

Entwicklung eines Inline-Messverfahrens zur Bestimmung und Nutzung prozessrelevanter Materialeigenschaften an Kalandieranlagen

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Genehmigt durch das

Zentrum für Ingenieurwissenschaften
als organisatorische Grundeinheit für Forschung und Lehre im Range einer Fakultät
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von

Herrn Dipl.-Ing. Andreas Schnabel

geboren am 09. November 1970 in Altenburg / Thüringen

Geschäftsführender Direktor (Dekan): Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. H. Altenbach

Gutachter:

1. Professor Dr.-Ing. habil. Hans-Joachim Radusch
2. Professor Dr.-Ing. habil. Volker Schöppner

Halle, den 21.09.2010

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Phänomenologische und modellmäßige Beschreibung des Kalandrierprozesses ..	4
2.1. Kalandrieren von PVC-U	4
2.1.1. Rohstoffe	6
2.1.2. Kalandrieren	7
2.2. Stand der Modellierung des Kalandrierprozesses	13
2.2.1. Experimentelle Untersuchungen	14
2.2.2. Verwendete Materialien und rheologische Untersuchungen	16
2.3. Ermittlung von Prozessviskositäten	20
2.4. Schlussfolgerungen und Präzisierung der Aufgabenstellung	24
3. Experimentelle Basis zur Inline-Viskositätsmessung	30
3.1. Aufbau des Versuchsstandes	30
3.2. Leerlaufdaten des Versuchsstandes	34
4. Modellierung und Simulation des Deformations- und Schneidprozesses	35
4.1. Annahmen für das Prozessmodell	35
4.2. Transportgleichungen	35
4.3. Rheologische Fließgesetze	35
4.3.1. Newtonsche Fluide	35
4.3.2. Nichtlineare viskose Fluide	37
4.4. Entwicklung der Prozessmodelle	39
4.4.1. Prozessmodell: Schneiden der Wendel	39
4.4.2. Prozessmodell: Schneiden und Scherung an der Wendel	44
4.4.3. Prozessmodell: Schneiden, Scherung und Strömung an der Wendel	45
4.5. Simulationsrechnungen mit den Prozessmodellen	47
4.5.1. Simulationsparameter	48
4.5.2. Simulation: Schneiden der Wendel	48
4.5.2.1. Schneiden eines Rechteckprofiles	48
4.5.2.2. Schneiden eines Dreieckprofiles	49
4.5.3. Simulation: Schneiden und Scherung an der Wendel	51
4.5.4. Simulation: Schneiden, Scherung und Strömung an der Wendel	53
4.4.5. Einfluss der Form der Schneidwendel	55
4.5. Vergleich der Prozessmodelle	57
5. Inline-Viskositätsmessung	59
5.1. Viskositätsmessung	59
5.1.1. Rheometerarten	60
5.1.2. Viskositätsmessungen an kalandrierten Folien	63
5.1.2.1. Verwendete Materialien	66
5.1.2.2. Vorbereitung und Durchführung der Messung	66
5.1.3. Fließkurven der untersuchten Proben	68
5.1.4. COX-MERZ-Regel	71
5.1.5. Ermittlung der Parameter der rheologischen Modelle	73
5.1.6. Ergebnisse	74
5.1.7. Ermittlung der temperaturbezogenen Anpassung an das Potenzgesetz	76

5.1.7.1. Datenanalyse mittels TA Instruments Datenprogramm	76
5.1.7.2. Schätzung von Koeffizienten einer Temperaturfunktion.....	76
5.1.8. Darstellung der Parameter für temperaturabhängige Masterkurven	77
5.1.9. Korrektur der ermittelten Materialfunktionen	78
5.1.9.1. Korrektur nach Weißenberg/Rabinowitsch	78
5.1.9.2. COX-MERZ-Regel	79
5.1.9.3. Gesamtkorrektur	81
5.1.10. Zusammenfassende Bewertung	81
5.2. Versuche im Technikumsmaßstab	82
5.2.1. Prozessparameter einer Kalandieranlage	82
5.2.2. Aufbau der Versuchsanordnung	83
5.2.3. Vorversuche.....	84
5.2.4. Versuchsergebnisse mit PVC-U	86
5.2.5. Messungen an PVC-P.....	89
5.2.6. Reproduzierbarkeitsmessungen	90
5.2.7. Bewertung der Messungen	92
5.3. Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den Modellvorhersagen.....	93
5.3.1. Bewertungsparameter	93
5.3.2. Analyse der Schergeschwindigkeit.....	95
5.3.3. Überprüfung der verwendeten Modelle	98
5.3.3.1. Prozessmodell Schneiden, Scherung und Strömung	99
5.3.3.2. Analogiemodell nach der Methodik ‚MSM‘	103
5.3.4. Anwendung der Drehmomentmessung mittels Schneidwalzen	108
5.3.4.1. Inline-Bestimmung der Viskosität.....	108
5.3.4.2. Nutzung der Arbeitsdiagramme	110
5.3.4.3. Bewertung der Modelle	111
6. Zusammenfassung und Ausblick.....	113
7. Abkürzungen und Formelzeichen.....	116
7.1. Lateinische Buchstaben	116
7.2. Griechische Buchstaben.....	117
8. Literaturverzeichnis.....	118
9. Anhang	A1
A1. Verfahrenseinflüsse.....	A1
A2. Rohstoffe.....	A9
A3. Rheologische Untersuchungen zum Kalandrieren	A16
A4. Variablendefinition	A20

1. Einleitung

Das Kalandrieren ist ein großtechnisches Verfahren zur Herstellung von Polymerfolien. Die im Weiteren näher betrachteten Anlagen zur PVC-Folienherstellung sind im Allgemeinen 4-Walzen-L-Kalander. Ihre grundlegende Ausstattung besteht aus einer Misch- und Dosieranlage zur Herstellung homogener Pulvermischungen, Gelieraggregaten zum Plastifizieren des Pulvers und dem Kalander mit Kalander-, Abzugs- und Temperwalzen. Daran angeschlossen sind die Konfektionierung und Aufwicklung der Folienbahn. Alle Anlagenteile verfügen über Sensoren oder Messeinrichtungen zur Aufnahme aktueller Maschinen- oder Materialdaten. Das beinhaltet Temperaturen, Geschwindigkeiten oder Kräfte der bewegten Teile an prozessrelevanten Positionen. Diese Messdaten beschreiben ausreichend genau die Verfahrenseinstellungen bei bekannter Produktqualität und werden zentral am Anlagenpult erfasst und verwaltet. Neben diesen Maschinendaten wird auch die Materialqualität der kalandrierten Folienbahn durch Messsysteme ermittelt und bewertet. In-situ Messungen wie die Bestimmung des Flächengewichtes (Filmdicke) oder der Molekülorientierung sowie die Detektion von Oberflächendefekten wurden in den letzten Jahren entwickelt und eingeführt. Aktuell werden Strategien erarbeitet und umgesetzt, welche im Produktionsprozess ermittelte Materialdaten mit zugehörigen Maschinendaten verknüpfen und visualisieren sollen. Alle weiteren erforderlichen Qualitätsmerkmale der PVC-U-Folie werden nach erfolgter Produktion an Folienmustern geprüft. Dieser zeitliche Versatz führt bei Qualitätsabweichungen zu größeren Produktmengen außerhalb festgelegter Spezifikationen und es steigt das Risiko einer Kundenreklamation. Die Folienqualität mit ihren geforderten Eigenschaften verbunden mit einer guten Homogenisierung und Gelierung des PVC-U entsteht maßgeblich innerhalb der Kalander- und Abzugswalzen. An diesen Positionen sind Maschinendaten verfügbar. Ihre Änderung wirkt direkt auf die Produkteigenschaft der Folie und über sie ist der Verarbeitungsprozess am Kalander interpretierbar.

Materialeigenschaften an diesen Prozessgliedern wie beispielsweise die Materialviskosität, einer für die Produktqualität entscheidenden Größe, sollen im Verarbeitungsprozess am Kalander ermittelt werden. Anwendungen an Kalanderanlagen sind derzeit nicht bekannt. Viskositätsänderungen führen zu Prozessstörungen oder Qualitätseinbußen der Folien wie ihren optischen Eigenschaften oder ihrem Verhalten bei der Nachverarbeitung. Beispielhaft hierfür sind sichtbare Fließinhomogenitäten, Materialtrübung, Lufteinschlüsse und die thermische Schädigung einer Folie. Daraus ergibt sich die Forderung nach der Entwicklung einer Messeinrichtung, welche materialspezifische Eigenschaften reproduzierbar direkt im Herstellungsprozess erfassen kann. Diese soll als Regelgröße bei Material- oder Geschwindigkeitsänderungen dienen und Anlagendaten mit Materialdaten verbinden. In wenigen Fällen ist dies an Versuchsanlagen umgesetzt worden. Dabei werden entstehende Drehmomente von Walzen oder Kräfte von anliegenden Keilen mit einer Prozess- oder Materialviskosität korreliert.

Eine Umsetzung an Produktionsanlagen ist bisher nicht bekannt. Gründe hierfür sind:

- nur punktuell arbeitende und somit für einen Produktionsprozess nicht repräsentative Messaufnehmer,
- unempfindliche Drehmomentmessungen an Kalandervalzen,
- fehlende Prozessdatenerfassung zur Verfahrensoptimierung,
- niedrigere Geschwindigkeiten an Versuchsanlagen,
- unbekannte Übertragungsfaktoren zu Produktionsmaschinen,
- ungünstige Produktionsbedingungen wie Temperatur, Schwingungen, Lärm oder Verschmutzungen.

Ein wissenschaftliches Ziel dieser Arbeit liegt in der experimentell-technischen Realisierung einer Messeinrichtung zur Bestimmung der Materialviskosität. Die Erfassung der Materialviskosität soll über an einer Kalandervorrichtung befindliche bereits installierte Hilfswalzen realisiert werden. Dazu werden geeignete Messglieder und prozessrelevante Positionen für deren Einsatz vorgesehen. Es ergeben sich Messpositionen z.B. direkt an den Kalandervalzen 2 bis 4. Hier befinden sich Aufreiß- bzw. Schneidwalzen, welche auf der Folienbahn aufliegen und diese an- bzw. durchschneiden. Mit Hilfe dieser Zusatzeinrichtungen sollen Drehmomente erfasst und deren Änderung bei schwankenden Materialzuständen einem Kennwert zugeordnet werden.

Ein weiteres Ziel ist die Modellierung des Prozesses und die Simulation mit dem Prozessmodell der Schneidwalze / Kalandervorrichtung. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Schneidwalze einer Hilfswalze in folgenden Fällen mit der Folie, die mit der Kalandervorrichtung rotiert, in Wechselwirkung tritt:

- I. die Schneidwalze einer Hilfswalze wird durch den Kontakt frei mitrotieren, die Walze der Schneidwalze schneidet in die Folie. Es treten Schneidkräfte auf, vor allem Normalkräfte und nur geringe Scherkräfte, die einen Schlupf hervorrufen.
- II. Die Schneidwalze befindet sich auf einer angetriebenen oder abgebremsten Hilfswalze. Im Kontakt mit der Folie / Kalandervorrichtung tritt Friktion auf. Der Schlupf wird eingestellt:
 1. die Hilfswalze rotiert so schnell, dass die Tangentialgeschwindigkeit u_2 bzw. u_f größer als die Kalandervorrichtungsgeschwindigkeit u_1 ist,
 2. die Hilfswalze rotiert langsamer, so dass die Tangentialgeschwindigkeit u_2 bzw. u_f kleiner als u_1 ist,
 3. die Hilfswalze rotiert so, dass die Bedingung $u_1 = u_f$ bzw. annähernd gleich u_2 ist und kein Schlupf auftritt.

Mit dem gewählten Versuchsaufbau und seiner Anwendung lassen sich diese Fälle (Wirkpaarungen) realisieren. Für die Modellierung der Wirkpaarung Schneidwalze - Folie auf Walze wird davon ausgegangen, dass die Walze in die fließfähige Folie einschneidet. Dabei wird ein Teil verdrängt und bildet nach der Schlupfbedingung entweder vor oder hinter der Walze einen Wulst bzw. den als ‚Auflaufen‘ bezeichneten Strömungsprozess. Für den Schneidprozess müssen die auftretenden Normalkräfte an der Stirnfläche der Walze und die

Scherkräfte an den Flanken der Wendel bestimmt und beurteilt werden. Zusätzlich entstehen durch den oben angegebenen Prozess des Auflaufens der Folie Druckbedingungen, die zu einer Strömung zwischen Wendel und Kalandervalze führen. Bei der Aufstellung von Prozessmodellen werden diese Vorstellungen genutzt.

Bei der Entwicklung des vereinfachten Modells in Anlehnung an die Methoden der klassischen Rheometrie wird sich auf die Methodik gestützt, die bei der Entwicklung von Modellen zur Bestimmung der Rührerleistung angewendet werden. Dort ist der prozessbestimmende Vorgang die Scherung des Fluids am Rührerradius. Die Flüssigkeitsverdrängung ist dabei ein komplizierter Strömungsvorgang und wird in vielen Fällen vernachlässigt oder durch Vereinfachungen im Scherprozess mit berücksichtigt. Im vorliegenden Fall wird das Modell der Wirkpaarung so aufgestellt, dass die Näherung der eindimensionalen Scherströmung durch den Kontakt der Schneidwendel mit der Folie und der Kalandervalze erreicht wird, bei dem die modifizierten Scherflächen der Wendel bewertet werden. Damit werden die Strömungsverhältnisse im Kontaktgebiet der Schneidwendel als Viskosimeterströmung approximiert. Reher, Kärmer, Schnabel /1/ definierten mit einer vergleichbaren Methodik prozessbestimmende Viskositäten, z.B. am Rührprozess. Als Voraussetzung für den Einsatz an einer Produktionsanlage werden an einem Walzwerk und einem äquivalenten Versuchskalander verkleinerte Schneidwalzen, verbunden mit einer Drehmomentmessung, installiert.

Über die in dieser Arbeit beschriebene Vorgehensweise zur Nutzung anlagenseitig vorhandener Hilfssysteme, der Entwicklung eines Übertragungsmodells zu diesen und der somit möglichen kontinuierlichen Messung der Materialviskosität soll ein wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Beitrag zur Ausstoßerhöhung und der damit verbundenen Prozessoptimierung erfolgen. Die bei Standardprodukten langfristig steigenden Rohstoffpreise und sich somit verringern Gewinnmargen erfordern höhere Produktionsgeschwindigkeiten und optimierte Prozesse und Abläufe. Neben der fortgeschrittenen produktionsintegrierten Prozessüberwachung zur verbesserten Qualität der Folien gegenüber anderen Mitbewerbern ergeben sich weitere Forderungen an Produktion und Technologien einer Firma, wie

- die frühzeitige Reaktion auf Produktionsstörungen oder Qualitätsabweichungen mit direkten Gegenmaßnahmen,
- schnelle und optimierte Produktionsumstellungen (geringe Materialmengen außerhalb der Qualitätsanforderung liegend),
- einer Verringerung anfallenden Rücklaufmaterials (schmale Randstreifen, eng gekennzeichnete ‚schlechte‘ Abschnitte),
- dem Aufbau effizienter und kostengünstiger Rezepturen,
- dem Einsatz von Alternativrohstoffen und anderen Verarbeitungshilfsmitteln,
- der Dokumentation aller Änderungen und Versuche für interne Kostenvergleiche.

Die Inline-Viskositätsmessung soll dafür einen eigenständigen, neuen und zusätzlichen Beitrag zur Umsetzung dieser Forderungen leisten.

2. Phänomenologische und modellmäßige Beschreibung des Kalandrierprozesses

2.1. Kalandrieren von PVC-U

Das in Produktionskapazität und Verbrauch an dritter Stelle stehende Polymer ist Polyvinylchlorid (PVC) mit prognostizierten 38 Mio. Tonnen für 2010 weltweit. Es reiht sich nach Polyethylen (83 Mio. t/a) gemeinsam mit Polypropylen (52 Mio. t/a) bei den meist verwendeten Standardkunststoffen ein /2/. Die seit ca. 60 Jahren stetig steigenden Verbräuche von rund 10000 t/a auf fast 40 Mio. t/a zeigen die anhaltende großtechnische Bedeutung von PVC /3-5/. Aufgrund seiner Verträglichkeit mit einer Reihe von Hilfsstoffen hat PVC ein sehr breites Produktspektrum, welches sich in den letzten Jahrzehnten kaum gewandelt hat. Die Anwendungen reichen von Fensterprofilen über Folien bis zu Pasten und Beschichtungen /6/. In Deutschland und Europa wird etwa doppelt soviel PVC-U wie PVC-P verarbeitet. Der Anteil von PVC-U-Folien beträgt circa 15% des Gesamtverbrauchs an PVC /7/. Mit rund 70% stehen Verpackungsfolien im Gesamtfolienverbrauch an erster Stelle. Weitere wichtige Anwendungen liegen bei technischen Folien und Druckfolien. 20% des PVC-U werden durch Kalandrieren zu Folien verarbeitet. Dabei decken sie die wichtigsten Marktsegmente bei Verpackungen und technischen Anwendungen ab.

Vinylchlorid wurde erstmals 1835 von Regnault gewonnen. Die erste großtechnische Produktion startete 1938 bei der IG Farbenindustrie und etwa zeitgleich bei Union Carbide und Du Pont in den USA. Heute erfolgt die Gewinnung überwiegend durch ein- oder zweistufige Anlagerungen von Chlor an Ethylen. Polyvinylchlorid, mit einem Chloranteil von 56% das erdölärmste Polymer, wird großtechnisch nach drei Verfahren hergestellt. Diese sind:

- Emulsionspolymerisation (E-PVC) – für Pasten und Folienanwendungen,
- Suspensionspolymerisation (S-PVC) – alle Anwendungen, Haupt-Typ,
- Massepolymerisation (M-PVC) – hauptsächlich für PVC-U-Anwendungen.

Der Einsatz dieser PVC-Sorten richtet sich nach den Anforderungen der Weiterverarbeitung und ihren Einkaufspreisen. S- und M-PVC sind vielseitig einsetzbar und untereinander austauschbar /7/.

Weiter unterscheidet man nach /8/ in PVC-U (Hart-PVC) und PVC-P (Weich-PVC), wobei das „U“ für unplasticized und das „P“ für plasticized stehen. Für PVC-U sind die folgenden Eigenschaften charakteristisch (Abb. 2-1, 2-2):

- hohe mechanische Festigkeit, Steifigkeit und Härte,
- Schlagempfindlichkeit bei Kälte in unmodifizierter Form,
- durchscheinend bis transparent,
- gute elektrische Eigenschaften im Niederspannungs- und Niederfrequenzbereich,
- hohe Beständigkeit gegen den Angriff durch Chemikalien,
- selbstverlöschend nach Entfernung der Zündquelle.

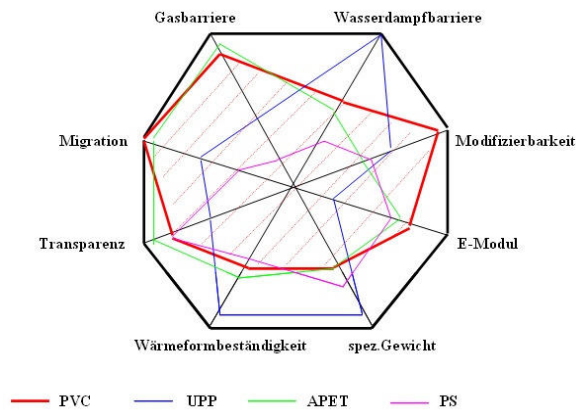


Abb. 2-1: Vergleich Stoffeigenschaften

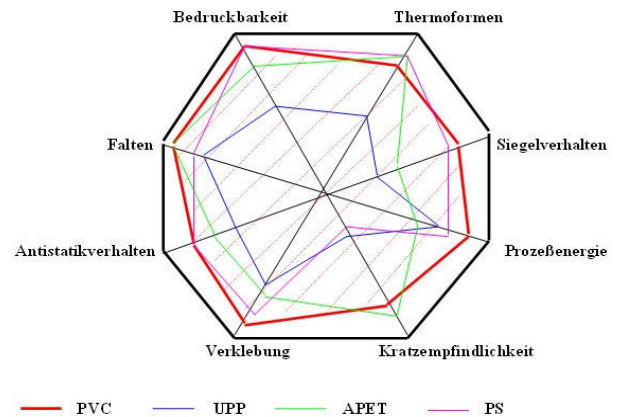


Abb. 2-2: Vergleich Verarbeitungseigenschaften

Dieses Eigenschaftsbild /4/ entsteht weniger durch das Herstellungsverfahren des PVC, sondern durch die zugeführten Additive /6/. Diese sind z. B. Stabilisatoren, Gleitmittel, Pigmente, Füllstoffe oder Antistatika. (Anhang Seiten A9 – A15)

Eine Bewertung der Entwicklung von Mengen und Kosten der letzten Jahre zeigt die Marktentwicklung von PVC abhängig von vier wesentlichen Einflussgrößen: Wirtschaftsrezessionen, Einführung der Verpackungsverordnungen, Anti-PVC-Kampagnen und verbesserte Substitutionsfolien /4, 9, 10/.

Als konkurrierende großtechnisch hergestellte Polymere sind in den letzten zehn Jahren Modifikationen von Polypropylen, Polyester oder Polystyrol entwickelt worden. Sie verfügen teilweise über ein besseres Preis-Leistungs-Verhältnis, höhere Qualitätseigenschaften (Barrierewirkung, Transparenz des Endproduktes, Temperaturbeständigkeit) oder möglicherweise günstigere ökologische Eigenschaften.

Entgegen den Voraussagen einer großflächigen Verdrängung des PVC durch die genannten Substitutionspolymeren ist in den letzten Jahren, speziell auf dem Verpackungsmarkt und im Bereich technischer Produkte, eher eine stagnierende Marktaufteilung zu verzeichnen /11/. Gründe hierfür sind die immer noch preisgünstigere Herstellung und Modifikation des PVC sowie die in einem breiten Spektrum liegende gute Verarbeitbarkeit der Halbzeuge und Endprodukte /4/.

Zusammenfassend kann für den gesamten Rohstoffmarkt, PVC und seine konkurrierenden Polymere, folgendes festgestellt werden /12/:

- Monomer- und Polymerpreise schwanken zyklisch, die Zykluszeiten werden kürzer.
- Die Bandbreite der Preisschwankungen wird geringer, aber die „Elastizität“ der Preise nimmt zu.
- Langfristig steigt der nominale Durchschnittspreis und der Kostendruck auf die Produzenten wird erhöht.

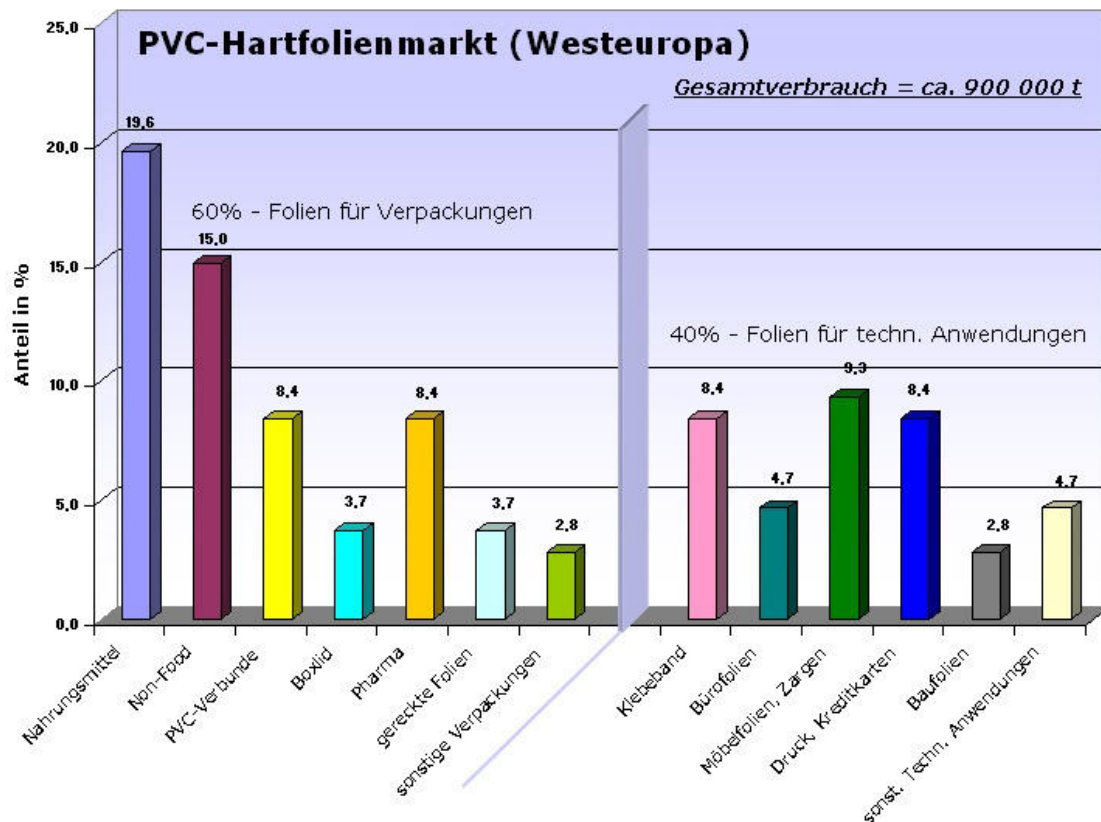


Abb. 2-3: PVC-U-Folienmarkt Westeuropa (2007)

Aus heutiger Sicht wird eine allgemeine Marktkonsolidierung mit Fusionen und Allianzen der Hersteller erreicht. Neben den steigenden Preisen der Basisrohstoffe erhöht sich der Wertanteil der Additive und Farben. Für PVC entstehen Nachteile, da die Eigenschaftsgestaltung der Endprodukte über diese Zusatzstoffe bestimmt wird.

Damit ergibt sich die Forderung nach einer Materialeinsparung an Additiven und Zusatzstoffen, die den in dieser Arbeit betrachteten Kalandrierprozess von PVC-U-Folien nachhaltig beeinflussen (PVC-U-Folien: Hauptanwendungen in Abb. 2-3).

2.1.1. Rohstoffe

Polymerisationsverfahren beeinflussen das äußere Eigenschaftsbild des PVC, nachhaltig wirkt sich auch der chemische Einfluss eingesetzter Zusatzstoffe aus.

PVC ist im Wesentlichen von amorpher Struktur. Die Kristallinität beträgt etwa 5%. Die Makromoleküle sind ataktisch aufgebaut mit kurzen syndiotaktischen Segmenten. Damit unterscheiden sich die eingesetzten PVC-Typen durch ihre molare Masse, deren Verteilung sowie äußerlich gesehen durch ihre Teilchengröße und -form, ihre Kornstruktur (glatt oder porös) und deren Korngrößenverteilung. Die darauf basierenden Kennzahlen werden nach DIN bestimmt und geben Aufschluss über das Verarbeitungsverhalten und die resultierenden Gebrauchseigenschaften /3, 6, 13-18/.

Den beispielhaften Aufbau einer PVC-U-Folien - Rezeptur zeigt Abbildung 2-4:

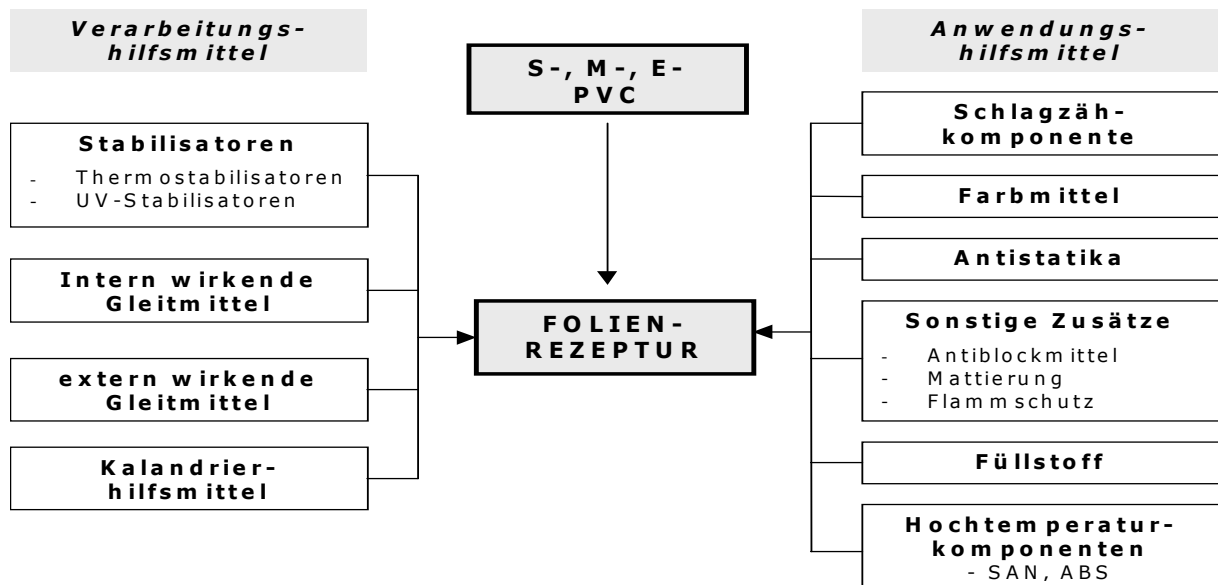


Abb. 2-4: Rezepturbestandteile einer PVC-U-Folie /4/

Für einen Kalandrier optimierte Rezepturen lassen sich selten direkt auf andere Kalandrieranlagen übertragen. Wegen unterschiedlicher Verfahrensparameter wie unterschiedlichen Bauformen der Gelieraggregate, dem Einzugs- und Aufschmelzverhalten im Gelieraggregat und den Verweilzeiten (Walzenanzahl, Umschlingungswinkel der Kalandrier) des Materials sind kalandrierabhängige Rezepturänderungen notwendig.

Von den im Anhang Seite A9 bis A15 speziell betrachteten Zuschlagstoffen müssen der Stabilisator und mehrere Gleitmittel zur Herstellung einer PVC-Folie am Kalandrier immer zugegeben werden, andere Stoffe wie Modifizier, Antistatika sowie Füllstoffe oder Pigmente dienen je nach Anwendung der Einstellung kundenspezifischer Folieneigenschaften.

2.1.2. Kalandrieren

Die Herstellung von Folien nimmt einen festen Platz in der Verarbeitung von Polymeren ein. Folien sind universell einsetzbar, als Halbzeuge oder Endprodukte erfüllen sie aufgrund ihrer breiten Modifikationsmöglichkeiten viele Voraussetzungen in verschiedenen Industriezweigen. Für die Erzeugung von Kunststoffbahnen wurden mehrere voneinander abweichende Verfahrenstechniken entwickelt. Diese gestatten es, für umfangreiche Anwendungszwecke auf wirtschaftliche Weise geeignete Folienbahnen herzustellen.

Bekannt sind der Extrusionsprozess mit Breitschlitzausformung oder Blasausformung, das Streichverfahren, das Gießverfahren und das Kalandrieren /19, 20, 21/.

Unter Kalandrieren versteht man das Ausformen bei der Verarbeitungstemperatur hochviskoser Mischungszubereitungen im Spalt zwischen zwei oder mehreren Walzen zu einer endlosen Bahn. Somit ist das Kalandrieren ein Verformungsvorgang zum Urformen unter hohem Druck.

Durch die Einstellung einer entsprechenden Spaltweite wird die Dicke der Folie oder Platte vorgegeben. Aus Spaltgeometrie und rheologischen Eigenschaften der zu kalandrierenden Masse ergibt sich der resultierende Spaltdruck. Ein Kalandrierer dient somit als Verarbeitungsmaschine der reinen Formgebung /23, 24, 25, 33/.

Die ersten kalandrierähnlichen Maschinen wurden zum Glätten von Textiloberflächen konstruiert. Aus dem Jahr 1836 stammen die ersten Patente für Kalandrierer zum Gummieren sowie zum Aufbringen von Kautschuk auf Gewebestoffen. Die Forderung nach höheren Produktionsgeschwindigkeiten und engeren Toleranzen führte zu einer Weiterentwicklung der Kalandrierer in ihrer Anwendungsbreite für die Verarbeitung von PVC-U und PVC-P neben der des Kautschuks.

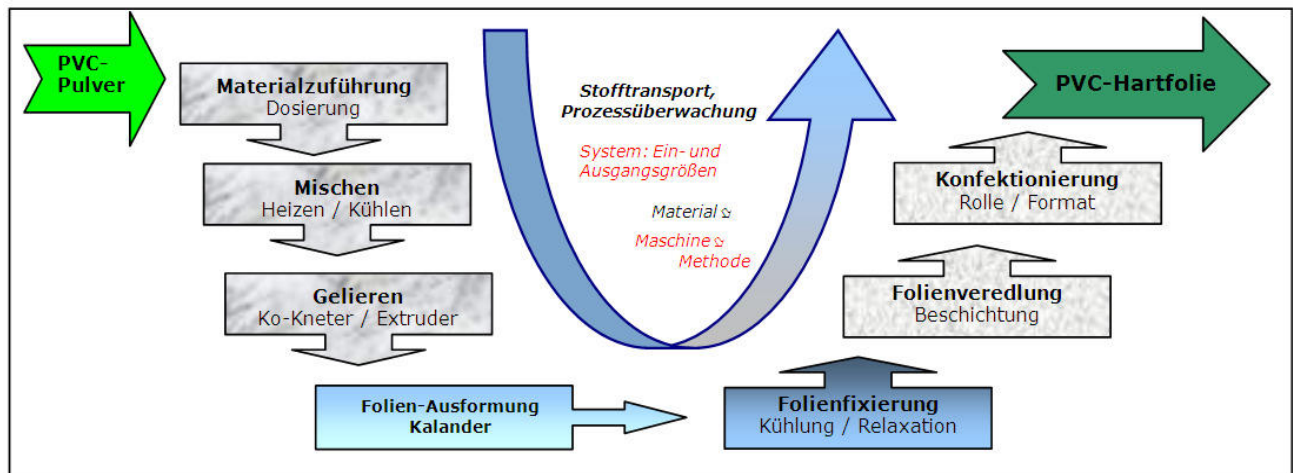
Aus dem Jahr 1798 sind erste Literaturhinweise auf einen mit Pferdekraft betriebenen Textilkalander aus Holz bekannt. Der erste Kalandrierer für die PVC-U-Verarbeitung, der bis auf Temperaturen von 220°C beheizbar war, wurde 1937 von der IG Farbenindustrie AG, Werk Bitterfeld, bei der Hermann Berstorff GmbH in Hannover in Auftrag gegeben /26, 33/. Mit der Herstellung von hochwirksamen Stabilisatoren konnte ab 1960 neben dem bislang genutzten Niedrigtemperaturverfahren (NT) das Hochtemperaturverfahren (HT) mit höherem Temperaturniveau innerhalb des Kalandrierers und modifizierten Rezepturen eingeleitet werden.

Ein umfassender geschichtlicher Abriss über die Entstehung und Weiterentwicklung der Kalandrierer wird in /26/ gegeben. Der technische Aufbau und die Einsatzformen sind in den letzten Jahrzehnten nahezu gleich geblieben. Die wirtschaftlichsten Variationen sind die Erhöhung der Walzenbreite der Kalandrieranlagen zur Steigerung der Produktivität oder eine Spezialisierung der Folienproduktion.

Für die Herstellung von PVC-U-Folien haben sich das HT-Verfahren und 4- oder 5-Walzen-Kalandrierer in Breiten von 1800 bis 3000 mm etabliert. Das NT-Verfahren, ältestes Verfahren zur Herstellung von PVC-Folien, wird nur noch vereinzelt zur Herstellung von Spezialfolien angewendet. Produziert werden heute noch dünne, gereckte Folien (bspw. Klebstreifen oder Folien mit einer Dicke unter 40 µm) aus E-PVC mit K-Werten um 78 und höheren mechanischen Ansprüchen. Die Vorteile des HT-Verfahrens liegen in der breiteren Modifizierbarkeit der Folieneigenschaften und der leistungsfähigen Herstellung auf deutlich breiteren Anlagen. Verwendet werden meist S- und M-PVC mit K-Werten um 57-63, die es erlauben, Folien in höherer Transparenz, guter Tiefziehfähigkeit und deutlich höherer Dicke zu produzieren /27/.

Eine Kalandrieranlage wird als verarbeitungstechnisches System mit hierarchisch gegliederten Elementen betrachtet. Damit besteht die Funktion dieses Systems in der Realisierung einer Folge von stoffformenden und form- oder lageabhängigen Prozessen wie dem Mischen, Gelieren, Walzen und Fixieren der Materialbahn. Verbunden werden die Elemente durch eine Struktur der zwischen den Elementen existierenden Stoff- und Energieströme. Im Falle einer Kalandrierlinie entspricht diese Struktur einer Reihenschaltung. Deren Aufbau mit maschinellen, verfahrenstechnischen und stofflichen Unterschieden und Zusammenhängen sowie der

Betrachtung als thermodynamisches Verbundsystem wird umfassend in /22, 23, 27, 28, 33/ beschrieben. In der Literatur finden sich weiterhin gleichlautende Aussagen, wonach ein Kalandrier in 6 bis 9 Prozessstufen oder Einzelsysteme gegliedert werden kann, welche im Gesamtprozess voneinander nicht isoliert betrachtet werden.



Grundsätzliche Unterschiede der Modellannahmen liegen in der Beschreibung entweder der örtlichen maschinellen Bezeichnung wie Mischer, Extruder, Walzwerk /28/ oder der Erläuterung des verfahrenstechnischen Ablaufs wie Mischen, Gelieren und Kalandrieren /23, 27, 29/.

Die bauliche Gestaltung einer Kalandrieranlage muss in Abhängigkeit von der produzierten Folie betrachtet werden. Grundsätzlich werden Kalandrier für PVC-P- und PVC-U-Folien sowie für Kautschuk oder für Beschichtungen/Dublieren unterschieden. Für eine Übersicht zum Stand der Entwicklung sollen hier beispielhaft die Ausführungen in /24-31, 33/ genannt werden. Für die Herstellung von PVC-U-Folien werden vorrangig Vier- und Fünf-Walzen-Kalandrier in L-Form eingesetzt. Der L-Kalandrier besitzt den Vorteil eines niedrigen Beschickungspaltes und seiner Übersichtlichkeit für die Bediener. Auch ergibt sich an der zweiten Walze die größte Kontaktfläche zwischen Materialbahn und Walze, so dass PVC-U, welches in diesem Bereich noch Heizenergie zur vollständigen Plastifizierung benötigt, am günstigsten produzierbar ist /31, 33/. Als schematischer Überblick soll Abbildung 2-5 dienen.

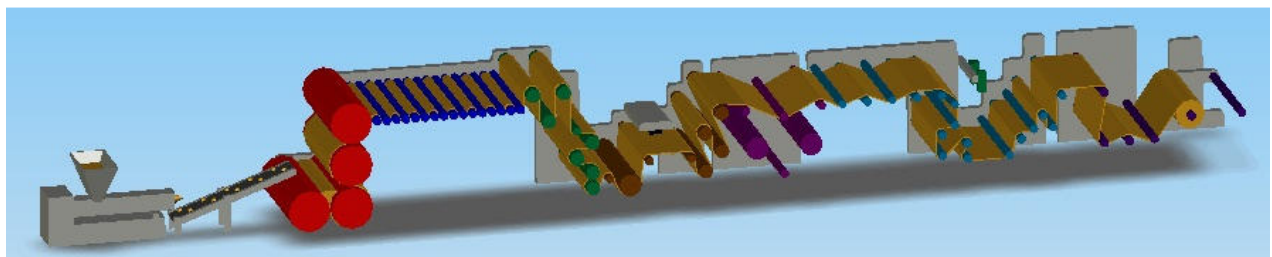


Abb. 2-5: Aufbau einer Vier-Walzen-L-Kalandrieranlage

Im Folgenden werden die Teilprozesse eines Vier-Walzen-L-Kalandriers ohne Zwischenwalzwerk beschrieben, der zur Herstellung von PVC-U-Folien eingesetzt wird. Die Rezepturbestandteile werden einzeln den Mischstationen zugeführt und gemischt.

Das Mischen ist ein diskontinuierlicher Vorgang. Es dient dem homogenen Verbinden der Rezepturbestandteile durch intensives Umlenken und Scheren der Rohstoffe. Das Auswiegen der Chargen und das Heiß- und Kaltmischen laufen parallel ab /29, 32/. Das Mischen von Rezepturkomponenten erfolgt in bevorzugten schnell- oder langsamlaufenden Mischern. Schnellmischer bringen die erforderliche Wärme mechanisch mit Hilfe des Mischwerkzeugs ein. Die Rezepturbestandteile werden über gesteuerte und festgelegte Reihenfolgen dem Mischer zugegeben. Für den Kalandrierprozess und das Gelieren im Ko-Kneter oder Extruder sind die Ausgangstemperatur der Mischung, deren Schüttdichte und die Kornform entscheidend /33/.

Unter Plastifizieren soll im wesentlichen der im Ko-Kneter oder im Planetwalzenextruder einer Kalandrstraße ablaufende Prozess verstanden werden, bei dem das mit Additiven abgemischte PVC-Pulver durch Schererwärmung oder Wärmeübertragung in eine kompakte Phase von 140 – 200°C, das so genannte Gelat, überführt wird. Der Zustand des Gelates ist die entscheidende Ausgangsgröße für die Qualität im Folgesystem Kalandr.

Nachfolgend wird stellvertretend der Ko-Kneter beschrieben. Er ist ein einwelliger Schneckenkneter, dessen Welle zusätzlich zu seiner Rotation eine axiale Hubbewegung ausführt. Die Schneckenwendel ist durch Lücken unterbrochen, wodurch als wellenseitiges Knetwerkzeug sogenannte Schneckenflügel entstehen. Die Schneckenflügel und die dreireihig im Gehäuse befestigten Knetzähne bilden Spalte, in denen die Scherung des Materials stattfindet /34/. Es kommt durch die Überlagerung der Rotations- und Hubbewegungen zu einem intensiven, häufigem Umlenken des Materialflusses mit einer sehr hohen Einleitung von Scherenergie in das Material und einer Selbstreinigung der Verfahrensteile. Weiterhin werden Planetwalzenextruder eingesetzt.

Die das Plastifizieraggregat verlassenden Materialbrocken werden über ein Förderband dem ersten Walzenspalt zugeführt. Dieses changiert zwischen den Begrenzungsbacken im ersten Walzenspalt für seine gleichmäßige kontinuierliche Befüllung /29, 33/. Das Transportförderband dient der Beschickung des ersten Kalanderspalt. Die vorgeschalteten Ko-Kneter oder Extruder übergeben ihren Materialvorrat, meist durch einfaches Herunterfallen, auf das Förderband. Steht ein Walzwerk zur Verfügung, wird das Materialfell vom Förderband abgezogen und dem Kalandr zugeführt.

Ausgangsgrößen für das Nachfolgesystem Kalandr sind die Materialtemperatur unter konvektiver Abkühlung auf dem Transportweg sowie die Materialverteilung im ersten Walzenspalt. Diese ist in Füllhöhe und Profil entscheidend für die Qualität der Folie.

Ein Kalandr besteht aus:

- Kalandrstände
- Kalandrwalzen
- Walzenlager
- Antrieb
- Temperierung der Walzen
- Abzugs- und Kühlwalzen

Eine Beschreibung der einzelnen Bestandteile befindet sich zum Beispiel in /27, 33/.

Nach der Abzugs- und Kühlwalzenpartie sind Rollenstege oder unangetriebene Walzen kleinen Durchmessers installiert, welche die Folienbahn entweder direkt in die Konfektionierungseinheit oder in weitere Verarbeitungssysteme leiten sowie die Qualitätsmessstrecke integrieren. An neuen Anlagen werden Freiflächen über Rollenführungen geschaffen, an denen die Qualität der Folienbahn gemessen und bewertet werden kann.

Die Messeinrichtungen gewinnen zunehmend an Bedeutung, da mit einer vollständigen Kontrolle der Folieneigenschaften der Kalandersprozess optimiert wird. Beispielhaft seien CCD-Kamerasysteme (Beleuchtungen und Kamertypen) und die traversierende Flächengewichtsmessung (Messkopf mit Traverse) genannt, die hier baulich berücksichtigt werden.

Die Folienkonfektionierung dient dem Abführen des Randbeschnittes, der Realisierung der Fertigungsendbreite sowie dem Aufrollen der Folienbahn in Rollen vorgegebener Breite oder dem Erzeugen von Formaten definierter Abmessungen.

Die zwei Verfahren zur Herstellung von PVC-U-Folien sind:

- das Niedrigtemperaturverfahren (Bröselknet- oder Luvithermverfahren),
- das Hochtemperaturverfahren (Rollknetverfahren).

Beide unterscheiden sich grundsätzlich im Verfahren und den eingesetzten Rezepturen.

Niedrigtemperaturverfahren: Das krümelige Gelat wird in den Spalten des Kalanders zu einer gesinterten Folie geformt, wobei die poröse Konsistenz weitgehend beibehalten wird. Das eigentliche Verschmelzen des aus dem Kalanders kommenden gesinterten Fells mit einer entsprechenden Zunahme der Festigkeit erfolgt im nachfolgenden Luvithermprozess bei hoher Temperatur und dem nachfolgenden Verstrecken.

Hochtemperaturverfahren: Das klumpenförmige, hochviskose Gelat aus dem Ko-Kneter oder Extruder wird unter Knetbildung (Materialwirbel im Einzugsbereich eines Walzenspaltes) zu einer Folie geformt. Bezeichnet wird das Hochtemperaturverfahren auch als Rollknetverfahren, da in diesem Kalandrierverfahren ein zigarrenförmiger Knet scheinbar rollende Bewegungen ausführt (Abb. 2-6).

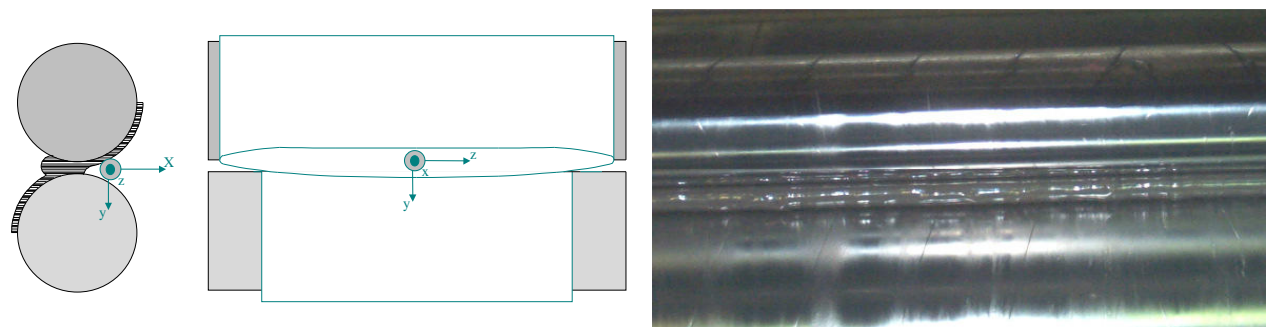


Abb. 2-6: Knet (Materialvorlage) vor einem Walzenspalt beim HT-Verfahren /35/

Dieser Rollknet besteht aus Ein- und Auslaufwirbel. Der Einlaufwirbel vergrößert sein Volumen durch die spiralförmige Aufnahme der dem Einlaufwirbel anliegende Hälfte der einlaufenden

Folie, während die andere Hälfte an der Einlaufwalze unverändert durch den Spalt läuft. Der Auslaufwirbel verkleinert sich durch die Abgabe des Materials für die zweite Folienhälfte. Mit der Vergrößerung des Einlaufwirbels kommt das an der Knetoberfläche liegende Wirbelende zu einem Stillstand. Das Material wird in einem plötzlichen Knetumschlag zur Auslaufwalze gerissen und füllt den Auslaufwirbel. Dieses in seiner thermischen und mechanischen Vorgeschichte andersartige Material des Knetumschlages zeigt dabei höhere Rückstellkräfte als das normale Material des Auslaufwirbels. Die in der abgekühlten Folienbahn dadurch entstehenden Verdickungen beeinträchtigen die Qualität und Optik nachhaltig.

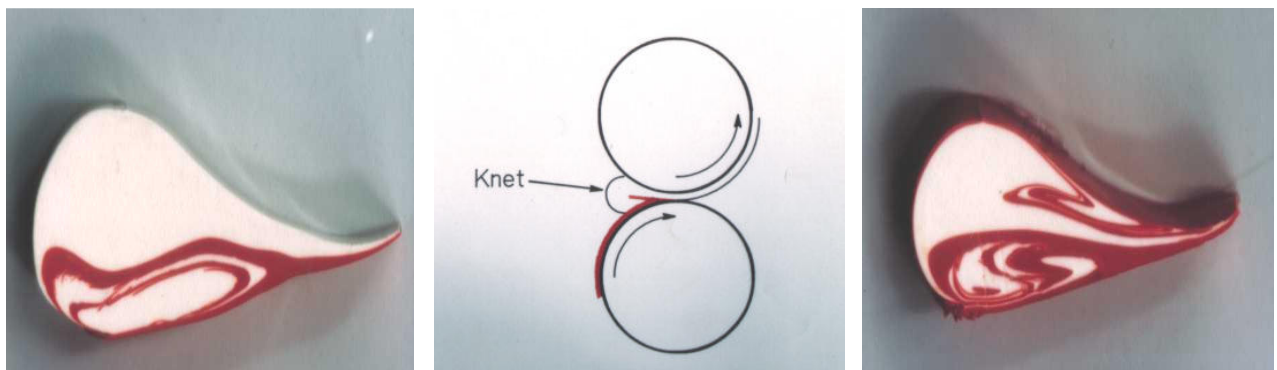


Abb. 2-7: Darstellung von Ein- und Auslaufwirbel /36/

Das Verhältnis von neu gebildeter zu vorhandener Materialschicht liegt nach Untersuchungen von /36/ unabhängig von Walzengeschwindigkeit, Temperatur, Foliendicke und Kneithöhe bei etwa 42 % aus dem einlaufendem Material und zu 58 % aus dem neu gebildeten Material (Abb. 2-7).

Eine Erhöhung der Friktion auf einen Wert um 3 ($v_2:v_1$ liegt normal bei ca. 1,1 – 1,8) kann den Anteil des direkt einlaufenden Materials auf 80 % anheben.

Der Stand der Technik für eine moderne Kalandieranlage im Hochtemperaturverfahren ist z.B.:

- eine Walzenoberflächenbreite von ca. 2500 mm,
- Produktionsgeschwindigkeiten bis 300 m/min bei geringsten Foliendicken von 30 μm ,
- eine durchschnittliche Produktionsleistung von 1200 bis 4500 kg/h (in Abhängigkeit von Foliendicke und Qualitätsanforderungen).

Die Verfahrensbedingungen /37/ werden wesentlich beeinflusst durch:

- die Beschaffenheit des Gelats aus Ko-Kneter und Extruder (Walzfell oder Brockenzustand und Größe sowie Verteilung),
- Walzentemperaturen (von Walze zu Walze steigende Temperaturen, die letzte oder beide letzten Walzen für den Abzug der Folie allgemein niedriger temperiert),
- Walzengeschwindigkeiten (von Walze zu Walze zunehmende Geschwindigkeit),
- Spaltweiten (die Spaltweiten liegen meist zwischen 0,3 und 0,8 mm, die Foliendicke wird durch Einstellung der Spaltweite sowie zusätzliches plastisches und elastisches Strecken erzielt).

Im Anhang Seite A1 bis A8 werden ausgewählte Verfahrenspunkte und -orte ausführlicher mit Beispielen erläutert.

Die Verfahrenseinflüsse im Einzelsystem Kalandrier können vereinfacht dargestellt werden (Abb.2-8):

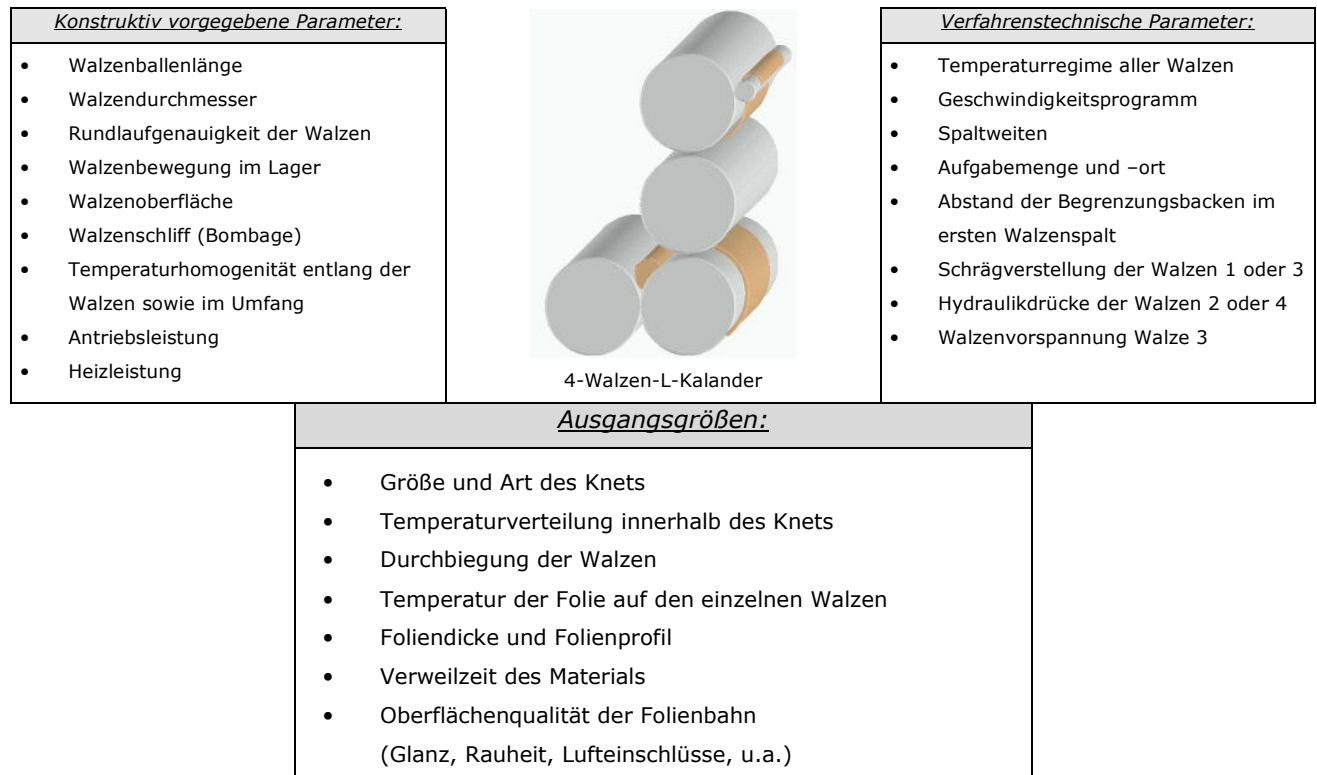


Abb. 2-8: konstruktive und verfahrenstechnische Einflüsse an einem Kalander

2.2. Stand der Modellierung des Kalandrierprozesses

Wie bereits in verschiedenen Arbeiten zur Kalandriertheorie vorgestellt, sollte ein Kalander als komplexes System mit einzelnen autarken Zonen betrachtet werden. Batschkowa /28/ beschreibt den Kalander als verarbeitungstechnisches System einzelner in Reihe geschalteter Elemente. Diese werden als technologische Einheiten verbunden und strukturiert durch den Stoff- und Energiestrom innerhalb des Gesamtsystems definiert. Sie zergliedert aus Sicht der physikalischen Vorgänge und aus technologischer Sicht das Modell Kalander in zwei wesentliche Ströme, in den Spaltprozess im Wirkpaar Walze–Walze und in den Wärmeleitprozess in den Abschnitten des Materialtransportes.

Auch Gärtner /27/ und Mansur /38/ beschreiben das System Kalander über die Leitgröße Temperatur als eine in einzelne Verarbeitungsschritte eingeteilte Reihenschaltung.

Es wirken in dieser mehr als 100 Einflussgrößen mit 822 Zusammenhängen auf die gesamte Folienqualität /39/. So werden innerhalb einer Kalanderspalte komplexere Modellierungen nur in ausgewählten Einheiten entsprechend relevanter technologischer Aufgabenstellungen durchgeführt.

Speziell für die Wirkpaarung Walze–Walze haben sich in den letzten Jahrzehnten verschiedene Berechnungsmodelle etabliert. Diese unterscheiden sich hauptsächlich in ihrer isothermen oder nicht-isothermen Betrachtungsweise, in rein analytische und experimentelle Arbeiten sowie in der Einbeziehung unterschiedlicher rheologischer Stoffdaten und gewählter rheologischer Modelle oder Zustandsgleichungen.

In den letzten Jahren ist eine deutliche Verfeinerung der Berechnungsgenauigkeiten von Strömungs- und Spannungsfeldern im Kalanderspalte über FEM und CAD-Modellierungen zu verzeichnen. Dies zeigt sich in aktuellen Arbeiten von Klostermann /40/ oder Luther /41/, in welchen unterschiedlichste Strömungsvolumina dreidimensional innerhalb breiter Verarbeitungsfenster dargestellt werden können und diese sich mit verschiedenen Modellansätzen simulieren lassen.

Alle bekannten Modelle arbeiten mit scheinbaren Viskositäten η , welche tabellarisch oder mit rheologischen Messungen näherungsweise bestimmt wurden. Sie scheinen ingenieurtechnische Problemstellungen hinreichend genau für die untersuchten konkreten Prozessbedingungen und Materialien zu beschreiben.

An Produktionskalandern sind für die Prozessoptimierung und eine weitere Ausstoßerhöhung unter Senkung von Material- und Anlagenkosten neue Prozessmessgrößen erforderlich.

Eine direkt am Kalanderspalte messbare Materialviskosität, als ein Ziel dieser Arbeit, erlaubt eine genauere Steuerung des Prozesses, schafft Vergleichsmöglichkeiten zu anderen Rohstoffkombinationen und hilft, den Kalandrierprozess zu optimieren.

2.2.1. Experimentelle Untersuchungen

Zur Untersuchung des Deformationsprozesses wendet man oft die so genannte Schnittmethode an, welche in der Verarbeitung zweier unterschiedlich gefärbter Materialien besteht. Jedoch lassen sich Strömungsfelder schlecht und nicht stabil bestimmen. Menges und Unkrüger /42, 43/ zeigen bei der Untersuchung von PVC im Walzenspalte, dass sich bei der Polymerbewegung drei, bei Veränderung der Deformationsbedingungen zwei geschlossene zirkulierende Strömungen entwickeln können. Torner, Dobroljubov /44/, Anker /45/ und Hatzmann /46/ bestätigen ein analoges Bild. Durch Funke und Matschke /36/ werden über umfangreiche Untersuchungen die Vorgänge im Walzenspalte visualisiert (Abb. 2-9). Sie dokumentieren ausschließlich zwei gegenläufige Wirbel, zwischen denen ein Materialaustausch stattfindet. Der Materialübergang vom langsamen zum schnellen Wirbel geschieht durch periodisches Abreißen des äußeren Teils des langsamen Wirbels und der Aufnahme dieser Materialmenge vom

schnelleren Wirbel. Umgekehrt zieht der langsame Wirbel schichtweise Material aus dem schnelleren Wirbel ein.

Fließvorgang im Knet beim Kalandrieren von PVC,

sichtbar gemacht durch Farbsprung in der PVC – Masse von weiß nach rot

Die in den Feldern gezeigten Knetschnittbilder wurden zu verschiedenen Zeiten nach Einlaufbeginn des roten Materials erhalten. Die Feldnummerierung folgt der ansteigenden Zeit.

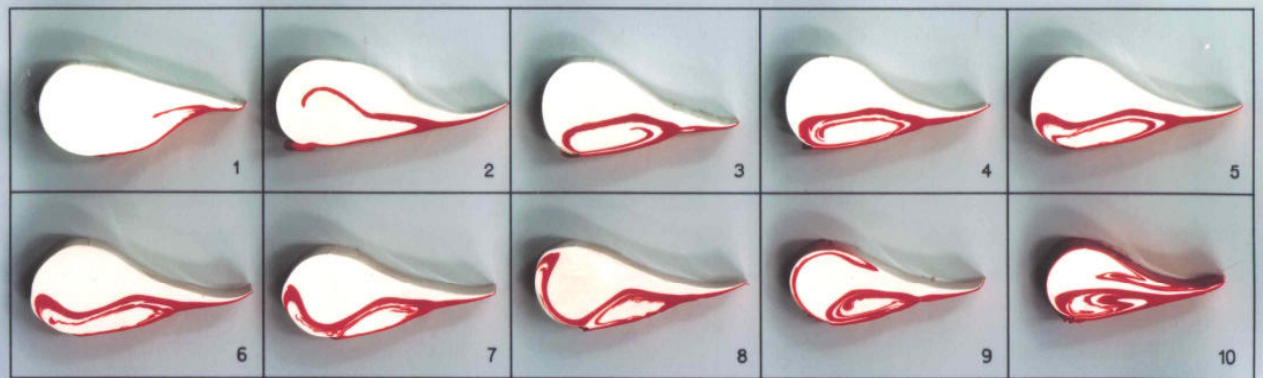
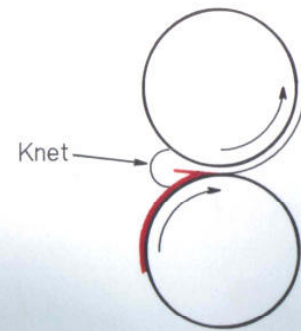


Abb. 2-9: Fließvorgang im Knet beim Kalandrieren von PVC /36/

Der unmittelbar auf der Walze aufliegende Teil des in den Knet einlaufenden Materialfells passiert auf direktem Wege den Walzenspalt. Ermittelt wird ein Wert von ca. 50% der Gesamtdicke des Fells. Die verbleibende zweite Fellohlfte erfährt eine Abscherung ins Spaltinnere und wird von dem langsamer drehenden Wirbel des Knets, der der langsameren Walze anliegt, aufgenommen.

Unkruer /42, 43/ und Krasovskij /47/ betrachten die Bewegungsabläufe im Deformationsgebiet und bewerten die zirkularen Gebiete und die Veränderungen der Stromlinien und Austrittskoordinaten (Abb. 2-10).

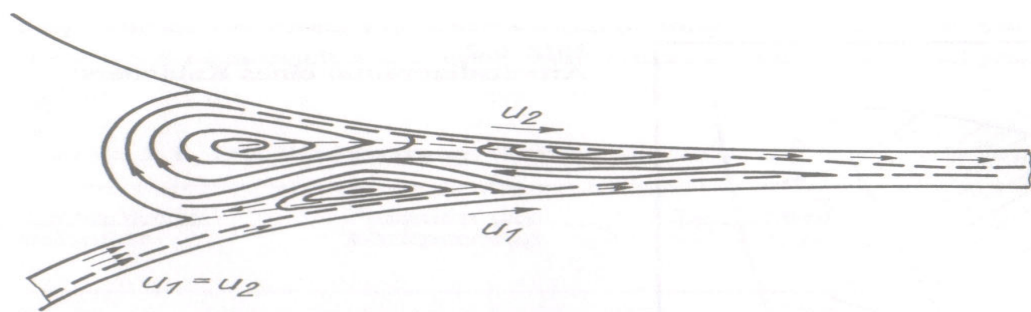


Abb. 2-10: qualitatives Bild der Knetwirbel nach /42, 43/

Bestätigt wird die Bedingung des Wandhaftens durch die nahezu gleichen Geschwindigkeiten der an den Walzen anliegenden Materialschichten und den zugehörigen Walzenoberflächen und die Richtigkeit der Untersuchungen von Gaskell /48/.

Die gewonnenen Erkenntnisse von Torner und Bekin /49/ zur Temperaturverteilung innerhalb der Strömungsfelder zeigen nur geringe Temperaturspitzen der Materialschichten an der Walzenoberfläche. Somit kann mit ausreichender Genauigkeit der gesamte Prozess isotherm mit nur einer mittleren Temperatur über die Verarbeitungsbreite betrachtet werden. Temperaturunterschiede im Knet können sich jedoch in Form von Fließlinien (ca. 5-7µm) als Qualitätsverschlechterung der Foliendicke auswirken.

Weitere Untersuchungen zeigen einen geringen Einfluss der Walzengeschwindigkeiten und minimalen Zwischenräume auf das Strömungsverhalten im Spalt. Einen hohen Einfluss zeigt die Friktion. Mit Vergrößerung der Friktion beim Kalandrieren thermoplastischer Polymere verschieben sich Strömungsgebiete und entsprechend die Stromlinien /50/. Instabilitäten des Walzprozesses bei Temperaturänderungen und Spaltweitenverringerung konnten dagegen bei der Verarbeitung von Kautschuk durch White /51/ und Wagner /52/ nachgewiesen werden.

2.2.2. Verwendete Materialien und rheologische Untersuchungen

In diesem Abschnitt werden Arbeiten zum Kalandrieren bezüglich der angenommenen Modellansätze und eingesetzten Materialien analysiert.

Chong /53/ verwendet für seine Untersuchungen ein hochmolekulares Cellulose-Acetat-Derivat mit unterschiedlichen Weichmachern. Das Material zeigt im Kapillarrheometer (ohne weitere Angaben) ein Fließverhalten nach dem Potenzgesetz bei verschiedenen Scherraten. Bei niedrigen Scherraten ähnelt das Materialverhalten eher dem eines Bingham-Fluids.

Alston und Astill /54/ nutzen von nicht näher beschriebenen Fluiden im Rotations- und Burrell-Viskosimeter ermittelte Werte zur Simulation des Fließvorganges.

Kiparissides und Vlachopoulos /55, 56/ variieren den Fließexponenten n des verwendeten Potenzgesetzes von $n=0,25$ bis $n=1,0$ zur Simulation verschiedener Materialien bei gleich bleibender Konsistenz.

Dobbels /57/ veröffentlicht die Faktoren A , B und m seines über das ELLIS-Modell beschriebenen Materials ohne weitere Angaben zu Herkunft und Art.

Vlachopoulos und Hrymak /58/ betrachten an einem Versuchskalandrierer PVC-U mit an einem Kapillarviskosimeter ermittelten Materialdaten. Diese Daten bilden über das Potenzgesetz einen Schergeschwindigkeitsbereich von $1 - 400 \text{ s}^{-1}$ bei Temperaturen von 160 bis 210 °C ab.

Hofbauer /23/ vergleicht an einem Produktionskalandrierer bisherige Untersuchungen in Theorie und Praxis anhand von PVC-U-Abmischungen. Zur Berechnung dienen veröffentlichte Laborwerte und Messergebnisse eines Hochdruckkapillar-Rheometers mit vorgeschaltetem Extruder – unter Anwendung des Potenzgesetzes als rheologisches Modell.

Seeger und Reher /59/ untersuchen an einer Kalandieranlage verschiedene kreidegefüllte PVC-P-Abmischungen. Sie verwenden das Potenzgesetz, erweitert um einen Arrheniusansatz, mit an einem Hochdruckkapillar-Viskosimeter ermittelten Materialdaten.

Chung /60/ betrachtet Polyethylen und Polystyrol mit unterschiedlichen Viskositäten nach dem Potenzgesetz unter Berücksichtigung kompressiblen Materialverhaltens.

Mitsoulis /61/ verwendet aus früheren Veröffentlichungen Materialdaten von PVC-U, die an einem Hochdruckkapillar-Rheometer erhalten wurden, zur zweidimensionalen Berechnung über das Potenzgesetz.

Agassant /62/ nutzt ohne weitere Angaben zu Art und Herkunft der PVC-U-Materialdaten das Potenzgesetz, Daud /63/ nimmt ohne weitere Angaben ein mit dem Potenzgesetz beschreibbares Medium.

Zheng /64/ vergleicht für das Verhalten im Kalanderspalt Materialien, welche über das Potenzgesetz und das PTT-Modell beschrieben werden.

Coleman /65/ verwendet für seine Betrachtungen über das KBKZ-Modell beschriebene elastische Fluide mit unterschiedlich ausgeprägter Strukturviskosität.

Batschkova /28/ arbeitet bei ihren Untersuchungen mit PVC-P, welche über das Potenzgesetz abgebildet werden.

Kohlert /30/ beschreibt in seiner Abhandlung zum Kalandrieren von Polymeren für experimentelle und theoretische Beispiele diverse Kautschukmischungen, PVC-U, PVC-P, PE sowie ABS unter Verwendung unterschiedlicher rheologischer Modelle.

Tseng /66-70/ betrachtet in verschiedenen Abhandlungen PVC-Typen unterschiedlichen Molekulargewichte und beschreibt detailliert Materialzusammensetzung, zugehörige rheologische Modelle und verwendete Messgeräte.

Die Daten werden aus unterschiedlichen Quellen für ein breites Temperaturspektrum zitiert. Neben Werten klassischer Kapillarrheometer sind erstmals auch Werte aus dynamischen Messungen aufgeführt und dargestellt.

Klostermann /40/ vergleicht berechnete und gemessene Fließfelder im Spalt zweier Rollen. Er verwendet für seine experimentellen Untersuchungen Polyisobuten bei geringen Scherraten. Riest /71/ nutzt die erhaltenen Untersuchungsergebnisse und Materialkenndaten für seine numerischen Berechnungen zur konstruktiven Gestaltung von Kalandерwalzen.

Luther /41/ arbeitet in ihren numerischen Berechnungen der freien Knetoberflächen einer Walzenpaarung mit Werten zweier Styrol-Butadien-Kautschuke (SBR) gleicher Fließindizes und unterschiedlicher Konsistenzfaktoren. Zur Beschreibung des rheologischen Materialverhaltens dient das Potenzgesetz nach Ostwald de Waele.

Glomsaker /72/ untersucht unplastifizierte PVC-Compounds experimentell und vergleicht die Ergebnisse mit numerischen Berechnungen. Hierbei werden das differentielle PTT-Modell sowie das integrale KBKZ-Modell für Untersuchungen an Kapillarrheometer und Rotationsviskosimeter verwendet.

Kohlert /73, 74/ untersucht speziell zur Ermittlung von Prozessviskositäten an Produktionsanlagen Kautschukmischungen für Keil- und Mikrowalzenrheometer. Alonso /75/ arbeitet mit unterschiedlichen Suspensionen an einer Reverse-Coating-Beschichtungsanlage zur Bestimmung des Drehmomentes der Auftragswalze, um die Prozessviskosität zu ermitteln. Einen Überblick über verwendete Geräte und Materialien früherer Untersuchungen gibt Tabelle 2-1 und 2-2. Für die mit * gekennzeichneten Autoren sind im Anhang Seite A16 und A17 beispielhaft Fließkurven ihrer untersuchten Materialien angegeben.

Autor	Messgerät / Kalandar	Material	Rheologisches Grundmodell	Angaben zu T, $\dot{\gamma}$, η
Batschkova /28/	Kapillarviskosimeter	PVC-P	Potenzgesetz	K: 20000 Pa*s ⁿ 54000 Pa* s ⁿ n: 0,32 T: 436 K
Kohlert /30/	Kapillarviskosimeter	Kautschuk (div.) PVC (-U, -P)	Potenzgesetz	div. Angaben
Tseng /66/	Kapillarviskosimeter Weißenberg- Rheogoniometer Produktionskalandar	PVC-U Molekulargewicht: 13500 - 200000 (PS, PP)	Potenzgesetz + Arrhenius-Ansatz Rainer-Philippof Ellis Powell-Eyring Maxwell White-Metzner Bueche, Rouse	Kapillare: $\dot{\gamma}$: 2,9 - 2900 s ⁻¹
Tseng /67/*				Rheogoniometer: $\dot{\gamma}$: 2 - 1200 s ⁻¹
Tseng /68/				T: 100 - 220°C
Tseng /69/				η : 3x10 ⁶ - 4x10 ⁶ Poise
Tseng /70/				
Klostermann/40/		Polyisobuten (Oppanol B3)	Carreau	$\dot{\gamma}$: 2 - 3x10 ¹ s ⁻¹ T: 288 - 298 K ω : 1,395 s ⁻¹
Riest /71/	Rotationsrheometer	Polyisobuten (Oppanol B3)	KBKZ-Modell	ω : 10 ⁻³ - 10 ¹ s ⁻¹ G _i : 1, 201, 12631 Pa λ_i : 0,01, 0,1, 1 s
Luther /41/		Styrol-Butadien- Kautschuk	Potenzgesetz	n: 0.32 K: 71000 Pa*s ⁿ 142000 Pa* s ⁿ
Glomsaker /72/*	Kapillarrheometer Rotationsviskosimeter (Platte/Platte)	PVC-U (S-PVC) K-Wert: 57.5	PTT-Modell KBKZ-Modell	$\dot{\gamma}$: 10 ⁻⁶ - 10 ³ s ⁻¹ T: 180°C, 195°C
Kohlert /73/	Produktionskalandar	Kautschukmischung SKI-3, SKN-26	Potenzgesetz	v _{kal} : 5 - 8 m/min T _{kal} : 75 - 110°C
Alonso /75,76/	Rotationsviskosimeter	Latex-Suspension mit CMC; Polyethylen-Glykol- Suspension	Potenzgesetz	$\dot{\gamma}$: 0,05 - 10 ³ s ⁻¹ n: 0,145 - 0,220 m: 3,7 - 16 (P*s ⁿ⁻¹)
Lenk /77/	Rotationsviskosimeter Schmelzindexprüfgerät	PVC-U	Reine Messung	$\dot{\gamma}$: 2,9 - 2900 s ⁻¹ T= 170°C - 220°C

Tab. 2-1: Aufstellung verwendeter Materialien, Modelle und Prüfgeräte

Autor	Messgerät / Kalanders	Material	Rheologisches Grundmodell	Angaben zu T, $\dot{\gamma}$, η
Chong /53/	Kapillarviskosimeter Laborkalanders	Cellulose-Acetat	Potenzgesetz	T : 80 – 140°C $\dot{\gamma}$: 1-300 s ⁻¹ η : 0,3 – 4x10 ⁻⁶ Poise
Brazinsky /78/			Potenzgesetz	n=0,1, 0,25, 1,0, 4,0
Alston /54/*	Rotationsviskosimeter Burrell - Viskosimeter		Potenzgesetz Tanh-Gesetz	$\dot{\gamma}$: 10 - 10 ⁵ s ⁻¹
Hatzmann /46/	Produktionskalander	PVC-U	Experimentelle Betrachtung	T: PVC Verarbeitung
Kipassides /55/		n = 0,25 – 1,0 $\eta_0 = 10^{-4}$ Poise	Potenzgesetz Tanh-Gesetz	A=80, B=79,65 Poise K=390; n=0,25
Dobbels /57/		$\rho = 1250$ kg/m ³	Potenzgesetz ELLIS - Modell	A=180000 Pas B=122000 Pas ^{1/m} m = 3,7
Vlachopoulos/56/		PVC-ähnlich	Potenzgesetz	T: PVC Verarbeitung m=1-5x10 ⁴ Pa*s ⁿ n=0,25 – 0,5
Vlachopoulos/58/	Kapillarviskosimeter	PVC-U	Potenzgesetz	T : 160 – 210°C $\dot{\gamma}$: 1-400 s ⁻¹ τ (180°C): 50,6 $\dot{\gamma}^{0.322}$
Hofbauer /23/*	Kapillarviskosimeter Produktionskalander	PVC-U + Weichmacher	Potenzgesetz	T: PVC Verarbeitung $\dot{\gamma}$: 10 ⁰ – 10 ⁴ s ⁻¹
Seeger /59/	Kapillarviskosimeter	PVC-P + Kreide	Potenzgesetz Vinogradov	T: 428 – 458 K K: 0,8-5,2 x 10 ⁴ Pas ^m m: 0,2 – 0,4
Chung /60/		PE, PS	Potenzgesetz	n: 0,594; 0,368 m: 126,9; 0,5 (P*s ⁿ⁻¹)
Mitsoulis /61/	Kapillarviskosimeter	PVC-U	Potenzgesetz Criminale-Ericksen- Filbey-Stoffgesetz	T : 160 – 210°C $\dot{\gamma}$: 1-400 s ⁻¹ τ (180°C): 50,6 $\dot{\gamma}^{0.322}$
Agassant /62/		PVC-U	Potenzgesetz	η : 10 ³ Pa*s
Daud /63/			Potenzgesetz	
Zheng /64/			Potenzgesetz PTT-Modell	n: 0,4 (Fließindex) η_s : 0, η_0 : 1, n: 1 Wi: 1
Coleman /65/			KBKZ-Modell	η : 10 ⁻¹ - 10 ¹ Pa*s $\dot{\gamma}$: 10 ⁻³ – 10 ¹ s ⁻¹

Tab. 2-2: Aufstellung verwendeter Materialien, Modelle und Prüfgeräte

2.3. Ermittlung von Prozessviskositäten

Für die Nutzung der Automatisierung und Steuerung verarbeitungstechnischer Prozesse stellt die Prozessviskosität eine interessante und bisher, speziell für den Kalandrierprozess, nur selten untersuchte Messgröße dar.

Die im Abschnitt 2.2. betrachteten Untersuchungen und die dargestellten Modellannahmen und beschriebenen Materialviskositäten beruhen im Wesentlichen auf Messungen an klassischen Rheometern. Viskositätsmessungen in herkömmlichen Rheometern basieren auf der Realisierung einfacher Couette- oder Druckströmungen in Rotations- oder Kapillarviskosimetern. Das Rotationsviskosimeter liefert dabei die Fließkurve über eine Drehmoment-Winkelgeschwindigkeits-Kurve in einer Couette-Strömung zweier ineinander verdrehbarer Zylinder. Das Kapillarviskosimeter mit einer Rohrströmung und einer Durchsatz-Druckverlust-Beziehung ermöglicht die Ermittlung verschiedener Punkte einer materialbeschreibenden Fließkurve.

Die Abbildung der Strömungsprozesse dieser klassischen Viskosimeter in einem Verarbeitungsprozess und die Ermittlung gleichgelagerter Messwerte wie Kraft, Drehmoment oder Druckverlust einer betreffenden Strömungscharakteristik direkt an dem bestimmenden Verarbeitungsort wird für die Verarbeitung von flächigen Gütern nachfolgend beispielhaft beschrieben. Im Zusammenhang mit dem Kalandrierverfahren ergeben sich zur Bestimmung der Viskosität folgende Möglichkeiten:

- Messung von Kraft und Drehmoment einer Walzenpaarung,
- Messung von Kraft und Drehmoment über einen keilförmigen An- oder Einbau an Walzen oder in Walzenspalten,
- Messung von Kraft und Drehmoment einer gleich- oder gegensinnig drehenden Verarbeitungs- oder Mikrowalze oder eines Rakels bei Beschichtungen.

Collin /79/ beschreibt ein Schalenrheometer, in dem über eine an der Walze angebrachte Schale mit Druckaufnehmer der der Viskosität proportionale Druck gemessen wird.

Weiterhin können heutige Laborwalzwerke der Firma Collin /80/ über die Bestimmung der Antriebsmomente der Walzenpaarung eine Prozessviskosität darstellen. Dazu werden hochgenau Material- und Walzentemperatur, Umfangsgeschwindigkeit, Lagerkräfte, Schmelzetemperatur, Knethöhe, Felldicke und Walzenspalt ermittelt und mit dem anliegenden Materialdruck im Walzenspalt korreliert.

$$p_{\max} = K \cdot \left(\frac{v_w}{h_0} \right)^n \cdot \sqrt{\frac{d_w}{h_0}} \cdot f_1(n) \quad (2.1)$$

$p_{\max}$... Verhältnis Druckströmung zu Schleppströmung im Spalt (Mischwirkung)

K ... Konsistenzfaktor

n ... Fließindex

d_w ... Durchmesser Walze

v_w ... Walzengeschwindigkeit

h_0 ... Spaltweite

Für Mischungen aus unterschiedlichsten Materialien werden Drehmoment- und Kraftverläufe online dargestellt (Abb. 2-11).

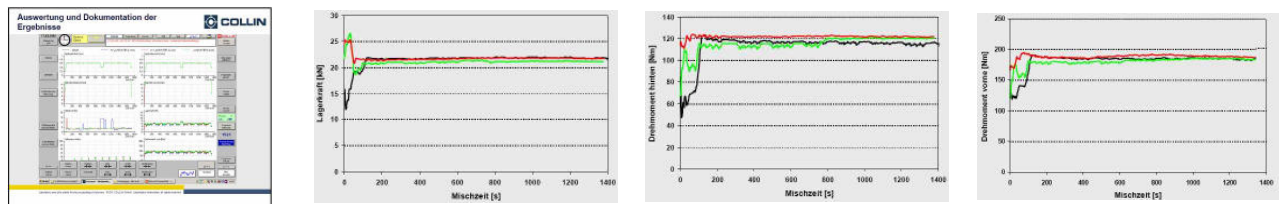


Abb. 2-11: Darstellung der Onlinemesswerte eines Laborwalzwerkes für Lagerkraft und Drehmomente /80/

Weitere Entwicklungen führen über Rodenacker /81/ zu einem Keilspaltrheometer im Labormaßstab, bei dem eine Walze exzentrisch in einem feststehendem ringförmigen Mantel rotiert. Der Spalt ist dabei einstellbar von 0 bis 3 mm und der Mantel besitzt Druckgeber zur Messung des Massedruckes. Über Temperierung und Variation der Drehzahl sowie der Spaltweite sind Kalandrierbedingungen simulierbar und es können Viskositäten ermittelt werden.

Kohlert betrachtet in /30/ die kontinuierliche Viskositätsfassung mit keilförmigen Einbauten im Walzen- bzw. Verarbeitungsspalt. Hierzu werden keilförmige Einbauten in den sich bildenden Materialwulst oder in den nahen Bereich des Materialeinzugs gebracht und über diese die Wandschubspannung ermittelt. Möglichkeiten der Messwertaufnahme sind in Abbildung 2-12 grafisch dargestellt.

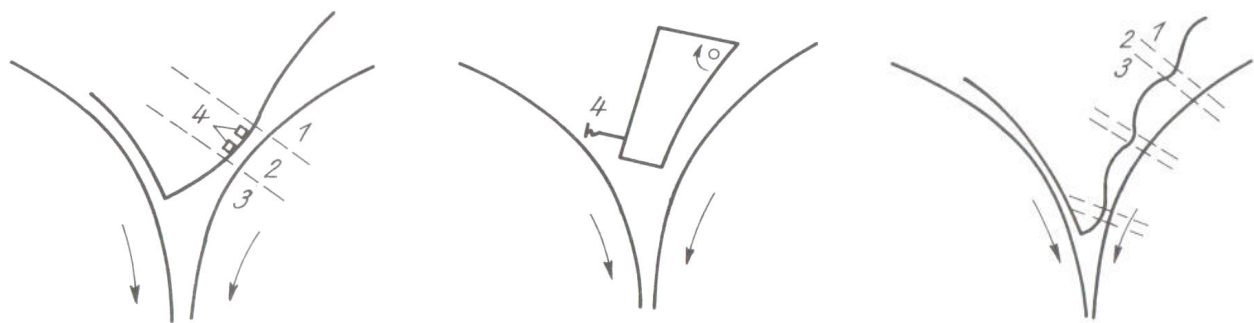


Abb. 2-12: Keilspaltrheometer mit Messgebern für Kraft (li.), Drehmoment (Mitte) und Druckdifferenz (re.) /30/

Die Ermittlung der Wandschubspannungen kann über den auf den parallelen Keilabschnitt wirkenden Druck, über das auf einen drehbar gelagerten Keil wirkende Drehmoment oder die auf eine elastische Fläche in Strömungsrichtung wirkende Zugkraft erfolgen. Die Keilspaltströmung wird dabei so gestaltet, dass in der ersten schwach konischen Zone eine Komprimierung und dabei ein Druckaufbau erfolgt, in der zweiten Zone ein konstanter Druck und damit eine einfache Scherströmung erreicht wird und in der dritten Zone der Verarbeitungsdruck der Maschine gesenkt wird.

Eine Änderung der Viskosität bewirkt eine Änderung des Druckes, des Drehmomentes oder der Zugkraft, aus denen sich durch einfache Modellansätze oder empirisch ermittelte

Abhängigkeiten die Fließkurve darstellen läßt und damit die rheologische Charakterisierung des zu verarbeitenden Materials erfolgen kann.

Die Berechnung der Prozessviskosität erfolgt mit vereinfachter Impulsbilanz und Newtonschem Stoffgesetz anhand eines einfachen Walzenspaltmodells. Mit der Ermittlung des Durchsatzes und des Druckverlaufes in Strömungsrichtung kann die messbare Kraft korreliert und die Viskosität bestimmt werden:

$$\eta = b_0 + b_1 \cdot F + b_2 \cdot F^2 + b_3 \cdot F^3 + b_4 \cdot F^4 \quad (2.2)$$

η ... Viskosität F ... auf den Keil wirkende Kraft

Über die Einbeziehung der Schergeschwindigkeit ist nichts bekannt, so dass die Eignung des Verfahrens für nicht-Newtonsche Materialien unklar ist.

Diese Rheometer sind nur an Stellen einsetzbar, an denen der Eingriff in den Materialstrom infolge der verursachten Oberflächenveränderung keinen Einfluss auf die Endqualität des Produktes hat. Für den Kalandrierprozess bedeutet dies einen maximal möglichen Einsatz im Randgebiet des Walzenspalt oder weit vor dem die Qualität der Folie bestimmenden Walzenspalt.

Von Kohlert /74/ wird weiterhin eine Vorrichtung zur kontinuierlichen Viskositätsmessung großflächiger Güter beschrieben. Diese soll innerhalb des Herstellungsprozesses an beliebiger Stelle ohne Beeinflussung des Strömungsprofils messen können (Abb. 2-13).

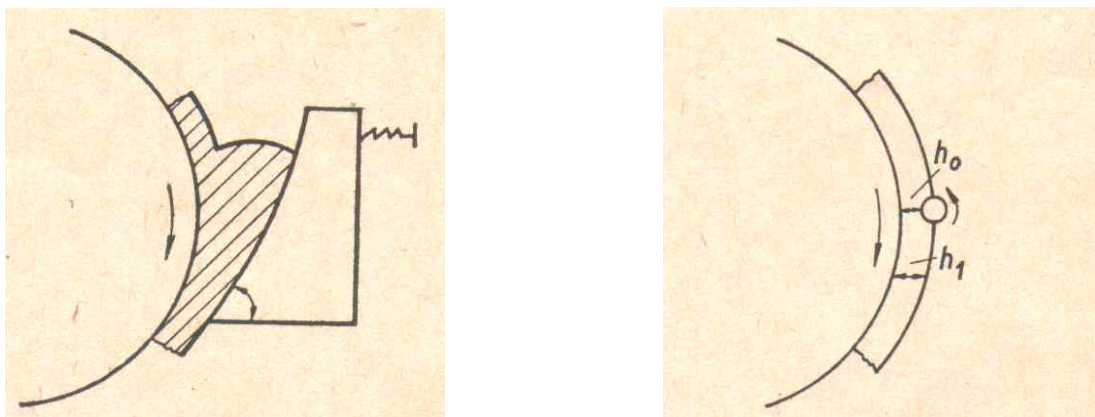


Abb. 2-13: Prozessviskosimeter li.: Keilrheometer, re.: Mikrowalzenrheometer /73, 74/

Dabei wird eine im Durchmesser wesentlich kleinere Mikrowalze idealerweise in der Nähe des Verarbeitungsspalt an das Flachgut (Foliendicke h_1) gedrückt und über die Eindringtiefe h_0 ein konstanter Schergeschwindigkeitsgradient eingestellt. Die Mikrowalze ist mit einer regelbaren Antriebseinheit und einer Torsionswelle zur Drehmomenterfassung ausgestattet. Über die Abnahme sich ändernder Drehmomentwerte kann numerisch eine Änderung der Viskosität erkannt und berechnet werden. Eine Beeinträchtigung des Strömungsregimes kann infolge der geringen Größe der Mikrowalze gegenüber der Arbeitswalze vernachlässigt werden.

Alonso /75, 76/ veröffentlicht 2001/2003 seine Untersuchungen zur Ermittlung der Prozessviskosität an einer Reverse-Roll-Coating-Versuchsanlage (Abb. 2-14). Er kombiniert die Messung des Anpressdruckes und des entstehenden Drehmomentes der gegenläufigen Auftragswalze zur Berechnung der aktuellen Prozessviskosität in Abhängigkeit von Materialformulierung und Scherrate. Die theoretischen Betrachtungen beinhalten ebenfalls die Modellierung eines einfachen Walzenspaltes mit vereinfachter Impulsbilanz, der rheologischen Gleichung in Form des Potenzgesetzes (Gleichung 2.3), Näherungsgleichungen einfacher Strömungen, Kontinuitätsgleichung, Energiegleichung sowie die Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur (Gleichung 2.4).

$$\tau = \mu \cdot |\dot{\gamma}|^{n-1} \cdot \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

μ ... Viskosität n ... Fließindex $\dot{\gamma}$... Scherrate

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{-b(T-T_0)} \quad (2.4)$$

μ_0 ... Konsistenzfaktor bei T_0 T ... Temperatur T_0 ... Bezugstemperatur b ... Temperaturfaktor

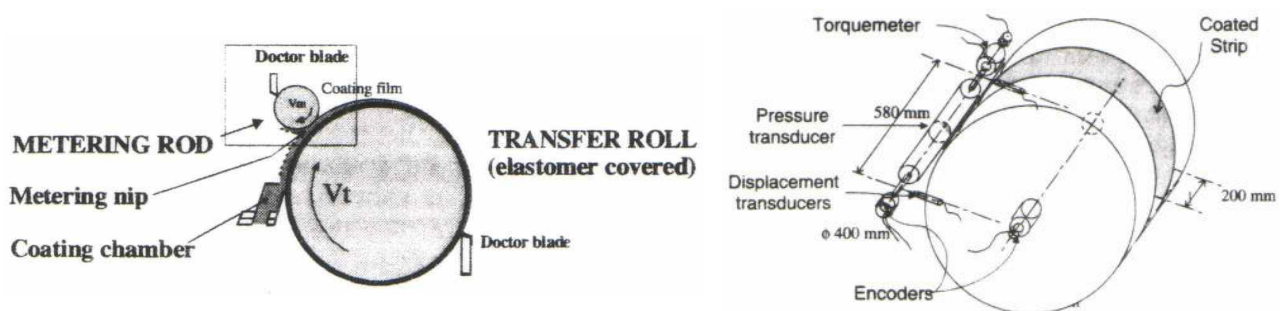


Abb. 2-14: Schema & Aufbau der Versuchsbeschichtungsanlage mit Messwertaufnahme /75/

Vergleichend zu seinen experimentellen Ergebnissen bewertet er parallel ermittelte Viskositätswerte/Fließkurven aus klassischen rheologischen Messungen und weiteren numerischen Modellansätzen/Berechnungen. Das Ziel seiner Arbeit ist die Dokumentation der tatsächlichen Materialeigenschaften, die, wie aus früheren Untersuchungen ersichtlich, deutlich von den in klassischen Messsystemen (Rheometern) gewonnenen Werten abweichen.

Über die in Abbildung 2-14 dargestellten angeschlossenen Messaufnehmer werden für alle Rezepturen / Suspensionen (Latex mit Carboxymethyl Cellulose) unter produktionsrelevanten Parametern (v , p , T) Messdaten ermittelt. Die vorherigen Simulationen (Cross-Modell, rheologische Untersuchungen) über Material- und Fließverhalten im Beschichtungsspalt des Antragswerkes werden mit den ermittelten Daten verglichen. Die Prozessviskosität wird unter Annahme der Schmierfilmtheorie bei parabolischem Geschwindigkeitsprofil und einer Kombination aus Couette- und Poiseuille Strömung berechnet. Die Ergebnisse der daraus resultierenden Gleichung (2.5) werden mit denen im Rheometer und bei Simulationen ermittelten Ergebnissen verglichen. Zur Verifizierung der theoretischen Daten und der ermittelten Prozessviskositäten am Versuchsstand dienen Suspensionen mit Newtonschem

Fließverhalten (Polyethylen-Glykol-Lösungen) in unterschiedlichen Konzentrationen und verschiedenen Geschwindigkeitsverhältnissen.

$$\mu_{proc} = \frac{T^2}{V_t \cdot \frac{dP}{dx} \cdot (SR)^2 \cdot \alpha} \quad (2.5)$$

α ... Konstante für Hagen-Poiseuille-Strömung bei resultierendem Couette Geschwindigkeitsgradienten an der Wand

μ_{proc} ... Prozessviskosität

T ... gemessenes Drehmoment

S ... benetzte Fläche der Auftragswalze

R ... Radius der Auftragswalze

V_t ... Transferrollen Geschwindigkeit

An der Versuchsbeschichtungsanlage werden unter Messung von Druck- und Drehmomentwerten der Antragswalze resultierende Prozessviskositäten ermittelt. Diese liegen ca. 2,5 - 6,3 mal niedriger als die der am Rheometer und in Simulationen erhaltenen Ergebnisse. Die vorgestellten Untersuchungen von Alonso zeigen eine Möglichkeit, die Prozessviskosität von Rezepturen/Suspensionen bekannten Materialverhaltens reproduzierbar innerhalb eines Prozesses und direkt am Verarbeitungs- und Prozessspalt zu messen.

2.4. Schlussfolgerungen und Präzisierung der Aufgabenstellung

An einer Kalandieranlage werden mit standardisierten Messaufnehmern und Sensoren viele verfügbare Daten erfasst (Tab. 2-3) und in industriellen Prozessleitsystemen dargestellt.

Anlagenteil	Messbare / aktuelle Größen	Anlagenteil	Messbare / aktuelle Größen
<i>Mischer</i>	- Drehzahl - Drehmoment - Einwaage - Mischtemperatur (Start / Ende) - Mischzeit - Innendruck / Absaugung Vakuum	<i>Kalander</i> <i>Walzen</i>	- Temperatur ** - Drehzahl / Friktion * - Drehmoment - Leistungsaufnahme - Verstellungsschritte Walzenabstand - Spaltdruck AS / HS - SV / Rb W2 & W4 (Druck) (Füllstand 1.WS)
<i>Gelieraggregate</i>	- Drehzahl Stöber & Schnecke * - Drehmoment Stöber & Schnecke - Kneterstrom, - Messergeschwindigkeit - Temperierung Zone 1-4 ** - Füllstand Empfangsgefäß - Vakuum Absaugung	<i>Abzug</i>	- Temperatur ** - Drehzahl / Friktion * - Drehmoment - Leistungsaufnahme - Foliendicke - Folienqualität (Molekülorientierung, OCS)
		<i>Nachbehandlung</i>	wie Abzug
* Drehzahlen bzw. Geschwindigkeiten in m/min sind aktuell und mit Abweichungen etc. über SPS dokumentierbar ** Bei Walzentemperaturen sind Einlauf- und Auslauftemperaturen an den zugehörigen Aggregaten verfügbar			

Tab. 2-3: beispielhafte Messwerte einer Kalandieranlage

Hauptgrößen sind Temperaturen und Geschwindigkeiten der Walzensysteme sowie an den zugehörigen Antriebs- und Temperiereinheiten gemessene Ströme und Leistungsaufnahmen.

Material- und Verarbeitungseigenschaften wie der chemisch-physikalische Aufbau (Molmassenverteilung, mittlere Molmasse), die Thermostabilität, die hydrolytische Stabilität und die thermodynamischen Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit oder spezifische Wärme sind vom pulverförmigen Vorprodukt bekannt. Weiterhin können Rieserverhalten, Materialdichte oder Reinheit entsprechender Rohstoffe oder Rezepturen labortechnisch ermittelt werden.

Allgemeine Messungen der Eigenschaften und Bewertungen der Qualität an einer produzierten Folienbahn oder entnommenen Mustern sind in Abbildung 2-15 dargestellt:

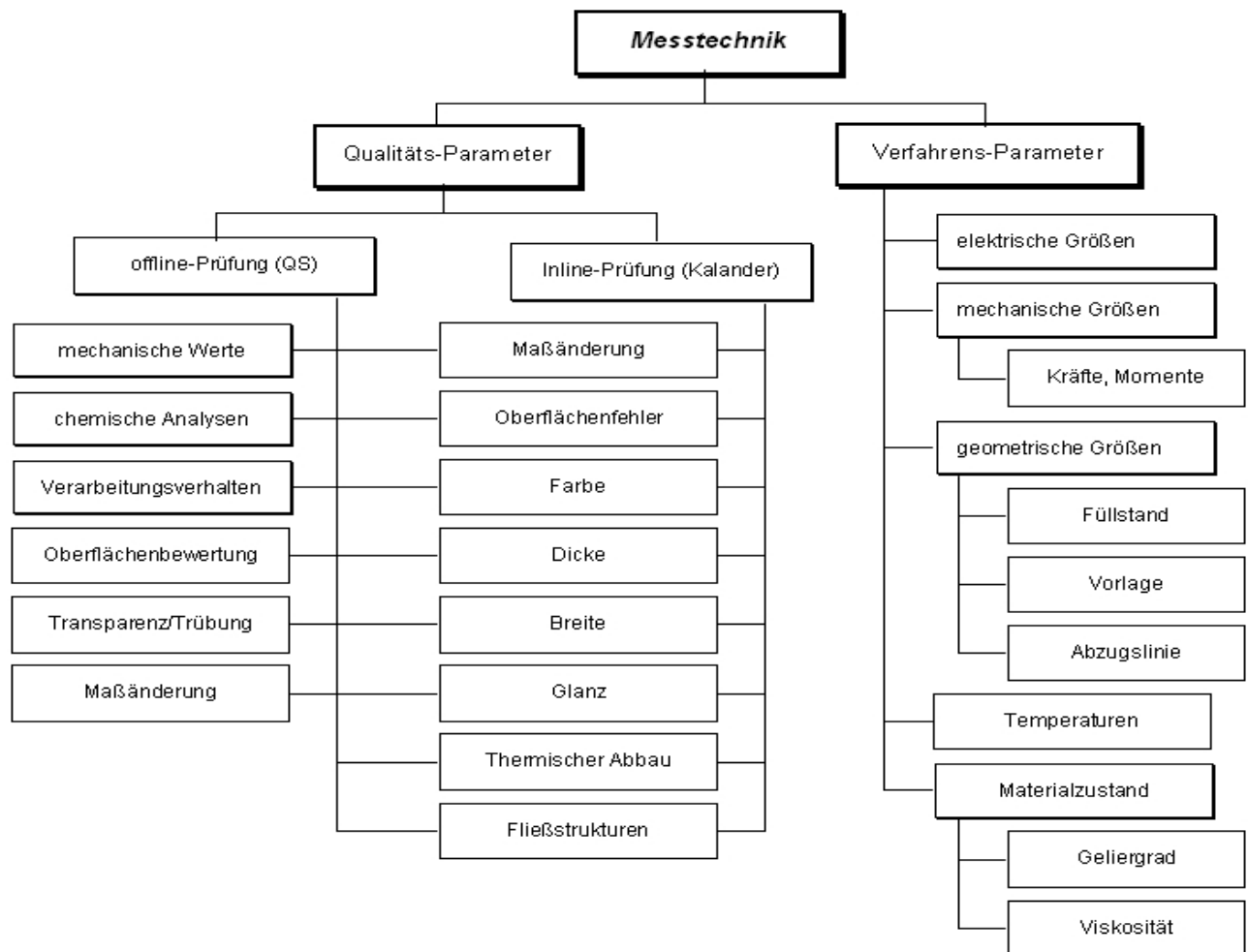


Abb. 2-15: beispielhafte Messungen an einer kalandrierten Folienbahn

Unbekannt hingegen sind die geschwindigkeits- und temperaturabhängigen Materialeigenschaften direkt im Produktionsprozess (im Gelieraggregat, im Kalandrierer).

Integrale Messgrößen wie die Spaltlast oder die Drehmomente der Walzen sowie die Materialbeeinflussung durch Rollbending oder Schrägverstellung sind nicht in die Prozessbeschreibung eingebunden. Ihre Werte spiegeln jahrelange Erfahrungen und Optimierungen wieder, sie sind jedoch in keinen Korrelationen und Datentabellen zusammen mit Materialkennwerten erfasst. Im Labormaßstab werden diese Messgrößen bereits verwendet und zu Materialeigenschaften korreliert, jedoch ist eine Übertragung in die Folienproduktion an Kalandrieranlagen derzeit nicht realisiert.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass Materialeigenschaften vom Rohstoff und dem Endprodukt vorliegen. Materialwerte direkt im Prozess sind jedoch unbekannt, es werden nur Oberflächentemperaturen und optischen Eigenschaften erfasst.

Daher ergibt sich zur Optimierung, zur Prozessstabilisierung und der Verbindung von Anlagen- und Verfahrensparametern der Bedarf an einer Material-beschreibenden Kenngröße innerhalb des Kalandrierprozesses.

Die über das Plastifizieren der Pulvermischung und ihr Einbringen in den ersten Kalanderspalt erfolgende unbekannte, teilweise extreme Materialbeanspruchung durch Dissipation und resultierende Temperaturspitzen ist rezepturabhängig. Diese Beanspruchung ist heute nur in Bezug auf beschriebene Anlagenparameter (Geschwindigkeiten, Walzentemperaturen, Durchsatz) und visuelle Einschätzungen (optische Bewertung der Folienbahn durch das Personal oder über Messtechnik) abschätzbar.

Zur Realisierung der Zielstellung der Arbeit bietet sich über eine Erweiterung der nachfolgend beschriebenen Vorrichtungen mit Messaufnehmern oder -sensoren die Möglichkeit, Kennwerte zu ermitteln. Diese sollen eine Aussage über die Materialviskosität in Bereichen des Kalanders erlauben. Ähnliche Anwendungen (Patent Keilviskosimeter, Viskositätskennwerte Collin-Walzwerke, Keil auf Gummimischung am Walzwerk) zeigen Lösungen, wie über Drehmomente und Positions-, Druck- oder Kraftmessung aussagefähige Korrelationen an Versuchsanlagen herzustellen sind. In der Literatur finden sich keine Hinweise, welche an Kalandieranlagen eine erfolgreiche Nutzung dokumentieren. Es sind ebenfalls keine an Produktionsanlagen ermittelten Materialfunktionen bekannt.

Für an oder zwischen den Walzen installierte Keile ergibt sich der Nachteil, dass diese nur punktuell eine kleine Fläche des Materials kontaktieren und nicht produktionssicher zu installieren sind. Sie erreichen also keine langfristige kontinuierliche Standzeit in der Messung und kommen bei circa 2000 mm Materialbreite zu stark differierenden Ergebnissen.

Die Messung von Drehmomenten und Lagerkräften erscheint für kleine Versuchsanlagen sinnvoll, sie wird an Produktionsmaschinen mit deutlich größeren Anlagen- und Walzenabmaßen jedoch stark fehlerbehaftet sein, da die Messempfindlichkeit deutlich herabgesetzt ist.

Bisher nur theoretisch berechnete Walzendurchbiegungen oder der selten bekannte Walzenabstand im Bereich der Schmelze bergen weitere Nachteile dieser Lösungen. Auch ist eine Messung direkt am Material (ausgenommen Temperatur oder Felldicke) an Produktionskalandern nicht gewährleistet.

Das im Kalandr ausgewalzte Gelat wird von den temperierten chromierten Walzen (ca. 200 °C) durch weitere Walzenpaarungen transportiert und dann in verringerter Dicke durch Abzugswalzen ausgetragen und verfestigt.

An diesen Kalandrwalzen sind Vorrichtungen installiert, welche die Materialbahn konfektionieren und die Produktqualität verbessern sollen. Diese sind allgemein über Lager und

Positionierungshilfen in Walzennähe montiert und laufen in oder an der Materialbahn unangetrieben mit.

Die für die vorliegende Arbeit relevanten drei Einrichtungen, direkt an den letzten drei Kalandervalzen und an den ersten Abzugswalzen positioniert, erlauben eine bisher nicht genutzte und genauere Bestimmung der Materialeigenschaften direkt im Produktionsprozess (Kalandrieren) und am Material (in der Folie – Materialfilm).

Hier kann über die Ermittlung eines temperatur- und mischungsabhängigen Drehmomentes ein äquivalenter Viskositätskennwert bestimmt werden.

Schneidwalze:

Schneidwalzen, auch Aufreißwalzen genannt, sind Walzen mit einem an der Kalandervalze anliegenden Schneidgewinde (Abb. 2-16). Sie durchschneiden das auf der Kalandervalze liegende Fell mit einem schräg über dessen Breite laufenden geraden Schnitt. Diese Vorrichtung dient dem Austrag der im Gelat enthaltenen Luft. Mittels eines Schneidanges über die gesamte Anlagenbreite (mittig nach außen verlaufend – „kräftefrei“ durch gegenläufige Gangwicklung) wird die Materialbahn oberflächlich angeschnitten oder durchtrennt. Die zwischen Fell und Walze eingeschlossenen Gasblasen sammeln sich im Zwickel (Hohlraum) zwischen Knet und Kalandervalze unter dem Fell (der Druckanstieg im Knet verhindert ihren Durchgang durch den Walzenspalt) und können beim Passieren der Schnittlinie nach außen entweichen /82/. Der Schnitt durch das Fell hinterlässt in dem beim folgenden Spaltdurchgang neu gebildeten Fell eine dem Schnittverlauf entsprechende Markierung. Ein Schnitt im Fell auf der vorletzten Kalandervalze macht sich damit als Markierung in der fertigen Folie bemerkbar. In der Literatur werden Aufreißwalzen auch unter dem Namen Spiralmesser, traversierende Schneidmesser oder Blasenauftecher (Kautschukindustrie) geführt /33, 83/.

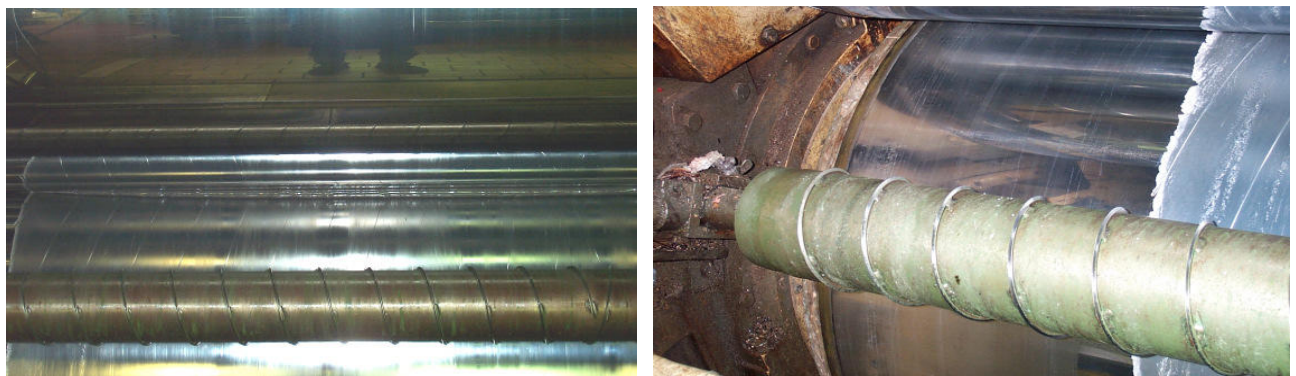


Abb. 2-16: Schneidwalze an einer Kalandieranlage

Die Arbeitshypothese besteht darin, dass mit Hilfe dieser großflächigen Materialbeanspruchung eine Funktion (Drehmomente und Drehzahl Schneid- und Kalandervalze, Eindringtiefe der Schneidwendel, Materialtemperatur und -dicke) zu Viskositätskennwerten entwickelt werden kann.

Heißbeschnitt:

An der letzten Kalandervalze sind Polyamid-Scheiben installiert, welche die Ränder der Folienbahn auf der Walze in bestimmter Breite trennen (Abb. 2-17). Ähnlich wie bei einer Schneidwalze kann hier – über Bestimmung von Drehmoment und Schnittkraft – eine Messgröße definiert werden, welche mit einem Viskositätskennwert korrelierbar sein sollte.

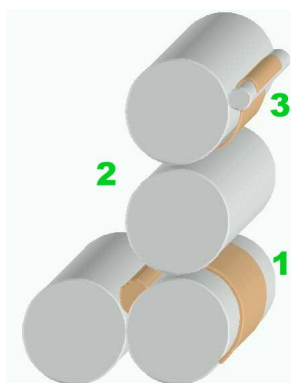
Diese Polyamid-Scheiben dienen zu einer Konfektionierung des Folienfells und der Befüllung der Randbereiche des ersten Walzenspaltes mit diesem Randbeschnitt.



Abb. 2-17: Schneidwalze (Walze 2); Heißbeschnitt (Walze 4)

Beide Vorrichtungen (Schneidwalze und Heißbeschnitt) sind am betrachteten Kalandrier in einem ansteigendem Temperaturbereich an nachfolgenden Walzen (Walze 2, 3 und 4) bei unterschiedlicher Materialdicke und -temperatur installiert und bieten die Möglichkeit, mehrere Funktionswerte innerhalb eines kurzen Materialweges zu erfassen.

Nachfolgend werden Dicken- und Temperaturbereiche dieser Messpositionen abgeschätzt:



Position	Dicke	Materialtemperatur
③	Enddicke X	210°C – 220°C
②	Enddicke + 0,3 bis 1 x Enddicke	190°C – 200°C
①	Enddicke + 1 bis 2 x Enddicke	160°C – 170°C

Breithalterollen:

An den ersten Abzugswalzen befinden sich gummierte Rollen, welche mit definiertem Druck an der von 200 bis 120 Grad Celsius abgekühlten Folienbahn anliegen. Sie dienen der Fixierung der Folie, da durch erhöhte Friktion zwischen letzter Kalandrierwalze und erster Abzugswalze die Bahn quer zur Produktionsrichtung aufgrund der plastisch-elastischen Verstreckung an Breite verlieren würde.

Hier besteht die Möglichkeit, über einen Vergleich der einzelnen Rollen an unterschiedlichen Positionen bei variierenden Materialrezepturen, Geschwindigkeiten oder Foliendicken, Drehmomente und Geschwindigkeitsunterschiede zu ermitteln.

Die über installierte Aufnehmer ermittelten zusätzlichen Messwerte erlauben über eine Definition des Materialzustandes die Interpretation von Viskositätszuständen und die Modellierung dieser Funktionen für verwendete Materialien an einem Produktionskalanders.

Neu ist die Verwendung einer bereits installierten Schneidgeometrie auf der Materialbahn im Gegensatz zu einem schon bekannten Keil, einer Mikrowalze oder einer reinen Walzendrehmoment-Korrelation (Collin) sowie deren Anwendung an einer Produktionsanlage zu einer kontinuierlichen Ermittlung zustandsbeschreibender Materialdaten und einer zusätzlichen Nutzung innerhalb einer Prozesssteuerung.

3. Experimentelle Basis zur Inline-Viskositätsmessung

3.1. Aufbau des Versuchsstandes

An Produktionskalandern werden zwei Arten von Schneidwalzen verwendet. Sie unterscheiden sich in der Art des Werkstoffes und ihrer Fertigung. Es werden Hohlkörper aus Stahl (Rohr) mit aufgeschweißter Wendel oder Messingwalzen mit aus Vollmaterial ausgedrehter Schneidwendel eingesetzt. Die Abbildungen 3-1 bis 3-3 zeigen die schematisierte und reale Einbausituation an Produktionsanlagen.

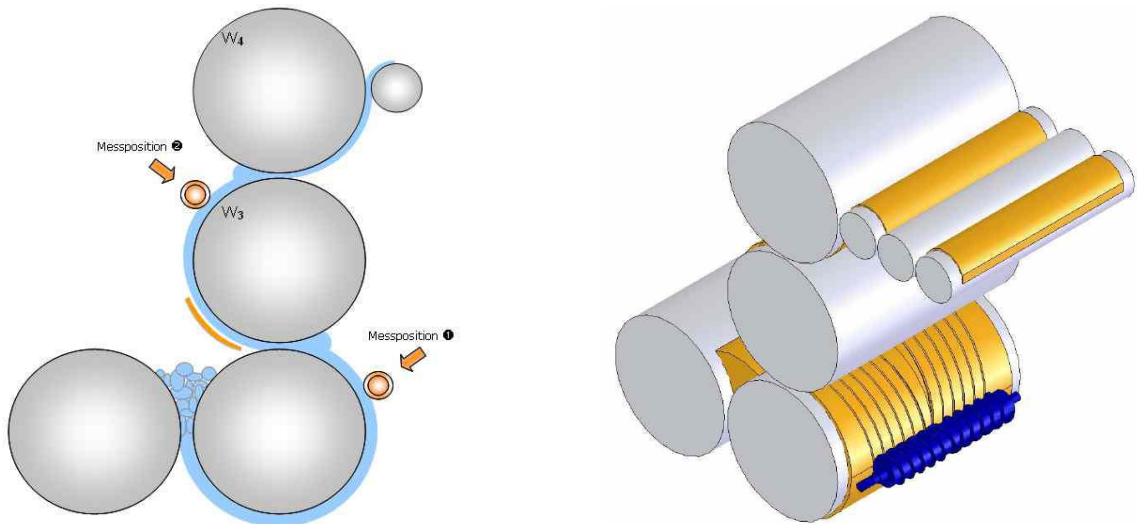


Abb. 3-1: schematische Darstellung der Einbaupositionen und der Schnittlinien von Schneidwalzen



Abb. 3-2: Einbausituation der Schneidwalzen an Kalandernanlagen (li.: Walze 2, re.: Walze 3)

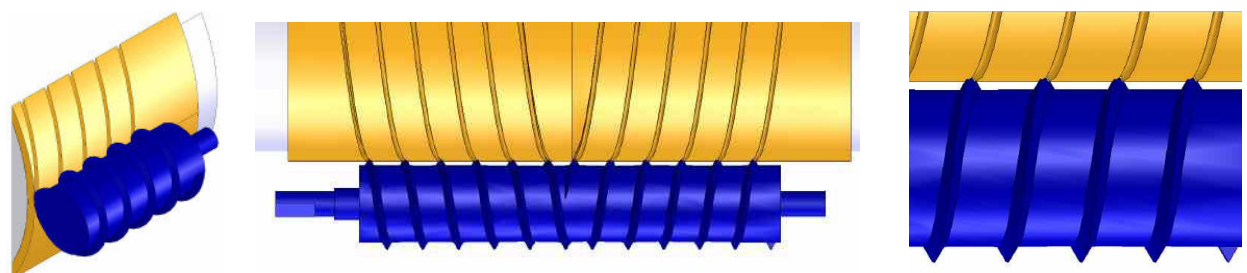


Abb. 3-3: schematische Darstellung der Schnittlinien der Schneidwalze

Die Schneidwalzen des Kalenders befinden sich auf den materialführenden Walzen 2 und 3 der betrachteten 4-Walzen-L-Kalender.

Sie werden über Druckzylinder bis zu einem Anschlag an die Walze angefahren. An den Zylinderaufnahmen befinden sich Lagerbuchsen, die die Schneidwalze aufnehmen und fixieren. Die Schneidwalzen liegen mit ihrem Eigengewicht auf der Kalenderwalze auf oder werden pneumatisch angedrückt und schneiden in das Material, welches sich im plastischen Zustand ($T \approx 180 - 210 \text{ }^{\circ}\text{C}$) befindet. Sie laufen unangetrieben an oder auf der Kalenderwalze mit, ihre Rotationsbewegung wird durch das die Schneidwendel umschließende Material übertragen.

Um für die Bestimmung von Materialeigenschaften notwendige Messgrößen (Drehmoment, Drehzahl) zu erhalten und beeinflussen zu können, wird eine Messeinrichtung unter Verwendung einer Brems- oder Antriebseinheit benötigt. Die Übertragung der Einbausituation von einem Kalender zu einem Versuchsaufbau erfordert den:

- Einsatz einer dimensionsähnlichen Schneidwalze mit Grundkörper und Wendel,
- Einsatz leichtlaufender Lager ohne Einfluss auf die empfindliche Drehmomentmessung,
- Einsatz einer Antriebseinheit für die Bremsung und die Beschleunigung der Messwalze,
- Einsatz einer Drehmomentmesswelle zur Erfassung von Geschwindigkeit und Drehmoment,
- Konstruktion eines variablen Grundgestells zur Anpassung an unterschiedliche Messpositionen des Versuchsstandes vom Walzwerk bis zum Produktionskalender

Entsprechend der beschriebenen Anforderungen werden für den Versuchsstand folgende Komponenten ausgewählt (Abb. 3-4) /84-94/:

- | | |
|----------------------------|---|
| • <i>Untergestell</i> | variable Aluminium Profilbauweise |
| • <i>Lineareinheiten</i> | Spindel-Lineareinheit RK-Compakt |
| • <i>Antriebseinheit</i> | Servomotor DBL2H von Kollmorgen / Danaher mit Alpha Getriebeuntersetzung LP 050-M01-10 |
| • <i>Drehmomentmessung</i> | lagerlose Drehmomentmesswelle T34 ST von HBM zur Erfassung von Drehmoment und Geschwindigkeit |
| • <i>Riemenantrieb</i> | Zahnriemen 1263-3M und Zahnräder |
| • <i>Schneidwalze</i> | Messingwalze, mit einer Drehmaschine gefertigt |

Aufgrund der hohen Temperaturen (ca. 200°C) speziell an der Messstelle müssen Antriebsmotor und Drehmomentmessdose in einer ausreichenden Entfernung von der Messwalze angeordnet werden. So können kritische Erwärmungen und damit verbundene geometrische Änderungen, Messwertfehler und Schäden an der Messelektronik vermieden werden.

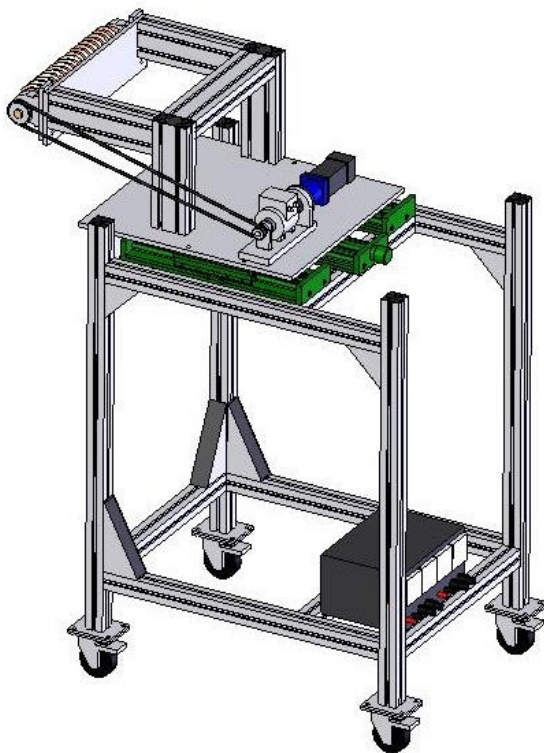


Abb. 3-4: Darstellung des Versuchsstandes

Gewählt wird ein einfaches Untergestell aus Aluminum-Item-Profil auf Rollen für einen einfachen Transport. Die Linearführungen dienen der positionsgenauen Verstellung der Messeinheit. Es werden an den Seiten jeweils zwei Lineareinheiten ohne Spindel zur abweichungsfreien Führung und eine mittig installierte Spindel-Lineareinheit zur Positionierung eingesetzt. Die Schrittweite der Verstellung beträgt $100\text{ }\mu\text{m}$ pro Skalierungsstrich. Somit kann ein definierter Materialkontakt entsprechend einer angenommenen Foliendicke eingestellt werden.

Der eingesetzte Synchron-Servomotor in Verbindung mit einem digitalen Servoverstärker eignet sich besonders für Positionieraufgaben bei Industrie-Robotern, Werkzeugmaschinen, Transferstraßen oder ähnlichen Anwendungen mit hohen Ansprüchen an Dynamik und Standfestigkeit. Die Steuerung des Antriebes wird vollständig softwareseitig übernommen. Neben einfachen Geschwindigkeitsvorgaben lassen sich auch Fahrprogramme mit positiver und negativer Beschleunigung zyklisch oder in unterschiedlicher Kombination am Versuchsstand umsetzen.

Zur Erfassung des Drehmomentes und der Drehzahl wird die Drehmomentmesswelle T 34 FN 40/5 Nm von Hottinger Baldwin Messtechnik gewählt. Diese ist aufgrund ihrer berührungslosen Messwertübertragung für empfindliche Messungen bei höheren Temperaturen und unterschiedlichen Messbedingungen sehr gut geeignet. Für den Antrieb der Schneidwalze wird ein Zahnriemen 1236-3M gewählt. Dieser ist für eine direkte Übertragung des anliegenden Drehmomentes ohne Schlupf oder störendes Winkelspiel über eine weite Strecke sehr gut geeignet und die Entfernung von Messwalze und Drehmomentmessdose kann aufgrund der

hohen Temperaturen am Messgut möglichst weit gehalten werden. Abbildung 3-5 zeigt den schematischen und umgesetzten Aufbau der Messeinheit.

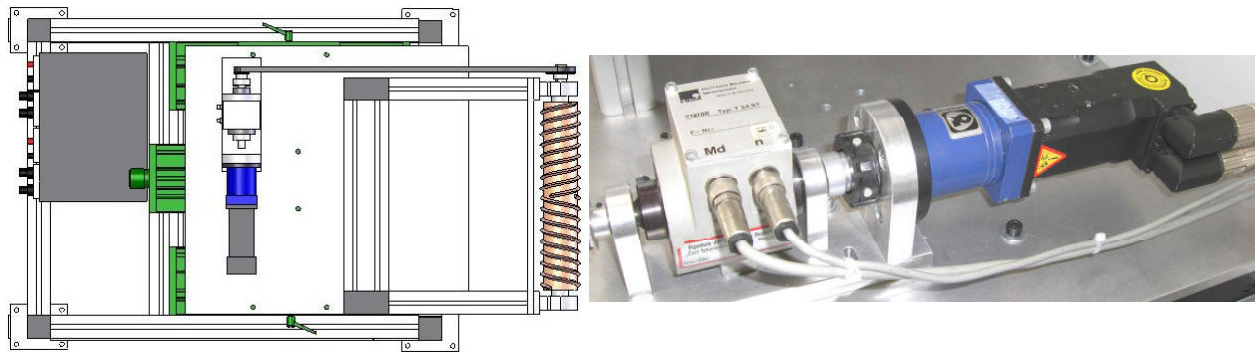


Abb. 3-5: Messeinheit des Versuchstandes (li.) mit Servomotor und Drehmomentmessdose (re.)

Die Schneidwalze ist aus Messing-Vollmaterial gefertigt, die Schneidwendel sind entsprechend der Abb. 3-6 dimensioniert.

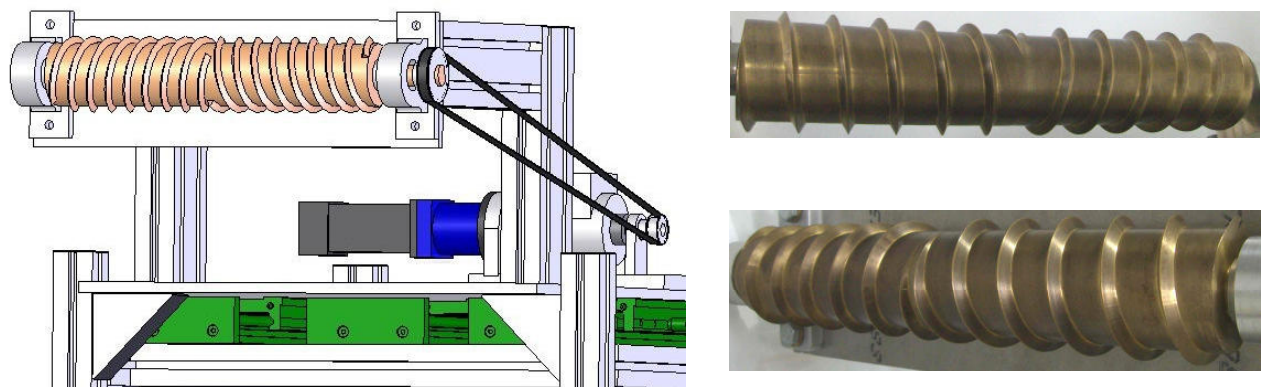


Abb. 3-6: Messwalze des Versuchstandes

Ihre Gestaltung wird analog der am Kalandar integrierten Schneidwalzensysteme übernommen. Höhe, Winkel, Stärke der Wendel und die Anzahl der Wendelgänge können von Kalandar zu Kalandar variieren. Je höher die Anzahl der in das Material eingreifenden Wendel, desto besser ist die Entgasung des Materials im nachfolgenden Walzenspalt. Für die Messung von Kräften und Drehmomenten ist eine möglichst hohe Anzahl an eingreifenden Wendeln sinnvoll. Die umgesetzte Variante des Versuchstandes ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

3.2. Leerlaufdaten des Versuchstandes

Zur Sicherstellung reproduzierbarer Messergebnisse sollte der Versuchsaufbau an unterschiedlichen Zeitpunkten gleiche oder sehr geringe Abweichungen des Drehmomentes ohne Belastung (Rotation der Schneidwalze ohne Materialberührung) aufweisen. Abbildung 3-7 zeigt den Verlauf des belastungsfreien Drehmomentes verschiedener Messreihen über einen Drehzahlbereich von 200 – 2000 U/min. Die Darstellung der Motordrehzahl zur

Walzengeschwindigkeit ist in Abbildung 3-8 abgebildet. Da an Kalandern und Walzwerken grundsätzlich mit der Geschwindigkeitsangabe [m/min] gearbeitet wird, die Steuerung des Versuchsstandes nur in [U/min] möglich ist, lautet die Berechnung der Walzengeschwindigkeit y aus der Motorendrehzahl x für den Versuchsstand:

$$y = 0,0104 \cdot x + 0,0285 \quad (3.1)$$

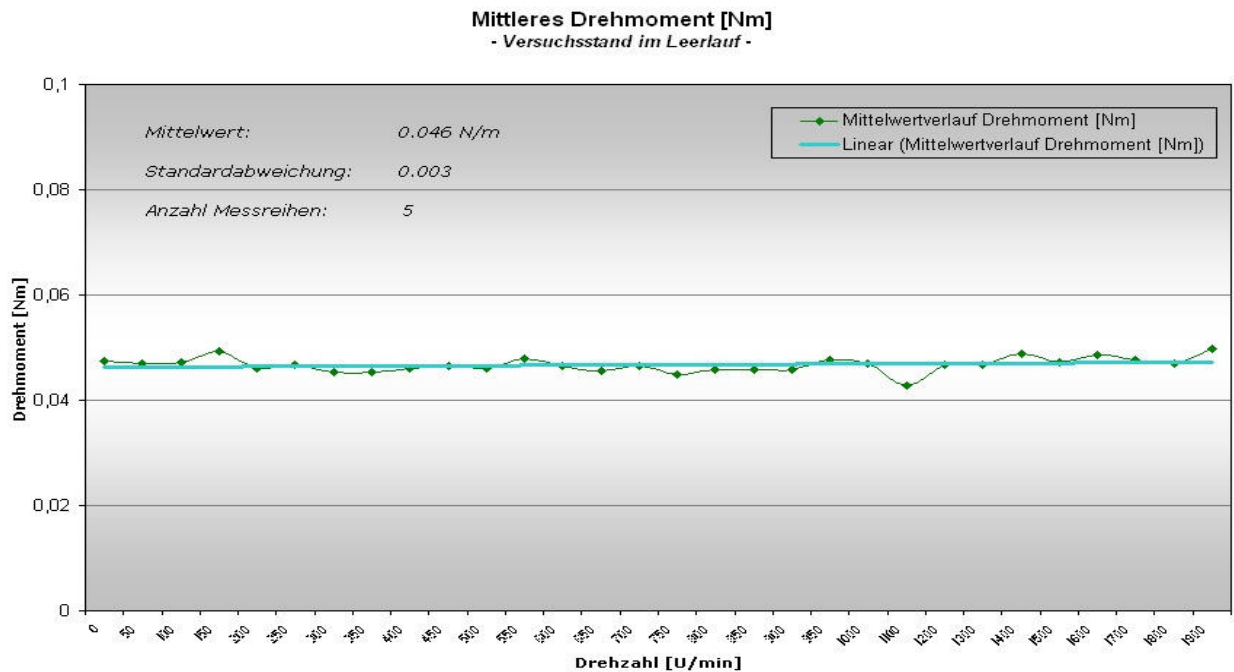


Abb. 3-7: Darstellung des Leerlauf-Drehmomentes

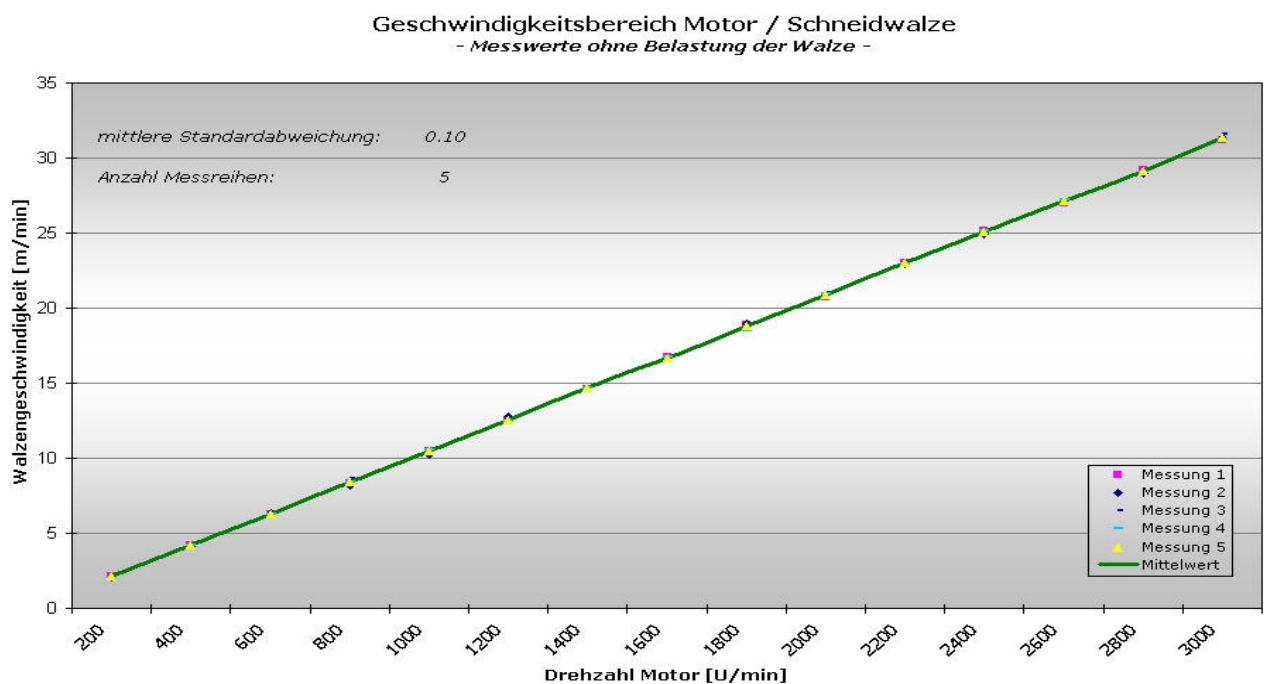


Abb. 3-8: Darstellung von Motorendrehzahl zur Walzengeschwindigkeit

4. Modellierung und Simulation des Deformations- und Schneidprozesses

4.1. Annahmen für das Prozessmodell

Für den Fall einer unsymmetrischen Walzenpaarung und das Einschneiden einer Wendel mit definierter Geometrie in eine Polymerschicht werden folgende Annahmen getroffen:

- laminare und stationäre Strömungsverhältnisse,
- gleiche Materialdicke über Breite und Umfang der Kalandерwalze,
- gleichmäßige Temperaturverteilung ohne Konvektion,
- Wandhaften der Schmelze,
- keine Stick-Slip-Effekte aufgrund der zu erwartenden geringen Beanspruchungen.

Im Weiteren sollen die Strömungsverhältnisse des Kontaktgebietes von Schneidwendel und Polymerschicht untersucht werden. Dabei erfolgt die Festlegung auf ein einfach überprüfbares Prozessmodell, welches Simulationen von theoretischen Annahmen und aufgenommenen Versuchsdaten erlaubt.

4.2. Transportgleichungen

Die Transportgleichungen für die Massen-, die Impuls- und die Energieströme werden ausführlich von Bird, Steward und Lightfoot /95/ hergeleitet und erläutert. Sie sind zum Beispiel auch bei Luther /41/ und Morrison /96/ dargestellt.

Für die Anwendung und Lösung der Transportgleichungen müssen die Materialeigenschaften, z.B. in Form der Material- bzw. Stofffunktionen der rheologischen und thermodynamischen Eigenschaften bzw. die so genannten Stoffgleichungen und ihre materialabhängigen Parameter (Konstanten), bekannt sein. Für die Untersuchung isothermer Vorgänge sind die rheologischen Eigenschaften besonders im Sinne der vorliegenden Arbeit zu betrachten.

4.3. Rheologische Fließgesetze

Zur Berechnung des Strömungsfeldes muss der Zusammenhang zwischen Spannungs- und Deformationszustand bekannt sein. Dieser wird mit rheologischen Modellen beschrieben.

4.3.1. Newtonsche Fluide

Zur Beschreibung der Deformation eines Fluidelements wird der Geschwindigkeitsgradiententensor

$$\underline{\underline{L}} = \begin{pmatrix} \frac{\delta v_x}{\delta x} & \frac{\delta v_x}{\delta y} & \frac{\delta v_x}{\delta z} \\ \frac{\delta v_y}{\delta x} & \frac{\delta v_y}{\delta y} & \frac{\delta v_y}{\delta z} \\ \frac{\delta v_z}{\delta x} & \frac{\delta v_z}{\delta y} & \frac{\delta v_z}{\delta z} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

nach

$$\underline{\underline{L}} = \underline{\underline{D}} + \underline{\underline{W}} = \frac{1}{2}(\underline{\underline{L}} + \underline{\underline{L}}^T) + \frac{1}{2}(\underline{\underline{L}} - \underline{\underline{L}}^T) \quad (4.2)$$

in den symmetrischen Deformationsgeschwindigkeitstensor

$$\underline{\underline{D}} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 2 \frac{\delta v_x}{\delta x} & \left(\frac{\delta v_x}{\delta y} + \frac{\delta v_y}{\delta x} \right) & \left(\frac{\delta v_x}{\delta z} + \frac{\delta v_z}{\delta x} \right) \\ \left(\frac{\delta v_x}{\delta y} + \frac{\delta v_y}{\delta x} \right) & 2 \frac{\delta v_y}{\delta y} & \left(\frac{\delta v_y}{\delta z} + \frac{\delta v_z}{\delta y} \right) \\ \left(\frac{\delta v_x}{\delta z} + \frac{\delta v_z}{\delta x} \right) & \left(\frac{\delta v_y}{\delta z} + \frac{\delta v_z}{\delta y} \right) & 2 \frac{\delta v_z}{\delta z} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

und den antisymmetrischen Drehgeschwindigkeitstensor

$$\underline{\underline{W}} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & \left(\frac{\delta v_x}{\delta y} - \frac{\delta v_y}{\delta x} \right) & \left(\frac{\delta v_x}{\delta z} - \frac{\delta v_z}{\delta x} \right) \\ \left(\frac{\delta v_y}{\delta x} - \frac{\delta v_x}{\delta y} \right) & 0 & \left(\frac{\delta v_y}{\delta z} - \frac{\delta v_z}{\delta y} \right) \\ \left(\frac{\delta v_z}{\delta x} - \frac{\delta v_x}{\delta z} \right) & \left(\frac{\delta v_z}{\delta y} - \frac{\delta v_y}{\delta z} \right) & 0 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

aufgeteilt. Mit dem Deformationsgeschwindigkeitstensor $\underline{\underline{D}}$ wird der Deformationsprozess beschrieben. Für ein inkompressibles Newtonsches Fluid ist der Extraspannungstensor $\underline{\underline{\tau}}$ in Gl. (4.5) dem Deformationsgeschwindigkeitstensor $\underline{\underline{D}}$ proportional. Das rheologische Fließgesetz, welches den Extraspannungstensor $\underline{\underline{\tau}}$ in den Impulsbilanzgleichungen beschreibt, lautet für ein inkompressibles Fluid mit Newtonschem Fließverhalten:

$$\underline{\underline{\tau}} = \eta \cdot (2 \underline{\underline{D}}) \quad (4.5)$$

Die Viskosität η ist auf experimentellem Wege zu ermitteln und beschreibt als Parameter das Fließverhalten. Sie ist temperatur- und druckabhängig (die Druckabhängigkeit wird meist vernachlässigt).

4.3.2. Nichtlineare viskose Fluide

Polymerschmelzen werden durch die Einführung einer Viskositätsfunktion beschrieben. Im mehrdimensionalen Deformationsprozess wird sie als Funktion der drei Invarianten des Deformationsgeschwindigkeitstensors formuliert. Für inkompressible Fluide und eine einfache Scherströmung sind die erste Invariante $I_1 = 0$ und die dritte Invariante $I_3 = 0$.

Als Maß für den Deformationsprozess wird die zweite Invariante I_2 des Deformationsgeschwindigkeitstensors $\underline{\underline{D}}$ genutzt.

$$I_2(\underline{\underline{D}}) = \frac{1}{2}[\text{tr}^2(\underline{\underline{D}}) - \text{tr}(\underline{\underline{D}}^2)] \quad (4.6)$$

Für ingenieurtechnische Anwendungen wird als gute Näherung das Fließgesetz nach Ostwald-de-Waele wie folgt definiert:

$$\underline{\underline{\tau}} = K \left| I_2(2 \underline{\underline{D}}) \right|^{(n-1)/2} (2 \underline{\underline{D}}) \quad (4.7)$$

K ist der Konsistenzfaktor und n der Fließexponent. Für PVC-Schmelzen gilt $n < 1$ und die Viskosität sinkt mit der Deformationsgeschwindigkeit. Für die einfache Scherströmung lautet die zweite Invariante des Deformationsgeschwindigkeitstensors:

$$\left| I_2(2 \underline{\underline{D}}) \right| = \dot{\gamma}^2 \quad (4.8)$$

Damit ergibt sich die bekannte Form des Potenzgesetzes zu:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad \text{oder} \quad \eta = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (4.9)$$

Der Konsistenzfaktor K wird in verschiedenen Schreibweisen oder Bezeichnungen verwendet. Oftmals werden für K auch k, Φ oder μ geschrieben. Mathematisch korrekt für positive und negative $\dot{\gamma}$ -Werte ist:

$$\tau = K \cdot \left| \dot{\gamma}^{n-1} \right| \cdot \dot{\gamma} \quad (4.10)$$

In der vorliegenden Arbeit wird die Bezeichnung μ für den Konsistenzfaktor verwendet und als temperaturabhängiger Potenzgesetz-Ansatz die folgende Schreibweise eingeführt:

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}^n \quad \text{mit} \quad \mu = \mu_0 \cdot e^{-b(T-T_0)} \quad (4.11)$$

Ein Stoffmodell, das sowohl den strukturviskosen als auch den Newtonschen Bereich beschreiben kann, ist der dreiparametrische Ansatz von Carreau, der für viele Polymere über einen breiten Schergeschwindigkeitsbereich das Viskositätsverhalten gut darstellt:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{A}{(1 + B \cdot \dot{\gamma})^C} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{(1 + (k \cdot \dot{\gamma})^2)^{\frac{n}{2}}} \quad (4.12)$$

Hierbei beschreibt A die Nullviskosität η_0 , B die reziproke Übergangsschergeschwindigkeit und C die Steigung der Viskositätskurve im strukturviskosen Bereich (für $\dot{\gamma} \gg B^{-1}$, analog zu 1-n im Potenzansatz).

Bekannt ist, dass für thermorheologisch einfache Polymerschmelzen die Viskositätskurven in eine einzige temperaturunabhängige Masterkurve überführt werden können, indem die Viskosität durch den η_0 -Wert der entsprechenden Temperatur dividiert und die Schergeschwindigkeit mit η_0 multipliziert wird. Diese Zeit-Temperatur-Verschiebung führt zur Auftragung der reduzierten Viskosität $\frac{\eta}{\eta_0}$ über der Größe $\eta_0 \cdot \dot{\gamma}$. Man erhält somit eine einzige

für das Polymere charakteristische Funktion:

$$\frac{\eta(\dot{\gamma}, T)}{\eta_0(T)} = f(\eta_0(T) \cdot \dot{\gamma}) \quad (4.13)$$

Die Temperatur T ist hierbei als Bezugsgröße frei wählbar. Bei bekannter Masterkurve zur Bezugstemperatur T_0 ergibt sich der Temperaturverschiebungsfaktor a_T zu:

$$a_T = \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_0)} \quad \text{bzw.} \quad \lg a_T = \lg \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_0)} \quad (4.14)$$

$\lg a_T$ ist dabei die Strecke, um die die Viskositätskurve der Bezugstemperatur T_0 jeweils in Richtung der Koordinatenachsen verschoben werden muss.

Zur Berechnung des Temperaturverschiebungsfaktors existieren verschiedene Ansätze, die beiden wichtigsten und am häufigsten genutzten sind der Arrhenius-Ansatz und die WLF-Gleichung.

Der Arrhenius-Ansatz lässt sich aus Betrachtungen eines rein thermisch aktivierten Platzwechselprozesses von Molekülen herleiten:

$$\lg a_T = \lg \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_0)} = \frac{E_0}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (4.15)$$

Dabei sind E_0 die materialspezifische Fließaktivierungsenergie (J/mol) und R die universelle Gaskonstante mit $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$. Der Arrheniusansatz eignet sich insbesondere zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität von teilkristallinen Thermoplasten. Die WLF-Gleichung, die auf der Grundlage des freien Volumens aufbaut, wurde zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit von Relaxationsspektren entwickelt, auf die Viskosität übertragen:

$$\lg a_T = \lg \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_S)} = - \frac{c_1 \cdot (T - T_S)}{c_2 + (T - T_S)} \quad (4.16)$$

Diese Beziehung verknüpft die Viskosität $\eta(T)$ bei einer gesuchten Temperatur T mit der Viskosität bei der Standardtemperatur T_S bei konstanter Schubspannung. Für $T_S \approx T_E + 50^\circ\text{C}$ - mit T_E als Erweichungstemperatur - kann man für die meisten Polymerschmelzen mit hinreichender Genauigkeit $C_1 = -8,86$ und $C_2 = 101,6$ annehmen [97].

4.4. Entwicklung der Prozessmodelle

Ziel der nachfolgend beschriebenen Prozessmodelle ist die schrittweise Untersuchung aller einwirkenden Kräfte auf die in das Polymer eingreifende Schneidwendel.

Dafür wird, dem gewählten Versuchsaufbau entsprechend, eine Walzenpaarung benutzt, deren minimaler Spalt nicht vollständig gefüllt ist und nachfolgende Randbedingungen erfüllt:

- glatte Oberflächen des Walzenpaares,
- die Materialschicht, die aus dem vorigen Spalt übergeben wird, besitzt eine kleinere Dicke als der Abstand von Schneidwalzenkern und Kalandervalze,
- das Eindringen der Wendel in die Polymerschicht erfolgt ohne die Bildung eines Materialwulstes bzw. nur mit der Bildung eines kleinen Materialwulstes.

Für die quantitative Beschreibung der Wechselwirkung der Schneidwalze mit der Materialschicht sind bisher keine Lösungen bekannt.

4.4.1. Prozessmodell: Schneiden der Wendel

Im Folgenden wird ein definiertes Eindringen und Heraustreten der Schneidwendel in und aus der Materialschicht bei gleichzeitigem synchronen Verschieben mit der Oberfläche der Kalandervalze beschrieben.

Betrachtet wird das Kontaktgebiet der Schneidwendel mit dem Polymer, dargestellt in planarer Form, in Abb. 4-1 und 4-2.

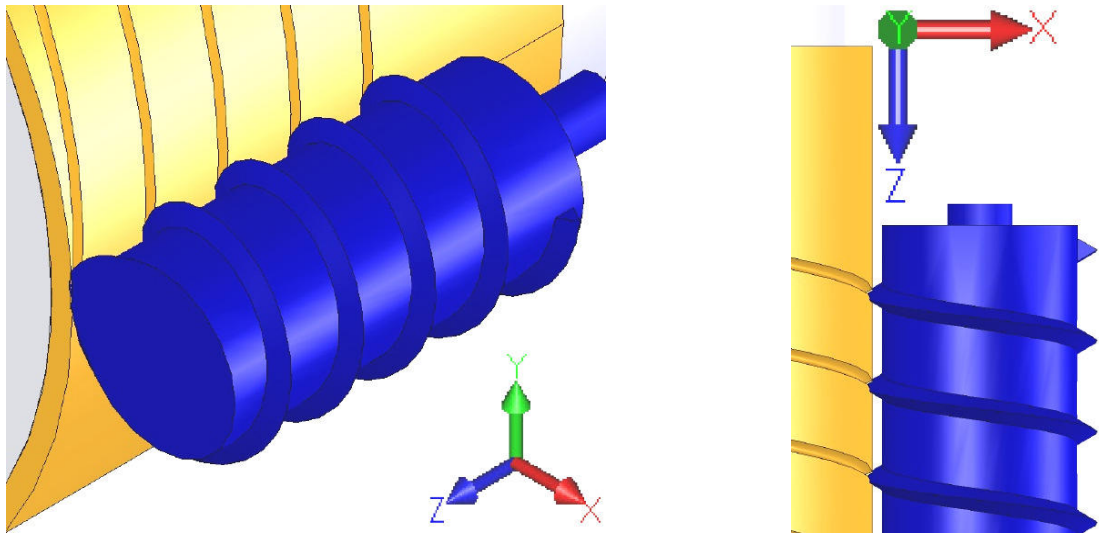


Abb. 4-1: Definition der Koordinatenrichtung (x, y, z)

Die allgemeine Darstellung der Objektkoordinaten lautet in kartesischer Form:

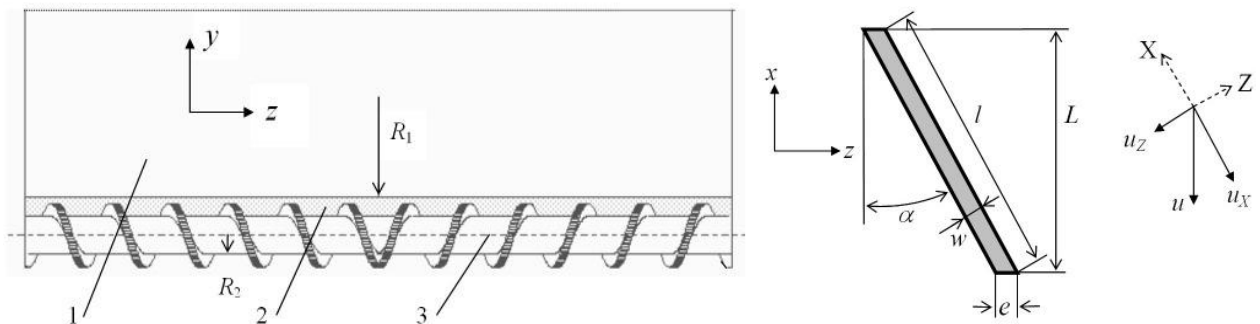


Abb. 4-2: Projektion der Oberfläche des Kontaktes der Wendel mit dem Material in der xz-Ebene des Arbeitsspalt (li.: x, y, z $\Rightarrow$ re.: X, Y, Z)

x ... Koordinate in Bewegungsrichtung der Polymerschicht im minimalen Spalt zwischen den Walzen
 z ... axiale Koordinate der Walze e ... Dicke (Stärke) der Schneidwendel in Richtung der Walzenachse
 α ... Winkel des Wendelganges L ... Länge des Kontaktes der Wendel mit dem Polymer in Umfangsrichtung
 (Richtung der X-Achse) l ... Kontaktstrecke in Längsrichtung der Wendel

Die Materialschicht auf der Kalandervalze mit dem Radius R_1 besitzt die Geschwindigkeit v_1 .
 Die Spitze der Wendel hat die Lineargeschwindigkeit:

$$u_f = u_2 \cdot \left(1 + \frac{H_f}{R_2} \right) \quad (4.17)$$

Wobei u_2 die lineare Geschwindigkeit der Drehung des Schneidwalzengrundkörpers und R_2 der Radius dieser Oberfläche sind. H_f ist die Höhe der Wendel.

Die Materialschicht, die aus dem vorherigen Kalanderspalt übergeben wird, strömt gleichförmig und konstant in den Spalt $H(x)$ zwischen Wendelgrundkörper und der Kalandervalze mit dem Radius R_1 und bildet die Schicht H_p .

Das Eindringen der Wendel in das Innere der Materialschicht erfolgt im Streckenabschnitt:

$$l = \frac{L}{\cos \alpha} \quad (4.18)$$

Hier besteht die Beziehung zwischen Kontaktlänge l und ihrer Breite w mit:

$$w = e \cdot \cos \alpha \quad (4.19)$$

Über die Koordinate X lässt sich der Raum zwischen den Wendelstegen und dem Walzenrund als Fläche betrachten.

In früheren Arbeiten von Kohlert, Krassovskij u. a. /30, 74, 98, 99/ wurden Modelle entwickelt, welche verbessert und im Weiteren genutzt werden.

Die Verdrängung des Materials aus dem Spalt erfolgt vorzugsweise an der Seite der kleinsten Breite des Wendelkontaktes als Strömung in Längsrichtung der Wendel. Sie wird als drucklose Blockströmung angenommen. Die Geschwindigkeit dieser Längsströmung wird in der Formel 4.20 dargestellt, wobei das Koordinatensystem im Kontaktgebiet X, Y, Z ist:

$$v_x = \frac{u_f + u_1}{2} \cdot \cos(\alpha) \quad (4.20)$$

Ein Weg zur Einschätzung der Wechselwirkung der Walze mit dem Material ist die Bestimmung der Leistung der Kräfte, die an der Oberfläche der Wendel wirken. Die Berechnung dieser Leistung lässt sich mit der Beschreibung des Geschwindigkeitsfeldes des Materials im Kontaktgebiet und des Spannungsfeldes realisieren.

Im Falle von gleichlaufenden Walzen ergibt sich u_f zu:

$$u_f = u_1 = u \quad (4.21)$$

Die Berechnung der Scherspannungen an der Oberfläche der Berührungszone erfolgt in Längsrichtung der Wendel und in ihrer Breitenrichtung w und werden als kleine Größen vernachlässigt.

Die Normalspannungen σ_y lassen sich unter Annahme einer Normalspannungsdifferenz im lokalen kartesischen Koordinatensystem X, Y, Z bestimmen. Bei reiner Schleppströmung in Längsrichtung ist die Geschwindigkeit der logarithmischen Deformation in X -Richtung:

$$\dot{\epsilon}_x = 0 \quad (4.22)$$

Die Deformationsgeschwindigkeit in Richtung der Spalthöhe bestimmt sich nach:

$$\dot{\epsilon}_Y = \frac{dH}{HdX} \cdot \frac{dX}{dt} \quad \text{mit} \quad v_X = \frac{dX}{dt} \quad (4.23)$$

Wobei t die Zeit und v_X die lineare Längsgeschwindigkeit der Strömung sind. Im gegebenen Fall ist die Randgeschwindigkeit:

$$u_X = u_f \cos \alpha \quad (4.24)$$

Die analytische Formel für die Fließkurve $\tau(\dot{\gamma})$, die nach der Bearbeitung der Viskosimeterdaten erhalten wird, wird als Funktion $\sigma_Y(\dot{\epsilon}_Y)$ auf der Grundlage des Postulates von Iljuschin /100/ über die Proportionalität des Deviators des Spannungstensors D_S und dem Deviator des Deformationsgeschwindigkeitstensors $\dot{D}_D$ umgewandelt.

Ausgangsannahme ist das Potenzgesetz:

$$\tau = \mu \cdot |\dot{\gamma}^{n-1}| \cdot \dot{\gamma} \quad \text{für} \quad \pm(\dot{\gamma}) \quad (4.25)$$

Gleichzeitig ist die analoge Funktion zwischen den quadratischen Invarianten I_σ und I der entsprechenden Tensoren der Spannung T_S und der Deformationsgeschwindigkeiten $\dot{T}_D$:

$$I_\sigma = \mu \cdot I^n \quad (4.26)$$

Dabei werden die Deviatoren D_S und $\dot{D}_D$ durch Subtraktion ihrer arithmetischen Mittelwerte von den Komponenten der Hauptdiagonalen der Tensoren gebildet. Die quadratischen Invarianten besitzen folgende allgemeine Form:

$$I_\sigma = \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2} \quad (4.27)$$

$$I = \sqrt{\frac{2}{3} [(\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y)^2 + (\dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_z)^2 + (\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_z)^2] + \dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{yz}^2 + \dot{\gamma}_{xz}^2} \quad (4.28)$$

In Formel 4.29 ist $\dot{\epsilon}$ die Geschwindigkeit der logarithmischen Deformation des Materials.

$$\dot{\epsilon} = \frac{dl}{l dt} \quad (4.29)$$

Nach dem Postulat von Iljuschin wird das Modell des strukturviskosen und thermoplastischen Materials in folgender Beziehung ausgedrückt:

$$D_S = \frac{2I_\sigma}{I} \dot{D}_D \quad (4.30)$$

Auf dieser Basis wird der ebene Spannungszustand des Volumenelementes $w \times H \times dX$ der Strömung im Kontaktgebiet mit der Wendel in Komponentendarstellung von Spannungstensor T_S und Deformationsgeschwindigkeitstensor $\dot{T}_D$ beschrieben:

$$T_S = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} ; \quad \dot{T}_D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{e}_y & 0 \\ 0 & 0 & \dot{e}_z \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Damit besitzen die Deviatoren D_S und $\dot{D}_D$ folgende Form:

$$D_S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_y}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\sigma_y}{2} \end{bmatrix} ; \quad \dot{D}_D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{e}_y & 0 \\ 0 & 0 & -\dot{e}_y \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Die Proportionalität der Deviatoren ergibt die Beziehung:

$$\sigma_y = 2 A \dot{e}_y \quad (4.33)$$

Wobei der Proportionalitätsfaktor A durch die Beziehungen der quadratischen Invarianten ausgedrückt wird. Somit folgt aus Gleichung 4.26:

$$I_\sigma / I = \mu \cdot I^{n-1} \quad (4.34)$$

D. h. die Beziehung zwischen den Invarianten wird durch eine Invariante I ausgedrückt. Für den Fall des ebenen Spannungszustandes gilt:

$$I = 2 \cdot |\dot{e}_y| \quad (4.35)$$

Für die Normalspannung an der Kontaktoberfläche von Materialschicht und Schneidwendel ergibt sich folgende Berechnungsformel:

$$\sigma_y = 4 \mu \cdot |2 \dot{e}_y|^{n-1} \dot{e}_y \quad (4.36)$$

Darin wird Gleichung 4.23 mit der ersten Ableitung dH / dX genutzt.

Die Leistung der Deformation ergibt:

$$N = \sigma_y \dot{e}_y = \mu \cdot |2 \dot{e}_y|^{n+1} \quad (4.37)$$

Für die Bestimmung des Leistungsaufwandes für den Volumenstrom im Kontaktgebiet folgt durch Integration nach der Koordinate X:

$$N_v = w \int_0^l NHdX \quad (4.38)$$

Mit Gleichung 4.38 lässt sich die Wechselwirkung zwischen Schneidwende und Materialschicht für den Fall einer gleichen Umfangsgeschwindigkeit von Schneidwende und Oberfläche der Kalandervalze, also einem reinen Schneiden, berechnen.

4.4.2. Prozessmodell: Schneiden und Scherung an der Wende

Im Fall der Friktion von Schneid- und Kalandervalze erfolgt weiter die Berechnung der Entwicklung von Scherspannungen an der Oberfläche des Kontaktes der Schneidwende mit der Materialschicht. Bei Walzenfriktion tritt eine Differenz der Geschwindigkeiten u_f und u_1 und eine Differenz ihrer Projektionen in den Achsenrichtungen X und Z im Kontaktgebiet auf. Im Ergebnis entstehen Schubspannungen in Richtung der genannten Achsen an der Oberfläche der Schneidwende. Somit lässt sich ein Spannungszustand des Materials, das sich zwischen der Spitze der Schneidwende und der Oberfläche der Kalandervalze befindet, beschreiben.

Die Deviatoren von Spannung und Deformationsgeschwindigkeit bekommen folgendes Aussehen:

$$D_S = \begin{bmatrix} 0 & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \frac{\sigma_y}{2} & \tau_{yz} \\ 0 & \tau_{yz} & -\frac{\sigma_y}{2} \end{bmatrix}; \quad \dot{D}_D = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{xy} & 0 \\ \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{xy} & \dot{e}_y & \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{yz} \\ 0 & \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{yz} & -\dot{e}_y \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Die quadratische Invariante des Deformationsgeschwindigkeitstensors (2. Invariante) besitzt folgendes Aussehen:

$$I = \sqrt{4\dot{e}_y^2 + \dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{yz}^2} \quad (4.40)$$

Für die gesuchten Spannungen ergeben sich folgende Ausdrücke:

$$\tau_{xy} = \mu I^{n-1} \dot{\gamma}_{xy}; \quad \tau_{yz} = \mu I^{n-1} \dot{\gamma}_{yz}; \quad \sigma_y = 4\mu I^{n-1} \dot{e}_y \quad (4.41)$$

mit $\mu = \mu_0 \cdot e^{-b(T-T_0)}$.

Die Gesamtleistung folgt:

$$N_{xyv} = \omega \int_0^l N_{xy} HdX \quad (4.42)$$

4.4.3. Prozessmodell: Schneiden, Scherung und Strömung an der Wendel

Bei vorhandener Friktion zeigt sich ein Effekt des Auflaufens der Materialschicht, wie es bei der Schmierung in Gleitlagern oder als Wulst beim Einlauf einer Schicht in ein Walzwerk vorliegt. Dieser Vorgang wurde mit einem Näherungsverfahren bei der Analyse der Walzenverarbeitung von Polymermaterialien gelöst /99/. In diesem Fall wird die Auflaufgeschwindigkeit der Fläche durch den Ausdruck

$$\Delta u_z = |u_f - u_1| \sin \alpha \quad (4.43)$$

bestimmt. Die Haupteinflussgröße für den Widerstand bei der Strömung durch den Spalt ist die variable Höhe $H(X)$ im Kontaktgebiet. Ein vereinfachtes Schema ist in Abb. 4-3 dargestellt.

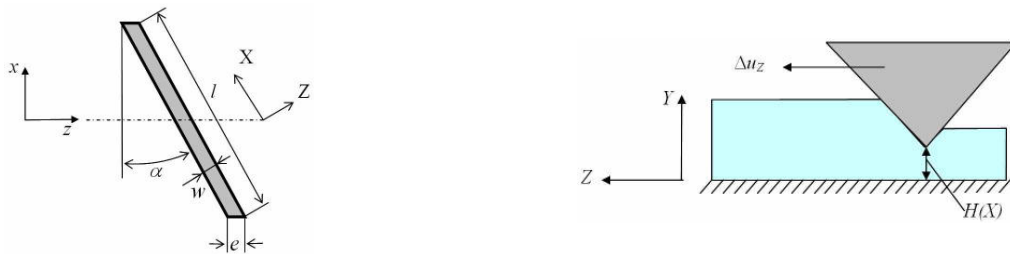


Abb. 4-3: Auflaufen eines Keils auf der Polymerschicht auf einer festen Unterlage

Die Bewegung der dargestellten schiefen Ebene entlang der Z-Achse berücksichtigt den Einfluss der seitlichen Flächen der Wendel als Zusatzleistung.

Die angenommene ebene Strömung, die in Richtung der Z-Achse der Kontaktfläche wirkt, ist in Abbildung 4-2 (Seite 40) dargestellt. Als Näherung werden die Berechnungsgleichungen der ebenen unsymmetrischen isothermen Strömung nach /30/ gewählt.

- Berechnungsgleichung mit dem gesuchten Kern

$$\phi = \frac{1}{\beta} \left[\beta \left(\frac{1}{n} + 1 \right) (L + 2) / L + 1 \right] \quad (4.44)$$

- Gleichung für den Gradienten des spezifischen Druckes

$$\frac{dp}{dz} = - \frac{k \zeta}{h} \quad (4.45)$$

- Gleichung für die Wandscherspannungen

$$\tau_d = k \zeta (1 + 1 / \beta) ; \tau_u = -k \zeta (1 - 1 / \beta) \quad (4.46)$$

- Gleichung für die Zwischenvariablen

$$\Phi = \left(\frac{1}{n} + 2 \right) \cdot \frac{u_u + u_d - Q/h}{u_u - u_d} \quad (4.47)$$

$$L = \left| \frac{\beta - 1}{\beta + 1} \right|^{\frac{1}{n} + 1} - 1 \quad (4.48)$$

$$k = \mu \left| \frac{u_u - u_d}{h} \left(\frac{1}{n} + 1 \right) \right|^n \operatorname{sign} (u_u - u_d) \quad (4.49)$$

$$\zeta = \frac{\beta}{|\beta + 1|} \cdot \left| \frac{\beta / (\beta + 1)}{L(\beta)} \right|^n \quad (4.50)$$

Wobei u_d und u_u lineare Geschwindigkeiten an der gegenüberliegenden Materialgrenze der Strömung und τ_d und τ_u die Wandscherspannungen sind.

Für die Berechnung der Druckströmung wird Wandhaften vorausgesetzt.

Die Geschwindigkeit der sich verschiebenden Oberflächen wird als gleich der Differenz Δu_z der Projektion der Umfangsgeschwindigkeiten der Walzen in Richtung der Z-Achse angenommen. Die Berechnung der aufzuwendenden Leistung erfolgt durch Integration (nach der Fläche der Projektion des Kontaktes) des Produktes der Wandschubspannungen mit der Differenz Δu_z der Wandgeschwindigkeiten. In jedem Integrationszyklus nach X wird der Aufbau eines spezifischen Druckes $p(Z)$ angenommen. Die Intensität $\partial Q_z / \partial X$ des Volumendurchsatzes wird berechnet, bis folgende Randbedingungen übereinstimmen:

- $p = 0$ am Eintrittsquerschnitt der Polymerschicht in den Spalt $H(Z)$ und
- $p = 0$ im Querschnitt des Spaltabschlusses bei Ausgang der Strömung an der Spitze der Wendel (Rippe) bei $H(Z) = H(X)$.

Bei endlicher Dicke der Wendel gibt es an ihrer Spitze den Aufbau von $p(Z)$, der sich nach Gleichung 4.45 im Gebiet des konstanten Spaltes $H(X)$ ausbreitet.

Auf der Grundlage der Analyse der energetischen Wechselwirkung werden die oben angegebenen Berechnungsgleichungen genutzt, die sich auf den Fall der ungleichen linearen Drehgeschwindigkeiten u_f und u_1 bezüglich der Oberflächen der Kalandermalze und der Höhe der Schneidwendel beziehen.

Die Scherdeformationsgeschwindigkeiten werden als konstant in Richtung der variablen Spalthöhe H in Bezug auf das vorausgesetzte lineare Geschwindigkeitsprofil der Materialverschiebung in Richtung der X- und Z-Achse des Kontaktgebietes angenommen.

Dafür gelten folgende Formeln:

$$\dot{\gamma}_{XY} = \frac{u_f - u_1}{H} \cdot \cos \alpha ; \quad \dot{\gamma}_{YZ} = \frac{u_f - u_1}{H} \cdot \sin \alpha \quad (4.51)$$

Für $\dot{\epsilon}_Y$ gilt wie vorher Formel 4.23.

Für den Leistungsaufwand, der durch die Normalspannungen entsteht, gilt:

$$N_Y = \sigma_Y \dot{\epsilon}_Y = \mu_0 \cdot e^{-b(T-T_0)} \cdot I^{n-1} \cdot \dot{\epsilon}^2 \quad (4.52)$$

Für die Bestimmung des Leistungsaufwandes der Strömung zwischen den Flächen der Wendel und der Oberfläche der Kalandervalze im Kontaktgebiet mit dem Material folgt diese Größe durch Integration nach der Koordinate X:

$$N_{YV} = w \int_0^l N_Y H dX \quad (4.53)$$

Es folgt weiter die Berechnung des Leistungsaufwandes durch die Scherkräfte, die mit der Längsscherströmung entlang der Flächen der Schneidwendel im Kontaktgebiet verbunden sind.

$$N_{XY} = \tau_{XY} \dot{\gamma}_{XY} = \mu_0 \cdot e^{-b(T-T_0)} \cdot I^{n-1} \dot{\gamma}_{XY}^2 \quad (4.54)$$

Für die Gesamtleistung folgt:

$$N_{XYV} = w \int_0^l N_{XY} H dX + N_{YZV} = w \int_0^l N_{YZ} H dX \quad (4.55)$$

4.5. Simulationsrechnungen mit den Prozessmodellen

Entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise zur Ermittlung der im Kontaktgebiet zwischen Material und Schneidwendel entstehenden Leistung wird ein gemeinsam mit der TU St. Petersburg /99/ entwickeltes Rechenprogramm eingesetzt. Dieses gestattet die Simulation verschiedener Parameter unter Verwendung der in den Abschnitten 4.4.1. bis 4.4.3. beschriebenen Algorithmen.

Die Berechnung der erforderlichen Leistung der Scherströmung in Beziehung zur Schneidwendel wird nach der Formel des Analogiemodells ausgeführt (4.56). Sie führt den Integrationsvorgang der entstehenden Wandscherspannungen auf die sich bildenden Wandschergeschwindigkeiten der Verschiebung der Schneidwendel in Bezug zur Unterlage aus. Die Integration erfolgt über das Kontaktgebiet der Wendel mit der Materialschicht. Alle Wandscherspannungen und Wandschergeschwindigkeiten sind Funktionen der Koordinaten X und Z.

Das Profil des spezifischen Druckes wird für die Berechnung der entstehenden Trennkräfte benutzt. Ebenfalls wird definiert, dass die zwei berechneten entstehenden Schneidkräfte nach dem Prinzip der Additivität wirken und sich gegenseitig nicht beeinflussen.

Mit Hilfe der vorliegenden Berechnungsprogramme CUT1 und CUT2 kann somit der Einfluss verschiedener Geschwindigkeiten und Friktionen der Walzenpaare und des Charakters der Schneidwalze auf die Energieaufwände beim Eindringen der Wendel in die Polymerschicht auf der Kalandervalze abgebildet werden.

4.5.1. Simulationsparameter

Mit den beschriebenen Programmen (CUT1 und CUT2) werden die Eckpunkte möglicher Einstelldaten simuliert. Die Grunddaten beziehen sich auf typische PVC-U-Kalanderdaten. Es werden jeweils zwei Parameter verändert, die in der Versuchsdurchführung Einfluss auf die Ergebnisse der Drehmomentmessung nehmen können.

Die Parameter simulieren einen sehr weiten Bereich, welcher im Versuchsmaßstab erreichbar, aber im Produktionsmaßstab nicht realisierbar ist. Für die weiteren Modellierungen sind bei dem zu untersuchenden PVC-U und der zu übertragenden Kalandereinstellung Eindringtiefen bis maximal 3 mm, Friktionen bis maximal 10 m/min und Temperaturdifferenzen von 20 Kelvin für eine Rezeptur realistisch.

Die für die Berechnungsprogramme (CUT1 und CUT2) verwendeten Variablen werden im Anhang Seite A20 tabellarisch aufgeführt.

4.5.2. Simulation: Schneiden der Wendel

4.5.2.1. Schneiden eines Rechteckprofiles

In einem ersten Schritt wird zu einer Überprüfung des Modells ein Rechteckprofil verwendet, welches mit einer breiten geraden Grundfläche in die Polymerschicht schneidet. Es werden folgende Größen angenommen:

- | | | |
|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| • $v_1 = v_2 = 20 \text{ m/min}$ | • $H_{FI} = 6 \text{ mm}$ | • $W_{FL} = 5 \text{ mm}$ |
| • $T = 205 \text{ °C}$ | • $e_{FI} = 5 \text{ mm}$ | • $H_{in} = 5 \text{ mm}$ |

Abb. 4-4 stellt beispielhaft den Verlauf der Integrationspunkte an der Stelle X für $H(X)$ dar.

In Tabelle 4-2 sind die summierten Leistungen der Wechselwirkung der Schneidwalze entlang der Walzenlänge unter der Berücksichtigung der Schichtdicke des Polymers dargestellt.

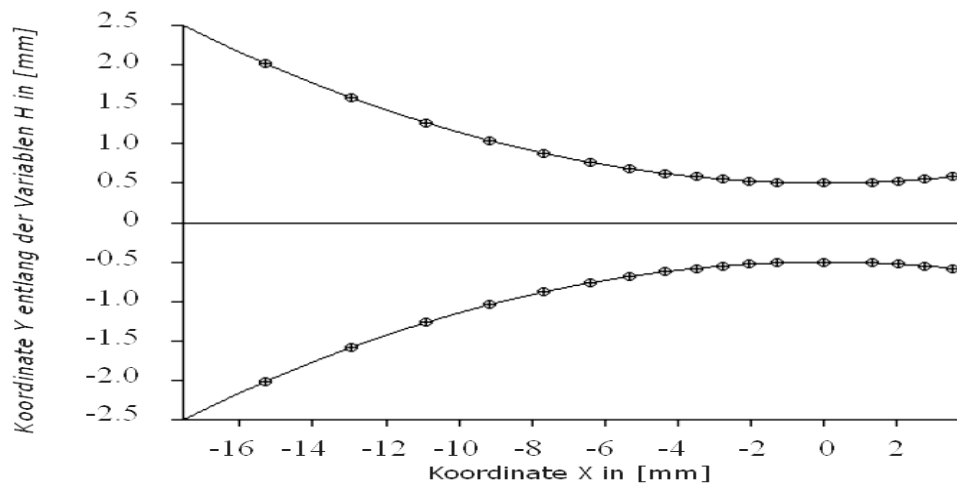


Abb. 4-4: Verlauf der Integrationsschritte für eine Schichtdicke von 2 mm

x	p	H	Q	$\dot{\epsilon}_\gamma$	σ_γ	N	N_V	τ
-15,9	0	5,00	16,67	22,0	210,3	4,64	0,000	0
-14,4	0	4,45	14,84	22,3	210,9	4,71	0,144	0
-12,8	0	3,96	13,19	22,4	211,0	4,72	0,275	0
-11,3	0	3,52	11,72	22,1	210,5	4,66	0,391	0
-9,8	0	3,13	10,43	21,4	209,1	4,48	0,493	0
-8,2	0	2,80	9,33	20,1	206,5	4,15	0,579	0
-7,4	0	2,65	8,82	19,1	204,4	3,91	0,617	0
-6,6	0	2,51	8,37	17,9	201,8	3,61	0,652	0
-5,8	0	2,39	7,97	16,5	198,4	3,26	0,682	0
-4,9	0	2,29	7,63	14,7	194,1	2,86	0,707	0
-4,1	0	2,20	7,33	12,8	188,6	2,41	0,728	0
-3,3	0	2,13	7,09	10,6	181,6	1,92	0,745	0
-2,5	0	2,07	6,91	8,1	172,3	1,40	0,757	0
-1,6	0	2,03	6,77	5,5	159,3	0,88	0,766	0
-0,8	0	2,01	6,70	2,4	135,2	0,33	0,770	0
0,0	0	2,00	6,67	0,0	0,0	0,00	0,771	0

Tab. 4-1: Materialzustand in der Kontaktzone mit der Wendel

Ergebnisse Wendel in Rechteckform			
N_V	Watt	0,77	Leistung bei lokalem Kontakt einer Schneidwendel
		14	Zahl der Kontakte einer Schneidwendel
N_{SUM}	Watt	10,78	Summe der Leistung

Tab. 4-2: Ergebnisse zu Tabelle 4-1 (CUT1)

Als Ergebnis für das „reine Schneiden“ (theoretische Annahme) ergibt sich im betrachteten Beispiel die summierte Leistung $N_\Sigma = 10,78$ Watt.

4.5.2.2. Schneiden eines Dreieckprofiles

Wird die Annahme weiterhin auf die einzusetzende dreieckige und spitz zulaufende Schneidwendelform angewendet, ergibt sich bei Größen von:

- $v_1 = v_2 = 20 \text{ m/min}$
- $H_{Fl} = 6 \text{ mm}$
- $W_{FL} = 7 \text{ mm}$
- $T = 205 \text{ }^\circ\text{C}$
- $e_{Fl} = 0,3 \text{ mm}$
- $H_{in} = 5 \text{ mm}$

für eine spitzförmige Wendelform folgende Leistung:

Ergebnisse Wendel in Dreieckform			
N_v	Watt	0,046	Leistung bei lokalem Kontakt einer Schneidwendel
		14	Zahl der Kontakte einer Schneidwendel
N_{SUM}	Watt	0,65	Summe der Leistung

Tab. 4-3: Ergebnisse für reines Schneiden(CUT1)

Die summierte Leistung aller eingreifenden Wendelstege beträgt im betrachteten angepassten Beispiel $N_\Sigma = 0,65 \text{ Watt}$. Die Leistung ist sehr gering.

Für die Schneidwendel in Dreieckform stellen die Abbildungen 4-5 und 4-6 unter Beibehaltung der Grunddaten für reines Schneiden ohne Friktion einen weiten Bereich der zu erwartenden Leistungsaufwände bei der Variation von jeweils zwei Einflussgrößen dar. Die Abbildung 4-5 zeigt die Erhöhung der aufgenommenen Leistung bei Gleichlauf der Walzenpaarung und steigender gemeinsamer Geschwindigkeit.

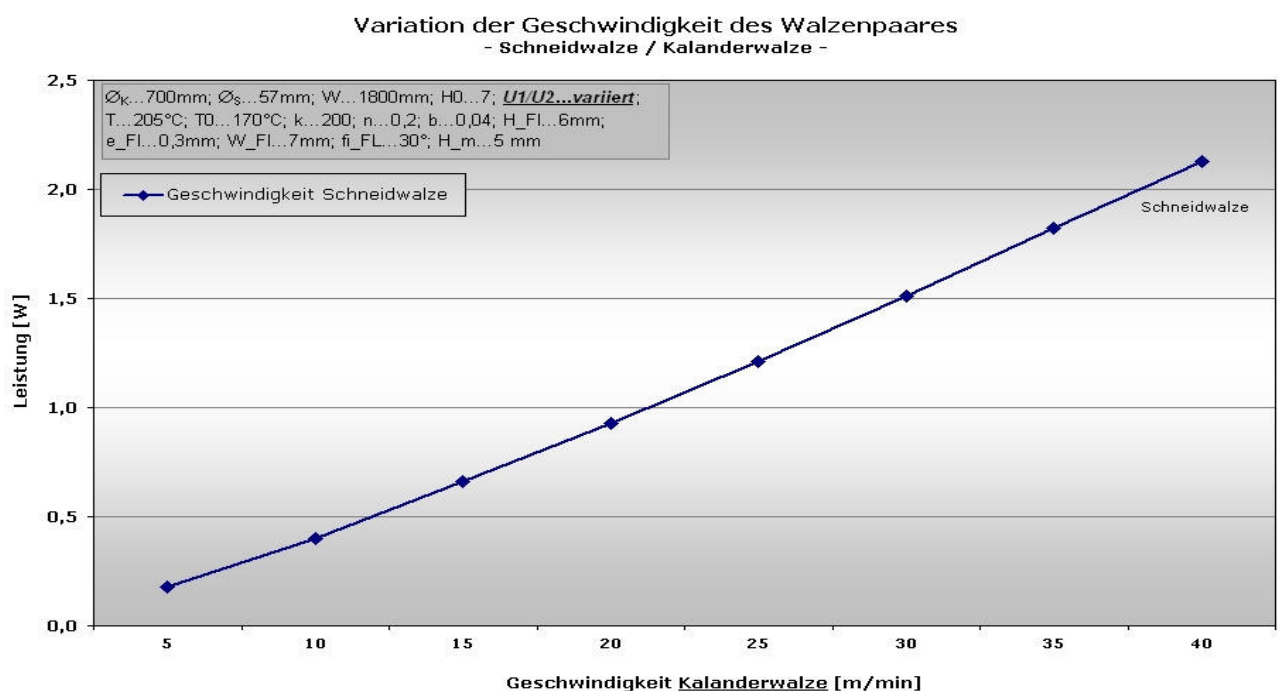


Abb. 4-5: Leistungsaufnahme bei Gleichlauf der Walzen und steigender Geschwindigkeit $U=U$

In Abbildung 4-6 besitzt die Felddicke als Parameter für die Eintauchtiefe der Schneidwendel in das Material einen sehr deutlichen Einfluss.

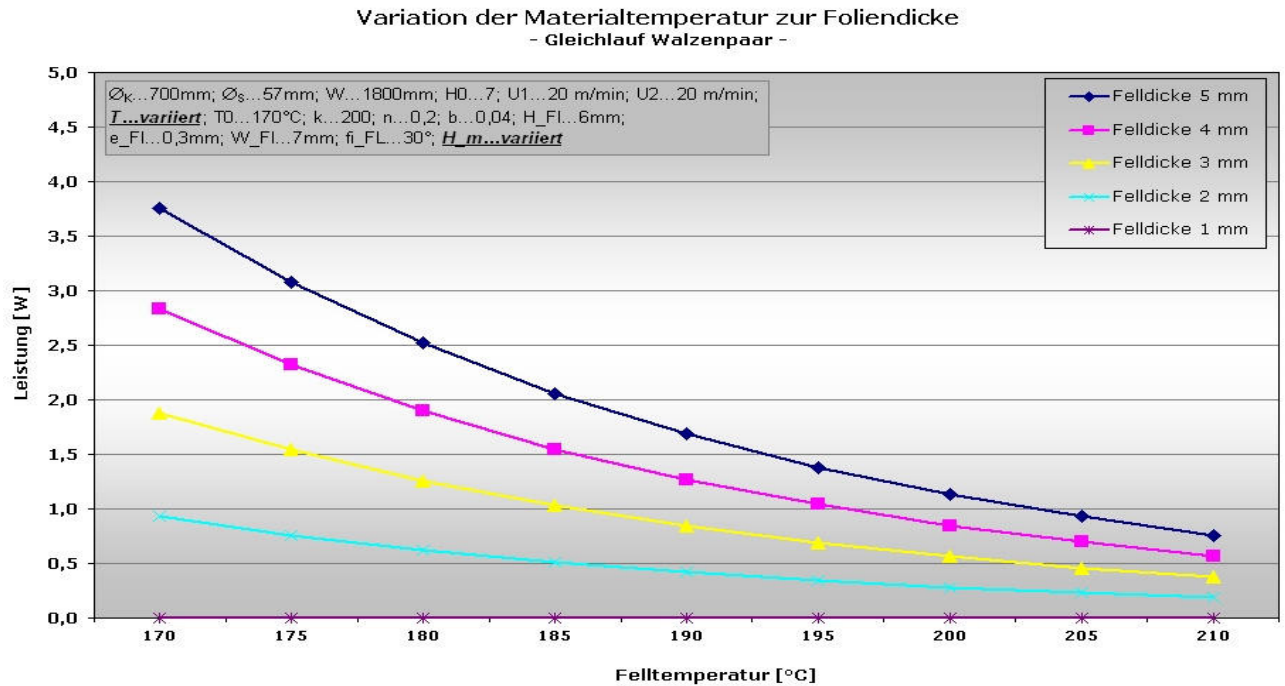


Abb. 4-6: Einfluss der Materialtemperatur zur Felldicke

4.5.3. Simulation: Schneiden und Scherung an der Wendel

Unter Verwendung gleicher Eingangsdaten und einer zusätzlichen Friktion der Schneidwalze wird das Einschneiden der Wendel mit Scherung am Wendelsteg berechnet. Die Parameter sind:

- $v_1 = 20 \text{ m/min}$
- $v_2 = 15 \text{ m/min}$
- $T = 205^\circ\text{C}$
- $H_{FL} = 6 \text{ mm}$
- $e_{FL} = 0,3 \text{ mm}$
- $W_{FL} = 7 \text{ mm}$
- $H_{in} = 5 \text{ mm}$

Folgende Materialzustände ergeben sich für den Fall des Schneidens und vorhandener Scherung an einer Wendel mit Dreiecksform:

Ergebnisse Wendel mit Dreieckform bei Schneiden und Scherung der Wendel			
N_v	Watt	0,05	Leistung bei lokalem Kontakt einer Schneidwendel
		14	Zahl der Kontakte einer Schneidwendel
N_{SUM}	Watt	0,70	Summe der Leistung

Tab. 4-4: Ergebnisse für Schneiden und Scherung (CUT1)

Als Ergebnis ergibt sich für die Annahme von Schneiden der Wendel mit Scherung (eingebrachte Friktion) im betrachteten Beispiel für eine Geschwindigkeitsdifferenz von 5 m/min eine summierte Leistung von $N_s = 0,70 \text{ Watt}$.

Somit erhöht sich die entstehende Leistung der Wendel für eine Stegbreite von 0,3 mm bei zusätzlicher Friktion geringfügig von 0,65 Watt auf 0,70 Watt.

Die Abbildungen 4-7 und 4-8 stellen unter Verwendung der gleichen Grunddaten den theoretischen Grenzbereich dar.

Abbildung 4-7 zeigt die zu erwartende Leistungsabgabe an der Schneidwalze für steigende Friktionen. Mit sich erhöhender Kalandervalzengeschwindigkeit ist eine Zunahme der Leistungsaufnahme selbst bei gleichen Geschwindigkeiten (keine Friktion) zu erwarten.

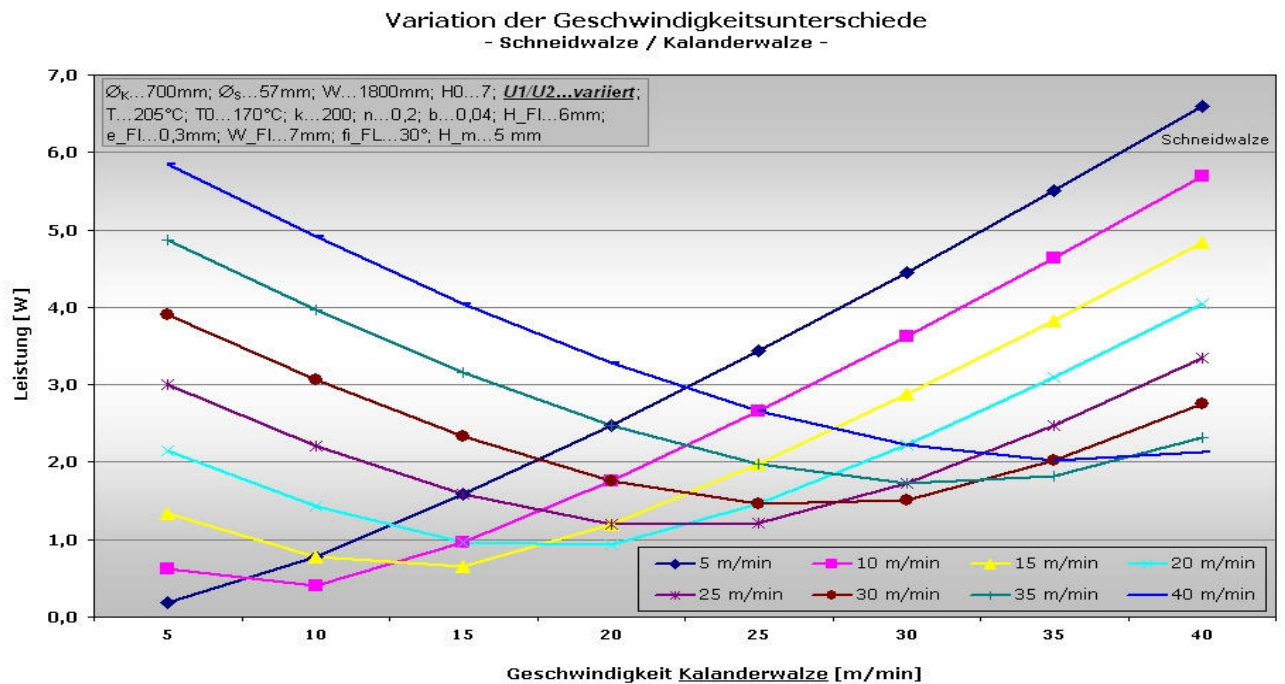


Abb. 4-7: Darstellung der zu erwartenden Leistung bei Friktionsänderungen

Die Felddicke hat einen sehr deutlichen Einfluss auf die entstehenden Leistungen (Abb. 4-8). Aufgrund des Dreieckquerschnittes wirkt bei größerer Eindringtiefe eine größere Arbeitsfläche an der Schneidwendel.

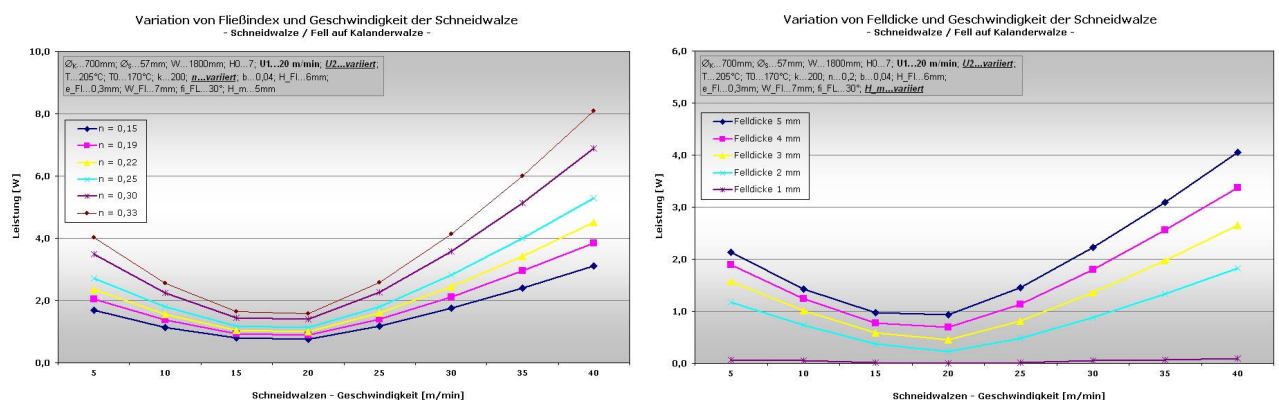


Abb. 4-8: Einfluss (li.) von Friktion zu Fließindex; (re.) Friktion zu Foliendicke

Weiterhin wird als Simulation zu bekannten Viskositätsdaten der Fließindex geändert, um verschieden Materialrezepturen abzubilden (Abb. 4-8). Hier verringert sich entsprechend

typischer Viskositätsverläufe die Leistungsdifferenz von unterschiedlichen Materialien bei abnehmender Felldicke.

4.5.4. Simulation: Schneiden, Scherung und Strömung an der Wendel

Neben der Annahme des Schneidens der Wendel bei wirkender Friktion wird auch der Einfluss der Seitenflächen der Schneidwendel auf die Polymerschicht überprüft.

Es erfolgt die Berechnung aller integralen Zusammenhänge, darunter auch des Leistungsaufwandes für die Scherdeformation in Querrichtung der Strömung in Bezug zur Wendel bei Vorliegen einer Friktion der Walzen, mit folgenden Ausgangsgrößen:

- $v_1 = 20 \text{ m/min}$
- $H_{Fl} = 6 \text{ mm}$
- $W_{FL} = 7 \text{ mm}$
- $v_2 = 15 \text{ m/min}$
- $e_{Fl} = 0,3 \text{ mm}$
- $H_{in} = 5 \text{ mm}$
- $T = 205 \text{ °C}$

Es werden folgende Materialzustände erhalten:

x	$P_{z \max}$	H	Q	$\dot{\epsilon}_Y$	σ_Y	N_Y	N_{XY}	N_{YV}	N_{XYV}	τ_{XY}
-15,9	0	5,00	14,58	16,5	181,4	3,00	0,00	0,000	0,000	46
-14,4	0,2	4,45	12,98	16,7	178,6	2,99	0,67	0,006	0,001	50
-12,8	0,6	3,96	11,54	16,8	174,4	2,93	0,83	0,010	0,002	55
-11,3	1,2	3,52	10,25	16,6	168,5	2,80	1,02	0,015	0,003	60
-9,8	2	3,13	9,12	16,1	160,2	2,57	1,26	0,018	0,005	66
-8,2	3	2,80	8,16	15,1	148,5	2,24	1,56	0,021	0,007	73
-7,4	3,6	2,65	7,72	14,3	140,7	2,02	1,78	0,022	0,008	77
-6,6	4,2	2,51	7,33	13,4	131,5	1,77	1,97	0,023	0,009	81
-5,8	4,9	2,39	6,98	12,3	120,8	1,49	2,18	0,024	0,010	85
-4,9	5,5	2,29	6,67	11,1	108,4	1,20	2,38	0,025	0,011	89
-4,1	6,1	2,20	6,42	9,6	94,2	0,90	2,59	0,025	0,012	93
-3,3	6,6	2,13	6,21	7,9	78,2	0,62	2,79	0,026	0,013	97
-2,5	7,1	2,07	6,04	6,1	60,5	0,37	2,96	0,026	0,015	100
-1,6	7,5	2,03	5,93	4,1	41,0	0,17	3,10	0,026	0,016	102
-0,8	7,7	2,01	5,86	1,8	18,1	0,03	3,20	0,026	0,017	104
0,0	7,8	2,00	5,83	0,0	0,0	0,00	3,28	0,026	0,017	104

Tab. 4-5: Materialzustand in der Kontaktzone mit der Wendel

Ergebnisse Wendel in Dreieckform			
N_V	Watt	0,82	Leistung bei lokalem Kontakt einer Schneidwendel
		14	Zahl der Kontakte einer Schneidwendel
N_{SUM}	Watt	11,48	Summe der Leistung
P_Y	Newton	14,50	Normalkraft

Tab. 4-6: Ergebnisse für Schneiden, Scherung und Strömung zu Tabelle 4-5 (CUT2)

Als Ergebnis bei Annahme von Schneiden der Wendel mit Scherung (eingebrachte Friktion) und einer Querströmung an der Wendelseite ergibt sich im betrachteten Beispiel für eine Geschwindigkeitsdifferenz von 5 m/min eine summierte Leistung von $N_{\Sigma} = 11,48 \text{ Watt}$.

Aus der Tabelle 4-5 folgt, dass die spezifische Pressleistung der Schicht N_V und ihre Scherung in Längsrichtung N_{XY} nach der Länge der Schneidwendel ungleichmäßig und in entgegengesetzter Weise verteilt sind. Die Werte dieser Leistungen sind unterschiedlich, die integralen Werte der entstehenden Leistung N_{YV} und N_{XYV} sind aber vergleichbar.

Tabelle 4-7 stellt die Änderungen der Leistung bei der Umdrehung der Schneidwalze und die Änderungen der Schneidkräfte bei steigender Friktion dar.

Die verwendete Geschwindigkeit der Hauptwalze ist 20 m/min, die der Schneidwalze wird von 20 m/min auf 3 m/min unter Beibehaltung aller weiteren Größen verringert.

Ergebnisse								
		Geschwindigkeit der Schneidwalze [m/min]						
		20	18	15	12	9	6	3
N	Watt	0,65	4,23	11,52	19,90	29,01	38,68	48,79
P	Newton	16,13	15,75	14,50	12,95	11,64	10,67	9,98

Tab. 4-7: Leistungsänderung bei Änderung der Friktion (CUT2)

In Abbildung 4-9 zeigt sich im Vergleich zu Abbildung 4-7 sehr deutlich der Einfluss der einbezogenen Querströmung an der Schneidwendel auf die zu erwartenden Leistungsaufwände.

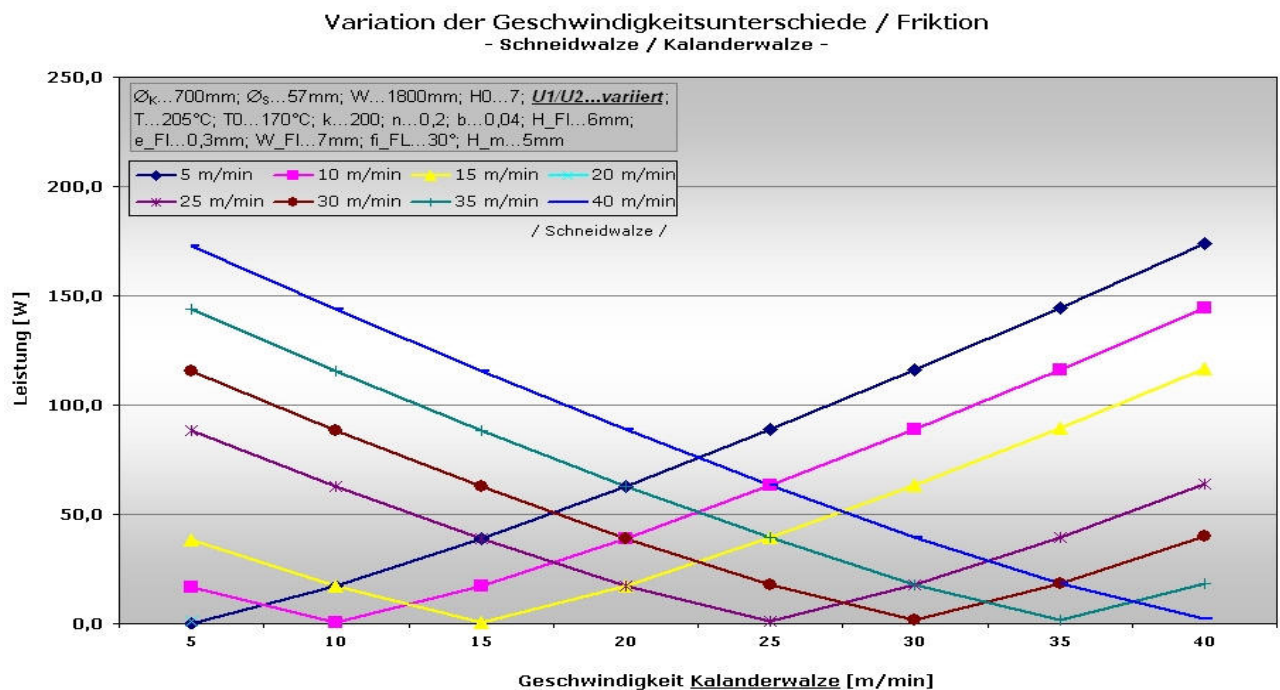


Abb. 4-9: Darstellung der zu erwartenden Leistung bei Friktion und Strömung

Das Verhältnis von Fließindex zur Erhöhung der Schneidwalzengeschwindigkeit (Abb. 4-10) zeigt ebenfalls eine deutliche Abhängigkeit von der Einbeziehung der Querströmung in das dritte Berechnungsmodell.

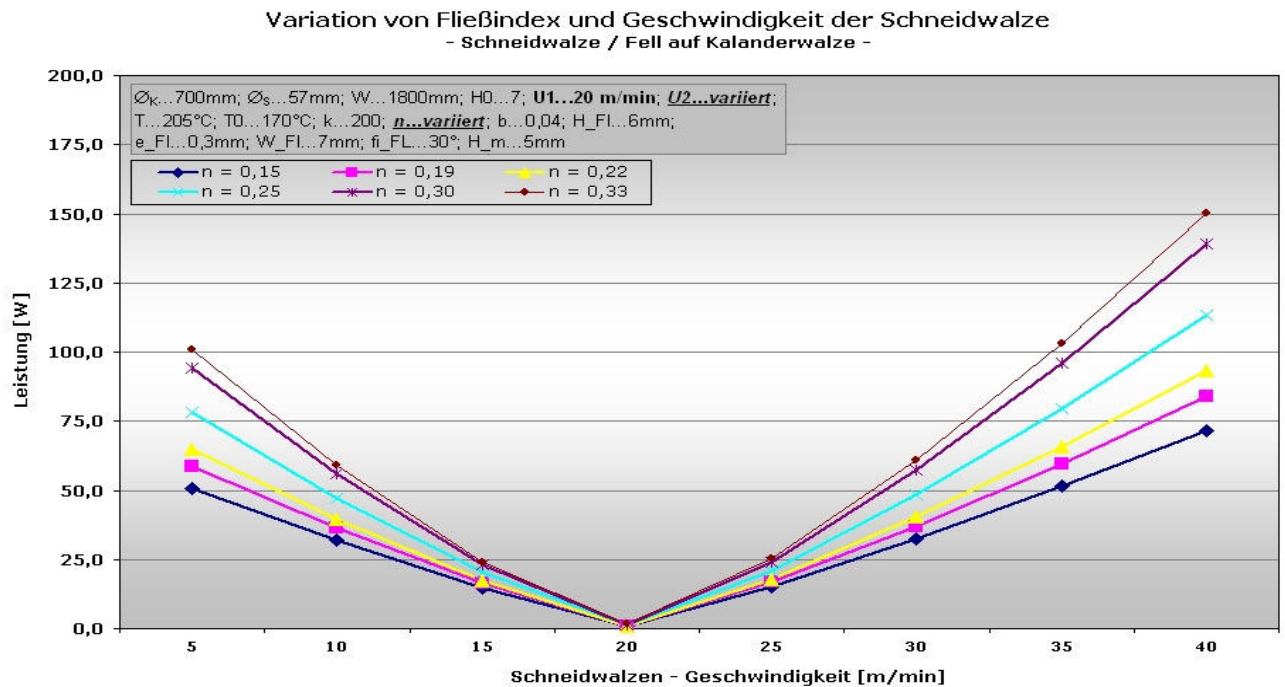


Abb. 4-10: Einfluss von Friktion und Fließindex

4.5.5. Einfluss der Form der Schneidwendel

Neben dem Einfluss der Friktion besitzt die Form der Schneidwendel einen wesentlichen Einfluss auf die Energieaufwände beim Eindringen der Wendel. Im Weiteren werden zwei unterschiedliche geometrische Formen des Schneidwendelsteiges verglichen - die Dreieckform - die dem am Kalandar eingesetzten Schneidwalzensystem entspricht und eine Trapezform als Vergleich.

Für die entstehende Querströmung (in Bezug zur Schneidwendel) erfolgt die Berechnung des Leistungsaufwandes für den Einfluss der geneigten Oberfläche der Wendel in den Fällen des Dreieck- und des Trapezquerschnittes. Es werden folgende Größen eingesetzt:

- $v_1 = 20 \text{ m/min}$
- $v_2 = 15 \text{ m/min}$
- $T = 200^\circ\text{C}$

Ausgangsdaten für Bild 4-11			
H_FL	mm	7	Steghöhe der Wendel
e_FL	mm	5	Breite an der Oberseite der Stege (Spitze)
W_FL	mm	15	Breite an der Unterseite der Stege (Walzenoberfläche)
fi_FL	°	30	Gangwinkel der Schneidwendel
H_in	mm	3	Dicke der Materialschicht, die in den Spalt eindringt
Ausgangsdaten für Bild 4-12			
H_FL	mm	7,0	Steghöhe der Wendel
e_FL	mm	0,1	Breite an der Oberseite der Stege (Spitze)
W_FL	mm	30	Breite an der Unterseite der Stege (Walzenoberfläche)

fi_FL	°	30	Gangwinkel der Schneidwendel
H_in	mm	3	Dicke der Materialschicht, die in den Spalt eindringt

Tab. 4-8: Ausgangsdaten für den Vergleich unterschiedlicher Wendelgeometrien (CUT2)

Das Schema des Auflaufens der geneigten Oberfläche einer Schneidwendel mit Trapezform am Beispiel des Profilaufbaus für die Position des Minimalwertes $H(X)$ zeigt Abb. 4-11

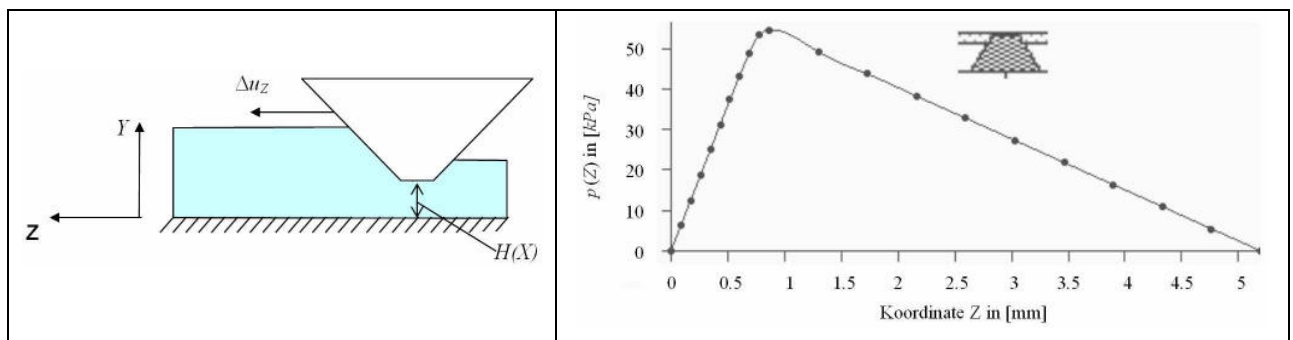


Abb. 4-11: Trapezquerschnitt der Wendel (li.) Schema des Auflaufens, (re.) Profil des spezifischen Druckes

und für eine Dreieckform der Wendel Abb. 4-12.

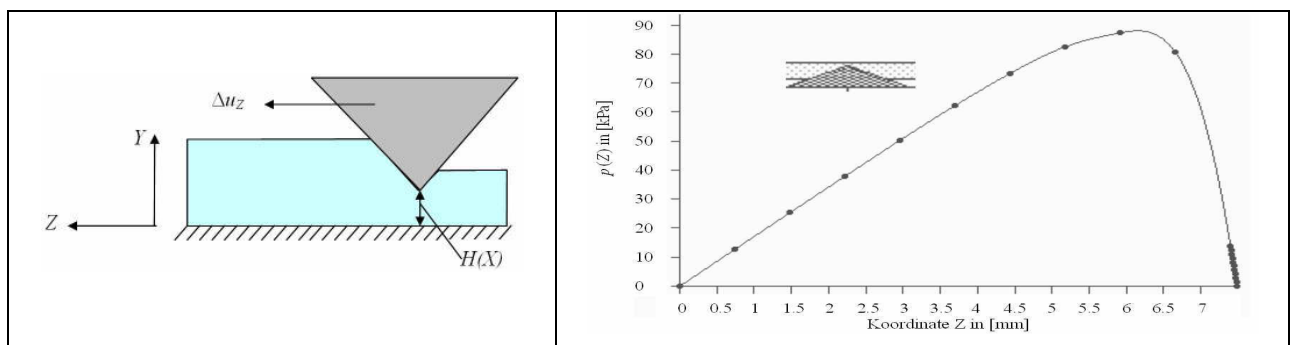


Abb. 4-12: Dreieckquerschnitt der Wendel (li.) Schema des Auflaufens, (re.) Profil des spezifischen Druckes

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Erhöhung der aufgenommenen Leistung der Schneidwendel mit Trapezform.

Ergebnisse Wendel in Trapezform			
N_V	Watt	4,68	Leistung bei lokalem Kontakt einer Schneidwendel
		14	Zahl der Kontakte einer Schneidwendel
N_{SU}	Watt	65,52	Summe der Leistung
M			
P_Y	Newton	145,74	Normalkraft

Tab. 4-9: Ergebnisse mit Tab. 4-8 (CUT2)

Für die Schneidwendel mit Dreieckquerschnitt (Tab. 4-10) ergeben sich nur 60% der aufgenommenen Leistung einer Schneidwendel mit Trapezform (Tab. 4-9).

Ergebnisse Wendel in Dreieckform			
N_V	Watt	1,84	Leistung bei lokalem Kontakt einer Schneidwendel
		14	Zahl der Kontakte einer Schneidwendel
N_{SU} M	Watt	25,76	Summe der Leistung
P_Y	Newton	86,72	Normalkraft

Tab. 4-10: Ergebnisse mit Tab. 4-8 (CUT2)

4.6. Vergleich der Prozessmodelle

Auf die Berechnung der Leistungsaufnahme der Schneidwalze haben, wie in Abschnitt 4.4. dargestellt, neben den Materialeigenschaften und den Prozessparametern auch die Art des Berechnungsmodells und die Geometrie der Schneidwalze einen entscheidenden Einfluss.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen für die Berechnungsmodelle Schneiden und Scherung sowie Schneiden, Scherung und Strömung die Unterschiede in der zu erwartenden Leistungsaufnahme. Die Parameter der Berechnungen werden beibehalten.

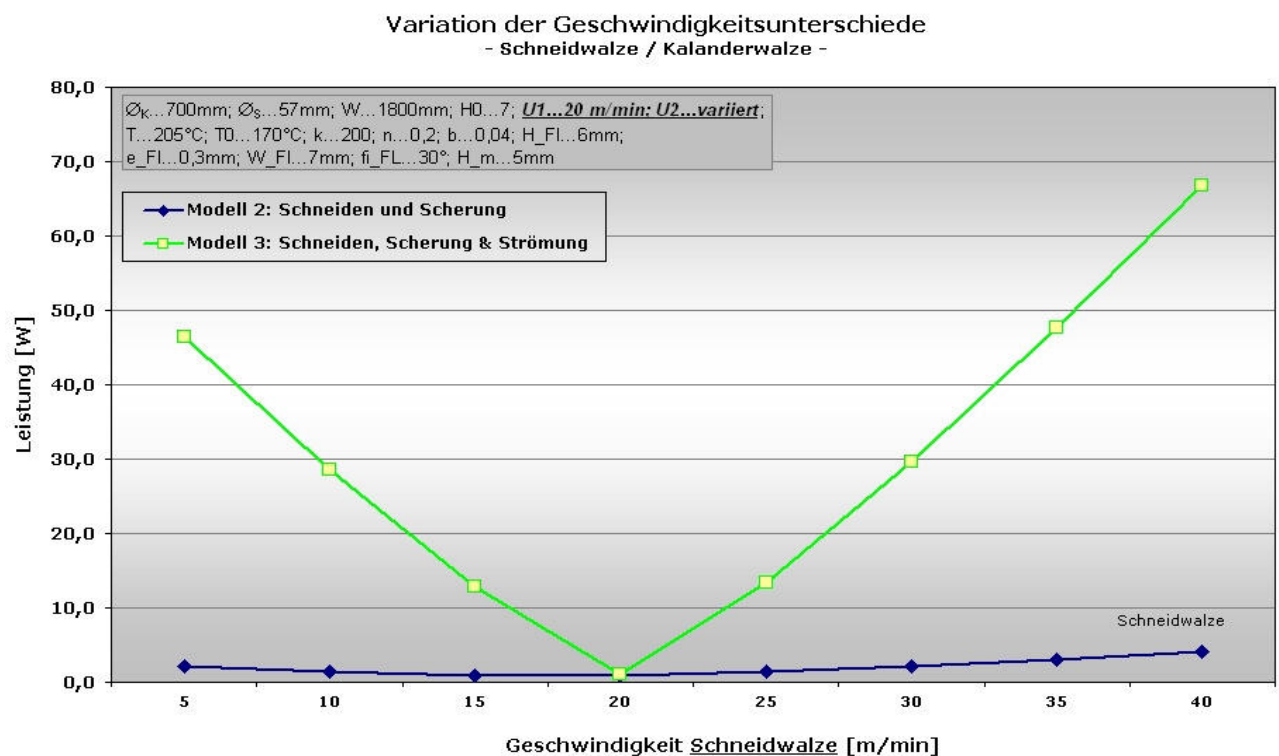


Abb. 4-13: Modellvergleich der zu erwartenden Leistungen für Friktionsänderungen

Abbildung 4-13 zeigt unter Verwendung gleicher Friktionen zwischen dem Modell Schneiden und Scherung und dem Modell Schneiden, Scherung und Strömung einen beträchtlichen Unterschied in der zu erwartenden Leistungsaufnahme der Schneidwalze. Dabei erhöhen sich die Unterschiede zwischen beiden Modellen mit zunehmender Geschwindigkeit und

zunehmender Friktion. In der Modellierung beider Modelle ist in dieser Abbildung der Gleichlauf der Walzenpaarung bei 20 m/min mit den geringsten zu erwartenden Drehmomenten zu erkennen. Für negative und positive Friktionen der Schneidwalze steigen diese modellabhängig unterschiedlich stark an.

Abbildung 4-14 stellt die zu erwartenden Leistungsaufnahmen aller 3 Modellansätze für unterschiedliche Materialien (hier durch die Veränderung des Fließindex simuliert) dar. Die mit M1 und M2 bezeichneten Kurven zeigen deutlich niedrigere zu erwartende Leistungsaufnahmen und geben die Modelle ‚reines Schneiden‘ sowie Schneiden und Scherung wieder. Die mit M3 bezeichneten Kurven bilden die Berechnungen des vollständigsten Modells Schneiden, Scherung und Strömung ab. Ihre Werte liegen deutlich höher als die der Kurven M1 und M2.

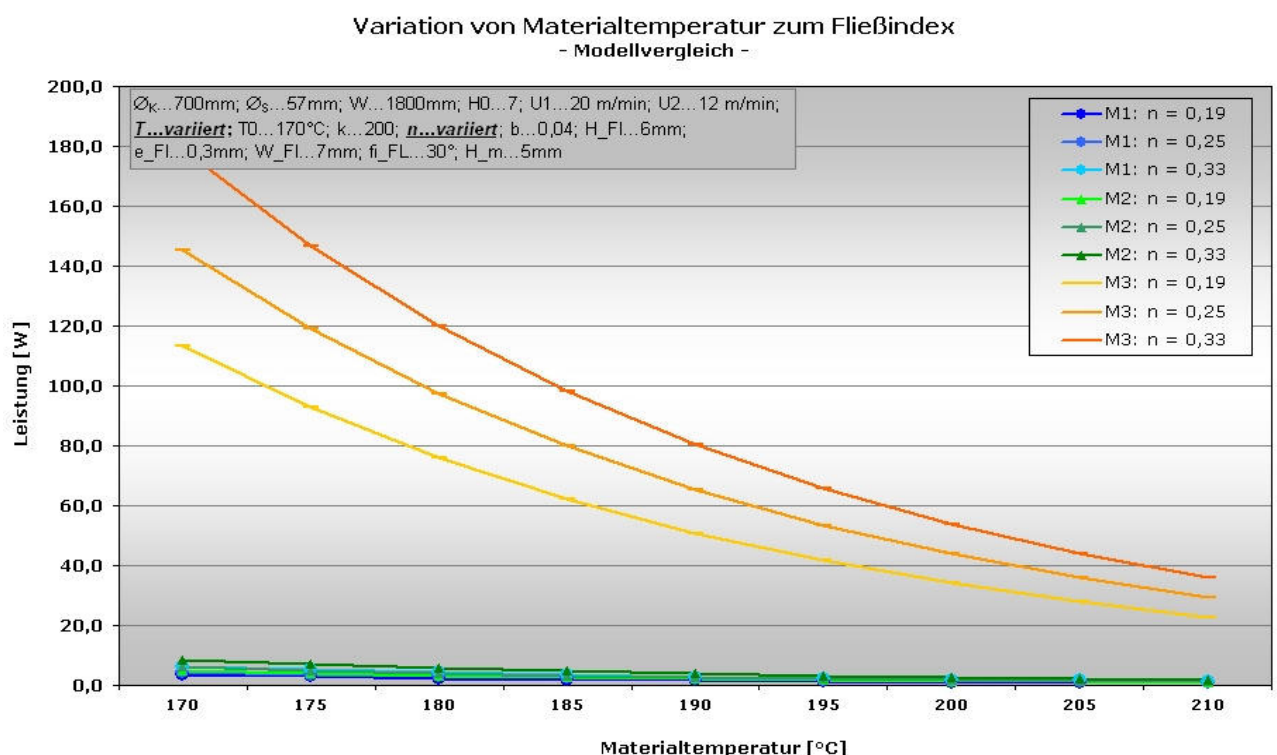


Abb. 4-14: Modellvergleich der zu erwartenden Leistungen für Fließindex und Temperaturänderung

Im Weiteren wird unter Annahme der Existenz aller Deformationsprozesse das Modell 3 verwendet. Dieses summiert die Leistungsaufnahmen aus reinem Schneiden der Schneidwendelspitzen, ihrer Scherung zwischen den Kontaktflächen von Schneidwendelspitzen und Material auf der Kalandervalze und bezieht die Strömung an den Seitenflächen der Schneidwendel zwischen Schneidwendel und Material in Form eines Auflaufens einer Fläche auf das Material (Kalandermode) ein.

5. Inline-Viskositätsmessung

5.1. Viskositätsmessung

Viskosität ist die Eigenschaft eines fließfähigen Stoffsystems, beim Verformen eine Spannung aufzunehmen, die von der Verformungsgeschwindigkeit abhängt. Sie ist ein Maß für die durch innere Reibung bestimmte Verschiebbarkeit der Fluidteilchen gegeneinander /101/. In diesem Abschnitt wird als Grundlage stationäres Fließverhalten beschrieben. Stationär bedeutet dabei, dass ein Material einer statischen Scherung (konstante Schergeschwindigkeit) ausgesetzt wird. Diese führt zu einer messbaren, im Rahmen des rheologischen Versuches konstanten Reaktion des Stoffes (Schubspannung). Der Quotient aus Schubspannung und Schergeschwindigkeit ist eine Materialgröße, die als Zähigkeit bzw. dynamische Viskosität η bezeichnet wird. Die Dimension der dynamischen Viskosität ist $\text{Pa}\cdot\text{s}$. Neben der dynamischen Viskosität kann durch Division durch die Materialdichte die kinematische Viskosität ν abgeleitet werden. Sie beschreibt das Verhältnis von Zähigkeits- und Trägheitseigenschaften eines Materials und trägt die Dimension m^2/s ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 1\text{cS} = 1 \text{ Zenti-Stokes}$). Für niedermolekulare Materialien ist die Viskosität ein Stoffwert, der nur von der Temperatur und gegebenenfalls dem Druck abhängig ist. Das kennzeichnet das Newtonsche Fließverhalten. Polymerschmelzen weisen die Materialfunktion der Viskosität als Kennzeichen des nicht-Newtonschen Verhaltens auf. Diese scheinbare Viskosität ist abhängig von der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$, der Temperatur T und dem Druck p . Die Materialklassen nicht-Newtonscher Fluide werden ausführlich in /96, 102, 103, 104/ beschrieben. Ihr viskoses Verhalten wird in Fließ- und Viskositätskurven dargestellt und beurteilt. Diese zeigen Verhaltensweisen, die meist durch ein- bis fünfparametrische rheologische Modelle angepasst werden können. Ein Modell, das eine Vielzahl von Fließkurven beschreiben kann, ist das allgemeine Potenzgesetz bzw. die HERSCHEL-BULKLEY-Beziehung. Der Schnittpunkt der Fließkurve mit der Ordinate liefert die Fließgrenze τ_0 . Der Fließindex n und der Konsistenzfaktor k bestimmen den Anstieg der Fließkurve. Für τ liefert $n > 1$ einen Viskositätsanstieg und beschreibt daher ein dilatantes Verhalten. Ein scherverdünnendes Verhalten wird hingegen durch einen Fließindex zwischen 0 und 1 charakterisiert. Beispielfhaft sind einige der häufig verwendeten Modelle /104/ aufgeführt:

Newton:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad \text{mit} \quad \eta = \text{const.} \quad (5.1)$$

Ostwald / de Waele (Potenzgesetz)

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n = k \cdot \left| \dot{\gamma}^{n-1} \right| \cdot \dot{\gamma} \quad (5.2)$$

Vereinfachungen des allgemeinen Potenzgesetzes (5.2) reichen häufig zur Beschreibung des Schergeschwindigkeitseinflusses auf die Schubspannung aus.

Das Herschel-Bulkley-Modell vereinigt die Elemente des Newtonschen und des Potenzgesetzes sowie der Bingham-Gleichung (5.3).

$$\tau = \tau_0 + k \cdot |\dot{\gamma}^{n-1}| \cdot \dot{\gamma} \quad (5.3)$$

Um ein Modell für eine allgemeine Fließkurve, die für einen breiten Scherbereich gilt, zu erhalten, werden mindestens vier Parameter benötigt. Das Cross-Modell ist ein gutes Beispiel für Gleichungen dieser Art. Es gestattet die Prognose des Verhaltens von Plateaus mit niedriger und hoher Scherung und die Prognose von strukturviskosem Verhalten zwischen diesen Plateaus. Das Cross-Modell benutzt die Scherrate als unabhängige Variable.

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{(1 + (k \cdot \dot{\gamma}))^m} \quad (5.4)$$

Die Parameter η_0 als „Nullviskosität“ und η_{∞} als Viskosität bei hohen Schergeschwindigkeiten verbessern das Modellverhalten bei der Anpassung der Modellvorhersagen an die experimentellen Daten. Für Polymerschmelzen wird in der Gegenwart das Carreau-Modell (Gl. 4.12) als Alternative zum Cross-Modell verwendet.

Neben dem viskosen Verhalten zeigen Polymerschmelzen viskoelastisches Fließverhalten. Dabei werden Materialfunktionen zur Beschreibung der Dehndeformationseigenschaften, der Eigenschaften unter oszillierender Deformationsbeanspruchung oder der Eigenschaften bei Kurzzeit- und Langzeitbeanspruchung ermittelt. In dieser Arbeit werden speziell die Materialfunktionen der dynamischen Charakteristiken verwendet.

5.1.1. Rheometerarten

Im Weiteren werden Rheometer in Kurzform und in einer Übersicht angegeben, um ihre Eignung für die Bestimmung der Eigenschaften von PVC-Schmelzen einzuschätzen. Danach sollen mit dem geeignetsten Rheometer die experimentellen Daten für die relevanten PVC-Proben bestimmt werden, um sie für die Lösung der gestellten Aufgabe zu nutzen.

Ausgangspunkt ist die Einschätzung des Standes der Rheologie von PVC-Schmelzen. Als besonders thermisch instabile Polymerschmelzen erfordern sie eine sehr kurze Temperier- und Versuchszeit im Rheometer, die Beachtung der Neigung von PVC zu Wandanomalien (z. B. Gleiten) und die Vermeidung einer hohen Scherbeanspruchung im Rheometer selbst.

Als eigener Beitrag zur Rheometrie wird das Konzept entwickelt und umgesetzt, PVC-Proben direkt im Rotationsrheometer unter dynamischer Beanspruchung zu untersuchen.

Die Anwendbarkeit der COX-MERZ-Regel wird überprüft. Die Transformation der Daten der Komplexviskosität erfolgt zu den Fließ- und Viskositätsfunktionen für die stationäre Scherbeanspruchung.

Die zur Lösung der vorliegenden Aufgabe betrachteten Rheometerarten beschränken sich auf Rotations- oder Druckrheometer. Mit ihnen lassen sich Fließ- bzw. Viskositätsfunktionen unter dynamischer oder statischer Belastung aufnehmen und in kurzer Zeit durchführen.

Rotationsrheometer

- Kegel / Platte-System
- Platte / Platte-System
- Zylinder / Zylinder-System

Kapillarrheometer

- Normaldruckviskosimeter
- Hochdruckkapillarviskosimeter

Die Konsistenz der Materialproben (fester plastischer Zustand mit geringer Elastizität) und die geringe thermische Stabilität schließen den Einsatz von Fallviskosimetern oder Rührwerken (z.B. Indexer) aus. Speziell die Kegel / Platte - oder Platte / Platte - Oszillationsrheometer bieten den Vorteil einer annähernd konstanten Scherdeformation bei stationärem Versuch und im dynamischen Modus eine annähernd konstante zeitabhängige Scherung.

Rheometer mit einer teilweise axial rotierenden Geometrie sind in der labortechnischen Untersuchung die verbreitetsten Rheometersysteme. Auch für prozessbegleitende Untersuchungen oder zur In-Line- und On-Line-Messung sind diese Systeme geeignet. Es können dabei Systeme mit einfacher und komplexer Strömung unterschieden werden. Letztere können in Form der „Indexer“ schnelle Aussagen zu rheologischen Größen liefern, lassen jedoch aufgrund der komplexen Strömungsformen ohne Kalibrierung keine direkten Rückschlüsse auf rheologische Stoffgrößen zu. Systeme mit einfacher, mathematisch zu beschreibender Strömung lassen eine direkte Ableitung der rheologischen Messgrößen zu.

Oszillationsrheometer: Sie sind mit verschiedenen Messgeometrien in einem weiten Untersuchungs- bzw. Messbereich einsetzbar. Diese Systeme besitzen Möglichkeiten zu statischen und dynamischen Untersuchungen und dienen zur Bestimmung von Drehmoment und Scherspannungen sowie Normalkräften und Normalspannungen als Funktion der Schergeschwindigkeiten. Dabei ist sowohl eine dynamische als auch kinematische Kopplung bei der Rheometereinstellung wählbar.

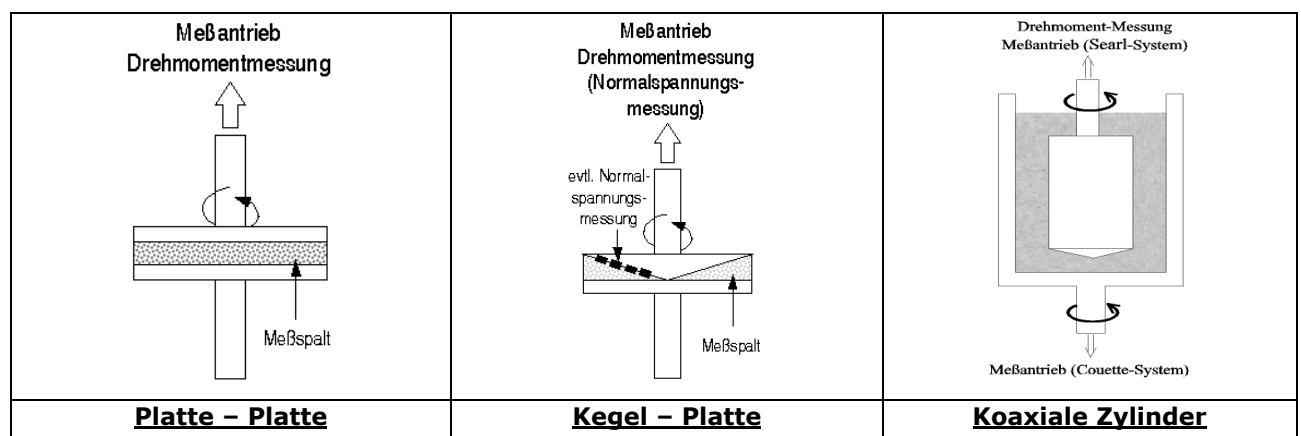


Abb. 5-1: Darstellung der Rotationsrheometersysteme

In Druckrheometern wird eine Strömung der Messsubstanz durch eine Druckdifferenz ausgelöst. In der durchströmten Geometrie wird ein Strömungsprofil erzeugt, welches einer Scherdeformation (Kapillarströmung) bzw. einer kombinierten Scher-/Dehnströmung (Düse, Schlitz) entspricht. Die gemessene Durchflussmenge und Schergeschwindigkeit auf der einen und gemessener Druckverlust und Schubspannung auf der anderen Seite stehen dabei in Beziehung und lassen Rückschlüsse auf rheologische Größen zu.

Neben der reinen Scherdeformation treten bei technisch relevanten Prozessen auch Dehn- und Zugbeanspruchungen des Materials auf. Das Verhalten bei derartigen Deformationen kann mit dem Dehnrheometer beschrieben werden. Kombi-Geräte eignen sich sowohl für Scher- als auch Dehnuntersuchungen und sind aus einer Fördereinrichtung (meist Extruder), einer durchflossenen Kapillare und Elementen zur Erzeugung der Dehndeformation (Düse oder Einlauf) aufgebaut. Gemessen werden Druckverluste, Kräfte und Deformationsgeschwindigkeiten. Ihre Vorteile liegen in einem großen messbaren Viskositäts- bzw. Dehnavisitätsbereich und einer prozessnahen Messung.

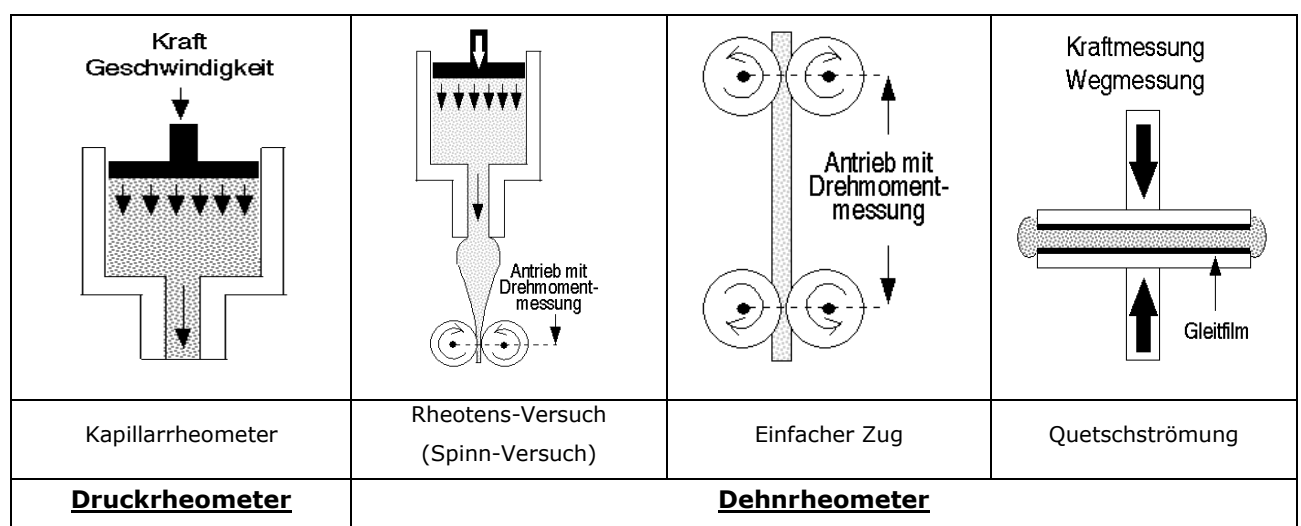


Abb. 5-2: Darstellung von Druck- und Dehnrheometern

Prozessrheometer dienen der Erfassung rheologischer Größen im Prozess oder in der Prozessumgebung. Sie sind gekennzeichnet durch eine schnelle Messwertbildung und eine geringe Anfälligkeit gegenüber Verschmutzung und Verschleiß. Eine grobe Einteilung der Prozessrheometer kann in On-line- und In-Line-Rheometer erfolgen. Während In-Line-Rheometer direkt vom Produktstrom durchflossen werden, nutzen On-Line-Rheometer einen Bypass für die Zuführung von Messproben. Für Prozessrheometer werden die verschiedensten Messprinzipien eingesetzt. Neben einigen der oben genannten Verfahren finden auch Vibrationsmethoden ihren Einsatz. Speziell Druck- und Dehnrheometer (Abb. 5-2) kommen aufgrund ihres Wirkprinzipes (Druckaufbau bei hohen Temperaturen, Abziehen von Schmelzen) für Bypass-Systeme zur Anwendung. In den meisten industriellen Anwendungen werden Drehmomentmessungen zur Ermittlung materialspezifischer Kennwerte verwendet. Die in der Kunststoffverarbeitung häufig eingesetzten Extruder, Knetzer oder Walzwerke lassen über die

Bewertung des aufgewendeten Drehmomentes der Antriebswellen oder –walzen Aussagen über die Homogenität und die in die Mischung/Schmelze eingebrachte Leistung zu. Grundsätzlich sind diese industriellen Maschinen aufgrund ihrer Komplexität und ihrer Abmessungen aber nicht in der Lage, genaue oder mit Labormessgeräten vergleichbare Kennwerte abzugeben. Hierfür werden häufig Messkneter /106/, Messextruder /107-109/ oder Laborwalzwerke /80/ für praxisnahe Untersuchungen eingesetzt. Diese können in kleinen Volumina definiertere Strömungsverhältnisse erzeugen und empfindlichere Drehmomentmessungen nutzen. Über verschiedene Temperaturbereiche lassen sich mit den ermittelten Drehmomenten, Massedurchflüssen und erfassten Drücken bestimmte Verarbeitungsfenster analysieren, Arbeitspunkte festlegen und auf Produktionsanlagen übertragen.

5.1.2. Viskositätsmessungen an kalandrierten Folien

Die Bestimmung der Nullviskosität η_0 ist nicht Anliegen der Arbeit. Bekannt ist, dass in der PVC-Rheologie zur Charakterisierung der molekularen Eigenschaften bzw. des Fließverhaltens der K-Wert genutzt wird. PVC wird trotz Stabilisierung in Abhängigkeit von der Temperatur schnell thermisch abgebaut. Das ist gekennzeichnet durch Chlorwasserstoff-Abspaltung, Autooxidation oder Vernetzung. Da alle rheologischen Messungen Zeit in Anspruch nehmen, findet während der Messung von Punkt zu Punkt auch eine zunehmende Schädigung des Materials statt. Diese verändert die Messwerte zunehmend im Vergleich zur „ungeschädigten“ Probe, so dass eine Verschiebung und „Schieflage“ der Messkurven resultieren kann. Bei ungenügender Beachtung dieser Tatsache können Vergleiche der Messungen unterschiedlicher Mischungen zu Fehlschlüssen führen.

Deshalb sind Rotationsrheometer für die Rheometrie von PVC besonders geeignet, weil die Zeit der thermischen Beanspruchung bei der Messwertbestimmung besonders kurz gehalten werden kann. Eigene und weiterführende Untersuchungen von Lenk /77/ zeigen selbst für die Rotationsrheometer eine Mindestbelastungsdauer der Proben von 9-17 Minuten. Für schlagzähmodifizierte PVC-U-Proben ist dieser Zeitraum bei Temperaturen von 180–210°C als äußerst kritisch anzusehen. Messungen am Hochdruckkapillarviskosimeter HKV 2002 zur Viskositätsbestimmung im höheren Schergeschwindigkeitsbereich ergeben ähnliche thermische Beschränkungen für die verwendeten PVC-Proben. Ein Vergleich von Proben gleichen Materialtyps, welche an Mischer, Kneter und Kalandrier entnommen und bei gleicher Prüftemperatur gemessen wurden, zeigt einen deutlichen Unterschied in der Viskosität dieser Proben. Die an Mischer und Kneter entnommenen Muster besitzen eine höhere Viskosität als die vollständig kalandrierten Proben /110/. Aufbauend auf den beschriebenen Messungen von Lenk /77/ und Chaudhari /110/ wird für die erforderlichen rheologischen Untersuchungen ein Rotationsrheometer mit Platte/Platte-Messsystem verwendet. Der Vorteil des Platte/Platte-Messsystems liegt speziell für die gemessenen thermisch empfindlichen PVC-U-Proben in der wesentlich kürzeren Temperierzeit und Nullpunkteinstellung des Rheometers bis zum Start der

Messung. Bei einem Kegel/Platte-System muss der Kegel bis auf wenige μm an die Platte herangefahren werden, so dass bis zum Erreichen dieses erforderlichen Nullpunktes die Proben bereits thermisch geschädigt sind /77/. Für reproduzierbare Messungen mit dem Platte/Platte-System wurden einheitliche Probendicken aus den Folienmustern hergestellt und geprüft.

Die Messungen werden mit einem Rotationsrheometer [Typ: AR 2000 der Firma TA Instruments] unter Verwendung einer Platte/Platte-Geometrie durchgeführt (Abb. 5-3).

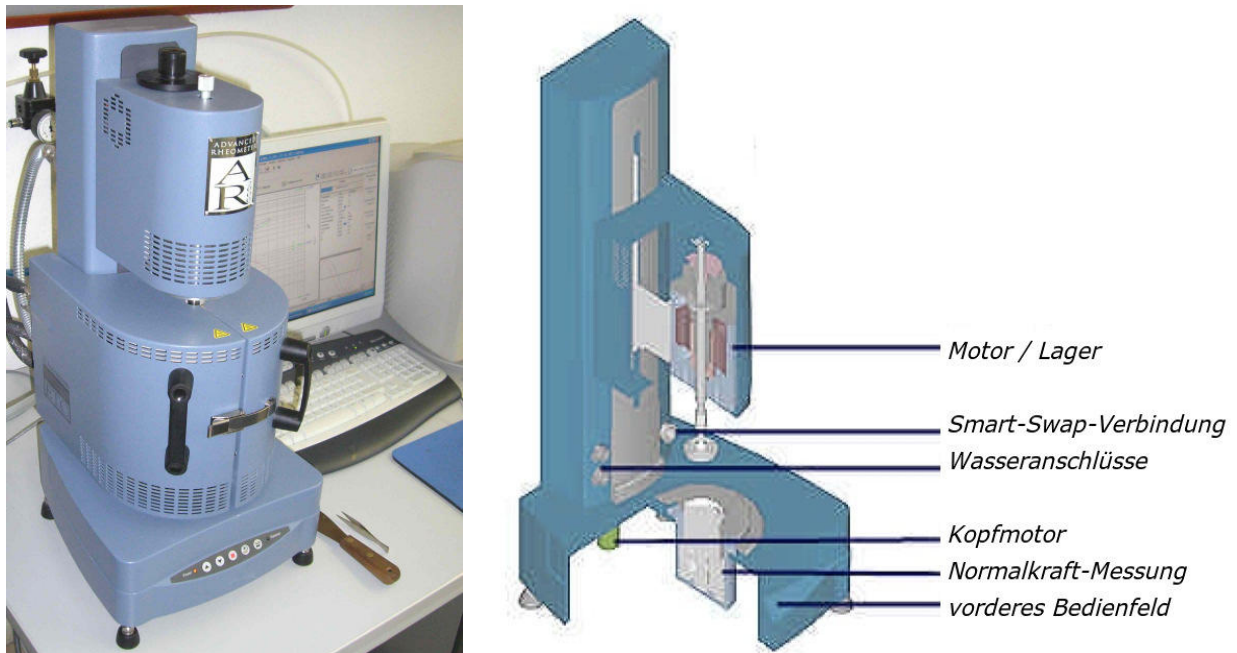


Abb. 5-3: li.: verwendetes Messgerät AR 2000; re.: schematischer Aufbau AR 2000

Das eingesetzte Rotationsrheometer AR 2000 dient der Untersuchung des Deformationsverhaltens von Fluiden, vorzugsweise auch Polymerschmelzen. Die Deformation wird im nichtdestruktiven Bereich elastischer oder viskoelastischer Deformation gemessen. Dadurch werden Informationen zu mikroskopischen Wechselwirkungen im Testmaterial erhalten sowie Messungen der Schubspannung/Scherrate-Beziehungen bei höheren Belastungen möglich. Die weitere Verwendung des Begriffes Scherrate für die Schergeschwindigkeit ergibt sich zweckmäßigerweise aus der Rheometersoftware.

Bei einstellbarer Schubspannung kann eine Spannung eingestellt und gelöst werden und somit ist das tatsächliche Verhalten der Probe direkt messbar (Kriechversuch). Dies ist mit herkömmlichen Geräten mit einstellbarer Scherrate nicht möglich. Zudem können die meisten Deformationsprozesse durch Messungen mit einstellbarer Scherspannung genauer simuliert werden, um z. B. Fließgrenzen zu bestimmen.

Eine kreisförmige Folienprobe vorbestimmter Geometrie (Radius, Dicke) wird zwischen die Platten bzw. Platte-Kegel-Geometrie gebracht, aufgeschmolzen und das entsprechende Messprogramm realisiert.

Die Schubspannung σ an der Platte in der Kegel-Platte-Geometrie mit dem Radius R verhält sich linear zum gemessenen Drehmoment M .

$$\sigma = \frac{3 M}{2 \pi R^3} \quad (5.5)$$

Ebenfalls einen linearen Zusammenhang findet man zwischen der ersten Normalspannungsdifferenz $N_1^+(t)$ und der Normalkraft $K(t)$.

$$N_1^+(t) = \frac{2 K(t)}{\pi R^2} \quad (5.6)$$

Die Scherströmung unterscheidet sich von einer transienten Scherströmung dadurch, dass der Spannungszustand den Gleichgewichtszustand erreicht.

Die Gleichgewichtviskosität hängt allein von der jeweiligen Scherrate ab und wird als Viskositätsfunktion $\eta(\dot{\gamma})$ bezeichnet. Die transiente Viskosität dagegen hängt sowohl von der Scherrate als auch von der Zeit ab und wird als $\eta^+(\dot{\gamma}, t)$ dargestellt. Transiente Effekte spielen nur bei Substanzen mit starken viskoelastischen Eigenschaften eine Rolle.

Mit Oszillationsmessungen kann gezeigt werden, wie eine viskoelastische Flüssigkeit die an der Platte wirkende sinusförmige Änderung der Deformation aufnimmt und sich das Relaxationsverhalten, dargestellt in einer Phasenverschiebung zwischen Spannung und Deformation, verhält. Bei einer elastischen Flüssigkeit ist die Phasenverschiebung gleich 0° , bei einer viskosen gleich 90° und für eine viskoelastische Flüssigkeit liegt diese zwischen 0° und 90° .

Der komplexe Schermodul (Gl. 5.7) ist definiert als Summe des Speichermoduls G' als ein Maß für die reversible, elastisch gespeicherte Deformationsenergie und dem Verlustmodul G'' , der durch Fließen irreversibel der dissipierten Energie proportional ist.

$$G^* = G' + i \cdot G'' \quad (5.7)$$

Das Verhältnis zwischen Real- und Imaginärteil ist durch den Verlustfaktor

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (5.8)$$

gegeben. Die komplexe Viskosität ist definiert als:

$$\eta^* = \sqrt{(\eta')^2 + (\eta'')^2} \quad (5.9)$$

mit

$$\eta' = \frac{G''}{\omega} \quad \text{und} \quad \eta'' = \frac{G'}{\omega} \quad (5.10)$$

Die Messung verlangt eine bestimmte Anzahl von Schwingungsperioden, bis sich das System im Gleichgewicht befindet und für die Absicherung der Messwertbestimmung /105/.

Die für den Fall der Verwendung von Platte-Platte-Messsystemen erforderliche Korrektur nach Weißenberg-Rabinowitsch wird in Kapitel 5.1.9 erläutert.

5.1.2.1. Verwendete Materialien

Für die rheologischen Messungen und Versuche an Walzwerk und Kalandrier werden Materialien mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften und Modifikationen ausgewählt (Tab. 5-1, 5-2). Aufgrund der kritischen thermischen Zersetzung von PVC-U werden kalandrierfähiges PET-G und PVC-P als Vorversuchsmaterialien eingesetzt.

Nachfolgende Auflistung zeigt die eingesetzten Materialkompositionen:

<u>Rohstoffe</u>	PVC-U		
	176/01	177/01	178/01
PVC A	84,4	64,4	35,5
PVC B	8,0	5,0	9,0
PVC C		24,0	48,0
Modifier	4,0	3,0	3,0
Stabilisator	1,6	2,0	2,4
Gleitmittel	1,0	0,8	1,0
Farbpigmente	2,4	2,4	2,4

Tab. 5-1: PVC-U-Rezepturen

... Angaben in Prozent [%] zur vollen Mischung (bspw. 100kg)

<u>Rohstoffe</u>	PVC-P	<u>Rohstoffe</u>	PET	
			PET 1	PET 2
PVC D	56,2	PET-Mischung	100	95
Weichmacher	40,0	Farbpigmente		5
Kalandrierhilfsmittel A	0,5			
Kalandrierhilfsmittel B	0,5			
Stabilisator	2,0			
Gleitmittel	0,8			

Tab. 5-2: PVC-P-Rezeptur und PET-Rezepturen

... Angaben in Prozent [%] zur vollen Mischung

5.1.2.2. Vorbereitung und Durchführung der Messung

Die vom Walzwerk/Kalandrier entnommenen Folienmuster besitzen aufgrund ihrer unterschiedlichen Klebeneigung und Elastizität verschiedene Abmaße und Foliendicken. Je nach ausgewählter Messgeometrie müssen die Muster definierte Durchmesser und Dicken

aufweisen. Eine möglichst gleichmäßige Dickenverteilung über alle Prüfmuster wird durch Pressen der Folienstücke gewährleistet.

Die dem Platte/Platte-Messsystem in ihrer Größe entsprechenden Durchmesser werden über Ausstanzen der Proben aus den gepressten Folienmustern gewonnen.

Die in Abb. 5-4 dargestellte Messkammer ist je nach Messtemperatur aufgeheizt und muss für das Entnehmen und Einlegen einer Probe geöffnet werden. Bei aufgefahrenem Stempel kann die alte, gescherte Probe entnommen und nach einer Reinigung der Platten die neue Probe eingelegt werden. Unsymmetrisches Einlegen verändert die Messwerte deutlich und verschlechtert das Messergebnis.

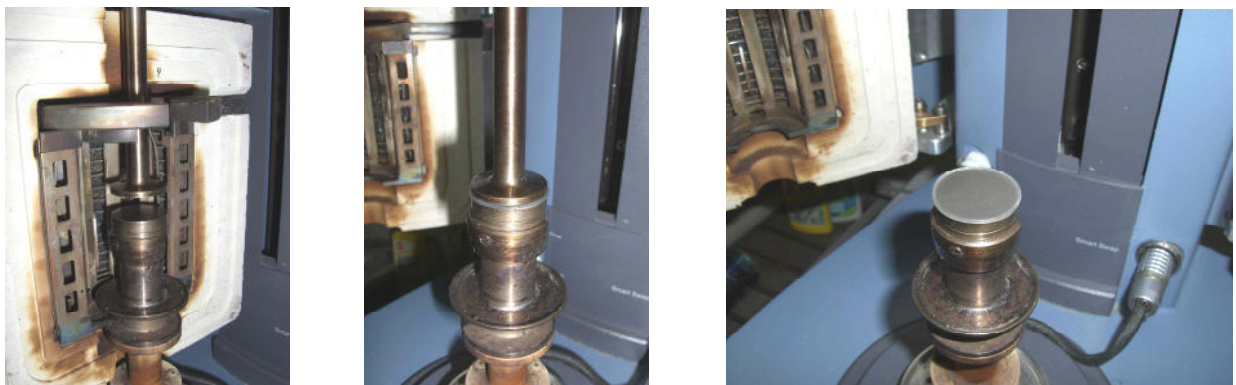


Abb. 5-4: li.: Messkammer; mi.: geschlossene Geometrie; re.: zu vermessende Probe

Die Einstellungen des Messprogrammes werden bei allen untersuchten Proben beibehalten. Die Messung wird bei Erreichen der Messtemperatur gestartet und mit nachfolgenden Vorgaben parametrisiert:

Verfahren		Geometrie	
<i>Frequenz-Sweep-Schritt</i>	0,1 – 100 Hz	25mm-ETC-Stahlplatte, Standard-ETC-Stahlparallelplatte	
<i>Punkte pro Dekade</i>	6	<i>Abmessungen</i>	25 mm
<i>Kontrollierte Variable</i>	Deformation; 0.010000	Spalt / Abstand der Platten je nach Muster	
<i>Konditionierungszeit</i>	1 Zyklus	Geräte- und Versuchsoptionen	
<i>Datenaufnahmezeit</i>	3 Zyklen	in jedem Datensatz vergleichbar und gespeichert	
<i>Kontrollierte Deformation</i>	Kontrollierte Oszillation		
	Auto		

Tab. 5-3: Einstellungen am Rheometer zur Probenmessung

Nach Erreichen der Messtemperatur und dem Beenden der Equilibrierungszeit von 2 min wird die Messung entsprechend der vorgegebenen Rampen durchgeführt.

5.1.3. Fließkurven der untersuchten Proben

Die Messungen der Fließkurven erfolgen an allen Proben als dynamische Messung sowie ergänzend für ausgewählte Proben als statische Messung. Als Proben werden PVC-U-Rezepturen verwendet, welche parallel vom Kalandrier und vom Walzwerk entnommen wurden. Weiterhin werden PVC-P und PET-G-Folien vom Walzwerk untersucht.

Abbildung 5-5 zeigt die Fließkurven von 2 Rezepturen, welche an Produktionskalandrern entnommen wurden. Diese werden jeweils in einem Temperaturbereich von 180°C – 210°C für jede gemessene Probe dargestellt.

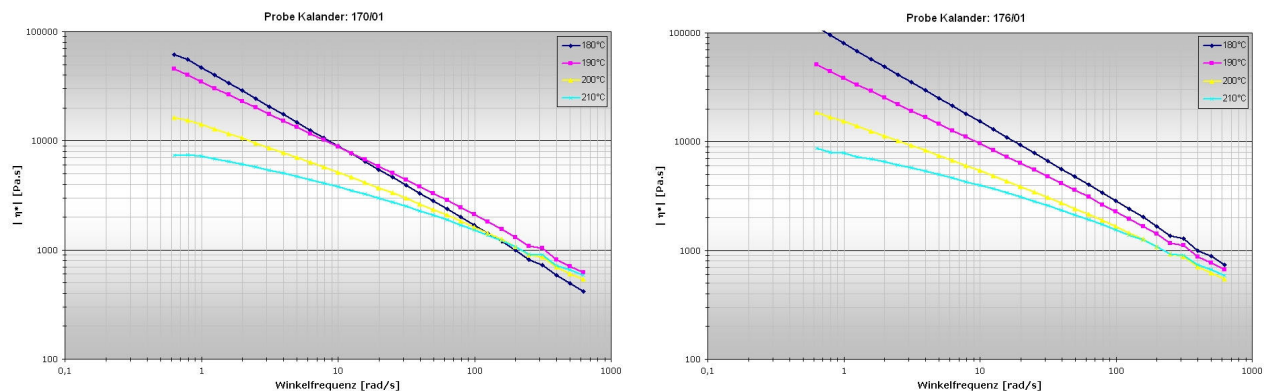


Abb. 5-5: Proben 170/01 und 176/01 im Temperaturbereich von 180°C bis 210°C

Die Abbildung 5-6 zeigt 5 PVC-U-Rezepturen bei 180°C und 200°C. Bei allen Messkurven ist eine deutliche Abnahme der Viskosität bei zunehmender Temperatur und Schergeschwindigkeit zu erkennen. Alle Proben weisen bis 200°C eine deutliche Temperatur-Viskositäts-Abhängigkeit auf.

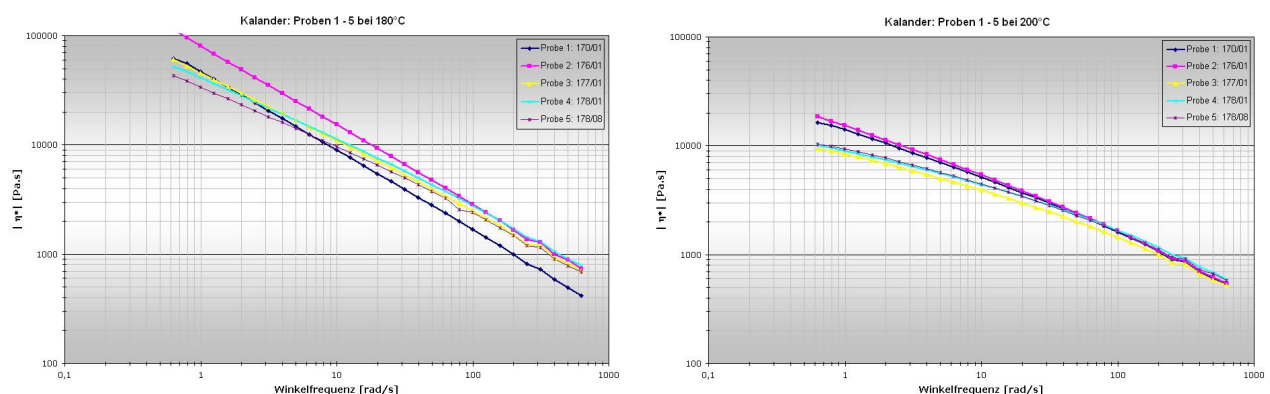


Abb. 5-6: Gegenüberstellung von 5 PVC-U-Rezepturen für li.: 180°C und re.: 200°C

Für weitere Untersuchungen werden drei PVC-U-Rezepturen ausgewählt, die in ihrer Kurvenlage signifikante Unterschiede zeigen und somit als Versuchsrezepturen für das eingesetzte Schneidwalzensystem geeignet sind.

Die Abbildungen 5-7 und 5-8 zeigen die Fließkurven der untersuchten 3 Proben im Temperaturbereich von 180°C – 200°C, welche während der Versuchsreihen am Walzwerk parallel zur Messung mit der Schneidwalze entnommen wurden.

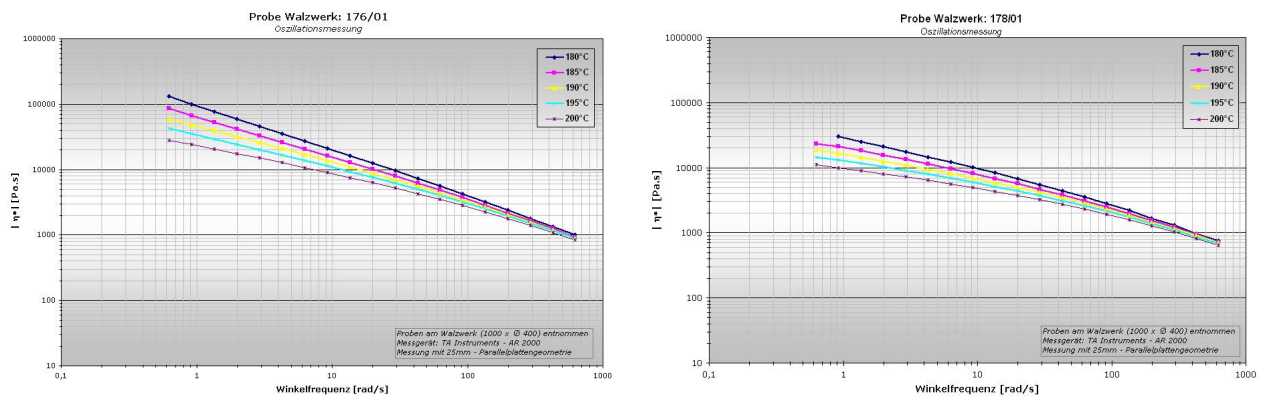


Abb. 5-7: Proben M176/01 und M178/01 im Temperaturbereich von 180°C bis 200°C

Es ist eine deutliche Abnahme der Viskosität bei zunehmender Temperatur und Schergeschwindigkeit zu erkennen. Mit steigenden Schergeschwindigkeiten bis ca. $\omega = 680 \text{ s}^{-1}$ fallen die Viskositäten auf ein allgemeines niedriges Niveau von ca. $900 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Eine Gegenüberstellung der PVC-Messkurven bei Prüftemperaturen von 180°C – 200°C zeigt eine deutliche und signifikante Herabsetzung der Viskosität der höher modifizierten Proben. Die in den Materialkompositionen M177/01 und M178/01 zugesetzten fließfähigeren Bestandteile werden in den nachfolgenden Abbildungen in den Viskositätsverläufen deutlich widerspiegelt.

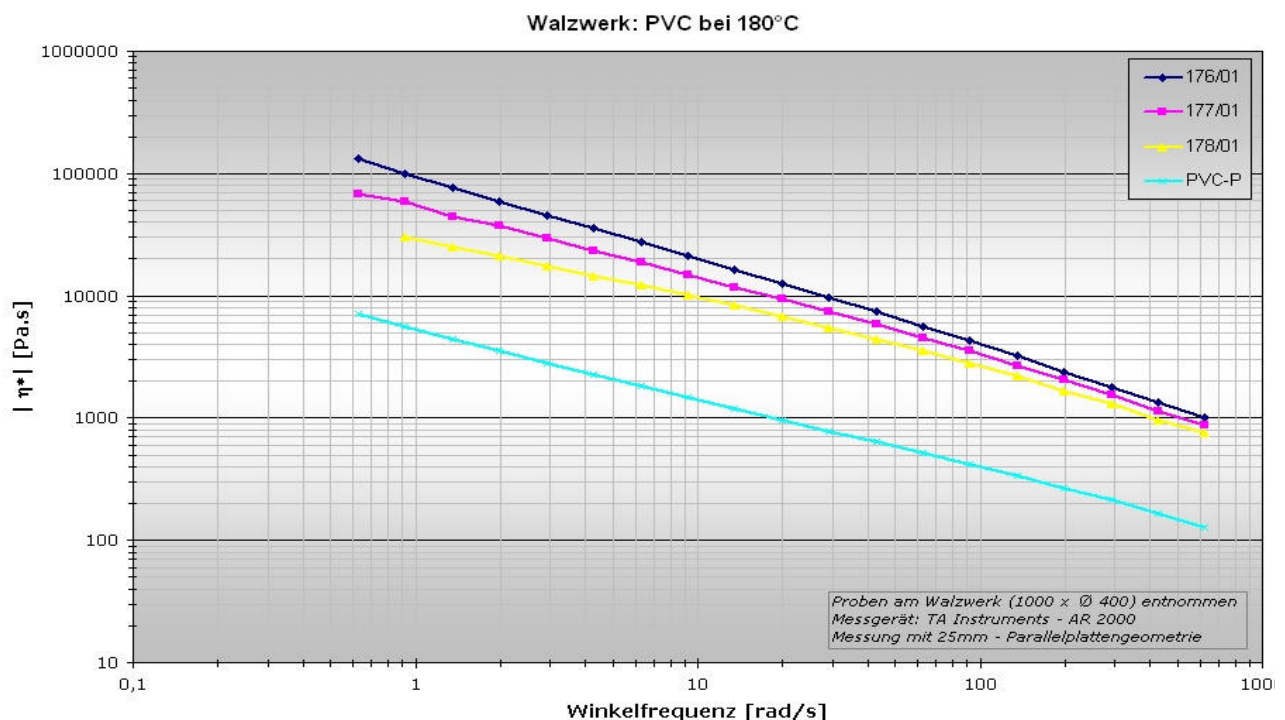


Abb. 5-8: Gegenüberstellung der Materialmischungen für 180°C

Weiterhin werden PET und PVC-P untersucht, die in Vorversuchen als thermisch stabile Folientypen eingesetzt wurden, um speziell mit weicher PVC-Rezeptur ein deutlich geändertes Fließverhalten zu erhalten. Diese werden ebenfalls in gleichen Temperaturbereichen verglichen, für PET von 170°C – 190°C und für PVC-P von 135°C – 190°C.

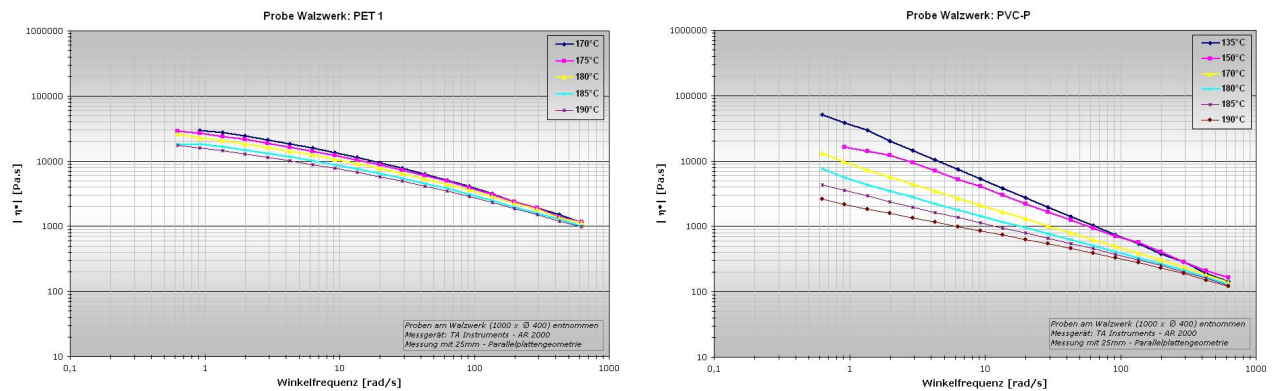


Abb. 5-9: Proben PET 1 und PVC-P im Temperaturbereich von 135°C bis 190°C

Auch hier ist eine deutliche Abnahme der Viskosität bei zunehmender Temperatur und Schergeschwindigkeit zu erkennen. Mit steigenden Schergeschwindigkeiten bis $\omega=680 \text{ s}^{-1}$ fallen die Viskositäten bei PET auf ca. 1 kPa*s und bei PVC-P auf 0,1 kPa*s.

Ein Vergleich von kalandrierten und gewalzten Proben zeigt systematische Unterschiede in den Viskositätskurven bei gleichen Massetemperaturen. Dargestellt sind in Abbildung 5-10 die Kurven für PVC-U, Typ M176/01, kalandriert und am Walzwerk entnommen, für den Temperaturbereich von 180°C – 200°C.

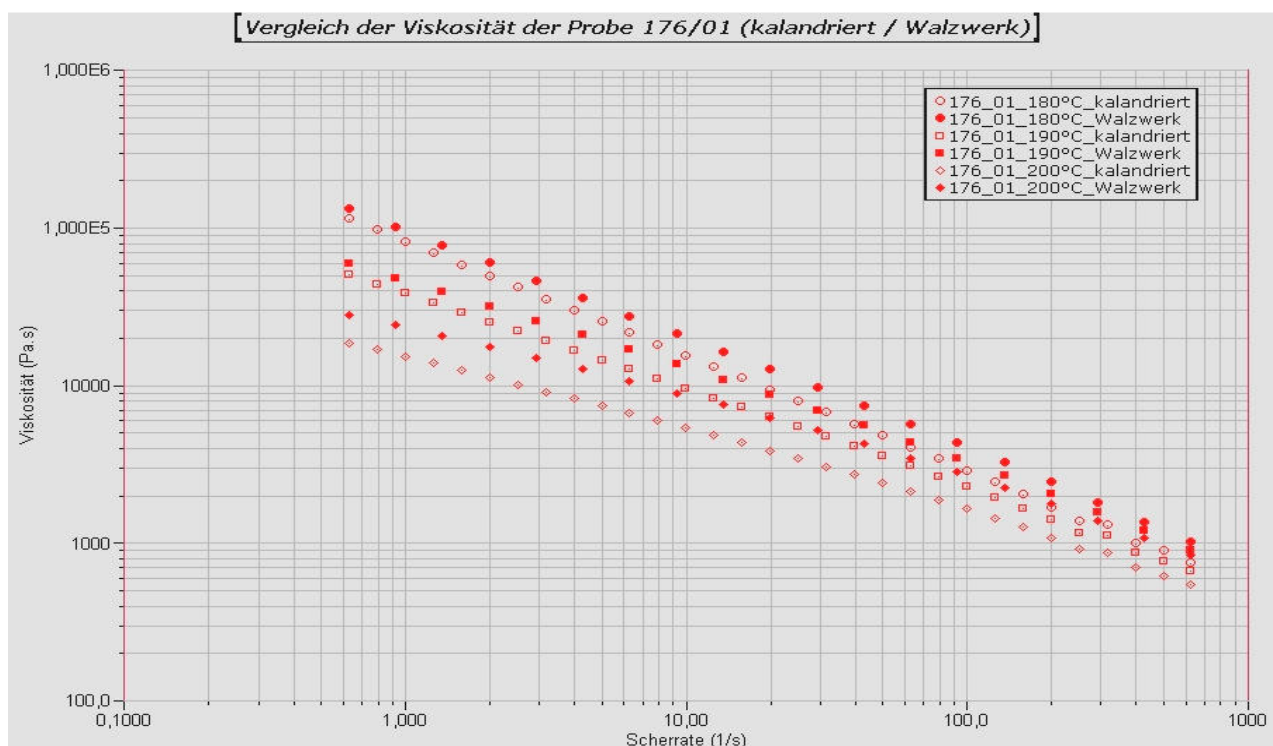


Abb. 5-10: Vergleich der Fließkurven von kalandrierten und gewalzten Mustern Typ M176/01

Die kalandrierten PVC-Proben liegen vollständig im nichtlinearen Bereich des Fließverhaltens ohne erkennbaren Übergang zu η_0 und besitzen somit Potenzgesetzcharakter. Die am Walzwerk hergestellten Proben zeigen einen steileren Abfall der Kurven, liegen niedriger als die kalandrierten Proben und haben ebenfalls Potenzgesetzcharakter ohne erkennbaren Übergang zu η_0 . Durch die bessere Einarbeitung der Verarbeitungshilfsmittel in den kalandrierten Folienmustern zeigen sich für alle Messungen niedrigere Viskositäten. Die Mischung und die Zugabe aller Verarbeitungshilfsmittel erfolgt im Mischer der Kalandieranlage. Das Pulver wird im Knetter/Extruder plastifiziert und in den Kalanderspalten weiter homogenisiert. Die höheren Viskositätswerte der am Walzwerk entnommenen Muster entstehen aufgrund der fehlenden Verarbeitungsspalte des nachfolgenden Kalanders, einer schlechteren Durchmischung der Rezeptur durch die fehlende Schereinwirkung und der somit schlechteren Einbindung und Wirksamkeit der Verarbeitungshilfsmittel. Dies bestätigen auch die Untersuchungen von Chaudhari /110/.

5.1.4. COX-MERZ-Regel

Die COX-MERZ-Regel ist eine empirische Beziehung, in der angenommen wird, dass bei vielen Polymeren eine Übereinstimmung zwischen der stationären Scherviskosität (in Abhängigkeit von der Scherrate) und dem Absolutbetrag der komplexen Viskosität (in Abhängigkeit von der Winkelfrequenz) besteht. Umfangreiche Untersuchungen werden durch Janowski und Malkin (in Vinogradov /111/) dargestellt. Sie untersuchen Zusammenhänge, die zwischen Daten aus stationärer Viskositätsmessung und dynamischen Messungen (Frequenzsweep) erhalten wurden.

Durch Schnabel /102/ erfolgt eine Klassifizierung verschiedener Stoffgruppen über die als COX-MERZ-Regel bekannte empirische Gleichung:

$$\eta(\dot{\gamma}) = |\eta^*(\omega)| \quad (5.11)$$

Verglichen wird eine Materialfunktion mit Informationen über die Struktur mit der Anwendung von Oszillationen kleiner Amplituden (ω) mit einer Materialfunktion für den Deformationsprozess bei großen Deformationen ($\eta(\dot{\gamma})$). Somit können über dynamische Messungen auch Informationen zum Materialverhalten im Bereich der nichtlinearen Viskoelastizität erhalten werden. In /102/ werden drei prinzipielle Formen der Korrelation von Stoffklassen nach (Gl. 5.11) unterschieden:

$$\text{Typ A:} \quad \eta^*(\omega) = \eta(\dot{\gamma}) \quad \text{für} \quad \omega = \dot{\gamma}$$

$$\text{Typ B:} \quad \eta^*(\omega) < \eta(\dot{\gamma})$$

$$\text{Typ C:} \quad \eta^*(\omega) > \eta(\dot{\gamma})$$

Verschiedene Stoffsysteme zeigen dabei ein zu Typ A abweichendes Verhalten. Hierzu zählen neben gefüllten Polymerschmelzen auch PVC-Schmelzen (Typ C). Als Ursachen der Abweichungen werden phänomenologisch energetische Wechselwirkungen oder Strukturierungsprozesse innerhalb der Stoffsysteme angesehen.

Für einen Vergleich beider Materialfunktionen sollte die kinematische Variable Schergeschwindigkeit nach folgender Definition genutzt werden:

Einfache Scherströmung: $\dot{\gamma}_{st} = \dot{\gamma}$

Oszillationsscherströmung: $\dot{\gamma}_{dyn} = \gamma_0 \cdot \omega$ ($\gamma_0 = 1 \dots$ hydrodynamisches Paradoxon)

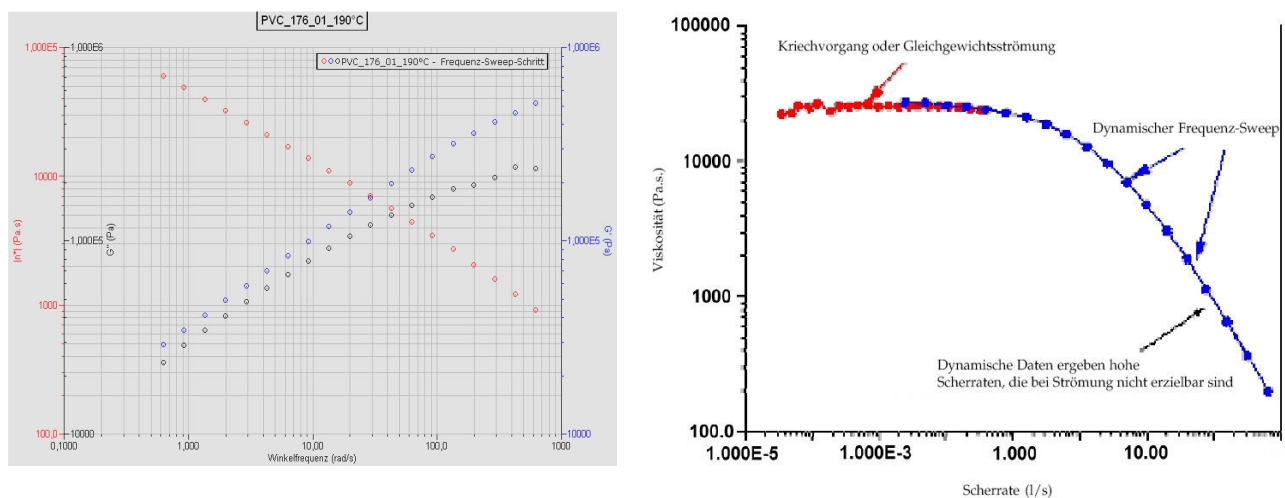


Abb. 5-11: li.: oszillierende Messung; re.: COX-MERZ-Bedingungen

Für neue Stoffe ist der Nachweis der Gültigkeit der COX-MERZ-Regel neu zu führen, das heißt, γ_0 ist zu bestimmen.

Ein Ausgangspunkt ist die Forderung der Kontinuumsmechanik, dass die dynamische Viskosität und die stationäre Viskosität in den Grenzwerten von niedriger Frequenz und Scherrate verwandt sind, d. h.

$$\eta'(\omega) \Big|_{\omega \rightarrow 0} = \eta(\dot{\gamma}) \Big|_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \quad \text{mit} \quad \eta'(\omega) = \frac{G''(\omega)}{\omega} \quad (5.12)$$

Somit definiert sich die empirisch ermittelte COX-MERZ-Regel nach /96/ zu

$$\eta(\dot{\gamma}) = \left| \eta^*(\omega) \right|_{\dot{\gamma} = \omega} \quad (5.13)$$

Für weiterführende Untersuchungen werden alle Datensätze mit der COX-MERZ-Regel transformiert, um aus den erhaltenen Messkurven die entsprechenden Modellparameter für stationäres Fließen zu erhalten. Die Messungen der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten PVC-Proben sind in Abb. 5-5 bis 5-9 dargestellt.

5.1.5. Ermittlung der Parameter der rheologischen Modelle

Für ingenieurtechnische Anwendungen beschreibt das Potenzgesetz ausreichend genau den Bereich typischer Schergeschwindigkeiten in und an Arbeitsmaschinen. Für den Kalandrierprozess und in dem in dieser Arbeit betrachteten Fall der realen Friktionen der eingesetzten unsymmetrischen Walzenpaarung liegen die Schergeschwindigkeiten im linear fallenden Kurvenabschnitt des Potenzgesetzes.

$$\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (5.14)$$

Die erhaltenen Faktoren der Analyse-Software des AR 2000 verwenden das Potenzgesetz in folgender Form:

$$\sigma = b \cdot \dot{\gamma}^c \quad (5.15)$$

Alternativ zum Potenzgesetz kann für eine bessere Abbildung der Messpunkte das Carreau-Modell gewählt werden.

Das Carreau-Modell bietet aufgrund seiner 4 Parameter eine gute Abbildung der gesamten Fließkurve im Bereich sehr kleiner bis zu sehr großen Schergeschwindigkeiten.

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{(1 + (k \cdot \dot{\gamma})^2)^{n/2}} \quad (5.16)$$

Mit den Parametern der Analyse-Software ergibt sich folgende Schreibweise:

$$\frac{\eta - b}{a - b} = \frac{1}{(1 + (c \cdot \dot{\gamma})^2)^{d/2}} \quad (5.17)$$

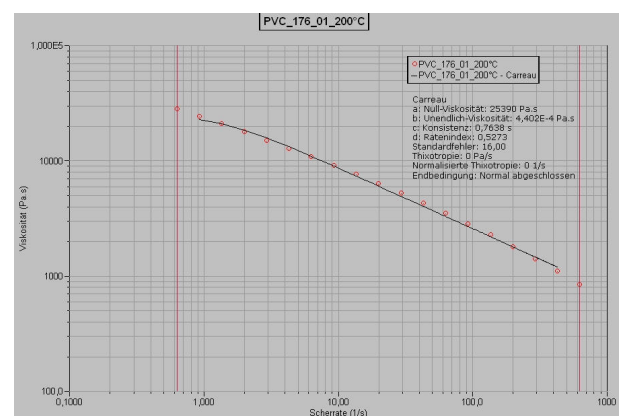
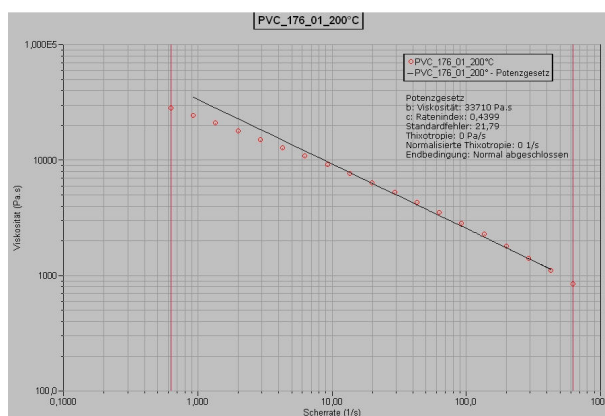


Abb. 5-12: Darstellung der Kurvenanpassung mittels Potenzgesetz (li.) und Carreau-Modell (re.)
(Probe M176/01 bei 200°C)

Wie der in Abbildung 5-12 für das Potenzgesetz und das Carreau-Modell abgebildete Kurvenverlauf zeigt, bildet das Carreau-Modell den Verlauf der Fließkurve deutlich besser ab. Für den Schergeschwindigkeitsbereich, in welchem die praktischen Messungen an Versuchswalzwerk und Kalandrierwerk realistisch erscheinen, liegt die Fließkurve bei beiden Modellen im nicht-linearen Bereich des Fließverhaltens. Nach Formel 4.51 (Abschnitt 4.4.3.) ergibt sich für die Schergeschwindigkeit im Prozess

$$\dot{\gamma} = \frac{u_f - u_1}{H} . \quad (5.18)$$

Bei relevanten Friktionen der eingesetzten Schneid- und Kalandrierwalze von 0 bis max. 6 m/min sind Schergeschwindigkeiten von 0 bis 100 s⁻¹ zu erwarten.

Vorteile des Potenzgesetzes liegen in der formalen Anpassung der Fließkurvenkrümmung durch den Fließindex n, so dass mit den Parametern k und n an Stelle von η der Kurvenverlauf meist hinreichend genau approximiert werden kann und es mathematisch unkompliziert ist. Das Potenzgesetz kann auf einfache Weise durch Logarithmierung linearisiert werden. Damit können mit bereits wenigen (mindestens zwei) Messpunkten der Wertepaare ($\tau_1, \dot{\gamma}_1; \tau_2, \dot{\gamma}_2, \dots$) die Parameter k und n bestimmt werden. Nachteil ist die nicht exakte physikalische Abbildung für hohe Schergeschwindigkeiten ($\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ für $\eta_\infty = 0$) und für die Anfangsviskosität bei ($\dot{\gamma} \rightarrow 0$ mit $\eta_0 = \infty$).

Weiterhin weicht die physikalische Dimension von k (Pa s⁻ⁿ) von der Dimension der wahren Viskosität η (Pa s⁻¹) ab. Somit sind die Parameter k und n keine reinen Stoffkonstanten, sondern Parameter eines mathematischen Approximationsmodells, die die Stoffwerte nicht exakt repräsentieren [112, 113].

Aufgrund der ausreichenden Genauigkeit des Potenzgesetzes im vorliegenden Schergeschwindigkeitsbereich und der Lage der Messwerte im nicht-linearen Bereich des Fließverhaltens der PVC-U-Proben wird das Carreau-Modell, verbunden mit der damit nötigen Bestimmung der Nullviskosität und der nicht benötigten genauen Abbildung der Fließkurve bei sehr hohen Schergeschwindigkeiten, in späteren Abschnitten dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

5.1.6. Ergebnisse

Nach Gleichung 5.15 ergeben sich für die dynamisch gemessenen Fließkurven der einzelnen Proben für das Potenzgesetz folgende Parameter (Tab. 5-4 bis 5-6):

PVC-U (Walzwerk)									
Typ	<u>M176/01</u>			<u>M177/01</u>			<u>M178/01</u>		
<u>Parameter</u>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>Sigma</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>Sigma</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>Sigma</i>
180°C	105000	0,2852	16,19	66920	0,3383	30,56	42210	0,3873	30,07
185°C	74860	0,3290	18,18	48250	0,3785	21,26	31730	0,4253	25,10
190°C	58380	0,3649	21,06	36930	0,4058	21,90	25850	0,4537	22,94
195°C	45790	0,4006	21,00	32400	0,4371	20,44	21720	0,4749	25,53
200°C	34040	0,4381	21,74	24880	0,4639	26,33	17470	0,5009	25,67

Tab. 5-4: Potenzgesetzparameter TA Rheologie - Datenauswertung

PET (Walzwerk)						
Typ	<u>PET 1</u>			<u>PET 2</u>		
<u>Parameter</u>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>Sigma</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>Sigma</i>
170°C	52940	0,4182	27,21	43620	0,4508	30,78
175°C	49600	0,4220	37,57	33570	0,4807	26,38
180°C	41720	0,4437	29,13	31890	0,4983	26,37
185°C	31140	0,4776	21,24	20150	0,5214	24,34
190°C	27100	0,4903	22,15	18640	0,5433	21,95

Tab. 5-5: Potenzgesetzparameter TA Rheologie - Datenauswertung

PVC-P (Walzwerk)						
<u>Temperatur</u>	135°C	150°C	170°C	180°C	185°C	190°C
<i>b</i>	35940	22990	8762	5330	3869	2493
<i>c</i>	0,1748	0,2308	0,3592	0,4306	0,4786	0,537
<i>Sigma</i>	39,57	41,47	6,062	8,308	12,89	13,56

Tab. 5-6: Potenzgesetzparameter TA Rheologie - Datenauswertung

Für das Carreau-Modell ergeben sich nach Gleichung 5.17 folgende Parameter für die Probe M176/01 bei der dynamischen Messung:

PVC (Walzwerk) M176/01					
<u>Temperatur</u>	180°C	185°C	190°C	195°C	200°C
<i>A</i>	129000	74450	49600	33820	22170
<i>B</i>	7,12E-05	9,41E-05	2,87E-04	1,94E-04	8,76E-05
<i>C</i>	1,5150	1,0580	0,8575	0,6880	0,5555
<i>D</i>	0,7106	0,6600	0,6183	0,5787	0,5354
<i>Sigma</i>	5,634	7,958	10,510	12,650	15,310

Tab. 5-7: Carreau-Modell-Parameter TA Rheologie - Datenauswertung

5.1.7. Ermittlung der temperaturbezogenen Anpassung an das Potenzgesetz

Die Viskosität Newtonscher und strukturviskoser Stoffe bzw. viskoelastischer Stoffe sinkt mit steigender Temperatur. Dieses Verhalten lässt sich mit der Arrhenius-Gleichung beschreiben. Die Temperatur wird in Kelvin angegeben. Für die Newtonsche Gleichung gilt:

$$\eta = c \cdot \exp \left(\frac{b}{T} \right) \quad (5.19)$$

Für nicht-Newtonsche Stoffe wird am Beispiel des Potenzgesetzes die Temperaturabhängigkeit des Konsistenzfaktors k mit Gleichung 5.19 erweitert (siehe Gl. 4.11).

5.1.7.1. Datenanalyse mittels TA Instruments Datenprogramm

Polymere zeigen aufgrund ihrer viskoelastischen Eigenschaften bei Deformation und Strömung ein Verhalten, das sowohl temperatur- als auch zeitabhängig (frequenzabhängig) ist. Wenn ein Polymer einer konstanten Belastung ausgesetzt wird, steigt die Deformation des Materials im Laufe der Zeit an. Messungen zur Nachgiebigkeit oder elastischen Dehnung innerhalb einer kurzen Zeitspanne ergeben daher höhere bzw. niedrigere Werte als Messungen über längere Zeiten. Die theoretische Grundlage für eine Zeit-Temperatur-Superposition lautet:

- die Prozesse bei der molekularen Relaxation oder Neuordnung in viskoelastischen Materialien laufen bei höheren Temperaturen beschleunigt ab,
- es besteht eine direkte Äquivalenz zwischen der Zeit (der Frequenz der Messung) und der Temperatur.

Die Zeit, in der solche Prozesse ablaufen, kann dadurch reduziert werden, dass die Messungen bei erhöhten Temperaturen erfolgen und die Messdaten dann auf niedrigere Temperaturen transponiert werden. Das Ergebnis dieses Vorgangs ist eine „Masterkurve“, mit der die Materialeigenschaften bei einer bestimmten Temperatur über einen großen Schergeschwindigkeitsbereich prognostiziert werden können. Die Parameter sind über die verwendete Software nach Gleichung 4.14 zu ermitteln.

5.1.7.2. Schätzung von Koeffizienten einer Temperaturfunktion

Alternativ zu der Datenanalyse der Rheometersoftware ergeben sich als Lösung eines Gleichungssystems aus $\dot{\gamma}$, η_a und T die Parameter A , B und C unter Annahme des nachfolgenden temperaturabhängigen Potenzgesetz-Ansatzes.

$$\eta_a = A \cdot \dot{\gamma}^B \cdot e^{CT} \quad (5.20)$$

Für die durchgeführten Messungen ergeben sich folgende Parameter:

Typ:	Parameter				
	A	B	C	$\dot{\gamma}$	T
M176/01	$2,350 \times 10^7$	-0,610	-0,032	$0,63 \text{ s}^{-1}$ bis $625,2 \text{ s}^{-1}$	180 – 200°C
M177/01	$7,942 \times 10^6$	-0,553	-0,029		
M178/01	$3,238 \times 10^6$	-0,492	-0,027		
PVC-P	$6,235 \times 10^5$	-0,620	-0,026		135 – 190°C
PET 1	$1,706 \times 10^6$	-0,476	-0,023		170 – 190°C
PET 2	$4,243 \times 10^6$	-0,409	-0,030		

Tab. 5-8: Parameter des temperaturbezogenen Potenzgesetzes nach Gl. 5.20

5.1.8. Darstellung der Parameter der temperaturabhängigen Masterkurven

Nach der rechentechnischen Auswertung mittels TA Instruments-Software ergeben sich für die Zeit-Temperatur-Superposition die in Tabelle 5-9 enthaltenen Werte. Nach der Verschiebung der Kurven lassen sich für die Masterkurve die Konstanten b und c des Potenzgesetzes errechnen und die Verschiebungsfaktoren a_T ermitteln.

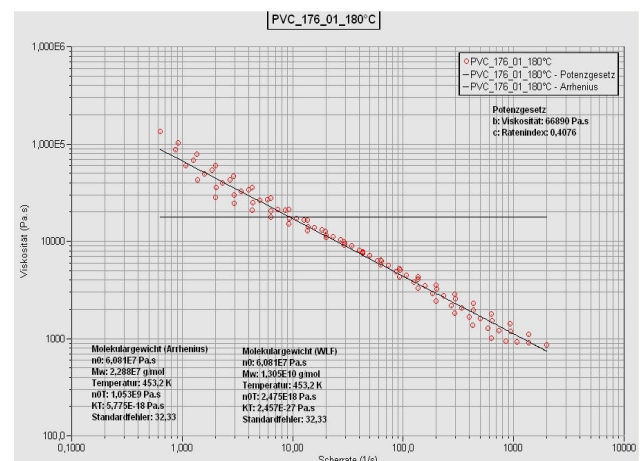
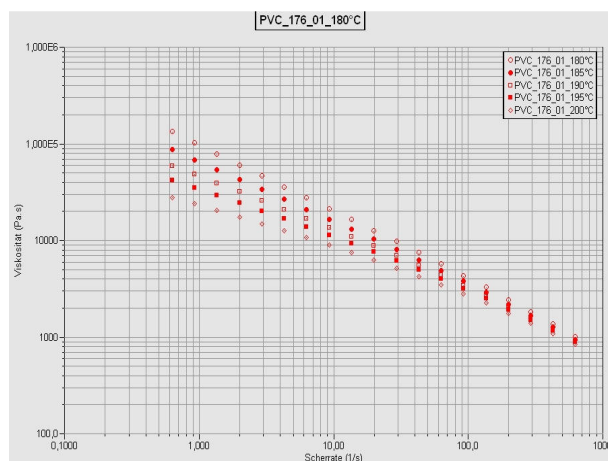


Abb. 5-13: li.: Darstellung der Viskositätsfunktionen; re.: Darstellung der Masterkurve (180°C)

Im Rahmen der durchgeführten Analysen ergeben sich folgende Parameter für $\log a_T$:

Typ:	Parameter						
	b	c	lg a _T				
			180°C	185°C	190°C	195°C	200°C
M176/01	66890	0,4076	0	0,1352	0,2326	0,3387	0,5012
M177/01	44180	0,4457	0	0,1296	0,2772	0,3041	0,5013
M178/01	29840	0,4862	0	0,1712	0,2478	0,3538	0,5082
			135°C	150°C	170°C	180°C	190°C
PVC-P	2813	0,5611	-0,7945	-0,5848	0,2319	0	0,3778

			170°C	175°C	180°C	185°C	190°C
PET 1	35376	0,4781	-0,1548	-0,0938	0	0,1484	0,2428
PET 2	27780	0,5323	-0,1138	-0,0245	0	0,3981	0,3977

Tab. 5-9: Parameter des temperaturbezogenen Potenzgesetzes nach Gl. 4.14 ($\dot{\gamma}$ von 0,63 s⁻¹ bis 625,2 s⁻¹)

5.1.9. Korrektur der ermittelten Materialfunktionen

Die in Abschnitt 5.1.3. beschriebenen und dargestellten Ergebnisse zeigen die Fließkurven der PVC-U-Rezepturen (Abb. 5-7 und 5-8). Diese wurden am Rotationsrheometer mit einer Platte-Platte-Geometrie im dynamischen Modus ermittelt. Für diese Anordnung und Durchführung ist bei nicht-Newtonschen Fluiden die Korrektur der gemessenen Viskositätskurven erforderlich. Hierfür wird die Korrektur für die Platte-Platte-Messgeometrie des Rheometers nach Weißenberg und Rabinowitsch verwendet und für die dynamische Oszillationsmessung die COX-MERZ-Regel (Kapitel 5.1.4.) angewandt.

5.1.9.1. Korrektur nach Weißenberg/Rabinowitsch

Die gemessene Viskosität in einer Kegel-Platte-Geometrie ist real kleiner als die aus den scheinbaren Fließkurven der PVC-U-Rezepturen berechneten. Für Newtonsche Fluide lautet die Gleichung für die Wandschubspannung am Rand, z. B. nach Kulicke /103/:

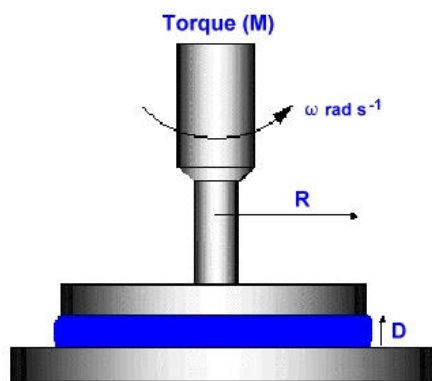
$$\tau_R = \frac{2 \cdot M_{PP}}{\pi \cdot R^3} \quad (5.21)$$

Für nicht-Newtonsche Fluide gilt nach /103/ analog zur Kapillarströmung die Korrektur nach Weißenberg/Rabinowitsch:

$$\tau_{R_{Korr}} = \frac{\tau_R}{4} \cdot \left[3 + \frac{d \log \tau_R}{d \log \dot{\gamma}_R} \right] \quad (5.22)$$

Abbildung 5-26 zeigt für die drei verwendeten PVC-U-Rezepturen die mit der Platte-Platte-Geometrie ermittelten sowie die um den Faktor 0,83 korrigierten realen Fließkurven, wobei der Fließindex n als annähernd konstant gefunden wurde.

Für die weiteren Untersuchungen werden von allen Materialproben die korrigierten Fließkurven verwendet.



$$\dot{\gamma} = \frac{\omega \cdot r}{D} \quad \text{bzw. am Rand} \quad \dot{\gamma}_R = \frac{\omega \cdot R}{D} \quad (5.23)$$

$$\tau_{R \text{ Kor}} = \frac{\tau_R}{4} \cdot [3 + n] \quad (5.24)$$

$$\text{mit } \eta_s = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{ergibt sich} \quad (5.25)$$

$$\eta_{\text{Korr}} = \frac{\left[\tau_R \cdot \frac{3 + n}{4} \right]}{\dot{\gamma}} \quad \text{zu} \quad (5.26)$$

$$\eta_{\text{Korr}} = \eta \cdot \left[\frac{3 + n}{4} \right] \quad (5.27)$$

Abb. 5-14: Platte-Platte-Messgeometrie nach Abb. 5-3

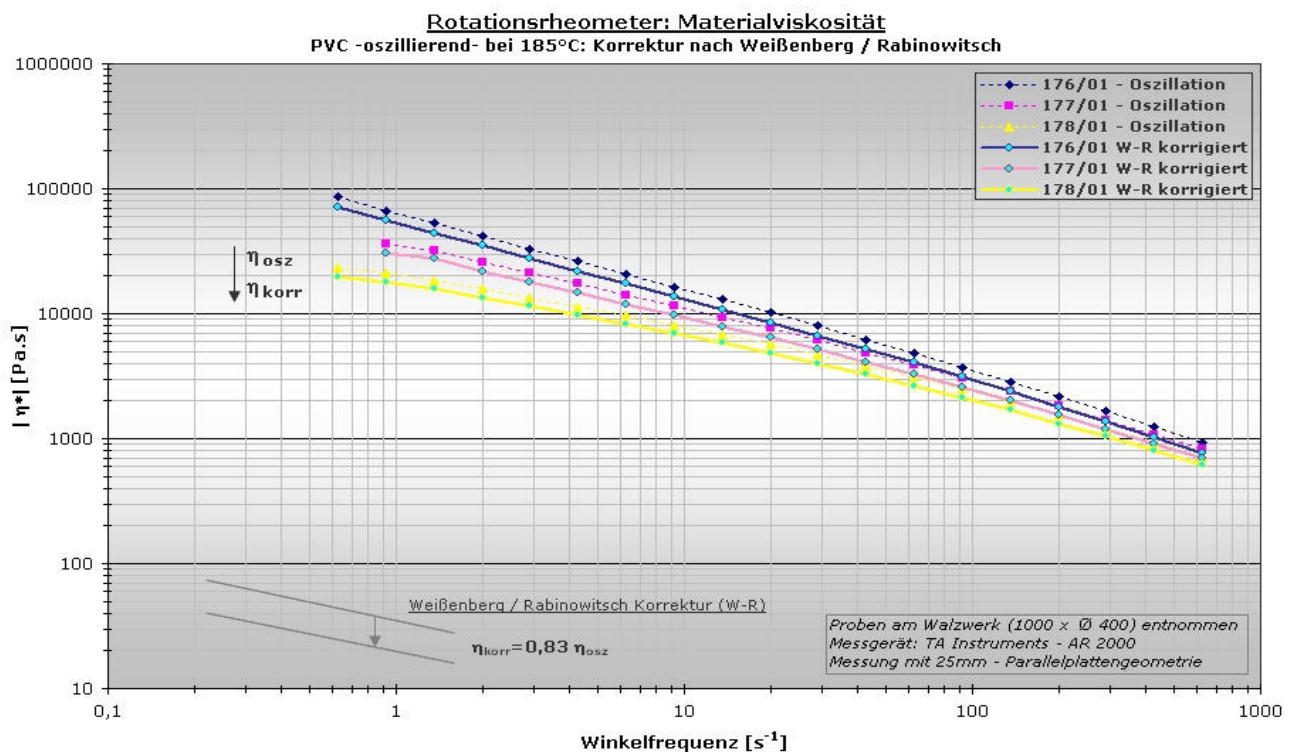


Abb. 5-15: Korrektur der Fließkurve nach Weißenberg/Rabinowitsch nach /103/

5.1.9.2. COX-MERZ-Regel

Die in Kapitel 5.1.4. beschriebene Anwendung der COX-MERZ-Regel wird für die erhaltene komplexe Viskosität der PVC-U-Proben ebenfalls durchgeführt. Nach /102, 103/ kann der Absolutbetrag der komplexen Viskosität an die stationäre Scherviskosität nach Gleichung 5.28 angeglichen werden.

$$\eta(\dot{\gamma}) = |\eta^*(\omega)| \quad \text{für} \quad \omega = 1,20 \cdot \dot{\gamma} \quad (5.28)$$

Abbildung 5-16 zeigt die gemessene Fließkurve der stationären Scherviskosität und der komplexen Viskosität der PVC-U-Probe M176/01. Die stationäre Scherviskosität ist bei allen gemessenen Proben geringer.

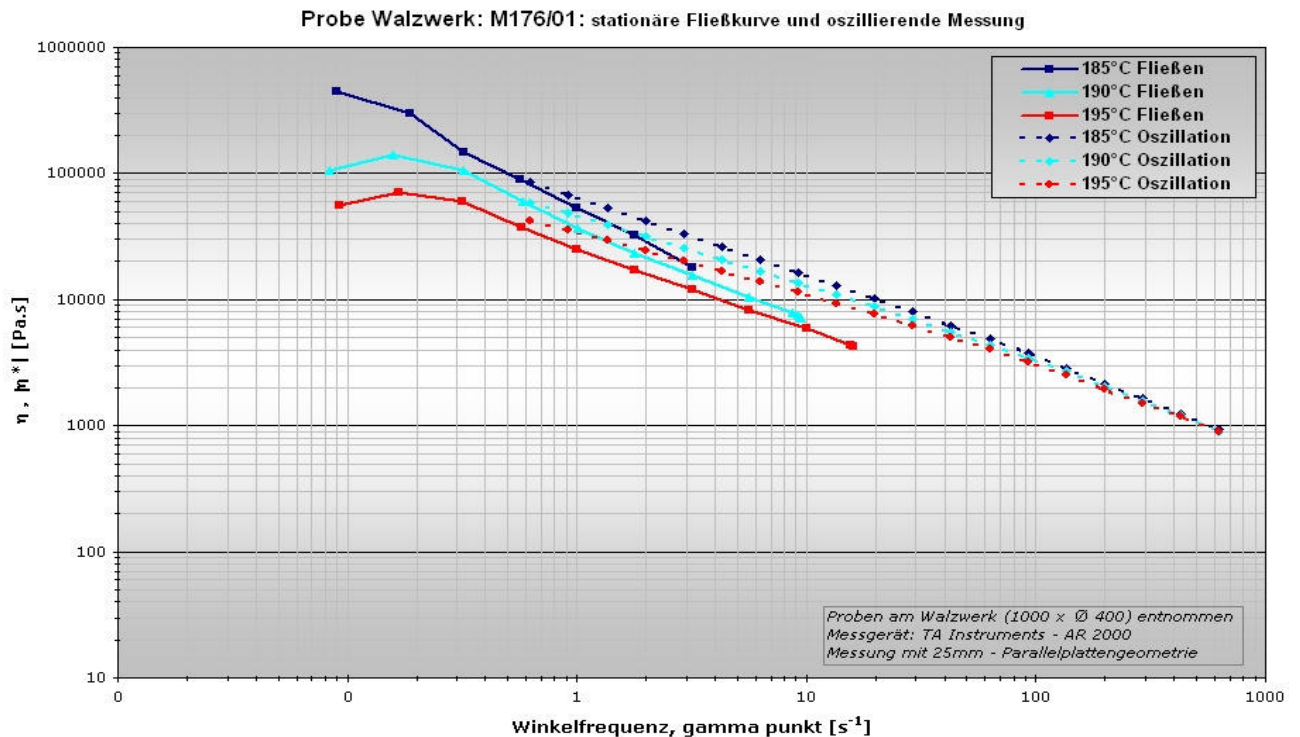


Abb. 5-16: Fließkurven für stationäre Scherviskosität und komplexe Viskosität (M176/01)

Die ermittelten komplexen Viskositäten werden entsprechend Abb. 5-17 korrigiert.

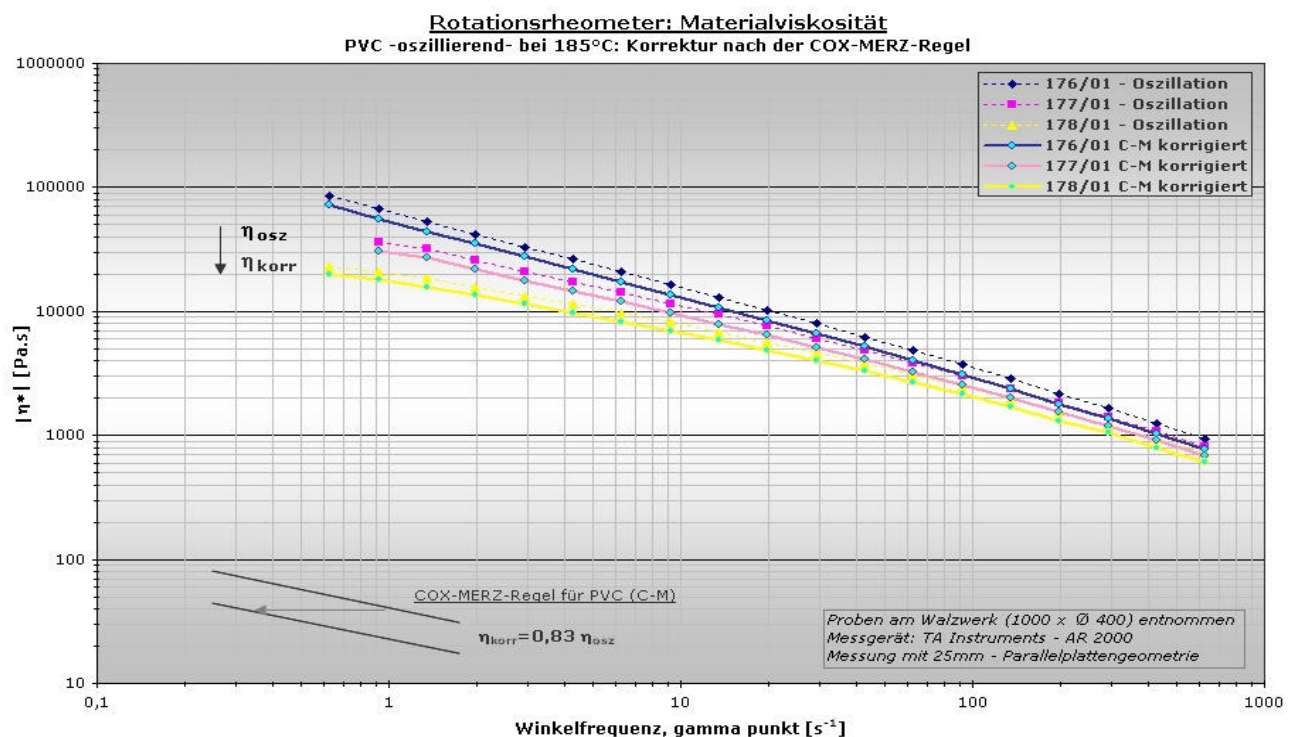


Abb. 5-17: Anpassung der Fließkurve nach der COX-MERZ-Regel

5.1.9.3. Gesamtkorrektur

Die am Rotationsviskosimeter ermittelten Fließkurven werden im Weiteren unter Berücksichtigung der Korrekturen nach Weißenberg/Rabinowitsch und der COX-MERZ-Regel verwendet. Es ergibt sich eine Gesamtkorrektur für $\eta^*(\omega)$ von:

$$\omega = 1,44 \cdot \dot{\gamma} \quad \text{für} \quad \eta(\dot{\gamma}) = |\eta^*(\omega)| \quad (5.29)$$

Abbildung 5-18 zeigt die Gesamtverschiebung der Fließkurve.

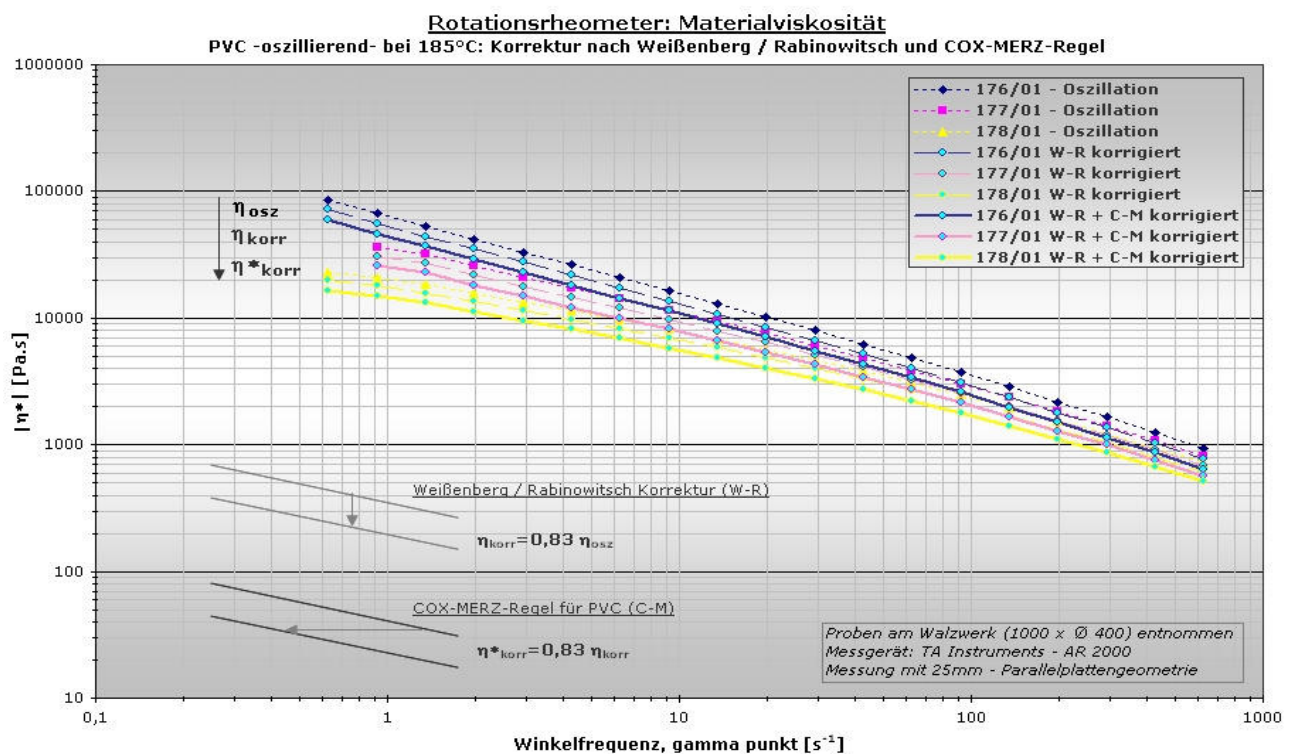


Abb. 5-18: Gesamtkorrektur der Fließkurve (COX-MERZ-Regel und Weißenberg/Rabinowitsch)

5.1.10. Zusammenfassende Bewertung

Für die verwendeten Materialien wurden mit dem beschriebenen Rotationsrheometer die Fließkurven ermittelt und dargestellt. Das Potenzgesetz wird bei den vorliegenden Schergeschwindigkeiten als ausreichend erachtet und im Weiteren verwendet. Die Gültigkeit der COX-MERZ-Regel wurde überprüft. Ihre Anwendung soll den Mess- und Zeitaufwand an Rheometern für neue Materialien und PVC-Rezepturen verringern. Eine weitere Vereinfachung in der späteren Nutzung der vorliegenden Ergebnisse wird mit dem temperaturabhängigen Potenzgesetz-Ansatz gesehen. Mit der Nutzung der einmalig zu ermittelnden Parameter verkürzt sich der Messaufwand bei der Erstellung der Fließkurven am Rheometer und auch am Prozessviskosimeter.

5.2. Versuche im Technikumsmaßstab

5.2.1. Prozessparameter einer Kalandieranlage

An der Kalandieranlage wird, die Misch- und Gelieraggregate unbeachtet, die beschriebene Messeinrichtung an den folienführenden Walzen eingesetzt. Dazu wurden für den Kalandrierer und die ersten Nachfolgewalzen die Temperatur- und Geschwindigkeitsdaten für die untersuchten Mischungen aufgenommen. Je nach Dicke, Folienbreite und Eigenschaftsprofil der Folie müssen die Geschwindigkeiten der einzelnen Walzen sowie die Temperaturen angepasst werden. In Abbildung 5-19 sind die Parameter für eine Mono-PVC-U-Folie im Dickenbereich von 200 – 300 µm dargestellt.

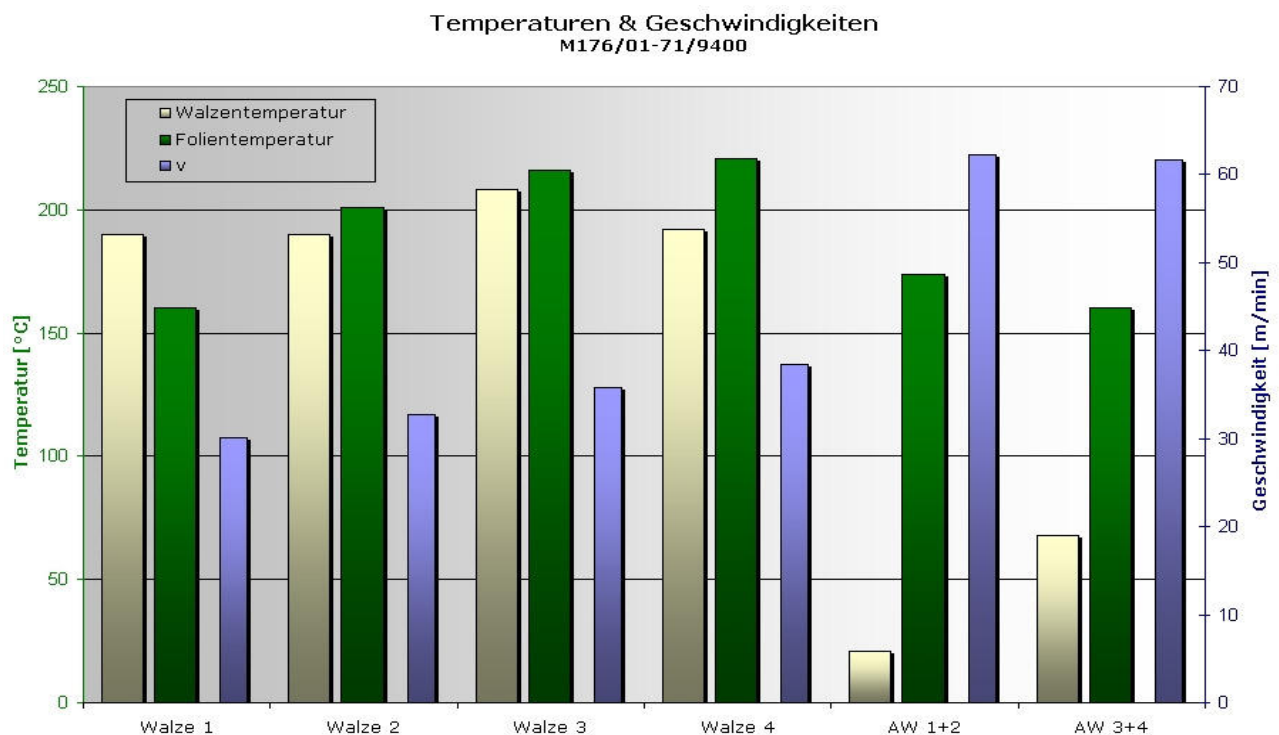


Abb. 5-19: Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung Kalandrierwalzen – Typ M176/01

Ein homogen ausgewalztes und gleichmäßig temperiertes Fell bildet sich auf der 2. Kalandrierwalze kurz vor dem 2. Walzenspalt aus. Die abgebildeten Temperaturverteilungen stellen eine ebenfalls typische Kalandrierproduktion des gleichen Materialtypes dar. Die Messungen wurden mit verschiedenen Handmessgeräten durchgeführt. Zur Ermittlung der Walzentemperatur kam ein Kontaktthermometer Testo 925 mit Walzentemperaturfühler zum Einsatz, das im Bereich der Kalandrierwalzen eine Temperaturdifferenz von Messung und angezeigtem Einstellwert von maximal 1-2 K anzeigt und somit eine Nutzung der SPS-seitig angezeigten Temperaturen zulässt. Die Geschwindigkeiten wurden mit einem digitalen Handtachometer DHO 907 der Firma Jaquet überprüft und mit den SPS-seitigen Anzeigewerten verglichen. Hier liegt die Abweichung bei 0,1 – 0,2 m/min zwischen Anzeige und geeichtem Messgerät. Zur Messung der Folientemperaturen wurden zwei berührungslose Infrarot-Temperaturmessgeräte-Typen verwendet. Eine punktuelle Messung erfolgte über ein Raytek-

Handmessgerät Typ Raynger MX, Modell RAYMX4PTDG. Die nachfolgend dargestellten Temperaturverläufe wurden mit einem Scanner der Firma Raytek (Thermalert MP) aufgenommen. Dieser arbeitet mit einer bei PVC-U zulässigen Wellenlänge von $3,43\text{ }\mu\text{m}$ und einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon_T = 0,95$.

In Abbildung 5-20 wird der Temperaturverlauf an einem 4-Walzen-L-Kalender dargestellt. Die Folienbahn zeigt eine zunehmende Homogenisierung in der Temperaturverteilung bei gleichzeitiger Zunahme der Materialtemperatur nach jedem Walzenspalt. Für eine gleichmäßige Temperaturverteilung empfiehlt sich daher die Messposition an der Walze 3, an der auch aktuell Schneidwalzensysteme arbeiten.

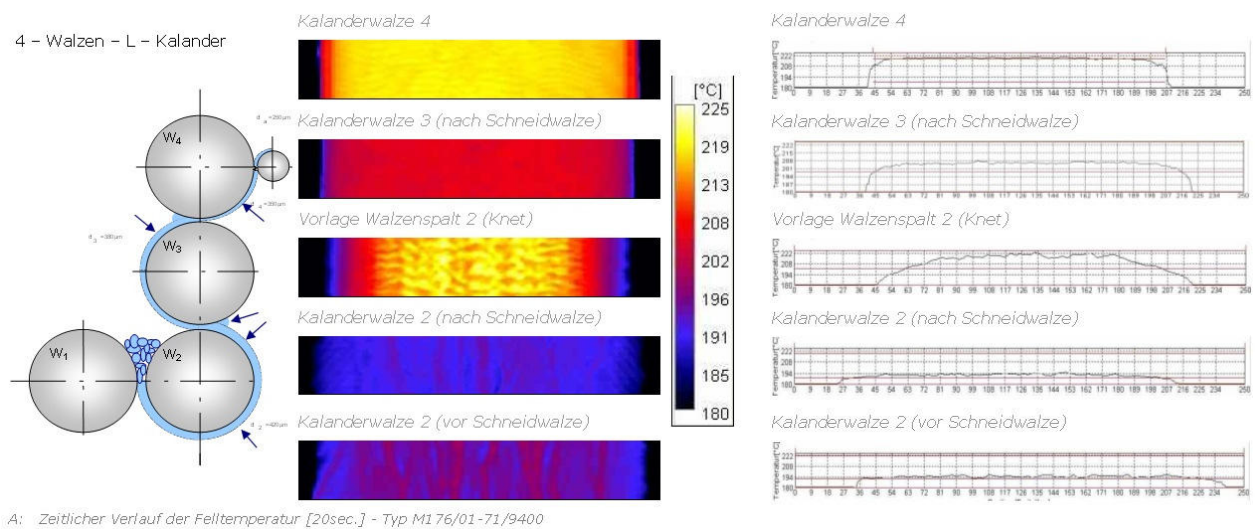


Abb. 5-20: Temperaturverteilung (Material) an einem 4-Walzen-L-Kalender (Materialtyp PVC M176/01)

Bei den Versuchen, die aufgrund der Größe der Produktionsanlagen und der geringen Verfügbarkeit für Testproduktionen an einem Walzwerk durchgeführt wurden, erfolgte die Messung erst nach gründlicher Durchmischung des Materials und einer homogenen Temperaturverteilung.

5.2.2. Aufbau der Versuchsanordnung

Der in Kapitel 3 beschriebene Versuchsstand, einsetzbar an Walzwerk oder Kalender, wurde am Fuß des Walzwerkes verschraubt und mit Messlehren parallel zum Walzwerk ausgerichtet. Nach dem Aufbringen der im Extruder plastifizierten Materialmischung erfolgte das Auswalzen einer homogenen Materialbahn bei definiertem Walzenabstand und konstanter Materialtemperatur. Temperaturänderungen des Materials können über die Änderung der Geschwindigkeit, der Walzentemperatur oder den Einsatz äußerer Wärmequellen erreicht werden.

Der Anlagenaufbau im Technikum besteht für die gesamte Versuchsanlage aus einem Planetwalzenextruder PWE 120, einem Mischwalzwerk mit Walzen der Abmaße $\varnothing 400 \times 1000\text{ mm}$ und einem 4-Walzen-S-Kalender mit Walzenabmessungen von $4 \times \varnothing 300 \times 600\text{ mm}$.

Der Versuchsstand wurde am Mischwalzwerk zwischen Kalandrier und Walzwerk positioniert, um die Materialbefüllung vom Planetwalzenextruder zu gewährleisten und einen guten Zugang für Temperatur- und Geschwindigkeitsmessungen zu erhalten (Abb. 5-21).

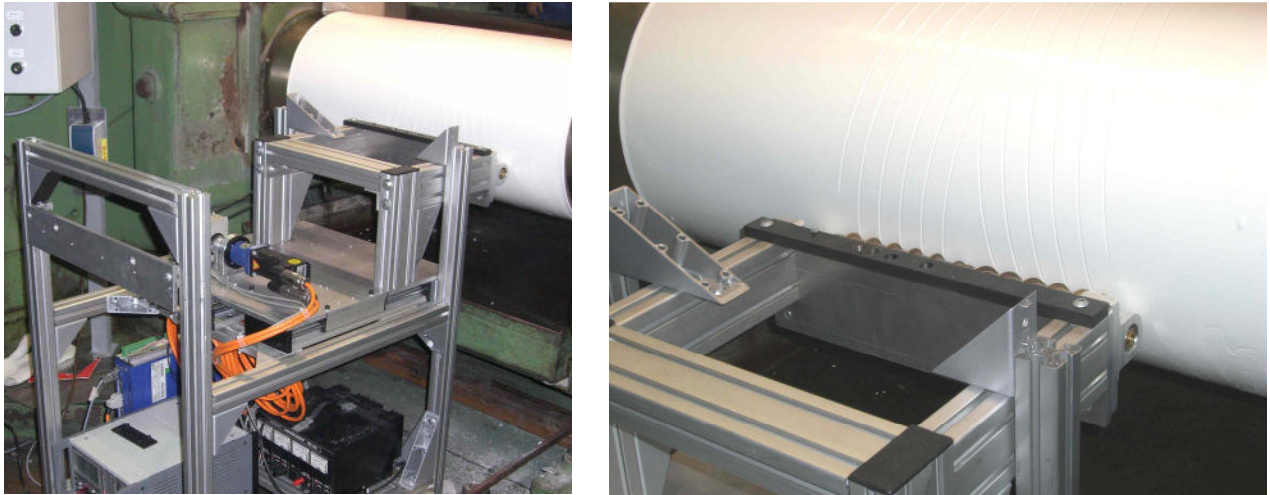


Abb. 5-21: Versuchsanordnung am Mischwalzwerk im Versuchstechnikum

5.2.3. Vorversuche

Die in Tabelle 5-10 dargestellten zu variierenden Parameter ergeben sich aus typischen Kalandrierdaten und simulieren unterschiedliche Rezepturen, Geschwindigkeitseinstellungen und Foliendicken. Für die Untersuchungen stehen drei PVC-U-Rezepturen, zwei PET-Abmischungen und eine PVC-P-Rezeptur zur Verfügung. In Voruntersuchungen zeigt sich am Walzwerk ein schneller thermischer Abbau der PVC-U-Rezepturen bei Temperaturen ab 195°C, unter 180°C werden diese nicht ausreichend homogen plastifiziert. PET-G, für den Kalandrierprozess modifiziert, bildet in einem Temperaturbereich von 175°C bis 195°C eine homogene Schmelze und bleibt über mehrere Minuten thermisch stabil. PVC-P wird bei Temperaturen ab 170°C schmelzeartig und im Bereich von 130°C bis 150°C stark zäh und elastisch. Damit ergeben sich für die eingesetzten Materialien nutzbare Temperaturbereiche von 180°C bis 195°C.

Weiterhin zeigen sich für niedrige Temperaturen und der damit verbundenen erhöhten Zähigkeit der Materialien deutliche Grenzen der mechanischen Stabilität des Versuchsaufbaus. Die am Kalandrier installierten Schneidwalzensysteme laufen annähernd im Gleichlauf an der Materialbahn – eine starke Erhöhung der Friktionen am Versuchsstand verändert die Winkel der Einschnitte der Schneidwendel in die Folienbahn von schräg nach außen laufend zu senkrecht in den Spalt einlaufend, so dass sie als Strömungshindernisse wirken und für den normalen Produktionsbetrieb ihren eigentlichen Zweck, das Transportieren der eingeschlossenen Luft nach außen, verlieren.

	Felldicke (d)	Geschwindigkeit (v)	Temperatur (T)	Konsistenzfaktor (η)	Einstellung Walzwerk	Typ / Stabilität der Messung
					185°C 10 m/min	<u>M176/01</u> – gute Plastifizierung, thermisch stabil für alle Messdurchgänge
					190°C 13 m/min	
					195°C 19 m/min	
Felldicke (d)		$d \updownarrow$ $v \updownarrow$	$d \updownarrow$ $T \updownarrow$	$d \updownarrow$ $\eta \updownarrow$	185°C 14 m/min	<u>M177/01</u> – gute Plastifizierung, thermisch stabil
Geschwindigkeit (v)	$v \updownarrow$ $d \updownarrow$	$v_K \updownarrow$ $v_S \updownarrow$	$v \updownarrow$ $T \updownarrow$	$v \updownarrow$ $\eta \updownarrow$	190°C 19 m/min	
Temperatur (T)	$T \updownarrow$ $d \updownarrow$	$T \updownarrow$ $v \updownarrow$		$T \updownarrow$ $\eta \updownarrow$	195°C 24 m/min	
Konsistenzfaktor (η)	$\eta \updownarrow$ $d \updownarrow$	$\eta \updownarrow$ $v \updownarrow$	$\eta \updownarrow$ $T \updownarrow$		185°C 10 m/min	<u>M178/01</u> – gute Plastifizierung, thermisch stabil
					190, 195°C 20 m/min	
					137- 188°C 20 m/min	<u>PVC-P</u> – gute Plastifizierung, zäh-elastisch bis Schmelze

... am Versuchswalzwerk/ -kalender variierte Größen

Tab. 5-10: visuelle Bewertung der Versuchsrezepturen

Zur Überprüfung des Versuchsaufbaus und einer Abschätzung der Verarbeitbarkeit auf dem Technikumswalzwerk wurden mit einer thermisch stabilen Polymermischung Vorversuche durchgeführt. Diese zeigen erwartungsgemäß eine deutliche Änderung des aufgenommenen Drehmomentes. Dieses fällt bei steigender Polymertemperatur signifikant ab.

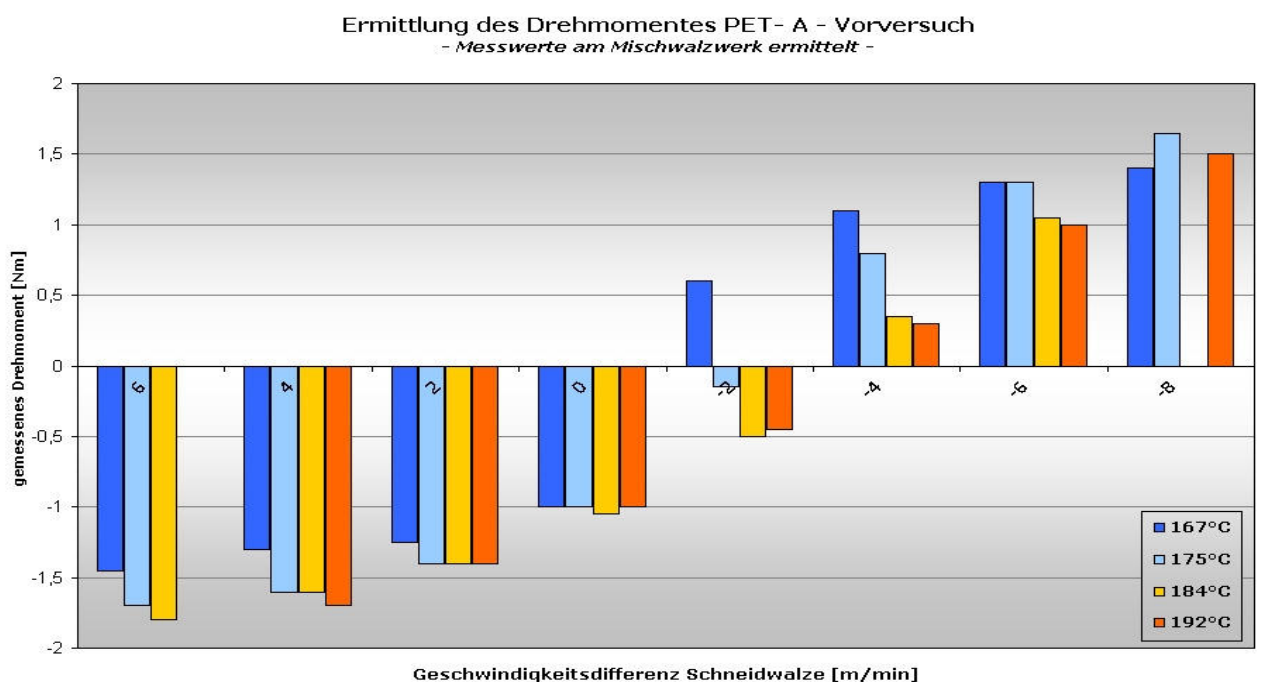


Abb. 5-22: Temperatur- und Friktionsänderung für G-PET_1 (PET-A)

Abbildung 5-22 zeigt den Drehmomentverlauf der Mischung 1 bei Materialtemperaturen von 167°C bis 192°C. Die Drehmomentmessungen ergeben für einen Temperaturbereich von 25 Kelvin circa 3 Nm Differenz. Dabei zeigen sich bei abnehmenden Materialtemperaturen mit zunehmender Festigkeit der Proben weniger stark steigende Drehmomente als angenommen. Diese können durch veränderte Strömungsverhältnisse wie Wandgleiten des Materials an der Schneidwendel oder der mechanischen Verwindung des Messaufbaus verursacht worden sein.

5.2.4. Versuchsergebnisse mit PVC-U

Die vorgestellten PVC-U-Rezepturen wurden am Technikumswalzwerk mit Hilfe des Messaufbaus analysiert. Die Durchführung der Messungen erfolgte wie bei den Vorversuchen mit PET. Die vorgemischten Rezepturen wurden zu jeweils 20 kg pro Probe im Extruder plastifiziert und am Walzwerk zu einem gleichmäßigen Fell homogenisiert. Nach Erreichen der vorgegebenen Materialtemperatur wurde die Schneidwendel mit synchroner Umdrehungsgeschwindigkeit in 100µm-Schritten auf die entsprechende Messtiefe in das Material eingefahren. Abb. 5-23 zeigt die eingreifende Schneidwendel und die sich ergebenden Einschnitte.

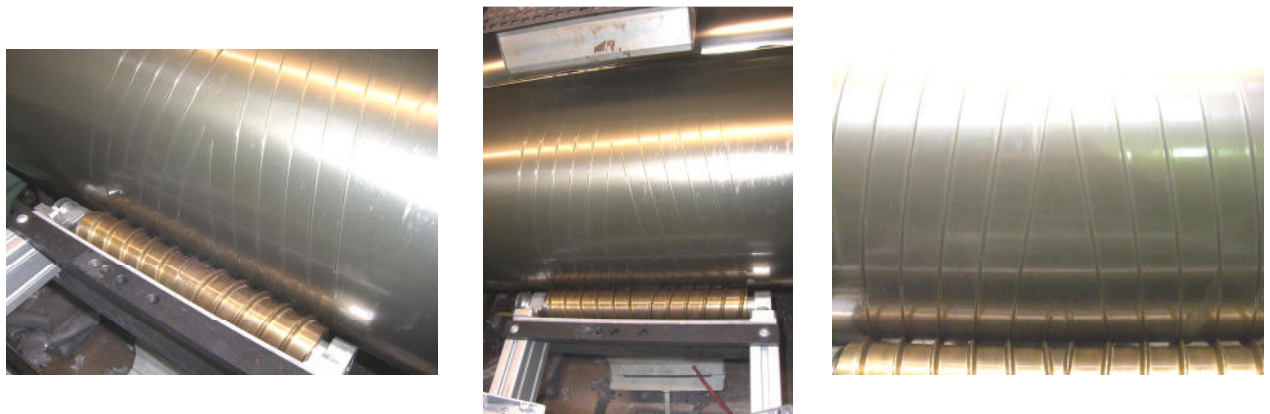


Abb. 5-23: Material im Versuchsstand; PVC-Kalandertypen mit eingreifender Schneidwendel

Die Messungen wurden bis zur thermischen Zersetzung der PVC-Proben durchgeführt, dann das Material vom Walzwerk entfernt und unter gleichen Bedingungen eine neue Menge aufgebracht und homogenisiert.

Die Messung der auftretenden Drehmomente erfolgte nach dem Erreichen der vorgegebenen Vergleichsdicke, die hier die Eindringtiefe in das Material ist. Bei Gleichlauf der Walzen wurde der Startwert erfasst und die Schneidwalzengeschwindigkeit erhöht und erniedrigt. Die Messwerte des Drehmomentes bei Gleichlauf der Walzen und bei Friktion der Walzenpaare wurden dabei aufgenommen und grafisch dargestellt. In Abbildung 5-24 wird das gemessene Drehmoment für die untersuchten drei PVC-Proben bei Friktionen von -6 m/min bis + 2 m/min und einer Temperatur von 185°C dargestellt. Gut zu erkennen sind die steigenden Drehmomente bei steigender Friktion und die Unterschiede zwischen den Materialproben. Hier

zeigen sich erwartungsgemäß für die wenig modifizierte Probe M176/01 höhere Drehmomente als für die modifizierten und daher weicheren Typen M177/01 und M178/01.

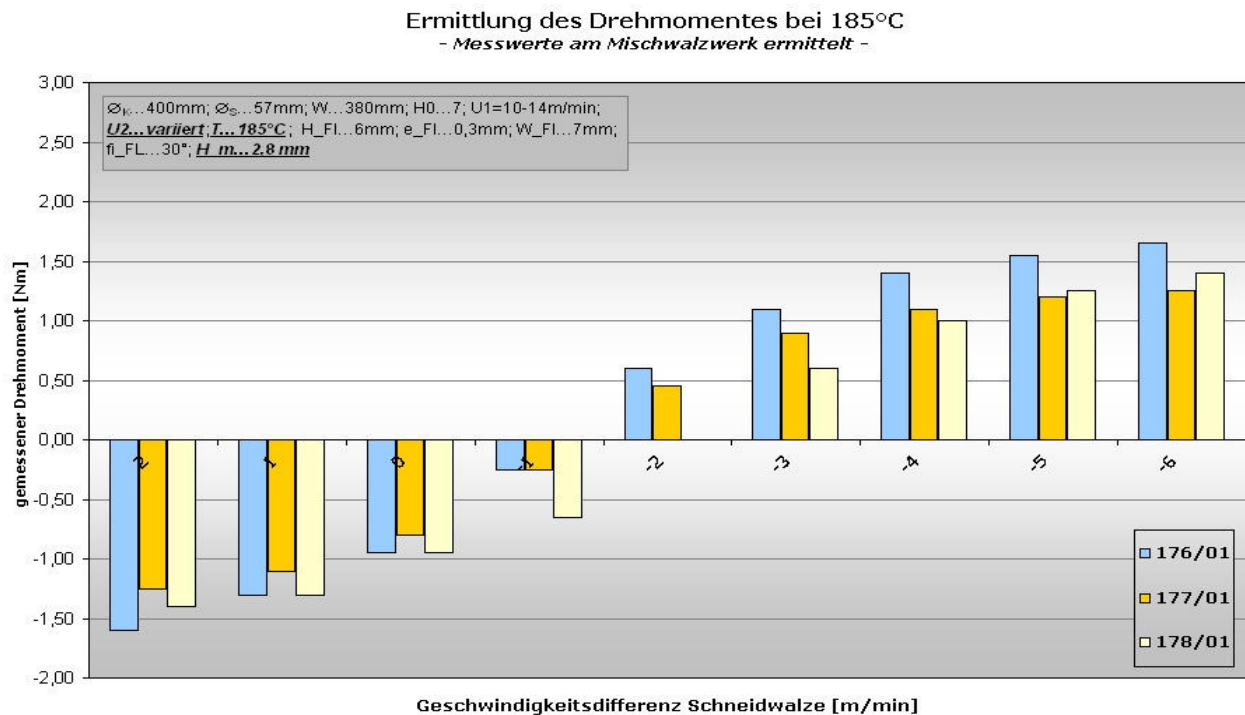


Abb. 5-24: Friktionsänderung und Drehmoment – PVC-Proben bei 185°C

Abb. 5-25 zeigt bei gleichen Proben und Geschwindigkeitsänderungen die aufgenommenen Drehmomente bei 190°C und 195°C. Hier sind die Unterschiede der verglichenen Rezepturen zueinander deutlicher erkennbar, da sich alle Proben bei diesen Temperaturen in einem weicheren Zustand befinden.

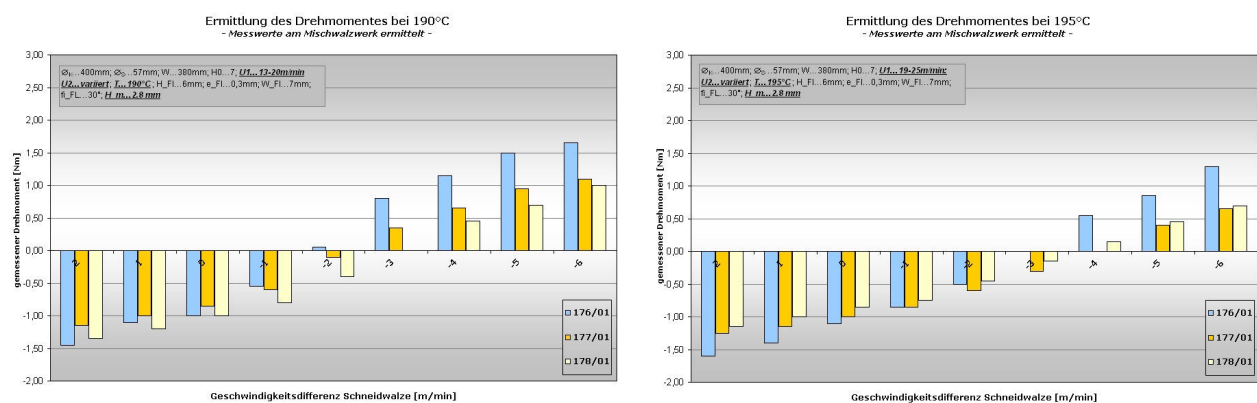


Abb. 5-25: Friktionsänderung und Drehmoment – PVC-Proben bei li.: 190°C und re.: 195°C

Ein Vergleich der gemessenen Drehmomente bei sich vergrößernder Eindringtiefe bei einer Temperatur von 195°C ist in Abbildung 5-26 dargestellt. Die Eindringtiefe (als Foliendicke betrachtet) wird von 500µm auf 1800µm vergrößert. Die aufgenommenen Drehmomente steigen mit zunehmender Eindringtiefe bei steigender Friktion.

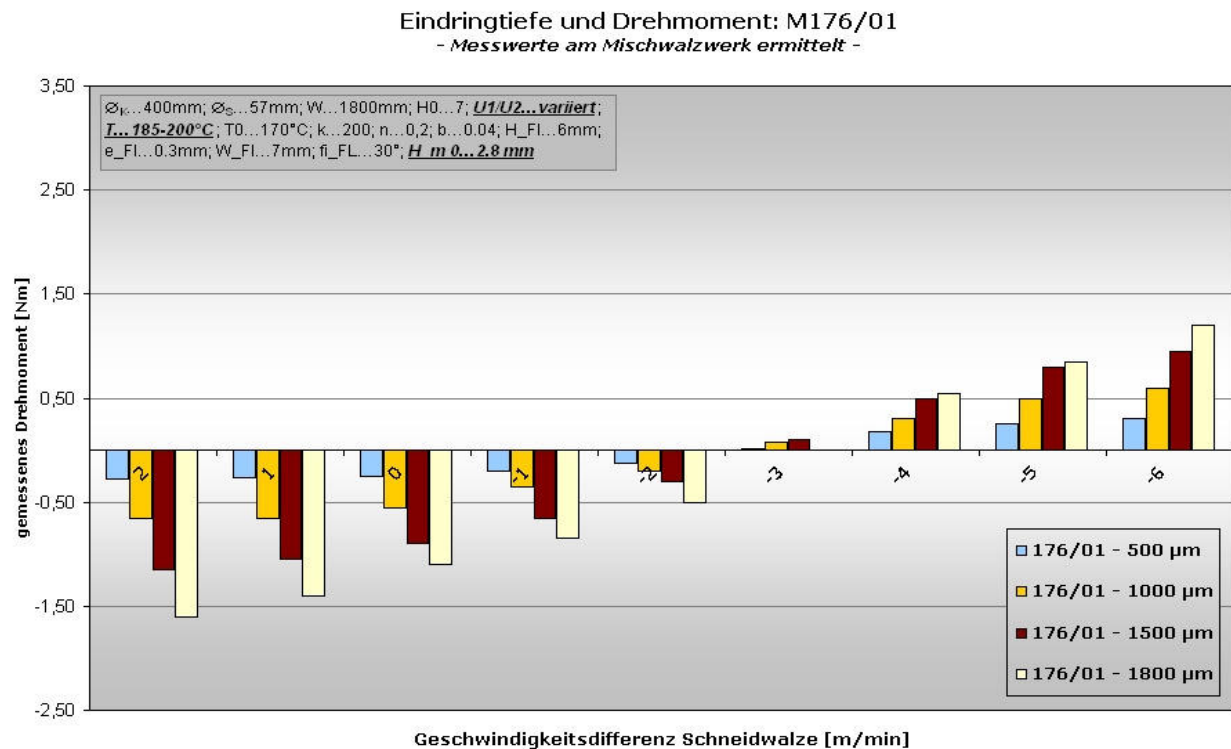


Abb. 5-26: Eindringtiefe und Drehmoment – PVC-Probe M176/01 bei 195°C

Abbildung 5-27 zeigt die Abhängigkeit des gemessenen Drehmomentes für die Proben M177/01 und M178/01 ebenfalls bei 195°C.

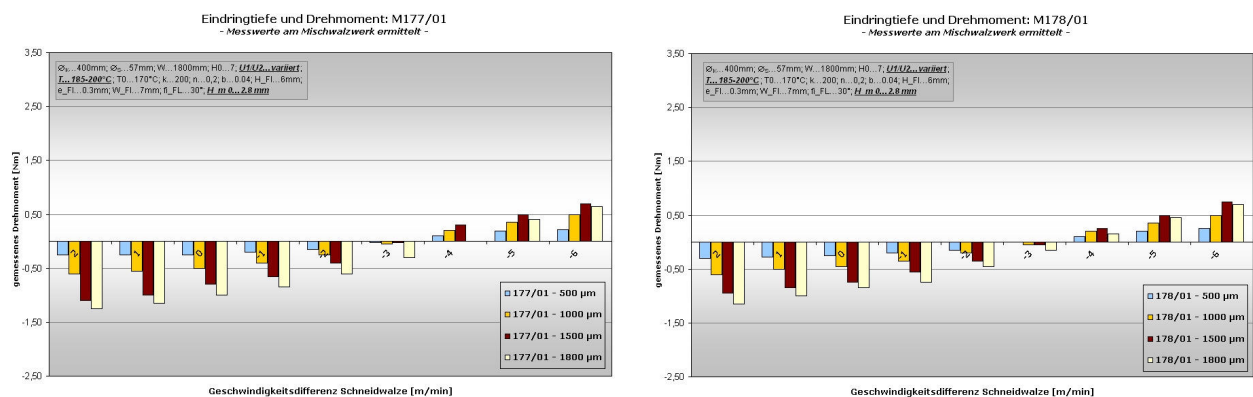


Abb. 5-27: Eindringtiefe und Drehmoment bei 195°C li.: PVC-Probe M177/01; re.: M178/01

Zur Bestätigung der Hypothese der Proportionalität der Materialviskosität zum Drehmoment an einem Schneidwalzensystem werden die aufgenommenen Messwerte der untersuchten Proben innerhalb einer Rezeptur verglichen. Abbildung 5-28 zeigt die ermittelten Drehmomente der PVC-Probe M176/01 bei 185°C – 195°C. Eine klare Unterscheidung in der Höhe des aufgenommenen Drehmomentes ist besonders im Bereich von 0 bis -3 m/min zu erkennen. Hier zeigen die gemessenen Momente für die einzelnen Temperaturen signifikante Unterschiede. Die höherviskosen Proben bei 185°C erzeugen eine höhere Leistung an der Schneidwendel als die niedrigviskosen Proben bei 190°C und 195°C.

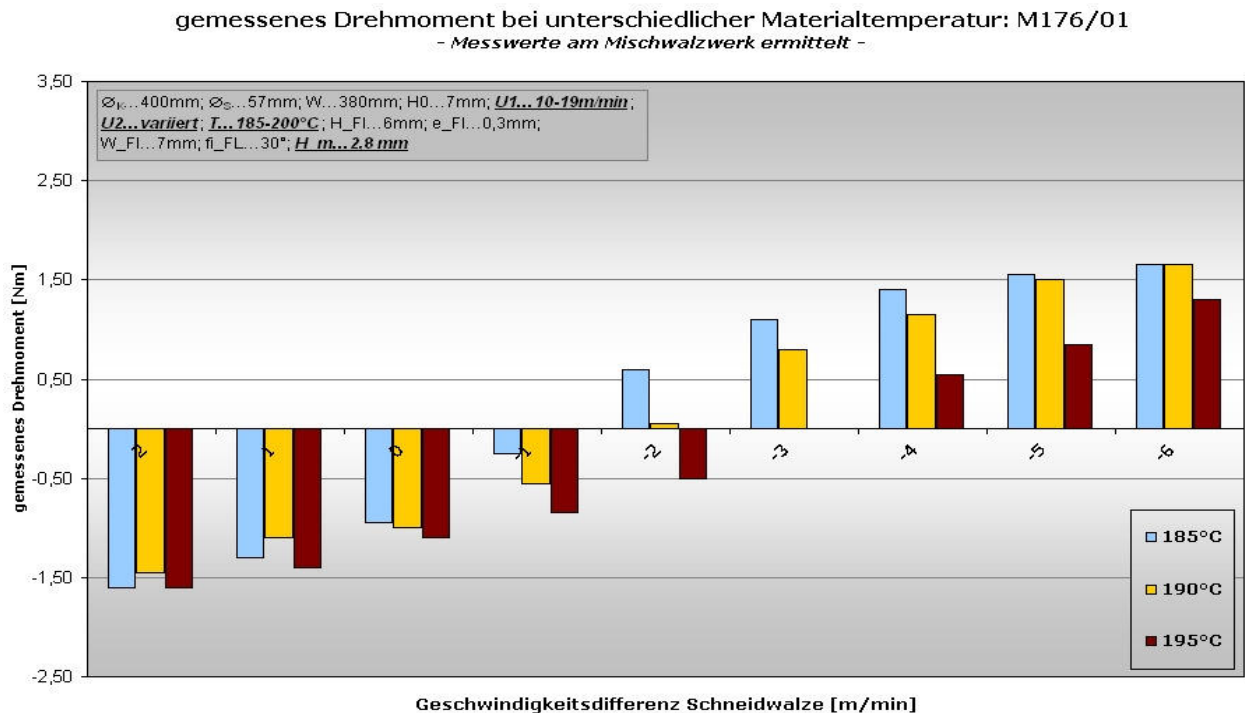


Abb. 5-28: Drehmoment und Materialtemperatur: M176/01 von 185°C – 195°C

Abbildung 5-29 zeigt diese Änderungen für die Rezepturen M177/01 und M178/01.

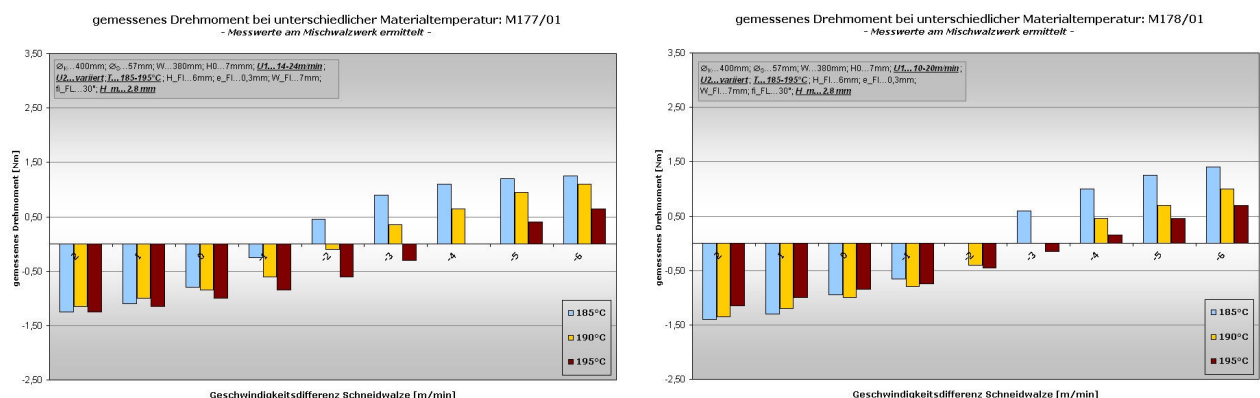


Abb. 5-29: Drehmoment und Materialtemperatur li.: M177/01 und re.: M178/01

Die Messungen zeigen eine signifikante Abhängigkeit des ermittelten Drehmomentes von der Eindringtiefe (verwendete Foliendicke), der Temperatur und der Rezeptur. Mit steigender Temperatur und sich verringernder Materialviskosität nimmt das an der Schneidwalze aufgenommene Drehmoment deutlich ab. Ebenfalls hat die Rezepturgestaltung der PVC-U-Proben einen deutlichen Einfluss auf das Drehmoment. Im Vergleich zu einer wenig modifizierten Probe verringern sich die gemessenen Drehmomente unter gleichen Bedingungen bei einer höher modifizierten Probe.

5.2.5. Messungen an PVC-P

Die als Vergleichsmaterial ebenfalls untersuchte PVC-P-Probe wird in Abbildung 5-30 für verschiedene Eindringtiefen bei 137°C dargestellt. Mit Erhöhung der Friktion werden steigende Drehmomentdifferenzen aufgenommen. Die Temperaturabhängigkeit von PVC-P zeigt Diagramm 5-31. Mit steigender Eindringtiefe erhöht sich das Drehmoment und fällt bei steigenden Temperaturen deutlich ab. Die maximalen Temperaturen von 188°C liegen hier aber außerhalb des verarbeitungstechnischen Bereiches einer Kalandieranlage, da das Material auf der Walze eine zu dünnflüssige Schmelze bildet.

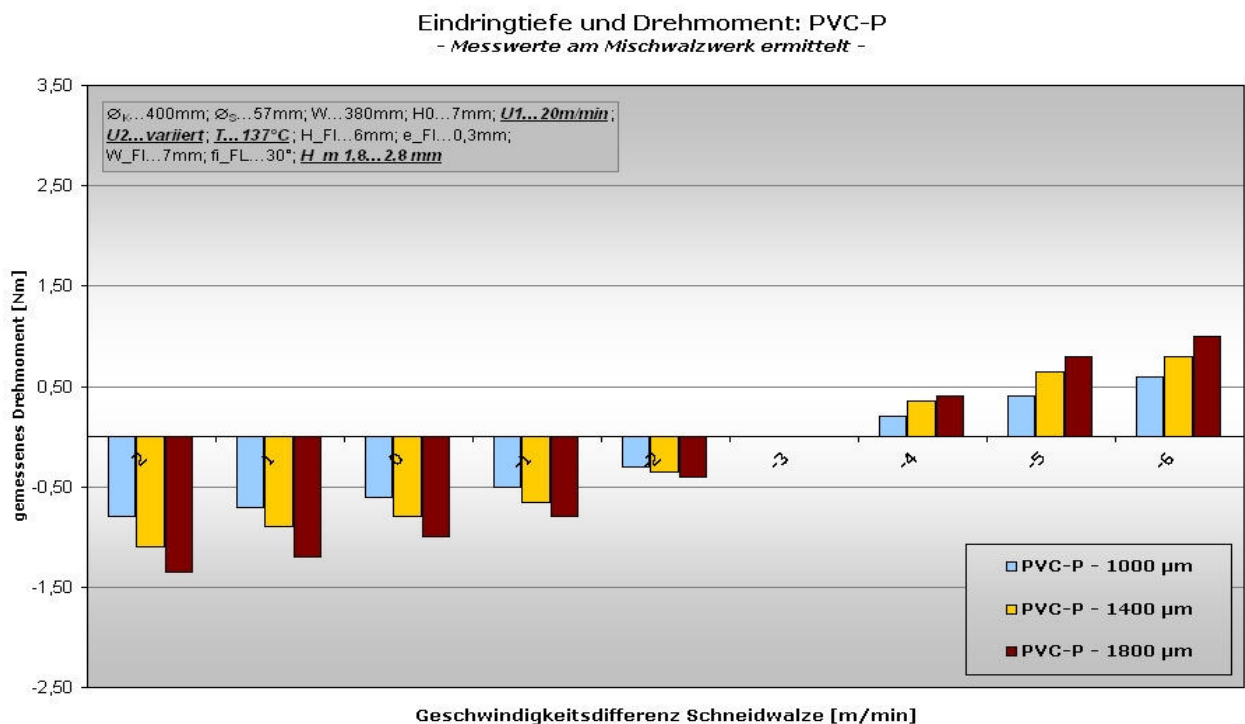


Abb. 5-30: PVC-P – Materialtemperatur 137°C

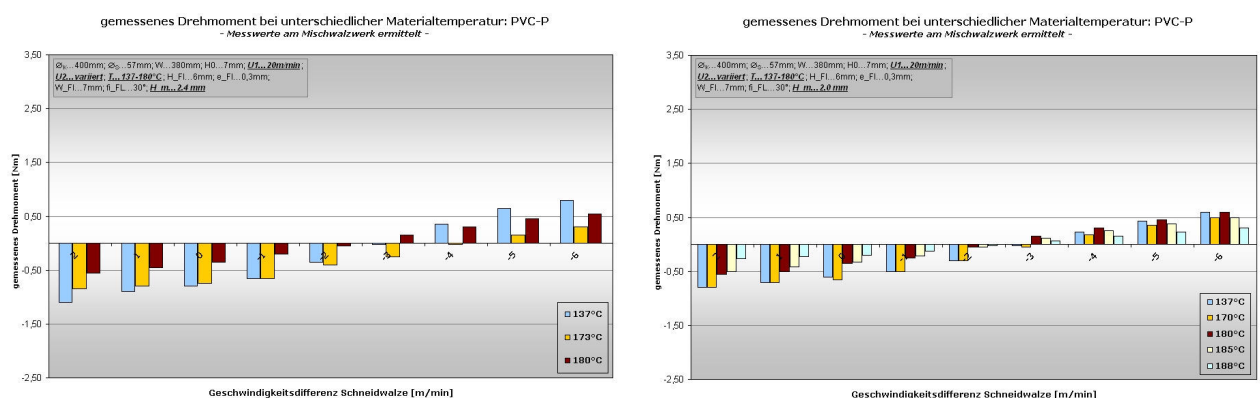


Abb. 5-31: PVC-P – Variation der Temperatur (Felldicke li.: 1000 μm ; re.: 1400 μm)

5.2.6. Reproduzierbarkeitsmessungen

Zur Abschätzung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurden die Messungen wiederholt. Die Schneidwalze wurde aus dem Material herausgefahren, eine neue Materialmischung aufgebracht und unter Beibehaltung aller Einstellungen wie Felldicke, Eindringtiefe und Friktion die Messung durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Drehmomentmessungen sind für PVC-P bei 137°C und einer Eindringtiefe von 1400 µm in Abbildung 5-32 dargestellt.

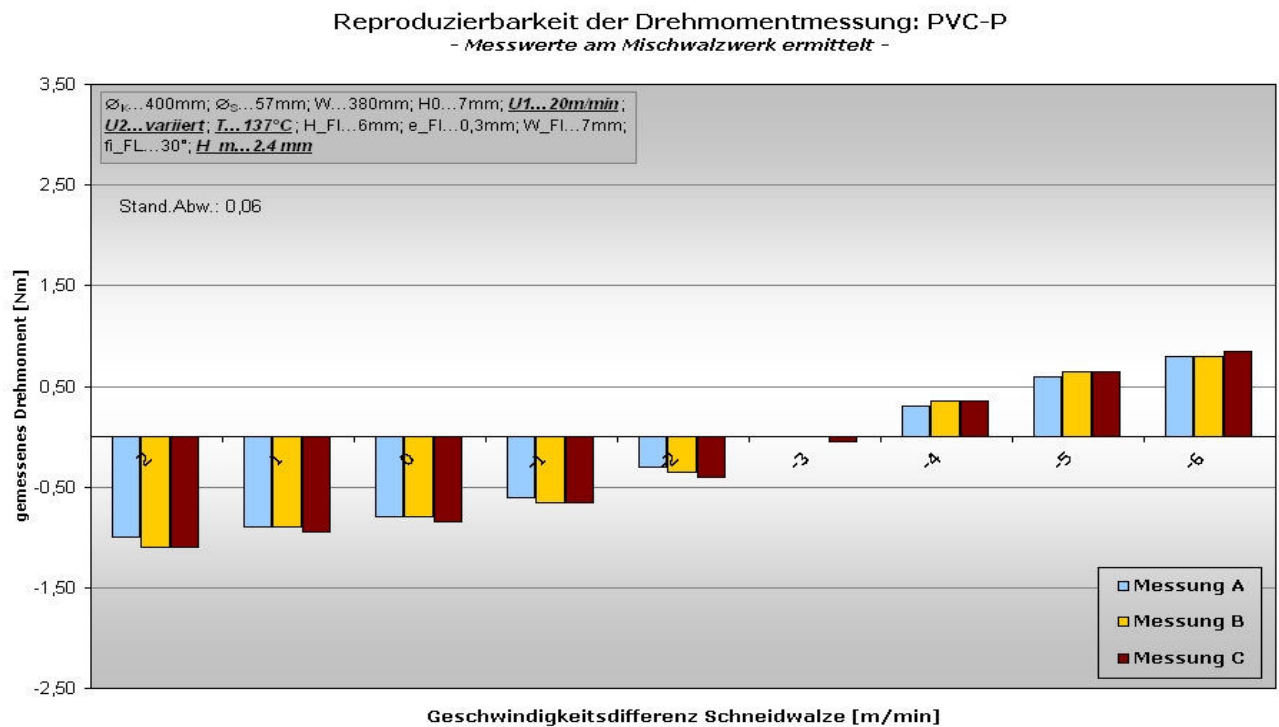


Abb. 5-32: Reproduzierbarkeitsmessung an PVC-P bei 137°C, Felldicke 1400 µm

Zur Bestätigung der Reproduzierbarkeit sind in Abbildung 5-33 Wiederholungsmessungen der PVC-U-Proben M176/01 und M178/01 dargestellt.

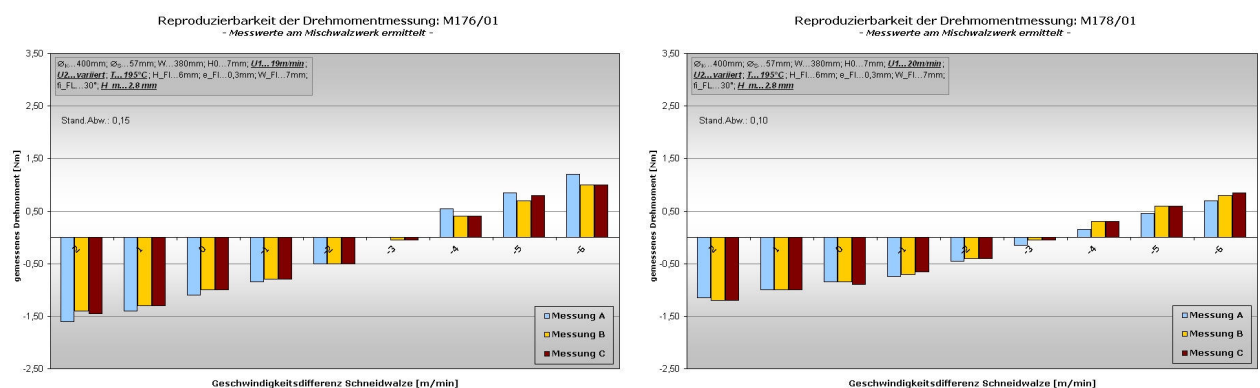


Abb. 5-33: Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei 195°C li.: M176/01 und re.: M178/01

Als Standardabweichungen der Messungen mit der größten Abweichung innerhalb einer Probe ergeben sich für:

PVC-P	PVC-U			
Stabw.: 0,06	<u>176/01</u>	Stabw.: 0,15	<u>178/01</u>	Stabw.: 0,10
$T = 137^{\circ}\text{C}$ $d = 1400\ \mu\text{m}$	$T = 195^{\circ}\text{C}$ $d = 1800\ \mu\text{m}$		$T = 195^{\circ}\text{C}$ $d = 1800\ \mu\text{m}$	

Tab. 5-11: Standardabweichungen für PVC-P und PVC-U

5.2.7. Bewertung der Messungen

Alle Messungen wurden an einem Walzwerk unter Verwendung der in Abb. 5-19 und 5-20 dargestellten Rahmenbedingungen einer Produktionsanlage durchgeführt.

Die Messergebnisse zeigen unter gleichen Versuchsparametern eine gute Reproduzierbarkeit. Die Ergebnisse beschreiben eine deutliche Änderung des aufgenommenen Drehmomentes bei einer Temperaturerhöhung bzw. -erniedrigung und unterschiedlichen Proben. Die durchgeführten rheologischen Messungen stellen ebenfalls ein entsprechendes Materialverhalten dieser Proben dar.

Grundsätzlich wird festgestellt, dass die Messwerte in einem Friktionsbereich von -3 bis +3 m/min deutliche und somit auswertbare Differenzen bei Temperatur- oder Rezepturänderungen besitzen. Außerhalb dieses Bereiches treten geringere Differenzen und somit größere Messfehler auf.

Im Weiteren werden die erhaltenen Drehmoment-Messwerte aus den beschriebenen Versuchen gemeinsam mit den im Prozessmodell (Kapitel 4.ff) verwendeten und in Kapitel 5.ff. ermittelten Materialfunktionen verknüpft.

5.3. Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den Modellvorhersagen

5.3.1. Bewertungsparameter

Mit dem in Kapitel 3 beschriebenen Versuchsaufbau wurden an PVC-U unter Produktionsbedingungen Drehmomentverläufe aufgenommen. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.2.4. beschrieben. Die am Rotationsrheometer ermittelten Fließkurven werden in Kapitel 5.1. dargestellt. Für die Verbindung dieser Daten erfolgt im Weiteren die Beschreibung einer Vorgehensweise, mit der im Kalandrierprozess über die Anwendung dieser Methodik Materialfunktionen ermittelt werden können.

Zur Übertragung der ermittelten Drehmomentverläufe auf die Viskosimeterkurven wird die ‚Matching Stress Method (MSM)‘ /114/ angewendet. Diese vergleicht den vorliegenden Prozess mit dem Verhalten des Fluids im Rheometer bei gleicher bzw. konstanter Scherspannung $\tau_{SW} = \tau_{RV}$ an der prozessbestimmenden Stelle, an der auch die Messung des Drehmomentes erfolgt. Als prozessbestimmende Stelle wird in der Wirkpaarung die Spitze der Wendelstege ($R_2 + H_f$) definiert.

Der Versuchsstand mit angetriebener Schneidwalze, welcher über positive und negative Geschwindigkeitsfriktionen Schergeschwindigkeiten an der Prozessstelle erzeugt, nimmt über eine integrierte Drehmomentmessung die an der Schneidwendel erzeugten Leistungen bzw. Leistungsänderungen auf. Im Kontaktgebiet von Schneidwendel und Folie ergeben sich die in Kapitel 4 und 5 beschriebenen Zustände und Bedingungen, welche im Weiteren für folgende ausgewählte Materialien und Geometriebedingungen gelten:

- am Kalandrier eingesetzte PVC-U-Rezepturen,
- Temperaturen entsprechend Produktionsbedingungen (Kapitel 5.2.1.),
- Geschwindigkeiten entsprechend Produktionsbedingungen von 10-30 m/min,
- Versuchsstand nach Kapitel 3.11 mit folgender Schneidwendelgeometrie:

• Ø Schneidwalze:	52 mm	• Höhe Schneidwendel:	6 mm	• Anzahl Schneidwendel:	12
• Winkel der Schneidwendel:	9°	• Steigung Schneidfläche:	30,3°	• Arbeitsbreite:	330 mm

- Wandhaften der Schmelze und Annahme von stationärer Strömung im Kontaktgebiet.

Die Planung des Versuchsstandes erfolgte unter folgenden Bedingungen:

- flexibler Einsatz an Versuchs- und Produktionsanlagen (verstellbar in Höhe, Positionierung, fahrbar, transportabel),
- Schneidwalze mit negativer und positiver Friktion einstellbar,
- angepasste Drehmomentmessung (Auflösung, Temperaturverhalten, Justage).

Der Versuchsstand wurde an einem Mischwalzwerk einer Versuchskalandrieranlage eingesetzt (Kapitel 3).

Er erfüllt die gestellten Vorgaben und liefert reproduzierbare Messwerte im Leerlauf sowie im Messbetrieb. Die zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführten Messungen ergeben im Leerlaufbetrieb eine Genauigkeit von 0,3% und im Messbetrieb eine Reproduzierbarkeit von 10%.

Die Untersuchungen wurden an PVC-U, PVC-P und PET durchgeführt. PVC-P und PET kamen für Vorversuche zum Einsatz, da aufgrund der bekannten thermischen Empfindlichkeit der PVC-U-Proben diese für einen Test des Probenhandlings sowie der Ermittlung von optimalen Versuchsbedingungen (Fixierung des Versuchsstandes, Messposition, Temperatur- und Geschwindigkeitsmessung, zusätzliche Heizstrahler) nicht verwendet werden konnten. Für die Bearbeitung und Lösung der vorliegenden Aufgabenstellung wurden Standardrezepturen einer Kalandieranlage verwendet:

- M176/01
- M177/01
- M178/01

Die Rezepturen unterscheiden sich hauptsächlich in der Modifikation der Fließfähigkeit durch den Einsatz von Co-Polymeren (Tabelle 5-1, Seite 66).

Die in Abbildung 5-19 dargestellten Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen verbunden mit Erfahrungen aus der Produktion dieser verwendeten Rezepturen am Produktionskalandrier ergeben für die Versuchsdurchführung am Walzwerk sowie die Probenmessungen am Rheometer für die PVC-U-Rezepturen Temperaturen von 185°C bis 195°C.

Diese Temperaturänderungen können am Walzwerk am schnellsten erreicht werden über

- Änderung der Geschwindigkeit
(Dissipation)
- Änderung der Friktion der Walzen
(Dissipation)
- Einsatz von Heizstrahlern
(Konvektionswärme)

oder Änderung der Walzentemperaturen, welche jedoch am Walzwerk mit größerem Zeitaufwand verbunden sind.

Für die in die Folie einschneidende Schneidwalze ergeben sich weiterhin Grenzen für die einsetzbaren Schergeschwindigkeiten bei Verzögerung und Beschleunigung der Walze. Werden die Schergeschwindigkeiten in beiden Fällen zu hoch, laufen die Einschnitte der Wendel in der Bahn, die für den Transport eingeschlossener Luft durch diese Schnitte zuständig sind, immer weniger schräg nach außen. Somit wirken die Schneidwendel bei hohen Schergeschwindigkeiten wie feststehende Strömungshindernisse und erfüllen die ihnen zugedachte Aufgabe des Lufttransportes an die Oberfläche des Materialknetes im nachfolgenden Walzenspalt nicht mehr.

Die Versuche ergeben einen relevanten Arbeitsbereich der Schneidwalze von -2 m/min bis $+4 \text{ m/min}$, welcher in Abhängigkeit vom Prozessspalt (H) einem Schergeschwindigkeitsbereich bis zu $\pm 150 \text{ s}^{-1}$ entspricht.

5.3.2. Analyse der Schergeschwindigkeit

Bei der Verwendung unterschiedlicher PVC-U-Materialien werden zum Erreichen der Verarbeitungstemperaturen verschiedene Walzengeschwindigkeiten und Friktionen eingestellt. Nachfolgend werden die vorliegenden Schergeschwindigkeiten und Prozessbedingungen ermittelt. Die Geschwindigkeitsänderungen zeigen eine Verschiebung der an der Prozessstelle auftretenden Schergeschwindigkeiten $\dot{\gamma}$.

Für die eindimensionale Strömung ist die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$:

$$\dot{\gamma} = \frac{u_f - u_1}{H} \quad (5.30)$$

In Abbildung 5-34 werden für drei unterschiedliche Grundgeschwindigkeiten der Kalandерwalze die Schergeschwindigkeiten der Schneidwalze (nach Gl. 5.30) bei unterschiedlichen Friktionen dargestellt.

Einstelldaten	M176/01		M177/01		M178/01	
	Geschwindigkeit	Folientemperatur	Geschwindigkeit	Folientemperatur	Geschwindigkeit	Folientemperatur
	10 m/min	185°C	14 m/min	185°C	10 m/min	185°C
	13 m/min	190°C	19 m/min	190°C	20 m/min	190°C
	19 m/min	195°C	24 m/min	195°C	20 m/min	195°C

Tab. 5-11: benötigte Walzengeschwindigkeiten für die Einstellung der Versuchstemperaturen

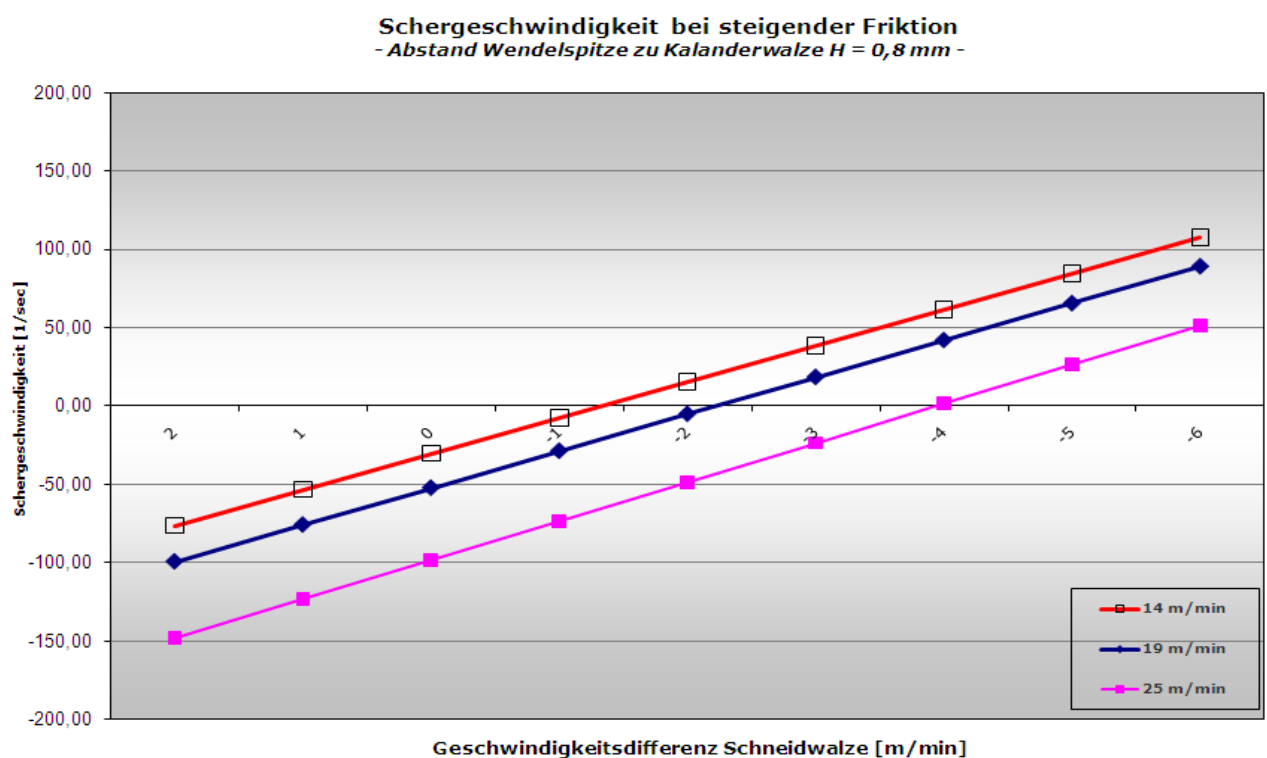


Abb. 5-34: Schergeschwindigkeitsverlauf bei 14, 19 und 25 m/min Kalandervalzengeschwindigkeit

Die Geschwindigkeiten beziehen sich auf die gemessenen Werte auf der Kalandervalzenoberfläche mit dem Radius R_1 und auf der Oberfläche des Schneidwalzengrundkörpers mit dem Radius R_2 . Die Schergeschwindigkeit nach Gleichung 5.30 bezieht sich auf das Kontaktgebiet von Folie und Schneidwendel (R_1 und R_2+H_f). Mit steigenden Walzengeschwindigkeiten und Friktionen [m/min] ergeben sich nach Gleichung 4.17 und 4.51 höhere Schergeschwindigkeiten [s^{-1}]. Für $\dot{\gamma} = 0 \text{ sec}^{-1}$ unterscheiden sich damit die Friktionswerte. Abbildungen 5-35 und 5-36 zeigen die Drehmomentverläufe für die eingesetzten Versuchsrezepturen. Im Versuchsstand wurden höhere Folientemperaturen durch höhere Walzengeschwindigkeiten erreicht (Tabelle 5-11).

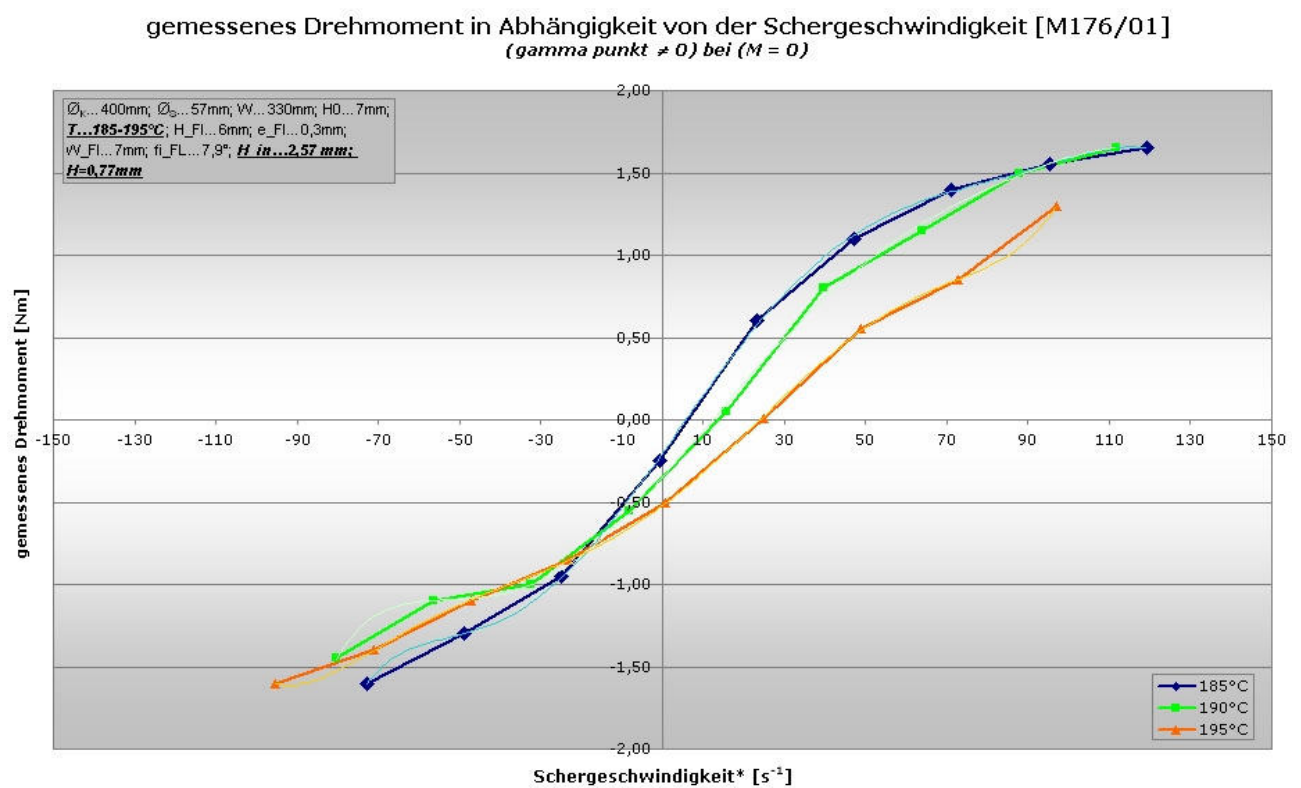


Abb. 5-35: gemessener Drehmomentverlauf der Rezeptur M176/01

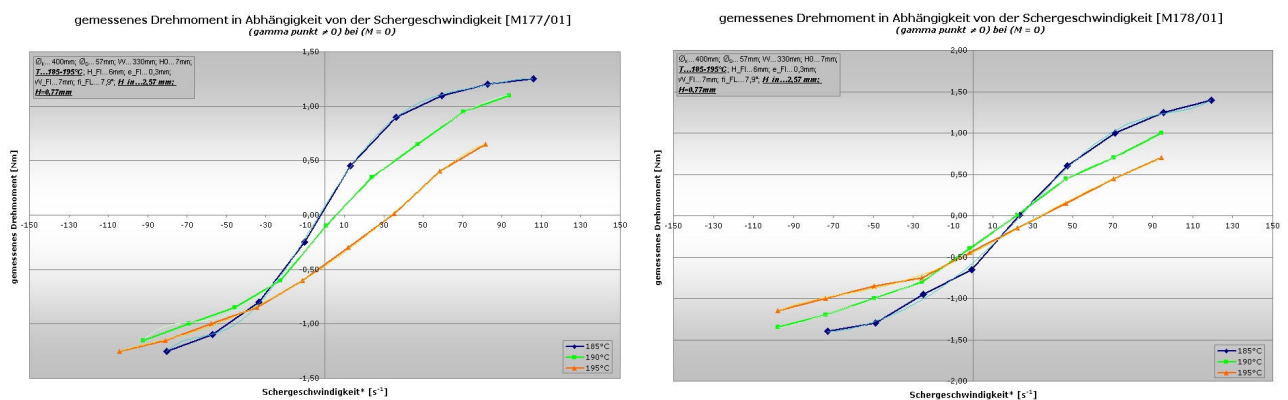


Abb. 5-36: gemessener Drehmomentverlauf der Rezepturen [li.: M177/01; re.: M178/01]

Die verwendeten Friktionswerte [m/min] werden in Schergeschwindigkeiten umgerechnet. Für eine Vereinheitlichung und Verschiebung der Messkurven in den Nullpunkt unter Annahme von

$$M = 0 \quad \text{bei} \quad u_f^* = u_1 \quad (5.31)$$

wird für u_f^* ein Verschiebungsfaktor $k_{f\dot{\gamma}}$ (Tab. 7-3) eingeführt.

$$u_f^* = k_{f\dot{\gamma}} \cdot u_f. \quad (5.32)$$

Die Umfangsgeschwindigkeit u_f an der Spitze der Schneidwendel beschreibt Gleichung 4-17 (Seite 40).

		M176/01		M177/01		M178/01	
		Geschwindigkeit	$k_{f\dot{\gamma}}$	Geschwindigkeit	$k_{f\dot{\gamma}}$	Geschwindigkeit	$k_{f\dot{\gamma}}$
Faktor für [M=0]	185°C	10 m/min	0,9723	14 m/min	1,0100	10 m/min	0,8880
	190°C	13 m/min	0,9553	19 m/min	0,9850	20 m/min	0,9520
	195°C	19 m/min	0,9407	24 m/min	0,9320	20 m/min	0,9220

Tab. 5-12: Verschiebungsfaktor $k_{f\dot{\gamma}}$ für $M=0$ bei γ punkt=0

Unter Verwendung von u_f^* zur Berechnung von $\dot{\gamma}_{sw} = 0$ ergeben sich, dargestellt in Abb. 5-37 und 5-38, korrigierte Messkurven unter Annahme der Bedingungen von Gleichung 5.32.

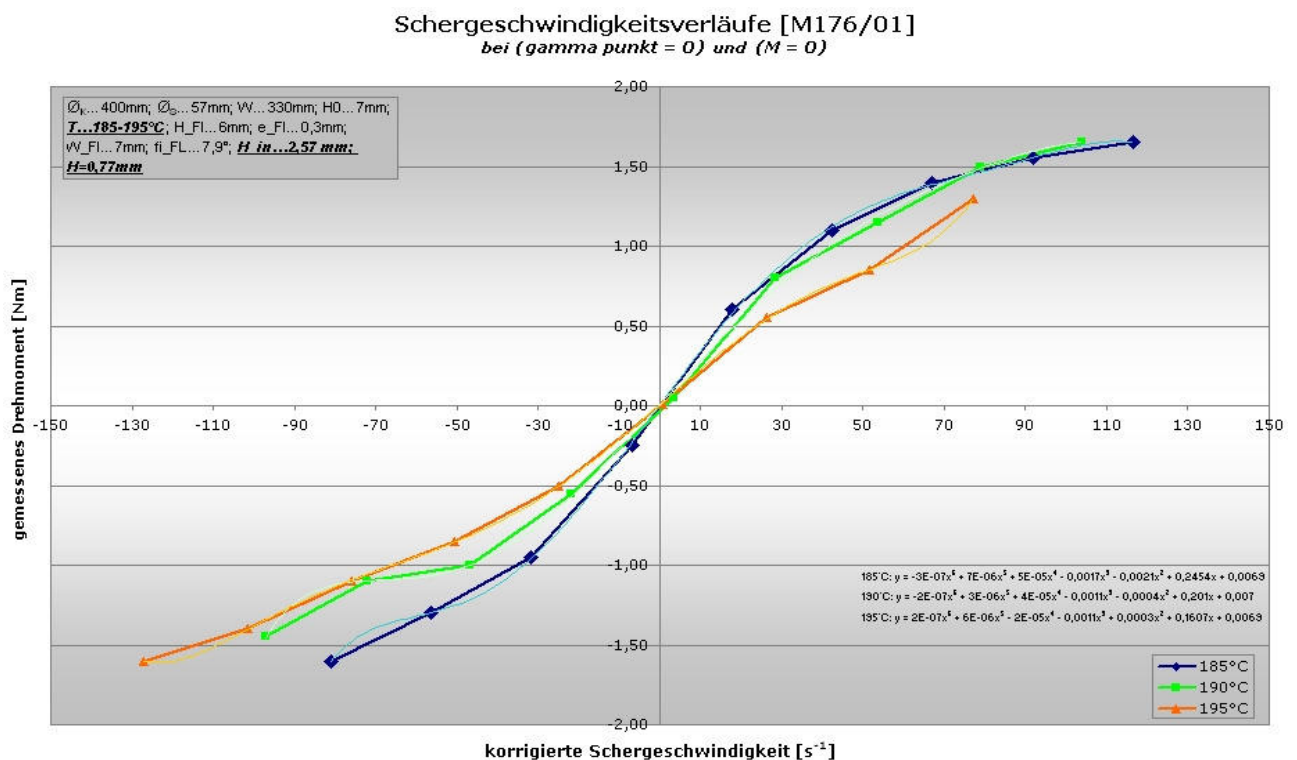


Abb. 5-37: Korrektur der Schergeschwindigkeitsverläufe für $M=0$ [M176/01]

Die Messwerte ergeben für die Rezepturen unterschiedlich nutzbare Schergeschwindigkeitsbereiche von -60 s^{-1} bis $+60 \text{ s}^{-1}$.

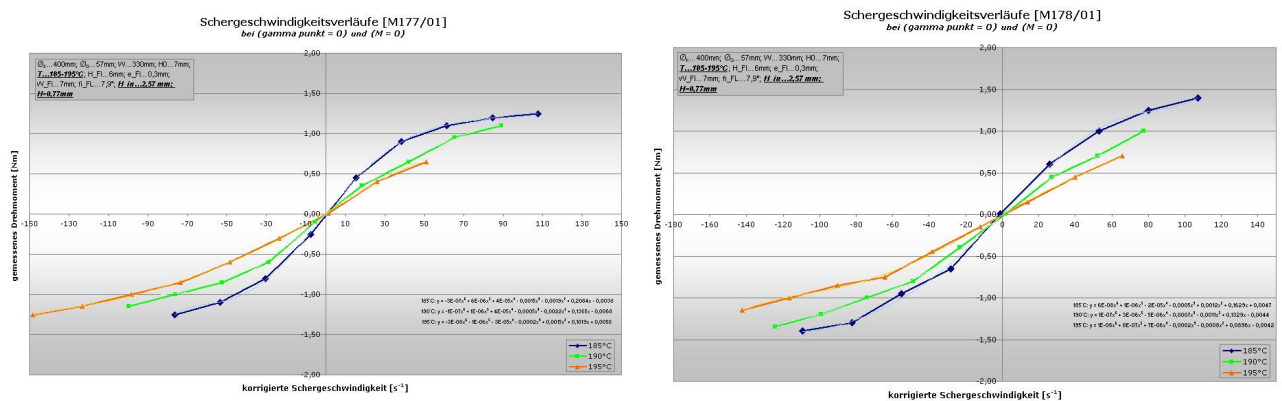


Abb. 5-38: Korrektur der Schergeschwindigkeitsverläufe für $M=0$ [li.: M177/01; re.: M178/01]

Für die Darstellung des Zusammenhanges von gemessenem Drehmoment M und der Materialviskosität η wird angenommen, dass die Schergeschwindigkeit nach Gleichung 5.30 für die Wirkpaarung Kalandervalze–Schneidwalze gilt. Mit ihr werden, unter Annahme der Gültigkeit des Potenzgesetzes, die scheinbaren Materialviskositäten nach Gleichung 5.33 berechnet, wobei k der zu bestimmende Parameter ist.

$$\eta = k \cdot \dot{\gamma}_{sw}^{n-1} \quad (5.33)$$

5.3.3. Überprüfung der verwendeten Modelle

Im Weiteren werden zwei Methoden zur Übertragung der gemessenen Drehmomente auf die vorhandenen Fließkurven der PVC-U-Rezepturen verwendet:

- Prozessmodell Schneiden, Scherung und Strömung an der Schneidwendel (Kap. 4.4.3.)
- Matching Stress Method (MSM) /114/ für die Wirkpaarung Kalandervalze-Schneidwalze.

Das Prozessmodell dient zunächst der Vorausberechnung der zu erwartenden Drehmomente (Gleichungen 4.17–4.56) bei bekannten Fließkurven und Anlagenparametern der Rezepturen. Bei Eignung des Modells wird im Trial and Error-Verfahren die gesuchte Viskositätsfunktion ermittelt, wobei bekannte Fließkurven die Startinformation liefern.

Die zweite Methodik vergleicht an der relevanten Scherfläche, an der das Drehmoment gemessen wird, die Scherspannung mit der in einer Rheometerströmung auftretenden Scherspannung. Die Anwendung der Methodik wird unter Verwendung bekannter Fließkurven überprüft. Sie liefert die Übertragungsfaktoren für die Schergeschwindigkeit der Schneidwalze.

5.3.3.1. Prozessmodell Schneiden, Scherung und Strömung

Für das Prozessmodell wird ein Schneiden der Wendelspitzen in das Material, die Scherung des Materials zwischen den Schneidwendelspitzen und der Kalandervalze sowie das Auflaufen der Materialschicht an den Seitenflächen der Schneidwendel angenommen (Kapitel 4.4.3.). Unter Berücksichtigung der additiven Zusammensetzung der berechneten Einzelleistungen des Prozessmodells und der theoretisch berechneten sehr geringen Leistungen der Modelle ‚Schneiden‘ und ‚Schneiden und Scherung‘ (Abb. 4-7) wird das Prozessmodell ‚Schneiden, Scherung und Strömung‘ auch weiterführend verwendet. Eine Analyse der Eindringtiefe/Materialverdrängung der Schneidwendel wird durchgeführt.

Abbildung 5-39 zeigt die Berechnung der eingreifenden Fläche einer Seite einer Schneidwendel. Das Verhältnis von Eindringtiefe zu eingreifender Fläche vergrößert sich mit zunehmender Eindringtiefe überproportional.

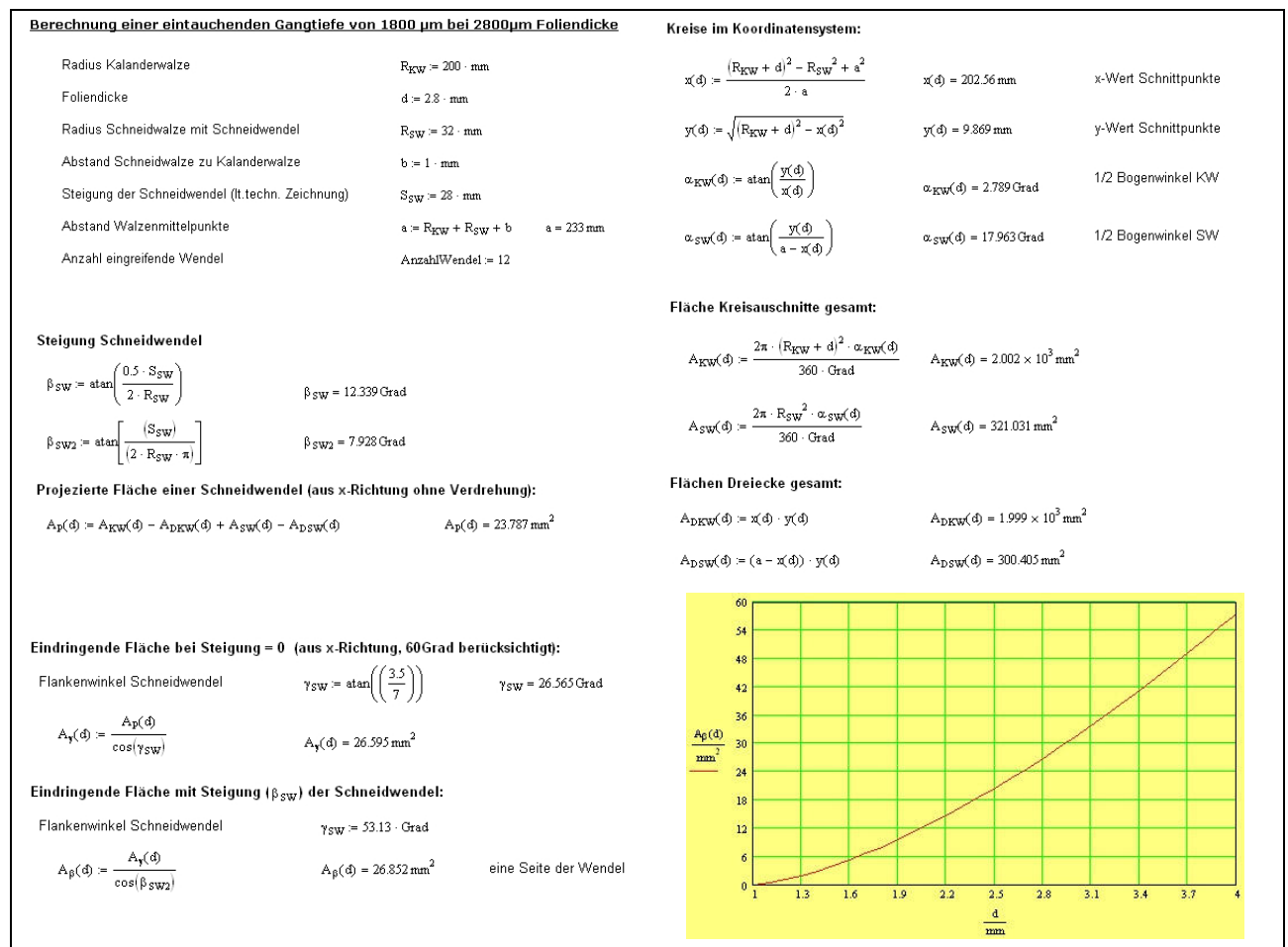


Abb. 5-39: Berechnung der beanspruchten Fläche einer Schneidwendelfläche

Die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe Eindringtiefe bzw. Foliendicke definieren sich als:

Eindringtiefe: Eindringen der Schneidwendel in die Materialschicht auf der Seite der Schneidwalze, bestimmt die Einwirkfläche der Schneidwendel unabhängig von der Foliendicke.

Foliendicke: Dicke der Materialschicht auf der Kalandervalze. Mit dieser wird in den Prozessmodellen gerechnet, wobei der Abstand von der Spitze der Schneidwendel bis zur Kalandervalze nicht der eigentlichen Eindringtiefe entspricht. Für die Berechnungen setzt sich die Foliendicke aus Eindringtiefe und verbleibender Materialschicht zwischen der Kalandervalze und der Schneidwendelspitze zusammen.

Für den Schneidprozess in der Materialschicht können verschiedene Arbeitszustände an der Schneidwendelfläche angenommen werden. Abb. 5-40 verdeutlicht diese. Das umgebende Material erzeugt ein verändertes Strömungsprofil innerhalb der Materialschicht, bildet eine Strömung und einen Wulst an der Schneidwendelfläche oder das verdrängte Material bildet vorwiegend einen Materialwulst.

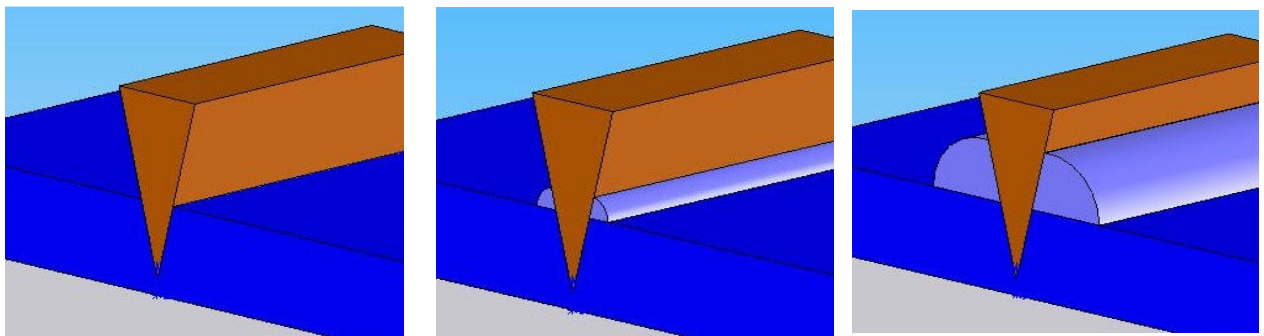


Abb. 5-40: Materialverdrängung an der Schneidwendel [li.: ohne Wulst; mit Materialwulst: mi.: 1mm; re.: 1.7mm]

Abbildung 5-41 zeigt die Veränderung der zu erwartenden Drehmomente mit steigender Eindringtiefe für eine Rezeptur bei Temperaturen von 185°C bis 195°C.

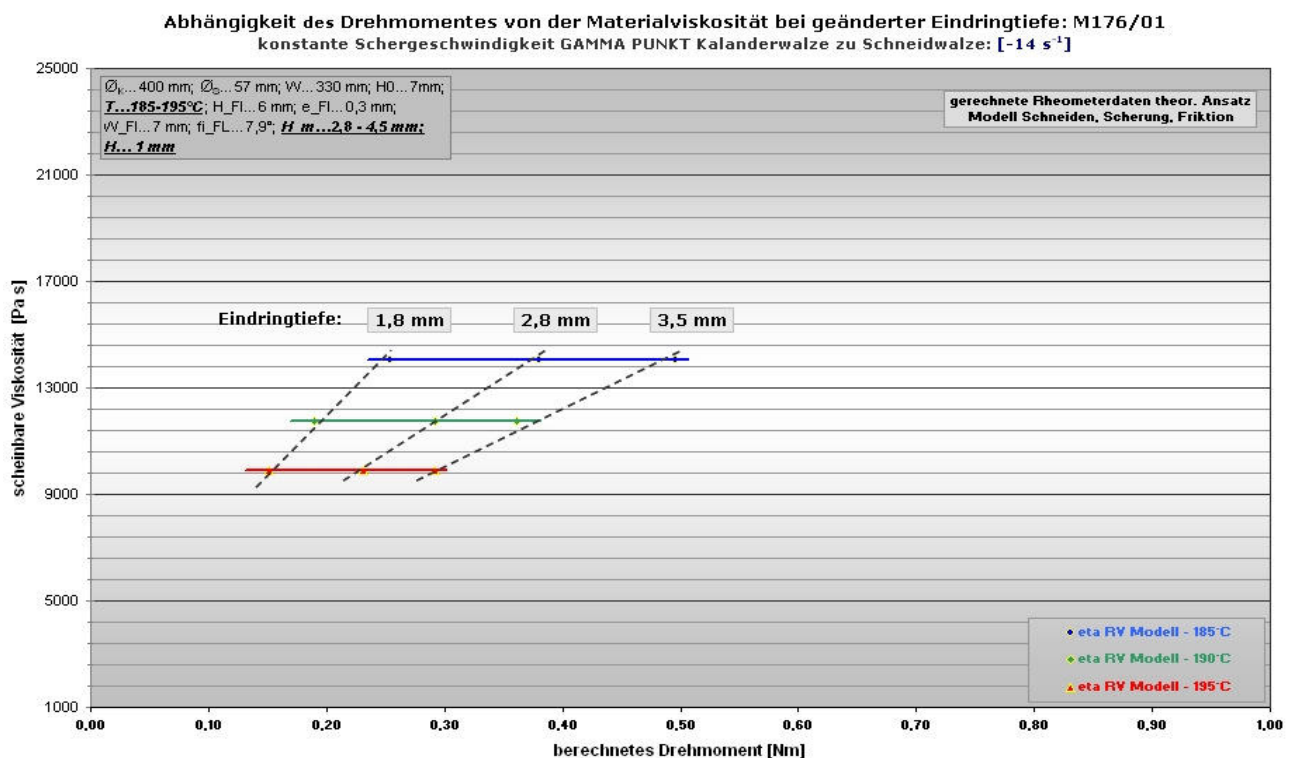


Abb. 5-41: Einfluss der Materialverdrängung auf das berechnete Drehmoment (Modell)

Tabelle 5-13 zeigt für angenommene Eindringtiefen der Schneidwendel die berechneten Drehmomente.

	Eindringtiefe	Benetzte Fläche	M176/01			M177/01			M178/01		
			T	η [Pa s]	Moment [Nm]	T	η [Pa s]	Moment [Nm]	T	η [Pa s]	Moment [Nm]
Ergebnis	1.8 mm	645 mm ²	185°C	10773	0,25	185°C	9154	0,16	185°C	8752	0,14
			190°C	8698	0,19	190°C	6970	0,12	190°C	6734	0,10
			195°C	7258	0,15	195°C	5548	0,12	195°C	4640	0,09
	2.8 mm	1246 mm ²	185°C	10773	0,38	185°C	9154	0,24	185°C	8752	0,21
			190°C	8698	0,29	190°C	6970	0,19	190°C	6734	0,16
			195°C	7258	0,23	195°C	5548	0,18	195°C	4640	0,15
	3.5 mm	1738 mm ²	185°C	10773	0,50	185°C	9154	0,31	185°C	8752	0,26
			190°C	8698	0,36	190°C	6970	0,24	190°C	6734	0,20
			195°C	7258	0,29	195°C	5548	0,23	195°C	4640	0,18

Tab. 5-13: berechnete Momente (M_{Modell}) bei gamma punkt = 14 s^{-1}

Abbildung 5-42 verdeutlicht den Einfluss der Schergeschwindigkeit auf das berechnete Drehmoment.

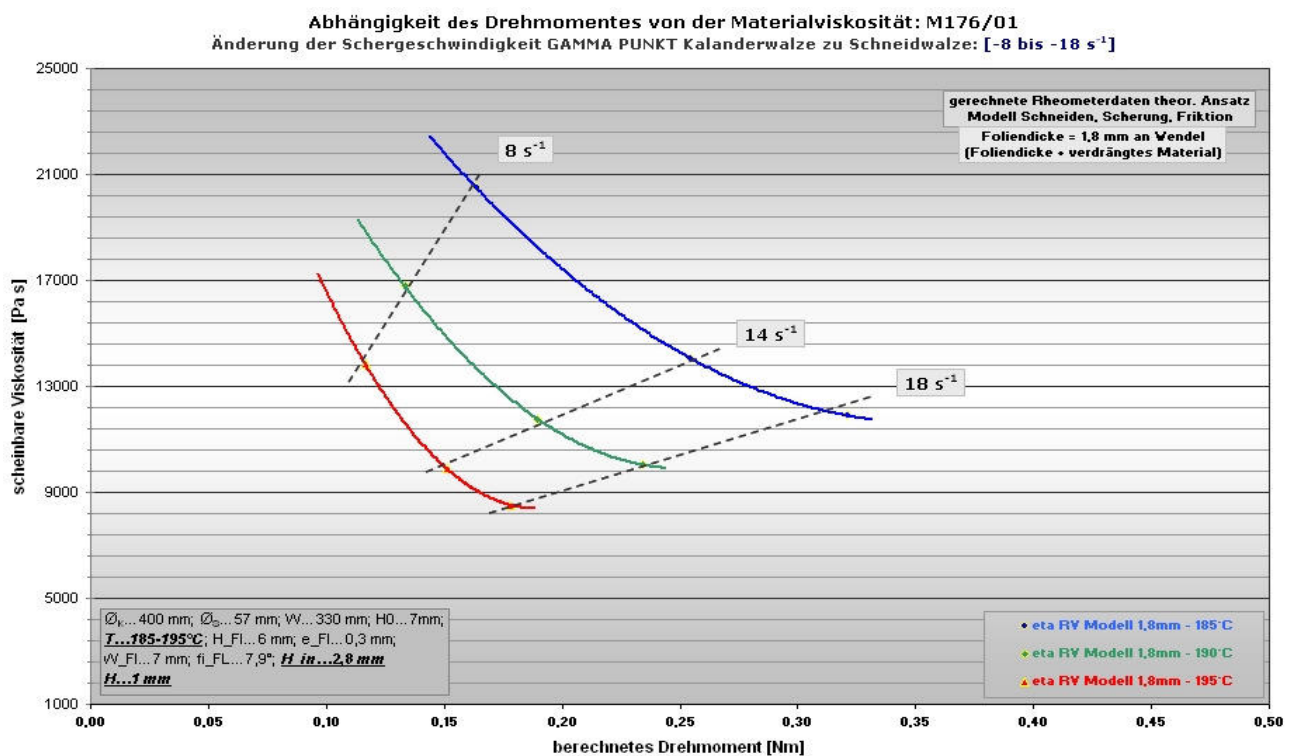


Abb. 5-42: Einfluss der Schergeschwindigkeit auf das berechnete Drehmoment (Modell)

Unter Verwendung des Hilfsprogrammes CUT 2 lassen sich, wie in Kapitel 4.5. angegeben, bei bekannten Geschwindigkeiten, geometrischen Abmessungen, Temperaturen und Materialfunktionen die zu erwartenden Leistungen an der Schneidwalze ermitteln. Hierzu werden die Anlagenparameter (Anhang S. A20) in die Vorgabemaske eingesetzt und die entsprechende Leistung wird berechnet.

Im Folgenden wird der Einfluss eines beim Eindringen der Schneidwendel in die Folienbahn entstehenden Materialwulstes für eine Schergeschwindigkeit überprüft. Die Schneidwendel dringt 1,8 mm ein und bildet in Form eines Wulstes eine vergrößerte Kontaktfläche an der Schneidwendel, die additiv auf die ursprüngliche Kontakttiefe (1,8 mm) mit 1 – 1,7 mm Zuwachs wirkt.

In Tabelle 5-14 wird das Verhältnis von M_{SW} (nach Gleichung 5.33) und M_{Modell} (aus Tabelle 5-12) unter den getroffenen Annahmen dargestellt.

		M176/01				M177/01				M178/01			
		M_{SW}	M_{SW}/M_{Modell} Kontakttiefe SW in [mm]			M_{SW}	M_{SW}/M_{Modell} Kontakttiefe SW in [mm]			M_{SW}	M_{SW}/M_{Modell} Kontakttiefe SW in [mm]		
			1,8	2,8	3,5		1,8	2,8	3,5		1,8	2,8	3,5
Temperatur [°C]	185°C	1,26	5,0	3,3	2,5	1,07	6,8	4,4	3,5	1,03	7,3	4,9	3,9
	190°C	1,02	5,4	3,5	2,8	0,82	6,6	4,3	3,4	0,79	7,8	4,9	4,0
	195°C	0,85	5,6	3,7	2,9	0,65	5,4	3,5	2,9	0,54	5,9	3,7	3,0
	Ø	Ø	5,3	3,5	2,7	Ø	6,3	4,1	3,3	Ø	7,0	4,5	3,6

Tab. 5-14: Vergleich der gemessenen und berechneten Drehmomente bei einer Schergeschwindigkeit von 14 sec^{-1} (Modell: Schneiden, Scherung und Strömung)

Abbildung 5-43 zeigt die Ergebnisse für M_{SW} bei einer Eindringtiefe von 1,8 mm für alle Rezepturen. Für das im Modell berechnete Moment M_{Modell} werden für 185°C unterschiedliche Eindringtiefen (Annahme einer Materialverdrängung) dargestellt.

Die Berechnung der scheinbaren Viskosität wird nach Gleichung 5.33 für die drei Rezepturen durchgeführt.

Es zeigt sich, dass die auftretende Differenz zwischen den Ergebnissen der Modellrechnung und den gemessenen Drehmomenten durch die Berücksichtigung eines Materialwulstes verringert wird.

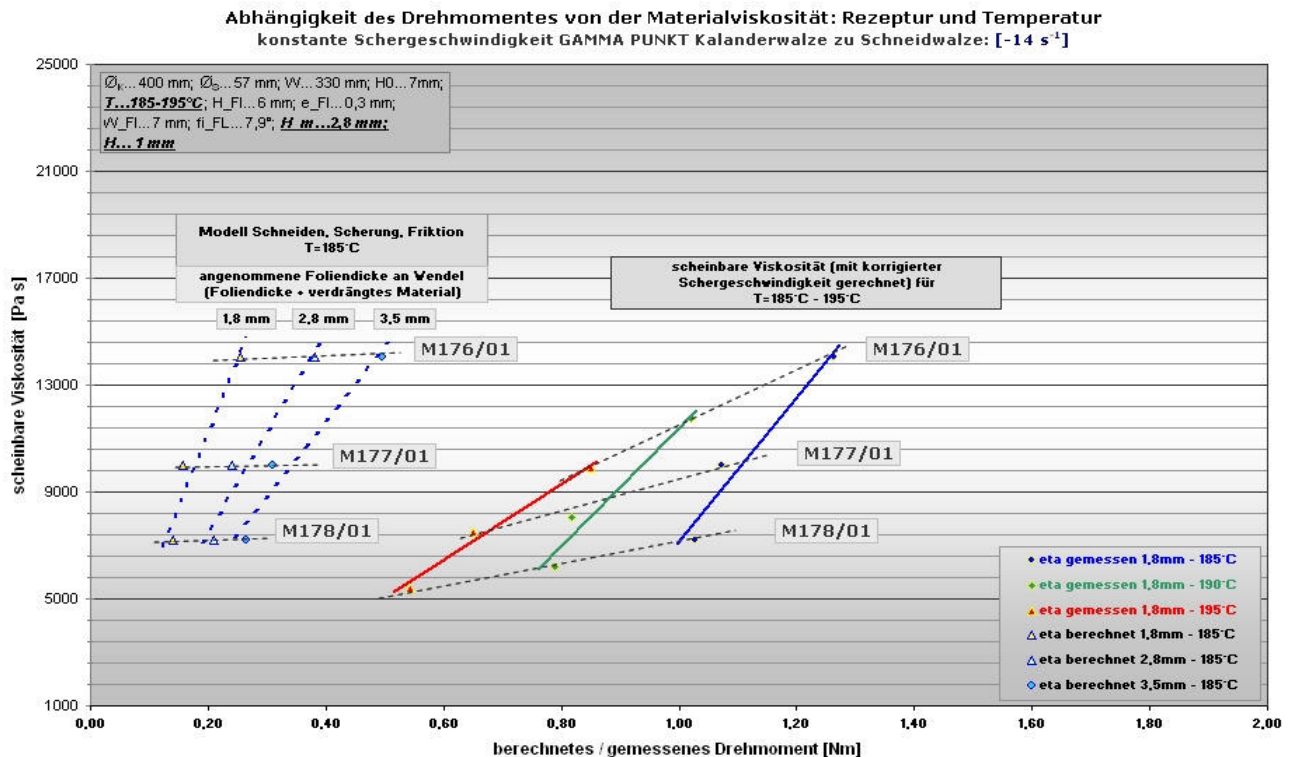


Abb. 5-43: gemessene und berechnete Drehmomente Modell (ohne Materialwulst und mit Materialwulst)

5.3.3.2. Analogiemodell nach der Methodik ,MSM'

Die unter Verwendung der Matching-Stress-Methode beschriebene Vorgehensweise hat das Ziel, die Strömungsverhältnisse im Kontaktgebiet der Schneidwendel analog zu einer Viskosimeterströmung darzustellen.

Die Methodik wird für die Wirkpaarung Kalandrierwalze–Schneidwalze modifiziert. Sie dient zur Bestimmung der Übertragungsfunktion der prozessrelevanten Schergeschwindigkeit für die Schneidwalze. Damit gelingt es, aus den ermittelten Drehmomenten die scheinbaren Viskositäten zu berechnen.

Mit der Annahme von vergleichbaren Scherspannungen im Gebiet der eingreifenden Schneidwendeln in die Materialbahn (τ_{SW}) und an den Kontaktflächen bei einer einfachen Rheometerströmung (τ_{RV}) von

$$\tau_{SW} = \tau_{RV} \quad (5.34)$$

wird die Schergeschwindigkeit der Schneidwalze $\dot{\gamma}_{SW}$ nach Gleichung 5.30 berechnet und auf eine eindimensionale Rheometerströmung zu $\dot{\gamma}_{SW \text{ kor}}$ übertragen (Abb. 5-44).

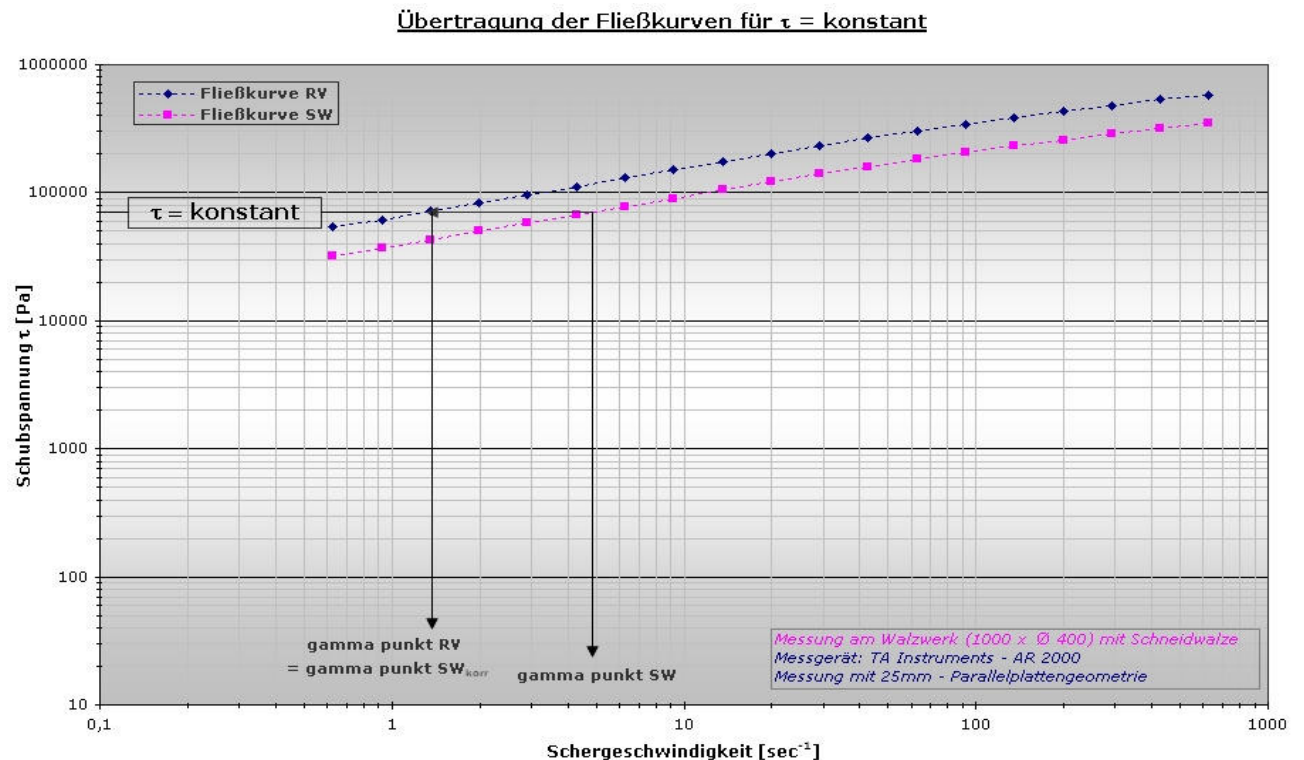


Abb. 5-44: Fließkurven aus Gl. 5.36 und Tab. 5-15 [M176/01]

Die Scherspannung τ ergibt sich aus:

$$\tau = \frac{M}{A \cdot (R_2 + H_f)} \quad (5.35)$$

M ... gemessenes Moment an der Schneidwalze
 A ... eingreifende Fläche (Abb. 5-40)

$(R_2 + H_f)$... Radius der Schneidwendelspitzen

Dabei wird vorausgesetzt, dass das gemessene Drehmoment an den Spitzen der Wendel wirkt – dort, wo die prozessrelevante Schergeschwindigkeit nach Gleichung 4.17 und 4.51 gilt.

A^* ist eine effektive Fläche, die parallel zur Kalandervalzenoberfläche angeordnet ist. Die in Abbildung 5-39 dargestellte berechnete eintauchende Fläche A der Wendelstege ergibt sehr geringe Scherspannungen. Aus der Bewertung aller vorliegenden Messergebnisse ergibt sich für A^* :

$$A^* = \frac{A}{3} \quad (5.36)$$

Die nachfolgende Methodik führt zur Bestimmung der Übertragungsfaktoren x :

$$\tau_{SW} = \frac{M}{A^* \cdot (R_2 + H_f)} \quad (5.37)$$

Für $\tau = konst.$ muss die an der Schneidwendel aufgenommene Fließkurve verschoben bzw. die einwirkende Schergeschwindigkeit mit einem Übertragungsfaktor verschoben werden.

$$\dot{\gamma}_{RV} = \left(\frac{\tau}{k_{korr}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{mit} \quad k_{korr} = (0,6935 \cdot k) \quad (5.38)$$

Der Faktor 0,6935 ergibt sich aus den rheometrischen Korrekturen (Kapitel 5.1.9.3).

Unter Bedingung der Gleichung 5.33 gilt:

$$\dot{\gamma}_{SW_{korr}} = x \cdot \dot{\gamma}_{SW} \quad \text{mit} \quad x = \frac{\dot{\gamma}_{RV}}{\dot{\gamma}_{SW}} \quad (5.39)$$

In Abbildung 5-45 und 5-46 sind für die drei Rezepturen bei Temperaturen von 185°C, 190°C und 195°C die gemessenen und berechneten Schergeschwindigkeitsverläufe für $\dot{\gamma}_{SW} = \pm 100 \text{ s}^{-1}$ dargestellt. Die Viskositäten ergeben sich zu:

$$\eta_{RV} = k_{korr} \cdot \dot{\gamma}_{RV}^{n-1} \quad \text{und} \quad \eta_{SW} = \frac{\tau_{SW}}{\dot{\gamma}_{SW}} \quad (5.40)$$

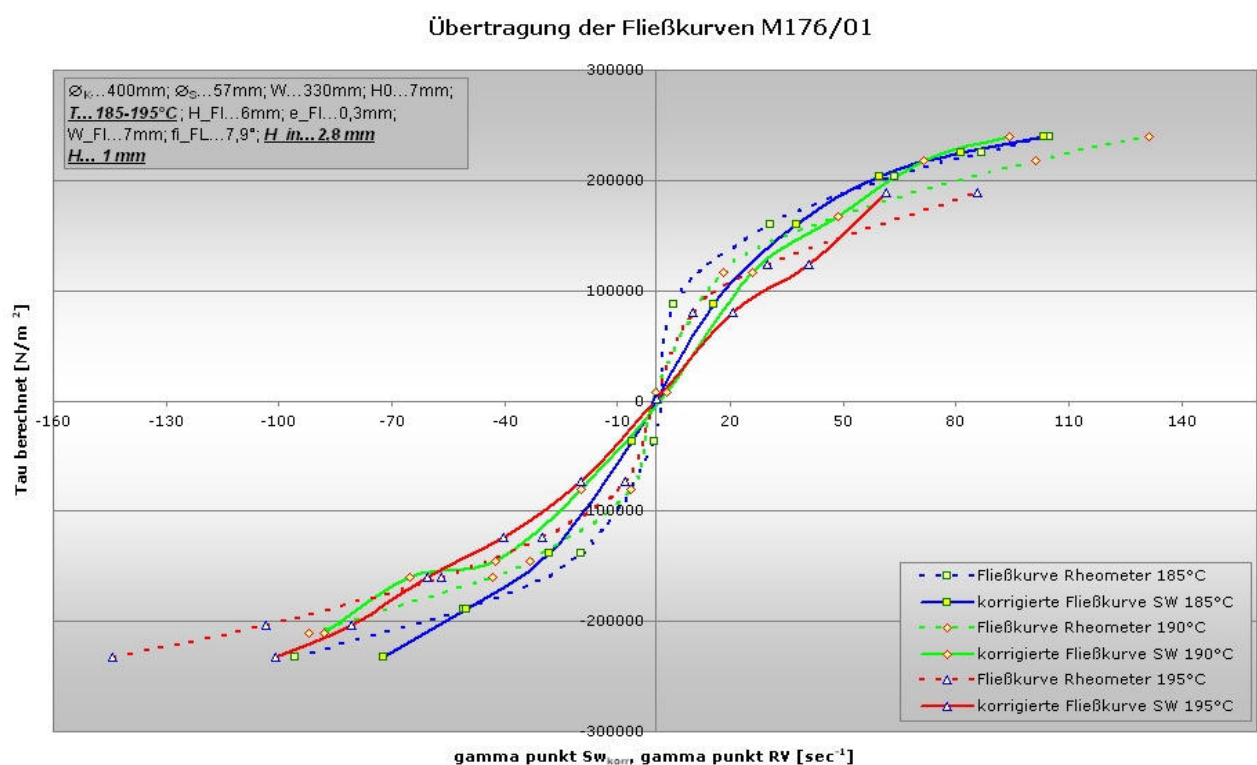


Abb. 5-45: Fließkurven aus Gl. 5-37 und Tab. 5-15 [M176/01]

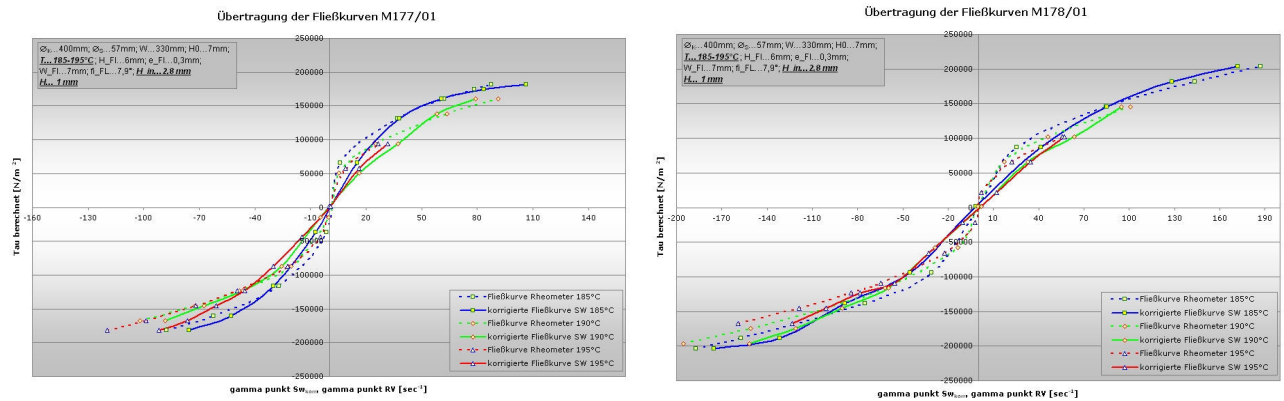


Abb. 5-46: Fließkurven aus Gl. 5-37 und Tab. 5-15 [li.: M177/01; re.: M178/01]

Die Faktoren für die Übertragung der Schergeschwindigkeitsverläufe zeigt Tabelle 5-15.

		M176/01		M177/01		M178/01	
		Felldicke [mm]	Korrekturfaktor	Felldicke [mm]	Korrekturfaktor	Felldicke [mm]	Korrekturfaktor
Faktor x	185°C	2,58	0,89	2.60	0,99	2.58	1,60
	190°C		0,91		0,89		1,22
	195°C		0,79		0,62		0,86

Tab. 5-15: Übertragungsfaktoren (MSM) für die Schergeschwindigkeiten der Schneidwalze

Als Ergebnis für die Modellierung und Überprüfung der erhaltenen Drehmomente in Verbindung mit den gemessenen Fließkurven und der Matching Stress Method (MSM) ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = f(M, \dot{\gamma}_{SW}) \quad (5.41)$$

mit

$$\eta(\dot{\gamma}_{SW_{\text{korr}}}, T) = \frac{\tau_{SW}}{\dot{\gamma}_{SW_{\text{korr}}}} = k(T) \cdot \dot{\gamma}_{SW_{\text{korr}}}^{n-1} \quad (5.42)$$

Die Durchführung der Untersuchungen erfolgte unter folgenden Rahmenbedingungen:

- Eindringtiefe 1,8 mm bei einem Scherspalt H von 1 mm,
- Steigung und Form und Material der Schneidwendel fixiert,
- Temperaturbereich der Untersuchungen im Technikum begrenzt auf 185°C bis 195°C.

In Abbildung 5-47 werden für einen Schergeschwindigkeitsbereich der Schneidwalze von $\dot{\gamma}_{SW} = 20 \text{ s}^{-1} - 100 \text{ s}^{-1}$ die am Rheometer ermittelte Fließkurve, die über die Matching-Stress-Methode berechnete Fließkurve und die gemessenen Drehmomente der Rezeptur M176/01 bei 185°C und in Abbildung 5-48 die Rezepturen M177/01 und M178/01 dargestellt.

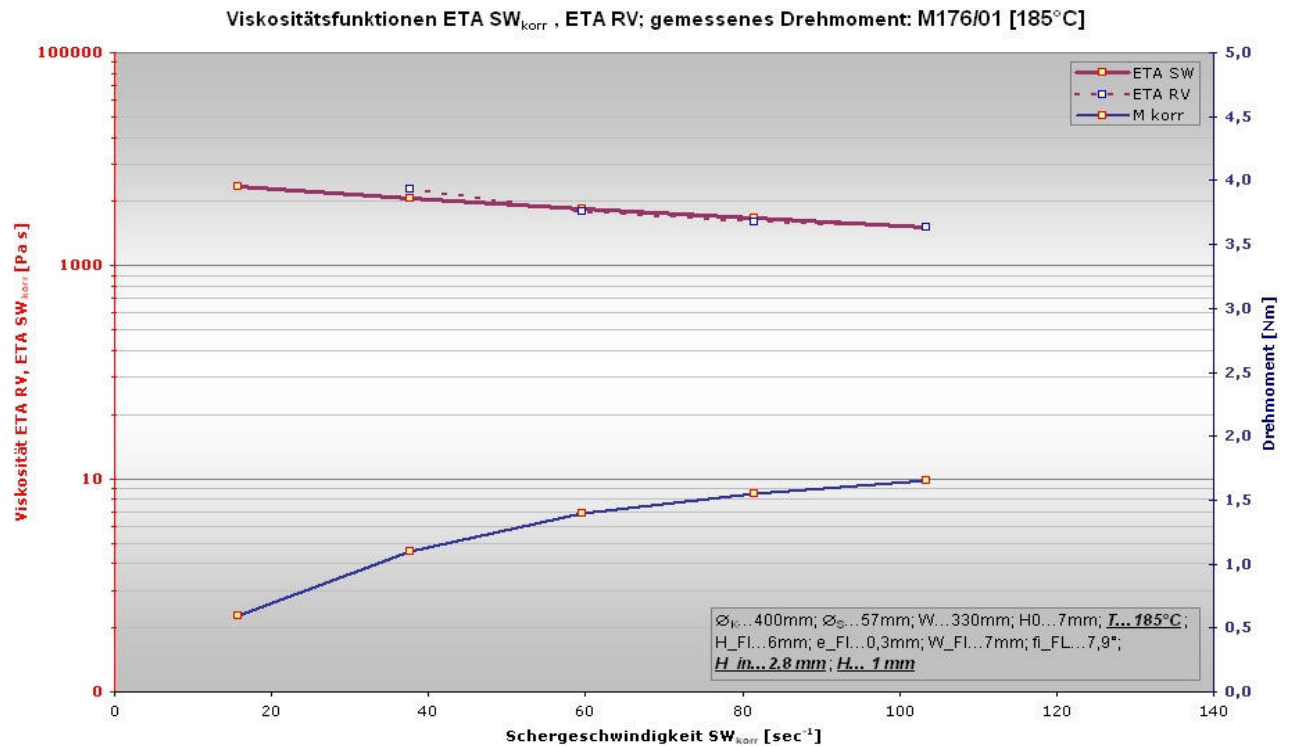


Abb. 5-47: Viskositätsfunktion aus Versuchsanordnung und Rheometer [M176/01]

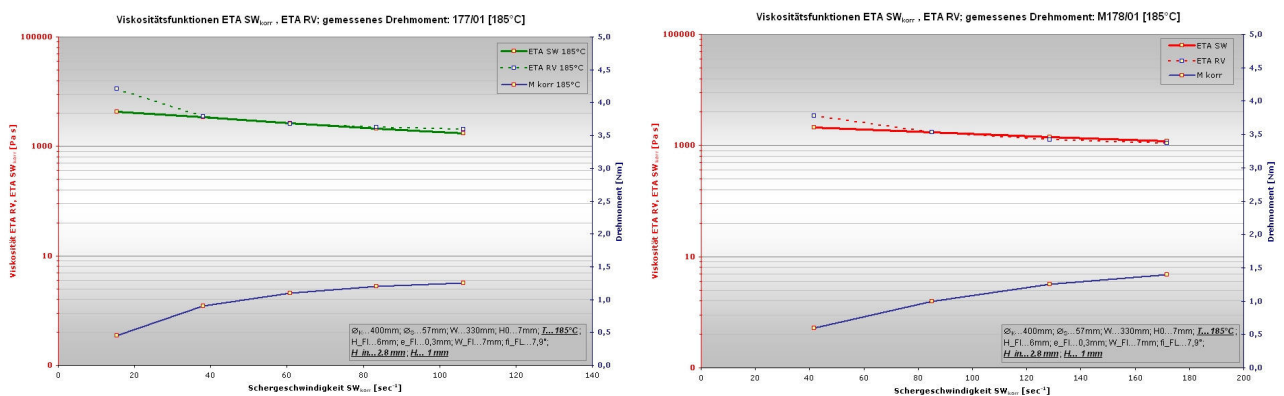


Abb. 5-48: Viskositätsfunktion aus Versuchsanordnung und Rheometer [li.: M177/01; re.: M178/01]

Mit den gemessenen Drehmomenten und vorliegenden Materialfunktionen ergeben sich somit Arbeitsdiagramme, in denen abhängig von Temperatur und Schergeschwindigkeit für alle Rezepturen Drehmoment und Materialviskosität korreliert werden können.

Mit der Einführung der effektiven Fläche $A^* = 1/3 \cdot A$ konnte die berechnete Scherspannung an der Schneidwendelfläche der im Rheometer vorliegenden Scherspannung angeglichen werden. Damit ergeben sich Übertragungsfaktoren für die Schergeschwindigkeiten von 0,88 bis 1,6 (Tab. 5-14). Diese sind leicht rezepturabhängig und innerhalb einer Rezeptur geringfügig temperaturabhängig. Weitere Untersuchungen sollten den Einfluss der Schergeschwindigkeit in Form der Eindringtiefe der Schneidwendel, der Anzahl und Form der Schneidwendel und weiterer Materialien auf die effektive Fläche und die Übertragungsfaktoren klären.

5.3.4. Anwendung der Drehmomentmessung mittels Schneidwalzen

Die entwickelte Methodik und das Prozessmodell für die Verbindung von ermittelten und existierenden Anlagen- und Materialparametern zeigt am Beispiel der an Kalandern eingesetzten Schneidwalzensysteme (Kapitel 2.4.) die Möglichkeit, für den Produktionsprozess wichtige und bisher nicht genutzte Viskositätsfunktionen zu ermitteln. Die Ergebnisse beweisen, dass mit dem umgesetzten Konzept direkt am Verarbeitungsort die Materialviskosität bestimmt werden kann. Diese ist eine prozessbestimmende Größe, die für eine Ausstoßerhöhung und Rezepturoptimierung bei der PVC-U-Herstellung an Großkalandern einen wichtigen Parameter darstellt.

Der Aufbau des Messsystems wurde für den Einsatz an Laborwalzwerken, Versuchsanlagen sowie Kalandern konzipiert. Somit kann an diesen Anlagen eine Messung des Drehmomentes stattfinden. Dazu wird der Versuchsstand an der entsprechenden Anlage/Walze fixiert, angeschlossen und die Schneidwendel mit einer definierten Eindringtiefe in die Materialbahn eingefahren. Die in Tabelle 5-16 dargestellten Drehmomente ergeben sich aus den Messungen am Technikumswalzwerk.

185°C	Drehmoment [Nm]			190°C	Drehmoment [Nm]			195°C	Drehmoment [Nm]			
	176/01	177/01	178/01		176/01	177/01	178/01		176/01	177/01	178/01	
Friktion [m/min]	2	-1,60	-1,25	-1,40	2	-1,45	-1,15	-1,35	2	-1,60	-1,25	-1,15
	1	-1,30	-1,10	-1,30	1	-1,10	-1,00	-1,20	1	-1,40	-1,15	-1,00
	0	-0,95	-0,80	-0,95	0	-1,00	-0,85	-1,00	0	-1,10	-1,00	-0,85
	-1	-0,25	-0,25	-0,65	-1	-0,55	-0,60	-0,80	-1	-0,85	-0,85	-0,75
	-2	0,60	0,45	0,01	-2	0,05	-0,10	-0,40	-2	-0,50	-0,60	-0,45
	-3	1,10	0,90	0,60	-3	0,80	0,35	0,01	-3	0,01	-0,30	-0,15
	-4	1,40	1,10	1,00	-4	1,15	0,65	0,45	-4	0,55	0,00	0,15
	-5	1,55	1,20	1,25	-5	1,50	0,95	0,70	-5	0,85	0,40	0,45
-6	1,65	1,25	1,40	-6	1,65	1,10	1,00	-6	1,30	0,65	0,70	

Tab. 5-16: gemessene Drehmomente am Walzwerk (Eindringtiefe 1,8 mm, H=1 mm)

Mit der Aufnahme der benötigten Prozessparameter wie den Temperaturen der Materialien, den Geschwindigkeiten der Walzen und allen geometrischen Abmaßen sowie der Bestimmung des anliegenden Drehmomentes kann die Materialviskosität bestimmt werden.

5.3.4.1. Inline-Bestimmung der Viskosität

Es wird vorausgesetzt, dass innerhalb einer Rezeptur folgende Bedingungen vorliegen:

- die am Kalandern eingesetzten Rezepturen besitzen näherungsweise gleiche Materialeigenschaften,
- der Fließindex n ist innerhalb der Rezepturen konstant,
- die Parameter der Temperaturfunktionen sind konstant,
- über den Arrhenius-Ansatz ist eine temperaturabhängige Masterkurve verwendbar.

In Abbildung 5-49 werden die in dieser Arbeit beschrittenen zwei Wege zur Inline-Bestimmung der Viskosität als Struktogramm dargestellt.

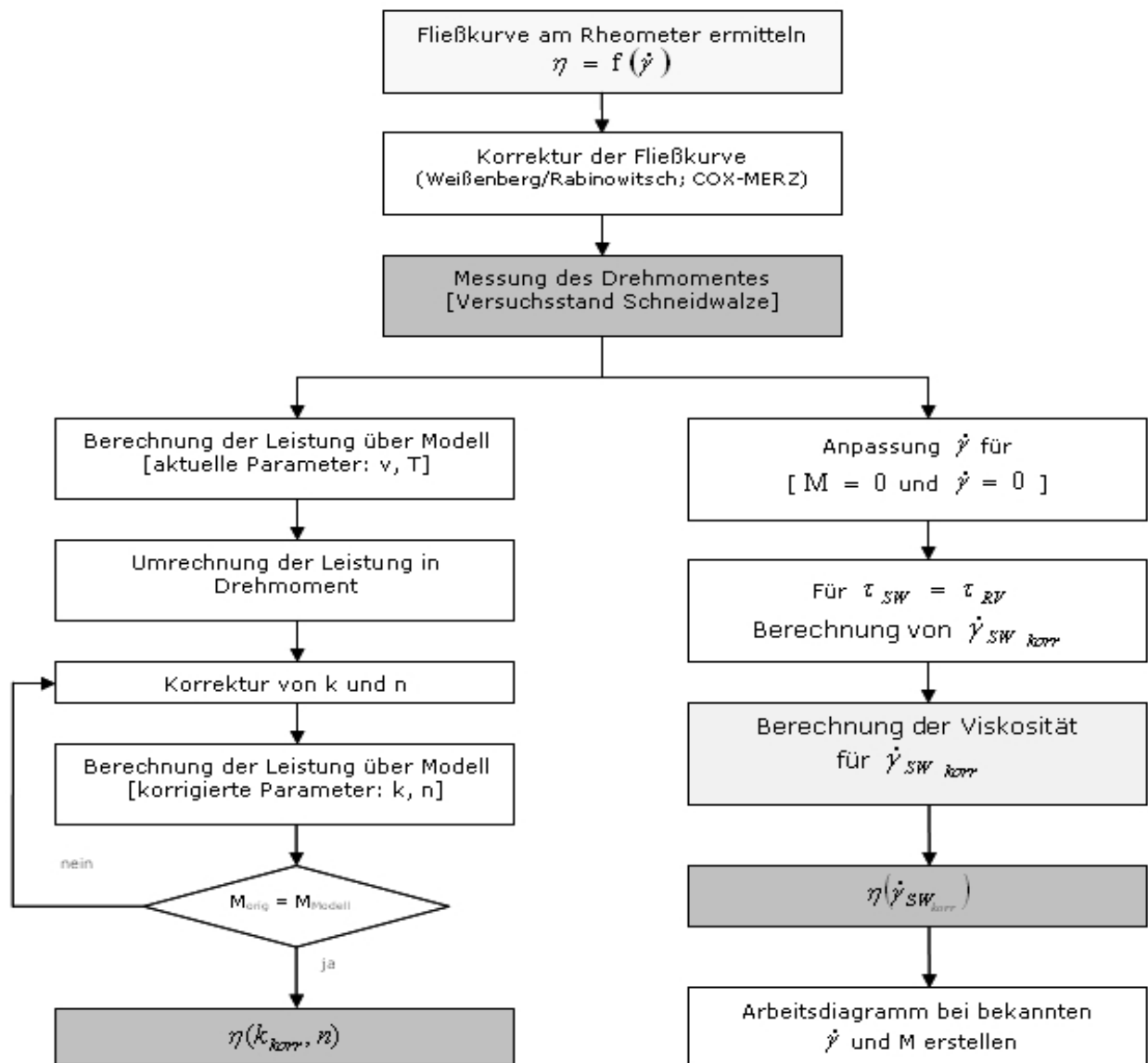


Abb. 5-49: Vorgehensweise zur Bestimmung der Materialviskosität aus dem gemessenen Drehmoment

1. Es besteht die Möglichkeit, über das entwickelte Prozessmodell „Schneiden, Scherung, Strömung“ und das zugehörige Berechnungsprogramm CUT2 bei angenommener Materialviskosität das zu erwartende Drehmoment zu berechnen, dieses mit dem gemessenen Drehmoment zu vergleichen und mit angepasstem Potenzgesetzparameter k die wahre Materialviskosität iterativ zu bestimmen.
2. Unter Nutzung der MSM werden Scherspannung τ_{SW} und Schergeschwindigkeit

$\dot{\gamma}_{SW \text{ korr}}$ mit der effektiven Fläche $A^* = \frac{A}{3}$ bestimmt und die Viskosität wird berechnet.

In beiden Fällen erhält man auf der Grundlage des gemessenen Drehmomentes an der Schneidwalze die schergeschwindigkeitsabhängige Viskosität der kalandrierten Materialien.

Nach Abbildung 5-50 kann die ‚MSM‘ als Zusammenhang von Messgrößen bzw. Prozessgrößen und den rheologischen Größen dargestellt werden:

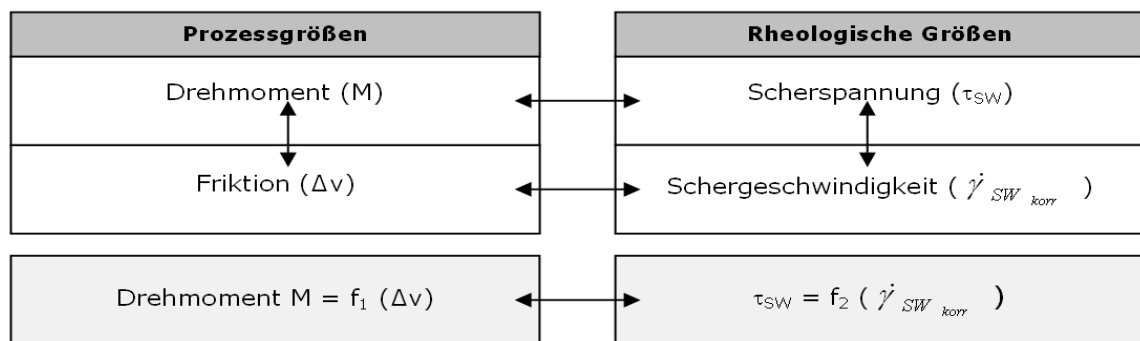


Abb. 5-50: Zusammenhang rheologischer Messgrößen mit Prozessgrößen

Die gesuchte Viskositätsfunktion folgt aus $\eta_{SW} = \frac{\tau_{SW}}{\dot{\gamma}_{SW_{korr}}}$. Für einen Friktionswert folgt damit

aus einem gemessenen Drehmoment ein Inline-Viskositätswert. Über die Variation der Friktionswerte kann aus den resultierenden Drehmomenten die Viskositätsfunktion bestimmt werden. Damit ergibt sich die Grundlage für die Erstellung von Arbeitsdiagrammen.

5.3.4.2. Nutzung der Arbeitsdiagramme

In Abbildung 5-51 sind in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit die aus den Drehmomenten berechnete Viskositätsfunktion und die gemessenen Drehmomente der Rezeptur M176/01 als Funktion der Schergeschwindigkeit dargestellt.

Die Viskositäten werden, wie in Kapitel 5.3.3.2. (Gl. 5.35 – 5.40) beschrieben, berechnet und im Diagramm im entsprechenden Schergeschwindigkeitsbereich aufgetragen. Die Drehmomente werden für die Berechnung der Fließkurve nach der ‚MSM‘ bei unterschiedlichen Friktionen in einem am Kalandrier möglichen Schergeschwindigkeitsbereich (Friktion der Schneidwalze) bei verschiedenen Temperaturen gemessen.

Die Schergeschwindigkeiten werden nach 5.3.2. und 5.3.3.2. ermittelt, korrigiert und als Abszisse im Diagramm dargestellt.

Bei bekannter Friktion von Schneid- und Kalandrierwalze ergibt sich die anliegende Schergeschwindigkeit und mit dem gemessenen Drehmoment wird die Materialviskosität im Diagramm dargestellt.

Die Abbildungen 5-51 und 5-52 zeigen entsprechende Arbeitsdiagramme.

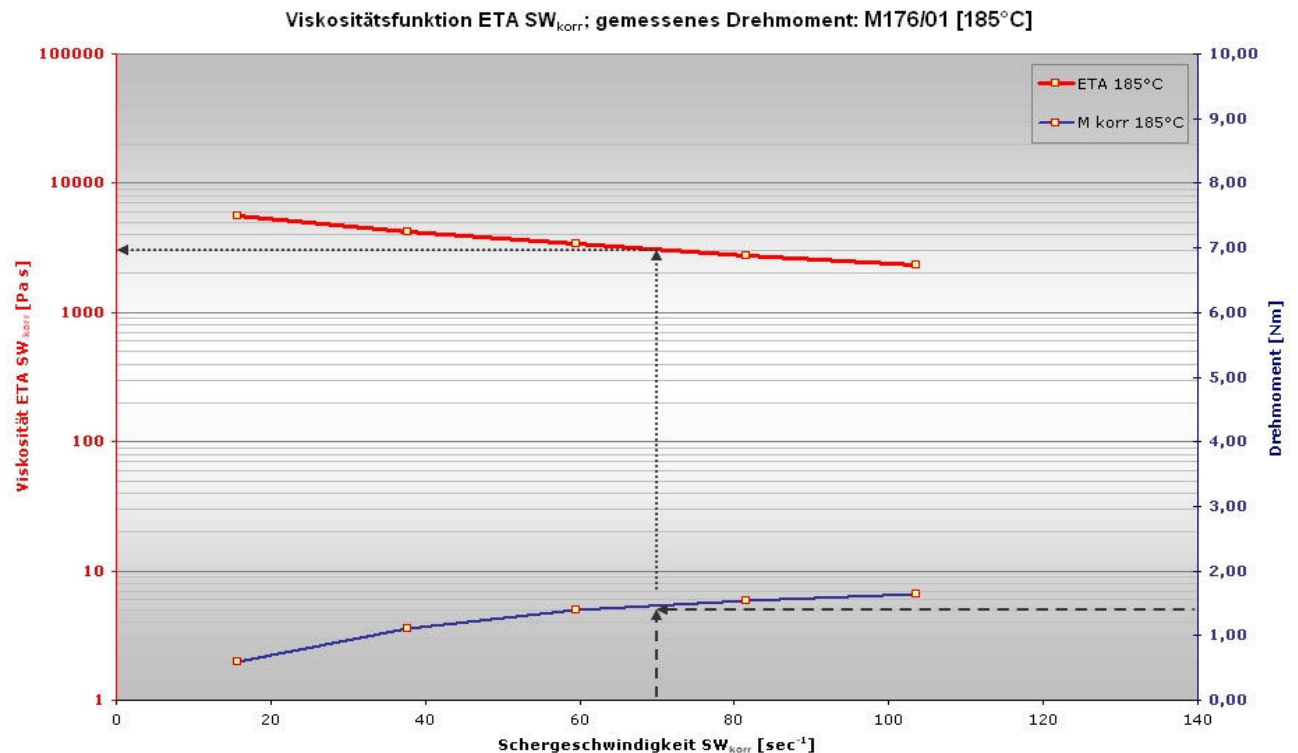


Abb. 5-51: Zuordnung der gemessenen Drehmomente zur berechneten Fließkurve SW [M176/01]

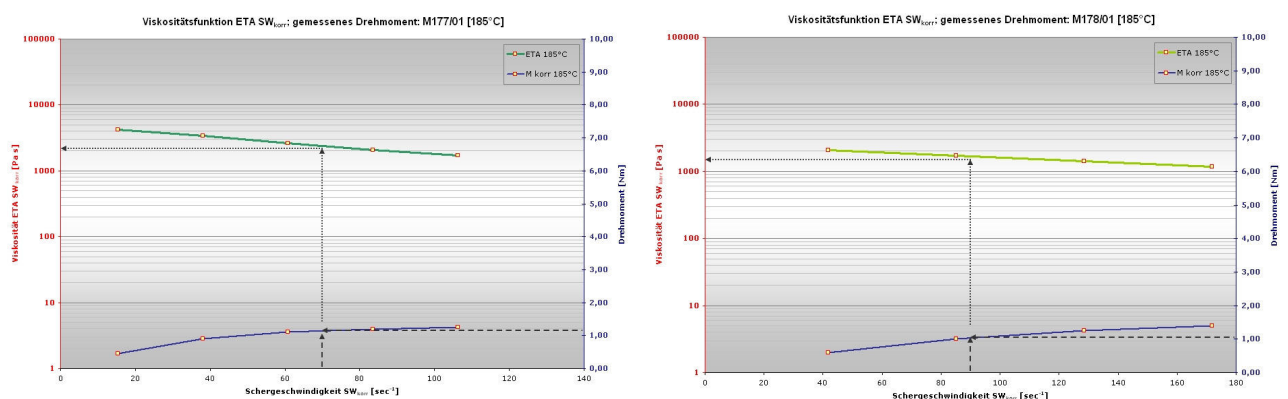


Abb. 5-52: Zuordnung der gemessenen Drehmomente zur berechneten Fließkurve SW
 [li.: M177/01; re.: M178/01]

Im Anwendungsfall innerhalb einer Stoffklasse mit konstantem Exponenten n des Potenzgesetzes wird mit den gemessenen Drehmomenten über die Methodik die Viskosität bzw. Viskositätsfunktion ermittelt und gegebenenfalls der Fließindex n überprüft.

5.3.4.3. Bewertung der Modelle

Ausgehend von den in Kapitel 5 bestimmten Materialeigenschaften aus rheologischen Messungen mit oszillierender Scherbeanspruchung wurden gesicherte Viskositätsfunktionen berechnet. Sie dienen als Grundlage für alle Berechnungen innerhalb der angewendeten Modelle.

Bei der mathematischen Modellierung der Strömung in der Wirkpaarung Kalandervalze–Schneidwalze wurde das Modell ‚Schneiden, Scherung und Strömung‘ aufgrund der additiven Wirkung der Teilprozesse auf die berechnete Leistung genutzt. Es zeigt sich, dass die berechneten Leistungen 2-4 mal niedriger sind als die im Versuch ermittelten. Für diese Abweichungen können viskoelastische Eigenschaften der Schmelze verantwortlich sein, wie auch von Alonso /75/ in seinen Untersuchungen vermutet. Der Einfluss einer Materialverdrängung in Form eines Wulstes wurde nicht berücksichtigt.

Die modifizierte Matching-Stress-Methode wurde erfolgreich eingeführt. Hierbei zeigen sich zwei wichtige Ergebnisse. Die Definition der effektiven Scherfläche A^* eignet sich sehr gut zur Anpassung der eindimensionalen Scherströmung in Analogie zum Rheometer bzw. Rührprozess. Die bestimmten Übertragungsfaktoren zur Verschiebung der Schergeschwindigkeitsverläufe der Schneidwalze liegen innerhalb eines engen Bereiches. Bei der Anwendung von Mittelwerten ergeben sich Faktoren von 0,8 bis 1,2.

Eine Verbesserung der Genauigkeiten in beiden Modellen kann bei einem Einsatz an Kalandernanlagen aus der Vielzahl der kontinuierlich erhaltenen Messwerte erreicht werden. Das betrifft auch die geringere thermische Beanspruchung der Materialien.

Für den untersuchten Einsatzfall der Wirkpaarung Kalandervalze–Schneidwalze ergibt sich ein relevanter Arbeitsbereich bei Friktionen von -3 m/min bis 1 m/min. Die daraus resultierenden Viskositäten liegen im mittleren Schergeschwindigkeitsbereich der Fließkurve im Gültigkeitsbereich des Potenzgesetzes.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit hatte das Ziel, ein Inline-Messverfahren zur Bestimmung und Nutzung prozessrelevanter Materialeigenschaften an einer Kalandieranlage zu entwickeln. Eine den Prozess beeinflussende Materialeigenschaft ist die Viskosität der kalandrierten Kunststoffrezepturen in oder vor den Walzenspalten des Kalanders. Die Neuheit dieser Arbeit besteht in der Nutzung einer oder mehrerer bereits vorhandener Anlagenteile (Schneidwalze oder Rundmesser) zur Erfassung von Kräften oder Momenten und ihrer Verbindung mit der aktuellen Materialviskosität. An den Kalandieranlagen befinden sich direkt an den Kalandermalzen Schneidwalzensysteme, welche mit ihren Schneidwendeln mitrotierend in das Material einschneiden. Eingeschlossene Luftblasen zwischen Material und Walze sollen dadurch im nachfolgenden Materialwirbel an die Oberfläche gelangen und austreten. Die Spitzen und Flanken der Schneidwendeln bilden vor dem Verarbeitungsspalt des Kalanders ein Kontaktgebiet im Material, in welchem sich bei der Erzeugung von Schergeschwindigkeitsprofilen unterschiedliche Scherspannungen und Strömungsverhältnisse einstellen. Diese sind abhängig von der Rezeptur und der Temperatur unterschiedlich stark ausgeprägt. Mit der Erfassung des anliegenden Drehmomentes bei verschiedener Friktion der Wirkpaarung Kalandermalze–Schneidwalze werden diese Zustände in den gemessenen Drehmomenten abgebildet.

In der Arbeit wurde ein Modell zur Berechnung des Drehmomentes bzw. der Leistung an der Schneidwalze entwickelt, das zur Bestimmung der Materialviskosität innerhalb eines kalandertypischen Temperatur- und Schergeschwindigkeitsbereiches geeignet ist.

Wissenschaftliche Untersuchungen an Kalandieranlagen begrenzen sich für PVC-U auf Fließvorgänge im Kalanderspalt, Ablösepunkte oder geometrische Betrachtungen der entstehenden Materialsichten. Untersuchungen zur Bestimmung von rheologischen Eigenschaften sind, auch aufgrund der vielfältigen Zusammensetzung der Rezepturen von PVC-U, nur vereinzelt im Labormaßstab durchgeführt und veröffentlicht worden. Die Messung der Materialviskosität an Produktionsanlagen ist bisher nicht bekannt. Für Laborwalzwerke wird das Drehmoment beider Walzen eines Walzwerkes für die Korrelation zur Materialviskosität auch für PVC angewendet. Diese Umsetzung ist für Kalandieranlagen aufgrund der Platzverhältnisse und des technischen Aufwandes und auch aus ökonomischen Gründen nicht realisiert. Bekannt ist weiterhin die Messung des Drehmomentes an Beschichtungsanlagen mit gegenläufigen Auftragswalzen an niedrigviskosen Flüssigkeiten. Für Kalandieranlagen wurden früher Möglichkeiten zur Bestimmung der Materialviskosität über Keilspalt-Rheometer im Materialknet oder kleinere Andruckwalzen auf der Kalandermalze vorgeschlagen, diese sind aber ebenfalls großtechnisch nicht umsetzbar.

Für eine praxisnahe Bearbeitung der Aufgabenstellung wurde ein Versuchsstand konzipiert und genutzt, welcher mit einer verkleinerten Schneidwalze, einer Antriebseinheit und einer empfindlichen Drehmomentmessung alle gestellten Anforderungen erfüllt. Mit ihm kann an

einem Laborwalzwerk, Mischwalzwerk oder Kalanders die Schneidwalze in das Material eingefahren und über einen Linearantrieb eine definierte Schergeschwindigkeit erzeugt und ein der Materialviskosität entsprechendes Drehmoment erfasst werden.

Für die Abbildung unterschiedlicher Materialeigenschaften wurden drei praxisrelevante PVC-U-Rezepturen ausgewählt, die mit verschiedenen Modifiziergehalten veränderte Fließeigenschaften aufwiesen. Dabei wurde zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften mit Rheometern eine Methodik entwickelt und angewendet, die unter verkürztem Zeitaufwand gesicherte Messergebnisse garantiert und zu den benötigten Viskositätsfunktionen führt. Über die Nutzung der oszillierenden Scherströmung im Platte-Platte-Rotationsrheometer wird die thermomechanische Beanspruchung minimiert. Als Ergebnis werden die im Kapillarrheometer auftretenden starken thermischen Schädigungen des PVC-U, Gleiterscheinungen und aufwendigen Korrekturverfahren vermieden. Die Überprüfung und Anwendung der COX-MERZ-Regel führt zu verwendbaren Viskositätsfunktionen.

Mit dem Potenzgesetz beschriebene Fließkurven sind die Ausgangsdaten für die Entwicklung des verwendeten Prozessmodells. Für den vorliegenden Schergeschwindigkeitsbereich von $1 - 100 \text{ s}^{-1}$ erweist sich das Potenzgesetz für die ingenieurtechnische Modellierung als ausreichend genau.

Für die Modellbildung der Wirkpaarung Kalanderswalze-Schneidwalze wurden zwei Lösungswege erarbeitet. Zum Einen erfolgte die mathematische Modellierung der Strömung im Kontaktgebiet, zum Anderen wurden die prozessrelevanten Scherbedingungen nach der Hypothese der Matching-Stress-Methode untersucht. Als Ergebnis wurden Übertragungsfunktionen der Messgröße Drehmoment zu der Materialeigenschaft Viskosität gefunden.

Modelliert wurden in dieser Arbeit das reine Schneiden der Schneidwendelspitze im Gleichlauf, das Schneiden mit Scherung der Schneidwendelspitze bei Friktion der Walzenpaarung und das Schneiden mit Scherung und einer Strömung an den Schneidwendelflächen in der Art einer Walzenspaltströmung. Unter Annahme der Addition aller auftretenden Leistungen wurde das Modell mit Schneiden, vorhandener Scherung und Strömung an den Schneidwendelflächen mit dem Potenzgesetzansatz als Prozessmodell verwendet. Die Simulation verschiedener Parameter zeigt hierfür den Einfluss von Friktion, Fließeigenschaften und Eindringtiefe auf die zu erwartende Leistungsaufnahme der Schneidwalze.

An einer Technikumsanlage aufgenommene Drehmomentverläufe für die ausgewählten PVC-U-Rezepturen ergaben, in Analogie zu dem vorhandenen Prozessmodell, deutliche Abhängigkeiten des gemessenen Drehmomentes von der Materialrezeptur und -temperatur. Für die am Rheometer charakterisierten fließfähigeren und niedrigviskoserer Rezepturen erniedrigten sich auch die im Versuch aufgenommenen Drehmomente. Ebenfalls konnte die Temperaturabhängigkeit in einem für den Kalanders relevanten Bereich von 185°C bis 195°C signifikant nachgewiesen werden.

Zur Darstellung der gemessenen Drehmomentverläufe und ihrer Übertragung auf die am Rheometer ermittelten Fließkurven wurde weiterhin eine Methodik entwickelt und überprüft, die ‚Matching Stress Method (MSM)‘. Mit ihr wird die Strömung in einem Rührprozess mit einer einfachen Rheometerströmung zusammengeführt und die einwirkenden Flächen beider zur Ermittlung der Scherspannungen verwendet. Neu ist die Übertragung dieser Methodik auf die Wirkpaarung Kalandervalze-Schneidwalze. Unter Annahme von gleichen Scherspannungen für Rheometer- und Schneidwalzenströmung wurde ein Verschiebungsfaktor bestimmt, der die im Kontaktgebiet auftretende Schergeschwindigkeit mit der des Rheometers korreliert. Damit ergibt sich ein leicht erstellbares und anwendbares Arbeitsdiagramm.

Die resultierenden Arbeitsdiagramme erlauben am Versuchsstand und später am Kalandr eine direkte Übertragbarkeit von gemessenem Drehmoment und vorliegender Materialviskosität.

Im Vergleich zu den gemessenen Rheometerwerten ergaben sich für das strömungstechnische Prozessmodell niedrigere Materialviskositäten, für die ‚MSM‘ wurden gute Übereinstimmungen gefunden. Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik der ‚MSM‘ und das mathematische Modell der Wirkpaarung Schneidwalze/Kalandrwalze sind für allgemein kalandrierfähige Kunststoffe anwendbar. Die am Versuchsstand realisierte technische Lösung ist auf Schneidwalzen an Produktionskalandern übertragbar.

Für die Optimierung des Kalandrprozesses bei einer notwendigen steigenden Produktivität mit gesenkten Produktionskosten ist das Ergebnis dieser Arbeit ein wichtiges Hilfsmittel. Mit Kenntnis der Materialviskosität an den prozessbestimmenden Verarbeitungsspalten der Kalandranlage können Rezepturen optimiert, neue Rohstoffe besser bewertet und Rücklaufmaterialien schneller eingesetzt werden. Für die Optimierung der Prozessparameter ist die hier vorgestellte Erfassung der Materialviskosität eine neue und erstmalig an einer Kalandranlage umgesetzte Vorgehensweise, die dem Prozessingenieur die Möglichkeit für veränderte neue Anlagenparameter wie Spaltweiten, Temperaturen oder Anlagen-geschwindigkeiten gibt.

In Weiterführung dieser Arbeit wird neben der konstruktiven Umsetzung der Drehmomentmessung an die vorhandenen Schneidwalzensysteme auch eine Nutzung zusätzlicher Messwertinformationen empfohlen. Die eingesetzten Antriebseinheiten erlauben eine programmgesteuerte Fahrweise ihrer Motoren, so dass mit einer Beschleunigung und Verzögerung der Schneidwalze oszillierende Messungen möglich sind und neben der Erfassung der Materialviskosität eine Korrelation des auftretenden Amplitudenverhältnisses und der Phasenverschiebung mit den elastischen Eigenschaften der Materialien (TPE, Kautschuk) vorstellbar ist.

7. Formelzeichen und Abkürzungen

7.1. Lateinische Buchstaben

G'	$[Pa]$	Speichermodul
G''	$[Pa]$	Verlustmodul
i, j		Koordinatenrichtung
v_x, v_y, v_z	$[m/s]$	Geschwindigkeitskomponente in x-, y- und z-Richtung
X, Y, Z	$[mm]$	Koordinatensystem entlang der Schneidwendel (α)
$\dot{D}_s$	$[Pa]$	Deviator des Spannungstensors
$\dot{D}_D$	$[s^{-1}]$	Deviator des Deformationsgeschwindigkeitstensors
I_σ	$[Pa]$	quadratische Invariante des Spannungstensors
I	$[s^{-1}]$	quadratische Invariante des Deformationsgeschwindigkeitstensors
T_s	$[Pa]$	Spannungstensor
$\dot{T}_D$	$[s^{-1}]$	Deformationsgeschwindigkeitstensor
D_s	$[Pa]$	Deviator des Spannungstensors
$\dot{D}_D$	$[s^{-1}]$	Deviator des Deformationsgeschwindigkeitstensors
A	-	Proportionalitätsfaktor
N	$[Watt]$	Leistung der Deformation für ein Einheitsvolumen
N_v	$[Watt]$	Leistungsaufwand in den Grenzen des Volumenstromes
$N_{y v}$	$[Watt]$	Gesamtleistung der Normalkräfte
$N_{xy v}$	$[Watt]$	Gesamtleistung der Scherkräfte
$N_1^+(t)$	$[Pa]$	erste Normalspannungsdifferenz $N_1^+(t)$, instationär
D, d	$[mm]$	Materialdicke
$k_{f\dot{\gamma}}$	-	Verschiebungsfaktor
u_f^*	$[m/min]$	korrigierte Schneidwendelgeschwindigkeit für $M=0$
A	$[mm^2]$	eingreifende Fläche der Schneidwendel
A^*	$[mm^2]$	effektive eingreifende Fläche der Schneidwendel
C	$[Pa \cdot s]$	Viskositätsparameter (Gl. 5.19)
b	$[^\circ K]$	Temperaturfaktor (Gl. 5.19)
A	$[Pa \cdot s^B]$	Konsistenzparameter (Gl. 5-20)
B		Fließindex (Gl. 5-20)
x, y, z		kartesische Koordinaten

7.2. Griechische Buchstaben

$\dot{\gamma}$	$[s^{-1}]$	Schergeschwindigkeit
η_0	$[Pa \cdot s]$	Nullviskosität
τ	$[Pa]$	Schubspannung
$\frac{\partial v_i}{\partial x_j}$	$[s^{-1}]$	Geschwindigkeitsgradienten im kartesischen Koordinatensystem
η_0	$[Pa \cdot s]$	Nullviskosität
η_∞	$[Pa \cdot s]$	Viskosität bei hohen Schergeschwindigkeiten
σ_Y	$[Pa]$	Normalspannung
$\dot{\epsilon}_X$	$[s^{-1}]$	Geschwindigkeit der logarithmischen Deformation in X-Richtung
$\dot{\epsilon}_Y$	$[s^{-1}]$	Deformationsgeschwindigkeit in der Richtung der Spalthöhe
τ	$[Pa]$	Scherspannung
$\dot{\epsilon}$	$[s^{-1}]$	Geschwindigkeit der logarithmischen Deformation des Materials
Δu_z	$[m/min]$	Auflaufgeschwindigkeit der Fläche (Ebene)
ϕ, L, ζ	-	Hilfsvariablen für die Berechnung der unsymmetrischen Kalanderstömung
Q, Q_z	$[cm^3/s]$	Volumenstrom
η^*	$[Pa \cdot s]$	komplexe Viskosität
τ_R	$[Pa]$	Wandschubspannung am Rand
$\tau_{R \text{ Korr}}$	$[Pa]$	Wandschubspannung am Rand (Korrektur nach Weißenberg / Rabinowitsch)
η_{Korr}	$[Pa \cdot s]$	korrigierte Viskosität nach Weißenberg / Rabinowitsch
η_{Korr}^*	$[Pa \cdot s]$	korrigierte Viskosität nach Weißenberg / Rabinowitsch und COX-MERZ
τ_{SW}	$[Pa]$	Scherspannung an der Schneidwendel (Kontaktfläche)
τ_{RV}	$[Pa]$	Scherspannung im Rotationsrheometer (Kontaktflächen)
$\dot{\gamma}_{SW\text{Korr}}$	$[s^{-1}]$	korrigierte Schergeschwindigkeit an der Schneidwendel
$\dot{\gamma}_{RV}$	$[s^{-1}]$	Schergeschwindigkeit im Rotationsrheometer
$\dot{\gamma}_{SW}$	$[s^{-1}]$	Schergeschwindigkeit der Schneidwendel
η_a	$[Pa \cdot s]$	Temperaturfunktion der Viskosität (Gl. 5-20)
ω	$[rad/s]$	Winkelfrequenz, Kreisfrequenz
η^*	$[Pa \cdot s]$	komplexe Viskosität
η'	$[Pa \cdot s]$	Realteil der komplexen Viskosität („dynamische Viskosität“)
η''	$[Pa \cdot s]$	Imaginärteil der komplexen Viskosität

8. Literaturverzeichnis

- [1] Reher E.O., Kärmer R., Schnabel R.: Technische Rheologie und Verarbeitungstechnik, Studienmaterial, TH Leuna-Merseburg, 1990
- [2] Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt E. V.: Weltkunststoff-Verbrauch 2000-2010, AgPU, 2010
- [3] Sächting H.J.: Vinylchlorid-Polymerisate, in Kunststoff-Taschenbuch 4. Ausgabe (1989)
- [4] Gärtner H.: Kalandrierte Folien aus PVC-Hart, PP und PS, Fachtagung „Kalandrieren von Kunststoff-Folien - PVC und Alternativen“, 1995
- [5] Gomez L.: Engineering with rigid PVC; Marcel Dekker, Inc. New York and Basel, 1984
- [6] Domininghaus H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, 4. Auflage, VDI Verlag, Düsseldorf, 1992
- [7] Finkmann H.-U.: Einführung in die Verarbeitung von PVC, Kunststoffhandbuch, Bd. 2, Polyvinylchlorid, Carl Hanser Verlag München Wien, 1986
- [8] Kurzbezeichnungen von Kunststoffen: DIN 7728 T1 / ISO 1043 T1 / DIN 16780
- [9] Tötsch W., Gaensslen H.: Polyvinylchlorid – Zur Umweltrelevanz eines Standardkunststoffes, Verlag TÜV Rheinland, 1990
- [10] Schrifttum ‚Freiwillige Verpflichtungen der PVC-Industrie‘, Nachhaltige Entwicklungen, 2000
- [11] Nentwig J.: Folientechnologie – Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft, Österr. Kunststoff-Zeitschrift 22, 1991
- [12] Norman A.: Synergieeffekte vom Rohstoff bis zur Folie, Tagungsband 5. Technologietagung Klöckner Pentaplast, 2002
- [13] DIN 53466 / ISO 60, 61, 171: Schütt- und Stopfdichte
- [14] DIN 53734 / ISO 175; DIN 53195 / DIN ISO 787: Korngrößenverteilung
- [15] DIN 53492: Rieselfähigkeit
- [16] DIN 53726 / ISO 174: K-Wert und Viskositätszahl
- [17] DIN ISO 787: Flüchtige Bestandteile; DIN 53715: Wassergehalt nach Fischer
- [18] DIN 53417: Kornporosität; DIN 54802: Weichmacheraufnahme
- [19] Michaeli W.: Zur Analyse des Flachfolien- und Tafelextrusionsprozesses, Dissertation, RTWH Aachen, 1975
- [20] Predöhl W.: Untersuchungen zur Herstellung von Blasfolien aus Polyethylen niedriger Dichte, Dissertation, RTWH Aachen, 1972
- [21] Thomass H.: PVC-Folien. Rohstoffe, Herstellverfahren, Eigenschaften, Prüfung, Weiterverarbeitung, Anwendung, Carl Hanser Verlag, 1963
- [22] Seeger R.: Beitrag zum Kalandrieren strukturviskoser und viskoelastischer Fluide, Technische Hochschule Merseburg, Dissertation A, 1981
- [23] Hofbauer L.: Entwicklung einer Kalanderausformtheorie und beispielhafte technische und wirtschaftliche Erprobung an PVC-Folien, Schriftenreihe Kunststoff-Forschung 5, Kunststofftechnik TU Berlin, 1981
- [24] Käufer H.: Arbeiten mit Kunststoffen, Band 1, Aufbau und Eigenschaften, Springer Verlag, 1990
- [25] Torner R.V.: Grundprozesse der Verarbeitung von Polymeren, Leipzig, 1974
- [26] Mahn H., Orth H., Roitzsch K.-H.: Kalandertechnik, Kunststoffe 75 (10), S. 5-26, 1985
- [27] Gärtner H.: Einfluß der Temperaturführung im Kalandrierprozeß auf Qualität und Kosten von PVC-Hartfolien, Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 1997

- [28] Batschkowa I.: Prozeß- und Systemuntersuchungen einer Kalandieranlage, Dissertation A TH Leuna-Merseburg, 1987
- [29] Schnabel A.: Erarbeitung eines neuen Regelungs- und Automatisierungskonzeptes für den Kalandrierprozeß von PVC-U-Folien, Diplomarbeit, Technische Universität Chemnitz, 1996
- [30] Kohlert Ch.; Reher E.-O.; Krasovskij V. N.; Voskresenskij A. M.: Kalandrieren von Polymeren 1. Auflage, Deutscher Verlag für Kunststoffindustrie GmbH, Leipzig, 1992
- [31] Handbuch „Know-How-Sammlung zum Kalandrieren“, Klöckner Pentaplast GmbH, Werk Gendorf
- [32] Grigo T.: Know How Bericht Mischen bei KP, Gendorf, 2002,
- [33] Kopsch H.: Kalandertechnik, München – Wien, Carl-Hanser-Verlag, 1978
- [34] Jeisy R., Trouilhet Y., Grassmann P.: Energieverbrauch im Knetteil eines BUSS-Ko-Kneters, Verfahrenstechnik 10, 79, 1976
- [35] Schnabel A.: Kalandrier – vom Walzwerk bis zur Produktion, 1. Technologietagung Kalle-Pentaplast, Montabaur, 1998, fimeninterner Tagungsband,
- [36] Funke H., Matschke K.: Fließvorgänge im Knet vor einem Walzenspalt, Forschungsbericht Höchst, FoBe 06-J87-0125, 1975
- [37] Matschke K., Funke H.: Dickenabweichungen in kalandrierten, elastisch unverstreckten PVC-Rollknetfolien, Forschungsbericht Höchst, FoBe 06-J31-0190, 1988
- [38] Mansur B.-M.: Systemtechnische Untersuchungen zur Formfixierung bei der Herstellung von Folien und Platten aus Kunststoffschmelzen auf Kalandrierlinien mit Kühlstrecken, Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 1997
- [39] Stephan W., Fourier S.: Methodik der Analyse eines verfahrenstechnischen Systems am Beispiel Folienkalandrier, Leder Schuhe Lederwaren, S. 119-121, 1984
- [40] Klostermann R., von Bose S., Mewes D.: Comparison of calculated with measured Flow Fields in the Gap between two rotating Rolls, Advances in Polymer Technology 13, 3, S. 187-199, 1994
- [41] Luther S.: Berücksichtigung der freien Knetoberfläche beim Berechnen von Strömungsfeldern im Kalanderspalt, Dissertation, Universität Hannover, 2003
- [42] Unkrüer W.: Druckverlauf und Fließverhalten im Walzenspalt, Teil 1 bis 5, Kunststoffberater 9 – 12, 1, 1971/1972
- [43] Unkrüer W.: Beitrag zur Ermittlung des Druckverlaufs und der Fließvorgänge im Walzenspalt bei der Kalanderverarbeitung von PVC, Dissertation, RWTH Aachen, 1972
- [44] Torner R.V., Dobroljubov G.V.: Kaucuk i resina 17, 1958
- [45] Anker F.: Plast. Technol. 14, 1968
- [46] Hatzmann G., Herner M., Müller G.: Fließvorgänge im Walzenspalt beim Kalandrieren von PVC-Folien, Kunststoffe Band 65, S. 472-476, 1975
- [47] Krasovskij V.N., Michaleva N.M., Mirsoev R.G.: Kaucuk i resina 31, 1972
- [48] Gaskell R.: The Calendering of Plastic Materials, Journal appl. Mech., S. 334-336, 1950
- [49] Bekin N.G., Torner R.V., Petrusanskij V.J., Sachaev A.I.: Method for calculating temperature fields in calendering of rubber mixes, Kaucuk i resina 30, 1971
- [50] Bernhardt E.C.: Processing of thermoplastic Materials, New York: Reinhold, 1959
- [51] White J.: Elastomer Rheology and Processing, Rubb. Chem. And Technol. 42, S. 257-338, 1969
- [52] Wagner M.: Appl. Polym. Science 14, 1970
- [53] Chong D.: Calendering Thermoplastic Materials, Journal of applied Polymer Science 12, S. 191-212, 1968

- [54] Alston W., Astill K.: An analysis for the calendering of Non-Newtonian Fluids, *Journal of Applied Polymer Science* 17, S. 3157-3174, 1973
- [55] Vlachopoulos J., Kiparissides C.: Finite Element Analysis of calendering, *Polymer Engineering and Science* 10, 16, S. 712-719, 1976
- [56] Vlachopoulos J., Kiparissides C.: A Study of viscous Dissipation in the Calendering of power low Fluids, *Polymer Engineering and Science* 3, 18, S. 210-214, 1978
- [57] Dobbels F., Mewis J.: Nonisthermal Nip Flow in Calendering Operations, *AIChE Journal*, Vol. 23, No. 3, S. 224-232, 1977
- [58] Vlachopoulos J., Hrymak A. N.: Calendering Poly(Vinyl Chloride): Theory and Experiments, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 20, No. 11, S. 725-731, 1980
- [59] Seeger R., Reher E.-O.: Berechnung der integralen Parameter beim Kalandrieren von PVC-Mischungen, *Plaste und Kautschuk*, 28. Jahrgang, Heft 7, S. 391-396, 1981
- [60] Chung T.-S.: Analysis for the Calendering of Compressible Fluids, *Journal of Applied Polymer Science* 28, S. 2119-2124, 1983
- [61] Mitsoulis E., Vlachopoulos J., Mirza F. A.: Calendering Analysis without the Lubrication Approximation, *Polymer Engineering and Science* 25, No.1, S. 6-18, 1985
- [62] Agassant J. F., Espy M.: Theoretical and Experimental Study of the molten Polymer Flow in the Calender Bank, *Polymer Engineering and Science* 25, No. 2, S. 118-121, 1985
- [63] Daud W. R. W.: Calendering of Non-Newtonian Fluids, *Journal of Applied Polymer Science* 31, S. 2457-2465, 1986
- [64] Zheng R., Tanner R.I.: A Numerical Analysis of Calendering, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, No. 28, S. 149-170, 1988
- [65] Coleman C.J.: A Contour Integral Approach to some Cavity Flows of elastic Fluids, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 28, S. 239-253, 1988
- [66] Tseng A.A., Soh S.K.: Predictability and Control of Layflatness in Calendering, *Processing of Polymers and polymeric Composites ASME*, S. 213-234, 1990
- [67] Tseng A.A., Cheng J.C.: Computer-Aided Modeling of polymer Processing: A Review, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 113, S. 363-371, 1991
- [68] Tseng A.A., Shih W.H., Thomas C.L., Cheng S.J.: Intelligent Processing of Polymer Sheets for Calendering, *Advances in Polymer Technology*, Vol. 12, No. 4, S. 361-378, 1993
- [69] Tseng A.A., Wang S.R., Traynor J.S., Kothari J.B.: Temperature Variation in Calendering and its Relationship to SPC Analysis of Layflatness, *Journ. of Plastic Film and Sheeting* 10, S. 21-64, 1994
- [70] Tseng A.A., Wang S.R.: On-line Modeling for Gage Control of Calendering, *Manufacturing Review*, Vol. 7, S. 72-85, 1994
- [71] Riest K.: Eine Konstruktionsumgebung für integriertes Gestalten und Berechnen am Beispiel von Kalandern, *Fortschrittberichte VDI, Reihe 3 Verfahrenstechnik*, 1999
- [72] Glomsaker T., Hinrichsen E.L., Irgens F., Thorsteinsen P.: Numerical simulation of extrusion of S-PVC formulations in a capillary rheometer, *Rheol Acta* 39, Springer Verlag, S. 81-95, 2000
- [73] Kohlert C., Reher E.-O., Bothmer D., Wille U.: Verfahren und Vorrichtung zur kontinuierlichen Viskositätsmessung an Walzenmaschinen, *Wirtschaftspatent DD 228 636, A1*, 1985
- [74] Kohlert C., Krasovski V., Voskresenski A.: Intensivierung des Kalandrierprozesses – ein Überblick, *Wissenschaftliche Zeitschrift TH Leuna-Merseburg* 30, 1988

- [75] Alonso S., Reglat O., Bertrand F., Choplin L., Tanguy P.A.: Process Viscosity in Reverse Roll Coating, Chemical Engineering Research and Design, Issue 2, Vol. 79, S. 128-136, 2001
- [76] Alonso S., Bertrand F., Tanguy P.A.: A torque-based analysis of the reverse roll coating process, Chemical Engineering Science 58, Issue 9, S. 1831-1837, 2003
- [77] Lenk H.G., Schnabel R.: Rheologie von Hart-PVC, Projektbericht Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Klöckner Pentaplast GmbH, 1999
- [78] Brazinsky J. u.a.: A theoretical study of liquid film spread heights in the calendering of newtonian and power law fluids, Journal appl. Polymer Science 14, S. 2771-2784, 1970
- [79] Collin H.: Chemische Rundschau 27, 1974
- [80] Grajewski F.: Produktvorstellung Collin-Walzwerke, PVC Tagung, Würzburg, 2008
- [81] Rodenacker W.: Keilspaltmaschinen – Fördern und Evakuieren von nicht-Newtonschen Stoffen, Vortrag Tagung chemische Apparatewesen Frankfurt, 1964
- [82] Leidl J., Meinel G.: Untersuchung des Kalandrierens am Laborkalender. Teil V: Die Bläschenbildung bei Dickfolien, FoBe 06-J31-0151-78, Forschungsbericht Höchst, Werk Gendorf, 1978
- [83] Meinel G.: Erfahrungsaustausch mit Sumitomo Bakelite. Besuchsbericht Fa. Sumitomo, 1987
- [84] HBM GmbH: Monageanleitung Drehmomentenmesswelle T 34 FN A O116-2.1 de
- [85] HBM GmbH: Datenblatt T 34 FN Drehmoment-Messwellen 23.T34FN.11 de
- [86] Kretzler K.: Eine neue Methode zur Bestimmung der Fließeigenschaft von Schüttgütern, Dissertation, Universität Würzburg, 2002
- [87] HBM GmbH: Torquebook_03 de.pdf
- [88] Produkthandbuch DBL/DBK Synchron-Servomotoren; Danaher Motion; Ausgabe 09/2006
- [89] Digitaler Servoverstärker Servostar 601 ... 620; Inbetriebnahme-Handbuch Danaher Motion; 03/2004
- [90] Hoffmann K.: Der Weg zum Messgrössenaufnehmer – Ein Leitfaden zur Anwendung der HBM K-Dehnungsmessstreifen; Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH; Darmstadt; 2008
- [91] Hottinger Baldwin Messtechnik: Drehmomentenmesswellen richtig einsetzen; Darmstadt; 1989
- [92] Prautzsch F.: Schrittmotorantriebe: Präzise Positionieren in computergerechter Technik; 1991
- [93] Brosch P.F.: Intelligente Antriebe in der Servotechnik, Die Bibliothek der Technik; 186; 1999
- [94] Rose und Krieger Produktkatalog: Lineareinheiten; 2007
- [95] Bird R.B., Stewart W. E., Lightfoot E. N.: Transport Phenomena; J. Wiley & Sons, Inc., New York London Sydney, 1966
- [96] Morrison F.A.: Understanding Rheology, Oxford University Press, New York, 2001
- [97] Menges G., Haberstroh E., Michaeli W., Schmachtenberg E.: Werkstoffkunde Kunststoffe, Hanser Fachbuch, 2002
- [98] Krasovskij V.N.: Methode zur Berechnung der Kraft- und Energieparameter beim Walzen und Kalandrieren von Polymeren, Plaste und Kautschuk 24, S. 122-124, 1977
- [99] Voskresenski A. M.: Berechnungsprogramm CUT und Kalandrieren für Polymere an Kalandern mit unterschiedlichen Walzendurchmessern, Technische Universität St. Petersburg, 2008
- [100] Charalampous T.: Methoden zur Darstellung inelastischen Materialverhaltens bei kleinen Deformationen; Habilitation; Universität Gesamthochschule Kassel; 1994
- [101] Siegloch H.: Technische Fluidmechanik, Springer Verlag, Berlin, S. 15, 2009

- [102] Schnabel R.: Rheologische Stoffkennzeichnung von Fluiden und ihre Anwendung in der Verarbeitungs- und Verfahrenstechnik, Dissertation B, TH Leuna-Merseburg, Merseburg, 1989
- [103] Kulicke W.: Fließverhalten von Stoffen und Stoffgemischen; Heidelberg; New York; 1986
- [104] Pahl M., Gleißle W.: Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere; VDI-K; Düsseldorf; 1995
- [105] TA Instruments: AR 2000 Bedienerhandbuch; PN500106.002; Ver. C; 2004
- [106] Brabender: Messknetter für Labor und Technikum; Produktbroschüre; 2005
- [107] Haake: PolyDrive Extruder, Produktbroschüre; 2003
- [108] Göttfert: Side-Stream-Rheometer; Produktbroschüre; 2005
- [109] Göttfert: AT-Line Station; Produktbroschüre, 2009
- [110] Chaudhari R., Schnabel R.: Rheology of PVC melts, Studienarbeit MLU Halle-Wittenberg, Merseburg, 2006
- [111] Vinogradov G.B.: Erfolge der Rheologie von Polymeren (russ.), Verlag Chemie, Moskau, 1970
- [112] Weipert D., Tscheuschner H.-D.: Rheologie der Lebensmittel, Behr's Verlag DE, 1993
- [113] Schäffner H.-J.: Vergleichende Untersuchungen der Strömungsprofile und des Fließverhaltens Nicht-Newtonischer Flüssigkeiten im Rotationsviskosimeter, Archive of Applied Mechanics, Volume 38, Berlin, 1969
- [114] Glenn T.A., Keener K.M., Daubert C.R.: A Mixer viscometry approach to use vane tools as steady shear rheological attachments, Applied Rheology 10, S. 80-89, 2000
- [115] Groh : Änderung der Eigenschaften von PVC-Mischungen durch das Heiz-Kühlmischen, Forschungsbericht Höchst, FoBe 06-J31-0082, 1973
- [116] Unkrüer W.: Beitrag zur Ermittlung des Druckverlaufes und der Fließvorgänge im Walzspalt bei der Kalanderverarbeitung von PVC-Hart zu Folien, Dissertation TH Aachen, 1970
- [117] Meinel G., Seidel E.: Momentane lokale Temperaturschwankungen an der KalanderstraÙe H13, Forschungsnotiz 173-82 Höchst, 1982
- [118] Passler W.: Theoretische Betrachtungen über das Kalandrieren von PVC mit rollendem Knet, Bericht Höchst Gendorf, 1970
- [119] Wöckener W.: Technische Entwicklung von Kunststoff-Kalandieranlagen, Plastverarbeiter 9, S. 25, 1974
- [120] Koch G.: Fortschritte auf dem Gebiet der Theorie des Kalandrierens. Möglichkeiten zur Anwendung der theoretischen Erkenntnisse in der Praxis, Forschungsbericht Höchst, FoBe 06-W01-0001, 1974
- [121] Ardichvili G.: Versuch der rationalen Bestimmung der Bombierung von Kalandерwalzen, Kautschuk 14, S. 23-25, 1938
- [122] Meinel G., Leidl J.: Das Gelierverhalten von Hart-PVC, Forschungsbericht Höchst, FoBe 06-J31-0117, Gendorf, 1975
- [123] Gächter R., Müller H.: Kunststoffadditive, 3. Ausgabe, Karl Hanser Verlag, München, Wien, 1990
- [124] Pfahler G., Riedel T.: Gleitmittel, Kunststoffe 66, S. 694, 1976
- [125] Menzel G.: Verarbeitungsadditive – Gleitmittel / Fließhilfen „Additive für die PVC-Verarbeitung“, Ciba Geigy, Symposiums-Vortrag in Marienberg, 1988
- [126] Meinel G.: Kalorimetrische Untersuchungen an verschiedenen Additiven von PVC-Folien, Forschungsnotiz Höchst 584, Gendorf, 1986
- [127] Deiringer G.: PVC und seine Additive, Listenausarbeitung, Gendorf, 1992

- [128] Abeler G.: Additive für die PVC-Verarbeitung, Ciba Geigy, Symposiums-Vortrag in Marienberg, 1988
- [129] Fleischer E.: Rheologie von PVC-Hart und PVC-Schlagzäh, Forschungsbericht Höchst AG, FoBe 01-H38-0290, Frankfurt, 1975
- [130] Bascom W.: The Wettability of Polymer Surfaces an the Spreading of Polymer Liquides, Advances Polymer Science 85, 190, 1988
- [131] Rabinovitch E.B.: Laboratory Impact testing of rigid Vinyl Profiles to predict Performance in Punching, Saw-Cutting and general Abuse, Antec 1276, 1986
- [132] Leidl J.: Einfluß von Stockopol und ähnlichen Substanzen auf die Abzugsgeschwindigkeit und Verarbeitungstemperatur in Genotherm N-Rezeptur, Untersuchungsnotiz Höchst AG, 27-83, Gendorf, 1983
- [133] Funke H.: Antistatische Ausrüstung von Folien durch K30-Ausrüstung in der Mischung, Untersuchungsnotiz Höchst AG, Gendorf, 1980
- [134] unbekannt: Prüfbericht zur Ausprüfung von Antistatika der Firma Atlas Chemie zu Inkorporierung in PVC, Höchst-AG Werk Gendorf, 1980
- [135] unbekannt: Herstellung und Untersuchung kalandrierter, hochgefüllter PVC-Hartfolien, Forschungsbericht Höchst, FoBe 06-J31-0134, Gendorf, 1976

A1. Verfahrenseinflüsse

Die Systemglieder einer Kalandieranlage lassen sich verschiedenen Verfahrensschritten bei der Verarbeitung vom Rohstoff zum Endprodukt Folie zuordnen. Die folgenden chronologisch ablaufenden Beschreibungen zeigen die wichtigsten Einflussgrößen innerhalb der jeweiligen Aggregate.

Mischen

Das Mischen von Rezepturkomponenten erfolgt in bevorzugten schnell- oder langsamlaufenden Mischern. Schnellmischer bringen die erforderliche Wärme mechanisch mit Hilfe des Mischwerkzeugs ein. Die Rezepturbestandteile werden über gesteuerte und festgelegte Reihenfolgen dem Mischer zugegeben. Die Mischdauer wird über eine empirisch ermittelte Zeit oder die erreichte Materialtemperatur gesteuert. Steuergröße für die zeitliche Folge der Herstellung der einzelnen Mischungschargen ist der Füllstand entweder eines Nachfolgebehälters oder des Trichters von Ko-Kneter oder Extruder. Bauliche Einflussgrößen für Mischer sind:

- die Behältergröße
- die Form der Mischwerkzeuge
- die Antriebsleistung der Motoren

Verfahrenstechnisch arbeitet das System mit folgenden Größen:

- der Mischreihenfolge der pulver- oder granulatförmigen und flüssigen Bestandteile sowie deren prozentualer Anteil,
- den Eingangstemperaturen der Bestandteile,
- dem Füllgrad des Mischbehälters,
- der Rotationsgeschwindigkeit des Mischwerkzeuges,
- der Mischdauer.

Für den Kalandrierprozess und das Gelieren im Ko-Kneter oder Extruder sind die Ausgangstemperatur der Mischung, deren Schüttdichte und die Kornform entscheidend /33/.

Gelieren

Hier soll im wesentlichen der im Ko-Kneter oder im Planetwalzenextruder einer Kalandersstraße ablaufende Prozess verstanden werden, bei dem das mit Additiven abgemischte PVC-Pulver durch Schererwärmung oder Wärmeübertragung in eine kompakte Phase von 140 – 200°C, das so genannte Gelat, überführt wird. Der Begriff wird abgeleitet von der früheren PVC-Verarbeitung mit Weichmachern und dem Übergang von einer flüssigen zu einer gelartigen Phase.

Die Mischungsaufbereitung unter Scherung zu einer kompakten Masse ist verbunden mit Wärmezufuhr am Anfang und Wärmeabfuhr am Ende der Gehäusewände des Ko-Kneters oder Extruders /29, 31, 33/.

	Ko-Kneter	Planetwalzenextruder
Gelieverhalten	unempfindlich gegen Schüttgewicht, Regenerateinsatz, Rezept, Ausstoßänderung	- enger Gelier-Betriebsbereich - besserer Materialaufschluss, wenig Bläschen und Stippen
Betriebssicherheit	- mechanisch robust, praktisch störungsfrei - Wandbeläge in Totzonen, Brand-agglomerate und somit Foliendefekte - hohe Reinigungszeit - mangelhafte Abdichtung – Materialverlust (ca. 1%)	- Verzahnung des PW-Teils mechanisch empfindlich, Zahnausbrüche - hoher Verschleiß, Abrieb - optimale Selbstreinigung - hohe Betriebszeit
Temperaturführung	- wenig Einfluss auf Geliergrad - hohe Wandtemperaturen günstig zum Anfahren	durch die großen Berührungsflächen hoher Einfluss der Temperierung von Gehäuse und Welle
Drehzahl	Drehzahländerungen sind proportional zur Gelierzeit	
Einzugsverhalten	Mischungen aus einem Heiz-Kühlmischer verbessern im Gegensatz zu kalt gemischten das Einzugsverhalten des Pulvers aufgrund einer Erhöhung der Schüttdichte /115/	

Tab. A1-1: Vergleich der Einflüsse bei Ko-Kneter und PWE

Das Gelat ist gummiartig bei HT-Kalenderrezepturen oder bröselig bei NT-Rezepturen.

Wichtige Kriterien für das Gelieren sind:

- ein gleichmäßiges Einleiten der Scherenergie, die zu thermisch homogenem Gelat und zu homogener Verteilung der Additive in makro- und mikroskopischen Dimensionen führt,
- eine geringe Verweilzeit und enges Verweilzeitspektrum (aufgrund der begrenzten Thermostabilität des PVC),
- ein wirksames Entgasen der flüchtigen Bestandteile,
- einem Verarbeiten von hohen Anteilen von Verschnitt und nicht gelierbaren Füllstoffen und Pigmenten.

Einfluss auf das Verfahren lässt sich nehmen über:

- das Verhältnis von Stopf- zu Hauptwelle (Füllgrad der Maschine),
- das Verhältnis Wellenlänge zu Durchmesser,
- die Drehzahl der Hauptwelle,
- den Durchmesser des Stauringes, Ringspaltdüse oder Anlaufringes,
- eine konische Wellenauslegung im Ko-Kneter,
- die Anzahl der Kneterelemente/Planetenspindeln als schereinwirkende Fläche,
- die Temperaturführung von Gehäuse und Hauptwelle.

Der Zustand des Gelates ist die entscheidende Ausgangsgröße für die Qualität im Folgesystem Kalender.

Materialtransport

Das Transportförderband dient der Beschickung des ersten Kalanderspalt. Die vorgeschalteten Ko-Kneter oder Extruder übergeben ihren Materialvorrat, meist durch einfaches Herunterfallen, auf das Förderband. Steht ein Walzwerk zur Verfügung, wird das Materialfell vom Förderband abgezogen und dem Kaland zugeführt.

Gestaltende Einflüsse sind:

- die Länge und der Förderquerschnitt des Bandes,
- die Transportgeschwindigkeit sowie die steuerbaren Haltezeiten des Bandes in den Endlagen,
- die Schwenkfrequenz.

Ausgangsgrößen für das Nachfolgesystem Kaland sind die Materialtemperatur unter konvektiver Abkühlung auf dem Transportweg sowie die Materialverteilung im ersten Walzenspalt. Diese ist in Füllhöhe und Profil entscheidend für die Qualität der Folie. Fließanomalien durch verschiedene Füllstände oder unterschiedlich ausgekühlte Materialbrocken sind die Folge der abweichenden Temperaturen und somit resultierenden Viskositätsunterschiede.

Kalandrieren

Die Ausformung einer Kunststoffmasse hoher Viskosität in den Walzenspalten eines Kalanders zu einer Folienbahn wird als Kalandrieren bezeichnet.

Die auszuformende Masse muss zuvor durch Gelieren plastifiziert werden, nach der Ausformung im Kaland wird die Folie im einfachsten Fall von der letzten Kalandwalze abgezogen und in einer Temperstrecke gezielt abgekühlt oder sie gelangt zu einer weiteren Nachbehandlung. Die zwei Verfahren zur Herstellung von PVC-U-Folien sind:

- das Niedrigtemperaturverfahren (Bröselknet- oder Luvithermverfahren),
- das Hochtemperaturverfahren (Rollknetverfahren).

Beide unterscheiden sich grundsätzlich im Verfahren und den eingesetzten Rezepturen.

Niedrigtemperaturverfahren: Das krümelige Gelat wird in den Spalten des Kalanders zu einer gesinterten Folie geformt, wobei die poröse Konsistenz weitgehend beibehalten wird. Das eigentliche Verschmelzen des aus dem Kaland kommenden gesinterten Fells mit einer entsprechenden Zunahme der Festigkeit erfolgt im nachfolgenden Luvithermprozess bei hoher Temperatur und dem nachfolgendem Verstrecken.

Die thermische Beanspruchung des Gelats wird gering gehalten durch:

- die Einstellung relativ niedriger Temperaturen der Kalandwalzen (134 – 185°C),
- die Erhöhung der Spaltweite, bei der ein größerer Massestrom den Kaland durchläuft als zur Folienherstellung im letzten Kalanderspalt benötigt wird (das überflüssige Material wird gleichmäßig entgegen der Walzenlaufrichtung aus dem Spalt ausgeschoben und zurückgeführt).

Der Austrag des überschüssigen Materials kann über Knetbleche oder Wachsauftrag erfolgen.

Hochtemperaturverfahren: Das klumpenförmige, hochviskose Gelat aus dem Ko-Kneter oder Extruder wird unter Knetbildung (Materialwirbel im Einzugsbereich eines Walzenspaltes) zu einer Folie geformt. Bezeichnet wird das Hochtemperaturverfahren auch als Rollknetverfahren, da in diesem Kalandrierverfahren ein zigarrenförmiger Knet scheinbar rollende Bewegungen ausführt. Die Bildung der Folie geschieht im Gegensatz zum Niedrigtemperaturverfahren in jedem Spalt nur zur Hälfte neu. Dabei läuft die Folie an der Walze anliegend in den Knet. In diesem Knet arbeiten zwei zueinander gegenläufig drehende Wirbel an der Ein- und Auslaufwalze des spaltbildenden Walzenpaares. Diese werden Ein- und Auslaufwirbel genannt /36, 43/.

Prozesstechnologie

Befüllung des Kalanders:

Allgemein ergibt sich für die Befüllung des Kalanders die Forderung nach einem möglichst homogenen Einzug des Gelats im Aufgabespalt zwischen erster und zweiter Walze. Sie ist notwendig für eine konstante Folienenddicke und eine gleichmäßige thermische Belastung des PVC.

- Inhomogenitäten des Einzugs können entstehen, wenn große Gelatbrocken auf einen fast rollenden Knet im Aufgabespalt treffen. Der bevorzugt eingezogene Brocken verdrängt die heiße Knetmasse.
- Nachteilig ist ein zu stark im Ko-Kneter oder Extruder vorgeliertes Material, da dieses zu schnell in eine dünnflüssige Konsistenz übergeht.
- Die durch eine ungleichmäßige Befüllung des 1. Walzenspaltes entstehenden unterschiedlichen Materialtemperaturen rufen Dickenschwankungen (in Produktionsrichtung oder Strukturen im Film) hervor.
- Eine zu starke Befüllung des 1. Walzenspaltes kann zu einer thermischen Zersetzung des verdrängten Materials im nachfolgenden Knet führen.
- Die Fellbreitenzunahme in den einzelnen Kalanderspalt muss möglichst gering sein, da sich die Bereiche der Endfolie, die durch eine Fellverbreiterung entstanden sind, durch Dickenänderungen (abweichende Massetemperaturen in diesen Randbereichen mit Veränderung der Abzugslinie) hervorheben.

Temperaturen der Kalandervalzen:

Die Walzentemperaturen sollen möglichst hoch liegen, um einen gut rollenden Knet und gute Oberflächenqualitäten der Folie mit wenig Fließlinien und geringer Trübung zu erhalten.

- Eine Erhöhung der Temperaturen vergrößert die Knettemperatur, verringert die Spaltlast und das Drehmoment sowie die resultierende Arbeit im Knet vor den Kalanderspalt.

- Diese Erhöhung ist begrenzt durch eine oberhalb einer bestimmten Temperatur beginnende starke Reduzierung der Schmelzefestigkeit, welche ein Abziehen der Folie von der Walze nicht mehr ermöglicht.
- Eine weitere Grenze ist die durch thermischen Abbau entstehende Zersetzung des PVC (Brandstreifen).

Temperaturen des Materials:

Die Materialtemperaturen werden beeinflusst durch:

- die Aufgabetemperatur,
- die Walzentemperatur und -geschwindigkeit,
- die Spaltweite,
- die Knetstärke sowie
- die Friktion der Walzen.

Die Materialtemperatur und ihre Schwankungen beeinflussen die Intensität der Folienstrukturen (Fließlinien), eine hohe Temperatur und geringe Schwankungen führen zu einer geringen Intensität.

Bei normalen Kalandrierbedingungen betragen die Temperaturschwankungen im Fell auf der Kalandrierwalze etwa ± 1 bis ± 2 K, im Knet ± 7 K (in Folge der Knetumschläge). Untersuchungen in /116/ zeigen Temperaturunterschiede über die Breite des Fells auf der Walze 3 von bis zu 10 K und über die Breite des Knets bis ca. 12 K.

Geschwindigkeit des Kalanders /37, 116/:

Die Kalandriergeschwindigkeit bestimmt zusammen mit der Spaltweite im wesentlichen den Ausstoß des Kalandrierwalzenspaltes (Erhöhung der Geschwindigkeit führt zu einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit).

- Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt neben dem Ausstoß die Spaltlast und das Drehmoment der Walzen und damit die Knettemperatur. Begrenzt wird dies durch eine Zunahme der Dickenschwankungen in der Folie.
- Produktionskalandrier werden im allgemeinen mit einer Friktion zwischen 1,1 und 1,8 im einzelnen Spalt gefahren. Eine Erhöhung der Friktion (Geschwindigkeitserhöhung der zweiten spaltbildenden Walze) ist mit der Zunahme der Trübung und der Oberflächenrauheit sowie einer Abnahme der Zähigkeitswerte (Kerbwirkung der Oberflächenrauheit) verbunden.

Walzenspalt des Kalanders:

Der Walzenspalt wird durch die Einstellung der Spaltweite an den Walzenlagern vorgegeben.

Er wird beeinflusst durch:

- Die Walzendurchbiegung durch den Massedruck im Spalt. Diese erfordert eine Korrektur der ungleichen Spaltweite durch Walzengegendurchbiegung, auch Rollbending genannt,

(über das Walzenlager hinaus verlängerter Walzenzapfen wird mit hydraulischer Kraft beaufschlagt und biegt die Walze in Gegenrichtung) und Walzenschrägverstellung (Drehung der Achsen zweier spaltbildender Walzen um einen Winkel von 0,5 bis 1° gegeneinander).

- Die Walzentemperaturverstellung und die Temperaturverteilung über die Walzenbreite. Eine Temperaturverstellung der Walze führt infolge der Wärmedehnung zu einer Änderung des Durchmessers von etwa 5,5 µm pro Grad Celsius. Auswirkungen können sich aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen über die Walzenbreite im Dickenquerprofil der Folie zeigen.
- Dem Kalandervalzenrundlauf. Er führt zu kurz- und langwelligen Dickenschwankungen der kalandrierten Folienbahn. Der Rundlauf wird durch Unrundheit der Walzen und ihren Bewegungen im Walzenlager negativ beeinflusst.

Spaltlasten am Kalandr:

Der Spaltdruck steigt im Knetinneren an und erreicht kurz vor der engsten Stelle des Spaltes sein Maximum /42, 117/. Der Spaltdruck fällt bei Zunahme von Knettemperatur und Spaltweite, er steigt mit Zunahme von Knetstärke, Walzendurchmesser und K-Wert des PVC /118/. Der Spaltdruck ist über die Walzenbreite nicht konstant, als Folge der unterschiedlichen Knetstärke und Knettemperatur fällt er gewöhnlich zu den Seiten hin ab. Eine Integration über den Druckverlauf im Knet ergibt die Linienlast pro Walzenbreite. Sie beträgt im Rollknetverfahren (HT) je nach Spaltweite, Temperatur und Knethöhe ca. 1 bis 5 kN / cm /119/.

Diese Linienlasten liegen in vergleichbarer Größenordnung wie beim Niedrigtemperaturverfahren (NT) (K-Wert-Unterschied wird durch Gleitmittelunterschied kompensiert).

Experimentelle Untersuchungen /117, 119/ zeigen für Spaltlast und Drehmoment einer Kalandranlage vereinfacht folgende Ergebnisse:

Die Spaltlast nimmt mit der Erhöhung der Walzengeschwindigkeit, der Knethöhe und des Walzendurchmessers zu. Sie fällt stark bei Erhöhung der Spaltweite, der Walzentemperatur und der Friktion.

Es ergibt sich eine qualitative Übereinstimmung dieser Erkenntnisse zur Gleichung von Ardichvili /120/:

$$P \approx 2 \cdot \eta \cdot b \cdot v \cdot R \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{S} \right) \quad (\text{A1.1})$$

P ... Spaltlast	[N/mm]	η ... Viskosität	[Pa*sec]
v ... Geschwindigkeit	[mm/s]	b ... Folienbreite	[mm]
R ... Radius	[mm]	d ... Spaltweite	[mm]
S ... Knethöhe	[mm]		

Das Drehmoment nimmt mit der Erhöhung der Walzengeschwindigkeit, der Knethöhe und der Friktion zu. Es fällt stark bei der Erhöhung der Spaltweite und der Walzentemperatur.

Aus dem Drehmoment lässt sich die spezifische Knetarbeit G im Spalt abschätzen gemäß:

$$G = \frac{M \cdot v}{Q \cdot R} \quad (\text{A1.2})$$

M ... Drehmoment

Q ... Durchsatz

v ... Walzengeschwindigkeit

R ... Walzenradius

Daraus folgt ein starker Abfall der Knetarbeit mit zunehmender Spaltweite, ein geringerer bei zunehmender Walzentemperatur.

Die Knetarbeit nimmt zu mit zunehmender Geschwindigkeit, Knethöhe oder Friktion.

Die Knettemperatur steigt mit der Erhöhung der Knethöhe, der Walzengeschwindigkeit, der Walzentemperatur und dem Walzenradius. Sie fällt mit der Erhöhung der Spaltweite. Die Übereinstimmung einfacher Modelle in Theorie und Praxis ist unzureichend. Hier treten Unzulänglichkeiten der Spaltmodelle auf, welche die Wirbelvorgänge im Knet nicht voll berücksichtigen.

Konfektionierung

Nachbehandlung: Der Folienabzug und die Kühlwalzen übernehmen die Führung und Fixierung der Folienbahn zum Abkühlen aus dem plastischen in den elastischen Bereich bis zur vollständigen Verfestigung bei Raumtemperatur.

Die PVC-Folie befindet sich mit ca. 220°C zum Zeitpunkt der Übernahme an der ersten Abzugswalze (erhöhte Friktion zum Einstellen der notwendigen Abzugskraft des Fells) im thermoplastischen Zustand. Die Qualitätsanforderungen wie Maßänderung, Oberflächengüte und Dickentoleranz sollten an diesem Verfahrenspunkt trotz der hohen Verfahrensempfindlichkeit (Abnahme des Fells von Kalanders- zu Abzugswalze über eine Freifläche von ca. 6 mm in idealem Winkel von 90°) möglichst wenig beeinflusst werden.

Entscheidend für die Qualität der Folien ist die Abkühlung im thermoelastischen Bereich. Die untere Grenze des thermoelastischen Bereichs (ca. 80°C) stellt die Glas- bzw. Verfestigungstemperatur des polymeren Materials dar. Unterhalb dieser Temperatur ist die Folienbahn ausreichend verfestigt und unempfindlich für qualitätsbeeinträchtigende Faktoren (falsche Friktionen oder Temperaturführung sowie Oberflächenrauheiten der Walzensysteme).

Um innere Spannungen beim Abkühlen der Folie weitestgehend ausgleichen zu können, ist die gesamte Kalandernachfolge in mehrere Antriebs- und Temperiereinheiten aufgeteilt. Diese arbeiten unabhängig voneinander mit konstruktiv umgesetzten kleinstmöglichen Abweichungen in Antriebsleistung sowie einer minimalen Temperaturabweichung über die Walzenbreite (ca. +/- 1K).

<u>Konstruktiv vorgegebene Parameter:</u>		<u>Verfahrenstechnische Parameter:</u>
• Anzahl der Walzen (durch Geschwindigkeit oder weitere Verstreckung vorgegeben) • Durchmesser der Walzen • Abstand der Abzugswalzen zueinander • Abstand zur Kalandrierwalze • Oberfläche der Abzugswalzen	Abzugsvorrichtung an einem L-Kalender	• Temperaturregime aller Walzen • Geschwindigkeitsprogramm • Abstand zur Kalandrierwalze • Eingangstemperatur der Folie • Temperaturverteilung über die Folienbreite
<u>Ausgangsgrößen:</u>		
	• Temperaturprofil der Folienbahn • Dicke der Folienbahn • Dickenprofil der Folienbahn • Maßänderung bei Wiedererwärmung (innere Spannungen) • Oberflächenstruktur (durch Prägung oder raue Abzugswalzen)	

Tab. A1-2: beispielhafte konstruktive und verfahrenstechnische Einflüsse in der Kalandernachfolge

Folienkonfektionierung: Bei der nachfolgenden Folienkonfektionierung werden die endgültigen Abmaße der kalandrierten Folienbahn eingestellt. Diese rein mechanische Formatierung wird bestimmt durch

- den Abstand und die Anzahl der Schneidmesser,
- der Genauigkeit der Messerverstellung,
- die Schärfe der Rund- und Klingenmesser (Schnittkante).

Ausgangsgrößen der Bahnkonfektionierung sind die Endbreite der Folienbahn in einer oder mehreren Bahnen sowie die Schnittgüte.

Bahnaufwicklung und Palettierung: In modernen Anlagen integrierte Wendewickler arbeiten mit Mess- und Regeleinrichtungen für die Einhaltung einer vorwählbaren Aufwickelart. Diese sind eine Aufwicklung mit konstanter Bahnspannung oder mit einer mit zunehmendem Wickeldurchmesser fallender Zugkraft.

Vorgegebene Parameter sind:

- der Durchmesser der Wickelhülse (Rollenneigung nach dem Relaxationszeitraum),
- die Geschwindigkeit der Klemm- und Wickelwalzen,
- die Wickelspannung.

Ausgangsgrößen des Systems zeigen sich in:

- der Bahnlänge der Folienrolle in Verbindung mit Flächengewicht und Dicke der Folie,
- der Wickelhärte (verantwortlich für leichte Abwicklung und gegen Teleskopieren in der Nachverarbeitung),
- dem Profil der Wicklung (verursacht durch Dickenabweichungen im Querprofil),

- der statischen Aufladung der Folienbahn.

Der Querschneider stellt die Länge der Formate und die Anzahl der geschnittenen Bögen und somit das Gewicht der Paletten ein.

A2. Rohstoffe

Hauptbestandteil einer PVC-U-Folienrezeptur ist das PVC als Homopolymer und Copolymer.

Homopolymere: sind entsprechend ihrer Herstellung bezeichnet in M-, S- und E-PVC. Für die Herstellung von PVC-U-Folien werden hauptsächlich S-PVC-Typen mit K-Wert von 57 bis 63 rein oder in Abmischung mit M-PVC eingesetzt. Zugaben von 5 bis 20% E-PVC mit K-Wert 60 sind wegen der besseren Lauffähigkeit am Kalandrierer, der Verringerung von Belägen an den Kalandrierwalzen und der geringeren elektrostatischen Aufladbarkeit der Folie üblich.

Für Weichfolien wird häufig PVC mit K-Wert 70 eingesetzt. Bei PVC-U-Folien nach dem Luvithermverfahren werden meist K-Werte von 75 – 80 verwendet.

E-PVC ermöglicht eine erhöhte Feuchtigkeitsaufnahme bei Kontakt mit heißem Wasser (Pasteurisierbarkeit, Trübung). S-PVC führt wegen der Suspensionshilfsmittel zu einer stärkeren Trübung, die anders als bei M-PVC weniger reversibel ist.

Ein geringerer K-Wert ergibt ein gelierfreudiges und fließfähigeres Gelat, das Streckverhalten ist allerdings ungünstiger, die Schlagzähigkeit sinkt /33, 121/.

Charakteristische Eigenschaften der eingesetzten PVC-Typen soll Tabelle A1-3 zeigen /121/:

	Vorteile	Nachteile
M-PVC	• frei von Nebenprodukten • geringe Wasseraufnahme • vorzügliche elektr. Isolierwirkung • gut für klare und transparente Folien	• anfällig gegen Licht • anfällig bei thermischer Belastung und Ozon • für CaZn-Stabilisierung weniger geeignet
S-PVC	• ähnlich M-PVC, allerdings mit Nebenprodukten wie Suspensionshilfsmittel • stippenärmer als M-PVC und bessere Folienoptik • Klebneigung höher als bei M-PVC	• weniger wärmestabil als M-PVC im Ko-Knetter • Belagsbildung • Verbrennung im Ko-Knetter je nach Rohstoffqualität
E-PVC	• Kalandrierbarkeit verbessert • Elektrostatische Aufladung verringert (Emulgatorgehalt)	• schlechte Bedruckbarkeit • hohe Wasseraufnahme durch Emulgator • Verfärbung bei CaZn-Stabilisierung

Tab. A1-3: charakteristische Eigenschaften von PVC-Typen

Copolymere: Die Forderung nach einem leicht gelierbaren PVC mit guter Oberflächenqualität bei hohem Ausstoß führt zu weiteren Rohstoffprodukten, die durch Copolymerisation eigenschaftsoptimiert werden.

Beispielhafte Eigenschaften zeigt Tabelle A1-4:

Fließfähigkeit	Vinylchlorid-Vinylacetat-Copolymere (ca. 10% PVAc)	
	• Verbesserung des Fließ- und Streckverhaltens • Tiefziehverhalten	• geringere Thermostabilität • Versprödung • stärkere Wasseraufnahme und Trübung
Zähigkeit	E-PVC mit Polybutadien-Acrylnitril (ca. 7% Anteil)	
	• Erhöhung der Zähigkeit	
Witterungsstabilität	Acrylathaltige Abmischungen (ca. 40%)	
	• Verbesserung der Witterungsstabilität	

Tab. A1-4: Modifizierungsmöglichkeiten für Beispieleigenschaften

Gleitmittel:

Für die Verarbeitung von PVC werden unterschiedliche Gleitmittel eingesetzt. Sie wirken einzeln oder als System der inneren und äußeren Gleitmittel.

Ihr chemischer Aufbau ist je nach Hersteller verschieden. So wird meist ein monomerer Molekülaufbau verwendet, vornehmlich Ester oder Amide aliphatischer Fettsäuren mit Kettenlängen > 12 /122-124/.

- Polare Gruppen erhöhen die Verträglichkeit mit PVC und damit die innere Wirkung des Gleitmittels.
- Lange Ketten erhöhen die Außengleitwirkung.
- Carbonsäuren wirken als Trennmittel wegen ihrer Benetzung von Metalloberflächen (Stearinsäure).
- Freie OH-Gruppen (z. B. bei Glycerin-mono- oder diestern) erhöhen die Wirkung des Sn-Stabilisators.

Innerliche und äußerliche Wirkkomponenten können in einem Gleitmittel mehr oder weniger vereint sein.

Alle Wachse sind kristallin mit Schmelzwärmen zwischen 11 und 260 J/g, die Kristallinität ist im Anlieferungszustand meist höher als nach einem zweiten Aufheizen /125, 126/.

Funktionen und Nebenwirkungen üblicher eingesetzter Gleitmittel werden beispielhaft in /123/ beschrieben und sind verallgemeinert dargestellt in Tabelle A1-5:

<i>Funktion</i>	• Gleitmittelwirkung/Trennwirkung Metall–Schmelze bzw. Metall–Folie • Verringerung der Schererwärmung • Vergleichmäßigung des Teilchen- bzw. Schmelzefflusses • Beeinflussung von Glanz- und Reibungskoeffizient der Folie
<i>Nebenwirkung</i>	• Beeinflussung (Verlangsamung) des Gelierprozesses • Beeinflussung der Gebrauchseigenschaften wie Bedruckbarkeit, Metallisierung oder Siegeln • Dampfbildung, die mit abnehmender Kettenlänge (oder Verringerung des Molekulargewichtes) steigt • chemische Reaktionen

Tab. A1-5: Funktion und Nebenwirkungen von Gleitmitteln

Die Einsatzmengen des Gleitmittels liegen beim HT-Verfahren bei ca. 0,3 bis 0,8%. Möglich sind weiterhin Abmischungen von 2–3 verschiedenen Typen mit einem resultierenden Gesamtgehalt bis zu 1,5%.

Speziell bei Dünnschichten liegt der Gleitmittelgehalt tendenziell höher als bei Dickschichten. Bei Dünnschichten werden mehr äußere Gleitmittel verwendet, bei Dickschichten mehr innere Gleitmittel. Mit den eingesetzten Gleitmittelmengen werden meist die Löslichkeitsgrenzen überschritten. Damit erfolgt eine Anreicherung des Gleitmittels in der Grenzschicht der Schichtenoberfläche.

Gleitmittel, welche am Kalandrier belagsfrei (ohne Auswanderung) verarbeitbar sind, können bei späterer Weiterverarbeitung zu Belagsbildung führen. Da Gleitmittel an der Oberfläche Farbbildung, Metallhaftung oder Siegelnahtfestigkeit reduzieren können, ist eine ständige Reduzierung und Optimierung eingesetzter Gleitmittel nötig. Emulgatoren, Stabilisatoren oder Verarbeitungshilfsmittel können eine zusätzliche Gleitmittelwirkung haben.

Stabilisatoren:

Stabilisatoren dienen der Verhinderung der thermischen Zersetzung von PVC. Verarbeitungstechnische Nebenwirkungen sind:

- Gleitmittelwirkung bei der Verarbeitung,
- Belagsbildung an Walzen oder auf der Folie,
- chemische Reaktionen,
- Geruchsbildung oder Geschmacksveränderungen.

Zum chemischen Aufbau und der Wirkungsweise allgemein eingesetzter Stabilisatoren geben Kopsch, Domininghaus oder Adeler einen Überblick /6, 33, 127/.

Verarbeitungs-Hilfsmittel:

Sie werden eingesetzt zum Beschleunigen des Geliervorganges, der Homogenisierung der Schmelze sowie der Verbesserung der rheologischen Eigenschaften (erhöhte Schmelzefestigkeit und Dehnbarkeit) der Schmelze. Weitere Wirkungen sind die eines Gleit- bzw. Trennmittels, eine Beeinflussung der Fließlinienintensität oder ein erhöhter Glanz sowie

eine Verringerung lokaler Oberflächendefekte. Eingesetzte Verarbeitungs-Hilfsmittel sind PMMA (gut zur Beschleunigung der Plastifizierung, gut verträglich mit PVC, keine Gleitmittelwirkung), MMA/Styrol-Copolymerisate (geringer Einfluss auf die Plastifizierung, gute Trennwirkung zwischen Metall und Schmelze analog eines äußeren Gleitmittels), PMMA/BA-Copolymere (ebenfalls gute Trennwirkung).

Die üblichen Einsatzmengen liegen zwischen 0,2 und 3 %.

Schlagzäh-Modifier:

Sie dienen der Erhöhung der Schlagzähigkeit der Folie. Ihre Wirkungen lassen sich vereinfacht beschreiben in:

- einer Beschleunigung des Gelierprozesses,
- der Beeinflussung der Transparenz der Folie (Trübung),
- der Beeinflussung der Farbe der Folie,
- der Beeinflussung des Weißbruches und
- einer Verringerung der Fließlinienintensität.

Allgemein beruht die Wirkung der Schlagzäh-Modifier auf der elastischen Modifier-Phase in der PVC-Matrix, welche die Schlagenergie möglichst ohne innere Rissbildung aufnehmen soll. Elastomerart und Menge sowie der Teilchendurchmesser bestimmen weitgehend die Schlagzähigkeitseigenschaften.

Die Unterschiede des Brechungsindex von Elastomerphase und PVC rufen eine Lichtstreuung und damit eine höhere Trübung hervor. Zur Verringerung dieses Unterschiedes werden zusätzlich andere Gruppen in den Modifier einpolymerisiert, die gleichzeitig die Verträglichkeit mit dem PVC beeinflussen.

Bei Einsatz von geringen Konzentrationen (um 1-3%) wirken Modifier wesentlich als Gelierhilfen, die Zähigkeit der Folie ist geringfügig verbessert. Bei Konzentrationen von 5 – 10% erhöhen sie die Zähigkeit merklich. Wird jedoch eine typenabhängige Sättigung überschritten, haben die Modifier keinen oder einen negativen Einfluss auf die erreichbare Schlagzähigkeit der Folie.

Eine optimale Zähigkeit hängt bei netzwerkbildenden Modifiern im Wesentlichen von den Verfahrensbedingungen (Temperatur, Scherung in Gelieraggregat und Materialknet) ab /128–130/.

Eine Eigenschaftsbeschreibung zeigt die verschiedenen Wirkungen auf PVC-U-Folien:

MBS (MMA, Styrol, Butadien)	<u>Aufbau:</u> Ker-Schale-Aufbau mit elastischem Butadienkern und einer PMMA- (Verträglichkeit mit PVC-Matrix) und Styrolschale (Anpassung an Brechungsindex) • breiter Anwendungsbereich bei großer Typenbreite • einsetzbar für transparente Anwendungen, aber lichtempfindlich
ABS (Acrylnitril, Butadien, Styrol)	<u>Aufbau:</u> Elastomerphase durch Butadien. Acrylnitril erhöht die Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit. • licht- und witterungsstabil, schwerentflammbar • nicht für transparente Folien einsetzbar
Acrylat-Schlagzähmacher	<u>Aufbau:</u> Elastomerphase ist Poly-butyl-acrylat, teilweise mit S-PVC als Grundpolymeres copolymerisiert • für opaque Folien nutzbar
CPE (chloriertes PE)	<u>Aufbau:</u> Netzwerkbildender Schlagzähmacher zum Teil auch in Abmischung mit MBS für bessere Lichtempfindlichkeit • gute Kälteschlagzähigkeit sowie hohes Aufnahmevermögen von Füllstoffen für schwerentflammbare Folien • auch für transparente Folien geeignet
EVA (Ethylen Vinylacetat)	<u>Aufbau:</u> netzwerkbildend sowie kugelförmiger Aufbau in Kombination mit CPE- und Acrylateigenschaften • licht- und witterungsstabil und schwerentflammbar

Tab. A1-6: Modifier für PVC-U

Wärmestand-Modifier:

Ihre Funktion liegt in der Verbesserung des Wärmestandes der Folie. Eingesetzt werden Kombinationen aus SAN/ABS (Styrol, Acrylnitril und Butadien) oder aliphatische Polyimide. Bestimmte Legierungen aus SAN/ABS können in Konzentrationen von 10 bis 40% den Wärmestand einer Folie erhöhen. Die Erhöhung ist mit 1 K pro 3 – 4% des Modifiers relativ gering. Abmischungen aus PVC und PC-ABS-Legierungen zeigen beispielsweise ein gutes Kalandrierverhalten, erhöhen jedoch nur geringfügig den Wärmestand und verschlechtern das Tiefziehverhalten.

Emulgatoren und Antistatika:

Sie dienen der Verringerung des Oberflächenwiderstandes und der Verbesserung des Entstapelungsverhaltens. Die rheologische Wirkung ist ähnlich der von Gleitmitteln (Erniedrigung der Spaltlast, Verringerung der Abzugskraft), teilweise können diese Stoffe das eingesetzte Gleitmittel direkt ersetzen. Emulgatoren und Antistatika können zur Bildung von Belägen auf den Walzen führen, welche nach einem Umschlag auf die Folie zu inhomogener Verteilung des Antistatikums und des Emulgators auf der Folienoberfläche beitragen. Der

chemische Aufbau ist tensid – ähnlich einer langen hydrophilen Kette und einem hydrophobem Kopf (Na-Alkylsulfonat, Na-Alkylarylsulfonat, Na-Alkansulfonat).

Die weiteren Wirkungen werden zusammengefasst dargestellt in /6, 33, 131–133/:

- die Gleitmittelwirkung erfolgt in der Schmelze beim Gelieren,
- Belagsbildung (Plate out) an Walzen und auf der Folie,
- Bläschenbildung und Oberflächenaufreißen,
- Herabsetzung der Thermostabilität des PVC,
- Beeinflussung der Bedruckbarkeit (Offset-, Flexodruck),
- Verschlechterung der Oberfläche besonders bei dicken Folien,
- Erhöhung der Trübung der Folie,
- schmierigere Oberflächen bei höheren Konzentrationen mit einer Verschlechterung der Verschweißbarkeit.

Eingesetzte Konzentrationen liegen zwischen 0,2 und 2%. Bei transparenten Folien liegt die sinnvolle Grenze zwischen 0,2 und 0,5%, da höhere Konzentrationen auch bei dünnen Folien die Trübung sehr stark erhöhen können (Versuche zeigten eine Zunahme der Trübung von 5% auf 70% bei Erhöhung einer Emulgator K30-Zugabe von 0,2 auf 2%) /132/.

Der Einsatz von Emulgatoren ist speziell im Hinblick auf die Verbesserung des Entstapelungsverhaltens von Vorteil. Ihre gegenteilige Wirkung, die Verschlechterung der Bedruckbarkeit, fordert jedoch geringste Einsatzmengen.

Emulgatoren sind grenzflächenaktiv und teilweise stark hygroskopisch. Dadurch kann speziell bei Lagerung in hoher Feuchte eine Bläschenbildung an der Oberfläche der Folien (speziell dicker Folien) entstehen. Bei Lagerung in Wasser oder Wasserdampf kommt es zu einer starken Wasseraufnahme und Trübung.

Füllstoffe und Pigmente:

Ihre Funktion ist die Beeinflussung spezieller Eigenschaften wie der Farbe, der Lichtdurchlässigkeit, einer Antiblockwirkung, der Mattierung, dem Flammenschutz, dem Bewitterungsverhalten und der biologischen Abbaubarkeit sowie der Verringerung der Rezepturkosten. Nachhaltig werden jedoch die mechanischen Folieneigenschaften und die optischen Eigenschaften (Oberflächenqualität) verändert.

Zu einer Rezeptur werden oft anorganische Füllstoffe oder Pigmente zugegeben. Ihre Definition wird in der Literatur angegeben mit:

- einem Brechungsindex der Pigmente $> 1,7$,
- einem Brechungsindex der Füllstoffe $< 1,7$.

Ihre Zusätze dienen hauptsächlich der Einstellung bestimmter Folieneigenschaften, ihr Einsatz verschlechtert allgemein den Maschinenlauf. Die eingesetzte Konzentration hängt von der geforderten Funktion des Füllstoffes oder des Pigmentes ab. Derartige Funktionen können sein:

- Antiblock-Wirkung (kleine Mengen Talkum),
- Mattierung (Kreide bei opaken Folien bis zu 15%),
- Lichtdurchlässigkeit (TiO_2 -Konzentrationen zwischen 0,1 und 20%),
- Brandverhalten (allg. Antimontrioxid für flammhemmende Folien von 3 bis 10%),
- biologische Abbaubarkeit (Versuche mit Maisstärke oder Cellulose – jedoch bislang wenig Erfolge).

Als Füllstoff werden oft verwendet:

- Calciumcarbonat,
- Calcium-Magnesium-Carbonat (Dolomit),
- Magnesiumsilikat (Talkum),
- Aluminiumsilikat (Kaolin) oder
- Bariumsulfat (Schwerspat).

Das Kalandrierverhalten ist bei feinkörnigen Füllstoffen ($\varnothing < 2\mu\text{m}$) bis zu Konzentrationen von 50% gut, es verschlechtert sich bei gröberen Füllstoffen ($\varnothing 3\text{--}5\mu\text{m}$). Folgen können ein schlecht rollender Knet, bei Temperaturerhöhung Kleben an der Kalandrierwalze oder Belagsbildung sein. Die Folienqualität wird oft negativ beeinflusst durch Füllstoffstippen, Aufbrüche, Mattstreifen und Löcher /134/.

A3. Rheologische Untersuchungen zum Kalandrieren

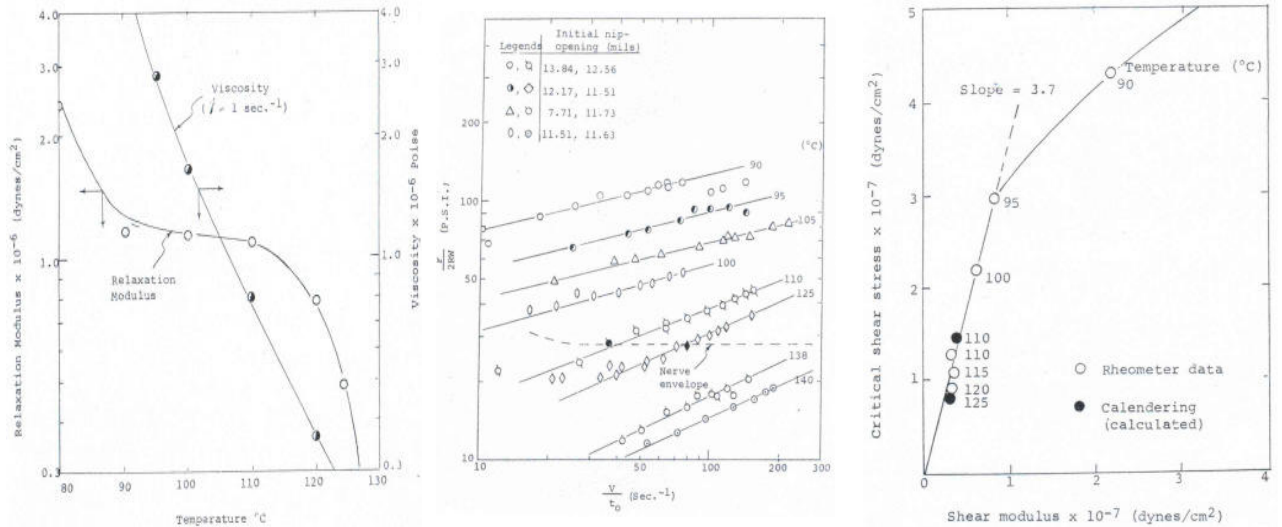


Abb. A1-1: Chong et al. – Fließkurve, experimentelle Werte [83]

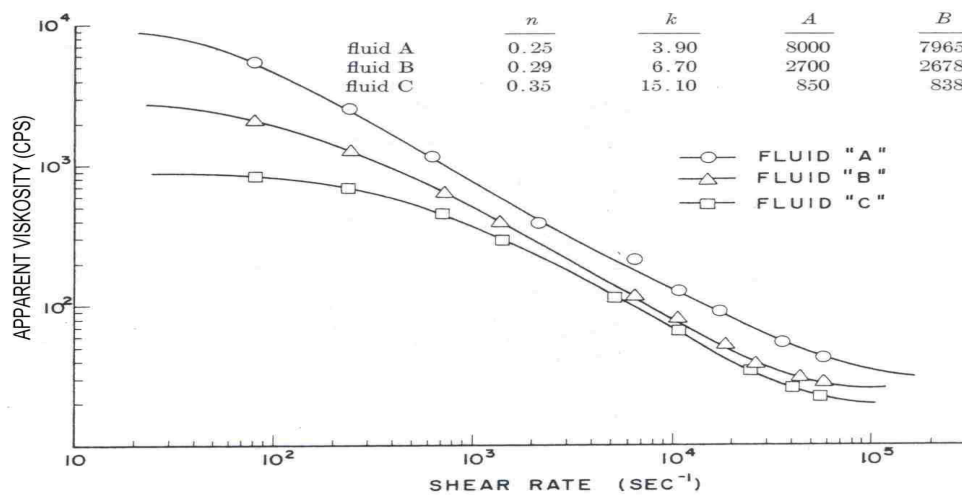


Abb. A1-2: Alston et al. – Fließkurve, berechnete Konstanten [88]

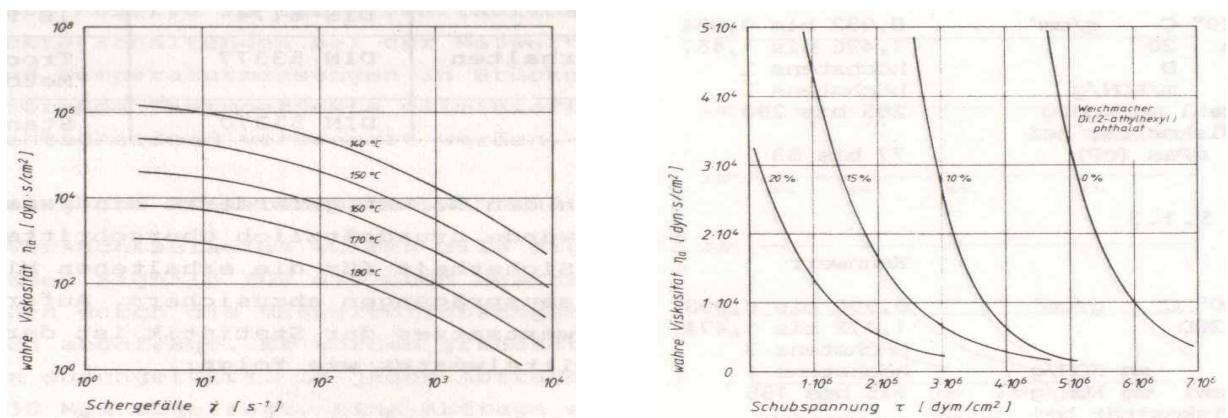


Abb. A1-3: Hofbauer /23/ (Literaturwerte aus Stühlen, Meier: Weichmacher für Kunststoffe am Beispiel PVC, Kunststoffrundschaу 1972/6/10)

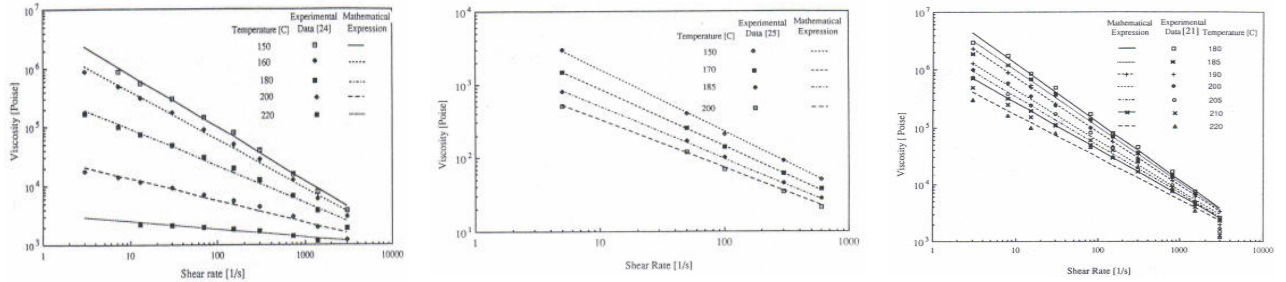


Abb. A1-4: Tseng /67/ Messungen Kapillarrheometer

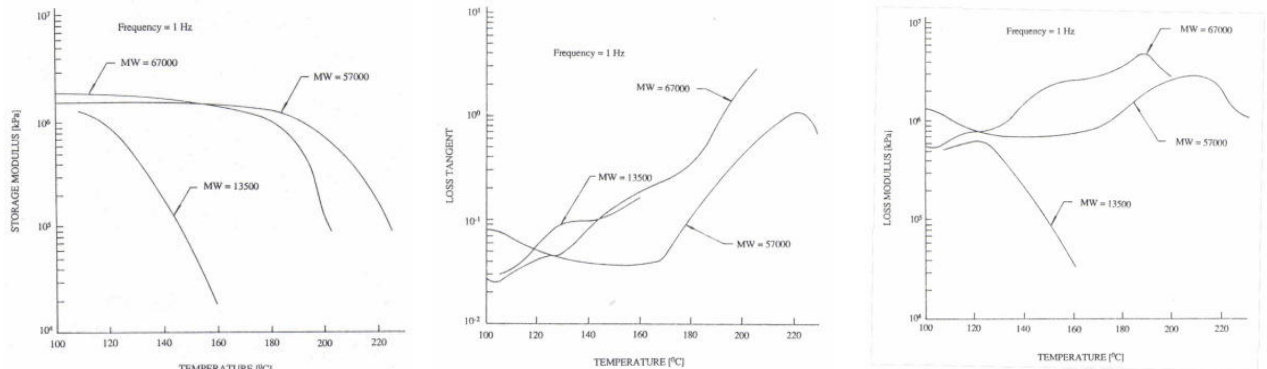


Abb. A1-5: Tseng /67/: Messungen Weißenberg Rheogoniometer

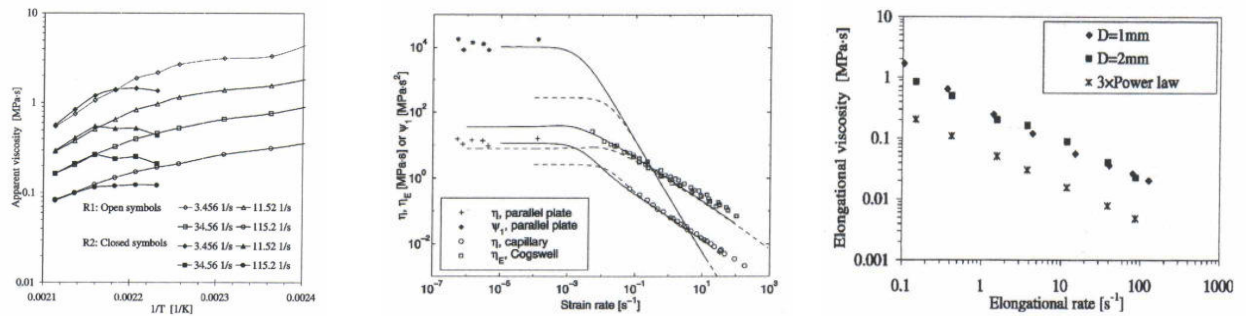


Abb. A1-6: Glomsaker /72/: Untersuchungen an S-PVC; Kapillarrheometer (Göttfert)

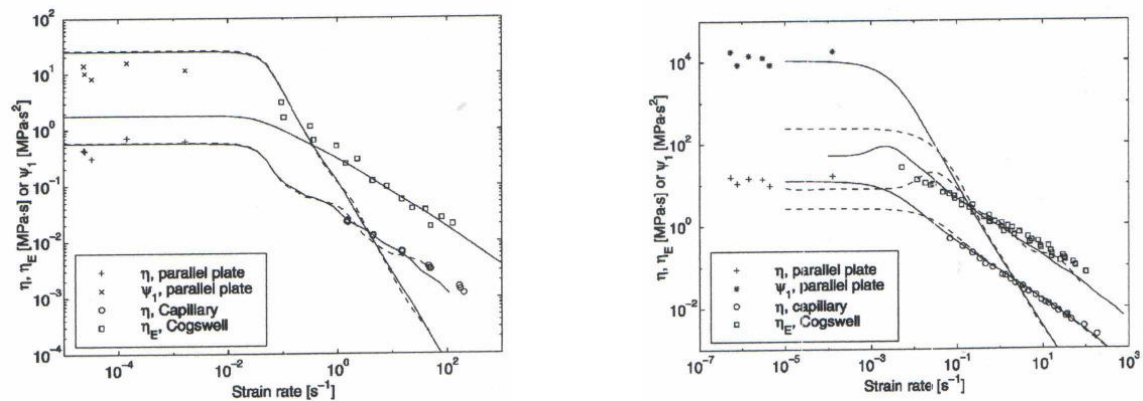


Abb. A1-7: Glomsaker /72/: Untersuchungen an S-PVC; Rotationsviskosimeter (Physika) (li.): PTT-Modell (re.): KBKZ-Modell

Alonso - Verwendete Modelle / Annahmen:

Aufbauend auf früheren Untersuchungen und Veröffentlichungen div. Autoren wird zur Berechnung der Prozessviskosität μ_{proc} unter Annahme von gleicher Druck- und Geschwindigkeitsverteilung im betrachteten Antragswerk die Schmierfilmtheorie angewandt.

$$\frac{dP}{dx} = \mu \cdot \frac{\delta^2 v_x}{\delta y^2} \quad (\text{A2.1})$$

P ... Druck v_x ... Geschwindigkeit in Hauptrichtung μ ... Viskosität γ ... Schergeschwindigkeit

$$\mu_{pl} = m \cdot \gamma^{n-1} + \eta_{\infty} \quad (\text{A2.2})$$

μ_{pl} ... Viskosität (Potenzgesetz) m ... Konsistenzfaktor n ... Fließindex
 η_{∞} ... Grenzviskosität bei unendlicher Schergeschwindigkeit γ ... Schergeschwindigkeit

Das bei geringen Scherraten nahezu newtonsche Materialverhalten der Suspensionen veranlasst den Autor, die numerischen Simulationen mit dem Cross Modell ohne Betrachtung der elastischen Eigenschaften durchzuführen. Er geht hierbei von einer vernachlässigbaren und im realen Prozess selten erreichbaren Scherbeanspruchung aus.

$$\mu_{Cr} = \eta_{\infty} + \frac{[\eta_0 - \eta_{\infty}]}{1 + (t \cdot \gamma)^p} \quad (\text{A2.3})$$

μ_{Cr} ... Viskosität (Cross Modell) t ... Zeit p ... Entzähungsfaktor
 η_{∞} ... Grenzviskosität bei unendlicher Schergeschwindigkeit η_0 ... Nullviskosität γ ... Schergeschwindigkeit

Rheologische Messungen

Die Messungen wurden an einem Rheometrics RFX II Rheometer durchgeführt. Unter einem dem Beschichtungsprozess angepassten Zeitregime wurden Scherraten von 80 s^{-1} für 30 sec. und für 2 sec. 1000 s^{-1} in verschiedene Rezepturen eingebracht und zum Messende mit $0,05 \text{ s}^{-1}$ zur Simulation einer Relaxation auf der benetzten Transferrolle beendet (Abb. A1-8).

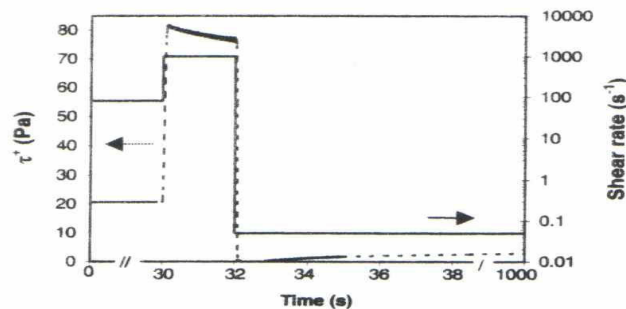


Abb. A1-8: Alonso /75/: Zeitregime der Scherbeanspruchung (Rheometer) als Prozesssimulation

Abbildung A1-9 zeigt Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen an verschiedenen Rezepturen.

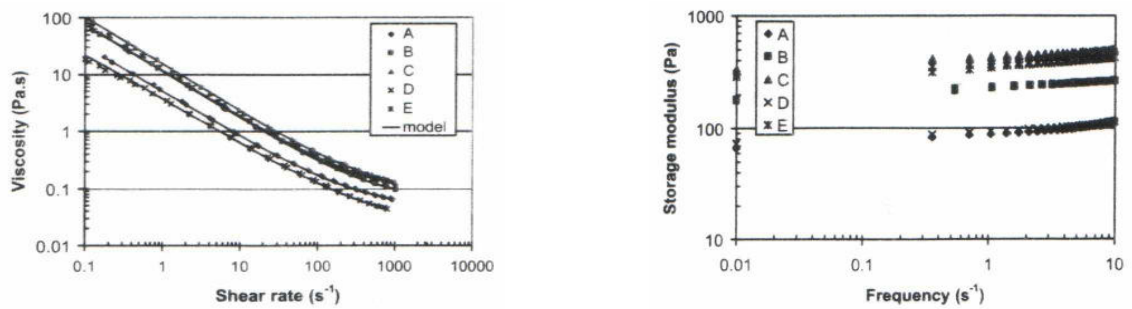


Abb. A1-9: Alonso et al. – /76/: erhaltene Materialfunktionen, li.: steady state, re.: oszillierende Beanspruchung (Rheometrics RFX II)

A4. Variablendefinition

Variable	Einheit	Wert	Ausgangsdaten
D	mm	700	Durchmesser der Hauptwalze
D _{SW}	mm	57	Durchmesser der Zusatzwalze
W	mm	1800	Länge der Arbeitsbreite der Walzen
H ₀	mm	8	Spalt zwischen den glatten Oberflächen der Walzen
V ₁	m/min	5 - 40	lineare Geschwindigkeit der Hauptwalze
V ₂	m/min	5 - 40	lineare Geschwindigkeit auf dem Schneidwalzensteg
T	°C	170 - 210	Verarbeitungstemperatur
T ₀	°C	170	Bezugstemperatur im Verarbeitungstemperaturbereich
μ ₀	kPa*sn	200	Konsistenzfaktor des Materials bei der Temperatur T ₀
n		0.15 - 0.33	Fließindex des Materials
b	1/K	0.04	Temperaturkoeffizient der Viskosität des Polymers
H _{FL}	mm	6	Steghöhe der Wendel
e _{FL}	mm	0.3	Breite an der Oberseite der Stege (Spitze)
W _{FL}	mm	7	Breite an der Unterseite der Stege (Walzenoberfläche)
fi _{FL}	°	7.9	Gangwinkel der Schneidwendel
H _{in}	mm	1 - 5	Dicke der Materialschicht, die in den Spalt einläuft

Variablen Berechnungsprogramm CUT

X	mm	Variable, Längskoordinate im Gebiet des Kontaktes der Wendel mit dem Polymer
H	mm	Laufhöhe des Abstandes zwischen Steg und Hauptwalze
τ_{XY}	kPa	Scherspannung in Längsrichtung der Wendel
τ_{YZ}	kPa	Scherspannung in senkrechter Richtung zur Wendel
$\dot{\gamma}_{XY}$	1/s	Schergeschwindigkeit in der Polymerströmung in den gleichen Richtungen in der Nähe der Kontaktoberfläche mit der Wendel
$\dot{\gamma}_{YZ}$	1/s	Schergeschwindigkeit in der Polymerströmung in den gleichen Richtungen in der Nähe der Kontaktoberfläche mit der Wendel
$\dot{\epsilon}_Y$	1/s	Deformationsgeschwindigkeit des Zusammendrückens der Schicht durch die Fläche des Steges, der in die Schicht drückt (Schneidwendel zu Strömungsspalt H(X))
α	°	Anstiegswinkel der Schneidwendel / Schraubenlinie
t	sec	Zeit
v _x	m/min	die mittlere Geschwindigkeit der Schleppströmung in Richtung der Wendel
u _r ; u _l	m/min	lineare Drehgeschwindigkeit in der Höhe der Wendel der Hilfswalze und der Oberfläche der Grundwalze
τ_1 ; τ_2	kPa	Grenzschubspannung in Längsrichtung des Spaltes
σ_Y	kPa	Normalspannung
N	MWatt/m	Leistung der Deformation pro Einheitsvolumen
N _V	Watt	akkumulierte Leistung der Oberflächenkräfte (beidseitig) einer Wendel in der Kontaktzone

weitere Variablen Berechnungsprogramm CUT2

N _Y	Watt/m ³	Leistung der Normalkräfte pro Einheitsvolumen
N _{XY}	Watt/m ³	Leistung der Scherkräfte pro Einheitsvolumen
N _{Y V}	Watt	Gesamtleistung der Normalkräfte
N _{XY V}	Watt	Gesamtleistung der Scherkräfte
τ_{XY}	kPa	Grenzscherspannung in Längsrichtung des Spaltes
P _Y	Newton	Normalkraft

Tab. A1-7: Parameter, Hilfs- und Ergebnisvariablen der Programme CUT1 und CUT2

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Radusch für die Übernahme der Betreuung dieser Arbeit und seine Unterstützung und Hilfestellung bei den gemeinsamen Diskussionen und seine Vorschläge für die Umsetzung meines Vorhabens über den gesamten Zeitraum dieser Arbeit. Auch möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Professur Kunststofftechnik und des Zentrums für Ingenieurwissenschaften für die Hilfe bei der Durchführung der Messungen und Präsentationen bedanken.

Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schöppner für die Übernahme des externen Gutachtens zu dieser Arbeit.

Ich danke auch meinen Kollegen der Klöckner Pentaplast GmbH & Co. KG in Montabaur, die mir über einen langen Zeitraum hilfreich bei Fragen und Problemen zur Seite gestanden haben. Prof. Dr.-Ing. Christian Kohlert danke ich für die tatkräftige Unterstützung und die zahlreichen Diskussionen sowie für die Förderung dieser Arbeit.

Herrn Dr.-Ing. Adolf M. Voskresenskij von der Technischen Universität St. Petersburg danke ich für die Hilfe bei der programmtechnischen Umsetzung der Modellierung.

Stefan Müller, Tobias Oppen und Michael Otten danke ich für die fachlichen und wertvollen Diskussionen und ihr Verständnis für den mit dieser Arbeit verbundenen Aufwand.

Ebenfalls danke ich Wilhelm Arnold, Wilhelm Hammer und Dr. Günther Deiringer des Werkes Gendorf für die Unterstützung während der Versuchsdurchführungen.

Des Weiteren danke ich Dr.-Ing. Lorenz Diener der MTD GmbH und Norbert Niewerth der OCS GmbH für die Hilfe bei der Gestaltung und der messtechnischen Umsetzung des Versuchsstandes sowie Franz Schwickert für die Realisierung des mechanischen Teils und der Fertigung der benötigten Elemente.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich in der ganzen Zeit bei der Fertigstellung dieser Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Eidesstattliche Erklärung:

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt habe und keine anderen als die angegebenen und in Zitaten kenntlich gemachten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Diese Dissertation wurde keiner anderen Universität oder Hochschule vorgelegt und verletzt in keiner Weise Rechte Dritter.

Halle, den 21.09.2010

Andreas Schnabel

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Andreas Schnabel
geboren am: 09. November 1970
Geburtsort: Altenburg
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: ledig

Schul Ausbildung: 09/1977 – 08/1987 Besuch der Polytechnischen Oberschule in Halle-Neustadt, erw. Realschulabschluss
09/1987 – 08/1990 Lehre an der Betriebsberufsschule der BUNA AG in Schkopau
Erlangung des Abiturs und des Facharbeiterabschlusses eines Instandhaltungsmechanikers

Wehrdienst: 09/1990 – 08/1991 Grundwehrdienst im Flugabwehrregiment 70 in Hohenmölsen

Studium: 10/1991 – 11/1996 Studium in der Fachrichtung Maschinenbau an der Technischen Universität Chemnitz-Zwickau
Vertiefungsrichtung: Kunststofftechnik
Abschluss: Dipl.-Ing.

Studienbegleitende Tätigkeiten: 09/1992 – 10/1992 Studentische Hilfskraft am FB Werkstoffwissenschaften der MLU Halle-Wittenberg
09/1993 – 10/1993 Praktikum bei der Klöckner Pentaplast GmbH
09/1994 – 02/1995 Industriepraktikum bei der Klöckner Pentaplast GmbH
11/1995 – 03/1996 Studienarbeit bei der Firma WIDOS,
Thema: Schweißen von PE-Rohren
03/1996 – 08/1996 Projektarbeit an der TU Chemnitz-Zwickau
Thema: Kleben von Metallverbindungen
06/1996 – 11/1996 Diplomarbeit bei der Klöckner Pentaplast GmbH
Thema: Regelungskonzept einer Kalandieranlage

Beruf: 11/1996 – 09/1999 Leiter des Versuchstechnikums und Verfahreningenieur bei der Klöckner Pentaplast GmbH & Co. KG / Werk Gendorf, Burgkirchen
seit 1999 Mess- und Verfahrenstechnik-Ingenieur bei der Klöckner Pentaplast GmbH & Co. KG im Stammsitz Montabaur

Berufsbegleitende Weiterbildung 09/2003 – 09/2004 Berufsbegleitendes Aufbaustudium am TWI Koblenz; Abschluss: Innovations-Manager (twi)