3 STAND DER FORSCHUNG

Die Geschichte des Kalandrierens beginnt im Jahre 1836, als eine Maschine mit dem Namen Kalander (griech. Kylindros = Zylinder, Walze; frz. calandrier = Rollen) von Chaffee patentiert wurde [14]. Die Entwicklung der Kalanderanlagen ist stark mit der Entstehung der Automobilindustrie, im 20. Jahrhundert, verbunden. Der Grund dafür sind die Forderungen nach engeren Toleranzen bei der Automobilreifenherstellung sowie größeren Produktionsgeschwindigkeiten. Im Weiteren spielt die sich rasch entwickelnde Kunststoffindustrie eine sehr wichtige Rolle, insbesondere durch die Verarbeitung sehr großer Mengen an Weich- und Hart-PVC zu Folien und Platten [3, 19].

Der Kalandrierprozess läuft wie folgt ab: dem Kalander wird eine erwärmte und fließfähige Kautschukmischung über den ersten Spalt zugeführt. Durch Passieren mehrerer sich in Förderrichtung verjüngender Spalte, die aus jeweils einem Walzenpaar gebildet werden, entsteht aus der Kautschukmasse eine flächige Kautschukbahn, die eine hochwertige Oberflächengüte aufweist. Das Strömungsfeld setzt sich im Walzenspalt aus einer Schleppestromung mit einer überlagerten Druckstromung zusammen. Die Mischung haftet an den Walzenoberflächen und wird in Richtung des engsten Spalts gefördert. Der Druck steigt innerhalb der Kautschukmasse in Förderrichtung. Kurz vor dem engsten Walzenspalt stellt sich ein Druckmaximum ein. Nach Passieren des engsten Walzenspalts löst sich die Kautschukmasse als kalandrierte Bahn oder Platte von den Walzenoberflächen ab. Vor dem Ort des Druckmaximums kommt es, aufgrund des sich in Förderrichtung einstellenden Druckgradienten, zur Rückstromung und zur Bildung eines Knets, innerhalb dessen das Strömungsfeld zirkuliert [1].

3.1 Strömungsfeld im Kalanderspalt – theoretische Arbeiten

Die ersten theoretischen Betrachtungen über die Vorgänge im Walzenspalt wurden von Archidvilli [20, 21] im Jahre 1938 basierend auf den Vereinfachungen der Schmierfilmtheorie, durchgeführt. Wegen der Annahme, dass der Ablösepunkt der kalandrierten Kautschukbahn an der engsten Stelle des Spalts liegt, ergeben sich für das Druckprofil und das Druckmaximum nur Näherungswerte.

In den 50er Jahren wurde die Theorie von Ardichvilli von Gaskell revidiert [22]. Die Annahme, dass die Folienauslaufdicke im Verhältnis zur Spaltweite immer größer als eins ist, führt zur Verbesserung der Vorhersage von Geschwindigkeitsfeldern im Kalanderspalt. Gaskell zeigt, dass das Druckmaximum und der Ablösepunkt symmetrisch zum engsten Spalt sind. Des Weiteren wird das Kalandersmodell unter Anwendung von Rechenverfahren mit bipolaren Koordinaten von Finston [23] erarbeitet. Seine Arbeit führt jedoch zu keinen wesentlichen Verbesserungen des Modells.

Im Jahre 1962 veröffentlicht McKelvey [26] ein Modell auf Basis des Gaskellschen-Modells für Newtonsches Fließen und macht den ersten Schritt für die Beschreibung des nicht-Newton'schen Fließens nach dem Fließgesetz von Ostwald-de-Waele. Das Gaskellsche-Modell wurde von Paslay [27] sowie Tokita und White [18] für strukturviskoses Fließen erweitert. Polymere zeigen neben strukturviskosem häufig auch ein viskoelastisches Fließen. Daher berichtet Chong [28] in seiner experimentell-analytischen Arbeit über Ableitungen der Kalanders Theorie mit Hilfe verschiedener Fließgesetze.

Brazinsky, Cosway, Valle, Clark Jones und Story [30] erhalten analytische Lösungen für das Strömungsfeld. Sie verwenden das Fließgesetz von Ostwald-de-Waele, um das Strömungsfeld des strukturviskosen Mediums zu beschreiben. In der Arbeit wird festgestellt, dass die Höhen kalandrierter Bahnen aus nicht-Newton'schen Flüssigkeiten von der Höhe des Eintrittsquerschnitts abhängig sind. Die Höhe der kalandrierten Bahn hängt zusätzlich vom Exponenten des Fließgesetzes ab. Weitere Autoren verwenden alternative Fließgesetze zum Beschreiben des strukturviskosen Fließverhaltens. Reher und Grader [31] berechnen das Druckfeld mit Hilfe des Herschel-Bulkley Fließgesetzes. Alston und Astill [32] beschreiben Lösungen unter Anwendung des Fließgesetzes nach Prantel-Eyring. Die Forscher berechnen die Höhe der kalandrierten Bahn in Abhängigkeit der Höhe des Eintrittsquerschnitts und verschiedener Prozessparameter. Dabei stellen sie im Gegensatz zu Brazinsky fest, dass die Höhe der kalandrierten Bahn von der Umfangsgeschwindigkeit der Walzen abhängig ist.

Seeger und Reher [38] berechnen das Drehmoment, die Antriebsleistung und den Spaltdruck in Abhängigkeit der Spalthöhe und der Umfangsgeschwindigkeit der Walzen für kreidegefüllte PVC-Mischungen. Agassant und Avenas [39] erweitern diese Berechnungen für ein nicht-isothermes Fließen und vergleichen die berechneten und gemessenen Werte. In beiden Arbeiten wird das Fließen von Polymeren mit strukturviskosem Fließverhalten nach dem Fließgesetz von Ostwald-de-Waele berechnet. Eine Zusammenfassung der bisherigen theoretischen Arbeiten zum Strömungsfeld im Kalanders für strukturviskose Fluide gibt Middleman [40].

Vlachopoulos und Hrymak [42] berechnen, basierend auf den Überlegungen von Gaskell, das Geschwindigkeits- und Druckprofil sowie die Bahndicke und das Drehmoment für ein isothermes strukturviskoses Fließen im Kalanderspalt mit und ohne Berücksichtigen der Haftung an der Walzenoberfläche. Für PVC stimmen die theoretischen und die experimentellen Ergebnisse unter der Annahme, dass keine Haftung an den Walzenoberflächen vorhanden ist, überein. Seeger, Schnabel und Reher [43] berechnen mehrdimensionale Geschwindigkeits- und Spannungsfelder im Kalanderspalt mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Ausgehend vom mathematischen Modell zur Beschreibung des Strömungsfelds im Kalanderspalt berechnen Kohlert, Seeger, Schulze und Reher [10] die dissipative Erwärmung in strukturviskosen Fluiden mit dem Fließgesetz von Ostwald-de-Waele. Die gemessenen und die berechneten Temperaturen zeigen eine gute Übereinstimmung. Das Temperatur- und Druckprofil im Kalanderspalt für ein viskoelastisches Fluid wird von Yu, Lee und Lee [44] mit dem Stoffgesetz von Maxwell berechnet. Die Autoren stellen fest, dass die Temperatur des Materials für unterschiedlich schnell rotierende Walzen viel höher ist, als beim Gleichlauf.

Die Annahme von Gaskell [22], dass die Strömung im Walzenspalt symmetrisch zur Mittelebene durch den engsten Spalt mit der Normalen senkrecht zu den Walzenachsen sei, wird von Agassant und Espy [45] revidiert. Die Autoren berechnen mit Hilfe der Finite Element Methode zwei nichtsymmetrische Wirbelgebiete. Die Ergebnisse stimmen mit experimentell gewonnenen Daten für PVC überein. Mitsoulis, Vlachopoulos und Mirza [46] berechnen ein zweidimensionales nichtisothermes Strömungsfeld im Kalanderspalt unter Berücksichtigung freier Oberfläche des Knets ohne Annahmen der Schmierfilmtheorie. Die Forscher vergleichen die Ergebnisse ihrer Berechnungen mit denen der bekannten Schmierfilmtheorie. Sie stellen fest, dass die Ergebnisse mit den bisher bekannten experimentellen Daten von Unkrüer [5] und Bourgeois [8] bezüglich der Bildung von asymmetrischen Wirbeln im Knet relativ gut übereinstimmen. Lipp [47] berechnet die 1. Normalspannungsdifferenz für das Geschwindigkeitsfeld im Kalanderspalt mit Hilfe des Maxwell-Modells. Daud [48] diskutiert die Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen der Höhe des Eintrittsquerschnitts und der Dicke der kalandrierten Bahn in Abhängigkeit der Verfahrensparameter für ein asymmetrisches Walzenpaar. Er stellt fest, dass das Verhältnis zwischen der Höhe des Eintrittsquerschnitts und der Dicke der kalandrierten Bahn eine Funktion des Verhältnisses der Walzenumfangsgeschwindigkeiten und des Fließindexes ist. Eine ausführliche Berechnung des Temperatur-, Geschwindigkeits- und Druckfeldes von Polymeren im Kalanderspalt wird von Gruber [50] durchgeführt. Um das Fließen im Kalanderspalt zu beschreiben, wird das Fließgesetz von

Vinogradov verwendet. Der Einfluss der unterschiedlichen verfahrenstechnischen Parameter auf das Strömungsfeld im Kalanderspalt wird erläutert.

Yao und Manas-Zloczower [52] berechnen das nichtisotherme Strömungsfeld mit den Vereinfachungen der Gaskellschen Theorie für strukturviskose Fluide mit Hilfe der Finite Elemente Methode, mit der Berücksichtigung der Form des Knets im Spalt zwischen zwei gegensinnig rotierenden Walzen. Klostermann und Mewes [53] berechnen mit Hilfe der Finite Elemente Methode und der Boundary Element Methode die Geschwindigkeits-, Temperatur- und Spannungsfelder im Kalanderspalt für strukturviskose Polyisobutylenschmelzen. Diese berechneten Geschwindigkeitsfelder für eine stationäre, nichtisotherme und nicht-Newtonsche Strömung stimmen mit den experimentellen Ergebnissen überein.

Mit den Vereinfachungen der Schmierfilmtheorie berechnen Levine, Corvalan, Campanella und Okos [57] die seitliche Ausdehnung der kalandrierten strukturviskosen Masse. Die Autoren stellen fest, dass mit schmal und höher einlaufenden Massestreifen, die Ausdehnung in Richtung der Walzenachsen zunimmt. Die berechneten Werte stimmen für PVC basierte Polymerschmelzen mit den Messergebnissen überein. Luther [58] berechnet mit dem kommerziell erhältlichen Programm „Polyflow“ das dreidimensionale Strömungsfeld im Kalanderspalt unter Berücksichtigung der freien Oberfläche des Knets in Abhängigkeit der Verfahrensparameter für Newtonsche und strukturviskose Fluide.

3.2 Strömungsfeld im Kalanderspalt – experimentelle Arbeiten

Aufgrund des erschwerten messtechnischen Zugangs zum Spalt zwischen zwei gegensinnig rotierenden Walzen, liegen nur wenige experimentelle Ergebnisse zum Strömungsfeld im Kalanderspalt vor. Diese sind notwendig, um die Berechnungen zu validieren.

3.2.1 Spannungsfeld

Das Gaskellsche-Modell des Druckfeldes wird von Bergen und Scott [24] angewandt und die Ergebnisse mit experimentellen Daten für gefüllte und ungefüllte Kunststoffschmelzen entlang der Walzenoberflächen verglichen. Die experimentellen Ergebnisse stimmen mit den

berechneten Werten nur für ungefüllte Kunststoffe überein. Bergen und Scott zeigen, dass der Druckverlauf von der Spalthöhe abhängt.

Unkrüer [5], Vlachopoulos und Hrymak [42] publizieren experimentelle Daten für den Druckverlauf im Walzenspalt für das Kalandrieren von PS- und PVC-Hart-Folien. Unkrüer [5] misst zusätzlich die Druckprofile in axialer Richtung der Walzen. Kohlert [2] untersucht den Einfluss der keilförmigen Einbauten auf die Strömung im Walzenspalt. Der Autor publiziert die qualitativen Ergebnisse bezüglich des Druckfelds in Walzrichtung im Kalanderspalt ohne und mit Keil unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Keilformen. Die Einführung eines Keils wird von einer wesentlichen Verlängerung des Knets und einer Spaltdruckerhöhung begleitet.

Von Bose [54] misst auf optischem Wege das Spannungsfeld in der Strömung viskoelastischer Polymere innerhalb des Walzenspalts und vergleicht seine Ergebnisse mit berechneten Werten. In den experimentellen Untersuchungen werden die für die Kalanderspaltströmung typischen Parameter wie Drehzahl, Abstand der Walzen sowie die Friktion, variiert. Riest [55] berechnet die Hauptnormalspannungen, die mit Messwerten von v. Bose übereinstimmen. Der Autor berechnet zusätzlich das dreidimensionale Spannungsfeld für Newtonsche Fluide, allerdings ohne den Knet zu berücksichtigen. Riest entwickelt eine Konstruktionsumgebung, mit welcher ein integriertes Gestalten der Kalandervalzen möglich ist. Mit Hilfe der Konstruktionsumgebung, die auf kommerziell erhältlichen CAD Programmen, CFX4 und ANSYS basiert, lassen sich das Druckfeld und die resultierende Deformation der Walzen berechnen. Die Ergebnisse der Berechnungen führen zur Modifikation der Gestalt der Walzen, so dass eine den Walzenspalt verlassende Bahn eine konstante Dicke aufweist.

Seeger und Reher [38] berechnen die Kräfte auf die Walzenachsen und die Drehmomente während des Kalandrierens von PVC und vergleichen diese mit experimentellen Ergebnissen von Agassant und Avenas [39].

3.2.2 Fließvorgänge im Kalanderspalt

Die Polymerbahn, die vom ersten Kalanderspalt, den sog. Fütterspalt gefördert wird, gelangt infolge Haftens an der Walzenoberfläche zwangsläufig in den nächsten Spalt. Es gibt ständig ein Materialüberschuss, der infolge des einlaufenden Materials vorhanden ist. Dieser Überschuss hat die Form einer Spindel mit einer von der Walzenmitte zum Rand hin abnehmenden

Höhe und wird als Knet bezeichnet. Im Knet wird das einlaufende Material über die Breite des Spalts verteilt, vermischt und homogenisiert. Der vorhandene Materialüberschuss führt zum Ausgleichen der auftretenden Schwankungen der Bahndicke.

Unkrüer [5] publiziert neben den experimentellen Ergebnissen bezüglich des Druckverlaufs die Strömungsfelder im Walzenspalt für das Kalandrieren von PS- und PVC-Hart-Folien. Die Stromlinien werden durch Einführung von unterschiedlich gefärbten Schichten aus PVC-Schmelzen sichtbar gemacht. Der Autor beobachtet innerhalb des Knets drei Wirbelgebiete. Die Größe und Lage dieser Wirbel hängen von den Verfahrensparametern sowie von den Stoffwerten der zu kalandrierenden PVC-Schmelze ab. Diese Beobachtungen werden von Hatzmann, Herner und Müller [61] bestätigt. Die Forscher berichten, dass das von Unkrüer beobachtete Strömungsbild im Knet für andere Polymerschmelzen mit viskoelastischem Verhalten auch unter verschiedenen Verfahrensparametern verallgemeinert werden kann. Die Entstehung der Wirbel im Knet ist durch die entgegengesetzt wirkenden Druck- und Schleppströmungen bedingt. Laut Unkrüer besteht die kalandrierte Polymerbahn aus zwei Schichten. Eine Schicht der auslaufenden Bahn wird aus den über den Wirbel umgelenkten Schichten der in den Spalt geförderten Polymerschmelzen gebildet. Die andere Bahnschicht besteht aus den nicht umgelenkten Schichten der in den Walzenspalt geförderten Polymerschmelzen. Die Höhe der neuen Bahnschichten beträgt 40 bis 60 % der Höhe der kalandrierten Polymerbahn und ist von den Verfahrensparametern sowie den Stoffdaten der Schmelze abhängig. Die Entstehung der Schichten ist in Kapitel 4.3 beschrieben. Des Weiteren stellt Unkrüer fest, dass die Materialbewegung im Knet in Transportrichtung der Walzen sowie in Walzenachsrichtung stattfindet. Die Polymerschmelze wird innerhalb des Knets auf spiralförmigen Bahnen zu den Knetenden, in Walzenachsrichtung hin gefördert. Die Wirbelgebiete seitlich im Knet werden stets kleiner. Diese Ergebnisse bestätigen das von Luther [58] berechnete dreidimensionale Strömungsfeld im Kalanderspalt.

Weitere Autoren wie Bourgeois und Agassant [8], Agassant und Espy [45] und Gärtner [63] untersuchen die Strömungsvorgänge im Kalanderspalt für PVC unter Berücksichtigung von verschiedenen Verfahrensparametern. Kohlert [2, 9] publiziert eine qualitative Darstellung der Strömungsvorgänge im Kalanderspalt mit keilförmigen Einrichtungen unterschiedlicher Form.