

**INFOR-Projekt Nr. 11**

# **Analyse zur Reduzierung der Biegesteifigkeitsverluste von Karton in der Ausrüstung**

**November 2001**

Lehrstuhl für Maschinenelemente  
und Konstruktionslehre  
Ruhr-Universität Bochum

Leiter der Forschungsstelle:  
Prof. Dr.-Ing. E. G. Welp

Projektleiter:  
Dipl.-Ing. E. Wolf  
Dipl.-Ing. A. Kleinert

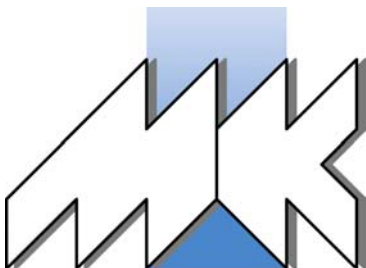


## Forschungsbericht LMK-VDP

### Analyse zur Reduzierung der Biegesteifigkeitsverluste von Karton in der Ausrüstung

---

Welp, E.G.; Wolf, E.; Kleinert, A.



Lehrstuhl für Maschinenelemente

Und Konstruktionslehre

Prof. Dr.-Ing. E.G. Welp

# **Analyse zur Reduzierung der Biegesteifigkeitsverluste von Karton in der Ausrüstung**

Forschungsbericht LMK-VDP  
Projektförderung  
Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP)

Autoren

Prof. Dr.-Ing. E.G. Welp  
Dipl.-Ing. E. Wolf  
Dipl.-Ing. A. Kleinert

Copyright by  
Lehrstuhl für Maschinenelemente und Konstruktionslehre  
Ruhr-Universität Bochum  
D-44807 Bochum  
2001

Zitiervorschlag:

Welp, E.G.; Wolf, E.; Kleinert, A.  
Analyse zur Reduzierung der Biegesteifigkeitsverluste von Karton  
in der Ausrüstung  
Forschungsbericht LMK-VDP, 101 S.  
Bochum 2001

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Zusammenfassung.....</b>                                                                                   | <b>1</b>  |
| <b>2 Ausgangssituation und Zielsetzung Ausgangssituation und Zielsetzung.....</b>                               | <b>3</b>  |
| <b>3 Grundlagen zu den durchgeführten Untersuchungen.....</b>                                                   | <b>5</b>  |
| 3.1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....                                                                                | 5         |
| 3.1.1 Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Karton .....                                                             | 5         |
| 3.1.2 Werkstoffgesetz und –kennwerte für Karton .....                                                           | 9         |
| 3.1.3 Verformungsverhalten von Karton .....                                                                     | 11        |
| 3.1.4 Biegesteifigkeitsverhalten von Karton.....                                                                | 13        |
| 3.2 NUMERISCHE GRUNDLAGEN.....                                                                                  | 22        |
| 3.2.1 Kontrollrechnungen zur Werkstoffmodellierung .....                                                        | 22        |
| 3.3 EXPERIMENTELLE GRUNDLAGEN.....                                                                              | 27        |
| 3.3.1 Allgemeine Versuchsbedingungen .....                                                                      | 27        |
| 3.3.2 Zugversuch .....                                                                                          | 31        |
| 3.3.3 Druckversuch.....                                                                                         | 31        |
| 3.3.4 Auswertung der Zug- und Druckversuche .....                                                               | 32        |
| 3.3.5 Biegesteifigkeitsversuch .....                                                                            | 33        |
| <b>4 Einflussfaktoren auf die Biegesteifigkeitsverluste von Karton....</b>                                      | <b>34</b> |
| 4.1 UMFANG UND ZIEL DER UNTERSUCHUNGEN.....                                                                     | 34        |
| 4.2 CHARAKTERISIERUNG DER UNTERSUCHTEN KARTONPROBEN .....                                                       | 35        |
| 4.3 EINFLUSSFAKTOREN AUS ZUGBEANSPRUCHUNGEN .....                                                               | 37        |
| 4.4 EINFLUSSFAKTOREN AUS DRUCKBEANSPRUCHUNGEN .....                                                             | 40        |
| 4.5 SORTENABHÄNGIGE REFERENZKURVEN FÜR BIEGESTEIFIGKEITSVERLUSTE IN<br>ABHÄNGIGKEIT VON SPANNUNGSZUSTÄNDEN..... | 42        |
| 4.5.1 Zugbeanspruchung.....                                                                                     | 44        |
| 4.5.2 Druckbeanspruchung.....                                                                                   | 46        |
| <b>5 Analyse der Biegesteifigkeitsverluste von Karton in<br/>Verarbeitungsprozessen .....</b>                   | <b>49</b> |
| 5.1 VERSUCHSTECHNIK .....                                                                                       | 52        |
| 5.2 BAHNTRANSPORT .....                                                                                         | 53        |
| 5.2.1 Umschlungene Walze.....                                                                                   | 53        |
| 5.2.2 Walzenpaar .....                                                                                          | 59        |
| 5.3 WICKELN .....                                                                                               | 67        |
| 5.4 STAPELN .....                                                                                               | 74        |
| 5.5 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE .....                                                                        | 76        |

|                                                                                                     |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6 Maßnahmen zur Reduzierung der Biegesteifigkeitsverluste von Karton .....</b>                   | <b>79</b> |
| 6.1 MATERIALVERHALTEN .....                                                                         | 79        |
| 6.2 VERARBEITUNGSPROZESSE.....                                                                      | 80        |
| 6.2.1 Grundlegende Hinweise zu Verarbeitungsprozessen .....                                         | 80        |
| 6.2.2 Konkrete Hinweise zu Verarbeitungsprozessen .....                                             | 80        |
| <b>7 Literatur.....</b>                                                                             | <b>84</b> |
| <b>A Anhang.....</b>                                                                                | <b>86</b> |
| A.1 EINFLUSSFAKTOREN AUS ZUGSPANNUNGEN .....                                                        | 86        |
| A.1.1 Einfluss der Belastungshöhe .....                                                             | 86        |
| A.1.2 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit .....                                                  | 88        |
| A.1.3 Zyklische Untersuchungen zum Einfluss der Entlastungshaltezeit<br>(Relaxationsverhalten)..... | 90        |
| A.1.4 Zyklische Untersuchungen zum Einfluss der Belastungshaltezeit<br>(Kriechverhalten) .....      | 92        |
| A.2 EINFLUSSFAKTOREN AUS DRUCKBEANSPRUCHUNGEN .....                                                 | 94        |
| A.2.1 Einfluss der Belastungshöhe .....                                                             | 94        |
| A.2.2 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit .....                                                  | 96        |
| A.2.3 Zyklische Untersuchungen zum Einfluss der Entlastungshaltezeit<br>(Relaxationsverhalten)..... | 98        |
| A.2.4 Zyklische Untersuchungen zum Einfluss der Belastungshaltezeit<br>(Kriechverhalten) .....      | 100       |

## Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes

### Formelzeichen

|                      |                      |                                                               |
|----------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------|
| $z$                  | [mm]                 | Abstand der Einzelschicht zur Mittellinie des Gesamtverbundes |
| $h$                  | [mm]                 | Bahndicke                                                     |
| $M_b$                | [Nm]                 | Biegemoment                                                   |
| $S_b$                |                      | spezifische breitenbezogene Biegesteifigkeit                  |
| $\alpha$             |                      | Biegewinkel                                                   |
| $\varepsilon$        | [-]                  | Dehnung                                                       |
| $\delta$             |                      | Dehnungsgeschwindigkeit                                       |
| $\rho$               | [g/m <sup>3</sup> ]  | Dichte                                                        |
| $E$                  | [N/mm <sup>2</sup> ] | Elastizitätsmodul                                             |
| $I_F$                | [mm <sup>4</sup> ]   | breitenbezogenes Flächenträgheitsmoment                       |
| $G$                  |                      | Gleitmodul                                                    |
| $S$                  | [N/mm <sup>2</sup> ] | Grenzspannung                                                 |
| $F$                  | [N]                  | Kraft                                                         |
| $l$                  | [mm]                 | Länge                                                         |
| $L_{\text{Paetow}}$  | -                    | Linearitätsterm nach Paetow                                   |
| $m$                  | [g]                  | Masse                                                         |
| $K_1$                | [N/mm <sup>2</sup> ] | Materialkonstante nach Pfeiffer                               |
| $K_2$                | [-]                  | Materialkonstante nach Pfeiffer                               |
| $NL_{\text{Paetow}}$ | -                    | Nichtlinearitätsterm nach Paetow                              |
| $b$                  | [mm]                 | Probenbreite                                                  |
| $\nu$                | [-]                  | Querkontraktionszahl                                          |
| $f$                  | [-]                  | Relative Massenanteile                                        |
| $k$                  | [-]                  | Schichtenanzahl                                               |
| $\sigma$             | [N/mm <sup>2</sup> ] | Spannung                                                      |
| $r$                  | [-]                  | Verhältnis der partiellen Rohdichten                          |
| $t$                  | [s]                  | Zeit                                                          |

### Indizes

|       |                                        |
|-------|----------------------------------------|
| a     | außen                                  |
| Bruch | Bruchzustand                           |
| DS    | Deckschicht                            |
| ZD    | Dickenrichtung des Papiers             |
| eff   | effektiv                               |
| el    | elastisch                              |
| ges   | gesamt                                 |
| Grenz | Grenzzustand                           |
| ini   | initial                                |
| MD    | Maschinenlaufrichtung                  |
| max   | maximal                                |
| MS    | Mittelschicht                          |
| pl    | plastisch                              |
| CD    | Querrichtung zur Maschinenlaufrichtung |
| R     | Rücken                                 |
| ve    | viskoelastisch                         |
| vpl   | viskoplastisch                         |

## 1 Zusammenfassung

Die Biegesteifigkeit ist eine der wesentlichen Gebrauchseigenschaften von Karton. Die Umsetzung der in dem Stoffeintrag mitgegebenen Materialeigenschaften zu einem maximalen Biegesteifigkeitswert der hergestellten Kartonbahn ist damit eine zentrale Anforderung an den Herstellungs- und Verarbeitungsprozess von Karton. In der industriellen Praxis hat sich gezeigt, dass in dem gesamten Verarbeitungsprozess 5 – 7% der Biegesteifigkeit verloren gehen können.

Vor diesem Hintergrund wurde am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Konstruktionslehre Bochum (LMK) ein Forschungsvorhaben durchgeführt, das die Biegesteifigkeitsverluste von Karton in Verarbeitungsprozessen mit dem Ziel analysiert, einerseits Optimierungspotenziale im Stoff- und Schichtaufbau und andererseits konstruktive oder konfigurative Optimierungspotenziale der einzelnen Verarbeitungsmaschinen aufzudecken.

Im Rahmen der experimentellen Grundlagenuntersuchungen wurde eine Zug-Druck-Prüfmaschine (Fa. Zwick) eingesetzt. Neben den Elastizitätsmoduli in allen drei Verarbeitungsrichtungen wurden die Parameter Belastungshöhe, Belastungsgeschwindigkeit, Belastungshaltezeit, Entlastungshaltezeit und ihre Einflüsse bei einmaligem und zyklischem Auftreten auf die Biegesteifigkeitsentwicklung von Karton untersucht. Zur messtechnischen Erfassung der Biegesteifigkeit wurde ein Biegesteifigkeitsmessgerät nach dem Zwei-Punkt-Verfahren und zur Bestimmung der Blattdicke ein Dickenmessgerät (beide Geräte Fa. L&W) eingesetzt. Die experimentellen Untersuchungen der Einflussparameter auf die Biegesteifigkeit sind bei Normklima DIN 50014 – 23/50 – 1 durchgeführt worden.

Zur Untersuchung der Biegesteifigkeitsverluste an wesentlichen Komponenten der Verarbeitungsprozesse (Rakel, umschlungene Walze, Walzenpaar und Wickeln) wurde der vorhandene Wickelversuchsstand des LMK genutzt. Experimentelle Untersuchungen zum Verarbeitungsprozess Stapeln wurden an einem weiteren Versuchsstand bei Normklima durchgeführt.

Die theoretischen Untersuchungen sind mit dem FEM – Programmsystem Marc&Mentat 2000 und dem Messdatenverarbeitungsprogramm Matlab 5.3 durchgeführt worden. Für die Werkstoffmodellierung von Karton wurde ein dreidimensionales nichtlineares Werkstoffgesetz verwendet. Zur Überprüfung des modellierten Werkstoffverhaltens von Karton sind der Zugversuch nach DIN ISO 1924-2 in der Blattebene, ein Druckversuch in Dickenrichtung und der Biegesteifigkeitsversuch nach DIN 53121 simuliert und mit experimentellen Ergebnissen verglichen worden. Der Vergleich zeigt, dass das Zug- und Druckverhalten von Karton durch numerische Berechnungen sehr gut angenähert werden kann, hingegen Abstriche beim Biegeverhalten hingenommen werden müssen.

Die Untersuchungen zum Einfluss des Schichtaufbaus und der Stoffzusammensetzung haben gezeigt, dass ein symmetrischer Schichtaufbau für das Erreichen maximaler Biegesteifigkeiten optimal ist. Bei den Untersuchungen zum unsymmetrischen Blattaufbau von Karton hat sich bei der Variation von Stoff- und Strukturparametern ein Bereich maximaler Biegesteifigkeiten in Abhängigkeit vom

relativen flächenbezogenen Massenanteil der Außenschicht und des partiellen Rohdichteverhältnisses von Mittel- zur Außenschicht herausgestellt. Demnach ist eine geringes Rohdichteverhältnis notwendig, um bei vorgegebener flächenbezogener Gesamtmasse eine maximale Biegesteifigkeit zu erhalten. Die Lage der optimalen Anteile der Außenschicht am Gesamtverbund wird maßgeblich durch die Steifigkeiten der eingesetzten Stoffe beeinflusst.

Zur Untersuchung der Verarbeitungsprozesse von Karton sind Simulationsmodelle, basierend auf den Ergebnissen der Grundlagenuntersuchungen entstanden, die in ihren Randbedingungen die realen Prozesse nachstellen. Mit Hilfe der gut übereinstimmenden experimentellen und numerischen Ergebnisse konnten die verarbeitungsspezifischen Biegesteifigkeitsverluste der einzelnen Verarbeitungsprozesse bestimmt werden. Diese Kombination, Theorie und Experiment, hat die Erzeugung sogenannter "sortenabhängiger Referenzkurven" für die Biegesteifigkeitsverluste bei Zug- und Druckbelastungen bzw. für äquivalente Bahnzüge und Kompressionen ermöglicht. Für den Praktiker sind sie ein wertvolles Hilfsmittel zur Einschätzung der sich einstellenden Biegesteifigkeitsverluste in den einzelnen Verarbeitungsprozessen. Diese Referenzkurven konnten den überproportionalen Einfluss der Blattdicke auf die Biegesteifigkeitsentwicklung verdeutlichen.

In Abhängigkeit des Umschlingungswinkels und des Walzendurchmessers, einschließlich kleiner Durchmesser (Rakel) sind die Biegesteifigkeitsverluste bei bahnumschlungenen Walzen untersucht worden. Die größten Verluste sind beim Rakel schon bei kleinen Umschlingungswinkeln feststellbar.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Verarbeitungsprozess Bahntransport haben gezeigt, dass bei Walzenpaaren der Durchmesser und der Walzenbelag die entscheidenden Einflussfaktoren auf die Biegesteifigkeitsverluste im Walzenspalt sind.

Die Verarbeitungsprozesse Wickeln und Stapeln verursachen unter Berücksichtigung realitätsnaher Verarbeitungsparameter die geringsten Biegesteifigkeitsverluste. Beim Wickeln sind erst bei der Betrachtung der Nipzone Biegesteifigkeitsverluste verstärkt feststellbar. Es konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Walzenbelägen zu einer Reduzierung der Biegesteifigkeitsverluste führt.

Diese zusammengefassten Untersuchungsergebnisse, unter Berücksichtigung der experimentell und numerisch erzeugten Referenzkurven, hat die Ausarbeitung von Maßnahmen zur Reduzierung der Biegesteifigkeitsverluste für die einzelnen Verarbeitungsprozesse im Sinne einer Handlungsanleitung für den Kartonhersteller und –verarbeiter ermöglicht.

## 2 Ausgangssituation und Zielsetzung

Durch einen Ringversuch des Zellcheming-Fachausschusses für Karton und Pappenerzeugung stellte sich heraus, dass der durchschnittliche Biegesteifigkeitsverlust von Karton allein in der Ausrüstung 5 – 7 % beträgt und durch verschiedene Belastungszustände in den Verarbeitungsmaschinen, die zu Volumen- und Steifigkeitsverlusten des Kartons führen, verursacht wird. Bisherige Maßnahmen zur Reduzierung der Volumen- und Steifigkeitsverluste bestanden darin, mit großem Aufwand für jeden Einsatzfall durch Variation der Material- und Prozessparameter der Ausrüstungsmaschinen ein Optimum für die jeweilige Kartonsorte zu finden.

Die beschriebene Ausgangssituation definiert somit die Gesamtzielsetzung dieses Projektes, die darin besteht, mit Hilfe einer systematischen Untersuchung der Biegesteifigkeit und der Biegesteifigkeitsverluste von Karton Maßnahmen zur Reduzierung dieser Verluste zu ermitteln. Die erzielten Ergebnisse sollen den jeweiligen Kartonhersteller in die Lage versetzen, den Gebrauchswert der erzeugten Kartonbahn durch Optimierung der Stoffzusammensetzung und der Verarbeitungsprozesse zu erhöhen.

Den gesamten Untersuchungen liegt der aus der Kontinuumsmechanik bekannte Zusammenhang für die Biegesteifigkeit zugrunde. In diesem Kontext wird sie als spezifische breitenbezogene Biegesteifigkeit  $S_b$  eingeführt. Für eine Kartonprobe mit der Probenbreite  $b$  ist sie in Richtung der Biegemomentenachse definiert durch das Produkt aus dem in-plane-Elastizitätsmodul  $E$ , der die materialkennzeichnende Größe darstellt und dem breitenbezogenen Flächenträgheitsmoment  $I_F$ , das die geometriebezogene Kenngröße bezeichnet:

$$S_b = \frac{E \cdot I_F}{b} \text{ [Nmm]}, \text{ mit } I_F = \frac{b \cdot h^3}{12} \text{ [mm}^4\text{]} \quad (1)$$

Zur Untersuchung werden nun die Einflüsse und Einwirkungen auf diese beiden Kenngrößen der Biegesteifigkeit und deren Verhalten analysiert und bewertet. Die Schichtigkeit des Kartons, Inhomogenität und Anisotropie der Einzelschichten, Dichte und Feuchte, Faserstruktur, Verformungszustand und Belastungsgeschwindigkeit sind maßgebliche Faktoren, die den Elastizitätsmodul beeinflussen, währenddessen das Flächenträgheitsmoment nur von der Schichtgeometrie des Materials nach ihrer Verformung abhängt. Mit Kenntnis dieser Einflüsse lassen sich dann unter Abspaltung der Steifigkeitsverluste und der irreversiblen Verformungsanteile der sogenannte effektive Elastizitätsmodul und das sogenannte effektive Flächenträgheitsmoment ermitteln. Die Bezeichnung „effektiv“ soll in diesem Zusammenhang die nutzbaren Eigenschaften des Materials für die Biegesteifigkeit des Kartons verdeutlichen.

Zur analytischen Bestimmung der Biegesteifigkeit bei unsymmetrischem mehrschichtigen Blattaufbau wird zunächst die Beziehung für die breitenbezogene Biegesteifigkeit auf mehrschichtige Materialien erweitert. Mit Hilfe einer Variation der stoff- und schichtspezifischen Parameter lassen sich die Optimierungsmöglichkeiten beim Blattaufbau aufdecken.

Zur mathematischen Beschreibung des Werkstoffverhaltens von Karton werden die entkoppelbaren Materialgesetze für die Blattebene von Paetow /2/ und in Dickenrichtung von van Haag /4/ herangezogen und in die Finite-Elemente-Methode eingebunden. Auf dieser Basis entsteht für den Werkstoff Karton ein Materialmodell,

mit dem man realitätsgetreu einzelne Verarbeitungsschritte simulieren kann.

Als Grundlage und zur Verifikation der Simulationsergebnisse werden an Kartonproben einerseits elementare Zug- und Druckversuche mit dem Ziel durchgeführt, die Materialparameter der untersuchten Kartonproben zu bestimmen und sie für die Anwendung der FEM bereitzustellen und andererseits die Biegesteifigkeiten der Kartonsorten nach dem Zwei-Punkt-Verfahren experimentell ermittelt.

Für die grundlegende Untersuchung des Biegesteifigkeitsverhaltens und des Kraft-Verformungsverhaltens wird das Materialverhalten unter einmaliger und zyklischer Belastung analysiert, wobei alle auftretenden reversiblen (elastische und viskoelastische) und irreversiblen (plastische und viskoplastische) Verformungsanteile sowohl für die Blattebene als auch für die Dickenrichtung ermittelt werden. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen wird einerseits die Gewichtung der Einflussparameter auf das Biegesteifigkeitsverhalten ermittelt und andererseits werden sogenannte „sortenabhängige Referenzkurven“ abgeleitet, in denen die auftretenden Biegesteifigkeitsverluste nach Belastungsart aufgeteilt werden. Hierbei handelt es sich einerseits um die nach einer Zugbelastung auftretenden Biegesteifigkeitsverluste aufgrund eines E-Modul-Verlustes und andererseits um die nach einer Druckbelastung auftretenden Biegesteifigkeitsverluste aufgrund eines Blattdicken-Verlustes.

Auf Basis dieser Voruntersuchungen zum grundlegenden Biegesteifigkeitsverhalten von Karton folgt die weiterführende Untersuchung der Biegesteifigkeitsverluste, verursacht durch die Belastungszustände der verschiedenen Verarbeitungsprozesse. Die Analyse erfolgt differenziert nach Belastungsart, Belastungsgröße und Belastungsgeschwindigkeit des jeweiligen Verarbeitungsprozesses. Hier werden ebenfalls realitätsnahe Simulationsrechnungen mittels FEM eingesetzt, die abschnittsweise die Beanspruchungszustände des Kartons unter Variation der zuvor festgelegten Sorten ermitteln. Durch den Abgleich der berechneten Beanspruchungszustände der einzelnen Verarbeitungsprozesse mit den sortenabhängigen Referenzkurven für die Biegesteifigkeitsverluste ist es möglich, die Biegesteifigkeitsverluste zu quantifizieren.

Die in den vorhergehenden Arbeitsschritten erzielten Untersuchungsergebnisse liefern Aufschluss über mögliche Optimierungsmaßnahmen für den Blattaufbau und die zu durchlaufenden Verarbeitungsprozesse. Die Optimierung des Materialverhaltens erfolgt analog zur Optimierung der Steifigkeit mehrschichtiger Druck- und Administrationspapiere in Anlehnung an /15/. Die hier vorgeschlagenen Maßnahmen führen, bei einer vorgegebenen (geforderten) Grammat, über die Festlegung des Stoffeinsatzes und des Schichtaufbaus für Karton, zu einem maximalen effektiven Elastizitätsmodul und maximalen effektiven Flächenträgheitsmoment. Um die Verarbeitungsprozesse zu optimieren, müssen alle Abschnitte untersucht werden und individuelle konstruktive oder konfigurative Optimierungspotenziale erkannt werden, um Biegesteifigkeitsverluste und irreversible plastische Verformungen der Kartonbahn gering zu halten.

### 3 Grundlagen zu den durchgeführten Untersuchungen

#### 3.1 Theoretische Grundlagen

Das reale Werkstoffverhalten von Karton kann mit einfachen Modellen nicht beschrieben werden. Karton ist ein flächiges, mehrlagiges Material, das hinsichtlich der flächenbezogenen Masse ( $150 \text{ g/m}^2$  bis  $600 \text{ g/m}^2$ ) sowohl in das Gebiet der Papiere als auch in das Gebiet der Pappe hineinreicht. Es ist steifer als Papier und wird im Allgemeinen aus hochwertigeren Stoffen als Pappe hergestellt /1/.

Karton kann als ein mehrschichtiges, dreidimensionales Fasernetzwerk angesehen werden, in dem die einzelnen Fasern regellos angeordnet sind. Durch diese Uneinheitlichkeit des Faseraufbaus erhält man eine starke Inhomogenität, die die Festigkeitseigenschaften und vor allem das Dehnungsverhalten stark beeinflusst. Das Material zeigt bei Belastung anisotropes Spannungs-Dehnungs-Verhalten.

Zur Verdeutlichung der nachfolgenden Ausführungen werden diese jeweils beispielhaft durch die für dieses Projekt ausgewählte Referenzkartonsorte: GC-2,  $300 \text{ g/m}^2$ ; Hersteller 1 (vgl. Tabelle 4-1) belegt.

##### 3.1.1 Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Karton

In Maschinenlaufrichtung (MD-Richtung) und in Querrichtung dazu (CD-Richtung) weist Karton einen degressiven Zusammenhang zwischen einer aufgetragenen Belastung und der dadurch auftretenden Verformung auf (Abbildung 3-1).

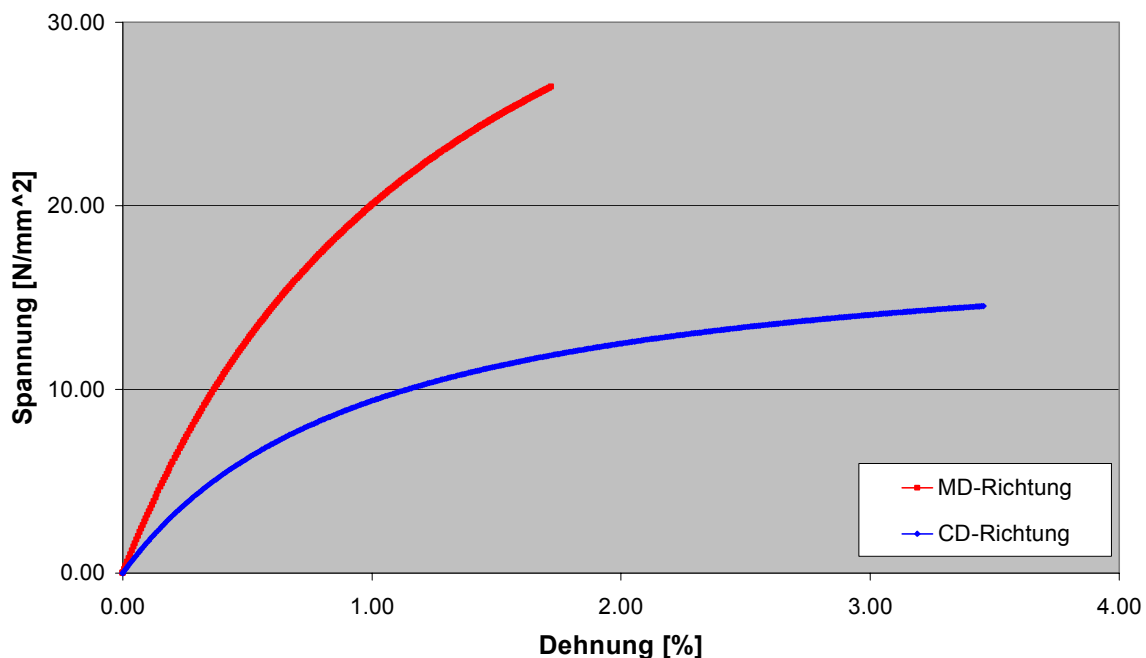


Abbildung 3-1 Spannungs-Dehnungs-Verhalten in MD- und CD-Richtung für die Referenzkartonsorte

Grundlage dieses Zusammenhangs ist das zweidimensionale Werkstoffgesetz von Paetow [2], das das nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Papier in der Blattebene (MD-CD - Ebene) beschreibt und hier auf die Betrachtungen zum mehrschichtigen Karton übertragen wird.

Paetow stellt aus den im Zugversuch experimentell erfassten Dehnungsverläufen von Papier ein eindimensionales Nachgiebigkeitsmodell (2) auf.

$$\sigma = E_{ini} \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{E_{ini}}{S} \cdot \varepsilon} \right) \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Dieses eindimensionale nichtlineare Werkstoffgesetz wird durch die beiden Werkstoffparameter initialer Elastizitätsmodul  $E_{ini}$  und Grenzspannung  $S$  beschrieben, deren Definition in der folgenden Abbildung gezeigt wird.

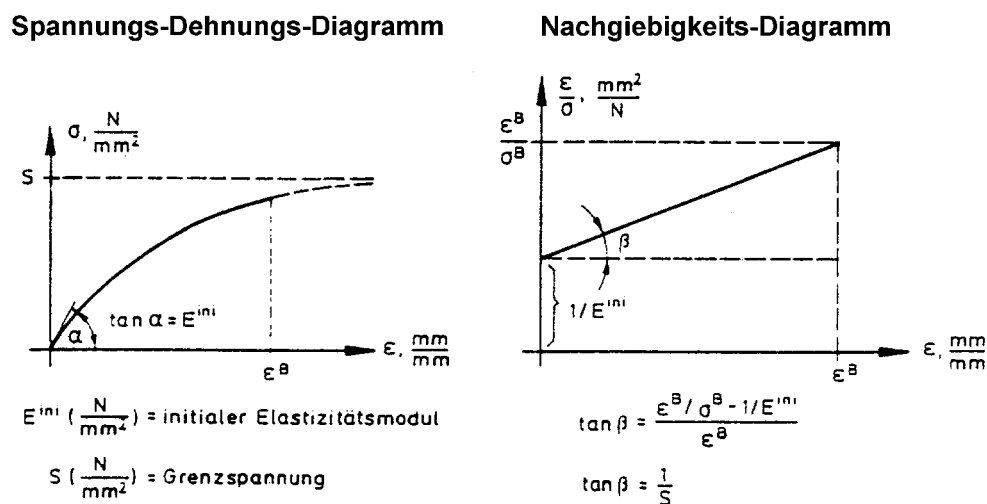


Abbildung 3-2 Werkstoffverhalten von Papier bei Zugbeanspruchung nach Paetow

Demnach handelt es sich bei dem initialen Elastizitätsmodul um die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve im Ursprung der Belastung, also dem Zustand initialer Steifigkeit des Werkstoffs vor einer Belastung. Die Grenzspannung wird durch eine Grenzwertbetrachtung ermittelt und ist die Spannung, die sich einstellen würde, wenn sich Papier unendlich dehnen ließe. Paetow bestimmt diese Größen aus dem Nachgiebigkeits-Diagramm durch eine lineare Regression im Bereich zwischen 10 – 100 % der Gesamtdehnung, gemäß Abbildung 3-2. Das Besondere am Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve im Nachgiebigkeits-Diagramm ist, dass zwischen der Nachgiebigkeit  $\varepsilon/\sigma$  und der Dehnung  $\varepsilon$  ein linearer Zusammenhang für Papier existiert. Dabei ist die Größe des Achsenabschnittes der Nachgiebigkeitsachse gleich dem reziproken Wert des initialen Elastizitätsmoduls und der Regressionskoeffizient des Nachgiebigkeitsdiagramms entspricht dem reziproken Wert der Grenzspannung. Mit Hilfe dieser beiden werkstoffspezifischen Größen lässt sich das Werkstoffgesetz (2) in die Form (3) überführen.

$$\sigma = L_{Paetow} \cdot NL_{Paetow} \cdot \varepsilon$$

mit  $L_{Paetow} = E_{ini}$  und  $NL_{Paetow} = \left( \frac{1}{1 + \frac{E_{ini}}{S} \cdot \varepsilon} \right)$  (3)

In dieser Beziehung wird deutlich, dass der initiale Elastizitätsmodul ( $L$ -Term) das lineare Werkstoffverhalten wiedergibt und durch die Kombination mit der Versagensgröße Grenzspannung das nichtlineare Verhalten durch den  $NL$ -Term beschreibt. Paetow erweiterte diese Überlegungen aus dem eindimensionalen Zugversuch auf ein zweidimensionales Nachgiebigkeitsmodell und bestätigte dieses anhand von Laborversuchen.

In Dickenrichtung (ZD-Richtung) weist Karton einen progressiven Zusammenhang zwischen einer aufgetragenen Belastung und der dadurch auftretenden Kompression auf (Abbildung 3-3).

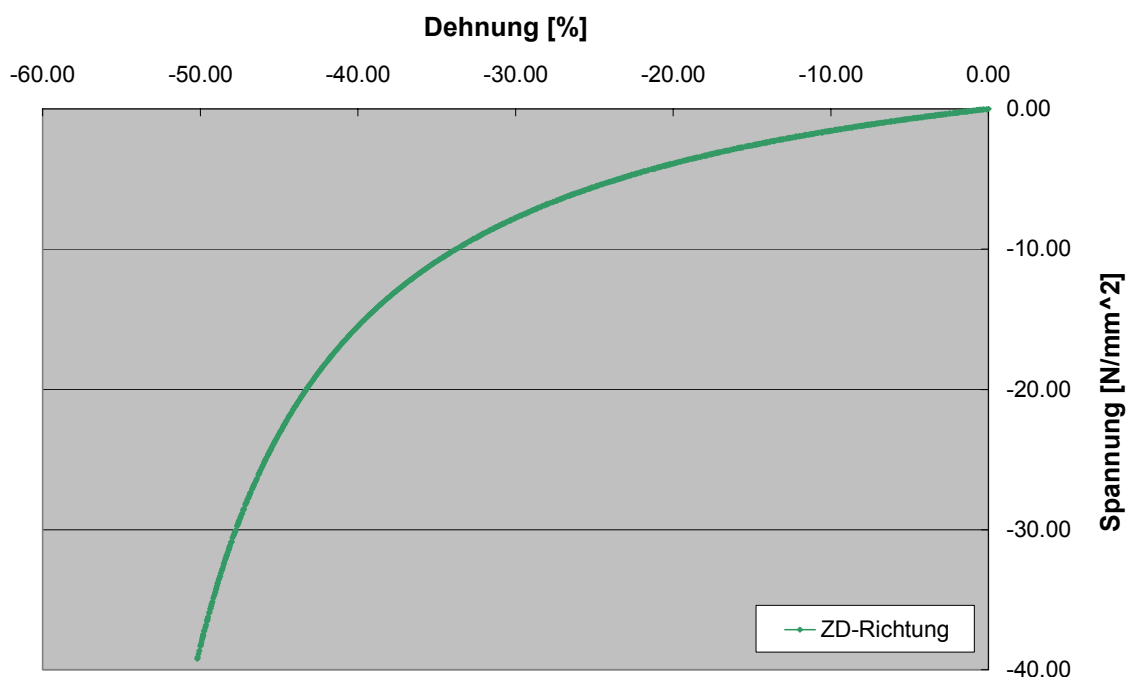


Abbildung 3-3 Spannungs-Dehnungs-Verhalten in ZD-Richtung für die Referenzkartonsorte

Die Dickenrichtung von Papier ist hinsichtlich ihrer werkstoffmechanischen Modellierung die bisher am wenigsten untersuchte Richtung. Lediglich die Arbeiten von Pfeiffer /3/ und van Haag /4/ sind hier zu erwähnen, die für ausgewählte Anwendungsfälle für Papier eindimensionale Werkstoffgesetze herleiten.

Pfeiffer hat bei seinen Überlegungen ein eindimensionales Werkstoffgesetz für die Dickenrichtung hergeleitet, das auf einer Exponentialfunktion basiert und das Verformungsverhalten von Papier unter Druckbelastung beschreibt. Dieses

Werkstoffgesetz (4) wurde durch rein mathematische Analysen hergeleitet, um den physikalischen Zusammenhang berechenbar zu machen.

$$\sigma = K_1 \cdot (1 - e^{-K_2 \cdot \varepsilon}) \quad (4)$$

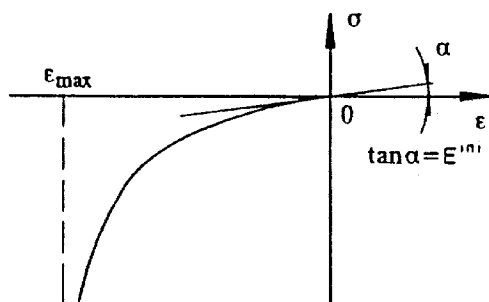
Die beiden Koeffizienten  $K_1$  und  $K_2$  bestimmen den exponentiellen und damit nichtlinearen Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve und werden für jeden Werkstoff durch Analyse experimentell ermittelter Spannungs-Dehnungs-Kurven angepasst. Dieses Werkstoffgesetz beschreibt das Materialverhalten für den Bereich geringer Belastungen (unter 1 N/mm<sup>2</sup>) bis hin zu typischen Belastungen beim Kalandrieren in sehr guter Übereinstimmung mit dem realen Verhalten von Papier.

Das Werkstoffgesetz von van Haag lehnt sich an das Nachgiebigkeitsmodell von Paetow an und wird ebenfalls über die Nachgiebigkeitsbeziehung hergeleitet. Auch hier findet man die Beschreibung des Werkstoffverhaltens in einem Linearitäts- und einem Nichtlinearitätsterm vor (5).

$$\sigma = E_{\text{ini}} \cdot \left( \frac{1}{1 - \frac{1}{\varepsilon_{\text{max}}} \cdot \varepsilon} \right) \cdot \varepsilon \quad (5)$$

Die Linearität des Werkstoffverhaltens wird auch bei van Haag über den initialen Elastizitätsmodul beschrieben, jedoch wird hier der Nichtlinearitätsterm über die maximale Grenzdehnung  $\varepsilon_{\text{max}}$  beschrieben. Also handelt es sich hier um die Dehnung, bei der die Steifigkeit des Papiers auf unendlich große Werte anwächst bzw. die Nachgiebigkeit einen minimalen Extremwert annimmt. Dieser Zusammenhang ist dem Nachgiebigkeitsdiagramm (Abbildung 3-4) zu entnehmen, ebenso die Analogie zum Nachgiebigkeitsmodell von Paetow, bei dem der Achsenabschnitt der Nachgiebigkeit den reziproken Wert des initialen Elastizitätsmoduls kennzeichnet.

**Spannungs-Dehnungs-Diagramm**



**Nachgiebigkeits-Diagramm**

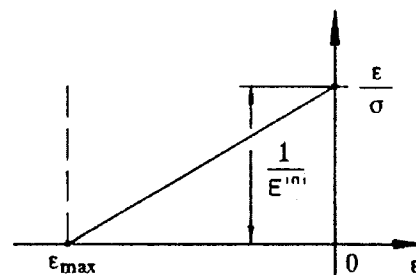


Abbildung 3-4 Werkstoffverhalten von Papier bei Druckbeanspruchung nach van Haag

Aufgrund der guten Übereinstimmung zwischen dem mathematisch modellierten und dem realen Spannungs-Dehnungs-Verhalten und aufgrund der Analogie zum Paetow-Ansatz wird hier für die weiteren Betrachtungen der Ansatz von van Haag verwendet.

### 3.1.2 Werkstoffgesetz und –kennwerte für Karton

Für die theoretischen Untersuchungen wurde ergänzend ein nichtlineares dreidimensionales Werkstoffgesetz zur vollständigen Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von Karton aufgestellt. Es lautet:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = L \cdot NL \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix}$$

mit

$$L = \begin{pmatrix} E_{11} \frac{1-\nu_{23}\nu_{32}}{X} & E_{11} \frac{\nu_{21}+\nu_{23}\nu_{31}}{X} & E_{11} \frac{\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}}{X} & 0 & 0 & 0 \\ & E_{22} \frac{1-\nu_{13}\nu_{31}}{X} & E_{22} \frac{\nu_{32}+\nu_{12}\nu_{31}}{X} & 0 & 0 & 0 \\ & & E_{33} \frac{1-\nu_{12}\nu_{21}}{X} & 0 & 0 & 0 \\ & S & & G_{23} & 0 & 0 \\ & & Y & & G_{13} & 0 \\ & & & M & & G_{12} \end{pmatrix}$$

mit

$$X = 1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{13}\nu_{31} - \nu_{23}\nu_{32} - 2\nu_{13}\nu_{21}\nu_{32}$$

und

$$NL = \begin{pmatrix} \frac{1}{1 + \frac{E_{11}^{ini}}{S_{11}^{Grenz}} \cdot \varepsilon_{11}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1 + \frac{E_{22}^{ini}}{S_{22}^{Grenz}} \cdot \varepsilon_{22}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1 - \frac{1}{\varepsilon_{33}^{Grenz}} \cdot \varepsilon_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

In diesem dreidimensionalen Werkstoffgesetz sind das zweidimensionale von Paetow und das eindimensionale von van Haag integriert. Für die Anwendung dieses dreidimensionalen Werkstoffgesetzes werden Konstanten für die 9 richtungsgebundenen Werkstoffkennwerte: die Elastizitätsmoduli  $E_{ij}$ , Querkontraktionszahlen  $\nu_{ij}$  und Gleitmoduli  $G_{ij}$  benötigt. Ausführliche Zahlenangaben dieser Werkstoffkonstanten liegen bis heute nicht vollständig vor. Lediglich in /8/ sind Zahlenangaben für alle 9 orthotropen Werkstoffkonstanten einer Kartonsorte zu finden:

|                   | $E_{MD-MD}$          | $E_{CD-CD}$          | $E_{ZD-ZD}$          | $\nu_{CD-ZD}$ | $\nu_{MD-ZD}$ | $\nu_{MD-CD}$ | $G_{CD-ZD}$          | $G_{MD-ZD}$          | $G_{MD-CD}$          |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                   | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |               |               |               | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Verpackungskarton | 7440                 | 3470                 | 39                   | 0.021         | 0.008         | 0.15          | 99                   | 137                  | 2040                 |

Tabelle 3-1 Orthotrope Werkstoffkennwerte eines Verpackungskartons

In /2/ und /10/ sind für einzelne Papiersorten Zahlenangaben zu den Kennwerten: Elastizitätsmodul, Gleitmodul und Querkontraktionszahl der MD- und CD- Richtung zu finden, für die ZD-Richtung in /4/ und /7/. Für die Bestimmung der in diesem Projekt erforderlichen Kennwerte wurden eigene Messungen durchgeführt. Basierend auf diesen Messungen erfolgte die Ermittlung der richtungsabhängigen Werkstoffkennwerte für die numerischen Berechnungen nach dem Nachgiebigkeitsansatz von Paetow bzw. van Haag. Dieses Auswerteverfahren ermittelt sowohl den Steifigkeitskennwert Elastizitätsmodul als auch den Versagenskennwert Grenzspannung in MD-Richtung bzw. Grenzdehnung in ZD-Richtung. Der so bestimmte Elastizitätsmodul weicht um ca. 10 % vom initialen Elastizitätsmodul ab, jedoch zeigt die Berechnung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens auf Basis dieser Kennwertekombination eine gute Übereinstimmung mit dem experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Verhalten (siehe Kapitel 3.2.1). Für die exakte Bestimmung des richtungsabhängigen initialen Elastizitätsmoduls zur experimentellen Ermittlung der Biegesteifigkeitsverluste (Kapitel 4, Anhang 1.3 und 1.4) wird eine lineare Interpolation im initialen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve durchgeführt.

Nachfolgend sind beispielhaft die Kennwerte der Referenzkartonsorte für den Verbund und für die Laborblätter aufgelistet.

| $E_{MD-MD}^{ini}$    | $E_{CD-CD}^{ini}$    | $E_{ZD-ZD}^{ini}$    | $s_{MD-MD}^{Bruch}$  | $s_{CD-CD}^{Bruch}$  | $s_{ZD-ZD}^{Bruch}$  | $\varepsilon_{MD-MD}^{Bruch}$ | $\varepsilon_{CD-CD}^{Bruch}$ | $\varepsilon_{ZD-ZD}^{Bruch}$ |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] | [%]                           | [%]                           | [%]                           |
| 3456,56              | 1878,33              | 13                   | 25,63                | 14,67                | - 39,21              | 1,7                           | 3,59                          | - 50,1                        |

Tabelle 3-2 "Verschmierte" Werkstoffkennwerte der untersuchten Referenzkartonsorte

Es handelt sich hierbei um die Kennwerte für das Materialverhalten als Einschichtverbund, den sogenannten "verschmierten" Kennwerten. Als Grundlage für die Untersuchung des mehrschichtigen Werkstoffverhaltens wurden die Kennwerte über Laborblätter der einzelnen Schichten der Referenzkartonsorte bestimmt. Es ergaben sich folgende Kennwerte:

| Referenzkartonsorte | $E_{MD-MD}^{ini}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $E_{ZD-ZD}^{ini}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $S_{MD-MD}^{Bruch}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\varepsilon_{ZD-ZD}^{Bruch}$<br>[%] |
|---------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| Deckschicht         | 5219,43                                   | 14,22                                     | 38,93                                       | -53,65                               |
| Mittellage          | 1853,60                                   | 6,47                                      | 12,33                                       | -77,94                               |
| Rücken              | 4671,61                                   | 16,03                                     | 33,88                                       | -55,19                               |

Tabelle 3-3 Werkstoffkennwerte von Laborblättern der Einzelschichten der Referenzkartonsorte

### 3.1.3 Verformungsverhalten von Karton

Bei dem Durchlauf einer Kartonbahn durch die unterschiedlichen Herstellungs- oder Verarbeitungsprozesse wird die Kartonbahn unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt. Hierbei zeigt der Werkstoff Karton ein nichtlineares, zeitabhängiges Verformungsverhalten auf. Dieses kann qualitativ in elastische, viskoelastische, plastische und viskoplastische Dehnungsanteile aufgeteilt werden (Abbildung 3-5).

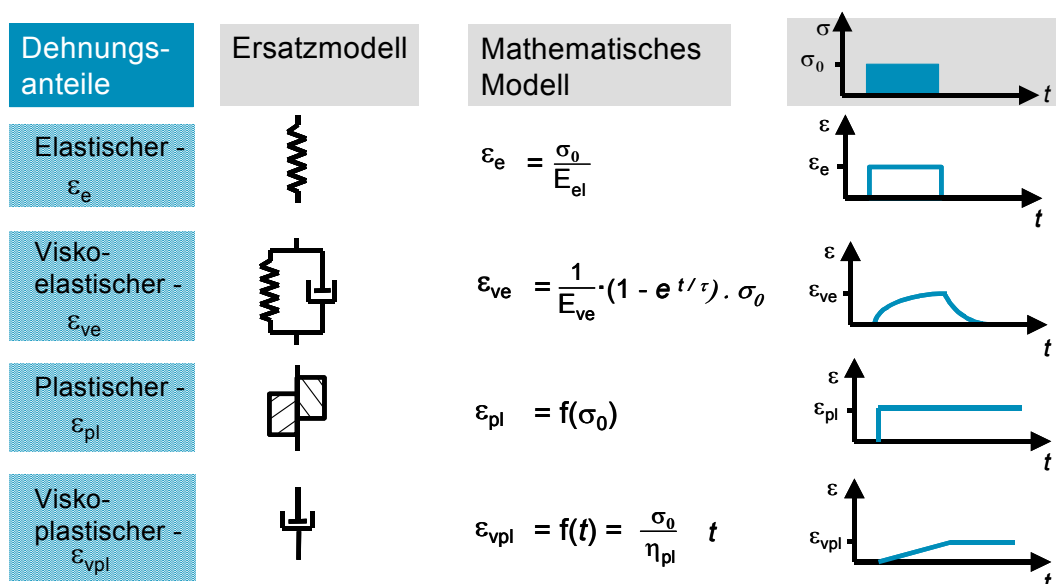


Abbildung 3-5 Dehnungsanteile von Karton

Die Dehnungsanteile, die sich nach einer erfolgten Belastung zurückverformen, werden als reversibel oder elastisch bezeichnet. Bei dem elastischen Dehnungsanteil  $\varepsilon_e$  handelt es sich um einen reversiblen Anteil, der in einem linearen Zusammenhang mit der einwirkenden Belastung  $\sigma_0$  (rechte Spalte Abbildung 3-5) steht. Papier und damit auch Karton weisen einen sehr geringen linear-elastischen Dehnungsanteil auf. Je nach betrachteter Richtung treten bis zu ca. 0.2 % der Gesamtdehnung als linear-elastische Dehnung auf (/5/ und /9/). Dieser Dehnungsanteil wird zur Bestimmung des richtungsabhängigen initialen Elastizitätsmoduls  $E_{ini}$  des Werkstoffes herangezogen (Abbildung 3-6). Ergänzend tritt ein nichtlinear-elastischer Dehnungsanteil auf, der in aller Regel größer als der linear-elastische ist. Beide zusammen ergeben das reversible Dehnungsmaß  $\varepsilon_e$ .

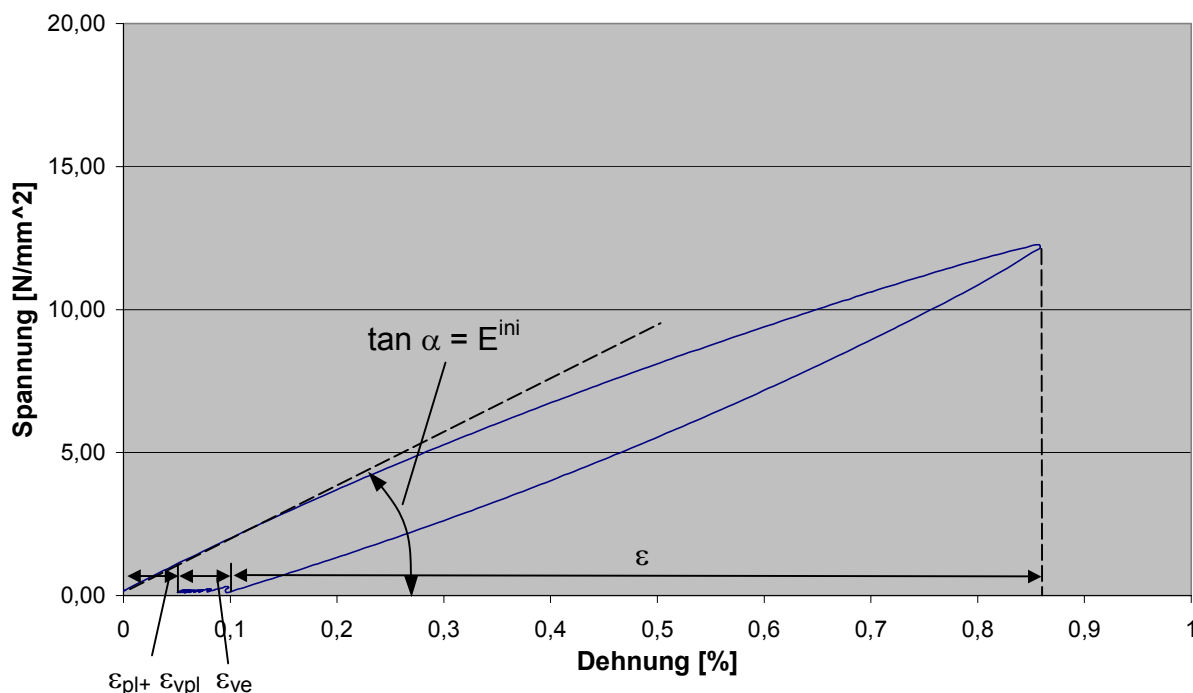


Abbildung 3-6 Kennzeichnende Verformungsgrößen für die Referenzkartonsorte (hier MD-Richtung)

Der sich unter Belastung einstellende viskoelastische Dehnungsanteil  $\varepsilon_{ve}$  ist ebenfalls ein reversibler Anteil (Abbildung 3-6). Im Gegensatz zur Elastizität ist die Viskoelastizität eine zeitabhängige Erscheinungsform des Verformungsverhaltens. Der Zusammenhang zwischen der sich bei Belastung einstellenden und bei Entlastung rückverformenden viskoelastischen Dehnung und der Zeit hat einen nichtlinearen Charakter (rechte Spalte Abbildung 3-5). Die Zeit, die der Werkstoff bis zur vollständigen Rückbildung der viskoelastischen Dehnungsanteile benötigt, wird Erholungszeit genannt. Experimentelle Untersuchungen zum viskoelastischen Dehnungsanteil sind in /2/, /11/, /12/ und /13/ zu finden.

Der plastische Dehnungsanteil  $\varepsilon_{pl}$  ist zeitunabhängig und beschreibt das Maß einer bleibenden Dehnung (Abbildung 3-6). Dieser Dehnungsanteil tritt erst ab einem gewissen Belastungsniveau auf, der in der Werkstoffmechanik als Fließgrenze bezeichnet wird. Bei Papier und damit auch Karton ist der Übergang von den elastischen Dehnungsanteilen zu den plastischen fließend, d.h. eine Fließgrenze kann nicht festgelegt werden /2/.

Der viskoplastische Dehnungsanteil  $\varepsilon_{vp}$  stellt einen weiteren irreversiblen Dehnungsanteil dar. Mit zunehmender Belastungszeit nimmt diese viskoplastische Dehnung zu und verbleibt nach Entlastung als plastischer Dehnungsanteil.

Zusätzlich zum Elastizitätsmodul können anhand quasistatischer Versuche weitere Kennwerte des Verformungsverhaltens bestimmt werden, wie z.B. die Bruchkraft  $F_{Bruch}$  oder die Bruchdehnung  $\varepsilon_{Bruch}$  (Abbildung 3-7).

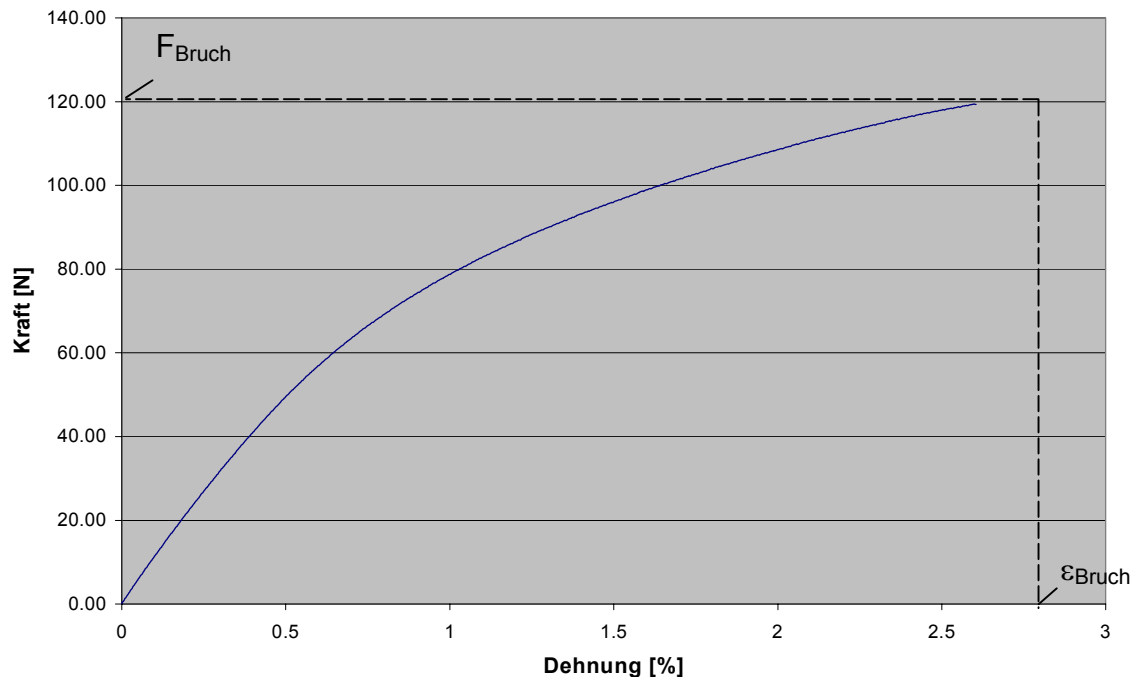


Abbildung 3-7 Bestimmung der richtungsabhängigen Bruchkraft und Bruchdehnung für die Referenzkartonsorte, hier MD-Richtung

### 3.1.4 Biegesteifigkeitsverhalten von Karton

Betrachtet man einen homogenen Körper mit Rechteckquerschnitt, der an seinen beiden freien Enden nur durch ein Biegemoment  $M_b$  belastet wird, so stellt sich über seine Länge ein konstantes Biegemoment und über seinen Querschnitt ein linearer Verlauf der Biegespannungen bei linear-elastischer Verformung ein (Abbildung 3-8).

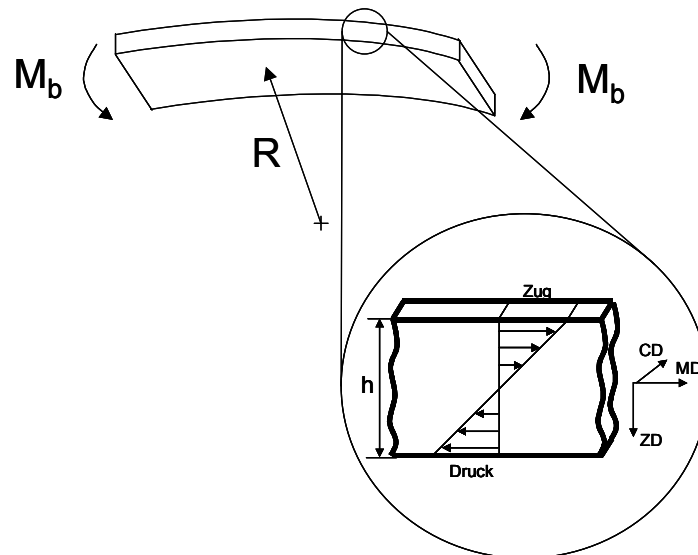


Abbildung 3-8 Homogener Körper mit Rechteckquerschnitt unter Biegebelastung

Die Biegesteifigkeit  $S_b$  wird definiert als Produkt aus dem Biegemoment  $M_b$  und dem sich nach Belastung einstellenden Krümmungsradius  $R$  der Probe am betrachteten Querschnitt /6/. Mit der Integration der Spannungen über der Höhe  $h$  des betrachteten Querschnittes und der Spannungs-Dehnungs-Beziehung im elastischen Verformungsbereich an der betrachteten Stelle ergibt sich die allgemeine Formel für die Biegesteifigkeit pro Querschnittsbreite zu:

$$S_b = \frac{E \cdot I}{b} \quad (6)$$

Anhand dieser Formel ist zu erkennen, dass die Biegesteifigkeit einerseits von dem Elastizitätsmodul  $E$ , also von der Steifigkeit des Werkstoffes in der Probenebene, und andererseits von dem Flächenträgheitsmoment  $I$  und der Probenbreite  $b$ , also der Geometrie der Probe abhängig ist.

Spezialisiert man die Formel zur Bestimmung der allgemeinen Biegesteifigkeit auf einen rechteckigen Querschnitt, so ergibt sich mit dessen Flächenträgheitsmoment  $I$ :

$$S_b = \frac{E \cdot h^3}{12} \quad (7)$$

Mit Hilfe dieser Beziehung lässt sich die Biegesteifigkeit einer homogenen Probe bei bekanntem Elastizitätsmodul und bekannter Geometrie berechnen. Da es sich bei Karton um einen Mehrschichtverbund handelt, muss diese Beziehung differenzierter betrachtet werden. Eine Beziehung zur Berechnung der Biegesteifigkeit von Karton aus den Steifigkeiten der einzelnen Schichten wurde von Fellers und Carlsson /6/ hergeleitet. Diese Beziehung kann bei bekannten Schichtabmessungen und Schichtsteifigkeiten angewendet werden. Die Kenntnis der Lage der neutralen Fläche ist für diese Beziehung nicht notwendig.

Sie lautet breitebezogen:

$$S_b = D - \frac{B^2}{A} \quad (8)$$

mit 
$$A = \sum_{i=1}^k E_i (z_i - z_{i-1}); \quad B = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^k E_i (z_i^2 - z_{i-1}^2); \quad D = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^k E_i (z_i^3 - z_{i-1}^3)$$

und 
$$z_0 = -\frac{h}{2} \quad \text{für } i = 0 \quad \text{und} \\ z_i = z_{i-1} + h_i \quad \text{für } i = 1, 2, \dots, k$$

wobei  $E_i$  = Elastizitätsmodul der Schicht i  
 $h_i$  = Dicke der Schicht i  
 $z_i$  = Abstand der Schicht i von der Mittellinie des betrachteten Querschnittes  
 $k$  = Anzahl der Schichten

Anhand des Aufbaus dieser Beziehung wird deutlich, dass die Biegesteifigkeit bei symmetrischem Schichtaufbau (Term B ist für den symmetrischen Aufbau gleich Null) einen maximalen Wert für die Biegesteifigkeit liefert. Will man zusätzlich zum rein geometrischen Schichtaufbau auch den Einfluss der Stoffzusammensetzung auf die Biegesteifigkeit untersuchen, so muss diese Beziehung durch den Einfluss der Rohdichte und der Massenanteile der einzelnen Schichten für mehrschichtigen Blattaufbau erweitert werden. Für den symmetrischen Schichtaufbau liegen diese Ergebnisse in /15/ vor. Für den hier zu untersuchenden Fall des nichtsymmetrischen Schichtaufbaus werden nachfolgend diese Beziehungen in Abhängigkeit der Stoffzusammensetzung und des Schichtaufbaus hergeleitet.

Die Grundlage für diese Untersuchungen bildet die Beziehung (8) zur Berechnung der Biegesteifigkeit bei mehrschichtigem, unsymmetrischem Blattaufbau. Die zur Berechnung der Biegesteifigkeit dieses Kartonverbundes notwendigen Steifigkeits- und Geometrieparameter sind in der folgenden Abbildung zusammengefasst, wobei die Indexbenennungen DS = Deckschicht, MS = Mittelschicht und R = Rücken eingeführt werden.

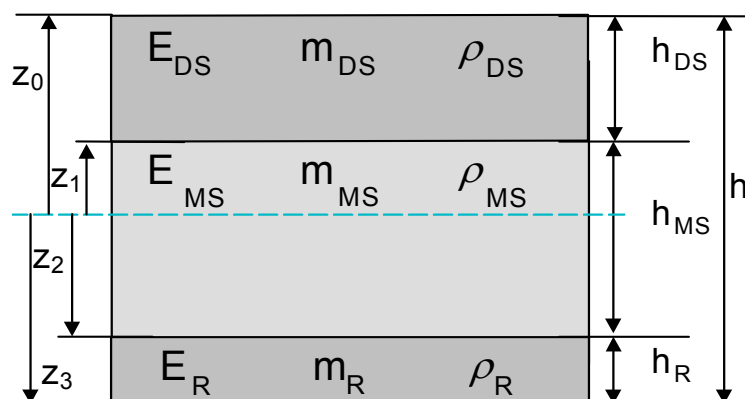


Abbildung 3-9 Steifigkeits- und Geometrieparameter eines dreischichtigen unsymmetrischen Kartonverbundes

In der Anwendung der Beziehung (8) lassen sich die Abstände  $z_i$  wie folgt bestimmen:

$$\begin{aligned}
z_0 &= -\frac{h}{2}; \\
z_1 &= -\frac{h}{2} + h_{DS}; \\
z_2 &= -\frac{h}{2} + h_{DS} + h_{MS} \quad \text{und} \\
z_3 &= -\frac{h}{2} + h_{DS} + h_{MS} + h_R
\end{aligned} \tag{9}$$

Koppelt man diese geometrischen Beziehungen mit den Steifigkeitseigenschaften  $E_i$  der einzelnen Schichten, so lassen sich die Ausdrücke A, B und D der Beziehung (8) wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned}
A &= E_{DS} \cdot h_{DS} + E_{MS} \cdot h_{MS} + E_R \cdot h_R; \\
B &= \frac{1}{2} \cdot [E_{DS} \cdot h_{DS} \cdot (-h + h_{DS}) + E_{MS} \cdot h_{MS} \cdot (-h + 2 \cdot h_{DS} + h_{MS}) + \\
&\quad E_R \cdot h_R \cdot (-h + 2 \cdot h_{DS} + 2 \cdot h_{MS} + h_R)] \quad \text{und} \\
D &= \frac{1}{3} \cdot \left\{ E_{DS} \cdot \left[ \frac{h^3}{8} + \left( -\frac{h}{2} + h_{DS} \right)^3 \right] + E_{MS} \cdot \left[ -\left( -\frac{h}{2} + h_{DS} \right)^3 + \left( -\frac{h}{2} + h_{DS} + h_{MS} \right)^3 \right] + \right. \\
&\quad \left. E_R \cdot \left[ -\left( -\frac{h}{2} + h_{DS} + h_{MS} \right)^3 + \left( -\frac{h}{2} + h_{DS} + h_{MS} + h_R \right)^3 \right] \right\}
\end{aligned} \tag{10}$$

Fasst man die Ausdrücke A, B und D nach (10) zusammen, so lässt sich die Biegesteifigkeit bei bekannten Steifigkeits- und Geometrieparameter berechnen. Anhand der Ausdrücke A, B und D erkennt man, dass der Elastizitätsmodul jeder Schicht proportional und die Dicke jeder Schicht mit der dritten Potenz die Biegesteifigkeit beeinflussen.

Um den Einfluss der Stoffzusammensetzung auf die Biegesteifigkeit dieses dreischichtigen, unsymmetrischen Kartonverbundes zu untersuchen, werden die relativen Massenanteile von Deck- ( $f_{DS}$ ) und Mittelschicht ( $f_{MS}$ ) und Rücken ( $f_R$ ) eingeführt.

$$f_{DS} = \frac{m_{DS}}{m_{Ges}}; \quad f_{MS} = \frac{m_{MS}}{m_{Ges}}; \quad f_R = \frac{m_R}{m_{Ges}} \tag{11}$$

Die flächenbezogene Gesamtmasse des untersuchten Kartonverbundes setzt sich additiv zusammen aus den flächenbezogenen Massen der einzelnen Schichten (12).

$$m_{Ges} = m_{DS} + m_{MS} + m_R \tag{12}$$

Durch die Wahl der flächenbezogenen Massen für die einzelnen Schichten und damit der Faser-Füllstoff-Zusammensetzungen sind auch die partiellen Rohdichten der einzelnen Schichten  $\rho_{DS}$ ,  $\rho_{MS}$  und  $\rho_R$  festgelegt. Zusätzlich wird das Verhältnis der

partiellen Rohdichten  $r$  eingeführt.

$$r = \frac{\rho_{MS}}{\rho_{DS}} \quad (13)$$

Berücksichtigt man die Abhängigkeit der Schichtdicke von der flächenbezogenen Masse und der partiellen Rohdichte der jeweiligen Schicht (14),

$$h_{DS} = \frac{m_{DS}}{\rho_{DS}} ; \quad h_{MS} = \frac{m_{MS}}{\rho_{MS}} \quad \text{und} \quad h_R = \frac{m_R}{\rho_R} \quad (14)$$

so lassen sich die Schichtdicken aus den Ausdrücken A, B und D durch

$$h_{DS} = \frac{f_{DS} \cdot m_{Ges}}{\rho_{DS}} ; \quad h_{MS} = \frac{1 - f_{DS} - f_R}{r \cdot \rho_{DS}} \quad \text{und} \quad h_R = \frac{m_R}{\rho_R} \quad (15)$$

ersetzen. Bei der Betrachtung der Einflussparameter der spezifischen Schichtdicken und damit der Biegesteifigkeit erkennt man, dass bei vorgegebener flächenbezogener Gesamtmasse des Schichtaufbaus und bekannten schichtspezifischen Parametern (partielle Rohdichten und Elastizitätsmodule), die wesentlichen Einflussparameter auf die Biegesteifigkeit die relativen Massenanteile der Aussenschichten (Deckschicht und Rücken) und ihre entsprechenden partiellen Rohdichten sind. Um den Einfluss der erwähnten Außenschichten auf die Biegesteifigkeit zusammenzufassen, werden die relativen Massenanteile der Deckschicht und des Rückens zum relativen Massenanteil der Außenschichten  $f_a$  zusammengefasst:

$$f_a = f_{DS} + f_R \quad (16)$$

Mit diesen Beziehungen lässt sich nun eine Parameterstudie durchführen. In einer ersten Betrachtung werden die Schichtparameter des Rückens konstant gehalten und durch eine Variation der Deckschichtparameter der Einfluss der Stoffzusammensetzung der Außenschichten untersucht. Bei dieser Variation werden die Schichtparameter der Deckschicht und der Mittelschicht variiert, d.h. dass in den Grenzen bei einem relativen Massenanteil der Außenschichten gleich dem relativen konstanten Massenanteil des Rückens ( $f_a = f_R$  und damit  $f_{DS}=0$ ) der Kartonverbund lediglich aus Mittelschicht und Rücken besteht und bei einem relativen Massenanteil der Außenschichten gleich 1 ( $f_a = 1$  und damit  $f_{MS}=0$ ) sich der Kartonverbund lediglich aus Deckschicht und Rücken zusammen setzt.

Für die Größen:

$$\begin{aligned} E_{DS} &= 6456 \text{ N/mm}^2 \\ E_{MS} &= 2292 \text{ N/mm}^2 \\ E_R &= 6456 \text{ N/mm}^2 \\ m_{Ges} &= 300 \text{ g/m}^2 \\ m_R &= 60 \text{ g/m}^2 \\ \rho_{DS} &= 800 \text{ kg/m}^3 \\ \rho_R &= 800 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

ergibt sich in den genannten Grenzen folgender Verlauf der Biegesteifigkeit:

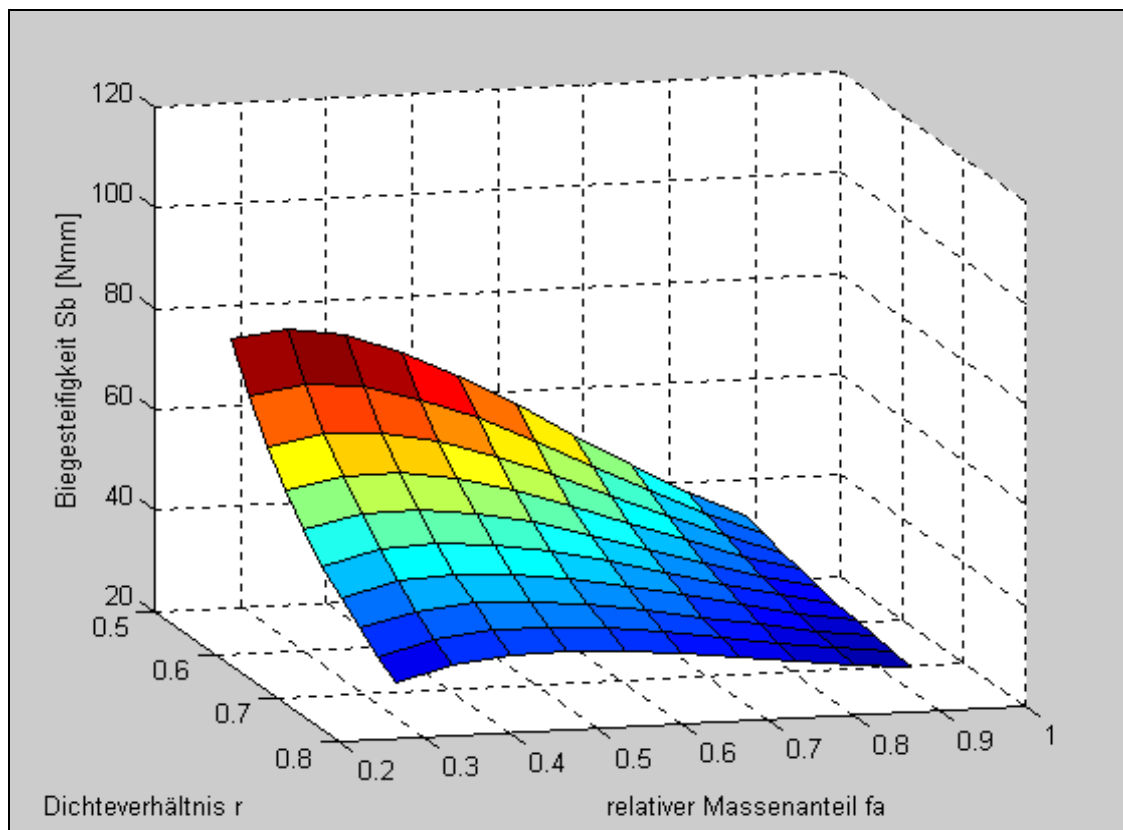


Abbildung 3-10 Biegesteifigkeitsverlauf für einen dreischichtigen unsymmetrischen Mehrschichtverbund mit konstanten Schichtparametern des Rückens (relativer Massenanteil von  $f_r = 20\%$ )

Der berechnete Verlauf der Biegesteifigkeit zeigt deutlich, dass mit abnehmendem Dichteverhältnis und damit mit steigender Dicke der Mittelschicht die Biegesteifigkeit überproportional zunimmt. Es bildet sich ein Bereich maximaler Biegesteifigkeiten in Abhängigkeit der relativen Massenanteile der Außenschichten vom Gesamtverbund aus. Bei einem Dichteverhältnis von  $r = 0.5$  liegt dieser Bereich bei einem relativen Massenanteil von ca. 35 % ( $f_R = 20\%$ ,  $f_{DS} \approx 15\%$ ) und bei einem Dichteverhältnis von  $r = 0.8$  liegt er bei ca. 45 % ( $f_R = 20\%$ ,  $f_{DS} \approx 30\%$ ). Die Ausnutzung dieses Bereiches optimaler relativer Massenanteile bei geringen Dichteverhältnissen zeigt sich als das Optimierungspotenzial hinsichtlich der Biegesteifigkeit bei mehrschichtigen Werkstoffen.

Verändert man nun den geometrischen Schichtaufbau des Rückens durch Steigerung der Dichte der Rückenschicht von  $800 \text{ g/m}^3$  auf  $900 \text{ g/m}^3$  und reduziert damit die Schichtdicke des Rückens um 12 % von  $75 \mu\text{m}$  auf  $66 \mu\text{m}$ , so ergibt sich folgender Biegesteifigkeitsverlauf:

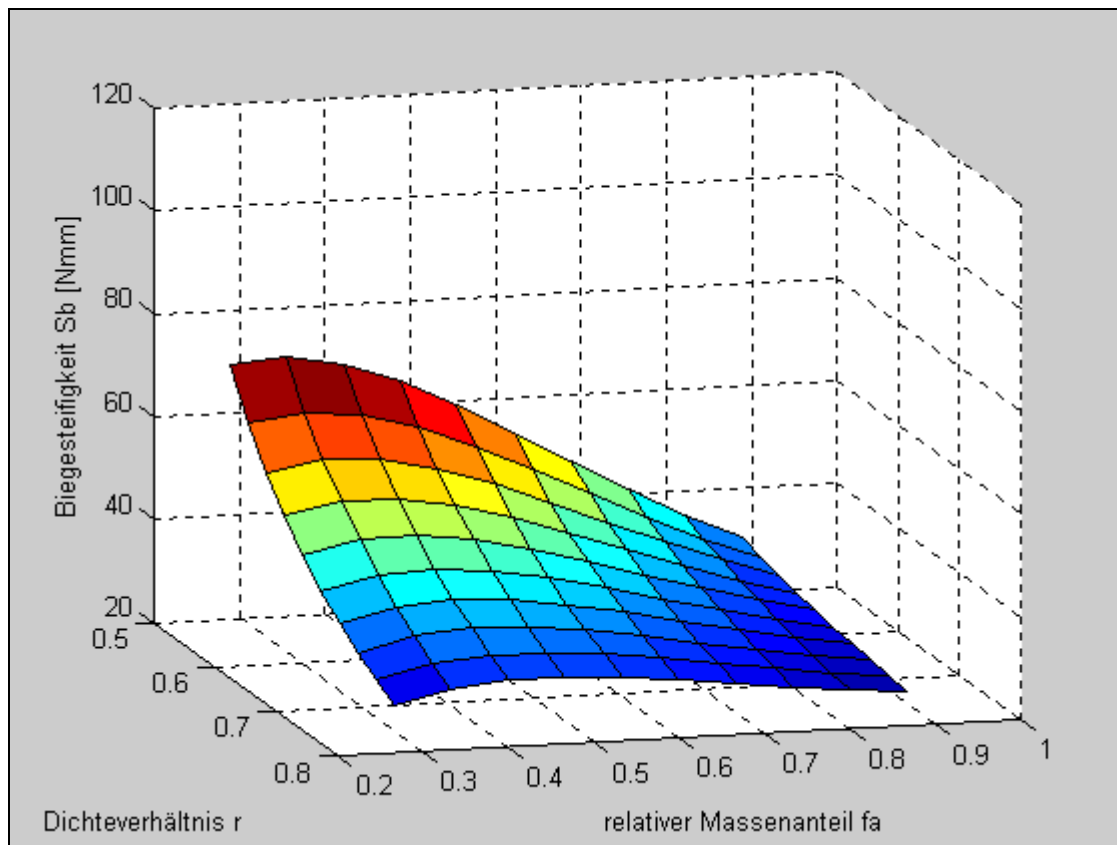


Abbildung 3-11 Biegesteifigkeitsverlauf bei Veränderung der partiellen Rohdichte des Rückens von 800 auf 900 g/m<sup>3</sup>

Der Biegesteifigkeitsverlauf zeigt eine niedrigere Biegesteifigkeit (Abnahme um 6% bei  $r = 0.5$  und 7 % bei  $r = 0.8$ ) bei geringen Rohdichteverhältnissen  $r$ , hervorgerufen durch die mit der Rohdichtezunahme verbundene Schichtdickenreduzierung. Die Bereiche optimaler Massenanteile verändern sich hinsichtlich ihrer Lage auf der Achse der relativen Massenanteile nicht.

In einer weiteren Betrachtung werden die Steifigkeitseigenschaften des Kartonverbundes hinsichtlich ihres Einflusses auf den Biegesteifigkeitsverlauf bei unterschiedlichen Stoffzusammensetzungen untersucht. Verändert man den Elastizitätsmodul der Mittelschicht von  $E_{MS} = 2292 \text{ N/mm}^2$  auf  $E_{MS} = 4000 \text{ N/mm}^2$  bei sonst gleichen Werten, so zeigt sich folgender Biegesteifigkeitsverlauf:

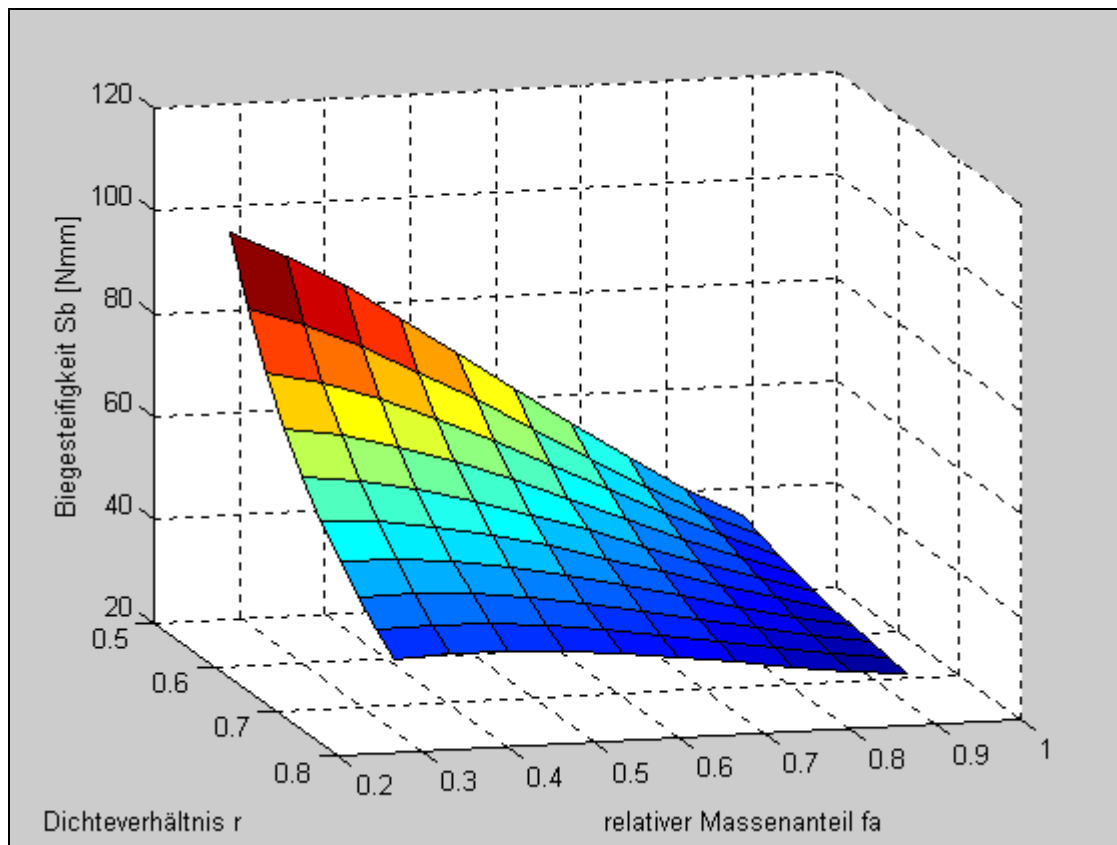


Abbildung 3-12 Biegesteifigkeitsverlauf bei Veränderung des Elastizitätsmoduls der Mittelschicht von 2292 auf 4000 N/mm<sup>2</sup>

Der dargestellte Verlauf zeigt bei abnehmendem Dichteverhältnis und damit mit sinkender spezifischer Rohdichte bzw. mit zunehmender Dicke der Mittelschicht eine Zunahme der maximalen Biegesteifigkeiten. Zusätzlich dazu verschiebt sich auch der Bereich optimaler Massenanteile der Außenschichten für maximale Biegesteifigkeiten. Bei großen Dichteverhältnissen lässt sich eine Steigerung der Biegesteifigkeit nur noch geringfügig über eine Veränderung der relativen Massenanteile der Außenschichten einstellen. Die Steigerung des Elastizitätsmoduls der Mittelschicht bewirkt eine Steigerung der maximalen Biegesteifigkeit von ca. 26 % bei einem Rohdichteverhältnis von  $r = 0.5$ .

Eine Veränderung des Elastizitätsmoduls der Deckschicht bewirkt eine deutliche Ausprägung des Bereiches optimaler Massenanteile für maximale Biegesteifigkeiten.

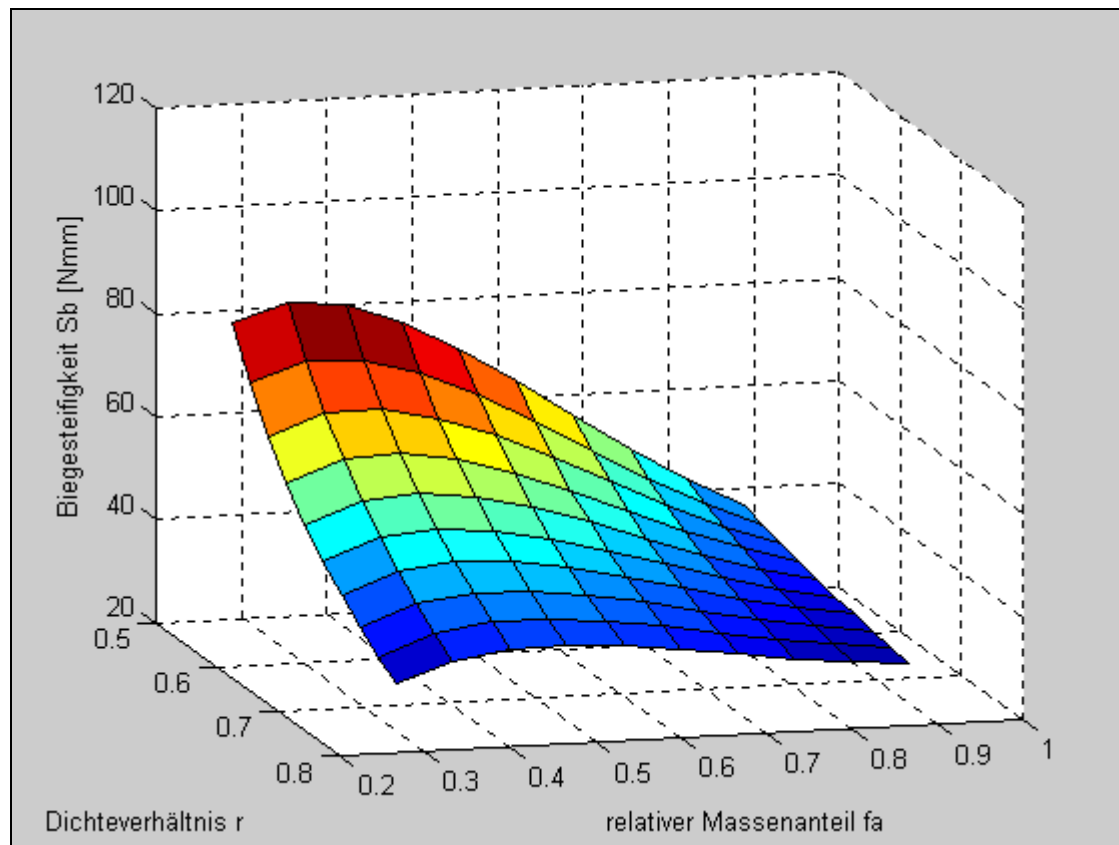


Abbildung 3-13 Biegesteifigkeitsverlauf bei Veränderung des Elastizitätsmoduls der Deckschicht von 6456 auf 8070 N/mm<sup>2</sup> ( $E_{MS} = 2292 \text{ N/mm}^2$ ;  $E_R = 6456 \text{ N/mm}^2$ )

Bei Erhöhung des Elastizitätsmoduls der Deckschicht um 25 % von 6456 N/mm<sup>2</sup> auf 8070 N/mm<sup>2</sup> nimmt die maximale Biegesteifigkeit um ca. 9 % zu.

Mit den untersuchten schichtspezifischen Kennwerten hat sich bei allen Variationen ein Bereich optimaler relativer Massenverhältnisse für maximale Biegesteifigkeiten bei gleichzeitig geringen Rohdichteverhältnissen von Mittel- zur Deckschicht herausgestellt. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Geometrie- und der Steifigkeitseigenschaften von Karton zeigen, dass die Biegesteifigkeit eines unsymmetrischen dreischichtigen Kartonverbundes durch eine analytische Betrachtung im Vorfeld der Kartonherstellung analysiert werden kann. Mit der genauen Kenntnis der schichtspezifischen Parameter lassen sich aus dieser Betrachtung sowohl die Schichtzusammensetzung als auch der Schichtaufbau so zusammenstellen, dass die Biegesteifigkeit ein Optimum erhält.

Diese grundlegenden Zusammenhänge zur Biegesteifigkeit und deren Beeinflussung werden in Kapitel 6.1 zur Untersuchung von Maßnahmen im Bereich der Stoffzusammensetzung und des Schichtaufbaus zur Biegesteifigkeitsverlustreduzierung herangezogen.

### 3.2 Numerische Grundlagen

Die theoretischen Untersuchungen der Biegesteifigkeitsverluste von Karton in den Verarbeitungsprozessen wurden mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode durchgeführt. Hierfür wurde das FEM-Programmsystem Marc&Mentat 2000 eingesetzt, da es sämtliche für die Untersuchungen gestellte Anforderungen erfüllt. Hierbei handelt es sich um:

- nichtlineares Werkstoffverhalten
- geometrische Nichtlinearitäten (große Verformungen)
- nichtlineare Randbedingungen (Kontakt reibungsbehafteter Strukturen)

Weiterhin zeichnet es sich auch dadurch aus, dass individuelle Programmerweiterungen in Form von Unterprogrammen in der Programmiersprache FORTRAN vorgenommen werden können.

Die Wahl der Koordinatenachsen MD, CD und ZD orientiert sich an den in der Papierverarbeitung üblichen Koordinatenbenennungen. Bei der Darstellung von Spannungs- oder Dehnungsgrößen werden die in der Werkstoffmechanik üblichen Richtungen 11, 22 und 33 bzw. x, y und z verwendet. Die Zuordnung dieser Koordinatensysteme ist in der Tabelle 3-4 zusammengefasst.

|                          |    |    |   |
|--------------------------|----|----|---|
| Koordinaten-<br>richtung | MD | 11 | x |
|                          | CD | 22 | y |
|                          | ZD | 33 | z |

Tabelle 3-4 Zuordnung der verwendeten Koordinatenrichtungen

Bei der Finite-Elemente-Methode handelt es sich um ein numerisches Berechnungsverfahren, bei dem über die Kopplung des Kraft-Verformungs-Verhaltens diskreter Bereiche eines Gesamtsystems, sogenannter finite Elemente, Aussagen zum Kraft-Verformungs-Verhalten des Gesamtsystems erzielt werden. Zur Beschreibung des Kraft-Verformungs-Verhaltens wurde das in Kapitel 3.1.2 beschriebene nichtlineare dreidimensionale Werkstoffgesetz in das FEM-System integriert.

#### 3.2.1 Kontrollrechnungen zur Werkstoffmodellierung

Die Überprüfung der FEM-Berechnungen erfolgt durch den Vergleich mit experimentellen Ergebnissen. Abbildung 3-14 zeigt den Vergleich eines experimentellen einachsigen Zugversuches mit einem FEM-simulierten Zugversuch in MD-Richtung bei einer einschichtigen Modellierung und Abbildung 3-15 den Vergleich eines experimentellen einachsigen Druckversuches mit einem FEM-simulierten Druckversuch in ZD-Richtung bei einer einschichtigen Modellierung der Referenzkartonsorte.

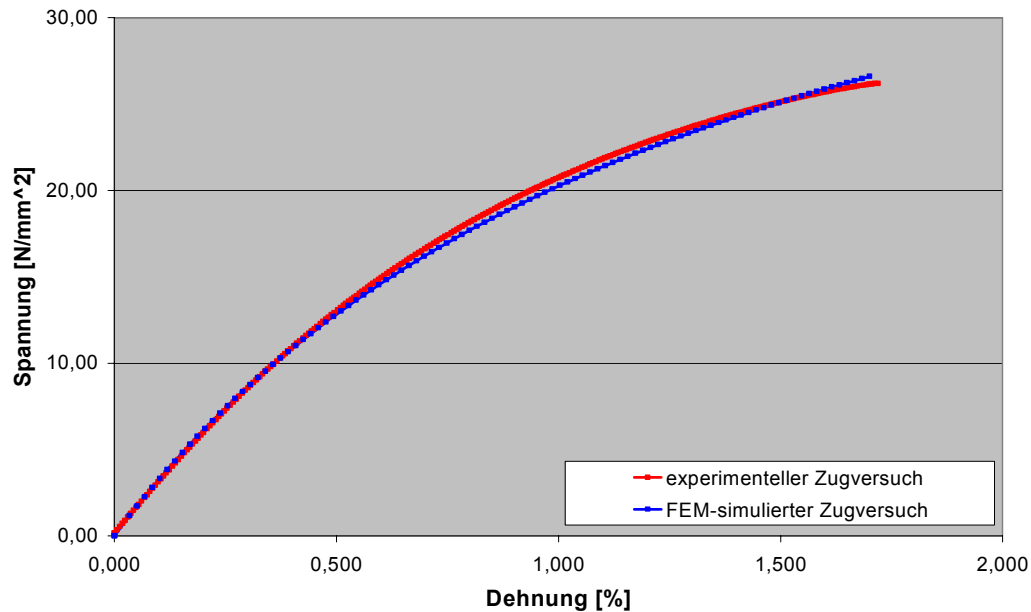


Abbildung 3-14 Überprüfung der FEM-Werkstoffmodellierung: Zugversuch in MD-Richtung für die Referenzkartonsorte

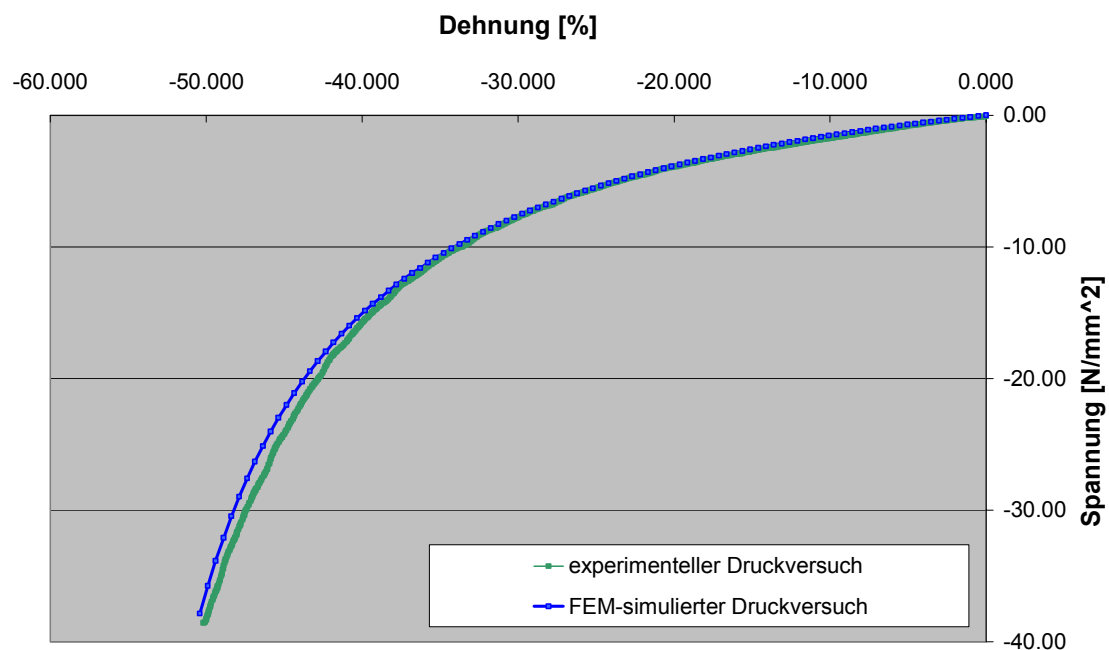


Abbildung 3-15 Überprüfung der FEM-Werkstoffmodellierung: Druckversuch in ZD-Richtung für die Referenzkartonsorte

Aus diesen Vergleichen resultiert für beide Belastungsfälle eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den experimentell durchgeführten Versuchen und den mit der FEM-Methode numerisch simulierten einachsigen Berechnungen bei einer einschichtigen Modellierung.

Weiterhin wurde der Biegesteifigkeitsversuch nach DIN 53121 simuliert und mit experimentellen Ergebnissen verglichen (Abbildung 3-16).

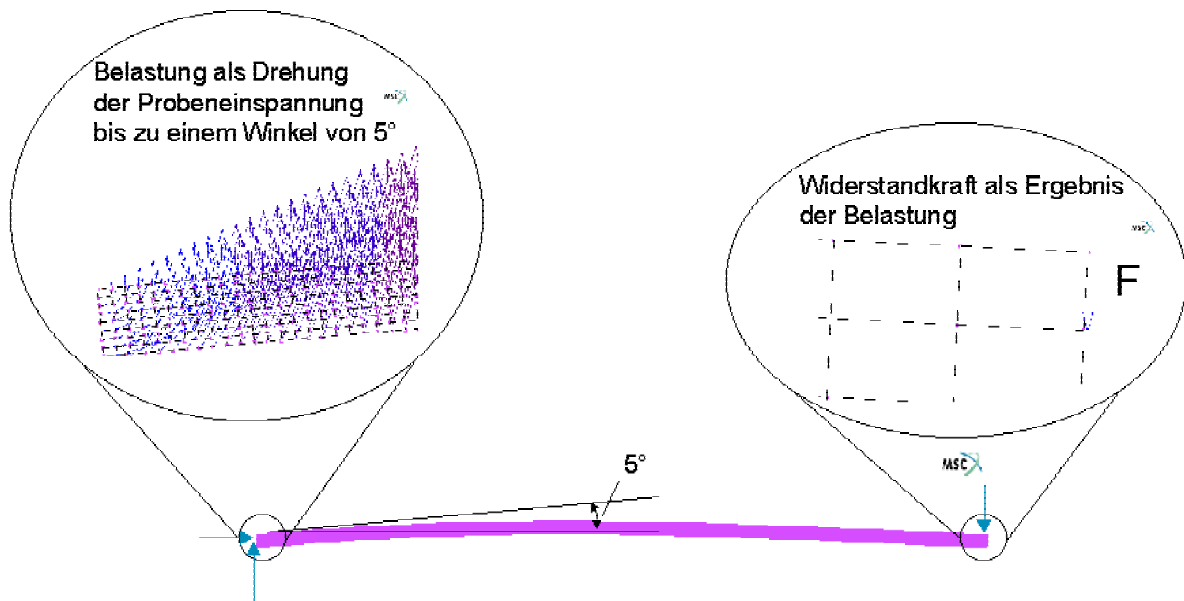


Abbildung 3-16 Simulation des Biegesteifigkeitsversuches mit drehbarer Probeneinspannung nach DIN 53121

Die Ergebnisse des Biegesteifigkeitsversuches werden als Reaktionskräfte am rechten Ende der Probe ausgegeben. Mit Hilfe der für das Zwei-Punkt-Verfahren zugrunde liegenden Beziehung (17) lässt sich dann die Biegesteifigkeit breitenbezogen ausrechnen.

$$S_b = \frac{F \cdot l^2 \cdot 60}{\alpha \cdot \pi \cdot b} \quad (17)$$

In einer ersten Untersuchung der Biegesteifigkeit wurden zwei Papiersorten als Einschichtverbund numerisch simuliert, analytisch berechnet und experimentell verifiziert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass die simulierten Biegesteifigkeiten der Einschichtverbunde gut mit den experimentell ermittelten Biegesteifigkeiten korrelieren (Abbildung 3-17).

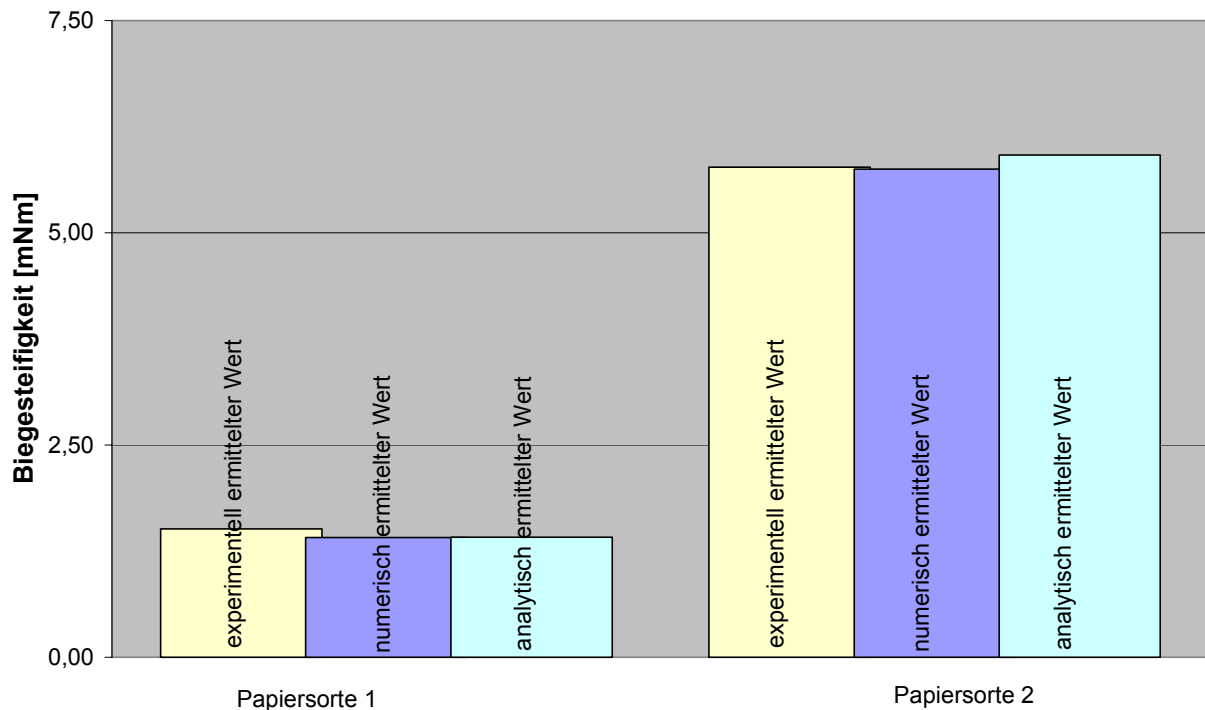


Abbildung 3-17 Simulation von Papier als Einschichtverbund

Die Simulation des Biegesteifigkeitsversuches für Karton als Einschichtverbund ist mit der Referenzkartonsorte gemäß Abbildung 3-18 durchgeführt worden (im weiteren Modell 1 – M1 bezeichnet).

Für die Modellierung von Karton als Mehrschichtverbund wurde in einem weiteren Schritt ein theoretisches Modell (im weiteren Modell 2 – M2 bezeichnet) generiert, das die gleichen physikalischen Eigenschaften besitzt wie die modellierte Referenzkartonsorte. Bei einer analytischen Berechnung der Biegesteifigkeit liefert dieses Modell den gleichen Wert wie die entsprechende Kartonsorte, und zusätzlich dazu entspricht der Versagenszustand des modellierten Materials sowohl in der Bruchdehnung als auch in der Bruchkraft dem der Referenzkartonsorte gemäß Abbildung 3-18.

Zusätzlich zu diesem mehrschichtigen Modell wurde ein weiteres mehrschichtiges Modell generiert, das in seinen Steifigkeitskennwerten einen physikalischen Bezug zur modellierten Kartonsorte besitzt. Hierfür wurden die Kennwerte der Laborblätter der einzelnen Schichten (Tabelle 3-3) als Grundlage für die Modellierung verwendet.

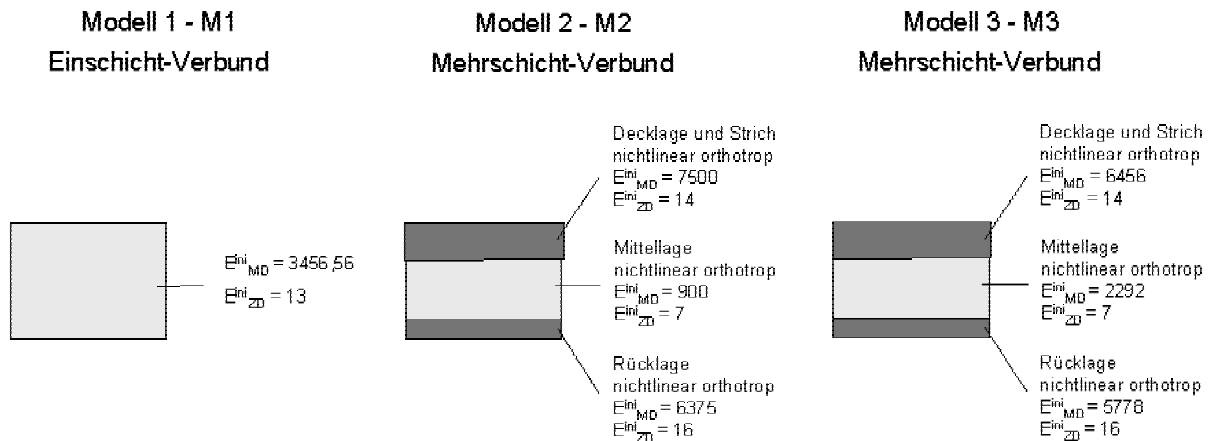


Abbildung 3-18 Werkstoffkennwerte der FEM-Modelle zur Untersuchung der Biegesteifigkeit von Karton (Referenzkartonsorte).

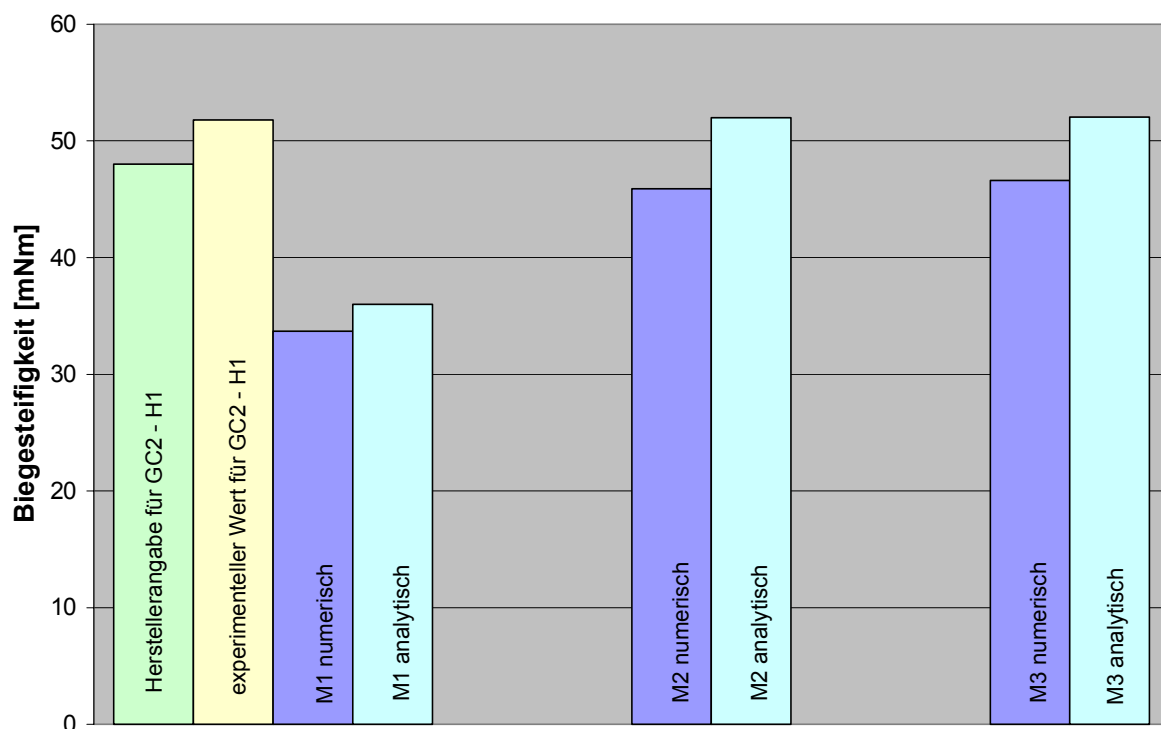


Abbildung 3-19 Ergebnisse der Simulation von Karton als Mehrschichtverbund

Die Ergebnisse des Biegesteifigkeitsversuches nach DIN 53121 zeigen, dass die Modellierung von Karton als Einschichtverbund in der Numerik und Analytik eine gute Übereinstimmung findet. Jedoch kommt in dieser Modellierung die Schichtigkeit von Karton nicht zum Tragen und deswegen weisen diese Ergebnisse einen Unterschied zu dem experimentell ermittelten Wert auf. Die Modellierung von Karton als Mehrschichtverbund zeigt hingegen den deutlichen Einfluss der Schichtigkeit (Abbildung 3-19). Die Annahmen der Werkstoffkennwerte für die Modelle M2 und M3 spiegeln sich in dieser Abbildung wider und gleichen die Biegesteifigkeit der theoretischen Modelle an die experimentell gemessenen Werte an. Der reproduzierbare Unterschied, der sich zwischen dem numerischen und analytischen Ergebnis für alle Modellierungsarten ergibt, liegt in der Natur des numerischen

Berechnungsverfahrens. Hier wird eine Lösung nur angenähert und nicht wie in der Analytik, exakt berechnet.

Die hier erstellten und verifizierten Material-Modelle M2 und M3 für den Schichtaufbau des Kartons zeigen, dass der Einfluss der Schichtigkeit dann nicht vernachlässigbar ist, wenn der Materialverbund Biegebeanspruchung erfährt. Dieser Aspekt wird zur Verdeutlichung noch einmal in Kap. 5.2.1 aufgegriffen.

### **3.3 Experimentelle Grundlagen**

#### **3.3.1 Allgemeine Versuchsbedingungen**

##### **Klimatisierung**

Die hygroskopischen Eigenschaften von Karton erfordern zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen die Versuchsdurchführung unter klimatisch normierten Umgebungsbedingungen. Die in diesem Forschungsprojekt durchgeführten experimentellen Untersuchungen fanden bei einem Normalklima DIN 50014 - 23/50-1 ( $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}$  und  $50 \pm 3$  % relative Luftfeuchte) statt. Die untersuchten Kartonproben wurden in einem ersten Schritt bei  $35^{\circ}\text{C}$  und 15 % relativer Luftfeuchte einem Trocknungsprozess unterworfen, um einen identischen, reproduzierbaren Ausgangszustand für alle Proben unter Berücksichtigung des Hysterese-Effektes zu realisieren.

Die experimentellen Untersuchungen am Wickelversuchsstand und die daran untersuchten Kartonproben unterlagen einem normalen Raumklima.

##### **Verwendete Messtechnik**

Zur besseren Vergleichbarkeit mit bereits vorliegenden Messergebnissen wurde die Bestimmung der mechanischen Werkstoffkennwerte der untersuchten Kartonsorten unter Verwendung normgerechter Messeinrichtungen durchgeführt.

Die Zug- und Druckuntersuchungen erfolgten mittels einer Universalprüfmaschine der Fa. Zwick. Die Möglichkeit der Wegmessung im Nanometerbereich und eine Kraftsignalauflösung mit einer Genauigkeit von  $\pm 2$  N lieferten die notwendigen Voraussetzungen für die Messung kleinster Dehnungen in Abhängigkeit der gemessenen Kräfte.

Für die Messung der Blattdicke wurde das Dickenmessgerät Lorentzen & Wettre SE 051 D20S M/I eingesetzt. Da dieses Gerät in der papierherstellenden und -verarbeitenden Industrie häufig eingesetzt wird, lassen sich dadurch die erzielten Ergebnisse mit den Angaben der Probenhersteller direkt vergleichen. Mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 1$   $\mu\text{m}$  ist es in der Lage, hier den benötigten Messbereich mit vertretbarer Genauigkeit aufzulösen.

Für die experimentelle Bestimmung der Biegesteifigkeit existieren unterschiedliche standardisierte Verfahren, wie z.B. das Resonanzlängenmessverfahren, das Zwei-Punkt-Verfahren, das Drei-Punkt-Verfahren oder Vier-Punkt-Verfahren.

Das in der Papier- und Kartonindustrie am häufigsten verwendete Messgerät ist das Biegesteifigkeitsmessgerät Lorentzen & Wettre DIN 53121. Dieses ermittelt die Biegesteifigkeit nach dem Zwei-Punkt-Verfahren und wird hier für die

Untersuchungen verwendet. Die Messgenauigkeit dieses Gerätes liegt bei  $\pm 2 \%$  des gemessenen Wertes.

Die Messgenauigkeiten aller eingesetzten Geräte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

| Kraftmessbereich | Technische Daten                | Universalprüfmaschine<br>Zwick              |       |      |          |            | Biegesteifigkeitsmessgerät<br>Lorentzen & Wette DIN 53121 | Dickenmessgerät<br>Lorentzen & Wette SE 051 D20S M1 |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|-------|------|----------|------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                  | Lastmessbereich - Sensor        | - 200 N bis + 200 N / - 1000 N bis + 1000 N |       |      |          |            | 5 N                                                       |                                                     |
|                  | Messgenauigkeit                 | $\pm 1\%$                                   |       |      |          |            | $\pm 2\%$                                                 |                                                     |
|                  | Messgeschwindigkeit (Frequenz)  | 50 Hz                                       |       |      |          |            | $5^\circ / s$                                             |                                                     |
| Wegmessbereich   | Messbereich                     | 1 - 1035 mm                                 |       |      |          |            | $5^\circ - 30^\circ$                                      | 0 - 20 mm                                           |
|                  | Messgeschwindigkeit             | mm/min                                      | 0,001 | 0,01 | 0,1 - 10 | 100 - 1500 |                                                           |                                                     |
|                  | max. Geschwindigkeitsabweichung | %                                           | 1     | 0,5  | 0,3      | 0,05       |                                                           |                                                     |
|                  | Auflösung                       | 30 nm                                       |       |      |          |            |                                                           | $\pm 1 \mu m$                                       |
|                  | Auflösungsgenauigkeit           | 60 nm                                       |       |      |          |            |                                                           | $\pm 2 \mu m$                                       |

Tabelle 3-5 Messgenauigkeiten der verwendeten Messgeräte

### Reproduzierbarkeit

Um die Aussagekraft der in den Zug- und Druckversuchen erzielten Ergebnisse zu überprüfen war es notwendig, das Verformungsverhalten der Universalprüfmaschine unter Druckbeanspruchung zu bestimmen. Das Verformungsverhalten der Universalprüfmaschine wurde zunächst ohne Kartonprobe aufgezeichnet und ist in der Abbildung 3-20 dargestellt.

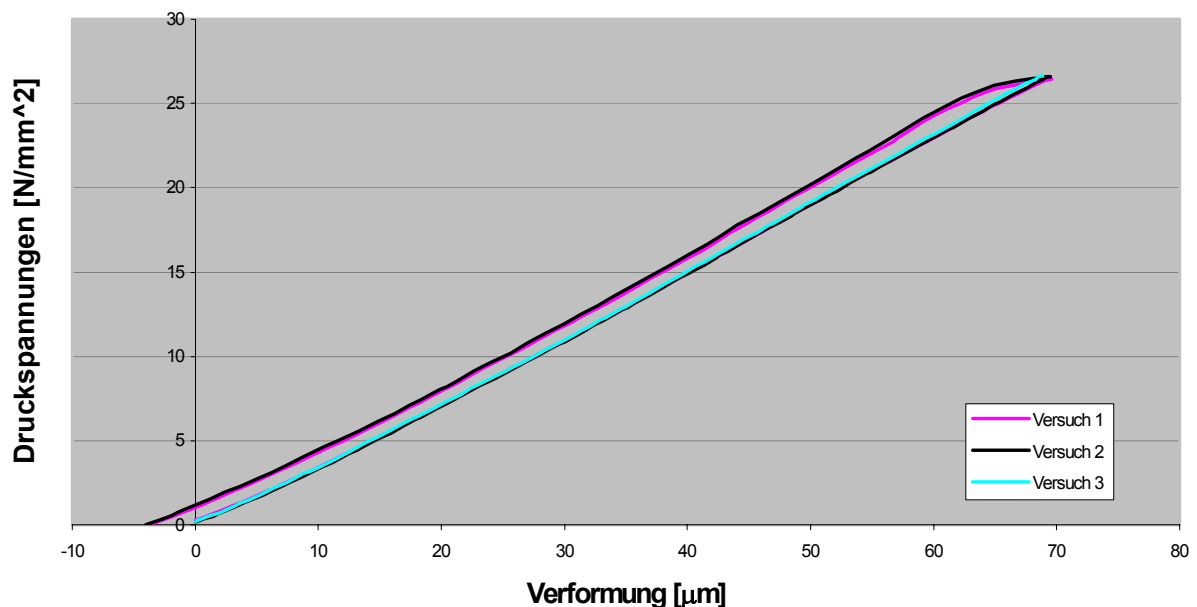


Abbildung 3-20 Verformungsverhalten der Universalprüfmaschine unter Druckbeanspruchung

Im Anschluss daran wurde der gleiche Versuch mit einer Kartonprobe durchgeführt. Um die reine Kartonprobenverformung unter Druckbelastung zu bestimmen, wurde von der gemessenen Kurve die Verformungskurve der Universalprüfmaschine subtrahiert.

Die Blattdicke geht mit der dritten Potenz in die Biegesteifigkeit ein. Dickenschwankungen einer Messprobe sind somit erhebliche Störgrößen bei der Bestimmung der Biegesteifigkeit und zusätzlich bei der Ermittlung der Materialkennwerte von Karton. Die Reproduzierbarkeitsmessungen bei der Dickenmessung sind nach dem Messort an der Kartonprobe zu unterscheiden.

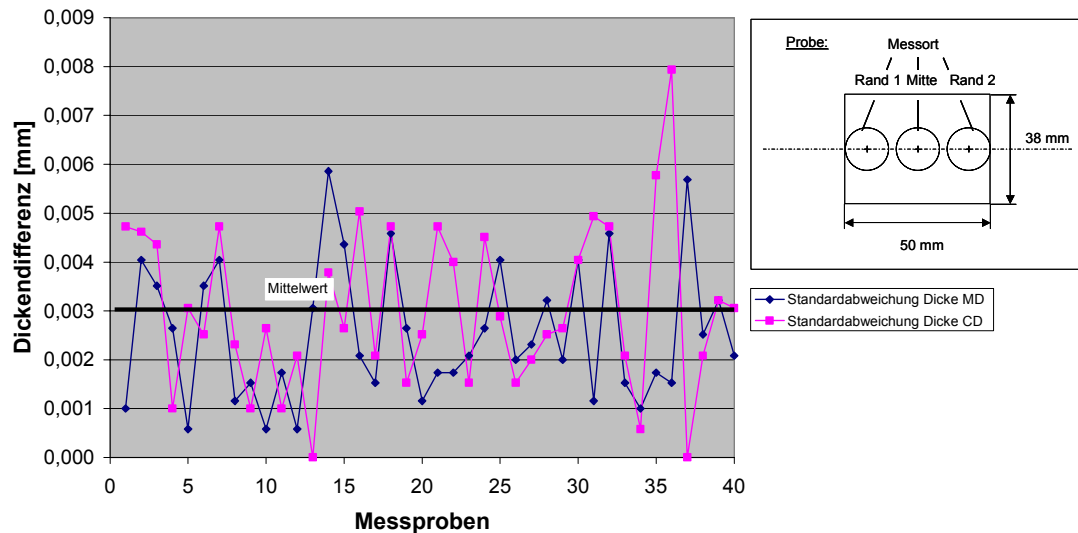


Abbildung 3-21 Standardabweichung bei der Dickenmessung an drei unterschiedlichen Messpositionen

Abbildung 3-21 zeigt eine Messprobe und die unterschiedlichen Messpositionen an denen die Blattdicke bestimmt wurde. Die dabei in ZD-Richtung berechnete Standardabweichung von 3  $\mu\text{m}$  entspricht einer theoretischen Biegesteifigkeitsabweichung von 1,8 % bei konstantem initialen Elastizitätsmodul von 3456 N/mm<sup>2</sup> der Referenzkartonsorte.

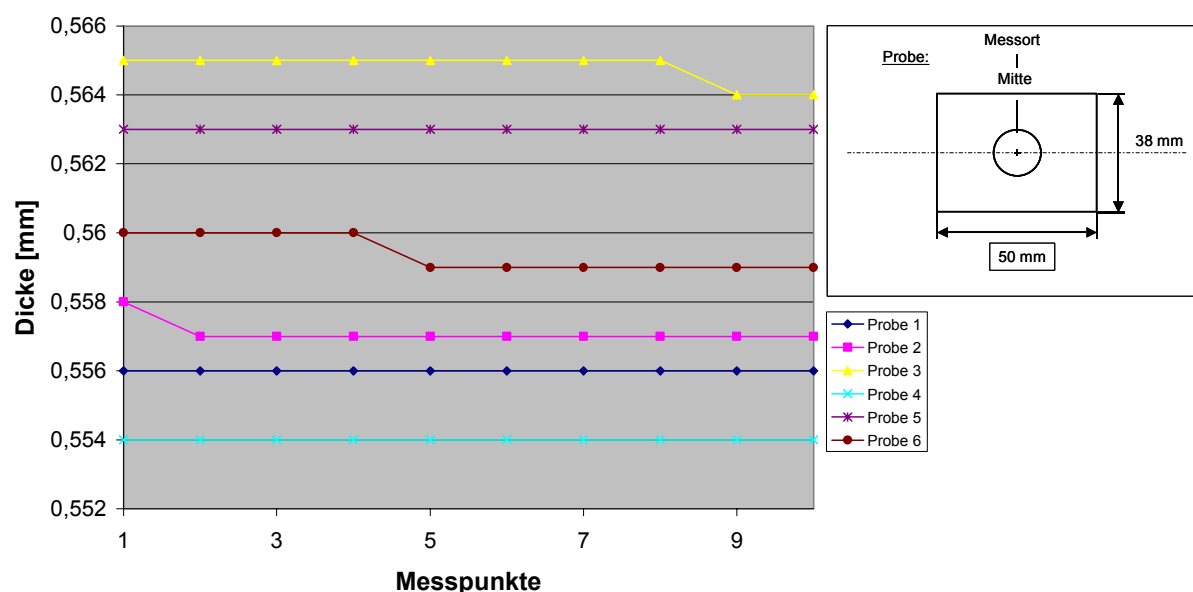


Abbildung 3-22 Standardabweichung bei Mehrfachmessungen am selben Ort

Mehrfachmessungen am selben Ort ergaben eine Standardabweichung von 1  $\mu\text{m}$ . Dieser Wert entspricht der Messgenauigkeit des Dickenmessgerätes und einer theoretischen Biegesteifigkeitsabweichung von 0.5 % (Abbildung 3-22). Bei der Betrachtung der Messgenauigkeit der Biegesteifigkeit ist weiterhin die Inhomogenität des Werkstoffes zu beachten. Kontrolluntersuchungen am Biegesteifigkeitsmessgerät ließen eine Schwankungsbreite von 3 mNm erkennen (Abbildung 3-23). Diese Schwankungsbreite entspricht einer theoretischen Biegesteifigkeitsabweichung von 3.3 – 4.1 %.

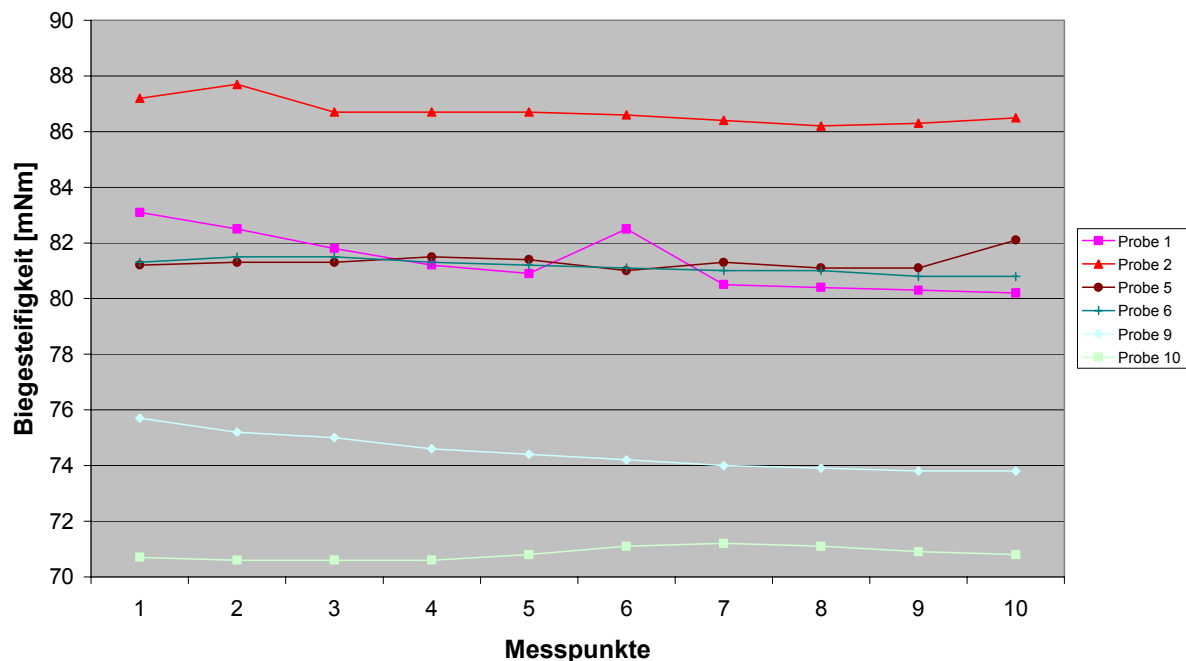


Abbildung 3-23 Schwankungsbreite der Biegesteifigkeitsmesswerte

Neben den Messabweichungen der eingesetzten Messgeräte ist die Schwankungsbreite innerhalb eines Probenspektrums, in diesem Fall jeweils 10 Proben, zu beachten. Durchgeführte Kontrollmessungen, dargestellt in Tabelle 3-6 zeigen die ermittelten Mittelwerte und Standardabweichungen.

| Ergebnisse Probeninhomogenität -Zugversuch- |              |         |                   |                 |                  |       |
|---------------------------------------------|--------------|---------|-------------------|-----------------|------------------|-------|
|                                             |              | t-Bruch | $\epsilon$ -Bruch | $\sigma$ -Bruch | E <sub>ini</sub> | S     |
| H1 GD2-MD                                   | Mittelwert   | 19,48   | 1,69              | 29,26           | 4332,44          | 49,89 |
|                                             | Std.-abw / % | 5,5     | 5,7               | 2,0             | 1,1              | 1,8   |
| H1 GD2-MD_02                                | Mittelwert   | 22,37   | 1,72              | 28,26           | 4175,69          | 47,92 |
|                                             | Std.-abw / % | 5,8     | 6,9               | 2,4             | 1,2              | 1,8   |

Tabelle 3-6 Messergebnisse zur Inhomogenität der Proben

Unter Berücksichtigung der in der Praxis ermittelten Biegesteifigkeitsverluste in Höhe von 5-7 % verdeutlichen die genannten Streubereiche, dass die Messergebnisse mit hoher Sorgfalt auszuwerten sind, um Fehldeutungen zu vermeiden.

### 3.3.2 Zugversuch

Im Zugversuch nach DIN ISO 1924-2 /16/ wird die breitenbezogene Bruchkraft und die Bruchdehnung einer Werkstoffprobe unter Zugbelastungen bei konstanter Dehnungsgeschwindigkeit gemessen. Aus den Messwerten lassen sich die initialen Elastizitätsmodule für die MD- und CD-Richtung bestimmen.

Für die Durchführung eines genormten Zugversuches (Abb. 3-24) sind die Kartonproben in Übereinstimmung mit der ISO 186 auszuwählen. Die Vorbereitung der Kartonproben und die Versuchsdurchführung müssen unter normierten Klimabedingungen erfolgen und die bekannten Kalibrierbedingungen erfüllen

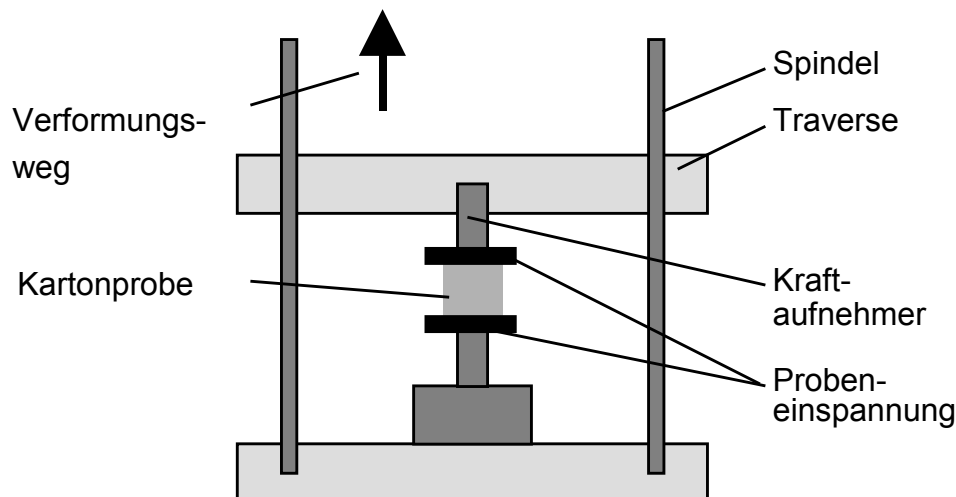


Abbildung 3-24 Schematische Darstellung des Zugversuches

### 3.3.3 Druckversuch

Im Druckversuch werden, ausgehend vom Zugversuch in Anlehnung an DIN EN 20534, unter normierten Klimabedingungen die Druckeigenschaften bestimmt. Hieraus lassen sich die Kompressibilität und der initiale Elastizitätsmodul in ZD-Richtung ermitteln.

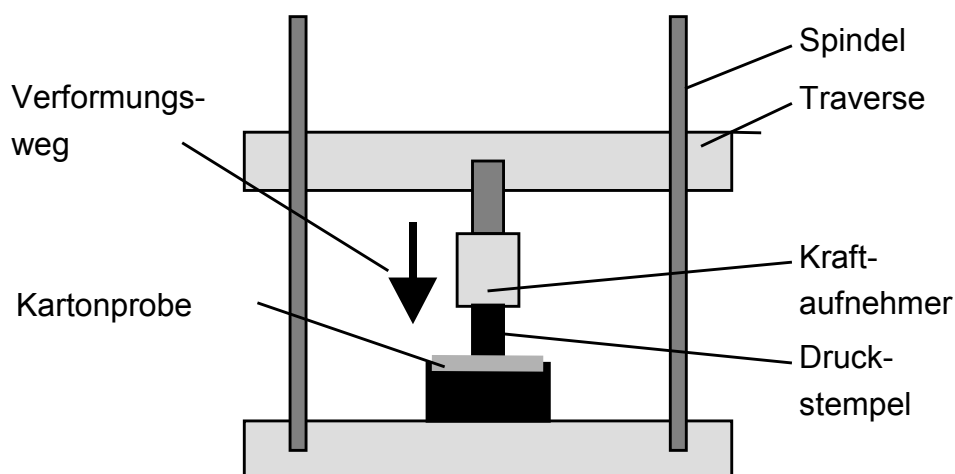


Abbildung 3-25 Schematische Darstellung des Druckversuches

Die selbst entwickelte Prüfapparatur (Abb. 3-25) beinhaltet den Druckstempel und den darin integrierten Kraftaufnehmer. Der Druckstempel weist eine Wirkfläche von  $19,63 \text{ mm}^2$  auf. Um bei der Versuchsdurchführung eine gleichmäßige Druckverteilung zu gewährleisten, müssen Druckstempel- und Auflagefläche mit hoher Genauigkeit planparallel justiert sein. Das Druck-Kompressionsverhalten in ZD-Richtung wird durch die aufgebrachte Last in Abhängigkeit von der registrierten Verformung ermittelt.

### 3.3.4 Auswertung der Zug- und Druckversuche

Die Ermittlung der Werkstoffkennwerte in allen Richtungen erfolgt auf der Basis eines klassischen Zug- bzw. Druckversuches im quasistatischen Versuch. Die Auswertung hinsichtlich der auftretenden Dehnungsanteile wurde unter Beachtung der in Abbildung 3-26 dargestellten Kraft-Verformungs-Phasen eines zyklischen Versuches mittels eines Excel-Makros durchgeführt, das in einem automatischen Ablauf die Phasengrenzen ermittelt, die Dehnungsanteile separiert sowie tabellarisch und graphisch darstellt.

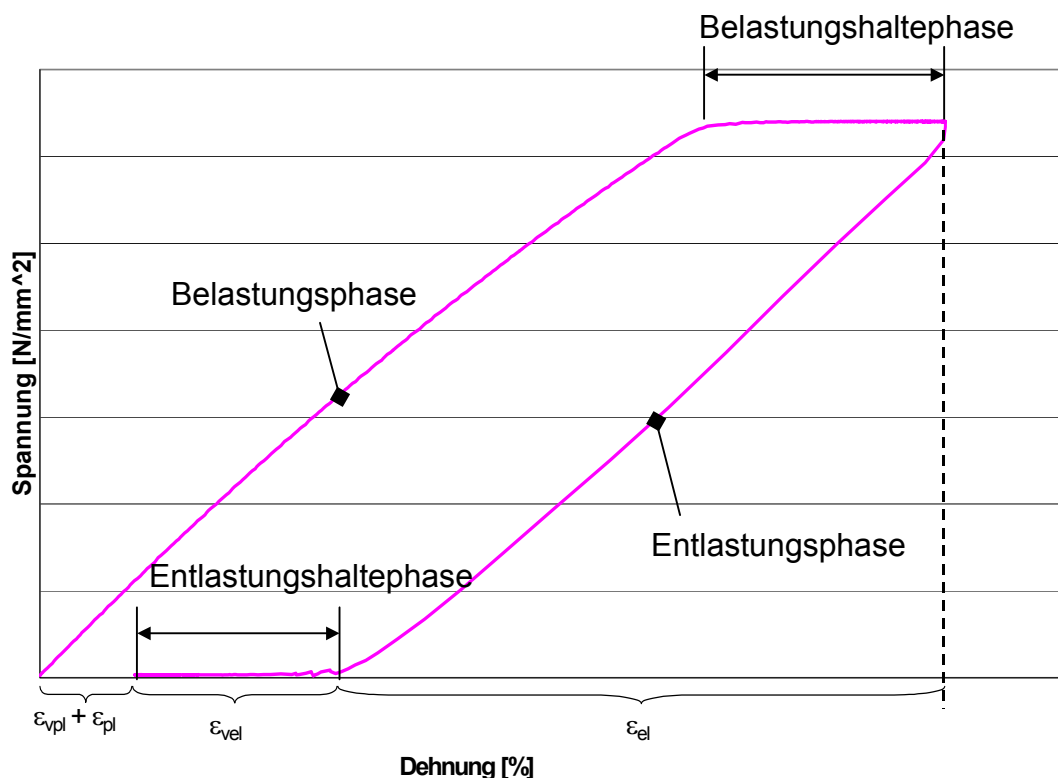


Abbildung 3-26 Kraft-Verformungs-Phasen eines Zugversuches mit eingetragenen Dehnungsanteilen

### 3.3.5 Biegesteifigkeitsversuch



Bei dem hier angewendeten Zwei-Punkt-Verfahren nach DIN 53121 wird eine balkenförmige Probe an einem Ende mittels einer Klemme so eingespannt, dass sie sich im Abstand  $l$  von dem Kraftmesspunkt befindet. Ist die Messlänge variierbar, so wird für Proben einer Dicke von über 0,1 mm eine Messlänge von  $l = 50$  mm vorgeschrieben.

Die Kartonprobe wird einseitig durch eine senkrecht zur Probenoberfläche wirkende Kraft beansprucht. Dies geschieht, indem sich die Einspannung um einen definierten Winkel ( $5^\circ$ ) dreht und den Prüfstreifen gegen den in

unmittelbarer Kartonoberflächennähe befindenden Kraftsensor drückt.

Bei dem Be- und Entlastungsvorgang führt die Klemme eine gleichförmige Drehbewegung mit dem Ziel aus, die gemessene Verformungsgeschwindigkeit des Prüfstreifens bzw. die Dehnungsgeschwindigkeit  $\dot{\delta}$  der Prüfstreifenoberseite konstant zu halten. Sie liegt zwischen  $\dot{\delta} = 0,2 \text{ \%}/\text{min}$  und  $\dot{\delta} = 1 \text{ \%}/\text{min}$ . Der dabei entstehende maximale Biegewinkel  $\alpha$  ist der Winkel, um den sich die Verbindungslinie zwischen dem Kraftangriffspunkt und dem Drehpunkt der Einspannklemme während des Versuchs verdreht. Beim Biegesteifigkeitsversuch dürfen die Prüfstreifen keine wesentlichen bleibenden Verformungen erleiden, was erfahrungsgemäß dann der Fall ist, wenn das Dehnungsmaß in den Außenschichten der Probe 0,2 % überschreitet. Für alle Kartondicken zwischen 0,05 mm und 0,8 mm ist der maximale Biegewinkel konstant und in der Regel  $5^\circ \pm 0,2^\circ$ . Da selbst bei geringen Vorkrümmungen der Proben die Kraft  $F$  oder das Biegemoment  $S$  von Oberseite und Unterseite unterschiedlich sind, müssen beide Seiten eines Prüfstreifens untersucht werden. Biegesteifigkeitswerte in diesen Untersuchungen ergeben sich aus dem arithmetischen Mittelwert aller durchgeführten Messungen.

## 4 Einflussfaktoren auf die Biegesteifigkeitsverluste von Karton

### 4.1 Umfang und Ziel der Untersuchungen

Zur Bestimmung der Einflussfaktoren auf die Biegesteifigkeitsverluste von Karton in der Verarbeitung ist eine detaillierte Kenntnis über das Werkstoffverhalten des Mehrschichtverbundes und über Belastungszustände erforderlich. Es wurden deshalb grundlegende Versuchsreihen unter Beachtung der in Abbildung 4-1 dargestellten Systematik durchgeführt. Die Aufteilung in zyklische und nicht zyklische Belastungszustände unter Berücksichtigung von Haltezeiten in der Belastungs- und Entlastungsphase ermöglicht die Beurteilung der Verarbeitungsprozesse hinsichtlich der Biegesteifigkeitsverluste.

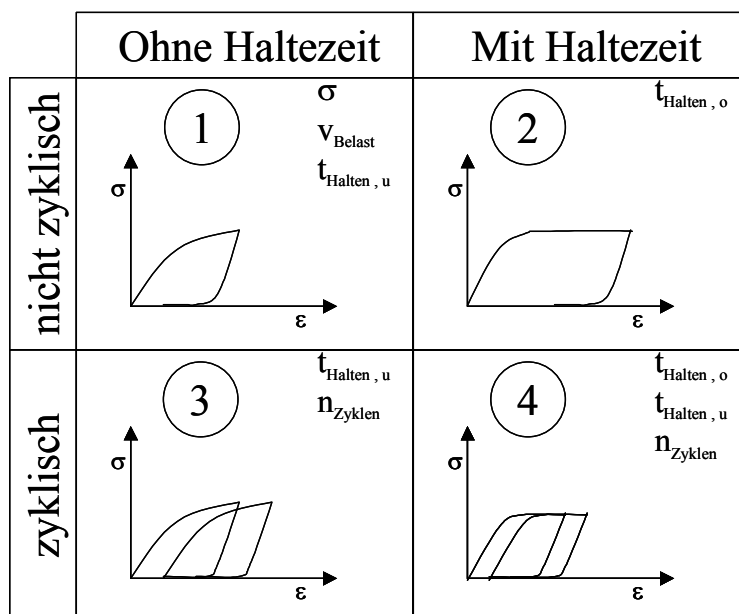


Abbildung 4-1 Versuchssystematik

In einem ersten Schritt steht die Bestimmung der Materialkennwerte der untersuchten Kartonproben im Vordergrund. Die Ermittlung des initialen Elastizitätsmoduls ( $E_{\text{ini}}$ ), der Grenzspannung ( $S$ ), der Bruchdehnung ( $\epsilon_{\text{Bruch}}$ ) und der Bruchspannung ( $\sigma_{\text{Bruch}}$ ) dient der eindeutigen Beschreibung der Materialeigenschaften. Die darauf aufbauenden Untersuchungen umfassen zyklische und nicht zyklische Belastungsszenarien für die Zug- und Druckbeanspruchung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Halte- und Entlastungszeiten, um die belastungs- und zeitabhängigen Einflüsse auf die Biegesteifigkeitsverluste zu erfassen.

Im zweiten Schritt werden die Erkenntnisse zu den Einflussfaktoren auf die Abschätzung von Biegesteifigkeitsverlusten übertragen. Hierbei entstehen sogenannte „Referenzkurven“, mit deren Hilfe die sortenabhängigen Biegesteifigkeitsverluste in Abhängigkeit des Belastungszustandes bestimmt werden können.

## 4.2 Charakterisierung der untersuchten Kartonproben

In der nachfolgenden Tabelle sind die für diese Untersuchungen verwendeten Kartonsorten aufgeführt.

| Sorte                |                    | GC2-H1 | GD2-H1 | GC2-H2 | GD2-H2 | GC2-H1 |
|----------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Grammatur            | g/m <sup>2</sup>   | 300    | 300    | 300    | 300    | 350    |
| Dicke                | μm                 | 500    | 410    | 495    | 410    | 600    |
| Volumen              | cm <sup>3</sup> /g | 1,67   | 1,37   | k.A.   | k.A.   | 1,71   |
| Streichverf. Oberfl. | g/m <sup>2</sup>   | 18-23  | 26     | k.A.   | k.A.   | 18-23  |
| Strich               | g/m <sup>2</sup>   | 20,00  | 26,00  | k.A.   | k.A.   | 20     |
| Decklage             | g/m <sup>2</sup>   | 52,00  | 36,00  | k.A.   | k.A.   | 55     |
| Schonschicht         | g/m <sup>2</sup>   | -      | 35,00  | k.A.   | k.A.   | -      |
| Mittellage           | g/m <sup>2</sup>   | 185,00 | 163,00 | k.A.   | k.A.   | 230    |
| Rückseite            | g/m <sup>2</sup>   | 38,00  | 35,00  | k.A.   | k.A.   | 40     |
| Pigmentierung        | g/m <sup>2</sup>   | 5,00   | 5,00   | k.A.   | k.A.   | 5      |

Tabelle 4-1 Basisdaten der untersuchten Kartonsorten (Herstellerangaben)

Bei den untersuchten Kartonproben handelt es sich um gestrichene Kartonsorten mit Grammaturen von 300 und 350 g/m<sup>2</sup>, die als repräsentativ für Marktbedeutung und Qualitätsanspruch angesehen werden können. Die Probenentnahme erfolgte am Poperoller der beiden Kartonfabriken.

Bedingt durch voneinander abweichende Verarbeitungsprozesse und Stoffzusammensetzungen besitzen die Kartonsorten der beiden Probenlieferanten unterschiedliche Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften. Die hier im Mittelpunkt stehenden Biegesteifigkeiten wurden nach dem Zwei-Punkt-Verfahren ermittelt und zeigen nachfolgende charakteristische Merkmale, die aus den Messergebnissen (Abbildung 4-2) entnommen werden können.

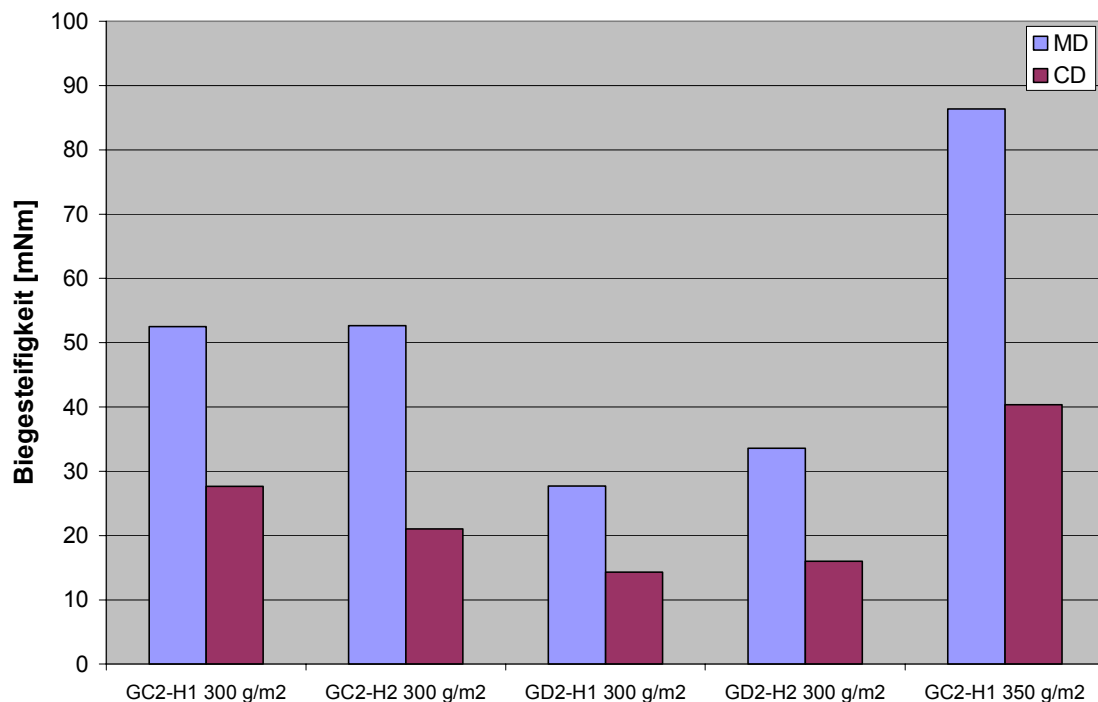


Abbildung 4-2 Biegesteifigkeit der untersuchten Kartonproben im „jungfräulichen“ Zustand

Die Kartonsorten GC-2 ( $300\text{g/m}^2$ ) beider Hersteller weisen in MD-Richtung fast identische Biegesteifigkeitswerte auf (ca.  $52\text{ mNm}$ ). In CD-Richtung (Abbildung 4-2) ist der gemessene Wert für den GC-2 Karton der Firma H1 allerdings um ca. 30 % höher (ca.  $28\text{ mNm}$ ). Die Kartonsorten GD-2 ( $300\text{ g/m}^2$ ) differieren in MD-Richtung um ca. 21%. Auch in CD-Richtung erweist sich der GD-2 Karton der Firma H2 mit annähernd 12%iger Differenz als der Biegesteifere.

Während das Verhältnis der Biegesteifigkeiten in MD- und CD-Richtung zueinander bei allen Proben zwischen 1,9 und 2,1 liegt, weicht der GC-2 Karton ( $300\text{ g/m}^2$ ) der Firma H2 mit einem Verhältnis von 2,5 von diesen Werten ab.

Die Kartonsorte GC-2 der Firma H1 mit einer Grammatur von  $350\text{ g/m}^2$  besitzt im Vergleich zur  $300\text{ g/m}^2$ -Variante in MD-Richtung eine um 65 % höhere Biegesteifigkeit. In CD-Richtung ist ein Unterschied von 46 % zu verzeichnen.

Diese ermittelten Biegesteifigkeiten repräsentieren das gewünschte Produktionsergebnis der Kartonfabriken und dienen hier als Vergleichsgrundlage. Die Werkstoffkennwerte für die verwendeten Kartonsorten sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

| Zusammenfassung der Ergebnisse -Zugversuch- |              |         |                      |                 |                 |                 |
|---------------------------------------------|--------------|---------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                             |              | t-Bruch | $\varepsilon$ -Bruch | $\sigma$ -Bruch | $E_{ini}$       | S               |
|                                             |              | s       | %                    | $\text{N/mm}^2$ | $\text{N/mm}^2$ | $\text{N/mm}^2$ |
| H1 GC2-MD<br>$300\text{ g/m}^2$             | Mittelwert   | 19,55   | 1,70                 | 25,63           | 3456,65         | 47,78           |
|                                             | Std.-abw / % | 3,9     | 4,1                  | 1,3             | 1,5             | 2,3             |
| H1 GC2-CD<br>$300\text{ g/m}^2$             | Mittelwert   | 21,36   | 3,59                 | 14,67           | 1878,33         | 18,75           |
|                                             | Std.-abw / % | 4,0     | 4,4                  | 1,1             | 0,7             | 0,5             |
| H1 GD2-MD<br>$300\text{ g/m}^2$             | Mittelwert   | 19,48   | 1,69                 | 29,26           | 4332,44         | 49,89           |
|                                             | Std.-abw / % | 5,5     | 5,7                  | 2,0             | 1,1             | 1,8             |
| H1 GD2-MD_02<br>$300\text{ g/m}^2$          | Mittelwert   | 22,37   | 1,72                 | 28,26           | 4175,69         | 47,92           |
|                                             | Std.-abw / % | 5,8     | 6,9                  | 2,4             | 1,2             | 1,8             |
| H1 GD2-CD<br>$300\text{ g/m}^2$             | Mittelwert   | 20,98   | 3,83                 | 13,45           | 2180,49         | 15,96           |
|                                             | Std.-abw / % | 4,2     | 4,7                  | 1,6             | 0,6             | 1,1             |
| H1 GC2-MD<br>$350\text{ g/m}^2$             | Mittelwert   | 36,02   | 1,63                 | 28,85           | 3348,95         | 64,96           |
|                                             | Std.-abw / % | 6,49    | 6,61                 | 1,97            | 1,0             | 4,3             |
| H2 GC2-MD<br>$300\text{ g/m}^2$             | Mittelwert   | 18,65   | 1,38                 | 25,00           | 3682,02         | 52,09           |
|                                             | Std.-abw / % | 3,7     | 4,6                  | 3,2             | 1,9             | 2,8             |
| H2 GC2-CD<br>$300\text{ g/m}^2$             | Mittelwert   | 25,58   | 4,47                 | 11,65           | 1551,56         | 13,87           |
|                                             | Std.-abw / % | 7,0     | 8,7                  | 2,4             | 2,3             | 1,4             |
| H2 GD2-MD<br>$300\text{ g/m}^2$             | Mittelwert   | 23,27   | 1,80                 | 31,18           | 4585,06         | 51,88           |
|                                             | Std.-abw / % | 5,1     | 6,3                  | 2,3             | 1,5             | 1,3             |
| H2 GD2-CD<br>$300\text{ g/m}^2$             | Mittelwert   | 24,78   | 5,39                 | 13,26           | 2161,75         | 14,79           |
|                                             | Std.-abw / % | 5,0     | 7,5                  | 1,0             | 3,1             | 0,8             |

Tabelle 4-2 Materialkennwerte der untersuchten Proben

Basierend auf Untersuchungen an 10 Proben jeder Kartonsorte sind in Tabelle 4-2 neben der Belastungszeit, der prozentualen Bruchdehnung und der Bruchspannung die Werkstoffkennwerte initialer Elastizitätsmodul ( $E_{ini}$ ) und Grenzspannung (S) als Mittelwert mit ihrer Standardabweichung aufgelistet. Für die untersuchten Chromo-Kartonsorten liegt die gemessene Bruchspannung in MD-Richtung bei ca.  $25\text{ N/mm}^2$  und in CD-Richtung bei ca.  $12\text{ N/mm}^2$  bis  $15\text{ N/mm}^2$ . Der Duplex-Karton erträgt eine deutlich höhere MD-Spannung ( $29 - 31\text{ N/mm}^2$ ). Dieser deutliche Unterschied ist in CD-Richtung für den Karton H1 GC2 und H1 GD2 nicht feststellbar. Der Chromo-Karton weist im Gegensatz zum Duplex-Karton einen niedrigeren initialen

Elastizitätsmodul in MD-Richtung und in CD-Richtung auf. Die ermittelten Werte zwischen den einzelnen Kartonsorten differieren um 14 – 28 %. Die Berechnung der Grenzspannungen ergab geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Kartonsorten (48 – 52 N/mm<sup>2</sup>). Eine Betrachtung der Standardabweichung lässt für den H1 GC2 die geringste Schwankungsbreite erkennen. Daher wurde dieser Karton als Referenzsorte ausgewählt.

Die Ermittlung von zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven ermöglicht die Feststellung von Elastizitätsmodul- bzw. Dickenverlusten und damit der Biegesteifigkeitsverluste. Um Analogiebetrachtungen mit den Verarbeitungsprozessen vornehmen zu können, ist sicherzustellen, dass die Versuchsbedingungen dem Verarbeitungsprozess entsprechen bzw. Abweichungen durch fundierte Parametervariationen erklärbar sind. Die durchgeführten Variationen zur Analyse des Materials hinsichtlich seines differenzierten Dehnungsverhaltens sind unter Berücksichtigung folgender Parameter im Anhang dargestellt:

- Belastungshöhe (quasistatisch)
- Belastungsgeschwindigkeit (quasistatisch)
- Entlastungshaltezeit (dynamisch)
- Belastungshaltezeit (dynamisch)

### **4.3 Einflussfaktoren aus Zugbeanspruchungen**

Ausgehend von der in Kapitel 4.1 beschriebenen Versuchssystematik und den im Anhang geschilderten Versuchsergebnissen werden in diesem Kapitel die Faktoren zur Biegesteifigkeitsbeeinflussung untersucht.

Die Komplexität des Kraft-Verformungs-Zusammenhangs im Mehrschichtverbund erschwert den direkten Rückschluss auf die Entwicklung des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit der sich einstellenden plastischen Dehnungsanteile. Die Analyse der Belastungshöhe (Anhang, Tabelle A-1) zeigt deutliche Steigerungen der plastischen Dehnungsanteile bei einer Belastungserhöhung. Diese Plastifizierung im Mehrschichtverbund Karton impliziert Elastizitätsmodulverluste. Zur Minimierung der daraus resultierenden Biegesteifigkeitsverluste sind geringst mögliche Belastungen in MD-Richtung anzustreben.

Im Anhang, Abbildung A-2, sind die normierten Dehnungsanteile in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit dargestellt. Eine Steigerung der Belastungsgeschwindigkeit führt tendenziell zu einer verstärkten Ausbildung von plastischen Dehnungsanteilen.

Des Weiteren lässt sich aus den zyklischen Versuchen zur Entlastungshaltezeit entnehmen (Anhang, Tabelle A-3/Abbildung 4.3), dass diese die E-Modul-Verluste in MD-Richtung mit dem ersten Belastungszyklus massiv beeinflussten.

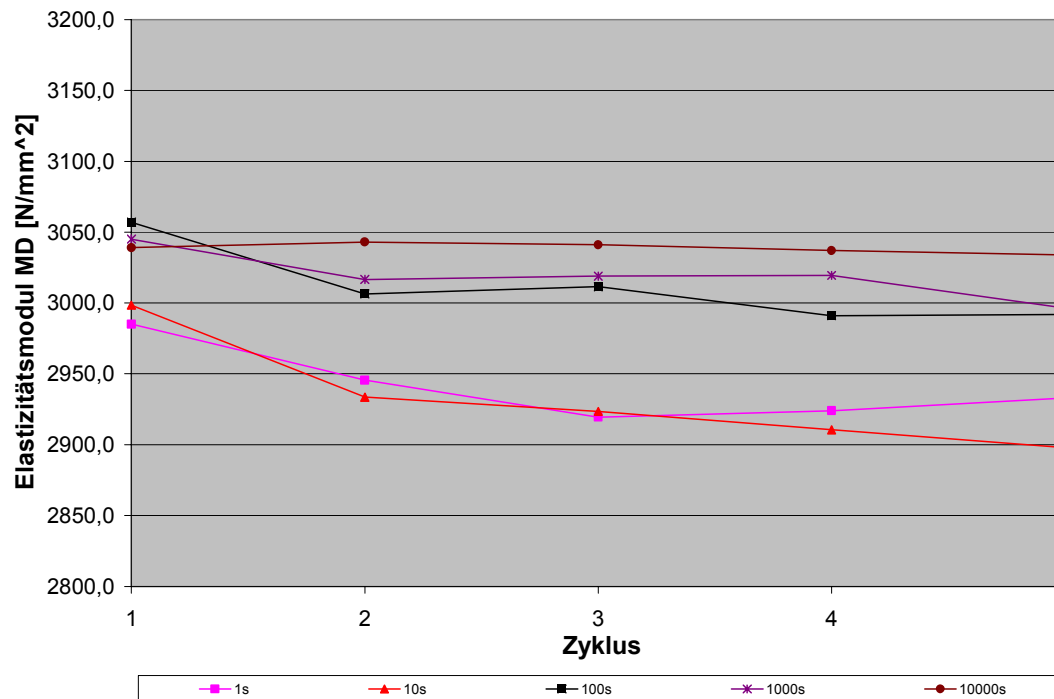


Abbildung 4-3 Elastizitätsmodulentwicklung bei Variation der Entlastungshaltezeit unter zyklischer Zugbeanspruchung

Die Datenreihen zeigen eine eindeutige Minderung des initialen Elastizitätsmoduls von 0,9 – 2,2 % (Abbildung 4-4) in Abhängigkeit der Zyklenanzahl. Der Vergleich unterschiedlicher Entlastungshaltezeiten bestätigt die Abhängigkeit der Elastizitätsmodulveränderung von der Entlastungshistorie.

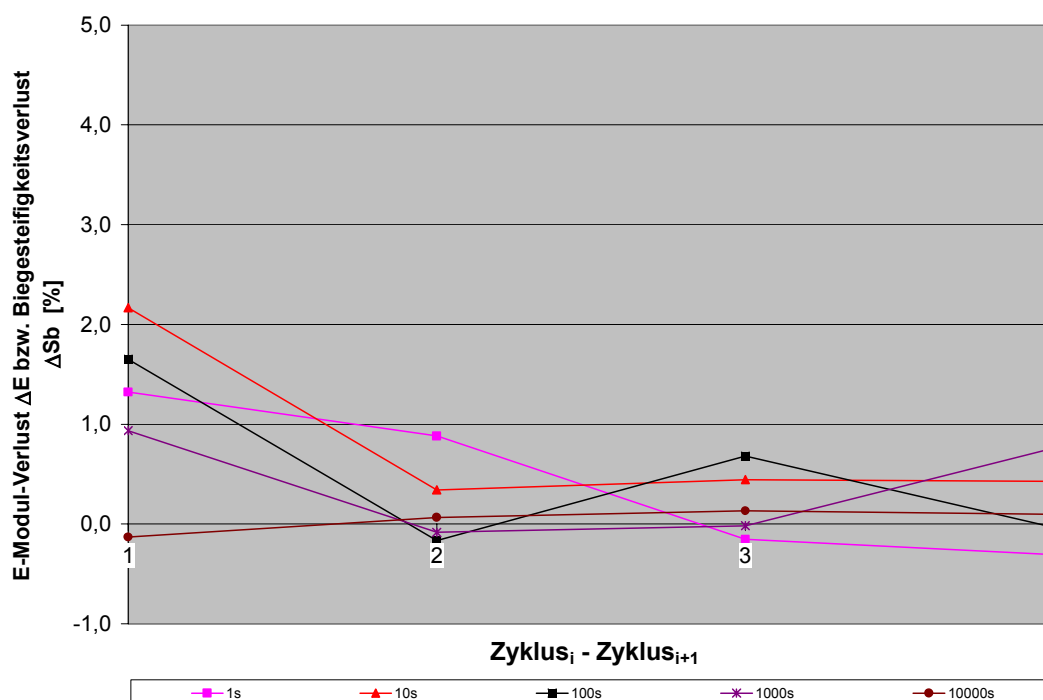


Abbildung 4-4 Elastizitätsmodulverlust bzw. Biegesteifigkeitsverlust bei Variation der Entlastungshaltezeit unter zyklischer Zugbeanspruchung

In Abbildung 4-4 ist der deutliche Verlust an Biegesteifigkeit, verursacht durch den ersten Belastungszyklus in Abhängigkeit der Entlastungshaltezeit, ersichtlich. Geringe Entlastungshaltezeiten führen eindeutig zu einer verstärkten Minderung des  $E_{ini}$  und damit zu einer Erhöhung der Biegesteifigkeitsverluste.

Bedingt durch hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten und die Vielzahl an Be- und Entlastungszyklen innerhalb der Verarbeitungsstrecken (umschlungene Walzen/Walzenpaare) werden die im Verarbeitungsprozess deutlich kürzeren Entlastungshaltezeiten zu einer weiteren Erhöhung der Biegesteifigkeitsverluste führen.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Ausbildung von Biegesteifigkeitsverlusten im Verarbeitungsprozess ist die Belastungshaltezeit.

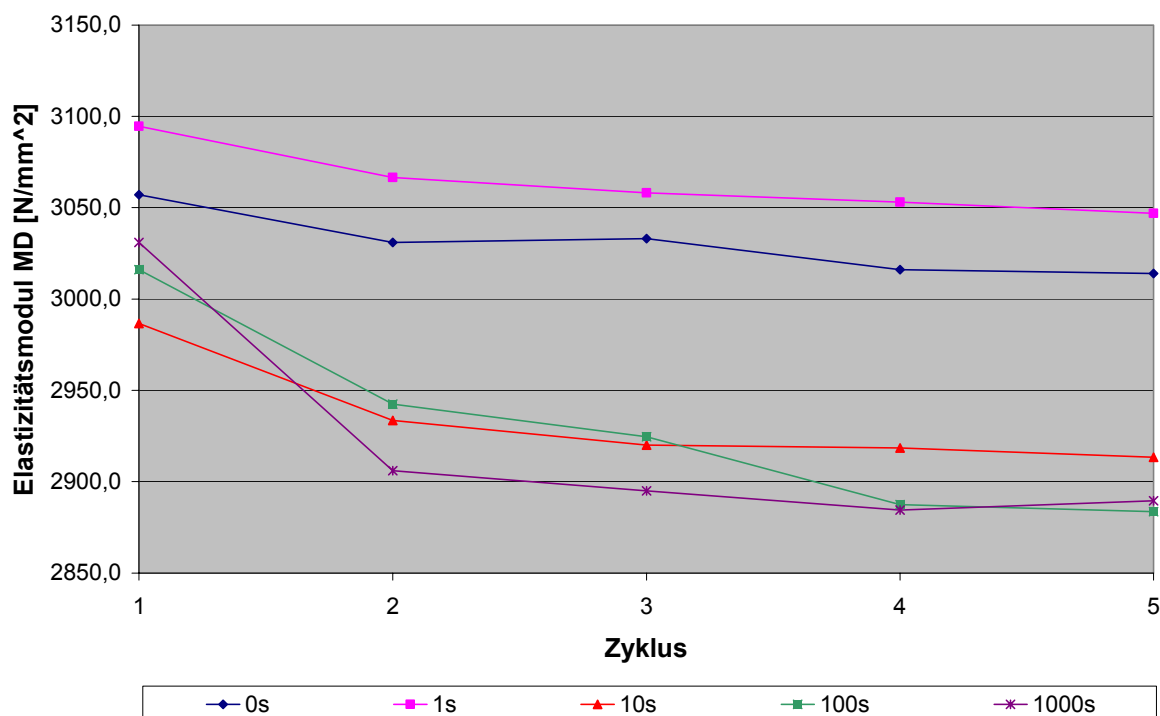


Abbildung 4-5 Elastizitätsmodulentwicklung bei Variation der Belastungshaltezeit unter zyklischer Zugbeanspruchung

Eine direkte Abhängigkeit der Biegesteifigkeitsverluste in MD-Richtung von der Belastungshaltezeit und der Zyklenanzahl wird bei der Betrachtung verschiedener Belastungshaltezeiten (siehe Abbildung 4-5) deutlich.

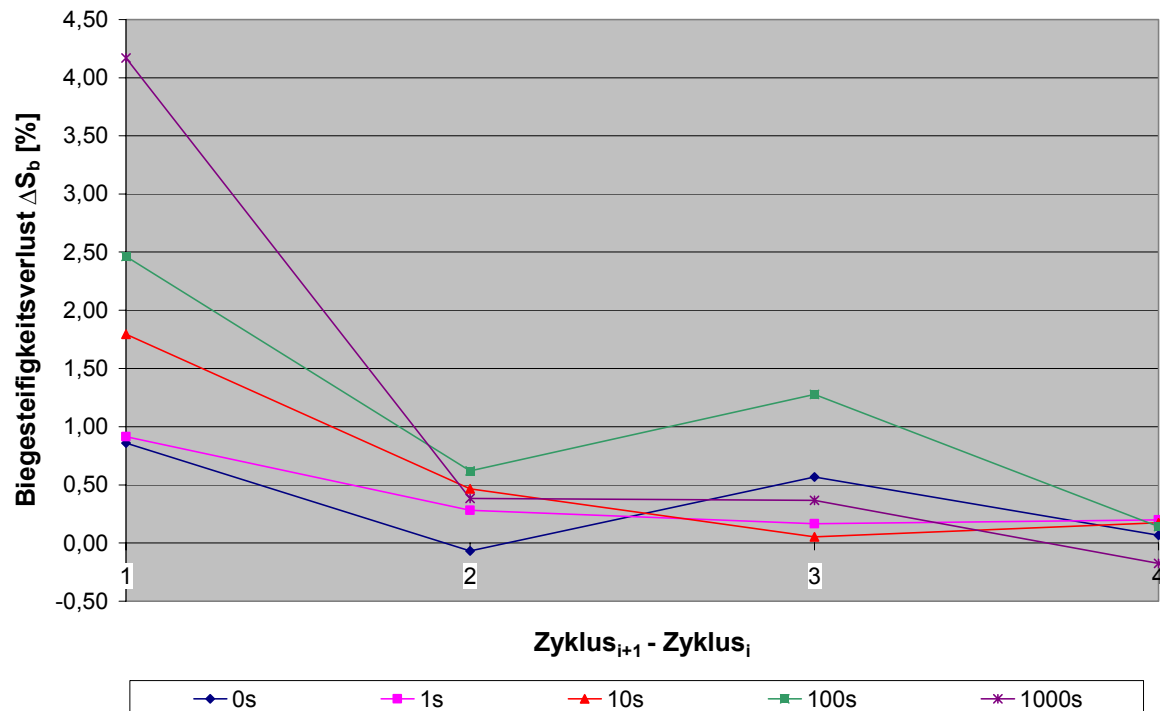


Abbildung 4-6 Elastizitätsmodulverlust bzw. Biegesteifigkeitsverlust bei Variation der Belastungshaltezeit unter zyklischer Zugbeanspruchung

Die prozentuale Minderung des  $E_{ini}$  in MD-Richtung durch aufgebrauchte Zugbelastungen für Belastungshaltezeiten von 0 s – 1000 s beträgt 0,8 % - 4,2 %. Dies entspricht unter Berücksichtigung des linearen Zusammenhangs den prozentualen Biegesteifigkeitsverlusten. Festzustellen ist, dass der erste Belastungszyklus die größte Elastizitätsmodulminderung verursacht. Nachfolgende Belastungen schädigen den Karton im Vergleich zur Erstbelastung nur noch geringfügig.

In Gegensatz zum Parameter Entlastungshaltezeit erhält man hier für höhere Belastungshaltezeiten höhere E-Modul-Verluste und damit höhere Biegesteifigkeitsverluste.

#### 4.4 Einflussfaktoren aus Druckbeanspruchungen

Biegesteifigkeitsverluste werden in diesem Kapitel unter dem Einfluss der Dickenreduzierung betrachtet. Eine mögliche Veränderung des effektiven Elastizitätsmoduls in MD-Richtung durch Druckbelastungen bleibt bei den folgenden Betrachtungen unberücksichtigt. Die im Anhang, Kapitel A.2, dargestellten prozentualen plastischen Dehnungsanteile sind unter Berücksichtigung der daraus resultierenden Dickenverluste ( $\Delta h$ ) und des analytischen Zusammenhangs (7) als Biegesteifigkeitsverluste darstellbar.

Den im Anhang, Tabelle A-5, dokumentierten Versuchsergebnissen ist eine eindeutige Steigerung der plastischen Dehnungsanteile in Abhängigkeit einer Belastungserhöhung zu entnehmen. In Übereinstimmung mit den Erfahrungen aus den Verarbeitungsprozessen ist festzustellen, dass die Belastungshöhe unmittelbaren Einfluss auf die Höhe der Biegesteifigkeitsverluste hat. Die gemessenen plastischen Dehnungen in ZD-Richtung bzw. die daraus resultierenden

Biegesteifigkeitsverluste sind die Grundlage der in Kapitel 4.5 aufgestellten Referenzkurven.

Zunehmende Belastungsgeschwindigkeiten verursachen höhere Biegesteifigkeitsverluste (Anhang, Kapitel A.2.2).

Die Minderung der plastischen Dehnungsanteile bzw. die Reduzierung der Biegesteifigkeitsverluste durch längere Entlastungshaltezeiten konnte in zyklischen Versuchen gezeigt werden (Anhang, Kapitel A.2.3). Ermittelt man daraus die Biegesteifigkeitsverluste, dann zeigen sie sich abnehmend bei steigender Entlastungshaltezeit. Dies überrascht nicht, da die viskoelastischen Anteile rückgebildet werden können.

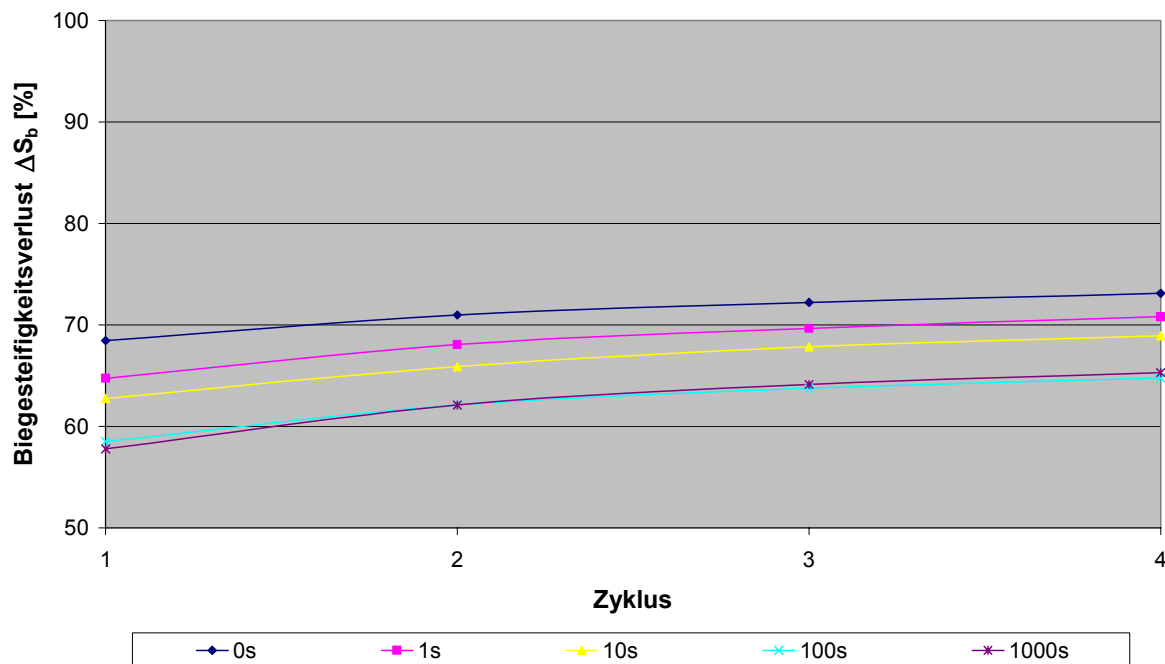


Abbildung 4-7 Biegesteifigkeitsverlust bei Variation der Entlastungshaltezeit unter zyklischer Druckbeanspruchung

Im Verarbeitungsprozess von Karton sind die Entlastungshaltezeiten zwischen den einzelnen Belastungsfällen allerdings deutlich kürzer als in den Laborversuchen, so dass der Rückbildungsmechanismus der viskoelastischen Dehnungsanteile behindert wird und nachfolgende Belastungen vermehrt additive Biegesteifigkeitsverluste unter Berücksichtigung des jeweiligen Spannungsniveaus verursachen.

Im Anhang, Kapitel A.2.4, sind zyklische Druckversuche mit einer Parametervariation der Belastungshaltezeit erläutert. Daraus ist zu entnehmen, dass jeder Belastungszyklus in ZD-Richtung die Biegesteifigkeit von Karton (Abbildung 4-8) mindert.

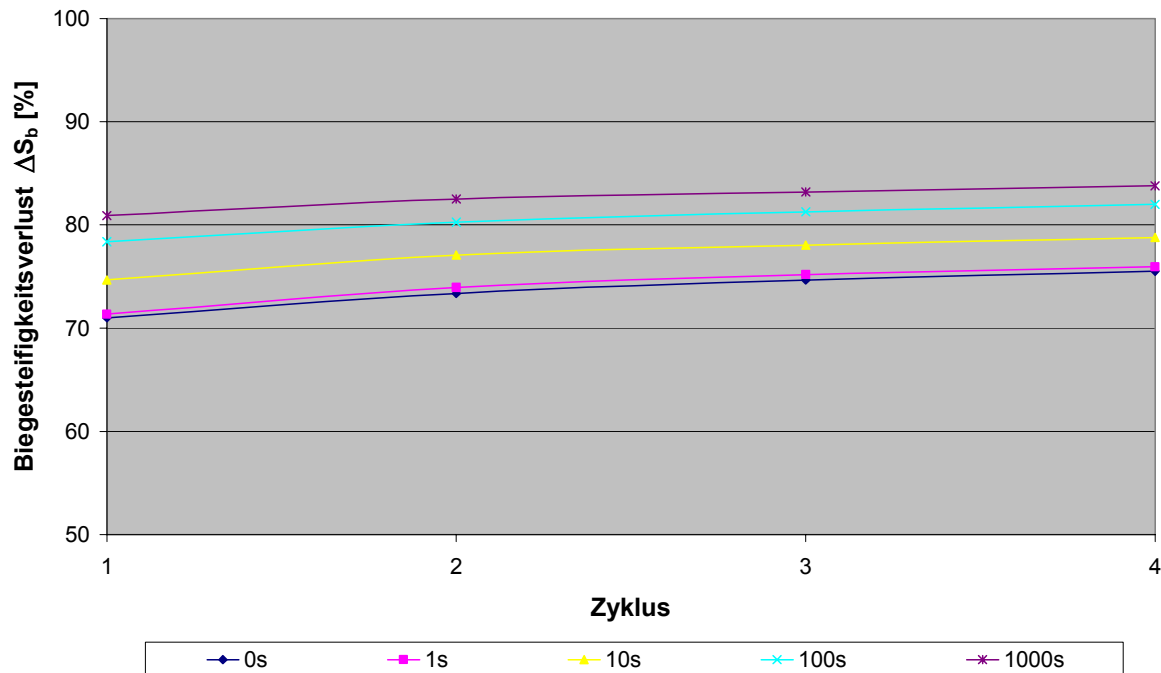


Abbildung 4-8 Biegesteifigkeitsverlust bei Variation der Belastungshaltezeit unter zyklischer Druckbeanspruchung

In Analogie zur Zugbeanspruchung resultiert aus einer zunehmenden Belastungshaltezeit auch ein steigender Biegesteifigkeitsverlust. Dieses Ergebnis erklärt sich aus dem zeitabhängigen Kriechverhalten.

#### 4.5 Sortenabhängige Referenzkurven für Biegesteifigkeitsverluste in Abhängigkeit von Spannungszuständen

Zur quantitativen Bewertung des Einflusses unterschiedlicher Belastungszustände auf die Biegesteifigkeitsverluste ist es empfehlenswert, sogenannte „Referenzkurven“ für die Biegesteifigkeitsentwicklung einer jeweiligen Kartonsorte in Abhängigkeit der Belastungsrichtung und des –zustandes zu ermitteln. Die grundsätzlichen Herleitungen zu den Ursachen von Biegesteifigkeitsverlusten haben gezeigt, dass der Elastizitätsmodul in MD-Richtung und die Blattdicke die primären Einflussparameter auf die Biegesteifigkeit sind. Beim Durchlauf einer Kartonbahn durch den gesamten Verarbeitungsprozess werden beide Größen durch die in den einzelnen Prozessen vorliegenden richtungsabhängigen Belastungszustände reduziert. So verändert sich bei einer Zugbelastung in MD-Richtung der Elastizitätsmodul zu einem durch die Belastung reduzierten effektiven Elastizitätsmodul  $E_{\text{eff}}$ . Stellt man den Zusammenhang zwischen einer aufgetragenen Zugbelastung und dem sich nach Rückbildung der Belastung reduzierten Elastizitätsmodul in MD-Richtung auf, so ergibt sich der in folgender Abbildung dargestellte Zusammenhang.

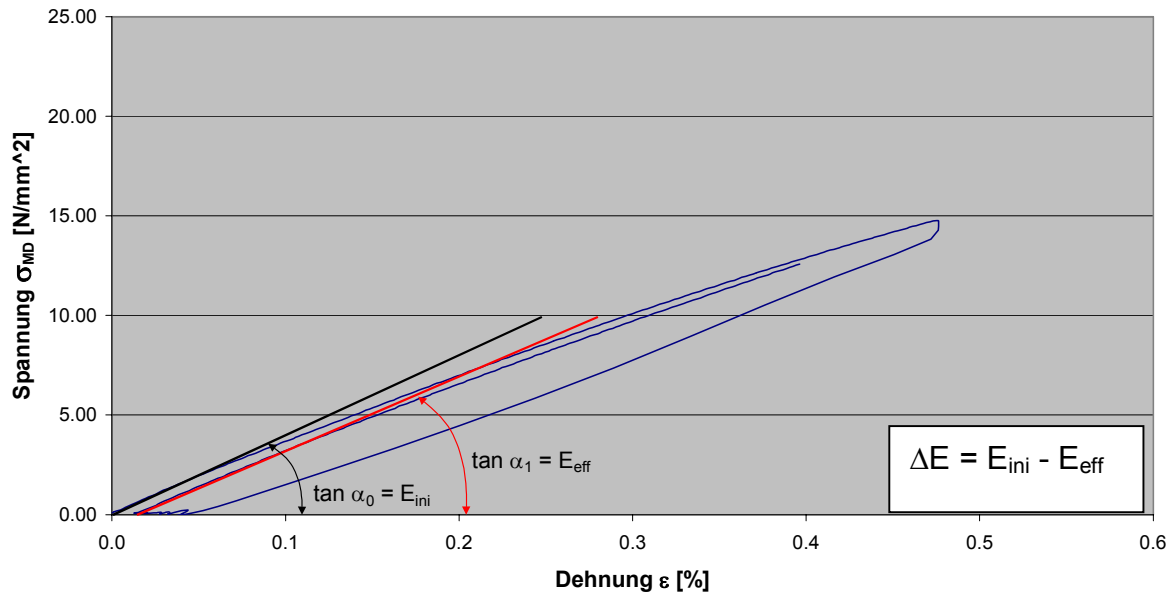


Abbildung 4-9 E-Modul-Verlust aufgrund einer Veränderung des Elastizitätsmoduls nach einer aufgetragenen zyklischen Zugbelastung in MD-Richtung (H1-GC2-300 g/mm<sup>2</sup>)

Der initiale Elastizitätsmodul  $E_{ini}$  entspricht der Steigung ( $\tan \alpha_0$ ) der Spannungs-Dehnungs-Kurve im unbelasteten, initialen Bereich des 1. Zyklus. Entlastet man diese Probe nach voller Belastung wieder, so zeigt sich, dass der Karton im initialen Bereich des 2. Zyklus einen veränderten, reduzierten E-Modul  $E_{eff}$  aufweist, ausgedrückt durch eine geringere Steigung ( $\tan \alpha_1$ ) der Spannungs-Dehnungs-Kurve. An den Stellen an denen Zugbelastungen in Verarbeitungsprozessen einen Elastizitätsmodulverlust in MD-Richtung verursachen, entsteht ein Biegesteifigkeitsverlust.

In ZD-Richtung werden die Biegesteifigkeitsverluste durch einen Dickenverlust nach einer Druckbelastung durch irreversible Dehnungsanteile verursacht.

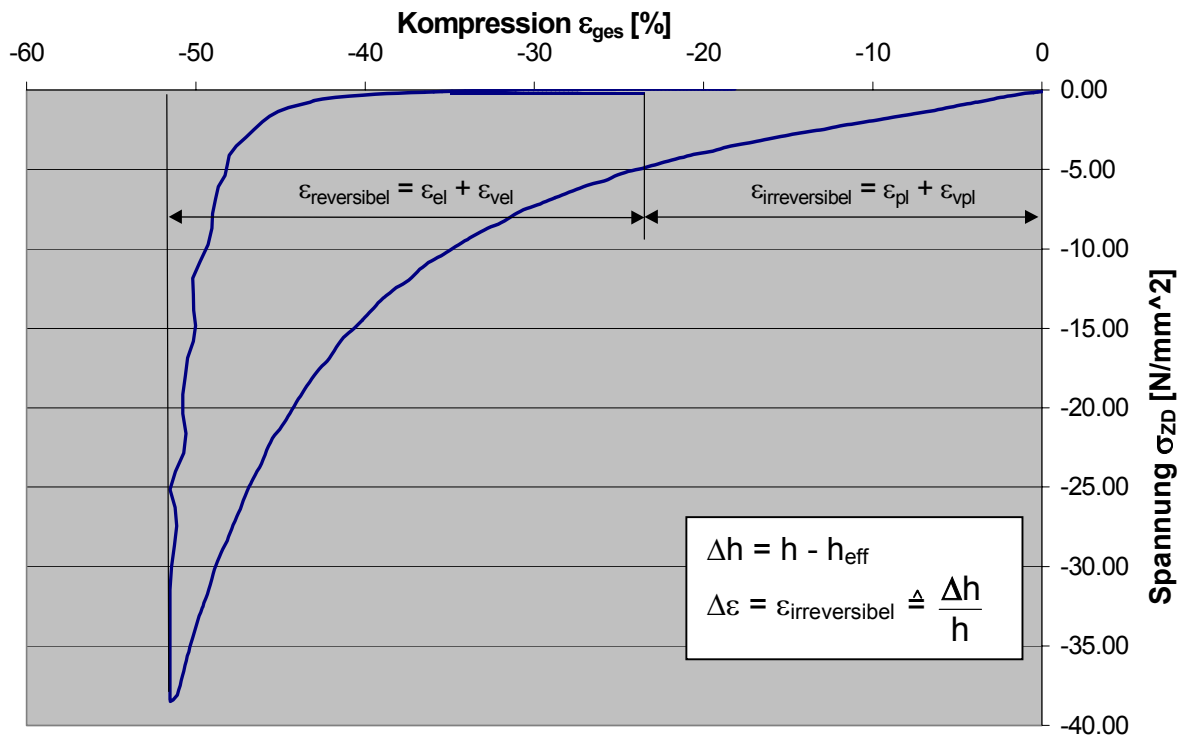


Abbildung 4-10 Dickenverlust aufgrund irreversibler Dehnungsanteile nach einer aufgetragenen Druckbelastung in ZD-Richtung (H1-GC2-300g/mm<sup>2</sup>)

Die sich nach einer Druckbelastung einstellende effektive Blattdicke  $h_{\text{eff}}$ , hervorgerufen durch den irreversiblen Dehnungsverlust  $\Delta \varepsilon$ , hat somit Biegesteifigkeitsverluste zur Folge.

Mit einer additiven Kombination der beiden Verluste  $\Delta E$  und  $\Delta h$  lassen sich direkt die Gesamtbiegesteifigkeitsverluste in den einzelnen Belastungszuständen der Verarbeitungsprozesse bestimmen.

#### 4.5.1 Zugbeanspruchung

Diese Untersuchungen wurden mit dem Ziel durchgeführt, Referenzkurven für den Biegesteifigkeitsverlauf in Folge des E-Modul-Verlustes durch Zugbeanspruchungen zu ermitteln.

Um einen E-Modul-Verlust zu erzeugen, sind Kartonproben mit einer definierten Zugbeanspruchung belastet worden. Für diese Kartonproben wurde vor und nach jeder Zugbeanspruchung die Biegesteifigkeit experimentell gemessen, so dass sich daraus die bei den Zugbeanspruchungen auftretenden Biegesteifigkeitsverluste bestimmen lassen. Hierbei wurde selbstverständlich darauf geachtet, dass sich durch Einhaltung genügender Wartezeiten zwischen den Versuchen, die viskoelastischen Verformungsanteile rückbilden konnten. Es ergibt sich exemplarisch folgende Referenzkurve für die Referenzkartonsorte:

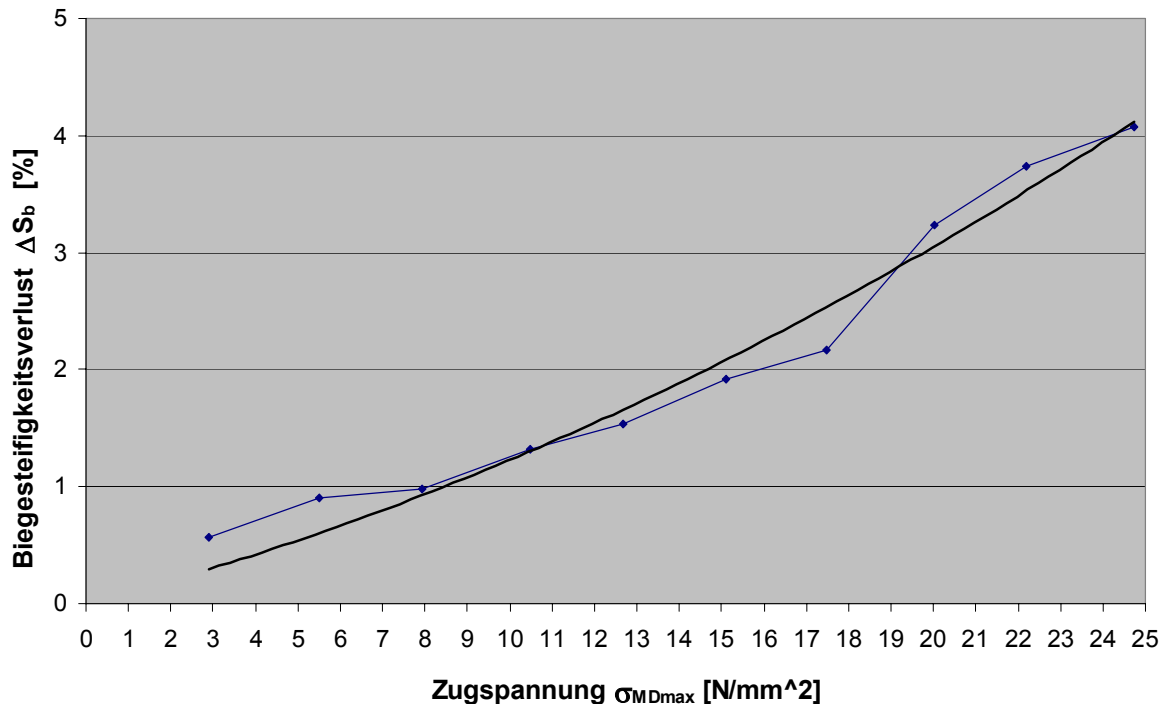


Abbildung 4-11 Experimentell bestimmte Biegesteifigkeitsverluste in Abhängigkeit der Zugbeanspruchung (H1-GC2-300g/m<sup>2</sup>)

Der progressive Verlauf der Biegesteifigkeitsverluste in Abhängigkeit der Zugbeanspruchungen, ausgedrückt durch die, die Kartonprobe belastende Zugspannung  $\sigma_{MDmax}$ , zeigt im Bereich geringer Spannungen minimale Biegesteifigkeitsverluste. Dieses deutet darauf hin, dass bedingt durch das in diesem Bereich vorwiegend elastische Verhalten von Karton minimale bzw. keine E-Modul-Verluste in diesem Zugspannungsbereich in MD-Richtung auftreten. In dem Bereich hoher Zugspannungen ( $\approx 24-25$  N/mm<sup>2</sup>) betragen die maximalen E-Modul-Verluste und damit die Biegesteifigkeitsverluste ca. 4 %. Verifiziert man diese durch direkte Messungen entstandene Referenzkurve über die in diesem Kapitel eingangs beschriebene E-Modul-Differenz, dann zeigt sich, dass unter Zugspannungen die Biegesteifigkeitsverluste primär vom E-Modul-Verlust abhängig sind.

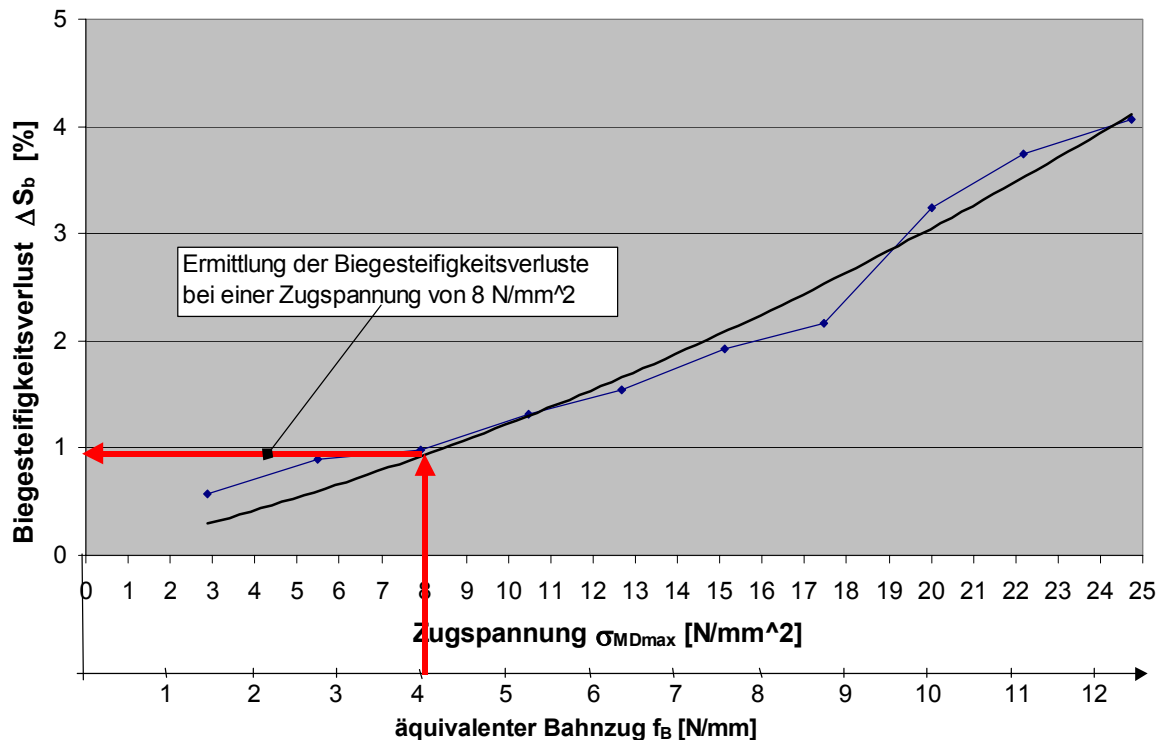


Abbildung 4-12 Experimentell bestimmte Biegesteigkeitsverluste in Abhängigkeit der Zugbeanspruchung und einem der Zugbeanspruchung entsprechenden "äquivalenten Bahnzug" für die Referenzkartonsorte (H1-GC2-300g/m²)

Die in Verarbeitungsprozessen auftretenden Zugspannungen einer Kartonbahn entstehen durch Überlagerung aller Zugspannungsanteile aus Bahntransport, Wickeln usw.. Da aber die Zugspannungen in der Regel nicht bekannt sind, ist in der obigen Abbildung unter Berücksichtigung der Blattdicke eine zusätzliche Abszisse für den Praktiker mit der Größe eines „äquivalenten Bahnzuges“ aufgetragen. Dieser kann stellvertretend für die in einem Verarbeitungsprozess anfallenden und sich überlagernden Zugspannungen betrachtet werden.

Liegt in einem Verarbeitungsprozess z.B. eine Zugspannung von 8 N/mm² an, so lässt sich diese mit der obigen Referenzkurve direkt in einen Biegesteigkeitsverlust für diese Kartonsorte überführen (s. Abbildung 4-12). Für diese Zugspannung und damit für den äquivalenten Bahnzug von 4 N/mm entstehen Biegesteigkeitsverluste von ca. 1 %.

#### 4.5.2 Druckbeanspruchung

In Analogie zu der experimentell ermittelten Referenzkurve für Zugbeanspruchungen in MD-Richtung wurde eine Referenzkurve für Druckbeanspruchungen exemplarisch für die Referenzsorte ermittelt.

Bei diesen Untersuchungen wurden die Kartonproben bis zu unterschiedlichen Kompressionszuständen ganzflächig belastet und anschließend wieder entlastet. Die gewählte Erholungszeit gewährleistete die vollständige Rückbildung der viskoelastischen Dehnungsanteile. Vor und nach einem derartigen Be- und Entlastungsvorgang wurden die Biegesteigkeiten gemessen und daraus die

Biegesteigkeitsverluste ermittelt. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 4-13 als sortenspezifische Referenzkurve:

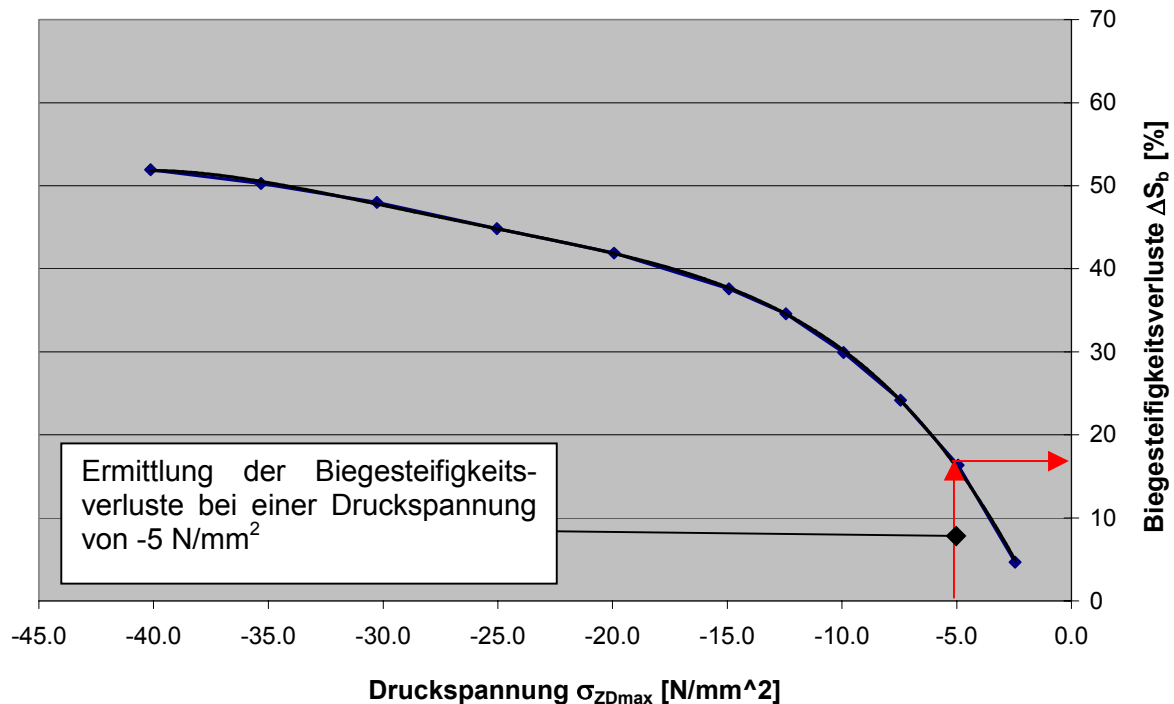


Abbildung 4-13 Experimentell bestimmte Biegesteigkeitsverluste in Abhängigkeit der Druckbeanspruchung (H1-GC2-300g/m²)

In der dargestellten Referenzkurve zeigt sich deutlich der degressive Verlauf mit zunehmendem Dickenverlust, resultierend aus einer Druckbeanspruchung. Erhebliche Verluste der Biegesteifigkeit treten schon bei geringen Druckspannungen auf. Verifiziert man diese Referenzkurve über die oben beschriebene Dickendifferenz, so erhält man deutlich höhere Biegesteigkeitsverluste. Das bedeutet, dass ein Karton unter Druckbeanspruchung nicht allein Volumen verliert, sondern auch verfestigt wird, was die Biegesteigkeitsverluste durch Dickenverlust teilweise kompensiert.

Auch hier ist es zweckmäßig, dem Anwender eine weitere Abszisse mit Praxisbezug zur schnelleren Interpretation anzubieten. Hierbei handelt es sich um die „äquivalente Gesamtkompression“, die zum Beispiel in Form einer Spaltweite am Walzenpaar einer Vorziehpartie eines Querschneiders voreingestellt wird. Sie beinhaltet die elastischen, viskoelastischen und plastischen Dehnungsanteile. Das bedeutet, dass die in der nachfolgenden Abbildung auch dargestellte plastische Kompression den irreversiblen Dickenverlust, der verantwortlich für die Biegesteigkeitsverluste ist, beschreibt.

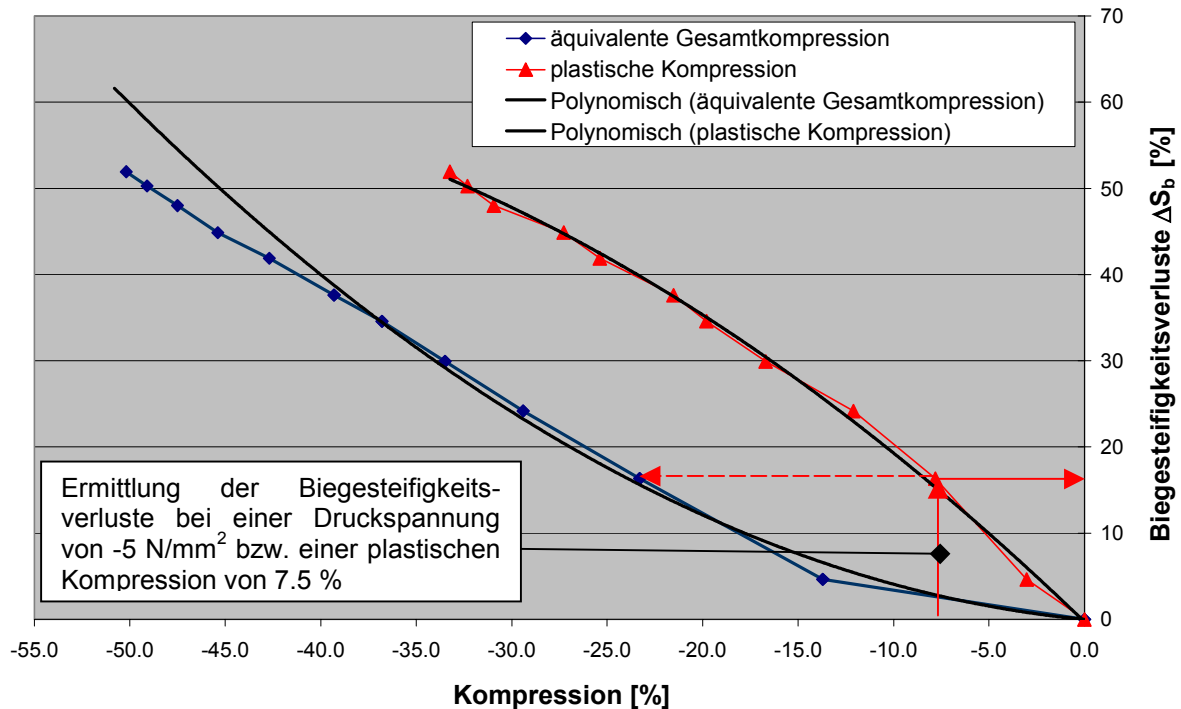


Abbildung 4-14 Experimentell bestimmte Biegesteifigkeitsverluste in Abhängigkeit der plastischen Kompression und der "äquivalenten Gesamtkompression" für die Referenzkartonsorte (H1-GC2-300g/m<sup>2</sup>)

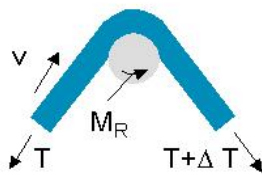
Aus diesen sortenabhängigen Referenzkurven für Belastungen in ZD-Richtung lassen sich somit direkt Biegesteifigkeitsverluste für relevante Verarbeitungsfunktionen ermitteln. Liegt zum Beispiel in einem Verarbeitungsprozess eine Druckspannung von  $-5 \text{ N/mm}^2$  in ZD-Richtung vor (Abbildung 4-13), so entstehen dabei Biegesteifigkeitsverluste von ca. 18 %. Diese Biegesteifigkeitsverluste ergeben sich nach der Probenentlastung aus der dann messbaren plastischen Kompression von 7,5 %. Diesem Kompressionswert lässt sich unmittelbar die äquivalente Gesamtkompression mit einem Wert von 23 % zuordnen.

Fasst man die beiden Biegesteifigkeitsverlustanteile aufgrund von Zugbeanspruchungen in MD-Richtung (Abbildung 4-11) und Druckbeanspruchungen in ZD-Richtung (Abbildung 4-13) additiv zusammen, so können daraus die Gesamtverluste für jeden kombinierten Belastungsfall berechnet werden. Diese Vorgehensweise wird bei den im Kapitel 5 zu den Verarbeitungsprozessen durchgeführten Simulationsrechnungen zu Grunde gelegt, sodass die Biegesteifigkeitsverluste für die in den einzelnen Verarbeitungsprozessen auftretenden mehrachsigen Spannungszustände bestimmt werden können.

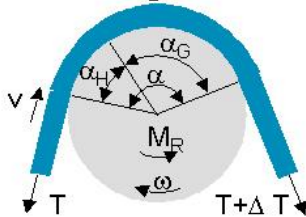
## 5 Analyse der Biegesteifigkeitsverluste von Karton in Verarbeitungsprozessen

Ausgehend von den Erkenntnissen zu den grundlegenden Einflüssen auf die Biegesteifigkeitsverluste werden in diesem Kapitel die Untersuchungen zur Analyse der Verarbeitungsprozesse vorgestellt. Grundlage zur Auswahl und Festlegung des Analyseumfangs sind die in der Kartonausrüstung auftretenden Verarbeitungsprozesse (Bahntransport, Wickeln, Stapeln, Lagern) mit ihren Einflussparametern, die in den nachfolgenden Abbildungen 5-1 bis 5-4 dargestellt sind.

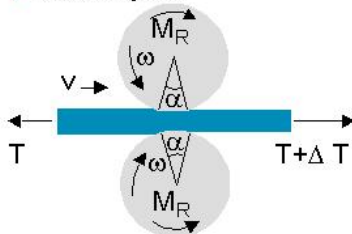
### ► Rakel



### ► umschlungene Walze



### ► Walzenpaar



### ► Parameter

- **Prozessparameter**
    - Bahnzug
    - Drehmoment
    - Geschwindigkeit
  - **Maschinenparameter**
    - Walzendurchm., -belag
    - Bahnumschlingung
  - **Materialparameter**
    - Reibbeiwert
    - Spannungs-Dehnungsverhalten
- 
- **Prozessparameter**
    - Bahnzug
    - Drehmoment
    - Geschwindigkeit
  - **Maschinenparameter**
    - Walzendurchm., -belag
    - Bahnumschlingung
  - **Materialparameter**
    - Reibbeiwert
    - Spannungs-Dehnungsverhalten
- 
- **Prozessparameter**
    - Bahnzug
    - Linienkraft
    - Drehmoment
    - Geschwindigkeit
  - **Maschinenparameter**
    - Walzendurchm., -belag
    - Bahnführung
  - **Materialparameter**
    - Reibbeiwert
    - Spannungs-Dehnungsverhalten

### ► Ergebnis

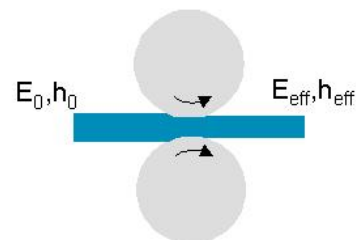
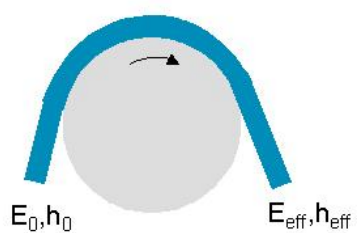
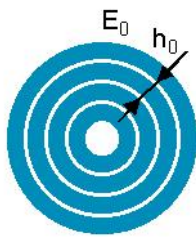


Abbildung 5-1 Verarbeitungsprozess Bahntransport

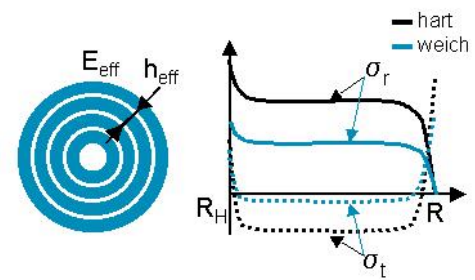
## ► Wickel



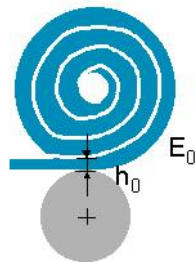
## ► Parameter

- **Prozessparameter**
  - Bahnzug
  - Drehmomentdifferenz
  - Linienkraft
  - Geschwindigkeit
- **Maschinenparameter**
  - Walzendurchm., -belag
  - Bahnführung
- **Materialparameter**
  - Reibbeiwert
  - Spannungs-Dehnungsverhalten
- **Hülsenparameter**
  - Durchm., E-Modul

## ► Ergebnis



## ► Nip



- **Prozessparameter**
  - Linienkraft
  - Geschwindigkeit
- **Maschinenparameter**
  - Walzendurchm., -belag
  - Anordnung Wickel-Walze
- **Materialparameter**
  - Reibbeiwert
  - Spannungs-Dehnungsverhalten
- **Rollenparameter**
  - Durchmesser, Rollenstärke

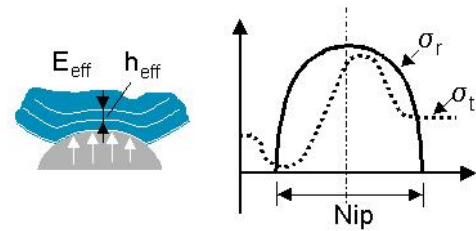
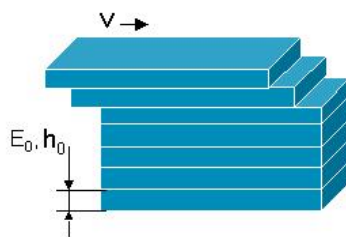


Abbildung 5-2 Verarbeitungsprozess Wickeln

## ► Bögen stapeln



## ► Parameter

- **Prozessparameter**
  - Stapeldruck
  - Einwirkzeit
  - Geschwindigkeit
- **Maschinenparameter**
  - Stapelvorgang
- **Materialparameter**
  - Spannungs-Dehnungsverhalten
  - Grammatur

## ► Ergebnis

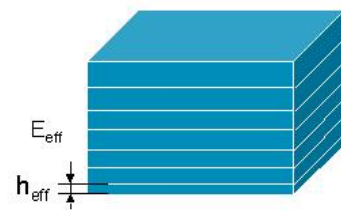


Abbildung 5-3 Verarbeitungsprozess Stapeln

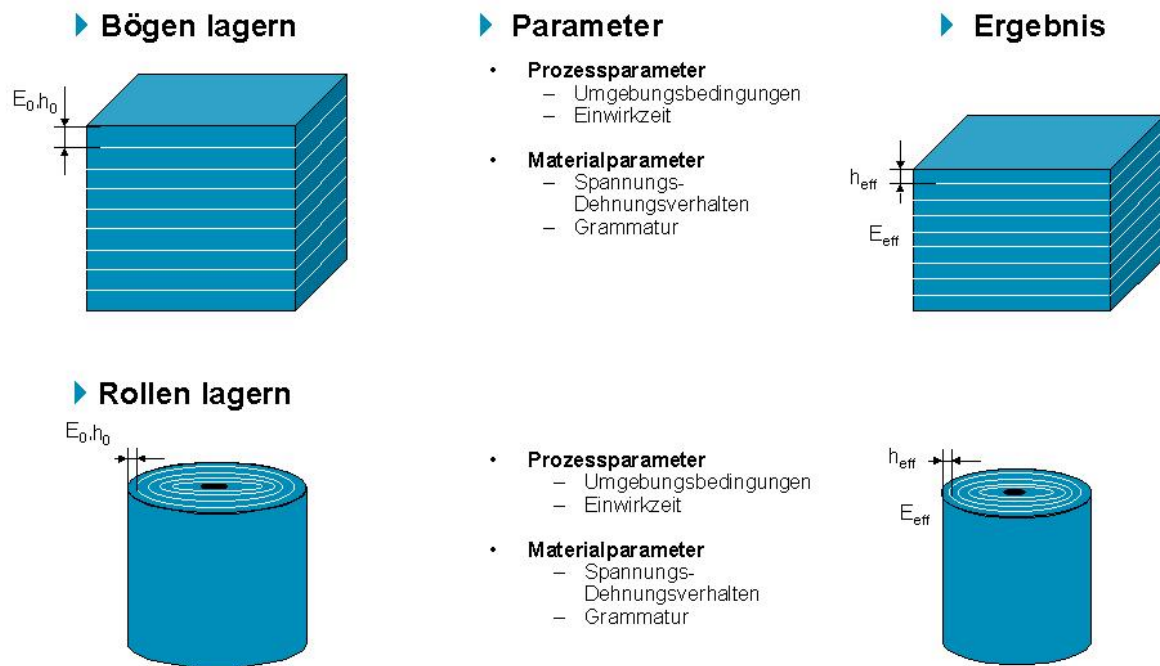


Abbildung 5-4 Verarbeitungsprozess Lagern

Zur Einschränkung der Analyse auf einen angemessenen Umfang wurde einerseits eine systematische und qualitativ ausgerichtete Vorbewertung aller einflussnehmenden Parameter auf die Biegesteifigkeit mit dem Ziel einer Prioritätenbildung unter Einbindung der Projektbegleiter vorgenommen. Andererseits wurde Wert darauf gelegt, experimentelle Einzelergebnisse durch numerische Parameterstudien zu begründen, um diese verallgemeinern zu können. Vor diesem Hintergrund wurde die Analyse auf den in Abbildung 5-5 dargestellten Umfang begrenzt, der hier aus der Sicht der numerischen Untersuchungen angegeben ist.

| Modellbildung |                                                                                     | Einflussparameter   | Größe                                     | Einheit  |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------|----------|
| Bahntransport |  | Bahnzug             | 1,5; 3,0; 4,5                             | N/mm     |
|               |  | Umschlingungswinkel | 0 - 45                                    | Grad     |
|               |  | Durchmesser         | 30; 60; 85; 120                           | mm       |
| Wickeln       |  | Bahnzug             | 0 - 3                                     | N/mm     |
|               |  | Linienkraft         | 0 - 12                                    | N/mm     |
|               |  | Walzenpaarungen     | 200/200<br>300/300<br>500/500<br>1000/750 | mm       |
| Lagern        |  | Walzenbelag         | $E_{B1}=24.5$ ; $E_{B2}=58$               | $N/mm^2$ |
|               |  | Bahnzug             | 0 - 3                                     | N/mm     |
|               |  | Wickeldurchmesser   | bis 1100                                  | mm       |
| Lagern        |  | Linienkraft         | 0 - 5                                     | N/mm     |
|               |  | Walzenbelag         | $E_{B1}=24.5$ ; $E_{B2}=58$               | $N/mm^2$ |
|               |  | Stapelhöhe          | 0 - 3                                     | m        |

Abbildung 5-5 Analyseumfang

### 5.1 Versuchstechnik

Der Wickelversuchsstand des LMK wurde zur Untersuchung der Verarbeitungsprozesse Bahntransport und Wickeln eingesetzt. Unterstützt durch Abbildung 5-6 lässt sich der Funktionsumfang wie folgt beschreiben.

Der Karton wird von einer Abrollung kommend über mehrere Umlenkrollen auf einen Wickelkern aufgewickelt. Eine dieser Umlenkrollen ist zur Erfassung des Bahnzuges mit Dehnungsmessstreifen ausgestattet. Die Aufwicklung erfolgt auf einem vertikal verschiebbaren Wickelkern. Als Wickelkern dient hier eine Stahlscheibe. Das Antriebsmoment wird an der Stützwalze eingeleitet. Des Weiteren ist es möglich, über eine Entlastung des Wickels unterschiedliche Linienkräfte in der Kontaktzone zwischen Wickel und Stützwalze zu erzeugen.

Um die Einflüsse unterschiedlicher Bahntransport-Varianten untersuchen zu können, lässt sich zum einen die Bahnführung variieren und es lassen sich zum anderen Umlenkrollen austauschen oder entfernen.

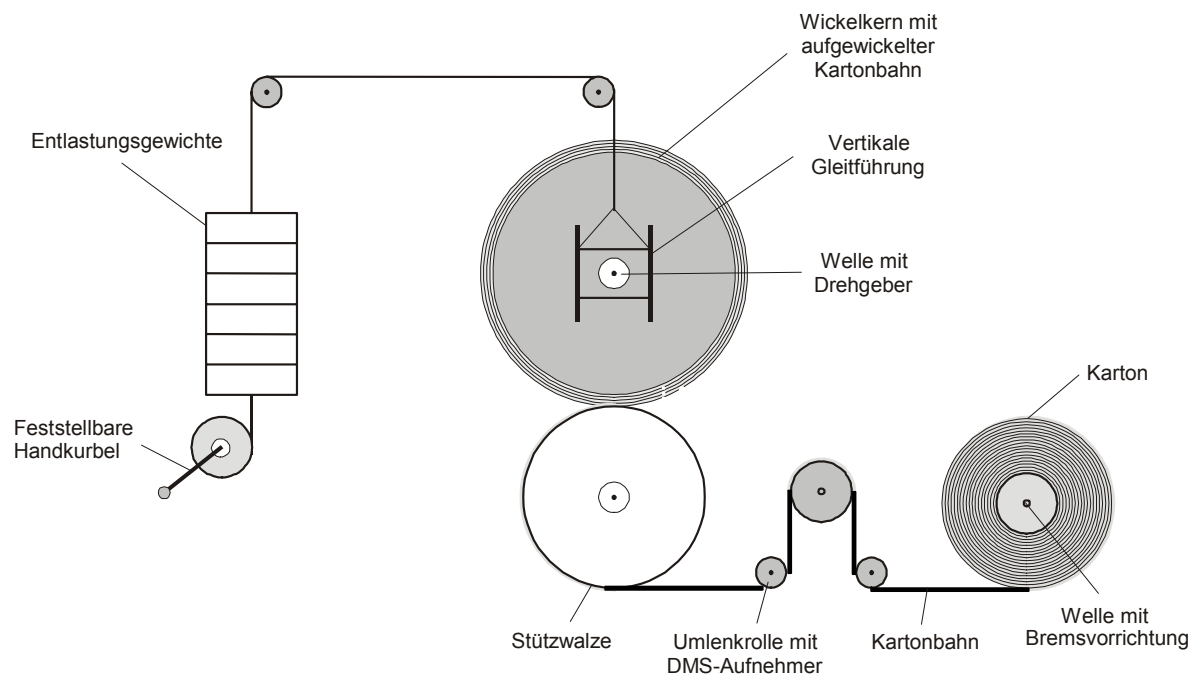


Abbildung 5-6 Schematischer Aufbau des Wickelversuchsstandes



Abbildung 5-7 Ansicht des Wickelversuchsstandes

Folgende technischen Daten kennzeichnen den Versuchsstand:

Wickelgeometrie:

|                        |      |    |
|------------------------|------|----|
| Stützwalzendurchmesser | 750  | mm |
| Wickelkerndurchmesser  | 1000 | mm |
| Breite der Papierbahn  | 135  | mm |

Betriebsparameter:

|             |          |      |
|-------------|----------|------|
| Bahnzug     | 0 – 3    | N/mm |
| Linienkraft | 0 – 18.3 | N/mm |

Abbildung 5-7 zeigt zur weiteren Verdeutlichung eine Ansicht der Anlage mit ihrer messtechnischen Ausstattung.

## 5.2 Bahntransport

Wie sich in der Vorbewertung gezeigt hat, sind alle Maschinenkomponenten, die im Bahntransport angeordnet sind, für die Biegesteifigkeitsbetrachtungen von großer Bedeutung. In diesem Abschnitt werden deshalb bahnumschlungene Walzen, Rakel und Walzenpaare untersucht.

### 5.2.1 Umschlungene Walze

Der untersuchte Rakel besitzt einen Durchmesser von 30 mm. Die untersuchten Leitwalzendurchmesser betragen gemäß Abbildung 5-5 60, 85 und 120 mm. In der folgenden Abbildung ist die Modellierungsgrundlage für die FEM-Berechnungen dargestellt.

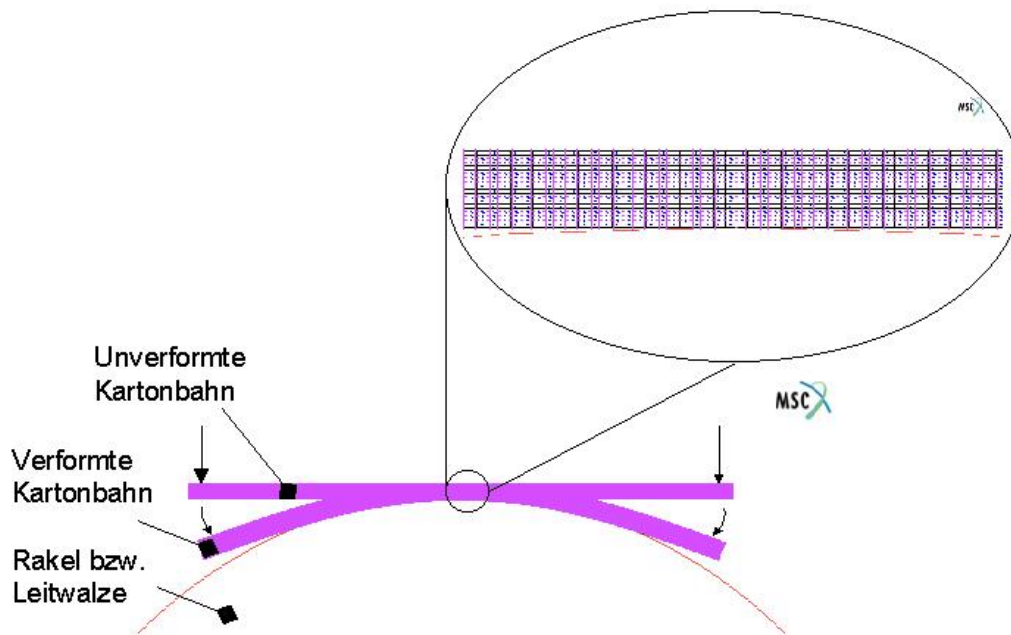


Abbildung 5-8 FEM-Modell umschlungene Walze

Im unbelasteten Zustand kontaktiert die unverformte Kartonbahn den Rakel bzw. die Leitwalze. Die Umschlingung der Kartonbahn wird durch Vorgabe der Verschiebung der freien Bahnenden in Richtung der Walze erzeugt. Zusätzlich zur Verschiebung der Bahnenden werden diese mit einer Zugspannung beaufschlagt, um so einen Bahnzug zu simulieren. In diesem belasteten Zustand werden die Spannungs- und Dehnungszustände über dem Bahnquerschnitt errechnet.

Die Spannungen in MD-Richtung würden sich bei linearem Werkstoffverhalten, wie in Abbildung 5-9 dargestellt, überlagern.

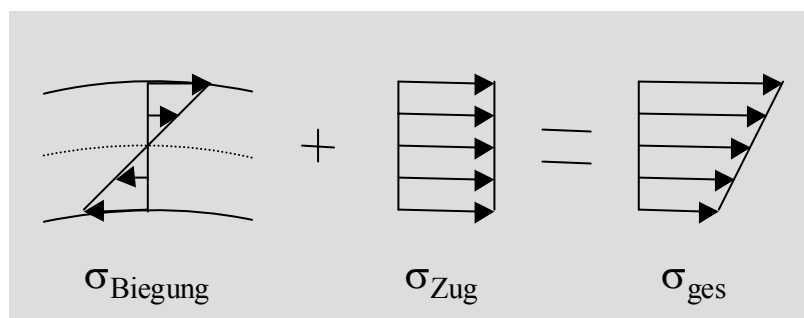


Abbildung 5-9 Biegespannung überlagert mit Bahnzug

Unter Berücksichtigung des nichtlinearen Verhaltens von Karton wird der Biegespannungsverlauf im Hinblick auf die maximalen Spannungen und die Überlagerungen von Zugspannungen aus Bahnzug und Biegung gravierend beeinflusst. Abbildung 5-10 zeigt diesen Zusammenhang für einen umschlungenen Rakel mit einem Durchmesser von 30 mm unter Variation des angelegten Bahnzuges für den Fall des Einschicht-Material-Modells M1.

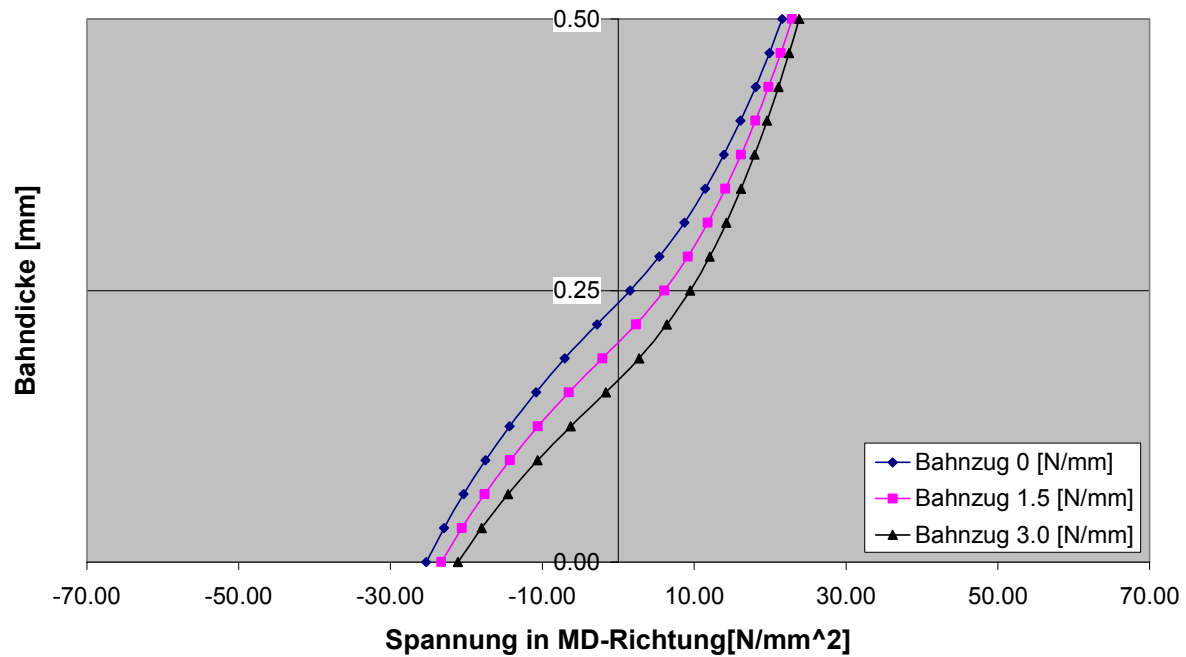


Abbildung 5-10 Spannung in MD-Richtung für Raket Ø 30 mm (Umschlingungswinkel 10° und Modellierung der Kartonbahn als Einschicht-Material M1)

Bei einer Modellierung der Kartonbahn als geschichtetes Material (Modelle M2 und M3) haben die Spannungen in MD-Richtung einen stark schichtabhängigen Verlauf, obwohl der Dehnungszustand der gleiche ist.

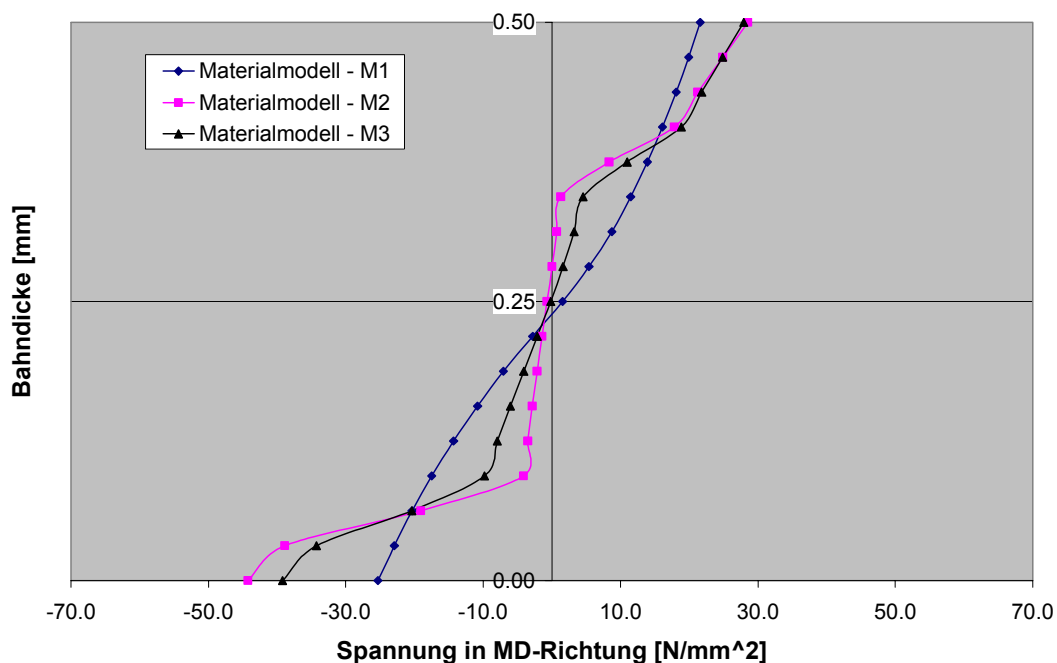


Abbildung 5-11 Spannung in MD-Richtung für Raket Ø 30 mm (Umschlingungswinkel 10°, Modellierung der Kartonbahn als Einschicht-Material M1 und Mehrschicht-Material M2 und M3, Bahnzug = 0 N/mm)

Anhand der voranstehenden Abbildung lässt sich erkennen, dass aufgrund des steiferen Materialverhaltens in der Deckschicht und im Rücken höhere Spannungen gegenüber der Einschicht-Modellierung auftreten. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Deck- und Rückenschicht durch ihr steiferes Werkstoffverhalten auch eine höhere Bruchspannung besitzen. Hieraus ist ein erster wichtiger Hinweis abzuleiten, nämlich der, dass zur verlässlichen Beurteilung des Biegeverhaltens von Karton, eine realitätsnahe Modellierung unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens und der Schichtigkeit erforderlich ist. Im Rahmen dieses Projektes musste allerdings auf die weitere Vertiefung des Schichteinflusses verzichtet werden.

Untersucht man die Spannungsverläufe bei unterschiedlichen Umschlingungswinkeln, so erkennt man, dass die maximalen Zugspannungen in der Deckschicht mit zunehmendem Umschlingungswinkel ansteigen (Abbildung 5-12). Erst ab einem Umschlingungswinkel von  $20^\circ$  Grad stellt sich für die Spannungen ein Grenzwert ein, der bei weiter zunehmendem Umschlingungswinkel nicht mehr wesentlich ansteigt. Daraus lässt sich schließen, dass der E-Modul-Verlust, resultierend aus Zugspannungen in MD-Richtung, und damit der Biegesteifigkeitsverlust bereits bei kleinen Umschlingungswinkeln seinen Grenzwert erreicht.

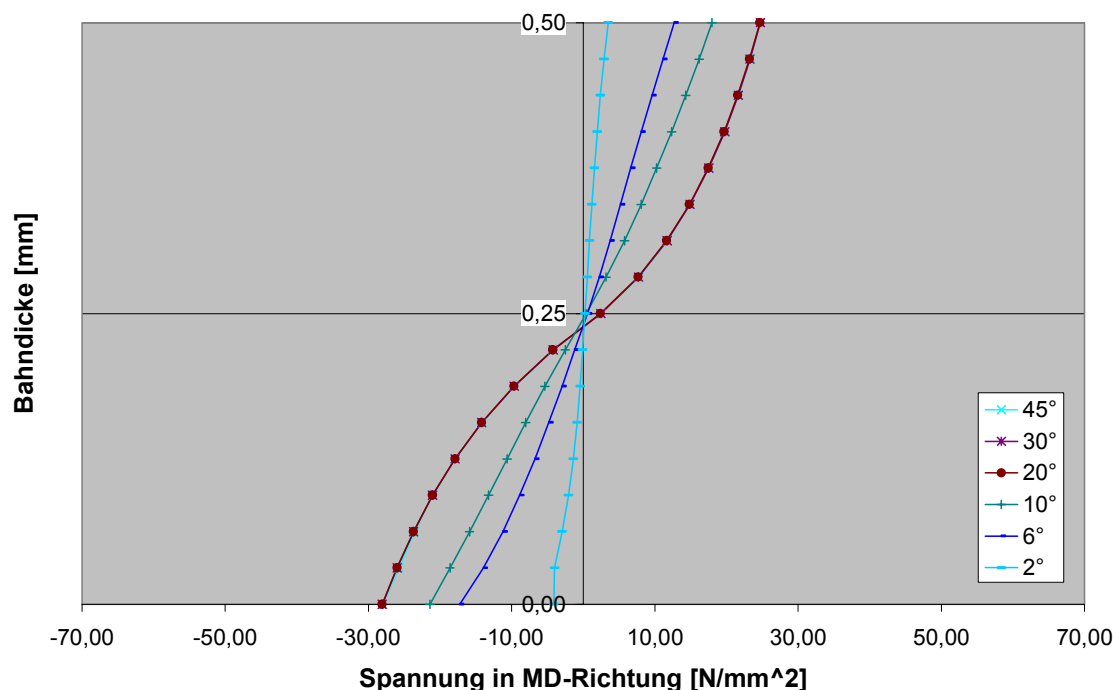


Abbildung 5-12 Verlauf der Spannung in MD-Richtung für Raket Ø 30 mm (unterschiedliche Umschlingungswinkel und Modellierung der Kartonbahn als Einschicht-Material M1, Bahnzug = 0 N/mm)

Bei Walzen mit größerem Durchmesser stellt sich der Spannungsgrenzwert und damit auch der Grenzwert der Biegesteifigkeitsverluste schon bei kleineren Umschlingungswinkeln ein. Darüber hinaus sind die Spannungsniveaus in MD-Richtung aufgrund der geringeren Krümmung der Bahn hier niedriger (Abbildung 5-13).

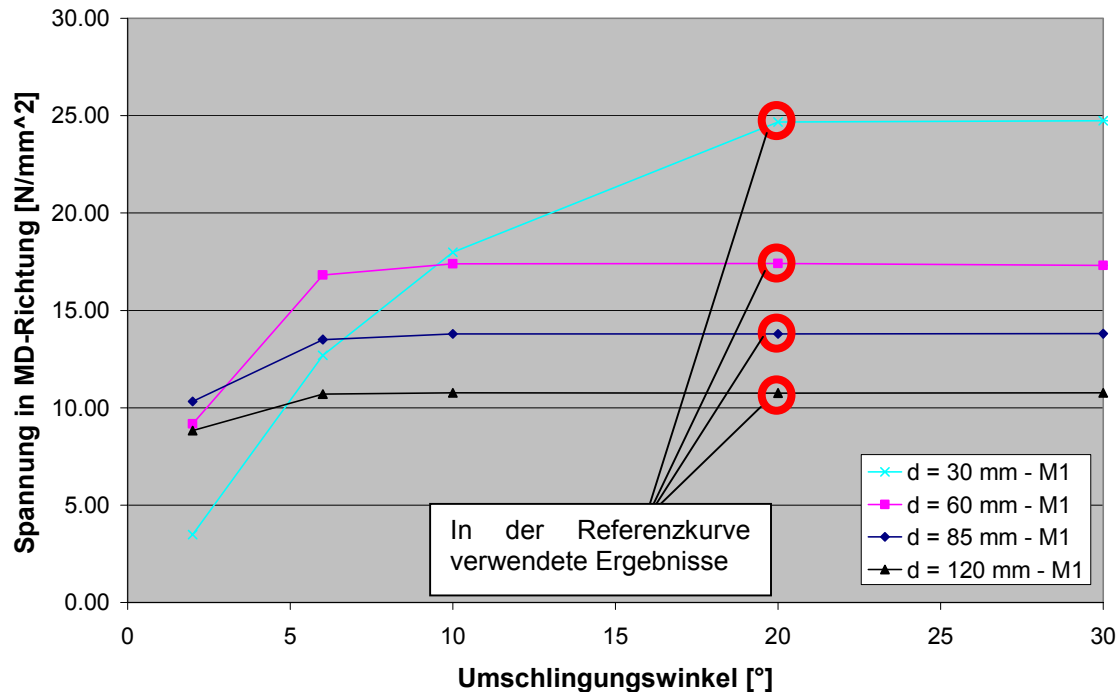


Abbildung 5-13 Verlauf der Spannungen in MD-Richtung in Abhängigkeit vom Walzendurchmesser und Umschlingungswinkel bei Modellierung der Kartonbahn als Einschicht-Material M1, Bahnzug = 0 N/mm

Aus diesen mit der FEM-Methode berechneten Spannungen in MD-Richtung lassen sich mit Hilfe der im Kapitel 4.5.1 ermittelten sortenabhängigen Referenzkurven die Biegesteifigkeitsverluste dieses Verarbeitungsprozesses resultierend aus den E-Modul-Verlusten in MD-Richtung bestimmen. Biegesteifigkeitsverluste aufgrund von Dickenverlusten in ZD-Richtung können vernachlässigt werden, da die ermittelten Verformungen in ZD-Richtung vernachlässigbar klein sind. Daher resultieren in diesem Verarbeitungsprozess die Gesamtbiegesteifigkeitsverluste lediglich aus einem Verlust des E-Moduls in MD-Richtung. Trägt man die in der Abbildung 5-13 eingekreisten Zustandspunkte in die Referenzkurve für die Biegesteifigkeitsverluste ein, so ergibt sich der in Abbildung 5-14 dargestellte Zusammenhang.

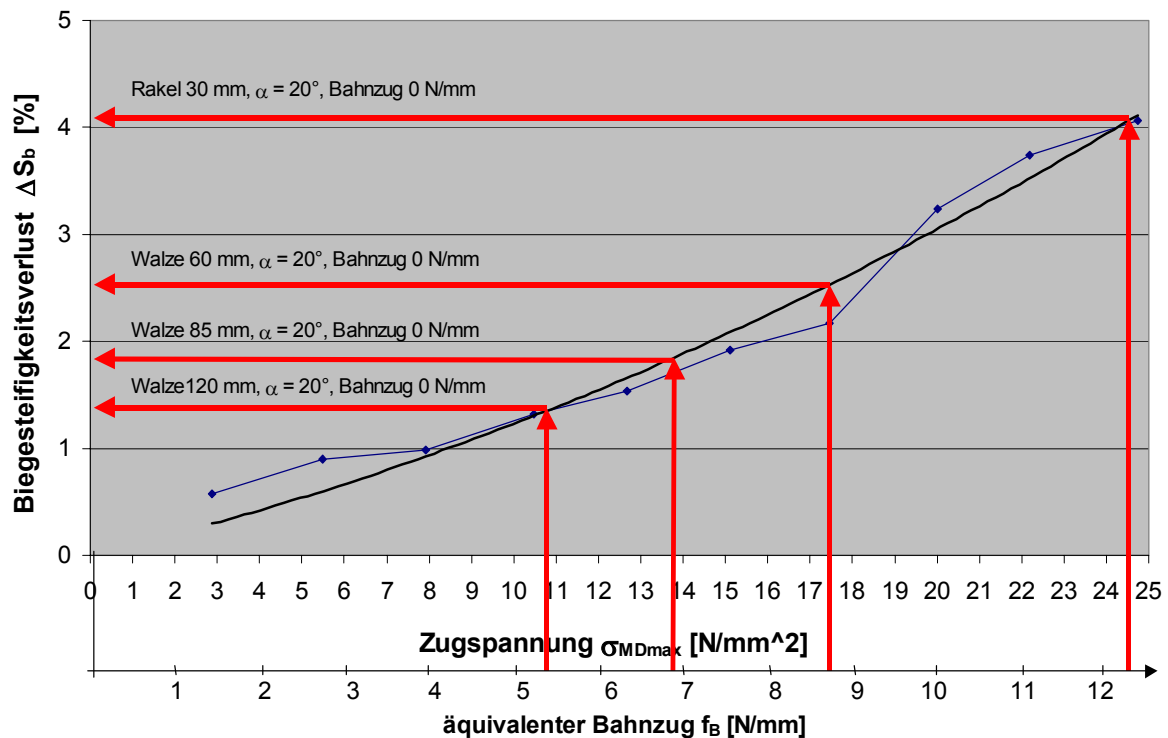


Abbildung 5-14 Biegesteifigkeitsverluste bei umschlungenen Walzen

Die eingetragenen Zustandspunkte repräsentieren die Spannungsgrenzwerte in MD-Richtung, die sich bei den unterschiedlichen Walzendurchmesser ergeben haben. Diese Spannungsgrenzwerte stehen für die maximalen Spannungen der einzelnen Durchmesservariationen und damit für die maximalen Biegesteifigkeitsverluste. Diese liegen bei umschlungenen Walzen in einem Bereich zwischen 1.5 – 4.1 % für die Berechnung ohne Bahnzug. Bei der Berücksichtigung eines Bahnzuges müsste der entsprechende Betrag über die Achse des äquivalenten Bahnzuges berücksichtigt werden. Die dargestellten Ergebnisse zeigen die größten Biegesteifigkeitsverluste beim Rakel. Je größer der Walzendurchmesser ist, desto geringer werden die Biegesteifigkeitsverluste bei gleichem Umschlingungswinkel. Zur Verifikation der Berechnung wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Als Kartonsorte stand hierfür ein GC2 vom Hersteller H1 zur Verfügung, welcher im Gegensatz zur simulierten Bahn ( $300 \text{ g/mm}^2$ ) ein Flächengewicht von  $350 \text{ g/mm}^2$  aufwies. Dieser Unterschied ist bei der Interpretation aller experimentellen Ergebnisse zu berücksichtigen.

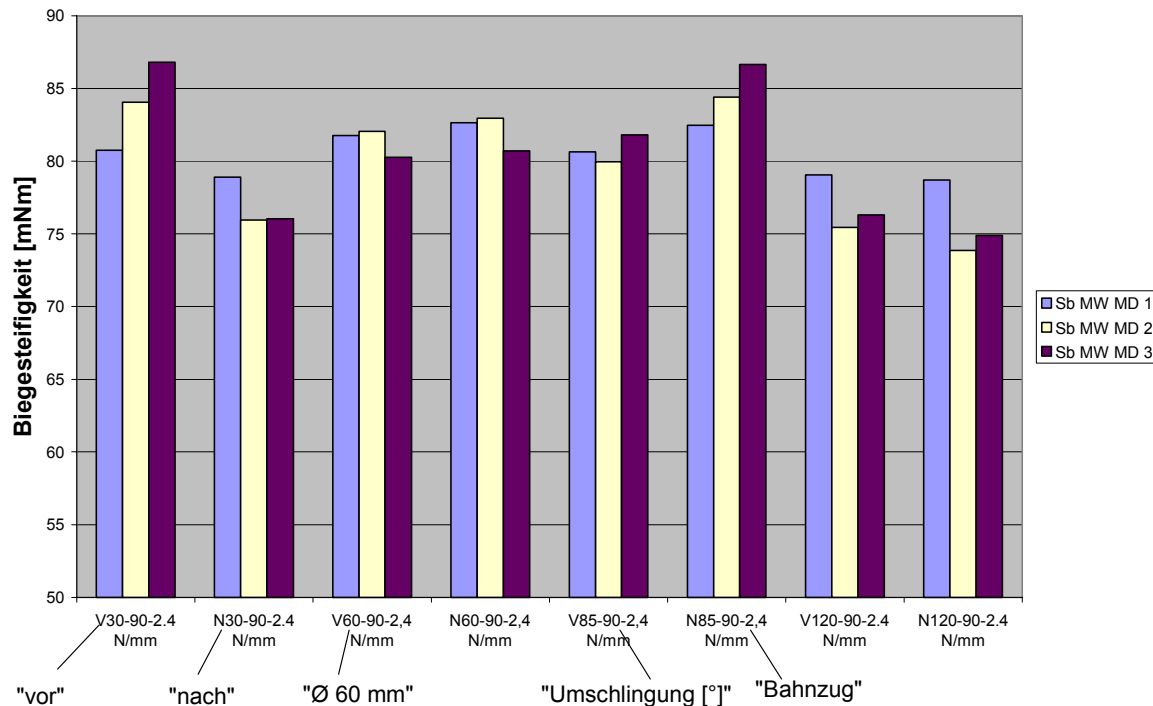


Abbildung 5-15 Biegesteifigkeitsverhalten an umschlungenen Walzen (Durchmesservariation von 30 - 120 mm/H1-GC2/350g/m<sup>2</sup>)

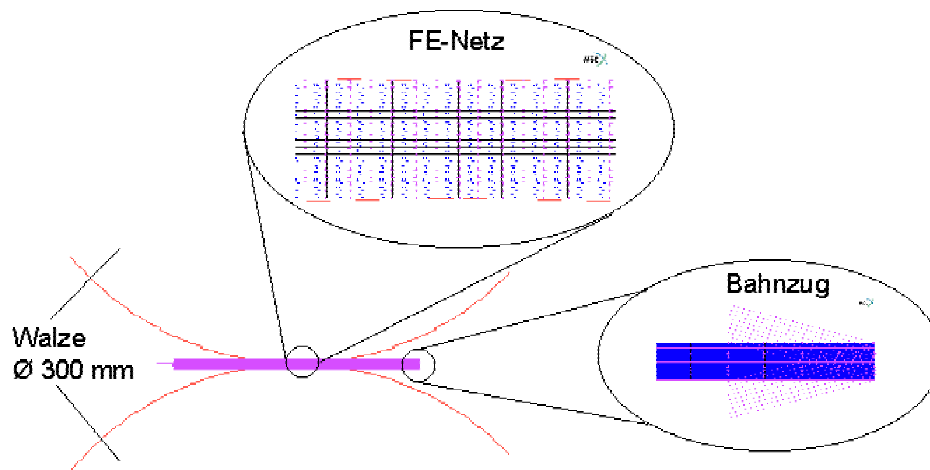
Die Abbildung 5-15 zeigt eine deutliche Minderung der Biegesteifigkeit unter Rakeleinwirkung auf. Die in den 3 Messreihen (MD1, MD2, MD3) ermittelten Biegesteifigkeitsverluste liegen gemittelt bei ca. 8 %. Die Auswirkungen von Walzen mit größeren Durchmessern bei gleichem Bahnzug und Umschlingungswinkel sind deutlich geringer.

Die theoretischen Ergebnisse beim Rakeel lieferten Biegesteifigkeitsverluste von ca. 4.1% bei der Berechnung ohne Bahnzug (Abbildung 5-14). Eine Berücksichtigung des bei den experimentellen Untersuchungen eingesetzten Bahnzuges von 2.4 N/mm lässt die theoretisch berechneten Biegesteifigkeitsverluste ansteigen, so dass zwischen den theoretisch berechneten und den experimentell bestimmten Biegesteifigkeitsverluste ein guter Abgleich vorliegt.

Die Ergebnisse verdeutlichen die Wichtigkeit der Auswahl optimaler Walzendurchmesser neben der Einstellung eines biegesteifigkeitsschonenden minimalen Umschlingungswinkels. Der Verarbeiter sollte daher immer eine Optimierungsstrategie unter Nutzung maximal möglicher Walzendurchmesser, bei geringst möglichen Bahnzügen und kleinen Umschlingungswinkeln, verfolgen.

### 5.2.2 Walzenpaar

In die Untersuchung der Biegesteifigkeitsverluste zum Bahntransport wurde auch das Walzenpaar, wie es als Vorziehpartie im Querschneider auftritt, einbezogen. Hierbei wurde die Variation der Prozessparameter gemäß Abbildung 5-5 durchgeführt.

Abbildung 5-16 FEM-Modell Walzenpaar  $\varnothing 300$  mm

Die Modellierung stellt sich gemäß Abbildung 5-16 wie folgt dar. Die Druckbelastung der Kartondecke wird durch Vorgabe eines Kompressionsmaßes, d.h. durch eine Verschiebung der Walzen zueinander und der Bahnzug durch eine Zugspannung an einem Ende der Kartondecke simuliert. Zwischen Walzenoberfläche und Kartondecke wird die Reibung mit einem Reibbeiwert von 0,2 berücksichtigt.

Mit dieser Modellierungsgrundlage lässt sich der Belastungszustand der Kartondecke im Walzenspalt so simulieren, dass alle relevanten Beanspruchungsgrößen wie z. B. Linienkraft oder richtungsabhängige Spannungen berechnet werden können. Der typische Verlauf der Spannungen in MD- und ZD-Richtung entlang der Kartondecke ist in den Abbildung 5-17 und 5-18 für das Einschicht-Material-Modell M1 dargestellt.

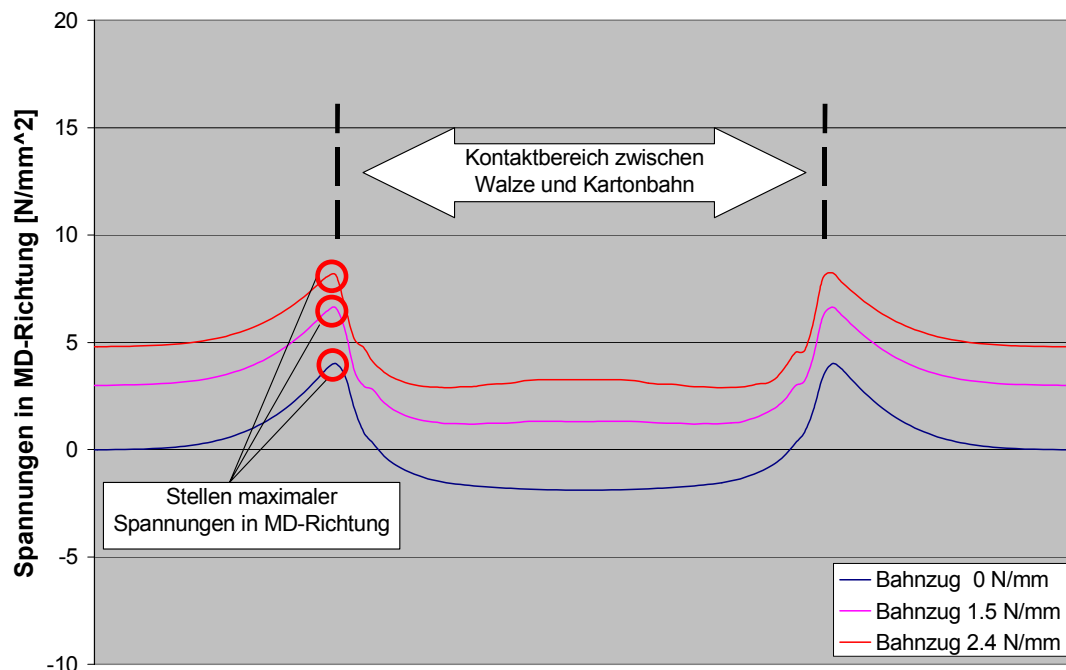


Abbildung 5-17 Verlauf der Spannungen in MD-Richtung entlang der Kartondecke im Walzenspalt (Durchmesserpaarung  $\varnothing 300/300$  mm, Bahnkompression 10%)

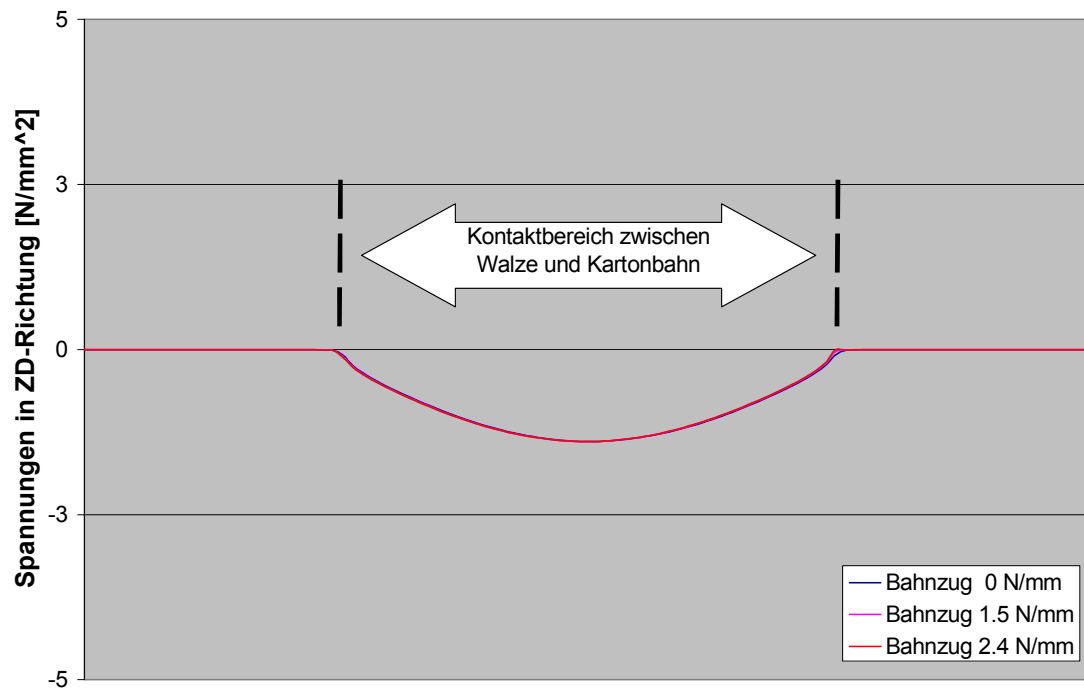


Abbildung 5-18 Verlauf der Spannungen in ZD-Richtung entlang der Kartonoberfläche im Walzenspalt (Durchmesserpaarung  $\varnothing 300/300$  mm, Bahnkompression 10%)

Maximale Spannungen in MD-Richtung zeigen sich am Ein- und Auslauf des Kontaktbereiches zwischen Walze und Kartonbahn im Zugbereich, die darauf hinweisen, dass die Kartonbahn in den Walzenspalt gezogen wird. Die Kartonbahn wird innerhalb des Kontaktbereiches in Nähe des Ein- und Auslaufes werden in MD-Richtung gedrückt und durch den reibungsbehafteten Kontakt so beeinflusst, dass die Zugspannungen abfallen. Überlagert man diesen Verlauf (Bahnzug 0 N/mm, Abbildung 5-17) mit den in der Verarbeitung üblichen Bahnzügen von z. B. 1.5 bzw. 2.4 N/mm so verschiebt sich der gesamte Spannungsverlauf hin zu höheren Zugspannungen (Abbildung 5-17).

Die Druckspannung in ZD-Richtung zeigt einen elliptischen Verlauf, der qualitativ der Hertzschen Flächenpressungstheorie entspricht. Da alle Druckspannungsverläufe den gleichen Kompressionszustand und damit den gleichen Kraft- und Spannungszustand der Kartonbahn darstellen, sind die Verläufe nahezu identisch (Abbildung 5-17).

Bei der Variation der Walzendurchmesser wurde die Linienkraft in Abhängigkeit vorgegebener Bahnkompressionen berechnet. Je größer die Durchmesserpaarung der untersuchten Walzen ist, desto größer ist auch die dabei entstehende Linienkraft bei gleicher Bahnkompression in Dickenrichtung. Für den Bereich üblicher Linienkräfte erhält man je nach Walzendurchmesserpaarung Bahnkompressionen von bis zu 20% (Abbildung 5-19).

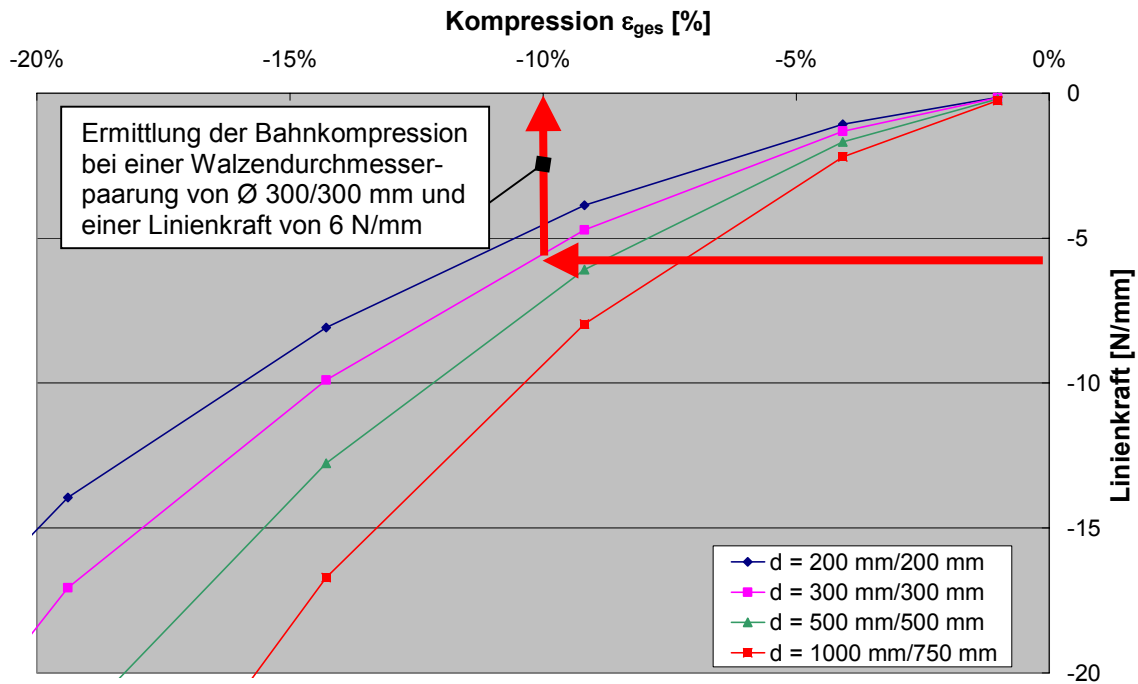


Abbildung 5-19 Verlauf der Linienkraft in Abhängigkeit der Bahnkompression bei Variation des Durchmessers, Einschicht-Material-Modell M1, Bahnzug 0 N/mm

Aus diesen beiden Diagrammen kann man im Umkehrschluss die Bahnkompression bei einer vorgegebenen Linienkraft bestimmen. So beträgt z.B. die Bahnkompression 10 % für die Durchmesserpaarung Ø300/300 mm bei einer Linienkraft von 6 N/mm. Aus dieser Vorgehensweise lassen sich die einzelnen Anteile der Biegesteifigkeitsverluste mit Hilfe der Referenzkurven bestimmen. Bei der Walzendurchmesserpaarung von Ø300/300 mm und einem Bahnzug von 0 N/mm ergibt sich eine maximale Spannung in MD-Richtung von  $4 \text{ N/mm}^2$  (Abbildung 5-17). Eingetragen in die entsprechende Referenzkurve folgt daraus ein Biegesteifigkeitsverlust von ca. 0.5 %. Bei sonst gleichen Parametern und einem überlagerten Bahnzug von z.B. 2.4 N/mm beträgt der Verlust hingegen bereits 1 % (Abbildung 5-20).

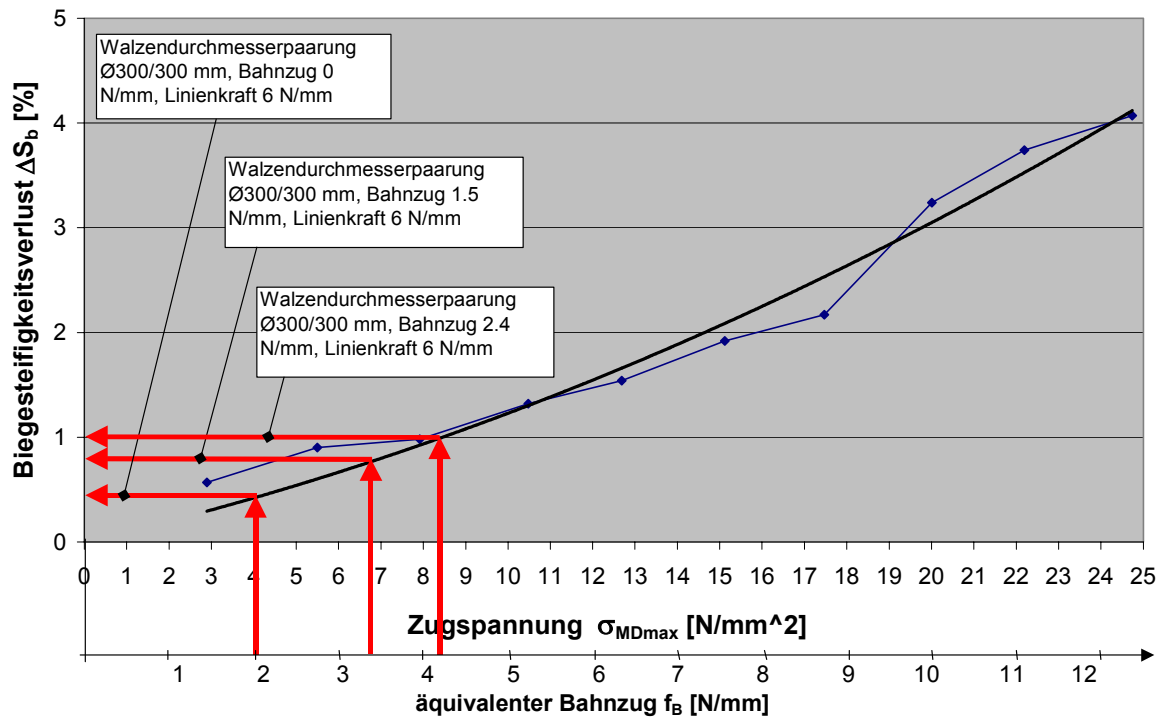


Abbildung 5-20 Aus Zugbeanspruchungen resultierende Biegesteifigkeitsverluste bei der Walzendurchmesserpaarung Ø300/300 mm, einer Linienkraft von 6 N/mm und einem Bahnzug von 0 N/mm, 1.5 N/mm und 2.4 N/mm

Analog hierzu kann der Anteil der Biegesteifigkeitsverluste für Walzenpaare resultierend aus einem Blattdickenverlust aufgrund von Druckbeanspruchungen im Walzenspalt bestimmt werden. Für die Walzendurchmesserpaarung Ø300/300 mm resultiert der in Abbildung 5-21 dargestellte Zusammenhang:

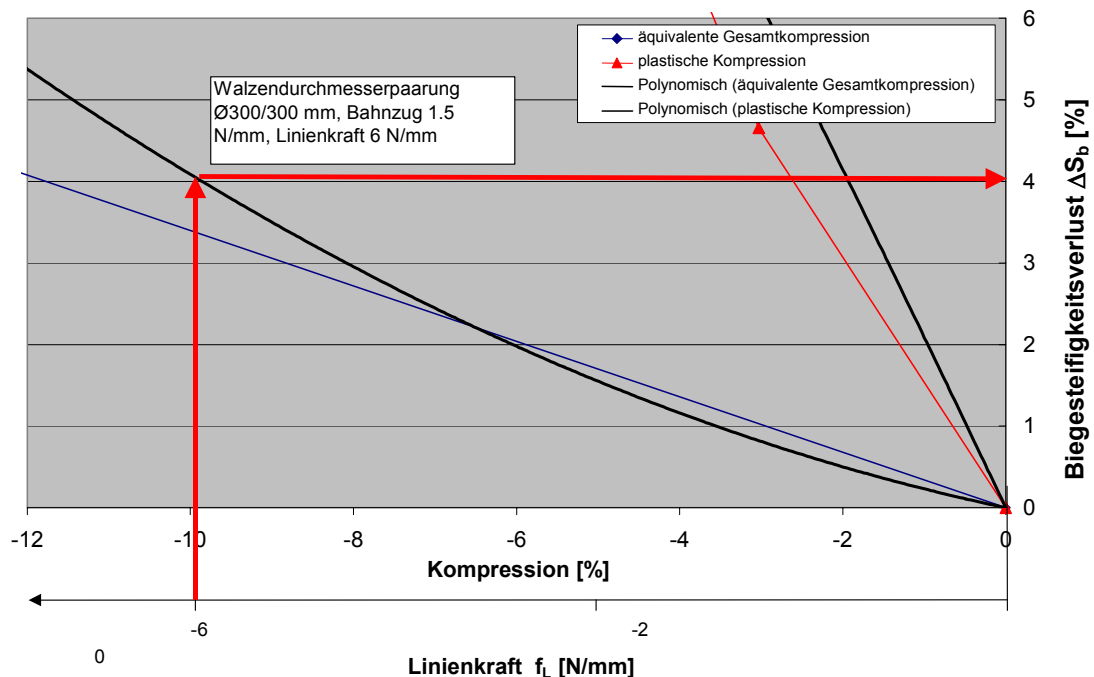


Abbildung 5-21 Aus Dickenverlusten resultierende Biegesteifigkeitsverluste bei der Walzendurchmesserpaarung Ø300/300 mm in Abhängigkeit der Linienkraft oder der äquivalenten Gesamtkompression

Demnach ergibt sich bei dieser Walzendurchmesserpaarung und einer Linienkraft von 6 N/mm (oder einer Bahnkompression von 10%) ein Biegesteifigkeitsverlustanteil von rund 4%.

Addiert man diesen Anteil zu dem Biegesteifigkeitsverlustanteil aufgrund von E-Modul-Verlusten (Abbildung 5-20), so ist für die Walzendurchmesserpaarung Ø300/300 mm, einem Bahnzug von 1.5 N/mm und einer Linienkraft von 6 N/mm ein Gesamtbiegesteifigkeitsverlust in Höhe von ca. 4.8 % zu verzeichnen.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Bahnkompression bei gleicher Linienkraft ist die Reduzierung der Steifigkeit der Walzenoberfläche. Für diese Untersuchung wurde beim Walzenpaar Ø 300/300 mm die obere Walze mit einem elastischen Walzenbelag mit einer Dicke von 25 mm ausgestattet.

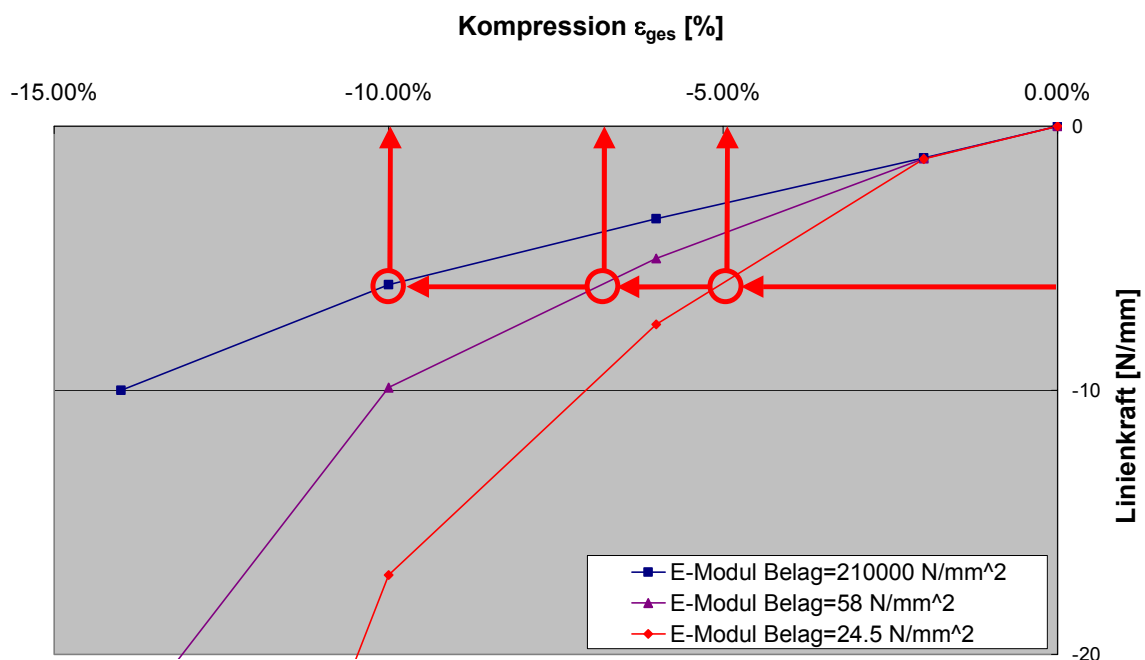


Abbildung 5-22 Verlauf der Linienkraft in Abhängigkeit der Bahnkompression bei Variation des Walzenbelages (Walzendurchmesserpaarung Ø300/300 mm, Modell M1, Bahnzug 1.5 N/mm)

Die Verläufe der Walzenpaarungen mit Belag in Abbildung 5-22 zeigen bei konstanter Linienkraft, z.B. 6 N/mm, deutlich geringere Bahnkompressionen als bei einer Walzenkombination ohne Belag. Bestimmt man exemplarisch die Biegesteifigkeitsverluste resultierend aus einem Blattdickenverlust bei einer Linienkraft von 6 N/mm, so können diese vom Wert der Stahlwalze (E-Modul 210000 N/mm<sup>2</sup>) auf den Wert der "weichen" Belagwalze (Elastizitätsmodul des Belages 24.5 N/mm<sup>2</sup>) um etwa 55 % reduziert werden (Abbildung 5-23).

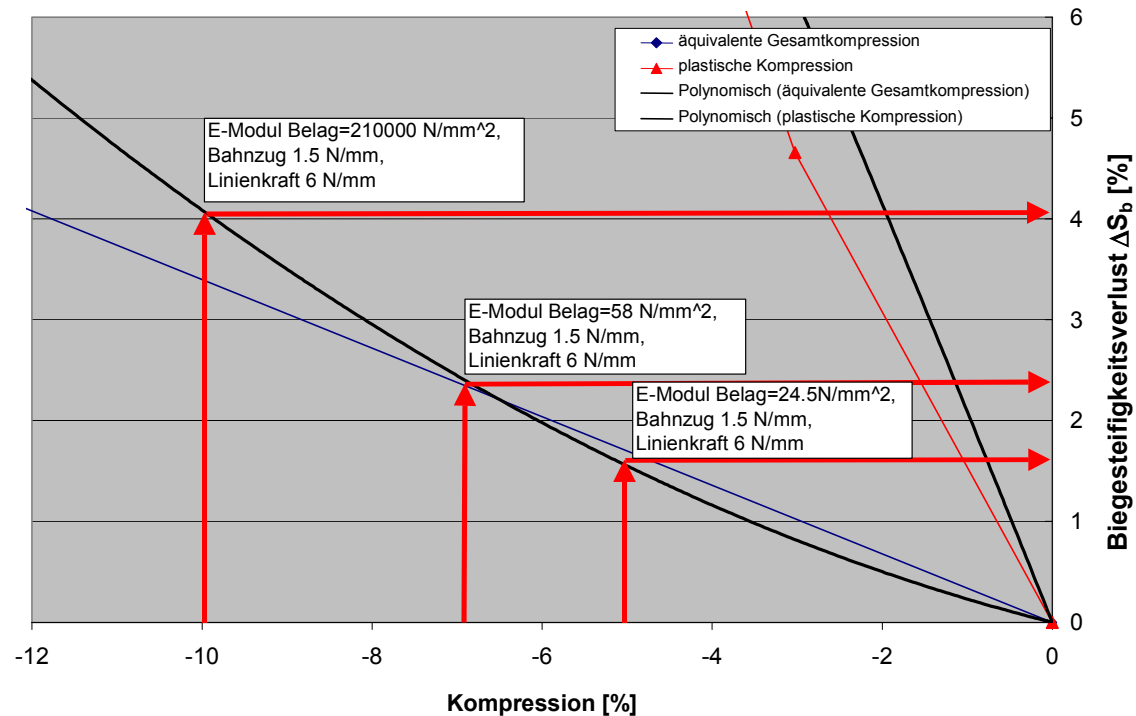


Abbildung 5-23 Biegesteifigkeitsverluste resultierend aus einem Dickenverlust bei Walzenpaaren mit Belägen

Der Einfluss durch weiche Walzenbeläge auf die Zugspannungen in MD-Richtung und daraus resultierende E-Modul-Verluste werden ebenfalls zu einem geringeren Biegesteifigkeitsverlust führen. Aus diesem Ergebnis kann die Optimierungsstrategie abgeleitet werden, Walzenpaarungen mit möglichst großen Durchmessern und Belägen einzusetzen.

Zur Verifizierung der numerischen FEM-Ergebnisse wurde der in Kapitel 5.1 beschriebene Versuchsstand dazu genutzt, den Einfluss unterschiedlicher Linienkräfte und Bahnzüge beim Bahntransport mit Walzenpaaren zu untersuchen. Hier wurde die verfügbare Walzenkombination mit der Durchmesserpaarung  $\varnothing 1000/750$  mm verwendet.

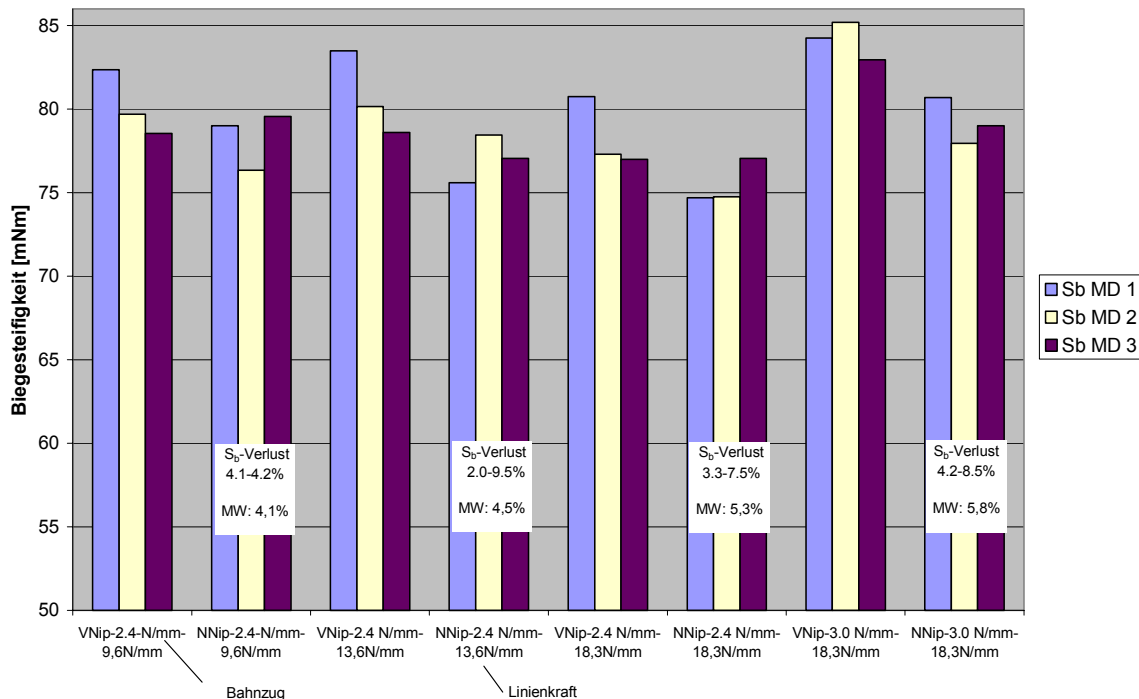


Abbildung 5-24 Biegesteifigkeitsentwicklung für 3 Messreihen in Abhängigkeit der Linienkraft und des Bahnzuges (H1-GC2/350g/m<sup>2</sup>)

Die untersuchten Linienkräfte (9.6 N/mm – 18.3 N/mm) und Bahnzüge zwischen 2.4 N/mm und 3.0 N/mm führen zu Biegesteifigkeitsverlusten in einem Bereich von 2.0 – 9.5 %. Betrachtet man die Mittelwerte der unterschiedlichen Messreihen, steigen die Biegesteifigkeitsverluste mit zunehmender Linienkraft bzw. mit steigendem Bahnzug. Die Erhöhung der Linienkraft von 9.6 N/mm auf 18.3 N/mm bei einem Bahnzug von 2.4 N/mm zeigt eine eindeutige Steigerung der Biegesteifigkeitsverluste in den Maximalwerten. Der Vergleich unterschiedlicher Bahnzüge bei einer konstanten Linienkraft von 18.3 N/mm zeigt tendenziell höhere Biegesteifigkeitsverluste (Abbildung 5-24).

In dem Vergleich der experimentell ermittelten mit den theoretisch berechneten Biegesteifigkeitsverlusten lässt sich eine gute Übereinstimmung feststellen. Die theoretischen Ergebnisse liegen in dem Streubereich der experimentellen Ergebnisse. Für einen Bahnzug von 2.4 N/mm und einem Liniendruck von 9.6 N/mm (experimentelles Ergebnis entspricht der 2. Säule von links) ergeben sich theoretische Gesamtbiegesteifigkeitsverluste von 4.9 %.

Berücksichtigt man z.B. den experimentell untersuchten Liniendruck von 13.6 N/mm, so ergibt sich hierfür bei der Simulation des entsprechenden Walzenpaares eine Bahnkompression von 12 %. Mit Hilfe der sortenabhängigen Referenzkurve für Druckbeanspruchungen resultieren allein aus den Druckbeanspruchungen Biegesteifigkeitsverluste von 5,3 %. Addiert man hierzu die aus den Zugbeanspruchungen resultierenden Biegesteifigkeitsverluste von 0.4 % (abgelesen für die berechnete Zugspannung von 7.2 N/mm<sup>2</sup> aus der sortenabhängigen Referenzkurve Abbildung 5-20), so ergeben sich für dieses Beispiel theoretische Gesamtbiegesteifigkeitsverluste von ca. 5.7 %. Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem experimentellen Ergebnis (Abbildung 5-24, 4. Säule von links), so lässt sich ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen den theoretischen und den experimentellen Untersuchungen (4.5 %) feststellen.

Die theoretischen Ergebnisse, berechnet unter Berücksichtigung der in Abbildung 5-24 genannten Versuchsparmeter (Säule 6 und 8 von links), liegen im oberen Streubereich der experimentell ermittelten Biegesteifigkeitsverluste.

Die Auswertung dieser Ergebnisse verdeutlicht die Auswirkungen steigender Bahnzüge und Linienkräfte. Im Rahmen einer zu entwickelnden Optimierungsstrategie für den Verarbeiter sollten daher immer geringst mögliche Bahnzüge bzw. Linienkräfte verwendet werden.

### 5.3 Wickeln

Für die Untersuchung der Biegesteifigkeitsverluste im Verarbeitungsprozess Wickeln wurde für die Berechnung der Spannungszustände ein Wickelmodell auf der Basis konzentrischer Ringe nach Hakiel /14/ verwendet. Diese Modellierung beruht auf der Annahme, dass ein Wickel durch eine Ansammlung konzentrischer Ringe und die Werkstoffmodellierung als linear orthotrop idealisiert werden kann (Abbildung 5-25).

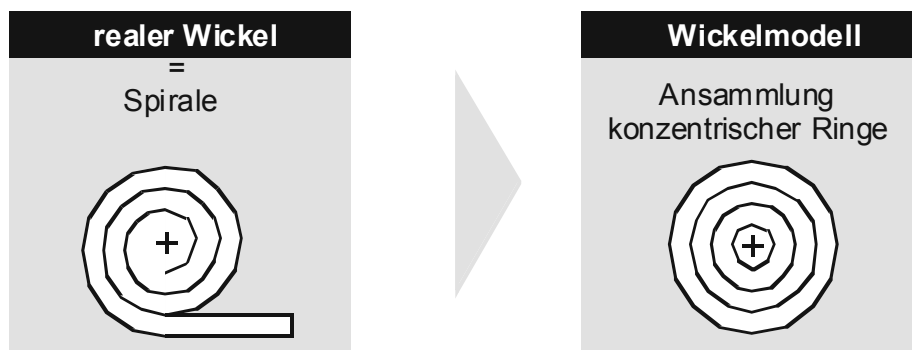


Abbildung 5-25 Idealisierung eines Wickels nach Hakiel

Die Gleichungssysteme, die dieser Idealisierung zugrunde liegen, sind in einem Berechnungsalgorithmus des Programms LabView implementiert worden, das über die graphische Benutzeroberfläche (Abbildung 5-26) bedient wird.

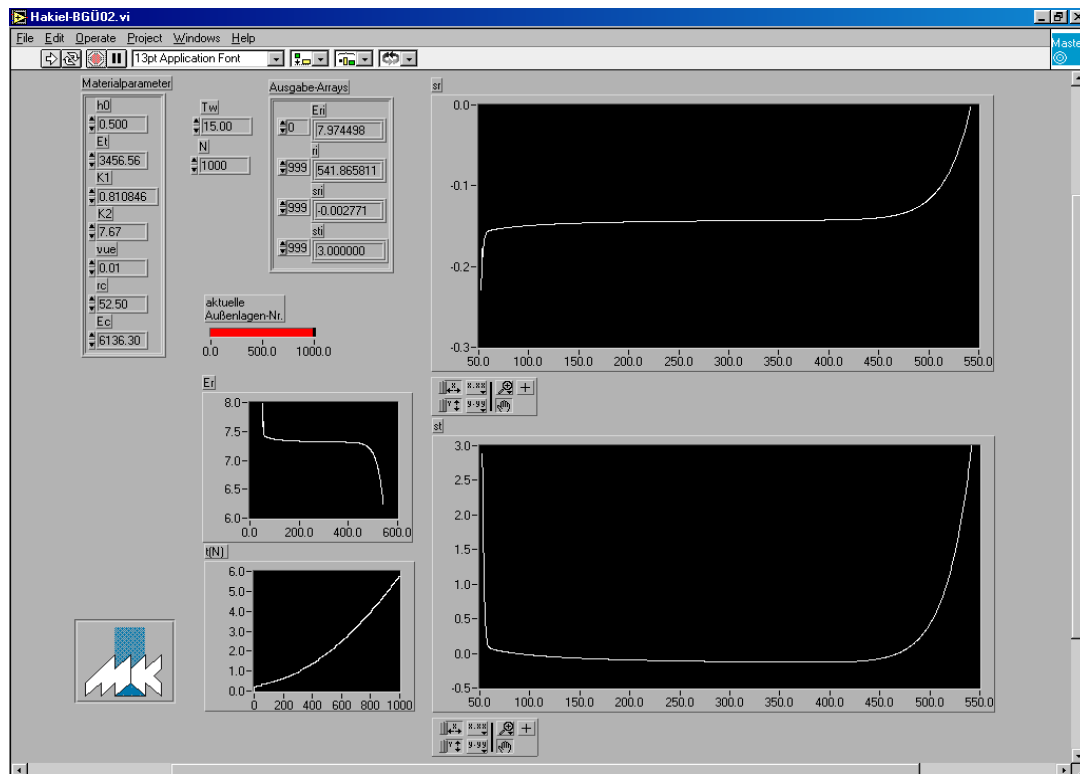


Abbildung 5-26 Graphische Benutzeroberfläche des Wickelmodells nach Hakiel

Als Eingabedaten verlangt das Wickelmodell die Geometriedaten und Steifigkeiten des Wickelkerns (Radius bzw. Elastizitätsmodul) und die Werkstoffkennwerte nach Pfeiffer, Formel (5), des zu wickelnden Materials (Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl der MD-CD-Ebene). Bei Angabe der Anzahl der zu wickelnden Lagen und des zu berücksichtigenden Bahnzugs berechnet das Programm sowohl die radialen und tangentialen Verschiebungen als auch Spannungen.

In der Abbildung 5-27 sind die Spannungen in radialer und tangentialer Richtung für 1000 gewickelte Lagen mit einem Einschicht-Material-Modell M1 bei einem Bahnzug von 1.5 N/mm dargestellt.

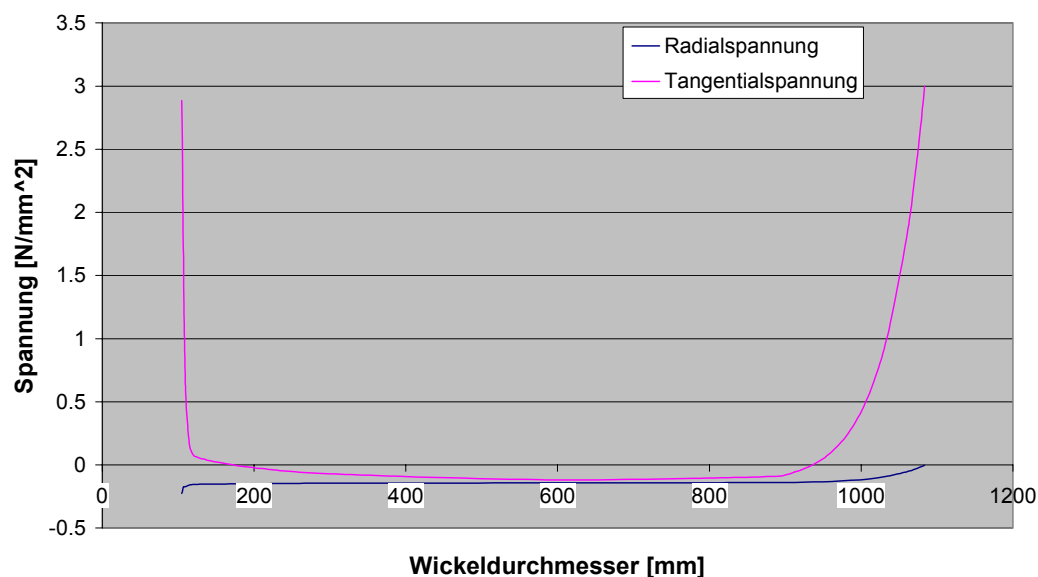


Abbildung 5-27 Spannungsverlauf in radialer und tangentialer Richtung bei Wicklung von 1000 Lagen Einschicht-Material-Modell M1 (Bahnzug 1.5 N/mm)

Beide Spannungen zeigen über einen weiten Durchmesserbereich einen nahezu konstanten Verlauf. Lediglich in den Randbereichen (Wickelkern und Wickelperipherie) weisen die Spannungen Maximal- bzw. Minimalstellen auf. Dieser Verlauf in den Randbereichen ist mit der FEM-Methode simuliert worden, um darauf aufbauend detaillierte Untersuchungen der Zugspannungen in MD-Richtung durchführen zu können. Ein Ergebnis dieser Untersuchungen an der Wickelperipherie ist in der Abbildung 5-28 dargestellt.

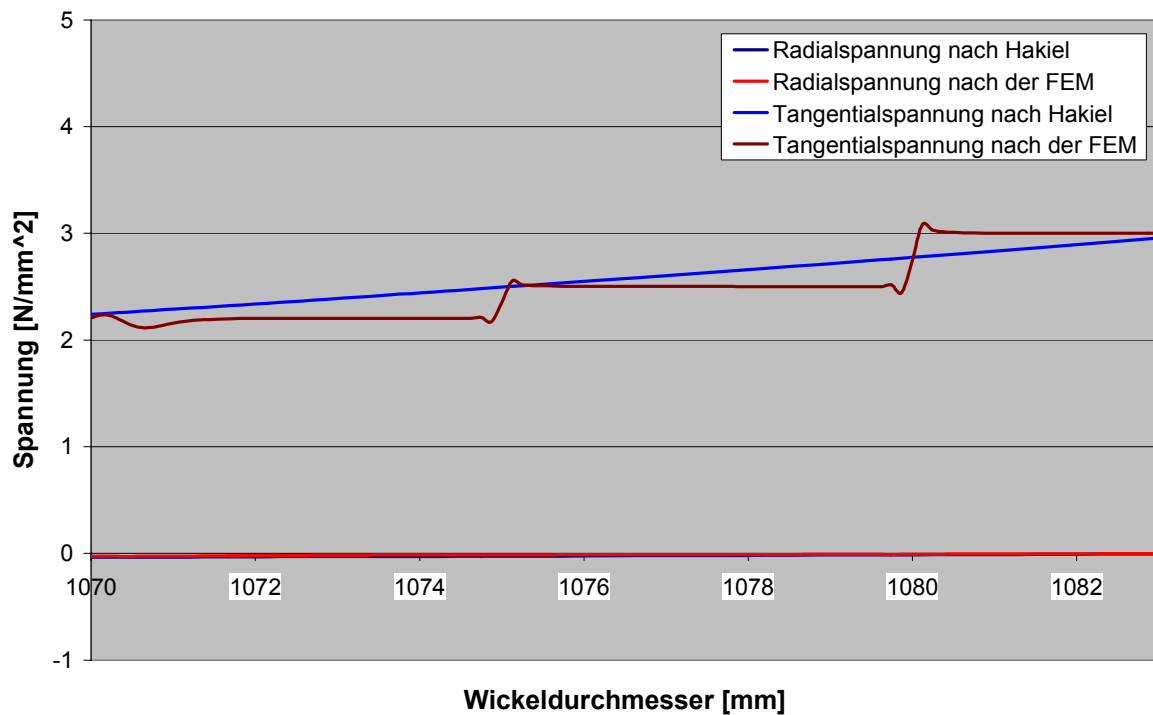


Abbildung 5-28 Spannungsverlauf in radialer und tangentialer Richtung an der Wickelperipherie (Bahnzug 1.5 N/mm)

Vergleichende experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der örtlich unterschiedlichen Tangential- und Radialspannungen im Wickel sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Im Bereich von 400 mm - 800 mm wurden Proben entnommen und die Biegesteifigkeit gemessen.

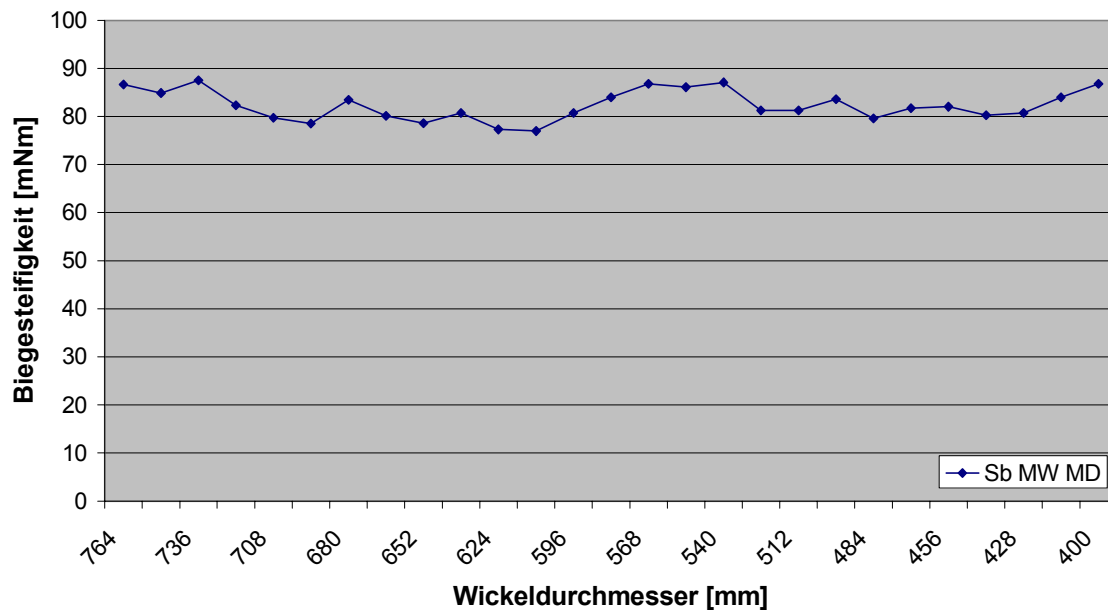


Abbildung 5-29 Biegesteifigkeitsmessungen an unterschiedlichen Positionen im Wickel (GC2 – H1 350g/m<sup>2</sup>)

Es zeigt sich eine Schwankungsbreite von 77 mNm – 87,55 mNm. Eine eindeutige Beziehung zwischen der örtlichen Lage der Kartonbahn und den örtlichen Spannungszuständen in Bezug zur Biegesteifigkeitsentwicklung konnte nicht beobachtet werden.

Das bedeutet in einer ersten Bewertung, dass allein aus "eingewickelten" Radial- und Tangentialspannungen kein signifikanter Einfluss auf Biegesteifigkeitsverluste zu erkennen ist.

Ausgehend von diesen Ergebnissen ist anzunehmen, dass gegebenenfalls auftretende Biegesteifigkeitsverluste beim Wickeln allein durch Nipwirkung entstehen. Deshalb wurde die lokale Zone des Nips mit der FEM analysiert. Aufbauend auf dem Modell der Wickelperipherie wurde die Modellierung des Nips (Abbildung 5-33) mit einer in den Wickel eintauchende Walze, mit und ohne Belag durchgeführt.

In der folgenden Abbildung 5-30 ist ein modellierter Nip mit einer Belagwalze und einem Wickelrand bestehend aus 15 Aussenschichten eines Wickels dargestellt.

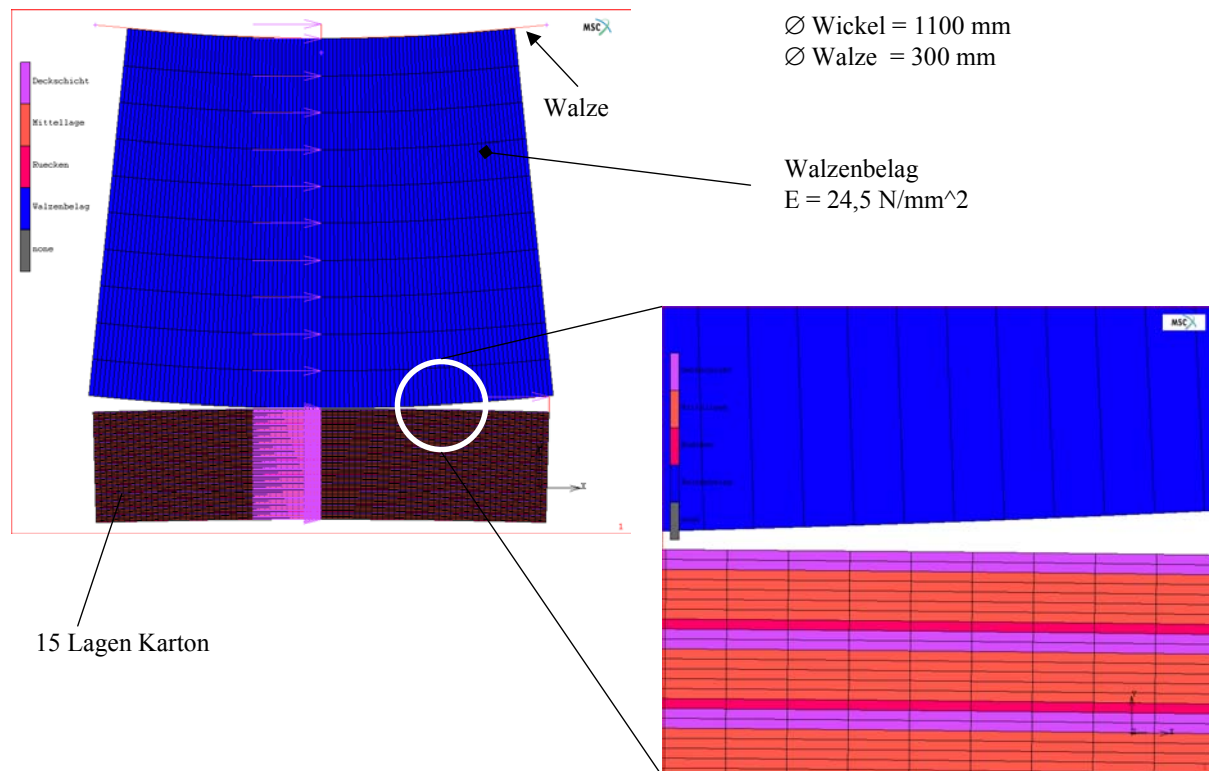


Abbildung 5-30 Nipmodell

Drückt man die Belagwalze mit einer Linienkraft von 6 N/mm in den Wickel, so ergeben sich die radialen und tangentialen Spannungen in der außenliegenden Kartonbahn wie in Abbildung 5-31 und 5-32 dargestellt. Diese Spannungsverläufe weisen einen zum Walzenpaar ähnlichen qualitativen Verlauf auf. Es zeigt sich bei Walzen mit Belag ein breiterer Kontaktbereich bei gleichzeitig niedrigerem Spannungsniveau. Die Abbildungen 5-31 und 5-32 zeigen die Gegenüberstellungen der Spannungen in radialer und tangentialer Richtung einer Wickelwalze aus Stahl und einer Wickelwalze mit weichem Belag.

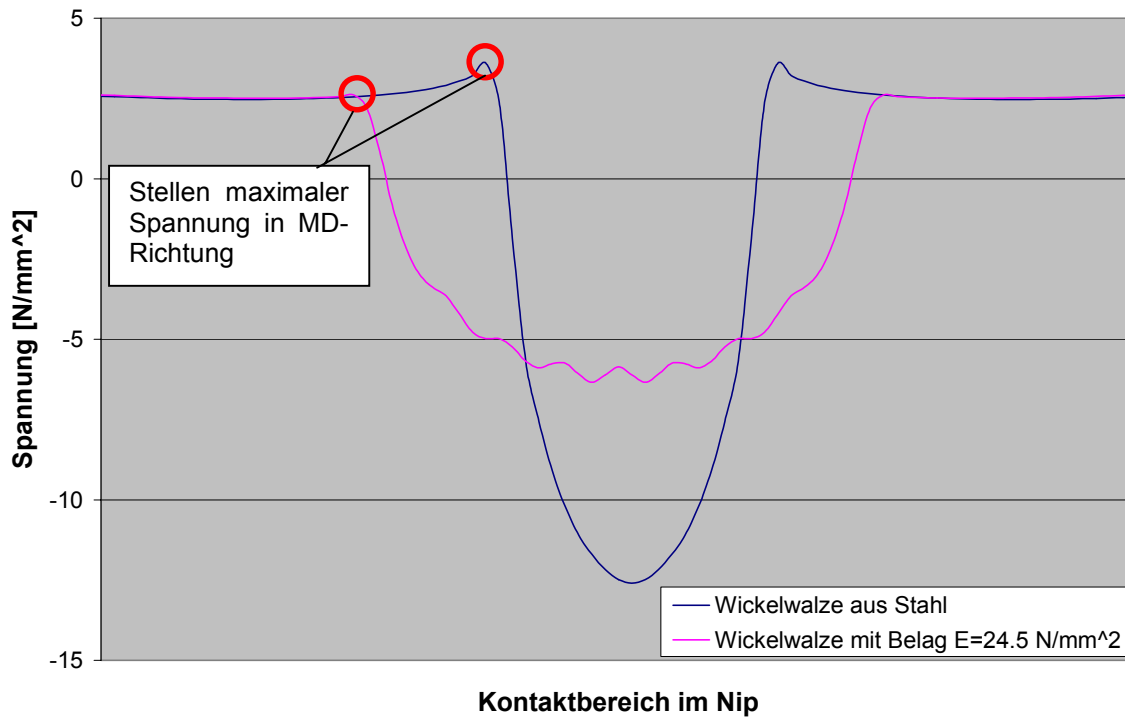


Abbildung 5-31 Spannungsverläufe im Nip in tangentialer Richtung (Variation der Wickelwalze, Linienkraft 6 N/mm)

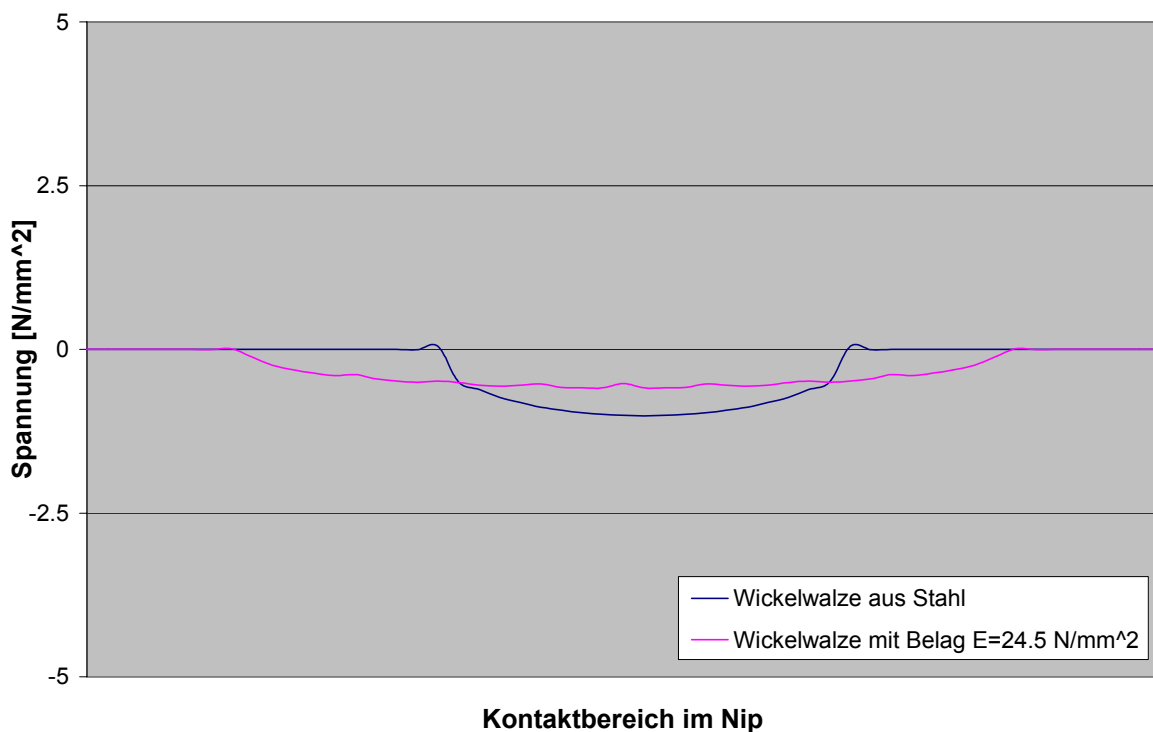


Abbildung 5-32 Spannungsverläufe im Nip in radialer Richtung (Variation der Wickelwalze, Linienkraft 6 N/mm)

Die Untersuchungen zur Oberflächenvariation der Wickelwalze zeigen, dass durch den Einsatz von Belagwalzen die Spannungen im Nip reduziert werden können. Am

Ein- und Auslauf des Nips werden die Spannungen in tangentialer Richtung einerseits durch den Bahnzug im Wickel und andererseits durch das Eintauchen der Wickelwalze in den Wickel verursacht. Überhohe Spannungen in tangentialer und radialer Richtung verursachen einen Verlust an Biegesteifigkeit. Trägt man die richtungsbezogenen Spannungen in die sortenabhängigen Referenzkurven ein, so lassen sich die Verlustanteile richtungsabhängig bestimmen. Die Abbildungen 5-33 und 5-34 zeigen die Anteile der Biegesteifigkeitsverluste in Abhängigkeit vom richtungsabhängigen Spannungszustand.

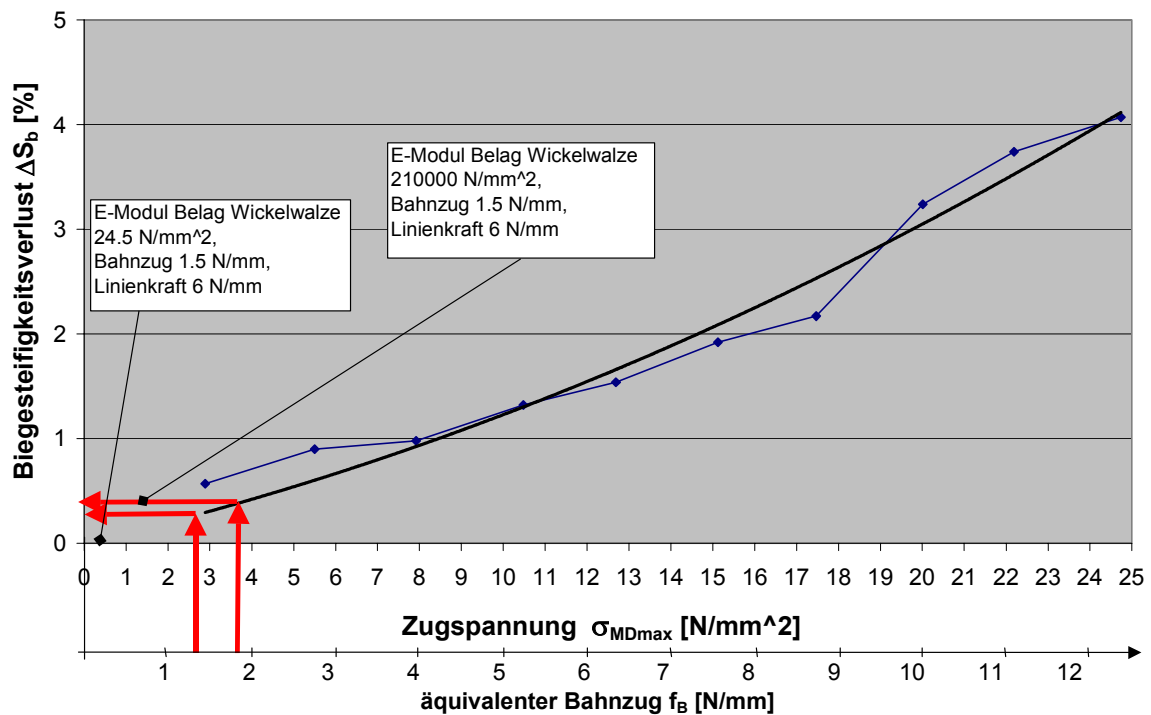


Abbildung 5-33 Biegesteifigkeitsverluste resultierend aus einem E-Modul-Verlust durch Nipwirkung

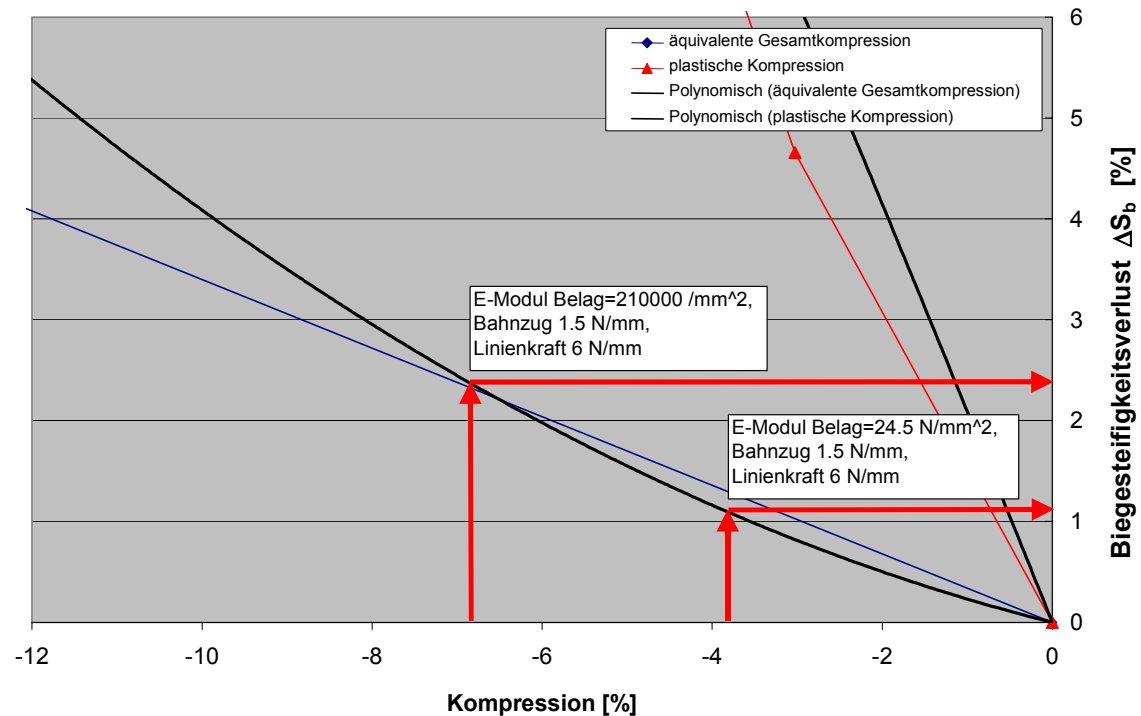


Abbildung 5-34 Biegesteifigkeitsverluste resultierend aus einem Dickenverlust durch Nipwirkung

Die Biegesteifigkeitsverluste aufgrund einer Zugbeanspruchung für die in Abbildung 5-31 dargestellten maximalen Spannungen in MD-Richtung betragen bei Verwendung einer Wickelwalze mit Belag 0.4 % und bei Verwendung einer Wickelwalze aus Stahl etwa 0.5 %. Unter Berücksichtigung des Dickenverlustes belaufen sich die Biegesteifigkeitsverluste auf 1.1 % - Wickelwalze mit Belag und 2.4% - Wickelwalze aus Stahl. Daraus ergeben sich beim Einsatz von Belagwalzen Biegesteifigkeitsverluste von insgesamt 1.5 % bzw. von 2.9 % beim Einsatz von Stahlwalzen. Damit treten ca. 49 % geringere Verluste bei einem Einsatz von "weichen" Wickelwalzen auf.

Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass es sich bei den berechneten Spannungen um die Belastungen einer aussenliegenden Kartonbahn im Nip handelt, also um die Maximalwerte der Belastungen. Mit jedem weiteren Nipdurchgang erfährt diese Kartonbahn eine zusätzliche, abgeschwächte Belastung durch neu eingewickelte Lagen. Durch diese entstehen additive Biegesteifigkeitsverluste, die dann zu den Verlusten des ersten Nipdurchgangs zu addieren sind.

In der Praxis können auf Tragwalzenrollern allerdings weit höhere Linienkräfte auftreten, was dann insbesondere zu einem stärkeren Einfluss von Druckspannungen im Nip auf den Dickenverlust und damit auf den zugehörigen Biegesteifigkeitsverlust führt.

#### 5.4 Stapeln

Das Eigengewicht von Kartonbögen verursacht beim Stapeln eine linear ansteigende statische Belastung in ZD-Richtung der Bögen auf geringem Niveau. Die nachfolgende Abbildung zeigt die sich einstellenden Spannungen in Abhängigkeit der Stapelhöhe.

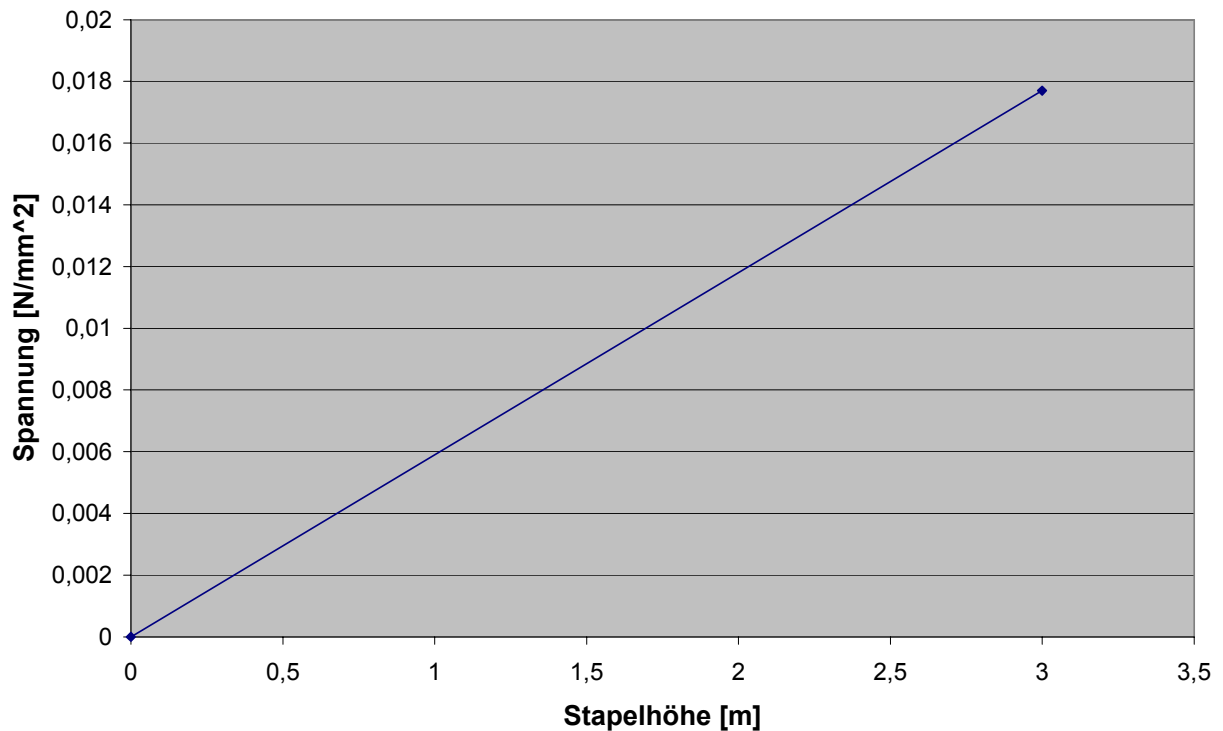


Abbildung 5-35 Spannungen ZD-Richtung in einem Stapel unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Stapelhöhen (H1-GC2 300g/m<sup>2</sup>)

Die sich einstellenden geringen Spannungen zeigen, dass Dickenreduzierungen bzw. Biegesteifigkeitsverluste im Normalbetrieb nicht auftreten können. Plastische Verformungen sind nur durch Kriechvorgänge im Mehrschichtverbund unter Einwirkung extremer Lagerzeiten und ungünstiger klimatischer Verhältnisse denkbar. Zur Einschätzung der Auswirkungen von Lagerzeiten wurde ein 1 m hoher Kartonstapel untersucht. Zeitabhängige Messungen der sich einstellenden Biegesteifigkeit wurden für den untersten Kartonbogen vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-36 dargestellt.

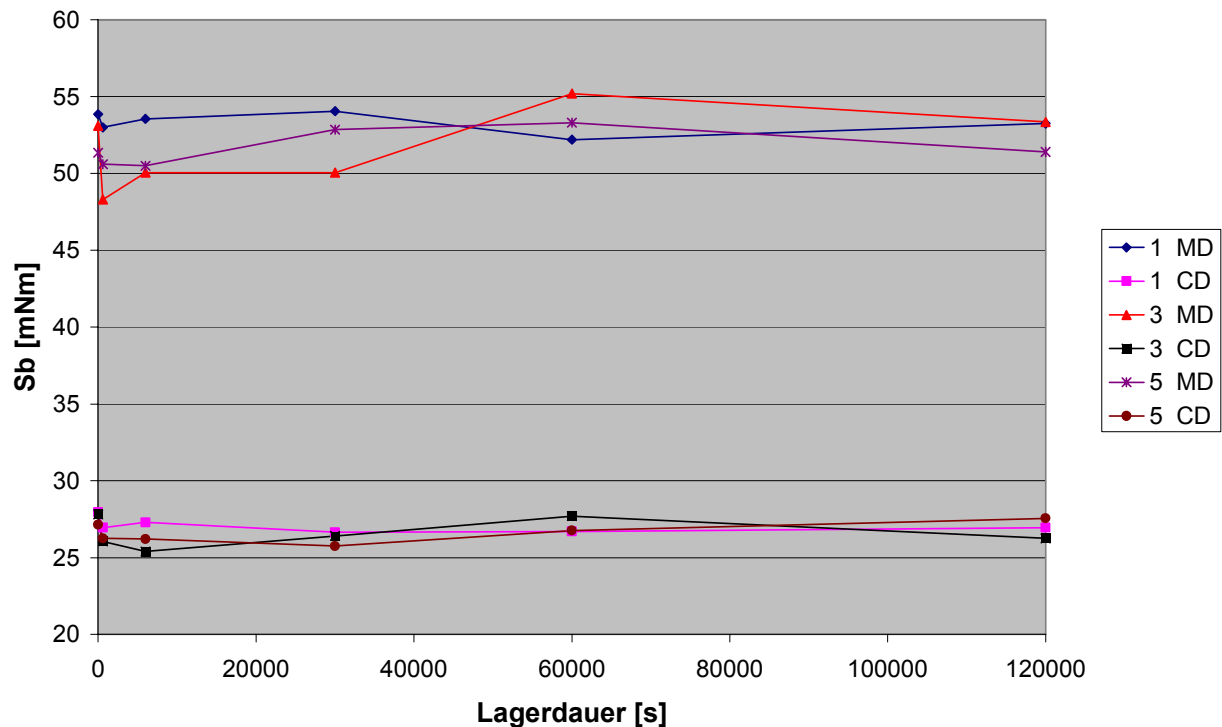


Abbildung 5-36 Biegesteifigkeitsentwicklung in einem Stapel unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Lagerzeiten (Stapelhöhe 1m/H1-GC2 300g/m<sup>2</sup>)

Zunehmende plastische Verformungen oder Volumenminderungen mit der Folge von Biegesteifigkeitsverlusten konnten nicht identifiziert werden. Lagerzeiten bis zu 120.000 s (33,3 h) führen für die untersuchte Kartonsorte nicht zu plastischen Verformungen bei Höhen von 1 m.

## 5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Unterschiedliche Konstruktionsprinzipien (z.B. Walzendurchmesser, Walzenbeläge und Umschlingungswinkel) und andererseits Maschineneinstellungen (z.B. Bahnzüge und Linienkräfte) nehmen Einfluss auf die sich einstellenden Biegesteifigkeitsverluste. Die zusammenfassbaren Ergebnisse aus den theoretischen Untersuchungen sind für E-Modul-Verluste durch überhohe Zugspannungen in MD-Richtung und für Dickenverluste durch überhohe Druckspannungen in ZD-Richtung in den Abbildungen 5-37 und 5-38 dargestellt.

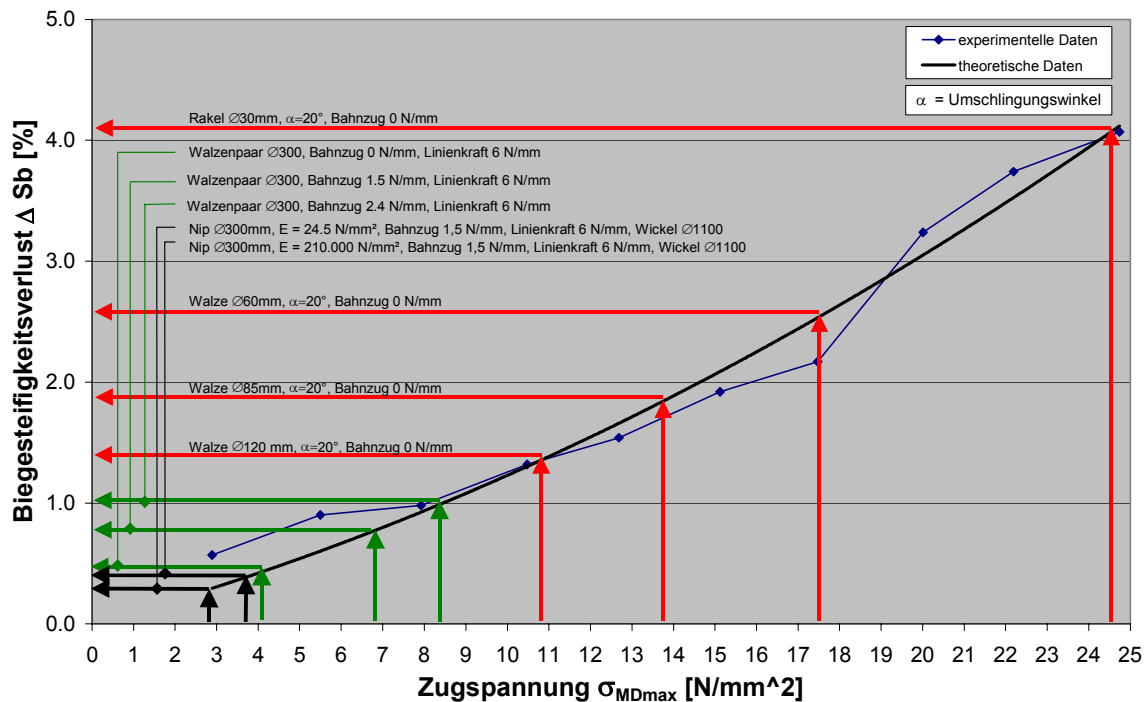


Abbildung 5-37 Biegesteifigkeitsverluste resultierend aus einem E-Modul-Verlust in MD-Richtung (H1-GC2 300g/m<sup>2</sup>)

Die Betrachtung der Zugbelastungen in MD-Richtung identifiziert den Rakel als Verursacher der höchsten Biegesteifigkeitsverluste. Erkennbar anhand der Walzendurchmesservariation, führen größere Walzendurchmesser zu geringeren Verlusten an Biegesteifigkeit. Auch die beim Wickeln durch den Nip verursachten Spannungen in MD-Richtung führen zu Biegesteifigkeitsverlusten. Diese sind jedoch gering im Vergleich zum Walzenpaar. Die im Wickel „eingewickelten“ Spannungen sind für die Biegesteifigkeitsentwicklung vernachlässigbar.

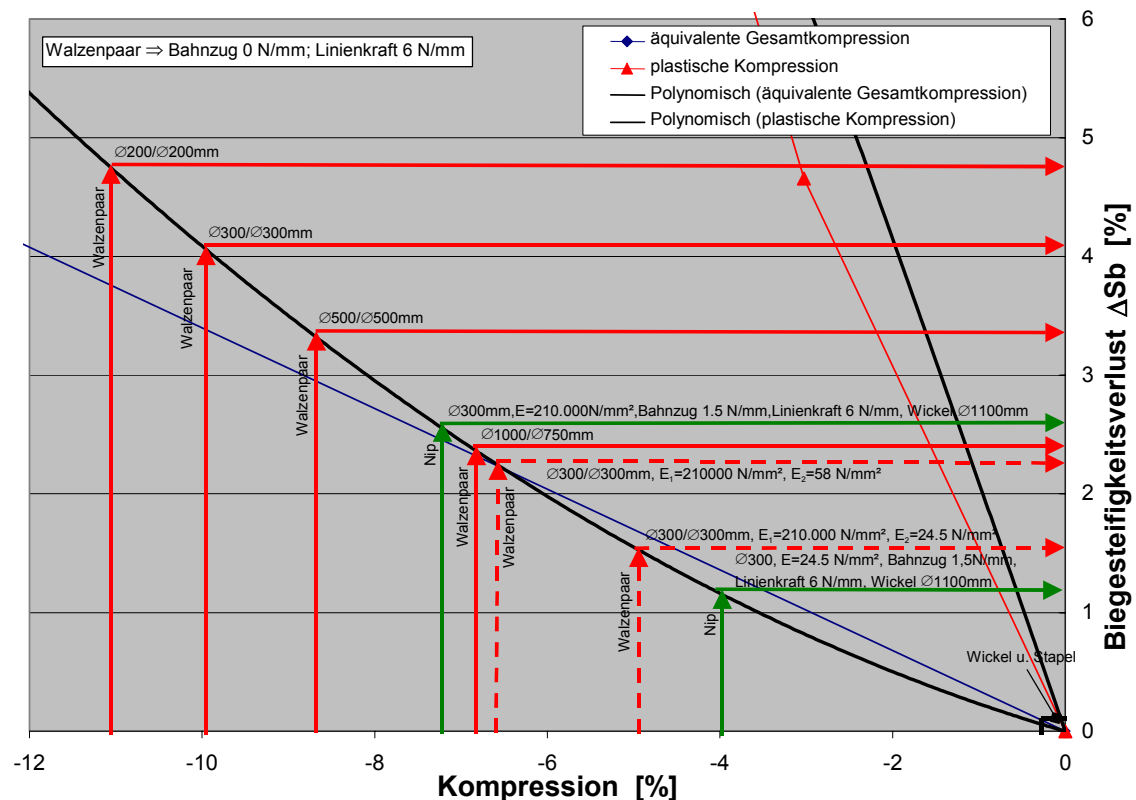


Abbildung 5-38 Berechnete Biegesteifigkeitsverluste resultierend aus Blattdickenverlusten in ZD-Richtung (H1-GC2 300g/m<sup>2</sup>)

Der Bahntransport mit einem harten Walzenpaar und geringem Walzendurchmesser führt zu den höchsten Biegesteifigkeitsverlusten. Die Verwendung von größeren Walzendurchmessern reduziert die Verluste erheblich. Ebenfalls kann weitere Verringerung durch die Verwendung von weichen Walzenbelägen erzielt werden.

Die Größe des Einflusses von Druckbelastungen im Nip wird entscheidend vom Elastizitätsmodul der Belagwalze geprägt. Vergleichbar mit den Auswirkungen bei Walzenpaaren ist auch hier eine deutliche Reduzierung der Biegesteifigkeitsverluste bei Verwendung von weichen Wickelwalzen zu verzeichnen.

Druckbelastungen, resultierend aus Stapelprozessen, sind vernachlässigbar im Vergleich zu den vorher genannten Verarbeitungsschritten.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen weisen vergleichbare Ergebnisse zur Ringuntersuchung des Zellcheming Fachausschusses für Karton und Papier /17/ auf. Sowohl die Biegesteifigkeitsverluste resultierend aus E-Modul-Verlusten in MD-Richtung als auch die resultierend aus Dickenverlusten zeigen übereinstimmende Verläufe, wobei sich in Einzelfällen zeigt, dass in konventionellen Verarbeitungsmaschinen auch größere Verluste auftreten können.

## 6 Maßnahmen zur Reduzierung der Biegesteifigkeitsverluste von Karton

### 6.1 Materialverhalten

Die analytischen Untersuchungen zum Einfluss der Parameter Schichtaufbau und Stoffzusammensetzung auf die Biegesteifigkeit haben für den nichtsymmetrischen Schichtaufbau ergeben, dass sich bei einer optimalen Kombination dieser Parameter maximale Biegesteifigkeiten einstellen.

Mit den angenommenen Kennwerten (Rohdichte der Außenschicht und Elastizitätsmodule der Mittel- und Außenschichten) hat sich bei einer geforderten flächenbezogenen Gesamtmasse ein Bereich optimaler relativer Massenanteile der Außenschichten am Gesamtverbund herausgestellt. Ein Massenverhältnis von  $30 \% < f_a < 40 \%$  bei einem niedrigen Dichteverhältnis der Mittel- zur Außenschicht ( $r \approx 0.5$ ) ermöglicht das Erreichen maximaler Biegesteifigkeiten. Die Lage des Bereiches maximaler Biegesteifigkeiten wird hauptsächlich über die Parameter Elastizitätsmodule der Schichten und partielle Rohdichten beeinflusst. Aus diesen Zusammenhängen ergibt sich für eine maximale Biegesteifigkeit die Forderung nach einer voluminösen Mittelschicht mit geringer Steifigkeit und einer hohen Steifigkeit in den Außenschichten.

Weiterhin haben die Untersuchungen gezeigt, dass die Biegesteifigkeit mit fallendem Dichteverhältnis überproportional steigt. Da die partielle Rohdichte der Aussenschicht nicht variiert wurde, bedeutet dieses, dass mit sinkender partiellen Rohdichte der Mittelschicht und damit mit steigender Dicke der Mittelschicht die Biegesteifigkeit stark gesteigert werden kann. Bei gleichen partiellen Rohdichten der Mittel- und Aussenschichten lässt sich die Biegesteifigkeit nur noch geringfügig über eine Variation des relativen Massenanteils der Aussenschichten einstellen. Daher sind für das Erreichen maximaler Biegesteifigkeiten geringe Dichteverhältnisse von Mittel- zu Aussenschichten notwendig. Eine weitere Möglichkeit zur Verringerung der partiellen Rohdichte der Mittelschicht ist der Abzug von Füll- und Feinstoffen. Durch ihre Teilchengröße, -form und Oberfläche beeinflussen sie über die Rohdichte die Biegesteifigkeit.

Die Zunahme des Elastizitätsmoduls bei wachsender Rohdichte der entsprechenden Schicht ergab einen geringeren Anstieg der Biegesteifigkeit bei geringen Dichteverhältnissen. Damit können die bei der Verdichtung bzw. Verfestigung entstehenden Biegesteifigkeitsverluste, bedingt durch Blattdickenreduzierungen, nicht durch die gleichzeitige Zunahme des Elastizitätsmoduls kompensiert werden. Um diesen Effekt zu minimieren wird in /16/ der Einsatz von steiferen Einzelfasern gefordert. Eine schonende Aufbereitung der Faserstoffe, mit dem Ziel den Einzelfaser-Elastizitätsmodul zu erhalten, sollte daher im Vordergrund stehen. Eine weitere Möglichkeit stellt die gezielte Veränderung der Faserorientierung dar. Einrichtungen zur Verringerung der Anisotropie der Einzelfasern mit dem Effekt der Elastizitätsmodulsteigerung in MD-Richtung könnten hier eine kostengünstige Alternative sein.

## 6.2 Verarbeitungsprozesse

### 6.2.1 Grundlegende Hinweise zu Verarbeitungsprozessen

Die grundlegenden Untersuchungen der Einflussfaktoren auf die Biegesteifigkeit haben eine überproportionale Erhöhung der plastischen Dehnungsanteile bei Zugbelastungserhöhung in MD-Richtung (Anhang A.1) und Druckbelastung in ZD-Richtung (Anhang A.2) gezeigt. Daraus leitet sich ein allgemeines Ziel für die Verarbeitungsprozesse ab. Eine schonende Prozessführung unter dem Aspekt der Belastungsminimierung für die zu produzierende Kartonbahn ist anzustreben. Ein weiteres sich daraus ergebendes Ziel ist die Vermeidung von Belastungsspitzen in allen Prozessabschnitten. Verarbeitungsprozesse sollten im Hinblick auf Maximalbelastungen untersucht und mit dem Ziel der Belastungsreduzierung optimiert werden.

Die Untersuchungen zu unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten bei Zug- (Anhang A 1.2) und Druckbelastungen (Anhang A 2.2) und die sich daraus ergebenden irreversiblen Dehnungsanteile haben eine Abhängigkeit zwischen den beiden Parametern aufgezeigt. Eine Kraftaufbringung mit hoher Belastungsgeschwindigkeit verursacht eine Schädigung des Fasergefüges und führt zu großen plastischen Dehnungsanteilen an der belasteten Stelle. Eine langsame Krafteinleitung und damit die Forderung nach einer schonenderen Prozessführung reduziert mögliche Biegesteifigkeitsverluste des Kartons.

Zusätzlich dazu haben die Untersuchungen in allen drei Verarbeitungsrichtungen (Anhang A 1.2 und Anhang A 2.2) bei statischer und zyklischer Belastung gezeigt, dass nicht nur eine hohe Belastungsgeschwindigkeit, sondern auch Belastungszeiten > 10 s verstärkt plastische Dehnungen hervorrufen.

Gewährt man dem Werkstoff Karton nach einer zyklisch aufgebrachten Belastung eine Relaxationszeit (Kap. 5.3.4 und Kap. 5.4.5), so verringern sich die E-Modul- und Volumenverluste durch Rückbildung der reversiblen Dehnungsanteile. Durch die Gewährung von Entlastungszeiten in den Verarbeitungsprozessen könnte diese Eigenschaft genutzt werden, um die Biegesteifigkeitsverluste zu reduzieren.

Druckbelastungen in ZD-Richtung verursachen bei längeren Belastungszeiten irreversible Dehnungen bzw. Volumenverluste. Diese Belastungen erzeugen gleichzeitig eine Verfestigung und damit eine Steifigkeitssteigerung der Kartonbahn. Für die Minimierung der Biegesteifigkeitsverluste sind minimale irreversible Dehnungen bzw. Volumenverluste und maximale Steifigkeitseigenschaften die Zielgrößen. Diese konträren Ziele sind im Verarbeitungsprozess nur durch optimierte Verarbeitungsprozesse zu erreichen.

### 6.2.2 Konkrete Hinweise zu Verarbeitungsprozessen

Die vorangegangenen experimentellen und theoretischen Ergebnisse zur Biegesteifigkeit von Karton im Grundsätzlichen und zu Biegesteifigkeitsverlusten in Verarbeitungsprozessen im Konkreten ermöglichen die Erarbeitung von Optimierungsmaßnahmen für jeden Verarbeitungsprozess. Das Wissen um Spannungszustände im Karton mittels FEM-Berechnungen für die einzelnen Verarbeitungsprozesse und die experimentelle Ermittlung der sich einstellenden Biegesteifigkeitsverluste bei diesen Spannungen eröffnen nunmehr die Möglichkeit, gezielt Konstruktionsprinzipien oder Maschineneinstellungen auf ihre Auswirkungen hinsichtlich der Biegesteifigkeit zu beurteilen.

### **Umschlungene Walze**

Die in Kapitel 5.2.1 gezeigten theoretischen und experimentellen Ergebnisse zur Variation der Walzendurchmesser zeigen eine Abhängigkeit der in der Kartonbahn auftretenden Spannungen und dem gewählten Walzendurchmesser. Bei großen Walzendurchmessern stellen sich die geringsten Spannungen ein. Ebenso führen kleine Umschlingungswinkel zu geringen Spannungen und damit zu minimalen Steifigkeitsverlusten. Ab einem bestimmten Umschlingungswinkel stellt sich für jeden Walzendurchmesser ein Spannungsgrenzwert ein, der bei weiter zunehmendem Umschlingungswinkel konstant bleibt. Dieser Spannungsgrenzwert wird bei Walzendurchmessern von ca. 60 mm und größer bei einem Umschlingungswinkel von ca.  $10^\circ$  erreicht. Für den Verarbeiter ist es daher sinnvoll, im Verarbeitungsprozess Umschlingungswinkel  $\leq 10^\circ$  anzustreben unter Verwendung von Leitwalzen mit einem größtmöglichen Durchmesser. Sind im Prozess größere Umschlingungswinkel gewünscht, erübrigen sich Maßnahmen hinsichtlich des Umschlingungswinkels. In diesem Fall steht als Optimierungsschritt nur die Vergrößerung des Walzendurchmessers zu Verfügung.

Beim Rakel (Durchmesser  $\leq 30$  mm) stellt sich der konstante Spannungsverlauf ab einem Umschlingungswinkel von ca.  $20^\circ$  ein. Dieser Spannungsgrenzwert ist hinsichtlich der Minimierung von Biegesteifigkeitsverlusten viel zu hoch. Daher ist bei Verwendung von Rakeln ein möglichst kleiner Umschlingungswinkel gekoppelt mit einem geringen Bahnzug zu wählen. Bezüglich des verwendeten Durchmessers des Rakels sind, wie auch bei den Leitwalzen, größtmögliche Durchmesser zu wählen. Obwohl diese Forderungen der Funktion eines Brechrakels diametral entgegenstehen, muss ein optimaler Kompromiss gefunden werden.

### **Walzenpaar**

Geringe Bahnkompressionen bei konstantem Liniendruck und damit verminderte plastische Dehnungsanteile bzw. Biegesteifigkeitsverluste ergeben sich bei Verwendung von großen Walzendurchmessern. Die Untersuchung der Spannungszustände in MD-Richtung für unterschiedliche Walzenpaare zeigt am Kontakteinlauf zwischen Walze und Bahn Spannungsspitzen, deren Dimension mit steigendem Bahnzug und kleiner werdendem Walzendurchmesser steigen. Daher sollte in der Produktion und in der Verarbeitung beim Transport der Bahn durch Walzenpaare der geringst mögliche Bahnzug und größtmögliche Durchmesser gewählt werden. Im Kontaktbereich erzeugen die Walzen einen gegenläufigen Effekt. Einerseits entstehen irreversible Volumen- bzw. Biegesteifigkeitsverluste und andererseits entsteht eine Materialverdichtung und damit eine Biegesteifigkeitserhöhung. Wie schon in /16/ vorgeschlagen, sollte in diesem Prozessabschnitt ein geringer Walzenanpressdruck gewählt werden, um einen Volumenerhalt der Kartonbahn zu gewährleisten. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Spannungsspitzen im Kontaktbereich von Walzenpaaren ist die konstruktive Umgestaltung der Walzen in diesem Prozessabschnitt. Die numerischen Ergebnisse haben gezeigt, dass durch Walzenbeläge mit niedrigem Elastizitätsmodul die auftretenden Spannungsspitzen deutlich reduziert werden können.

### **Wickeln**

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Prozessabschnitt Wickeln haben tangential und radiale Spannungen gezeigt, die unter Berücksichtigung der gezeigten Referenzkurven in Kapitel 4.5 als geringfügig einzustufen sind. Die

Maximalwerte der Spannungen liegen am Wickelkern und am Wickelrand, sie übersteigen aber nicht den kritischen Bereich mit der Folge von plastischen Verformungen. Auch die Variation des Bahnzuges zeigt keine Verschiebung der auftretenden Spannungszustände in den Bereich irreversibler Volumenverluste.

Ein weiterer wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang ist das Thema der Lagerung von Wickel. Unsachgemäße Lagerung kann die Spannungszustände im Wickel gravierend ändern, z.B. durch die Eigengewichtsbelastung des Wickels bei der Lagerung auf dem Boden. Eine schonende Wickelbehandlung bis zur Weiterverarbeitung ist anzustreben, um das Entstehen von unnötigen Belastungen des Wickels zu vermeiden.

### **Nip**

Im äußeren Bereich des Wickels werden die im Wickel gespeicherten Spannungen mit den aus dem Nip erzeugten Belastungen überlagert. Die in radialer Richtung entstehenden Spannungen haben einen druckkegelförmigen Verlauf, der hinsichtlich der Referenzkurven auf Biegesteifigkeitsverluste hinweist. Daraus ergibt sich die Forderungen zur Minimierung dieser Belastungen durch konstruktive Umgestaltung des Nipbereiches, z.B. durch Verwendung von Belagwalzen oder durch Einsatz von Gegenwalzen mit möglichst großem Durchmesser oder durch Riemenabstützung. So haben die beispielhaften Simulationsrechnungen zur Variation des Walzenbelages gezeigt, dass Belagwalzen mit einem geringen Elastizitätsmodul diese Spannungen bereits deutlich herabsetzen.

### **Stapeln**

Unter Berücksichtigung der in Kap 5.4 analysierten Stapelhöhen ist für diesen Verarbeitungsschritt kein Einfluss zu erwarten. Die experimentellen und theoretischen Untersuchungen konnten die Stapelhöhe für die untersuchte Kartonsorte mittels Referenzkurven als unkritisch einstufen. Daher ist das Wissen um einzelne Faktoren wie z.B.:

- punktuelle Belastungen durch Palettenlagerung,
- punktuelle Spannungsspitzen durch unsachgemäßen Transport und
- das Auftreten von additiven Spannungen durch Verpackung

bei der Suche nach Möglichkeiten zur Vermeidung von Biegesteifigkeitsverlusten nun noch wichtig. Ziel muss eine sortengerechte Lagerung bzw. Logistik des Kartons sein.

Für die Verarbeitungsprozesse liefert die folgende Abbildung eine Zusammenfassung der grundlegenden und konkreten Hinweise.

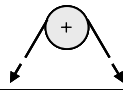
| Einflussgröße<br>↑<br>Effekt                                                             |                                                                                     | Zug                                                                                                                  |                   |                     |                      |                     |              | Druck                                                                      |                   |                     |                      |                     |              |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------------|
|                                                                                          |                                                                                     | Belastungshöhe                                                                                                       | Belastungsgeschw. | Belastungshaltezeit | Entlastungshaltezeit | Belastungshaltezeit | Zyklusanzahl | Belastungshöhe                                                             | Belastungsgeschw. | Belastungshaltezeit | Entlastungshaltezeit | Belastungshaltezeit | Zyklusanzahl |
| <b>Allgemein</b>                                                                         |                                                                                     | <i>quasistatisch</i>                                                                                                 |                   |                     | <i>dynamisch</i>     |                     |              | <i>quasistatisch</i>                                                       |                   |                     | <i>dynamisch</i>     |                     |              |
| elastischen D.A.                                                                         | $\epsilon_e$                                                                        | ↓                                                                                                                    | K                 | ↓                   | K                    | ↓                   | ↓            | ↓                                                                          | ↓                 | ↓                   | K                    | ↓                   | ↓            |
| viskoelastischen D.A.                                                                    | $\epsilon_{ve}$                                                                     | ↑                                                                                                                    | ↓                 | ↑                   | ↑                    | ~                   | ~            | ↓                                                                          | ↓                 | ↓                   | ↑                    | ↑                   | ↓            |
| plastischen D.A.                                                                         | $\epsilon_{pl}$                                                                     | ↑                                                                                                                    | ↑                 | ↑                   | ↓                    | ↑                   | ↑            | ↑                                                                          | ↑                 | ↑                   | ↓                    | ↑                   | ↑            |
| initialer E-Modul                                                                        | $E_{ini (MD)}$                                                                      | K                                                                                                                    | K                 | K                   | K                    | K                   | K            | —                                                                          | —                 | —                   | —                    | —                   | —            |
| effektiver E-Modul                                                                       | $E_{eff (MD)}$                                                                      | —                                                                                                                    | —                 | —                   | ↑                    | ↓                   | ↓            | —                                                                          | —                 | —                   | —                    | —                   | —            |
| <b>Hinweise zur Reduzierung von Biegesteifigkeitsverlusten in der Kartonverarbeitung</b> |                                                                                     |                                                                                                                      |                   |                     |                      |                     |              |                                                                            |                   |                     |                      |                     |              |
| umschl. Walze                                                                            |    | 1. Bahnzug ↓<br>2. Bahngeschwindigkeit ↓<br>3. Belastungszeit ↓<br>4. Entlastungszeit ↑                              |                   |                     |                      |                     |              | 5. Walzenanzahl ↓<br>6. Walzendurchmesser ↓<br>7. Umschlingungswinkel ↓    |                   |                     |                      |                     |              |
| Walzenpaar                                                                               |    | 1. Bahnzug ↓<br>2. Linienkraft ↓<br>3. Belastungszeit ↓<br>4. Entlastungszeit ↑                                      |                   |                     |                      |                     |              | 5. Walzendurchmesser ↑<br>6. Walzenanzahl ↓<br>7. E-Modul der Belagwalze ↓ |                   |                     |                      |                     |              |
| Wickeln                                                                                  |   | 1. Bahnzug ↓<br>2. Lagerzeit ↓<br>3. Belastungsspitzen durch Bodenkontakt ↓                                          |                   |                     |                      |                     |              |                                                                            |                   |                     |                      |                     |              |
| Nip                                                                                      |  | 1. Bahnzug ↓<br>2. Linienkraft ↓<br>3. Belastungszeit ↓                                                              |                   |                     |                      |                     |              | 4. Gegenwalzendurchmesser ↑<br>5. E-Modul der Belagwalze ↓                 |                   |                     |                      |                     |              |
| Stapeln                                                                                  |  | 1. Stapeldruck ↓<br>2. Belastungszeit ↓<br>3. Belastungswirkung durch punktuelle Belastung (Transport, Verpackung) ↓ |                   |                     |                      |                     |              |                                                                            |                   |                     |                      |                     |              |

Abbildung 6-1 Zusammenfassung der Maßnahmen zur Reduzierung der Biegesteifigkeitsverluste

Diese Hinweise beruhen auf den experimentellen und theoretischen Untersuchungen zur Beurteilung der E-Modul-Verluste in MD-Richtung und den Dickenverlusten in ZD-Richtung.

Die Nutzung von Referenzkurven für die jeweilige Kartonsorte ermöglicht die Beurteilung der Biegesteifigkeitsverluste in Abhängigkeit von Konstruktionsprinzipien oder Maschineneinstellungen. Sie versetzen den Verarbeiter in die Lage, seinen Verarbeitungsprozess auf biegesteifigkeitsmindernde Einflussfaktoren und ungünstige konstruktive Maschinenkomponenten zu untersuchen.

## 7 Literatur

- /1/ DIN 6730  
Papier, Pappe, Begriffe  
Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, 1994
- /2/ Paetow, R.  
Über das Spannungs-Verformungs-Verhalten von Papier  
Dissertation 1991, TH Darmstadt
- /3/ Pfeiffer, J. D.  
Measurement of the  $K_2$ -factor for paper  
Paper Finishing Conference, Hershey PA, 1980
- /4/ van Haag, R.  
Über die Druckspannungsverteilung und die Papierkompression im  
Walzenspalt eines Kalanders  
Dissertation 1993, TH Darmstadt
- /5/ Brecht, W.; Knittweis, H.-J.; Schmidt, W.  
Neuere Untersuchungen über das Dehnungsverhalten verschiedener Papiere  
Wochenblatt für Papierfabrikation 99 (1971), Nr. 8, 287 – 292
- /6/ Fellers, C.; Carlsson, L. A.  
Bending stiffness, with special reference to paperboard in Handbook of  
physical and mechanical testing of paper and paperboard  
Marcel Dekker Verlag, 1983, ISBN 0-8247-1871-2, 323 – 347
- /7/ Schaffrath, H. J.  
Über das Kompressions- und Reibverhalten von Papier vor dem Hintergrund  
des Rollenwickelns  
Dissertation 1993, TH Darmstadt
- /8/ Mann, R. W.; Baum, G. A.; Habeger, C. C.  
Determination of all nine orthotropic elastic constants for machine-made  
paper  
TAPPI, Vol. 63, No. 2, 163-166 (February 1980)
- /9/ Götttsching, I.; Baumgarten, H. L.  
Triaxial deformation of paper under tensile load  
Fundamental Research Symposium, Nr. 5, 1973, 227 – 252
- /10/ Castagnede, B, Mark, R. E.; Seo, Y. B.  
New concepts and experimental investigations in the description of the 3-d  
elasticity of paper, Part 2  
Journal of pulp and paper science, 15, Nr. 6, November 1989, J201 – J205

- /11/ Rättö, P.; Rigdahl, M.  
The deformation behaviour in the thickness direction subjected to a short pressure pulse  
Nordic pulp and paper research journal, 3, 1998, 180 - 185
- /12/ Browne, T. C. Crotogino, R. H.; Douglas, W. J. M.  
Viscoelastic modeling of paper in a calender nip  
Journal of pulp and paper science, 22, Nr. 5, May 1996, J170 – J173
- /13/ Heikkilä, I.  
Viscoelastic model of paper surface compressibility  
Paperi ja Puu, Vol. 79, Nr. 3, 1997, 186 – 192
- /14/ Hakiel, Z.  
Nonlinear Model for Wound Roll Stresses  
TAPPI 70 (5), 1987, 113 – 117
- /15/ Goedsche, F.  
Verbesserung der Steifigkeit von Druck- und Administrationspapieren mit kostengünstigen Rohstoffen  
PTS München, PTS-Forschungsberichte, PTS-FB 24/98, ISSN 0937-2091
- /16/ DIN EN ISO 1924 - 2  
Bestimmung von Eigenschaften bei zugförmiger Belastung  
Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, 1995
- /17/ N.N.  
Steifigkeitsentwicklung von Poperoller bis nach Querschneider  
Ringuntersuchung des Zellcheming Fachausschusses Karton und Papier, unveröffentlichter Bericht

## A Anhang

An dieser Stelle werden die Untersuchungsergebnisse dokumentiert, die einerseits zum grundsätzlichen Materialverständnis von Karton beitragen und andererseits die Endergebnisse zur Biegesteifigkeit interpretierbar und begründbar machen. Hierzu gehört insbesondere die konsequente Erfassung der Dehnungsanteile bei quasistatischer und zyklischer Belastung.

### A.1 Einflussfaktoren aus Zugspannungen

#### A.1.1 Einfluss der Belastungshöhe

Karton wird in seiner Verarbeitung unterschiedlichen Belastungshöhen ausgesetzt. Unter Zugrundelegung der DIN EN ISO 1924-2 wurde der Einfluss der Belastungshöhe auf die sich einstellenden Dehnungsanteile untersucht und gem. Kapitel 3.1.3 ausgewertet.

Konstante Parameter:

Belastungshaltezeit (0 s)  
 min. Zugkraft (0.5 N - entspricht einer Zugspannung von 0.07 N/mm<sup>2</sup> in MD-Richtung)  
 Zyklen (1)

| gemessene<br>Dehnungsanteile: | Belastung | e,max | e,pl  | e,vel | e,el  |
|-------------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
|                               | % Bruch   | %     | %     | %     | %     |
| H1 MD                         | 25        | 0.240 | 0.002 | 0.017 | 0.220 |
|                               | 50        | 0.528 | 0.025 | 0.060 | 0.444 |
|                               | 75        | 0.984 | 0.084 | 0.195 | 0.705 |
| normierte<br>Dehnungsanteile: |           | e,max | e,pl  | e,vel | e,el  |
|                               |           | %     | %     | %     | %     |
| H1 MD                         | 25        | 100   | 1.0   | 7.2   | 91.8  |
|                               | 50        | 100   | 4.7   | 11.3  | 84.0  |
|                               | 75        | 100   | 8.6   | 19.8  | 71.6  |

Tabelle A-1 Messergebnisse zur Variation der Belastungshöhe

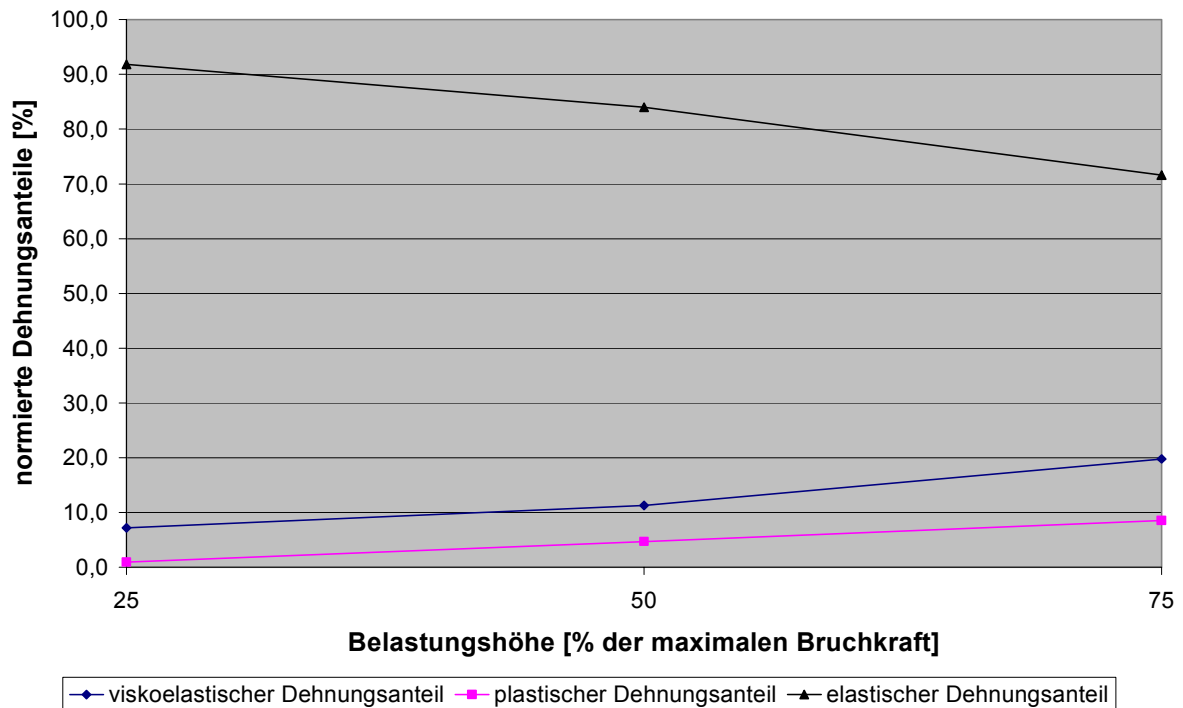


Abbildung A-1 Normierte Dehnungsanteile in Abhängigkeit der Belastungshöhe

Die durchgeführte Variation der maximal aufgebrauchten Kraft liegt im Bereich von 25 – 75 % der gemessenen Bruchkraft. Eindeutig ist der steigende prozentuale Dehnungsanteil der plastischen Verformung zu erkennen. Eine Verdoppelung der aufgebrauchten Kraft von 25 % auf 50 % führt zu einer Verfünffachung der relativen prozentualen plastischen Dehnungsanteile. Eine Kraftverdreifachung verursacht dagegen eine relative Erhöhung der plastischen Dehnungsanteile um das Neunfache. Der relative viskoelastische Dehnungsanteil erfährt einen moderaten prozentualen Anstieg an der Gesamtdehnung (2,8fache) bei gleicher Krafterhöhung. Der relative elastische Dehnungsanteil sinkt um 20 % bei Belastungserhöhung von 25 % auf 75 % der Bruchkraft.

Die Variation der Belastungshöhe zeigt deutlich die Auswirkungen auf die plastischen Dehnungsanteile der Proben. Messungen mit 25 % der Bruchkraft geben jedoch keinen eindeutigen Aufschluss über die elastischen, viskoelastischen, viskoplastischen und plastischen Dehnungsanteile. Daher wurden die weiteren Untersuchungen mit einer Kraft in Höhe von 50 % der Bruchkraft durchgeführt.

### A.1.2 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit

Neben der Belastungshöhe hat die Belastungsgeschwindigkeit einen wesentlichen Einfluss auf das Dehnungsverhalten von Karton. Unter Einhaltung der DIN EN ISO 1924-2 wurde eine Variation der Belastungsgeschwindigkeiten mit den folgenden konstant gehaltenen Parametern untersucht.

Konstante Parameter:

|                     |                                                                                  |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Belastungshaltezeit | (0 s)                                                                            |
| max. Zugkraft       | (95 N - entspricht einer Zugspannung von 12.8 N/mm <sup>2</sup> in MD-Richtung)  |
| min. Zugkraft       | (0.5 N - entspricht einer Zugspannung von 0.07 N/mm <sup>2</sup> in MD-Richtung) |
| Zyklen              | (1)                                                                              |

| gemessene<br>Dehnungsanteile: | v-Belast<br>mm/min | e,max<br>% | e,pl<br>% | e,vel<br>% | e,el<br>% |
|-------------------------------|--------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| H1 MD                         | 1                  | 0,555      | 0,029     | 0,085      | 0,441     |
|                               | 5                  | 0,523      | 0,024     | 0,060      | 0,439     |
|                               | 10                 | 0,528      | 0,025     | 0,060      | 0,444     |
|                               | 50                 | 0,555      | 0,042     | 0,045      | 0,468     |
|                               | 100                | 0,594      | 0,036     | 0,059      | 0,499     |
| normierte<br>Dehnungsanteile: |                    | e,max<br>% | e,pl<br>% | e,vel<br>% | e,el<br>% |
| H1 MD                         | 1                  | 100,0      | 5,3       | 15,3       | 79,4      |
|                               | 5                  | 100,0      | 4,5       | 11,5       | 83,9      |
|                               | 10                 | 100,0      | 4,7       | 11,3       | 84,0      |
|                               | 50                 | 100,0      | 7,6       | 8,1        | 84,3      |
|                               | 100                | 100,0      | 6,1       | 9,9        | 84,0      |

Tabelle A-2 Messergebnisse zur Variation der Belastungsgeschwindigkeit

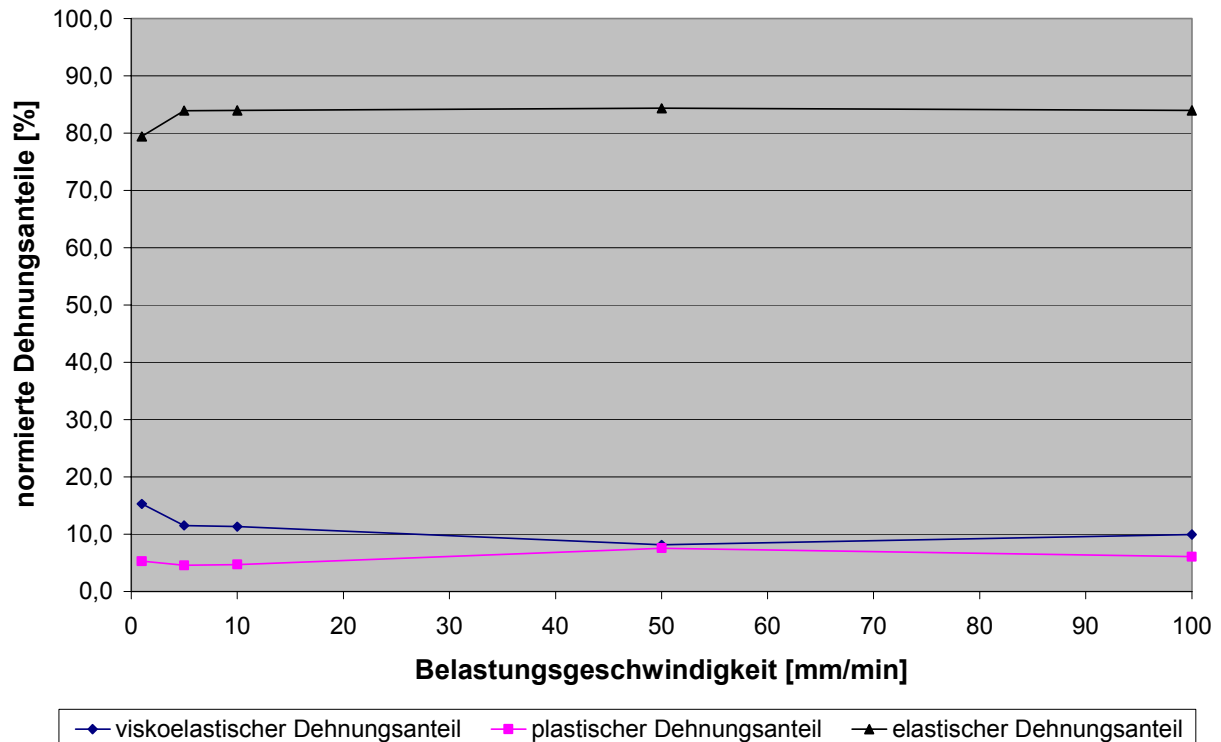


Abbildung A-2 Normierte Dehnungsanteile in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit

Zur Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeiten auf die Dehnungsanteile von Karton wurde eine Geschwindigkeitsvariation von 1 – 100 mm/min durchgeführt. Die dabei erreichte maximale Gesamtdehnung weist eine eindeutige Tendenz auf. Mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit steigt der Anteil der elastischen und der plastischen Dehnung. Der viskoelastische Dehnungsanteil zeigt eine gegenläufige Tendenz.

Eine Betrachtung der prozentualen Dehnungsanteile offenbart jedoch in Bezug zur Gesamtdehnung einen tendenziell steigenden Anteil an plastischer Dehnung zu Lasten der viskoelastischen Dehnungsanteile, bei gleichzeitig fast konstantem, prozentualen, elastischen Dehnungsanteil (Abbildung A-2). Anhand der vorliegenden Versuchsdaten wurde für die weiteren Untersuchungen eine Belastungsgeschwindigkeit von 10 mm/min gewählt, da reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden konnten und eine Analogiebetrachtung unter Berücksichtigung höherer Belastungsgeschwindigkeiten möglich ist.

Im Gegensatz zu der gewählten Belastungsgeschwindigkeit sind in der Realität weitaus höhere Belastungsgeschwindigkeiten zu verzeichnen. Dieser Aspekt ist bei der Auswertung zu berücksichtigen.

### A.1.3 Zyklische Untersuchungen zum Einfluss der Entlastungshaltezeit (Relaxationsverhalten)

In verarbeitenden Prozessen sind Kartonbahnen wiederholt kurzfristigen Be- und Entlastungen ausgesetzt. Zur Analyse dieser zeitabhängigen Vorgänge wurden zyklische Belastungsintervalle an den Kartonproben untersucht. Die Entlastungshaltezeit wurde zwischen 1 und 10.000 s variiert.

Konstante Parameter:

Belastungsgeschwindigkeit (10 mm/min)

Entlastungsgeschwindigkeit (250 mm/min)

Belastungshaltezeit (< 1 s)

max. Zugkraft (95 N - entspricht einer Zugspannung von 12.8 N/mm<sup>2</sup> in MD-Richtung)

min. Zugkraft (0.5 N - entspricht einer Zugspannung von 0.07 N/mm<sup>2</sup> in MD-Richtung)

Zyklen (5)

zyklische Zugversuche

|            |     |     |  |        |       |    |  |         |    |    |
|------------|-----|-----|--|--------|-------|----|--|---------|----|----|
| Hersteller | H1  | --- |  | Breite | 15    | mm |  | Temp.   | 23 | °C |
| Sorte      | GC2 | --- |  | Länge  | 180   | mm |  | rel. LF | 50 | %  |
| Richtung   | MD  | --- |  | Dicke  | 494,7 | µm |  |         |    |    |

|     |                     |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                     |
|-----|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| ID  | n <sub>Proben</sub> | V <sub>Belast</sub> | V <sub>Entlast</sub> | t <sub>Halten,o</sub> | t <sub>Halten,u</sub> | F <sub>Halten,o</sub> | F <sub>Halten,u</sub> | n <sub>Zyklen</sub> |
| --- | ---                 | [mm/min]            | [mm/min]             | [s]                   | [s]                   | [N]                   | [N]                   | ---                 |
| 1   | 2                   | 10                  | 250                  | 0                     | 1                     | 95                    | 0,5                   | 5                   |
| 2   | 2                   | 10                  | 250                  | 0                     | 10                    | 95                    | 0,5                   | 5                   |
| 3   | 2                   | 10                  | 250                  | 0                     | 100                   | 95                    | 0,5                   | 5                   |
| 4   | 2                   | 10                  | 250                  | 0                     | 1000                  | 95                    | 0,5                   | 5                   |
| 5   | 2                   | 10                  | 250                  | 0                     | 10000                 | 95                    | 0,5                   | 5                   |

Versuchsergebnisse:

normierte Versuchsergebnisse:

|     |        |                  |                     |                  |                  |                 |                  |                 |                  |                 |                  |                 |
|-----|--------|------------------|---------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| ID  | Zyklus | F <sub>max</sub> | σ <sub>MD,max</sub> | E <sub>ini</sub> | e <sub>max</sub> | e <sub>pl</sub> | e <sub>vel</sub> | e <sub>el</sub> | e <sub>max</sub> | e <sub>pl</sub> | e <sub>vel</sub> | e <sub>el</sub> |
| --- | ---    | N                | N/mm^2              | N/mm^2           | %                | %               | %                | %               | %                | %               | %                | %               |
| 1   | 1      | 95,9             | 12,92               | 2985,0           | 0,519            | 0,033           | 0,046            | 0,441           | 100,00           | 6,28            | 8,77             | 84,95           |
|     | 2      | 96,1             | 12,96               | 2945,5           | 0,528            | 0,039           | 0,045            | 0,444           | 100,00           | 7,31            | 8,49             | 84,21           |
|     | 3      | 96,3             | 12,98               | 2919,5           | 0,533            | 0,042           | 0,045            | 0,446           | 100,00           | 7,85            | 8,42             | 83,73           |
|     | 4      | 96,3             | 12,98               | 2924,0           | 0,535            | 0,046           | 0,043            | 0,446           | 100,00           | 8,65            | 8,05             | 83,31           |
|     | 5      | 96,3             | 12,97               | 2933,0           | 0,537            | 0,050           | 0,043            | 0,445           | 100,00           | 9,22            | 7,97             | 82,80           |
| 2   | 1      | 95,8             | 12,91               | 2998,5           | 0,521            | 0,021           | 0,056            | 0,445           | 100,00           | 3,94            | 10,70            | 85,36           |
|     | 2      | 96,1             | 12,96               | 2933,5           | 0,528            | 0,026           | 0,050            | 0,452           | 100,00           | 4,89            | 9,54             | 85,57           |
|     | 3      | 96,3             | 12,97               | 2923,5           | 0,532            | 0,028           | 0,054            | 0,450           | 100,00           | 5,31            | 10,16            | 84,52           |
|     | 4      | 96,2             | 12,97               | 2910,5           | 0,534            | 0,030           | 0,058            | 0,446           | 100,00           | 5,69            | 10,85            | 83,46           |
|     | 5      | 96,3             | 12,98               | 2898,0           | 0,536            | 0,033           | 0,057            | 0,447           | 100,00           | 6,08            | 10,56            | 83,36           |
| 3   | 1      | 96,0             | 12,94               | 3057,0           | 0,506            | 0,013           | 0,058            | 0,435           | 100,00           | 2,54            | 11,49            | 85,97           |
|     | 2      | 96,2             | 12,96               | 3006,5           | 0,508            | 0,016           | 0,057            | 0,436           | 100,00           | 3,06            | 11,16            | 85,78           |
|     | 3      | 96,2             | 12,97               | 3011,5           | 0,510            | 0,016           | 0,054            | 0,440           | 100,00           | 3,21            | 10,59            | 86,20           |
|     | 4      | 96,3             | 12,97               | 2991,0           | 0,510            | 0,018           | 0,055            | 0,438           | 100,00           | 3,44            | 10,79            | 85,77           |
|     | 5      | 96,3             | 12,98               | 2992,0           | 0,511            | 0,019           | 0,056            | 0,436           | 100,00           | 3,65            | 11,03            | 85,32           |
| 4   | 1      | 96,0             | 12,93               | 3045,0           | 0,507            | 0,014           | 0,055            | 0,439           | 100,00           | 2,70            | 10,79            | 86,52           |
|     | 2      | 96,1             | 12,95               | 3016,5           | 0,509            | 0,018           | 0,067            | 0,425           | 100,00           | 3,44            | 13,10            | 83,45           |
|     | 3      | 96,2             | 12,97               | 3019,0           | 0,512            | 0,020           | 0,057            | 0,436           | 100,00           | 3,83            | 11,06            | 85,11           |
|     | 4      | 96,1             | 12,96               | 3019,5           | 0,515            | 0,021           | 0,059            | 0,435           | 100,00           | 4,01            | 11,56            | 84,43           |
|     | 5      | 96,3             | 12,97               | 2996,5           | 0,516            | 0,020           | 0,062            | 0,434           | 100,00           | 3,85            | 12,03            | 84,12           |
| 5   | 1      | 96,1             | 12,95               | 3039,0           | 0,513            | 0,020           | 0,047            | 0,445           | 100,00           | 3,95            | 9,24             | 86,81           |
|     | 2      | 96,1             | 12,95               | 3043,0           | 0,517            | 0,025           | 0,066            | 0,427           | 100,00           | 4,77            | 12,70            | 82,53           |
|     | 3      | 96,0             | 12,94               | 3041,0           | 0,521            | 0,027           | 0,059            | 0,436           | 100,00           | 5,11            | 11,30            | 83,60           |
|     | 4      | 96,0             | 12,93               | 3037,0           | 0,524            | 0,027           | 0,065            | 0,431           | 100,00           | 5,20            | 12,42            | 82,38           |
|     | 5      | 96,0             | 12,93               | 3034,0           | 0,524            | 0,027           | 0,061            | 0,436           | 100,00           | 5,12            | 11,63            | 83,25           |

Tabelle A-3 Ergebnisse der Variation der Entlastungshaltezeit bei zyklischer Beanspruchung

Mit zunehmender Zyklenanzahl nimmt das Maß der Gesamtdehnung zu. Die prozentuale Aufteilung in elastische, viskoelastische und plastische Dehnungsanteile zeigt ansteigende Dehnungsanteile im plastischen Bereich (Abbildung A-3). Für den elastischen und viskoelastischen Dehnungsanteil lässt sich kein eindeutiger Trend erkennen.

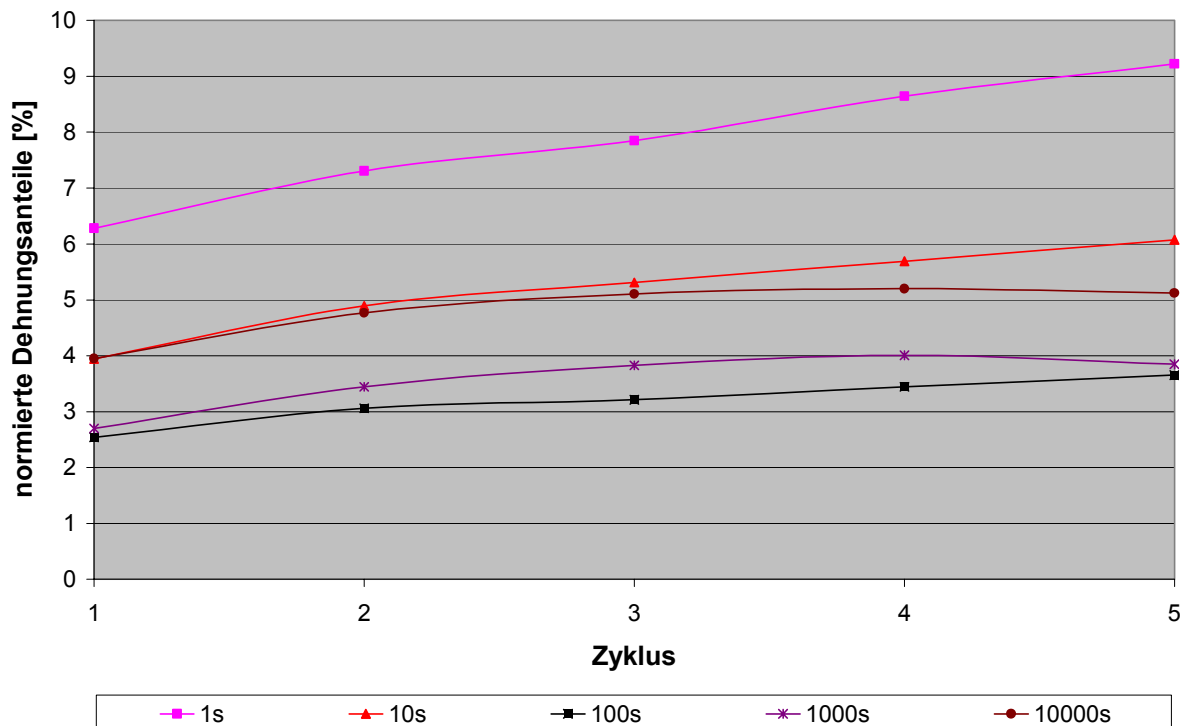


Abbildung A-3 Relative plastische Dehnungsanteile bei Variation der Entlastungshaltezeit und zyklischer Belastung

Ein Vergleich der relativen Dehnungsanteile in Bezug auf die Entlastungsdauer, gleichbedeutend mit dem Zeitraum zur Rückbildung von viskoelastischen Verformungen, zeigt einen Rückgang der plastischen Dehnungsanteile zugunsten der viskoelastischen Dehnungsanteile.

### A.1.4 Zyklische Untersuchungen zum Einfluss der Belastungshaltezeit (Kriechverhalten)

Ein weiterer zeitabhängiger Einflussparameter auf das Dehnungsverhalten von Karton ist die Belastungshaltezeit. Unter Einhaltung nachfolgend genannter konstanter Versuchsgrößen wurde eine Variation der Belastungshaltezeit von 0 bis 1.000 s durchgeführt.

Konstante Parameter:

|                            |                                                                                     |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Belastungsgeschwindigkeit  | (10 mm/min)                                                                         |
| Entlastungsgeschwindigkeit | (250 mm/min)                                                                        |
| Entlastungshaltezeit       | (100 s)                                                                             |
| max. Zugkraft              | (95 N - das entspricht einer Zugspannung von 12.8 N/mm <sup>2</sup> in MD-Richtung) |
| min. Zugkraft              | (1 N - entspricht einer Zugspannung von 0.14 N/mm <sup>2</sup> in MD-Richtung)      |
| Zyklen                     | (5)                                                                                 |

#### zyklische Zugversuche

|            |     |     |        |       |    |         |    |    |
|------------|-----|-----|--------|-------|----|---------|----|----|
| Hersteller | H1  | --- | Breite | 15    | mm | Temp.   | 23 | °C |
| Sorte      | GC2 | --- | Länge  | 180   | mm | rel. LF | 50 | %  |
| Richtung   | MD  | --- | Dicke  | 494,7 | µm |         |    |    |

#### Versuchssystematik:

| ID  | n <sub>Proben</sub> | V <sub>Belast</sub> | V <sub>Entlast</sub> | t <sub>Halten,o</sub> | t <sub>Halten,u</sub> | F <sub>Halten,o</sub> | F <sub>Halten,u</sub> | n <sub>Zyklen</sub> |
|-----|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| --- | ---                 | [mm/min]            | [mm/min]             | [s]                   | [s]                   | [N]                   | [N]                   | ---                 |
| 1   | 2                   | 10                  | 250                  | 0                     | 100                   | 95                    | 1                     | 5                   |
| 2   | 2                   | 10                  | 250                  | 1                     | 100                   | 95                    | 1                     | 5                   |
| 3   | 2                   | 10                  | 250                  | 10                    | 100                   | 95                    | 1                     | 5                   |
| 4   | 2                   | 10                  | 250                  | 100                   | 100                   | 95                    | 1                     | 5                   |
| 5   | 2                   | 10                  | 250                  | 1000                  | 100                   | 95                    | 1                     | 5                   |

#### Versuchsergebnisse:

#### normierte Versuchsergebnisse:

| ID  | Zyklus | F <sub>max</sub> | σ <sub>MD-max</sub> | E <sub>ini</sub>  | e <sub>max</sub> | e <sub>pl</sub> | e <sub>vel</sub> | e <sub>el</sub> | e <sub>max</sub> | e <sub>pl</sub> | e <sub>vel</sub> | e <sub>el</sub> |
|-----|--------|------------------|---------------------|-------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| --- | ---    | N                | N/mm <sup>2</sup>   | N/mm <sup>2</sup> | %                | %               | %                | %               | %                | %               | %                | %               |
| 1   | 1,0    | 96,0             | 12,94               | 3057,0            | 0,506            | 0,016           | 0,057            | 0,432           | 100,000          | 3,224           | 11,285           | 85,492          |
|     | 2,0    | 96,2             | 12,96               | 3031,0            | 0,508            | 0,020           | 0,055            | 0,433           | 100,000          | 3,932           | 10,759           | 85,309          |
|     | 3,0    | 96,2             | 12,97               | 3033,0            | 0,510            | 0,020           | 0,053            | 0,437           | 100,000          | 3,947           | 10,333           | 85,721          |
|     | 4,0    | 96,3             | 12,97               | 3016,0            | 0,510            | 0,021           | 0,054            | 0,435           | 100,000          | 4,165           | 10,535           | 85,300          |
|     | 5,0    | 96,3             | 12,98               | 3014,0            | 0,511            | 0,019           | 0,059            | 0,434           | 100,000          | 3,652           | 11,499           | 84,849          |
| 2   | 1,0    | 97,1             | 13,09               | 3094,5            | 0,530            | 0,023           | 0,067            | 0,440           | 100,000          | 4,344           | 12,627           | 83,028          |
|     | 2,0    | 97,3             | 13,11               | 3066,5            | 0,534            | 0,027           | 0,066            | 0,442           | 100,000          | 5,060           | 12,262           | 82,679          |
|     | 3,0    | 97,1             | 13,09               | 3058,0            | 0,538            | 0,030           | 0,067            | 0,441           | 100,000          | 5,576           | 12,424           | 81,999          |
|     | 4,0    | 97,5             | 13,14               | 3053,0            | 0,540            | 0,031           | 0,065            | 0,444           | 100,000          | 5,817           | 12,082           | 82,101          |
|     | 5,0    | 97,2             | 13,10               | 3047,0            | 0,542            | 0,029           | 0,072            | 0,441           | 100,000          | 5,323           | 13,366           | 81,311          |
| 3   | 1,0    | 95,8             | 12,91               | 2986,5            | 0,588            | 0,038           | 0,101            | 0,449           | 100,000          | 6,514           | 17,117           | 76,369          |
|     | 2,0    | 96,1             | 12,95               | 2933,5            | 0,597            | 0,046           | 0,098            | 0,453           | 100,000          | 7,641           | 16,397           | 75,963          |
|     | 3,0    | 96,3             | 12,98               | 2920,0            | 0,604            | 0,050           | 0,101            | 0,453           | 100,000          | 8,291           | 16,655           | 75,054          |
|     | 4,0    | 96,1             | 12,95               | 2918,5            | 0,606            | 0,054           | 0,099            | 0,454           | 100,000          | 8,856           | 16,358           | 74,786          |
|     | 5,0    | 96,0             | 12,94               | 2913,5            | 0,610            | 0,053           | 0,105            | 0,453           | 100,000          | 8,628           | 17,143           | 74,229          |
| 4   | 1,0    | 96,0             | 12,93               | 3016,0            | 0,637            | 0,061           | 0,131            | 0,445           | 100,000          | 9,508           | 20,638           | 69,854          |
|     | 2,0    | 96,3             | 12,98               | 2942,5            | 0,657            | 0,077           | 0,135            | 0,445           | 100,000          | 11,696          | 20,542           | 67,762          |
|     | 3,0    | 96,0             | 12,94               | 2924,5            | 0,667            | 0,087           | 0,137            | 0,443           | 100,000          | 13,110          | 20,483           | 66,407          |
|     | 4,0    | 96,1             | 12,94               | 2887,5            | 0,676            | 0,095           | 0,137            | 0,444           | 100,000          | 14,100          | 20,317           | 65,583          |
|     | 5,0    | 96,1             | 12,95               | 2883,5            | 0,682            | 0,098           | 0,137            | 0,447           | 100,000          | 14,423          | 20,098           | 65,479          |
| 5   | 1,0    | 97,2             | 13,10               | 3031,0            | 0,713            | 0,124           | 0,152            | 0,437           | 100,000          | 17,349          | 21,367           | 61,284          |
|     | 2,0    | 97,2             | 13,09               | 2906,0            | 0,744            | 0,157           | 0,154            | 0,433           | 100,000          | 21,139          | 20,685           | 58,175          |
|     | 3,0    | 97,0             | 13,07               | 2895,0            | 0,763            | 0,179           | 0,154            | 0,430           | 100,000          | 23,463          | 20,134           | 56,404          |
|     | 4,0    | 97,2             | 13,10               | 2884,5            | 0,779            | 0,195           | 0,152            | 0,432           | 100,000          | 25,055          | 19,488           | 55,457          |
|     | 5,0    | 97,1             | 13,09               | 2889,5            | 0,790            | 0,204           | 0,155            | 0,430           | 100,000          | 25,842          | 19,687           | 54,471          |

Tabelle A-4 Ergebnisse der Variation der Belastungshaltezeit bei zyklischer Beanspruchung

Alle Versuchsreihen zeigen mit steigender Zyklusanzahl einen Anstieg der Gesamtdehnung bzw. der plastischen und viskoelastischen Dehnungsanteile. Der absolute elastische Dehnungsanteil ist jedoch nahezu konstant.

Mit zunehmender Belastungshöhe steigen die relativen plastischen und viskoelastischen Dehnungsanteile. Exemplarisch sind in Abbildung A-4 verschiedene Belastungszeiträume und ihre Auswirkungen auf die sich einstellenden relativen plastischen Dehnungsanteile dargestellt.

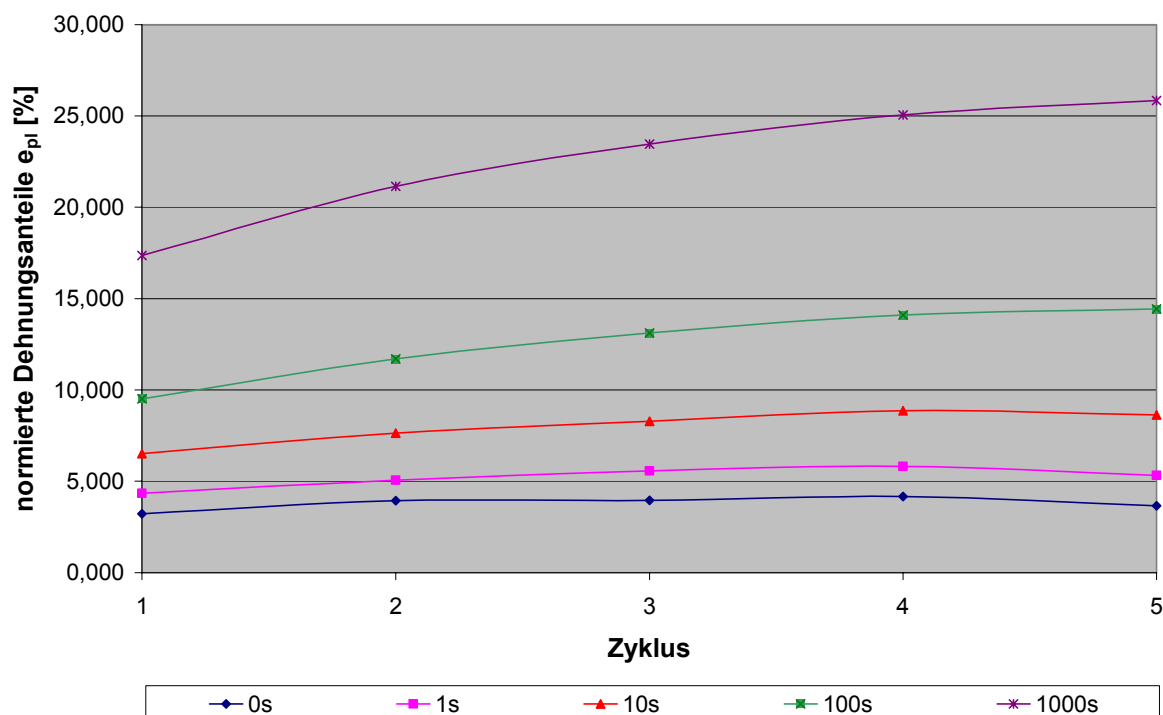


Abbildung A-4 Relative plastische Dehnungsanteile bei Variation der Belastungshaltezeit und zyklischer Belastung

## A.2 Einflussfaktoren aus Druckbeanspruchungen

### A.2.1 Einfluss der Belastungshöhe

In Verarbeitungsprozessen erfährt die Kartonbahn Druckspannungen in ZD-Richtung. Das Dehnungsverhalten in dieser Richtung wird bei Variation der Belastungshöhe in diesem Abschnitt untersucht. Folgende konstante Versuchsgrößen lagen der Untersuchung zugrunde:

Konstante Parameter:

|                            |                                                                                 |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Druckfläche                | (19,63 mm <sup>2</sup> )                                                        |
| Belastungsgeschwindigkeit  | (1 mm/min)                                                                      |
| Entlastungsgeschwindigkeit | (1 mm/min)                                                                      |
| Belastungshaltezeit        | (600 s)                                                                         |
| min. Druckkraft            | (2 N - entspricht einer Druckspannung von 0.1 N/mm <sup>2</sup> in ZD-Richtung) |

| F <sub>max</sub> | σ <sub>ZDmax</sub>   | e <sub>max</sub> | e <sub>pl</sub> | e <sub>vel</sub> | e <sub>el</sub> |
|------------------|----------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| [N]              | [N/mm <sup>2</sup> ] | [%]              | [%]             | [%]              | [%]             |
| 100              | 5.1                  | 25.99            | 9.25            | 7.88             | 8.86            |
| 250              | 12.7                 | 38.54            | 18.42           | 9.78             | 10.33           |
| 500              | 25.5                 | 46.18            | 26.11           | 10.21            | 9.86            |
| 750              | 38.2                 | 50.44            | 30.60           | 9.96             | 9.87            |
| 1000             | 50.9                 | 50.945           | 34.069          | 10.780           | 6.096           |

normierte Versuchsergebnisse:

| F <sub>max</sub> | e <sub>max</sub> | e <sub>pl</sub> | e <sub>vel</sub> | e <sub>el</sub> |
|------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| [%]              | [%]              | [%]             | [%]              | [%]             |
| 10               | 100              | 35.60           | 30.31            | 34.09           |
| 25               | 100              | 47.80           | 25.38            | 26.82           |
| 50               | 100              | 56.53           | 22.11            | 21.36           |
| 75               | 100              | 60.67           | 19.76            | 19.57           |
| 100              | 100              | 66.87           | 21.16            | 11.97           |

Tabelle A-5 Ergebnisse der Variation der Belastungshöhe

Die Betrachtung der absoluten Werte (Tabelle A-5) zeigt einen Anstieg der Gesamtdehnung und der plastischen Dehnung. Der viskoelastische Dehnungsanteil steigt von 7.88 % auf 9.78 % im ersten Variationsschritt. Die nächsten drei weiteren Belastungserhöhungen verursachten keinen deutlichen Anstieg des absoluten viskoelastischen Wertes. Die elastischen Dehnungsanteile sind in ihrer Tendenz nicht einheitlich. Ein in der ersten Variation gemessener Anstieg von 8.86 % steht einer Minderung von 9.87 % auf 6.1 % (Belastungsvariation von 38.2 N/mm<sup>2</sup> auf 50.9 N/mm<sup>2</sup>) gegenüber.

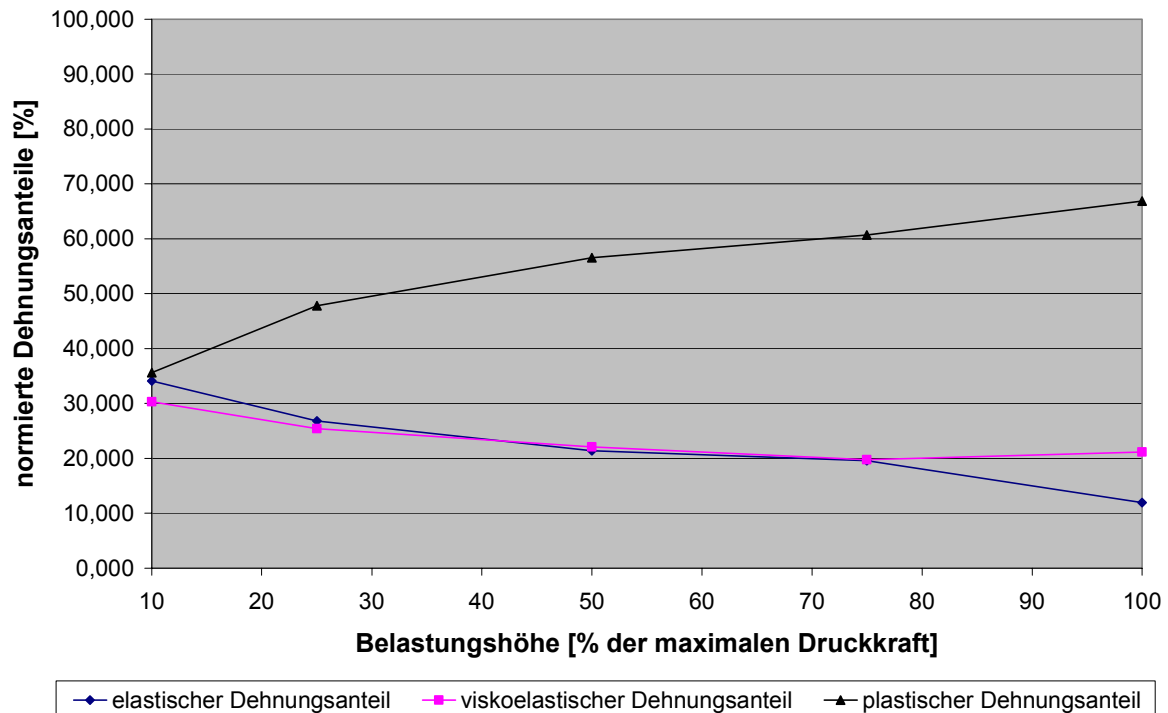


Abbildung A-5 Normierte Dehnungsanteile in Abhängigkeit der Belastungshöhe

Die Umrechnung auf relative Größen gibt Aufschluss über die Veränderung der einzelnen Dehnungsanteile. Diese relativen Größen zeigen deutlich die Erhöhung der plastischen Dehnungsanteile zu Lasten der viskoelastischen und elastischen Dehnungsanteile. Eine kontinuierliche Zunahme bis zu einer Gesamthöhe von 31.27 % ist für den relativen plastischen Dehnungsanteil gemessen worden. Die Variation der Belastungshöhe verursacht im viskoelastischen Bereich eine relative Reduzierung um 9.15 % und für die relativen elastischen Dehnungsanteile eine Reduzierung um 22.12 %. Für die weiteren Versuche wird eine konstante Belastungshöhe von  $38.2 \text{ N/mm}^2$  (75 % der maximalen Druckkraft) gewählt, da sich die Ergebnisse bei dieser Einstellung als reproduzierbar erwiesen.

## A.2.2 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit

In Analogie zu den geschilderten Ergebnissen für Zugspannungen wird auch hier der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit untersucht. Die nachfolgend aufgeführten Parameter lagen der Versuchsreihe zugrunde:

Parameter:

|                            |                                                                                                      |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| max. Druckkraft            | (750 N)                                                                                              |
| Druckspannung              | (38,2 N/mm <sup>2</sup> )                                                                            |
| Entlastungsgeschwindigkeit | (10 mm/min)                                                                                          |
| Entlastungshaltezeit       | (600s)                                                                                               |
| min. Druckkraft            | (2 – 6 N entspricht einem Druckspannungsbereich zwischen 0.1 – 0.3 N/mm <sup>2</sup> in ZD-Richtung) |
| Zyklen                     | (1)                                                                                                  |

| Variation Belastungsgeschwindigkeit -Druckversuche- |                     |                     |                      |                       |                               |                       |                       |                     |       |
|-----------------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-------|
| Hersteller                                          | H1                  | ---                 |                      | Radius                | 2,5                           | mm                    |                       | Temp.               | 23 °C |
| Sorte                                               | GC2                 | ---                 |                      | Fläche                | 19,63                         | mm <sup>2</sup>       |                       | rel. LF             | 50 %  |
| Richtung                                            | ZD                  | ---                 |                      |                       |                               |                       |                       |                     |       |
| Versuchssystematik:                                 |                     |                     |                      |                       |                               |                       |                       |                     |       |
| ID                                                  | n <sub>Proben</sub> | V <sub>Belast</sub> | V <sub>Entlast</sub> | t <sub>Halten,o</sub> | t <sub>Halten,u</sub>         | F <sub>Halten,o</sub> | F <sub>Halten,u</sub> | n <sub>Zyklen</sub> |       |
| ---                                                 | ---                 | [mm/min]            | [mm/min]             | [s]                   | [s]                           | [N]                   | [N]                   | ---                 |       |
| 1                                                   | 5                   | 0,1                 | 10                   | 0                     | 600                           | 750                   | 2                     | 1                   |       |
| 2                                                   | 5                   | 0,5                 | 10                   | 0                     | 600                           | 753                   | 2                     | 1                   |       |
| 3                                                   | 5                   | 1                   | 10                   | 0                     | 600                           | 757                   | 2                     | 1                   |       |
| 4                                                   | 5                   | 5                   | 10                   | 0                     | 600                           | 780                   | 2                     | 1                   |       |
| 5                                                   | 5                   | 10                  | 10                   | 0                     | 600                           | 824                   | 2                     | 1                   |       |
| Versuchsergebnisse:                                 |                     |                     |                      |                       |                               |                       |                       |                     |       |
| v-Belastung                                         | e <sub>max</sub>    | e <sub>pl</sub>     | e <sub>vel</sub>     | e <sub>el</sub>       | normierte Versuchsergebnisse: |                       |                       |                     |       |
| [s]                                                 | %                   | %                   | %                    | %                     | e <sub>max</sub>              | e <sub>pl</sub>       | e <sub>vel</sub>      | e <sub>el</sub>     |       |
|                                                     |                     |                     |                      |                       | %                             | %                     | %                     | %                   |       |
| 0,1                                                 | 51,084              | 25,173              | 16,893               | 9,018                 | 100,000                       | 49,278                | 33,069                | 17,652              |       |
| 0,5                                                 | 51,094              | 26,092              | 15,260               | 9,742                 | 100,000                       | 51,067                | 29,867                | 19,066              |       |
| 1                                                   | 50,421              | 26,202              | 14,726               | 9,493                 | 100,000                       | 51,967                | 29,206                | 18,827              |       |
| 5                                                   | 50,806              | 27,576              | 14,112               | 9,118                 | 100,000                       | 54,277                | 27,775                | 17,947              |       |
| 10                                                  | 52,159              | 30,428              | 13,660               | 8,070                 | 100,000                       | 58,338                | 26,190                | 15,472              |       |

Tabelle A-6 Ergebnisse der Variation der Belastungsgeschwindigkeit

Die Veränderung der plastischen Dehnungsanteile bei Steigerung der Belastungsgeschwindigkeit ist durch eine Zunahme gekennzeichnet. Gleichzeitig erhöht sich jedoch die maximale Belastungshöhe, bedingt durch das Regelungsverhalten der Universalprüfmaschine. Ein Vergleich der prozentualen Erhöhungen zeigt eine Spannungserhöhung von 10.3 % und eine Erhöhung von 20.9 % der absoluten prozentualen plastischen Dehnungsanteile.

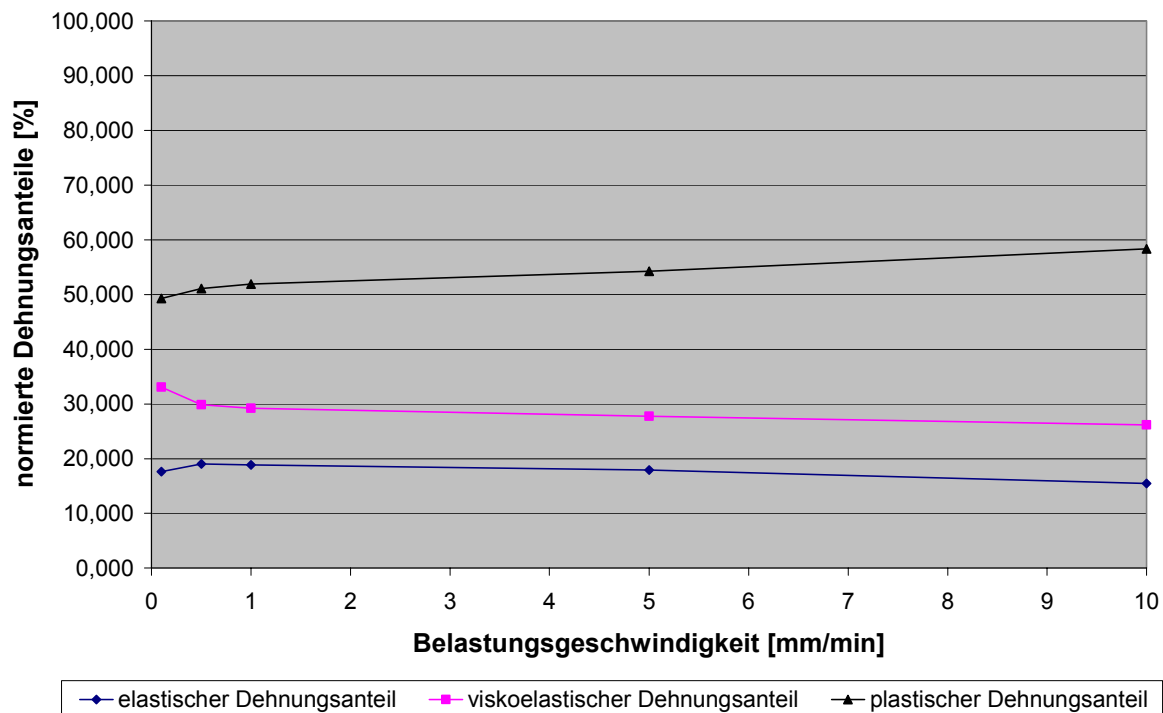


Abbildung A-6 Normierte Dehnungsanteile in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit

Die Betrachtung der normierten und damit relativierten Versuchsergebnisse verdeutlicht diese Aussage. Der relative plastische Dehnungsanteil erhöht sich in Bezug zur maximal erreichten Dehnung um 9.06 %. Diese Zunahme impliziert relative und absolute Minderungen im viskoelastischen und elastischen Bereich. Der relative viskoelastische Dehnungsanteil sinkt um ca. 6.9 % und der relative elastische Dehnungsanteil verringert sich von ca. 17.7 % auf ca. 15.5 %. Die Belastungsgeschwindigkeit hat somit Einfluss auf die Ausbildung der einzelnen Dehnungsanteile.

Für die weiteren Versuche wird eine konstante Belastungsgeschwindigkeit von 1 mm/min gewählt, da die Ergebnisse sich bei dieser Einstellung als reproduzierbar erwiesen. Wünschenswert wäre an dieser Stelle eine höhere Belastungsgeschwindigkeit, da im Verarbeitungsprozess der Karton annähernd stoßartigen Druckbelastungen ausgesetzt ist.

### A.2.3 Zyklische Untersuchungen zum Einfluss der Entlastungshaltezeit (Relaxationsverhalten)

Belastungsintervalle mit unterschiedlicher Dauer beeinflussen den Karton auch unter Druckbeanspruchung in seinen Materialeigenschaften. In diesem Kapitel wird der Einfluss der Entlastungshaltezeit (0 – 1000 s) unter folgenden konstanten Parametern untersucht:

Konstante Parameter:

|                           |                                                                                  |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Druckfläche               | (19.63 mm <sup>2</sup> )                                                         |
| Belastungsgeschwindigkeit | (1 mm/min)                                                                       |
| max. Druckkraft           | (750 N)                                                                          |
| Druckspannung             | (38.2 N/mm <sup>2</sup> )                                                        |
| min. Druckkraft           | (3 N - entspricht einer Druckspannung von 0.15 N/mm <sup>2</sup> in ZD-Richtung) |
| Zyklen                    | (4)                                                                              |

| Zyklische Druckversuche       |         |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                  |                 |                  |                 |
|-------------------------------|---------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Hersteller                    | H1      | ---                 |                      | Fläche                | 19,63                 | mm <sup>2</sup>       |                       | Temp.            | 23              | °C               |                 |
| Sorte                         | GC2     | ---                 |                      | Länge                 | ---                   | mm                    |                       | rel. LF          | 50              | %                |                 |
| Richtung                      | ZD      | ---                 |                      | Dicke                 | 493,70                | µm                    |                       |                  |                 |                  |                 |
| Versuchssystematik            |         |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                  |                 |                  |                 |
| ID                            | nProben | V <sub>Belast</sub> | V <sub>Entlast</sub> | t <sub>Halten,o</sub> | t <sub>Halten,u</sub> | F <sub>Halten,o</sub> | F <sub>Halten,u</sub> | nZyklen          |                 |                  |                 |
| ---                           | ---     | [mm/min]            | [mm/min]             | [s]                   | [s]                   | [N]                   | [N]                   | ---              |                 |                  |                 |
| 1                             | 4       | 1                   | 10                   | 0                     | 0                     | 750                   | 3                     | 5                |                 |                  |                 |
| 2                             | 3       | 1                   | 10                   | 0                     | 1                     | 750                   | 3                     | 5                |                 |                  |                 |
| 3                             | 3       | 1                   | 10                   | 0                     | 10                    | 750                   | 3                     | 5                |                 |                  |                 |
| 4                             | 3       | 1                   | 10                   | 0                     | 100                   | 750                   | 3                     | 5                |                 |                  |                 |
| 5                             | 3       | 1                   | 10                   | 0                     | 1000                  | 750                   | 3                     | 5                |                 |                  |                 |
| Versuchsergebnisse:           |         |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                  |                 |                  |                 |
| normierte Versuchsergebnisse: |         |                     |                      |                       |                       |                       |                       |                  |                 |                  |                 |
| ID                            | Zyklus  | F <sub>ZDmax</sub>  | σ <sub>ZDmax</sub>   | e <sub>max</sub>      | e <sub>pl</sub>       | e <sub>vel</sub>      | e <sub>el</sub>       | e <sub>max</sub> | e <sub>pl</sub> | e <sub>vel</sub> | e <sub>el</sub> |
| ---                           | ---     | N                   | N/mm^2               | %                     | %                     | %                     | %                     | %                | %               | %                | %               |
| 1                             | 1       | -757,6              | -38,58               | -50,260               | -31,929               | -9,120                | -9,210                | 100,000          | 63,528          | 18,147           | 18,325          |
|                               | 2       | -760,0              | -38,71               | -50,619               | -33,789               | -8,081                | -8,748                | 100,000          | 66,753          | 15,964           | 17,283          |
|                               | 3       | -760,5              | -38,73               | -50,829               | -34,749               | -7,779                | -8,301                | 100,000          | 68,363          | 15,305           | 16,332          |
|                               | 4       | -761,1              | -38,76               | -50,904               | -35,452               | -7,513                | -7,939                | 100,000          | 69,645          | 14,760           | 15,595          |
| 2                             | 1       | -756,8              | -38,54               | -50,608               | -29,358               | -12,246               | -9,005                | 100,000          | 58,009          | 24,198           | 17,793          |
|                               | 2       | -759,3              | -38,67               | -51,021               | -31,643               | -10,927               | -8,451                | 100,000          | 62,019          | 21,417           | 16,565          |
|                               | 3       | -760,0              | -38,71               | -51,257               | -32,801               | -10,159               | -8,297                | 100,000          | 63,993          | 19,820           | 16,187          |
|                               | 4       | -760,0              | -38,71               | -51,295               | -33,657               | -9,397                | -8,241                | 100,000          | 65,616          | 18,319           | 16,065          |
| 3                             | 1       | -757,4              | -38,57               | -51,091               | -28,056               | -14,014               | -9,021                | 100,000          | 54,914          | 27,429           | 17,657          |
|                               | 2       | -758,4              | -38,63               | -51,429               | -30,130               | -12,738               | -8,561                | 100,000          | 58,586          | 24,769           | 16,646          |
|                               | 3       | -759,2              | -38,67               | -51,532               | -31,490               | -11,523               | -8,519                | 100,000          | 61,107          | 22,361           | 16,532          |
|                               | 4       | -760,2              | -38,71               | -51,648               | -32,273               | -11,104               | -8,271                | 100,000          | 62,486          | 21,500           | 16,014          |
| 4                             | 1       | -757,8              | -38,59               | -49,965               | -25,421               | -15,347               | -9,197                | 100,000          | 50,878          | 30,715           | 18,406          |
|                               | 2       | -758,8              | -38,65               | -50,190               | -27,643               | -13,598               | -8,948                | 100,000          | 55,077          | 27,094           | 17,829          |
|                               | 3       | -760,1              | -38,71               | -50,405               | -28,695               | -12,905               | -8,806                | 100,000          | 56,929          | 25,602           | 17,470          |
|                               | 4       | -760,6              | -38,74               | -50,512               | -29,380               | -12,132               | -9,000                | 100,000          | 58,165          | 24,018           | 17,817          |
| 5                             | 1       | -756,6              | -38,53               | -50,761               | -24,987               | -16,931               | -8,844                | 100,000          | 49,224          | 33,354           | 17,422          |
|                               | 2       | -757,2              | -38,57               | -50,947               | -27,639               | -15,320               | -7,987                | 100,000          | 54,252          | 30,071           | 15,677          |
|                               | 3       | -758,4              | -38,62               | -51,223               | -28,943               | -13,821               | -8,459                | 100,000          | 56,504          | 26,982           | 16,514          |
|                               | 4       | -759,1              | -38,66               | -51,534               | -29,732               | -13,341               | -8,460                | 100,000          | 57,695          | 25,888           | 16,417          |

Tabelle A-7 Ergebnisse der Variation der Entlastungshaltezeit

Zunehmende absolute plastische Dehnungsanteile sind mit wachsender Zyklanzahl zu verzeichnen, bei gleichzeitiger Minderung der absoluten viskoelastischen und elastischen Dehnungsanteile.

Für die Ausbildung der absoluten plastischen Dehnungsanteile ist eine Abhängigkeit von der Entlastungshaltezeit feststellbar. Hohe Entlastungshaltezeiten führen im Gegensatz zu deutlich kürzeren Entlastungshaltezeiten zu geringeren absoluten plastischen Dehnungsanteilen. Dieser Anstieg spiegelt sich in der Zunahme der absoluten viskoelastischen Dehnungsanteile wider.

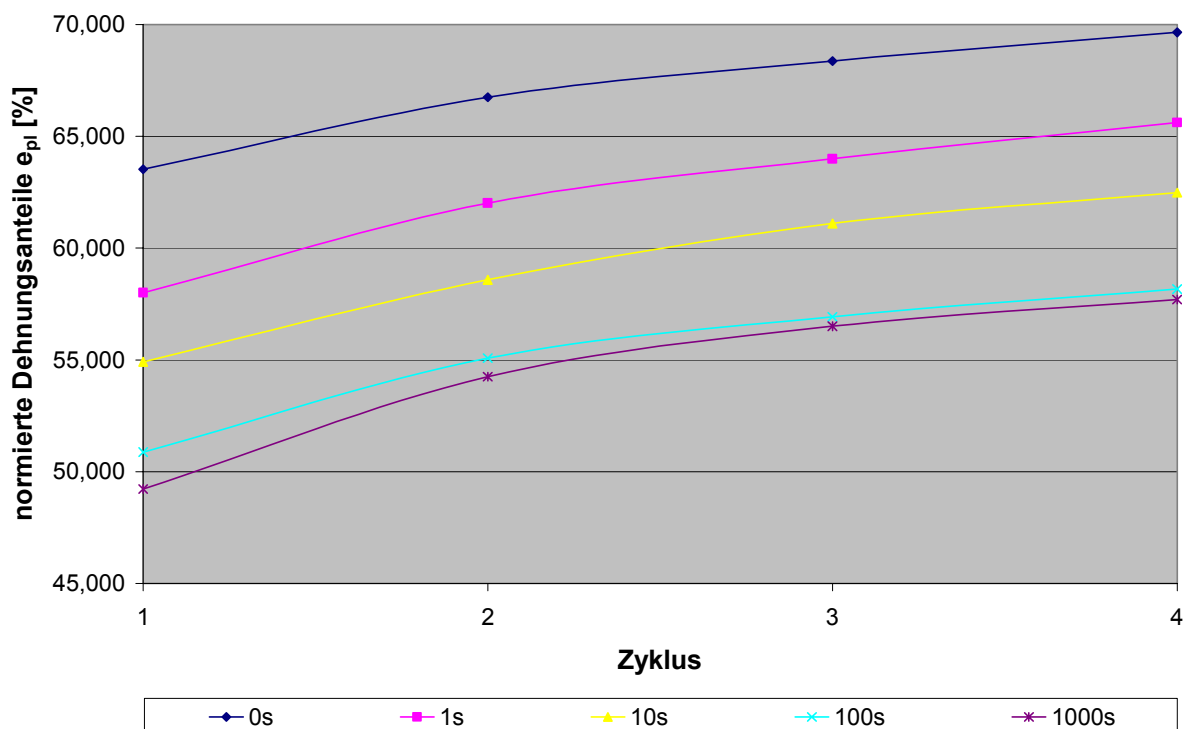


Abbildung A-7 Prozentuale plastische Dehnungsanteile in Abhängigkeit der Entlastungshaltezeit

Die Betrachtung der relativen Dehnungsanteile bei zyklischer Belastung mit konstanter Entlastungshaltezeit zeigt unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit eindeutige Tendenzen. Der relative plastische Dehnungsanteil (Abbildung A-7) steigt mit zunehmender Zyklanzahl, während der elastische und der viskoelastische relative Dehnungsanteil abnimmt.

Die Analyse der Vergleichsmessungen von Belastungszyklen mit variierten Entlastungshaltezeiten erlaubt eine Aussage über die Entwicklung der unterschiedlichen Dehnungsanteile. Der in Abbildung A-7 dargestellte relative plastische Dehnungsanteil nimmt mit zunehmender Entlastungshaltezeit zu Gunsten des relativen viskoelastischen Dehnungsanteils ab.

### A.2.4 Zyklische Untersuchungen zum Einfluss der Belastungshaltezeit (Kriechverhalten)

Die in Tabelle A-8 aufgeführte Versuchsreihe soll Erkenntnisse über die Auswirkungen von Belastungshaltezeiten auf die Dehnungsanteile der Dickenrichtung liefern. Hierbei wurde die Belastungshaltezeit zwischen 0 – 1000 s variiert.

Konstante Parameter:

|                           |                                                                                 |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Druckfläche               | (19.63 mm <sup>2</sup> )                                                        |
| Belastungsgeschwindigkeit | (1 mm/min)                                                                      |
| max. Druckkraft           | (750 mm)                                                                        |
| Druckspannung             | (38.2 N/mm <sup>2</sup> )                                                       |
| min. Druckkraft           | (6 N - entspricht einer Druckspannung von 0.3 N/mm <sup>2</sup> in ZD-Richtung) |
| Zyklen                    | (4)                                                                             |

| Zyklische Druckversuche       |         |                    |                    |                       |                       |                       |                       |         |       |       |       |
|-------------------------------|---------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|-------|-------|-------|
| Hersteller                    | H1      | ---                |                    | Fläche                | 19,63                 | mm <sup>2</sup>       |                       | Temp.   | 23    | °C    |       |
| Sorte                         | GC2     | ---                |                    | Länge                 | ---                   | mm                    |                       | rel. LF | 50    | %     |       |
| Richtung                      | ZD      | ---                |                    | Dicke                 | 493,70                | µm                    |                       |         |       |       |       |
| Versuchssystematik            |         |                    |                    |                       |                       |                       |                       |         |       |       |       |
| ID                            | nProben | VBelast            | VEntlast           | t <sub>Halten,o</sub> | t <sub>Halten,u</sub> | F <sub>Halten,o</sub> | F <sub>Halten,u</sub> | nZyklen |       |       |       |
| ---                           | ---     | [mm/min]           | [mm/min]           | [s]                   | [s]                   | [N]                   | [N]                   | ---     |       |       |       |
| 1                             | 3       | 1                  | 10                 | 0                     | 10                    | 750                   | 6                     | 5       |       |       |       |
| 2                             | 4       | 1                  | 10                 | 1                     | 10                    | 750                   | 6                     | 5       |       |       |       |
| 3                             | 4       | 1                  | 10                 | 10                    | 10                    | 750                   | 6                     | 5       |       |       |       |
| 4                             | 4       | 1                  | 10                 | 100                   | 10                    | 750                   | 6                     | 5       |       |       |       |
| 5                             | 3       | 1                  | 10                 | 1000                  | 10                    | 750                   | 6                     | 5       |       |       |       |
| Versuchsergebnisse:           |         |                    |                    |                       |                       |                       |                       |         |       |       |       |
| normierte Versuchsergebnisse: |         |                    |                    |                       |                       |                       |                       |         |       |       |       |
| ID                            | Zyklus  | F <sub>ZDmax</sub> | σ <sub>ZDmax</sub> | e,max                 | e,pl                  | e,vel                 | e,el                  | e,max   | e,pl  | e,vel | e,el  |
| ---                           | ---     | N                  | N/mm^2             | %                     | %                     | %                     | %                     | %       | %     | %     | %     |
| 1                             | 1       | -751,4             | -38,27             | -49,172               | -33,820               | -7,356                | -7,995                | 100,000 | 68,78 | 14,96 | 16,26 |
|                               | 2       | -751,9             | -38,29             | -49,359               | -35,659               | -6,070                | -7,630                | 100,000 | 72,24 | 12,30 | 15,46 |
|                               | 3       | -751,7             | -38,28             | -49,490               | -36,719               | -5,520                | -7,251                | 100,000 | 74,20 | 11,15 | 14,65 |
|                               | 4       | -752,3             | -38,31             | -49,511               | -37,447               | -4,431                | -7,633                | 100,000 | 75,63 | 8,95  | 15,42 |
| 2                             | 1       | -752,0             | -38,30             | -49,630               | -34,093               | -6,705                | -8,833                | 100,000 | 68,69 | 13,51 | 17,80 |
|                               | 2       | -752,4             | -38,32             | -49,707               | -36,123               | -6,104                | -7,480                | 100,000 | 72,67 | 12,28 | 15,05 |
|                               | 3       | -753,3             | -38,36             | -49,926               | -37,167               | -5,618                | -7,141                | 100,000 | 74,44 | 11,25 | 14,30 |
|                               | 4       | -753,2             | -38,36             | -49,978               | -37,807               | -5,886                | -6,286                | 100,000 | 75,65 | 11,78 | 12,58 |
| 3                             | 1       | -752,6             | -38,33             | -51,186               | -36,736               | -7,164                | -7,286                | 100,000 | 71,77 | 14,00 | 14,23 |
|                               | 2       | -753,5             | -38,38             | -51,338               | -38,805               | -6,476                | -6,057                | 100,000 | 75,59 | 12,61 | 11,80 |
|                               | 3       | -753,4             | -38,37             | -51,519               | -39,670               | -5,319                | -6,530                | 100,000 | 77,00 | 10,32 | 12,67 |
|                               | 4       | -754,8             | -38,44             | -51,703               | -40,362               | -5,613                | -5,728                | 100,000 | 78,07 | 10,86 | 11,08 |
| 4                             | 1       | -753,1             | -38,36             | -52,039               | -39,981               | -5,986                | -6,072                | 100,000 | 76,83 | 11,50 | 11,67 |
|                               | 2       | -753,1             | -38,36             | -52,434               | -41,789               | -4,509                | -6,136                | 100,000 | 79,70 | 8,60  | 11,70 |
|                               | 3       | -753,1             | -38,36             | -52,681               | -42,789               | -4,336                | -5,557                | 100,000 | 81,22 | 8,23  | 10,55 |
|                               | 4       | -754,6             | -38,43             | -52,875               | -43,527               | -3,969                | -5,379                | 100,000 | 82,32 | 7,51  | 10,17 |
| 5                             | 1       | -753,6             | -38,38             | -52,494               | -42,435               | -5,100                | -4,959                | 100,000 | 80,84 | 9,72  | 9,45  |
|                               | 2       | -753,2             | -38,36             | -52,895               | -44,078               | -4,522                | -4,295                | 100,000 | 83,33 | 8,55  | 8,12  |
|                               | 3       | -753,8             | -38,39             | -53,113               | -44,808               | -4,317                | -3,988                | 100,000 | 84,36 | 8,13  | 7,51  |
|                               | 4       | -753,4             | -38,37             | -53,246               | -45,472               | -3,973                | -3,802                | 100,000 | 85,40 | 7,46  | 7,14  |

Tabelle A-8 Ergebnisse der Variation der Belastungshaltezeit

Die Betrachtung der einzelnen Zyklen bei gleichen Belastungshaltezeiten zeigt im Rahmen der Messgenauigkeit für die Gesamtdehnung einen nahezu konstanten Wert. Der relative plastische Dehnungsanteil (Abbildung A-8) erhöht sich zu Lasten der viskoelastischen und elastischen Dehnungsanteile.

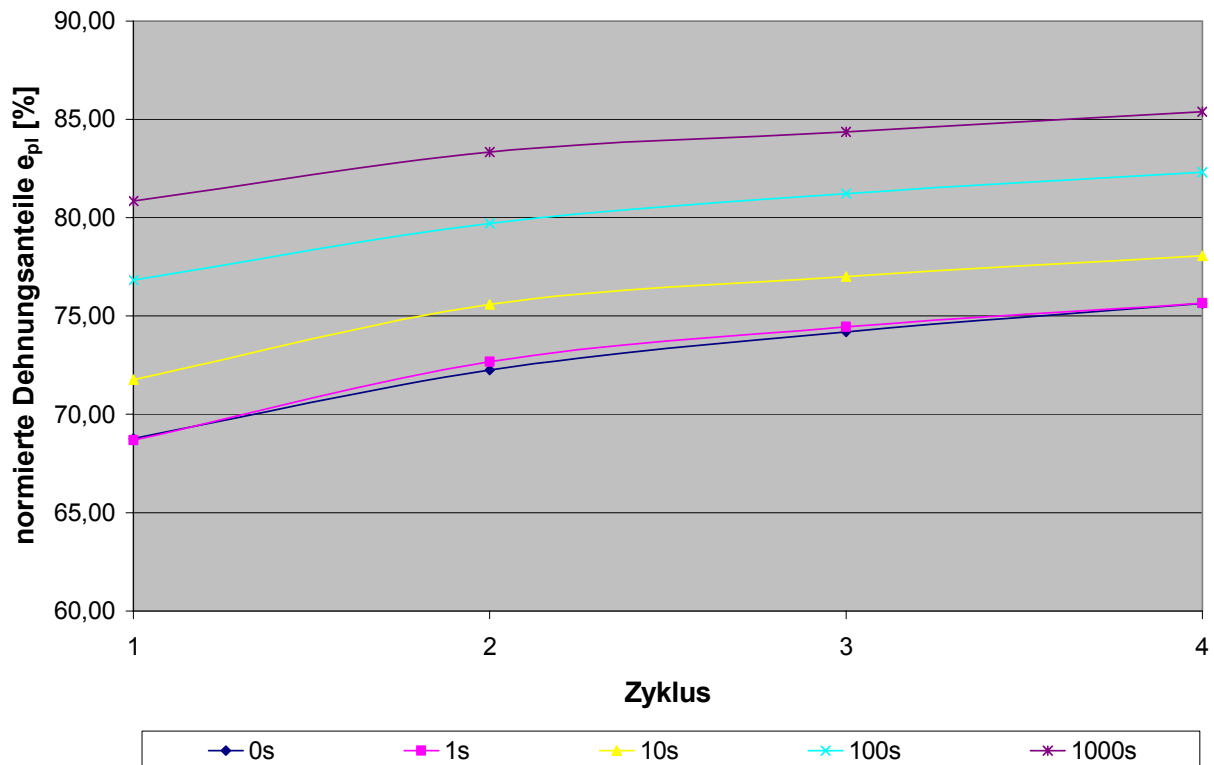


Abbildung A-8 Relative plastische Dehnungsanteile in Abhängigkeit der Belastungshaltezeit

Eine Analyse der Zyklen mit unterschiedlichen Belastungshaltezeiten zeigt eine zunehmende maximale Gesamtdehnung bei steigender Belastungshaltezeit. Der relative plastische Dehnungsanteil weist die gleiche Abhängigkeit von der Belastungshaltezeit auf. Der erste Belastungszyklus impliziert die höchste Zunahme der relativen plastischen Dehnungsanteile in Höhe von ca. 4 %. Weitere zyklische Belastungen verursachen Erhöhungen im plastischen Bereich von ca. 1 - 2 % (relative Werte). Die viskoelastischen und elastischen Dehnungsanteile verringern sich in Abhängigkeit von der Belastungshaltezeiterhöhung.