

# Messung des Elastizitätsmodules an einer laufenden Papierbahn

Scheuter, Karl R.; Belau, L.  
(1986)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00014117>

License:



CC-BY 4.0 International - Creative Commons, Attribution

Publication type: Article

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

Original source: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/14117>

---

K. R. Scheuter und L. Belau

## Messung des Elastizitätsmodules an einer laufenden Papierbahn



### Zusammenfassung

#### Messung des Elastizitätsmodules an einer laufenden Papierbahn

Ein optimal stehender Passer eines gedruckten Mehrfarbendes setzt voraus, daß die örtlichen Dehnzustände der Bahn in der laufenden Druckmaschine und damit die von der Abroll-einheit erzeugte Dehnung der Bahn vor dem ersten Druckwerk konstant gehalten werden. Die Bahnspannung muß deshalb dem örtlichen Elastizitätsmodul der Bahn nachgeführt werden. Zu diesem Zweck wurde eine Meßeinheit entwickelt, welche mit Hilfe der Messung zweier Bahnspannungen und

---

Prof. Dipl.-Ing. K. R. Scheuter und Dipl.-Ing. L. Belau, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Hochschule Darmstadt, Alexanderstraße 22, D-6100 Darmstadt

zweier Bahngeschwindigkeiten den Elastizitätsmodul praktisch in Echtzeit mit einer örtlichen Auflösung besser als 20 Laufmeter zu bestimmen erlaubt. Die Untersuchung verschiedener Rollenpapiere ergab charakteristische Verhaltensmuster für den Verlauf des Elastizitätsmodules über der Bahnlänge, welche nicht nur der Druckindustrie, sondern auch den Papierherstellern neue Einsichten in die Verhaltensweise von Rollenpapieren ermöglichen.

### Summary

#### Measurement of the Modulus of Elasticity on a Running Paper Web

In order to obtain an optimum standing lay mark of a printed multicolour image, the local strain conditions of the web in the running printing machine and consequently the stretching of the web prior to the first printing unit must be kept constant. The web tension must therefore be guided according to the local modulus of elasticity of the web. For this purpose, a measuring unit was developed which allows the determination of the modulus of elasticity practically in true time with a local discernability of better than 20 running meters employing the measurement of two web tensions and two web velocities. The investigation of different roll papers gave characteristic patterns of behaviour for the changes of the modulus of elasticity over the web length generating a better understanding of the behaviour characteristics of roll papers not only for the printing industry but also for the paper producers.

Es darf heute festgestellt werden, daß — nicht zuletzt dank der Entwicklung der Fertigungstechnik — die Druckmaschine dem alten Anspruch, eine Präzisionsmaschine zu sein, inzwischen in hohem Maße ge-rechter geworden ist.

Dies hat nun zur Folge, daß grundlegende Fragen, welche längst beantwortet und erledigt schienen, neu auf den Tisch kommen, weil sie nun eine genauere, dem heutigen Qualitätsstand der Druckmaschine entsprechende Antwort erheischen. Eine dieser Fragen betrifft die Regelung der Bahnzustände in Rollenrotationsmaschinen im Hinblick auf einen optimalen, stehenden Passer im anspruchsvollen Mehrfarbendruck.

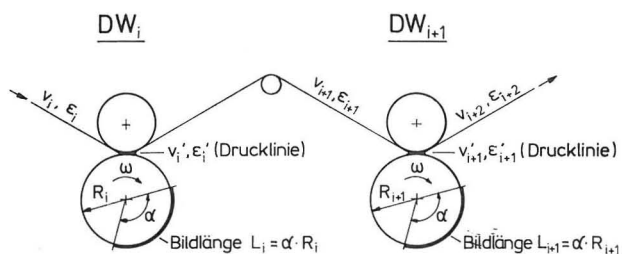


Abb. 1 Schematische Darstellung einer Rollenrotationsdruckmaschine mit sich folgenden Druckwerken

Die Grundbedingung für den einwandfreien Passer eines in einer aus sich folgenden Druckwerken bestehenden Druckmaschine (Abb. 1) gedruckten bunten Bildes ist die gleiche Länge  $L_0$  der einzelnen Teilbilder auf der spannungsfreien Bahn. Mit den Formzylinderradien  $R_i$ , den Druckbildlängen  $L_i = \alpha \cdot R_i$  auf den Formzylindern und den Bahndehnungen  $\varepsilon_i$  in den Drucklinien lautet die Passerbedingung somit

$$L_{01} = \frac{\alpha \cdot R_1}{1 + \varepsilon_1} = \dots = L_{0i} = \frac{\alpha \cdot R_i}{1 + \varepsilon_i} = \dots = L_{0n} = \frac{\alpha \cdot R_n}{1 + \varepsilon_n} \quad (1)$$

Für den passerhaltigen Druck gilt deshalb auch für zwei beliebige sich folgende Druckwerke

$$\therefore \frac{R_{i+1}}{R_i} = \frac{1 + \varepsilon_{i+1}}{1 + \varepsilon_i} \quad (2)$$

Erweitert man die linke Seite der Gl. 2 mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  der Formzylinder, dann ergibt sich

$$\frac{\omega \cdot R_{i+1}}{\omega \cdot R_i} = \frac{w_{i+1}}{w_i} = \frac{1 + \varepsilon_{i+1}}{1 + \varepsilon_i} \quad (2.1)$$

Da die Dicke der Papierbahn gegenüber den Zylinderradien verschwindend klein ist, dürfen die Bahngeschwindigkeiten  $v'$  in den Drucklinien den Umfangsgeschwindigkeiten  $w$  der Formzylinder gleichgesetzt werden. Mit  $v'_i = w_i$  und  $v'_{i+1} = w_{i+1}$  wird dann

$$\therefore \frac{v'_{i+1}}{v'_i} = \frac{1 + \varepsilon_{i+1}}{1 + \varepsilon_i} = \text{Kontinuitätsbedingung für } v \rightarrow 0 \quad (3)$$

Unter der praktisch zulässigen Voraussetzung, daß die Poissonzahl der laufenden Bahn  $\nu \cong 0$  ist, stellt die Gl. 3 die Kontinuitätsbedingung für die Drucklinien dar. Ist sie erfüllt, dann ist auch die Passerbedingung erfüllt und umgekehrt.

Die auf die Drucklinien bezogene Kontinuitätsbedingung kann natürlich nur dann erfüllt sein, wenn sie auch an zwei beliebigen anderen Bahnstellen  $j$  und  $k$  erfüllt wird. Allgemein gilt deshalb

$$\text{Allgemein für zwei beliebige Bahnstellen } j \text{ und } k \quad (4)$$

$$\frac{v_k}{v_j} = \frac{1 + \varepsilon_k}{1 + \varepsilon_j}$$

Aber auch aus dieser allgemeinen Gleichung läßt sich noch nicht auf die Bahnzustände der freien Bahnen vor dem ersten Druckwerk bzw. zwischen den Druckwerken schließen. Es ist deshalb noch nicht möglich, auf den von der Abrolleinheit zu erzeugenden Bahnzustand  $\sigma_1$  und  $\varepsilon_1$  vor dem ersten Druckwerk zu schließen, also das Pflichtenheft der Abrolleinheit aufzustellen. Es ist dazu zusätzlich die Bahnlaufgleichung notwendig, welche die Bahnzustände aller Bahnabschnitte miteinander verknüpft.

In der älteren Literatur<sup>1, 2</sup> wird ausnahmslos von der Annahme ausgegangen, daß sich die Bahnzustände ausschließlich in den Drucklinien ändern. Der Bahnzustand in den freien Bahnen vor den Druckwerken wäre dann identisch mit dem Bahnzustand in der jeweils nachfolgenden Drucklinie. Also würde für die Bahngeschwindigkeiten und Bahndehnungen

$$\left. \begin{array}{l} v_i = v'_i \\ \varepsilon_i = \varepsilon'_i \end{array} \right\} \quad (5)$$

als Bahnlaufgleichung gelten. Daraus ergäbe sich für die ersten beiden Druckwerke (Abb. 2) vorerst der Zusammenhang

$$\therefore \frac{1 + \varepsilon'_2}{1 + \varepsilon'_1} = \frac{1 + \varepsilon_2}{1 + \varepsilon_1} = \frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

Mit dieser Gleichung folgt aus der Passerbedingung (Gl. 1)

$$\therefore \frac{L_{02}}{L_{01}} = 1 \neq f(\varepsilon_1, R_1, R_2) \quad (7)$$

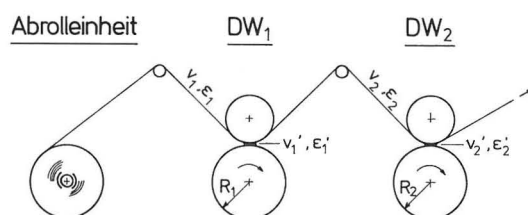


Abb. 2 Schematische Darstellung einer Rollenrotationsdruckmaschine mit Abrolleinheit

Die Aussage, welche diese Gleichung beinhaltet, lautet, daß unter der Nebenbedingung, daß die Bahndehnung an jeder beliebigen Stelle in der Druckmaschine stets größer als Null bleibt, die Radienverhältnisse der sich folgenden Formzylinder völlig beliebig gewählt werden dürfen: Ferner wäre die Passerbedingung Gl. 1 unter Berücksichtigung der oben erwähnten Nebenbedingung für jede beliebige Dehnung  $\varepsilon_1 = \varepsilon'_1$  erfüllt<sup>3</sup>. Eine Änderung der Dehnung  $\varepsilon_1$  führte allerdings zu einer Änderung der Bildlänge und damit zu Passerfehlern. Diese würden jedoch rasch wieder abklingen. Die Maschine würde dann von sich aus wieder passerhaltig, wenngleich mit veränderter Bildlänge, weiterdrucken.

Die Tiefdrucker wissen aus Erfahrung, wenngleich meist nur implizite, daß all das nicht stimmt. Es stimmt deshalb nicht, weil insbesondere beim Einlauf in die Drucklinien, wie auch beim Auslauf, Reibkräfte in die Papierbahn eingeleitet werden, welche bewirken, daß die Bahnzustände der freien Bahnen nicht mehr identisch sind mit jenen in den nachfolgenden Drucklinien<sup>4</sup>. Die Berücksichtigung der Reibkräfte sowie der möglichen bleibenden Dehnung  $\Delta\varepsilon_{B_i}$  der Bahn als Folge der Kompression in den Drucklinien und der möglichen Längenänderung  $\Delta\varepsilon_{T_i}$  durch Schrumpfen in den Trocknern führt zu folgenden neuen Bahnzustandsgleichungen, nämlich

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_i' &= \varepsilon_i \cdot k_1 + \Delta\varepsilon_{B_i} \\ \varepsilon_{i+1} &= \varepsilon_i' \cdot k_2 + \Delta\varepsilon_{T_i} \\ \varepsilon_{i+1}' &= \varepsilon_{i+1} \cdot k_3 + \Delta\varepsilon_{B_{i+1}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Die Faktoren  $K_1$ ,  $K_2$  und  $K_3$  berücksichtigen die Dehnungsänderungen durch Reibkräfte außerhalb der eigentlichen Drucklinien. Die Größe dieser drei Faktoren und die Größe der Längenänderungen  $\Delta\varepsilon_B$  und  $\Delta\varepsilon_T$  hängen selbstverständlich von der Art der Druckmaschine und der Geometrie des Bahnlaufes ab. Durch Einsetzen in die Kontinuitätsgleichung mit  $i = 1$  für die beiden ersten Druckwerke entsteht der Zusammenhang

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{1 + \varepsilon_2'}{1 + \varepsilon_1'} = \frac{1 + \varepsilon_1 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 + \Delta\varepsilon_{B_1} \cdot k_2 \cdot k_3 + \Delta\varepsilon_{T_1} \cdot k_3 + \Delta\varepsilon_{B_2}}{1 + \varepsilon_1 \cdot k_1 + \Delta\varepsilon_{B_1}} \quad (9)$$

Da in der im Fortdruckzustand laufenden Maschine nicht nur das Radienverhältnis  $\frac{R_2}{R_1}$  konstant ist, sondern auch die zusätzlichen Dehnungen  $\Delta\varepsilon_{B_1}$ ,  $\Delta\varepsilon_{T_1}$  und  $\Delta\varepsilon_{B_2}$ , ist sofort erkennbar, daß im Fortdruck die von der Rollenabwickleinheit erzeugte Dehnung der freien Bahn vor dem ersten Druckwerk

$$\therefore \varepsilon_1 = f\left(\frac{R_2}{R_1}, k_1, k_2, k_3, \Delta\varepsilon_{B_1}, \Delta\varepsilon_{T_1}, \Delta\varepsilon_{B_2}\right) = \text{konst.} \quad (10)$$

sein muß.

Da in der Regel  $\varepsilon_1 \leq 1\%$  ist, darf für jede Stelle  $l$  der abgewickelten Bahn die Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes vorausgesetzt werden. Somit ist

$$\therefore \text{mit } \varepsilon_1 \leq 1\% \text{ gilt allg. } \begin{aligned} \sigma &= \varepsilon \cdot E(l), \text{ d.h.} \\ \sigma_1 &= \varepsilon_1 \cdot E(l) \end{aligned} \quad (11)$$

und mit  $\varepsilon_1 = \text{konst.}$  folgt dann die Anweisung für die Rollenabwicklung

$$\text{und damit } \sigma_1 \sim E(l) \quad (11.1)$$

Damit ergibt sich aus der Forderung nach einem stehenden Passer die zwingende Notwendigkeit, die Abspannung  $\sigma_1$  dem Elastizitätsmodul  $E(l)$  der laufenden Bahn nachzuführen. Dies setzt jedoch die Echtzeitmessung des Elastizitätsmodules der Bahn vor dem ersten Druckwerk voraus<sup>5</sup>. Die Dehnung, und damit der Elastizitätsmodul, entzieht sich in einer laufenden Bahn der direkten Messung. Mittels der Kontinuitäts-

gleichung läßt sich jedoch eine indirekte Methode zur Bestimmung des Elastizitätsmodules gewinnen. Aus Gl. 4, der allgemeinen Form der Kontinuitätsgleichung, folgt unter der Voraussetzung, daß quasi in Echtzeit gemessen wird, so daß während der Meßzeit  $E = \text{konst.}$  gesetzt werden darf,

$$\frac{v_k}{v_j} = \frac{1 + \varepsilon_k}{1 + \varepsilon_j} = \frac{E + \sigma_k}{E + \sigma_j} \quad (12)$$

Die Auflösung nach dem Elastizitätsmodul ergibt

$$\therefore E = \frac{\sigma_k - \sigma_j \frac{v_k}{v_j}}{\frac{v_k - v_j}{v_j}} \quad (13)$$

Da in jedem Falle die beiden Geschwindigkeiten sich nur geringfügig voneinander unterscheiden, darf unter Inkaufnahme eines vernachlässigbaren Fehlers die Gl. 13 in der vereinfachten Form

$$E \approx \frac{\sigma_k - \sigma_j}{\frac{v_k - v_j}{v_j}} = E(l) \quad \text{mit} \quad \frac{v_k}{v_j} \sim 1 \quad (14)$$

geschrieben werden. Da Spannungen und Bahngeschwindigkeiten meßbar sind, läßt sich der Elastizitätsmodul einer laufenden Bahn bestimmen. Aus der Gl. 14 ergibt sich unmittelbar die Forderung, daß zwischen den beiden Stellen  $j$  und  $k$ , an welchen jeweils die Spannung und die Geschwindigkeit gemessen wird, eine Bahnzustandsänderung durch eine Kräfteinleitung erzeugt wird. Ursprünglich war dazu eine Klemmstelle, bestehend aus einer Zugwalze und einem Presseur, vorgesehen. Die ersten Messungen zeigten jedoch sofort, daß der früher erwähnte Kompressionseinfluß  $\Delta\varepsilon_B$  im Vergleich zu den statisch bestimmten Werten auf zu geringe Werte des dynamischen Elastizitätsmodules führte. Als besonders geeignet zur Kräfteinleitung erwies sich schließlich jedoch eine einfache feste Wendestange, welche durch Höhenverstellung und der damit einhergehenden Änderung des Umschlingungswinkels die Kraft feinfühlig und ohne merklichen Kompressionseinfluß zu dosieren erlaubt.

Die Spannungsmessung konnte mittels Wägezellen mit der notwendigen Genauigkeit durchgeführt werden. Problematisch war jedoch die Geschwindigkeitsmessung. Da sich die Geschwindigkeit  $v_j$  und  $v_k$  nur in der Größenordnung von weniger als 1% unterscheiden, müssen die Geschwindigkeiten mit einer relativen Genauigkeit von besser als  $10^{-5}$  gemessen werden. Dieses Problem wurde, nachdem schließlich feststand, daß die bekannten Methoden der Geschwindigkeitsmessung nicht genau genug sind, gelöst, indem die Geschwindigkeitsmessung auf die Messung der Winkelgeschwindigkeit umschlungener Walzen zurückgeführt wurde. Aufgrund dessen konnte die Geschwindigkeitsdifferenz  $v_k - v_j$  auf eine Differenzfrequenz-Messung<sup>6</sup> mit einer relativen Genauigkeit von rund  $10^{-6}$  zurückgeführt werden. Dadurch konnte der Geschwindigkeitsterm in Gl. 14 mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden.

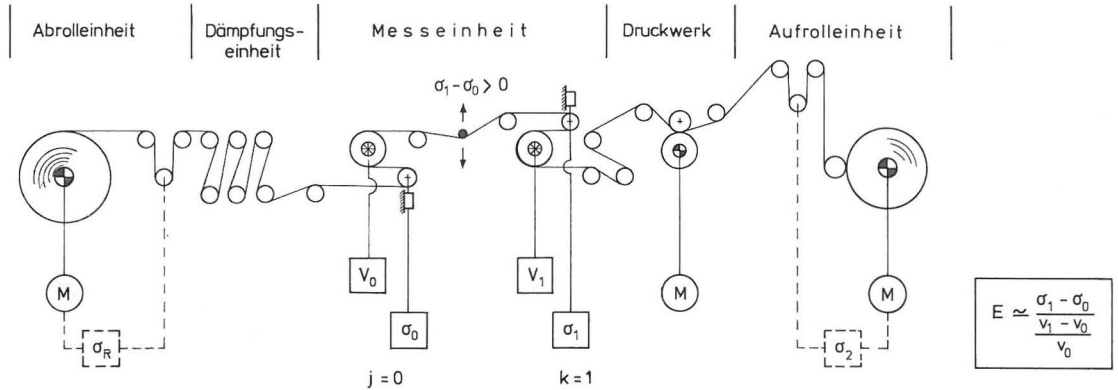


Abb. 3 Schematische Darstellung der Versuchsmaschine

Zur Überprüfung der vorstehenden Überlegungen wurde eine Versuchsmaschine gebaut, welche hinsichtlich des Bahntransportes einer Tiefdruck-Rollenrotationsmaschine entspricht. Da aus Umwelts- und Sicherheitsgründen nicht gedruckt werden konnte, beschränkte man sich auf nur ein Druckwerk. Der Aufbau, bestehend aus einer Abwickleinheit, einer Dämpfungseinheit, der Meßeinheit, einem Druckwerk und einer Aufrolleinheit, ist in der Abb. 3 schematisch dargestellt. Aus Kostengründen wurde die Bahnbreite auf 300 mm beschränkt. Da die Aufrolleinheit nur eine Durchmesserkapazität von 600 mm aufweist, war bei allen Versuchsläufen mit den von der Papierindustrie zur Verfügung gestellten 1000-mm-Rollen ein Betriebsunterbruch von 15 bis 20 Minuten zum Rollenwechsel im Wickler notwendig. Während dieses Zeitintervalles war die Bahn, wie nach einem Bahnriß in einer Druckmaschine, spannungsfrei.

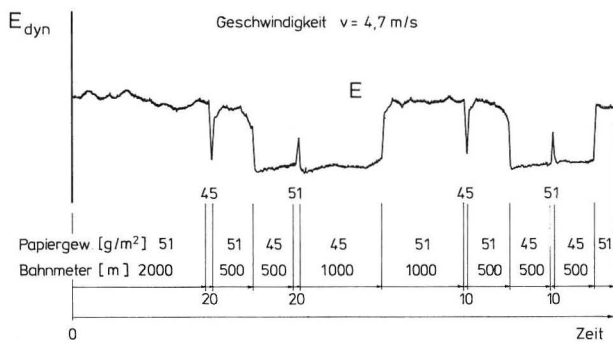


Abb. 4 Der Verlauf des Elastizitätsmodules einer zusammengesetzten Bahn

Für die Eignung der Meßeinheit als Ist-Wert-Geber für die Regelung der Dehnung  $\epsilon_1$  vor dem ersten Druckwerk ist das örtliche Auflösungsvermögen in Laufrichtung von besonderer Bedeutung. Zu seiner Überprüfung wurden Bahnen aus verschiedenen langen Teilstücken unterschiedlicher Elastizitätsmoduli zusammengeklebt und neu gewickelt und dann in einem Versuchslauf entgegengesetzt der Papiermaschinenufrichtung in der Versuchsmaschine wieder abgerollt. Die Abb. 4 zeigt beispielsweise, daß das örtliche

Auflösungsvermögen sprunghafter Änderungen bei ca. 10 bis 20 m Bahnlänge liegt. Auch unter Berücksichtigung der Tatsache, daß das Trägheitsmoment der Meßwalzen etwa proportional zur Bahnbreite ist, bei breiten Bahnen also eine etwas geringere Auflösung zu erwarten ist, dürfte das Auflösungsvermögen des Meßsystems bei produktionsgerechten Bahnen mehr als ausreichend sein und damit als Ist-Wert-Geber für den Elastizitätsmodul die Erwartungen erfüllen.

Die nachfolgenden Prüfläufe, welche ihrem Hauptzweck nach noch immer der Systemprüfung dienen, gaben jedoch auch erste Einsichten über die Verhaltensweise von Rollenpapieren. Die Abb. 5 zeigt stellvertretend ein Meßresultat, das den Verlauf des Elastizitätsmodules über der Bahnlänge  $l$  zeigt. Es ist erkennbar, daß einem gleitenden Mittelwert Störungen überlagert sind, welche bei allen untersuchten Papieren mit mehr oder weniger großen Amplituden und Frequenzen auftreten und mutmaßlicherweise der Papierherstellung angelastet werden müssen, also im wesentlichen der Elastizitätsmodulverteilung vor dem Wickeln entsprechen. Hinsichtlich des gleitenden Mittelwertes zeichnen sich jedoch zwei grundlegend unterschiedliche Verhaltensmuster ab (Abb. 6), welche eigentlich nur als Antwort der unterschiedlichen Papiereigenschaften auf die Belastungszustände im Wickel verstanden werden können. Das erste Verhaltensmuster scheint charakteristisch vor allem für Tiefdruckpapiere zu sein. Es ist dadurch gekennzeichnet, daß der gleitende Mittelwert des Elastizitätsmodules vorerst langsam auf einen praktisch konstanten Wert abfällt, welcher auch nach einem Betriebsunterbruch mit spannungsloser Bahn erhalten bleibt. Gegen das Bahnenende zu steigt der Elastizitätsmodul noch einmal an und fällt dann am Ende wieder auf etwa den vorangegangenen konstanten Wert zurück.

Das zweite Verhaltensmuster scheint eher für ungestrichene Offset- und Zeitungsdruckpapiere charakteristisch zu sein. Kennzeichnend ist hier der meist steilere Abfall des Elastizitätsmodules am Rollenanfang

auf den praktisch konstanten Wert. Dieser Wert bleibt nun jedoch während eines Betriebsunterbruches nicht mehr erhalten, sondern der Elastizitätsmodul scheint sich zu erholen und erreicht erst nach einem

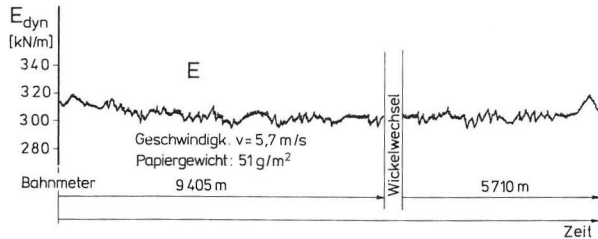


Abb. 5 Der Verlauf des Elastizitätsmodules eines Tiefdruckpapiers

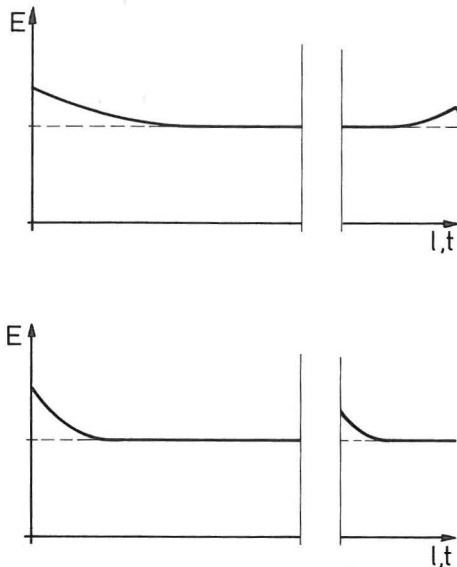


Abb. 6 Verhaltensmuster des Elastizitätsmodules

relativ steilen neuen Abfall wieder den konstanten Wert. Ein merklicher Wiederanstieg kurz vor dem Rollenende tritt nicht auf.

Wegen der relativ geringen Zahl der untersuchten Papiere sind die Schlußfolgerungen hinsichtlich der Verhaltensweise von Rollenpapieren noch als vorläufig zu betrachten. Endgültig ist jedoch der Schluß, daß das Meßsystem geeignet ist zur Messung des Elastizitätsmodules in einer laufenden Bahn, womit auch seine Eignung als Ist-Wert-Geber für eine Abrollregelung auf konstante Dehnung vor dem ersten Druckwerk bewiesen ist. Das Meßsystem bietet zudem den Papierherstellern ein neues Mittel zur Untersuchung einer bedeutsamen Verdrückbarkeitseigenschaft von Rollenpapieren.

## Literatur

- 1 Brandenburg, G.: Über das dynamische Verhalten durchlaufender elastischer Stoffbahnen bei Kraftübertragung durch Coulomb'sche Reibung in einem System angetriebener, umschlungener Walzen. München, TU, Diss., 1971
- 2 Brandenburg, G.; Tröndle, H.: Dynamik des Längsregisters bei Rollenrotationsmaschinen. Siemens Forschungs- u. Entwicklungsbericht Bd. 5 (1976), Nr. 1
- 3 Schmid, J.: Bahnspannung, Bahndehnung, Passerfehler. Information Wifag, Polytype, 5. April 1972
- 4 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
- 5 Belau, L.; Scheuter, K. R.: Längsdehnung und Elastizitätsmodul einer laufenden Bedruckstoffbahn. Institutsbericht 1/1985, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der TH Darmstadt
- 6 Forschungsgesellschaft Druckmaschinen e. V.: Patentanmeldung Nr. P 32 05 240.5