

Längsdehnung und Elastizitätsmodul einer laufenden Bedruckstoffbahn

Belau, Lutz; Scheuter, Karl. R.
(1985)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00013560>

License:



CC-BY 4.0 International - Creative Commons, Attribution

Publication type: Report

Division: 16 Department of Mechanical Engineering
16 Department of Mechanical Engineering

Original source: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/13560>

Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren
der Technischen Hochschule Darmstadt

Institutsdirektor: Prof. Dipl.-Ing. Karl R. Scheuter

Längsdehnung und Elastizitätsmodul einer laufenden Bedruckstoffbahn

L. Belau, K. R. Scheuter

Darmstadt 1985

Institutsbericht 1/1985

Der vorliegende Bericht unterrichtet über das im Januar 1983 begonnene und Ende 1984 abgeschlossene Forschungsvorhaben "Bahn-
dehnungsmessung".

Finanzieller Träger des Forschungsvorhabens war die Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e.V. mit Zuwendungen des Bundeswirtschaftsministeriums über die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen A.I.F.

Dank gebührt der Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e.V. und ihren Mitgliedsfirmen auch für ihre bereitwillige Unterstützung durch Sachspenden. Dank gebührt auch den Papierherstellern, welche dank großzügiger Papierspenden die Durchführung des Vorhabens wesentlich gefördert haben.

I N H A L T

	Seite
1. Einleitung	1
2. Bahntransport	1
2.1 Bedingungen in der Druckmaschine	1
2.2 Erkenntnisse zur Bahntransporttheorie	4
2.3 Konzept zur Dehnungsmessung	8
3. Aufbau der Versuchsmaschine und des Meßstandes	11
3.1 Maschinentechnische Realisation	11
3.2 Meßtechnische Ausrüstung	20
4. Messungen	33
4.1 Fehlerbetrachtungen und Vorbereitungen zur Messung	33
4.2 Meßprogramm	38
4.3 Meßergebnisse	41
4.4 Schlußfolgerungen aus den Messungen	51
5. Zusammenfassung	51
6. Literaturverzeichnis	53

1. Einleitung

Der Druck von mehrfarbigen Bildern wird durch Aufeinanderdrucken einfarbiger Farbauszugs-Teilbilder realisiert. Die Druck- bzw. Bildqualität wird in hohem Maße dadurch bestimmt, daß die Teilbilder des Mehrfarbendruckes, welche in sich folgenden Druckeinheiten einer Rollenrotationsdruckmaschine von der jeweiligen Druckform auf die laufende Bahn übertragen werden, hinsichtlich Bildgröße und Bildlage ausreichend genau aufeinanderpassen. Als ausreichend gilt bisher, wenn in keinem Bereich des Gesamtbildes die Bildgrößenfehler und Bildlagefehler zu Verschiebungen der Teilbildelemente von mehr als 5/100 mm führen (Passerfehlertoleranz). Größere Abweichungen werden besonders an Stellen scharfer Farbkontraständerung wegen der Bildung von Farbsäumen visuell als sehr störend empfunden. Aber auch kleinere Fehler wirken sich oft qualitätsmindernd aus, da sie feine Details verwischen. Die ständig steigenden Qualitätsforderungen bedeuten einen immer wichtiger werdenden "stehenden" Passer, und der o.a. Toleranzwert wird nach unten korrigiert werden müssen.

2. Bahntransport

2.1 Bedingungen in der Druckmaschine

Die zu bedruckende Bahn muß einer vorbestimmten Wegrichtung durch die Druckmaschine folgen. Nur so ist gewährleistet, daß die seitliche Lage des in jedem Druckwerk gedruckten Bildes erhalten bleibt. Damit die Bahn von ihrem bestimmten Weg nicht abweicht, sind Richtkräfte notwendig, die nur mittels des Bahnzuges, d.h. der Bahnspannung, erzeugt werden können.

Beim Lauf durch die Druckeinheiten von z.B. einer Tiefdruckrollenrotationsmaschine berührt die gespannte und um den Betrag von etwa 1 % gedehnte Bahn Leitwalzen, Formzylinder und Presseure oder andere Maschinenteile, welche fortlaufend neue Reibkräfte in die Bahn einleiten und dadurch deren Verzerrungszustand jeweils verändern. Diesen i.a. reversiblen Verzerrungen können sich Dimensionsänderungen überlagern, die unter Umständen nicht reversibel sind

(z.B. Schrumpfen durch Trocknung, Kalandriereffekte). Daraus ergibt sich eine Summenverzerrung, welche im allgemeinen an jeder Stelle der Maschine, vor allem auch in den Drucklinien der sich folgenden Druckeinheiten, jeweils eine andere ist. Damit nun die sich folgenden Teilbilder aufeinanderpassen, müssen die Bildgrößen auf den sich folgenden Formzylindern in Lauf- und Querrichtung dem jeweiligen Verzerrungszustand der Bahn angepaßt werden. Im Falle von Papier, welches hier im Vordergrund stehen soll, ist davon auszugehen, daß die Querkontraktion klein ist ($\nu \simeq 0,2$). Dementsprechend zeigt die Erfahrung, daß in der Praxis eine Anpassung in Querrichtung bei Bahnbreiten unter einem Meter im allgemeinen nicht notwendig ist. Bei über ca. 1 m breiten Maschinen ist jedoch meist eine Anpassung notwendig, um den zulässigen Bildbreitenfehler (Querpasserfehler) nicht zu überschreiten. Werden mehrere Seiten über die Bahnbreite gedruckt, dann genügt es meist, die Mittenabstände der einzelnen Seiten zu korrigieren. Die Anpassung in Laufrichtung ist dagegen immer von grundlegender Bedeutung, wie sich aus folgenden Überlegungen zwangsläufig zeigt.

Die Kontinuitätsbedingung als Grundlage des Bahntransportes verknüpft die Bahngeschwindigkeit an jedem Ort mit der zugehörigen Verzerrung. Damit sind nun insbesondere auch die Bahngeschwindigkeiten in den Drucklinien der sich folgenden Druckeinheiten gegeben. Da diese Drucklinien Klemmstellen sind, in denen zwischen Bahn und druckender Oberfläche Haften auftritt, sind dadurch auch alle Umfangsgeschwindigkeiten der Formzylinder und - weil ihre Winkelgeschwindigkeiten notwendigerweise alle gleich sind - ihre Radien gegeben. Stimmt die Anpassung der Zylinderradien an die Verzerrungszustände nicht, dann prägen die Formzylinder der Bahn in den Drucklinien falsche Geschwindigkeiten auf. Dadurch wird die Kontinuitätsbedingung für den stationären Bahnlauf verletzt. Es treten Ausgleichsvorgänge auf, die zu stochastischen Längspasserfehlern führen, welche mit den praxisüblichen Register- oder Passerreglern nicht ausregelbar sind. Ihrem Funktionsprinzip entsprechend können Register- oder Passerregler nur Lagefehler der Passermarken, nicht jedoch Bildlängenfehler, ausregeln. Daher sind sie nicht fähig, eine Verletzung der Kontinuitätsbedingung auszugleichen, und

ihre Regeleingriffe führen nicht zu einem stationären Bahnlauf mit "stehendem" Passer.

In der Praxis hat es sich als unmöglich erwiesen, die Formzylinder-
radien genau den Verzerrungszuständen anzupassen. Man paßt deshalb
vorzugsweise über die vom Trockner erzeugte Schrumpfung der Papier-
bahn die Verzerrungszustände den Formzylinderradien an. Auf diese
Weise ist es oft möglich, innerhalb eines Zylindersatzes alle Ra-
dien gleich zu halten. Dies beinhaltet den großen Vorteil, daß bei
der photomechanischen Übertragung der Teilbilder auf die Zylinder
keine Bildlängen Anpassung in der Laufrichtung notwendig ist.

Unabhängig davon, ob die Zylinderradien den Verzerrungen oder diese
den Zylinderradien angepaßt werden, muß der Verzerrungszustand der
Bahn in den Drucklinien während des Druckens der ganzen Auflage
konstant gehalten werden. Da der Verzerrungszustand zwischen der
ersten und letzten Druckeinheit infolge der Kontinuitätsbedingung
ursächlich von der Verzerrung der freien Bahn vor der ersten Druck-
einheit abhängt, muß diese letzte aufrecht erhalten bleiben. Das
bedeutet, daß die Längsdehnung ϵ_1 der Bahn vor dem ersten Druckwerk
konstant gehalten werden muß. Der Dehnzustand der Bahn als Folge
der Einleitung von Richtkräften legt es nahe, durch konstant halten
der Bahnspannung σ_1 vor dem ersten Druckwerk dieser Forderung nach-
zukommen. Das setzt jedoch stillschweigend voraus, daß zwischen
Bahndehnung und -spannung ein linearer und über die Bahnlänge orts-
unabhängiger Zusammenhang besteht. Zugversuche an Papierstreifen
haben ergeben, daß in Dehnungsbereichen unter etwa zwei Promille
ein praktisch ausreichend genau proportionaler Zusammenhang zwischen
Last und Dehnung existiert. Damit ist die Hooke'sche Elastizitäts-
gleichung anwendbar, und der Proportionalitätsfaktor E (Elastizi-
tätsmodul) gibt örtlich eine eindeutige, lineare Relation zwischen
Papierspannung und -dehnung. Weiterhin wurde jedoch festgestellt,
daß die geforderte Ortsunabhängigkeit des E -Moduls bei Papier nicht
vorausgesetzt werden kann. Eine Regelung auf konstante Bahnspannung
in der Druckmaschine führt deshalb nicht zwingend zu einem stehen-
den Passer.

Der örtliche E-Modul der Papierbahn hängt im wesentlichen ab von der örtlichen flächenbezogenen Masse, vom örtlichen Massenverhältnis zwischen Faser und Füllstoff bzw. Strich, vom örtlichen Feuchtigkeitsgehalt und von der Lage im Wickel d.h. der Rolle, von welcher die zu bedruckende Bahn abgezogen wird. Die letzte Abhängigkeit wirkt sich in der Praxis besonders auffällig aus, da der E-Modul der äußeren Wickellagen in der Regel höher ist als jener der inneren Lagen /1/. Äußere und innere Lagen werden beim Rollenwechsel zusammengefügt. Die sprunghafte Änderung des E-Moduls bewirkt dann schwere Passerstörungen, die praktisch immer außerhalb der Toleranz liegen. Aber auch die nach dem Abklingen dieser Störungen als Folge eines nichtstationären Papierlaufes noch auftretenden, nicht ausregelbaren Passerfehler gelten als Folge gesteigerter Qualitätsanforderungen als schädlich. Die Regelung des Verzerrungszustandes vor der ersten Druckeinheit hat deshalb eine neue, große Bedeutung.

2.2 Erkenntnisse zur Bahntransporttheorie

Zur Beschreibung des Transportverhaltens einer elastischen Stoffbahn in einem System angetriebener, umschlungener Walzen sind die aus der Mechanik bekannten Grundgesetze - Bewegungsgleichung, Kontinuitätsgleichung, Coulomb'sches Reibungsgesetz und Hooke'scher Elastizitätsansatz - notwendig und hinreichend. Unter Benutzung einiger Vereinfachungen ($\nu \simeq 0$ und trockene Coulomb'sche Reibung zwischen Stoffbahn und treibender Oberfläche) ist die Reduktion auf ein eindimensionales Problem möglich. Ein stationärer Bahnlauf durch die Druckmaschine kann wie in der Strömungsmechanik mittels der Kontinuitätsbedingung beschrieben werden. Durch einen beliebig gewählten Querschnitt A_x ist der Massenfluß $\dot{m} = \rho_x \cdot v_x \cdot A_x = \text{konstant}$. Die Dichte

$$\rho_x = \rho_0 \frac{1}{1 + \epsilon_x} \quad (\nu = 0) \quad (1)$$

ist durch den Dehnungszustand ϵ_x gegeben, weil der tragende Bahnquerschnitt wegen $v \approx 0$ praktisch konstant bleibt. Damit entsteht als Kontinuitätsgleichung folgende Form:

$$\frac{v_0}{1+\epsilon_0} = \frac{v_1}{1+\epsilon_1} = \frac{v_x}{1+\epsilon_x} \quad (2)$$

oder

$$\frac{v_0}{v_1} = \frac{1+\epsilon_0}{1+\epsilon_1} \quad (2.1)$$

Der Hooke'sche Ansatz

$$\sigma_i = \epsilon_i \cdot E \quad (3)$$

verknüpft die Dehnungen mit den Spannungen. Da einerseits die Bahnlängen zwischen den Stellen 0 und 1 in allen hier betrachteten Fällen kurz sind und andererseits die Änderungen des Elastizitätsmodules längs der Bedruckstoffbahn in der Regel langsam verlaufen, darf der Momentanwert des Elastizitätsmodules $E = \text{konstant}$ gesetzt werden. Damit wird aus Gl. 2.1

$$\frac{v_0}{v_1} = \frac{1 + \frac{\sigma_0}{E}}{1 + \frac{\sigma_1}{E}} \quad (4)$$

Diese Gleichung verknüpft die Dehnung bzw. Spannung und die Laufgeschwindigkeit einer beliebigen Stelle (0) der Stoffbahn mit der Dehnung bzw. Spannung und der Laufgeschwindigkeit an einer beliebigen anderen Stelle (1) der Stoffbahn unter der praktisch zulässigen, vereinfachenden Voraussetzung, daß die Querdehnungen und die Querschnittsänderungen der Stoffbahn quasi verschwinden.

Da in der freien Bahn abgesehen von vernachlässigbaren Luftkräften keine äußeren Kräfte eingeleitet werden, ist offensichtlich eine Änderung der Zustände von ϵ_x , σ_x und v_x nur innerhalb sogenannter

Klemmstellen, die durch eine Anpreßkraft gekennzeichnet sind, möglich. In Druckmaschinen treten die in Abb. 1 dargestellten Grundtypen von Klemmstellen auf /2/.

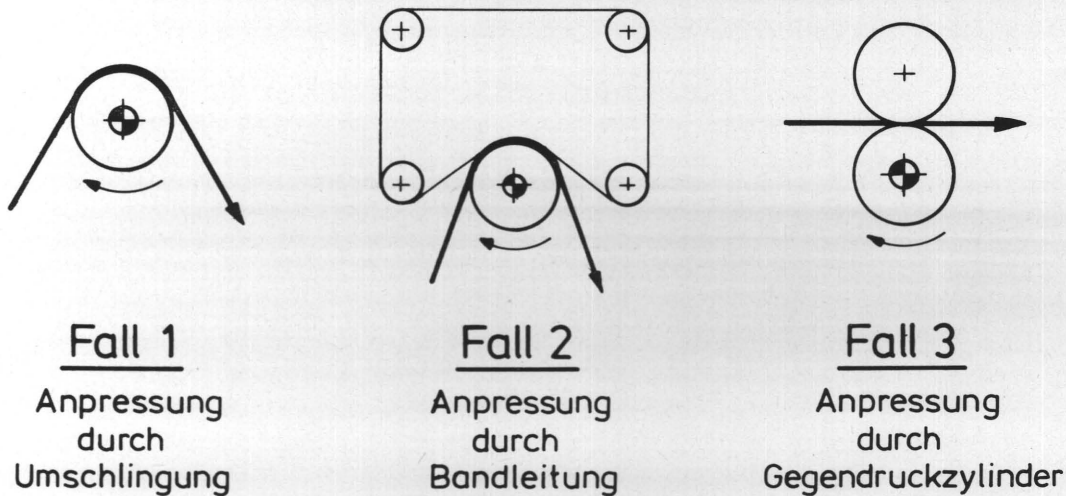


Abb. 1 Die Grundtypen der Klemmstellen nach /2/

Die theoretische Behandlung des Bahnlaufproblems stützt sich im allgemeinen auf ein vereinfachtes Prozeßmodell, bei dem als grundlegende Vereinfachung die Geschwindigkeit der freien Bahn mit der Geschwindigkeit in der Haftzone der treibenden Klemmstelle gleichgesetzt wird /2/, /3/, /4/, /5/, /6/, /7/, /8/, /9/, /10/. Es wird also angenommen, daß nur in der Klemmstelle und im nachfolgenden Gleitbereich Kräfte in die Bahn eingeleitet werden. Diese Modellvorstellung beinhaltet, daß auch bei beliebigen Radienverhältnissen der sich folgenden treibenden Formzylinder unter Voraussetzung eines konstanten Bahnzustandes vor der ersten Klemmstelle der Bahnlauf stationär ist, also weder ein Bildlage- noch ein Bildgrößenfehler in Laufrichtung auftritt. Zusätzlich beinhaltet diese Modellvorstellung die Möglichkeit der Selbstregelung. Verändert man nämlich den Bahnzustand vor der ersten Klemmstelle eines solchen Modells mit gegebenen Zylinderradien, dann wird nach Ablauf von Ausgleichsvorgängen der Bahnlauf wieder stationär, so daß die während der Ausgleichsvorgänge auftretenden Passerfehler wieder verschwinden. Untersuchungen /9/ zeigen jedoch, daß die Realität mit dieser Modell-

vorstellung keineswegs übereinstimmt, da nach Veränderung des Bahnzustandes vor der ersten Klemmstelle die auftretenden Passerfehler nicht vollständig abklingen. Es verbleibt ein erheblicher Restfehler, der aus einem konstanten und einem überlagerten stochastischen Anteil besteht. Der konstante Anteil kann, z.B. unter Anwendung eines Registerreglers, durch Weglängenänderung der Bahn oder Zylinderverdrehung korrigiert werden. Der stochastische Anteil bleibt jedoch und verschwindet erst dann, wenn der ursprüngliche, richtige Bahnzustand vor dem ersten Druckwerk wieder hergestellt wird.

Zur Erklärung dient der Nachweis /11/, daß die Modellvorstellung gleicher Geschwindigkeit der freien und der geklemmten Bahn nicht zutreffend ist, sondern daß eine Förderabweichung auftritt. Aus umfassenderen Untersuchungen /12/ (AIF-Nr. 1712, 2548) ergibt sich die Schlußfolgerung, daß der Bahnzustand vor dem ersten Druckwerk und die Radienverhältnisse der sich folgenden treibenden Zylinder bei gegebenen Betriebsparametern eindeutig miteinander verknüpft sind, wenn der stationäre Bahnlauf mit stehendem Passer als Voraussetzung höchster Druckqualität eingehalten werden soll. Funktionell bestimmend für den Bahnzustand vor dem ersten Druckwerk ist die Rollenabwickleinheit der Druckmaschine. Entsprechend der geschichtlichen Entwicklung werden die Rollenabwickleinheiten auch heute noch auf konstanten Bahnzug geregelt. Es wird also nicht berücksichtigt, daß der Elastizitätsmodul einer von einer Rolle abgewickelten Bahn in der Regel keine Konstante ist. Vielmehr ist zu erwarten /1/, /3/, daß der Elastizitätsmodul der äußeren Lagen höher ist als jener der inneren Lagen und zwar unabhängig von der Wickelart und der Lagerung der Rolle. Die Unterschiede können dabei 15 % übersteigen, und auch unabhängig davon werden von Papiermachern Elastizitätsschwankungen innerhalb der Bahn von bis zu 10 % vermutet.

Diese Zusammenhänge erklären, daß die Spannungsregelung durchweg als unbefriedigend angesehen werden muß, und erlauben folgende Schlußfolgerungen:

1. Die heute noch übliche Regelung auf konstante Bahnspannung vor dem ersten Druckwerk führt bei jeder Abweichung des Elastizitätsmoduls vom Sollwert zu einem instationären Bahnlauf mit unruhigem Passerverhalten.
2. Die eingangs genannten Überlegungen hinsichtlich der Kontinuitätsbedingung bedeuten, daß die Regelung auf konstante Bahndehnung sich der idealen Problemlösung sehr stark nähert.

2.3 Konzept zur Dehnungsmessung

Die direkte Messung der Längsdehnung in einer laufenden Bahn ist unmöglich. Die genaue Betrachtung der Kontinuitätsbedingung im Kapitel 2.2 gibt jedoch den Hinweis auf die Möglichkeit der indirekten Dehnungsmessung an der laufenden Bedruckstoffbahn. In Gleichung (4) treten neben dem momentan als konstant betrachteten Elastizitätsmodul nur zwei Bahngeschwindigkeiten und -spannungen auf. Eine Auflösung der Gleichung (4) nach E ergibt

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_0 \frac{v_1}{v_0}}{\frac{v_1 - v_0}{v_0}} \quad (5)$$

Diese Beziehung liefert nur dann eine definierte Rechenvorschrift für den Elastizitätsmodul, wenn sich die mit 1 indizierten Größen von denjenigen mit 0 indizierten Größen unterscheiden. Dann kann also mittels zweier Geschwindigkeitsmessungen und zweier Spannungsmessungen je vor und nach einer Klemmstelle der Elastizitätsmodul bzw. die Dehnung der laufenden Bahn in den beiden Bahnabschnitten bestimmt werden. Macht man sich zunutze, daß der Geschwindigkeitenquotient im Zähler der Gleichung (5) nur um Promille von Eins verschieden ist, so reduziert sich die Bestimmungsgleichung des Elastizitätsmoduls zu

$$E \approx \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\frac{v_1}{v_0} - 1} = \frac{\Delta\sigma}{\frac{\Delta v}{v_0}} \quad (5.1)$$

Mit $\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E}$ wird somit

$$\varepsilon_1 = \frac{\frac{v_1 - v_0}{v_0}}{\frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\sigma_1}} = \frac{\frac{\Delta v}{v_0}}{\frac{\Delta \sigma}{\sigma_1}} \quad (6)$$

Die Messung der Bahnspannungen bzw. der Bahnspannungsdifferenz darf unter Berücksichtigung der heutigen DMS-Meßtechnik hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit als problemlos angesehen werden. Mittels stabiler Wägezellen ist außerdem eine quasi weglose Spannungsmessung möglich. Weiterhin setzt aber der Versuch, den E-Modul zu ermitteln und die Dehnungsregelung zu realisieren, voraus, daß die sich nur geringfügig unterscheidenden Bahnlaufgeschwindigkeiten vor und nach einer Klemmstelle ausreichend genau und möglichst als Echtzeitwerte bestimmt werden können. Die Messung der sich nur in der Größenordnung von weniger als 1 % unterscheidenden Bahngeschwindigkeiten erfordert eine relative Genauigkeit von besser 10^{-5} , da zur Errechnung des Elastizitätsmoduls bzw. der Dehnung die Bildung der Bahngeschwindigkeitsdifferenz ausreichend genau erfolgen muß. Das war bisher nicht möglich.

Die Messung der Papierbahngeschwindigkeit ist auch bei der Papierherstellung von Bedeutung. Als Maß für die Bahngeschwindigkeit wird dort die Umfangsgeschwindigkeit der angetriebenen Trockentrommeln benutzt. Da jedoch meist Schlupf auftritt, ist diese Methode zu ungenau, so daß eine direkte Bahngeschwindigkeitsmessung versucht wurde. Zur Anwendung gelangte z.B. die Methode der Kreuzkorrelation der an zwei hintereinander liegenden Stellen gemessenen optischen Transmissionen $\tau(x)$ bzw. $\tau(x + x_0)$. Die Methode erwies sich als sehr empfindlich auf Änderungen der Papiereigenschaften, so daß sie bisher nicht eingeführt wurde. Ihre Eignung für den vorliegenden Fall muß verneint werden.

Ferner ist eine Methode bekannt, die Ultraschall (100 bis 200 kHz) benutzt. Der Dopplereffekt entsteht hier nicht durch Reflexion an der strukturierten und veränderlichen Oberfläche, sondern durch die

vom Ultraschallfeld in der Bahn erzeugten und mit ihr weglaufenden Schwingungswellen /13/. Die starke Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur ist im vorliegenden Fall sehr nachteilig, da an zwei merklich voneinander entfernten Orten gemessen werden muß. Daher ist auch diese Methode fragwürdig.

Die Laser-Doppler-Anemometrie stellt schließlich eine weitere Möglichkeit zur berührungsfreien Messung der Bahngeschwindigkeit dar. Die heute käuflichen Systeme sind zur Messung hoher Geschwindigkeiten mit einer Genauigkeit von etwa 10^{-3} ausgelegt. Die Steigerung der Genauigkeit auf besser 10^{-4} ist zwar nach Herstellerangaben möglich, würde jedoch eines erheblichen Entwicklungsaufwandes bedürfen, dessen unkalkulierbaren Kosten die Durchführung des Forschungsvorhabens möglicherweise gefährdet hätten.

Der Vollständigkeit halber sei noch die Methode der Durchlaufzeitmessung einer optisch oder elektronisch erkennbaren Marke durch zwei Tore genannt. Da der Torabstand zur Erzielung der notwendigen Genauigkeit vergleichsweise groß sein muß, ist kaum eine Annäherung an eine Echtzeitmessung möglich. Außerdem müßte die Bahn vor dem Einlauf in die eigentliche Druckmaschine mit diesen Marken präpariert (bedruckt) werden.

Es verbleibt also nur der Rückgriff auf die indirekte Ermittlung der Bahngeschwindigkeit mittels der Umfangsgeschwindigkeitsmessung umschlungener Meßwalzen. Dabei sind einerseits Schlupfmöglichkeiten auszuschließen und andererseits höchste Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen. Die Verwendung massereicher und extrem reibungsarm gelagerter Meßwalzen schließt bei Bahnumschlingung von 180° das Auftreten von Schlupf aus. Es ist in jedem Fall gewährleistet, daß im Bahneinlaufbereich der Umschlingungszone ein ausreichend großer Bereich mit reiner Haftung zwischen Bahn und Zylinderoberfläche existiert /2/. An die Fertigungsgenauigkeit und die Wucht der Meßwalzen stellt die Anwendung dieser Meßmethode hohe, jedoch auch in der Praxis beherrschbare Forderungen. Da die Meßwalzen eine erhebliche Masse aufweisen, ist das Auflösungsvermögen der Methode hinsichtlich der Störfrequenz beschränkt. Da erfahrungsgemäß Stör-

frequenzen sich auf den Passer dank der guten Dämpfungseigenschaften des Bahntransportsystems nur dann auswirken, wenn sie wesentlich unter 5 Hz liegen, hat dieser Gesichtspunkt innerhalb des Ablaufes einer Rolle keine Bedeutung.

Die indirekte Bahngeschwindigkeitsmessung über die Umfangsgeschwindigkeit der Meßwalzen beinhaltet, daß die hierzu proportionalen Winkelgeschwindigkeiten ausreichend genau und praktisch als Echtzeitwerte bestimmt werden können. Es ist bei der Durchführung des AIF-Vorhabens Nr. 4148 gelungen, dank einer neuartigen Meßwertverarbeitung die Differenz $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_0$ über die Ermittlung der Differenzfrequenz zweier mit den beiden Meßwalzen verbundenen inkrementaler Drehwinkelgeber hochgenau (besser 10^{-6} relative Genauigkeit) in Echtzeit zu bestimmen, so daß der für die Berechnung des Elastizitätsmoduls bzw. der Bahndehnung notwendige Quotient $\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta\omega}{\omega} \approx 0,001$ genau genug gebildet werden kann /14/, /15/.

Mißt man die Eignung der angeführten Geschwindigkeitsmeßmethoden an Kriterien der späteren praktischen Anwendung, dann stellt man fest, daß die Methode der Winkelgeschwindigkeitsmessung besondere Vorzüge aufweist. Sie benötigt keine Geräte im Bahnbereich, welche das Bahneinziehen behindern. Gleichfalls entfallen besondere Sicherheitsvorkehrungen. Der einfache mechanische Auf- und Einbau läßt auch eine leichte Integration in den Druckmaschinenbau erwarten.

3. Aufbau der Versuchsmaschine und des Meßstandes

3.1 Maschinentechnische Realisation

Die Untersuchung des Elastizitätsmoduls bzw. der Dehnung einer laufenden Bedruckstoffbahn macht eine Modellmaschine erforderlich, welche zumindest hinsichtlich des Bahntransportes einer Tiefdruckrollenrotation mit - mindestens - einem Druckwerk entspricht. Den grundsätzlichen Aufbau einer solchen Maschine zeigt Abb. 2.

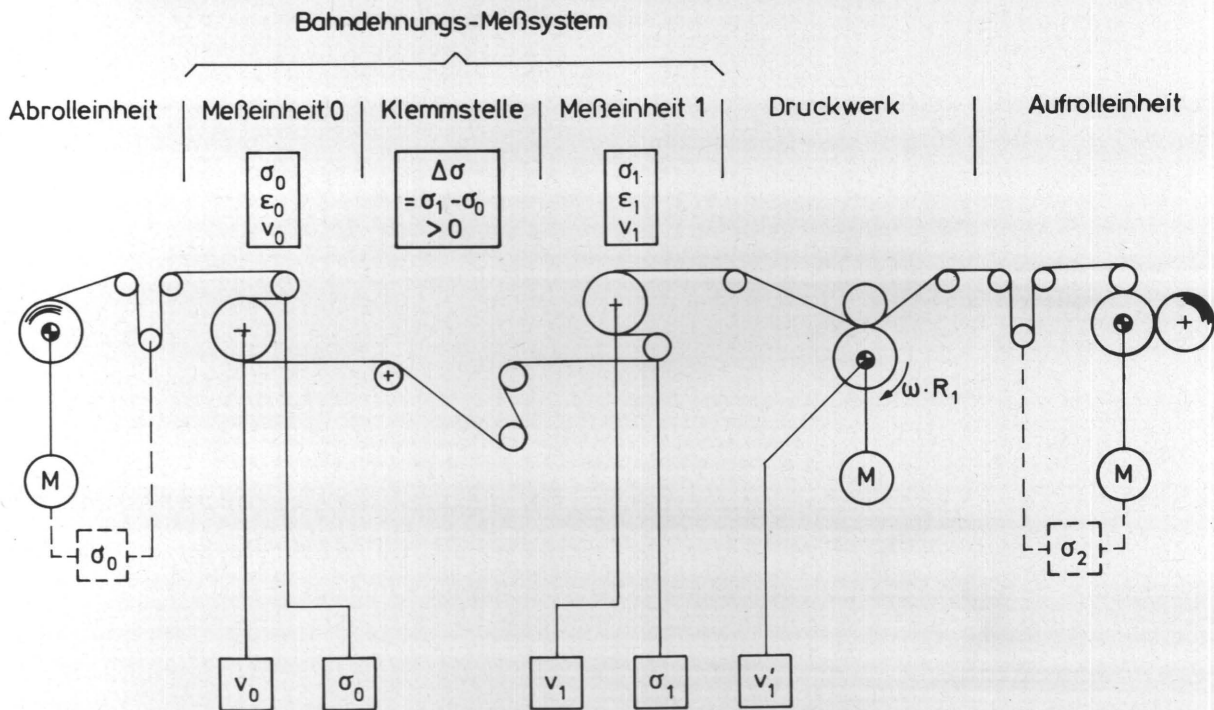


Abb. 2 Prinzip des Modellmaschinenaufbaus

Für einen hinsichtlich des Papierees sparsamen Betrieb wurde die Bahnbreite der Modellmaschine auf 300 mm festgelegt. Aufgeteilt in Funktionseinheiten gliedert sich die Maschine in folgende Aggregate:

- eine bahnspannungsgeregelte Abwickel­einheit
- eine Dämpfungseinheit zur Minimierung einlaufender Störungen
- zwei Meßeinheiten zur Ermittlung der Bahnspannungen und -geschwindigkeiten
- eine Klemmstelle zwischen den o.a. Meßeinheiten zur Erzeugung zweier unterschiedlicher Bahnzustände
- ein angetriebenes Druckwerk verantwortlich für den Bahntransport
- eine bahnspannungsgeregelte Aufwickel­einheit

Sowohl Ab- wie auch Aufwickleinheit sind von der Druckmaschinenindustrie bereitgestellte Standardgeräte. Während die Abwickleinheit einen Rollendurchmesser von 1000 mm zuläßt, ist die Aufwickleinheit auf einen Wickeldurchmesser von 650 mm beschränkt. Es mußte deshalb jeder Laufversuch mit 1000 mm Rollen zum Wickelwechsel jeweils unterbrochen werden. Dies erwies sich im Nachhinein nicht als Nachteil, weil durch den Wickelwechsel ein Produktionsunterbruch simuliert wird. Dadurch ergaben sich erzwungenermaßen Erkenntnisse über den Einfluß von Maschinenstillständen auf den Elastizitätsmodul.

Der übrige Teil der Modellmaschine ist das Ergebnis einer konstruktiven Studienarbeit und der entsprechenden Fertigung durch das Forschungsinstitut unter reger Beihilfe der Druckmaschinenindustrie. Die endgültige Maschinenversion ist in den Abbildungen 3, 4, 5, 6, 7, 8 und 9 zu erkennen.

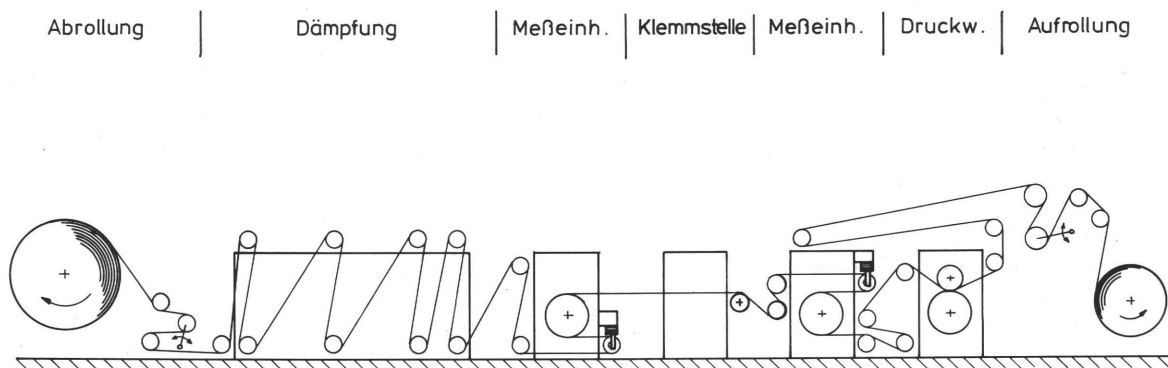


Abb. 3 Tiefdruckrollenrotations-Modellmaschine

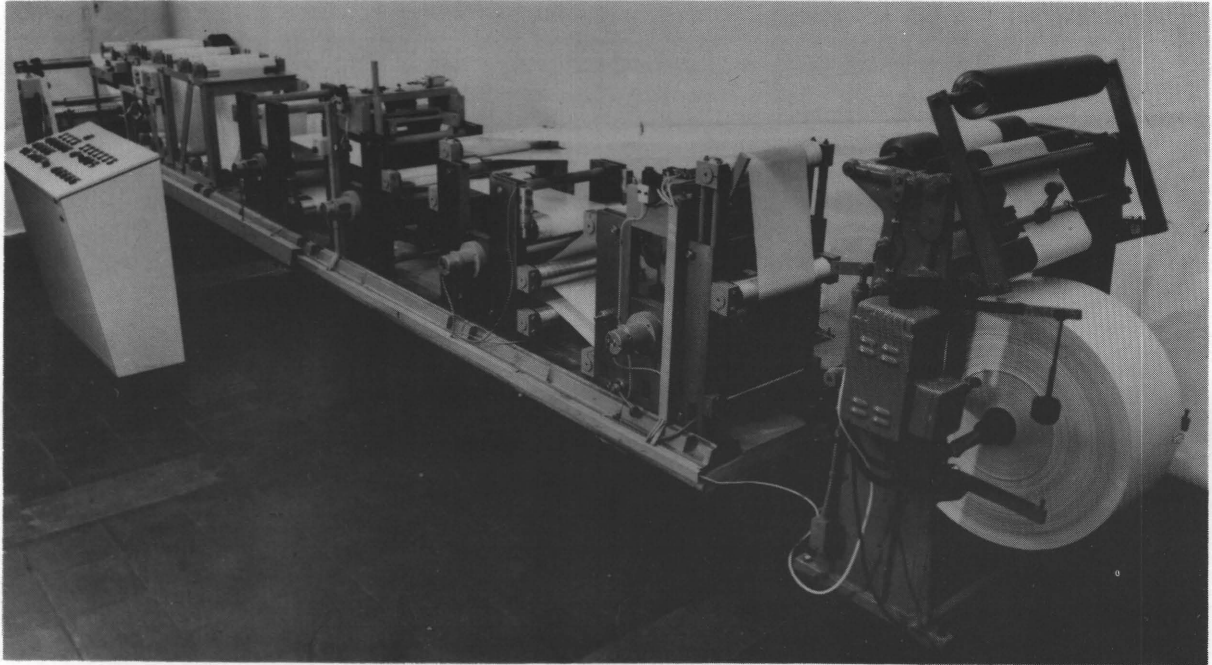


Abb. 4 Modellmaschine Gesamtansicht von Aufrollseite

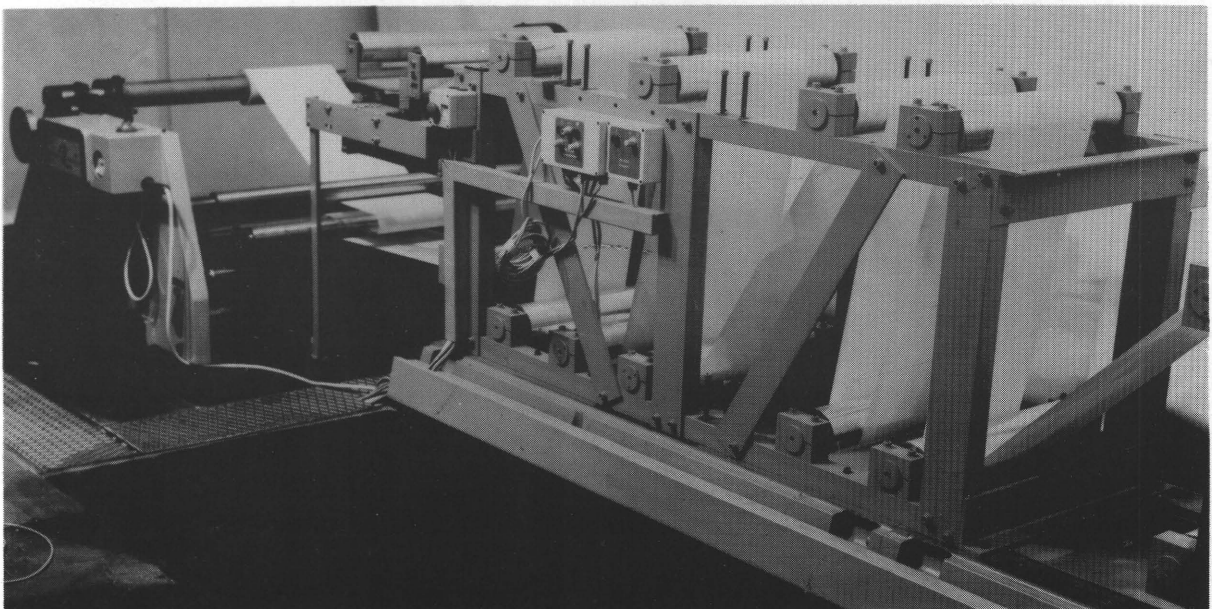


Abb. 5 Modellmaschine - Abrollung und Dämpfungseinheit

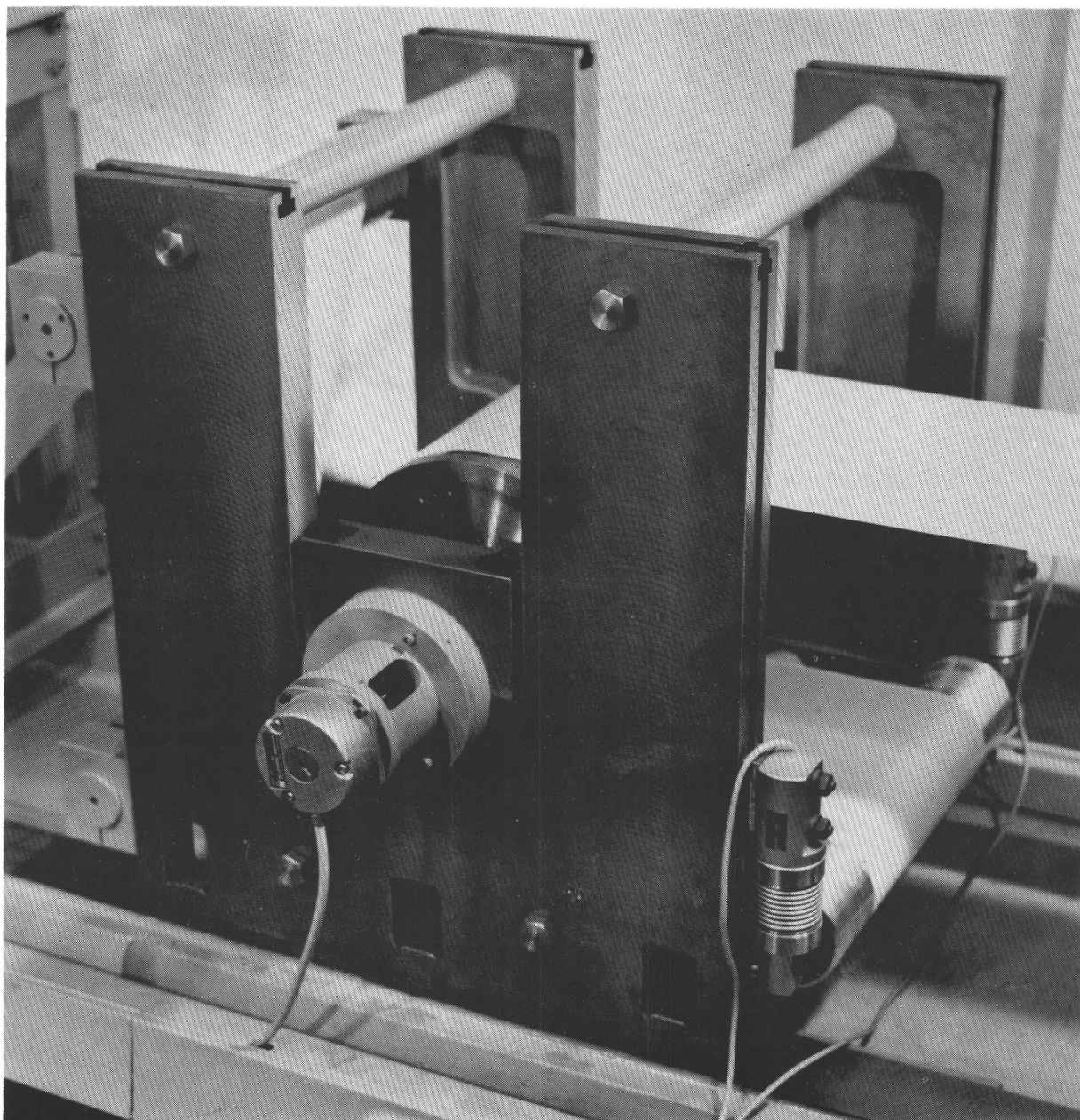


Abb. 6 Modellmaschine - Meßeinheit vor der Klemmstelle

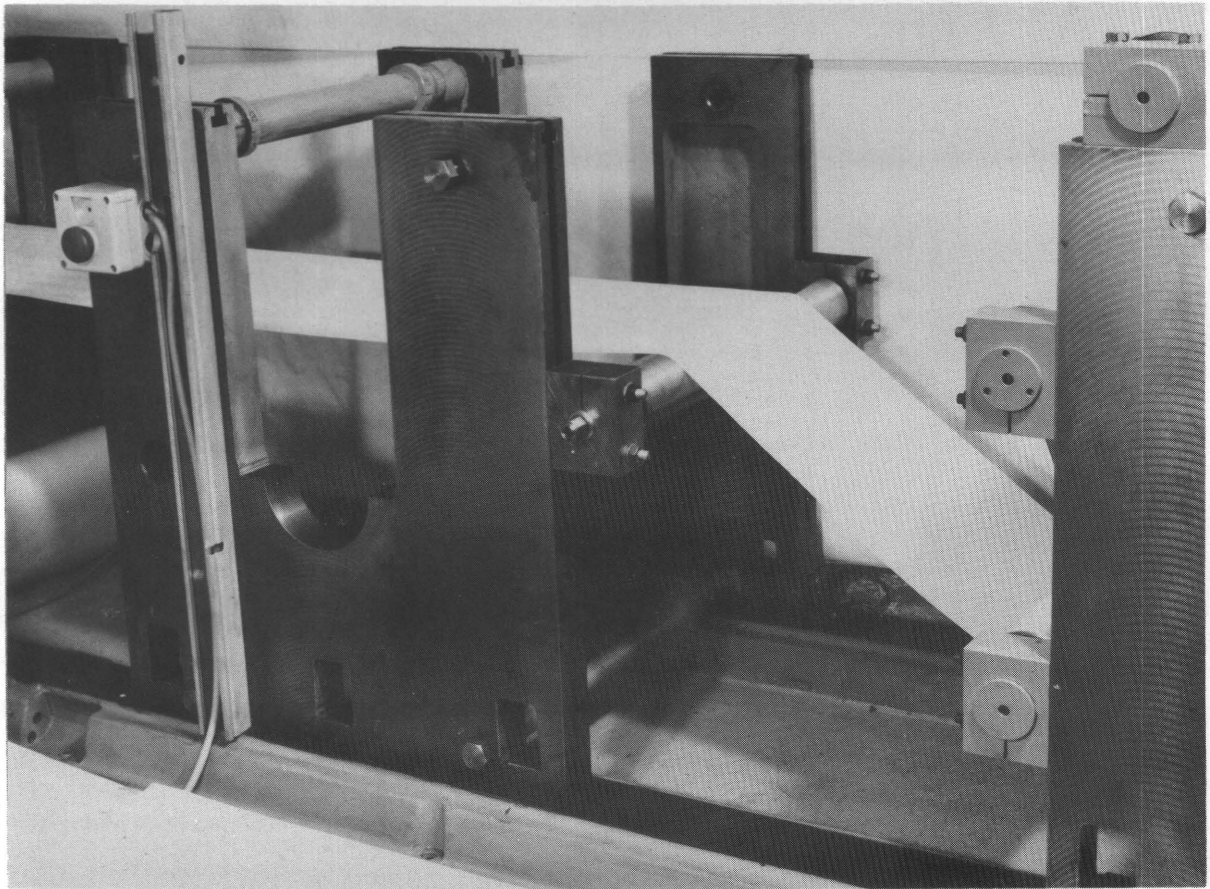


Abb. 7 Modellmaschine - Klemmstelle

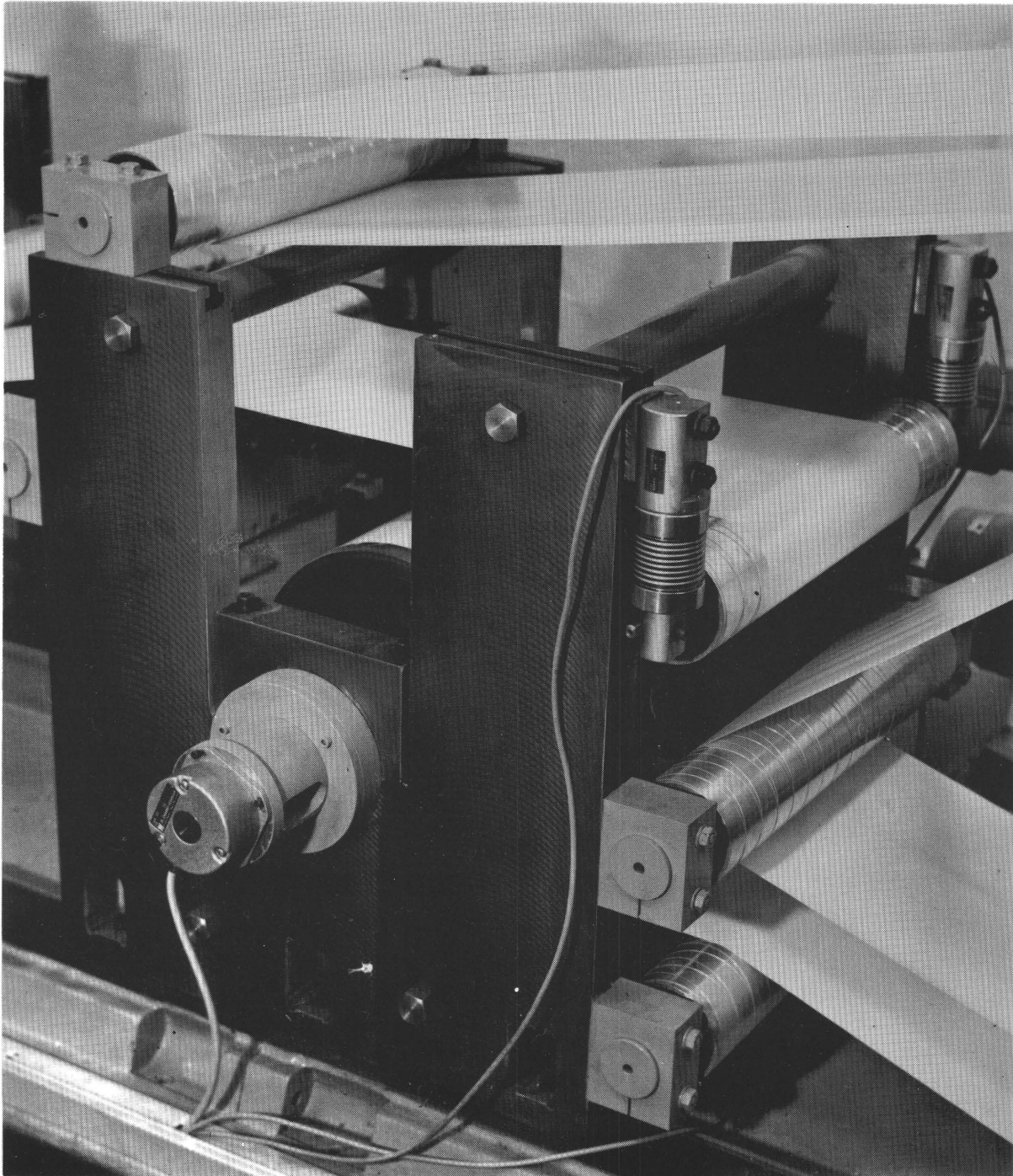


Abb. 8 Modellmaschine - Meßeinheit nach der Klemmstelle

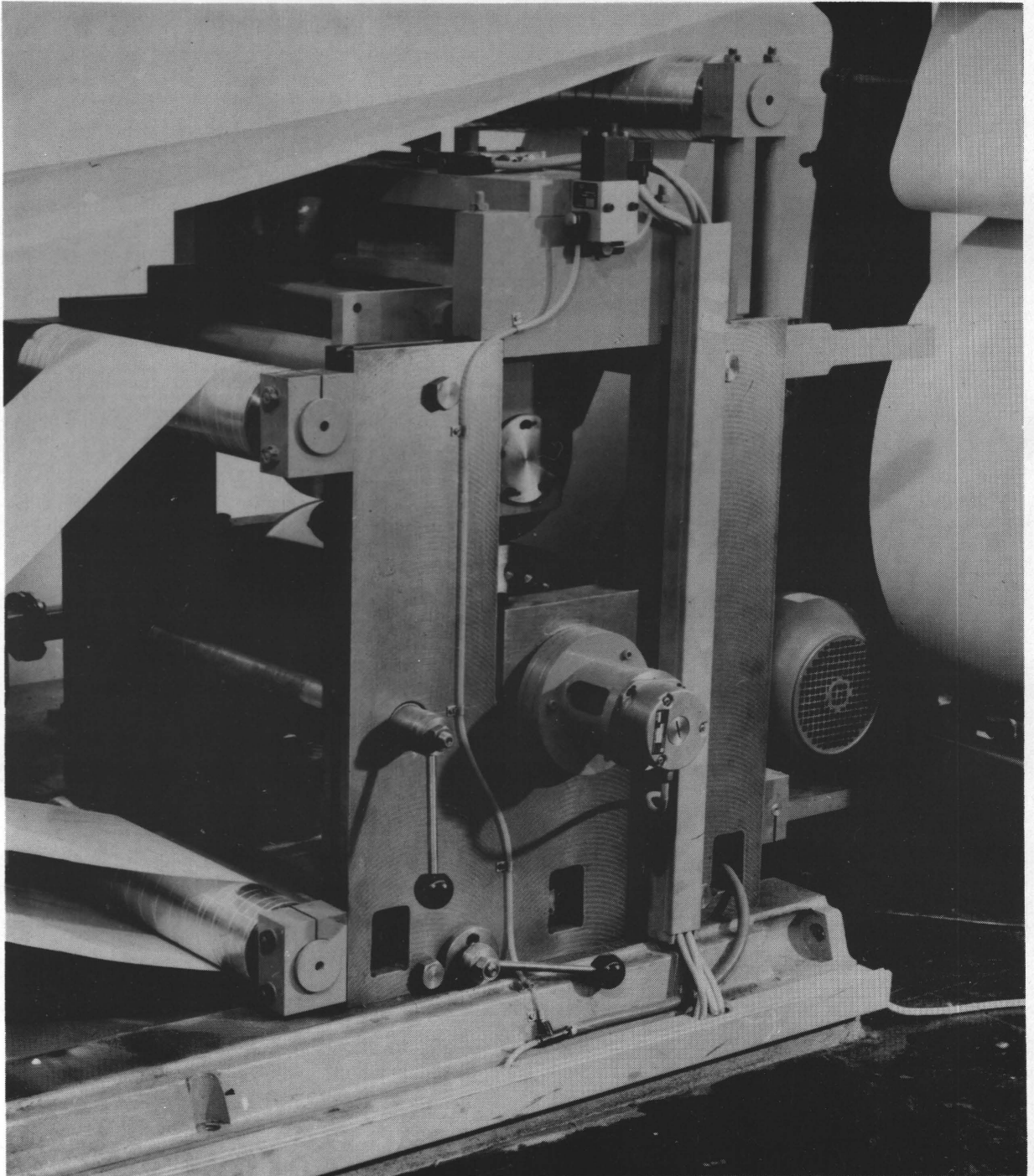


Abb. 9 Modellmaschine - Druckwerk

Außer den beiden Wickeleinheiten befinden sich alle Einheiten auf einem Fundament aus Beton, worauf 2 parallele Gußschienen zur Befestigung der Aggregatwände verankert sind. Die Dämpfungseinheit besteht aus einem Rahmengestell, in das mittels Lagerböcken neun Umlenkwalzen von 100 mm Durchmesser eingebaut sind. Durch entsprechende Bahnführung ist somit ein fester Speicher von ca. neun Bahnmeter den weiteren Einheiten vorgeschaltet.

Die Meß- und Druckwerkeinheiten bestehen alle aus je zwei u-förmig ausgeschnittenen Gußwänden, die präzise eben geschliffen sind und mit je vier starken Traversen exakt parallel verbunden und versteift sind. In den u-förmigen Ausschnitten befindet sich die Lagerung der Geschwindigkeitsmeßwalzen bzw. des Druckzylinders. Eine in den Wänden umlaufende T-Nut dient zur Aufnahme der Lagerböcke für Umlenkwalzen und gegebenenfalls der Spannungsmeßwalzen ($d = 100 \text{ mm}$). Letztere sind an als Biegebalken ausgeführten Meßzellen befestigt, wodurch sich aus der gemessenen Verbiegung der Bahnzug sowie die Bahnspannung ermitteln läßt. Die Durchmesser der Geschwindigkeitsmeßwalzen wie auch des Formzylinders im Druckwerk sind zu 300 mm festgelegt, um die Einflüsse der meßtechnisch nicht zugänglichen Dickenveränderungen des Papiere durch unterschiedliche Bahnspannungen und Pressungen unter ein Prozent zu minimieren /16/, /17/, /18/, /19/, /20/. Die Abweichung im Durchmesser aller drei Zylinder unterschreitet durch hochgenaues Schleifen $2 \mu\text{m}$; diejenigen der beiden Geschwindigkeitsmeßwalzen beträgt $1,95 \mu\text{m}$. Für die Lagerung werden kleine, hochgenaue Schrägkugellager verwendet, die ein minimales Reibmoment aufweisen. Das hat zur Folge, daß in jedem Fall eine Haftzone im Umschlingungsbereich der Geschwindigkeitsmeßwalzen existiert.

Das Druckwerk ist praxisüblich aufgebaut. Der treibende Zylinder weist, wie schon erwähnt, 300 mm und der Druckzylinder (Presseur) 200 mm Durchmesser auf. Der Antrieb des Druckwerkes erfolgt durch einen Gleichstromantrieb über ein Schneckengetriebe mit einem Übersetzungsverhältnis von 1: 4,63. Bei einer Grenzdrehzahl des Antriebes von 3000 min^{-1} beträgt die dadurch erzielbare Bahngeschwindigkeit $10,2 \text{ m/s}$. Die Zustellkraft des Druckzylinders wird einstellbar

mit Hilfe von Pneumatikbalgzylindern erzeugt und bleibt infolge Krafteinprägung auch bei Änderung der Bahndicke konstant. Das Druckwerk ist nicht mit einer Einfärbungsvorrichtung versehen, da ein Bedrucken zur E-Modul- und Dehnungsermittlung nicht erforderlich ist.

3.2 Meßtechnische Ausrüstung

Die Berechnung von Elastizitätsmodul bzw. Dehnung vor dem ersten Druckwerk erfolgt mit Hilfe der Gleichungen (5.1) und (6). Zur Ermittlung der Bahnspannungen werden sogenannte Wägezellen eingesetzt, von denen je zwei eine Umlenkwalze (Bahnspannungsmeßwalze) abstützen. Die Wägezellen erfassen mittels Dehnungsmeßstreifen (DMS) die Auslenkung von Biegebalken infolge der Last, die von der die Meßwalze umschlingenden Bahn herrührt. Meßprinzip und -aufbau sind in Abb. 10 und 11 dargestellt.

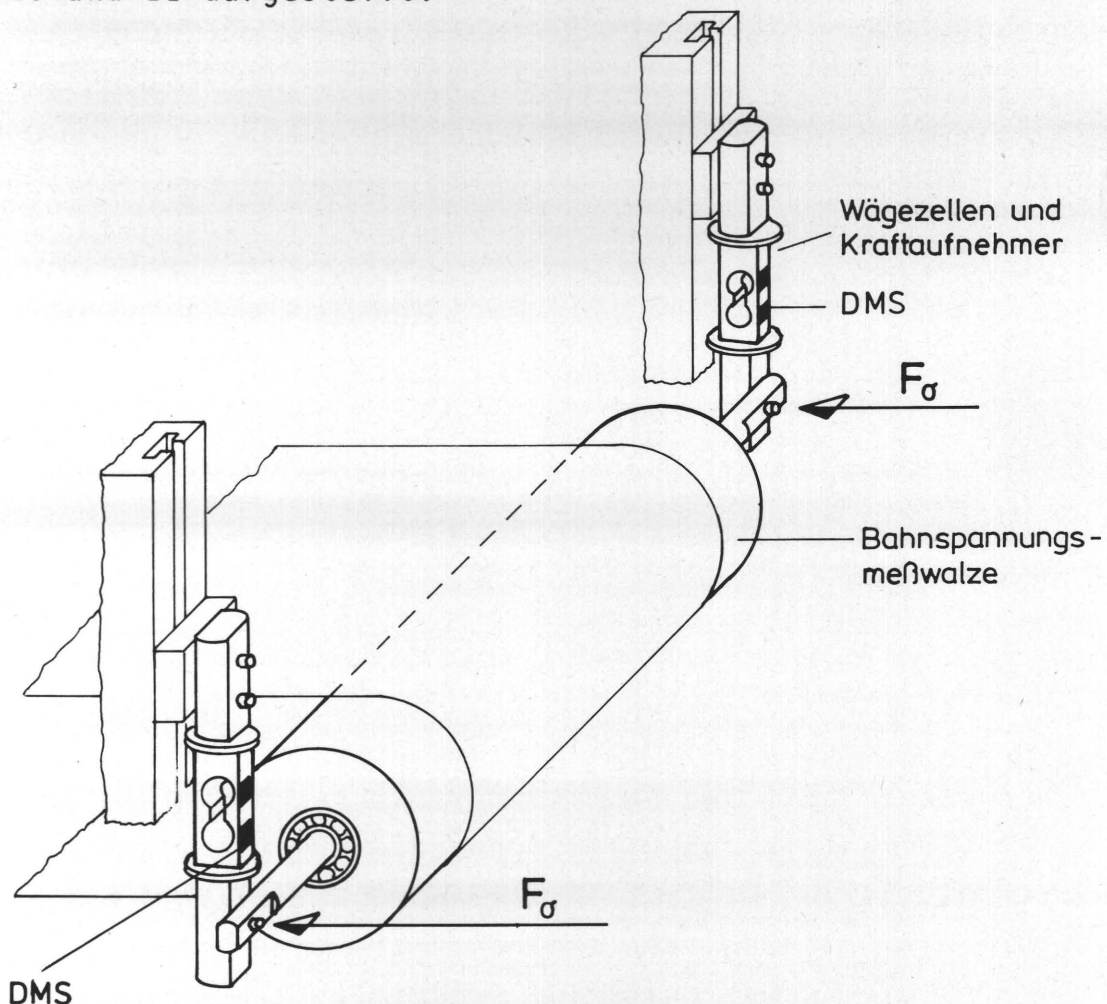


Abb. 10 Bahnspannungsmeßprinzip

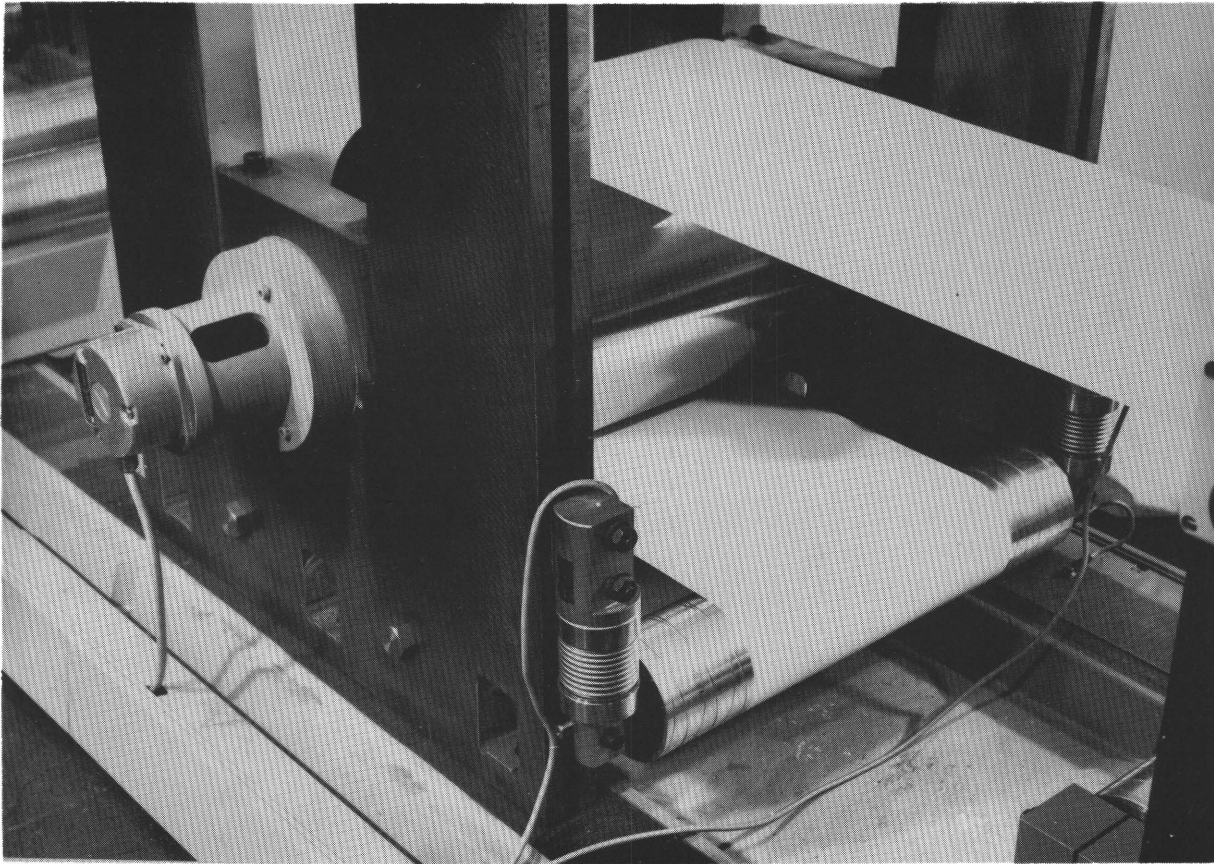


Abb. 11 Bahnspannungsmeßwalze (rechts vorne)

Es handelt sich demnach um eine Kraftmessung mit Hilfe einer Widerstand-Meßbrückenschaltung. Die Meßschaltung ist als DMS-Vollbrückenschaltung ausgeführt und mit Korrektur- und Kompensationswiderständen ausgerüstet, so daß unerwünschte Einflüsse auf Nullsignal, Kennwert und Kennlinie weitgehend beseitigt werden. Die Nennlast der eingesetzten Wägezellen beträgt 10 kN. Dieser hohe Wert bedeutet eine vergleichsweise hohe Steifigkeit (17,8 kN/mm), was bei den zu erwartenden Lasten (bis etwa 2 % der Nennlast) bei einer Auslenkung von weniger als 8 μm eine quasi weglose Bahnspannungsmessung erlaubt. Je zwei Wägezellen sind parallelgeschaltet mit einem Trägerfrequenzverstärker verbunden, der eine sich linear mit der Last verändernde Ausgangsspannung liefert. Die Verwendung

von Trägerfrequenzverstärkern hat den Vorteil einer vernachlässigbaren Temperaturdrift und bei einer Grenzfrequenz von 1000 Hz ist eine vollständige Messung der Bahnspannungsverläufe gewährleistet. Auch die Grenzfrequenz der Wägezellen von 835 Hz beschneidet nicht das erwartete Bahnspannungsfrequenzspektrum, das infolge der Zylinderträgheiten deutlich unter 100 Hz liegt.

Die Eichung der Bahnspannungsmessung erfolgt durch Umschlingen der Meßwalze mit einem einseitig eingespannten Bahnstück und Belastung des freien Bahnendes mit verschiedenen Gewichten bekannter Masse. Bezogen auf die Bahnbreite b ergibt sich aus der Gewichtsmasse m mit der Erdbeschleunigung g die resultierende Bahnspannung zu

$$\sigma_x = \frac{m \cdot g}{b} \quad (7)$$

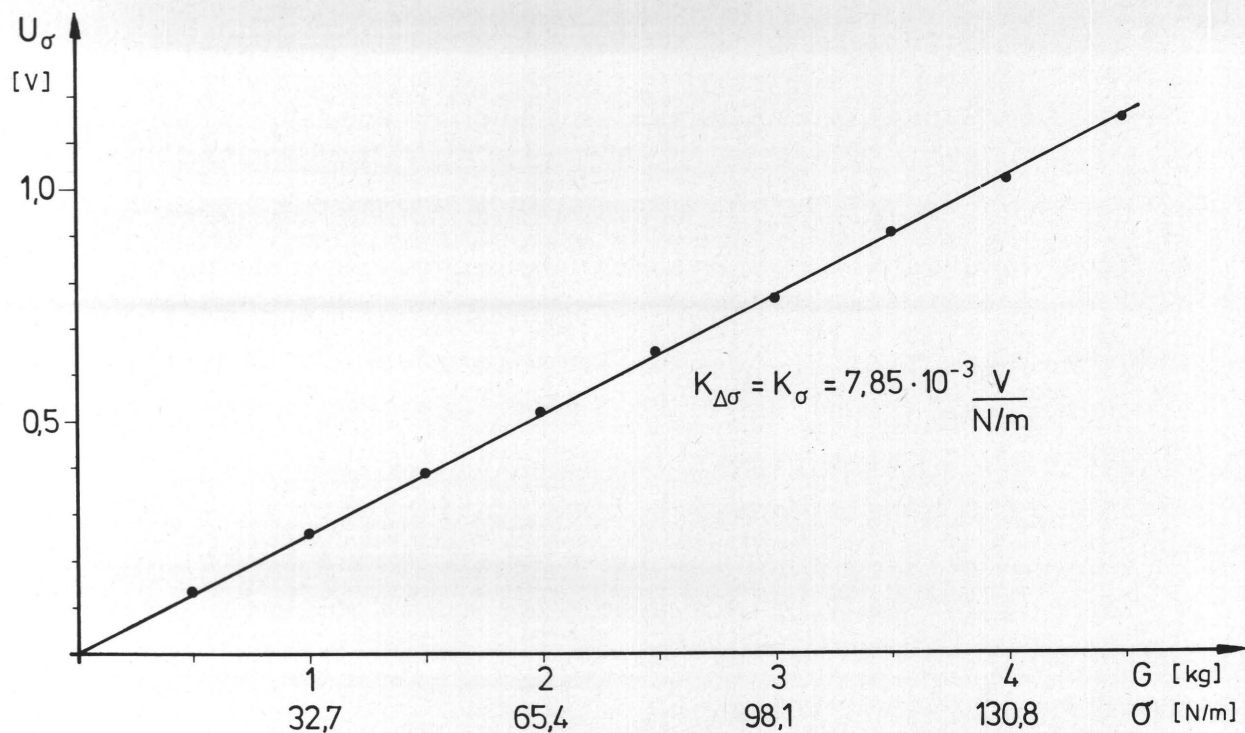


Abb. 12 Eichung der Bahnspannungsmessung

Die in Abb. 12 gezeigte Eichgerade ergibt einen Empfindlichkeitskoeffizienten

$$S_{\sigma} = 127,389 \text{ Nm}^{-1}/\text{V}$$

Eine signifikante Linearitätsabweichung ist nicht zu erkennen.

Einen deutlich höheren Schwierigkeitsgrad gegenüber der Bahnspannungsmessung beinhaltet die Bestimmung der bezogenen Bahngeschwindigkeitsdifferenz mit ausreichender Genauigkeit, um den E-Modul nach Gleichung (5.1) sicher berechnen zu können. Die besondere Anstrengung muß hier einer genauen Absolutgeschwindigkeitsmessung wie auch der genauen Bestimmung einer rund um den Faktor 1000 kleineren Geschwindigkeitsdifferenz gewidmet werden. Die gewählte Methode der Geschwindigkeitsmessung ist, wie in Kapitel 2.3 ausgeführt, die indirekte Messung der Bahnlaufgeschwindigkeit über die Winkelgeschwindigkeitsmessung der von Papier umschlungenen Meßwalzen.

Das im AIF-Vorhaben Nr. 4148 entwickelte Verfahren zur hochgenauen Messung der Phasenlage bzw. Phasenverschiebung zweier Impulsfolgen (Differenzwinkelmessung) erlaubt es, mit einer relativen Genauigkeit von besser 10^{-6} die Winkeldifferenz der beiden Meßwalzen vor und nach der Klemmstelle zu bestimmen /10/. Wenn mit Hilfe einer der beiden Impulsfolgen als externer Taktgeber die Winkeldifferenz $\Delta\varphi$ aufgezeichnet und nach φ differenziert wird, ist die gesuchte Größe $\frac{\Delta\varphi}{\varphi}$ entsprechend $\frac{\Delta v}{v_0}$ im Nenner von Gl. (6) bekannt und die Berechnung von E kann durch einfache Quotientenbildung erfolgen. Die Erprobung dieser Meßtechnik an der Modellmaschine zeigte jedoch, daß die Verwendung dieser Auswertetechnik hinsichtlich der optimalen Trennung von Signal- und Rauschteilen starke Filterprobleme aufwirft. Im Hinblick auf eine komplette Systemlösung zur Bestimmung von bezogener Winkelgeschwindigkeit, Elastizitätsmodul und Bahndehnung vor dem ersten Druckwerk wurde eine neue Auswerteschaltung entwickelt, deren Aufbau und Wirkungsweise im folgenden vorgestellt wird (Abb. 13a, b).

Abrollung

Dämpfung

Meßeinh.

Klemmstelle

Meßeinh.

Druckw.

Aufrollung

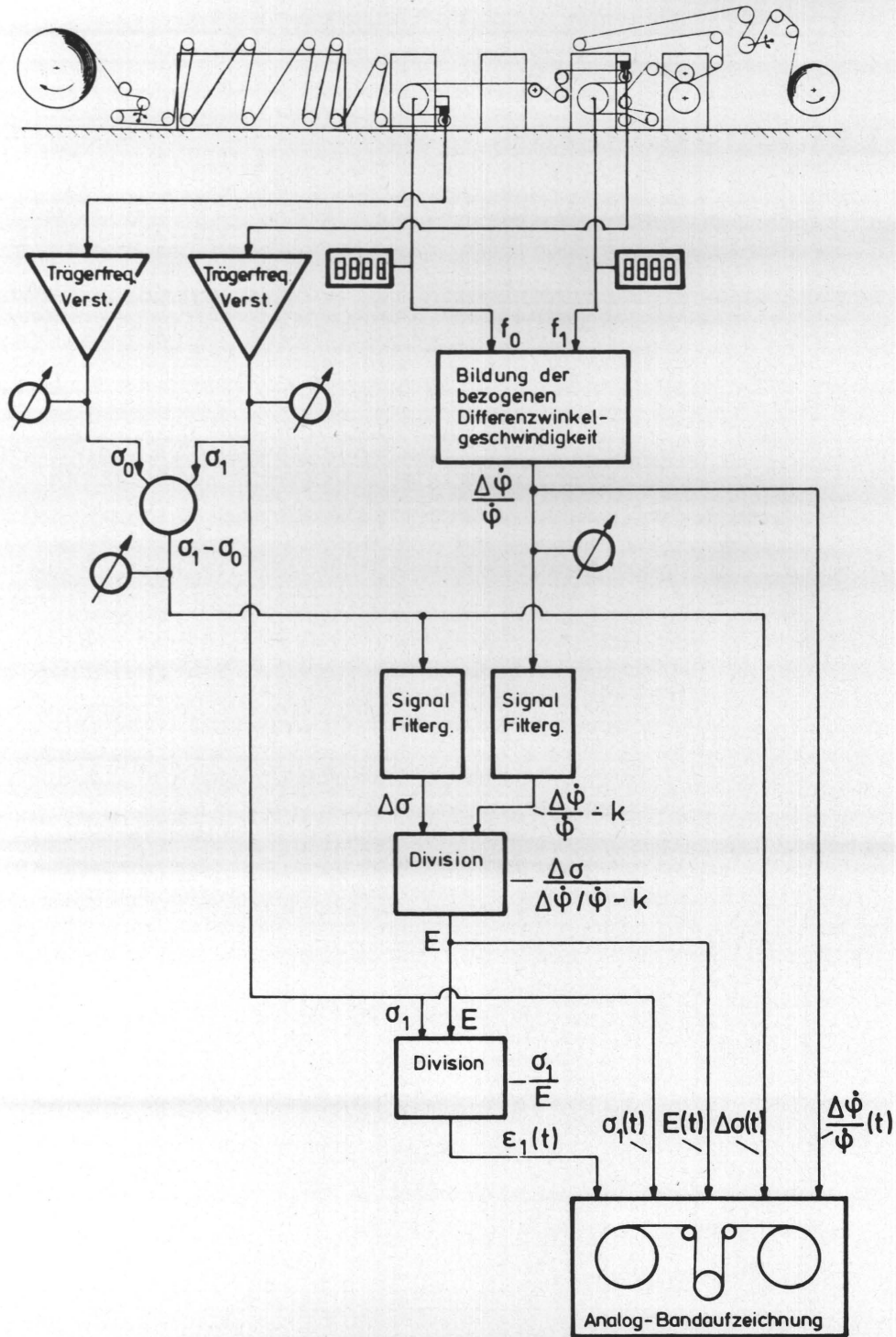
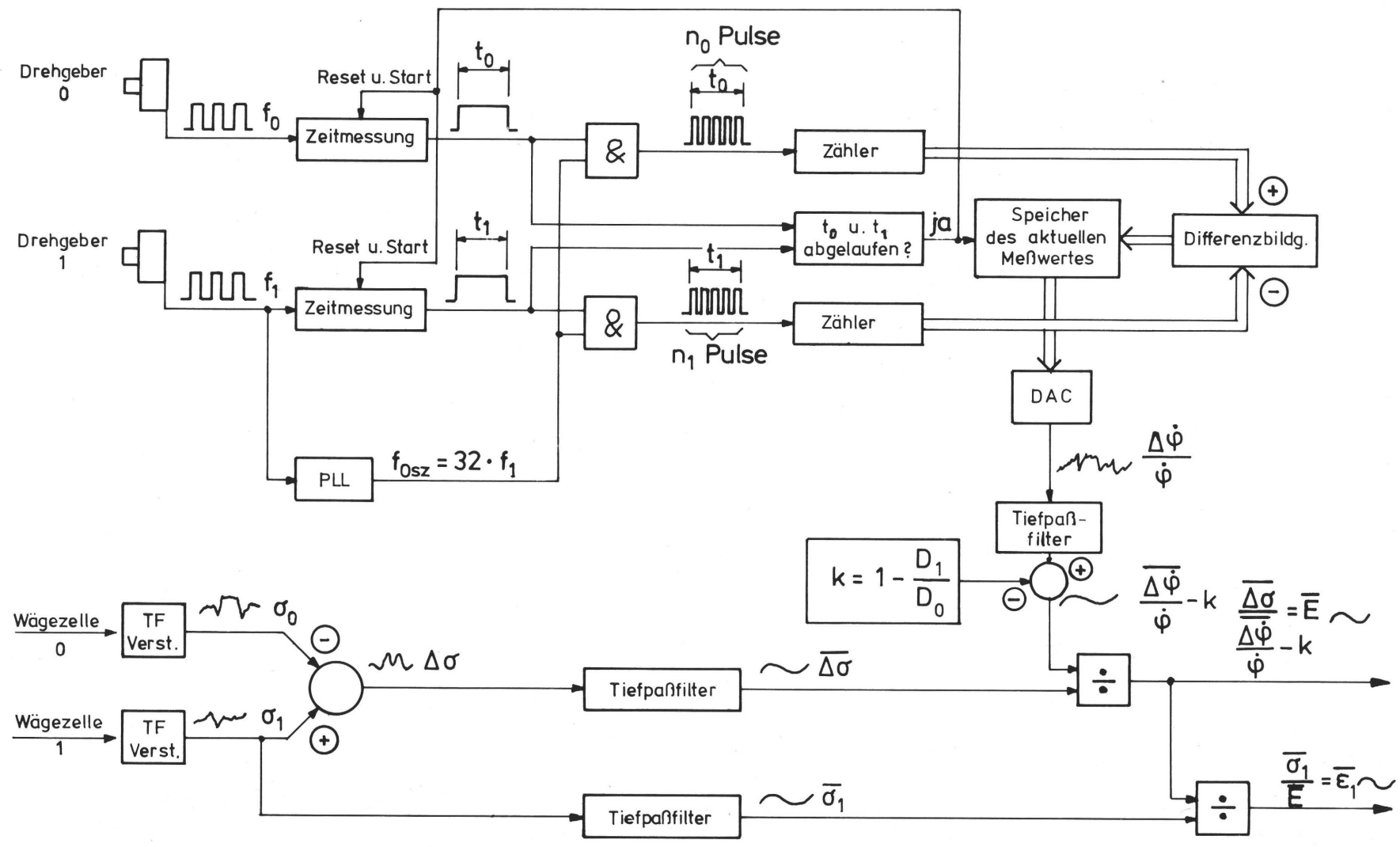


Abb. 13a Blockschaltbild der E - und ϵ_1 -Berechnung

Abb. 13b Blockschatbild der E- und ϵ_1 -Berechnung



Die Bildung der Größe $\frac{\Delta\dot{\phi}}{\dot{\phi}}$ wird auf eine Zeitmessung zurückgeführt unter Benutzung der folgenden Zusammenhänge:

Es ist mit n_i = Drehwinkelgeberdrehzahl

$$\dot{\phi}_i = \omega_i = 2 \pi n_i \quad (8)$$

Mit C = Zahl der Inkremente der beiden gleichen Drehwinkelgeber und f_i = Rechteckimpulsfrequenz des Drehwinkelgebers i ist

$$n_i = \frac{f_i}{C} \quad (9)$$

Mit T_i = Rechteckperiode des Drehwinkelgebersignals gilt ferner

$$f_i = \frac{1}{T_i} \quad (10)$$

Somit wird

$$\frac{\Delta\dot{\phi}}{\dot{\phi}} = \frac{\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_0}{\dot{\phi}_0} = \frac{T_0 - T_1}{T_1} \quad (11)$$

Mit T_i^* = internes Zeitmaß für $2^N - 2$ Impulse des Drehwinkelgebers i , wobei N = Bit-Anzahl und mit

K = Proportionalitätskonstante des internen Zeitmaß gilt

$$T_i = K \cdot T_i^* \quad (12)$$

und damit

$$\frac{T_0 - T_1}{T_1} = (T_0^* - T_1^*) K \cdot f_1 \quad (13)$$

Das heißt

$$\frac{\Delta\dot{\phi}}{\dot{\phi}} = (T_0^* - T_1^*) K \cdot f_1 \quad (14)$$

Die interne Zeitbasis

$$f_{osz} = K \cdot f_1 \quad (15)$$

wird in der PLL- (phase locked loop) Schaltung durch Vervielfachung der Meßdrehwinkelgeberfrequenz f_1 gebildet.

Wählt man $N = 7$, so starten und stoppen je 126 Drehgeberimpulse den zugehörigen Zähler (i) für die Zeitpulse von f_{osz} . Die Anzahl n_i der Zeitpulse ist ein Maß für den Zeitraum, in dem von je einem Drehwinkelgeber (i) die festgelegte Zahl von 126 Inkrementpulsen auftritt. Mit $K = 32$ und $f_1 = 126 \text{ s}^{-1}$ werden in Zähler 1 genau 4032 Zeitpulse gezählt, und bei einer mittleren relativen Winkelgeschwindigkeitsabweichung von 1 Promille werden 4028 Zeitpulse im Zähler 0 gemessen. Die Bildung der Differenz aus beiden Zählern wird erst nach Ablauf des o.a. Impulsintervalls gültig, so daß sofort ein Bezug zu T_1 entsprechend 4032 Zählpulsen hergestellt ist. Das bedeutet, daß die am DAC (Digital-Analog-Converter) anliegende Zählimpulsdifferenz (hier 4) gerade der relativen Winkelgeschwindigkeitsabweichung von 1 Promille entspricht. Infolge der ganzzahligen Berechnung entsteht dabei ein Fehler, der unter 1 Prozent liegt. Es wird also abschnittsweise die relative Winkelgeschwindigkeitsabweichung mit einer Genauigkeit von besser als 1 Prozent errechnet und als analoges Signal zur Verfügung gestellt.

Die in der Versuchsmaschine eingesetzten Drehwinkelgeber weisen eine Teilung von 18000 Strichen am Umfang auf, so daß bei jeder Meßwalzenumdrehung über 140 Meßwerte ausgegeben werden. Die Streuung dieser Werte wird durch kontinuierliche Mittelwertbildung über eine Walzenumdrehung mit Hilfe eines geeigneten Tiefpasses in einen Näherungswert von noch höherer Genauigkeit überführt. Vorversuche zeigten jedoch, daß infolge Schwingungen des Papierlaufes

eine fortlaufende Mittelung über etwa 10 Walzenumdrehungen entsprechend 1400 Meßwerten notwendig ist, so daß der systematische Meßfehler infolge o.a. Rechnung mit ganzen Zahlen vernachlässigbar klein wird. Nach der Tiefpaßfilterung erfolgt die Korrektur der relativen Differenzwinkelgeschwindigkeit durch einen weiter unten vorgestellten Faktor k , der durch das geometrische Übersetzungsverhältnis der Geschwindigkeitsmeßwalzen bestimmt wird.

Die von den Wägezellen der Spannungsmeßwalzen in ihren zugehörigen Trägerfrequenzverstärkern vorliegenden Ausgangssignale werden einem Differenzverstärker zugeführt, wodurch ein der Bahnspannungsdifferenz proportionales analoges Signal entsteht. Durch Filterung dieses Signals mit einem gleichartigen Tiefpaßfilter wie für das o.a. Differenzwinkelsignal läßt sich ohne Phasenfehler die Division von $U_{\Delta\sigma}$ (Bahnspannungsdifferenzsignal) und $U_{\Delta\varphi}$ (verstärktes Signal der relativen Winkelgeschwindigkeitsabweichung) durchführen. Dafür dient ein analog arbeitender Divisorbaustein, dessen Ausgangssignal somit dem mittleren Elastizitätsmodul E längs der gerade durchlaufenden Bedruckstoffbahn proportional ist. Zur Berechnung der Dehnung ϵ_1 vor dem ersten Druckwerk wird einem weiteren Divisorbaustein sowohl das Signal der Bahnspannung σ_1 wie auch das E-Modul-Signal zugeführt und der Quotient σ_1/E gebildet. Dadurch liegt ein dehnungsproportionales Ausgangssignal als Istsignal zur Aufzeichnung und/oder Regelung vor.

Zur Eichung der relativen Winkelgeschwindigkeitsmeßkette wurde eine geeignete Impulsgeberschaltung entwickelt und gebaut. Diese Schaltung ermöglicht die Synthese zweier Rechteckimpulsfolgen, deren relativer Frequenzunterschied reproduzierbar genau von $6,66 \cdot 10^{-2}$ bis zu $2 \cdot 10^{-6}$ eingestellt werden kann. Der Frequenzbereich selbst umfaßt Werte von 4,88 bis 625 kHz. Das entspricht der Simulation von Meßwalzengeschwindigkeiten ab 0,27 U/s bis 34,7 U/s (Papiergeschwindigkeit von 0,26 m/s bis 32,7 m/s). Die Auslegung der E-Modul-Auswerteschaltung beschränkt sich allerdings auf einen Geschwindigkeitsbereich von 1 U/s bis 10 U/s, so daß nur ein Teil des Stellbereiches der Frequenzsimulationsschaltung zum Einsatz für die Eichung kommt. Die in Abb. 14 dargestellte Eichfunktion für den bezogenen Differenzwinkel $\frac{\Delta\varphi}{\varphi}$ weist eine ausgezeichnete Linearität und Nullpunktsge-

nauigkeit auf. Der Kalibrierungsfaktor beträgt 7,11 V/‰, was einen Empfindlichkeitskoeffizienten

$$S_{\varphi} = 0,1406 \text{ Promille/V}$$

ergibt.

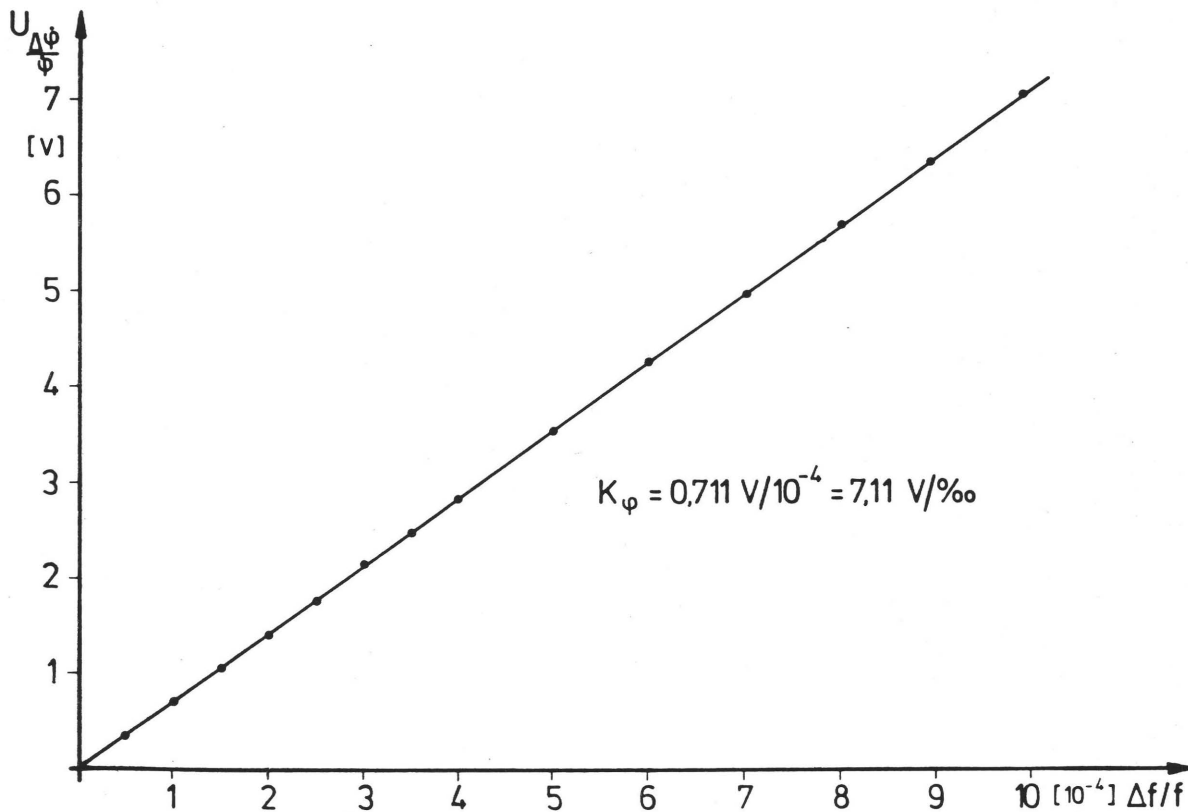


Abb. 14 Eichung der relativen Differenzwinkelmessung

Die Empfindlichkeitskoeffizienten für E und ε_1 lassen sich leicht berechnen, denn die Ausgangsspannungen an den zugehörigen Divisorbausteinen sind auf 10 Volt normiert. Mit einer Teilung des Bahnspannungsdifferenzsignals um den Faktor 3 ergibt sich der Empfindlichkeitskoeffizient für den Elastizitätsmodul zu

$$S_E = 90,6378 \frac{\text{kNm}^{-1}}{\text{V}}$$

Daraus wiederum errechnet sich der Empfindlichkeitskoeffizient für die Dehnung vor dem ersten Druckwerk

$$S_{\epsilon} = 0,468 \frac{\%}{V}$$

Mit diesen Angaben ist die Auswertungssystemkette vollständig bestimmt und der kontinuierlichen Erfassung von Elastizitätsmodul und Dehnung der laufenden Bedruckstoffbahn steht nichts mehr im Wege.

Die Ausbildung der Klemmstelle zwischen den beiden Meßeinheiten ist von grundlegender Bedeutung für die Meßgenauigkeit des Bahndehnungs-Meßsystems. Ursprünglich wurde zur Einleitung des Spannungssprunges $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_0 > 0$ eine Klemmstelle, bestehend aus einem freilaufenden Zylinder und einem Presseur, verwandt. Das Bremsmoment wurde vom viskoelastischen Moment des Presseurs geliefert. Die Steuerung des Spannungssprunges erfolgte mittels der Presseurkraft.

Schon die ersten Versuche mit dieser Klemmstelle zeigten erhebliche Abweichungen zwischen den mittels eines Zugprüfgerätes ermittelten statischen und den in der Versuchsmaschine dynamisch gemessenen Elastizitätsmoduli. Die ermittelten Werte der zwei benutzten Papiersorten (Zeitungsdruckpapier 45 g/m² und Tiefdruckpapier 56 g/m²) sind in der Tab. 1 einander gegenübergestellt.

Papiergewicht (g/m ²)	E _{stat} (kN/m)	E _{dyn} (kN/m)
45	282	170
45	280	160
56	301	195

Tab. 1 Zusammenstellung von statischen und dynamischen E-Moduli

Bei diesen beiden Papierqualitäten war nur eine rein qualitative Übereinstimmung insofern gegeben, als den jeweils höheren statischen Elastizitätsmodulwerten entsprechend die höheren dynamischen

Werte zugeordnet sind. Trägt man die dynamisch gemessenen Moduli gegen die statisch gemessenen auf (Abb. 15), so erhält man auch für diese verschobenen Vergleichswerte einen durchaus korrelierten Zusammenhang. Die Vergleichswerte lassen sich in erster Näherung mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durch eine Ausgleichsgerade verbinden (Abb. 15).

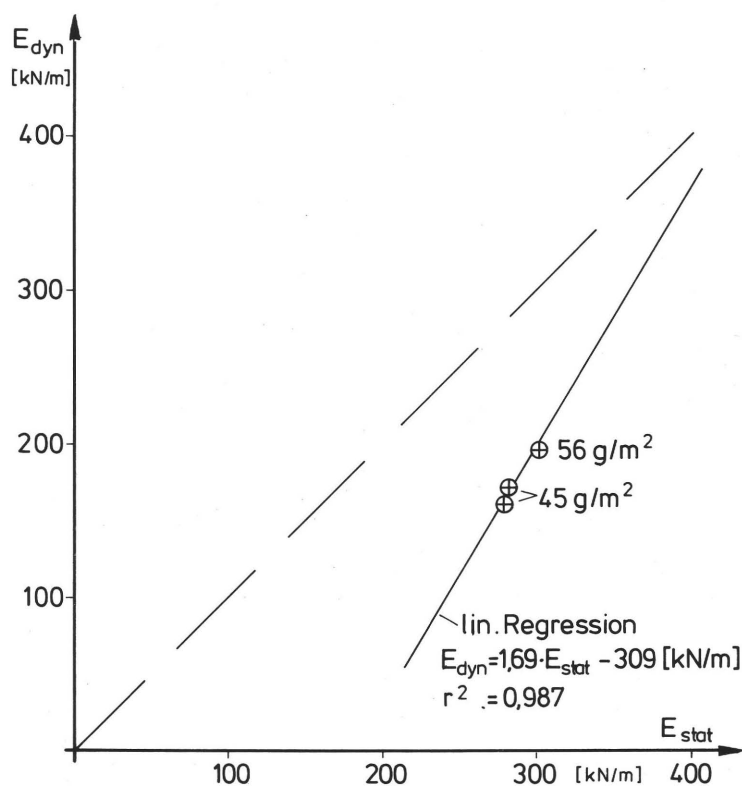


Abb. 15 Vergleich zwischen statisch und dynamisch (mit Kompression) gemessenen E-Moduli

Der Grund für die zu niedrig liegenden dynamischen E-Modul-Werte wurde in den Kompressibilitätseigenschaften des Papierses vermutet und angenommen, daß die nach dem einmaligen Zusammenpressen in der Klemmstelle einsetzende Rückschwellung soviel Zeit braucht, daß die Geschwindigkeitsmessung auf der nachfolgenden Meßwalze infolge Lageänderung der neutralen Faser der Bahn verfälscht wird und zu große Werte für $\frac{\Delta v}{v_0}$ liefert. Dadurch würden die dynamisch gemessenen

Elastizitätswerte unter die tatsächlichen sinken, was die Abweichung in Abb. 15 erklärt. Eine weitere Erklärung könnte möglicherweise ein Kalandriereffekt liefern, der zu einer bleibenden Dehnung führt. Jeder der mutmaßlichen Einflüsse im Zeitverhalten macht die hier verwendete Klemmstelle (Fall 3 nach Abb. 1) unzweckmäßig, und es wurde deshalb eine Umrüstung der Versuchsmaschine mittels einer feststehenden, teilumschlungenen Stange auf eine nichtpressende Klemmstelle entsprechend Anordnung 1 nach Abb. 16 vollzogen, mit der eine Coulomb'sche Reibkraft in die Bahn eingeleitet wird.

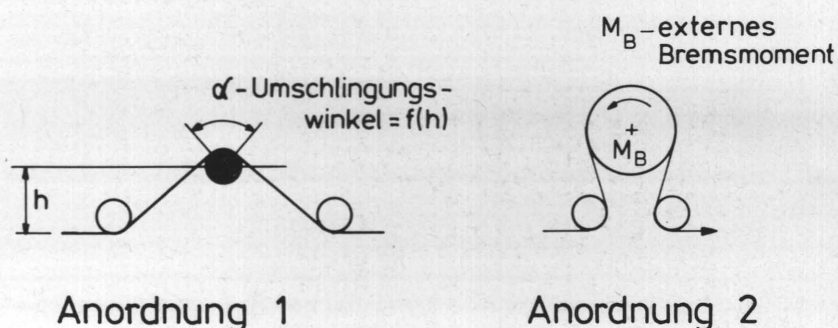


Abb. 16 Klemmstellen ohne Pressung der Bahn

Die Untersuchung eines Offsetrollenpapiers mit 55 g/m^2 flächenbezogener Masse ergab dann folgende Elastizitätsmoduli an einer bestimmten Bahnstelle (Tab. 2).

Papiergewicht (g/m^2)	E_{dyn} (kN/m)	E_{stat} (kN/m)
55	317	310

Tab. 2 Vergleich von statischem und dynamischem E-Modul mit geänderter Klemmstelle

Es zeigt sich demnach erwartungsgemäß als Ergebnis, daß der in der Maschine gemessene dynamische Elastizitätsmodul sehr nahe bei dem statisch ermittelten E-Modul liegt. Dieses Ergebnis steht in

Übereinstimmung zur allgemeinen Erkenntnis, daß der Elastizitätsmodul eines viskoelastischen Stoffes bei dynamischer Belastung höher liegt als bei statischer. Wie die an allen Papierproben des Versuchsprogrammes später noch durchgeführten Vergleichsmessungen jedoch zeigten, war dies eher ein Zufallstreffer, denn oft lagen die statischen Werte auch über den dynamischen. Die Abweichungen nach oben waren jedoch signifikant geringer als bei Anwendung der ursprünglichen Klemmstelle mit Kompression der Papierbahn (Fall 3 der Abb. 1). Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß erstens beide Meßmethoden mit Meßfehlern behaftet sind und zweitens zwischen der Probenentnahme und der Messung der statischen Elastizitätsmoduli die Probenzustände sich ändern konnten, ist die Übereinstimmung der jeweiligen Vergleichswerte insgesamt sehr zufriedenstellend und damit eine ausreichende Bestätigung der dynamischen Meßmethode.

Für die praktische Anwendung hätte die Anordnung 2 nach Abb. 16 Vorteile, weil die Bahnkraft zur Spannungserhöhung ohne ein für das Papier schädliches Gleiten und praktisch verschleißfrei eingeleitet würde. Die Anordnung 2 bietet zudem den Vorzug, daß die Regelung auf konstante Dehnung ϵ_1 vor dem ersten Druckwerk wahlweise durch Änderung der Bahnspannung σ_0 an der Rollenabwicklung oder durch Änderung des Bremsmomentes M_B zur Steuerung der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_0$ in der Klemmstelle durchgeführt werden kann.

4. Messungen

4.1 Fehlerbetrachtungen und Vorbereitungen zur Messung

Die Anwendung der o.a. Empfindlichkeitskoeffizienten für die Bahnspannungs-, Elastizitätsmodul- und Dehnungsmessung setzt voraus, daß die Quellen systematischer Fehler als vernachlässigbar betrachtet werden können.

Im Falle der Bahnspannungsmessung ist der wesentliche mögliche Störeinfluß in unkontrollierten Querkraft- und Momentbelastungen der Wägezellen zu sehen. Diese dürfen jedoch infolge der quasi punktförmigen Befestigung der Meßwalzenwelle an den Wägezellen und der

Lasteinleitung in Vorzugsrichtung vernachlässigt werden. Die Nullpunktgenauigkeit und -stabilität der Bahnspannungsdifferenz ist infolge Verwendung von Trägerfrequenzverstärkern und Nullabgleichung der Signaldifferenz der unbelasteten Wägezellen vor Experimentbeginn ausreichend hoch.

Die hochgenaue Messung der relativen Geschwindigkeitsdifferenz kann durch mehrere Komponenten verfälscht werden. Die extrem reibungsarme Lagerung in möglichst kleinen Hochgenauigkeitslagern sichert eine ausreichende Haftzone im Umschlingungsbereich von Bahn und Meßwalze. Mit bekanntem Walzendurchmesser ist so die eindeutige Verknüpfung von Bahngeschwindigkeit und Walzenwinkelgeschwindigkeit einerseits und deren eindeutige Verknüpfung mit der Spannung andererseits gewährleistet. Bei Gleichsetzen der relativen Winkelgeschwindigkeitsdifferenz $\frac{\Delta\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}}$ mit der relativen Bahngeschwindigkeitsdifferenz $\frac{\Delta v}{v_0}$ müssen die Durchmesser der Bahngeschwindigkeitsmeßwalzen exakt das gleiche Maß aufweisen. Da dies mit derzeitigen Fertigungsmethoden nicht vollkommen gewährleistet ist, müßte gegebenenfalls ein Korrekturfaktor ermittelt werden. Es gilt

$$v_i = r_i \cdot \dot{\varphi}_i \quad (16)$$

wobei

v_i = Bahngeschwindigkeit auf der Walze i

r_i = Radius der Walze i

$\dot{\varphi}_i$ = Winkelgeschwindigkeit der Walze i

Die relative Bahngeschwindigkeitsdifferenz wird so zu

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{v_1 - v_0}{v_0} = \frac{r_1 \cdot \dot{\varphi}_1 - r_0 \cdot \dot{\varphi}_0}{r_0 \cdot \dot{\varphi}_0} = \frac{r_1}{r_0} \cdot \frac{\dot{\varphi}_1}{\dot{\varphi}_0} - 1 \quad (17)$$

und damit

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{v_1 - v_0}{v_0} = \frac{r_1}{r_0} \cdot \left(\frac{\dot{\varphi}_1}{\dot{\varphi}_0} + 1 \right) - 1 = \frac{D_1}{D_0} \left(\frac{\Delta\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}} + 1 \right) - 1 \quad (17.1)$$

Aus dem Radienverhältnis sei nun ein Korrekturfaktor

$$k = 1 - \frac{r_1}{r_0} = 1 - \frac{D_1}{D_0} = \frac{D_0 - D_1}{D_0} \quad (18)$$

definiert. Mit Gl. (18) wird aus (17.1)

$$\frac{\Delta v}{v_0} = (1-k) \left(\frac{\Delta \dot{\phi}}{\dot{\phi}} + 1 \right) - 1 \quad (19)$$

Schließlich ergibt sich unter Vernachlässigung der Glieder höherer Ordnung

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{v_1 - v_0}{v_0} \cong \frac{\Delta \dot{\phi}}{\dot{\phi}} - k \quad (20)$$

Die Gleichung (5.1) läßt sich demnach umformen zu

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\frac{\Delta v}{v_0}} \cong \frac{\Delta \sigma}{\frac{\Delta \dot{\phi}}{\dot{\phi}} - k} \quad (5.2)$$

Und demgemäß wird aus Gleichung (6)

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} \cong \frac{\sigma_1}{\Delta \sigma} \left(\frac{\Delta \dot{\phi}}{\dot{\phi}} - k \right) \quad (6.1)$$

Das Durchmesser Verhältnis der Meßwalzen $\frac{D_1}{D_0}$ unterscheidet sich nur äußerst wenig von eins, wenn die Absolutdurchmesser im vorliegenden Fall 300 mm betragen und ihre Abweichung vom Sollmaß im Mikrometerbereich liegt. Die genaue Bestimmung von $\frac{D_1}{D_0}$ bedarf daher einer speziellen Vorgehensweise. Nach /10/ läßt sich ein geometrisches Durchmesser Verhältnis nahe eins dadurch ermitteln, daß aus den beiden Meßwalzen durch aufeinander Abrollen ein Reibradgetriebe gebildet wird, und zwei Messungen des Gesamtübersetzungsverhältnisses bei

Wechseln von treibender und getriebener Walze durchgeführt werden. Die im Gesamtübersetzungsverhältnis enthaltenen elastischen Schlupfanteile infolge Bremsmoment der Lagerung werden durch Subtraktion der beiden Übersetzungsmeßwerte eliminiert, wodurch der dem Durchmesser Verhältnis entsprechende geometrische Anteil des Übersetzungsverhältnisses direkt erhältlich ist. Alle drei Zylinder der Versuchsmaschine wurden diesem Verfahren in sämtlich möglichen Kombinationen unterworfen. Das ergibt drei Durchmesserdifferenzen

$$\delta_{i,j} = D_i - D_j \quad i \neq j; \quad i, j = 0, 1, 2 \quad (21)$$

Zur Plausibilitätskontrolle dient zusätzlich die Bedingung

$$\delta_{i,j} + \delta_{j,k} + \delta_{k,i} = 0 \quad (22)$$

Es wurden folgende Durchmesserdifferenzen zwischen je zwei Walzen festgestellt:

$$\begin{aligned} \delta_{1,2} &= - 1,40 \text{ } \mu\text{m} \\ \delta_{2,0} &= - 0,55 \text{ } \mu\text{m} \\ \delta_{0,1} &= 1,95 \text{ } \mu\text{m} \end{aligned}$$

- Index 0 Meßzylinder vor der Klemmstelle
- Index 1 Meßzylinder vor dem ersten Druckwerk
- Index 2 Druckzylinder im ersten Druckwerk

Die Durchmesserdifferenz der Meßwalzen beträgt demnach $D_1 - D_0 = - 1,95 \text{ } \mu\text{m}$. Bei einem Solldurchmesser von 300 mm ergibt sich das Durchmesser Verhältnis

$$\frac{D_1}{D_0} = 0,9999935$$

und damit $k = 0,0000065$

Weitere Quellen für systematische Fehler in der Bahngeschwindigkeitsmessung finden sich in der Abweichung der Meßwalzenoberfläche von der idealen Kreisform, im Radialschlag der Wälzlager und in der Bahnwegveränderung durch Lageänderung der Bahnspannungsmeßwalzen.

Die Fertigungstoleranz bezüglich der Walzenkreisform beträgt $\pm 2 \mu\text{m}$, so daß bei $D = 300 \text{ mm}$ der relative Fehler in der Größenordnung von 10^{-5} liegt. Auch der Radialschlag der Meßwalzenlagerung ist durch Auswahl von Hochgenauigkeitsschrägkugellagern auf $3,5 \mu\text{m}$ beschränkt, was ebenfalls einen relativen Fehler von 10^{-5} in der Umfangsgeschwindigkeitsbestimmung bedeutet. Da für die Meßwertbildung rund 10 Walzenumdrehungen herangezogen wurden, mittelten sich diese beiden periodischen Fehler aus.

Die Lageänderung der Bahnspannungsmeßwalzen infolge Biegung der sie tragenden Wägezellen hat primär einen verkürzten oder verlängerten Bahnweg zur Folge. Nur während der Lageänderung kann die zur jeweiligen Bahnspannung zugehörige Bahndehnung verfälscht werden und eine Fehlmessung der Bahngeschwindigkeit bewirken. Diese Lageänderung als Folge einer Laständerung in der Bahn ist jedoch erstens nur ein Bruchteil des gesamten Lastniveaus und zweitens kurzzeitig bzw. relativ zur Walzendrehzahl hochfrequent. Die Auslastung der Wägezellen bei Betrieb mit Papierbahnen von mittlerer flächenbezogener Masse beträgt jedoch weniger als 1 % und demnach ist eine Laständerung nur im Bereich von Promillen der Wägezellen-Nennlast zu erwarten. Die maximale Lageänderung von $50 \mu\text{m}$ bei Volllast wird nicht ausgenutzt. Die Dehnungsänderung bei einer freien Bahnlänge von mehr als 400 mm zwischen Bahnspannungs- und Geschwindigkeitsmeßwalze darf deshalb als vernachlässigbar klein angesehen werden.

Die Einstellung des Spannungssprunges $\Delta\sigma$ geschieht bei der gewählten Anordnung nach 1 von Abb. 16 durch Variation des Umschlingungswinkels der Klemmstelle. Da das Ziel der Messungen die Bestimmung des Elastizitätsmodules und nicht die Regelung von ϵ_1 war, konnte ein fester Umschlingungswinkel eingestellt werden. Bei dem gewählten σ_0 und den jeweiligen Reibbeiwerten μ ergaben sich dann relative

Geschwindigkeitsdifferenzen $\frac{\Delta v}{v_0}$ von rund 0,3 % bis 0,5 %. Auftretende Änderungen der Abrollspannung σ_0 und des Reibwertes μ werden hinsichtlich des Elastizitätsmodules E vom Meßsystem entsprechend seiner Natur selbsttätig ausgeglichen. Die Dehnung ϵ_1 kann sich jedoch dabei ändern.

Die Papierbahngeschwindigkeit wird durch die Bewegung des Druckzylinders im ersten Druckwerk bestimmt. Den Antrieb dieses Zylinders übernimmt ein Gleichstromnebenschlußmotor mit einer Nennleistung von $P_N = 9$ kW und einer Nenndrehzahl von $n_N = 3000$ min^{-1} . Durch die Verbindung von Längswelle und Druckzylinder in Form eines Schneckengetriebes mit einem Übersetzungsverhältnis von $i = 1:4,63$ reduziert sich die maximale Drehzahl zu $n_{DZ} = 10,8$ s^{-1} , was bei einem Druckzylinderumfang von 0,9425 m eine maximale Bahngeschwindigkeit von 10,18 m/s zur Folge hat. An dieser Höchstgeschwindigkeit ist auch die Auslegung der o.a. Auswerteschaltung orientiert, welche ein Geschwindigkeitsverhältnis $\frac{v_{\max}}{v_{\min}} = 10 : 1$ abdeckt.

4.2 Meßprogramm

Das Versuchsprogramm umfaßt zwei prinzipiell unterschiedliche Untersuchungsaspekte. Zum einen wurde das Dehnungsverhalten d.h. der Elastizitätsmodul über die Bahnlänge bei gleichbleibenden Betriebsparametern während des gesamten Rollenablaufes beobachtet und auf Magnetband und mit x-t-Schreibern aufgezeichnet. Zum anderen wurden Proberollen aus Papieren von unterschiedlicher flächenbezogener Masse zusammengestellt, die eine Sprung- bzw. Rechteckfunktion der Papiereigenschaft als Eingang in das Meßsystem simulieren.

Die zur Untersuchung benutzten Papierproben entstammen der laufenden industriellen Produktion und repräsentieren bezüglich ihres Flächengewichtes einen hohen Marktanteil. Es handelt sich konkret um

- ein ungestrichenes Naturpapier für Tiefdruck mit einer flächenbezogenen Masse von 60 g/m^2 (Hersteller A)

- ein ungestrichenes Naturpapier für Tiefdruck mit einer flächenbezogenen Masse von 56 g/m^2 (Hersteller B)
- ein LWC- (light weight coated) Papier mit einer flächenbezogenen Masse von 51 g/m^2 (Hersteller A)
- ein ungestrichenes Offsetpapier mit einer flächenbezogenen Masse von 55 g/m^2 (Hersteller C)
- ein ungestrichenes Naturpapier für Zeitungsdruck mit einer flächenbezogenen Masse von 45 g/m^2 (Hersteller B)

Zur Kontrolle der Messungen in der Versuchsdruckmaschine wurden "statische" Vergleichsmessungen durchgeführt, die den Elastizitätsmodul der jeweiligen Papiersorte an einer bestimmten Bahnstelle bestimmten. Dies geschah mit einer handelsüblichen Zugprüfmaschine der Papieranalytik, mit welcher es möglich ist, Papierproben im kleinsten Last-Dehnbereich zu untersuchen (Institut für Papierfabrikation der TH Darmstadt).

Von jeder Papiersorte wurde vor dem Laufversuch, während des Wickelwechsels und am Rollenende je eine Probe entnommen und von je 10 Probestreifen der mittlere Elastizitätsmodul in Maschinenrichtung bestimmt. Die maximale Dehnung in der Zugprüfmaschine beträgt 2,78 %, was eine praktisch rein elastische Verformung im Zugversuch gewährleistet. Die Tangente am Last-Weg-Meßschrieb wird graphisch ermittelt und ihre Steigung als Meßwert für den statischen E-Modul berechnet (Abb. 17).

Die im zweiten Versuchsprogrammteil benutzten Kombinationsprobenrollen dienten der Untersuchung des Auflösungsvermögens seitens der Auswerteschaltung für E-Modul und Bahndehnung. Unter Variation der Bahnabschnittslänge und der Papiergewichtskombination kamen zwei Rollen mit unterschiedlichen Kombinationen zum Einsatz.

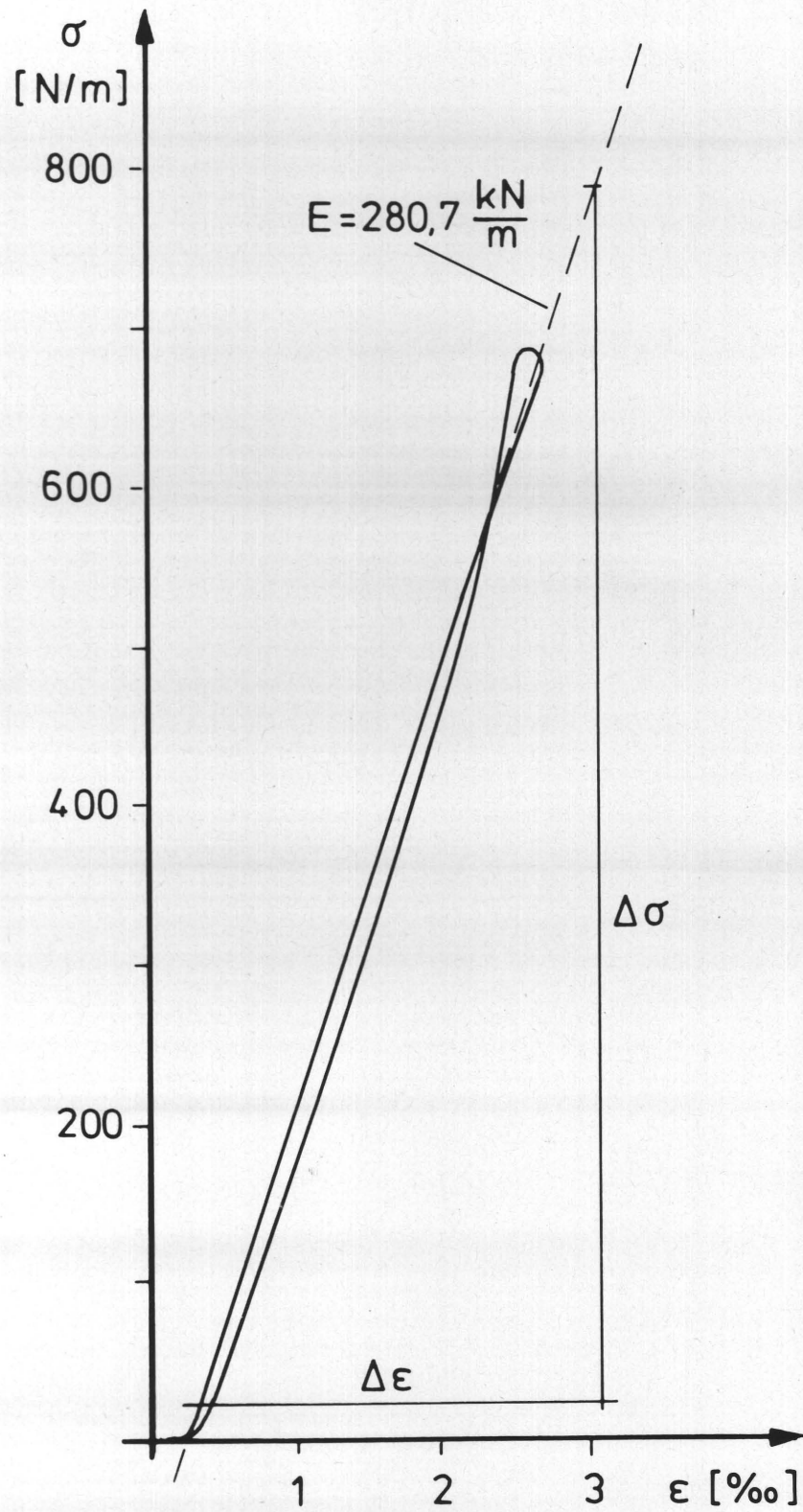


Abb. 17 Zugversuch an Papier im elastischen Bereich

4.3 Meßergebnisse

Der erste Versuchsabschnitt umfaßt fünf Einzelversuche mit den oben angegebenen Papiersorten. Die Meßschriebe von Elastizitätsmodul, Bahndehnung und -spannung vor dem ersten Druckwerk sind in den Abbildungen 18 bis 22 dargestellt.

Das Tiefdruckpapier mit 60 g/m^2 flächenbezogener Masse (Abb. 18) weist am Rollenanfang eine deutliche Störung des Elastizitätsmodules auf, die sich in einem ausgeprägten Maximum äußert. Nach Abklingen dieser Störung bei ca. 4000 Bahnmeter stellt sich ein langfristig gleichbleibender Elastizitätsmodul ein, der von geringen Schwankungen mit einer relativen Amplitude von etwa 7 % überlagert ist. Zum Rollenende hin ist dann jedoch eine weitere Störung zu verzeichnen, die sich in einem nochmaligen Elastizitätsmodulmaximum und in einem letzten Anstieg des E-Modules zum Bahnende hin bemerkbar macht.

Das Tiefdruckpapier mit 56 g/m^2 flächenbezogener Masse zeigt im dynamischen Versuch (Abb. 19) eine ähnliche Tendenz im Elastizitätsverhalten. Ein E-Modul-Maximum zu Beginn des Laufversuches klingt innerhalb von 4500 Bahnmeter langsam ab, und im weiteren Verlauf stellt sich wiederum ein nahezu konstanter Elastizitätsmodulwert ein, dem sich noch verschiedene Schwankungen unterschiedlicher Amplitude (ca. 7 %) und Frequenz überlagern. Dies setzt sich bis weit nach dem Wickelwechsel fort, bis sich dann in den letzten 2000 Bahnmeter wieder ein deutliches Elastizitätsmodulmaximum ergibt, sowie ein endgültiger Anstieg zum Bahnende.

Das LWC-Papier von 51 g/m^2 flächenbezogener Masse (Abb. 20) weist Parallelen zu den beiden Tiefdruckpapieren (56 und 60 g/m^2) auf. Auch hier ist zu Beginn der Rollenabwicklung ein, wenn auch nur geringer, Abfall des Elastizitätsmodules über die Bahnlänge festzustellen, der jedoch nach ca. 3000 Bahnmeter verschwindet. Es stellt sich wie bei den beiden Tiefdruckpapieren ein langfristig quasi konstanter E-Modul ein, der nur am Rollenende nochmals einen ausgeprägten Gipfel aufweist.

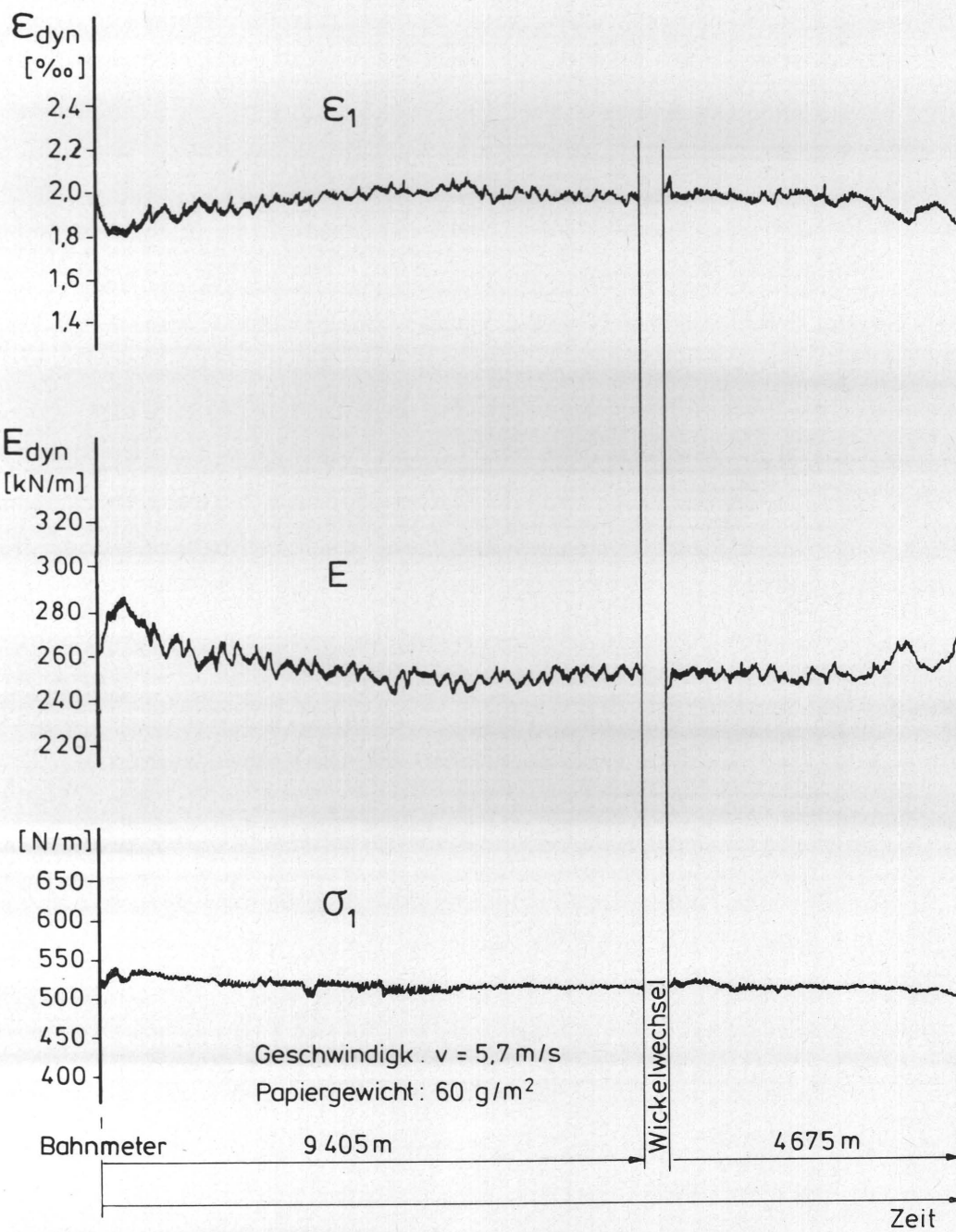


Abb. 18 Naturpapier für Tiefdruck, 60 g/m^2
(Hersteller A)

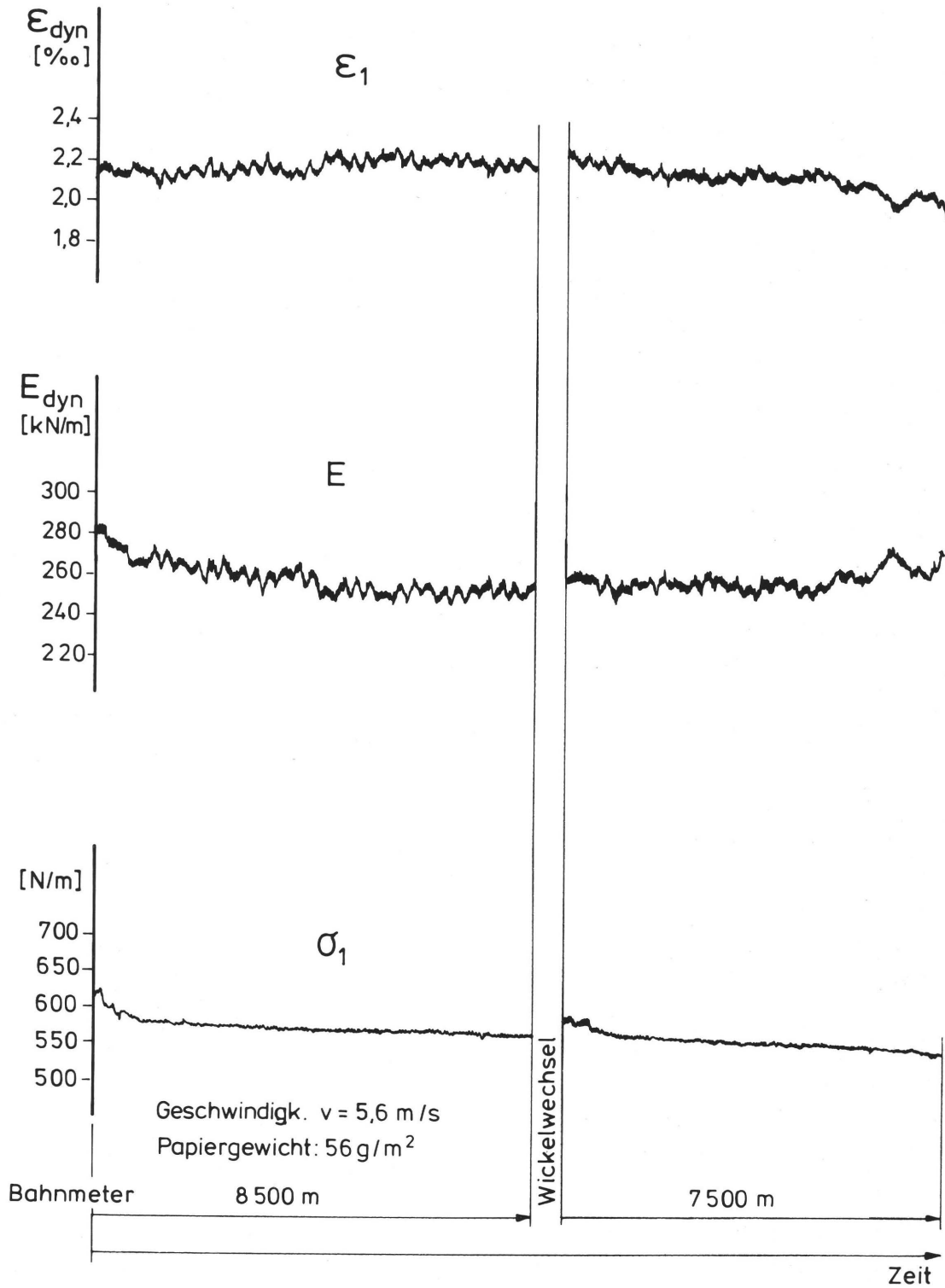


Abb. 19 Naturpapier für Tiefdruck, 56 g/m²
(Hersteller B)

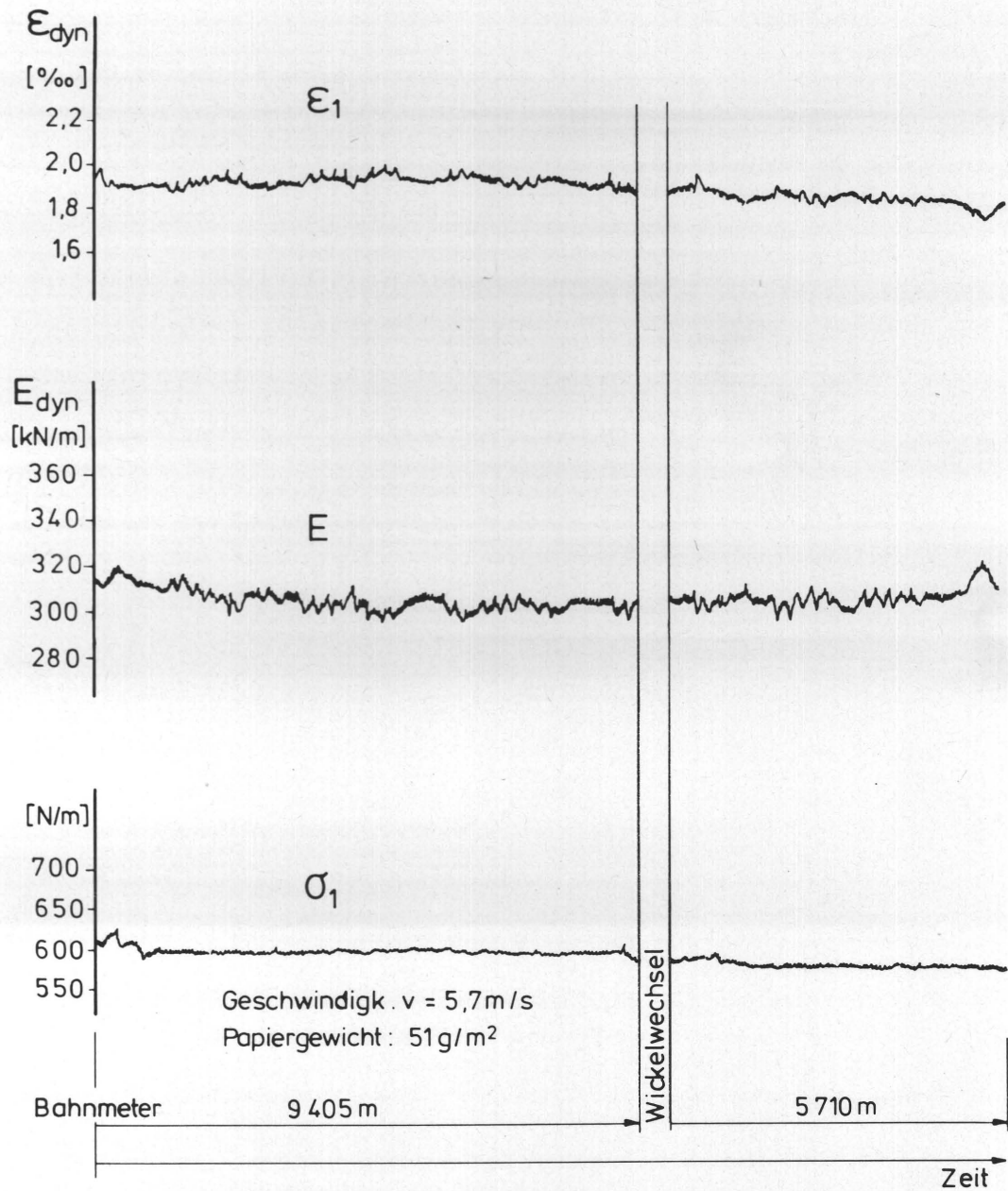


Abb. 20 LWC-Papier für Tiefdruck, 51 g/m^2
(Hersteller A)

Das Offsetpapier mit 55 g/m^2 flächenbezogener Masse (Abb. 21) ist ebenfalls wieder von einem deutlichen E-Modul-Abfall im Anfangsbereich der Bahnlänge gekennzeichnet. Innerhalb von rund 2000 m Bahn beträgt der relative Elastizitätsmodulverlust 13 %, wohingegen der restliche Bahnteil bis auf eine Störung nach dem Wickelwechsel einen quasi konstanten E-Modul aufzeigt. Beim Übergang vom abfallenden zum konstanten Teil der Aufzeichnung erhöht sich der E-Modul schlagartig um einen geringen Betrag, was durch eine Klebestelle hervorgerufen wird. Hier ist offensichtlich ein Bahnstück mit einem höheren Elastizitätsmodul angefügt worden. Dies ist somit ein gutes Beispiel für das Auflösungsvermögen der Meßeinrichtung.

Als letztes werden die Untersuchungsergebnisse des Zeitungsdruckpapiers mit 45 g/m^2 flächenbezogener Masse vorgestellt (Abb. 22). Dieses Papier weist einen signifikanten Abfall des Elastizitätsmoduls über die Bahnlänge auf. Er beträgt über eine Bahnlänge von 8500 m 12,4 % vor dem Wickelwechsel und 7,7 % über eine Bahnlänge von 3900 m nach dem Wickelwechsel, wobei sich dieser Abfall vor allem in den ersten 2500 Bahnmeter vor bzw. in den ersten 1000 Bahnmeter nach dem Wickelwechsel zeigt.

Eine besonders auffällige und bislang unbekannte Verhaltensweise ist bei diesem Zeitungsdruckpapier dort zu beobachten, wo es aufgrund eines Wickelwechsels an der Aufwickleinheit zu einem vollständigen Maschinenstillstand mit spannungsfreier Bahn kommt. Der Elastizitätsmodul der neu auf Sollgeschwindigkeit gebrachten Restrolle liegt nämlich deutlich über dem Endwert der bislang abgewickelten Teilbahn. Hierfür sind wohl bis heute nicht untersuchte Abhängigkeiten der mechanischen Eigenschaften vom in der Rolle vorherrschenden Lastkollektiv und von Relaxationserscheinungen verantwortlich.

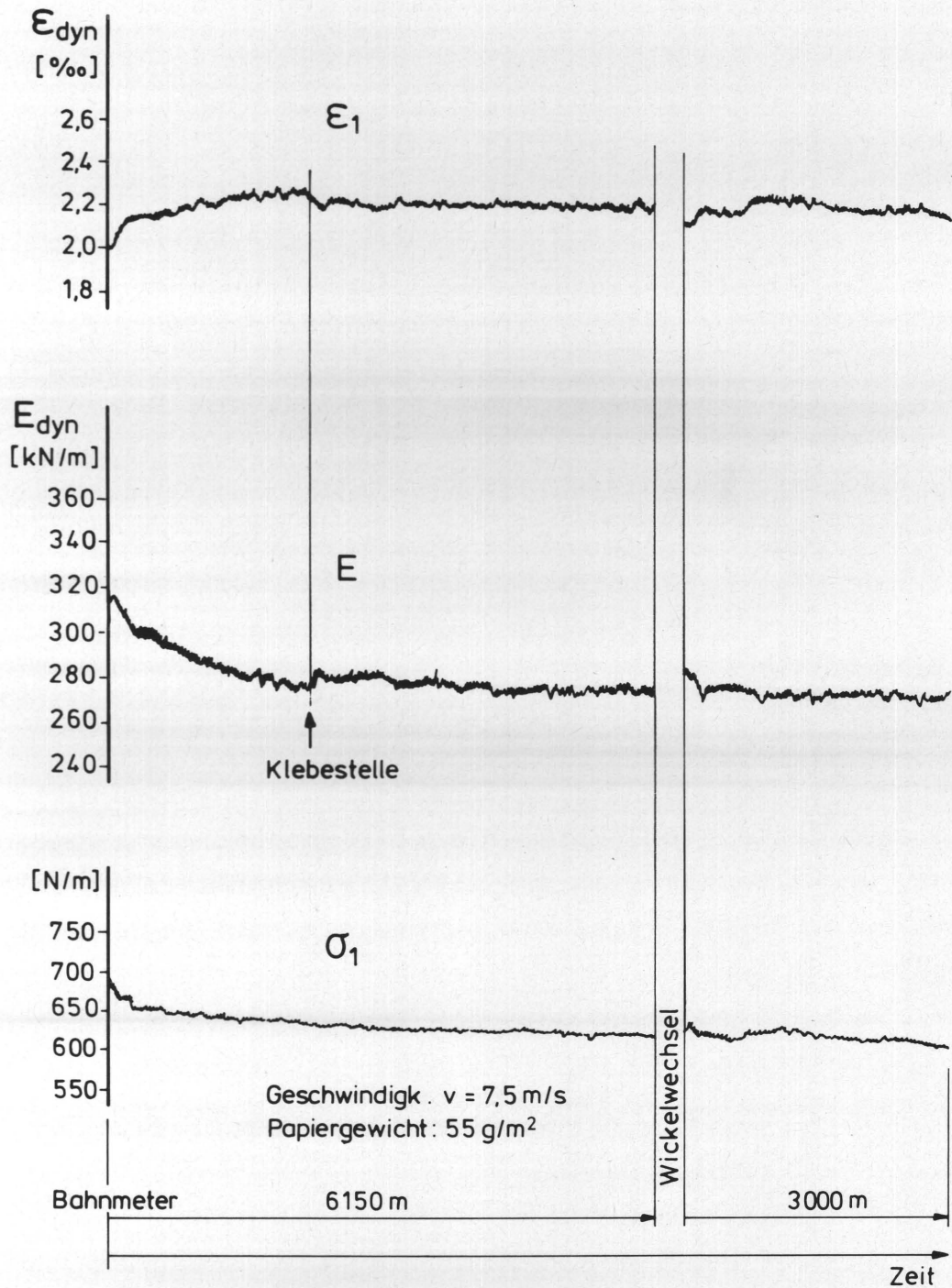


Abb. 21 Ungestrichenes Offset-Druckpapier, 55 g/m^2
(Hersteller C)

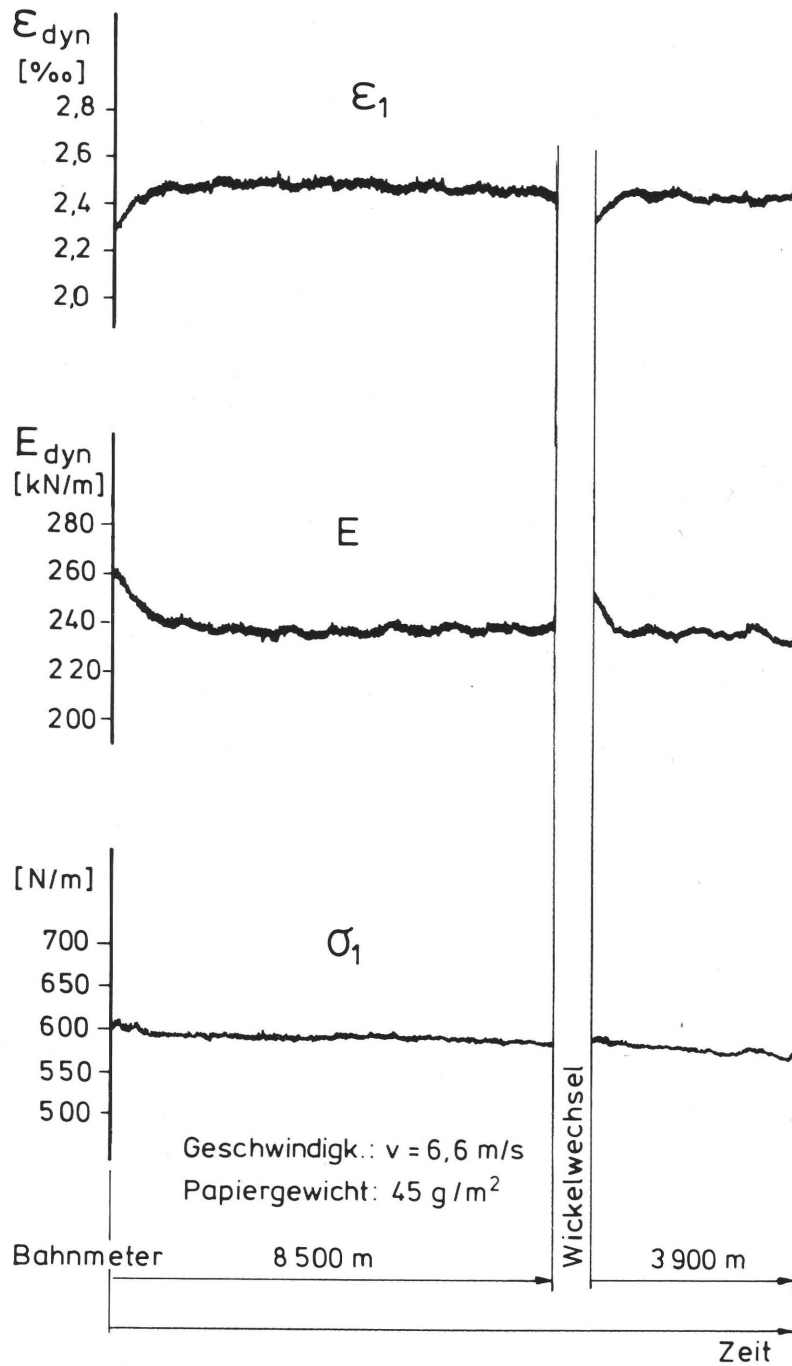


Abb. 22 Naturpapier für Zeitungsdruck, 45 g/m^2
(Hersteller B)

Die Untersuchung dieser fünf Papiere läßt folgende vorläufige Schlußfolgerung zu:

1. In der Regel fällt der Elastizitätsmodul mit der von der Rolle abgewickelten Länge vorerst mehr oder weniger stark ab.
2. Anschließend folgt ein Längenbereich, der bis zum Rollenende gehen kann, in welchem der Elastizitätsmodul einen quasi konstanten Wert erreicht.
3. Es können sowohl am Rollenanfang als auch am Rollenende merkliche Abweichungen von dieser Verhaltensweise auftreten.
4. Es kann bei Maschinenstillstand und - während der Stillstandzeit - spannungsfreier Bahn der Elastizitätsmodul der äußeren Lagen der Restrolle sich teilweise erholen. Beim weiteren Abwickeln treten dann wieder, wie bei einer neuen Rolle, die Erscheinungen 1 und 2 auf.
5. Alle untersuchten Papiere weisen Elastizitätsabweichen auf, welche bei der heute üblichen Regelung auf konstante Bahnspannung σ_1 vor dem ersten Druckwerk zu instationärem Bahnlauf mit entsprechenden nicht korrigierbaren Passersprüngen führen.

Die Qualität der Elastizitätsmodul- und Dehnungsmessung läßt sich besonders anhand der Ergebnisse des zweiten Versuchsprogrammabschnittes aufzeigen. Die Kombination K 1 (Abb. 23) bestand aus Bahnstücken der Tiefdruckpapiere mit 56 und 60 g/m² flächenbezogener Masse. Alle Bahnstücke, die hier große Längen von 400 bis 3000 m aufweisen, können eindeutig über den gemessenen Elastizitätsmodul identifiziert werden. Die über die abgewickelte Bahnlänge steigende Tendenz des E-Moduls beider Papiere ist damit zu erklären, daß bei der Zusammenstellung dieser - wie auch aller anderen - Proberollen ein Umwickelprozeß stattgefunden hat, so daß sich die ursprüngliche Verhaltensweise über die Bahnlänge umkehrt.

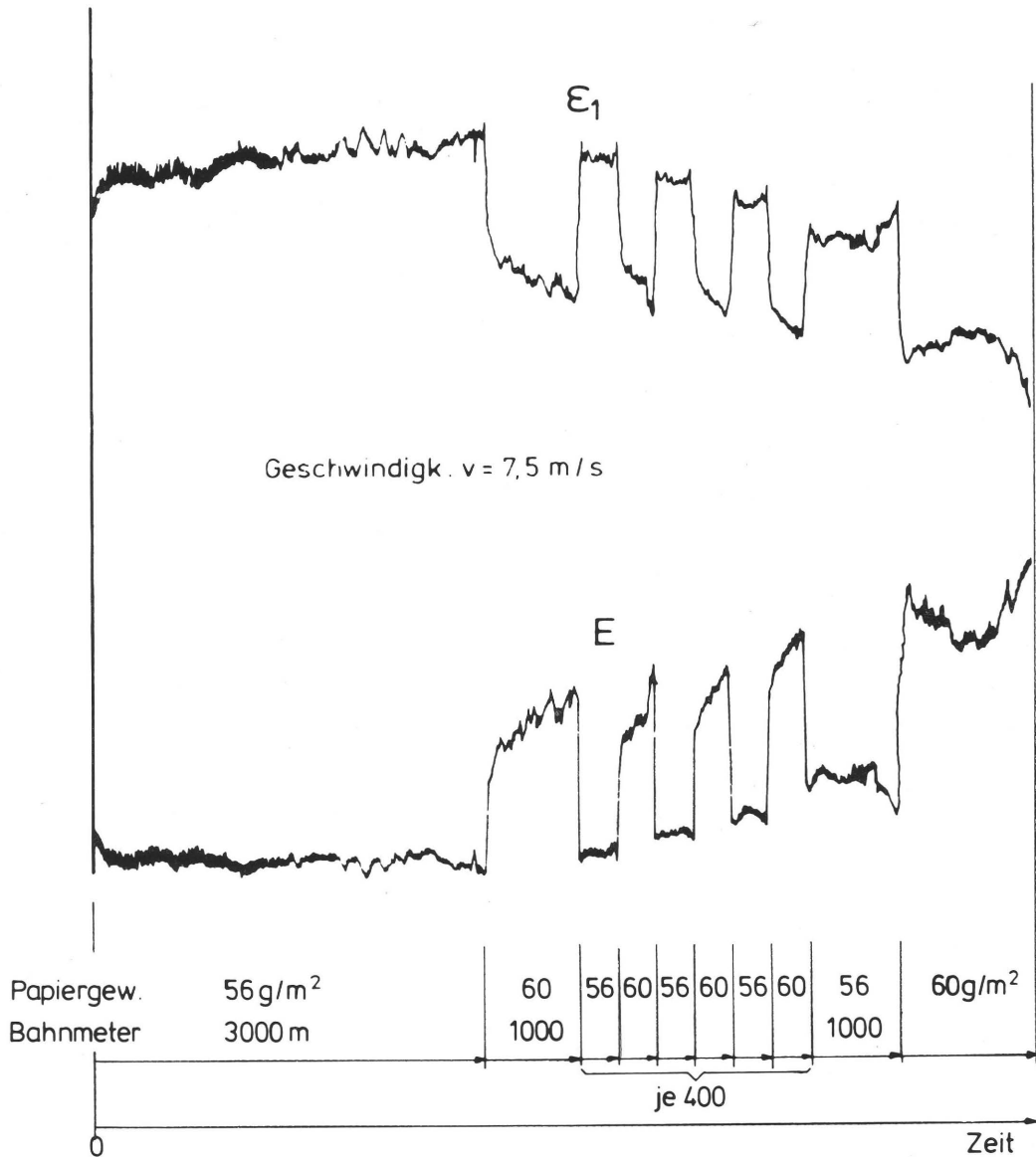


Abb. 23 Kombination K 1

In der nächsten Kombination K 2 (Abb. 24) wechseln sich lange Bahnstücke von 500 oder 1000 Bahnmetern mit sehr kurzen Bahnstücken von 20 und sogar 10 Bahnmetern ab. Auch hier können die beteiligten Papiere von 45 und 51 g/m² flächenbezogener Masse anhand ihres unterschiedlichen E-Modules deutlich unterschieden werden. Selbst die kürzesten Bahnstücke von 10 m Länge werden mit eindeutigen Signalveränderungen angezeigt, was durch die Auslegung des Tiefpaßfilters mit einer Grenzfrequenz entsprechend

10 m laufender Bahn gerade noch zu erwarten war. Damit ist die weitere Schlußfolgerung zulässig, daß das Auflösungsvermögen für die Erfassung von E-Moduländerungen in produktionsgerechten Rollenpapieren mehr als ausreichend ist.

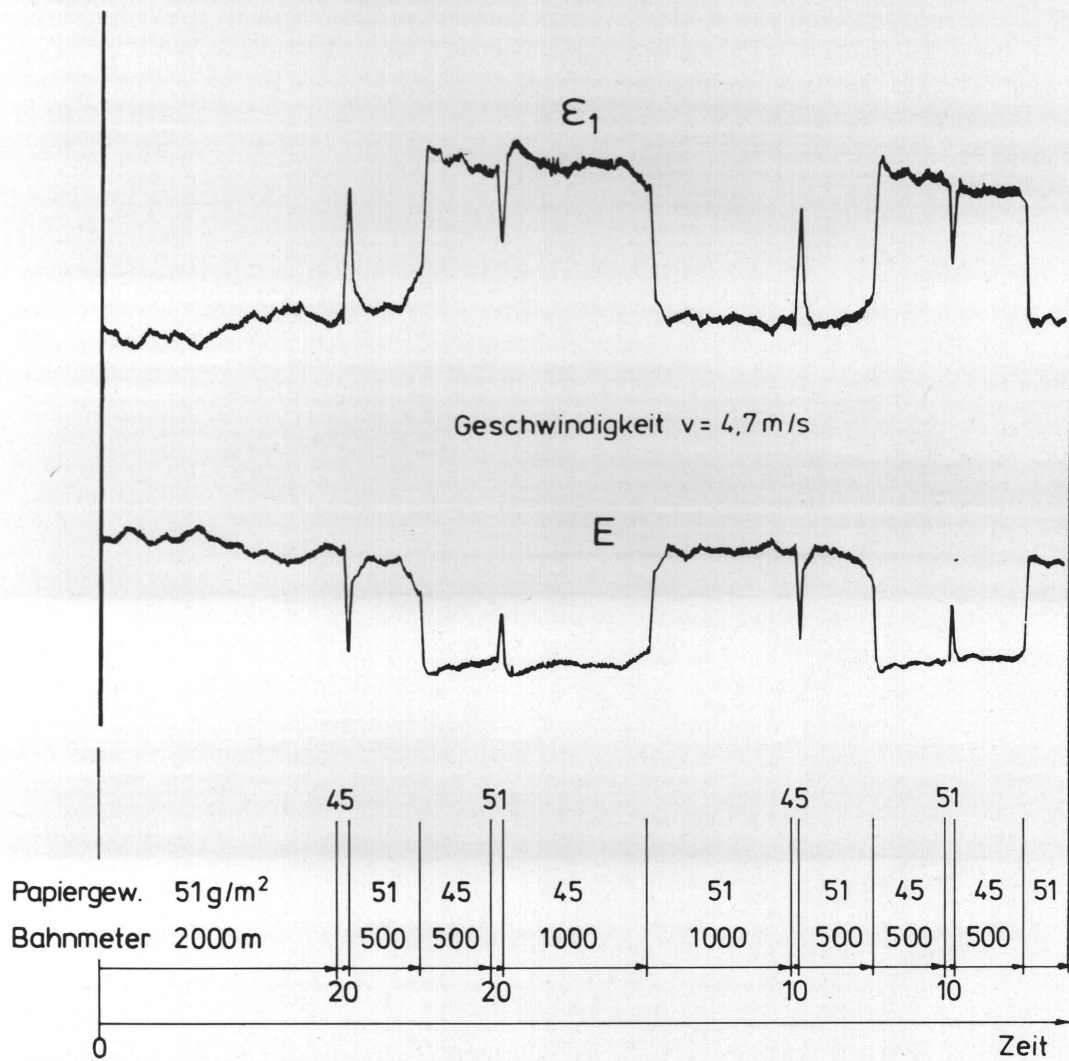


Abb. 24 Kombination K 2

4.4 Schlußfolgerungen aus den Messungen

Es gelten demnach zusammenfassend die Feststellungen, daß

- mit dem vorgestellten Bahndehnungs-Meßsystem die Elastizitätsmodul- und Dehnungsermittlung an der laufenden Bedruckstoffbahn realisiert worden ist,
- dadurch der Druckmaschinenindustrie die Grundlage für eine grundlegend verbesserte Regelung des Bahnlaufes in Druck- und Papierverarbeitungsmaschinen zur Erzielung eines unabhängig von Elastizitätsmoduländerungen stationären Bahnlaufes als Vorbedingung für einen optimal stehenden Passer zur Verfügung steht,
- zudem der Papierindustrie ein Mittel zur Untersuchung einer für die Verdruckbarkeit hoch bedeutsamen Eigenschaft von Rollenpapieren an die Hand gegeben wird.

5. Zusammenfassung

Die Regelung von Abrolleinheiten für Rollen-Rotationsdruckmaschinen auf konstante Bahnspannung σ_1 vor dem ersten Druckwerk ist nicht in der Lage, instationären Papierlauf zu vermeiden, da ein über der Bahnlänge variierender Elastizitätsmodul des Papiers veränderte Verzerrungszustände in den Drucklinien bewirkt und damit zu falschem Förderverhalten der Druckwerke führt. Es entstehen nicht korrigierbare, stochastisch auftretende Passerfehler. Nur durch Konstanthalten der Dehnung ϵ_1 vor dem ersten Druckwerk ist ein stationärer Bahnlauf gewährleistet und nur dann kann das Auftreten von Passerfehlern vermieden werden.

Auf Grund der Kontinuitätsbedingung läßt sich indirekt der E-Modul der laufenden Bahn und daraus die Dehnung ϵ_1 bestimmen. Dank der hier entwickelten und beschriebenen Meßeinrichtung zwischen Abrol- lung und erstem Druckwerk, welche die Bahnspannungen und -geschwin- digkeiten vor und nach einer Klemmstelle mißt, ist die Berechnung des Elastizitätsmoduls und der Dehnung ϵ_1 nahezu in Echtzeit mög-

lich. Damit ist die Grundlage zur Entwicklung eines Reglers für die im Hinblick auf die Passerhaltigkeit notwendige Nachführung der Bahnspannung σ_1 zwecks Konstanthaltung der Dehnung ϵ_1 vor dem ersten Druckwerk gegeben.

Für die Überprüfung der Meßeinrichtung wurden mit verschiedenen Rollenpapieren Laufversuche durchgeführt, wobei teilweise neue Einblicke in das Dehnverhalten einer laufenden Bahn gewonnen wurden. Das entwickelte Bahndehnungs-Meßsystem bietet den Papierherstellern ein neues Mittel zur Untersuchung einer bedeutsamen Verdruckbarkeitseigenschaft von Rollenpapier.

6. LITERATURVERZEICHNIS

Zitierte Literatur

- /1/ KUNZ, W.: "Erfordert die neue Generation von Tiefdruckrotationsmaschinen (40.000 U/h) besondere Druckpapiere?", Wochenblatt für Papierfabrikation 17, 1980
- /2/ BRANDENBURG, G.: "Über das dynamische Verhalten durchlaufender elastischer Stoffbahnen bei Kraftübertragung durch Coulomb'sche Reibung in einem System angetriebener, umschlungener Walzen", München TU, Dr.-Ing.-Diss. 1971
- /3/ BONRATH, H.: "Bahnspannung, Bahndehnung und Bedruckstofftransport in Rollendruckmaschinen, DTZ der Albert-Frankenthal AG 1/71, 1/72
- /4/ BRANDENBURG, G.: "Verallgemeinertes Prozeßmodell für Fertigungsanlagen mit durchlaufenden Bahnen und Anwendung auf Antrieb und Registerregelung bei Rotationsdruckmaschinen", Fortschritt-Berichte der VDI Zeitschriften Reihe 1, Nr. 46
- /5/ BRANDENBURG, G., TRÖNDLE, H.: "Dynamik des Längsregisters bei Rollenrotationsmaschinen", Siemens Forschungs- und Entwicklungsbericht, Band 5, Nr. 1, 1976
- /6/ BRANDENBURG, G., TRÖNDLE, H.: "Verhalten durchlaufender elastischer Stoffbahnen bei ortsunabhängiger Verteilung von E-Modul, Querschnitt und Dichte", Siemens Forschungs- und Entwicklungsbericht, Band 4, Nr. 6, 1975
- /7/ KESSLER, G.: "Das zeitliche Verhalten einer kontinuierlichen elastischen Bahn zwischen aufeinanderfolgenden Walzenpaaren", Regelungstechnik Jahrgang 8, 1960, Heft 12; Regelungstechnik Jahrgang 9, 1961, Heft 4
- /8/ LANGEWALD, H.P.: "Dehnungskonstante Papierführung in der Druckmaschine durch digitale Messung und Ausregelung von Winkelgleichlauf-Fehlern der an dem Papiertransport beteiligten Zugorgane", DTZ der Albert-Frankenthal AG 1/71
- /9/ SCHMID, J.: "Bahnspannung, Bahndehnung, Passerfehler", Information Wifag, Polytype, 5. April 1972
- /10/ SPIEGEL, N.: "Form- und reibschlüssige Antriebe in Druckwerken und ihr Zusammenwirken", Darmstadt, TH, Dr.-Ing.-Diss. 1983
- /11/ KORNMANN, P.: "Untersuchungen zur Ermittlung verarbeitungstechnischer Kennwerte des kontinuierlichen Flachstofftransportes in Verarbeitungsmaschinen", Karl-Marx-Stadt, TH, Dr.-Ing.-Diss. 1969

- /12/ SCHEUTER, K.R., MEISSNER, E., SUTANTO, J.: "Untersuchung von Papierzugvorrichtungen von Rollenrotationsmaschinen bei stationärem Bahntransport", Institutsbericht 2/1976, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der TH Darmstadt
- /13/ JARTTI, P., LUUKALA, W.: "Ultrasonic method for web speed measurement", Tappi, November 1967, Vol. 60, Nr. 11
- /14/ FORSCHUNGSGESELLSCHAFT DRUCKMASCHINEN E.V.: Patentanmeldung Nr. P 32 05 240.5
- /15/ HOPFENGÄRTNER, H.: "Auswertung von Impulssignalen zur Drehzahlmessung", Technisches Messen 49, 1982, 2
- /16/ BAUM, G.A.: "On-Line-Measurement of Paper Mechanical Properties", Proceedings, The Institute of Paper Chemistry, 1980
- /17/ BRECHT, W. und SCHÄDLER, M.: "Die Zusammendrückbarkeit von Papieren in ihrer Abhängigkeit von einigen Fertigungsbedingungen", Das Papier, 15. Jahrgang, Heft 12, Dezember 1961
- /18/ BRECHT, W. und SCHÄDLER, M.: "Über neue Messungen der Kompressibilität von Papieren", Das Papier, 17. Jahrgang, Heft 10a, Oktober 1963
- /19/ FALTER, K.A., HALLER, K., BRUNE, M.: "Einfluß von Zusammendrückbarkeit, Kontaktanteil und Kontaktstellenverteilung auf die Bedruckbarkeit", FOGRA Forschungsbericht 4.013, 1974
- /20/ GÖTTSCHING, L. und BAUMGARTEN, H.L.: "Triaxial Deformation of Paper under Tensile Load", Fifth International Fundamental Research Symposium, Cambridge, September 1973

Weitere Literatur

ASEA: "Reelstands for unwinding and rewinding", ASEA Druckschrift 8092 E, Västerås 7/1963

BRECHT, W., ERFURT, H.: "Über das Kraft-Dehnungsverhalten von Papier im gesamten Bereich der praktisch vorkommenden Trockengehalte", Darmstadt, TH, Dr.-Ing.-Diss., 1963

BRECHT, W., FÜHRLBECK, E.: "Das rheologische Verhalten von Papier verschiedenen Feuchtigkeitsgehaltes bei kurzzeitiger Zugbeanspruchung", Darmstadt, TH, Dr.-Ing.-Diss., 1963

ENGEL, V.: "Automatische Abrollung an Papierverarbeitungsmaschinen", Wbl. für Papierfabrikation 1966, Nr. 19

FALKNER, W.: "Mechanik der Tänzerwalze", IPM-Mitteilungen 10/1968, Heft 2

- GEORGES, H.F., KIMBALL, J.J.: "Web Tension Research on Rotogravure Presses", Technical Association on the Graphic Arts, Eleventh Annual Meeting, June 15-17, 1959
- GOEBEL, GMBH: "Einrichtung zum Einhalten einer Dehnung", Offenlegungsschrift 25 49 762
- GÖTTSCHING, L.: "Beiträge zur Rheologie des Papiers", Referat Symposium Papierrheologie 1971, Darmstadt
- GRAF, E.: "Papierlauf um Wendestangen", Information Wifag, Polytipe 2/1967
- HAGLOV, N.J.E.: "Web Tension, Rollstands and Reel Changing", Proceedings of the PATRA Newspaper and Rotary Letterpress Conference, Part two, 1957
- HANK, D.: "Einfluß der Tänzerwalze auf den Rollenregelkreis", IMP-Mitteilungen 10/1968, Heft 4
- HANK, D.: "Regelungstechnische Analyse der Tänzerwalze", IMP-Mitteilungen 10/1968, Heft 5
- HANK, D.: "Neuartige Abrollregelungen", Papier und Druck 30, 1981, 8
- HELBIG, T.: "Passer und Passertoleranzen", Papier und Druck, 29, 1980, 1
- HETTLER, P.: "Ein Fühlgerät zum Messen und Regeln der Zugspannung in laufenden Warenbahnen", Siemens-Zeitschrift Heft 6/1959
- HÖLTER, R., KUGLER, R.: "Registerregler für Mehrfarben-Rotationsdruckmaschine", Technische Mitteilungen AEG-Telefunken 58, 1958, 8
- HUCK, W.F.: "Paper Tension and Register in Multicolor Gravure Presses", Vortrag, gehalten auf der ERA-Tagung in Stockholm, 15.5.1961
- HUTZENLAUB, A.: "Theoretische Betrachtungen über den Aufbau einer Wicklung", Allg. Papierrundschau Nr. 1, 3, 9, 11, 15, 17, 19, 1967
- JÖRG, H.: "Über den Rollvorgang in einem Walzenpaar und die Kraftübertragung auf eine durchlaufende Bahn", München, TU, Dr.-Ing.-Diss. 1979
- KALLMES, O.: "Über die Grundlagen der Formation, der Struktur und der Eigenschaften von Papier", Das Papier 104, 1981
- KRIPPNER, N.: "Beitrag zur Untersuchung von Papierzugvorrichtungen an Rollenrotationsmaschinen", Druck-Print 5, Mai 1974
- LARSEN, N.O.: "Drucktechnische und mechanische Belastungen des Papiers in der Druckmaschine", Das Papier, 34. Jahrgang, Heft 10 A, 1980
- LUTZ, C., STRÖLE, D.: "Übergangsverhalten des Längsregisters in Rollenrotationsmaschinen", Sonderdruck Siemens, Jahrg. 41, 1961, Heft 5

MOHR, O., JENTSCH, W.: "Tänzerwalze zur Steuerung von hochwertigen Wickelanstrichen", Patentschrift Nr. 898 747, 1953

MUTH, E.: "Papierspannungsmessung, Papierspannungskontrolle und selbsttätige Rollenwechsellvorrichtungen", Tiefdruckjahrbuch 1961, Gesellschaft zur Förderung des Tiefdruckverfahrens mbH, Wiesbaden

MUTH, E.: "Über den Papierlauf in Rollenrotationsmaschinen und die Optimierung der Rollenwechselsteuerungsvorrichtungen", Darmstadt, TH, Dr.-Ing.-Diss. 1965

MUTH, E.: "Über den Papierlauf in Rotationsmaschinen", Polygraph 7/1966

RINGE, C.H.: "Über das Messen der Spannungen in einer laufenden Papierbahn", Archiv für Druck und Papier, 4. (95.) Jg., 1. Ausgabe 1958

ROCH, R.: "Probleme im Zusammenhang mit der optimalen Steuerung des Umfangspassers auf Rollendruckmaschinen, Papier/Kunststoff-Verarbeiter 10/1973

SCHAUT, D., BAUER, W.: "Einzelantriebe für Rotationsdruckmaschinen mit winkelgenauer Gleichlaufregelung", AEG-Sonderdruck 1975

SCHEUTER, K.R., PFEIFFER, G.: "Dynamische Untersuchungen an Papier", Druck-Print 7, 1971

SCHLEGEL, P.: "Automatische Abrollung in Umkehrung des Pop-Rollenprinzipes", Das Papier Nr. 9, 1964

SCHNEIDERREIT, G.: "Über den Einfluß der Papierrollenbremsung auf den Druck und den Betrieb von Rotationsmaschinen", Mitteilung des Forschungsinstitutes für das graphische Gewerbe, Technische Hochschule Berlin, Berlin 1940

TRÖNDLE, H.: "Zum dynamischen Verhalten transportierter elastischer und visko-elastischer Stoffbahnen zwischen aufeinanderfolgenden Klemmstellen", München, TU, Dr.-Ing.-Diss. 1973

UHRIG, R., HERRMANN, E.: "Untersuchung der Spannungsverteilung und der Größe der Spannungen im laufenden Papierstrang in Rotationsmaschinen", Institutsbericht 1961, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der TH Darmstadt

WEIDENMÖLLER, J.: "Einflüsse auf die Wickelhärte von Papierrollen und ihre Auswirkung auf die Papiereigenschaften" Zeitungstechnik, Juli 1976

WEBER, R.: "Beitrag zur Theorie der Registerregelung", Aachen, Dr.-Ing.-Diss. 1970

WOLFERMANN, W.: "Mathematischer Zusammenhang zwischen Bahnzugkraft und inneren Spannungen beim Wickeln von elastischen Stoffbahnen", München, Dr.-Ing.-Diss. 1976