

Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren
der Technischen Hochschule Darmstadt

Institutsdirektor: Professor Dr.-Ing. Chr. Hars

**Übertragungs- und Entleerungsverhalten von Farbe
aus Nöpfchen von Rasterwalzen (Flexodruck)
und Tiefdruckzylindern**

von
H. Behler, Chr. Hars

Darmstadt 1990

Institutsbericht 2/90

Vorwort

Der vorliegende Bericht schließt den ersten Teil des Forschungsvorhabens "Übertragungs- und Entleerungsverhalten von Farbe aus Näpfchen von Rasterwalzen (Flexodruck) und Tiefdruckzylindern" ab. Die Anregung und Vorarbeiten zu diesem Forschungsvorhaben gehen auf meinen Vorgänger in der Leitung des Instituts Druckmaschinen und Druckverfahren, Herrn o. Prof. Dipl.-Ing. Karl R. Scheuter, zurück, dem an dieser Stelle Dank gesagt sei.

Finanzieller Träger des Vorhabens waren zu gleichen Teilen die Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e.V. (FGD) und die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF).

Die Arbeiten wurden in der Zeit vom 1. April 1987 bis zum 30. September 1989 am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der Technischen Hochschule Darmstadt durchgeführt. Sachbearbeiter des Forschungsvorhabens war Dipl.-Ing. H. Behler.

Das Forschungsvorhaben wurde von dem Arbeitskreis "Farbtrennverhalten" der Forschungsgesellschaft Druckmaschinen fachlich und durch Sachspenden unterstützt.

Allen genannten Organisationen und Personen und auch den Mitarbeitern des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren sei an dieser Stelle für ihre Unterstützung bei der Durchführung des Forschungsvorhabens gedankt.

Darmstadt, im März 1990

Christoph Hars

Inhalt

1.	Einführung	1
1.1	Die Farbübertragung in Tief- und Flexodruckwerken	1
1.2	Zielsetzung	5
1.3	Ausgangssituation	6
2.	Theoretischer Teil	11
2.1	Mathematische Formulierung	11
2.1.1	Geometrie und Bewegungsgleichungen	11
2.1.2	Dynamische Randbedingungen	13
2.1.3	Kinematische Randbedingung	16
2.2	Ähnlichkeitsbetrachtung	17
2.3	Abschätzung der Kavitation in Druckwerken	22
3.	Experimenteller Teil	28
3.1	Versuche mit dem Parallel-Platten-Tackmeter	30
3.1.1	Allgemeines und Aufbau	30
3.1.2	Versuchsdurchführung	34
3.1.3	Diskussion	42
3.2	Die Strömung mit freier Oberfläche zwischen zwei Glasplatten	45
3.3	Folgerungen aus den Versuchsergebnissen	49
4.	Schichtdickenbestimmung an laufenden Maschinen	50
4.1	Farbfluß und Farbspaltungszahlen im Flexodruckwerk	50
4.2	Schichtdickenmessung	56
5.	Simulation mit FIDAP	58
5.1	Programmaufbau	58
5.2	Die Behandlung freier Oberflächen mit FIDAP	60
5.3	Simulation von Farbspaltungsvorgängen	63

5.3.1	Untersuchte Modelle	63
5.3.2	Diskretisierung des Rechengebietes	64
5.3.3	Entdimensionierung	68
5.3.4	Beispiele	69
5.3.4.1	Ebene Platten	69
5.3.4.2	Napfstruktur	73
6.	Ausblick	76
6.1	Grundsätzliche theoretische Arbeiten	76
6.2	Farbübertragungsversuche	76
7.	Zusammenfassung	78
8.	Liste der verwendeten Abkürzungen und Symbole	80
9.	Literaturverzeichnis	82
Anhang:	FIDAP-Eingabedateien	A-1

1. Einführung

1.1 Die Farbübertragung in Tief- und Flexodruckwerken

Obwohl das Flexodruckverfahren ein Hochdruckverfahren ist, bestehen mit dem Tiefdruckverfahren verschiedene Gemeinsamkeiten, besonders in bezug auf die Farbübertragung. Daher werden mit diesem Bericht beide Verfahren angesprochen.

Im Gegensatz zum Offset- und Hochdruck werden im Tief- und Flexodruck dünnflüssige Druckfarben niedriger Viskosität (ca. 0,02 Pa s) verdruckt. Bei beiden Verfahren spielt die Farbübertragung aus Rasternäpfchen auf den nächsten farbführenden Träger eine große Rolle. Die Bilder 1 und 2 zeigen den typischen Aufbau eines Tiefdruck- bzw. Flexodruckfarbwerkes. Die Rasternäpfchen der Tiefdruckformen bieten ihre Farbfüllung direkt dem Bedruckstoff an (siehe Bild 3). Je nach Herstellungsverfahren des Tiefdruckzylinders geschieht dabei die Bildmodulation nur durch die Näpfchentiefe oder durch Näpfchentiefe und -grundfläche. Dagegen dient die Rasterwalze im Flexodruckverfahren zur dosierten Einfärbung der Hochdruckform, welche den Bedruckstoff einfärbt (siehe Bild 4). Daher sind hierbei alle Näpfchen geometrisch gleich.

Ein besonderer Vorteil dieser Art der Einfärbung liegt in der Rückwirkungsfreiheit, d.h. sowohl der Tiefdruckzylinder als auch die Rasterwalze werden bei jeder Umdrehung überschüssig eingefärbt und abgerakelt, so daß immer die gleiche Farbmenge angeboten wird. Schablonieren und "Geisterbilder" sind hier praktisch unbekannt.

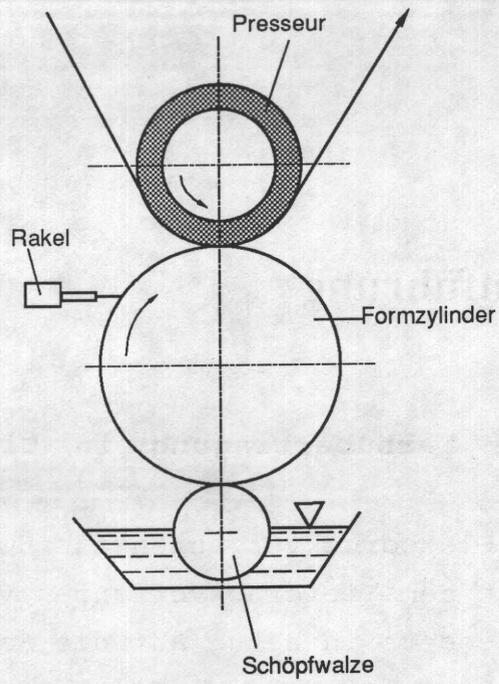


Bild 1: Tiefdruckfarbwerk

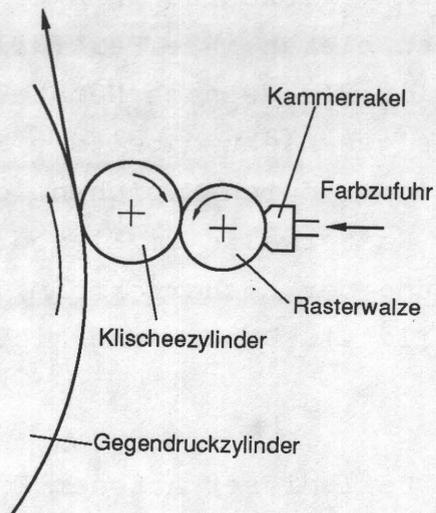


Bild 2: Flexodruckfarbwerk

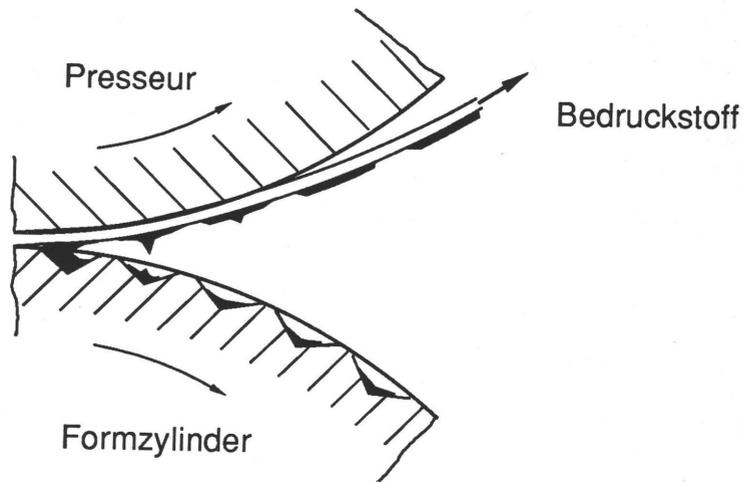


Bild 3: Farbübertragung aus Rasternäpfchen im Tiefdruck

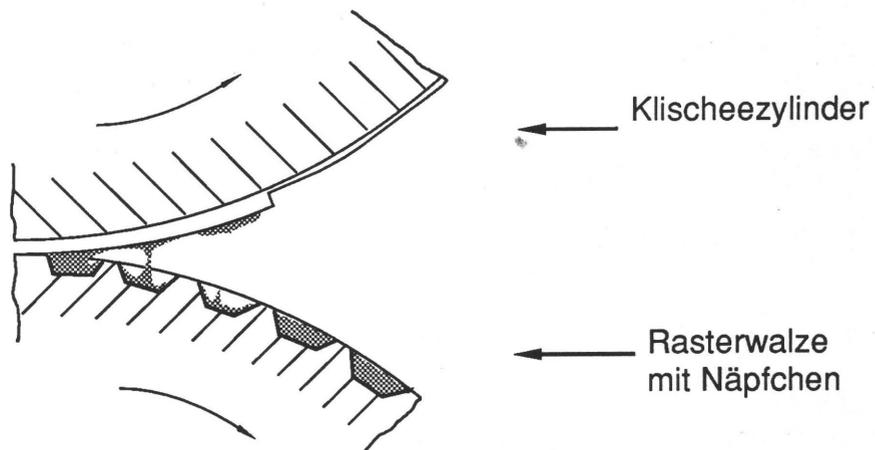


Bild 4: Farbübertragung aus Rasternäpfchen im Flexodruck

Besonders das Flexodruckverfahren und auch die verwandten Verfahren Anilox-Hochdruck und -Flachdruck (Druckfarbenviskositäten ca. 1 Pa s) erfuhren in den letzten Jahren einen beachtlichen Aufschwung. Dies liegt zum einen an der zunehmenden Nachfrage nach mehrfarbig bedruckten Verpackungen und zum anderen am kurzen und daher preiswerteren Farbwerk. Dazu eröffnet sich noch die Möglichkeit, umweltverträglichere Druckfarben (Stichwort: wasserverdünnbar) verwenden zu können. Im Gegensatz zum Flexodruckverfahren ist das Anilox-

Hochdruckverfahren nicht vollständig rückwirkungsfrei, da wegen der relativ harten Druckform zwei zusätzliche, mit Gummi ummantelte Übertragungswalzen zwischen Rasterwalze und Formzylinder angeordnet sind. Bilder 5 und 6 zeigen schematisch den Aufbau eines Anilox-Offset- bzw. Anilox-Hochdruckfarbwerks.

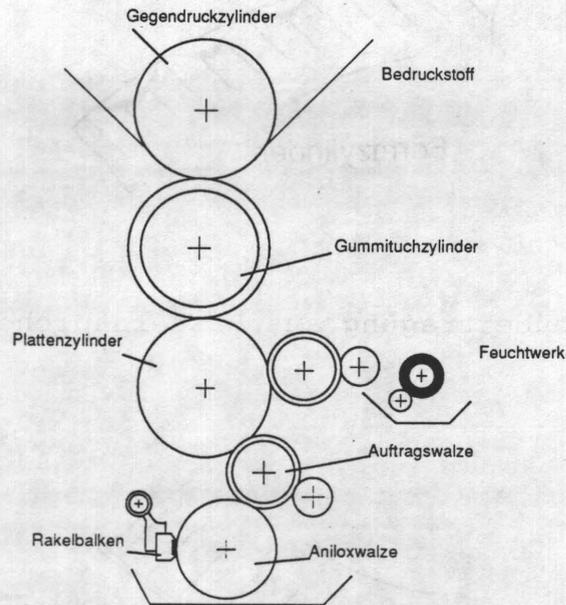


Bild 5: Anilox-Offsetfarbwerk

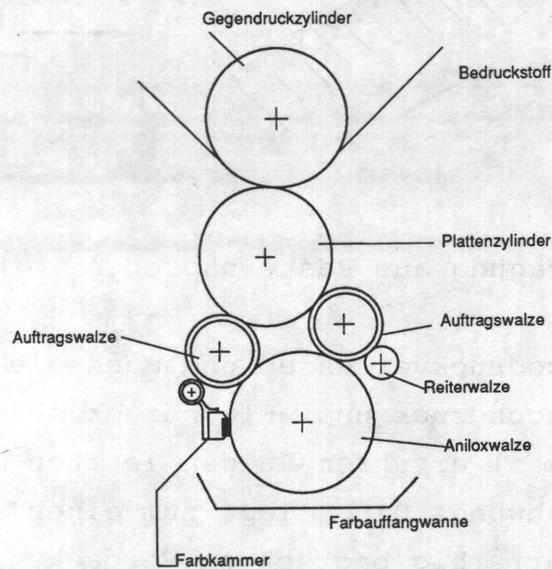


Bild 6: Anilox-Hochdruckfarbwerk

Die sich bei der Farbübertragung in den genannten Verfahren im Walzenspalt ausbildende Strömung unterscheidet sich deutlich vom Farbspaltungsvorgang im Offsetverfahren, zu welchem bereits zahlreiche Untersuchungsergebnisse sowohl theoretischer als auch experimenteller Art vorliegen: Grenzflächenphysikalische Effekte werden im Offsetverfahren zur Unterscheidung druckender und nichtdruckender Stellen genutzt. Die beteiligten Walzen werden jedoch in den meisten Untersuchungen als vollständig benetzt angenommen, so daß kein ausgeprägter Einfluß der Oberflächenspannung auf die Strömung vorhanden sein kann. Zur Beschreibung der Farbspaltung wird meist von einer Farbspaltungszahl von etwa 0,5 ausgegangen, d.h., die Druckfarbe verteilt sich etwa je zur Hälfte auf die beiden beteiligten Walzen. Etwaige Abweichungen rühren in der Regel von dem in der Druckfarbe emulgierten Feuchtmittel her.

Bei der Entleerung von Druckfarbe aus Rasternäpfchen liegen die Dinge anders: Aufgrund der vorhandenen Dreiphasenkontaktklinie können die Oberflächenkräfte bei der Farbspaltung wirksam werden und die Strömung beeinflussen, d.h., den beteiligten Materialien kommt im Hinblick auf ihre Oberflächenenergien besondere Bedeutung zu.

1.2 Zielsetzung

Aufgrund bei der Durchführung anderer Forschungsvorhaben gemachter Erfahrungen und der Beurteilung der bisherigen Erkenntnisse im Bereich der Farbübertragung in Druckwerken (siehe Abschnitt 1.3) sollen zunächst, aufbauend auf dem in einem vorangegangenen Forschungsvorhaben /1/ erhaltenen Grundlagenwissen, die theoretischen Grundlagen der bei der Farbübertragung auftretenden Strömung erarbeitet werden.

Aus mehreren Gründen erscheint eine genaue Kenntnis des physikalischen Geschehens bei der Farbübertragung wünschenswert: Einerseits können Geometrie und Material der Rasterwalzen bzw. Tiefdruckzylinder optimiert werden im Hinblick auf konstante und

reproduzierbare Farbübertragung, andererseits können Rückschlüsse auf die optimale Herstellung der Klischees (Stichwort Tonwertzunahme) gezogen werden. Bei der Farbübertragung soll der vorgegebene Nüpfcheninhalt (theoretisches Volumen) möglichst vollständig weitergegeben werden. Durch gleichmäßigere, reproduzierbare und höhere Farbübertragung wird die Prozeßführung stabilisiert und so können Makulatur und Farbverbrauch reduziert werden. Ferner können die erforderlichen Bedingungen für eine erfolgreiche Verwendung von wasserverdünnbaren Druckfarben ermittelt werden. Umrüstzeiten werden verringert, der Druckfarbenverbrauch kann gesenkt werden, und die Standzeiten der Rasterwalzen können verlängert werden. Im Druckereibetrieb können die verbleibenden Parameter, d.h. Farbviskosität und Rasterwalzenauswahl (im Flexodruck), bereits vor Bearbeitung des Auftrags weitgehend abgestimmt werden. Insgesamt ist also eine Steigerung von Qualität und Wirtschaftlichkeit zu erwarten.

Durch eine geeignete Variation der beeinflussenden Parameter sollen die Erkenntnisse grundsätzlich auf die übrigen Druckverfahren Offset- und Hochdruck erweiterbar sein.

1.3 Ausgangssituation

Über das Entleerungsverhalten von Farbe aus Nüpfchen von Rasterwalzen (Flexodruck) und Tiefdruckzylindern ist bisher wenig bekannt. Offenbar werden die Nüpfchen nie ganz entleert und es kommt zur Farbspaltung. Daher führt eine Steigerung der Nüpfchentiefe nicht unbedingt zu einer Erhöhung der übertragenen Farbmenge, was die Erzeugung hoher optischer Farbdichten in den genannten Druckverfahren beeinträchtigt.

Aus der Praxis sind einige Maßnahmen zur Erhöhung der zu übertragenden Farbmenge bekannt: Im Tiefdruck beispielsweise nutzt man ein elektrostatisches Feld im Farbübertragungsbereich als Druckhilfe. Hierbei werden im wesentlichen die sog. "missing dots" vermieden, d.h. der im Nüpfchen liegende Farbtropfen wird durch elektrostatische Kräfte derartig deformiert, daß auch bei

sehr rauhem Bedruckstoff die zur Farbübertragung erforderliche Benetzung ermöglicht wird.

Im Flexodruck erweisen sich keramikbeschichtete Rasterwalzen als günstig für die Farbübertragung, wesentlicher Vorteil ist allerdings die im Vergleich zur verchromten Walze erheblich längere Standzeit. Außerdem bedient man sich beim Bedrucken von Kunststofffolien, z.B. aus Polyäthylen (PE), der sog. Corona-Vorbehandlung. Dabei wird durch das Aufbringen einer elektrischen Ladung der polare Anteil der Oberflächenspannung erhöht. In den meisten Fällen, insbesondere beim Verdrucken von wasserlöslichen Druckfarben, wird erst durch diese Behandlung eine sichere Farbübertragung möglich. Grundsätzlich werden die materiellen Komponenten so zusammengestellt, daß sich die Oberflächenspannungen der beteiligten Stoffe innerhalb des Farbwerks in Richtung zum Bedruckstoff erhöhen.

Die die Farbübertragung beeinflussenden Parameter sind im wesentlichen bekannt:

1. Materialien
2. Oberflächenbeschaffenheit
3. eventuelles viskoelastisches Verhalten des Druckformzylinders bzw. des Presseurs
4. Druckgeschwindigkeit
5. Temperatur
6. Anstelldruck im Kontaktbereich
7. rheologische Eigenschaften der Druckfarbe
8. grenzflächenphysikalische Effekte
9. elektrostatisches Feld
10. Geometrie

Über die genannten Einflüsse konnten bisher keine quantitativen Aussagen gewonnen werden.

Untersuchungen zur Farbübertragung in Walzenfarbwerken werden seit den fünfziger Jahren durchgeführt. Mit einer kegelförmigen Walze, die auf einer Plexiglasscheibe abrollt, führen Schaeffer

und Zettlemoyer /2/ 1957 grundlegende experimentelle Untersuchungen durch. Durch die Plexiglasscheibe können die Vorgänge im Walzenspalt visuell beobachtet werden. Die Entstehung von Kavitationsblasen und Flüssigkeitslamellen ist deutlich sichtbar. Schade /3/ berichtet 1966 über fotografische Untersuchungen im Walzenspalt von Tiefdruckfarbwerken. Die quantitativen Aussagen von Kunz /4/, Sorensen /5/ und Schirmer /6/ beruhen auf gravimetrischen Bestimmungen der Farbmenge. Schümmer /7/ erzielt durch Messung radioaktiver Strahlung einer entsprechend dotierten Druckfarbe sehr genaue Ergebnisse für die Farbübertragung. Albright /8/ beschreibt eine Tracer-Technik, die in Kombination mit einem Atom-Absorptions-Spektrophotometer die Bestimmung der übertragenen Farbmenge gestattet.

Insbesondere durch die zunehmende Verbreitung des Flexodruckverfahrens wird das Problem der Farbübertragung aus Rasternäpfchen in letzter Zeit verstärkt untersucht.

Die 18. Fachtagung der Deutschsprachigen Flexodruck-Fachgruppe e.V. (DFTA) beschäftigte sich eingehend mit der Optimierung von Rasterwalzen. Griebel /9/ mißt die theoretischen Schöpfvolumina und die tatsächlich übertragene Farbmenge. Es zeigt sich die Abhängigkeit der Farbübertragung von Näpfchengeometrie und den Materialien. Die trotz geringerer Näpfchentiefe festgestellte große angebotene Farbmenge bei lasergravierten Keramikwalzen im Vergleich zu molettierten bzw. geschlagenen Chromwalzen wird zum Teil auf den verfahrensbedingten Grataufwurf (Recastbildung) am Näpfchen zurückgeführt. Der Haupteinfluß rührt allerdings von den unterschiedlichen grenzflächenphysikalischen Eigenschaften der beiden Materialien her. Keramik bildet mit der Druckfarbe einen größeren Randwinkel als Chrom. Für die Praxis sind somit bereits Hinweise für die Auswahl der Parameter gegeben, jedoch lassen die Ergebnisse keine zielgerichtete Optimierung, auch im Hinblick auf die Entwicklung neuer Druckverfahren, zu.

Am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren wird schon seit mehr als zwanzig Jahren das Gebiet der Farbübertragung erforscht. Allerdings lag der Schwerpunkt im Bereich des Offset-

Verfahrens. Ausgehend von angenommenen Farbspaltungsfaktoren entwickelt Rech in seiner Dissertation /10/ ein Simulationsprogramm für Walzenfarbwerke. Wiesner und Scheuter /11/ führen die experimentelle Bestätigung durch. Bei diesen Untersuchungen steht die Ermittlung von Farbspaltungsfaktoren in Abhängigkeit des in die Druckfarbe emulgierten Feuchtmittels im Vordergrund, eine mechanische Theorie zur Beschreibung dieser Vorgänge wird nicht geliefert.

All diese Erkenntnisse entwickelten sich aus der Beurteilung von in Experimenten beobachteten Phänomenen. Eine umfassende, grundlegende Theorie, die die Vorgänge in Farbwerken beschreibt, fehlt bisher.

Die Forschungsergebnisse in "verwandten" Gebieten zeigen die erfolgreiche Verbindung von Theorie und Experiment:

Shield, Bogy und Talke /12/ benutzen ein eindimensionales Modell, um die im Ink-Jet-Verfahren entstehende Tropfenform zu untersuchen. Schweizer /13/ führt experimentelle Untersuchungen zur Beschichtung von Filmmaterial durch und vergleicht die Ergebnisse mit einer Finit-Element-Simulation des gleichen Problems von Christodoulou und Scriven /14/. In beiden Fällen kann die Übereinstimmung zwischen Theorie (Simulation) und Experiment als hervorragend bezeichnet werden. Die zielgerichtete Verfahrensverbesserung wird vereinfacht und kostengünstiger.

Bei dem Farbübertragungsprozeß kommt den hydrodynamischen Vorgängen eine entscheidende Rolle zu. Diese werden durch die Benetzungseigenschaften der beteiligten Materialien beeinflusst.

Bei Messungen der Farbübertragung an Praxismaschinen ergeben sich einige Einschränkungen: Hydrodynamische Kenngrößen, wie etwa das Geschwindigkeits- und das Druckfeld, die Aufschluß über das Strömungsfeld geben, sind nicht erfaßbar. Eine fotografische Analyse der Vorgänge im Walzenspalt einer laufenden Druckmaschine ist nur mit sehr großem finanziellen Aufwand möglich.

Man benötigt dazu eine Hochgeschwindigkeitskamera (oder -videokamera), ein geeignetes Endoskop und eine ausreichende Lichtquelle. Für eine grundlegende klärende Untersuchung wäre eine solche fotografische Analyse in jedem Fall hilfreich.

Auch die Bestimmung des übertragenen Farbvolumens ist schwierig: Optische Schichtdickenmessung, z.B. mit Laser-Abstandsaufnehmern, ist wegen der Überlagerung von in der Größenordnung der Schichtdicke oder darüber liegender Rundlauffehler des Plattenzylinders und Schwingungen, die beim An- und Abstellen eines Druckwerks auftreten, ungeeignet. Die Wägung des Bedruckstoffes ist problematisch, da durch die Trocknung u.U. nicht nur die in der Druckfarbe enthaltenen Lösemittel, sondern auch noch die Restfeuchte des Bedruckstoffes verdampft wird. Zudem kommt diese Methode nur für den Tiefdruck in Frage, da beim Flexodruck zunächst die Farbspaltung Rasterwalze/Plattenzylinder interessiert. Es verbleiben Methoden, die die Sekundäreigenschaften der Farbschichtdicke ausnutzen, wie z.B. radioaktive oder optische Methoden oder die Verwendung eines Atom-Absorptions-Spektrophotometers.

kompliziert und die Behandlung durch FIDAP ermöglicht. Der dargestellte Napf hat dann die Form eines Kegelstumpfes, und das Problem ist in Zylinderkoordinaten beschreibbar. Da bei den zu untersuchenden Druckverfahren dünnflüssige Farben, basierend auf Alkohol (Äthanol), Toluol oder neuerdings auch Wasser beteiligt sind, können die Farben in guter Näherung als Newtonsche Flüssigkeiten behandelt werden. Es gilt dann das Materialgesetz nach Cauchy-Poisson, das im inkompressiblen Fall (d.h.: $\nabla \mathbf{u} = 0$) den Zusammenhang zwischen Verzerrungsgeschwindigkeiten und Spannungen wie folgt herstellt:

$$\tau_{ij} = -p \delta_{ij} + \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

Darin bezeichnen τ_{ij} die Komponenten des Spannungstensors \mathbf{T} , δ_{ij} das Kronecker-Delta, p den Druck, u_i die Komponenten des Geschwindigkeitsvektors und η die dynamische Viskosität. Näheres zu den Herleitungen findet man z.B. in /15/. Da die beim Drucken auftretenden Beschleunigungen erheblich größer sind als die Erdbeschleunigung, werden im folgenden die Volumenkräfte vernachlässigt. Setzt man (1) in den Impulssatz unter Vernachlässigung der Schwerkraft [$\mathbf{Du}/Dt = (1/\rho)\text{div } \mathbf{T}$] ein, erhält man die Navier-Stokes-Gleichung (NSG), die die auftretende Strömung beschreibt, zunächst in der allgemeinen Form:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \mathbf{u} \times (\nabla \times \mathbf{u}) + \nabla \frac{\mathbf{u}^2}{2} + \frac{\nabla p}{\rho} - \nu \Delta \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

Darin bedeuten ρ die Dichte und ν die kinematische Viskosität.

Mit der Annahme der Rotationssymmetrie reduziert sich (2) auf zwei Gleichungen für die drei unabhängigen Variablen u, w und p . Sie bedeuten die Geschwindigkeitskomponenten in r - und z -Richtung und den Druck.

Zur vollständigen Beschreibung der Strömung sind die Rand- bzw. Anfangsbedingungen einzubringen. Dazu sind die Spannungszustände

und das Geschwindigkeitsfeld an den materiellen Rändern festzulegen und für die Form der Oberfläche sind die Randwinkel zu beachten. Letztere ergeben sich mit der Young-Dupré-Gleichung aus den Grenzflächenspannungen, die als Materialkonstanten angenommen werden.

2.1.2 Dynamische Randbedingungen

An der freien Oberfläche steht der Spannungsvektor mit dem Kapillardruck und den übertragenen Schubspannungen im Gleichgewicht. Da die Flüssigkeit erheblich zäher ist als die umgebende Luft, wird im folgenden davon ausgegangen werden, daß an der freien Oberfläche keine Schubspannungen wirken und folglich: $\mathbf{t} = |\mathbf{t}| \cdot \mathbf{n}$, wobei \mathbf{n} der nach außen zeigende Normalenvektor der Oberfläche ist. Es sei bemerkt, daß jedoch tatsächlich von den übertragenen Schubspannungen bedeutsame Effekte herrühren: Es bildet sich auf dem auf der Druckwalze befindlichen Farbfilm eine Luftgrenzschicht aus, die zum Teil mit in den Walzenspalt eingezogen wird, so daß Luftblasen in die Flüssigkeit hineingetragen werden, die Kavitation und schließlich das Abreißen der entstandenen Farbfäden begünstigen.

Der Spannungsvektor steht an der freien Oberfläche mit dem Kapillardruck im Gleichgewicht; siehe auch Bild 8:

$$t_i = \tau_{ij} n_j = 2 \gamma H n_i \quad (= 2 \gamma H \delta_{ij} n_j) \quad (3)$$

Wir verwenden die Indexschreibweise, d.h. es wird über doppelt auftretende Indizes summiert, δ_{ij} bedeutet das Kronecker-Symbol. t_i ist die i-te Komponente des Spannungsvektors, τ_{ij} sind die Komponenten des Spannungstensors, H ist das sog. Gaußsche Krümmungsmaß, für das im ebenen Fall gilt: $H = 1/R$. Bild 2 zeigt das Kräftegleichgewicht an der freien Oberfläche.

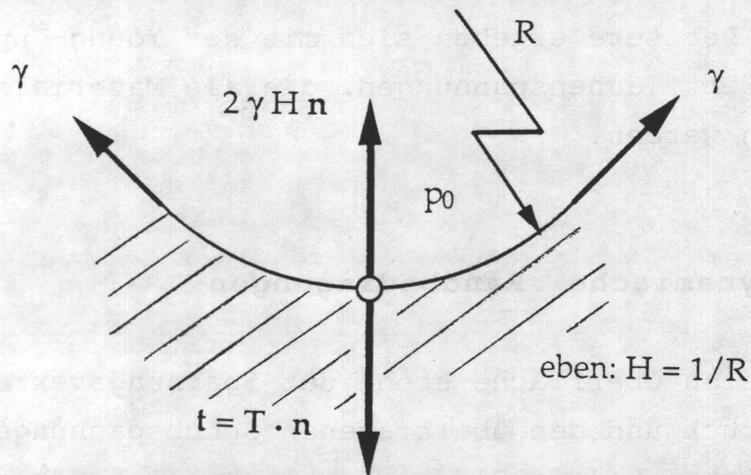


Bild 8: Gleichgewicht an der Phasengrenzfläche

Eine weitere dynamische Randbedingung ist die Haftbedingung an den Grenzflächen zum Festkörper.

$$u_i = u_{wi} \quad (4)$$

u_w ist die Wandgeschwindigkeit.

Im Zusammenhang mit der noch zu diskutierenden kinematischen Randbedingung an der freien Oberfläche ist diese Randbedingung durchaus problematisch. Von besonderem Interesse ist dabei die 3-Phasen-Kontaktlinie bzw. der 3-Phasen-Kontaktpunkt in der ebenen Betrachtung. Es ist nicht möglich, sämtliche an der Kontaktlinie beobachteten physikalischen Phänomene in eine mathematische Formulierung mit aufzunehmen.

Für den Fall der ruhenden Flüssigkeit gilt das Gesetz von Young-Dupré; die an der Kontaktlinie angreifenden Oberflächenspannungen stehen im Gleichgewicht. Der sich bildende Kontaktwinkel θ stellt eine Konstante der jeweiligen Materialpaarung dar. Das Young-Dupré-Gesetz,

$$\gamma_g - \gamma_s = \gamma_f \cos\theta, \quad (5)$$

wird aus dem Gleichgewicht der Oberflächenspannungen am ruhenden Tropfen hergeleitet.

Sobald die Einschränkung der Ruhelage aufgegeben wird, ist der Kontaktwinkel keineswegs mehr allein vom Material abhängig. Es ist deshalb davon auszugehen, daß die Young-Dupré-Gleichung in dem hier interessierenden Fall der bewegten Flüssigkeit ihre Gültigkeit verliert. Dies wirft die Frage nach einer geeigneten Randbedingung auf, die für den Grenzfall der ruhenden Flüssigkeit in die Young-Dupré-Gleichung übergeht.

Die physikalischen Effekte an der Kontaktlinie sind nur z.T. bekannt. Es soll hier auf die Möglichkeit der Einbindung in die Kontinuumsmechanik eingegangen werden. Insbesondere stellen sich beim Vorschreiten und Zurückziehen der Flüssigkeit auf einer Festkörperoberfläche unterschiedliche Randwinkel ein; man spricht von Vorschreit- und Rückzugswinkel. Hierzu siehe auch /1/. Dabei wirken sich sowohl die Trägheit der Flüssigkeit als auch die Haftung an der Wand aus. Bei gut benetzenden Flüssigkeiten bleibt beim Zurückziehen ein Film zurück. In Abhängigkeit von einer Vielzahl von Parametern, vor allem aber der Viskosität, kann dieser Film u.U. nur mehrere Moleküllagen dick sein. Die Kontinuumshypothese für Flüssigkeiten wäre in diesem Fall nicht mehr zutreffend. Und wird dieser Film als unendlich dünn gesehen, kann von einer ausgeprägten Kontaktlinie ausgegangen werden.

Der zurückbleibende Film kann jedoch auch eine merkliche Dicke aufweisen, die keinesfalls mehr unberücksichtigt bleiben darf. Es läßt sich dann keine ausgeprägte "wandernde" Kontaktlinie und vor allem kein eindeutiger Randwinkel mehr feststellen. Die ursprüngliche Kontaktlinie bleibt hier beibehalten. Diese Vorgänge wurden von Tanner /16/ mit Hilfe der Theorie der Schmierung, also unter Vernachlässigung der Trägheit, beschrieben. Bei dieser Annahme ist die Oberflächenkontur großen Deformationen unterworfen, die die numerische Behandlung erschweren.

Im Fall der bewegten Kontaktlinie können zwei Möglichkeiten unterschieden werden:

(1) *Die Kontaktlinie ist materiell konstant*, und die Flüssigkeit kann auf der Wand "rutschen"; zur mathematischen Beschreibung kann nahe der Kontaktlinie ein Schlupf zugelassen werden. Einzelheiten finden sich bei Dussan V. /17/. Damit ist die Bedingung der Wandhaftung lokal verletzt.

(2) *Die Wandhaftung bleibt erhalten*, eine Bewegung der Kontaktlinie läßt sich nur durch ein "Roller" der Flüssigkeit erklären. Dabei bestünde die freie Flüssigkeitsoberfläche nicht mehr durchgehend aus denselben Teilchen; es würden vielmehr Teilchen von der Grenzfläche fest/flüssig an die Grenzfläche flüssig/gasförmig transportiert. In der Kontinuumstheorie wird jedoch gefordert, daß die freie Oberfläche einer Flüssigkeit immer aus denselben Teilchen besteht. Diese Bedingung wird auch zur Bestimmung der Kontur benutzt. Das tatsächliche Verhalten der Flüssigkeit läßt sich nur schwierig beobachten.

2.1.3 Kinematische Randbedingung

Ist die freie Oberfläche einer Flüssigkeit in impliziter Form mit $F^*(r, z, t) = 0$ dargestellt, so gilt $dF^*/dt = 0$, da ein Punkt der freien Oberfläche immer an der Oberfläche bleibt. Daraus erhält man durch Umformung die sog. kinematische Randbedingung:

$$\frac{\partial F^*}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla F^* = 0. \quad (6)$$

Sie ist für unsere Zwecke abzuschwächen. Dies wurde im vorhergehenden kurz diskutiert. Ohne Einschränkung kann aber angenommen werden, daß die Teilchen grundsätzlich an der Oberfläche des Flüssigkeitsgebietes bleiben, allerdings von der Flüssigkeitsoberfläche zur freien Oberfläche wandern können und umgekehrt. Im Fall der ausgeprägten Kontaktlinie ist diese nicht materiell, und die implizite Darstellung der Oberfläche $F^*(r, z, t) = 0$ enthält Singularitäten, die Oberfläche ist im

mathematischen Sinn nicht "glatt". Um eine numerische Bestimmung der Oberflächenkontur zu ermöglichen, wird die kinematische Randbedingung so umgeschrieben, daß die Ortskoordinate der Oberfläche explizit auftritt.

$$\frac{D\bar{x}_i}{Dt} = \bar{u}_i = \frac{\partial \bar{x}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{x}_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

\bar{u}_i bedeutet die Geschwindigkeit der Teilchen an der freien Oberfläche, \bar{x}_i den Ort der Teilchen. Diese Bedingung ist rein kinematischer Natur und gilt in jedem Fall.

Gleichung (2) ist mit den angegebenen Randbedingungen analytisch nicht lösbar. Daher sind, eventuell unter vereinfachenden Annahmen, numerische Lösungen zu suchen. In Kapitel 5 werden mit Hilfe eines Finit-Element-Programms (FIDAP) Lösungen aufgesucht.

2.2 Ähnlichkeitsbetrachtung

Wir führen folgende Kennzahlen ein:

$$Re = (h w) / \nu \quad (8 \text{ a})$$

$$We = (\rho w^2 h) / \gamma_{LV} \quad (8 \text{ b})$$

$$\Lambda = h/R \quad (8 \text{ c})$$

$$Bo = (g \rho l^2) / \gamma_{LV} \quad (8 \text{ d})$$

Damit erhalten wir die dimensionslose Form der Navier-Stokes-Gleichung. In Zylinderkoordinaten entstehen als Komponentengleichungen:

In r-Richtung:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{We} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{\Lambda^2} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{u}{r^2} \right] \quad (9 \text{ a})$$

und in z-Richtung:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{-1}{We \Lambda^2} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\Lambda^2 \partial z^2} \right] + \frac{Bo}{\Lambda We} \quad (9 \text{ b})$$

Dabei bedeuten u und w die Geschwindigkeitskomponenten in r- bzw. in z-Richtung.

Es werden nun drei mechanische Grundgrößen gewählt, die Kraft F, die Länge l und die Zeit t als Basiseinheiten, und die Dimensionen der Einflußgrößen werden als Produktkombinationen der Basiseinheiten dargestellt, so entsteht folgende Dimensionsmatrix:

	V ₁	V ₂	h	s	A	γ _{S1}	γ _{S2}	γ _{SL1}	γ _{SL2}	γ _{LV}	η	ρ	w
F	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
l	3	3	1	1	2	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-4	1
t	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	-1

Diese Matrix hat offenbar den Rang 3. Nach dem π-Theorem von Buckingham gibt es zu diesem, von 13 Parametern abhängigen Problem ein äquivalentes Problem, das von $n - r = 13 - 3 = 10$ Parametern, sog. Kennzahlen abhängt. Diese Kennzahlen werden mit π_i bezeichnet. Eine weitere Reduktion der Anzahl der Kennzahlen ist mit Hilfe der Gleichung von Young-Dupré (5) möglich. Die Differenz der Grenzflächenspannungen bleibt als einzelne Größe stehen. Der Quotient aus dieser Größe und der Oberflächenspannung der Flüssigkeit stellt den Kosinus des Randwinkels, eine typische Kennzahl des Problems, dar. Damit erhält man nun die folgenden Kennzahlen:

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= V_1/V_2 \\
 \pi_2 &= V/(As) \\
 \pi_3 &= A/h^2 \\
 \pi_4 &= s/h \\
 \pi_5 &= \cos\theta_1 \\
 \pi_6 &= \cos\theta_2 \\
 \pi_7 &= We \\
 \pi_8 &= Re
 \end{aligned} \tag{10}$$

Da das Volumenverhältnis v interessiert, gilt:

$$v = \frac{V_2}{V_1} = f(\pi_i) \quad \text{für } i=2, \dots, 8$$

Zwei Vorgänge bezeichnet man als mechanisch ähnlich, wenn die entsprechenden Kennzahlen gleich sind. Da das vorliegende Problem von acht solchen Kennzahlen abhängt, erscheint es unmöglich, bei Änderung des Längenmaßstabs durch geeignete Variation anderer Parameter vollständige mechanische Ähnlichkeit zu erreichen. Dennoch soll ein Ansatz versucht werden.

Folgende Überlegungen sollen den Zusammenhang erhellen:

Für $s/h \rightarrow 0$ hat man zwei ebene Platten, die auseinander gezogen werden. Bei quasi statischer Trennung der Platten stellt sich das Volumenverhältnis proportional zu den Adhäsionsarbeiten ein. Bei sehr großer Trenngeschwindigkeit spielen die Adhäsionskräfte im Vergleich zu den Trägheits- und Zähigkeitskräften eine untergeordnete Rolle, so daß sich vermutlich ein Volumenverhältnis von 1 einstellt. Für den unendlich tiefen Napf wird die Volumenverteilung offenbar 0, was nicht heißt, daß keine Farbe übertragen werden kann. Zusammengefaßt:

$$\frac{s}{h} \rightarrow 0, w \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad v = \left(\frac{1 + \cos \theta_1}{1 + \cos \theta_2} \right)^\alpha = v_0^\alpha$$

$$\frac{s}{h} \rightarrow 0, w \rightarrow \infty \quad \Rightarrow \quad v = 1$$

$$\frac{s}{h} \rightarrow \infty \quad \Rightarrow \quad v = 0$$

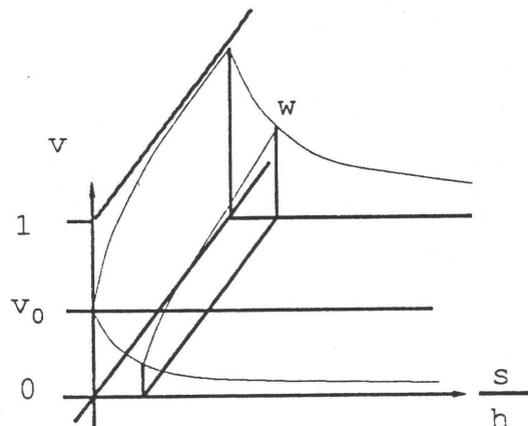


Bild 9: Möglicher Verlauf der Volumenverteilung in Abhängigkeit von einigen Systemparametern

Qualitativ sind die Verläufe nach Bild 9 möglich.

Folgender formelmäßiger Zusammenhang ist daher denkbar:

$$v = \left[\frac{1 + \cos \theta_1}{1 + \cos \theta_2} \right] \alpha \cdot \exp \left\{ \left(\frac{V}{A s} \right)^\beta \left(\frac{A}{h^2} \right)^\delta We^\zeta Re^\kappa \right\} \cdot \exp \left\{ -\varepsilon \frac{s}{h} \right\} \quad (11)$$

Dabei sind die Konstanten $\alpha, \beta, \delta, \zeta, \kappa$ und ε noch frei wählbar. Sie könnten beispielsweise durch Experimente bestimmt werden.

Es sollen nun Überlegungen angestellt werden, wie sich die Volumenverteilung v bei Variation des Längenmaßstabs verhält. Der neue Maßstab sei durch ein hochgestelltes I gekennzeichnet. Bei geometrischer Ähnlichkeit entsteht:

$$\phi_v = \frac{v^I}{v} = v_0 \alpha \left[\exp(B) - \exp(B \phi_1) \right] \quad (12)$$

$$\text{mit } B = \pi_2^\beta \cdot \pi_3^\delta \cdot We^\zeta \cdot Re^\kappa$$

und ϕ_1 als Längenmaßstab.

Die letzte Gleichung läßt sich sehr gut interpretieren: Das Verhältnis von Näpftentiefe zu Ausgangshöhe (s/h) spielt keine Rolle. Bei gleichen Materialien oben und unten, d.h. $v_0 = 1$, erhält man $\phi_v = 1$, die geometrische Ähnlichkeit überträgt sich also auch auf die Volumenverteilung. Bei ungleichen Materialien ist das noch unklar, da ja die Exponenten der Kennzahlen noch nicht bestimmt sind.

Für Versuche bedeutet dies folgendes: Mit identischen Materialien für die obere und die untere Platte können Einfluß der Napftiefe und der Napfgeometrie ermittelt werden. Dieses Ergebnis vereinfacht die Meßreihen erheblich.

Vorläufig ist dabei unterstellt, daß der für v gemachte Ansatz zutrifft. Dies muß sowohl rechnerisch als auch experimentell

nachgewiesen werden. Tatsächlich sind nämlich die Randwinkel von der Geschwindigkeit abhängig. Bei unterschiedlicher Geometrie der beiden Platten ist auch bei gleichen Materialien mit unterschiedlichen Randwinkeln zu rechnen, weil die Geschwindigkeiten örtlich verschieden sind.

Bei der eventuellen Verwendung von geänderten Längenmaßstäben ist von Interesse, ob die Volumenkräfte, d.h. die Schwerkraft vernachlässigt werden kann. Insbesondere stellt sich die Frage, bis zu welchen Abmessungen das Modell vergrößert werden darf, ohne das Meßergebnis aufgrund der auftretenden Schwerkraft unzulässig zu verfälschen. Eine Betrachtung der die Schwerkraft beinhaltenden Ähnlichkeitskennzahlen soll darüber Aufschluß geben.

Zuerst sei die Bond-Zahl betrachtet, die die Kapillarkraft und die Schwerkraft ins Verhältnis setzt. Gibt man vor, daß die Schwerkraft bis zu einer kritischen Bond-Zahl $Bo_{krit} = 0,1$ vernachlässigbar ist, so ergibt sich eine dazugehörige Abmessung $R_{zul} = 0,6$ [mm]. Eine derartige Vergrößerung des Modells würde die Messungen erheblich vereinfachen.

Aus den Bewegungsgleichungen ist zu ersehen, daß die Schwerkraft im Vergleich zu den Trägheitskräften dann vernachlässigbar ist, wenn der Quotient Bo/We klein wird. Mit der Forderung $(Bo/We)_{krit} \leq 0,1$ folgt, daß die Schwerkraft vernachlässigbar ist bis zu Plattengeschwindigkeiten von $U \geq 0,7$ [m/s].

Schließlich folgt für den Term $Bo/(We/Re)$ mit den obengenannten Werten: $Bo/(We/Re) \leq 0,21$, d.h., daß die Schwerkraft auch gegenüber den viskosen Kräften vernachlässigt werden darf.

Zusammenfassend kann daher gesagt werden, daß bis zu Geschwindigkeiten von ca. $0,7$ [m/s] und charakteristischen Tropfenradien bis zu $0,6$ [mm] die Schwerkraft vernachlässigt werden kann.

2.3 Abschätzung der Kavitation in Druckwerken

Bei den Versuchen mit dem Parallel-Platten-Tackmeter wurde Unterdruck erzeugt, es führt daher eine eventuell auftretende Kavitation offenbar nicht sofort zum Abreißen der Flüssigkeitssäule. Das liegt daran, daß das Blasenwachsen Zeit erfordert, und erst Blasen ab einer bestimmten Größe lassen die Flüssigkeit reißen. Die charakteristische Zeit des Farbspaltungsprozesses, z.B. die Verweildauer im Unterdruckgebiet des Walzenspaltes, ist kleiner als 1 ms. Es bleibt die Frage, mit welcher Volumenänderungsgeschwindigkeit Kavitationsblasen beim Durchlaufen des Walzenspaltes wachsen können. Dies sei im folgenden abgeschätzt.

Die sog. Rayleigh-Plesset-Gleichung (13) beschreibt das Wachstum von Gasblasen in Flüssigkeiten. Σp bezeichnet darin die Summe von Gasdruck, Dampfdruck und Umgebungsdruck. Sie ist ausführlich hergeleitet in /18/¹ und lautet

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 + \frac{4}{\rho} \eta \frac{\dot{R}}{R} + \frac{2\gamma}{\rho} \frac{1}{R} + \frac{\Sigma p}{\rho} = 0 \quad (13)$$

Bei (13) handelt es sich um eine nichtlineare Differentialgleichung zweiter Ordnung, die analytisch nicht gelöst werden kann. Deshalb wird die Gleichung mit Hilfe des Runge-Kutta-Verfahrens numerisch gelöst. Zur Entdimensionierung verwenden wir die typische Zeit $T = \eta^3/(\gamma^2\rho)$, die typische Länge $L = \eta^2/(\gamma\rho)$ und einen "Staudruck" ρU^2 . Damit entsteht aus (13):

$$\ddot{R} + \frac{3}{2} \frac{\dot{R}^2}{R} + 4 \frac{\dot{R}}{R^2} + \frac{2}{R^2} + Ca^2 \frac{p_\infty}{R} = 0 \quad (14)$$

¹ Ausgehend von einer kugelsymmetrischen Potentialströmung wurden verschiedene Korrekturglieder für den Einfluß von Zähigkeit und Oberflächenspannung eingeführt.

Alle in (14) auftretenden Größen sind dimensionslos. Ca bezeichnet die Kapillarzahl:

$$Ca = \frac{U \eta}{\gamma} \quad (15)$$

Wir gehen von den Randbedingungen (16) aus, die den Ausgangsdurchmesser mit $R_0 = 1$ (dimensionslos) und die Startgeschwindigkeit mit 0 (dimensionslos) festlegen.

$$R(t=0) = R_0 = 1. ; \quad \dot{R}(t=0) = 0. \quad (16)$$

Die typischen Zeiten und Kapillarzahlen ergeben sich aus Praxiswerten für Oberflächenspannung, Viskosität und Druckgeschwindigkeit für die unterschiedlichen Druckverfahren (Tabelle 1). Dort ist zusätzlich der dimensionslose Zeitbereich t angegeben. Dabei wird davon ausgegangen, daß ein Kavitationskeim ca. 0,1 [ms] im Unterdruckgebiet verweilt.

Größe	Tiefdruck	Flexodruck	Bogenoffset	Rollenoffset
η [Pa s]	0,02	0,02	10	1
γ [N/m]	0,03	0,03	0,035	0,035
ρ [kg/m ³]	850	850	1000	1000
T [s]	$\approx 7,7 \cdot 10^{-6}$	$\approx 7,7 \cdot 10^{-6}$	≈ 102	$\approx 0,816$
t	0...10	0...10	$0 \dots 10^{-6}$	$0 \dots 10^{-4}$
U [m/s]	10	4	1	6
Ca	$\approx 6,7$	$\approx 2,7$	≈ 140	≈ 170

Tabelle 1: Dynamische Größen für unterschiedliche Druckverfahren

Unter Vernachlässigung der Trägheitskräfte ($\ddot{R}=0$) wird aus (14):

$$4 \frac{\dot{R}}{R^2} + \frac{2}{R^2} + Ca^2 \frac{p_\infty}{R} = 0. \quad (17)$$

Diese Differentialgleichung läßt sich geschlossen lösen und es folgt mit den genannten Randbedingungen (16):

$$R(t) = \left[1 + \frac{2}{p_{\infty} Ca^2} \right] \cdot e \left(- \frac{p_{\infty} Ca^2}{4} t \right) - \frac{2}{p_{\infty} Ca^2} . \quad (18)$$

Es ist nicht bekannt, wie niedrig die Drücke im Unterdruckgebiet des Walzenspaltes tatsächlich sind. Auch ist nicht bekannt, wie lang die Verweilzeit der Blase in diesem Unterdruckgebiet ist. Wenn man jedoch von einer Verweilzeit im Unterdruckgebiet von ca. 0,1 [ms] ausgeht, und einen konstant anliegenden Unterdruck von 1 [bar] = 10^5 [Pa] annimmt, so vergrößert sich eine Blase in dieser Zeit beim Offsetdruck auf das 1,5- bis 2-fache ihrer ursprünglichen Größe. Dieses bedeutet, daß vermutlich die Wirkung der Kavitation nicht ausreicht, um das Reißen des Farbfilmes zu bewirken. Beim Tief- und Flexodruck ergeben sich erheblich größere Werte für das Blasenwachstum, es ist jedoch unwahrscheinlich, daß dort ein so hoher Unterdruck erzeugt wird wie im Offsetverfahren. Dennoch erscheint für die letztgenannten Druckverfahren ein merklicher Einfluß der Kavitation auf die Farbspaltung wahrscheinlich.

Der Unterdruck liegt zeitlich nicht konstant an, sondern ist über die Verweildauer t_e beispielsweise sinusförmig verteilt. Dann wirken zu Beginn die Kapillarkräfte, die ein Zusammenfallen der Blase bewirken wollen, dem Umgebungsdruck entgegen. Dadurch wächst die Blase nur langsam, bzw. verkleinert sich zunächst.

(17) nimmt die Form an:

$$4 \frac{\dot{R}}{R^2} + \frac{2}{R^2} + Ca^2 \frac{p_{\infty} \cdot \sin\left(\pi \frac{t}{t_e}\right)}{R} = 0. \quad (19)$$

Mit dem integrierenden Faktor $\mu(t) = \exp \left\{ - \frac{Ca^2 p_{\infty} t_e}{4\pi} \cos\left(\pi \frac{t}{t_e}\right) \right\}$

führt (19) auf eine exakte Differentialgleichung, für die wegen des darin auftretenden Integrals $\int \exp \left\{ - \frac{Ca^2 p_{\infty} t_e}{4\pi} \cos\left(\pi \frac{t}{t_e}\right) \right\} dt$

eine geschlossene Lösung nicht bekannt ist.

Die vollständige Gleichung (14) wird mit Hilfe des Runge-Kutta-Verfahrens numerisch gelöst. In den folgenden Darstellungen ist für unterschiedliche Materialeigenschaften der Blasenradius über der Zeit aufgetragen.

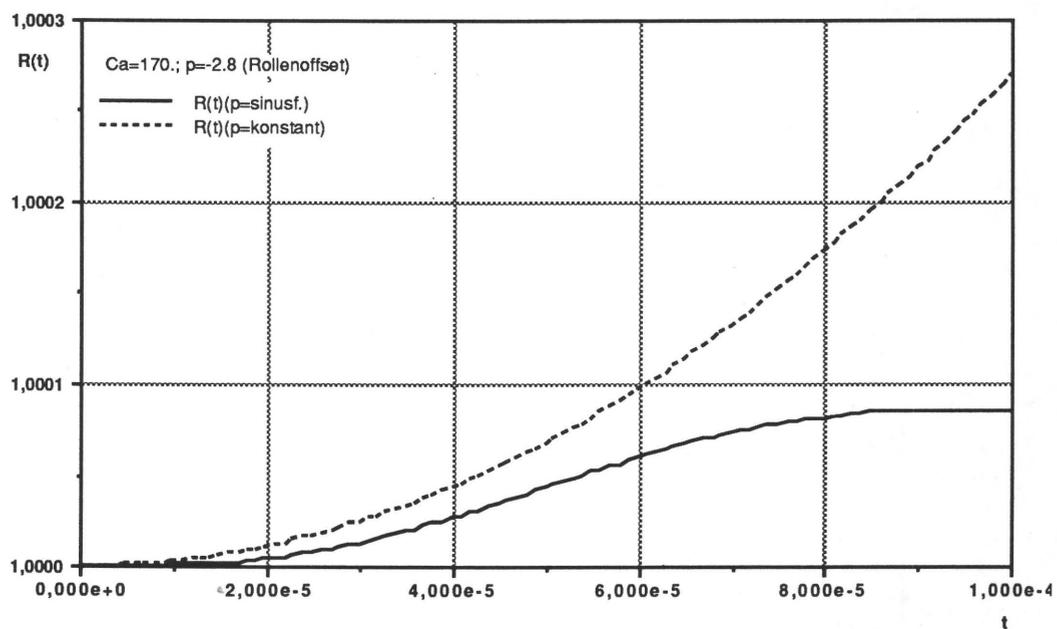


Bild 10: Blasenwachstum mit typischen Zahlenwerten für Rollenoffset

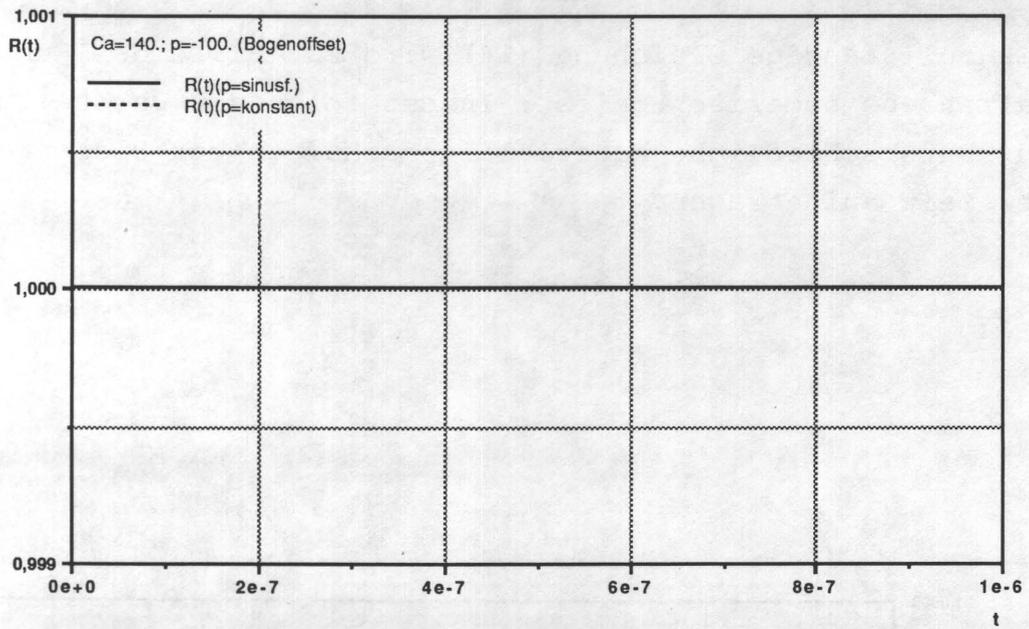


Bild 11: Blasenwachstum mit typischen Zahlenwerten für Bogenoffset

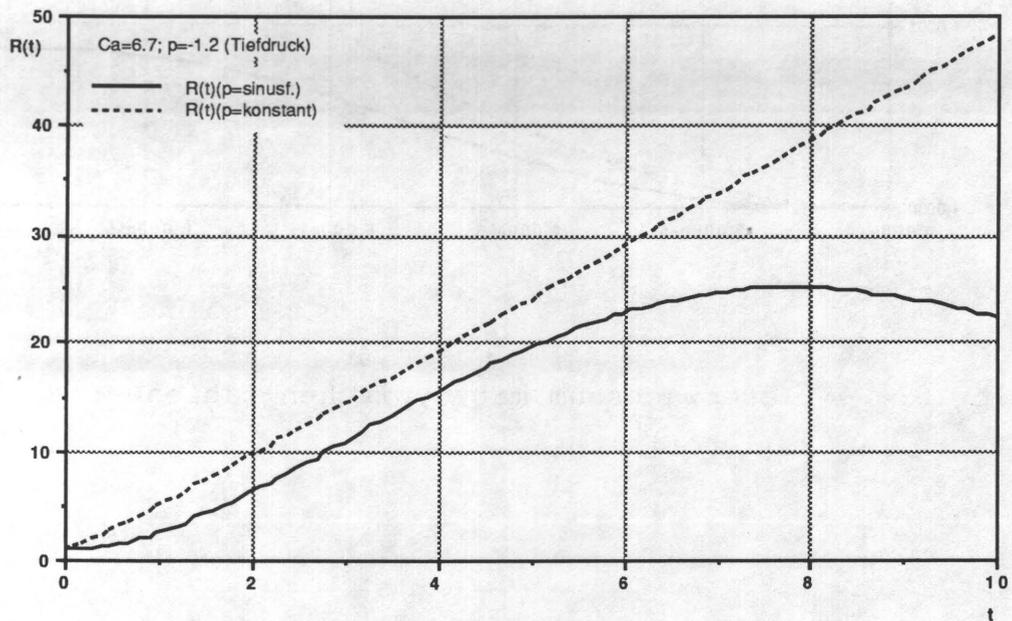


Bild 12: Blasenwachstum mit typischen Zahlenwerten für Tiefdruck

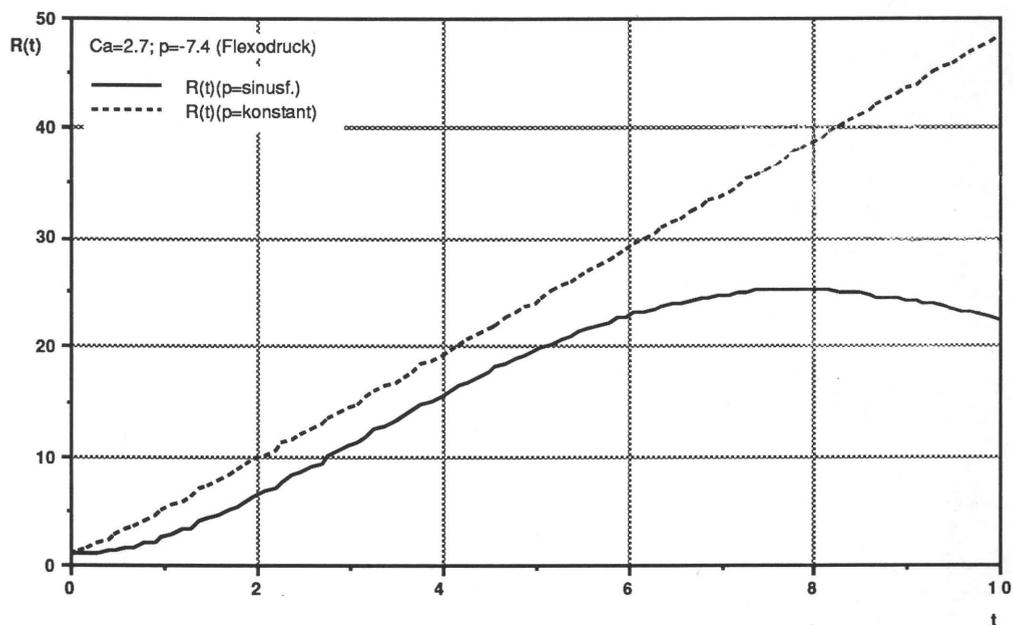


Bild 13: Blasenwachstum mit typischen Zahlenwerten für Flexodruck

Insgesamt zeigt sich, daß die Verweildauer eines Kavitationskeimes im Unterdruckgebiet des Walzenspaltes nicht ausreicht, um ein die Farbspaltung merklich beeinflussendes Anwachsen des Keimes zuzulassen. Dabei muß man davon ausgehen, daß die Keime in der Größenordnung von $0,2 \text{ } [\mu\text{m}]$ sind. Der für die Rechnungen zugrundegelegte dimensionslose Druck entspricht jeweils einem Unterdruck von 1 [bar] . Bei dünnflüssigen Druckfarben wird dieser Unterdruck vermutlich nicht erreicht.

3. Experimenteller Teil

Bereits in der Phase der Antragstellung wurde ein Parallel-Platten-Tackmeter (PPT) konstruiert mit der Absicht, mit einem preisgünstigen Gerät die errechneten Farbzugkräfte auf experimentellem Wege zu bestätigen. Am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren gehen erste Berechnungen zum Tack auf Kronenberger /19/ zurück. Darauf aufbauend bestimmt Kühlmeyer /20/ nach Formel (20) den zeitlichen Verlauf der Trennkraft $F(t)$,

$$F(t) = \frac{3 \pi \eta r_0^4}{4t} \cdot \left(\frac{1}{h(t)^2} - \frac{1}{h_0^2} \right) \quad (20)$$

und kommt für die maximal übertragbare Kraft in Abhängigkeit vom Ausgangsplattenabstand auf:

$$F_{\max} = 1,31 \cdot \frac{h r_0^4 a^{0,5}}{h_0^2} \quad (21)$$

Die bei den Messungen aufgezeichneten zeitlichen Verläufe für die sich ergebende Trennkraft entsprechen qualitativ den theoretischen Verläufen. Bild 14 zeigt den Verlauf nach (20), Bild 15 den Verlauf nach (21).

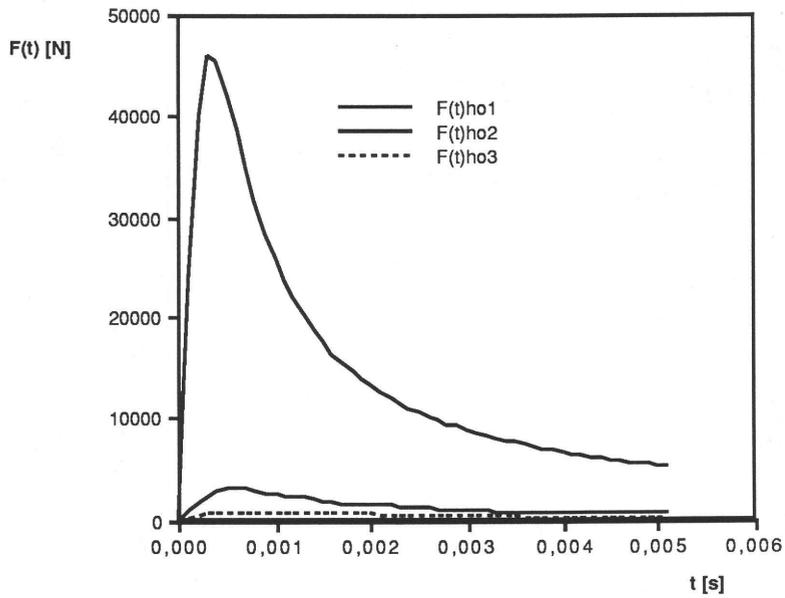


Bild 14: Theoretischer Trennkraftverlauf über der Zeit

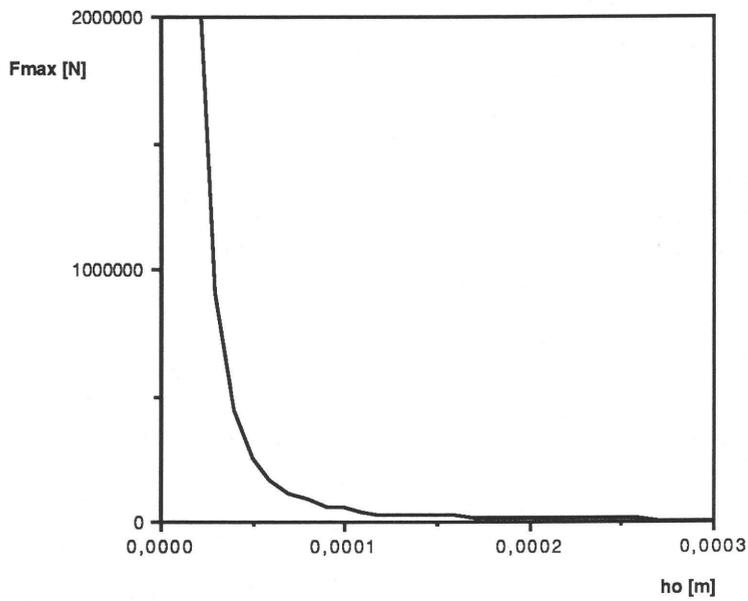


Bild 15: Maximale Kraft in Abhängigkeit vom Ausgangsplattenabstand

3.1 Versuche mit dem Parallel-Platten-Tackmeter

3.1.1 Allgemeines und Aufbau

Zur Abschätzung der in Druckwerken auftretenden Beschleunigungen ergibt sich zunächst anhand Bild 16 für die Spaltweitengrößen δ_1 und δ_2 :

$$\delta_1 = R_1 [1 - \cos(\omega_1 t)] \quad (22a)$$

$$\delta_2 = R_2 [1 - \cos(\omega_2 t)], \quad (22b)$$

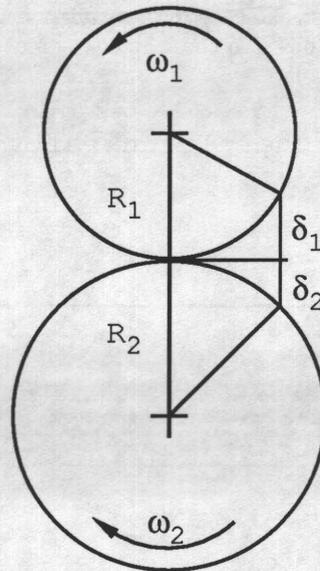


Bild 16: Geometrie des Walzenspalts

womit der Gesamtabstand die Form annimmt:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = R_1 [1 - \cos(\omega_1 t)] + R_2 \left[1 - \cos\left(\frac{R_1}{R_2} \omega_1 t\right) \right] \quad (23)$$

Durch zweimaliges Differenzieren nach der Zeit t folgt aus (23) für die Beschleunigung:

$$\ddot{\delta} = \frac{d^2\delta}{dt^2} = R_1 \omega_1^2 \cos(\omega_1 t) + R_2 \left(\frac{R_1}{R_2} \omega_1 \right)^2 \cos\left(\frac{R_1}{R_2} \omega_1 t \right) \quad (24)$$

was sich für gleiche Radien und damit auch gleiche Winkelgeschwindigkeiten verkürzt auf:

$$\ddot{\delta} = 2 R \omega^2 \cos(\omega t) \quad (25)$$

Da die betrachteten Winkel ωt offenbar sehr klein sind, folgt mit guter Näherung:

$$\ddot{\delta} = 2 R \omega^2 = 2 \frac{U^2}{R} \quad (26)$$

worin U die Umfangsgeschwindigkeit bedeutet.

Für den Tiefdruck und den Flexodruck ergeben sich daraus für die Beschleunigungen, mit denen die Farben getrennt werden die derzeitigen Grenzwerte für die Praxis:

Tiefdruck: $U = 12 \text{ m/s}$, $R = 0,2 \text{ m}$

$$\ddot{\delta}_{\text{Tiefdruck}} = 1440 \text{ m/s}^2 \cong 150 \text{ g}$$

Flexodruck: $U = 6 \text{ m/s}$, $R = 0,1 \text{ m}$

$$\ddot{\delta}_{\text{Flexodruck}} = 720 \text{ m/s}^2 \cong 75 \text{ g}$$

Bereits vor Beginn des Forschungsvorhabens wurde ein sog. Parallel-Platten-Tackmeter (PPT) konstruiert und gebaut. Die oben genannten sehr großen Beschleunigungen, mit denen beim Drucken zumindest größenordnungsmäßig zu rechnen ist, werden mit einer Druckfeder als Antrieb realisiert. Bei Betätigung des PPT wird die Druckfeder schlagartig freigegeben, und es ergibt sich

eine zur Federvorspannung proportionale Beschleunigung. Bild 17 zeigt eine Prinzipskizze des PPT, Bild 18 eine Fotografie des PPT.

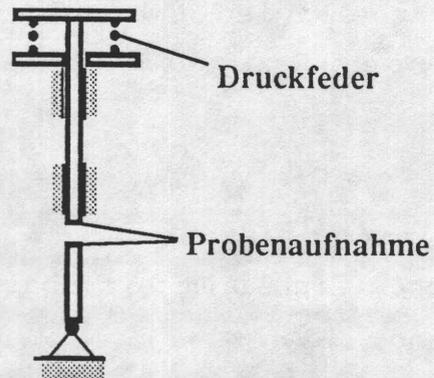


Bild 17: Prinzipskizze des Parallel-Platten-Tackmeter

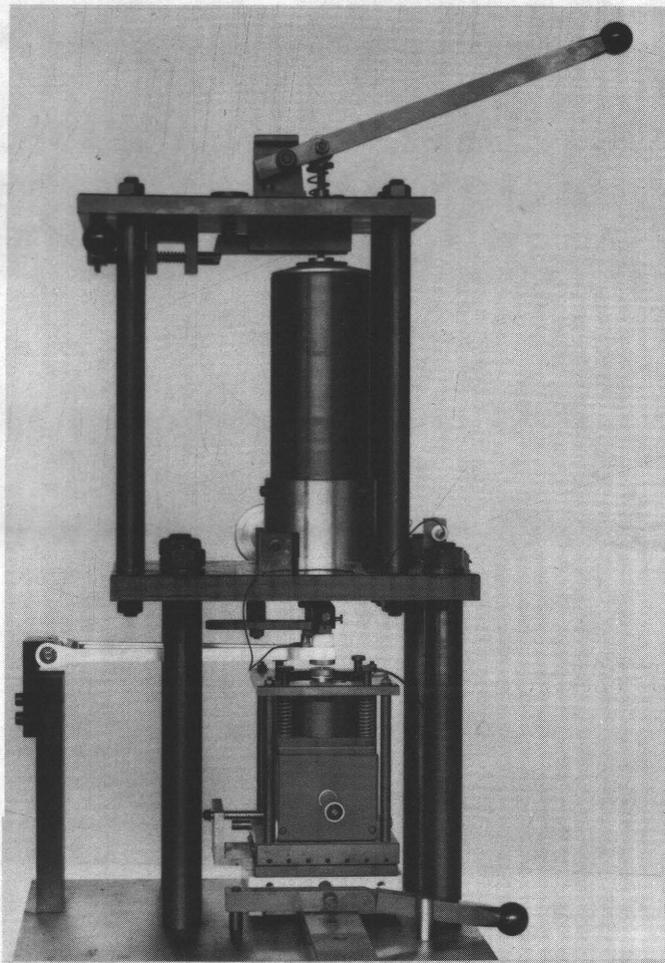


Bild 18 a: Das Parallel-Platten-Tackmeter (Gesamtansicht)

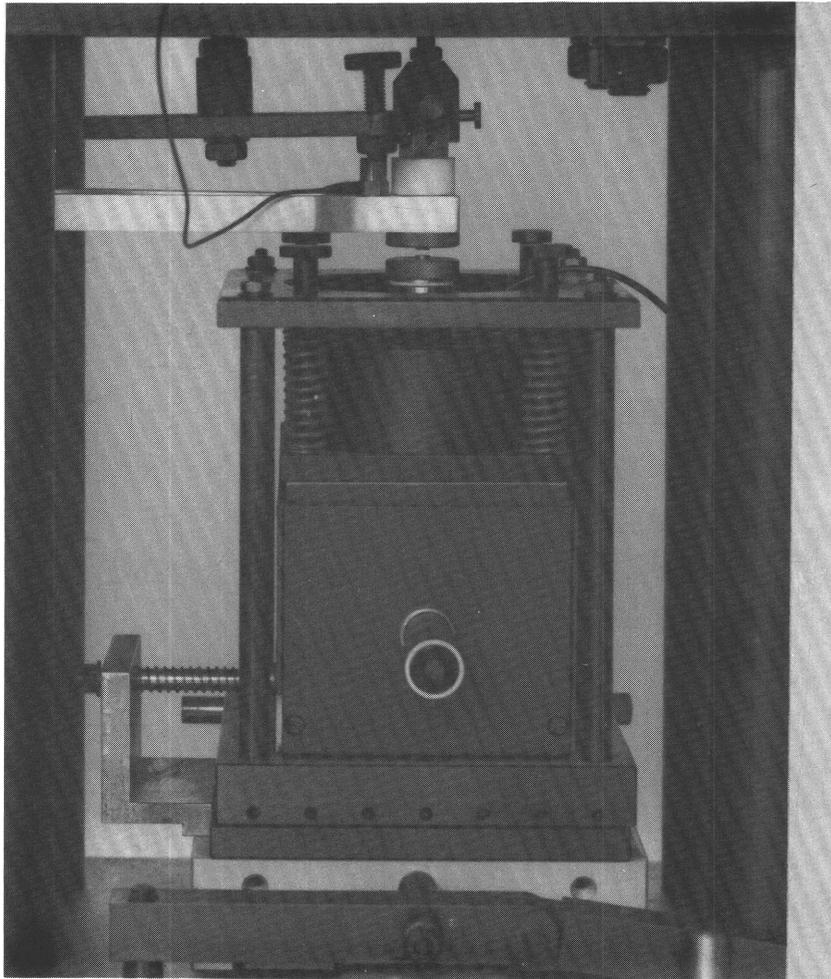


Bild 18 b: Das Parallel-Platten-Tackmeter (Detail der Platten)

Der untere Teil im Bild enthält einen piezokeramischen Kraftaufnehmer; die durch den Flüssigkeitstropfen übertragene Kraft kann gemessen werden. Der obere Teil, der konstruktiv als drehbarer Hebel ausgeführt ist, trägt einen piezokeramischen Beschleunigungsaufnehmer. Beide Größen dienen zur Überprüfung des physikalischen Modells.

Die Signale werden über Ladungsverstärker und Digital-Speicher-Oszilloskop (LeCroy 3400) an einen Personal Computer (Atari 1040) übertragen. Den Meßaufbau veranschaulicht Bild 19. Mit dem PC erfolgt die weitere Auswertung. Es wurde ein Basic-Programm entwickelt, das die Versuchsdurchführung und Auswertung im Dialogbetrieb ermöglicht. Dabei werden aus den gemessenen Daten durch Integration Geschwindigkeit und Weg berechnet. Durch Eliminierung des Parameters Zeit wird der Verlauf Kraft über Weg ermittelt. Wegen leichter Oszillationen der Wegkoordinate ist dieser Zusammenhang nicht eindeutig. Es wurde ein spezieller

Algorithmus entwickelt, um den Kraft-Weg-Verlauf darstellen zu können. So läßt sich leicht der bei Auftreten der Maximalkraft zurückgelegte Weg und ggf. die eingebrachte Energie bestimmen.

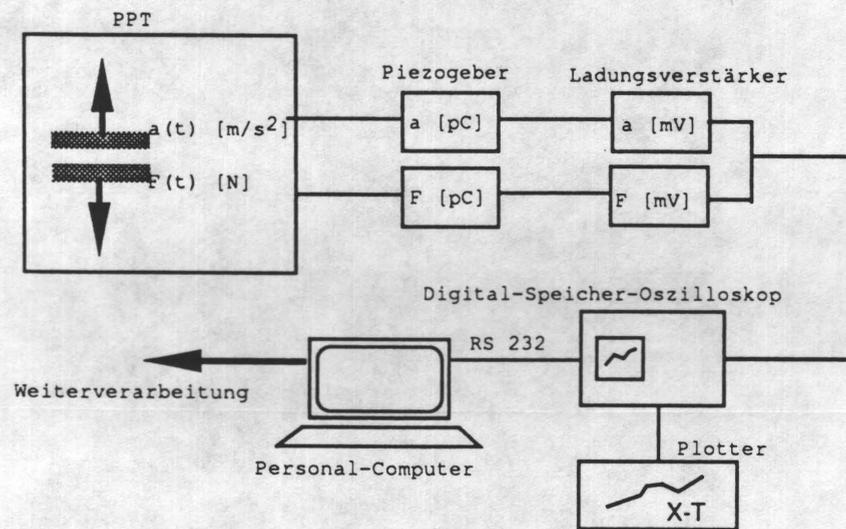


Bild 19: Meßaufbau des Tackmeter-Versuchsstandes

3.1.2 Versuchsdurchführung

Die Messungen mit dem Parallel-Platten-Tackmeter (PPT) wurden mit Normalölen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) durchgeführt. Diese Öle zeichnen sich durch eine in einem weiten Schergeschwindigkeitsbereich gültige Linearität des Schubspannungsverlaufes aus und werden daher auch zur Eichung von Viskosimetern benutzt. Tabelle 2 zeigt die Liste der verwendeten Öle:

Bezeichnung	Dyn. Viskosität [Pa s]	Dichte 10^3 [kg/m ³]	kin. Viskosität 10^{-3} [m ² /s]
200 A	0,2281	0,9205	0,2478
2000 A	1,9410	0,8998	2,1570
20000 B	27,5400	0,8815	31,2500

Die angegebenen Werte gelten für eine Temperatur von 20 °C.

Tabelle 2: Materialwerte der Normalöle

Es wurden Versuche mit oben und unten gleichen Platten durchgeführt, dabei wurden zwei verschiedene Durchmesser untersucht. Bild 20 zeigt die Plattenpaare.

Bilder 21 bis 26 zeigen gemessene Trennkraftverläufe.

Die Bilder 27, 28 und 29 zeigen typische Verläufe für Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg der oberen Platte beim Tackmeterversuch. Die Höhe der Beschleunigung erscheint praktisch unabhängig von Viskosität und Ausgangsplattenabstand, d.h. daß die Antriebsfeder im PPT ausreichend dimensioniert ist. Die Beschleunigungen liegen im Bereich von 850 bis 1000 m/s^2 , also etwa 100 g.

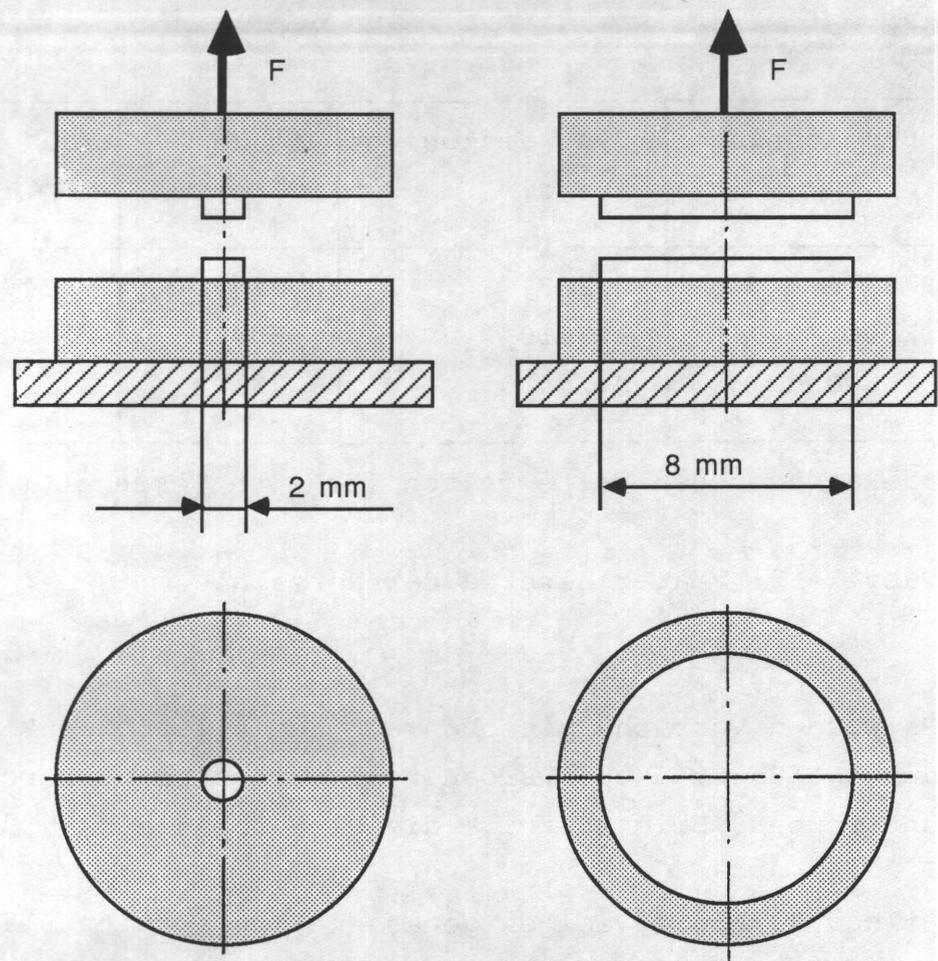


Bild 20: Platten für den PPT-Versuch

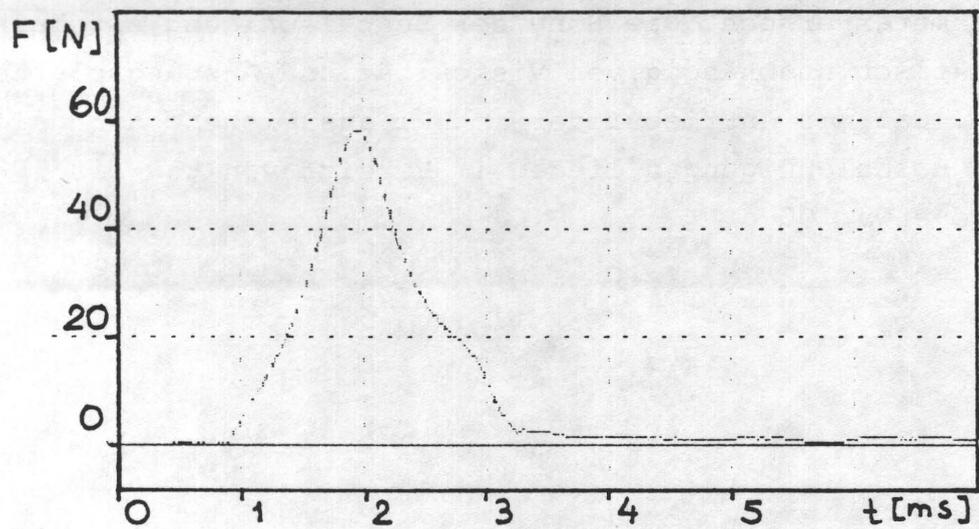


Bild 21: Trennkraftverlauf Öl 20000 B,
Grundfläche 210 mm^2 , $h_0=300 \mu\text{m}$

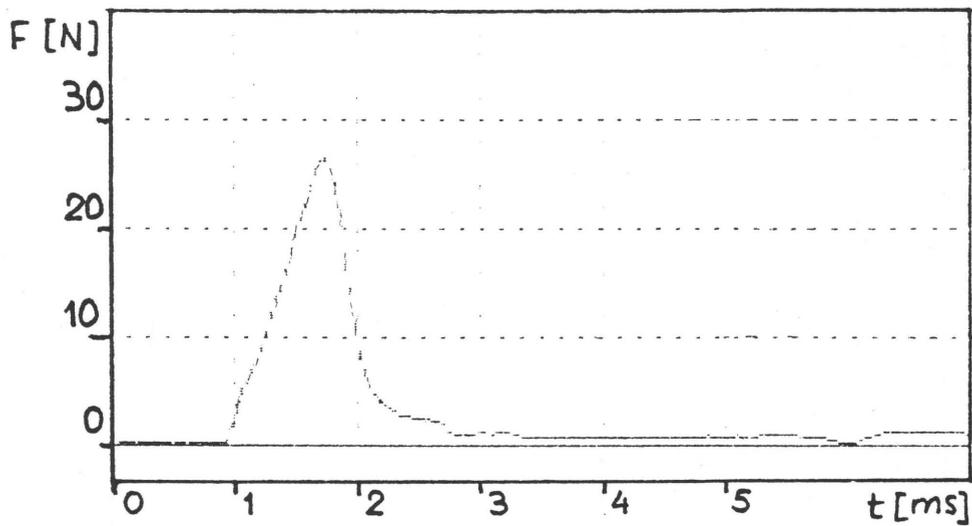


Bild 22: Trennkraftverlauf Öl 20000 B,
Grundfläche $12,6 \text{ mm}^2$, $h_0=100\mu\text{m}$

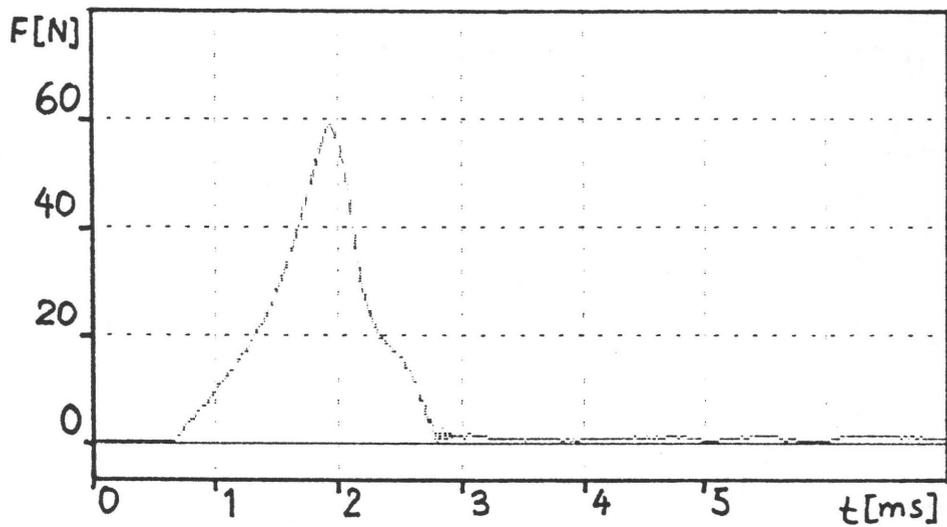


Bild 23: Trennkraftverlauf Öl 2000 A,
Grundfläche 210 mm^2 , $h_0=300\mu\text{m}$

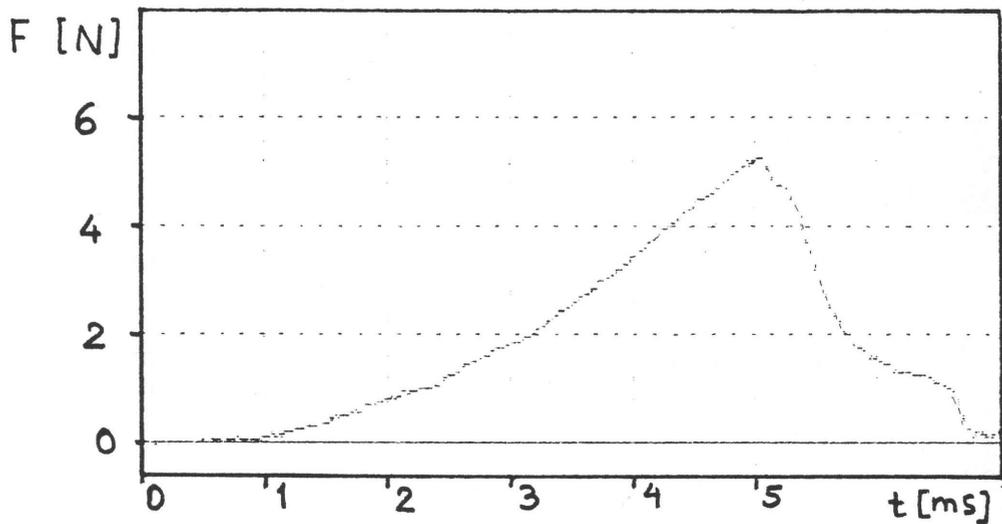


Bild 24: Trennkraftverlauf Öl 2000 A,
Grundfläche $12,6 \text{ mm}^2$, $h_0=150\mu\text{m}$

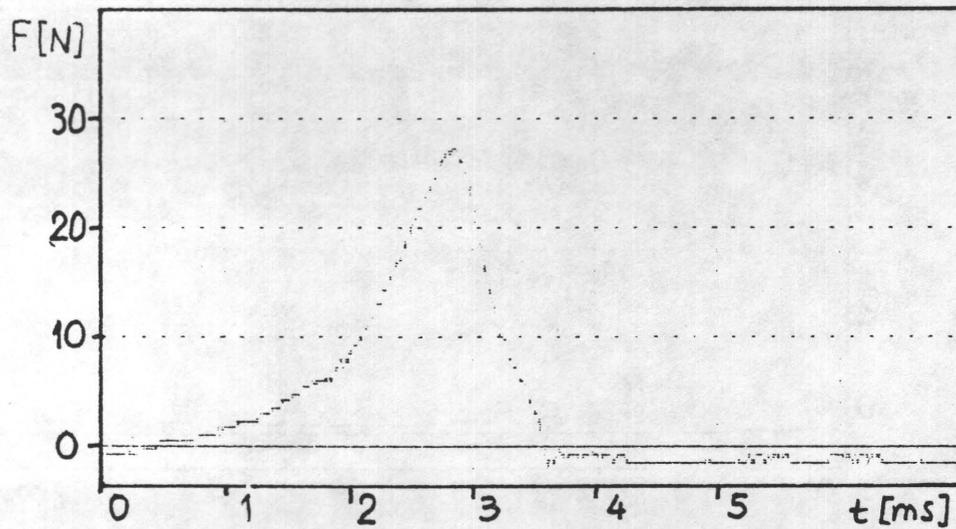


Bild 25: Trennkraftverlauf Öl 200 A,
Grundfläche 210 mm^2 , $h_0=300\mu\text{m}$

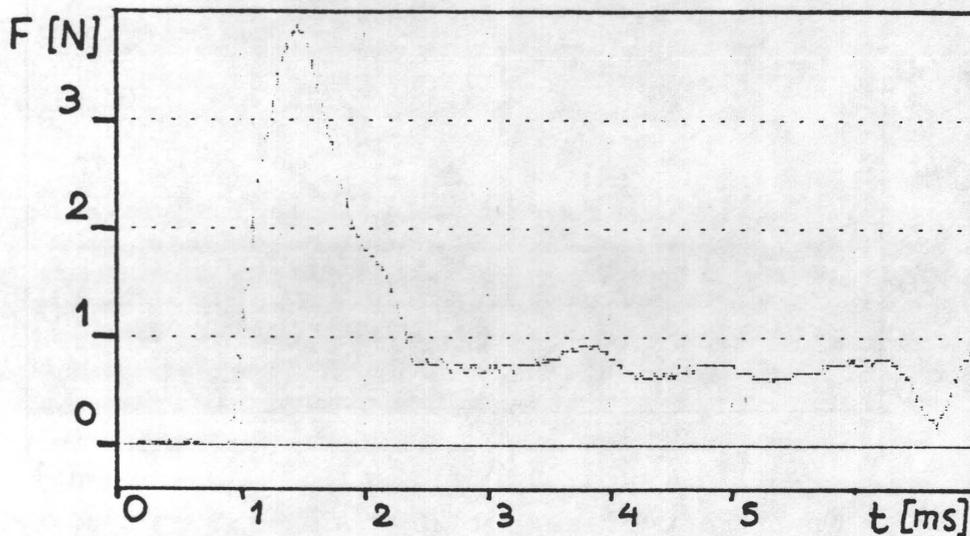


Bild 26: Trennkraftverlauf Öl 200 A,
Grundfläche $12,6 \text{ mm}^2$, $h_0=250\mu\text{m}$

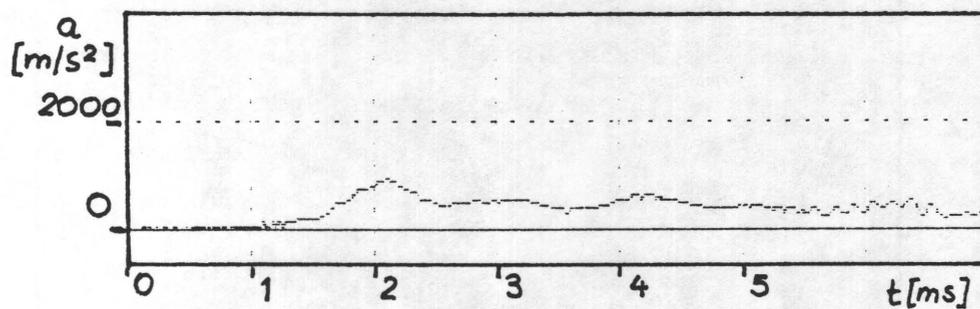


Bild 27: Typischer Beschleunigungsverlauf

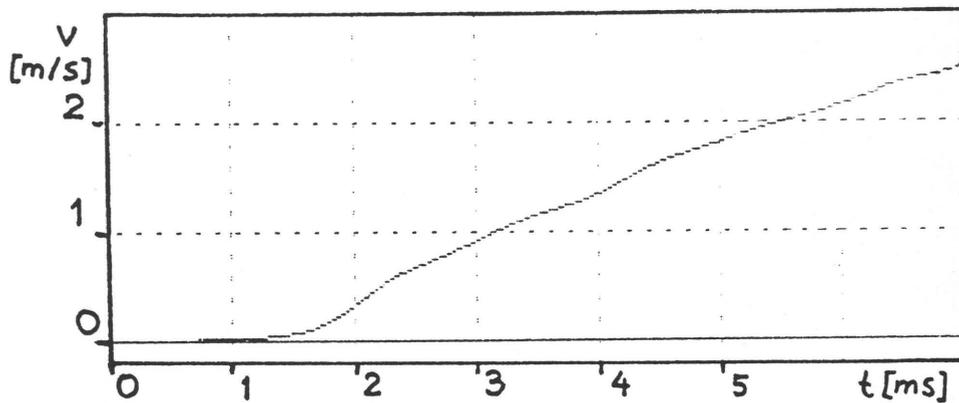


Bild 28: Typischer Geschwindigkeitsverlauf

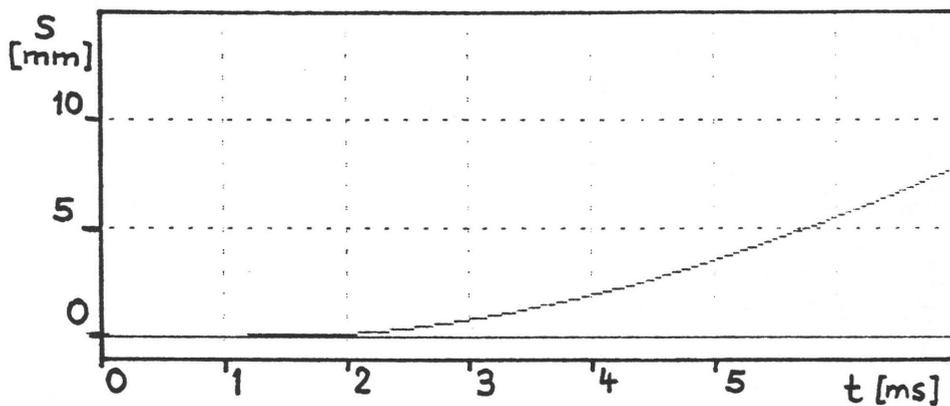


Bild 29: Typischer Wegverlauf

Die Bilder 30, 31, 32, 33 und 34 zeigen Trennkraft, erzeugten Unterdruck und Weg beim Erreichen der Maximalkraft in Abhängigkeit des Ausgangsplattenabstandes für die drei verschiedenen Öle und die beiden verschiedenen Plattenradien.

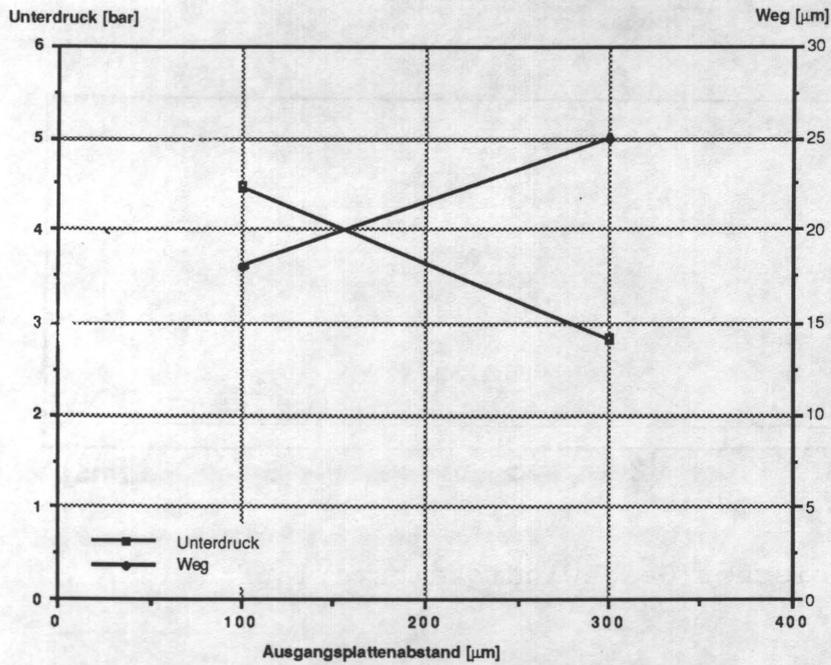


Bild 30: Unterdruck und Weg bis zum Erreichen der Maximalkraft für Öl 20000 B, Plattenradius 8mm

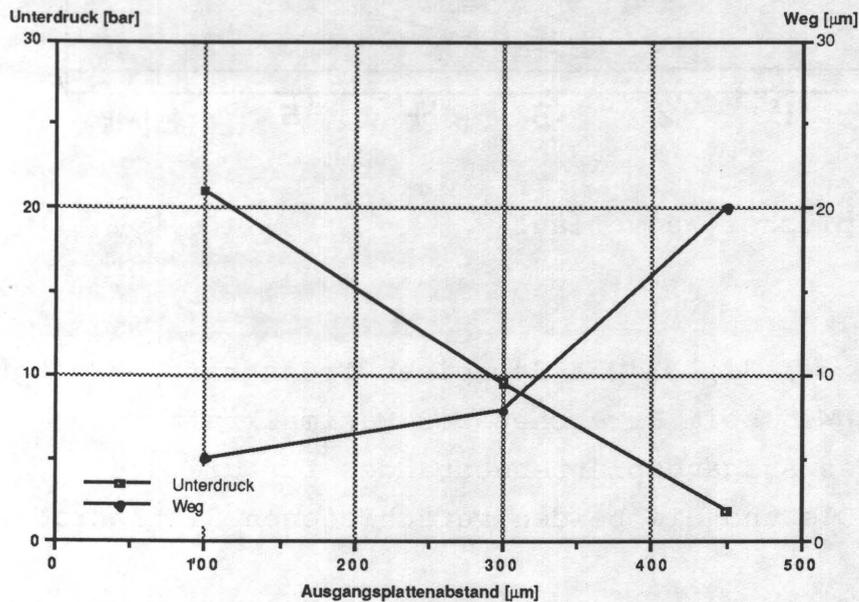


Bild 31: Unterdruck und Weg bis zum Erreichen der Maximalkraft für Öl 20000 B, Plattenradius 2mm

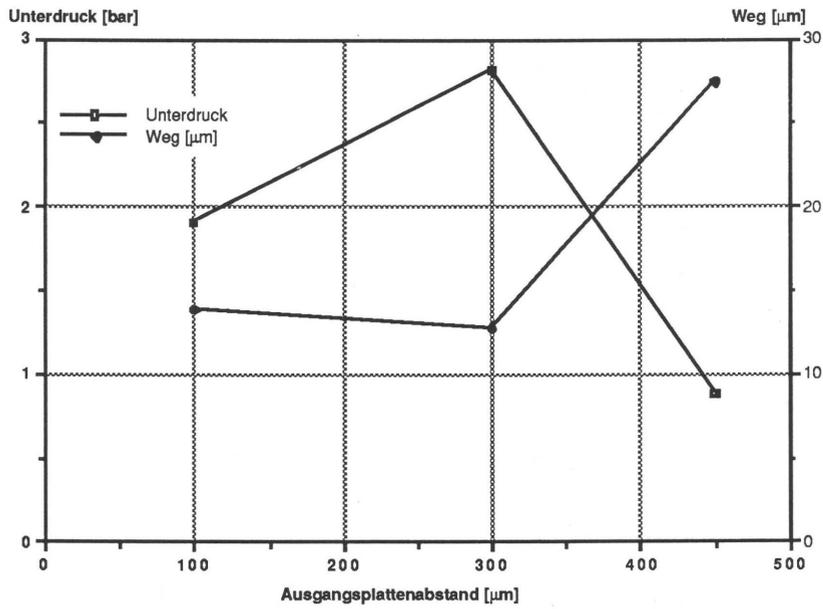


Bild 32: Unterdruck und Weg bis zum Erreichen der Maximalkraft für Öl 2000 A, Plattenradius 8mm

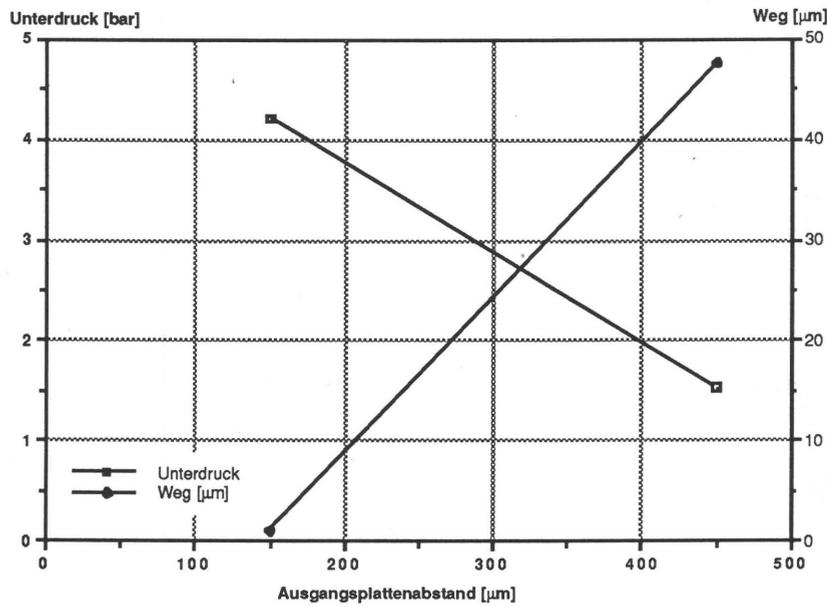


Bild 33: Unterdruck und Weg bis zum Erreichen der Maximalkraft für Öl 2000 A, Plattenradius 2mm

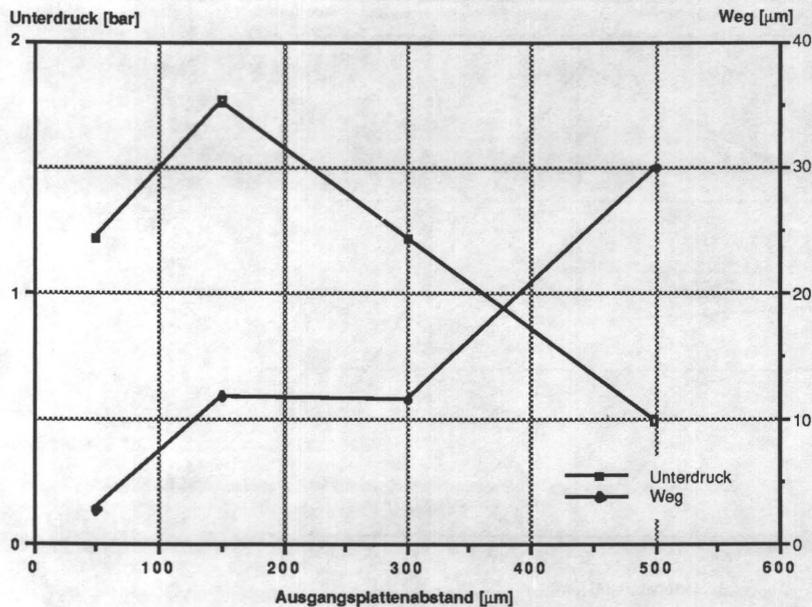


Bild 34: Unterdruck und Weg bis zum Erreichen der Maximalkraft für Öl 200 A, Plattenradius 8mm

3.1.3 Diskussion

Es zeigen sich z.T. große Abweichungen von den mit (20) und (21) errechneten Größen und nur in wenigen Fällen liegen Rechnung und Messung in derselben Größenordnung. Die auf die Grundfläche bezogene Trennkraft führt zu Unterdrücken bis zu 21 bar. Das bedeutet, daß die untersuchten Flüssigkeiten offenbar Zugspannungen übertragen können und die Kavitation nicht allein für das Reißen der Farbfäden verantwortlich ist. Das rührt daher, daß in der zur Verfügung stehenden Zeit die in der Flüssigkeit vorhandenen Blasen sich nicht genügend ausdehnen können. D.h., die Normalkräfte können sich voll auswirken und einen sehr hohen Tack verursachen. Bild 35 zeigt einen typischen Verlauf für die übertragene Kraft in Abhängigkeit des Weges der oberen Platte. Man erkennt, daß bereits nach sehr kleinem Weg die maximale Kraft auftritt.

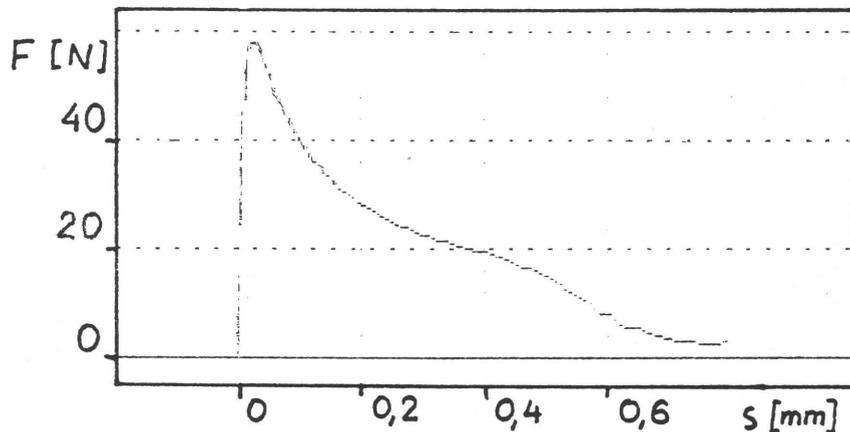


Bild 35: Typischer Kraft-Weg-Verlauf

Dennoch steigt für gegen Null gehenden Ausgangsplattenabstand die maximale Trennkraft nicht unendlich an. Vielmehr ist für einen bestimmten Wert des Ausgangsplattenabstandes ein Maximum feststellbar. Offenbar spielen dabei mehrere sich überlagernde Effekte eine Rolle:

(1) Durch hohe Zugkräfte schneller wachsende Kavitationsblasen und Instabilitäten der 2-Phasengrenzfläche, die das Einströmen von Luft nach innen begünstigen, führen zu Flüssigkeitsfäden und -lamellen, die geringen viskosen Widerstand zeigen.

(2) Die den Tack wesentlich beeinflussende Viskosität kann sich wegen der dabei vorliegenden Zweiphasenströmung nicht mehr auswirken. Eine Betrachtung des Grenzüberganges des Ausgangsplattenabstandes gegen Null macht dies plausibel: In diesem Fall wäre überhaupt keine Flüssigkeit, die Reibungsspannungen zulassen könnte, vorhanden. Beim Ausgangsplattenabstand Null muß also auch die Farbzugkraft Null sein. Dies deutet darauf hin, daß sich bei Vorliegen von Unstetigkeitsflächen die üblichen kontinuumsmechanischen Annahmen nicht ohne weiteres anwenden lassen.

Den Zähigkeitseinfluß veranschaulicht Bild 36. Es zeigt den erzeugten Unterdruck und Weg der oberen Platte bis zum Erreichen der maximalen Zugkraft in Abhängigkeit von der Viskosität.

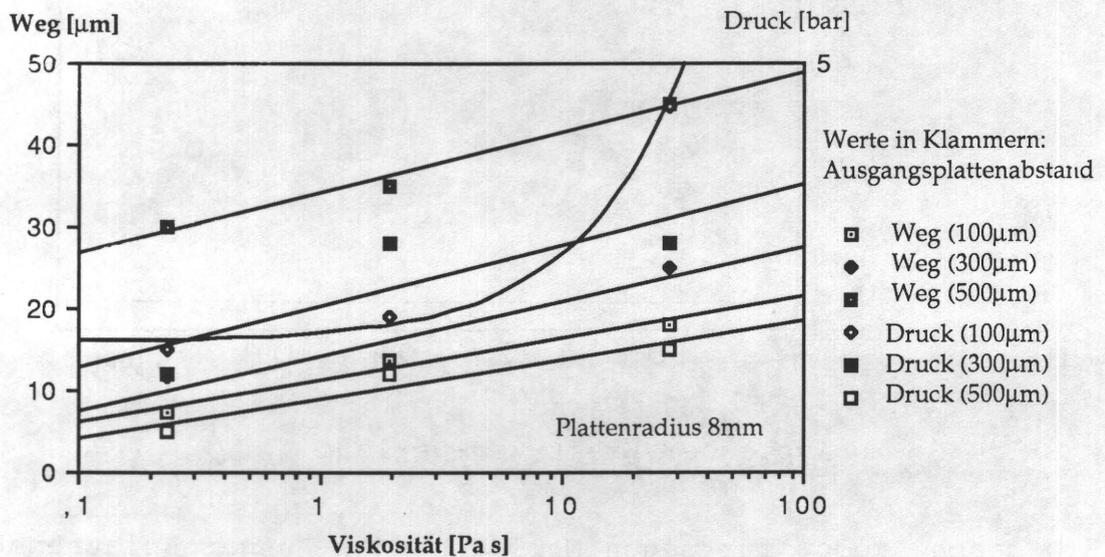


Bild 36: Unterdruck und Weg bis zum Erreichen der max. Zugkraft in Abhängigkeit der Viskosität für Plattenradius 8mm

Das PPT ermöglicht die Bestimmung der Farbzugkraft, des "Tacks", die tatsächlichen Strömungsverhältnisse werden aber nur unvollkommen simuliert:

(1) Die obere Platte wird von der feststehenden unteren Platte weggezogen. Aufgrund der Trägheit der Flüssigkeit wird die Volumenverteilung zuungunsten der oberen Platte verfälscht. Lediglich bei sehr langsamen Geschwindigkeiten, bei denen der Einfluß der Trägheitskräfte vernachlässigt werden kann, spielt dies keine Rolle.

(2) Das planparallele Auseinanderziehen der beiden Platten entspricht nicht der Wirklichkeit. Beim tatsächlichen Druckprozeß ist aufgrund der Krümmung der Walzen eine "Kerbwirkung", und damit ein verminderter Tack zu erwarten. Bei gerasterten Proben wird das vermieden.

(3) Das Einbringen der Probeflüssigkeit läßt sich dem Vorgang in der Druckmaschine nur unzureichend anpassen. Aus der Praxis ist bekannt, daß u.a. der Anstelldruck großen Einfluß auf die Farbübertragung hat. Beim vorhandenen PPT läßt sich dieser Anpreßdruck nicht einstellen, zudem ist die Anpreßdauer um einige Größenordnungen größer als in einer Druckmaschine, so daß z.B. eine eventuelle Saugfähigkeit des Bedruckstoffes (z.B. bei Papier) die Volumenverteilung verfälscht. Bei Versuchen mit Flexoklischees hat sich gezeigt, daß die Druckfarbe aufgrund ihrer Oberflächenspannung an den einzelnen Rasterpunkten des Klischees "hochkriecht", was zu einer vermehrten Farbübertragung führt.

(4) Das Einbringen von Papier und ähnlichen Bedruckstoffen ist nicht ohne weiteres möglich. Aber gerade hierfür ist der Tack eine interessante Größe, da die Rupffestigkeit des Papiers die entscheidende Einschränkung darstellt. Bei allen anderen Anwendungen steht allein die erzielte Volumenverteilung im Mittelpunkt des Interesses.

3.2 Die Strömung mit freier Oberfläche zwischen zwei Glasplatten

Da bei den Versuchen mit dem Parallel-Platten-Tackmeter geringere Kräfte gemessen wurden, als nach Gleichung (21) zu erwarten war, führte zu der Annahme, daß sich aufgrund hydrodynamischer Instabilitäten an der freien Oberfläche sog. "Luftfinger" bilden, die das Reißen der Flüssigkeit begünstigen. Dieser Effekt ist in ähnlicher Form bereits bekannt und wurde in einem klassischen Papier von Saffman und Taylor untersucht (/21/). Die bei den Untersuchungen an einer Hele-Shaw-Zelle aufgetretene Instabilität in der Form der freien Oberfläche wird als Saffman-Taylor-Instabilität bezeichnet. Ähnliche Untersuchungen für den bei uns vorliegenden rotations-symmetrischen Fall wurden von Paterson /22/ vorgenommen.

Die theoretische Behandlung der "Luftfinger" ist sehr schwierig. Diese Instabilität kommt daher, daß an der weiter innen liegenden Stelle der freien Oberfläche ein höherer Druckgradient entsteht, da ja der Außendruck als konstant angenommen wird. Daher weitet sich ein durch eine Anfangsstörung einsetzender "Finger" weiter aus. Bild 37 veranschaulicht diesen Effekt.

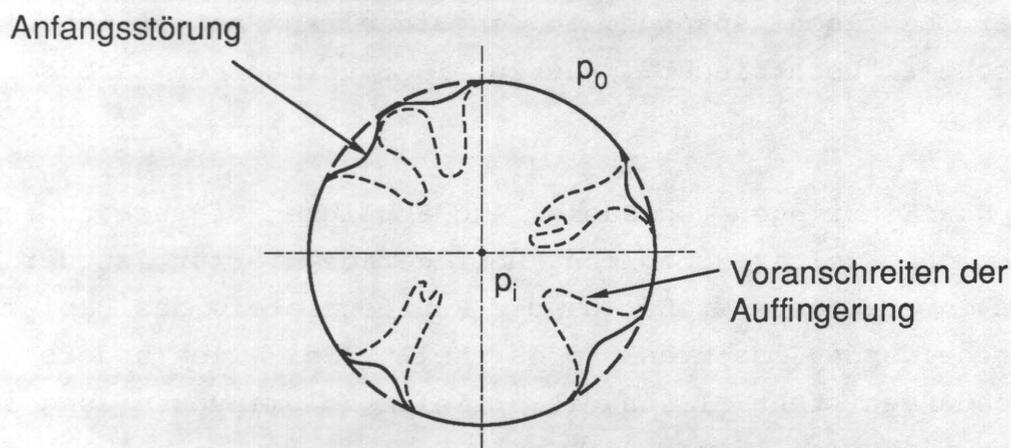


Bild 37: Skizze eines in eine Flüssigkeit eindringenden Luftfingers

Für das Drucken ist es von wesentlichem Interesse, ob diese Instabilitäten überhaupt auftreten. Deshalb wurden zu dieser Frage grundsätzliche Experimente durchgeführt mit der in Bild 38 dargestellten Vorrichtung. Durch einen geeigneten Antriebsmechanismus lassen sich die beiden Glasplatten definiert voneinander entfernen, wobei die dazwischen befindliche Flüssigkeit mit einem Makroskop beobachtet werden konnte.

Die betrachteten Flüssigkeitsmengen sind größer als das materielle Volumen realer Druckpunkte, aber das Verhältnis Schichtdicke (=Ausgangsplattenabstand) zu Radius ist in derselben Größenordnung, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die gezeigte Instabilität auch bei praxisrelevanten Abmessungen auftritt.

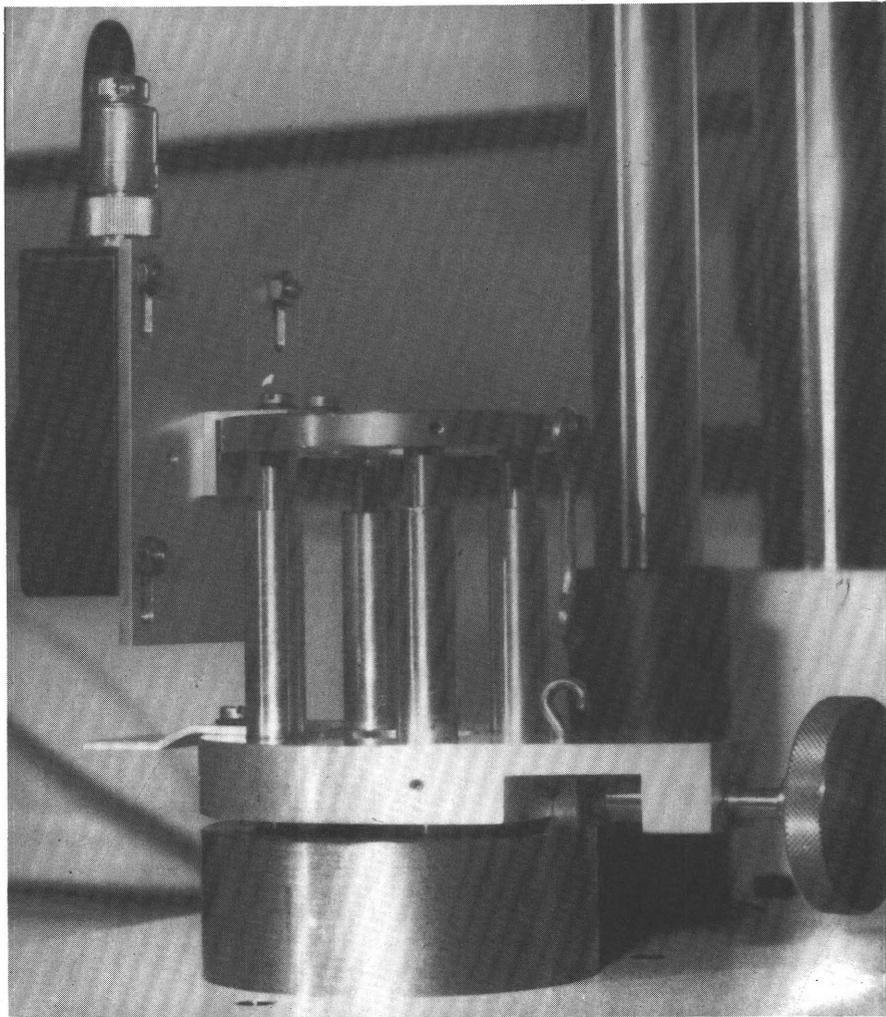
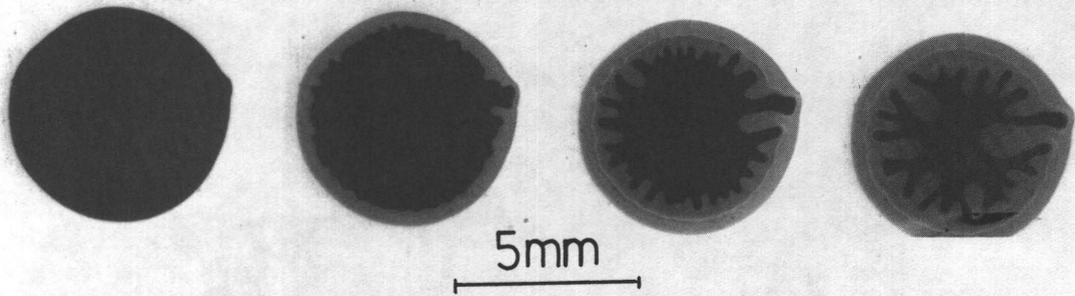


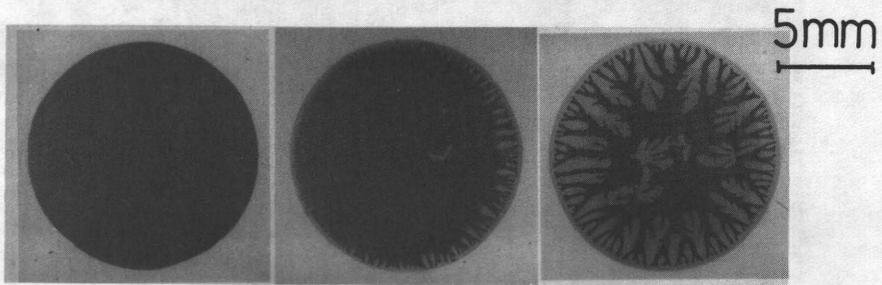
Bild 38: Vorrichtung zur Beobachtung von Instabilitäten an
 der freien Oberfläche von Flüssigkeiten

Die Untersuchungen wurden durchgeführt a) mit gelber Offsetdruckfarbe und b) mit gelber Flexodruckfarbe. Die folgenden Bilder 39 bis 41 zeigen das Voranschreiten der Auffingerung bei unterschiedlichen Plattenabständen.



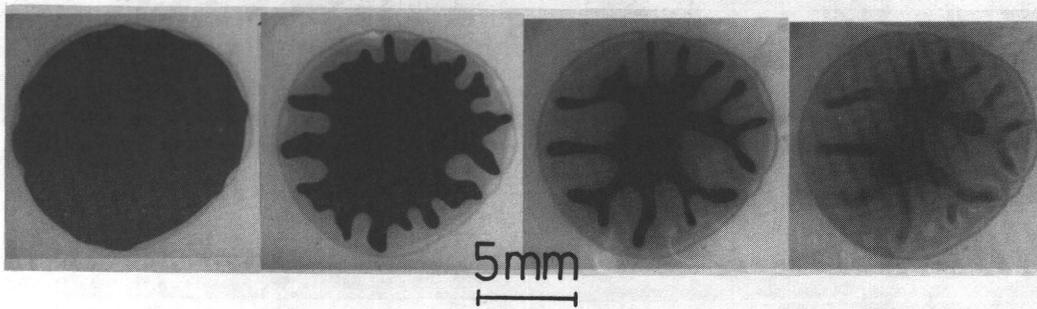
Plattenabstand von links nach rechts:
 0 7 35 94 [μm]

Bild 39: Auffingerung bei Offsetfarbe



Plattenabstand von links nach rechts:
 0 8 11 [μm]

Bild 40: Auffingerung bei Offsetfarbe



Plattenabstand von links nach rechts:
 0 17 56 327 [μm]

Bild 41: Auffingerung bei Flexofarbe

Es wird die Tendenz deutlich, daß der Auffingerungseffekt bei relativ größerer Schichtdicke zurückgeht. Da der Auffingerungseffekt den Tack offenbar vermindert, kann davon ausgegangen werden, daß der auf die Grundfläche eines Druckpunktes bezogene Tack bei kleinen Druckpunkten erhöht wird.

3.3 Folgerungen aus den Versuchsergebnissen

Beim Trennvorgang läßt sich beobachten, daß sich durch die in den Walzenspalt eindringende Luft Instabilitäten an der Zweiphasengrenzfläche bilden. Die hierbei erzeugten Lamellen zeigen einen geringen viskosen Widerstand. Die Gleichungen (20) und (21), die die scheinbaren Adhäsionskräfte beschreiben, sind daher nicht mehr zutreffend. Auch im Innern der Flüssigkeit treten bei Unterschreiten des Dampfdruckes derartige Unstetigkeitsflächen auf, so daß die Annahme eines Kontinuums hier nicht ohne weiteres getroffen werden darf. Die bei der Farbspaltung auftretende Strömung kann offensichtlich nicht durch eine rotationssymmetrische Strömung, wie in /17/ und /18/ angenommen, beschrieben werden. Aufgrund der langsamen Blasenwachstumsgeschwindigkeiten scheint die Kavitation nicht die Hauptursache für die Farbspaltung zu sein.

4. Schichtdickenbestimmung an laufenden Maschinen

Es ist klar, daß im Flexodruck die Farbübertragung nicht summarisch durch eine einheitliche Farbspaltungszahl angegeben werden kann, sich vielmehr die beiden Farbspaltungsstellen (Rasterwalze/Klischee und Klischee/Bedruckstoff) wechselseitig beeinflussen. Der Zusammenhang wird in Abschnitt 4.1 untersucht. Dort zeigt sich, daß nur mit einem praxisgerechten Farbwerk die Ergebnisse überprüft werden können¹. Hierzu eignet sich ein in Abschnitt 4.2 beschriebenes Versuchsdruckwerk. Dort wird auch auf eine geeignete Meßmethode eingegangen. Diese Experimente sollen im Anschlußvorhaben (Farbtrennverhalten II) durchgeführt werden.

4.1 Farbfluß und Farbspaltungszahlen im Flexodruckwerk

Im Flexodruckverfahren wird durch die Farbspaltung zwischen Rasterwalze und Plattenzylinder nicht direkt der Bedruckstoff eingefärbt. Dennoch hängt die Qualität dieser Farbübertragung sehr von der Farbübertragung vom Plattenzylinder auf den Bedruckstoff ab. Daher wird in diesem Abschnitt der Farbfluß im Flexodruckwerk diskutiert, und die Farbspaltungsfaktoren werden hergeleitet.

In Bild 42 ist ein Flexodruckwerk dargestellt. Die Bilanzgleichungen für die Knotenpunkte B und C liefern als Farbspaltungszahlen:

¹ Im Gegensatz hierzu wird mit dem Parallel-Platten-Tackmeter und auch dem später beschriebenen Rotationstactometer die Farbübertragung isoliert an einer Farbspaltungsstelle ermittelt. Dort kann deshalb auch eine Farbspaltungszahl angegeben werden.

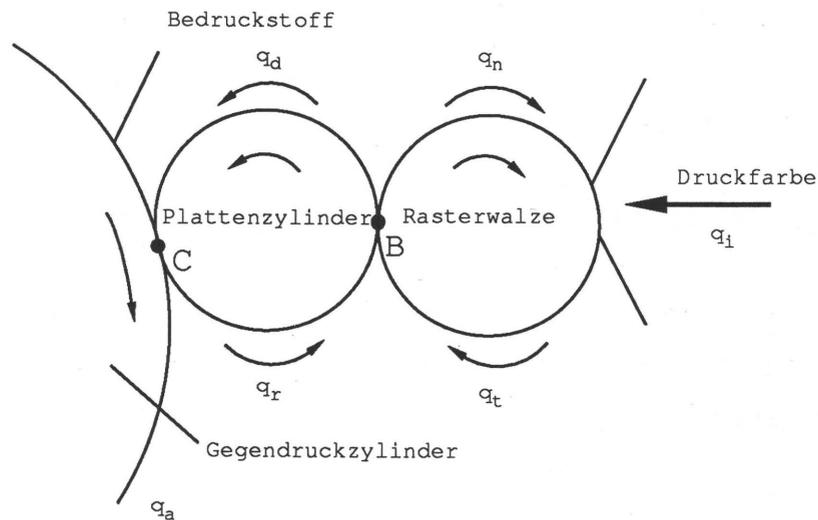


Bild 42: Skizze Flexodruckwerk

(1) Punkt B: die von der Rasterwalze abgegebene Farbmenge wird zu der von der Rasterwalze angebotenen Farbmenge ins Verhältnis gesetzt:

$$\alpha_B = 1 - \frac{q_n}{q_t} \quad (27)$$

(2) Punkt C: die vom Plattenzylinder abgegebene Farbmenge wird zu der vom Plattenzylinder angebotenen Farbmenge ins Verhältnis gesetzt:

$$\alpha_C = \frac{q_a}{q_d} = 1 - \frac{q_r}{q_d} \quad (28)$$

Wir interessieren uns für die Meßbarkeit von α_B und α_C : Die Farbschicht q_t ist in gewissen Grenzen als Geometrieparameter

bekannt. Im stationären Betrieb ist q_a durch den Farbverbrauch bekannt. Aus einer Gesamtmengenbilanz folgt:

$$q_n = q_t - q_a, \quad (29)$$

so daß α_B bestimmt werden kann. Problematisch ist die Bestimmung von q_r bzw. q_d , wobei wegen $q_r = q_d - q_a$ nur eine der beiden Schichten (q_d oder q_r) gesondert gemessen zu werden braucht.

Die Farbspaltungszahlen α_B und α_C hängen zusammen, denn je nach Farbabnahme des Bedruckstoffes fließt unterschiedlich viel Farbe q_r zurück zur Spaltstelle Plattenzylinder/Rasterwalze. Dieser Farbrückfluß beeinflusst entscheidend die Farbannahme des Plattenzylinders. An dieser Stelle sei nur das Ergebnis getrennter Überlegungen wiedergegeben:

$$\alpha_B = \frac{m_p^* - m_p}{q_t T_p} \quad (30)$$

Darin bedeuten m_p die auf dem Plattenzylinder befindliche Farbmenge, m_p^* die maximal auf dem Plattenzylinder aufbringbare Farbmenge und T_p eine Zeitkonstante. Man erkennt, daß in diesem Fall α_B vom Befüllungsgrad des Plattenzylinders abhängt.

Die aus dieser Betrachtung folgende Meßstrategie wird in Abschnitt 4.2 erläutert. Es handelt sich dabei um ein elektrooptisches Schichtdickenmeßverfahren.

Es wird gezeigt, in welcher Weise α_B vom Befüllungsgrad des Plattenzylinders abhängt, wobei es vorteilhaft ist, vorab zwei Grenzfälle zu betrachten: (1) Der Bedruckstoff übernimmt sämtliche ihm angebotene Druckfarbe, (2) der Bedruckstoff nimmt überhaupt keine Druckfarbe an.

(1) Der Bedruckstoff übernimmt sämtliche ihm angebotene Druckfarbe:

$$\text{d.h.: } q_r = 0 \quad (31)$$

Die Ermittlung des Farbverbrauchs (aus q_i) führt also direkt zur Bestimmung von q_n .

$$q_n = q_t - q_i \quad (32)$$

Allerdings läßt es sich an einer Praxismaschine nicht realisieren, keinen Farbrückfluß von der Spaltstelle Plattenzylinder/Bedruckstoff zu haben. Im Experiment mit dem rotierend arbeitenden Versuchsstand kann dieser Fall jedoch simuliert werden.

(2) *Der Bedruckstoff nimmt überhaupt keine Druckfarbe an:*

$$\text{D.h.: } q_a = 0 \quad (33)$$

Dieser Prozeß ist instationär, d. h. die Zeitableitungen sind zu berücksichtigen. Wir betrachten die Farbstrombilanz für das gesamte System und erhalten:

$$q_i = \frac{d}{dt} (m_n + m_d + m_r) \quad (34)$$

Folgende heuristische Überlegung läßt sich durchführen: Je besser die Rasterwalze "entleert", umso länger dauert es, bis das System voller Druckfarbe ist. Das vollgelaufene System ist dann stationär mit $q_i = 0$, und es liefert:

$$q_d = q_d' = q_r = q_r' \quad \wedge \quad m_d = m_r; \quad m_d + m_r = m_p \quad (35)$$

m_p ist die Farbmasse auf dem Plattenzylinder, sie kann experimentell bestimmt werden über

$$\int_0^{T_e} q_i' dt - m_n - m_t = m_p^* \quad (36)$$

Im stationären Endzustand ist $m_n = m_t$ und $m_n + m_t = m_{RW}$.

Es soll versucht werden, aus der Befüllung des Plattenzylinders auf die Farbspaltungszahlen zu schließen. Es gilt noch:

$$q_i' = q_t - q_n \quad (37)$$

$$q_n' = q_t - \frac{d}{dt} (m_n + m_d + m_r) \quad (38)$$

$$q_t - q_n = q_d - q_r' = q_d - q_r + \frac{dm_r}{dt} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} q_n &= q_t - q_d + q_r - \frac{dm_r}{dt} = \\ &= q_t - q_d - \frac{dm_d}{dt} + q_r - \frac{dm_r}{dt} \end{aligned} \quad (40)$$

wegen $q_a = 0$ gilt dabei:

$$q_r = q_d' \quad \text{und} \quad \frac{d}{dt} (m_d + m_r) = \frac{dm_p}{dt} \quad (41)$$

Damit:

$$q_n = q_t - \frac{dm_p}{dt} \quad (42)$$

Für das Folgende sei angenommen, daß die Verläufe $m_p(t)$ und $m_n(t)$ exponentiell sind und mit gewissen Zeitkonstanten T_p und T_n versehen sind. So erhält man folgenden Ansatz für $m_p(t)$, $m_n(t)$ und ihre Zeitableitungen:

$$m_p = m_p^* (1 - e^{-t/T_p}) \quad (43)$$

$$m_n = m_t (1 - e^{-t/T_n}) \quad (44)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = \frac{m_p^*}{T_p} e^{-t/T_p} \quad (45)$$

$$\frac{dm_n}{dt} = \frac{m_t}{T_n} e^{-t/T_n} \quad (46)$$

Einsetzen von (45) in (42) ergibt:

$$q_n = q_t - m_p^* \left(\frac{1}{T_p} e^{-t/T_p} \right) \quad (47)$$

Damit wird α_B :

$$\begin{aligned} \alpha_B &= 1 - \frac{q_n}{q_t} = 1 - \frac{q_t - m_p^* \left(\frac{1}{T_p} e^{-t/T_p} \right)}{q_t} = \\ &= 1 - 1 + \frac{m_p^*}{q_t T_p} e^{-t/T_p} = \end{aligned}$$

$$\alpha_B = \frac{m_p^*}{q_t T_p} e^{-t/T_p} \quad (48)$$

Dabei soll in den Gleichungen (39) bis (44) m_p^* die Menge m_p im (stationären) Endzustand bedeuten:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} m_p(t) = m_p^* \quad (49)$$

Aus (44) erhält man

$$e^{-t/T_p} = 1 - \frac{m_p}{m_p^*}, \quad \text{und damit:}$$

$$\begin{aligned} \alpha_B &= + \frac{m_p^*}{q_t T_p} \cdot \left(1 - \frac{m_p}{m_p^*} \right) = + \frac{m_p^*}{q_t T_p} - \frac{m_p m_p^*}{T_p m_p^*} \\ &= \frac{m_p^* - m_p}{q_t T_p}, \end{aligned}$$

was oben bereits angegeben wurde. Die Farbspaltungszahl hängt also vom jeweiligen Befüllungsgrad des Plattenzylinders ab.

4.2 Schichtdickenmessung

Die FGD-Mitgliedsfirma Windmüller & Hölscher (W&H) hat dem IDD eine Maschine des Typs Flexotest (im folgenden Versuchsdruckwerk genannt) zur Verfügung gestellt. Sie wurde im Dezember 1989 installiert und in Betrieb genommen. Dabei handelt es sich ursprünglich um eine Maschine zur Druckplattenmontage und zum Andruck. Das darin befindliche Flexodruckwerk ist mit einem Kammerrakelsystem ausgerüstet und entspricht weitgehend dem neuesten Stand. Es kann für die obenerwähnten Druckversuche im Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren genutzt werden. Eine Ab- und Aufwickereinheit ist an der Maschine vorhanden. Bild 43 zeigt eine Skizze des Geräts.

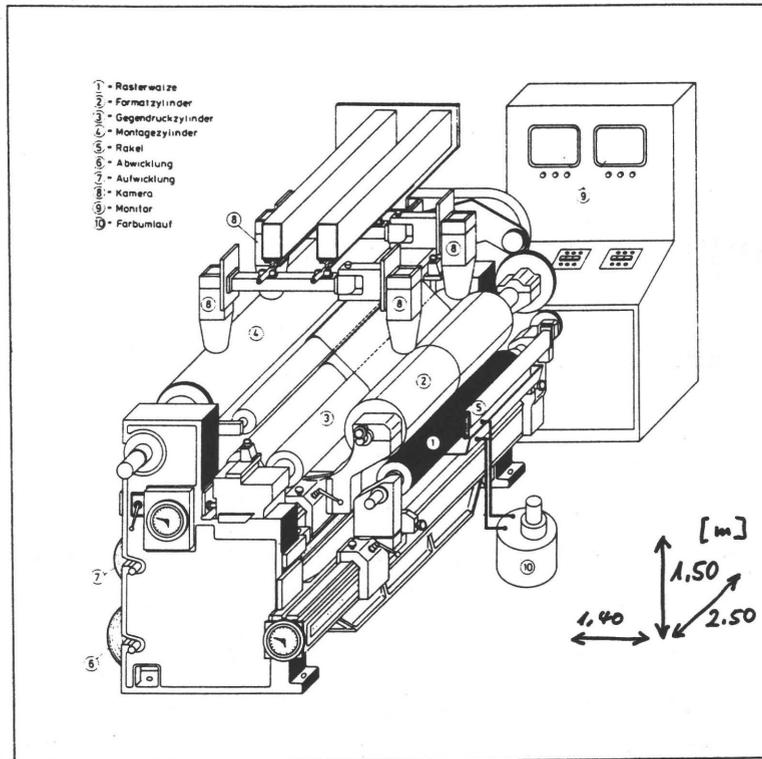


Bild 43: Skizze der W&H-Flexotest

Mit diesem Gerät sollen im Anschlußvorhaben Schichtdicken im laufenden Farbwerk bestimmt werden. Ein am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren 1982 von Rodriguez-Giles und Scheuter /23/ entwickeltes Auflichtmeßverfahren zur Schichtdickenmessung in Walzenfarbwerken soll hierzu dienen.

Das Meßverfahren wurde für den Offsetdruck konzipiert und in einem Forschungsvorhaben von Wiesner und Scheuter /11/ erfolgreich angewendet. Der Aufnehmer besteht aus einer grünen und einer roten Lichtquelle (LED) und einer Photodiode als Empfänger. Die Anordnung ist so gestaltet, daß die LEDs die Farbschicht anstrahlen und der von der Photodiode erfaßte Strahl von ihr in elektrische Spannung umgewandelt wird. Da die Intensität des reflektierten Strahles exponentiell von der Farbschichtdicke abhängt, ist die Ausgangsspannung ein Maß für diese Schichtdicke.

5. Simulation mit FIDAP¹

5.1 Programmaufbau

FIDAP ist ein im Jahre 1988 am Hochschulrechenzentrum der TH Darmstadt installiertes universelles Programmsystem zur Berechnung stationärer und instationärer zwei- und dreidimensionaler Strömungen inkompressibler Medien mit Hilfe eines Finit-Element-Algorithmus. Es können Wärmeströme und unterschiedliche Materialgesetze behandelt werden. Strömungen mit freier Oberfläche können in ebenen oder axialsymmetrischen Koordinatensystemen berechnet werden. Für detailliertere Angaben über das Programmsystem sei auf das FIDAP User's Manual /24/ verwiesen.

Das Strömungsgebiet wird in "kleine" Untergebiete, die sog. finiten Elemente, unterteilt. Die partiellen Differentialgleichungen, die die Strömung im gesamten Gebiet beschreiben, werden durch ein System von (i.a. nichtlinearen) algebraischen Gleichungen ersetzt. Nach der Lösung dieses Gleichungssystems ist das Strömungsfeld an sog. Knotenpunkten bekannt².

Ein besonderer Vorteil der Methode der finiten Elemente liegt in der Möglichkeit begründet, auch sehr komplizierte Geometrien (Berandungen) behandeln zu können. Daher erscheint diese Methode auch zur Berechnung der Strömung aus Rasternäpfchen geeignet.

Da FIDAP universell einsetzbar ist, kann es keinesfalls als "Black Box" betrachtet werden. Das jeweils zu untersuchende

¹ FIDAP (Fluid Dynamic Analysis Package) ist ein Produkt der Fluid Dynamic International, Inc., Evanston, Ill., USA

² Näheres zur Herleitung des im FIDAP verwendeten Algorithmus kann dem User's Manual, Vol. 1, entnommen werden

Problem ist aufzubereiten und wird in Form einer Input-Datei (Eingabedatei) dem Programm zugeführt. Zur Erzeugung dieser Input-Datei existiert im FIDAP ein eigener einer Programmiersprache ähnlicher Syntax.

FIDAP ist in drei eigenständig laufende Programmsegmente FIPREP, FIDAP und FIPOST unterteilt, die Struktur der Programmsegmente und der dazugehörigen Dateien veranschaulicht Bild 44.

Der Preprozessor FIPREP stellt die Benutzerschnittstelle mit FIDAP dar und übernimmt die Erzeugung der Input-Datei für das Hauptprogramm. Er verarbeitet die vom Benutzer bereitgestellte Input-Datei und generiert mit dem Netzgenerator FIMESH das Finit-Element-Netz. FIMESH wird innerhalb des FIPREP als Programmmodul aufgerufen. Es werden sämtliche zur Berechnung notwendigen Randbedingungen formuliert und alles zusammen anschließend in eine vom Hauptprogramm FIDAP lesbare Form gebracht. Die Output-Datei (Ausgabedatei) von FIPREP ist die Input-Datei von FIDAP. FIPREP kann prinzipiell sowohl interaktiv als auch im Batch gestartet werden. Zur Eingabe sollten alle Daten dimensionslos vorliegen und derart aufeinander abgestimmt sein, daß zu große Größenordnungsdifferenzen vermieden werden, die zu numerischen Schwierigkeiten führen könnten.

FIDAP läuft in der Regel nur im Batch, da hierbei praktisch keine Manipulationsmöglichkeiten mehr gegeben sind. Hier werden die aus den Bewegungs-, Energie- und Kontinuitätsgleichungen entstandenen Gleichungssysteme iterativ gelöst und die (oft sehr großen) Ergebnisdateien erzeugt.

Da diese Ergebnisse i.a. sehr unanschaulich, d.h. in sich schwierig analysierbar sind, werden sie dem Postprozessor FIPOST zur Weiterverarbeitung zugeführt. Hier werden die gewünschten Informationen über eine bestimmte Strömung, z.B. Geschwindigkeitsfeld, Isobaren oder Stromlinien aus den in FIDAP errechneten Daten in Form von Plots erzeugt. Es können verschiedene

Grafikprogramme zur Plotterzeugung angesprochen werden, als zweckmäßig erwies sich die Benutzung von DISSPLA¹.

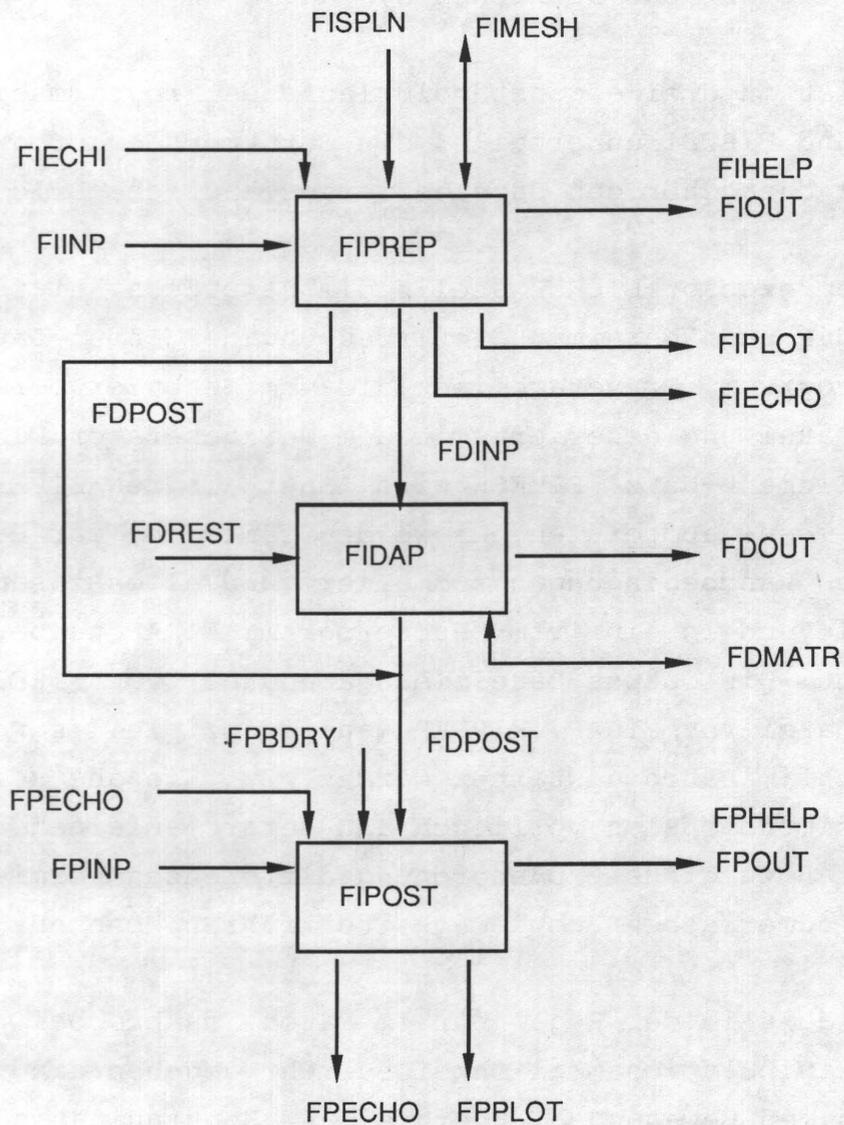


Bild 44: Aufbau von FIDAP mit den dazugehörigen Dateien

5.2 Die Behandlung freier Oberflächen mit FIDAP

Die uns interessierenden, in der Drucktechnik relevanten Strömungen sind besonders durch das Vorhandensein von freien Oberflächen gekennzeichnet. Dies hat, wie in Kapitel 2. bereits

¹ DISSPLA ist ein Produkt der Computer Associates International, Inc., USA

geschildert, Auswirkungen auf die Art der Randbedingungen des Problems. Mit FIDAP besteht unter anderem die Möglichkeit zur Berechnung von Strömungen mit freien Oberflächen. Daher wird in diesem Abschnitt auf die Behandlung freier Oberflächen mit FIDAP eingegangen. Die erhaltenen Ergebnisse werden dadurch klarer und mögliche Quellen für systematische Fehler werden sichtbar.

Wichtig für gute Konvergenz und genaue Ergebnisse ist eine nicht allzu große Deformation der einzelnen Elemente. Daher darf das Flüssigkeitsgebiet nicht beliebig deformiert werden. Auf keinen Fall dürfen Faltungen der freien Oberfläche, wie z.B. sich brechende Meereswellen, stattfinden. Neben dem Geschwindigkeitsfeld und der Druckverteilung stellt dabei die Lage der freien Oberfläche der Flüssigkeit (Kontur) ein Rechenergebnis dar. Im Zusammenhang mit Farbspaltungsvorgängen wird hierauf in Abschnitt 5.3 näher eingegangen.

Ganz allgemein werden bei der Beschreibung von Feldgrößen Eulersche und Lagrangesche Koordinaten unterschieden¹. Die Eulerschen Koordinaten sind ortsfest, die Lagrangeschen Koordinaten sind materiell und beziehen sich auf die Lage des jeweiligen Teilchens zu einer Referenzzeit. Lagrangesche Koordinaten eignen sich besonders für Probleme der Festkörpermechanik, während sich Eulersche Koordinaten im allgemeinen besser für Strömungsprobleme eignen. Die freie Oberfläche von Flüssigkeiten ist jedoch materiell (siehe Kapitel 2.), was die Einführung materieller Koordinaten nahe legt. Schwierig ist in jedem Fall die Umsetzung in ein Computerprogramm, so daß im FIDAP mit einem sog. gemischt Euler-Lagrangeschen Ansatz gearbeitet wird².

Für die freien Oberflächen und auch für bewegliche Wände müssen durch die ELEMENT-Kontrollkarte sog. Oberflächenelemente (surface element) eingeführt werden. Dies sind im zweidimensionalen nur Linienelemente. Durch die BCNODE- und ICNODE-

¹ Näheres hierzu findet sich in fast jedem Lehrbuch der Strömungslehre, z.B. in /15/
² Genaueres zu der erforderlichen Transformation kann dem User's Manual, Vol. 1, entnommen werden

Karte können Rand- und Anfangsbedingungen für die Oberflächen definiert werden.

Bei der Eingabe ist auf eine geeignete Entdimensionierung zu achten. Zusätzlich zur Reynoldszahl wird bei freien Oberflächen die Kapillarzahl Ca (Gl.(15)) benötigt, die die reziproke dimensionslose Oberflächenspannung darstellt.

An der freien Oberfläche wird ein zusätzlicher Freiheitsgrad eingeführt. Damit entstehen zusätzliche Unbekannte die durch die Randbedingungen festgelegt werden. Senkrecht zu der freien Oberfläche stehen sog. Spines (spine = engl.: Rückgrat); das sind Linien, entlang denen sich die Knoten bewegen können. Sie werden im FIPREP durch Einfügen einer SPINE-Kontrollkarte eingeführt. Hierdurch wird auch die Bewegung der auf der Oberfläche liegenden Knoten ermöglicht. Im FIDAP müssen grundsätzlich auch für alle bewegten starren Wände solche Spines vorgesehen werden, nicht nur für freie Oberflächen. In der Drucktechnik stellen dies beispielsweise die benetzten Zylinder dar. Bild 45 zeigt die Zusammenhänge.

Für jeden Spine ist außer dem Anfangs- und Endpunkt ein sog. Basispunkt (base-point) zu definieren, der mit dem Endpunkt zusammenfallen kann. Um diesen Basispunkt kann der Spine rotieren. Dies ist erforderlich, wenn mit einer dynamischen Kontaktlinie gerechnet werden soll. Durch Spezifizierung eines Endpunktes der zur freien Oberfläche zugehörigen Elementgruppe wird die Rotation von Spines um den Basispunkt und damit das "Wandern" der Kontaktlinie zugelassen.

Zusätzlich müssen in jedem Fall die beiden Randwinkel an der freien Oberfläche angegeben werden. Dabei kann auch ein Schlupf (slip) zwischen fester Wand und Flüssigkeit zugelassen werden. Die Kontaktlinie (bzw. der Kontaktpunkt) ist die Schnittlinie (bzw. der -punkt) zwischen zwei Oberflächenelementgruppen, wovon eine die feste Wand darstellt.

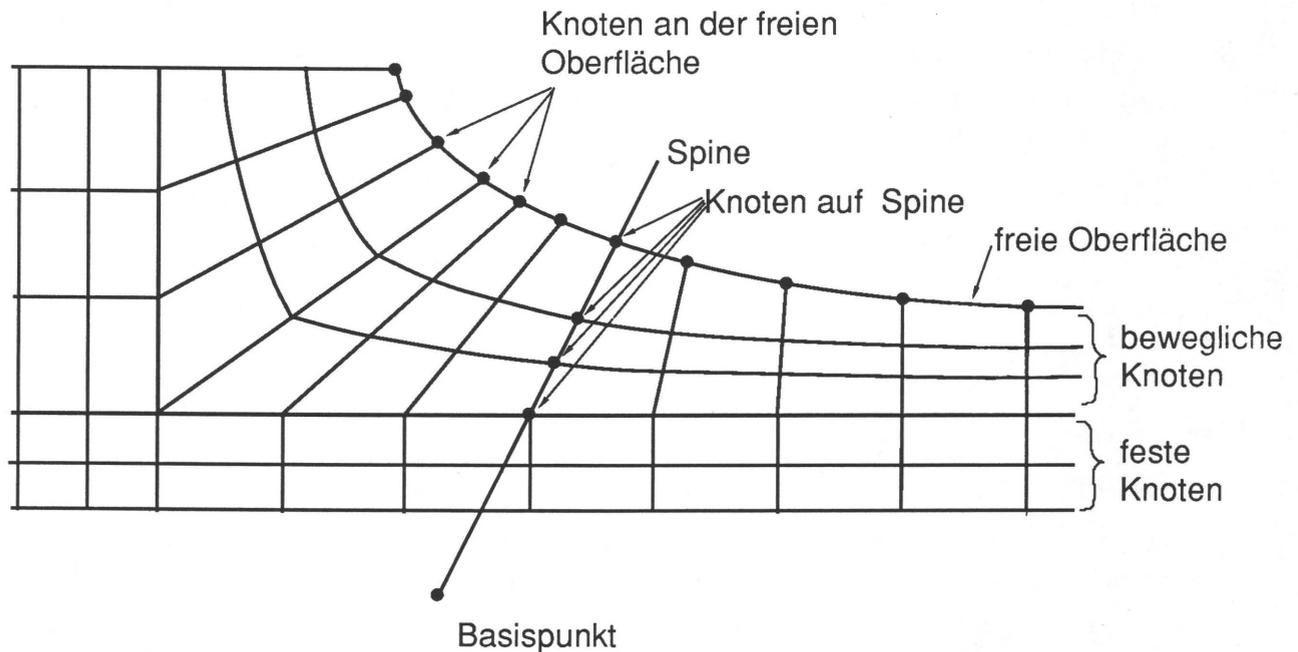


Bild 45: Freie Oberfläche im FIDAP

5.3 Simulation von Farbspaltungsvorgängen

5.3.1 Untersuchte Modelle

Nach der Untersuchung einfacher Testbeispiele wurde begonnen, Farbspaltungsvorgänge zu simulieren. Um das Verhalten solcher Strömungen und die damit verbundene numerische Problematik zu sondieren, wurde zunächst ein zwischen zwei ebenen, sich voneinander entfernenden Platten befindlicher Tropfen untersucht. Anschließend wurden Napfstrukturen betrachtet, was im FIDAP dadurch simuliert wird, daß eine der beiden beteiligten Platten um einen Winkel geneigt ist. Grundsätzlich beschränkte sich die Untersuchung auf rotationssymmetrische Tropfen, d.h., die Napfform ist immer kegelförmig. Dreidimensionale Probleme mit freien Oberflächen können mit FIDAP bislang nicht behandelt werden.

Unter der Annahme, daß ein betrachteter Farbfaden an seiner dünnsten Stelle reißt, sind Rückschlüsse auf die sich ergebende

Volumenverteilung möglich. Daraus lassen sich sowohl die übertragene als auch die im Nöpfchen verbliebene Farbe berechnen. Die die Farbübertragung bestimmenden Parameter werden im Dialog eingegeben, so daß eine Simulation im Hinblick auf eine Optimierung erfolgt.

5.3.2 Diskretisierung des Rechengebietes

Untersucht werden drei verschiedene Fälle, (A), (B) und (C). Bilder 46 und 47 zeigen Skizzen der Rechengebiete mit den zugehörigen Randbedingungen. Bei (A) handelt es sich um 2 voneinander weg bewegte ebene Platten. Das Problem ist symmetrisch, so daß es ausreicht, einen Quadranten zu betrachten. Die in FIDAP betrachteten Gebiete sind in Bild 46 und 47 schraffiert dargestellt. Bild 46 zeigt zwei voneinander weg bewegte ebene Wände, Bild 47 zeigt eine von einem feststehenden Napf (schräge Wand) weg bewegte ebene Wand.

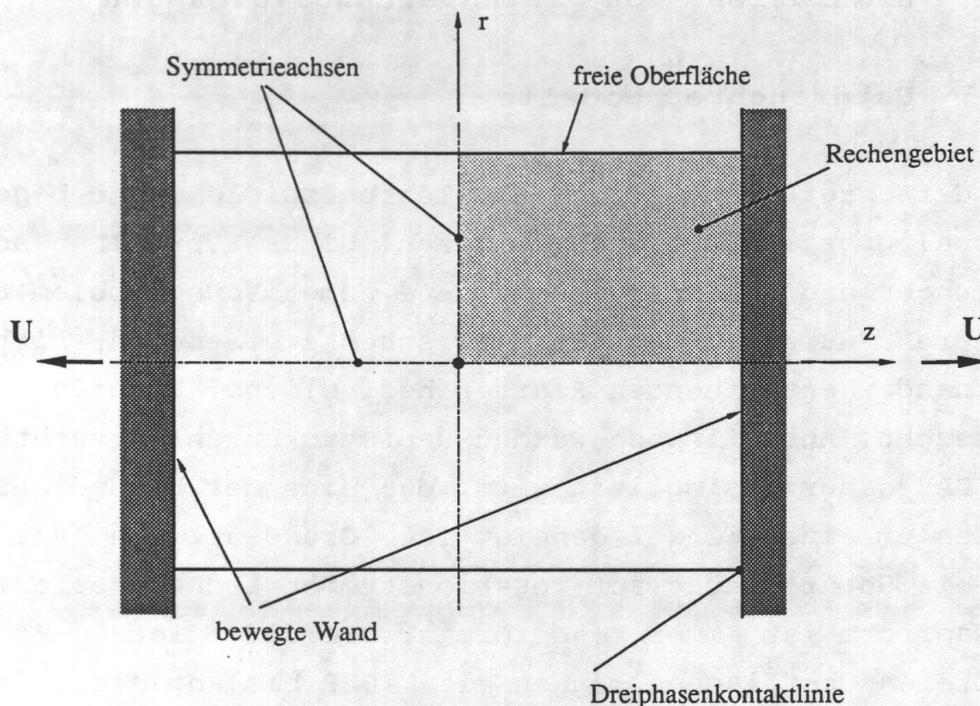


Bild 46: Rechengebiet (ebene Platten)

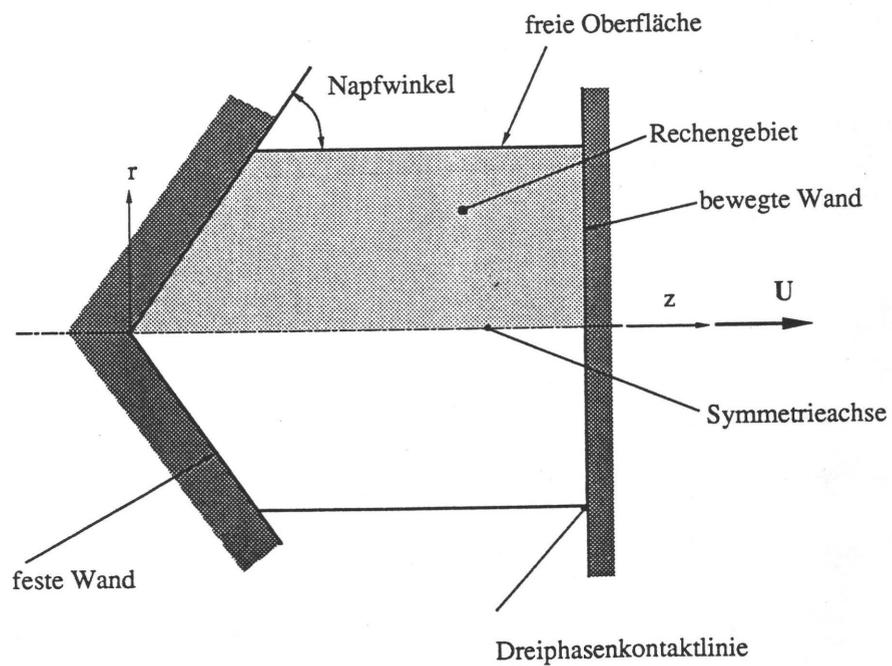


Bild 47: Rechengebiet (Napfstruktur)

Für diese Fälle muß das Rechengebiet auf unterschiedliche Weise diskretisiert werden, d.h., man erhält unterschiedliche Netze. Wie schon in 5.2 diskutiert, benötigt man sowohl für die feste Wand als auch für die freie Oberfläche Spines, um Knotenverschiebungen zuzulassen. Dabei ist besonders auf die Dreiphasenkontaktlinie (DPKL) zu achten. Bilder 48 und 49 zeigen die verwendeten Netzstrukturen und die zugehörigen logischen Gitter. Spines und DPKL sind eingezeichnet.

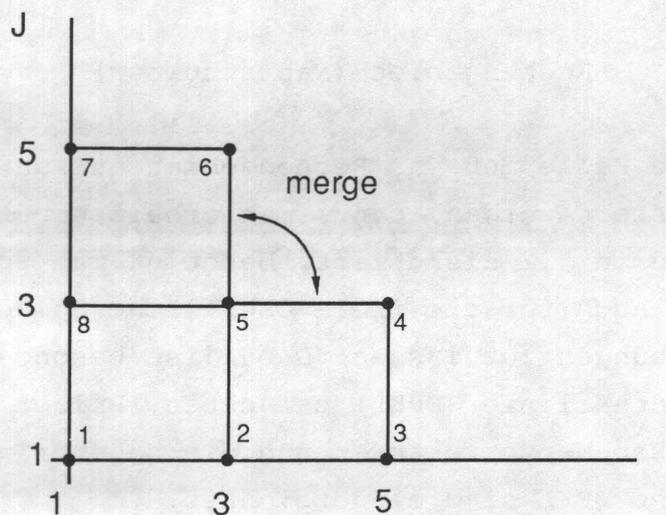
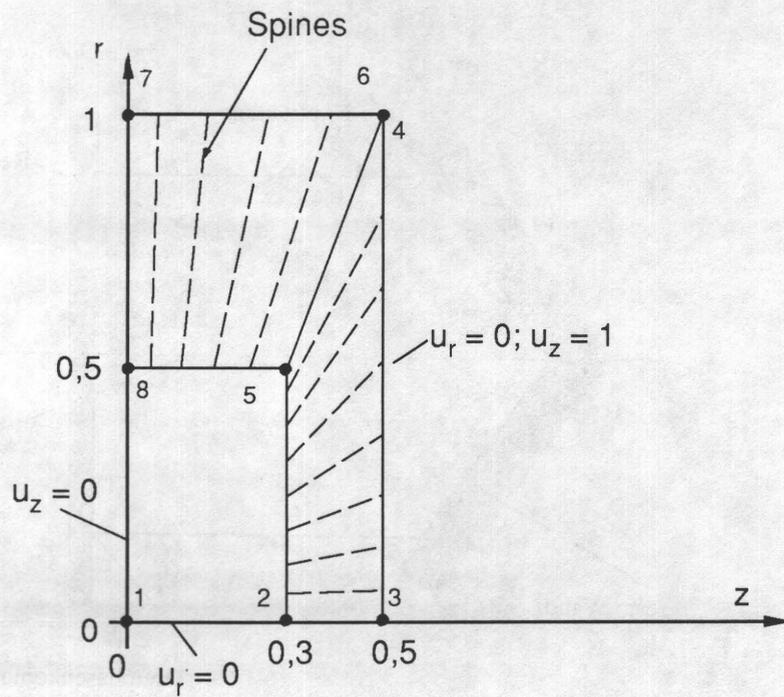


Bild 48: Diskretisierte Rechengebiete (1 feste bewegte Wand)

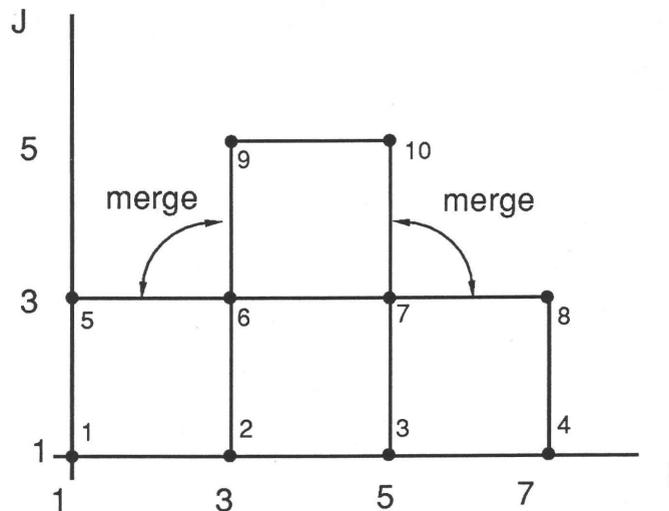
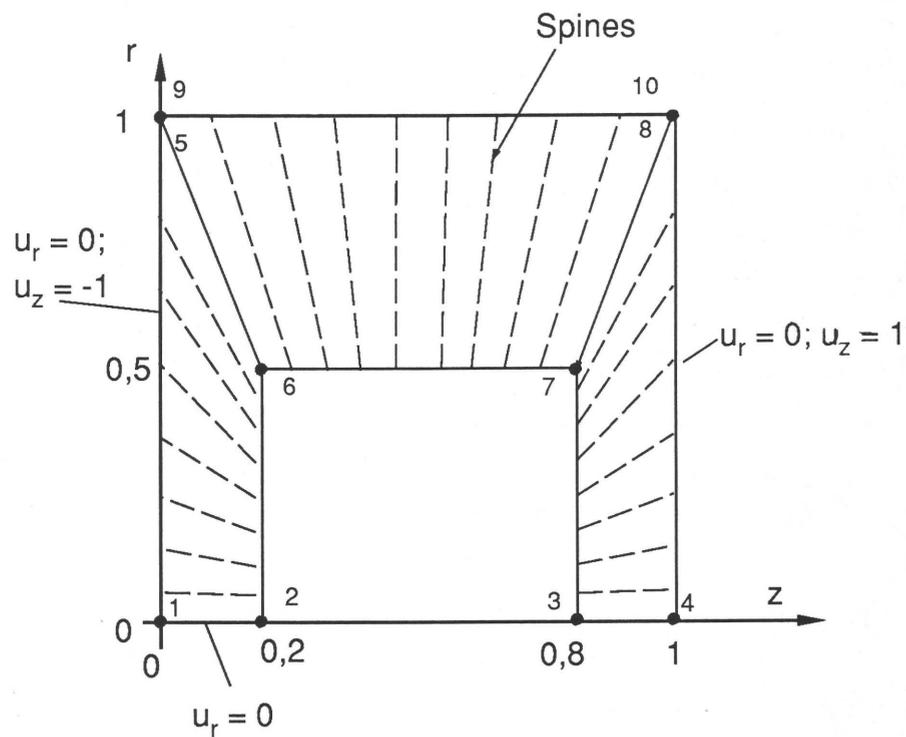


Bild 49: Diskretisierte Rechengebiete (2 feste bewegte Wände)

Durch Spezifizierung des ENDSLIP-Schlüsselwortes bei der Definition der Oberflächenelemente können - wie ausgeführt - rotierende Spines zugelassen werden. Dies ist jedoch mit dem derzeitigen FIDAP prinzipiell nicht möglich, wenn beide an der DPKL zusammentreffende Flächen bewegt werden sollen, wenn also ein Schlupf der Flüssigkeit entlang der Wand zugelassen sein soll.

5.3.3 Entdimensionierung

Die uns bei der Farbspaltung interessierenden Parameter sind sehr unterschiedlicher Größenordnung. Die Abweichungen sind z.T. größer als die relativen numerischen Fehler bei der Rechnung mit FIDAP. Daraus würden bei einer dimensionsbehafteten Rechnung große numerische Fehler erwachsen und wahrscheinlich keine Konvergenz erreicht werden. Um daher Größen ähnlicher (möglichst gleicher) Größenordnung zu erhalten, muß in geeigneter Weise dimensionslos gemacht werden.

Die typische Abmessung eines Rasternäpfchens beträgt $L = 10 \text{ } [\mu\text{m}]$, die typische Geschwindigkeit des Problems sei $U = 1 \text{ } [\text{m/s}]$. Damit ergibt sich sofort die Zeiteinheit $T = L/U = 10 \text{ } [\mu\text{s}]$. Bei der Eingabe in FIPREP kann nun gewählt werden, ob alle Größen auf die Dichte oder die Viskosität bezogen werden sollen. Im folgenden wurde von der Dichte ausgegangen; die Viskosität ist in diesem Fall als die reziproke Reynolds-Zahl einzugeben¹. Mit $\rho = 1000 \text{ } [\text{kg/m}^3]$ wird $Re = (U L \rho) / \eta = 0,5$. Die Oberflächenspannung wird nun über die reziproke Kapillarzahl eingegeben: $Ca = (U \eta) / \gamma = 0,667$. Damit muß im FIPREP für die Materialwerte eingegeben werden:

```
*DENSITY(CONST.=1.)
*VISCOSITY(CONST.=2.)
*SURFACETENSION(CONST.=1.5)
```

Alle Längenabmessungen bzw. Geschwindigkeiten werden in Vielfachen von $10 \text{ } [\mu\text{m}]$ bzw. $1 \text{ } [\text{m/s}]$ eingegeben. Volumenkräfte, z.B. die Schwerkraft, sind voraussetzungsgemäß vernachlässigt.

Mit diesen Angaben werden die im Anhang befindlichen Eingabedateien (FIPREP.xyz.FIINP) verständlich. Die Rechnung zeigt (s. Abschnitt 5.3.4), daß bei sehr kleinen Oberflächenspannungen die freie Oberfläche rasch stark verformt wird. Wegen der

¹ Diese Vorgehensweise wird im FIDAP-User's Manual vorgeschlagen

Deformation der Elemente wurde keine numerische Konvergenz erzielt. Daher wird im folgenden z.T. mit erheblich kleineren Werten für die Kapillarzahl gerechnet.

5.3.4 Beispiele

5.3.4.1 Ebene Platten

In einer ersten Untersuchung werden zwei mit der Geschwindigkeit U auseinandergezogene ebene Platten betrachtet. Das Problem wird als zylindrisch angesehen. Die Bilder 50 und 51 zeigen das Stromlinienfeld unmittelbar nach einsetzender Strömung. Es wird deutlich, daß nur bei kleinen Kapillarzahlen die Kontur der freien Oberfläche stabil bleibt, d.h., die Oberflächenspannung zieht die freie Oberfläche zusammen. Bei verschiedenen Anwendungen in der Drucktechnik sind die Kapillarzahlen zwar größer, dennoch lassen sich nützliche Simulationen auch mit kleineren Kapillarzahlen durchführen. Diese Ergebnisse zeigen, daß der Einfluß der Kapillarzahl auf die dynamischen Vorgänge beim Drucken von untergeordneter Bedeutung ist.

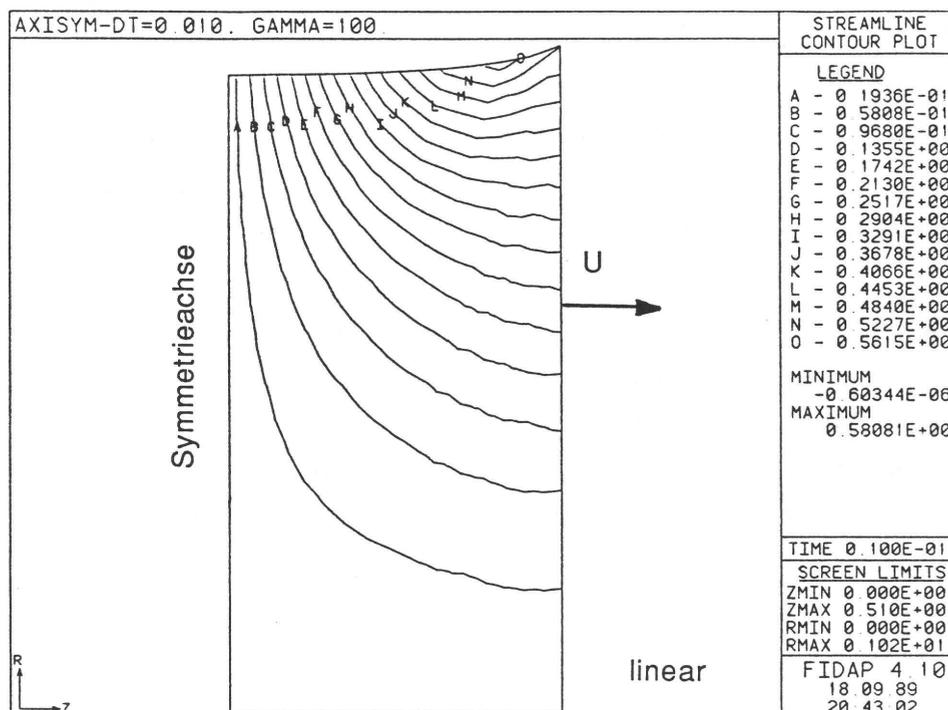


Bild 50: Stromlinienplot für $Ca = 0,01$

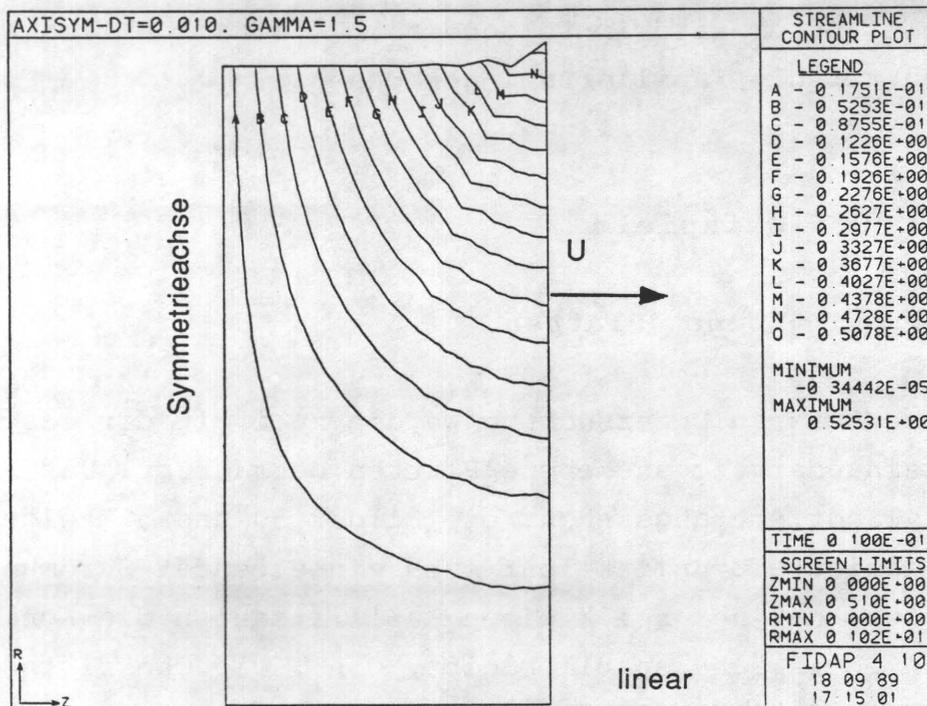


Bild 51: Stromlinienplot für $Ca = 0,667$

Bilder 52 und 53 zeigen die Isobaren bei linearer, d.h., die konvektiven Glieder in der Navier-Stokes-Gleichung bleiben unberücksichtigt, und nichtlinearer Rechnung. Es zeigt sich, daß bei hohen Kapillarspannungen (hier: $Ca = 0,005$) die rechnerische Berücksichtigung der konvektiven Glieder der Navier-Stokes-Gleichung zu keiner nennenswerten Beeinflussung des Ergebnisses führt. Daraus ergibt sich, daß auch mit der linearisierten Rechnung nützliche Ergebnisse ermittelt werden können. Die Rechenzeiterparnis beträgt im FIDAP allerdings nur ca. 15%.

Es wurde mit der sog. "No-Slip"-Randbedingung gerechnet, d.h., daß sich die Dreiphasenkontaktlinie nicht relativ zur Wand bewegt. Dadurch kommt es an dieser Stelle rechnerisch zu einer Singularität, die am Verlauf der Isobaren bereits nach einem Zeitschritt deutlich hervortritt.

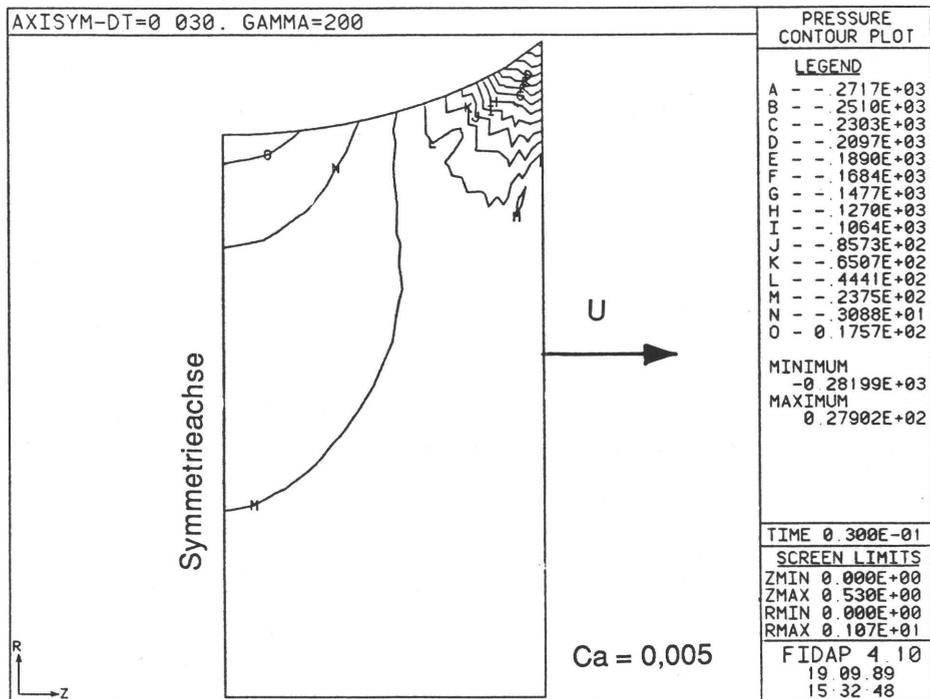


Bild 52: Druckverteilung bei linearer Rechnung

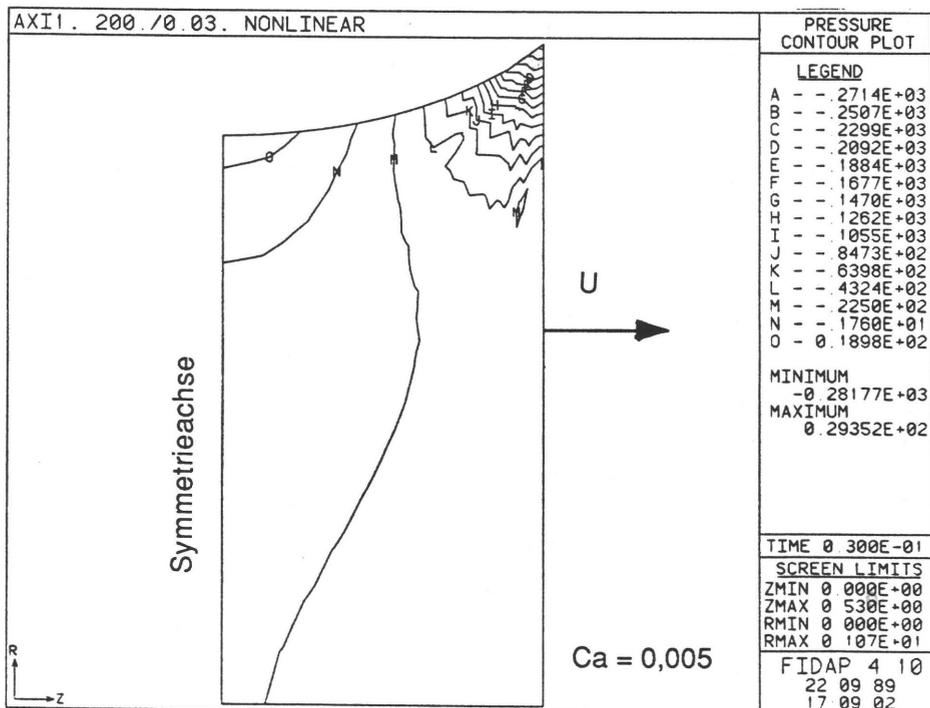


Bild 53: Druckverteilung bei nichtlinearer Rechnung

Die Arbeiten mit FIDAP haben ferner gezeigt, daß instationäre Probleme besser mit sog. Restarts beherrscht werden als mit einer sukzessiven Zeitintegration. Beim Restart wird das Rechenergebnis des ersten Laufs als Anfangsbedingung für einen nächsten Lauf vorgegeben. Bild 54 und 55 zeigen zwei sich voneinander entfernende Platten nach einem bzw. zwei Zeitschritten.

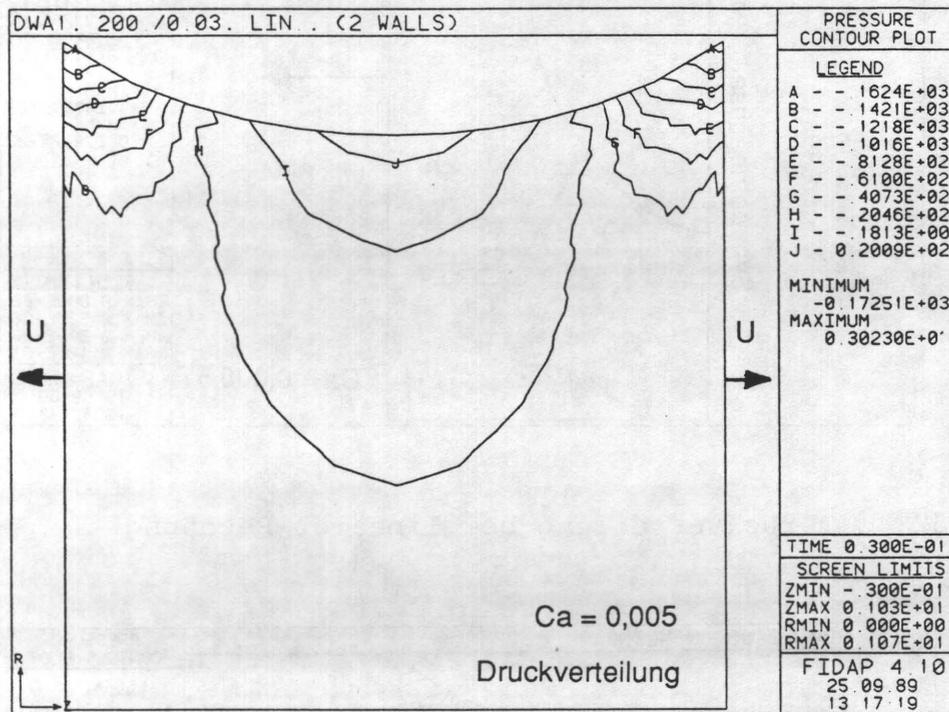


Bild 54: Zwei voneinander bewegte Platten nach einem Zeitschritt

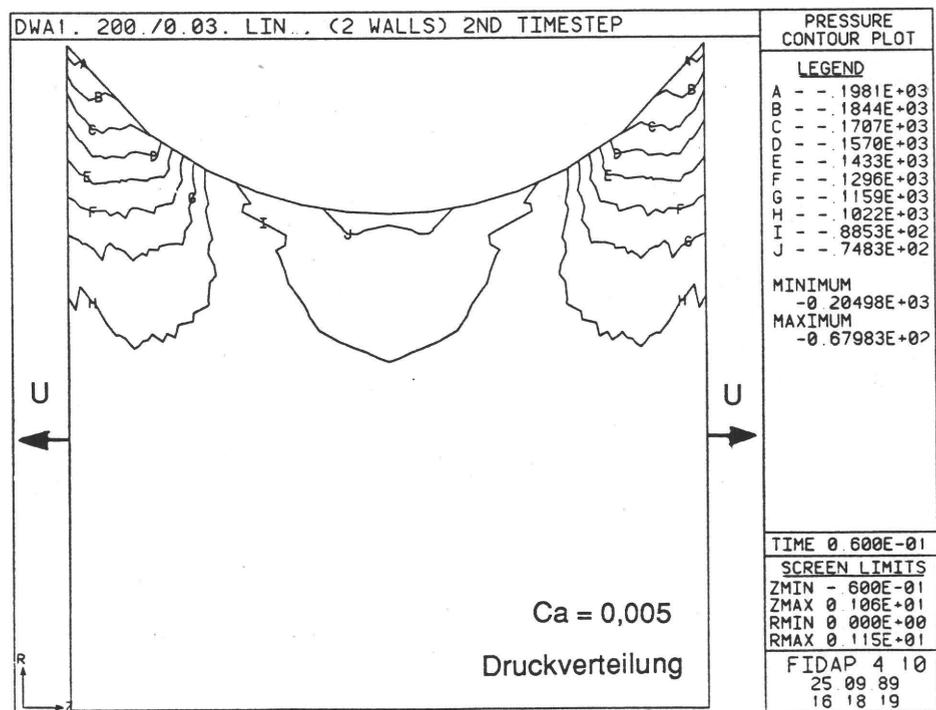


Bild 55: Zwei voneinander bewegte Platten nach zwei Zeitschritten

Es mußte festgestellt werden, daß die Verformung der freien Oberfläche des Farbtropfens sehr von der vom Anwender spezifizierten Randbedingung für die Dreiphasenkontaktlinie abhängt. Es ist hierbei möglich, die Dreiphasenkontaktlinie entweder an der festen Wand haften zu lassen, oder aber einen definierten sog. Slip zuzulassen. Die physikalischen Vorgänge an der Dreiphasenkontaktlinie sind bislang nicht umfassend erforscht, so daß die geeignete Randbedingung mit Hilfe mehrerer Rechenläufe und jeweils verschiedenen Randbedingungen gesucht wird. Auch der Ort der dünnsten Stelle des sich spaltenden Tropfens hängt hiervon ab.

5.3.4.2 Napfstruktur

Bei der Behandlung schräger Wände (Näpfchen) kommt es zu großen Netzdeformationen. Damit sind Ungenauigkeiten der Rechnung

verbunden (Bilder 56 bis 59). An einer entsprechenden Verbesserung der Netzstruktur wird noch gearbeitet.

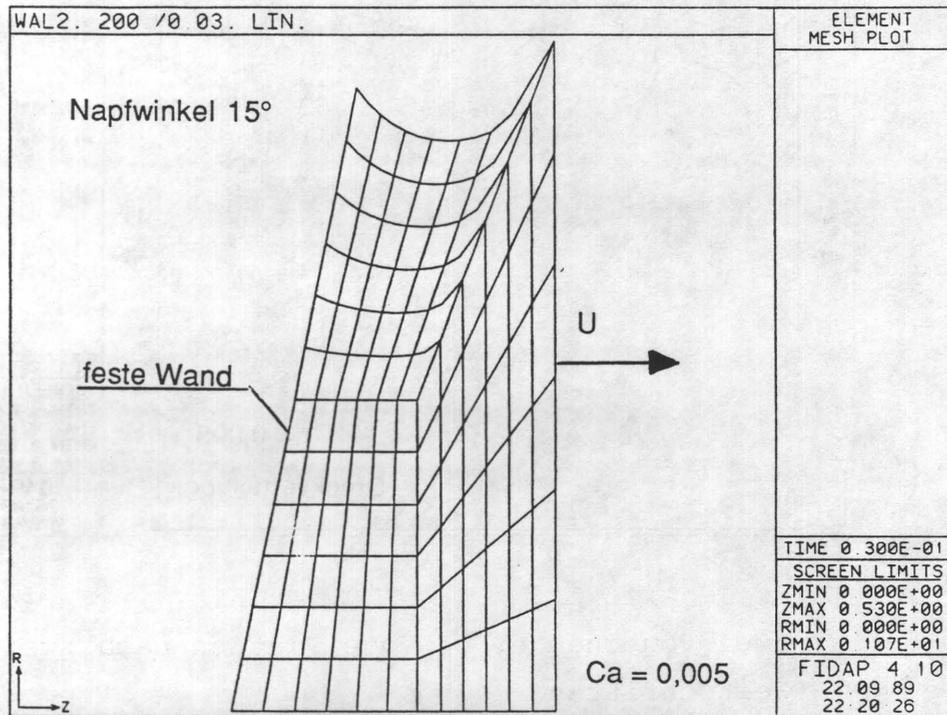


Bild 56: Netz nach einem Zeitschritt

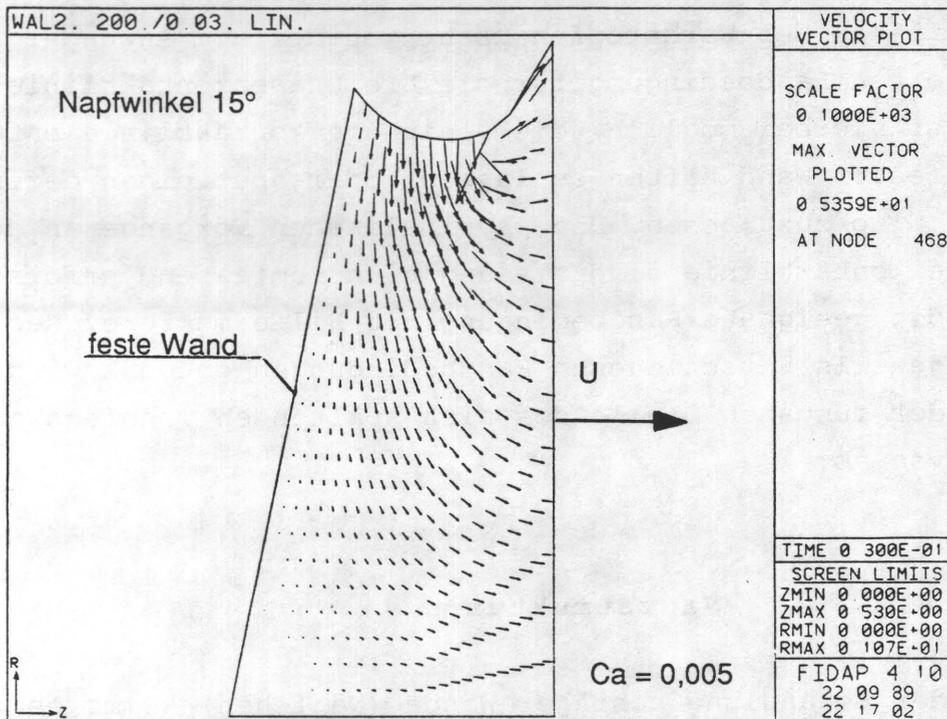


Bild 57: Geschwindigkeitsfeld nach einem Zeitschritt

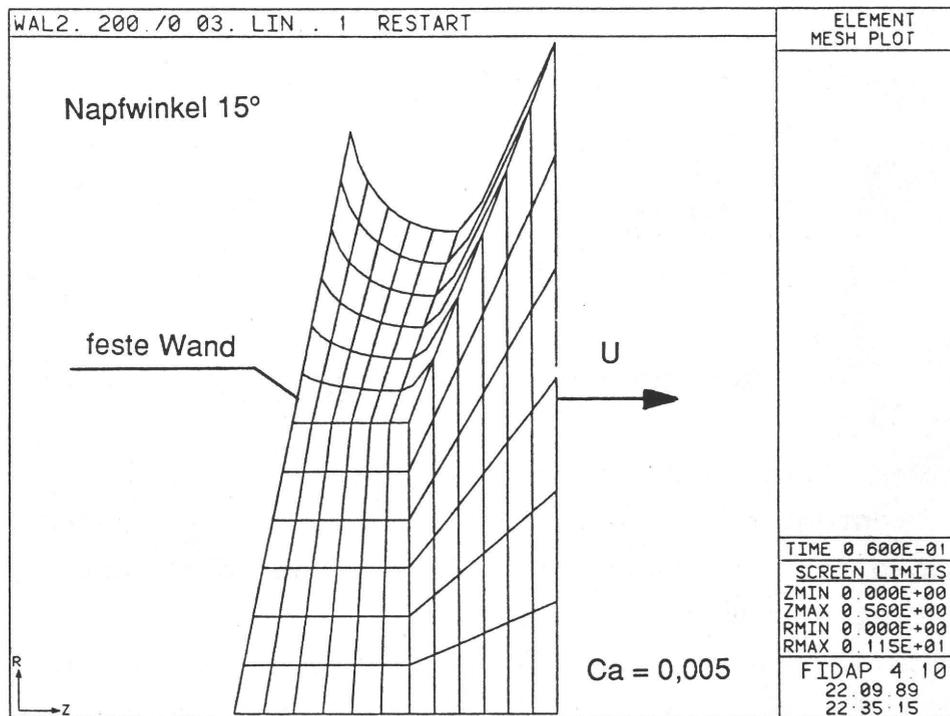


Bild 58: Netz nach zwei Zeitschritten

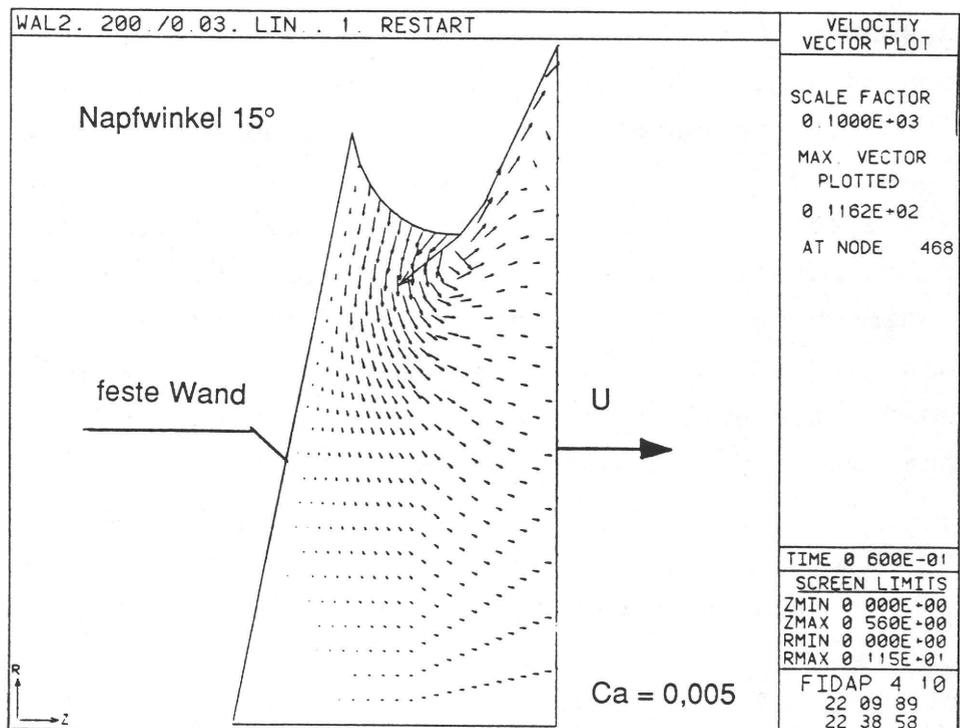


Bild 59: Geschwindigkeitsfeld nach zwei Zeitschritten

6. Ausblick

6.1 Grundsätzliche theoretische Arbeiten

Die bisherigen Untersuchungen lassen eine Reihe von Fragen unbeantwortet: So bestehen bei der Anwendung von FIDAP erhebliche Einschränkungen in der Wahl der Randbedingungen. Auch ist nicht geklärt, welche Randbedingungen für das zu untersuchende Problem geeignet sind. Hierzu sollten grundsätzliche Experimente durchgeführt werden. Solche Experimente sind für das Anschlußforschungsvorhaben geplant.

In der Drucktechnik kommt es aber hauptsächlich auf die übertragene Farbmenge an, und es bleibt fraglich, ob derartige aufwendige Experimente weiterführen und für die Drucktechnik lohnend sind. Ergänzend dazu sollte daher der Spaltungsprozeß mit einer Hochgeschwindigkeitskamera untersucht werden, um das dynamische Verhalten der Kontur des sich spaltenden Tropfens im Detail festhalten zu können. Die so gewonnenen Informationen können mit den Rechenergebnissen verglichen werden, und es kann zu einem breiteren Kenntnisstand der Farbspaltung gelangt werden. Rechnerisch kaum erfaßbare Einflüsse wie Rakel und Stege lassen sich einbeziehen und können in eine ingenieurmäßige Betrachtung der Farbspaltung Eingang finden.

6.2 Farbübertragungsversuche

Von den im Anschlußvorhaben (Farbtrennverhalten II) beabsichtigten Versuchen mit einem praxisgerechten Flexofarbwerk wurde in Kapitel 4 berichtet. Außerdem wird ein Versuchsstand gebaut, der es ermöglicht, die Farbübertragung an den einzelnen Spaltstellen

isoliert zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird es sowohl möglich sein, einzelne auf Zylinder aufgespannte Proben, z.B. Klischee- oder Bedruckstoffmaterial, durch einmaliges Abwälzen zu untersuchen als auch eine längere Bahn durch den Walzenspalt laufen zu lassen. Neben der Farbübertragung, die gravimetrisch und optisch bestimmt werden, soll auch der Farbtack gemessen werden. Dazu sind Anstelldrücke und Betriebsgeschwindigkeiten voreinstellbar.

Die Aufzeichnung der Meßdaten erfolgt mit einem Macintosh II. Die Software sowohl für die Meßwerterfassung als auch für die Weiterverarbeitung ist erstellt worden. Menügesteuert ist die Meßdatenerfassung sowohl über RS432-Schnittstelle (seriell), als auch über die IEEE-488-Schnittstelle des IEC-Bus möglich. Die Software für die Weiterverarbeitung der Daten beinhaltet alle üblichen Analysemethoden (Integration, FFT, Ausgleichsfunktionen usw.) und umfangreiche Möglichkeiten zur grafischen Darstellung unter Verwendung von Postscript.

7. Zusammenfassung

Mit dem bereits vor Anlauf des Forschungsvorhabens entwickelten Parallel-Platten-Tackmeter (PPT) wurden einige Versuche mit ebenen Platten und Testölen durchgeführt. Dabei wurden zwischen zwei Platten befindliche Normalöle mit großer Beschleunigung auf Zug beansprucht. Es wurde festgestellt, daß die gemessenen und errechneten Werte für den Tack z.T. stark voneinander abweichen und die Flüssigkeit Zugkräfte übertragen kann. Dies deutet darauf hin, daß Kavitation nicht allein für das Reißen des Flüssigkeitsfadens verantwortlich ist, vielmehr entstehen an der 2-Phasengrenzfläche Instabilitäten, die das rasche Einströmen der Umgebungsluft ermöglichen. Dieser Effekt konnte durch Versuche mit Glasplatten gezeigt werden. Die entstehenden Flüssigkeitslamellen haben geringen viskosen Widerstand und begünstigen die Flüssigkeitsspaltung.

Die Versuche ergaben aber auch, daß das PPT den für das Drucken typischen Farbspaltungsvorgang nicht vollkommen simuliert: Massenträgheit und Zylinderkrümmung werden nicht berücksichtigt, das Einbringen der Proben und der Probeflüssigkeit entspricht nicht dem Druckprozeß. Daher wurde mit der Konzeption eines neuen Versuchsstandes begonnen. Es wurde ein Meßwerterfassungssystem für Apple-Macintosh II entwickelt, das die Erfassung und Auswertung von Daten menügesteuert ermöglicht.

Die für die Farbspaltung maßgeblichen hydrodynamischen Gleichungen wurden aufgestellt und - soweit möglich - mit dem Programmsystem FIDAP gelöst. Dabei zeigte sich, daß die Lösung von der Wahl der Randbedingung an der 3-Phasenkontaktlinie (Haften oder Rutschen) abhängt. Einige grundsätzliche physikalische Fragen blieben bisher unbeantwortet; für das Anschlußvorhaben geplante Experimente sollen hierüber Aufschluß geben.

Eine Versuchsmaschine des Typs W&H Flexotest mit einem praxisgemäß mit Kammerrakel ausgerüsteten Flexodruckwerk wurde an der Forschungsstelle installiert und in Betrieb genommen.

8. Liste der verwendeten Abkürzungen und Symbole

a	Beschleunigung
b	Näpfchenbreite
F	Kraft
F*	implizite Darstellungsform der freien Oberfläche
g	Erdbeschleunigung
h	Plattenabstand
h ₀	Ausgangsplattenabstand
H	Gaußsches Krümmungsmaß
I	Einheitstensor
l	Länge
m _p , m _p *	Massen auf dem Plattenzylinder
n, n _j	Normalenvektor, Komponente
p	Druck
q _i ,	Farbströme
r ₀	Ausgangsradius
R, R, R	Blasenradius und Ableitungen nach der Zeit
R _{zul}	zulässiger Radius
s	Näpfchentiefe
t	Zeit
t _e	Verweildauer im Unterdruckgebiet
t, t _i	Spannungsvektor, Komponente
T _p	Zeitkonstante
T	Spannungstensor
v	Volumenverteilung
v ₀	rel. Gesamtvolumen
U	Umfangsgeschwindigkeit
u	Geschwindigkeitsvektor
u _i , u, v, w	Komponenten des Geschwindigkeitsvektors

u_w, u_{wi}	Wandgeschwindigkeit, Komponente
u', w', w'', t', r', z'	dimensionslose Größen
x, y, r, z	Koordinaten
x_i	Ortskoordinate der freien Oberfläche
Bo	Bond-Zahl
Re	Reynolds-Zahl
We	Weber-Zahl
Ca	Kapillarzahl
α	Näpfchenwinkel
α_B, α_C	Farbspaltungsfaktoren
δ_{ij}	Kronecker-Delta
$\delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}$	Abstand und Ableitungen nach der Zeit
γ, γ_i, \dots	Grenzflächenspannungskoeffizient
Γ, Γ_i, \dots	freie Oberflächen
η	dynamische Viskosität
ν	kinematische Viskosität
ϕ	Maßstab
λ	Wellenlänge
Λ	Geometrieparameter
$\theta \dots$	Randwinkel
τ_{ij}	Komponente des Spannungstensors
ρ	Dichte
ω	Winkelgeschwindigkeit
Ω	Flüssigkeitsgebiet
$\alpha, \beta, \delta, \zeta, \kappa, \varepsilon$	freie Parameter
Δ	Laplace-Operator
∇	Nablaoperator

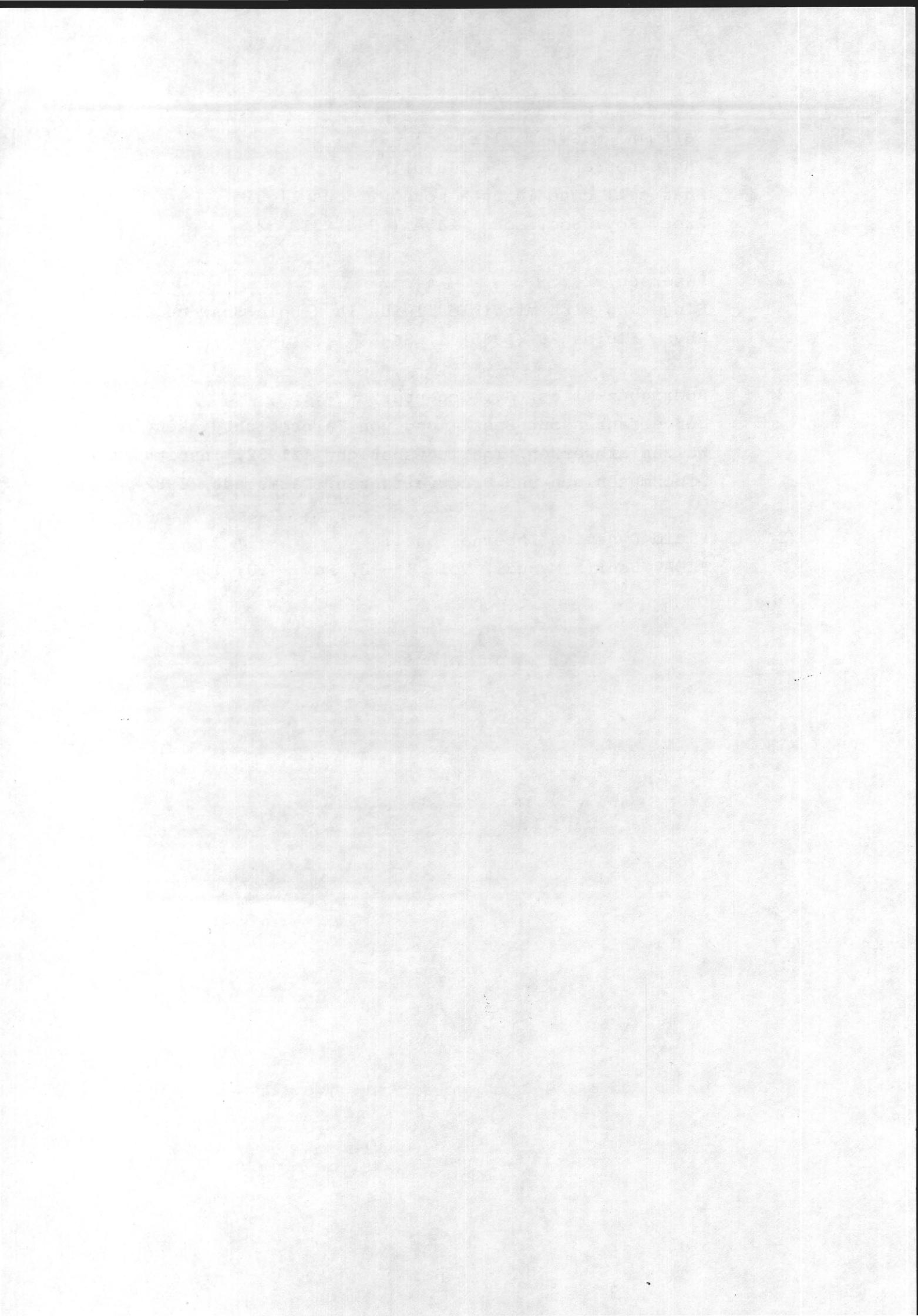
9. Literaturverzeichnis

- /1/ Hübner, G.; Hars, Chr.:
Untersuchungen von grenzflächenphysikalischen
Eigenschaften und deren Veränderungen an farb- und
wasserführenden Oberflächen in Offsetdruckmaschinen,
Teil B, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren
der TH Darmstadt, Institutsbericht 2/1988
- /2/ Schaeffer, W.D.; Zettlemyer, A.C.:
The Splitting of Thin Liquid Films
National Printing Ink Research Institute, Project Report
No. 38, 1957
- /3/ Schade, C.:
Foto-optische Untersuchungen zum Druckvorgang im
Tiefdruck
Tiefdruck-Jahrbuch, 1966, 81-99
- /4/ Kunz, W.:
Wechselwirkungen zwischen den am Tiefdruck beteiligten
Materialien
Vorträge II der XX. EUCEPA-Konferenz, Budapest, 1982
- /5/ Sorensen, P.H.:
Printability investigations in gravure on a printability
tester with special reference to practical printing
12. IARIGAI-Conference, in: Advances in Printing
Science, (Ed.: H.W. Banks), 1973, 88-97

- /6/ Schirmer, K.H.:
Ergiebigkeit von Tiefdruckfarben für geätzte und
gravierte Druckformen als Grundlage einer Ermittlung des
Farbverbrauchs
FOGRA-Forschungsbericht 5.304, München, 1980
- /7/ Schümmer, P.:
Farbschichtdickenmessung mittels Isotopen
Mitteilungen der Forschungsgesellschaft Druckmaschinen
e. V., Frankfurt/M., 1970, 37-47
- /8/ Albright, C.F.:
Gravure application to absorbent substrates
TAPPI Vol. 67 (1984) 5, 110-113
- /9/ Griebel, R.:
Messung der Nöpfchen-Tiefen, Bestimmung der
Schöpfvolumina, Messung der Farbübertragung
Dokumentation zur 18. DFTA-Fachtagung, 5. Okt. 1988,
Frankfurt, 44-71
- /10/ Rech, H.:
Beiträge zur experimentellen und rechnerischen
Untersuchung des Farbtransportes in Walzenfarbwerken von
Druckmaschinen
Diss., Darmstadt, 1971
- /11/ Wiesner, R.; Scheuter, K.R.:
Ermittlung von Farbspaltungsfaktoren in Walzenfarbwerken
Institutsbericht 1/1983, Institut für Druckmaschinen und
Druckverfahren, Darmstadt, 1983
- /12/ Shield, T.W.; Bogy, D.B.; Talke, F.E.:
Drop formation by DOD ink-jet nozzles: A comparison of
experiment and numerical simulation
IBM Journal of Research and Development, 31 (1987) 1,
96-110

- /13/ Schweizer, P.M.:
Visualization of coating flows
Journal of Fluid Mechanics, 193 (1988), 285-302
- /14/ Christodoulou, K.N.; Scriven, L.E.:
AIChE Annual Meeting, San Francisco, 1984, Paper 1423
- /15/ Spurk, J. H.:
Strömungslehre
Springer, Berlin usw., 1987
- /16/ Tanner, L.H.:
The spreading of silicone drops on horizontal surfaces
J. Phys. D: Appl. Phys., 12 (1979) 1473-1484
- /17/ Dussan V., E.B.:
The moving contact line: the slip boundary condition
J. Fluid Mech., 77 (1976) 665-684
- /18/ Kümmel, K.:
Theoretische und Experimentelle Untersuchungen über die
Rolle der Strömungskeime bei der Entstehung von
Flüssigkeitskavitation
Diss., Darmstadt, 1978
- /19/ Kronenberger, A.:
Entwicklung eines "Quetsch-Zug-Viskosimeters"
Studienarbeit am Institut für Druckmaschinen und
Druckverfahren (Nr. 121), Darmstadt, 1982
- /20/ Kühlmeyer, L.:
Entwurf eines "Parallel-Platten-Tackmeters"
Studienarbeit am Institut für Druckmaschinen und
Druckverfahren (Nr. 134), Darmstadt, 1985

- /21/ Saffman, P.G.; Taylor, G.:
The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid
Proc. Roy. Soc. Lond. 245A (1958) 312-329
- /22/ Paterson, L.:
Fingering with miscible fluids in a Hele-Shaw cell
Phys. Fluids 28 (1985) 1, 26-30
- /23/ Rodriguez-Giles, J.; Scheuter, K.R.:
Meßverfahren zur Bestimmung von Farbschichtdicken in
Walzenfarbwerken, Institutsbericht 1/1982, Institut für
Druckmaschinen und Druckverfahren, Darmstadt, 1982
- /24/ Fluid Dynamics International:
FIDAP User's Manual, Vol. 1 - 3, Rev. 4.0, 1987



Anhang

FIDAP-Eingabedateien

```
*TITLE
/1. ZEITSCHRITT
AXI1
*FIMESH (IMAX=5, JMAX=5)
EXPI
1 0 13 0 25
EXPJ
1 0 13 0 25
POINT
/ I J K Z R
1 1 1 1 0. 0.
2 3 1 1 0.3 0.
3 5 1 1 0.5 0.
4 5 3 1 0.5 1.
5 3 3 1 0.3 0.5
6 3 5 1 0.5 1.
7 1 5 1 0. 1.
8 1 3 1 0. 0.5
LINE
1 2
2 3
3 4 0.75 0
2 5
1 8
8 7
5 6
6 7 1.333 0
5 8
4 5
SURFACE
1 5
2 4
8 6
MERGE
5 4 5 6
ELEMENTS (QUAD, NODES=9, ALL)
ELEMENTS (BOUN, NODES=3, CRNS, CRNF)
3 4
7 6
SPINES
3 2 4
7 8 6
BCNODE (UZC, CONSTANT)
```

```

1 7 0.
3 4 1.
BCNODE (URC, CONSTANT)
3 4 0.
1 3 0.
BCNODE (SURFACE, CONSTANT)
3 4 1. 1. 1
END
*PROBLEM (AXI-SYMMETRIC, TRAN, LINEAR, FREE)
/*PROBLEM (AXI-SYMMETRIC, TRAN, NONL, FREE)
*PRESSURE (MIXED, DISC)
*EXECUTION (NEWJ)
*SOLUTION (N.R.=20, ACCF=0.75)
*TIMEINTEGRATION (BACK, NSTEPS=1, TSTART=0., DT=0.03)
*TMFUNCTION (SET=1, NPOINTS=2)
0. 1.
0.1 1.5
*NODES (FIMESH)
*DENSITY (CONST=1.)
*VISCOSITY (CONST=2.)
*PRINTOUT (NONE)
*SURFACETENSION (SET=1, CONST=1.5, ANG1=0., ANG2=180.)
/*SURFACETENSION (SET=1, CONST=100., ANG1=0., ANG2=180.)
/*SURFACETENSION (SET=1, CONST=200., ANG1=0., ANG2=180.)
*ELEMENTS (NODES=9, FIMESH)
*ELEMENTS (SURFACE, NODES=3, FIMESH)
*ELEMENTS (SURFACE, NODES=3, FIMESH)
*END

```

```

*TITLE
/RESTART
AXI1
*FIMESH (IMAX=5, JMAX=5)
EXPI
1 0 13 0 25
EXPJ
1 0 13 0 25
POINT
/ I J K Z R
1 1 1 1 0. 0.
2 3 1 1 0.3 0.
3 5 1 1 0.5 0.
4 5 3 1 0.5 1.
5 3 3 1 0.3 0.5
6 3 5 1 0.5 1.
7 1 5 1 0. 1.
8 1 3 1 0. 0.5
LINE
1 2
2 3
3 4 0.75 0
2 5
1 8
8 7
5 6
6 7 1.333 0
5 8

```

```

4 5
SURFACE
1 5
2 4
8 6
MERGE
5 4 5 6
ELEMENTS (QUAD, NODES=9, ALL)
ELEMENTS (BOUN, NODES=3, CRNS, CRNF)
3 4
7 6
SPINES
3 2 4
7 8 6
BCNODE (UZC, CONSTANT)
1 7 0.
3 4 1.
BCNODE (URC, CONSTANT)
3 4 0.
1 3 0.
BCNODE (SURFACE, CONSTANT)
3 4 1. 1. 1
END
*PROBLEM (AXI-SYMMETRIC, TRAN, LINEAR, FREE)
/*PROBLEM (AXI-SYMMETRIC, TRAN, NONL, FREE)
*PRESSURE (MIXED, DISC)
*EXECUTION (REST)
*SOLUTION (N.R.=20, ACCF=0.75)
*TIMEINTEGRATION (BACK, NSTEPS=1, TSTART=0.03, DT=0.03)
*TMFUNCTION (SET=1, NPOINTS=2)
0. 1.
0.1 1.5
*NODES (FIMESH)
*DENSITY (CONST=1.)
*VISCOSITY (CONST=2.)
*PRINTOUT (NONE)
*SURFACETENSION (SET=1, CONST=1.5, ANG1=0., ANG2=180.)
/*SURFACETENSION (SET=1, CONST=100., ANG1=0., ANG2=180.)
/*SURFACETENSION (SET=1, CONST=200., ANG1=0., ANG2=180.)
*ELEMENTS (NODES=9, FIMESH)
*ELEMENTS (SURFACE, NODES=3, FIMESH)
*ELEMENTS (SURFACE, NODES=3, FIMESH)
*ICNODE (VELOCITY, READ)
*ICNODE (SURFACE, READ)
*END

*TITLE
/1. ZEITSCHRITT, 2 BEWEGTE WÄNDE
DWA1
*FIMESH (IMAX=7, JMAX=5)
EXPI
1 0 13 0 25 0 37
EXPJ
1 0 13 0 25
POINT
/ I J K Z R

```

```

1 1 1 1 0. 0.
2 3 1 1 0.2 0.
3 5 1 1 0.8 0.
4 7 1 1 1. 0.
5 1 3 1 0. 1.
6 3 3 1 0.2 0.5
7 5 3 1 0.8 0.5
8 7 3 1 1. 1.
9 3 5 1 0. 1.
10 5 5 1 1. 1.

```

LINE

```

1 2
2 3
3 4
4 8
3 7
2 6
1 5
5 6
6 7
7 8
7 10
6 9
9 10

```

SURFACE

```

1 6
2 7
3 8
6 10

```

MERGE

```

5 6 9 6
8 7 10 7

```

ELEMENTS (QUAD, NODES=9, ALL)

ELEMENTS (BOUN, NODES=3, CRNS, CRNF)

```

4 8
10 9
5 1

```

SPINES

```

4 3 8
10 7 9
1 2 5

```

BCNODE (UZC, CONSTANT)

```

1 5 -1.
4 8 1.

```

BCNODE (URC, CONSTANT)

```

1 5 0.
4 8 0.
1 4 0.

```

BCNODE (SURFACE, CONSTANT)

```

4 8 1. 1. 1
1 5 1. 1. 1

```

END

*PROBLEM (AXI-SYMMETRIC, TRAN, LINEAR, FREE)

*PRESSURE (MIXED, DISC)

*EXECUTION (NEWJ)

*SOLUTION (N.R.=20, ACCF=0.75)

*TIMEINTEGRATION (BACK, NSTEPS=1, TSTART=0., DT=0.03)

*TMFUNCTION (SET=1, NPOINTS=2)

```

0.      1.
0.1    1.5
*NODES (FIMESH)
*DENSITY (CONST=1.)
*VISCOSITY (CONST=2.)
*SURFACETENSION (SET=1, CONST=200., ANG1=0., ANG2=180.)
*ELEMENTS (NODES=9, FIMESH)
*ELEMENTS (SURFACE, NODES=3, FIMESH)
*ELEMENTS (SURFACE, NODES=3, FIMESH)
*ELEMENTS (SURFACE, NODES=3, FIMESH)
*RENUMBER
/*DATAPRINT (NONE)
/*PRINTOUT (NONE)
*END

```

```

*TITLE
/RESTART, 2 BEWEGTE WÄNDE
DWA1
*FIMESH (IMAX=7, JMAX=5)
EXPI
1 0 13 0 25 0 37
EXPJ
1 0 13 0 25
POINT
/ I J K Z R
1 1 1 1 0. 0.
2 3 1 1 0.2 0.
3 5 1 1 0.8 0.
4 7 1 1 1. 0.
5 1 3 1 0. 1.
6 3 3 1 0.2 0.5
7 5 3 1 0.8 0.5
8 7 3 1 1. 1.
9 3 5 1 0. 1.
10 5 5 1 1. 1.
LINE
1 2
2 3
3 4
4 8
3 7
2 6
1 5
5 6
6 7
7 8
7 10
6 9
9 10
SURFACE
1 6
2 7
3 8
6 10
MERGE

```

```

5 6 9 6
8 7 10 7
ELEMENTS (QUAD, NODES=9, ALL)
ELEMENTS (BOUN, NODES=3, CRNS, CRNF)
4 8
10 9
5 1
SPINES
4 3 8
10 7 9
1 2 5
BCNODE (UZC, CONSTANT)
1 5 -1.
4 8 1.
BCNODE (URC, CONSTANT)
1 5 0.
4 8 0.
1 4 0.
BCNODE (SURFACE, CONSTANT)
4 8 1. 1. 1
1 5 1. 1. 1
END
*PROBLEM (AXI-SYMMETRIC, TRAN, LINEAR, FREE)
*PRESSURE (MIXED, DISC)
*EXECUTION (REST)
*SOLUTION (N.R.=20, ACCF=0.75)
*TIMEINTEGRATION (BACK, NSTEPS=1, TSTART=0.03, DT=0.03)
*TMFUNCTION (SET=1, NPOINTS=2)
0. 1.
0.1 1.5
*NODES (FIMESH)
*DENSITY (CONST=1.)
*VISCOSITY (CONST=2.)
*SURFACETENSION (SET=1, CONST=200., ANG1=0., ANG2=180.)
*ELEMENTS (NODES=9, FIMESH)
*ELEMENTS (SURFACE, NODES=3, FIMESH)
*ELEMENTS (SURFACE, NODES=3, FIMESH)
*ELEMENTS (SURFACE, NODES=3, FIMESH)
*RENUMBER
/*DATAPRINT (NONE)
/*PRINTOUT (NONE)
*ICNODE (VELOCITY, READ)
*ICNODE (SURFACE, READ)
*END

```