebracht. Oberhalb des Objektivs des Makroskops ist eine CCD-Kamera zur Aufnahme des Streifenbildes angebracht. Zur Justierung kann die Probe zudem auch mit dem Auge durch das Okular des Makroskops betrachtet werden.

Im Dunkelfeld zwischen den gekreuzten Polarisatoren verursachen sowohl die Kunststofffolie als auch das Wollaston-Prisma einen Gangunterschied. Die hervorgerufenen Gangunterschiede der Folie Γ_F und des Kompensators Γ_K addieren sich hierbei nach folgender Gleichung.

$$\Gamma_{ges} = \Gamma_F + \Gamma_K(x) \quad (8)$$

Für die Intensitätsverteilung des Kamerabildes ergibt sich durch das Einsetzen in Gl(2) mit Gl(6) für einen festen Winkel α :

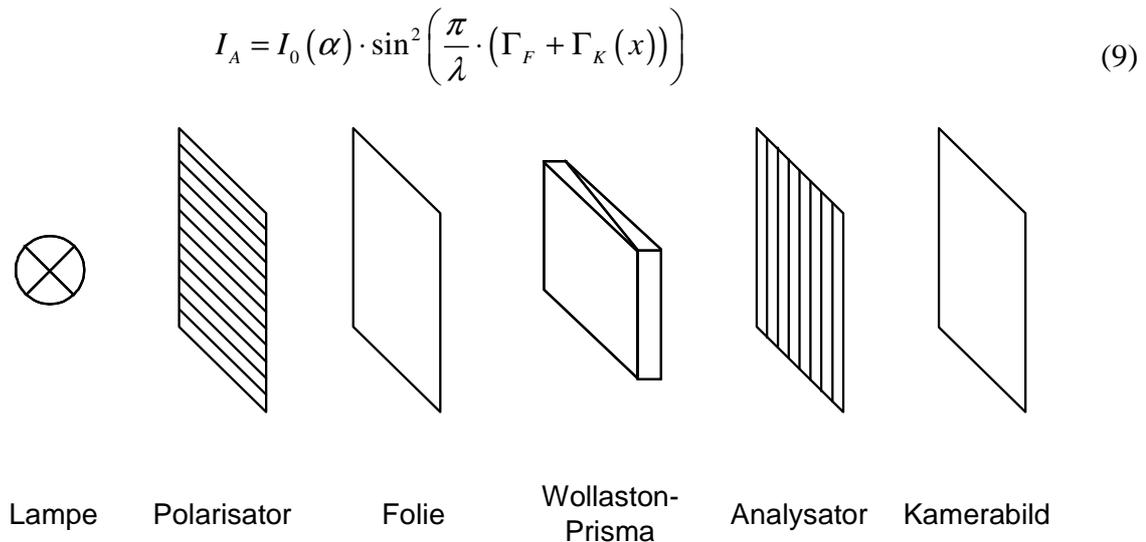


Bild 12: Schematischer Versuchsaufbau der Kompensationsmethode

Fig. 12: Schematic setup of compensation method

Anschaulich bedeutet dies, dass das Streifenbild von Bild 11 zunächst erhalten bleibt, wenn man zusätzlich zu dem Wollaston-Prisma die Kunststofffolie mit in das Dunkelfeld einbringt, da weiterhin die Abhängigkeit des Gangunterschieds von der \sin^2 -Funktion gegeben ist. Durch die Addition der verursachten Gangunterschiede von Folie und Kompensator verschiebt sich jedoch die Nullkompensationslinie und damit das gesamte Streifenbild nach rechts oder links. So wird z.B. aus einer ursprünglichen Dunkelstelle durch Kompensation des Gangunterschiedes an dieser Stelle ein heller Streifen. Die Verschiebung der Nullkompensationslinie ist ein Maß für den Gangunterschied Γ_F , den die Kunststofffolie hervorruft, und somit für ihre Doppelbrechung. Zur Messung von Γ_F wird daher zunächst nur das Wollaston-Prisma in den Strahlengang des Makroskops eingebracht und eine Aufnahme von dem sich ergebenden Streifenbild gemacht. Danach wird zusätzlich zu dem Wollaston-Prisma die Kunststofffolie in den Strahlengang eingebracht und wiederum eine Aufnahme von dem sich einstellenden Streifenbild gemacht. Auf beiden Bildern wird im Anschluss hieran die Lage der Nullkompensationslinie vermessen. Aus der Differenz dieser beiden Messwerte, der Verschiebung der Nullkompensationslinie, wird der von der Kunststofffolie verursachte Gangunterschied ermittelt Γ_F (Bild 13).

Die Differenzmessung der Nullkompensationslinie auf den Streifenbildern mit und ohne Kunststofffolie wird mit einer am IKV entwickelten Software durchgeführt (Bild 14). Die Software sucht hierzu mit einem einfachen Algorithmus auf den von der CCD-Kamera gelieferten Bildern den dunklen Mittelstreifen, die Nullkompensationslinie. Den Suchbereich des Algorithmus innerhalb des Bildes kann der Anwender definieren, indem er eine linke und

rechte, obere und untere Grenze setzt. Als Ergebnis der Vermessung liefert die Software eine relative Lage der Nullkompensationslinie in der Einheit Bildpunkt (Pixel).

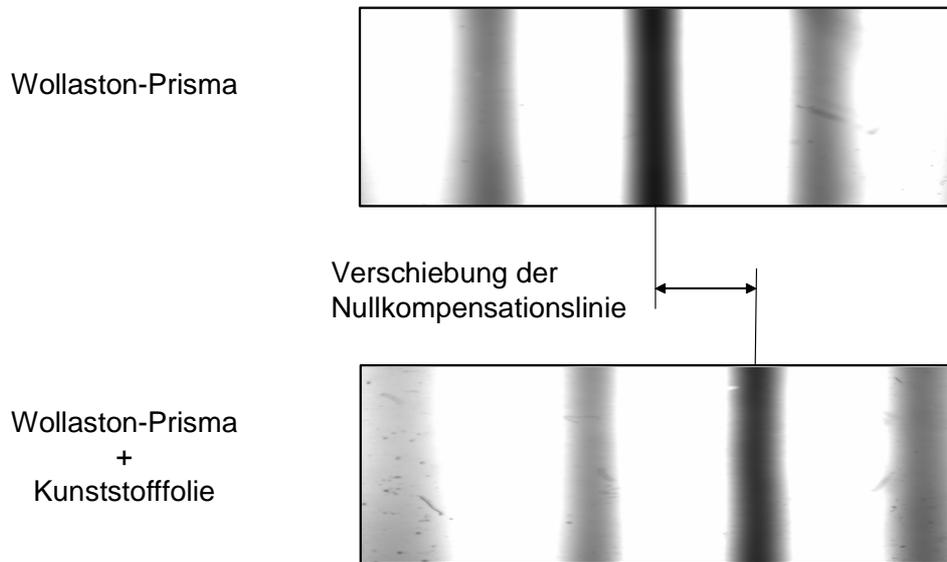


Bild 13: Verschiebung der Nullkompensationslinie

Fig. 13: Displacement of zero compensation line

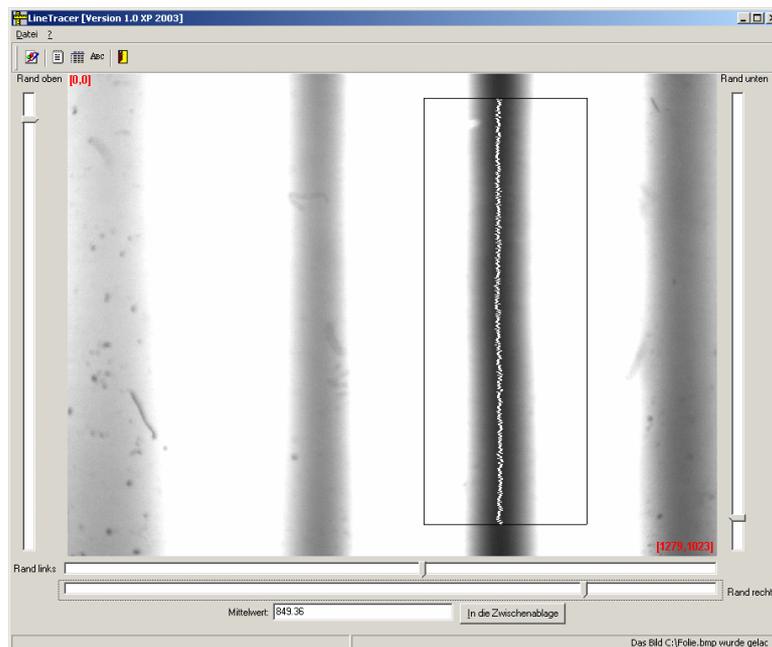


Bild 14: IKV-Software Line Tracer

Fig. 14: IKV-software Line Tracer

2.4.3 Messung der Doppelbrechung

Zur Bestimmung der Doppelbrechung der Kunststoffolie wird der von ihr erzeugte Gangunterschied gemessen. Aus dem gemessenen Gangunterschied lässt sich dann mit Kenntnis der

Probendicke nach Gl(1) die Doppelbrechung bestimmen. Die Foliendicke wird mit einer Mikrometerschraube gemessen. Da Schlauchfolien eine Varianz der Foliendicken über dem Umfang aufweisen, werden die Folienproben an der Stelle des Umfangs entnommen, an der die Foliendicke nahezu der Solldicke des jeweiligen Betriebspunkts entspricht. Aus Foliendicke und Gangunterschied wird anschließend die Doppelbrechung berechnet.

Bei der Bestimmung des von der Kunststofffolie erzeugten Gangunterschieds wird, wie oben beschrieben, zunächst nur das Wollaston-Prisma in den Strahlengang der gekreuzten Polarisatoren eingebracht. Nach Gl(6) gilt für die Nullkompensationslinie ($x = x_0$) und die Nullstelle erster Ordnung ($x = x_1$).

$$\Gamma_K(x = x_0) = \frac{2b}{L} \cdot |n_{ao} - n_o| \cdot x_0 = 0 \cdot \lambda \quad (10)$$

$$\Gamma_K(x = x_1) = \frac{2b}{L} \cdot |n_{ao} - n_o| \cdot x_1 = 1 \cdot \lambda \quad (11)$$

Aus der Differenz von Gl(10) und Gl(11) erhält man einen Term, der den Abstand zwischen der Nullkompensationslinie und der Nullstelle erster Ordnung $|x_1 - x_0|$ des Wollaston-Prismas in Abhängigkeit von seiner Geometrie, den Brechungsindizes und von der Wellenlänge des verwendeten Lichtes beschreibt:

$$\frac{\lambda}{|x_1 - x_0|} = \frac{2b}{L} \cdot |n_{ao} - n_o| \quad (12)$$

Zur Bestimmung des Gangunterschiedes der Kunststofffolie wird diese nun zusätzlich zu dem Wollaston-Prisma in den Strahlengang eingebracht. Wie oben beschrieben, addieren sich hierbei die Gangunterschiede der Folie und des Kompensators nach Gl(8). Für die dadurch entstandene Verschiebung der Nullkompensationslinie $|x - x_0|$ ergibt sich daher die Bedingung.

$$\Gamma_{ges} = \Gamma_F + \Gamma_K |x - x_0| = 0 \quad (13)$$

Durch Einsetzen von Gl(6) unter Berücksichtigung des Terms aus Gl(12) und Gl(1), die den Zusammenhang zwischen dem Gangunterschied und der Doppelbrechung beschreibt, erhält man dann die Bestimmungsgleichung für die gesuchte Doppelbrechung der Kunststofffolie.

$$\Delta n = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{|x - x_0|}{|x_1 - x_0|} \quad (14)$$

In dieser Bedingungsgleichung beschreibt Δn die gesuchte Doppelbrechung, d die Foliendicke und λ die Wellenlänge des verwendeten Lichtes. Hierbei wird mit einer mittleren Wellenlänge der Lampe des Makroskops von $\lambda = 550 \mu\text{m}$ gerechnet. Die beiden Strecken, sowohl der Abstand zwischen der Nullstelle erster Ordnung und der Nullkompensationslinie des Kompensators $|x_1 - x_0|$ als auch die Verschiebung der Nullkompensationslinie durch die Kunststoffolie $|x - x_0|$, werden, wie oben beschrieben, mit der Auswertungssoftware bestimmt. Die Strecken können dabei direkt in der Einheit Pixel in die Formel eingesetzt werden und müssen nicht über den Vergrößerungsfaktor in die Einheit Meter umgerechnet werden, da die Einheit sich in der Formel herauskürzt. Die Vorzeichenwahl der Doppelbrechungen, sprich eine Verschiebung der Nullkompensationslinie nach rechts oder links, ist willkürlich und könnte ebenso auch umgekehrt getroffen werden.

2.5 Bestimmung des Kristallisationsgrades

Die Bestimmung des Kristallisationsgrades erfolgt mittels der DSC (Differential Scanning Calorimetry). Hierbei wird die Probe mit einer konstanten Temperatursteigerung von 20 K/min von Raumtemperatur auf 200 °C erhitzt. Das DSC-Gerät misst die hierzu benötigte elektrische Leistung, die dem Wärmefluss äquivalent ist. In dem Temperaturbereich, in dem die kristallinen Bereiche der Probe schmelzen, wird mehr Energie benötigt, um den konstanten Temperaturgradienten aufrecht zu erhalten, als vor und nach diesem Bereich. Dies ist damit zu begründen, dass das Schmelzen der Kristalle, im Gegensatz zur exothermen Bildung, endotherm verläuft. Das Ergebnis der DSC-Messung ist ein Messschrieb, auf dem die spezifische Wärme über der Temperatur aufgezeichnet ist. Im Kristallitschmelzbereich der besitzt diese Kurve einen Peak. Bild 15 zeigt einen solchen Verlauf exemplarisch.

Die Integration der gemessenen Peakfläche ergibt direkt die gemessene Wärmeenergie, d.h. die benötigte Energie zum Schmelzen der kristallinen Bereiche. Sie ist ein Maß für den Grad der Kristallinität. Man erhält den Kristallisationsgrad κ , wenn man die gemessene Schmelzwärme H_{DSC} in Beziehung setzt zu der theoretischen Schmelzwärme H_C für die 100 % kristalline Probe, Gl(15). Für die Schmelzwärme von 100 % kristallinem Polyethylen wird in der Literatur ein Wert von 290 J/g angegeben [RW'84].

$$\kappa = \frac{H_{DSC}}{H_C} \quad (15)$$

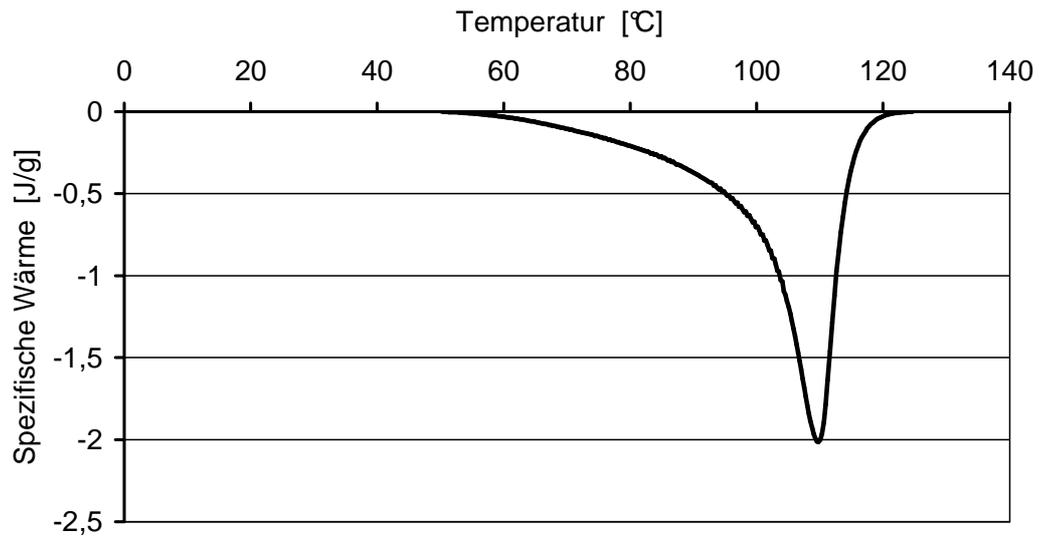


Bild 15: DSC-Messung einer LDPE-Probe

Fig. 15: DSC-measuring of a LDPE-sample

3 MECHANISCHE FOLIENEIGENSCHAFTEN

3.1 Entstehung der Schlauchfolieneigenschaften

Besonders die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen werden in starkem Maße von dem molekularen Orientierungszustand beeinflusst. Solche Zustände molekularer Orientierung können ungewollt auftreten, sie können aber auch gezielt erzeugt werden. Allgemein gilt, dass ein höherer Orientierungsgrad der Makromoleküle verbesserte mechanische Eigenschaften hervorruft. Um thermoplastische Kunststoffe zu orientieren, muss man sie im Allgemeinen bei Temperaturen oberhalb ihres Erweichungsbereichs verstrecken. Dies erfolgt bei der Schlauchfolienextrusion durch die biaxiale Dehnung in der Schlauchbildungszone. Will man die durch die Verstreckung eingebrachte hohe Orientierung erhalten, so muss man die Folie nach dieser Dehndeformation möglichst schnell abkühlen. Dies erfolgt bei der Schlauchfolienextrusion durch das intensive Anblasen mit Kühlluft. So lassen sich mit dem Schlauchfolienextrusionsverfahren Zustände bevorzugter Orientierung zur Verbesserung mechanischer Eigenschaften gezielt erzeugen.

Die Einbringung der molekularen Orientierung durch das biaxiale Verstrecken in der Schlauchbildungszone ist allerdings nicht unwiderruflich. Wegen der bei den vorliegenden Temperaturen in der Schlauchbildungszone sehr starken Beweglichkeit der Makromoleküle wird schon während des Verstreckens ein Teil der Orientierung durch die Orientierungsrelaxation zurückgebildet. Die Orientierungsrelaxation bewirkt, dass der erreichbare Orientierungszustand nicht nur vom Dehngrad abhängt, sondern umso stärker abgebaut wird, je länger die Relaxationszeit und je höher die Relaxationstemperatur ist. Beide Vorgänge, die Dehnung sowie die Relaxation, enden mit dem Erreichen des festen Zustandes (Kristallisationstemperatur) der Schlauchfolie an der Frostlinie.

An der Frostlinie sind also die durch Abziehen in Längsrichtung und Aufweiten des Schlauches in Querrichtung entstandenen Orientierungen in der Schmelze eingefroren. Die eingefrorenen Orientierungen hängen dabei jedoch nicht nur von den Absolutwerten der Längs- und Querverstreckung ab, sondern wegen der Orientierungsrelaxation auch von der Form der Schlauchbildungszone, d.h. vom zeitlichen Verlauf von Längs- und Querverstreckung in bestimmten Temperaturbereichen. Neben dem Grad der biaxialen Dehnung haben also auch die Schlauchkontur, insbesondere der Ort der Schlauchaufweitung, die Frostlinienhöhe und die das Relaxationsverhalten der Molekülorientierungen beeinflussende Folientemperaturverteilung einen entscheidenden Einfluss.

In dem Zusammenhang mit dem Zeitpunkt der Schlauchaufweitung ist die Fahrweise mit langem Hals zu nennen. Diese Fahrweise bedeutet, dass die Kunststoffschmelze nach Verlassen des Werkzeugs zunächst lediglich längsverstreckt wird. Hierbei besitzt die Folienblase oberhalb des Werkzeuges einen ausgeprägten zylindrischen Bereich, dessen Durchmesser ungefähr dem Werkzeugaustrittsdurchmesser entspricht. Der so genannte „neck-in“ kurz vor dem Aufblasen des Folienschlauches weist im Allgemeinen sogar einen gegenüber dem Werkzeug verkleinerten Durchmesser auf. Das eigentliche Aufblasen des Folienschlauches, die Querverstreckung, erfolgt erst kurz vor dem Erreichen der Frostlinie. Da der Folienschlauch am Ende des langen Halses bereits eine gegenüber der Schmelzeaustrittsgeschwindigkeit erhöhte Foliengeschwindigkeit besitzt, findet die Querverstreckung in einem kürzeren Zeitfenster statt als bei der normalen Fahrweise mit kurzen Hals. Somit verbleibt den Molekülketten weniger Zeit, die durch die Dehnung eingebrachten Orientierungen durch Relaxation wieder abzubauen. Des Weiteren ist die Relaxationstemperatur am Ort der Aufweitung niedriger als bei der Fahrweise mit kurzem Hals. Die Auswirkung ist z.B. eine Verbesserung der Durchstoßfestigkeit der Folie.

Neben der Orientierung hat jedoch noch eine andere Größe, die ebenfalls die molekulare Anordnung beschreibt, Einfluss auf die mechanischen Folieneigenschaften, nämlich die Kristallisation. Bei der Abkühlung von teilkristallinen Thermoplasten aus der Schmelze bilden sich regelmäßige Strukturen auf molekularer Ebene, die man auch als kristalline Bereiche bezeichnet. Beim Wachstum der kristallinen Bereiche bilden sich mit zunehmender Abkühlung in der Schmelze Überstrukturen in Form einzelner Sphärolithe, die von einem Keim radial nach außen wachsen, bis sie mit anderen Sphärolithen zusammenstoßen. Dieser Vorgang verläuft exotherm, d.h. es wird Wärme frei. Auf Grund der Länge der Molekülketten ist eine vollständige Kristallisation der Thermoplaste nicht möglich. In einem teilkristallinen Werkstoff gibt es immer kristalline und amorphe Bereiche. Der Grad der kristallinen Ordnung, der Kristallisationsgrad, nimmt hierbei Einfluss auf die mechanischen Folieneigenschaften.

Zusammenfassend lässt sich formulieren, dass der komplexe Prozesszustand der Schlauchbildungszone mit überlagerter Dehnung und Relaxation die molekulare Struktur, also den Kristallisationsgrad und den Orientierungszustand, festlegt. Die molekulare Struktur bestimmt ihrerseits dann die mechanischen Kennwerte der Folie beim Schlauchfolienextrusionsverfahren [Fis'85]. Es ist demnach die „Form“ der Schlauchbildungszone, welche zum einen den Prozesszustand beschreibt und zum anderen die Folieneigenschaften festlegt. Hierbei ist der Begriff Form nicht nur rein geometrisch zu verstehen. Neben der geometrischen Kontur, die ein Zusammenspiel aus lokaler Foliengeschwindigkeit und -dicke ist, spielt auch der Verlauf

der Folientemperatur in der Schlauchbildungszone eine Rolle. Der Begriff Form der Schlauchbildungszone ist demnach dem Prozesszustand der Schlauchbildungszone gleichzusetzen. Der Prozesszustand ist dabei abhängig von drei Einflussgrößen: den Materialeigenschaften des Polymeren, den Maschineneinstellgrößen und den gegebenen Randbedingungen der verwendeten Schlauchfolienanlage. Zu diesen Randbedingungen gehören z.B. der Austrittsdurchmesser des Werkzeugs oder die Art und geometrische Form des Kühlrings. Die Randbedingungen der Schlauchfolienanlage sind in der Praxis meist fest vorgegeben und nur unter vergrößertem Aufwand zu ändern. Die Einflussgrößen Materialeigenschaften und Maschinenparameter sind jedoch leicht veränderbar und können durch ihre Variation den Prozesszustand der Schlauchbildungszone ausschlaggebend verändern. So setzt ein hochviskoses Material der Querverstreckung mehr Widerstand entgegen als ein niedrigviskoses, wodurch der Ort der Aufweitung verschoben werden kann. Ein stärkerer Kühlluftvolumenstrom führt, bedingt durch eine schnellere Abkühlung, zu einem früheren Erreichen des festen Zustandes. Folglich sinkt die Frostlinienhöhe.

Beide Einflussgrößen Materialeigenschaften sowie Maschinenparameter sind jedoch in der Stärke ihrer Auswirkung abhängig von den gegebenen Randbedingungen der Schlauchfolienextrusionsanlage und wirken sich dadurch bei veränderten Randbedingungen bzw. auf verschiedenen Anlagen unterschiedlich auf den Prozesszustand der Schlauchbildungszone und damit auf die Folieneigenschaften aus. So führt ein quantitativ gleicher Luftvolumenstrom bei unterschiedlichen Kühlringgeometrien (Durchmesser oder Kühllippenform) zu unterschiedlich hohen Frostlinien.

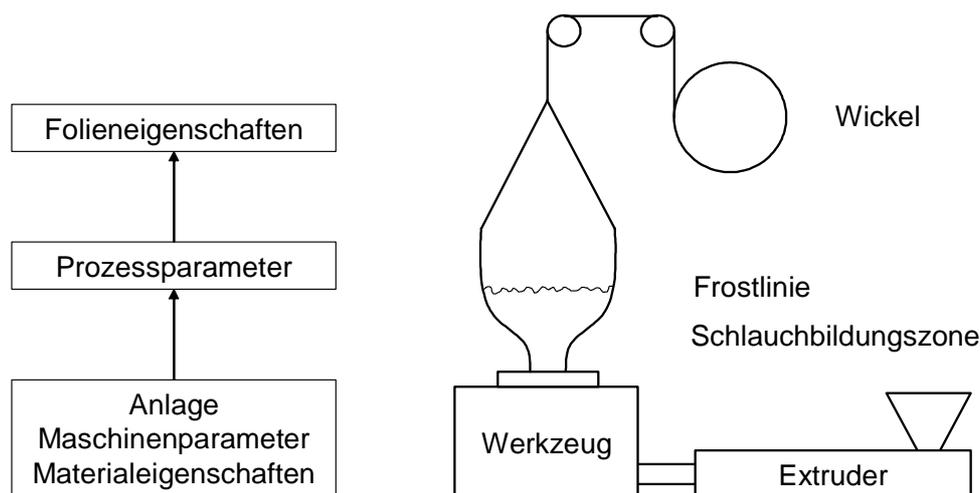


Bild 16: Wirkungsablauf bei der Entstehung der Schlauchfolieneigenschaften

Fig. 16: Sequence of action at formation of blown film properties

Die Entstehung der Schlauchfolieneigenschaften hängt also ab von dem Prozesszustand, der sich auszeichnet durch überlagerte Dehnung und Relaxation und steht am Ende einer Wir-

kungskette. Diese Wirkungskette beginnt mit den Materialeigenschaften, Maschinenparametern und Randbedingungen der Anlage. Sie setzt sich fort über den sich einstellenden Prozesszustand der Schlauchbildungszone und mündet in den resultierenden Schlauchfolieneigenschaften auf dem Wickel (Bild 16).

3.2 Einfluss der Orientierungen

Die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen werden, wie bereits erläutert, in starkem Maße durch den Orientierungszustand der Molekülketten beeinflusst. Die Modellvorstellung zur Beschreibung des molekularen Aufbaus eines teilkristallinen Werkstoffs, wie dem hier verwendeten LDPE, geht von nebeneinander liegenden vollständig amorphen und vollständig kristallinen Bereichen aus. Diese beiden Bereiche sind durch so genannte „tie molecules“ miteinander verbunden [Sam'74]. Beide Bereiche, die amorphen wie die kristallinen, können eine voneinander unterschiedliche Orientierung der Molekülketten aufweisen. Um die Orientierung eines teilkristallinen Materials zu beschreiben gibt es vielerlei Methoden, die sich nicht nur durch den apparativen und präparativen Aufwand sondern auch durch ihr Messergebnis unterscheiden. Die Methoden reichen von einer einfachen Schrumpfmessung über Messungen von Schallgeschwindigkeit, Doppelbrechung oder Wärmeausdehnung bis hin zu Infrarotabsorption oder Röntgenstrahlbeugung. Gemessen wird dabei je nach Methode die Orientierung der kristallinen, der amorphen oder beider Bereiche zusammen. Übersichten über die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Orientierung finden sich bei *Hensel, Retting* und *Wilkes* [Hen'75, Ret'75, Wil'70]. Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Beschreibung des Orientierungszustandes zum einen die Schrumpfmessung (Kapitel 3.2.1) und zum anderen die Doppelbrechung (Kapitel 3.2.2) angewendet. Die Doppelbrechung beschreibt die Orientierung beider, der amorphen sowie der kristallinen, Bereiche [Sam'74]. Sie stellt demnach eine Art Gesamtorientierung dar.

Die im Folgenden gezeigten Messergebnisse wurden an Folienproben bestimmt, die auf der Schlauchfolienanlage am IKV hergestellt wurden. Bei dem Material handelt es sich jeweils um den LDPE-Typ LD 150 AC. Die Einstellungen der verschiedenen Betriebspunkte entsprechen den Punkten 1-32 bzw. 1-64 des entsprechenden Versuchsplans aus Kapitel 5.1.1.

3.2.1 Beschreibung mittels Schrumpf

Die Messung des Schrumpfs ist ein relativ einfaches Mittel, molekulare Orientierungszustände zu charakterisieren. Im Allgemeinen gilt dabei die Beziehung, dass je größer der Orientierungsgrad ist, desto größer der Schrumpf ist und umgekehrt. Zwischen dem Orientierungs-

stand und den mechanischen Eigenschaften gilt dann wiederum die Beziehung, dass je höher der Orientierungsgrad ist, desto größer der mechanische Kennwert ist. Daraus folgt, dass mit zunehmendem Schrumpfpotential die mechanischen Eigenschaften einer Schlauchfolie ansteigen. Untersuchungen an LDPE-Folien haben diesen qualitativ theoretischen Zusammenhang bewiesen. Um mit der Größe Folienschrumpf die Orientierung einer biaxial verstreckten Schlauchfolie zu beschreiben, kann man die Differenz aus dem Schrumpf in Längsrichtung und dem Schrumpf in Querrichtung der Folie bilden. Bild 17 links zeigt den funktionalen Zusammenhang zwischen dem E-Modul in Längsrichtung der Folie und der Differenz des Schrumpfs in Längs- und Querrichtung, Bild 17 rechts den Zusammenhang zwischen der Spannung bei 100 % Dehnung in Längsrichtung und der Schrumpfdifferenz.

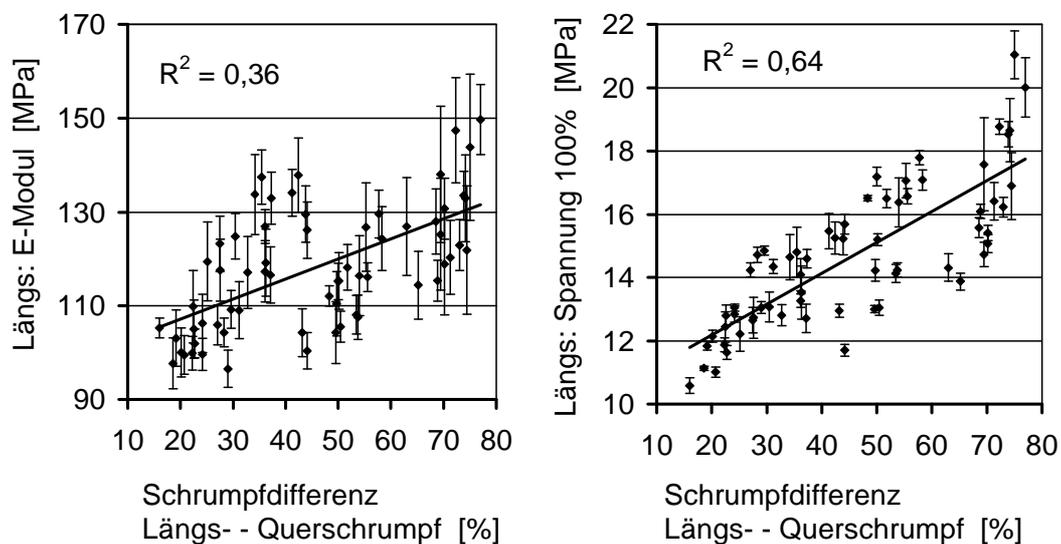


Bild 17: Einfluss des Schrumpfs auf die mechanischen Eigenschaften

Fig. 17: Influence of shrinkage on mechanical properties

Beide Diagramme zeigen die Zunahme der mechanischen Folieneigenschaften mit zunehmendem Schrumpfpotential, bzw. Orientierungsgrad. Damit unterstreichen sie zugleich den signifikanten Einfluss der Orientierungen auf die mechanischen Eigenschaften einer Schlauchfolie.

3.2.2 Beschreibung mittels Doppelbrechung

Die Messung der Lichtdoppelbrechung ist nur möglich, wenn es sich um transparente Werkstoffe handelt. Eingefärbte Folien werden von dem Licht nicht hinreichend durchdrungen, um den Wert der Doppelbrechung zu bestimmen. Selbst eine Trübung der Folie, wie sie z.B. durch den größeren Kristallisationsgrad des HDPE hervorgerufen wird, kann bereits zu Schwierigkeiten bei der optischen Messung führen, wenn die Foliendicke abhängig von dem

Grad der Trübung eine kritische Grenze überschreitet. In anderen Untersuchungen ist es daher auch nicht gelungen, die Doppelbrechung von 20 µm dicken HDPE-Folien zu messen.

Bei der Beschreibung der Orientierung mittels der Doppelbrechung muss man zwei grundsätzliche Fälle unterscheiden. Die Messung der veränderlichen Doppelbrechung unter Deformation, z.B. während des Zugversuchs, und die Messung der Doppelbrechung an einer lastfreien undeformierten Probe. Der erste Fall beschreibt die Orientierbarkeit einer Probe, sprich die Ausrichtung der Makromoleküle unter der aufgebrachten Last. Im zweiten Fall misst man die Orientierung der Molekülketten, die im Inneren der Folie vorliegt, ohne dass sie von außen mit einer Last beaufschlagt wird. Der hierbei gemessene Orientierungszustand ist das Ergebnis der durch die biaxiale Verstreckung in der Schlauchbildungszone eingebrachten Molekülorientierungen. Dieser Orientierungszustand wird im Rahmen dieser Arbeit als „eingefrorene“ Orientierung bezeichnet.

3.2.2.1 Veränderliche Doppelbrechung unter Deformation

Die veränderliche Doppelbrechung unter Deformation liegt dann vor, wenn es um die Charakterisierung von Orientierungen entweder von Kunststoffen in der Schmelze [Jan'83, Wal'76] oder von Kautschuken geht [Stu'56]. Für beide Fälle lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung annehmen, den man als linear-elastisches Verhalten bezeichnet. Dabei gilt das linear-elastische Verhalten für die Schmelze nur für hochviskose Materialien und selbst dort nur in Näherung [MHMS'02].

Der Grund für die Verwendung der Doppelbrechung bei der Charakterisierung von Orientierungszuständen von Schmelzen und Kautschuken ist die Existenz des so genannten spannungsoptischen Gesetzes. Wobei das spannungsoptische Gesetz besagt, dass sich bei einer mechanischen Beanspruchung die sich einstellende Orientierung der Makromoleküle proportional zur in der Probe wirkenden Spannung verhält. Das Verhältnis von Spannungs- und Orientierungszustand ist also konstant, wobei der Quotient aus Doppelbrechung und Spannung als so genannter spannungsoptischer Koeffizient C bezeichnet wird, Gl(16). Das spannungsoptische Gesetz nach Gl(16) ermöglicht also, bei Kenntnis des spannungsoptischen Koeffizienten, aus einem bestimmten Spannungszustand einer Probe die korrespondierende Doppelbrechung zu berechnen. Die Doppelbrechung ist dann ein direktes Maß für die Orientierung.

$$C = \frac{\Delta n}{\sigma} \quad (16)$$

Diese Beziehung gilt jedoch wie erwähnt nur für Kunststoffe, die ein linear elastisches Verhalten zeigen, primär also für Kautschuke und in Näherung für Schmelzen. Das spannungsoptische Gesetz gilt hingegen nicht für feste teilkristalline Kunststoffe, wie sie in dieser Arbeit untersucht werden. Stattdessen besteht für die untersuchten teilkristallinen LDPE-Folien ein linearer Zusammenhang nicht zwischen der Spannung und der Doppelbrechung, sondern zwischen der Dehnung und der Doppelbrechung. Dieser Zusammenhang ist bereits für verschiedenste Werkstoffe in der Literatur bekannt [Jan'83, Wol'61]. Er wird durch das so genannte dehnungsoptische Gesetz beschrieben, Gl(17). Der zugehörige Faktor K wird als dehnungsoptischer Koeffizient bezeichnet.

$$K = \frac{\Delta n}{\varepsilon} \quad (17)$$

Zur experimentellen Bestimmung des dehnungsoptischen Koeffizienten einer Kunststoffolie muss die Dehnung der Folienprobe zusammen mit der korrespondierenden Doppelbrechung in einer gemeinsamen Messung aufgezeichnet werden. Hierzu wird der optische Aufbau der Kompensationsmethode (vgl. Bild 12) in eine Zugprüfmaschine integriert, Bild 18.

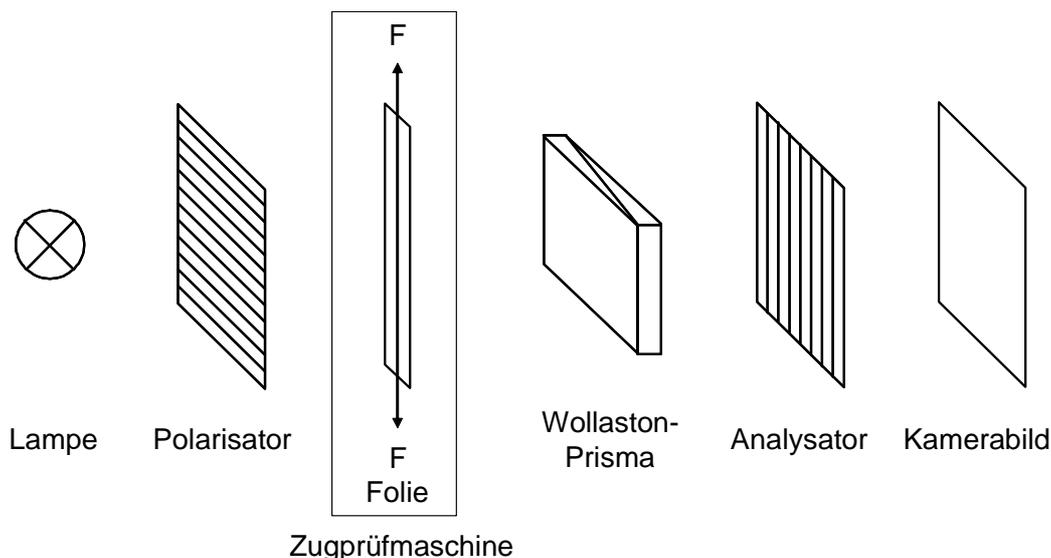


Bild 18: Messaufbau zur Bestimmung der Doppelbrechung während des Zugversuchs

Fig. 18: Test layout to determine birefringence during tensile test

Die Versuche werden dann wie folgt durchgeführt. Zunächst wird die Probe in die Spannvorrichtung der Zugprüfmaschine eingespannt. Mit Beginn der Zugprüfung erfolgt dann in zeitlich diskreten Abständen die Messung der Doppelbrechung der Folie. Nach dem Versuch werden die gemessenen Doppelbrechungswerte den parallel aufgenommenen Messwerten der Spannung-/Dehnungs-Kurve zugeordnet. Trägt man die gemessenen Doppelbrechungswerte über den zugehörigen Dehnungen in einem Diagramm auf, ergibt sich ein linearer Zusam-

menhang zwischen Dehnung und Doppelbrechung. Die Steigung der Geraden entspricht dem dehnungsoptischen Koeffizienten K . Bild 19 gibt diesen Zusammenhang quantitativ exemplarisch für eine LDPE-Folie wieder. Der dehnungsoptische Koeffizient K hat in diesem Beispiel den Wert $0,00028 \text{ \%}^{-1}$ bzw. $0,028$.

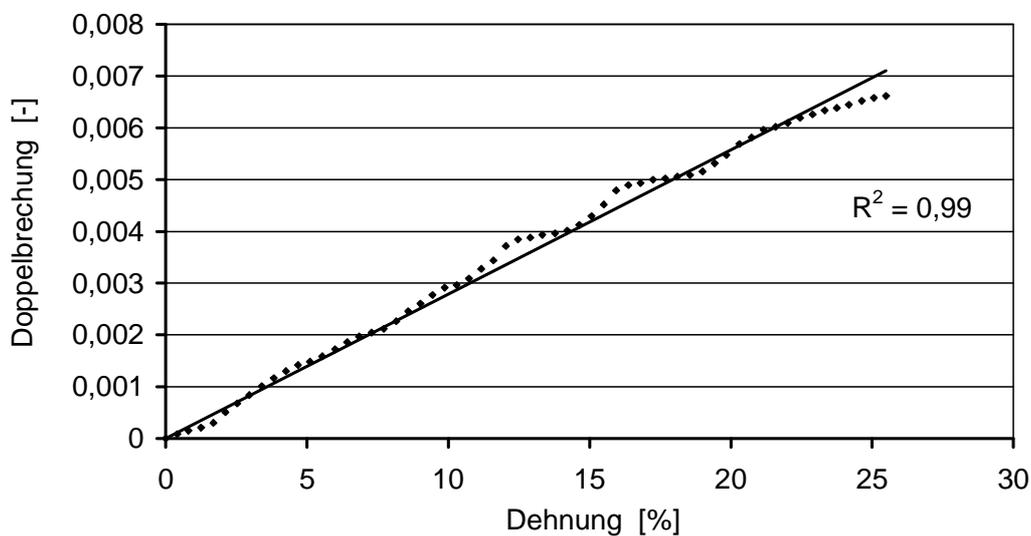


Bild 19: Doppelbrechung in Abhängigkeit von der Dehnung

Fig. 19: Birefringence depending on strain

Bild 20 links zeigt das zu einer Probe gehörige Spannung-/Dehnungs-Diagramm. Trägt man nun in einem neuen Diagramm die Spannung über der Doppelbrechung auf (Bild 20 rechts), ähnelt diese Kurve auf Grund der linearen Beziehung zwischen Doppelbrechung und Dehnung zwangsläufig der Spannung-/Dehnungs-Kurve. An dieser Stelle wird dann auch das Zusammenwirken zwischen dem spannungs- und dem dehnungsoptischen Gesetz klar. Wenn der Kunststoff einen linearen Zusammenhang zwischen der Dehnung und der Doppelbrechung zeigt, spricht das dehnungsoptische Gesetz Gültigkeit hat, kann das spannungsoptische Gesetz, der lineare Zusammenhang zwischen Spannung und Doppelbrechung, nur dann gelten, wenn es einen linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung gibt. Dieses linear elastische Verhalten liegt jedoch bei den untersuchten teilkristallinen LDPE-Folien nicht vor, sondern lediglich, wie oben bereits erwähnt, bei Kautschuken oder in Näherung in der Schmelze.

Um den Einfluss der Temperatur auf den dehnungsoptischen Koeffizienten zu veranschaulichen, zeigt Bild 21 quantitativ exemplarisch die Doppelbrechung in Abhängigkeit von der Dehnung einer Kunststofffolie bei zwei Prüftemperaturen. Das Diagramm zeigt einen größeren dehnungsoptischen Koeffizienten für eine Versuchstemperatur von 40 °C als bei Raumtemperatur. Das bedeutet, mit steigender Temperatur und damit steigender Beweglichkeit der

Molekülketten steigt der dehnungsoptische Koeffizient. Der Grund hierfür liegt in der leichteren Orientierbarkeit der Makromoleküle bei höheren Temperaturen. So werden bei gleichen Dehnwerten höhere Doppelbrechungswerte erreicht, je höher die Temperatur ist.

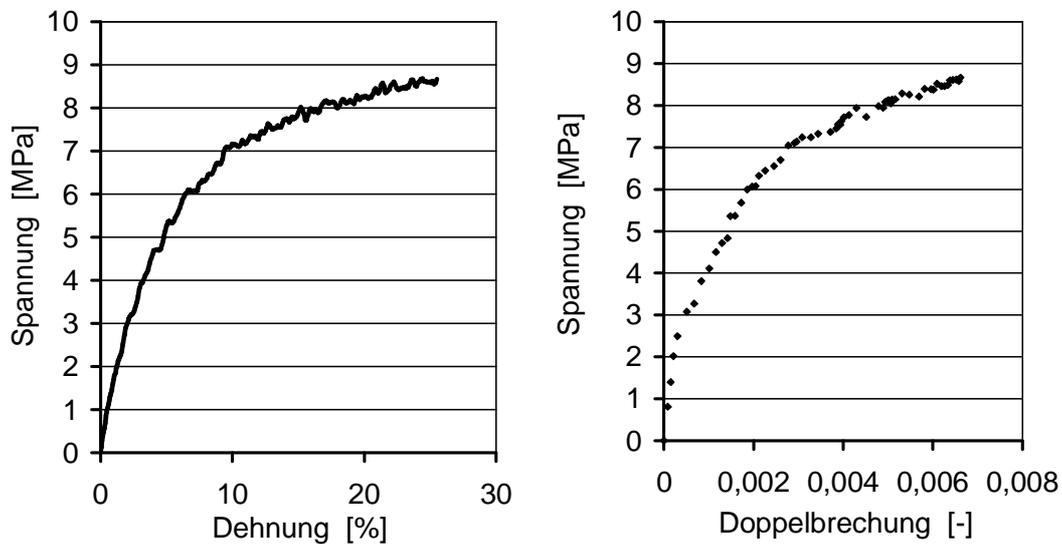


Bild 20: Spannung in Abhängigkeit von Dehnung und Doppelbrechung

Fig. 20: Stress depending on strain and birefringence

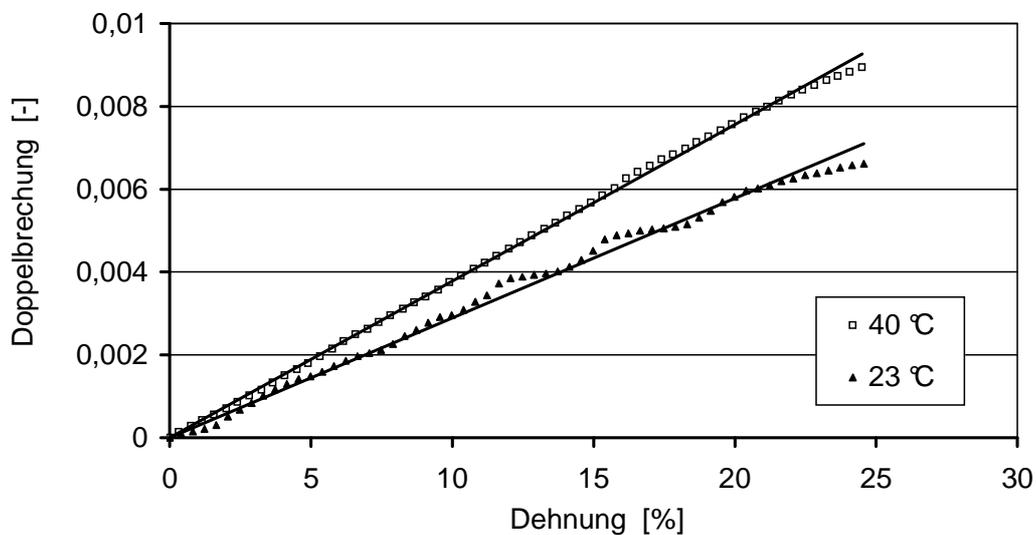


Bild 21: Doppelbrechung in Abhängigkeit von Dehnung und Temperatur

Fig. 21: Birefringence depending on strain and temperature

Nach einer allgemeinen Regel steigt die Steifigkeit einer Kunststoffprobe mit zunehmendem Orientierungsgrad. Demnach müsste, wegen des gezeigten Anstiegs der Orientierung bei höheren Temperaturen, die Steifigkeit der Kunststoffprobe mit der Temperatur steigen. Dies ist natürlich nicht so, wie auch das Spannung/Dehnungs-Diagramm auf Bild 22 zeigt. Die beiden dargestellten Kurven sind die korrespondierenden Versuchspunkte zu den Graphen auf

Bild 21. Vielmehr ist es so, dass mit steigender Beweglichkeit der Molekülketten bei steigender Temperatur auf der einen Seite zwar die Orientierbarkeit der Molekülketten erleichtert wird, auf der anderen Seite aber auch das Abgleiten der Makromoleküle aneinander begünstigt wird. Hierdurch steigt zwar der Orientierungsgrad der Folie doch ebenso die Dehnbarkeit, was zu einem Absinken der gemessenen Zugkraft führt. Die erleichterte Dehnbarkeit ist demnach der Grund für das niedrigere Niveau der Spannung/Dehnungs-Kurve bei 40 °C auf Bild 22 trotz höherer Orientierung.

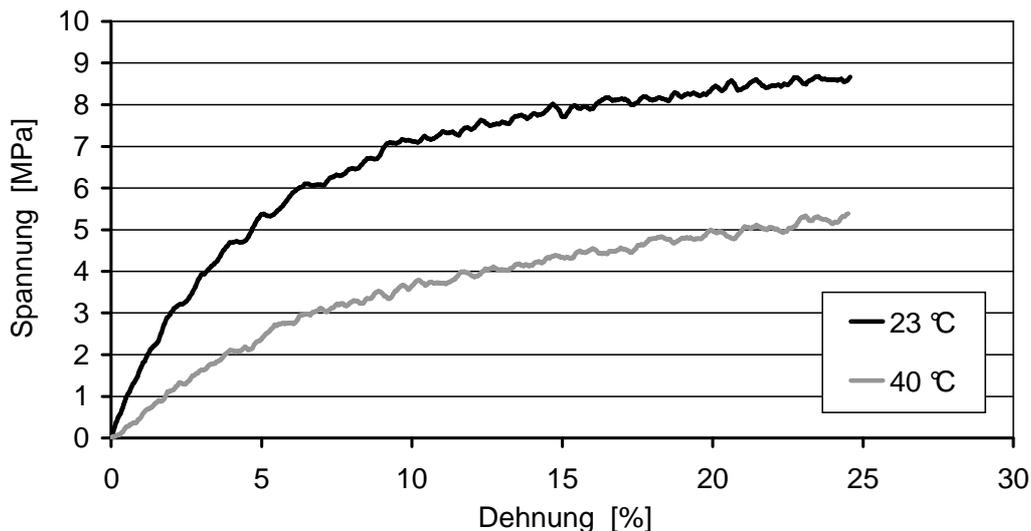


Bild 22: Spannung in Abhängigkeit von Dehnung und Temperatur

Fig. 22: Stress depending on strain and temperature

3.2.2.2 Eingefrorene Doppelbrechung ohne Deformation

Die eingefrorene Doppelbrechung ohne Deformation wird meistens dann verwendet, wenn es darum geht, nicht wie bei der veränderlichen Doppelbrechung unter Deformation die Orientierungsänderung der Molekülketten zu beurteilen, sondern von dem eingefrorenen Orientierungszustand eines verreckten Thermoplasten auf seine mechanischen Eigenschaften zu schließen. Dies bedeutet, dass man aus der „Vor-“Orientierung einer unbelasteten Probe auf seine Zugfestigkeit unter Last schließen kann. Demnach sind die (richtungsabhängigen) mechanischen Eigenschaften orientierter Polymere eindeutige Funktionen ihres Orientierungszustandes, also z.B. ihrer Doppelbrechung, und dies sogar unabhängig davon, unter welchen Bedingungen die Orientierung zustande gekommen ist. Zu dieser Thematik sind von *Retting* zahlreiche Veröffentlichungen erschienen [Ret'91, Ret'81, Ret'75, Ret'79a, Ret'79b, RL'91], die im Folgenden kurz zusammengefasst werden.

Retting verwendet für die Vorhersage der mechanischen Eigenschaften aus der Orientierungsvorgeschichte meistens amorphe Polymere. Dies liegt darin begründet, dass es für amorphe Polymere eine eindeutige Beziehung zwischen der Doppelbrechung und der im Material vorliegenden Orientierung gibt. Das bedeutet, dass bei amorphen Materialien der gemessene Wert der Doppelbrechung auch tatsächlich den Orientierungszustand der Molekülketten beschreibt. Für teilkristalline Polymere, die bei der Schlauchfolienherstellung hauptsächlich und in dieser Arbeit ausschließlich verarbeitet werden, trifft diese Aussage jedoch nur eingeschränkt zu. Bei teilkristallinen Polymeren setzt sich die gemessene Doppelbrechung nämlich, wie beschrieben, aus einem amorphen und einem kristallinen Anteil zusammen, wobei beide Bereiche unterschiedlich stark orientiert sein können. Die gemessene Doppelbrechung gibt dann eine kombinierte Orientierung beider Bereiche zusammen wieder, die sich von der der Einzelbereiche unterscheiden kann. Des Weiteren untersucht *Retting* hauptsächlich uniaxiale Verstreckzustände, und stößt auf Schwierigkeiten bei der Korrelation zwischen der Doppelbrechung und mehrachsigen Orientierungszuständen. Diese Schwierigkeiten werden verursacht zum einen durch einen erhöhten mathematischen Aufwand bei der Beschreibung mehrachsiger Orientierungs- und Spannungszustände und zum anderen durch die experimentelle Bestimmung der benötigten beschreibenden Größen. Schlauchfolien hingegen, die in dieser Arbeit untersucht werden, sind biaxial und nicht uniaxial verstreckt.

Um die eingefrorene Doppelbrechung mit den mechanischen Kennwerten einer Schlauchfolie zu korrelieren, müssen zum einen der Wert der Doppelbrechung und zum anderen der mechanische Kennwert bekannt sein. Die Doppelbrechung wird im Rahmen dieser Arbeit nach der Kompensationsmethode im Makroskop bestimmt (vgl. Kapitel 2.4). Die Bestimmung der mechanischen Kennwerte wird in Kapitel 2.3 beschrieben. Beide Werte werden anschließend in einem Diagramm gegeneinander aufgetragen. Bild 23 zeigt hierzu exemplarisch die Korrelation zweier Folieneigenschaften (E-Modul in Längsrichtung bzw. Schrumpfung in Querrichtung) einer LDPE-Folie mit der Doppelbrechung. Die angegebenen Bestimmtheitsmaße unterstreichen den optischen Eindruck des Fehlens eines funktionalen Zusammenhangs. Bei der Korrelation der anderen mechanischen Eigenschaften mit der Lichtdoppelbrechung wurden für das teilkristalline LDPE ebenfalls keine funktionalen Zusammenhänge gefunden.

Da die mechanischen Eigenschaften der Schlauchfolien, wie mit der Beschreibung des Schrumpfs nachgewiesen (vgl. Kapitel 3.2.1), allerdings eindeutig von dem Orientierungszustand der Folie abhängen, lässt die hier nicht nachgewiesene Korrelation folgenden Schluss zu: Der Wert der eingefrorenen Doppelbrechung ist nicht in der Lage den Orientierungszustand einer teilkristallinen biaxial verstreckten Schlauchfolie zu charakterisieren. Dieses Ergebnis bestätigt die zuvor gemachten theoretischen Aussagen und lässt sich wie folgt erklä-

ren. Der Wert der eingefrorenen Doppelbrechung eines teilkristallinen Materials gibt nicht die tatsächliche Orientierung wieder, sondern eine Gesamtorientierung der amorphen und kristallinen Bereiche gleichzeitig.

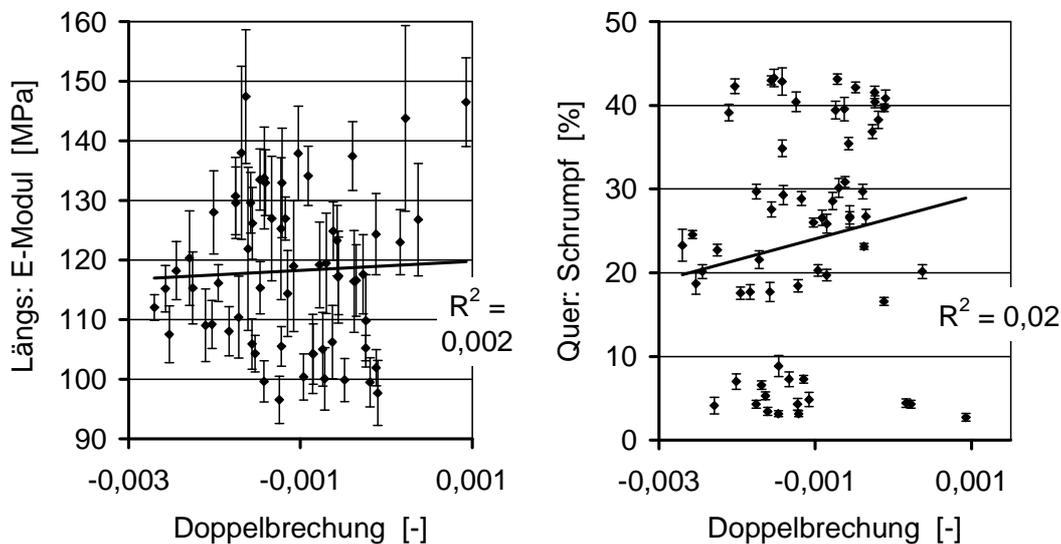


Bild 23: Korrelation zwischen Folieneigenschaften und Doppelbrechung einer LDPE-Folie

Fig. 23: Correlation between film properties and birefringence of a LDPE-film

Dieser Schluss berührt allerdings nicht die Eignung der Beschreibung der Orientierung mit der veränderlichen Doppelbrechung unter Deformation (vgl. Kapitel 3.2.2.1). In diesem Fall gibt die Messung der Doppelbrechung nämlich die tatsächliche Orientierung wieder. Dies liegt darin begründet, dass das Material entweder als Schmelze vorliegt, also vollständig amorph ist, so dass die Doppelbrechung nur die Orientierung der amorphen Bereiche bestimmen muss, oder dass das Material unter Last stark deformiert wird. Bei diesen hohen Deformationsgraden (im Zugversuch bis 25 %) kann man davon ausgehen, dass sich sowohl die Makromoleküle der amorphen Bereiche, als auch die Molekülketten der kristallinen Bereiche, neu ausrichten und zwar in Deformationsrichtung. Die Sphärolithe in der morphologischen Überstruktur werden dabei zerstört. Die gemessene Doppelbrechung charakterisiert dann den neuen Orientierungszustand, bei dem sich die Orientierungen der amorphen und der kristallinen Bereiche nicht mehr voneinander unterscheiden.

3.3 Einfluss der Kristallisation

Die zweite wichtige Größe, die neben der Molekülorientierung bei teilkristallinen Materialien unmittelbar die mechanischen Eigenschaften der Folie beeinflusst, ist der Kristallisationsgrad. Um seinen Einfluss genauer zu untersuchen, wurden im Rahmen dieser Arbeit für alle Proben

von allen Versuchspunkten der in Kapitel 5.1.1 entworfenen Versuchspläne die Kristallisationsgrade bestimmt. Innerhalb eines Versuchsplans werden verschiedene Maschineneinstellparameter der Schlauchfolienanlage nach dem Prinzip der statistischen Versuchsplanung variiert. Zu den variierten Maschinenparametern gehören: Schneckendrehzahl, Werkzeugtemperatur, Blaseninnendruck, Lüfterdrehzahl des Kühlluftgebläses und Abzugsgeschwindigkeit. Die Untersuchungen werden auf drei verschiedenen Schlauchfolienanlagen mit drei unterschiedlichen LDPE-Typen durchgeführt (vgl. Kapitel 2.1). Tabelle 6 zeigt die Anzahl der untersuchten Versuchspunkte der jeweiligen Versuchspläne und die Ergebnisse der Kristallisationsgradmessungen. Dargestellt sind die mittleren Kristallisationsgrade der Proben aus den Experimenten nach den jeweiligen Versuchsplänen und ihre Variationsbreite (Abstand des Mittelwertes zum jeweiligen Maximum und Minimum) jeweils aller Versuchspunkte innerhalb des Versuchsplans. Zu der Messgenauigkeit der DSC-Messungen sei angemerkt, dass diese zum einen durch die Genauigkeit des Gerätes selbst und zum anderen durch den Ort der Probenentnahme bestimmt wird. Bei dem Ort der Probenentnahme spielt die Unterschiedlichkeit der Foliendicke und der Folientemperatur über dem Umfang eine beeinflussende Rolle. Untersuchungen der Messgenauigkeit haben ergeben, dass diese bei ca. +/- 1 % Kristallinität liegt.

Anlage Material	IKV			Kiefel Extrusion	Kuhne
	Lupolen 2420 D	Lupolen 2441 D	LD 150 AC	LD 150 AC	LD 150 AC
Anzahl der Versuchspunkte	32	38	64	32	20
Mittlerer Kristallisationsgrad [%]	39,4	36,2	38,3	38,8	38,4
Variationsbreite [%]	+ 1,3 - 1,6	+ 1,7 - 1,3	+ 1,7 - 3,7	+ 1,2 - 2,1	+ 0,8 - 0,3

Tabelle 6: Kristallisationsgrade der verschiedenen Versuchspläne

Table 6: Degrees of crystallization of the various experimental designs

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Kristallisationsgradmessungen fällt vor allem die geringe Unterschiedlichkeit der Mittelwerte zwischen den Versuchsplänen aber auch die geringe Variationsbreite innerhalb eines Versuchsplans auf. Für die drei Versuchspläne mit dem Material LD 150 AC ergibt sich auf allen drei Schlauchfolienanlagen ein nahezu identischer mittlerer Kristallisationsgrad. Die geringe Variationsbreite innerhalb eines Versuchsplanes deutet zudem darauf hin, dass die umfangreiche Variation der Maschineneinstellparameter zwar jeweils zu einer Unterschiedlichkeit des Prozesszustandes in der Schlauchbil-

dungszone führt, dass sich diese Unterschiedlichkeit im Rahmen der Messgenauigkeit der DSC-Messung jedoch nur unwesentlich in einer Änderung des Kristallisationsgrades widerspiegelt. Dies ist umso bezeichnender, als die Variationsbreite der Maschineneinstellungen, um dieses eigentliche Ziel zu erreichen, im Rahmen der Möglichkeiten der Versuchsanlagen sehr groß gewählt wurde. Betrachtet man den Einfluss des Kristallisationsgrades auf die mechanischen Eigenschaften der Schlauchfolie, so ergibt sich, dass die geringe Unterschiedlichkeit des Kristallisationsgrades keinen signifikanten Einfluss auf die Folieneigenschaften ausübt. Bild 24 zeigt hierzu exemplarisch die Korrelation zweier Folieneigenschaften (E-Modul in Längs- und Querrichtung) mit dem Kristallisationsgrad. Bei der Korrelation der anderen mechanischen Eigenschaften mit dem Kristallisationsgrad wurden ebenfalls keine klaren funktionalen Zusammenhänge gefunden.

Die quasi nicht vorhandene Änderung des Kristallisationsgrades bedeutet demnach, dass beispielsweise weder die Temperaturvariation der Massetemperatur noch die Verweilzeit der Schmelze in der Schlauchbildungszone zu Änderungen im Kristallisationsgrad geführt haben. Ähnliche Beobachtungen wurden auch von anderen Autoren gemacht [And'93, Bon'95]. Als Quintessenz der Untersuchungen ergibt sich daher eine Unabhängigkeit des Kristallisationsgrads bei der LDPE-Schlauchfolienextrusion von den Einstellungen der Maschine, bzw. vom Prozesszustand in der Schlauchbildungszone, und eine geringfügige Abhängigkeit vom verwendeten LDPE-Typ. Das bedeutet, dass der erreichbare Kristallisationsgrad bei der LDPE-Schlauchfolienextrusion primär vom Material abhängt, also eine Art „Materialkonstante“ darstellt.

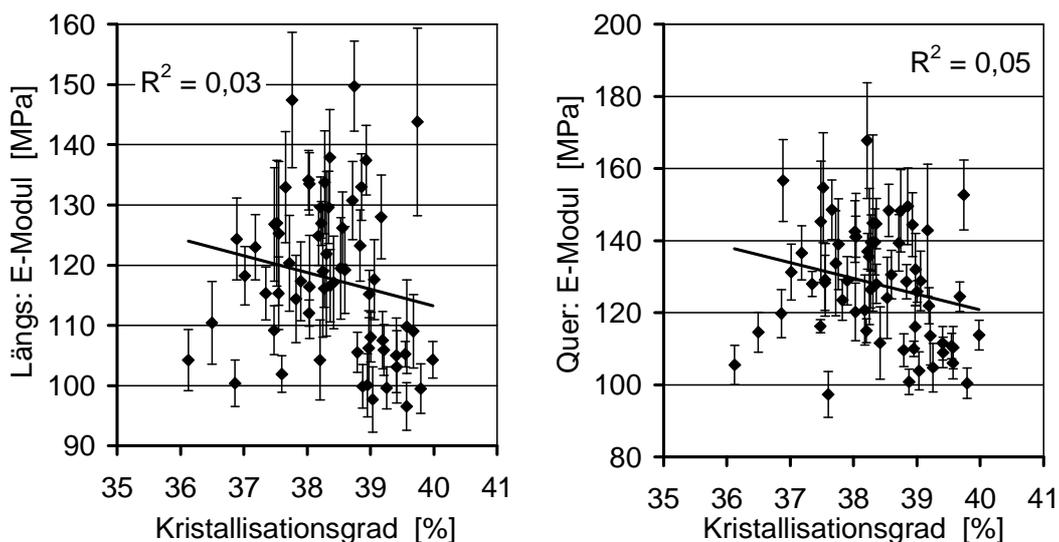


Bild 24: Korrelation zwischen Folieneigenschaften und Kristallisationsgrad einer LDPE-Folie

Fig. 24: Correlation between film properties and degree of crystallization of a LDPE-film

Die Unabhängigkeit des Kristallisationsgrads von den Maschineneinstellparametern der Schlauchfolienextrusionsanlage bzw. des Prozesszustands in der Schlauchbildungszone bedeutet jedoch nicht, dass der Kristallisationsgrad keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften ausübt. So wurde an anderer Stelle bei Stäben aus Polypropylen ein linearer Anstieg der Streckspannung und des E-Moduls mit zunehmender Dichte, die ein Maß für den Kristallisationsgrad ist, nachgewiesen [SW'70]. Die unterschiedlichen Dichten wurden hierbei durch Wärmebehandlung (Tempern) der Probekörper erreicht. Die Unabhängigkeit des Kristallisationsgrads vom Prozesszustand in der Schlauchbildungszone bedeutet vielmehr, dass der ausgeübte Einfluss der Kristallisation auf die mechanischen Schlauchfolieneigenschaften konstant ist und nicht verändert werden kann.

3.4 Fazit

Wie gezeigt, sind es der Orientierungszustand und der Kristallisationsgrad, die die mechanischen Folieneigenschaften einer Schlauchfolie im Wesentlichen charakterisieren. Diese beiden Größen sind abhängig vom verwendeten Material und werden in der Schlauchbildungszone durch den dort herrschenden Prozesszustand bestimmt, Bild 25.

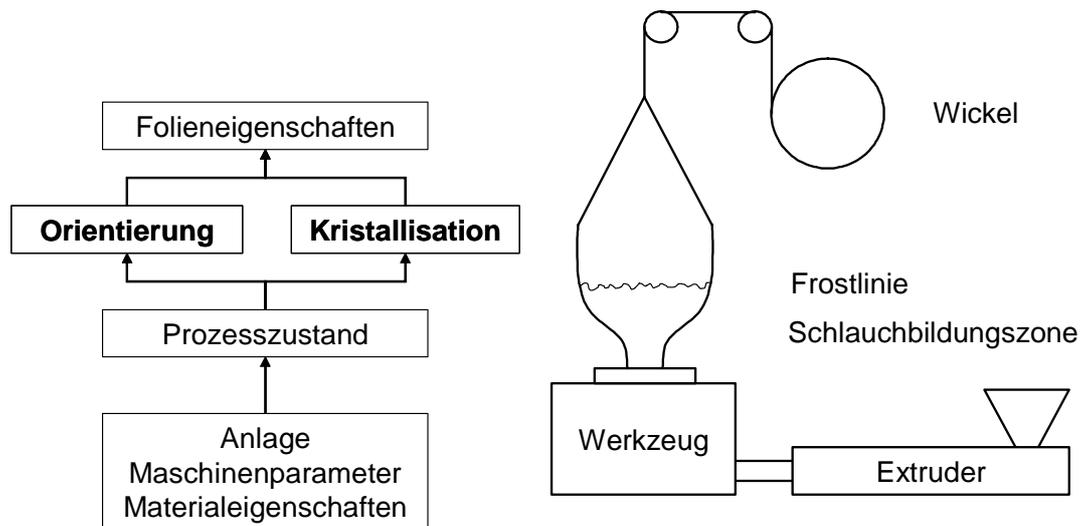


Bild 25: Orientierung und Kristallisation bestimmen die Schlauchfolieneigenschaften

Fig. 25: Orientation and crystallization determines the blown film properties

Dabei ist der Kristallisationsgrad quasi eine Art Materialkonstante und unabhängig vom Prozesszustand. Sein Anteil an den mechanischen Eigenschaften einer LDPE-Schlauchfolie ist demnach konstant. Der Orientierungszustand hingegen ist in großem Maße abhängig von dem Prozesszustand in der Schlauchbildungszone, und daher nahezu allein verantwortlich für die große Variationsbreite der mechanischen Eigenschaften. Der Einfluss der Orientierungen auf die mechanischen Eigenschaften einer Schlauchfolie wurde mittels Schrumpf und mittels

Doppelbrechung beschrieben. Als Quintessenz der Untersuchungen ergibt sich eine Abhängigkeit der mechanischen Schlauchfolieneigenschaften von dem Grad der Orientierung, wobei mit zunehmender Orientierung die Festigkeit der Folie zunimmt.

Lässt man bei der Betrachtung von Bild 25 die bisher gemachten Aussagen Revue passieren, wird klar, wie ein Berechnungsmodell aufgebaut sein muss, welches die mechanischen Eigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion im Vorfeld der Produktion vorhersagen kann. Das Modell muss in der Lage sein, aus den vorgegebenen Randbedingungen den Prozesszustand in der Schlauchbildungszone als Grundlage für die Eigenschaftsvorhersage zu berechnen. Ausgehend vom Prozesszustand muss das Berechnungsmodell dann Orientierung und Kristallisation der Schlauchfolie beschreiben. Die mechanischen Folieneigenschaften muss das Modell dann aus diesen beiden Größen berechnen.

4 BERECHNUNGSMODELL

4.1 Theorie der Modellbildung

Es existieren Berechnungsmodelle für diverse technische Prozesse. Allen Modellen ist gemein, dass sie Ein- und Ausgangsgrößen besitzen. Die Ausgangsgrößen verkörpern dabei die gesuchten Ergebnisse. Des Weiteren sind alle Modelle nur ein Abbild der jeweiligen Realität, und geben diese nur näherungsweise, d.h. nicht absolut exakt, wieder. Die Güte der Modelle kann dabei stark schwanken, und ist neben den Modellparametern vor allem von den Gleichungen des Modells selbst abhängig.

Bezogen auf die Vorhersage der mechanischen Folieneigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion bedeutet dies, dass die Berechnungsgleichungen des Modells die Entstehungsursachen für die Folieneigenschaften abbilden müssen. Als Einflussgrößen müssen dabei, wie gezeigt, die Maschineneinstellparameter, die Materialeigenschaften und anlagenspezifische Randbedingungen, wie Werkzeug- oder Kühlringgeometrie, beachtet werden. Im Folgenden wird aus Gründen der Vereinfachung stellvertretend für all diese Einflussgrößen immer nur der Begriff Maschineneinstellparameter bzw. Maschinenparameter verwendet.

Betrachtet man die Wirkungskette bei der Entstehung der Schlauchfolieneigenschaften ausgehend von den Maschineneinstellparametern über den sich ausbildenden Prozesszustand bis hin zu den resultierenden Folieneigenschaften, ergeben sich bei der Wahl der Eingangsgrößen für das Modell zwei unterschiedliche Möglichkeiten. Bei der Wahl des Prozesszustands als Eingangsgröße für das Berechnungsmodell muss das Modell den Zusammenhang zwischen dem Prozesszustand und den Folieneigenschaften wiedergeben. Bei der Wahl der Maschineneinstellparameter als Eingangsgrößen muss das Berechnungsmodell den Zusammenhang zwischen den Maschineneinstellparametern und den Folieneigenschaften wiedergeben. Betrachtet man die Arten von Modellen ergeben sich ebenfalls zwei Möglichkeiten der Bildung des Berechnungsmodells. Man kann wählen zwischen statistischen und physikalischen Modellen. Den Unterschied der beiden Modelle und die mit ihnen im Zusammenhang stehende Wahl der Eingangsgröße des Modells, Prozessparameter oder Maschineneinstellparameter, beschreiben die beiden folgenden Kapitel, Kap. 4.1.1 für die statistischen Modelle und Kap. 4.1.2 für die physikalischen Modelle.

4.1.1 Statistische Modellbildung

Das statistische Modell ist ein experimentelles Modell. Es beschreibt die Zusammenhänge zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen rein mathematisch. Hierzu muss keine Kenntnis über die zu Grunde liegenden physikalischen Zusammenhänge bestehen. Zum Aufstellen des statistischen Modells wird zunächst ein Zusammenhang zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen angenommen und eine entsprechende Berechnungsgleichung formuliert. Diese Berechnungsgleichung enthält neben den Eingangsgrößen als Variablen noch zu bestimmende Faktoren, die das Modell kalibrieren. Nach der Formulierung der Gleichung werden Experimente durchgeführt, bei denen die Ein- und Ausgangsgrößen ermittelt werden. Aus diesen Messwerten werden mittels geeigneter mathematischer Analyseverfahren die Kalibrierungsfaktoren der Berechnungsgleichungen bestimmt. Als Voraussetzung für ein solches Modell muss lediglich die Art der Abhängigkeiten zwischen Ein- und Ausgangsgrößen im Vorfeld aus der Empirie bekannt sein, d.h. es müssen Erfahrungen darüber vorliegen, wie die Abhängigkeiten sind, linear, exponentiell, usw.. Als Nachteil der statistischen Modellbildung ist zu nennen, dass sich die ermittelten Berechnungsgleichungen in der Regel lediglich auf das beobachtete Prozessfenster der gemessenen Eingangsgrößen beziehen und nicht ohne weiteres auf andere ähnliche Eingangsgrößen übertragbar sind.

Wählt man nun die Maschineneinstellparameter als Eingangsgrößen eines statistischen Modells, so muss das Modell die komplette Wirkungskette Maschineneinstellparameter, Prozesszustand, Folieneigenschaften abbilden. Ein derartiges Modell ist aber, wie schon in der Einleitung dargelegt, prinzipiell auf die Schlauchfolienanlage beschränkt, auf der es ermittelt wurde, und somit nicht übertragbar. Es ist nicht allgemeingültig. Wählt man indes die Prozessparameter als Eingangsgrößen eines statistischen Modells, so muss das Modell nur den Zusammenhang zwischen dem Prozesszustand und den Folieneigenschaften abbilden. Die den Prozesszustand beschreibenden Prozessparameter sind hingegen auf andere Schlauchfolienanlagen übertragbar. Ein derartiges Modell ist demnach allgemeingültig.

Aus den Überlegungen folgt als Quintessenz, bei der Wahl eines statistischen Modells muss man den Prozesszustand in der Schlauchbildungszone als Eingangsgröße des Modells wählen.

4.1.2 Physikalische Modellbildung

Im Gegensatz zu dem statistischen Modell basiert das physikalische Modell nicht auf experimentell ermittelten Zusammenhängen sondern auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten, Überlegungen und Formeln. Daher müssen bei dem physikalischen Modell alle Zusammenhänge zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen bekannt und mit physikalischen Formeln mathema-

tisch beschreibbar sein. Dieser Umstand kann im Einzelfall sehr schwierig sein, immer dann, wenn die Zusammenhänge komplex sind. Ein weiterer Nachteil des physikalischen Modells ist, dass die Faktoren der Berechnungsgleichungen, die das Modell kalibrieren, in der Regel die Materialparameter, oftmals nicht bekannt sind oder sich messtechnisch nur schwer erfassen lassen. Der entscheidende Vorteil eines physikalischen Modells allerdings ist seine uneingeschränkte Übertragbarkeit. Das physikalische Modell ist allgemeingültig, da die Beschreibungen der Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten basieren. Auch besteht bei dem physikalischen Modell nicht die Beschränkung der Eingangsgrößen auf ein bestimmtes Prozessfenster, wie bei dem statistischen Modell.

Wählt man nun die Maschineneinstellparameter als Eingangsgrößen eines physikalischen Modells, so muss das Modell die komplette Wirkungskette Maschineneinstellparameter, Prozesszustand, Folieneigenschaften abbilden. Diese Aufgabe ist sehr komplex. Wählt man indes die Prozessparameter als Eingangsgrößen eines physikalischen Modells, so muss das Modell nur den Zusammenhang zwischen dem Prozesszustand und den Folieneigenschaften abbilden. Für die Übertragbarkeit allerdings spielt die Wahl der Eingangsgröße, im Gegensatz zum statistischen Modell, keine Rolle. Beide Modelle sind übertragbar und demnach allgemeingültig.

Aus den Überlegungen folgt als Quintessenz, bei der Wahl eines physikalischen Modells kann man die Eingangsgröße des Modells frei wählen. Mit der Wahl der Maschinenparameter anstatt der Prozessparameter als Eingangsgrößen steigt allerdings der Aufwand der Formulierung der entsprechenden Berechnungsgleichungen sowie der Bestimmung der benötigten Materialparameter.

4.2 Entwurf eines Eigenschaftsmodells

Es soll ein Berechnungsmodell entwickelt werden, welches die Folieneigenschaften aus den Eingangsgrößen berechnet, um die Vorhersage der mechanischen Kennwerte einer Schlauchfolie zu erreichen. Dieses Modell zur Berechnung der Eigenschaften wird im Folgenden als „Eigenschaftsmodell“ bezeichnet. Bei der Wahl der Art des Modells und der Eingangsgrößen stehen, wie im vorigen Kapitel erläutert, jeweils zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Als Modelltyp kommt ein statistisches oder physikalisches Modell in Frage, bei den Eingangsgrößen besteht die Wahl zwischen den Maschinenparametern und den Prozessparametern. Hieraus ergeben sich durch Kombination vier Möglichkeiten der Modellbildung. Bild 26 zeigt eine Übersicht über diese vier Möglichkeiten.

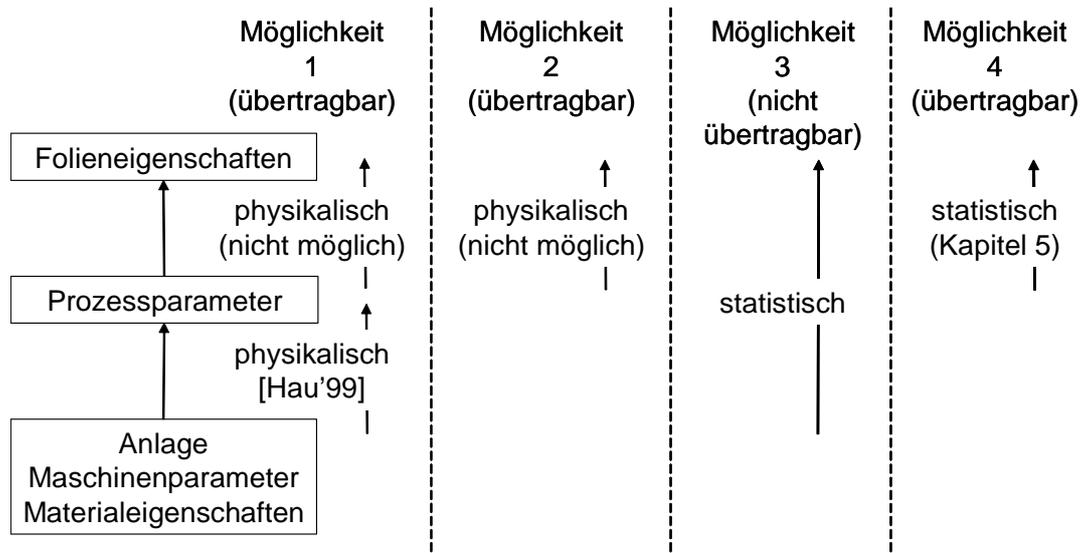


Bild 26: Möglichkeiten der Modellbildung zur Berechnung der Folieneigenschaften

Fig. 26: Possibilities of modelling to calculate film properties

Möglichkeit 1, die rein physikalische Modellbildung, ist sicherlich die Ideallösung der Aufgabe. Zum einen ist das physikalische Modell gegenüber dem statistischen Modell auf Grund der uneingeschränkten Übertragbarkeit und der Unabhängigkeit von einem Prozessfenster der Eingangsgrößen die technisch bessere Lösung. Zum anderen ermöglicht die Wahl der Maschinenparameter als Eingangsgrößen des Modells eine einfache Handhabung und Nutzung, da die Eingangsgrößen des Modells den Einstellungen der Maschine entsprechen.

Bei der physikalischen Modellbildung ist man auf das Vorhandensein physikalischer Zusammenhänge angewiesen, die sich durch Formeln formulieren lassen. Daher unterteilt man die Entstehung der Folieneigenschaften aus den Maschinenparametern über den Prozesszustand in der Schlauchbildungszone in einzelne beschreibbare Teilschritte. Für den ersten Teilschritt von Möglichkeit 1, die Berechnung des Prozesszustandes aus den Maschinenparametern ist es Hauck [Hau'99] gelungen, ein physikalisches Modell aufzustellen. Der zweite Teilschritt, die Berechnung der Folieneigenschaften aus dem Prozesszustand, ist jedoch heute noch nicht möglich.

Wie gezeigt, hängen die mechanischen Kennwerte der Folie beim Schlauchfolienextrusionsverfahren von der Anordnung und dem Aufbau der Molekülketten ab. Für die physikalische Modellbildung zur Berechnung der Folieneigenschaften müssten für die Bestimmung beider Größen, des Kristallisationsgrades sowie des Orientierungszustandes, physikalisch begründete Formeln zur Verfügung stehen, die die Entstehung dieser Größen berechnen können. Des Weiteren müssten die Zusammenhänge zwischen der Kristallstruktur bzw. der Orientierung und dem Verhalten des Werkstoffes unter Last bekannt und durch physikalische Formeln

beschreibbar sein. Aus diesen Zusammenhängen ließen sich letztendlich die mechanischen Eigenschaften einer Schlauchfolie durch ein physikalisches Modell berechnen.

Die Berechnung der Kristallisation ist seit langem Gegenstand ständiger Forschung und Diskussion [Avr'39, Avr'40, Avr'41, BA'96, EJ'97, NKA'73, NWKA'72, NWKA'74, Oza'71, SC'98]. Bis heute gibt es zahlreiche Diskussionsbeiträge zu diesem Thema. Trotz der großen Anzahl von Untersuchungen sind dennoch viele kristallisationsspezifische Fragen offen, so dass die Berechnung der Kristallisation heute zwar möglich, jedoch noch mit Unsicherheit beaufschlagt ist. Dies bezieht sich insbesondere auf die komplexen Verhältnisse in der Schlauchbildungszone, die durch Nicht-Isothermie und Dehnung die Kristallisation beeinflussen.

Die Berechnung der Orientierung ist z.B. Gegenstand der Forschung auf dem Gebiet der Füllsimulation in Werkzeugen, bzw. der Fließsimulation beim Pressen. Hierbei geht man von der These aus, dass Gebiete hoher Dehnung (Fließfront) bzw. hoher Scherung (Werkzeugwand) starke Orientierungen hervorrufen. Diese These findet sowohl bei der Charakterisierung der Molekülorientierung als auch bei der Charakterisierung der Faserorientierung Verwendung. Wobei die Beschreibung der Molekülorientierung ungleich schwieriger als die der Faserorientierung ist, da die Faser in der Regel als steif angesehen wird und nur eine Richtung besitzt, während diese Vereinfachung für ein Molekülknäuel nicht zutrifft. Die Art und Weise des Einflusses von Dehnung und Scherung auf die Molekülorientierung, und hierbei insbesondere der quantitative Einfluss, ist daher noch nicht vollständig verstanden. So ist auch die Berechnung des molekularen Orientierungszustandes heute noch nicht möglich.

Der Zusammenhang zwischen Kristallisation, Orientierung und den resultierenden mechanischen Eigenschaften ist heute ebenfalls noch nicht geklärt. Es ist zwar möglich, integrale Materialparameter, wie den E-Modul einer orientierten Probe, im Experiment zu bestimmen und mit Hilfe dem Deformationsverhalten von Kunststoffen angepassten Feder-Dämpfer-Modelle mechanische Kennwerte zu berechnen. Die Berechnung lokaler Spannungen bei ungleicher lokaler Bauteilorientierung und Kristallisation ist heute noch nicht in Sicht. Die Schwierigkeiten, die es dabei zu überwinden gilt, sind z.B. die Berechnung der realen Kräfte eines interkristallinen Risses oder einer Entschlafung bei der Zerstörung eines Sphärolithen. Dabei fehlt es an zwei Dingen. Zum einen an physikalischen Modellvorstellungen und Formeln, die diese molekularen Festigkeitszustände berechnen können, zum anderen an der meist benötigten Rechenleistung der heute verfügbaren Rechnersysteme. Zumindest der zweite Punkt könnte dabei, hält man sich die Entwicklung der Rechenleistung in der Vergangenheit vor Auge, in nächster Zukunft gelöst werden.

Möglichkeit 2, die physikalische Modellbildung mit der Wahl der Prozessparameter als Eingangsgrößen des Modells, ist aus den oben beschriebenen Gründen heute noch nicht möglich und wird daher ebenfalls als Möglichkeit zur Eigenschaftsmodellbildung ausgeschlossen.

Möglichkeit 3, die statistische Modellbildung mit der Wahl der Maschinenparameter als Eingangsgrößen des Modells, verbirgt, wie oben erläutert, den Einfluss der Maschinenparameter auf den Prozesszustand in der Schlauchbildungszone in den Berechnungsgleichungen der Folieneigenschaften, und ist von daher nicht übertragbar. Möglichkeit 3 wird daher ebenso als Möglichkeit zur Eigenschaftsmodellbildung ausgeschlossen.

Möglichkeit 4, die statistische Modellbildung mit der Wahl der Prozessparameter als Eingangsgrößen des Modells, hat gegenüber Möglichkeit 3, wie oben beschrieben, den Vorteil der Übertragbarkeit des Ansatzes auf andere Schlauchfolienanlagen. Gegenüber den physikalischen Modellen ist es in der Lage, überhaupt erst die mechanischen Eigenschaften einer Schlauchfolie zu berechnen. Möglichkeit 4 wird daher zur Modellbildung des Eigenschaftsmodells in dieser Arbeit verwendet. Die Ausarbeitung des Modells ist Inhalt des nächsten Kapitels.

5 STATISTISCHES EIGENSCHAFTSMODELL

5.1 Vorgehensweise

Die mechanischen Folieneigenschaften von Schlauchfolien ergeben sich, wie erläutert, aus dem Prozesszustand in der Schlauchbildungszone. Verschiedene Prozesszustände führen dabei auch zu unterschiedlichen Folieneigenschaften. Eine gezielte Variation der Prozesszustände und eine anschließende Korrelation der beschreibenden Prozessparameter mit den ermittelten mechanischen Folieneigenschaften ist die Grundlage für das statistische Eigenschaftsmodell.

Die grundsätzliche Vorgehensweise gliedert sich wie folgt (Bild 27). Zunächst werden experimentelle Untersuchungen an einer Schlauchfolienanlage mittels statistischer Versuchsplanung durchgeführt, wobei die Maschinenparameter variiert werden. Eine bestimmte Kombination der Maschinenparameter führt dabei zu einem definierten Versuchspunkt bzw. Prozesszustand. Die Versuchspläne sind in Kapitel 5.1.1 dargestellt. Der Versuchsplan soll dabei durch die systematische Variation der Maschinengrößen der Schlauchfolienextrusionsanlage sicherstellen, dass alle möglichen sich einstellenden Prozesszustände erfasst werden, und folglich mit in die Entwicklung der Berechnungsgleichungen einfließen. Die Prozesszustände werden also nicht direkt an der Anlage eingestellt, sondern ergeben sich indirekt aus Variation der Maschinenparameter. Der Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen wird in Kapitel 5.1.2 näher erläutert. An den sich einstellenden Versuchspunkten werden die Prozessparameter des Prozesszustandes gemessen. Die gemessenen Prozessparameter werden anschließend in dimensionslose Prozesskennwerte überführt. In Kapitel 5.1.3 werden diese dimensionslosen Prozesskennwerte definiert. Parallel zur Bestimmung der Prozesskennwerte wird an den verschiedenen Versuchspunkten jeweils ein Folienmuster entnommen. Von diesen Folienmustern werden die mechanischen Eigenschaften bestimmt: E-Modul, Spannung bei 100 % Dehnung, Zugfestigkeit und Schrumpf jeweils in Längs- und Querrichtung. In Kapitel 5.2 wird zunächst der qualitative Einfluss der dimensionslosen Prozesskennwerte auf die mechanischen Folieneigenschaften diskutiert. Die anschließende Anwendung des statistischen Analyseverfahrens der multiplen Regression überführt die gefundenen Zusammenhänge zwischen den Prozesskennwerten und den mechanischen Eigenschaften in die Berechnungsgleichungen. Mit den ermittelten Berechnungsgleichungen können dann die mechanischen Kennwerte von Schlauchfolien aus den Prozesskennwerten berechnet werden. Dies ist Inhalt von Kapitel 5.3.

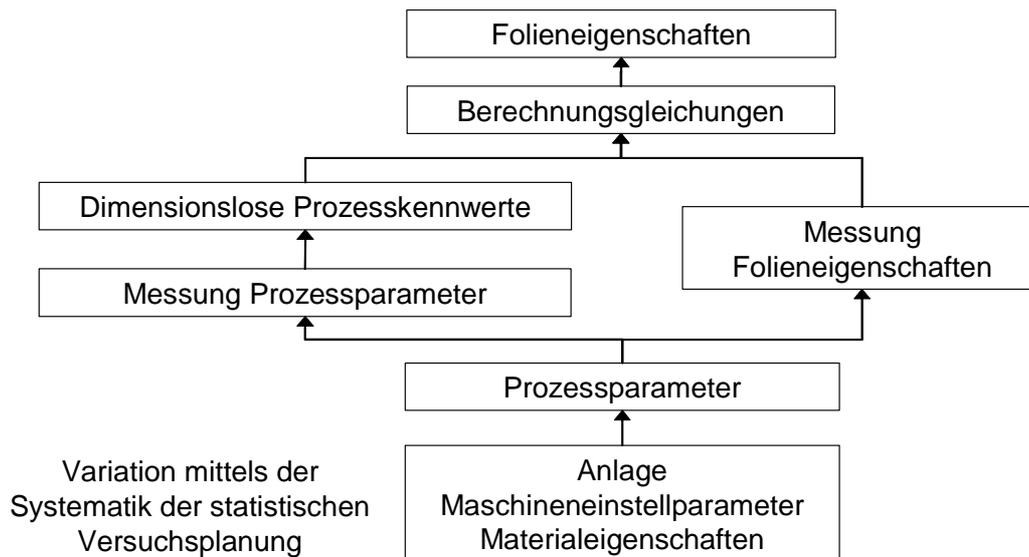


Bild 27: Vorgehensweise statistisches Eigenschaftsmodell

Fig. 27: Procedure of the statistical property model

Das Eigenschaftsmodell, welches in Kapitel 5.3 entwickelt wird, besitzt zunächst keine Variablen, die den Einfluss des Materials auf die mechanischen Schlauchfolieneigenschaften beschreiben. Die Übertragung des Eigenschaftsmodells auf andere Materialien ist jedoch ohne materialspezifische Variablen in den Berechnungsgleichungen prinzipiell nicht möglich. Dennoch wird in Kapitel 5.4 untersucht, ob und mit welchen Einschränkungen sich die Berechnungsgleichungen auf andere ähnliche Materialien übertragen lassen. Dies ist sicherlich nur unter Vorbehalt möglich, da sich z.B. die mechanischen Eigenschaften einer HDPE-Folie doch deutlich von denen einer Folie aus LDPE unterscheiden. Daher werden hierbei nur ähnliche Materialien (drei verschiedene LDPE-Typen) miteinander verglichen. Um auch bezüglich der Übertragbarkeit des Eigenschaftsmodells auf andere Materialien eine Allgemeingültigkeit zu erzielen, müssen materialspezifische Variablen in das Eigenschaftsmodell integriert werden. Ein Ansatz hierzu wird ebenfalls in Kapitel 5.4 behandelt.

Im Allgemeinen haben Berechnungsgleichungen, die mit der statistischen Prozessmodellbildung entwickelt werden, nur für die betreffende Anlage Gültigkeit. Jedoch soll die Verwendung der dimensionslosen Prozesskennwerte anstatt der Maschinenparameter als Variablen der Berechnungsgleichungen in dieser Arbeit die Übertragbarkeit, und damit die Allgemeingültigkeit, des entwickelten Eigenschaftsmodells gewährleisten. Der Grundgedanke, der sich dahinter verbirgt, ist, dass sich der Prozesszustand der Schlauchbildungszone, z.B. das Aufblasverhältnis, auf unterschiedlichen Anlagen in gleicher Weise auf die mechanischen Folieneigenschaften auswirkt. Die Übertragung des Eigenschaftsmodells auf andere Anlagen ist Inhalt von Kapitel 5.5.

5.1.1 Versuchspläne

Es wurden mehrere unterschiedliche Versuchspläne entworfen und durchgeführt. Dabei wurden drei Hauptzielrichtungen verfolgt.

1. Untersuchung des Zusammenhanges zwischen den Prozessparametern und den mechanischen Folienkennwerten. Entwicklung des statistischen Eigenschaftsmodells.
2. Überprüfung der Übertragbarkeit des Modells auf andere Materialien.
3. Überprüfung der Übertragbarkeit des Modells auf andere Anlagen.

Für die erste Hauptzielrichtung wurde ein Versuchsplan mit 64 Versuchspunkten auf der Versuchsanlage im IKV durchgeführt (siehe Tabelle 7). Für diese Untersuchungen wurde als Material ein LDPE, LD 150 AC, verwendet.

Die Einstellung der Versuchspunkte an der Schlauchfolienanlage am IKV sowie an den anderen Anlagen erfolgt nach dem gleichen Schema. Das Werkzeug wird auf die entsprechende Temperatur geheizt. Die Lüfterdrehzahl, und damit der Kühlluftvolumenstrom, werden fest eingestellt. Der Blasendurchmesser wird so lange verändert, bis die gewünschte Folienbreite erreicht ist. Mittels der Schneckendrehzahl bzw. des Massedurchsatzes wird bei konstanter Kühlung und konstantem Blasendurchmesser die Höhe der Frostlinie variiert. Anschließend wird die Abzugsgeschwindigkeit solange verändert, bis die erforderliche Foliendicke erreicht ist. Gegebenenfalls ist hierbei eine nachträgliche Anpassung des Massedurchsatzes nötig.

Versuchspunkt	Folien- dicke [μm]	Lüfter- drehzahl [%]	Werkzeug- temperatur [°C]	Folien- breite [mm]	Frost- linien- höhe* [cm]	Masse- durchsatz* [kg/h]	Abzugs- geschwin- digkeit* [m/min]
1 - 32	80 120	40 63	170 190	315 500	12,5 - 37,5	9 - 29	2,2 - 7,0
33 - 64	100 140	51,5 86	180 200	223 408	10 - 27,5	7 - 26	2,1 - 5,7

* Frostlinienhöhe: Variation auf zwei Stufen (niedrig & hoch)
Massedurchsatz: Einstellung erfolgt über Schneckendrehzahl und bestimmt Frostlinienhöhe
Abzugsgeschwindigkeit: Ergibt sich aus Massedurchsatz und Foliendicke

Tabelle 7: Versuchsplan LD 150 AC, Anlage IKV

Table 7: Experimental design LD 150 AC, plant IKV

Zur Untersuchung der Übertragbarkeit des Eigenschaftsmodells auf andere Materialien (Hauptzielrichtung 2) wurden Versuche auf der Versuchsanlage im IKV mit zwei weiteren Materialien durchgeführt. Dabei handelt es sich um zwei LDPE-Typen, Lupolen 2420 D und

Lupolen 2441 D (siehe Tabelle 8 und Tabelle 9). Bei diesen Versuchen bleibt somit die Anlage als Einflussfaktor konstant. Das Material wird variiert.

Versuchspunkt	Foliendicke [μm]	Lüfterdrehzahl [%]	Werkzeugtemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	Folibreite [mm]	Frostlinienhöhe* [cm]	Massedurchsatz* [kg/h]	Abzugsgeschwindigkeit* [m/min]
1 - 32	80 120	40 63	170 190	315 500	12,5 - 37,5	9 - 29	2,2 - 7,0

* Frostlinienhöhe: Variation auf zwei Stufen (niedrig & hoch)
 Massedurchsatz: Einstellung erfolgt über Schneckendrehzahl und bestimmt Frostlinienhöhe
 Abzugsgeschwindigkeit: Ergibt sich aus Massedurchsatz und Foliendicke

Tabelle 8: Versuchsplan Lupolen 2420 D, Anlage IKV

Table 8: Experimental design Lupolen 2420 D, plant IKV

Versuchspunkt	Foliendicke [μm]	Lüfterdrehzahl [%]	Werkzeugtemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	Folibreite [mm]	Frostlinienhöhe* [cm]	Massedurchsatz* [kg/h]	Abzugsgeschwindigkeit* [m/min]
1 - 32	100	40 80	170 190	250 350 450 550	15 - 42,5	7 - 33	2,5 - 5,5
33 - 35	50	40	190	250 350 450 550	27,5 - 32,5	13 - 19	2,0 - 2,1
36 - 38	150	40	190	350 450 550	22,5 - 27,5	13 - 19	6,1 - 6,4

* Frostlinienhöhe: Variation auf einer (bei 33-38) bzw. zwei (bei 1-32) Stufen
 Massedurchsatz: Einstellung erfolgt über Schneckendrehzahl und bestimmt Frostlinienhöhe
 Abzugsgeschwindigkeit: Ergibt sich aus Massedurchsatz und Foliendicke

Tabelle 9: Versuchsplan Lupolen 2441 D, Anlage IKV

Table 9: Experimental design Lupolen 2441 D, plant IKV

Zur Untersuchung der Übertragbarkeit des Eigenschaftsmodells auf andere Anlagen (Hauptzielrichtung 3) wurden Versuche auf zwei weiteren Schlauchfolienextrusionsanlagen durchgeführt. Zu diesem Zweck haben die Firmen Kiefel Extrusion, Worms, und Kuhne, Sankt Augustin, ihre Technikumsanlagen zur Verfügung gestellt. Für diese Untersuchungen wurde als Material wiederum der LDPE-Typ LD 150 AC verwendet. Einen Überblick geben

Tabelle 10 und Tabelle 11. Bei diesen Versuchen bleibt somit das Material als Einflussfaktor konstant. Die Anlage wird variiert.

Versuchspunkt	Foliendicke [μm]	Lüfterdrehzahl [%]	Werkzeugtemperatur [°C]	Folibreite [mm]	Frostlinienhöhe* [cm]	Massedurchsatz* [kg/h]	Abzugsgeschwindigkeit* [m/min]
1 - 32	80 120	35 55	170 190	888 1402	55 - 105	120 - 269	9,8 - 24,8

* Frostlinienhöhe: Variation auf zwei Stufen (niedrig & hoch)
 Massedurchsatz: Einstellung erfolgt über Schneckendrehzahl und bestimmt Frostlinienhöhe
 Abzugsgeschwindigkeit: Ergibt sich aus Massedurchsatz und Foliendicke

Tabelle 10: Versuchsplan LD 150 AC, Anlage Kiefel Extrusion

Table 10: Experimental design LD 150 AC, plant Kiefel Extrusion

Versuchspunkt	Foliendicke [μm]	Lüfterdrehzahl [%]	Werkzeugtemperatur [°C]	Folibreite [mm]	Frostlinienhöhe [cm]	Massedurchsatz [kg/h]	Abzugsgeschwindigkeit [m/min]
1 - 16	80 120	60 80	170 190	986	65 - 90	113 - 182	8,9 - 20,0
18 - 20	80 120	60 80	190	1300	80 - 85	144 - 182	8,9 - 15,2

* Frostlinienhöhe: Variation auf zwei (bei 1-16) bzw. einer (bei 18-20) Stufen
 Massedurchsatz: Einstellung erfolgt über Schneckendrehzahl und bestimmt Frostlinienhöhe
 Abzugsgeschwindigkeit: Ergibt sich aus Massedurchsatz und Foliendicke

Tabelle 11: Versuchsplan LD 150 AC, Anlage Kuhne

Table 11: Experimental design LD 150 AC, plant Kuhne

5.1.2 Maschinenparameter und Prozessparameter

Die nachfolgende Begriffsdefinition soll zum einen dem Verständnis bei der Verwendung der Fachbegriffe im Rahmen dieser Arbeit dienen. Zum anderen soll sie die Abhängigkeit der Prozessparameter von den Maschinenparametern im Rahmen der Wirkungskette bei der Entstehung der Schlauchfolieneigenschaften verstehbar verdeutlichen. Dabei soll diese Begriffsdefinition die Sensibilität des Lesers zur korrekten Verwendung dieser Begriffe wecken. Maschinenparameter sind innerhalb dieser Arbeit die Größen, die man direkt an der Schalttafel der Schlauchfolienextrusionsanlage einstellen kann. Durch die Variation der Maschinenparameter ändert sich der Prozesszustand in der Schlauchbildungszone. Prozessparameter sind dann die Zustandsgrößen, die die Schlauchbildungszone beschreiben. Tabelle 12 ordnet

die relevanten Größen des Schlauchfolienextrusionsprozesses diesen beiden Kategorien zu, und zwar so, wie die Begriffe in dieser Arbeit verwendet werden.

Maschinenparameter	Prozessparameter
Schneckendrehzahl	Massedurchsatz
Werkzeugdurchmesser	Schmelzgeschwindigkeit
Spaltweite	
Werkzeugtemperatur	Schmelztemperatur
Blaseninnendruck	Blasendurchmesser
Abzugsgeschwindigkeit	Lokale Foliengeschwindigkeit
	Lokale Foliendicke
	Blasenkontur
	Frostlinienhöhe
	Lokale Folientemperatur
Lüfterdrehzahl	Lokaler Luftvolumenstrom
	Lokale Lufttemperatur

Tabelle 12: Einteilung Maschinenparameter, Prozessparameter

Table 12: Classification machine parameters, process parameters

Die Schneckendrehzahl ist ein eindeutiger Maschinenparameter. Sie beeinflusst den Prozessparameter Massedurchsatz. Über die beiden Maschinenparameter Werkzeugdurchmesser und -spaltweite bestimmt sich mit dem Massedurchsatz der Prozessparameter Schmelzgeschwindigkeit. Der Maschinenparameter Werkzeugtemperatur beeinflusst den Prozessparameter Massetemperatur, der allerdings noch von anderen Einflüssen wie z.B. der Scherung abhängig ist. Da die Massetemperatur im Allgemeinen nicht gemessen werden kann, wird die Werkzeugtemperatur näherungsweise mit der Massetemperatur gleichgesetzt. Der Maschinenparameter Blaseninnendruck beeinflusst den Prozessparameter Blasendurchmesser. Bei den meisten Schlauchfolienanlagen, wie auch bei der Anlage am IKV, kann man den Blaseninnendruck an der Maschinensteuerung jedoch nicht explizit einstellen. Es wird vielmehr direkt der Prozessparameter Blasendurchmesser mit dem Luftdruck eingestellt. Die Regelung des Blasendurchmessers erfolgt über die Breite der doppelt flachgelegten Folie. Die Abzugsgeschwindigkeit ist ein Maschinenparameter.

Der Prozesszustand in der Schlauchbildungszone wird beschrieben durch die Prozessparameter lokale Foliengeschwindigkeit, Dicke und Temperatur, die Blasenkontur und die Frostlinienhöhe. Bei der Kühlluft ist der beeinflussende Maschinenparameter die Lüfterdrehzahl und

die entscheidenden Prozessparameter der Kühlluft sind der lokale Luftvolumenstrom und die lokale Lufttemperatur.

5.1.3 Dimensionslose Prozesskennwerte

Im Kapitel 4.2 werden als Eingangsgrößen des statistischen Eigenschaftsmodells die Prozessparameter festgelegt. Dies soll die Übertragbarkeit und somit die Allgemeingültigkeit des Modells sichern. Bei der Verwendung der Maschinenparameter als Eingangsgrößen wäre diese Allgemeingültigkeit nicht gegeben, da sich, wie beschrieben, die Maschinenparameter verschiedener Schlauchfolienextrusionsanlagen in ihrer Stärke unterschiedlich auf den jeweiligen Prozesszustand auswirken. Um eine einfache Handhabung der Prozessparameter in den Berechnungsgleichungen zu gewährleisten und die Vergleichbarkeit der Prozessparameter zwischen verschiedenen Anlagen zu erreichen, müssen die Prozessparameter in dimensionslose Prozesskennwerte überführt werden. Diese Prozesskennwerte werden dann als Variablen in die Berechnungsgleichungen des Eigenschaftsmodells eingesetzt. Während es sich bei Aufblas- und Abzugsverhältnis bereits um dimensionslose Kennwerte handelt, ist z.B. die erfasste Blasenkontur ein Prozessparameter aber kein dimensionsloser Prozesskennwert. Der Prozessparameter Blasenkontur wäre bei unterschiedlichen Werkzeugdurchmessern nicht von einer Schlauchfolienanlage auf eine andere übertragbar. Die gemessenen Prozessparameter müssen daher durch geeignete Transformation in dimensionslose Kennwerte überführt werden, um die Übertragbarkeit und somit Allgemeingültigkeit des Eigenschaftsmodells zu gewährleisten.

In der Literatur findet man, wie in Kapitel 1.3 dargelegt, als Prozesskennwerte lediglich das Aufblas- bzw. Abzugsverhältnis in Untersuchungen zu ihrem Einfluss auf die mechanischen Kennwerte einer Schlauchfolie. Der Prozesszustand in der Schlauchbildungszone wird mit diesen beiden Größen jedoch nur unzureichend charakterisiert. Eine Beschreibung z.B. der thermischen Verhältnisse, die die Folieneigenschaften mit beeinflussen, ist weder dem Aufblas- noch dem Abzugsverhältnis zu entnehmen. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher hierüber hinaus noch weitere dimensionslose Prozesskennwerte entwickelt und ihre Korrelation mit den mechanischen Eigenschaften der Folie überprüft. Als Ergebnis dieser Untersuchungen wurden einfach zu handhabende dimensionslose Prozesskennwerte gefunden, mit denen die mechanischen Eigenschaften charakterisiert werden können. Der Vorteil der gefundenen Prozesskennwerte liegt dabei im Besonderen in der einfachen Ableitung aus den gemessenen Prozessparametern, die keiner zusätzlichen Messtechnik gegenüber einer herkömmlichen Schlauchfolienextrusionsanlage bedarf.

Zu den dimensionslosen Prozesskennwerten zur Berechnung der mechanischen Eigenschaften gehören neben den etablierten Größen Abzugs- und Aufblasverhältnis die folgenden: Temperatur-, Frostlinien-, Volumenstrom- und Dickenverhältnis. Die Berechnung der Prozesskennwerte zeigen Gl(18) bis Gl(23).

$$\text{Abzugsverhältnis:} \quad i_l = \frac{\text{Foliengeschwindigkeit}}{\text{Schmelzgeschwindigkeit}} \quad (18)$$

$$\text{Aufblasverhältnis:} \quad i_q = \frac{\text{Blasendurchmesser}}{\text{Werkzeugdurchmesser}} \quad (19)$$

$$\text{Temperaturverhältnis:} \quad i_t = \frac{\text{Schmelzetemperatur}}{\text{Frostlinientemperatur}} \quad (20)$$

$$\text{Frostlinienverhältnis:} \quad i_f = \frac{\text{Frostlinienhöhe}}{\text{Werkzeugradius}} \quad (21)$$

$$\text{Volumenstromverhältnis:} \quad i_v = \frac{\text{Schmelzevolumenstrom}}{\text{Kühlluftstrom}} \quad (22)$$

$$\text{Dickenverhältnis:} \quad i_d = \frac{\text{Foliendicke}}{\text{Spaltweite}} \quad (23)$$

Jeder Prozesskennwert ist dabei in der Lage, eine bestimmte Änderung des Prozesszustandes der Schlauchbildungszone zu beschreiben. Aufblas- und Abzugsverhältnis beschreiben das Maß der Dehnung und damit indirekt das Maß der Orientierung in Quer- bzw. Längsrichtung. Das Temperaturverhältnis beschreibt das Maß der Abkühlung in der Schlauchbildungszone und damit in Verbindung mit dem Volumenstromverhältnis und dem Frostlinienverhältnis die Effektivität der Kühlung. Das Volumenstromverhältnis beschreibt die Fahrweise der Schlauchbildungszone mit kurzem oder langem Hals. Der Zusammenhang zwischen Schmelzevolumenstrom und Kühlluftvolumenstrom ist dabei eindeutig zugeordnet. Erhöht man bei konstantem Kühlluftvolumenstrom den Massestrom, bewegt sich die Frostlinie immer weiter nach oben. Erhöht man bei konstantem Massestrom den Kühlluftvolumenstrom, bewegt sich die Frostlinie immer weiter nach unten. Das Frostlinienverhältnis beschreibt die dimensionslose Höhe der Frostlinie. Den Einfluss der Foliendicke beschreibt das Dickenverhältnis.

5.2 Einfluss der Prozesskennwerte auf die Folieneigenschaften

Der Versuchsplan aus Tabelle 7 mit seinen 64 Versuchspunkten dient der Analyse des Zusammenhangs zwischen den Prozesskennwerten des Schlauchfolienextrusionsprozesses und den resultierenden mechanischen Kennwerten. Hierzu werden an jedem Versuchspunkt die

Prozessparameter gemessen und in die dimensionslosen Kennwerte überführt. Parallel hierzu wird an jedem Versuchspunkt jeweils ein Folienmuster entnommen und die mechanischen Kennwerte werden bestimmt. Hierzu zählen E-Modul, Spannung bei 100 % Dehnung, Zugfestigkeit und Schrumpf jeweils in Längs- und Querrichtung. Die Prüfmethodik wurde bereits in Kapitel 2.3 erläutert. Im Folgenden wird zur Untersuchung der grundlegenden Abhängigkeiten zunächst nur der qualitative Einfluss der dimensionslosen Prozesskennwerte auf die mechanischen Folieneigenschaften diskutiert. In den verwendeten Diagrammen sind jeweils die Messergebnisse der 64 verschiedenen Versuchspunkte inklusive der dazugehörigen Standardabweichungen dargestellt. Die Geraden entsprechen Regressionsgeraden, und sollen lediglich Tendenzen verdeutlichen.

5.2.1 E-Modul

Bei der Betrachtung des E-Moduls in Abhängigkeit von dem Abzugsverhältnis (Bild 28) erkennt man eine Zunahme des E-Moduls in Längsrichtung mit zunehmendem Abzugsverhältnis. Dieses Verhalten ist auch zu erwarten, da die Steifigkeit im Allgemeinen mit zunehmendem Verreckgrad, und dadurch zunehmenden Orientierungen, steigt. Die Zunahme des E-Moduls in Querrichtung mit zunehmendem Abzugsverhältnis hingegen ist zunächst, genau wie die Abnahme des E-Moduls in Querrichtung mit steigendem Aufblasverhältnis (Bild 29), auffallend. Eine Erklärung hierfür liefert Bild 30. In dem Diagramm ist das Volumenstromverhältnis über Abzugs- bzw. Aufblasverhältnis der Versuchspunkte dargestellt. Ein niedriges Volumenstromverhältnis (geringer Massestrom bei hohem Kühlluftvolumenstrom) steht hierbei synonym für die Fahrweise mit kurzem Hals. Ein kürzerer Hals führt auf Grund der mangelnden Relaxationszeit der Molekülketten in der Schlauchbildungszone zu höheren mechanischen Kennwerten. Somit erklärt sich die Zunahme des E-Moduls in Querrichtung mit zunehmendem Abzugsverhältnis durch das parallel sinkende Volumenstromverhältnis bzw. den kürzer werdenden Hals. Die Abnahme des E-Moduls in Querrichtung mit steigendem Aufblasverhältnis erklärt sich hingegen durch das parallel steigende Volumenstromverhältnis bzw. den länger werdenden Hals. Bei der direkten Betrachtung der Abhängigkeit des E-Moduls von dem Volumenstromverhältnis (Bild 31) zeigt sich das gleiche Bild, verbesserte Steifigkeit bei kleineren Volumenstromverhältnissen.

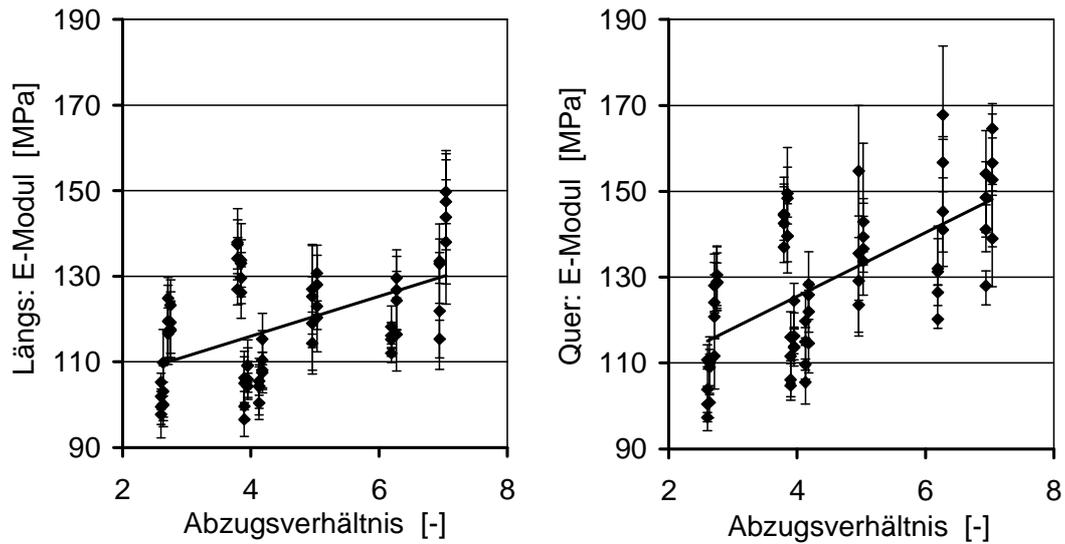


Bild 28: *E-Modul über Abzugsverhältnis, LD 150 AC, IKV*

Fig. 28: *Young's modulus vs. take up ratio, LD 150 AC, IKV*

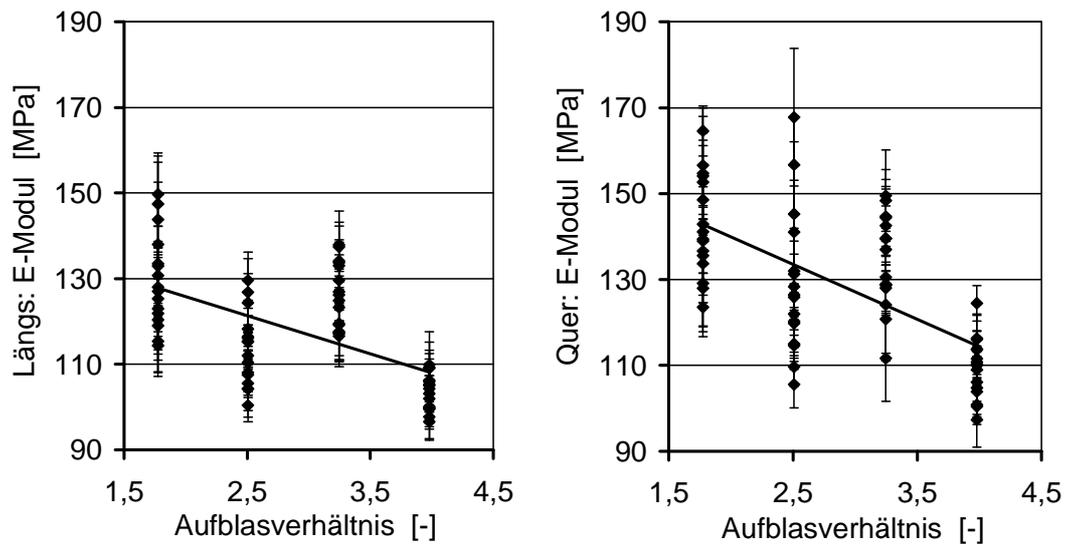


Bild 29: *E-Modul über Aufblasverhältnis, LD 150 AC, IKV*

Fig. 29: *Young's modulus vs. blow up ratio, LD 150 AC, IKV*

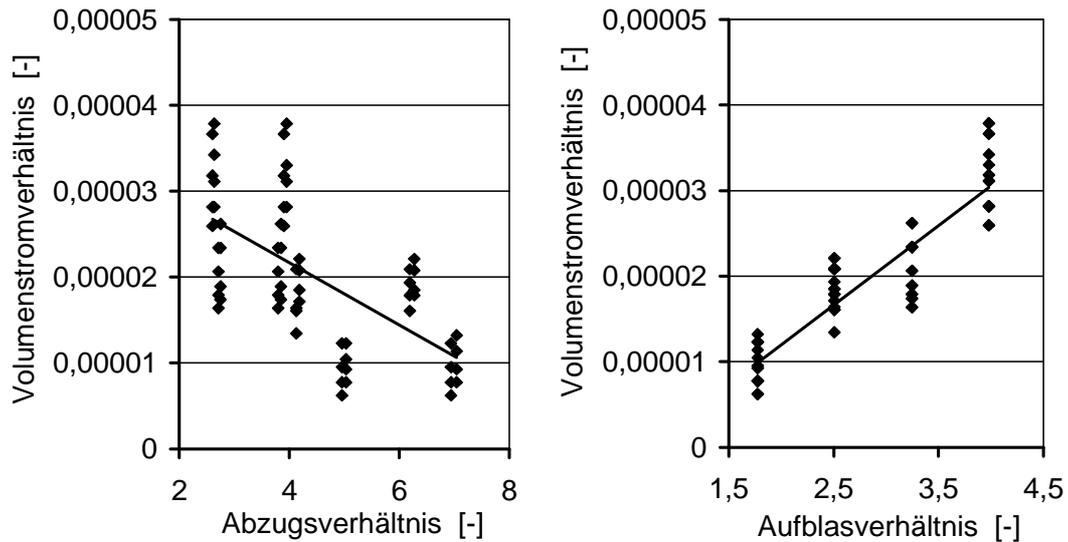


Bild 30: Volumenstrom- über Abzugs- und Aufblasverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 30: Volume flow rate- vs. take up and blow up ratio, LD 150 AC, IKV

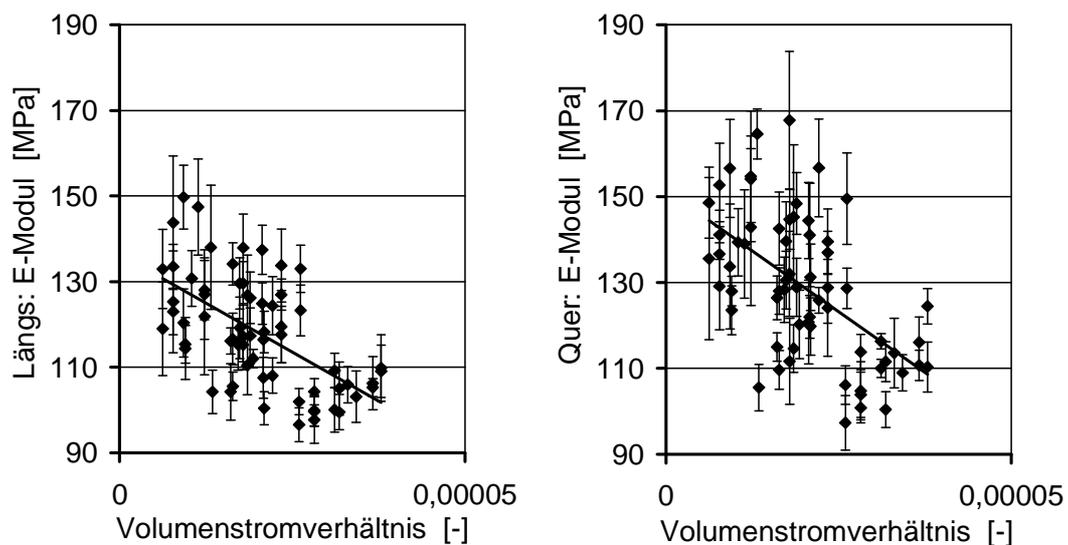


Bild 31: E-Modul über Volumenstromverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 31: Young's modulus vs. volume flow rate ratio, LD 150 AC, IKV

Der Einfluss des Temperaturverhältnisses auf den E-Modul (Bild 32) ist bei der Betrachtung aller Ergebnisse auf den ersten Blick nicht eindeutig. Demnach scheint die Schmelztemperatur bei der Schlauchfolienextrusion keinen Einfluss auf den E-Modul zu haben. Dieses Ergebnis ist vor dem Hintergrund theoretischer Überlegungen allerdings denkwürdig. So ist die Relaxation eingebrachter Orientierungen bei kälteren Schmelzen auf Grund der verminderten Beweglichkeit der Molekülketten eingeschränkt. Demnach müssen die Steifigkeit, und somit auch der E-Modul, einer bei niedrigerer Temperatur extrudierten Folie höher sein, da ein größeres Maß der ursprünglich eingebrachten Orientierungen erhalten bleibt. Bei der Betrachtung

tung der Ergebnisse der beiden einzelnen Versuchspläne 1-32 (Temperaturverhältnisse 1,9 und 2,1) und 33-64 (2,0 und 2,2) zeigt sich die Theorie auch bestätigt. Der E-Modul in Längs- sowie in Querrichtung fällt mit steigendem Temperaturverhältnis von 1,9 auf 2,1 bzw. von 2,0 auf 2,2, da gleichzeitig die Molekülbeweglichkeit zunimmt, und somit die Relaxation gefördert wird. Ein Unterschied ergibt sich jedoch in den Absolutwerten der E-Moduln. So liegen die Werte der Versuchspunkte 1-32 (1,9 und 2,1) auf einem niedrigeren Niveau als die E-Moduln der Versuchspunkte 33-64 (2,0 und 2,2). Diese Beobachtungen zeigen eine Inkonsistenz in den Ergebnissen der beiden Versuchspläne 1-32 und 33-64, auf die später noch genauer eingegangen wird.

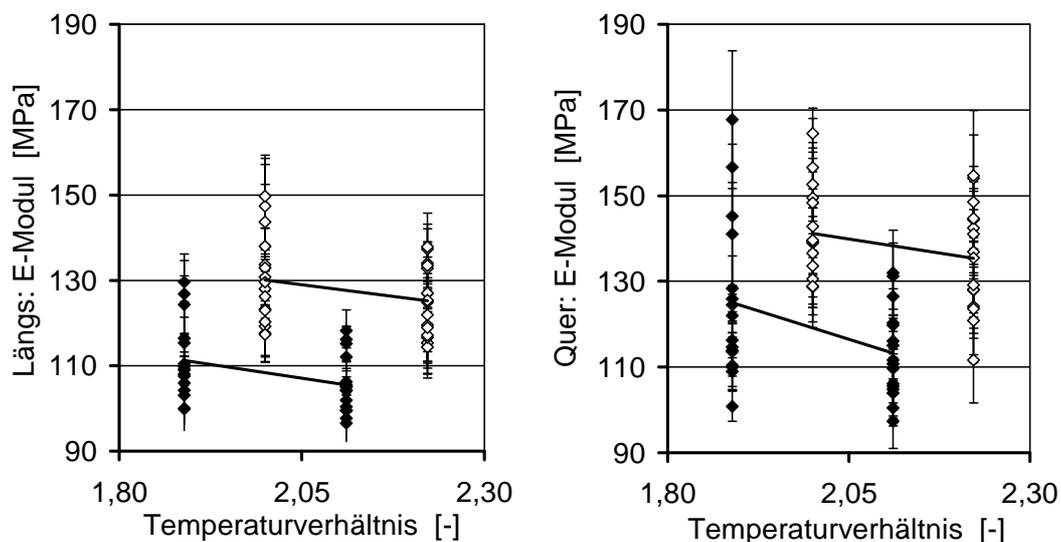


Bild 32: E-Modul über Temperaturverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 32: Young's modulus vs. temperature ratio, LD 150 AC, IKV

Bild 33 zeigt den Einfluss des Dickenverhältnisses auf den E-Modul. Auch bei diesen Ergebnissen fällt, wie schon bei dem Einfluss des Temperaturverhältnisses, die Unterschiedlichkeit der Versuchspläne 1-32 (Dickenverhältnis 0,053 und 0,080) und der Versuchspläne 33-64 (0,067 und 0,093) auf. Auch hier zeigt sich der Trend, ein Absinken der E-Moduln mit steigendem Dickenverhältnis, nur innerhalb der einzelnen Versuchsreihen. Außerdem liegen die Ergebnisse der Versuchspläne 33-64 (0,067 und 0,093) wiederum auf einem höheren Niveau. Somit zeigen auch diese Beobachtungen die schon angesprochene Inkonsistenz in den Ergebnissen der beiden Versuchspläne 1-32 und 33-64. Der abnehmende E-Modul bei dickeren Folien lässt sich ebenfalls wieder mit einer stärkeren Relaxation der eingebrachten Orientierungen erklären, da die Relaxation durch höhere Temperaturen begünstigt wird, wie beim Einfluss des Temperaturverhältnisses gezeigt wurde. Da dickere Folien bei gleicher Wärmeleitfähigkeit langsamer kühlen als dünnere Folien, befindet sich die durchschnittliche Folientemperatur bei größeren Dickenverhältnissen für eine längere Zeit in einem Temperaturbe-

reich, in dem die Relaxation noch möglich ist. Daher ist die Relaxation bei größeren Dickenverhältnissen begünstigt, was zu der Abnahme des E-Moduls mit steigendem Dickenverhältnis führt.

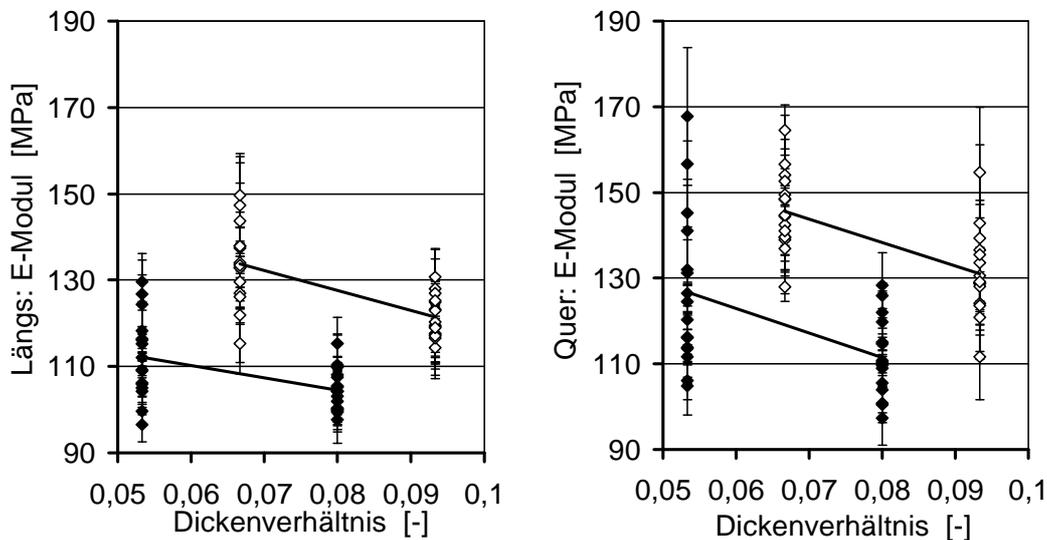


Bild 33: E-Modul über Dickenverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 33: Young's modulus vs. thickness ratio, LD 150 AC, IKV

Das Frostlinienverhältnis, welches definiert ist als Quotient aus Frostlinienhöhe und Werkzeugradius, führt bei Vergrößerung zu einer Abnahme des E-Moduls in Längs- sowie in Querrichtung (Bild 34). Das bedeutet, mit zunehmender Frostlinienhöhe sinkt die Steifigkeit der Folie. Diese Beobachtung ist wiederum durch die steigende Relaxationszeit und den damit verbundenen Abbau der Molekülorientierungen bei steigender Frostlinienhöhe bzw. Verweilzeit in der Schlauchbildungszone zu erklären. Die Auftragung von Volumenstromverhältnis über Frostlinienverhältnis verdeutlicht diese Erklärung (Bild 35). Mit zunehmendem Frostlinienverhältnis erhöht sich demnach das Volumenstromverhältnis, welches synonym für eine Verlängerung der Halslänge bei der Fahrweise steht. Dieser Einfluss hat bereits oben durch die Verringerung des E-Moduls in Längs- und Querrichtung eine Abnahme der Steifigkeit gezeigt.

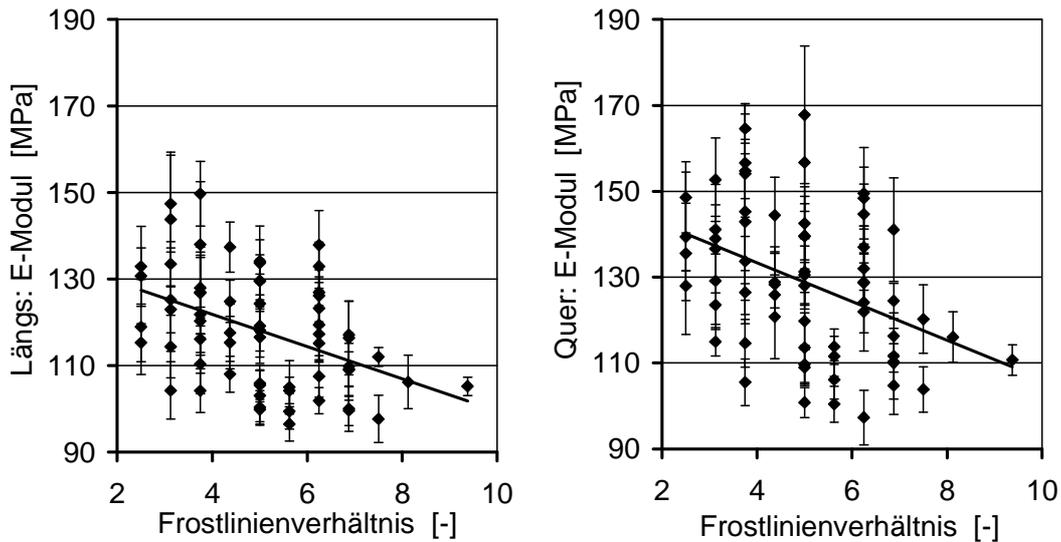


Bild 34: E-Modul über Frostlinienverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 34: Young's modulus vs. frost line ratio, LD 150 AC, IKV

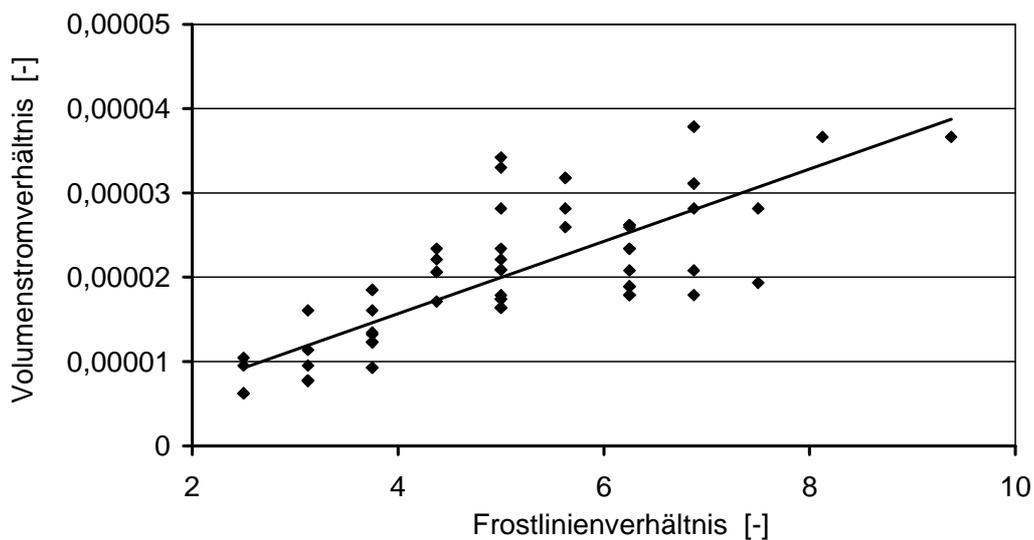


Bild 35: Volumenstrom- über Frostlinienverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 35: Volume flow rate- vs. frost line ratio, LD 150 AC, IKV

5.2.2 Zugfestigkeit

Bei der Analyse des Einflusses von Abzugs- und Aufblasverhältnis auf die Zugfestigkeit zeigt sich eine Zunahme der Zugfestigkeit in Längsrichtung mit zunehmendem Abzugsverhältnis und eine Zunahme der Zugfestigkeit in Querrichtung mit zunehmendem Aufblasverhältnis (Bild 36 und Bild 37). Diese Beobachtung ist vor dem Hintergrund steigender Orientierungen in Längsrichtung mit steigendem Abzugsverhältnis bzw. in Querrichtung mit steigendem Aufblasverhältnis schlüssig. Die Zugfestigkeit zeigt somit eine klare Abhängigkeit vom Ori-

entierungsgrad. Die Abnahme der Zugfestigkeit in Querrichtung mit zunehmendem Abzugsverhältnis bzw. in Längsrichtung mit zunehmendem Aufblasverhältnis ist jedoch zunächst unklar. Eine Erklärung hierfür liefert der Zusammenhang zwischen Aufblas- und Abzugsverhältnis. Bild 38 zeigt das Aufblasverhältnis aufgetragen über dem Abzugsverhältnis. Man erkennt, dass bei den durchgeführten Versuchsplänen mit steigendem Abzugsverhältnis das Aufblasverhältnis sinkt. Somit erklärt sich die Abnahme der Zugfestigkeit in Querrichtung mit steigendem Abzugsverhältnis durch die damit verbundene Abnahme des Aufblasverhältnisses bzw. der Querverstreckung. Analog hierzu erklärt sich die Abnahme der Zugfestigkeit in Längsrichtung mit steigendem Aufblasverhältnis durch die damit gekoppelte Abnahme des Abzugsverhältnisses.

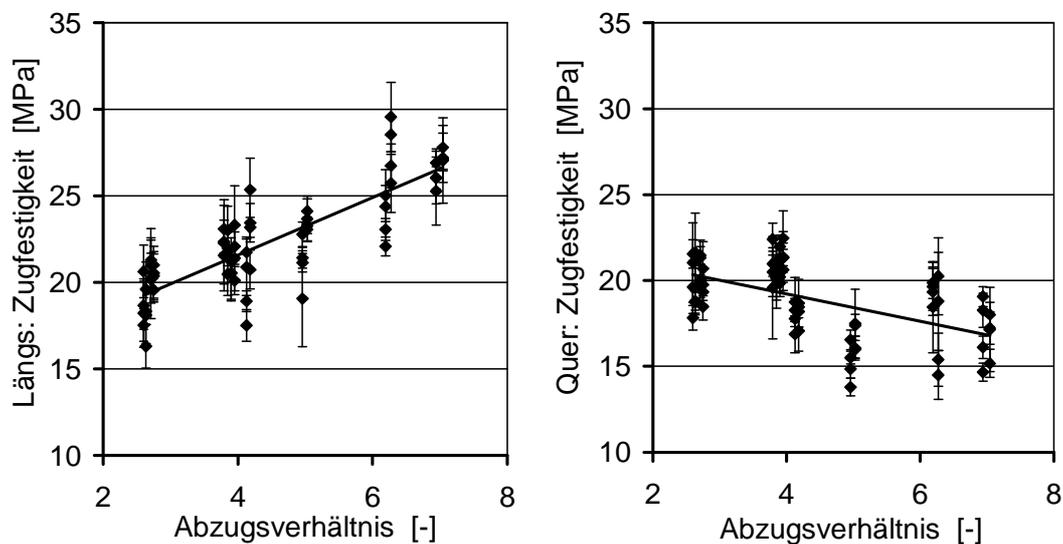


Bild 36: Zugfestigkeit über Abzugsverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 36: Tensile strength vs. take up ratio, LD 150 AC, IKV

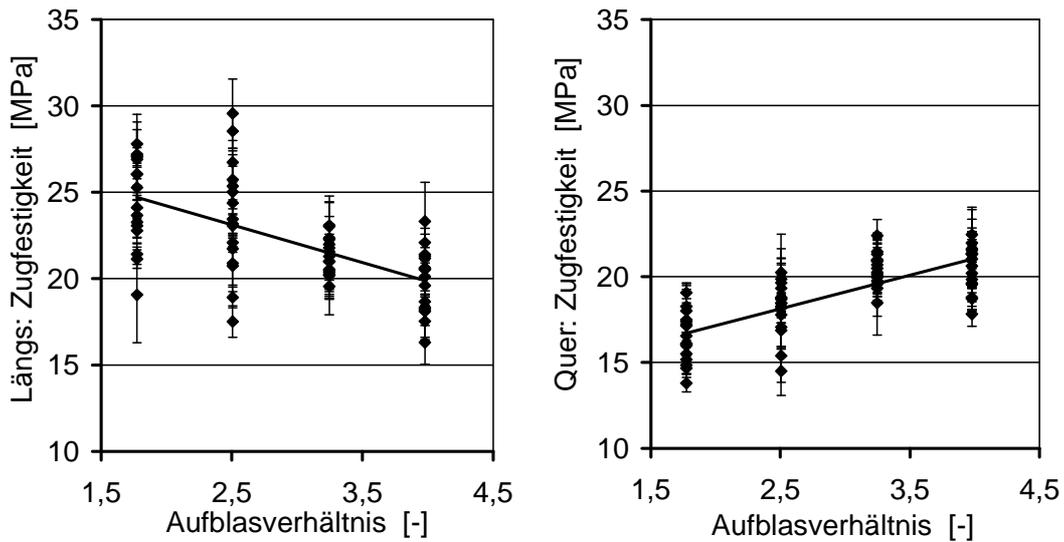


Bild 37: Zugfestigkeit über Aufblasverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 37: Tensile strength vs. blow up ratio, LD 150 AC, IKV

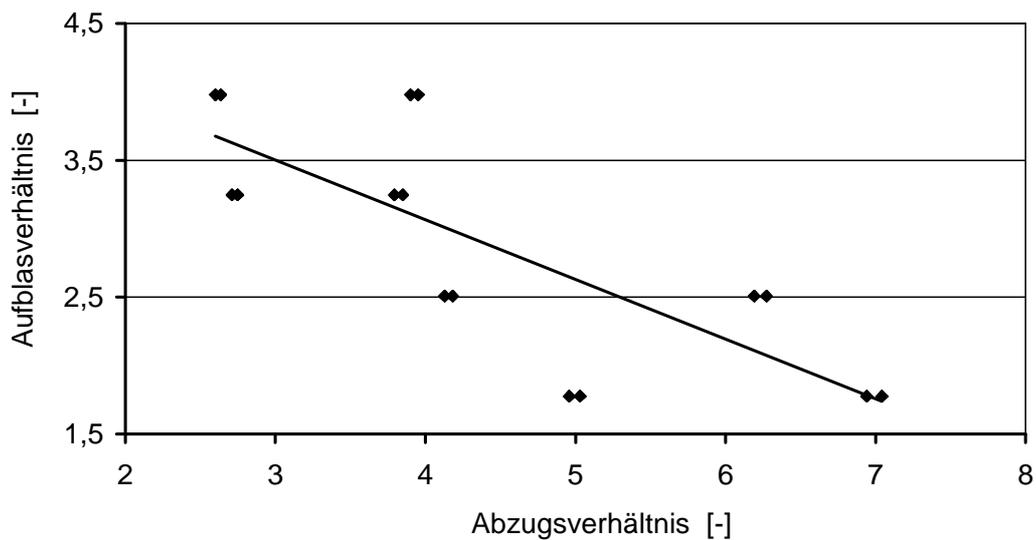


Bild 38: Aufblas- über Abzugsverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 38: Blow up- vs. take up ratio, LD 150 AC, IKV

Vergleicht man die Einflüsse von Abzugs- und Aufblasverhältnis auf den E-Modul mit den Einflüssen auf die Zugfestigkeit, stellt man fest, dass der Einfluss der Orientierung auf den E-Modul überlagert wird durch den Einfluss des Volumenstromverhältnisses bzw. die Fahrweise mit kurzem Hals. Der Einfluss der Orientierung auf die Zugfestigkeit hingegen ist unmittelbar und nicht durch andere Effekte überlagert. Offensichtlich scheint daher die Molekülstruktur, die für die mechanischen Eigenschaften verantwortlich ist, auf die Kennwerte E-Modul und Zugfestigkeit unterschiedlichen Einfluss auszuüben. Dies ist vor dem Hintergrund der verschiedenen Dehnwerte betrachtet auch schlüssig. Während der E-Modul im

Dehnbereich von 1 bis 5 % Dehnung bestimmt wird, betragen die Dehnungen bei Zugfestigkeit einige Hundert Prozent. So wird die Messung des E-Moduls vorwiegend von Entschlafungen der molekularen Überstruktur bestimmt, während diese Überstrukturen bei den hohen Dehnungen bei Zugfestigkeit komplett zerstört sind und die Messung der Zugfestigkeit überwiegend vom Abgleiten der Molekülketten aneinander bestimmt wird. Die Betrachtung der Ergebnisse lässt daher folgenden Schluss zu: Die Relaxation der in der Schlauchbildungszone eingebrachten Orientierungen, die bei einem großen Volumenstromverhältnis bzw. der Fahrweise mit langem Hals begünstigt ist, betrifft nur die Entschlafungen der freien Molekülenenden, und wirkt sich daher nur auf die mechanischen Eigenschaften bei geringen Dehnwerten wie z.B. den E-Modul aus. Daher ist der Einfluss der Orientierung auf den E-Modul überlagert von dem Volumenstromverhältnis bzw. von der Fahrweise mit kurzem Hals. Auf die eigentliche Orientierung der Hauptketten, die die mechanischen Eigenschaften bei hohen Dehnwerten wie z.B. die Zugfestigkeit bestimmen, hat die Relaxation in der Schlauchbildungszone nur einen sehr geringen Einfluss. Diese Schlussfolgerung wird bestätigt durch die Analyse des Einflusses des Volumenstromverhältnisses auf die gemessenen Zugfestigkeiten (Bild 39). Ein sinkendes Volumenstromverhältnis (Quotient aus Massestrom und Kühlluftvolumenstrom), sprich eine Fahrweise mit kurzem Hals, hat bei der Betrachtung des E-Moduls einen Anstieg in Längs- sowie in Querrichtung ergeben. Bei dem Einfluss auf die Zugfestigkeit führt ein sinkendes Volumenstromverhältnis nur in Querrichtung zu einem Anstieg des mechanischen Kennwerts, in Längsrichtung sinkt die Zugfestigkeit mit sinkendem Volumenstromverhältnis. Eine Erklärung hierzu liefert Bild 30, die Auftragung des Volumenstromverhältnisses über Abzugs- und Aufblasverhältnis. Hieraus geht die Überlagerung des Einflusses des Volumenstromverhältnisses auf die Zugfestigkeit durch Abzugs- bzw. Aufblasverhältnis und damit durch den Orientierungsgrad hervor. Somit ist die Abnahme der Zugfestigkeit in Längsrichtung mit zunehmendem Volumenstromverhältnis durch die damit verbundene Abnahme des Abzugsverhältnisses zu erklären, analog hierzu die Zunahme der Zugfestigkeit in Querrichtung mit zunehmendem Volumenstromverhältnis durch die gleichzeitige Zunahme des Aufblasverhältnisses.

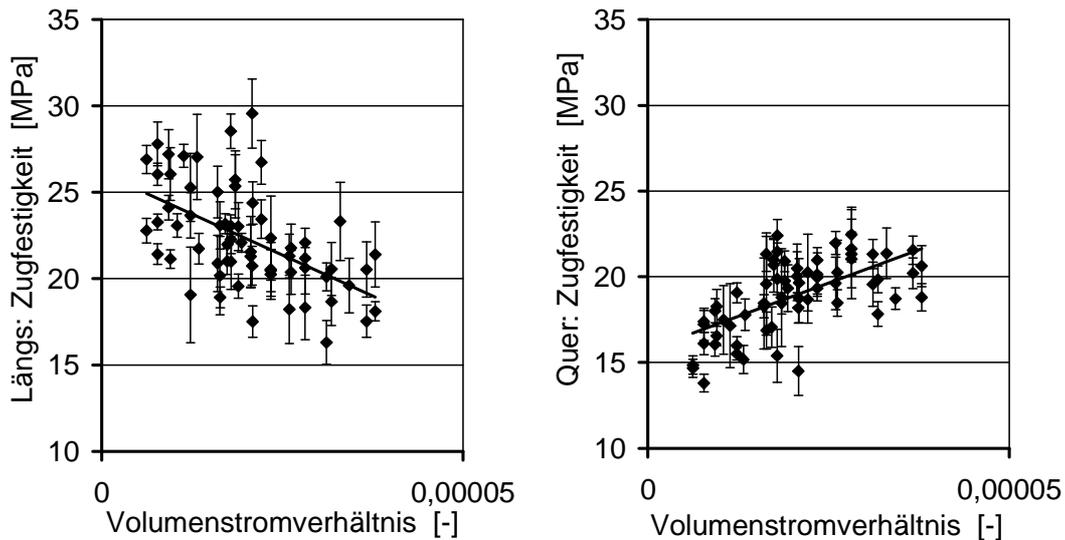


Bild 39: Zugfestigkeit über Volumenstromverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 39: Tensile strength vs. volume flow rate ratio, LD 150 AC, IKV

Bild 40 und Bild 41 zeigen den Einfluss von Temperatur- und Dickenverhältnis auf die Zugfestigkeit. Hier ist ebenfalls, wie auch schon bei der Analyse des E-Moduls, ein Einfluss nur bei der Einzelbetrachtung der Versuchspunkte 1-32 bzw. 33-64 zu erkennen. Tendenzen sind nur für die Zugfestigkeiten in Längsrichtung zu erkennen und auch diese nur schwach ausgeprägt. Auf die Zugfestigkeit in Querrichtung zeigen Temperatur- und Dickenverhältnis keinen Einfluss, obwohl mit zunehmendem Temperatur- bzw. Dickenverhältnis die Relaxation der Molekülketten begünstigt wird. Das bedeutet, dass die Relaxation der eingebrachten Orientierungen in der Schlauchbildungszone wohl einen Einfluss auf den E-Modul, jedoch nur einen sehr geringen Einfluss auf die Zugfestigkeit ausübt. Dieses Ergebnis bestätigt die oben getroffene Schlussfolgerung, dass die Zugfestigkeit in erster Linie von Abzugs- und Aufblasverhältnis, also dem Grad der Verstreckung, abhängt.

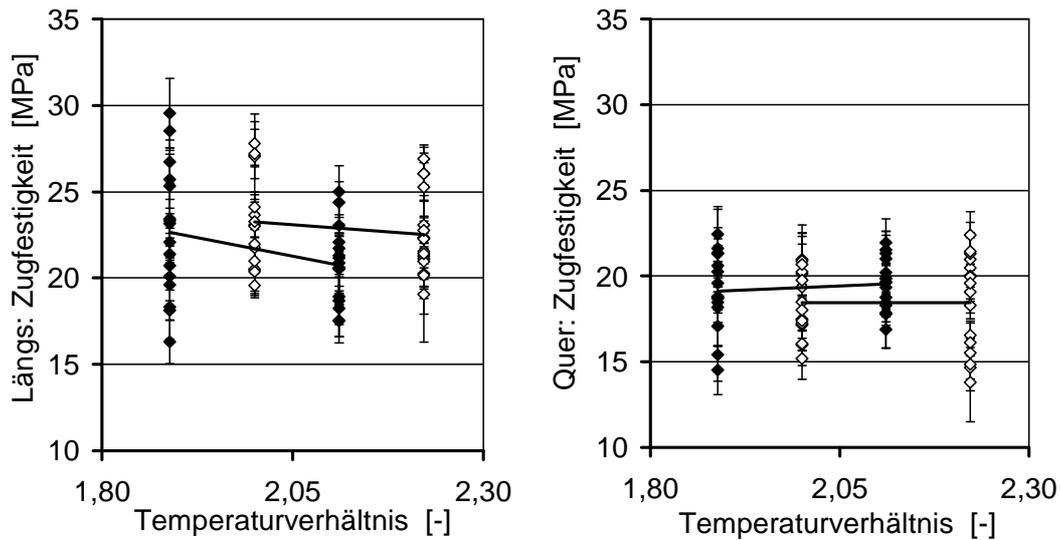


Bild 40: Zugfestigkeit über Temperaturverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 40: Tensile strength vs. temperature ratio, LD 150 AC, IKV

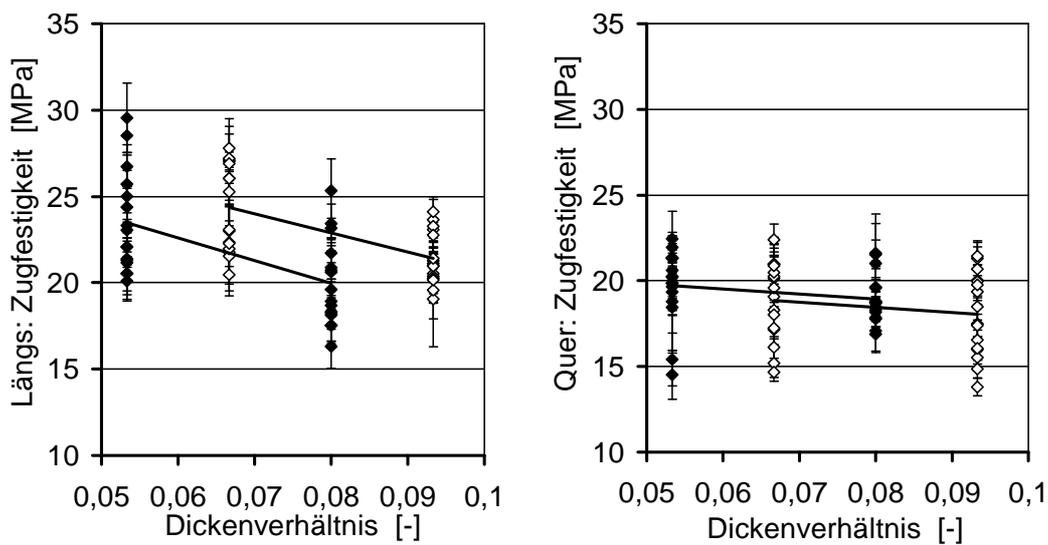


Bild 41: Zugfestigkeit über Dickenverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 41: Tensile strength vs. thickness ratio, LD 150 AC, IKV

Letztlich ist auch der Einfluss des Frostlinienverhältnisses auf die Zugfestigkeit auf den Einfluss von Abzugs- und Aufblasverhältnis zurückzuführen. Ein Vergleich von Bild 42 mit Bild 43 zeigt eine Abnahme der Zugfestigkeit mit steigendem Frostlinienverhältnis in Längsrichtung bei einer korrespondierenden Abnahme des Abzugsverhältnisses und eine Zunahme der Zugfestigkeit in Querrichtung bei gleichzeitig ansteigendem Aufblasverhältnis.

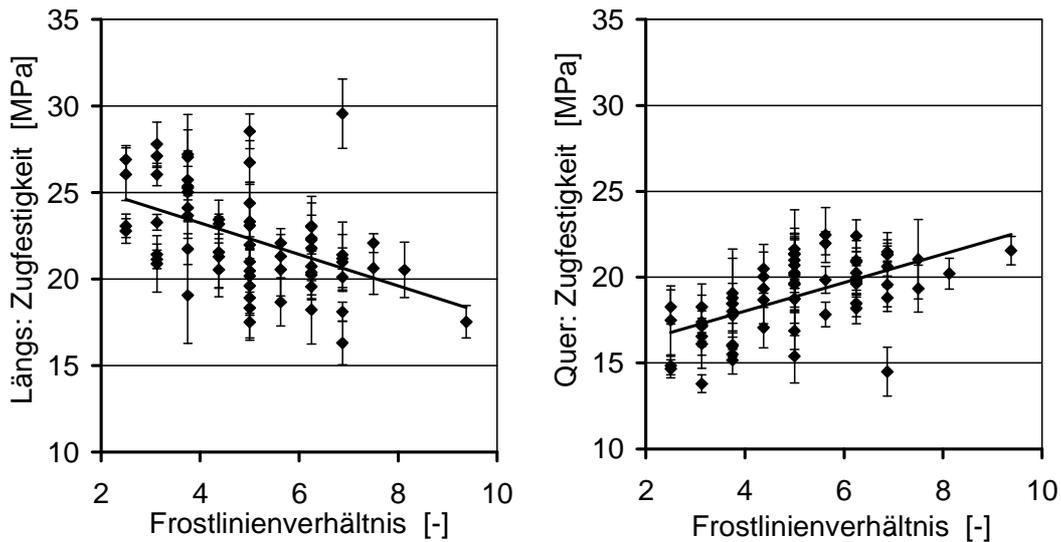


Bild 42: Zugfestigkeit über Frostlinienverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 42: Tensile strength vs. frost line ratio, LD 150 AC, IKV

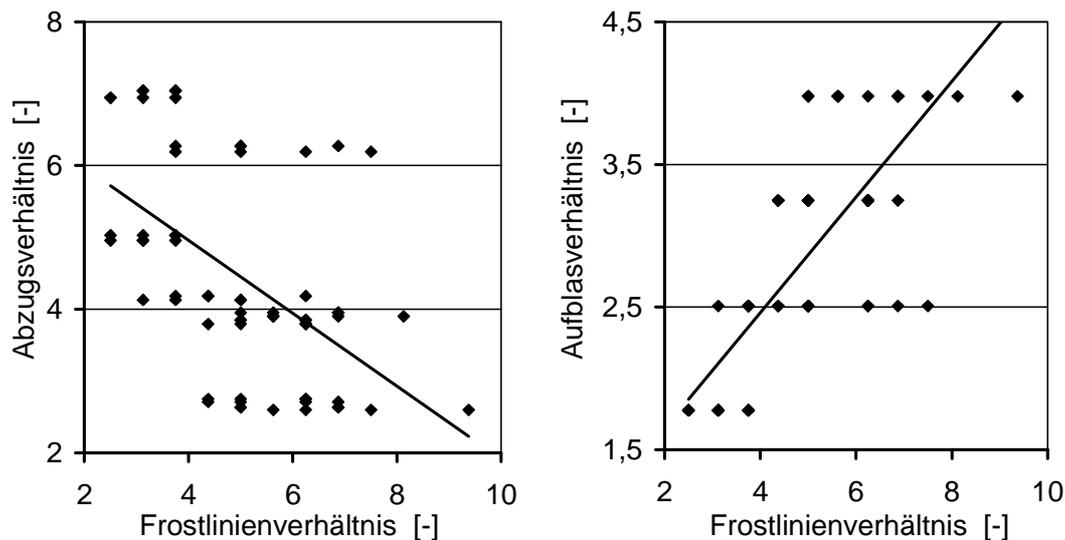


Bild 43: Abzugs- und Aufblas- über Frostlinienverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 43: Take up- and blow up- vs. frost line ratio, LD 150 AC, IKV

5.2.3 Schrumpfung

Die Analyse des Einflusses des Abzugsverhältnisses auf den Schrumpfung in Längsrichtung zeigt, wie zu erwarten war, eine verstärkende Wirkung mit zunehmendem Abzugsverhältnis (Bild 44). Mit zunehmender Längsverstreckung steigt nämlich auch die Längsorientierung in der Folie, für welche der Schrumpfung ein direktes Maß ist. Der abnehmende Einfluss des Abzugsverhältnisses auf den Schrumpfung in Querrichtung erklärt sich wiederum aus dem Zusammenhang zwischen Aufblas- und Abzugsverhältnis (Bild 38). Bei den durchgeführten Ver-

suchsplänen sinkt mit steigendem Abzugsverhältnis das Aufblasverhältnis. Somit erklärt sich durch die damit verbundene geringere Querverstreckung des Folienschlauchs auch der abnehmende Einfluss des Abzugsverhältnisses auf den Schrumpf in Querrichtung.

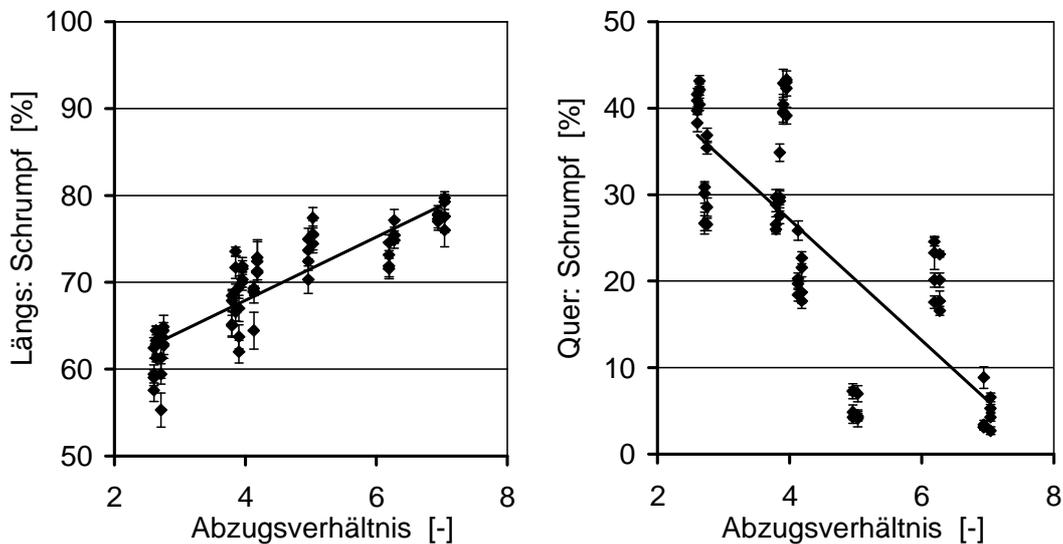


Bild 44: Schrumpf über Abzugsverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 44: Shrinkage vs. take up ratio, LD 150 AC, IKV

Ein analoges Verhalten zum Einfluss des Abzugsverhältnisses zeigt die Analyse des Schrumpfs in Abhängigkeit von dem Aufblasverhältnis (Bild 45). Während sich die verstärkende Wirkung des Aufblasverhältnisses auf den Schrumpf in Querrichtung wie erwartet einstellt, lässt sich die abnehmende Wirkung des Aufblasverhältnisses auf den Schrumpf in Längsrichtung mit dem parallel sinkenden Abzugsverhältnis erklären.

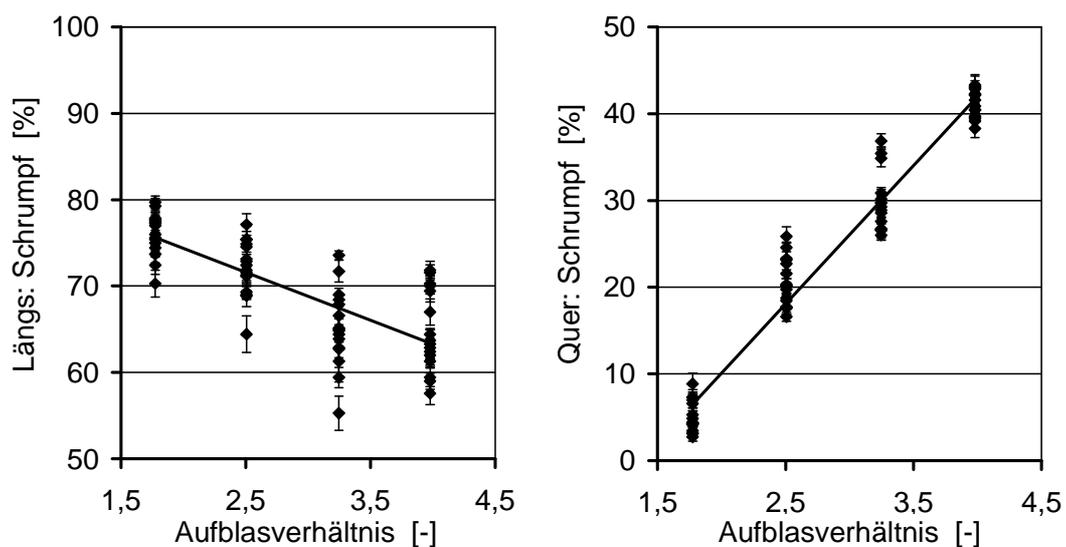


Bild 45: Schrumpf über Aufblasverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 45: Shrinkage vs. blow up ratio, LD 150 AC, IKV

Das Volumenstromverhältnis ist ein Maß für die Halslänge bei der Herstellung der Schlauchfolie. Nach der Theorie führen kleinere Volumenstromverhältnisse (kürzere Halslängen) zu verbesserten mechanischen Eigenschaften, da die in der Schlauchbildungszone verreckten Molekülketten weniger Zeit zum Relaxieren haben. Bild 46 zeigt diese Erklärung für den Längsschrumpf auch bestätigt, hohe Schrumpfwerte bei kleinen Volumenstromverhältnissen. Der Schrumpf in Querrichtung zeigt jedoch ein gegenteiliges Verhalten, eine Abnahme der Schrumpfwerte mit sinkenden Volumenstromverhältnissen bzw. Halslängen. Der Einfluss des Volumenstromverhältnisses scheint daher bei der Ausbildung des Schrumpfs in Querrichtung von einem anderen Prozesskennwert überlagert zu werden. Bei größeren Volumenstromverhältnissen liegen auch größere Aufblasverhältnisse vor (Bild 30). Der ausschlaggebende Prozesskennwert bei der Zunahme des Querschrumpfs mit zunehmenden Volumenstromverhältnissen ist demnach das parallel steigende Aufblasverhältnis und die dadurch eingebrachten größeren Orientierungen. Analoge Beobachtungen wurden bei der Analyse der Einflüsse auf die Zugfestigkeit gemacht. Auch hierbei werden die Einflüsse der anderen Prozesskennwerte von dem Einfluss des Abzugs- bzw. Aufblasverhältnisses überlagert. Somit scheint offensichtlich auch der Schrumpf vorwiegend durch den molekularen Orientierungszustand bestimmt zu werden.

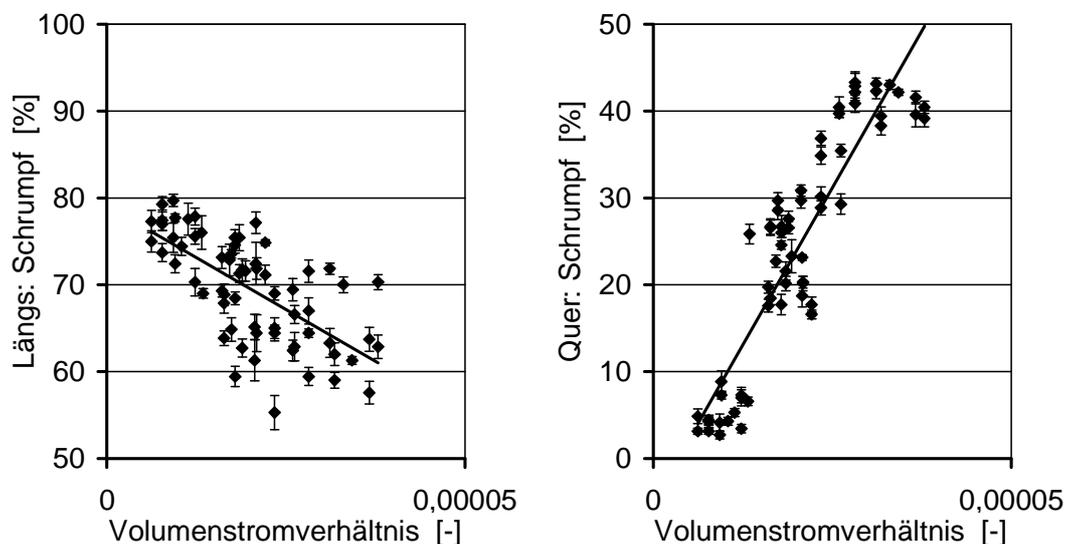


Bild 46: Schrumpf über Volumenstromverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 46: Shrinkage vs. volume flow rate ratio, LD 150 AC, IKV

Bild 47 und Bild 48 zeigen den Einfluss von Temperatur- und Dickenverhältnis auf den Schrumpf. Hier ist ebenfalls, wie auch schon bei der Analyse von E-Modul und Zugfestigkeit, eine Tendenz nur bei der Einzelbetrachtung der beiden Versuchspläne 1-32 bzw. 33-64 zu erkennen. Es zeigt sich wieder die Inkonsistenz der Versuchsreihen. Eine Tendenz ist jedoch

im Gegensatz zu der Analyse der Einflüsse auf den E-Modul nur bei dem Schrumpf in Längsrichtung auszumachen. Hierbei ist der abnehmende Einfluss der steigenden Prozesskennwerte Temperatur- sowie Dickenverhältnis auf den Schrumpf in Längsrichtung durch eine verstärkte Relaxation bei höheren Temperaturen bzw. Zeiten zu erklären. Im Gegensatz hierzu zeigen Temperatur- sowie Dickenverhältnis keinen Einfluss auf den Schrumpf in Querrichtung. Vielmehr ist in den beiden Diagrammen der Einfluss der vier verschiedenen Aufblasverhältnisse auf den Schrumpf in Querrichtung zu erkennen (vgl. Bild 45).

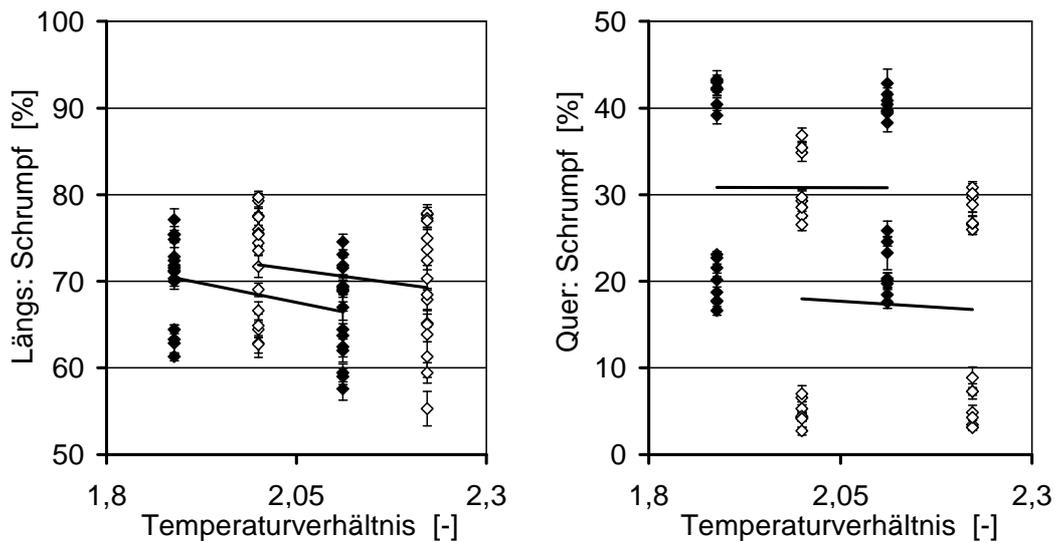


Bild 47: Schrumpf über Temperaturverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 47: Shrinkage vs. temperature ratio, LD 150 AC, IKV

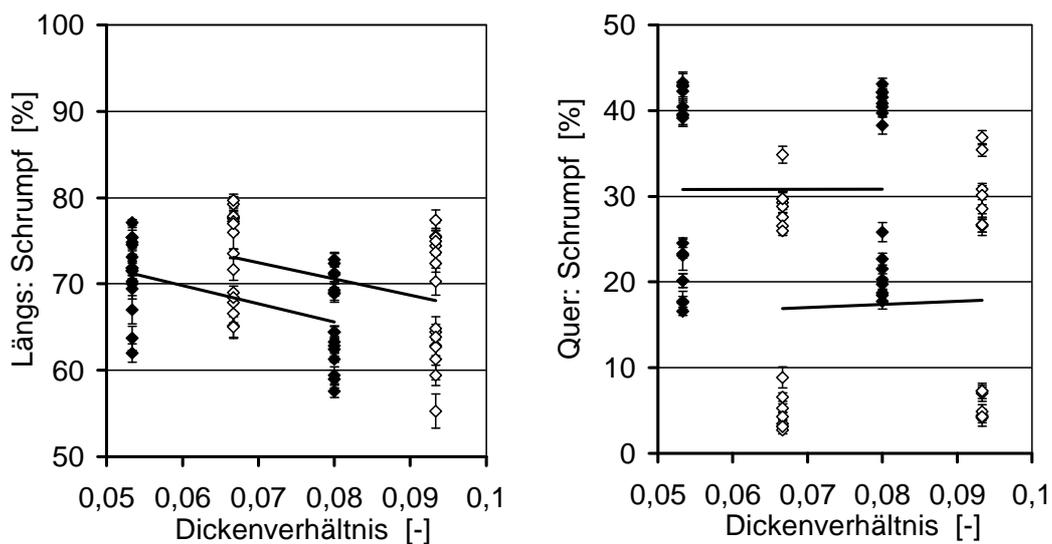


Bild 48: Schrumpf über Dickenverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 48: Shrinkage vs. thickness ratio, LD 150 AC, IKV

Der Einfluss des Frostlinienverhältnisses auf den Schrumpfung lässt sich ebenfalls mit dem Einfluss von Abzugs- bzw. Aufblasverhältnis erklären. Mit sinkendem Abzugsverhältnis sinkt der Längsschrumpfung, und mit steigendem Aufblasverhältnis wächst der Querschrumpfung. Ein Vergleich von Bild 49 mit Bild 43 zeigt daher eine fallende Regressionsgerade für Längsschrumpfung und Abzugsverhältnis bzw. eine steigende Regressionsgerade für Querschrumpfung und Aufblasverhältnis jeweils bei Zunahme des Frostlinienverhältnisses.

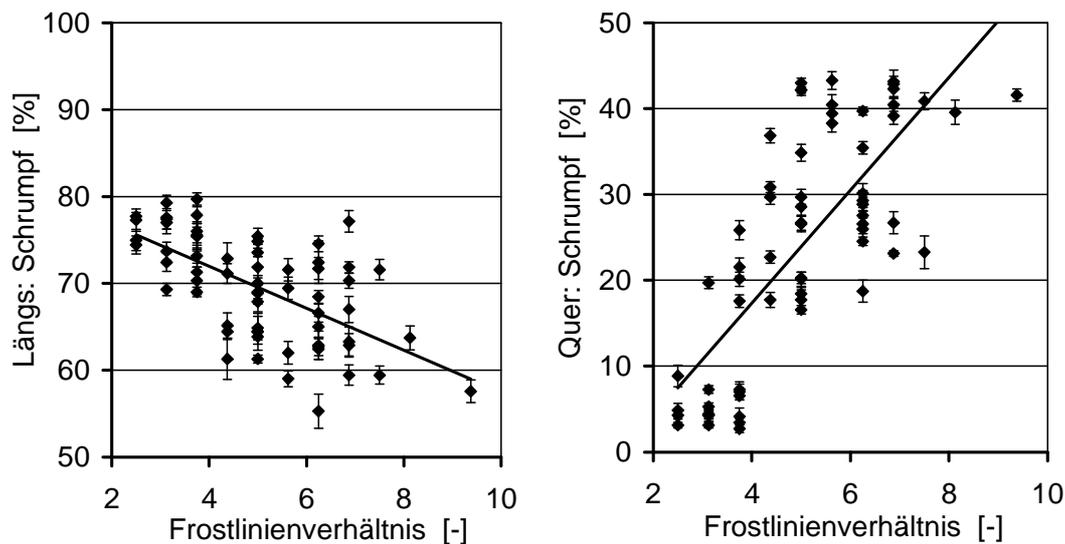


Bild 49: Schrumpfung über Frostlinienverhältnis, LD 150 AC, IKV

Fig. 49: Shrinkage vs. frost line ratio, LD 150 AC, IKV

5.2.4 Fazit

Die Betrachtungen des Kapitels 5.2 schließen nur die Prozesskennwerte der Schlauchbildungszone ein. Neben diesen Einflussgrößen bestimmen in der Schlauchfolienextrusion, wie anfangs erläutert, noch zwei weitere Randbedingungen die Folieneigenschaften. Diese beeinflussenden Faktoren sind das Material und die Anlage, auf der die Folie hergestellt wird. Der Einfluss dieser beiden Faktoren wird in den Kapiteln 5.4 und 5.5 noch näher untersucht.

Die qualitative Analyse der Einflüsse der aufgestellten dimensionslosen Prozesskennwerte auf die mechanischen Folieneigenschaften zeigt eine Abhängigkeit von E-Modul, Zugfestigkeit und Schrumpfung von allen sechs aufgestellten Prozesskennwerten Abzugs-, Aufblas-, Volumenstrom-, Temperatur-, Dicken- und Frostlinienverhältnis. Vereinfacht betrachtet bestimmen Abzugs- und Aufblasverhältnis den Grad der Verstreckung, während Temperatur-, Frostlinien-, Dicken- und Volumenstromverhältnis die Abkühlung, bzw. das Maß der Relaxation, beeinflussen. Das heißt, bei der Entstehung der mechanischen Eigenschaften in der Schlauch-

bildungszone sind all die Prozesse von entscheidendem Einfluss, die die Orientierung bzw. die Relaxation und ihr komplexes Wechselspiel charakterisieren.

Die Analyse der Ergebnisse zeigt eine Zunahme des E-Moduls in Längsrichtung mit steigendem Abzugsverhältnis (Bild 28). Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen aus der Literatur (vgl. Kapitel 1.3). Die in der Literatur beschriebene Zunahme des E-Moduls in Querrichtung mit steigendem Aufblasverhältnis konnte allerdings mit den aufgestellten Versuchsplänen nicht nachgewiesen werden. Bild 29 zeigt mit der Abnahme des E-Moduls in Querrichtung bei zunehmendem Aufblasverhältnis das genaue Gegenteil der Erwartungen. Dieses Ergebnis bedeutet allerdings nicht, dass die Beobachtungen entweder in der Literatur oder in dieser Arbeit falsch sind. Vielmehr zeigt es die Komplexität und die gegenseitige Überlagerung der, die mechanischen Eigenschaften bestimmenden, Vorgänge in der Schlauchbildungszone. In dem vorliegenden Fall wird der Einfluss des Aufblasverhältnisses, wie oben beschrieben, von dem Einfluss der Fahrweise mit kurzem Hals überlagert. Daraus folgt, dass die isolierte Betrachtung einzelner Einflussgrößen auf die Folieneigenschaften nicht statthaft ist, da sie zu falschen Schlussfolgerungen führen kann. Vielmehr sind die Vorgänge in der Schlauchbildungszone in ihrer Gesamtheit zu betrachten, so dass nicht nur die Haupteffekte sondern auch die auftretenden Wechselwirkungseffekte bewertet werden müssen.

Neben den spezifischen Aussagen bezüglich des Einflusses der Prozesskennwerte auf die Folieneigenschaften ist bei den Untersuchungen auch ein allgemeiner Aspekt hervorgetreten. Die Einflüsse der Prozesskennwerte besitzen annäherungsweise -innerhalb des untersuchten Prozessfensters- einen linearen Charakter. Diese Erkenntnis führt später zu der Aufstellung der Berechnungsgleichungen in ebenfalls linearer Form.

Des Weiteren wird eine große Streubreite der Messergebnisse besonders beim E-Modul beobachtet. Dies ist zum Teil auf die Schwankung der Foliendicke bei der Herstellung zurückzuführen. Darüber hinaus weisen Zugversuche prinzipiell große Streubreiten auf, da die inneren Eigenschaften von unterschiedlichen Zugproben nie vollkommen identisch sind. Die zugehörige DIN schreibt daher auch die Wiederholungsmessungen vor. Da die Schlauchfolienextrusionsanlage am IKV nicht über eine Regelung der Foliendickenverteilung über dem Umfang verfügt, muss eine Schwankung der Foliendicke von ca. $\pm 10\%$ in Kauf genommen werden. Diese Schwankung wirkt sich jedoch während des Zugversuches direkt auf die aufgenommene Kraft, und somit folgerecht auf die aus der Kraft/Weg-Kurve ermittelten mechanischen Kennwerte aus. Die große Streuung als Datenbasis für das statistische Eigenschaftsmodell lässt dabei eine ebenso große Streubreite bei den Prognosewerten des Modells erwarten, da es eine Eigenart der statistischen Prozessmodellbildung ist, dass die Güte des Modells umge-

kehrt abhängig von der Varianz bzw. der Abweichung der Messdaten zur Erstellung des Modells ist.

5.3 Berechnungsgleichungen

Die qualitative Analyse des Einflusses der aufgestellten dimensionslosen Prozesskennwerte aus Kapitel 5.2 hat für die Aufstellung der Berechnungsgleichungen im Wesentlichen zwei Ergebnisse hervorgebracht. Erstens zeigen die mechanischen Eigenschaften E-Modul, Zugfestigkeit und Schrumpf eine Abhängigkeit von allen sechs aufgestellten Prozesskennwerten Abzugs-, Aufblas-, Volumenstrom-, Temperatur-, Dicken- und Frostlinienverhältnis. Zweitens zeigen die Abhängigkeiten neben der großen Streubreite näherungsweise einen linearen Charakter. Diese beiden Erkenntnisse führen zu der aufgestellten linearen Berechnungsgleichung der folgenden Form.

$$\text{Mechanischer Kennwert} = q \cdot i_q + l \cdot i_l + t \cdot i_t + f \cdot i_f + v \cdot i_v + d \cdot i_d + k \quad (24)$$

Ein beliebiger mechanischer Kennwert wird dann mit der Formel berechnet, indem man die zugehörigen Prozesskennwerte i_q , i_l , i_t , i_f , i_v und i_d , vgl. Gl(18) bis Gl(23), als Variablen in Gl(24) einsetzt. Die Faktoren q , l , t , f , v und d der einzelnen Effekte und die Konstante k müssen dazu bekannt sein, und werden im Vorfeld aus Experimenten bestimmt. Die Vorgehensweise hierzu wird im nächsten Kapitel erklärt.

5.3.1 Mathematik der Modellbildung

Gl(24) stellt den quantitativen Zusammenhang zwischen den dimensionslosen Prozesskennwerten und den mechanischen Kennwerten dar. Die Gleichung wird mit Hilfe der mathematischen Analysemethode der Multiplen Regression gelöst [Sac'97]. Die multiple Regressionsrechnung hat im Allgemeinen die Aufgabe, den Zusammenhang zwischen mehr als zwei Variablen zu beschreiben und damit zu Prognosen für eine als abhängig angesehene Variable zu gelangen, der unterstellt wird, dass sie nicht nur von einer unabhängigen Variablen, sondern auch von einer Zweiten (und eventuell weiteren Variablen) abhängt. In dem vorliegenden Fall bedeutet das, dass man eine Prognose für den jeweiligen mechanischen Kennwert E-Modul, Zugfestigkeit oder Schrumpf (abhängige Variablen) in Abhängigkeit von den sechs dimensionslosen Prozesskennwerten erhält (unabhängige Variablen).

Die Durchführung der multiplen Regressionsanalyse zur Lösung von Gl(24) wird von einer Statistik-Software übernommen. Das Ergebnis der Lösung sind die Werte der sechs verschiedenen Faktoren und der Konstante k . Die Vorgehensweise ist dabei wie folgt. Der Statistik-

Software wird eine Zahlenmatrix übergeben, deren Anzahl der Zeilen der Anzahl der Versuchspunkte entspricht. In den Spalten stehen zum einen die bestimmten Prozesskennwerte und zum anderen die gemessenen Folieneigenschaften. Dabei werden die Mittelwerte der sieben Messwerte der mechanischen Folieneigenschaften E-Modul, Zugfestigkeit und Schrumpf eingesetzt (vgl. Kapitel 2.3). Die Statistik-Software korreliert nun eine Folieneigenschaft mit allen sechs Prozesskennwerten. Das Ergebnis dieser Korrelation sind die entsprechenden Faktoren q , l , t , f , v und d und die Konstante k von Gl(24).

Die Statistik-Software überprüft zusätzlich zu der Berechnung der Faktoren und Konstanten vorab die notwendigen Voraussetzungen für die Durchführung der Regressionsanalyse. Als Voraussetzung für die multiple Regression wird zum einen gefordert, dass die Residuen (Prognosewerte minus beobachtete Werte) normalverteilt sind. Eine weitere Voraussetzung ist die lineare Unabhängigkeit der dimensionslosen Prozesskennwerte. Bei linearer Abhängigkeit kann der Einfluss jedes einzelnen Prozesskennwertes auf die mechanischen Eigenschaften kaum von den Einflüssen der anderen Prozesskennwerte getrennt werden. Mathematisch bedeutet dies, dass mindestens eine der unabhängigen Variablen (praktisch) vollständig redundant zu den anderen unabhängigen Variablen ist. Im Falle der Redundanz gilt die Matrix der unabhängigen Variablen als schlecht konditioniert. Die Statistik-Software würde in diesem Fall die Regressionsanalyse nicht durchführen, da die Überprüfung der Voraussetzung der linearen Unabhängigkeit ein negatives Ergebnis hätte.

Des Weiteren berechnet die Statistik-Software die Signifikanzen des Gesamtmodells und der einzelnen Variablen. Die Signifikanz des statistischen Modells wird dabei mit dem F-Test überprüft, die Signifikanz der einzelnen Effekte der Variablen mit dem t-Test. Bei beiden Signifikanztests werden Prüfwerte aus den Daten berechnet und mit Tabellenwerten verglichen. Die Signifikanz ist in beiden Fällen dann gegeben, wenn der berechnete Prüfwert größer als der jeweilige tabellierte Vergleichswert ist. Das Signifikanzniveau α , gegen das getestet wird, beträgt 5 %. Dies entspricht einer Vertrauenswahrscheinlichkeit $1-\alpha$ von 95 %. Bei der Überprüfung der Effekte der einzelnen Variablen mit dem t-Test hat sich gezeigt, dass nicht alle sechs dimensionslosen Prozesskennwerte auf jeden mechanischen Kennwert einen signifikanten Einfluss bei der gewählten Vertrauenswahrscheinlichkeit von 95 % gezeigt haben. Da aber auch die bei dieser Vertrauenswahrscheinlichkeit nicht signifikanten Variablen jeweils zur Verbesserung des Gesamtergebnisses beigetragen haben, werden bei der späteren Auswertung stets alle sechs dimensionslosen Prozesskennwerte berücksichtigt.

Nach der Überprüfung der Signifikanz des statistischen Modells muss seine Güte anhand geeigneter Bewertungskriterien beurteilt werden, d.h. die prognostizierten Werte des statistischen Eigenschaftsmodells müssen mit den zugehörigen Messwerten verglichen und bewertet

werden. Trägt man die Prognosewerte von E-Modul, Zugfestigkeit und Schrumpf hierzu in einem Diagramm über den Messwerten auf und verbindet alle Punkte miteinander, ergibt sich im Idealfall eine Gerade mit der Steigung eins. In der Wirklichkeit liegen die Punkte allerdings mehr oder weniger weit oberhalb und unterhalb dieser idealen Gerade. Als Bewertungskriterium, inwieweit zwischen Prognose und Messung tatsächlich eine lineare Abhängigkeit besteht, dient das Bestimmtheitsmaß. Das Bestimmtheitsmaß kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Dabei bedeutet ein Bestimmtheitsmaß von 1, dass die lineare Abhängigkeit 100 % beträgt [Har'93]. Das Bestimmtheitsmaß r^2 berechnet sich nach Gl(25). In die Gleichung des Bestimmtheitsmaßes werden die Mittelwerte der sieben Messwerte der mechanischen Folieneigenschaften E-Modul, Zugfestigkeit und Schrumpf eingesetzt, in der Formel mit x_i bezeichnet. y_i bezeichnet die Prognosewerte. Die Mittelwerte der Mittelwerte beider Datenreihen werden mit \bar{x} bzw. \bar{y} bezeichnet.

$$r^2 = \left[\frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}} \right]^2 \quad (25)$$

Das Bestimmtheitsmaß gibt zwar eine Aussage über die Linearität des Zusammenhangs zwischen Prognose und Messung, liefert allerdings keinen Aufschluss über die Abweichung der Prognose von der Messung. Werden die Prognosewerte in einem Diagramm über den Messwerten aufgetragen, hat das Bestimmtheitsmaß den Wert 1 für jede Gerade mit der Steigung 1, auch wenn die Gerade nicht durch den Ursprung verläuft. Anschaulich bedeutet dies, dass es zwar einen linearen Zusammenhang zwischen Prognose- und Messwerten gibt, dass die Prognosewerte die Messungen im Mittel aber entweder über- oder unterschätzen können. Daher wird in dieser Arbeit neben dem Bestimmtheitsmaß noch ein weiteres Bewertungskriterium eingeführt, welches die Abweichung von Prognose und Messung bewerten soll. Die Abweichung a ist ein Maß dafür, wie weit die Mittelwerte der Prognose (y -Werte) von den Mittelwerten der Messwerte (x -Werte) abweichen. Die prozentuale Abweichung berechnet sich nach Gl(26). In die Gleichung der prozentualen Abweichung werden ebenfalls die Mittelwerte der sieben Messwerte der mechanischen Folieneigenschaften E-Modul, Zugfestigkeit und Schrumpf eingesetzt.

$$a = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}}{\bar{x}} \cdot 100 \% \quad (26)$$

5.3.2 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Anwendung der entwickelten Berechnungsgleichung, Gl(24), auf die in Kapitel 5.2 vorgestellten Versuche präsentiert. Bei den Versuchen handelt es sich um die Untersuchungen mit dem Material LD 150 AC auf der Schlauchfolienanlage am IKV. Die dabei durchgeführten beiden Versuchspläne 1-32 und 33-64 weisen, wie oben bereits gezeigt, eine teilweise Inkonsistenz der Messergebnisse auf. Dies ist zum einen begründet in einer zeitlichen Differenz von mehreren Tagen zwischen den beiden experimentellen Versuchsplänen der Versuchspunkte 1-32 und der Versuchspunkte 33-64. Zum anderen wurden die Versuchspunkte 33-64 zwar mit demselben Materialtyp, jedoch aus einer anderen Charge durchgeführt. Diese Unterschiedlichkeit nimmt, wie oben dargestellt, Einfluss auf einige Teilergebnisse. Die Faktoren und Konstanten für die Berechnungsgleichungen werden daher nur mit der Datenbasis der Versuchspunkte 1-32 ermittelt. Eine gemeinsame Auswertung der beiden Versuchspläne wäre inhaltlich zwar wünschenswert, ist mathematisch jedoch auf Grund der Inkonsistenz nicht sinnvoll.

Im Folgenden werden die berechneten Faktoren und Konstanten der Gl(24) mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß und der prozentualen Abweichung jeweils für die entsprechende mechanische Eigenschaft in einer Tabelle angegeben. Zusätzlich zu den Tabellen geben Bilder den Vergleich zwischen den gemessenen und den mit den Faktoren berechneten Prognosewerten wieder.

E-Modul LD 150 AC									
	l	q	v	t	d	f	k	r ²	a [%]
Längs	14,2	8,3	457.539	-16,9	615,8	-0,6	6,16	0,84	3,04
Quer	18,5	3,2	878.218	-40,3	615,2	-0,1	48,24	0,83	5,45

Tabelle 13: Werte der Berechnung des E-Moduls, LD 150 AC, IKV

Table 13: Calculated values of the Young's modulus, LD 150 AC, IKV

Bei der Berechnung der E-Moduln erreicht das statistische Eigenschaftsmodell Bestimmtheitsmaße von 0,84 bzw. 0,83. Ein solches Eigenschaftsmodell ist sicherlich zur Abschätzung der mechanischen Eigenschaften geeignet. Die prozentuale Abweichung ist mit ca. 3-5 % vertretbar. Bildlich gedeutet bedeutet sie, dass es mehr Prognosewerte oberhalb bzw. unterhalb der idealen Gerade gibt, so dass die Messwerte über- bzw. unterschätzt werden.

Auf den nachfolgenden Bildern (Bild 50 bis Bild 51) ist der Vergleich von Messung und Prognose des E-Moduls in Längs- und in Querrichtung für die entsprechenden Versuchspunkte dargestellt. Die Prognosen werden darin durch die schmalen schwarzen Balken abgebildet.

Der graue Balken im Hintergrund gibt den Mittelwert der Messreihe abzüglich der Standardabweichung an, der darüber liegende weiße Balken dementsprechend die doppelte Standardabweichung. Insgesamt zeigt sich, dass die Prognosen größtenteils innerhalb der Streubreite der einzelnen Versuchspunkte liegen, wobei es auch Ausreißer zu verzeichnen gibt.

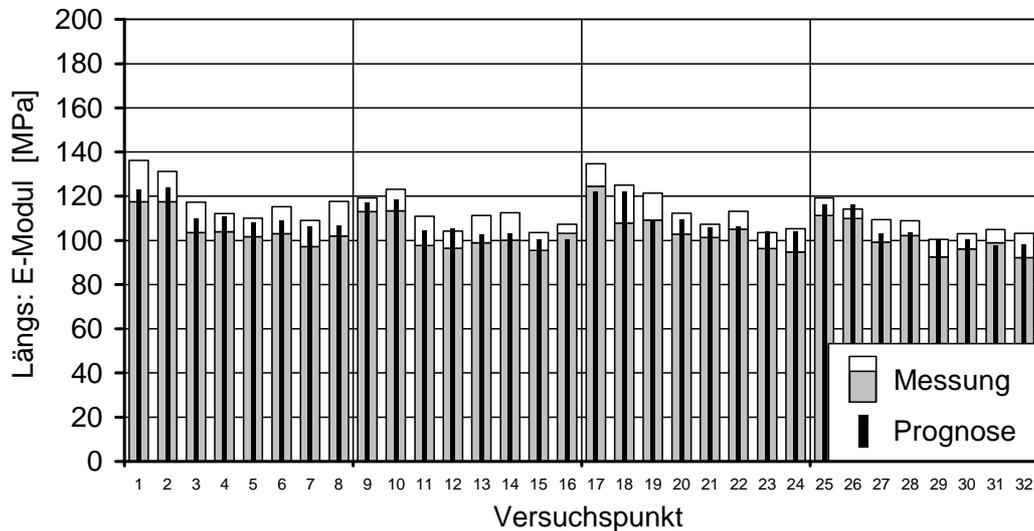


Bild 50: Messung/Prognose Längs: E-Modul, LD 150 AC, IKV

Fig. 50: Measuring/prediction longitudinal: Young's modulus, LD 150 AC, IKV

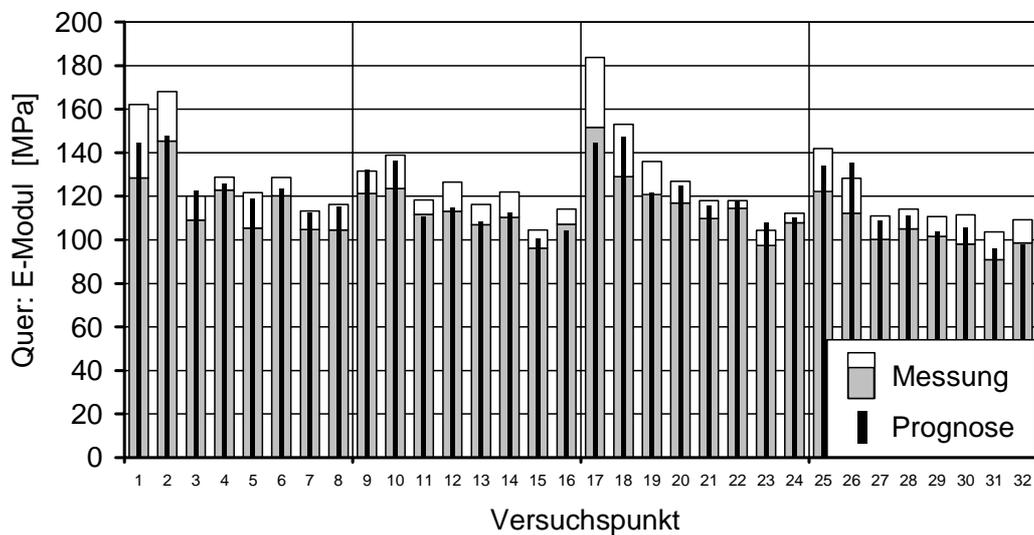


Bild 51: Messung/Prognose Quer: E-Modul, LD 150 AC, IKV

Fig. 51: Measuring/prediction transverse: Young's modulus, LD 150 AC, IKV

Zugfestigkeit LD 150 AC									
	l	q	v	t	d	f	k	r ²	a [%]
Längs	2,3	1,5	-99.316	-8,5	9	-0,2	26,98	0,77	7,04
Quer	-1,4	0,1	-38.519	1,1	-118,4	0	31,50	0,50	6,68

Tabelle 14: Werte der Berechnung der Zugfestigkeit, LD 150 AC, IKV

Table 14: Calculated values of the tensile strength, LD 150 AC, IKV

Bei der Berechnung der Zugfestigkeiten liegen die Bestimmtheitsmaße niedriger als bei der Berechnung der E-Moduln. Ebenso steigen die prozentualen Abweichungen der prognostizierten Werte. Besonders bei der Berechnung der Zugfestigkeit in Querrichtung ist die mathematische Bestimmtheit mit 0,50 sehr schlecht. Alles in allem ist das statistische Eigenschaftsmodell bezüglich der Vorhersage der Zugfestigkeit höchstens zur Abschätzung geeignet.

Auf den nachfolgenden Bildern (Bild 52 bis Bild 53) ist der Vergleich von Messung und Prognose der Zugfestigkeit in Längs- und Querrichtung für die entsprechenden Versuchspunkte in der bekannten Weise dargestellt. Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei dem Vergleich von Messung und Prognose des E-Moduls. Insgesamt liegen die Prognosen der Zugfestigkeiten auch hierbei innerhalb der Streubreiten der Messwerte, wobei ebenfalls Ausreißer vorhanden sind.

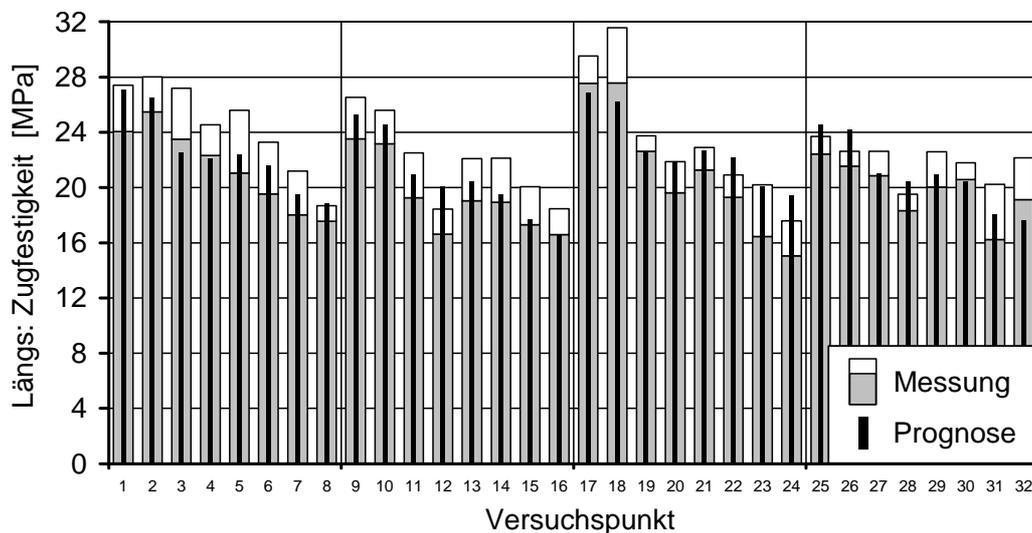


Bild 52: Messung/Prognose Längs: Zugfestigkeit, LD 150 AC, IKV

Fig. 52: Measuring/prediction longitudinal: tensile strength, LD 150 AC, IKV

Schrumpf LD 150 AC		l	q	v	t	d	f	k	r ²	a [%]
Längs		-3	-6	-479.113	-24	-433	0	187,98	0,95	1,73
Quer		-1	15	-383.165	-6	-85	1	11,60	0,97	6,37

Tabelle 15: Werte der Berechnung des Schrumpfs, LD 150 AC, IKV

Table 15: Calculated values of the shrinkage, LD 150 AC, IKV

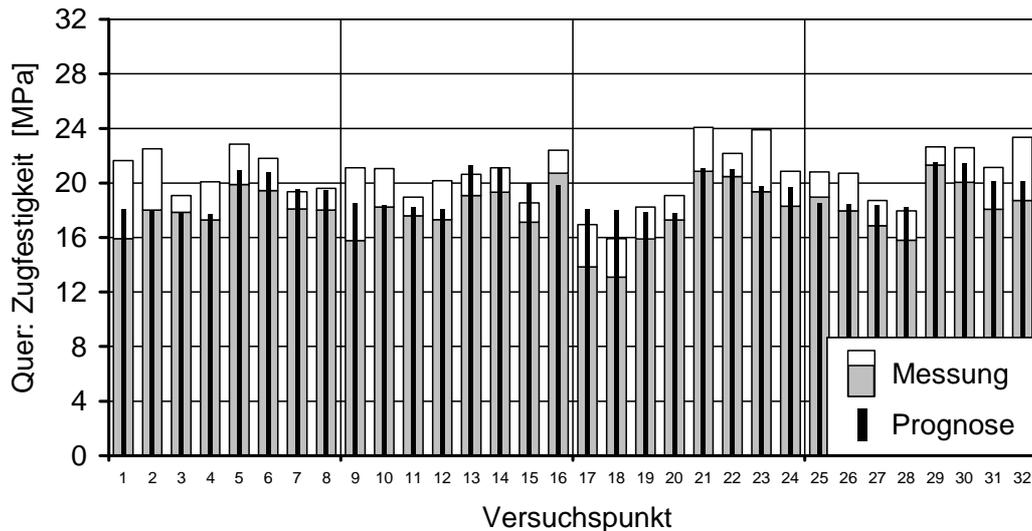


Bild 53: Messung/Prognose Quer: Zugfestigkeit, LD 150 AC, IKV

Fig. 53: Measuring/prediction transverse: tensile strength, LD 150 AC, IKV

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Berechnungen des Schrumpfs fallen zunächst die höheren Bestimmtheitsmaße auf. Die Berechnung des Längsschrumpfs erreicht ein Bestimmtheitsmaß von 0,95. Die Berechnung des Querschrumpfs erzielt einen Wert von 0,97. Vor dem Hintergrund des komplexen Prozesses mit seinen vielen sich gegenseitig beeinflussenden Einflussfaktoren und der mit Fehlern behafteten Messung der Schrumpfwerte sind Bestimmtheitsmaße von größer als 0,95 als gut zu bewerten. Bestimmtheitsmaße in dieser Größenordnung ermöglichen daher sicherlich eine Berechnung der Folieneigenschaft Schrumpfung, die über eine bloße Abschätzung hinausgeht.

Auf den nachfolgenden Bildern (Bild 54 bis Bild 55) ist der Vergleich von Messung und Prognose des Schrumpfs in Längs- und Querrichtung für die entsprechenden Versuchspunkte in der bekannten Weise dargestellt. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Vergleichen von E-Modul und Zugfestigkeit mit den jeweiligen Prognosewerten, eine insgesamt gute Übereinstimmung mit einigen Ausreißern, vor allem beim Querschrumpfung.

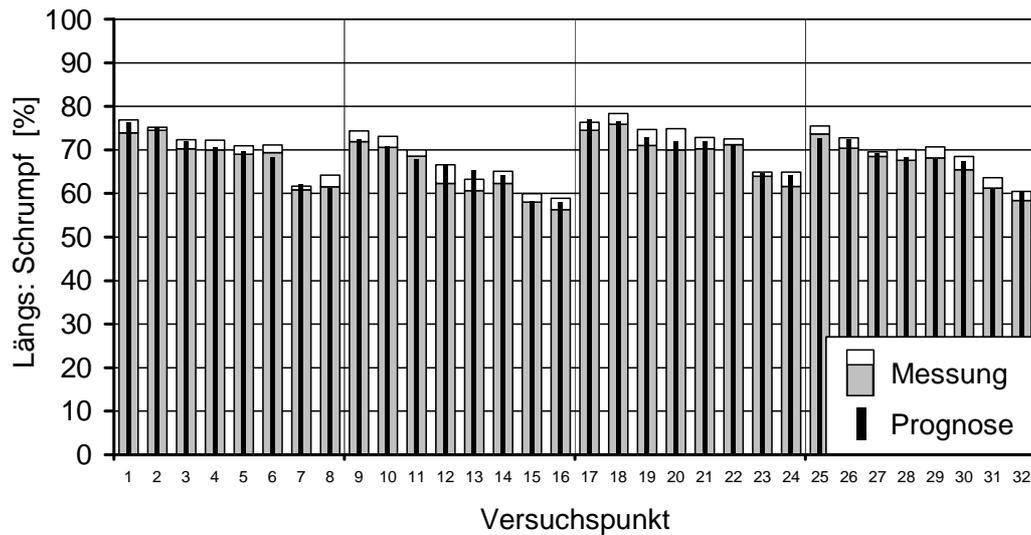


Bild 54: Messung/Prognose Längs: Schrumpf, LD 150 AC, IKV

Fig. 54: Measuring/prediction longitudinal: shrinkage, LD 150 AC, IKV

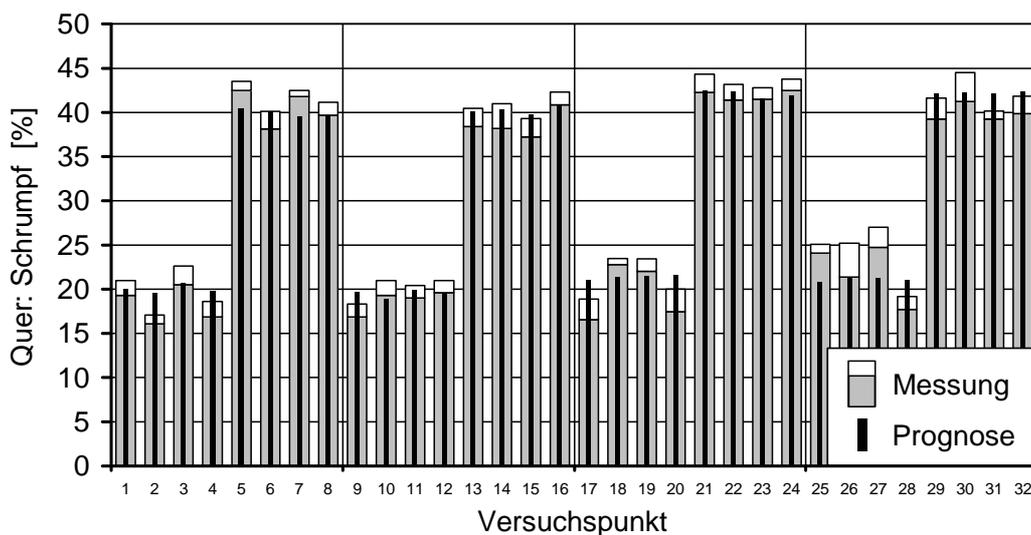


Bild 55: Messung/Prognose Quer: Schrumpf, LD 150 AC, IKV

Fig. 55: Measuring/prediction transverse: shrinkage, LD 150 AC, IKV

5.3.3 Fazit

Inhalt des Kapitels 5 ist die Erstellung eines statistischen Eigenschaftsmodells, welches die mechanischen Folieneigenschaften beim Schlauchfolienextrusionsverfahren vorhersagen kann. Für dieses Ziel werden dimensionslose Prozesskennwerte eingeführt, die die eigenschaftsbestimmenden Vorgänge in der Schlauchbildungszone beschreiben. Diese Prozesskennwerte sind die Variablen eines linearen Modells zur Berechnung der Eigenschaften. Die Ergebnisse haben dabei gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, mit der Bildung von Prozess-

kennwerten die mechanischen Folieneigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion durch statistische Modelle zu beschreiben. Dabei sind die Ergebnisse der Berechnung des Schrumpfs als gut zu bewerten, während die Ergebnisse bei der Berechnung von E-Modul und Zugfestigkeit zur Abschätzung der Eigenschaften dienen können.

Kritisch zu bewerten ist, dass die Streuungen der Messwerte der mechanischen Folieneigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion in der Regel sehr hoch sind. Hieraus folgen im Allgemeinen niedrigere Bestimmtheitsmaße und größere prozentuale Abweichungen. Um die Vorhersagegenauigkeit des statistischen Eigenschaftsmodells zu verbessern, müssten daher die Streuungen der Messwerte minimiert werden. Dies erfordert eine Erhöhung der Versuchszahl, was einen erheblichen experimentellen Aufwand nach sich zieht. Dabei ist anzumerken, dass eine Berechnungsformel, die einen bestimmten mechanischen Kennwert mit einem hohen Bestimmtheitsmaß im Vorfeld der Produktion vorhersagen kann, wenig Nutzen bringt, wenn in den nachfolgenden Produktionen dieser Kennwert nicht gezielt „produziert“ werden kann, da die Schwankung der mechanischen Folieneigenschaften von Produktion zu Produktion zu hoch ist. Von daher muss die Vorhersagegenauigkeit der Berechnung zwar mindestens so gut sein, wie die Reproduzierbarkeit des Herstellungsprozesses, darüber hinaus ist jedoch jede Anstrengung, die mathematische Vorhersagegenauigkeit zu steigern, nicht sinnvoll.

5.4 Übertragung auf andere Materialien

Im Kapitel 5.3.2 wurden Berechnungsgleichungen für die mechanischen Kennwerte E-Modul, Zugfestigkeit und Schrumpf jeweils in Längs- und Querrichtung aufgestellt. Auf die anderen beiden Materialien und im späteren auf die anderen beiden Schlauchfolienanlagen übertragen werden allerdings nur der E-Modul und der Schrumpf. Da die Messung der Zugfestigkeit, bedingt durch die hohe Dehnung bei Zugfestigkeit und die geringe Prüfgeschwindigkeit der Zugprüfmaschine, sehr lange Zeiten beansprucht, wurden die Zugfestigkeiten nur bei den beiden Versuchsplänen des LD 150 AC auf der Anlage am IKV gemessen. Somit entfällt die Übertragung der Zugfestigkeit in Ermangelung der Vergleichsmessdaten bei der Übertragung auf andere Materialien sowie bei der späteren Übertragung auf andere Anlagen. Um dennoch einen zusätzlichen und aussagekräftigen mechanischen Kennwert anstatt der Zugfestigkeit bei den Untersuchungen zu berücksichtigen, wird die Spannung bei 100 % Dehnung verwendet. Bild 56 zeigt das Spannung/Dehnungs-Diagramm exemplarisch für eine Folienprobe aus LD 150 AC in Längs- und Querrichtung. Zu erkennen sind die hohen Dehnungen bei Zugfestigkeit. Hieran wird auch der Grund für die Substitution der Zugfestigkeit durch die Spannung bei 100 % Dehnung deutlich. Dieser Spannungswert ist in wesentlich kürzerer Zeit erreicht, so dass der Gesamtzeitaufwand für die Messungen deutlich verkürzt werden kann.

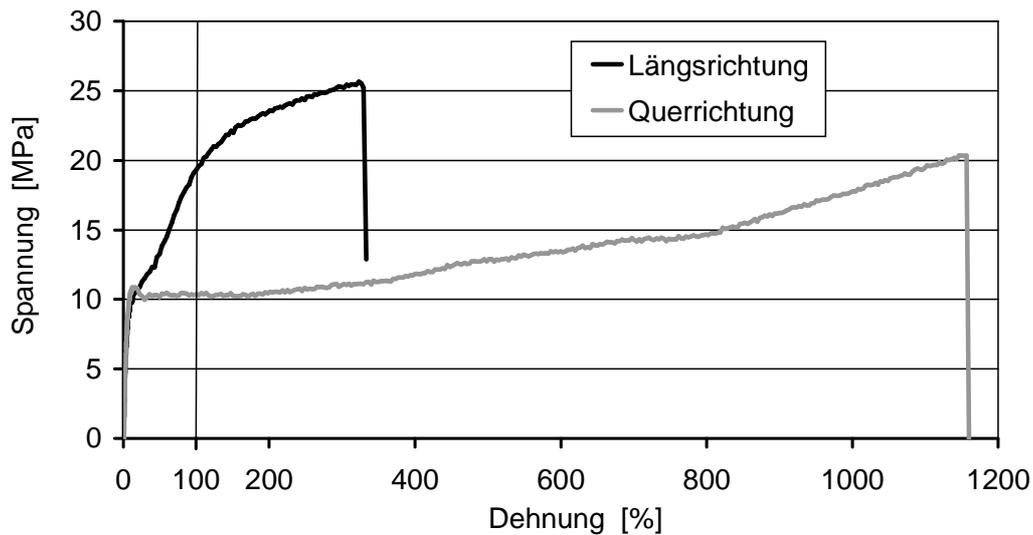


Bild 56: Spannung in Abhängigkeit von Dehnung und Zugrichtung

Fig. 56: Stress depending on strain and drawing direction

Das Spannung/Dehnungs-Diagramm der Kurve in Längsrichtung zeigt eine stetige Zunahme der Spannung mit steigender Dehnung bis zum Riss. Jedem Dehnwert ist eindeutig ein Spannungswert zuzuordnen. Für diese Richtung eignet sich daher auf Grund der Stetigkeit der Kurve die Spannung bei 100 % Dehnung als Ersatz für die Zugfestigkeit. Bild 57 links zeigt die Korrelation zwischen diesen beiden Werten. Zu erkennen ist ein näherungsweise linearer Zusammenhang, der die Substitution der Zugfestigkeit durch die Spannung bei 100 % Dehnung in Längsrichtung rechtfertigt. Das Spannung/Dehnungs-Diagramm der Kurve in Querrichtung (Bild 56) zeigt eine stetige Zunahme der Spannung mit steigender Dehnung nur bis zur Streckgrenze. Ab diesem Punkt erfolgt über einen sehr weiten Dehnbereich (bis ca. 200 % Dehnung) ein Fließen der Probe mit nahezu gleich bleibender Spannung. Bei dem Spannung/Dehnungs-Verlauf in Querrichtung ist in dem Bereich dieses Fließens nicht jedem Dehnwert eindeutig ein Spannungswert zugeordnet. Daher ist die Substitution der Zugfestigkeit durch die Spannung bei 100 % Dehnung in Querrichtung nicht zulässig. Bild 57 rechts zeigt die Korrelation zwischen der Zugfestigkeit und der Spannung bei 100 % Dehnung in Querrichtung. Wie zu erwarten ist, besteht zwischen diesen beiden Werten kein Zusammenhang. Bei der Übertragung auf andere Materialien bzw. andere Anlagen werden E-Modul und Schrumpf in Längs- und Querrichtung betrachtet. Die Zugfestigkeit wird in Längsrichtung durch die Spannung bei 100 % Dehnung substituiert. Eine Berücksichtigung der Werte in Querrichtung findet aufgrund der fehlenden Korrelation zwischen Zugfestigkeit und Spannung bei 100 % Dehnung nicht statt.

Um die Spannung bei 100 % Dehnung des Materials LD 150 AC übertragen zu können, werden hierzu die entsprechenden Faktoren der Berechnungsgleichung benötigt. Diese sind in

Tabelle 16 aufgelistet. Auffallend bei der Betrachtung der Ergebnisse sind das hohe Bestimmtheitsmaß und die niedrige prozentuale Abweichung. Die Prognose der Spannung bei 100 % Dehnung in Längsrichtung ist damit besser als die Prognose der Zugfestigkeiten. Sie ist somit ähnlich gut wie die Prognose des Schrumpfs. Bild 58 zeigt den zugehörigen und bestätigenden Vergleich zwischen Messung und Prognose der Spannung bei 100 % Dehnung in Längsrichtung.

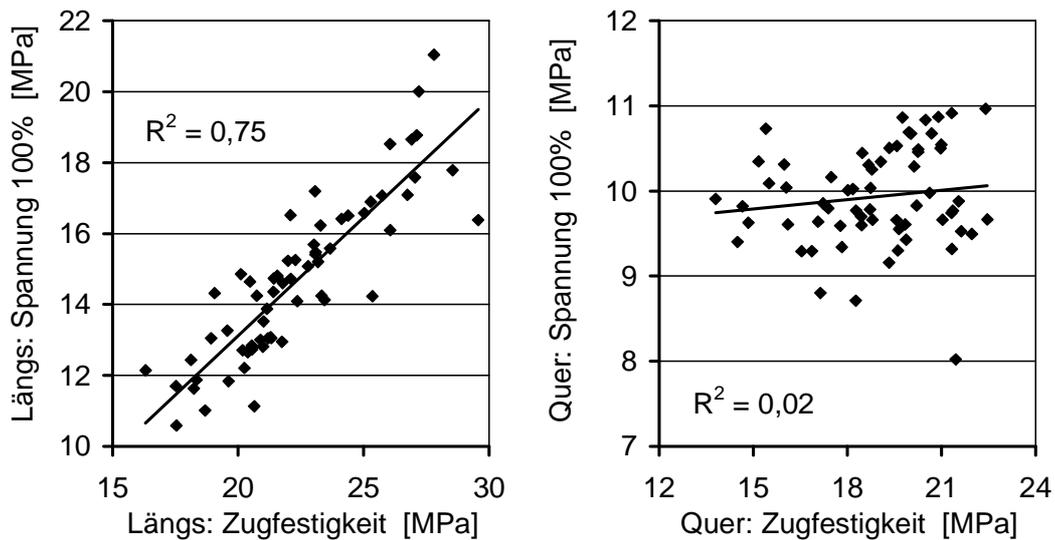


Bild 57: Korrelation zwischen Spannung bei 100 % Dehnung und Zugfestigkeit

Fig. 57: Correlation between strain at 100 % stress and tensile strength

Spannung 100 % LD 150 AC									
	l	q	v	t	d	f	k	r ²	a [%]
Längs	1,5	0,7	-70.569	-5,8	-8,6	0,1	18,78	0,95	3,13

Tabelle 16: Werte der Berechnung der Spannung 100 %, LD 150 AC, IKV

Table 16: Calculated values of the strain 100 %, LD 150 AC, IKV

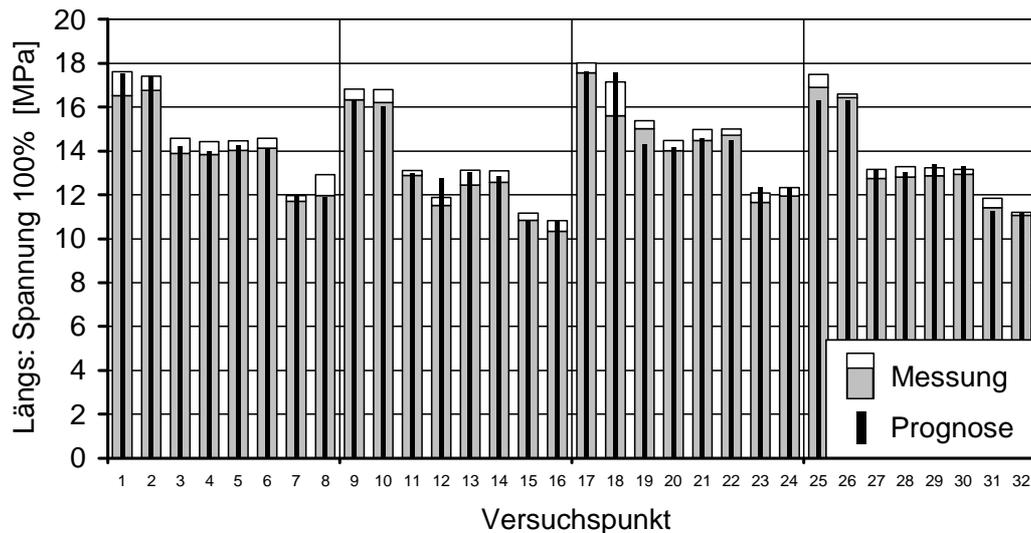


Bild 58: Messung/Prognose Längs: Spannung 100 %, LD 150 AC, IKV

Fig. 58: Measuring/prediction longitudinal: strain 100 %, LD 150 AC, IKV

Bei der Übertragung des statistischen Eigenschaftsmodells auf andere Materialien werden die ermittelten Berechnungsgleichungen der Versuche eines Materials auf ein anderes Material angewendet. Praktisch bedeutet dies, dass die errechneten Faktoren und Konstanten des Materials LD 150 AC des Kapitels 5.3.2 zusammen mit den dimensionslosen Prozesskennwerten der Versuche mit den Materialien Lupolen 2420 D und Lupolen 2441 D in Gl(24) eingesetzt werden. Die hierbei errechneten Prognosewerte werden dann mit den Messergebnissen der Versuche mit den Materialien Lupolen 2420 D und Lupolen 2441 D verglichen.

5.4.1 Lupolen 2420 D

Bild 59 und Bild 60 zeigen den Vergleich von Messung und Prognose des E-Moduls in Längs- und Querrichtung für die entsprechenden Versuchspunkte des Materials Lupolen 2420 D in der bekannten Weise. Der Unterschied zu den bisherigen Vergleichsbildern ist allerdings, dass für die Prognosewerte nicht die dargestellten Messwerte als Datenbasis dienen, sondern dass die Prognosen auf einem statistischen Modell basieren, welches anhand der Messwerte der Versuchspunkte 1-32 des Materials LD 150 AC ermittelt wurde. Der Vergleich zeigt, dass die hierbei prognostizierten Werte des E-Moduls gegenüber den Messwerten tendenziell zu niedrig berechnet werden. Eine Übersicht über die Bestimmtheitsmaße und die prozentualen Abweichungen der Vergleiche aller mechanischen Folieneigenschaften gibt Tabelle 17 (s.u.).

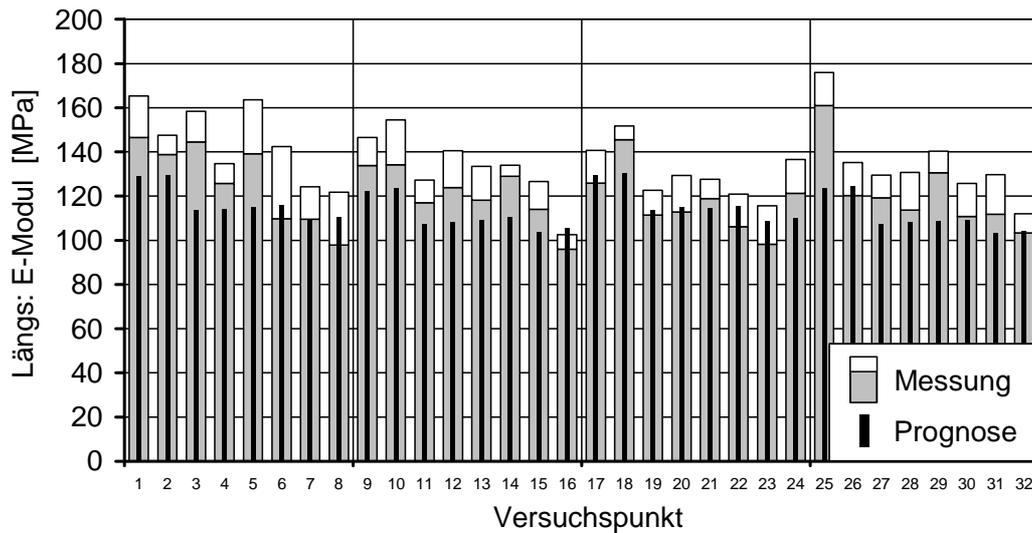


Bild 59: Messung/Prognose Längs: E-Modul, Lupolen 2420 D, IKV

Fig. 59: Measuring/prediction longitudinal: Young's modulus, Lupolen 2420 D, IKV

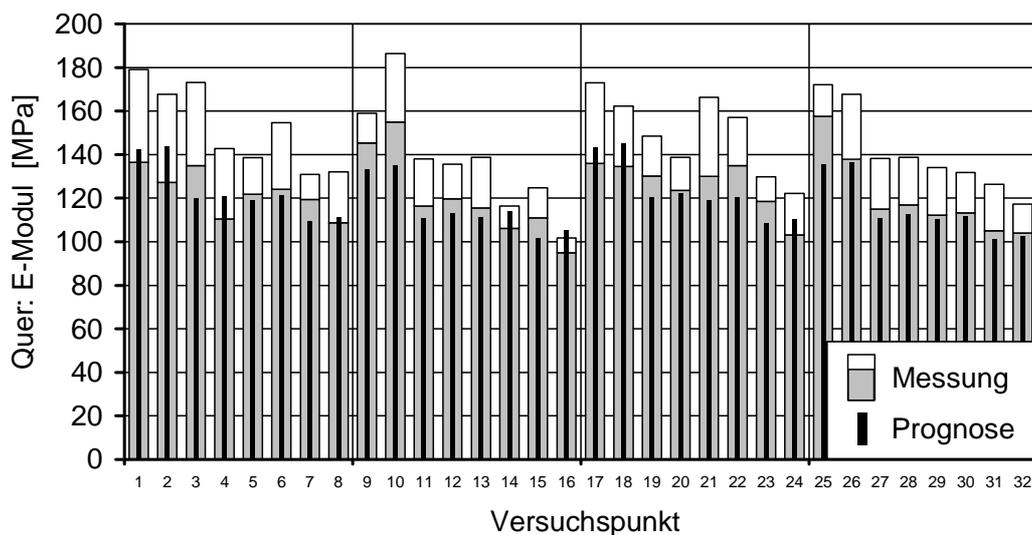


Bild 60: Messung/Prognose Quer: E-Modul, Lupolen 2420 D, IKV

Fig. 60: Measuring/prediction transverse: Young's modulus, Lupolen 2420 D, IKV

Der Vergleich von Messung und Prognose der Spannung bei 100 % Dehnung in Längsrichtung zeigt ein ähnliches Bild wie bei dem Vergleich des E-Moduls. Auch die prognostizierten Werte der Spannung bei 100 % Dehnung liegen tendenziell zu niedrig.

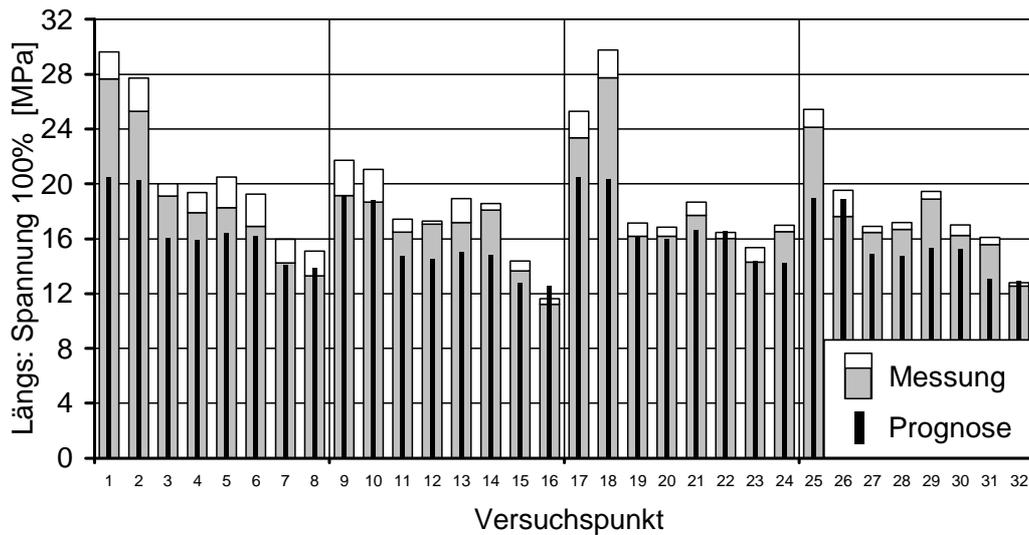


Bild 61: Messung/Prognose Längs: Spannung 100 %, Lupolen 2420 D, IKV

Fig. 61: Measuring/prediction longitudinal: stress 100 %, Lupolen 2420 D, IKV

Beim Vergleich zwischen den Messwerten des Schrumpfs des Materials Lupolen 2420 D und der Prognose ergibt sich im Vergleich zu den mechanischen Eigenschaften E-Modul und Spannung bei 100 % Dehnung ein verbessertes Bild. Die Prognosen und die Messwerte liegen hier enger aneinander.

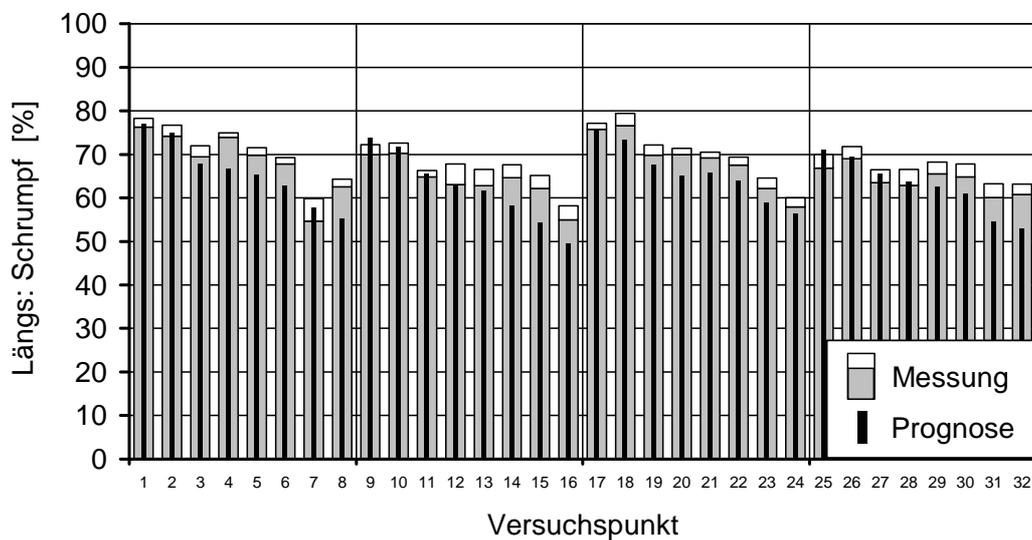


Bild 62: Messung/Prognose Längs: Schrumpfung, Lupolen 2420 D, IKV

Fig. 62: Measuring/prediction longitudinal: shrinkage, Lupolen 2420 D, IKV

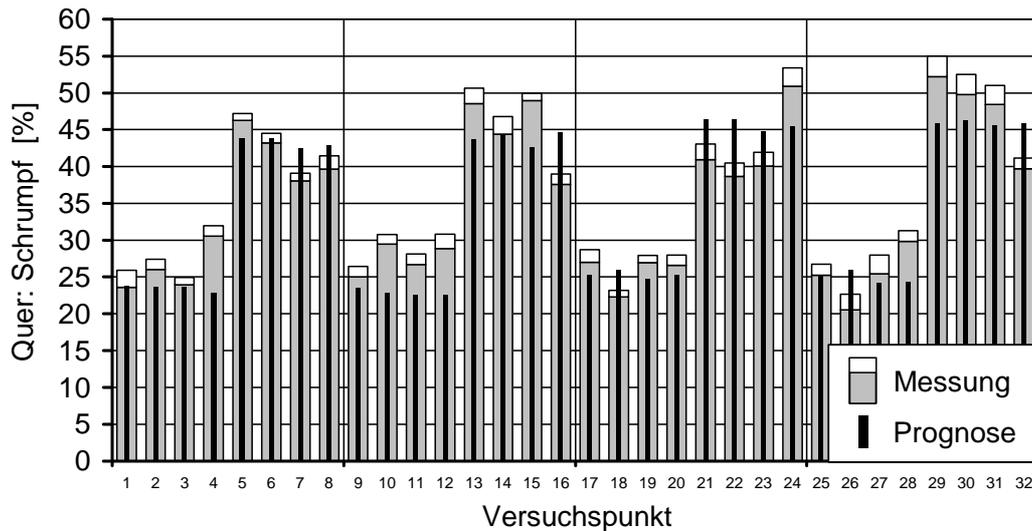


Bild 63: Messung/Prognose Quer: Schrumpf, Lupolen 2420 D, IKV

Fig. 63: Measuring/prediction transverse: shrinkage, Lupolen 2420 D, IKV

Lupolen 2420 D	E-Modul		Spannung 100 %		Schrumpf	
	r ²	a [%]	r ²	a [%]	r ²	a [%]
Längs	0,44	18,14	0,79	27,46	0,80	4,23
Quer	0,66	13,47			0,82	13,16

Tabelle 17: Bewertung der Modellübertragung auf Lupolen 2420 D

Table 17: Assessment of model transfer to Lupolen 2420 D

Die Bestimmtheitsmaße bei der Prognose der mechanischen Folieneigenschaften des Lupolen 2420 D zeigen niedrigere Werte als bei der Prognose der Werte des LD 150 AC. Die Werte der prozentualen Abweichung sind ebenso höher als beim LD 150 AC. Die großen Abweichungen spiegeln damit die bereits oben gemachten Beobachtungen wider. Die Prognosen von E-Modul und Spannung bei 100 % Dehnung des statistischen Modells liefern tendenziell zu niedrige Ergebnisse. Die große Differenz zwischen Prognose und Messung wird durch die große prozentuale Abweichung von ca. 13 bis 27 % ausgedrückt. Die Prognose der Schrumpfwerte ist zwar besser als die Prognose des E-Moduls und der Spannung bei 100 % Dehnung, allerdings ebenfalls schlechter als die Prognose der Schrumpfs des LD 150 AC. Alles in allem kann man bei den erzielten Bestimmtheitsmaßen und den prozentualen Abweichungen sicherlich nur von einer eingeschränkten Übertragbarkeit des statistischen Eigenschaftsmodells von dem Material LD 150 AC auf das Material Lupolen 2420 D sprechen.

5.4.2 Lupolen 2441 D

Bild 64 und Bild 65 zeigen den Vergleich von Messung und Prognose des E-Moduls in Längs- und Querrichtung für die entsprechenden Versuchspunkte des Materials Lupolen 2441 D in der bekannten Weise. Die Prognosewerte basieren wiederum auf dem statistischen Modell, welches aus den Messwerten der Versuchspunkte 1-32 des Materials LD 150 AC gewonnen wurde. Der Vergleich zeigt, dass die hierbei prognostizierten Werte des E-Moduls gegenüber den Messwerten entweder innerhalb der Streuung der Messwerte liegen oder geringfügig zu niedrig berechnet werden. Als Kriterium zur Bewertung der Korrelation zwischen den Messwerten und der Prognose des statistischen Modells werden wiederum das Bestimmtheitsmaß und die prozentuale Abweichung verwendet. Eine Übersicht über diese Werte der Prognosen aller mechanischen Folieneigenschaften gibt Tabelle 18 (s.u.).

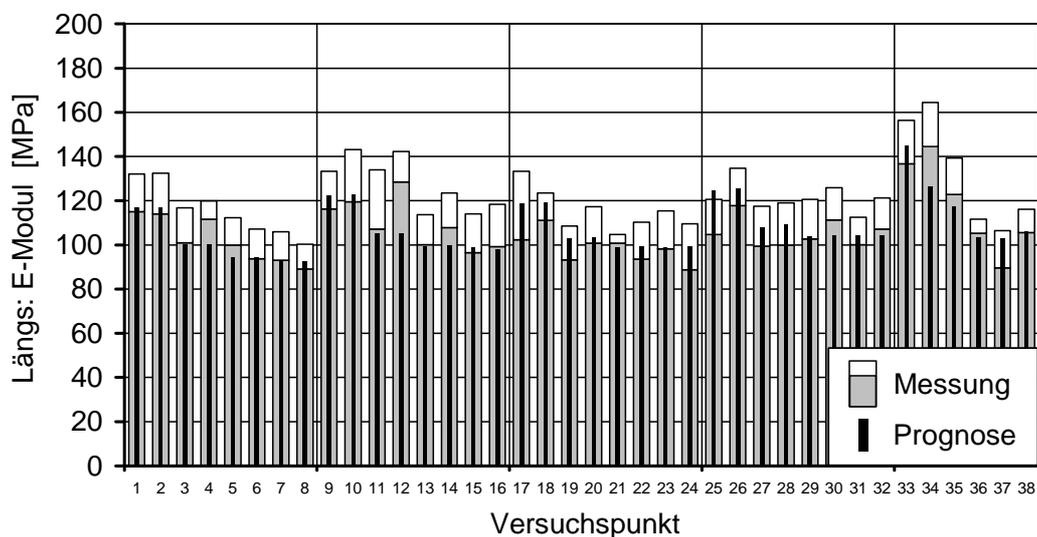


Bild 64: Messung/Prognose Längs: E-Modul, Lupolen 2441 D, IKV

Fig. 64: Measuring/prediction longitudinal: Young's modulus, Lupolen 2441 D, IKV

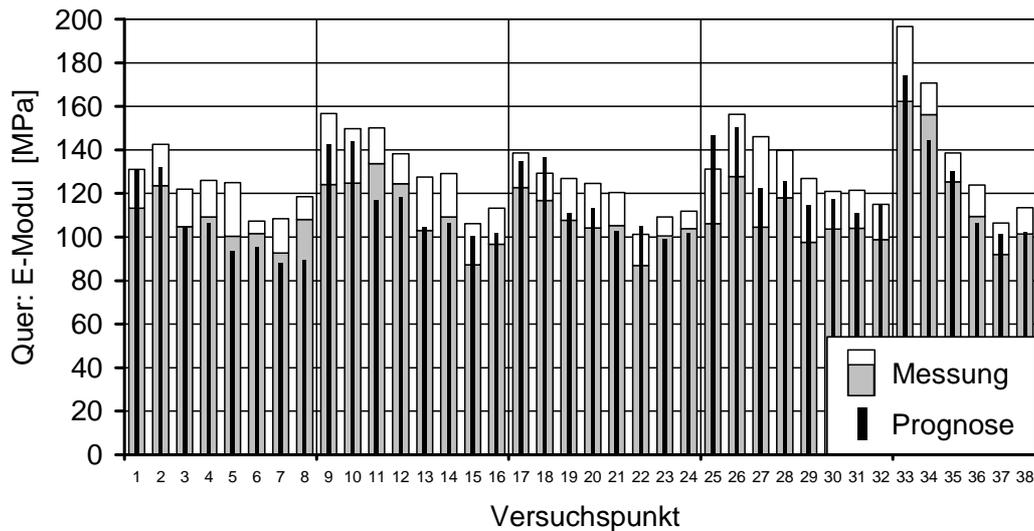


Bild 65: Messung/Prognose Quer: E-Modul, Lupolen 2441 D, IKV

Fig. 65: Measuring/prediction transverse: Young's modulus, Lupolen 2441 D, IKV

Die Prognose der Spannung bei 100 % Dehnung in Längsrichtung des Lupolen 2441 D zeigt ein schlechteres Bild als die Prognose des E-Moduls. Die prognostizierten Werte werden zu niedrig berechnet (Bild 66).

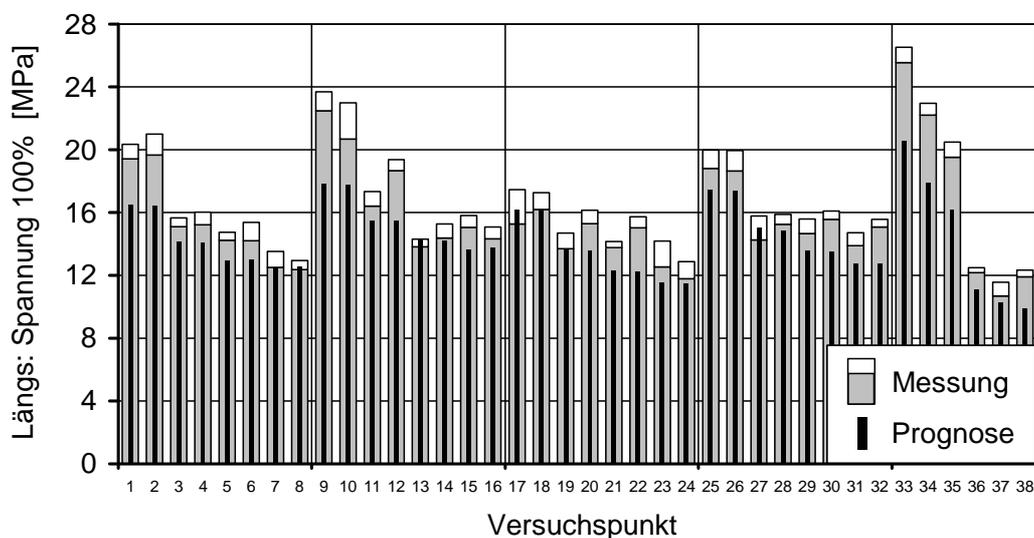


Bild 66: Messung/Prognose Längs: Spannung 100 %, Lupolen 2441 D, IKV

Fig. 66: Measuring/prediction longitudinal: stress 100 %, Lupolen 2441 D, IKV

Die Prognose des Schrumpfs liefert teilweise zu niedrige und teilweise zu hohe Schrumpfwerte. Hierbei gibt es keine eindeutige Tendenz der Über- oder Unterschätzung der Messwerte. Insgesamt wird der Querschrumpf, wie auch schon bei der Übertragung auf das Lupolen 2420 D, schlechter prognostiziert als der Längsschrumpf.

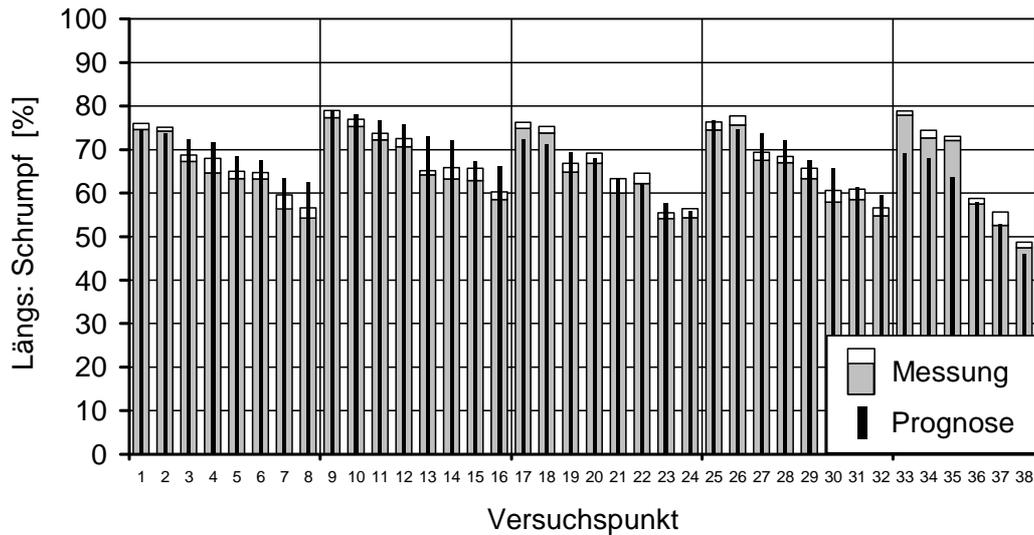


Bild 67: Messung/Prognose Längs: Schrumpf, Lupolen 2441 D, IKV

Fig. 67: Measuring/prediction longitudinal: shrinkage, Lupolen 2441 D, IKV

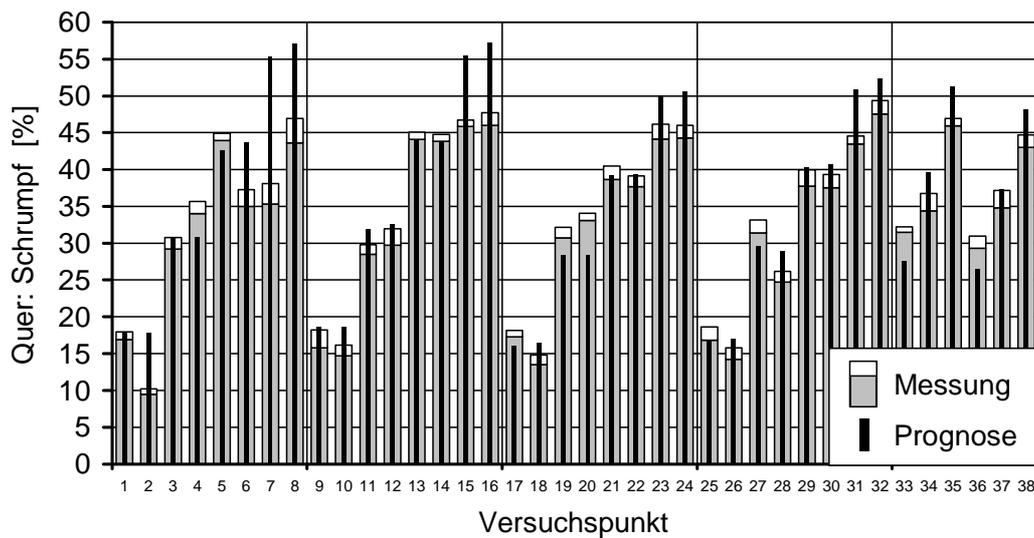


Bild 68: Messung/Prognose Quer: Schrumpf, Lupolen 2441 D, IKV

Fig. 68: Measuring/prediction transverse: shrinkage, Lupolen 2441 D, IKV

Lupolen 2441 D	E-Modul		Spannung 100 %		Schrumpf	
	r ²	a [%]	r ²	a [%]	r ²	a [%]
Längs	0,64	8,97	0,87	14,93	0,72	6,69
Quer	0,71	9,12			0,87	16,20

Tabelle 18: Bewertung der Modellübertragung auf Lupolen 2441 D

Table 18: Assessment of model transfer to Lupolen 2441 D

Die Bestimmtheitsmaße bei der Prognose der mechanischen Folieneigenschaften des Lupolen 2441 D zeigen niedrigere Werte als bei der Prognose der Werte des LD 150 AC. Die Werte der prozentualen Abweichung sind analog dazu höher als beim LD 150 AC. Die Bewertungskriterien Bestimmtheitsmaß und prozentuale Abweichung bestätigen damit die oben gemachten Beobachtungen. Im Ganzen ergibt sich für das Lupolen 2441 D, wie auch schon beim Lupolen 2420 D, eine nur eingeschränkte Übertragbarkeit von dem Material LD 150 AC auf das Material Lupolen 2441 D.

5.4.3 Lösungsansatz zur Verbesserung der Übertragbarkeit

Im Folgenden wird ein Lösungsansatz beschrieben, der das Ziel hat, die mathematische Bestimmtheit bei der Übertragung des Eigenschaftsmodells von einem auf ein anderes Material mit Hilfe eines materialspezifischen Kennwerts zu erhöhen. Der Grundgedanke hinter diesem Ansatz ist, dass es einen Materialkennwert gibt, der zum einen die mechanischen Eigenschaften des jeweiligen Materials signifikant beeinflusst, und zum anderen eine Differenzierung der drei verwendeten LDPE-Typen erlaubt. Ein möglicher Materialkennwert, der diese Kriterien erfüllt, ist die Schmelze-Massefließrate (**Melt Flow Rate**). Dabei kann der signifikante Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften prinzipiell auf zwei Arten ausgeübt werden. Zum einen kann der Prozesszustand in der Schlauchbildungszone verändert werden, welche die Entstehung der Schlauchfolieneigenschaften beeinflusst. Materialien mit einer geringeren Schmelze-Massefließrate setzen der Orientierung der Molekülketten durch die in der Schlauchbildungszone herrschenden Kräfte einen größeren Widerstand entgegen, während hingegen Materialien mit einem größeren MFR-Wert sich leichter orientieren lassen, allerdings bei ihnen auch wiederum die Relaxation der Molekülketten begünstigt ist. Die andere Art der Beeinflussung der Folieneigenschaften durch den materialspezifischen Kennwert findet nicht bei der Entstehung der Folieneigenschaften in der Schlauchbildungszone sondern während der eigentlichen mechanischen Belastung selbst statt. So ist ein niedrigerer MFR-Wert durch eine stärkere Verschlaufung der Makromoleküle zu erklären. Derselbe Grund kann allerdings auch während des Zugversuchs einen signifikanten Einfluss in Form der Zunahme der Festigkeit verursachen.

Der Ansatz die Übertragbarkeit des statistischen Eigenschaftsmodells mit Hilfe des materialspezifischen Kennwerts „Schmelze-Massefließrate“ zu verbessern, wird folgendermaßen durchgeführt. Der MFR-Wert wird als zusätzliche Variable in Gl(24) eingesetzt. Hierdurch ergibt sich Gl(27).

$$\text{Mechanischer Kennwert} = q \cdot i_q + l \cdot i_l + t \cdot i_t + f \cdot i_f + v \cdot i_v + d \cdot i_d + mfr \cdot \text{"Wert"} + k \quad (27)$$

Die Lösung der Gleichung erfolgt für die jeweilige Folieneigenschaft dabei nicht nur mit den Messwerten der Versuche mit dem LD 150 AC sondern mit den Messwerten des LD 150 AC und des Lupolen 2441 D zusammen. Dies muss daher geschehen, da sich die Variable MFR-Wert für ein Material nicht ändert. Diese Änderung jedoch ist eine zwingende Voraussetzung für die Auswertung mit der multiplen Regression, da der Einfluss der Variablen auf die Prognosen gerade nach diesen Änderungen gewichtet und berechnet wird. Die berechneten Faktoren und Konstanten der Gl(27) sind mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß und der prozentualen Abweichung jeweils für die entsprechende mechanische Eigenschaft in Tabelle 19 bis Tabelle 21 angegeben. Mit den berechneten Faktoren der Materialien LD 150 AC und Lupolen 2441 D werden dann im Anschluss die Schlauchfolieneigenschaften des Materials Lupolen 2420 D prognostiziert, um den Ansatz zur Verbesserung der Übertragbarkeit zu bewerten.

E-Modul LD 150 AC & Lupolen 2441 D										
	l	q	v	t	d	f	mfr	k	r ²	a [%]
Längs	12,56	8,97	92.609	-23,23	413,77	0,4	-12,56	48,97	0,75	5,16
Quer	15,9	7,3	140.552	-33,4	412,2	0,8	-0,5	59,82	0,78	6,59

Tabelle 19: Werte der Berechnung des E-Moduls, LD 150 AC & Lupolen 2441 D, IKV

Table 19: Calculated values of the Young's modulus, LD 150 AC & Lupolen 2441 D, IKV

Spannung 100 % LD 150 AC & Lupolen 2441 D										
	l	q	v	t	d	f	mfr	k	r ²	a [%]
Längs	2,7	2	-49.774	-5,9	46,7	0	-5,1	9,26	0,91	6,01

Tabelle 20: Werte der Berechnung der Spannung 100 %, LD 150 AC & Lupolen 2441 D, IKV

Table 20: Calculated values of the strain 100 %, LD 150 AC & Lupolen 2441 D, IKV

Schrumpf LD 150 AC & Lupolen 2441 D										
	l	q	v	t	d	f	mfr	k	r ²	a [%]
Längs	2	-2	-181.897	-15	-178	-1	6	112,97	0,92	2,90
Quer	-2,49	9,51	-6.942	-1,53	-178,5	-0,02	-7,5	30,85	0,92	9,72

Tabelle 21: Werte der Berechnung des Schrumpfs, LD 150 AC & Lupolen 2441 D, IKV

Table 21: Calculated values of the shrinkage, LD 150 AC & Lupolen 2441 D, IKV

Die sich bei der Übertragung des Eigenschaftsmodells auf das Material Lupolen 2420 D ergebenden Bestimmtheitsmaße und prozentualen Abweichungen zeigt Tabelle 22.

Lupolen 2420 D	E-Modul		Spannung 100 %		Schrumpf	
	r ²	a [%]	r ²	a [%]	r ²	a [%]
Längs	0,44	14,56	0,81	17,70	0,79	7,05
Quer	0,71	12,85			0,84	12,10

Tabelle 22: Bewertung der Übertragungsverbesserung mittels MFR-Wert

Table 22: Assessment of model transfer improvement through MFR-Value

Die Bestimmtheitsmaße und prozentualen Abweichungen, die mit den Messwerten der beiden Materialien LD 150 AC und Lupolen 2441 D und den zugehörigen MFR-Werten als zusätzliche Variable errechnet wurden, weisen für das Material Lupolen 2420 D eine ähnliche mathematische Bestimmtheit und eine ähnliche Abweichung wie bei den oben aufgeführten Versuchen auf. Dies betrifft die Prognose aller fünf mechanischen Kennwerte. Daher wird mit dem vorgeschlagenen Lösungsansatz das anvisierte Ziel, die Übertragung des Eigenschaftsmodells auf ein anderes Material signifikant zu verbessern, nicht erreicht.

Nach der Theorie des Lösungsansatzes muss der zusätzliche materialspezifische Kennwert zum einen verschiedene Materialien unterscheiden können, zum anderen muss er einen Einfluss auf die Folieneigenschaften ausüben. Der MFR-Wert erfüllt prinzipiell diese beiden Anforderungen. Dennoch ergibt sich durch die Einführung dieses Wertes in das Eigenschaftsmodell keine (statistische) Verbesserung. Es konnte daher nicht abschließend geklärt werden, ob der Lösungsansatz, mittels eines materialspezifischen Kennwerts die Übertragung zu verbessern, prinzipiell nicht zum Ziel führt. Ggf. kann ein anderer oder mehrere Kennwerte die Übertragung verbessern. Weitere Kennwerte, die ebenfalls die Auswahlkriterien erfüllen, sind das mittlere Molekulargewicht bzw. die Molekulargewichtsverteilung.

5.4.4 Fazit

Die Vorhersage der mechanischen Folieneigenschaften einer Schlauchfolie mit einem statistischen Eigenschaftsmodell basierend auf dimensionslosen Prozesskennwerten ergibt für ein bestimmtes Material zufrieden stellende Ergebnisse, mit denen der Schrumpf und die Spannung bei 100 % Dehnung berechnet und der E-Modul abgeschätzt werden kann. Dies gilt, wenn das Berechnungsmodell aus Messwerten des gleichen Materials bestimmt wird. Bei der Übertragung dieses Modells auf ein anderes Material ergeben sich insgesamt schlechtere Prognosen der mechanischen Folieneigenschaften, so dass man zu diesem Zeitpunkt nur von

einer eingeschränkten Übertragbarkeit sprechen kann. Auf der anderen Seite kann die Möglichkeit der Übertragbarkeit des statistischen Eigenschaftsmodells von einem Material auf ein anderes auch nicht endgültig ausgeschlossen werden, da die prinzipielle Machbarkeit der Übertragung, wenn auch bei geringerer mathematischer Bestimmtheit, gezeigt wurde. In diesem Zusammenhang sei auf den Lösungsansatz verwiesen, die mathematische Bestimmtheit der Übertragbarkeit mittels zusätzlicher materialspezifischer Kennwerte zu erhöhen. Die Einbeziehung des MFR-Werts hat hierbei allerdings zu keiner Verbesserung geführt. Bei der Suche nach anderen oder weiteren materialspezifischen Kennwerten besteht daher noch Forschungsbedarf.

5.5 Übertragung auf andere Anlagen

Bei der Übertragung des statistischen Eigenschaftsmodells auf andere Schlauchfolienextrusionsanlagen werden die ermittelten Berechnungsgleichungen der Versuche einer Anlage auf eine andere Schlauchfolienanlage angewendet. Hierbei wird bei den experimentellen Untersuchungen auf den verschiedenen Extrusionsanlagen jeweils dasselbe Material verwendet, LD 150 AC. Zur praktischen Durchführung der Übertragung werden die errechneten Faktoren und Konstanten der Versuche auf der Anlage am IKV zusammen mit den dimensionslosen Prozesskennwerten der Versuche auf den Anlagen von Kiefel Extrusion und Kuhne in Gl(24) eingesetzt. Die hierbei errechneten Prognosewerte werden dann mit den Messergebnissen der Versuche auf den Schlauchfolienanlagen von Kiefel Extrusion und Kuhne verglichen.

Da weder bei den Versuchen bei Kiefel Extrusion noch bei Kuhne der jeweils eingestellte Luftvolumenstrom des Kühlluftgebläses bestimmt werden konnte, fehlt der dimensionslose Prozesskennwert Volumenstromverhältnis (Quotient aus Massestrom und Kühlluftstrom). Da die in Kapitel 5.3.2 errechneten Faktoren und Konstanten der Berechnungsgleichungen mit dem Prozesskennwert Volumenstromverhältnis bestimmt wurden, können diese Werte nicht zur Übertragung des Modells auf die Schlauchfolienanlagen bei Kiefel Extrusion und Kuhne verwendet werden. Aus diesem Grund wird die allgemeine Berechnungsgleichung, Gl(24), derart modifiziert, dass die Variable des Volumenstromverhältnisses und damit auch der Faktor v entfernt werden. Daraufhin werden die übrigen Faktoren und Konstanten aus den Prozesskennwerten der Versuchspunkte 1-32 auf der Anlage am IKV mit dem Material LD 150 AC mit der Statistik-Software neu berechnet. Die Ergebnisse dieser neuen Berechnung werden dann zur Übertragung des statistischen Eigenschaftsmodells auf die anderen beiden Anlagen verwendet. Die geänderten Faktoren und Konstanten zeigen Tabelle 23 bis Tabelle 25. Des Weiteren wurde weder bei den Versuchen bei Kiefel Extrusion noch bei Kuhne die Kühllufttemperatur am Kühlringaustritt bestimmt. Während die Versuche auf der

Anlage des IKV mit temperierter Kühlluft, mit konstant 38 °C am Kühlringaustritt gefahren wurden, sind die Versuche bei Kiefel Extrusion und Kuhne mit angesaugter Umgebungsluft durchgeführt worden. Idealerweise hätte man auch auf den Technikumsanlagen der beiden Firmen dieselbe Kühllufttemperatur von 38 °C einstellen können. Dies war jedoch nicht möglich. Für die Übertragung des Eigenschaftsmodells bedeutet dies eine Einschränkung.

E-Modul LD 150 AC									
	l	q	v	t	d	f	k	r ²	a [%]
Längs	13,88	11,22	-	-22,53	596,81	0,049	18,21	0,82	3,20
Quer	17,89	8,88	-	-51,02	578,80	1,169	71,36	0,82	5,72

Tabelle 23: Geänderte Werte der Berechnung des E-Moduls, LD 150 AC, IKV

Table 23: Modified values of Young's modulus calculation, LD 150 AC, IKV

Spannung 100 % LD 150 AC									
	l	q	v	t	d	f	k	r ²	a [%]
Längs	1,53	0,28	-	-4,92	-5,72	-0,028	16,92	0,95	3,35

Tabelle 24: Geänderte Werte der Berechnung der Spannung 100 %, LD 150 AC, IKV

Table 24: Modified values of strain 100 % calculation, LD 150 AC, IKV

Schrumpf LD 150 AC									
	l	q	v	t	d	f	k	r ²	a [%]
Längs	-3,14	-8,89	-	-18,11	-413,53	-0,178	175,36	0,91	2,39
Quer	-1,16	12,23	-	-1,17	-69,56	0,269	1,51	0,96	7,01

Tabelle 25: Geänderte Werte der Berechnung des Schrumpfs, LD 150 AC, IKV

Table 25: Modified values of shrinkage calculation, LD 150 AC, IKV

5.5.1 Schlauchfolienanlage Kiefel Extrusion

Bild 69 und Bild 70 zeigen in der bekannten Weise den Vergleich von Messung und Prognose des E-Moduls in Längs- und Querrichtung für die entsprechenden Versuchspunkte auf der Schlauchfolienanlage von Kiefel Extrusion. Auch bei diesen Bildern gilt wieder, dass für die Prognosewerte nicht die dargestellten Messwerte als Datenbasis dienen, sondern dass die Prognosen auf dem geänderten statistischen Modell ohne Volumenstromverhältnis basieren, welches anhand der Messwerte der Versuchspunkte 1-32 des Materials LD 150 AC ermittelt wurde. Der Vergleich zeigt, dass die hierbei prognostizierten Werte des E-Moduls teilweise innerhalb der Streubreite der Messwerte liegen. Ein Großteil der prognostizierten E-Moduln

liegt jedoch ober- bzw. unterhalb der Messwerte. Eine Übersicht über die Bestimmtheitsmaße und die prozentualen Abweichungen der Vergleiche aller mechanischen Folieneigenschaften gibt Tabelle 26 (s.u.).

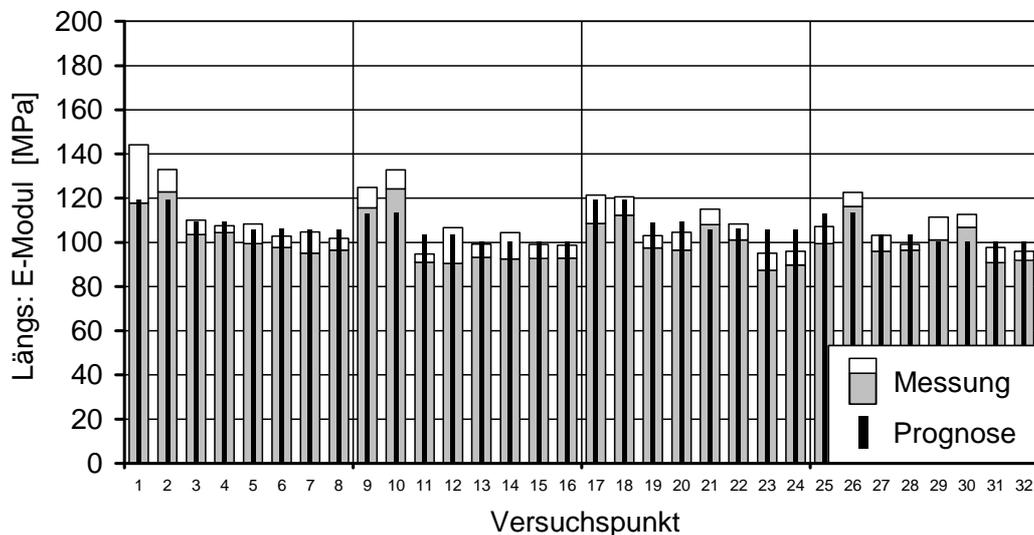


Bild 69: Messung/Prognose Längs: E-Modul, LD 150 AC, Kiefel Extrusion

Fig. 69: Measuring/prediction longitudinal: Young's modulus, LD 150 AC, Kiefel Extrusion

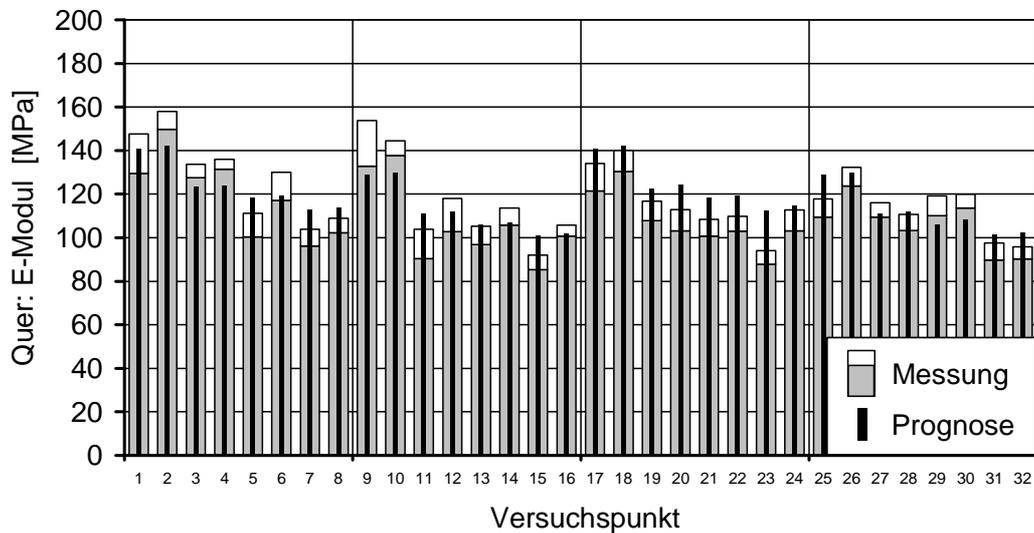


Bild 70: Messung/Prognose Quer: E-Modul, LD 150 AC, Kiefel Extrusion

Fig. 70: Measuring/prediction transverse: Young's modulus, LD 150 AC, Kiefel Extrusion

Der Vergleich von Messung und Prognose der Spannung bei 100 % Dehnung zeigt ein ähnliches Bild wie der Vergleich der E-Moduln. Teilweise liegen die Prognosen innerhalb der Streubreite der Messwerte. Ein Großteil der prognostizierten Spannungen bei 100 % Dehnung liegt jedoch wiederum ober- bzw. unterhalb der Messwerte.

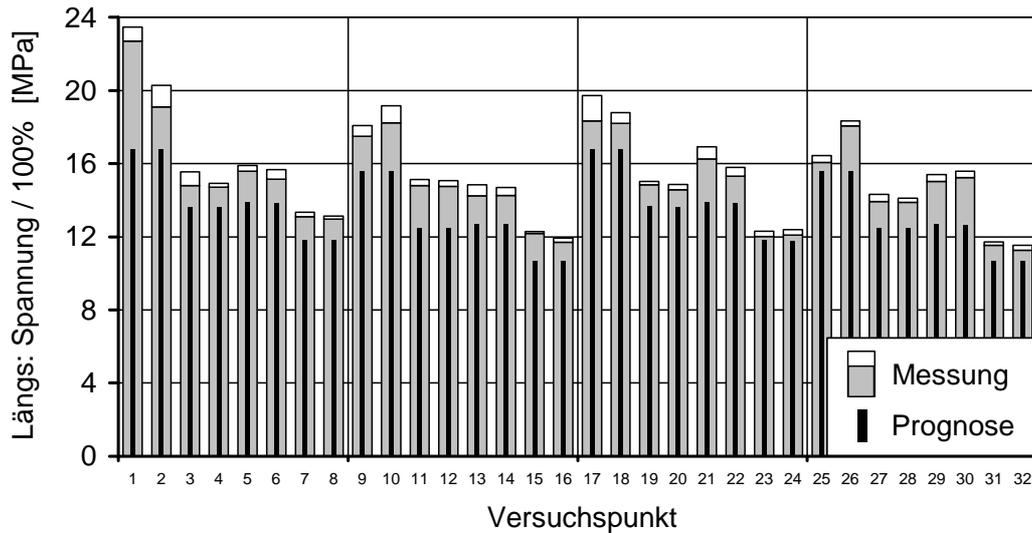


Bild 71: Messung/Prognose Längs: Spannung 100 %, LD 150 AC, Kiefel Extrusion

Fig. 71: Measuring/prediction longitudinal: stress 100 %, LD 150 AC, Kiefel Extrusion

Beim Vergleich zwischen der Prognose und den Messwerten des Schrumpfs der Versuche auf der Anlage bei Kiefel Extrusion ergibt sich im Vergleich zu den Festigkeitseigenschaften E-Modul und Spannung bei 100 % Dehnung ein verbessertes Bild zumindest in Längsrichtung. Die Prognosen und die Messwerte liegen hier enger aneinander.

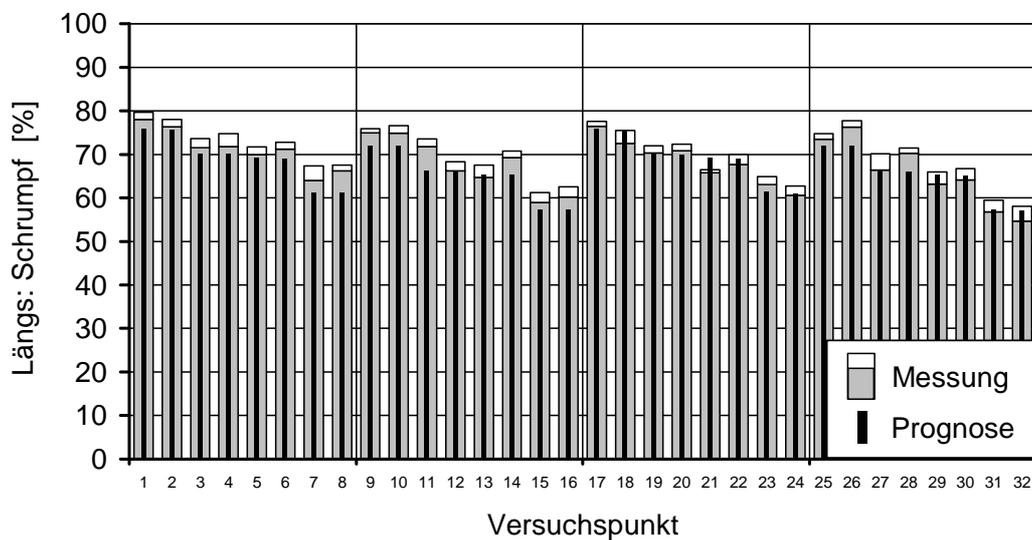


Bild 72: Messung/Prognose Längs: Schrumpfung, LD 150 AC, Kiefel Extrusion

Fig. 72: Measuring/prediction longitudinal: shrinkage, LD 150 AC, Kiefel Extrusion

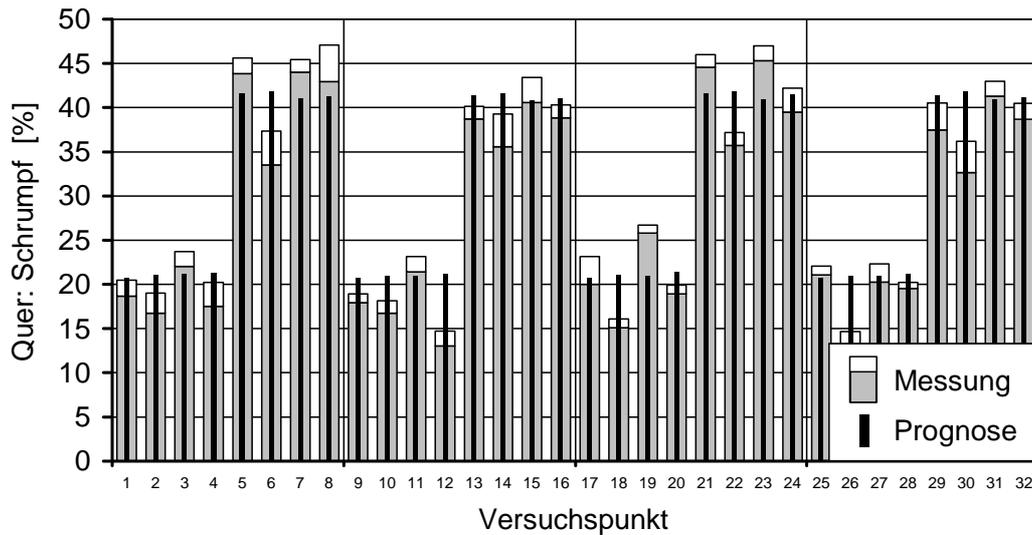


Bild 73: Messung/Prognose Quer: Schrumpf, LD 150 AC, Kiefel Extrusion

Fig. 73: Measuring/prediction transverse: shrinkage, LD 150 AC, Kiefel Extrusion

Kiefel Extrusion	E-Modul		Spannung 100 %		Schrumpf	
	r ²	a [%]	r ²	a [%]	r ²	a [%]
Längs	0,61	7,22	0,88	14,11	0,86	4,35
Quer	0,67	9,05			0,90	12,52

Tabelle 26: Übertragung des Modells auf die Anlage von Kiefel Extrusion

Table 26: Model transfer to the plant of Kiefel Extrusion

Die Bestimmtheitsmaße bei der Prognose der mechanischen Folieneigenschaften der Versuche auf der Anlage von Kiefel Extrusion zeigen niedrigere Werte als bei der Prognose der Werte des LD 150 AC auf der Anlage am IKV. Die Werte der prozentualen Abweichung sind dabei höher. Die Werte spiegeln damit die bereits oben gemachten Beobachtungen wider. Die Prognosen von E-Modul und Spannung bei 100 % Dehnung des statistischen Modells liefern tendenziell die richtigen Ergebnisse. Die Prognose der Schrumpfwerte ist geringfügig besser als die Prognose des E-Moduls und der Spannung bei 100 % Dehnung, allerdings ebenfalls schlechter als die Prognose des Schrumpfs auf der Anlage des IKV. Alles in allem kann man bei den erzielten Bestimmtheitsmaßen und den prozentualen Abweichungen sicherlich nur von einer eingeschränkten Übertragbarkeit des statistischen Eigenschaftsmodells von der Schlauchfolienanlage des IKV auf die Anlage von Kiefel Extrusion sprechen.

5.5.2 Schlauchfolienanlage Kuhne

Bild 74 und Bild 75 zeigen den Vergleich von Messung und Prognose des E-Moduls in Längs- und Querrichtung für die entsprechenden Versuchspunkte auf der Anlage von Kuhne in der bekannten Weise. Die Prognosewerte basieren wiederum auf dem geänderten statistischen Modell ohne Volumenstromverhältnis, welches aus den Messwerten der Versuchspunkte 1-32 des Materials LD 150 AC auf der Anlage des IKV gewonnen wurde. Der Vergleich zeigt, dass die hierbei prognostizierten Werte des E-Moduls gegenüber den Messwerten tendenziell zu hoch berechnet werden. Als Kriterium zur Bewertung der Korrelation zwischen den Messwerten und der Prognose des statistischen Modells werden wiederum das Bestimmtheitsmaß und die prozentuale Abweichung verwendet. Eine Übersicht über diese Werte der Prognosen aller mechanischen Folieneigenschaften gibt Tabelle 27 (s.u.).

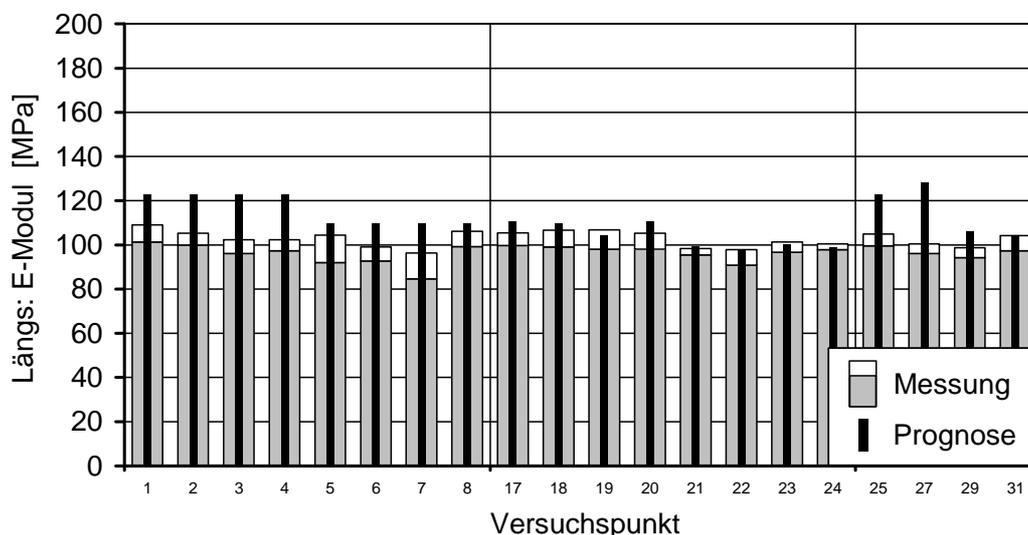


Bild 74: Messung/Prognose Längs: E-Modul, LD 150 AC, Kuhne

Fig. 74: Measuring/prediction longitudinal: Young's modulus, LD 150 AC, Kuhne

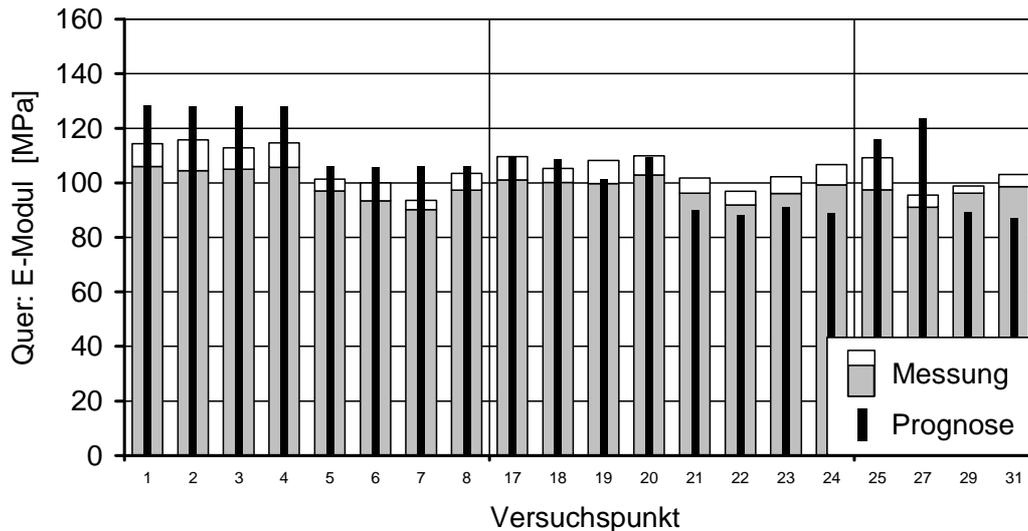


Bild 75: Messung/Prognose Quer: E-Modul, LD 150 AC, Kuhne

Fig. 75: Measuring/prediction transverse: Young's modulus, LD 150 AC, Kuhne

Die Prognosen der Spannung bei 100 % Dehnung in Längsrichtung der Versuche auf der Anlage bei Kuhne zeigen ein ähnliches Bild wie die Prognosen der E-Moduln. Auch hier liegen die prognostizierten Werte tendenziell zu hoch.

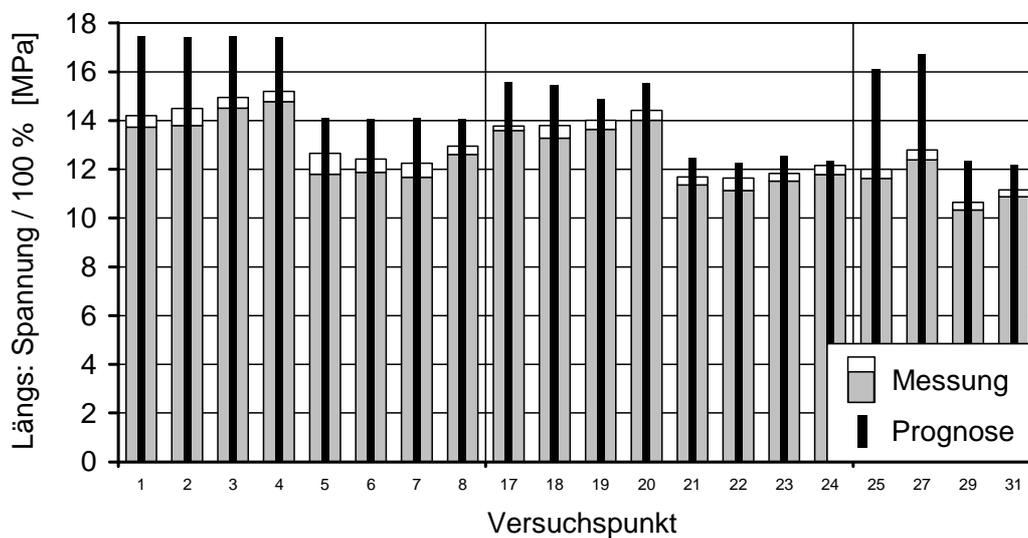


Bild 76: Messung/Prognose Längs: Spannung 100 %, LD 150 AC, Kuhne

Fig. 76: Measuring/prediction longitudinal: stress 100 %, LD 150 AC, Kuhne

Die Prognose des Schrumpfs liefert im Vergleich zu den Festigkeitseigenschaften E-Modul und Spannung bei 100 % Dehnung ein ähnliches Bild. Auch hierbei gibt es eine Tendenz der Überschätzung der Messwerte.

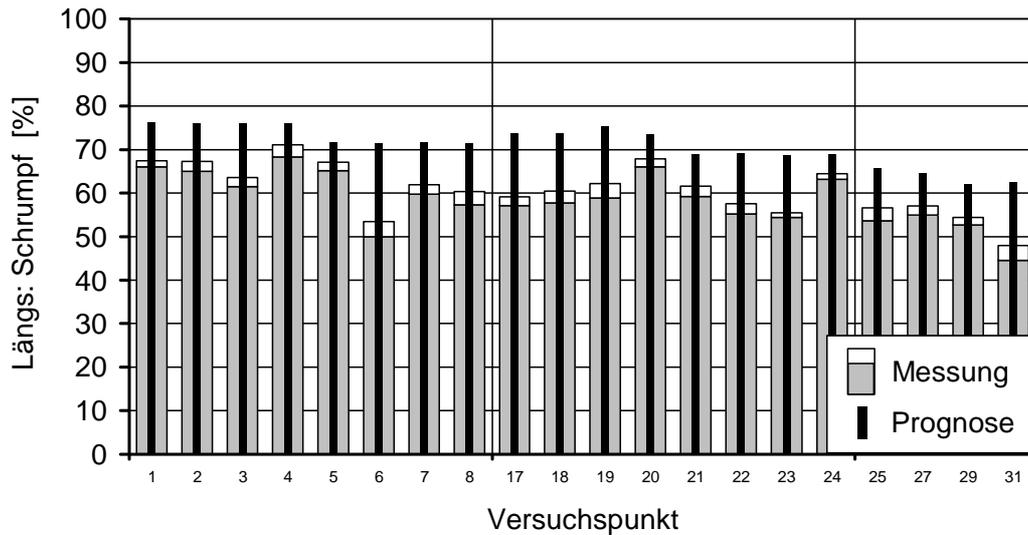


Bild 77: Messung/Prognose Längs: Schrumpf, LD 150 AC, Kuhne

Fig. 77: Measuring/prediction longitudinal: shrinkage, LD 150 AC, Kuhne

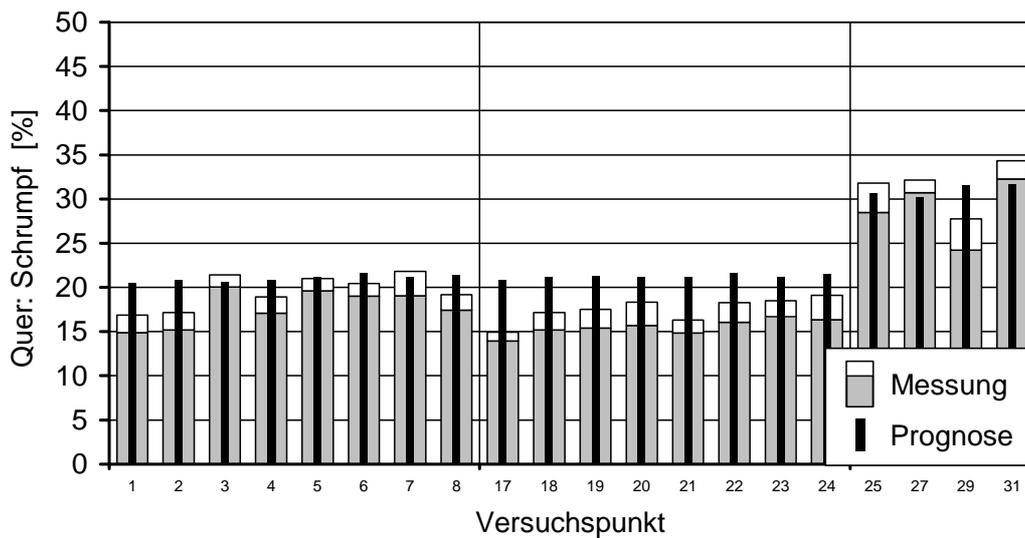


Bild 78: Messung/Prognose Quer: Schrumpf, LD 150 AC, Kuhne

Fig. 78: Measuring/prediction transverse: shrinkage, LD 150 AC, Kuhne

Kuhne	E-Modul		Spannung 100 %		Schrumpf	
	r ²	a [%]	r ²	a [%]	r ²	a [%]
Längs	0,12	14,61	0,71	17,78	0,55	19,73
Quer	0,27	26,81			0,85	18,73

Tabelle 27: Übertragung des Modells auf die Anlage von Kuhne

Table 27: Model transfer to the plant of Kuhne

Insgesamt betrachtet sind die für die Übertragung des Modells auf die Anlage bei Kuhne berechneten Bestimmtheitsmaße und prozentualen Abweichungen der Prognosen wesentlich schlechter als die erreichten Werte auf der Anlage des IKV, auf der das Eigenschaftsmodell entwickelt wurde. Damit bestätigen sich die oben gemachten Beobachtungen der Überschätzung der Messwerte durch die Prognosen. Die Übertragbarkeit des Modells von der Anlage des IKV auf die Anlage bei Kuhne ist daher bei den vorliegenden Daten nicht gegeben.

Die Erklärung für die Überschätzung der Messwerte, oder anders formuliert, für die geringeren mechanischen Folienkennwerte, liegt wahrscheinlich in den unterschiedlichen Abkühlverhältnissen verborgen. Wie die Untersuchungen des Kapitels 5.2 gezeigt haben, hat das Volumenstromverhältnis (Quotient aus Masse- und Kühlluftstrom) einen entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Folieneigenschaften einer Schlauchfolie. Während der Massedurchsatz mit ca. 9-29 kg/h auf der Anlage des IKV noch relativ niedrig ist, wurden auf den Anlagen der Firma Kiefel Extrusion und Kuhne 113-269 kg/h verarbeitet. Die Ergebnislage deutet nun daraufhin, dass wenn man die Volumenstromverhältnisse der Anlage des IKV als Referenz definiert, das Volumenstromverhältnis, sprich die Kühlwirkung, der Anlage von Kuhne geringer ist. Hierdurch lassen sich die geringeren mechanischen Kennwerte erklären. Beim Vergleich der beiden Anlagen von Kiefel Extrusion und Kuhne zeigen die Messergebnisse der Folien, die auf der Anlage von Kiefel Extrusion produziert wurden, bessere mechanische Eigenschaften, die ungefähr gleich sind mit den Eigenschaften der Folien, die auf der Anlage des IKV hergestellt wurden. Diese höheren mechanischen Kennwerte deuten auf eine bessere Kühlwirkung der Anlage von Kiefel Extrusion im Vergleich mit der Anlage von Kuhne hin. Bei der Betrachtung der Kühleinrichtungen der beiden Anlagen erklärt sich diese These dann auch durch das Vorhandensein einer Blaseninnenkühlung bei der Anlage von Kiefel Extrusion, da die Blaseninnenkühlung bei gleichen Massedurchsätzen durch die beidseitige Folienkühlung die Kühlwirkung entscheidend verbessert. Insgesamt bewertet scheint offenbar bei geringeren Massedurchsätzen (IKV) eine Außenkühlung zu genügend großen Volumenstromverhältnissen zu führen, während bei größeren Massedurchsätzen zur Erreichung ähnlicher Kühlwirkungen die Außenkühlung allein nicht ausreicht (Kuhne), und eine Blaseninnenkühlung notwendig ist (Kiefel Extrusion). Für die Übertragbarkeit des Eigenschaftsmodells von einer Anlage auf eine andere ergibt sich aus diesen Überlegungen unmittelbar die Notwendigkeit der Berücksichtigung der unterschiedlichen Kühlwirkungen.

5.5.3 Fazit

Die Vorhersage der mechanischen Folieneigenschaften einer Schlauchfolie mit einem statistischen Eigenschaftsmodell basierend auf dimensionslosen Prozesskennwerten ergibt für eine

bestimmte Schlauchfolienanlage zufrieden stellende Ergebnisse, mit denen der Schrumpf und die Spannung bei 100 % Dehnung berechnet und der E-Modul abgeschätzt werden kann. Dies gilt, wenn das Berechnungsmodell aus Messwerten der gleichen Anlage bestimmt wird. Bei der Übertragung dieses Modells auf eine andere Anlage ergeben sich insgesamt schlechtere Prognosen der mechanischen Folieneigenschaften. Während die Übertragung des Eigenschaftsmodells auf die Schlauchfolienanlage der Firma Kuhne nicht funktioniert hat, kann man bei der Übertragung auf die Anlage der Firma Kiefel Extrusion, wenn auch bei geringer mathematischer Bestimmtheit, zumindest von einer eingeschränkten Übertragbarkeit sprechen. Daher kann die Möglichkeit der Übertragbarkeit des statistischen Eigenschaftsmodells von einer Anlage auf eine andere auch nicht endgültig ausgeschlossen werden.

In diesem Zusammenhang sei noch mal darauf hingewiesen, dass die Übertragung des statistischen Eigenschaftsmodells ohne den dimensionslosen Prozesskennwert Volumenstromverhältnis, der den Einfluss des Kühlrings bzw. die Effektivität der Kühlung mit abbildet, durchgeführt wurde. Des Weiteren war die Kühllufttemperatur auf allen drei Schlauchfolienanlagen unterschiedlich. Wenn man sich vor diesem Hintergrund vor Augen führt, in welchen Punkten bzw. konstruktiven Merkmalen sich Schlauchfolienextrusionsanlagen voneinander unterscheiden, sind es jedoch neben der Werkzeuggeometrie eben die Abkühlbedingungen, die die Unterschiedlichkeit ausmachen. Wobei sich dieser Vergleich nur auf die Elemente bezieht, die im direkten Zusammenhang mit der Ausbildung der Schlauchbildungszone stehen. Die Abkühlbedingungen bei einer Schlauchfolienanlage werden dabei neben dem Kühlluftvolumenstrom noch durch die Kühllufttemperatur, die Kühlringgeometrie und entscheidend durch die Lippenform mitbestimmt. Hinzu kommen das Vorhandensein einer Blaseninnenkühlung und deren konstruktive Auslegung. Wie oben gezeigt, ist es jedoch notwendig, zur Übertragung des Eigenschaftsmodells die Abbildung der Kühlwirkung mit zu berücksichtigen. Hierzu können, ähnlich dem Lösungsansatz zur Verbesserung der Übertragbarkeit des Eigenschaftsmodells auf ein anderes Material, ein oder mehrere zusätzliche anlagenspezifische Kennwerte eingeführt werden, die eben genau diese unterschiedliche Kühlwirkung auf verschiedenen Anlagen beschreiben. Bei der Suche nach diesen zusätzlichen anlagenspezifischen Kennwerten besteht daher noch Forschungsbedarf.

5.6 Fazit

Ziel des Kapitels 5 ist die Erstellung eines allgemeingültigen statistischen Eigenschaftsmodells, welches die mechanischen Folieneigenschaften beim Schlauchfolienextrusionsverfahren vorhersagen kann. Allgemeingültig heißt in diesem Fall, dass das Eigenschaftsmodell für verschiedene Anlagen und Materialien Gültigkeit besitzt. Zu diesem Zweck wird ein statisti-

ches Modell zunächst auf einer Anlage mit einem Material entwickelt. Im nächsten Schritt wird versucht, dieses Modell dann auf andere Anlagen bzw. Materialien zu übertragen. Das Eigenschaftsmodell basiert dabei auf dimensionslosen Prozesskennwerten, die die Vorgänge in der Schlauchbildungszone beschreiben.

Die Ergebnisse haben dabei gezeigt, dass das aufgestellte statistische Eigenschaftsmodell die mechanischen Folieneigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion für den speziellen Anwendungsfall vorhersagen kann. Dabei sind die Ergebnisse der Vorhersage des Schrumpfs und der Spannung bei 100 % Dehnung als gut zu bewerten, während die Ergebnisse bei der Vorhersage des E-Moduls und der Zugfestigkeit zur Abschätzung der Eigenschaften dienen können. Die allgemeingültige Übertragbarkeit des Modells auf andere Materialien und Schlauchfolienanlagen ist nur eingeschränkt gelungen. Da die Übertragbarkeit aber im Ansatz funktioniert hat, zeigt das entwickelte Eigenschaftsmodell hierdurch sein Potential. Daher kann die Übertragbarkeit zu diesem Zeitpunkt auch nicht verworfen werden. Zur möglichen Verbesserung der Übertragbarkeit bzw. zur abschließenden Bewertung des Verfahrens besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Hierzu werden bereits erste Lösungsansätze mittels zusätzlicher material- bzw. anlagenspezifischer Kennwerte aufgezeigt.

6 AUSBLICK

Die mechanischen Eigenschaften einer Schlauchfolie werden, neben dem Material und der Anlage, bestimmt durch den Prozesszustand in der Schlauchbildungszone bzw. durch die hieraus resultierende Orientierungsverteilung und den Grad der Kristallisation. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Orientierungszustand der Folie in weitem Maße durch eine Variation der Prozessparameter der Schlauchbildungszone verändert werden kann, während der Kristallisationsgrad unabhängig von der Variation des Prozesszustands ist. Diese Aussage gilt zunächst nur für die hier untersuchten Materialien, also für LDPE. Ob diese Unabhängigkeit des Kristallisationsgrads von dem Prozesszustand in der Schlauchbildungszone auch für andere Materialien gültig ist, bleibt noch zu untersuchen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde versucht ein Modell zu entwickeln, welches die mechanischen Eigenschaften einer Schlauchfolie im Vorfeld der Produktion vorhersagen kann. Hierzu wurde ein statistisches Eigenschaftsmodell entwickelt, welches mittels dimensionsloser Prozesskennwerte den Zustand der Schlauchbildungszone abbildet. Einige der hierbei verwendeten dimensionslosen Prozesskennwerte benötigen allerdings Eingangsgrößen, die nicht ohne weiteres „vom Schreibtisch aus“ im Vorfeld festzulegen sind. So benötigt man zur Berechnung des Frostlinienverhältnisses die sich im Prozess einstellende Frostliniehöhe, und zur Berechnung des Volumenstromverhältnisses den hierzu benötigten Kühlluftvolumenstrom. Diese Größen lassen sich daher erst während der Produktion eindeutig festlegen. Dies bedeutet, dass die Vorhersage der mechanischen Folieneigenschaften zwar nicht Tage im Voraus geschehen kann, sehr wohl jedoch zu Beginn der Produktion. Trotz dieses Umstands hat der Folienproduzent bereits hiervon einen großen Nutzen. Die Qualität der Produktion ist durch die Vorhersage bereits ab der ersten Rolle gesichert. Verfügt der Folienhersteller über ein eigenes Prüflabor zur Kontrolle der mechanischen Folieneigenschaften, so muss dieses nicht während der Produktion regelnd eingreifen, und ggf. die ersten Rollen der Produktion ausmustern. Verfügt der Folienhersteller über kein eigenes Prüflabor, so kann er sich sicher sein, dass die ausgelieferten Rollen nicht in der Eingangskontrolle des Kunden ausgemustert werden, und die gesamte Ware zurückgeliefert wird.

In dem Zusammenhang des praktischen Einsatzes des entwickelten Eigenschaftsmodells sei auch auf die Kopplung dieses Eigenschaftsmodells zur Berechnung der mechanischen Kennwerte mit dem Prozessmodell für den Schlauchfolienextrusionsprozess von *Hauck* [Hau'99] hingewiesen (vgl. Kapitel 4.2). Somit kann eine durchgängige Simulation der Schlauchfolienextrusion erreicht werden, indem mit dem Prozessmodell von *Hauck* aus den Maschineneinstellparametern der Prozesszustand in der Schlauchbildungszone berechnet wird, und an-

schließlich ausgehend von diesem Prozesszustand mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Eigenschaftsmodell die mechanischen Kennwerte der Schlauchfolie bestimmt werden. Die Berechnungsergebnisse des Eigenschaftsmodells haben gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, mit der Bildung von Prozesskennwerten die mechanischen Folieneigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion durch statistische Modelle zu beschreiben. Bezüglich der Güte der Vorhersage hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse der Berechnung des Schrumpfs und der Spannung bei 100 % Dehnung als gut zu bewerten sind, während die Ergebnisse bei der Berechnung von E-Modul und Zugfestigkeit zur Abschätzung der Eigenschaften dienen können. Das weiterführende Ziel muss daher eine Verbesserung des statistischen Eigenschaftsmodells sein. Hält man dabei an dem Grundgerüst der Abbildung der Vorgänge in der Schlauchbildungszone durch dimensionslose Prozesskennwerte fest, ist eine Verbesserung des Eigenschaftsmodells auf unterschiedliche Art zu erreichen. Zum einen kann das Eigenschaftsmodell durch weitere Prozesskennwerte erweitert werden, ggf. können dafür auch momentan verwendete Kennwerte ausgetauscht werden. Zum anderen kann die lineare Abhängigkeit, die sich bei den Untersuchungen innerhalb des gewählten Prozessfensters ergeben hat, im Einzelfall durch Abhängigkeiten höherer Ordnungen ersetzt werden. Betrachtet man in diesem Zusammenhang den Schrumpf in Querrichtung in Bild 45 so wird schnell klar, dass, wenn das Aufblasverhältnis einen bestimmten Wert überschritten hat, der Schrumpf nicht größer als 100 % werden kann. Vielmehr wird sich der Schrumpf wahrscheinlich einem asymptotischen Grenzwert nähern. Dieses Verhalten ist allerdings mit einer linearen Beziehung nicht zu beschreiben. Vor dem Hintergrund dieser Betrachtungen erhebt das entwickelte Eigenschaftsmodell keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr wird mit diesem Eigenschaftsmodell ein Verfahren eingeführt, das die Vorhersage der mechanischen Eigenschaften einer Schlauchfolie prinzipiell ermöglicht. Dieses Verfahren versteht sich dabei als Basis einer offenen Diskussion. Die mögliche Erweiterung bzw. Änderung des statistischen Eigenschaftsmodells wurde bereits eingeführt und ist insbesondere für die Verbesserung der Vorhersagegüte von E-Modul und Zugfestigkeit auch erstrebenswert. In diesem Zusammenhang besteht daher noch weiterer Forschungsbedarf.

Die Übertragbarkeit des Eigenschaftsmodells auf andere Materialien bzw. Anlagen wurde ebenfalls gezeigt, wenn auch bei geringer mathematischer Bestimmtheit. Zur Erhöhung der mathematischen Bestimmtheit werden Lösungsansätze präsentiert, die die Übertragbarkeit der Berechnungsgüte weiter verbessern sollen. Diese Lösungsansätze basieren dabei auf einer Änderung bzw. Erweiterung des Eigenschaftsmodells um zusätzliche material- bzw. anlagen-spezifische Kennwerte. Ein Versuch zur Verbesserung der Übertragbarkeit auf andere Materialien wurde in diesem Zusammenhang bereits mit dem Materialkennwert MFR-Wert unter-

nommen. In diesem Punkt besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf. Auch hierbei erhebt das entwickelte Eigenschaftsmodell daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern will sich ebenfalls als Diskussionsgrundlage verstanden wissen.

7 ZUSAMMENFASSUNG / SUMMARY

7.1 Zusammenfassung

Die Herstellung von Schlauchfolien aus thermoplastischen Kunststoffen stellt ein wichtiges Verarbeitungsverfahren für polymere Rohstoffe dar. Ein Ziel der Weiterentwicklung bei der Schlauchfolienextrusion ist heute die Reduzierung des Rohstoffeinsatzes bei gleich bleibender oder verbesserter Folienqualität insbesondere in Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften. Von daher stehen die mechanischen Folieneigenschaften als entscheidender Schlüssel auf dem Weg zu dünneren Folien heute mehr denn je im Blickpunkt des Interesses. Bisher existiert allerdings noch kein allgemeingültiges und anerkanntes Berechnungsmodell für die mechanischen Folieneigenschaften beim Schlauchfolienextrusionsverfahren. Hieraus ergibt sich bei der Vorhersage der Schlauchfolieneigenschaften eine große Unwägbarkeit für den Folienhersteller bei der Entwicklung eines neuen Produkts, einem Wechsel des Materials oder der Produktionsanlage. Das Aufstellen eines derartigen Berechnungsmodells zur Vorhersage der mechanischen Kennwerte bei der Schlauchfolienextrusion ist daher Thema dieser Arbeit.

Als Einstieg in die Thematik wird zunächst der Stand der Forschung bezüglich der mechanischen Eigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion ausführlich beschrieben. Darauf aufbauend wird die Entstehung der Schlauchfolieneigenschaften erklärt. Hierbei sind vor allem die Vorgänge auf molekularer Ebene, die die Schlauchfolieneigenschaften festlegen. Hierzu werden die Auswirkungen von Orientierungszustand und Kristallisationsgrad auf die Folieneigenschaften untersucht. Dabei ist der Kristallisationsgrad, für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten LDPE-Folien, eine Art Materialkonstante und unabhängig vom Prozesszustand. Sein Anteil an den mechanischen Eigenschaften ist in diesem Fall demnach konstant. Der Orientierungszustand hingegen ist in großem Maße abhängig von dem Prozesszustand in der Schlauchbildungszone, und daher nahezu allein verantwortlich für die große Variationsbreite der mechanischen Eigenschaften.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell zur Vorhersage der Folieneigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion basiert auf der Grundlage der statistischen Modellbildung. Die entsprechenden mechanischen Kennwerte bilden die Ausgangsgrößen des Modells. Als Eingangsgrößen werden dimensionslose Prozesskennwerte gewählt, um die Übertragbarkeit des statistischen Eigenschaftsmodells auf andere Materialien bzw. Anlagen zu gewährleisten. Dabei werden neben den bekannten Prozesskennwerten der Schlauchfolienextrusion, Aufblas- und Abzugsverhältnis, noch weitere Prozesskennwerte eingeführt. Allen verwendeten Pro-

zesskennwerten ist dabei gemein, dass sie den Prozesszustand in der Schlauchbildungszone beschreiben, da in der Schlauchbildungszone die Folieneigenschaften festgelegt werden.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, mit der Bildung von Prozesskennwerten die mechanischen Folieneigenschaften bei der Schlauchfolienextrusion durch statistische Modelle zu beschreiben. Dabei sind die Ergebnisse der Berechnung des Schrumpfs und der Spannung bei 100 % Dehnung als gut zu bewerten, während die Ergebnisse bei der Berechnung von E-Modul und Zugfestigkeit lediglich zur Abschätzung der Eigenschaften dienen können. Die allgemeingültige Übertragbarkeit des Modells auf andere Materialien und Schlauchfolienanlagen ist nur eingeschränkt gelungen. Zur möglichen Verbesserung der Übertragbarkeit besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Hierzu werden bereits erste Lösungsansätze mittels zusätzlicher material- bzw. anlagenspezifischer Kennwerte aufgezeigt.

7.2 Summary

The manufacturing of blown films made of thermoplastic materials is considered an important processing technique for polymer raw material. Today, one goal of the further development of the blown film extrusion is the reduction of raw material application while maintaining or improving the quality of the film, also in regard of the mechanical properties. Therefore, the mechanical film properties, as a key aspect on the way to create thinner films, move into the focus of interest. Up to now, a generic and recognised calculation model, which predicts the film properties in the blown film extrusion process, is not available. Hence, large imponderability in predicting film properties for new product development or the change of material or the production line result to the film manufacturer. Therefore, the proposal of a calculation model in order to predict the mechanical characteristic values of the blown film extrusion is the subject of this work.

As an introduction on the topic, a description of the state of the art regarding mechanical properties in the blown film extrusion is given. Based hereon, the formation of the blown film properties is being explained. The blown film properties are foremost set-up by processes taking place on the molecular level. The effect of orientation and crystallisation on the blown film properties is being investigated. For all that, the crystallisation is a kind of material constant which is independent from the process state. Hence, its part on the mechanical properties of a LDPE blown film is constant. The orientation on the other side depends on the process state in the bubble expansion zone in a large scale, and is therefore the utmost factor of influence on the mechanical properties.

The model developed in the course of this work, in order to predict the blown film properties, is based on the foundation of statistical modelling. The corresponding mechanical characteristic values form the start values of the model. As input value, dimensionless process characteristic values are being chosen, in order to ensure the transferability of the statistical property model on different materials and production lines. Therefore, next to the known characteristic values of the blown film process, blow-up ratio and take-up ratio, additional process characteristic values are being introduced. All used process characteristic values have in common that they describe the process state in the bubble expansion zone because the blown film properties are being fixed there.

The results show that it is on principle possible to describe the mechanical blown film properties with statistical models by the use of process characteristic values. The results of shrinkage and strain at 100 % stretch are to be judged as good, while the results of the calculation of Young's modulus and tensile strength can be used to assess the properties roughly. The transferability of the model to different materials and blown film lines has been realised only to a limited extent. For a possible improvement, further research is necessary. Some approaches by the use of additional material- or plant-specific characteristic values have been shown already.

8 ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

8.1 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CCD	Charge Coupled Device
DSC	Differential Scanning Calorimetry
HDPE	High Density Polyethylene
HMW-HDPE	High Molecular Weight - High Density Polyethylene
IKV	Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Aachen
LDPE	Low Density Polyethylene
LLDPE	Linear Low Density Polyethylene
MFR	Melt Mass Flow Rate
mLDPE	Metallocene-based Low Density Polyethylene
PE	Polyethylene
PP	Polypropylene
PVC	Polyvinyl Chloride

8.2 Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung
a	Prozentuale Abweichung
b	Dicke des Wollaston-Prismas
C	Spannungsoptischer Koeffizient
d	Foliendicke
d	Faktor des Eigenschaftsmodells - Dickenverhältnis
f	Faktor des Eigenschaftsmodells - Frostlinienverhältnis
H _C	Schmelzwärme für die 100 % kristalline Probe
H _{DSC}	Schmelzwärme mit der DSC gemessen
I ₀	Intensität des Lichts
I _A	Intensität des Lichts, welches den Analysator passiert
i _d	Dickenverhältnis
i _f	Frostlinienverhältnis
i _l	Abzugsverhältnis
i _q	Aufblasverhältnis

i_t	Temperaturverhältnis
i_v	Volumenstromverhältnis
K	Dehnungsoptischer Koeffizient
k	Konstante des Eigenschaftsmodells
l	Faktor des Eigenschaftsmodells - Abzugsverhältnis
L	Länge des Wollaston-Prismas
mfr	Faktor des Eigenschaftsmodells - Melt Mass Flow Rate
n	Brechungsindex
n	Anzahl der Versuchspunkte
n_{ao}	Brechungsindex in Richtung des außerordentlichen Strahls
n_o	Brechungsindex in Richtung des ordentlichen Strahls
q	Faktor des Eigenschaftsmodells - Aufblasverhältnis
r^2	Bestimmtheitsmaß
t	Faktor des Eigenschaftsmodells - Temperaturverhältnis
v	Faktor des Eigenschaftsmodells - Volumenstromverhältnis
x	Laufvariable
x_i	Messwert
\bar{x}	Mittelwert der Messwerte
y_i	Prognosewert
\bar{y}	Mittelwert der Prognosewerte
Δn	Doppelbrechung
Γ	Gangunterschied
Γ_F	Gangunterschied der Folie
Γ_{ges}	Gesamtgangunterschied
Γ_K	Gangunterschied des Kompensators
α	Winkel zwischen der linear polarisierten Welle und der optischen Achse
α	Winkel des Wollaston-Prismas
ε	Dehnung
κ	Kristallisationsgrad
λ	Wellenlänge
σ	Spannung

9 LITERATUR

- [AC'92] ASHOK, B. K.; CAMPBELL, G. A.: Two-phase simulation of tubular film blowing of crystalline polymers. *International Polymer Processing* 7 (1992) 3, S. 240-247
- [And'93] ANDERSEN, A.: *Experimentelle Untersuchung der Schmelzedeformationen in der Schlauchbildungszone bei Variation von Frostlinienhöhe und Abzugsverhältnis*, Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Studienarbeit, 1993. - Betreuer: SCHMITZ, G.
- [Avr'39] AVRAMI, M.: Kinetics of Phase Change. I General Theory. *Journal of Chemical Physics* 7 (1939) 12, S. 1103-1112
- [Avr'40] AVRAMI, M.: Kinetics of Phase Change. II Transformation-Time-Relaxation for Random Distribution of Nuclei. *Journal of Chemical Physics* 8 (1940) 2, S. 212-224
- [Avr'41] AVRAMI, M.: Kinetics of Phase Change. III Granulation, Phase Change and Microstructure. *Journal of Chemical Physics* 9 (1941) 2, S. 177-184
- [BA'96] BENARD, A.; ADVANI, S. G.: A Cell Model to Describe the Spherulitic Growth in Semicrystalline Polymers. *Polymer Engineering and Science* 36 (1996) 4, S. 520-534
- [BC'93a] BABEL, A. K.; CAMPBELL, G. A.: Correlating the plastic strain with the properties of the linear low density polyethylene blown film. In: *Proceedings of the 51st ANTEC*. SPE, New Orleans, 1993a, S. 444-448
- [BC'93b] BABEL, A. K.; CAMPBELL, G. A.: Correlating the plastic strain with the properties of the low density polyethylene blown film. *Journal of Plastic Film & Sheeting* 9 (1993b) 7, S. 247-258
- [BC'94] BABEL, A. K.; CAMPBELL, G. A.: Correlation between the plastic strain and the properties of the low and linear low density polyethylene blown films. In: *Proceedings of the 52nd ANTEC*. SPE, San Francisco, 1994, S. 224-228
- [Bes'90] BEST, S. A.: Influence of LLDPE Blends and Coextrusion on HMW-HDPE Film Properties. In: *Proceedings of the 48th ANTEC*. SPE, Dallas, 1990, S. 182-189
- [BKPS'94] BLONG, T. J.; KLEIN, D. F.; POCIUS, A. V.; STROBEL, M.: The influence of polymer processing additives on the surface, mechanical, and optical properties of LLDPE blown films. In: *Proceedings of the 52nd ANTEC*. SPE, San Francisco, 1994, S. 28-34
- [BLPS'94] BUTLER, T. I.; LAI, S.; PATEL, R. P.; SPURIA, J. E.: Blown film frost line - freeze line interactions. In: *Proceedings of the 52nd ANTEC*. SPE, San Francisco, 1994, S. 15-27
- [BNCC'96] BABEL, A. K.; NAGARAJAN, G.; CAMPBELL, G. A.; CAO, B.: Kinematics, Structure and Properties Relationship of Polyethylene Blown Films. In: *Proceedings of the 54th ANTEC*. SPE, Indianapolis, 1996, S. 2112-2114
- [Bon'95] BONTEN, M.: *Bestimmung des Orientierungszustands von Blasfolien mit Hilfe der Doppelbrechung*, Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Studienarbeit, 1995. - Betreuer: SCHMITZ, G.
- [BP'93a] BUTLER, T. I.; PATEL, R.: Blown film bubble forming and quenching effects on film properties. In: *Proceedings of the 51st ANTEC*. SPE, New Orleans, 1993a, S. 51-57
- [BP'93b] BUTLER, T. I.; PATEL, R.: Blown film bubble forming and quenching effects on film properties. *Journal of Plastic Film & Sheeting* 9 (1993b), S. 181-200

- [BP'92] BUTLER, T. I.; PIRTLE, S. E.: Melt Temperature Influence of Processing and Properties in Blown Film. In: *Proceedings of the 50th ANTEC*. SPE, Detroit, 1992, S. 1833-1840
- [Bro'84] BROWN, R. P.: *Taschenbuch der Kunststoff-Prüftechnik*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1984
- [BSB'85] BISWAS, P. K.; SENGUPTA, S.; BASU, A. N.: Modified affine law for the elastic and optical properties of low density polyethylene. *Makromol. Chem.* 186 (1985), S. 2649-2656
- [CC'86] CAMPBELL, G. A.; CAO, B.: Blowing film modelling - die to frostline. In: *Proceedings of the 44th ANTEC*. SPE, Boston, 1986, S. 909-911
- [CH'90] CANTOR, K. M.; HARRISON, I. R.: Optimizing Blown Film Polyethylene Using a Merit Function. *Polymer Engineering and Science* 30 (1990) 19, S. 1205-1208
- [CSW'82] CHOI, K. J.; SPRUIELL, J. E.; WHITE, J. L.: Orientation and Morphology of High-Density Polyethylene Film Produced by Tubular Blowing Method and its Relationship to Process Conditions. *Journal of Polymer Science* 20 (1982), S. 27-47
- [CT'89] COOKE, D. L.; TIKUISIS, T.: Addition of Branched Molecules and High Molecular Weight Molecules to Improve Optical Properties of LLDPE Film. In: *Proceedings of the 47th ANTEC*. SPE, New York, 1989, S. 22-27
- [CWS'80] CHOI, K. J.; WHITE, J. L.; SPRUIELL, J. E.: Orientation Development in Tubular Film Extrusion of Polystyrene. *Journal of Applied Polymer Science* 25 (1980), S. 2777-2788
- [EJ'97] EDER, G.; JANESCHITZ-KRIEGL, H.: Crystallization (Chapter 5). In: *Material Science and Technology 18*, Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1997
- [Fei'89] FEISTKORN, W.: Blasfolienextrusion - heute besser und wirtschaftlicher denn je. *Kunststoffe* 79 (1989) 11, S. 1178-1181
- [Fis'85] FISCHER, E.: Eigenschaftsveränderungen an Schlauchfolien durch die Beeinflussung der Orientierung bei der Herstellung. In: *Extrudieren von Schlauchfolien*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1985, S. 55 - 70
- [Fis'88] FISCHER, E.: *Die optimierte Folienfahrweise - Schlauchfolien aus LDPE werden fester durch die Verarbeitung*. In: Mitteilung der BASF AG, Ludwigshafen, 1988
- [Fis'86] FISCHER, E.: Die Fahrweise mit langem Hals: Festere Schlauchfolien aus LDPE durch die Verarbeitung. *Kunststoffe* 76 (1986) 2, S. 117-122
- [Fis'81] FISCHER, E.: Schrumpfverhalten von Blasfolien aus LDPE. *Kunststoffe* 71 (1981) 6, S. 380-385
- [Fis'83] FISCHER, E.: *Ein rheologisches Modell zur Beschreibung der Produktqualität bei der Verarbeitung von Hochdruckpolyethylen*, Universität Stuttgart, Dissertation, 1983
- [FS'87] FEISTKORN, W.; SENSEN, K.: Automatik-Schlauchfolienwerkzeuge insbesondere für Fein- und Kaschierfolie. *Kunststoffe* 77 (1987) 5, S. 472-474
- [FSNS'95] FRUITWALA, H.; SHIRODKAR, P.; NELSON, P. J.; SCHREGENBERGER, S. D.: Characterization of Blown Film Morphology. *Journal of Plastic Film & Sheeting* 11 (1995) 10, S. 298-311
- [FSNS'94] FRUITWALA, H.; SHIRODKAR, P.; NELSON, P. J.; SCHREGENBERGER, S. D.: Characterization of Blown Film Morphology. In: *Tagungsumdruck 52nd ANTEC*. SPE, San Francisco, 1994, S. 2252-2256
- [Gab'98] GABRIELE, M. C.: Internal Bubble Cooling boosts Film Productivity. *Modern Plastics International* 28 (1998) 8, S. 60-65

- [GCL'96a] GHANEH-FARD, A.; CARREAU, P. J.; LAFLEUR, P. G.: Application of Birefringence to Film Blowing. *Journal of Plastic Film & Sheeting* 12 (1996a) 1, S. 68-86
- [GCL'97a] GHANEH-FARD, A.; CARREAU, P. J.; LAFLEUR, P. G.: Study of Kinematics and Dynamics of Film Blowing of Different Polyethylenes. *Polymer Engineering and Science* 37 (1997a) 7, S. 1148-1163
- [GCL'97b] GHANEH-FARD, A.; CARREAU, P. J.; LAFLEUR, P. G.: On-Line Birefringence Measurement in Film Blowing of a Linear Low Density Polyethylene. *International Polymer Processing* 12 (1997b) 2, S. 136-146
- [GCL'95] GHANEH-FARD, A.; CARREAU, P. J.; LAFLEUR, P. G.: Application of Birefringence to Film Blowing. In: *Proceedings of the 53rd ANTEC*. SPE, Boston, 1995, S. 1459-1463
- [GCL'96b] GHANEH-FARD, A.; CARREAU, P. J.; LAFLEUR, P. G.: Study of Kinematics and Dynamics of Film Blowing of a Linear Low Density Polyethylene. In: *Proceedings of the 54th ANTEC*. SPE, Indianapolis, 1996b, S. 111-115
- [Gha'99] GHANEH-FARD, A.: Effects of Film Blowing Conditions on Molecular Orientation and Mechanical Properties of Polyethylene Films. *Journal of Plastic Film & Sheeting* 15 (1999) 7, S. 194-218
- [GHP'87] GILBERT, M.; HEMSLEY, D. A.; PATEL, S. R.: Effect of processing conditions on the Orientation and properties of polyethylene blown film. *British Polymer Journal* 19 (1987) 1, S. 9-23
- [GSH'93a] GUPTA, A.; SIMPSON, D. M.; HARRISON, I. R.: Crystalline morphology in oriented HDPE blown films. *Plastics Engineering* (1993a) 11, S. 33-36
- [GSH'93b] GUPTA, A.; SIMPSON, D. M.; HARRISON, I. R.: A Morphological Study of HDPE-Blown Films Using Small-Angle X-Ray Scattering. *Journal of Applied Polymer Science* 50 (1993b), S. 2085-2093
- [Har'93] HARTUNG, J.: *Statistik, Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. München, Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1993
- [Hau'99] HAUCK, J.: *Entwicklung eines Simulationsprogrammes für den Schlauchfolienextrusionsprozeß*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1999
- [Hen'75] HENSEL, H.: *Die Orientierungsdoppelbrechung - ein Mittel zur Beurteilung der Anisotropie von Kunststoffen*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1975
- [Her'98] HERSCHBACH, C.: Blasfolie oder Gießfolie - ein Vergleich der Produktionsverfahren. In: *Tagungsumdruck Folienextrusion - Materialcharakterisierung, Prozessoptimierung, Qualitätssicherung*. Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen, 1998
- [HH'84] HAW, J. S.; HAN, C. D.: Mathematical modelling of the tubular film blowing process. In: *Proceedings of the 42nd ANTEC*. SPE, New Orleans, 1984, S. 44-48
- [HK'83] HAN, C. D.; KWACK, T. H.: Rheology-Processing-Property Relationships in Tubular Blown Film Extrusion. II. Low-Pressure Low-Density Polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science* 28 (1983), S. 3419-3433
- [HKC'91] HARRIS, W. D.; VAN KERKHOVEN, C. A.; CANTU, L. K.: Effects of bubble cooling on performance and properties of HMW-HDPE film resins. In: *Proceedings of the 49th ANTEC*. SPE, Montreal, 1991, S. 178-182
- [Jan'83] JANESCHITZ-KRIEGL, H.: *Polymer Melt Rheology and Flow Birefringence*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1983

- [Kan'87] KANAI, T.: Theoretical analysis of tubular film extrusion and its applications for HMW-HDPE. *International Polymer Processing* 1 (1987) 3, S. 137-143
- [Kel'89] KELLER, R.: Comparing the Cast Film and Blown Film Process. *Plastics Engineering* (1989) 8, S. 31-34
- [KHV'88] KWACK, T. H.; HAN, C. D.; VICKERS, M. E.: Development of Crystalline Structure during Tubular Film Blowing of Low-Density Polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science* 35 (1988), S. 363-389
- [Kni'96] KNITTEL, R.: A review of the Blown Film Process. In: *Proceedings of the 54th ANTEC*. SPE, Indianapolis, 1996, S. 92-100
- [KRKV'92] KOHLERT, C.; REHER, E. O.; KRASOVSKIJ, A. M.; VOSKRESENSKIJ, A. M.: *Kalandrieren von Polymeren*. Leipzig: Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, 1992
- [KTN'98] KUIJK, E. W.; TAS, P. P.; NEUTEBOOM, P.: A Rheological Model for the Prediction of Polyethylene Blown Film Properties. In: *Proceedings of the 56th ANTEC*. SPE, Atlanta, 1998
- [KTN'99] KUIJK, E. W.; TAS, P. P.; NEUTEBOOM, P.: A Rheological Model for the Prediction of Polyethylene Blown Film Properties. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 18 (1999) 6, S. 508-517
- [LGC+'98] LEGROS, N.; GHANEH-FARD, A.; COLE, K. C.; AJJI, A.; DUMOULIN, M. M.: Tensile Properties and Orientation Evolution with Processing Conditions in Polyethylene Blown Films. In: *Proceedings of the 56th ANTEC*. SPE, Atlanta, 1998
- [Lou'88] LOUNSBURY, D.: Review of Developments in Blown Film Machinery Over the Last Decade. In: *Proceedings of the 46th ANTEC*. SPE, Atlanta, 1988, S. 158-161
- [LP'93] LARENA, A.; PINTO, G.: The effect of surface roughness and crystallinity on the light scattering of polyethylene tubular blown films. *Polymer Engineering and Science* 33 (1993) 12, S. 742-747
- [LPWF'88] LEE, C.; PEAT, I.; WILD, L.; FERNANDO, P.: Correlation Between Orientation and Tear Strengths on Blown LLDPE Films. In: *Proceedings of the 46th ANTEC*. SPE, Atlanta, 1988, S. 183-187
- [LSR'00] LU, J.; SUE, H. J.; RIEKER, T. P.: Morphology and mechanical property relationship in linear low-density polyethylene blown films. *Journal of Materials Science* 35 (2000), S. 5169-5178
- [LT'85] LUO, X. L.; TANNER, R. I.: A computer study of film blowing. *Polymer Engineering and Science* 25 (1985) 10, S. 620-629
- [MD'98] MAHLER, F.; DOBOCZKY, Z.: Flach- oder Blasfolienverfahren. *Plastverarbeiter* 49 (1998) 10, S. 40-48
- [MHMS'02] MENGES, G.; HABERSTROH, E.; MICHAELI, W.; SCHMACHTENBERG, E.: *Werkstoffkunde Kunststoffe*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2002
- [Mic'03] MICHAELI, W.: *Extrusionswerkzeuge*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2003
- [MP'70] MENGES, G.; PREDÖHL, W.: Untersuchungen zum Abkühl- und Verstreckverhalten von Blasfolien. In: *Tagungsumdruck 5. IKV-Kolloquium*. Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen, 1970, S. XV1-XV9
- [MW'71] MÜLLER, J.; WERNER, W.: Herstellen von Schrumpffolien aus Polyäthylen mit Blasfolien-Großanlagen. *Plastverarbeiter* 22 (1971) 7, S. 461-466
- [Nen'00] NENTWIG, J.: *Kunststoff-Folien*. München: Carl Hanser Verlag, 2000

- [Nen'97] NENTWIG, J.: m-Polyolefine eine Klasse für sich. *Papier + Kunststoff-Verarbeiter* (1997) 10, S. 28-35
- [Nen'96] NENTWIG, J.: Etappen der Automation der Blasfolienherstellung. *Papier + Kunststoff-Verarbeiter* (1996) 11, S. 8-14
- [NKA'73] NAKAMURA, K.; KATAYAMA, K.; AMANO, T.: Some Aspects of Nonisothermal Crystallization of Polymers II. Considering of the Isocentric Condition. *Journal of Applied Polymer Science* 17 (1973), S. 1031-1041
- [NN'91] N.N.: Stand der Technik beim Automatisieren - Schlauchfolienextrusion. *Plastverarbeiter* 42 (1991) 9, S. 230-234
- [NN'97] N.N.: Extrusion von Flachfolien. *Kunststoff Information* 27 (1997) 1351
- [NN'98] N.N.: K98: Extrusionstechnik. *Kunststoff Information* 28 (1998) 1413
- [NWKA'72] NAKAMURA, K.; WATANABE, T.; KATAYAMA, K.; AMANO, T.: Some Aspects of Nonisothermal Crystallization of Polymers I. Relationship between Crystallization, Temperature, Crystallinity and Cooling Condition. *Journal of Applied Polymer Science* 16 (1972), S. 1077-1091
- [NWKA'74] NAKAMURA, K.; WATANABE, T.; KATAYAMA, K.; AMANO, T.: Some Aspects of Nonisothermal Crystallization of Polymers III. Crystallization during Melt Spinning. *Journal of Applied Polymer Science* 18 (1974), S. 615-623
- [Oza'71] OZAWA, T.: Kinetics of non-isothermal crystallization. *Polymer* 12 (1971) 1, S. 150-158
- [PB'93] PATEL, R. M.; BUTLER, T. I.: Investigation of Processing-Structure-Properties Relationships in Polyethylene Blown Films. In: *Proceedings of the 51st ANTEC*. SPE, New Orleans, 1993, S. 465-467
- [PBWK'94] PATEL, R. M.; BUTLER, T. I.; WALTON, K. L.; KNIGHT, G. W.: Investigation of Processing-Structure-Properties Relationships in Polyethylene Blown Films. *Polymer Engineering and Science* 34 (1994) 19, S. 1506-1514
- [Ple'90] PLEBKE, P.: Die optimierte Herstellung von Schlauchfolien nach der Fahrweise mit langem Hals. In: *Tagungsumdruck Extrusion von Folien*. BASF, Ludwigshafen, 1990
- [PPD'77] PASCHKE, E.; PLOENES, H.; DANZ, H.: Gezielte Beeinflussung der Eigenschaften von Folien aus hochmolekularem Polyäthylen hoher Dichte. *Kunststoffe* 67 (1977) 7, S. 377-380
- [PW'92] PENDLEY, M. W.; WOBSTER, M. D.: Optimization of HMW HDPE Film Properties Utilizing IBC Systems. In: *Proceedings of the 50th ANTEC*. SPE, Detroit, 1992, S. 1824-1832
- [Ret'91] RETTING, W.: *Mechanik der Kunststoffe*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1991
- [Ret'81] RETTING, W.: Mehrachsige Orientierungszustände und mechanische Eigenschaften hochpolymerer Werkstoffe. *Colloid & Polymer Science* 259 (1981) 1, S. 52-72
- [Ret'75] RETTING, W.: Orientierung, Orientierbarkeit und mechanische Eigenschaften von thermoplastischen Kunststoffen. *Colloid & Polymer Science* 253 (1975) 10, S. 852-874
- [Ret'79a] RETTING, W.: Verstreckte Thermoplasten: Reckung, Orientierung und mechanische Eigenschaften. *Maschinenmarkt* 85 (1979a) 24, S. 415-418
- [Ret'79b] RETTING, W.: Generation and relaxation of the molecular orientation during hot-stretching of amorphous thermoplastics. *Colloid & Polymer Science* 257 (1979b) 7, S. 689-710
- [RL'91] RETTING, W.; LAUN, H. M.: *Kunststoff-Physik*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1991

- [RW'84] RIESEN, R.; WIDMANN, G.: *Thermoanalyse - Anwendung, Begriffe, Methoden*. Heidelberg: Hüthig Verlag, 1984
- [Sac'97] SACHS, L.: *Angewandte Statistik, Anwendung statistischer Methoden*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997
- [Sam'76] SAMUELS, R. J.: The influence of anisotropic phase structure on the properties of crystalline polymers. *Polymer Engineering and Science* 16 (1976) 5, S. 327-333
- [Sam'85] SAMUELS, R. J.: Polymer Structure - The Key to Process-Property Control. *Polymer Engineering and Science* 25 (1985) 14, S. 864-874
- [Sam'74] SAMUELS, R.: *Structured Polymer Properties*. John Wiley & Sons, 1974
- [SC'95] SCHROETER, B.; CASPAR, G.: Querprofilverbesserung bei Schlauchfolien. *Kunststoffe* 85 (1995) 3, S. 359-362
- [SC'98] SWAMINARAYAN, S.; CHARBON, C.: A Multiscale Model for Polymer Crystallization I: Growth of Individual Spherulites. *Polymer Engineering and Science* 38 (1998) 4, S. 634-643
- [Sch'92] SCHMITZ, A.: *Herstellen von Schlauchfolien bei tieferen Temperaturen*, Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Studienarbeit, 1992. - Betreuer: APPEL, O.
- [Sch'63] SCHENKEL, G.: *Kunststoff-Extrudertechnik*. München: Carl Hanser Verlag, 1963
- [Sch'95] SCHMITZ, G.: *Experimentelle Analyse und numerische Modellierung der Deformationsvorgänge bei der Schlauchfolienextrusion*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1995
- [Sch'90] SCHRÖDER, G.: *Technische Optik*. Würzburg: Vogel Buchverlag, 1990
- [SCL+'96] SMITH, P. F.; CHUN, I.; LIU, G.; DIMITRIEVICH, J.; RASBURN, J.: Studies of Optical Haze and Surface Morphology of Blown Films Using Atomic Force Microscopy. *Polymer Engineering and Science* 36 (1996) 16, S. 2129-2134
- [SH'94] SIMPSON, D. M.; HARRISON, I. R.: A Study of the Effects of Processing Parameters on the Morphologies and Tensile Modulus of HDPE Blown Films: Application of Composite Theories on a Molecular Level to Characterize Tensile Modulus. *Journal of Plastic Film & Sheeting* 10 (1994) 10, S. 302-325
- [SK'79] STUART, H. A.; KLAGES, G.: *Kurzes Lehrbuch der Physik*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1979
- [SS'87] SHIRODKAR, P. P.; SCHREGENBERGER, S. D.: Effect of molecular weight of HMW-HDPE blown film extrusion. In: *Proceedings of the 45th ANTEC*. SPE, Los Angeles, 1987, S. 37-40
- [SSW'81] STEHLING, F. C.; SPEED, C. S.; WESTERMANN, L.: Causes of Haze of Low-Density Polyethylene Blown Films. *Macromolecules* 14 (1981) 3, S. 698-708
- [Stu'56] STUART, H. A.: *Die Physik der Hochpolymeren - Band 4: Theorie und molekulare Deutung technologischer Eigenschaften von Hochpolymeren Werkstoffen*. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag, 1956
- [Suk'98] SUKHADIA, A. M.: The Effects of Molecular Structure, Rheology, Morphology and Orientation on Polyethylene Blown Film Properties. In: *Proceedings of the 56th ANTEC*. SPE, Atlanta, 1998, S. 160-168

- [SW'70] SCHÖNEFELD, G.; WINTERGERST, S.: Beeinflussung von Struktur und Festigkeit von Polypropylen durch Wärmebehandlung. *Kunststoffe* 60 (1970) 3, S. 177-184
- [Tas'94] TAS, P. P.: *Film blowing, from polymer to product*, TU Eindhoven, Dissertation, 1994
- [Vri'83] DE VRIES, A. J.: Structure-Properties Relationships in Biaxially Oriented Polypropylene Films. *Polymer Engineering and Science* 23 (1983) 5, S. 241-246
- [Vri'81] DE VRIES, A. J.: Structure and Properties of uni- and biaxially oriented Polypropylene Films: Part 1 - Structural Characterization. *Pure & Applied Chemistry* 53 (1981) 1, S. 1011-1037
- [Vri'82] DE VRIES, A. J.: Structure and Properties of uni- and biaxially oriented Polypropylene Films: Part 2: Mechanical and other end-use Properties. *Pure & Applied Chemistry* 54 (1982) 3, S. 647-670
- [Wah'69] WAHLSTROM, E. E.: *Optical Crystallography*. New York, London, Sidney, Toronto: John Wiley and Sons, 1969
- [Wal'96] WALTERS, G.: *Entwicklung und Erprobung eines Meßsystems zur Untersuchung der Kühlluftströmung bei der Blasfolienextrusion mit anschließender Bestimmung des Einflusses verschiedener Blasengeometrien auf die Strömungsverhältnisse*, Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Diplomarbeit, 1996. - Betreuer: HAUCK, J.
- [Wal'76] WALES, J. L. S.: *The application of flow birefringence to rheological studies of polymer melts*. Delft University Press, 1976
- [Wil'70] WILKES, G. L.: The Measurement of Molecular Orientation in Polymeric Solids. *Advances in Polymer Science* 8 (1970), S. 91-136
- [Wir'91] WIRTZ, R.: Coextrudierte Flachfolien und Tafeln - Halbzeuge mit Zukunftsperspektiven. In: *Tagungsumdruck Coextrusion - Technik der Zukunft*. SKZ, Würzburg, 1991, S. 51-74
- [Wol'61] WOLF, H.: *Spannungsoptik*. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag, 1961
- [Wor'88] WORTBERG, J.: Entwicklungen bei der Blasfolienextrusion. *Kunststoffe* 78 (1988) 10, S. 952-956
- [YKT'81] YAMADA, K.; KAMEZAWA, M.; TAKAYANAGI, M.: Relationship between Orientation of amorphous chains and modulus in highly oriented Polypropylene. *Journal of applied Polymer Science* 26 (1981), S. 49-60
- [YW'87] YAMANE, H.; WHITE, J. L.: Simulation of tubular film extrusion of polymer melts. *International Polymer Processing* 2 (1987) 2, S. 107-112

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Friedrich Ohlendorf
Geburtsdatum: 22. März 1971
Geburtsort: Hildesheim
Familienstand: verheiratet, 2 Kinder

Schulausbildung:

1977 - 1981 Grundschule Ochtersum, Hildesheim
1981 - 1983 St. Augustinus Schule, Hildesheim
1983 - 1990 Bischöfliches Gymnasium Josephinum, Hildesheim
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Wehrdienst:

1990 - 1991 Sanitätsdienst, Hildesheim

Hochschulstudium:

1991 - 1998 Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen
Studiengang: Maschinenbau
Studienrichtung: Kunststofftechnik
Abschluss: Diplom

Berufserfahrung:

1998 - 2003 Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
seit August 2003 Kuhne GmbH, Sankt Augustin
Technischer Leiter Blasfolienextrusion

Königswinter, im März 2004