

# **Simulation der Kett- und Warenkräfte in verschiedenen Webmaschinentypen**

Referent: Dr.-Ing. M. Beitelschmidt  
SULZER INNOTECH AG, Winterthur

## **1 Einleitung**

Zahlreiche Vorgänge in Webmaschinen können heute mit numerischer Simulation untersucht werden. Neben klassischen maschinendynamischen Fragestellungen ist die Berechnung der Kett- und Gewebezugkräfte ein zentrales Anliegen. Mit den Ergebnissen können Probleme im Bereich der Maschinenfestigkeit und der Schwingungseigenschaften, der Antriebstechnik sowie letztlich der Gewebequalität gelöst werden.

Die Simulation und Berechnung von Kettfadenkräften ist keinesfalls eine neue Idee. Aus den zahlreichen Veröffentlichungen zu diesem Thema seien die Arbeiten von Azarschab [1], de Weldige [8] und Chen [6] erwähnt. Eine Arbeit, die in einfacher Weise Fadenkraftberechnungen und Starrkörperbewegungen in einer Webmaschine koppelt, stammt von Backmann [2].

Das neue Modell, welches in dieser Arbeit vorgestellt wird, geht jedoch über die Möglichkeiten der bisherigen Modelle hinaus. Ziel ist es, die Methoden der modernen Mehrkörpersimulation einschließlich Antriebs- und Regelungstechnik mit einem verfeinerten Faden-Gewebe-Modell zu koppeln und somit eine Gesamtsimulation des Gewebebildungsprozesses zu ermöglichen. Zusammengefaßt hat das Modell folgende Eigenschaften:

- Die Dynamik aller Elemente der Maschine, welche die Kettfäden und das Gewebe berühren, ist modelliert.
- Die Bewegung des fertigen Gewebes bis zum Warenabzug kann mit berücksichtigt werden.
- Die Fäden und das Gewebe erhalten eine trägheitsbehafte Bewegungsmöglichkeit in Fadenlängsrichtung.
- Die Reibvorgänge an den Umlenkungen können Reibrichtungsumkehr sowie Haft-Gleit-Übergänge zeigen.
- Rotierende Umlenkungen können mit beliebigen Antriebstechnik- und Reglermodellen gekoppelt werden.
- Es können alle Typen von Webmaschinen und auch wahlweise nur Teilsysteme davon behandelt werden.

Die aus dem Modell abgeleiteten Gleichungen sind in einem Simulationsprogramm in der zum Paket MATLAB gehörigen Programmiersprache implementiert. Einige Ergebnisse werden am Ende dieses Beitrages gezeigt.

## **2 Grundgleichungen der Fadendynamik**

Den Fadenlauf in einer Webmaschine kann man in eine Abfolge von freien Strecken und Umlenkungen gliedern. In diesem Abschnitt werden dabei die Gleichungen beschrieben, welche die Bewegung der Fäden beschreiben. Dazu wird die aus der Strömungsmechanik bekannte „Eulersche Betrachtungsweise“ gewählt. Als Zustandsgrößen dienen die aktuelle Fadenfeinheit im Inneren der freien Strecken, so-

wie die Geschwindigkeiten der Fadenelemente beim Einlauf und Verlassen der Umlenkungen.

Die Beschreibung textiler Fäden im Verarbeitungsprozeß mittels der Feinheit und zugehörigen Massenbilanzen beschreibt Beyreuther in [3] und wird von Eren in [7] auf den Gewebebildungsvorgang in Webmaschinen angewendet. Die Grundgleichungen für über Umlenkungen "strömende" elastische Medien inklusive der Reibungsphänomene werden von Brandenburg in [4] und [5] hergeleitet. Wie auch dort wird hier nur die Längsdynamik der Fäden berücksichtigt.

## 2.1 Fadenfeinheit und Fadenkräfte

Ein unbelasteter Faden hat eine Grundfeinheit, die im weiteren mit  $Tt_0$  bezeichnet wird. Wird der Faden gedehnt, nimmt seine Feinheit ab und es stellt sich der Wert  $Tt$  ein. Für kleine Dehnungen unter 10% kann man den Zusammenhang zwischen der relativen Dehnung  $\varepsilon$  und der aktuellen Feinheit mit  $\varepsilon = 1 - Tt/Tt_0$  angeben. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Dehnung zeitlich ändert, gehorcht der Beziehung  $\dot{\varepsilon} = -\dot{Tt}/Tt_0$ . Ist nun die Zustandsgröße  $Tt$  sowie ihre zeitliche Änderung an einer Stelle im Faden bekannt, kann daraus mit Hilfe eines beliebigen viskoelastischen, quasistatischen Kraftgesetzes  $F = F(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$  die aktuelle Fadenkraft berechnet werden.

## 2.2 Bilanzgleichungen für Masse und Impuls in freien Strecken

Betrachtet man einen Faden in einer freien Strecke als eindimensionales strömendes Kontinuum, liegt es auf der Hand, analog zur Strömungsmechanik, eine Massen- und Impulsbilanz in Fadenlängsrichtung aufzustellen.

Die Impulsbilanz in Fadenlängsrichtung wird einfach, wenn man Wellenvorgänge nicht berücksichtigen will. Die Bilanz reduziert sich zu der Aussage, daß die Fadenlängskraft in einer freien Strecke konstant ist.

Mit diesem Zwischenergebnis kann die Massenbilanz sofort integral über die Gesamtlänge  $L$  der Strecke aufgestellt werden und lautet:

$$L \cdot \dot{Tt} = Tt(v_{ein} - v_{aus}) \quad (1)$$

Dabei bedeuten  $v_{ein}$  und  $v_{aus}$  die Absolutgeschwindigkeiten des Fadens in Fadenrichtung am Ein- bzw. Auslauf der Strecke. Mit dieser Gleichung steht der erste Satz von Differentialgleichungen für Zustandsgrößen zur Verfügung.

## 2.3 Kinematik der Umlenkungen und der Fadenstrecken

Eine Umlenkung ist ein kreisförmiger Körper mit vorgegebenem Radius, der im Fall einer Punktumlenkung gleich Null sein kann. Das Fadenstück zwischen den Kontaktpunkten auf zwei Umlenkungen stellt eine freie Strecke dar. Bewegungen der Umlenkungen führen zu Auf- und Abwickeln der Fäden, was Verschiebungen der Kontaktpunkte Faden-Umlenkung und damit Änderungen der Streckenlängen verursachen kann.

Die Vektoren zu den Umlenkungsmittelpunkten, die momentanen Absolutgeschwindigkeiten sowie ihre Beschleunigungen sind – abhängig vom Typ der Umlenkung – entweder fest vorgegeben oder das Ergebnis der aktuellen Simulationsergebnisse der beweglichen Umlenkungen.

Zwischen zwei derartigen Umlenkungen sind insgesamt 4 verschiedene Fadenverläufe denkbar, analog zu den 4 mathematisch möglichen Tangenten zwischen zwei sich nicht durchdringenden Kreisen. In Bild 1 sind die wichtigsten Geometriegrößen einer derartigen Anordnung dargestellt.

Berechnet werden nun die Winkel  $\alpha$ ,  $\varphi$  und  $\gamma$ , sowie der Fadenstreckeneinheitsvektor

$\mathbf{e}_T$  und die Normale  $\mathbf{n}$ . Mit Hilfe dieser Einheitsvektoren lassen sich die Vektoren  $\mathbf{r}_{P_1}$  sowie  $\mathbf{r}_{P_2}$  zu den Tangentenendpunkten  $P_1$  und  $P_2$  auf den Umlenkungen angeben, ebenso die Länge des Fadens  $l = |\mathbf{r}_{P_2} - \mathbf{r}_{P_1}|$ .

Nachdem alle wichtigen Lagegrößen bereitgestellt sind, werden ihre zeitlichen Ableitungen berechnet. Dabei ist der Unterschied zwischen der Kontaktpunktgeschwindigkeit  $\mathbf{v}_P$  und der Geschwindigkeit der Umlenkung am Kontaktpunkt  $\mathbf{v}_U$  zu beachten. Diese Geschwindigkeiten werden jeweils noch in die Fadenrichtung projiziert und lauten dann  $v_P$  und  $v_U$ .

## 2.4 Bilanzgleichungen für Masse und Impuls an Umlenkungen

An jeder Umlenkung muß die Massenbilanz für den ein- und ausströmenden Faden erfüllt sein (siehe Bild 2). Dabei ist zu beachten, daß die Absolutgeschwindigkeiten der ein- bzw. ausströmenden Fäden zu Verfügung stehen, für die Massenbilanz jedoch die Relativgeschwindigkeiten über die Bilanzgrenze entscheidend sind. Bewegt sich der Umlenkungsmittelpunkt mit  $\dot{\mathbf{r}}_U$  und die aktuellen Fadenrichtungen werden durch die Einheitsvektoren  $\mathbf{e}_T$  beschrieben, lautet die Massenbilanz:

$$Tt_A(\mathbf{v}_A - \mathbf{e}_{TA}^T \dot{\mathbf{r}}_U) - Tt_B(\mathbf{v}_B - \mathbf{e}_{TB}^T \dot{\mathbf{r}}_U) = 0 \quad (2)$$

Für die Simulation muß diese noch nach der Zeit differenziert werden.

Die Impulsbilanz des Fadens an einer Umlenkung zeigt, daß man die Kraft, die für die Impulsumlenkung des Fadens erforderlich ist, vernachlässigen kann.

## 2.5 Bewegungsgleichung für die Fäden

Es wird der Bewegungsvorgang eines Fadens über eine Umlenkung beschrieben. Dieser Vorgang soll trägheitsbehaftet ablaufen, um Haft-Gleit-Vorgänge in der Umlenkung und hochdynamische Kraftänderungen eindeutig beschreiben zu können. An diesem Vorgang sind die beiden benachbarten Fadenstrecken A und B, sowie die Umlenkung dazwischen beteiligt. Für die Beschreibung des massebehafteten, elastischen Fadens werden dabei folgende Annahmen getroffen (siehe auch Bild 3):

- In benachbarten freien Strecken herrscht jeweils eine ortsunabhängige Feinheit und damit auch Fadenkraft  $F_A$  und  $F_B$ .
- Die Geschwindigkeit nehme in den Strecken linear in Fadenrichtung zu oder ab, ebenso eine eventuell vorhandene Beschleunigung.

Eine Interpretation dieses Modells ist, daß hier eine FE-Diskretisierung mit Ansatzfunktionen nullter Ordnung für die Fadenfeinheiten und erster Ordnung für die Geschwindigkeiten durchgeführt wird.

Die für die Berechnung der Fadenbeschleunigung relevante Fadenmasse setzt sich zusammen aus der aktuellen Fadenfeinheit  $Tt$  und einer ggf. vorhandenen Zusatzmasse durch die Schußfäden, wenn die betrachtete Strecke im Bereich des Gewebes liegt.

Nun werden immer zwei Fadenstrecken zu einem Teilsystem zusammengefaßt (siehe Abbildung). Die Geschwindigkeit am Anfang und Ende der Strecke A mit der Länge  $L_A$  wird mit  $v_{A1}$  und  $v_{A2}$  bezeichnet, analog dazu in Strecke B. In den Strecken wirken die aktuellen Fadenkräfte  $F_A$  und  $F_B$  die aktuelle Reibkraft an der Umlenkung ist  $F_{\text{reib}}$ . Die Bewegungsgleichung für dieses Teilsystem lautet:

$$L_A Tt_A \left( \frac{1}{6} \dot{v}_{A1} + \frac{1}{3} \dot{v}_{A2} \right) + L_B Tt_B \left( \frac{1}{3} \dot{v}_{B1} + \frac{1}{6} \dot{v}_{B2} \right) = F_B - F_A - F_{\text{reib}} \quad (3)$$

Verläuft ein Faden über  $n$  Umlenkungen sind  $n+1$  freie Strecken im Verlauf enthalten. Pro Strecke sind zwei unbekannte Beschleunigungen  $\dot{v}_{i1}$  und  $\dot{v}_{i2}$  zu berechnen. Zusammen mit den Massenbilanzen und den Randbedingungen am Kettbaum und dem Warenabzug ergibt sich ein Gleichungssystem für die unbekanntes Fadenbeschleunigungen, welche die zeitlichen Änderungen der als Zustandsgrößen verwendeten Fadengeschwindigkeiten sind.

## 2.6 Berechnung der Reibkraft

Die Reibkraft, die ein Faden an einer Umlenkung erfährt, soll mit dem Gesetz der Umschlingungsreibung  $F_B = F_A e^{\mu(v)\alpha}$  beschrieben werden. In dieser Gleichung bezeichnen  $F_A$  und  $F_B$  die aktuellen Fadenkräfte,  $\mu(v)$  einen geschwindigkeitsabhängigen Reibkoeffizienten und  $\alpha$  den Umschlingungswinkel. Gestaltet man  $\mu(v)$  so, daß bei Richtungswechsel der Geschwindigkeit auch der Reibkoeffizient sein Vorzeichen wechselt, so hat man beide denkbaren Fälle der Umschlingungsreibung abgedeckt. Als Geschwindigkeit  $v$  wird hier der Mittelwert aus Ein- und Ausströmrelativgeschwindigkeit verwendet. Die in der Umschlingung wirkende Reibkraft ist die Differenz der Fadenkräfte:  $F_{reib} = F_B - F_A$ .

Die Umschlingungsgleichung ist strenggenommen nur in der Lage, quasistationäre Gleichgewichtszustände zu beschreiben, da sie einen festen Zusammenhang zwischen den benachbarten Fadenkräften fordert. Während der zeitlichen Entwicklung eines Systems können die Kräfte  $F_A$  und  $F_B$  sowie die Geschwindigkeit  $v$  beliebige Werte annehmen, was der quasistatischen Beziehung widersprechen kann. Ohne Herleitung wird deshalb die tatsächlich verwendete Reibkraftgleichung

$$F_{reib} = (e^{\mu(v)\alpha} - 1) \frac{L_A F_B + L_B F_A}{L_A e^{\mu(v)\alpha} + L_B}, \quad (4)$$

angegeben, die den quasistatischen Zustand als Sonderfall enthält ( $L_A$  und  $L_B$  sind die Längen der benachbarten Strecken).

## 3 Übersicht über die modellierten Umlenkungstypen

Jede Umlenkung kann hat sogenannte translatorische und rotatorische Eigenschaften, die jeweils frei untereinander kombinierbar sind. Die translatorischen Eigenschaften beschreiben die Bewegung des Elementmittelpunktes und die rotatorischen die Verdrehung um diesen Punkt.

### 3.1 Translatorische Eigenschaften von Umlenkungen

Grundsätzlich kann man die Umlenkungen hinsichtlich ihrer translatorischen Eigenschaften in zwei Klassen unterteilen: Zwangsbewegte Umlenkungen führen Bewegungen durch, die durch die Mechanik der Webmaschine fest vorgegeben sind. Bei den diesen Umlenkungen wird die Rückwirkung der Fadenkräfte auf die Dynamik der Umlenkungen vernachlässigt und es wird von starr vorgegebenen Bewegungsgesetzen (Hubkurven etc.) ausgegangen.

Die frei beweglichen Umlenkungen führen unter dem Einfluß der Kett- oder Warenkräfte Bewegungen durch. Sie besitzen eigene Freiheitsgrade und haben auch immer eine Trägheit.

Werden mehrere Fäden in der Maschine simuliert, muß man darauf achten, daß es Umlenkungen gibt, die alle Fäden gemeinsam bewegen und andere, die jeden Faden individuell behandeln.

### 3.1.1 Zwangsbewegte Umlenkungen

Bei den zwangsbewegten Umlenkungen lassen sich drei Gruppen unterscheiden: Der einfachste Typ repräsentiert die fest stehende Umlenkung, die in Webmaschinen häufig anzutreffen ist. Die zweite Gruppe dient zur Realisierung von Schaftbewegungen, wie sie in konventionellen Webmaschinen zur Fachbildung genutzt werden. Diese Bewegung der Fäden hat eine Geometrieänderung der freien Strecken zur Folge, die sich auf die Fadenkräfte ganz erheblich auswirkt. Die Anzahl der Schäfte bestimmt zugleich die Anzahl unterschiedlicher Fäden, die in der Webmaschine gleichzeitig simuliert werden. Durch die freie Wahl von Rapport und zugehöriger Schaftposition sind beliebige Webbindungen simulierbar. Die dritte Gruppe enthält die Elemente, mit denen die Wirkungen des Blattanschlages an der Gewebekante nachgebildet werden können.

### 3.1.2 Frei bewegliche Umlenkungen

Das universellste Element ist die benutzerdefinierte Umlenkung, bei der man die Bewegungsdifferentialgleichung frei programmieren kann. Um elastische Bauteile modellieren zu können, stehen mit viskoelastischen Kraftgesetzen ausgestattete Umlenkungen zur Verfügung. In Webmaschinen sind häufig Umlenkungen anzutreffen (Spannbäume, Webkettenspanner), die sich frei an Hebeln bewegen können. Auch dafür steht ein Element zur Verfügung. Ein spezielles Element ist in der Lage, von Umlenkungen abhebende Fäden richtig zu beschreiben, damit sind auch Kettfadenwächterlamellen modellierbar.

## 3.2 Rotatorische Eigenschaften von Umlenkungen

Die Fäden liegen auf der Oberfläche der Umlenkungen auf und treten über Reibung in Wechselwirkung mit diesen. Die dabei auftretende Relativgeschwindigkeit zwischen Faden und Oberfläche der Umlenkung wird zum einen durch die Eigenbewegung der Fäden, zum anderen durch die Eigenrotation der Umlenkung bestimmt. Beim Warenabzug, bei dem ständiges Haften zwischen Ware und Umlenkung angenommen wird, ist die Fadengeschwindigkeit immer gleich der Umfangsgeschwindigkeit der Walze.

Die in Webmaschinen typischerweise auftretenden Umlenkungen kann man bezüglich ihrer Rotation in vier Typen unterscheiden: feststehende, frei drehbare, konstant angetriebene und mit mitzumodellierender Antriebstechnik ausgestattete Umlenkungen. Feststehend stellt einen Sonderfall von konstant angetrieben dar, deshalb bleiben drei unterschiedliche Typen übrig.

### 3.2.1 Die zwangsgedrehte Umlenkung

Die zwangsbewegte Umlenkung hat keine eigenen Freiheitsgrade, die Umfangsgeschwindigkeit ist frei wählbar und während dem Lauf fest vorgegeben. Mit der Umfangsgeschwindigkeit null kann man eine fest stehende Umlenkung realisieren.

### 3.2.2 Die frei drehbare Umlenkung

Die frei drehbare Umlenkung ist eine träge Rotationsmasse, die sich unter dem Einfluß der Fadenkräfte auf beiden Seiten (und damit letztlich der Reibung) bewegt. Dem aus den Fadenkräften resultierenden Drehmoment wirkt das Trägheitsmoment der Walze sowie ein Reibmoment in der Drehachse entgegen.

### 3.2.3 Die Verdrehung gesteuert durch ein Simulink-Modell

In Webmaschinen gibt es Umlenkungen, die angetrieben sind und deren Antriebsdynamik eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt. Insbesondere gilt das für die Um-

lenkungen, deren Drehverhalten von einem Regler, der auf Systemgrößen (Kraftmessungen, Auslenkungen) zurückgreift, vorgegeben wird.

Ein bewährtes Tool zur Modellierung derartiger Subsysteme ist Matlab-Simulink. Um die Einbindung derartiger Submodelle in die Simulation zu ermöglichen, existiert eine Umlenkung, deren rotatorisches dynamisches Verhalten durch ein vom Benutzer zu erstellendes Simulink-Modell bestimmt wird. Dabei dürfen im Modell alle zeitstetigen Übertragungsglieder verwendet werden.

#### 4 Aufbau des Gesamtmodells

In den vorangegangenen Abschnitten sind die Modelle der einzelnen Elemente zusammengestellt worden. Hier wird nun erläutert, wie aus den Gleichungen der einzelnen Elemente die aktuelle zeitliche Änderung aller Zustandsgrößen des Systems in Abhängigkeit vom aktuellen Zustand und der Zeit berechnet wird.

- Im ersten Schritt wird die aktuelle Absolutposition und -geschwindigkeit aller Umlenkungen bestimmt.
- Mit den Kinematikgrößen der Umlenkungsmittelpunkte können die Fadenkontaktpunkte und deren Geschwindigkeiten, sowie die Fadenlängen und Längenänderungen berechnet werden. Auch die Faden- und Umschlingungswinkel sowie deren Ableitungen sind bestimmbar.
- Die Absolutgeschwindigkeiten der Fadenenden an den Kontaktpunkten zu den Umlenkungen sind Zustandsgrößen. Zusammen mit den Kontaktpunktgeschwindigkeiten können damit die relativen Ein- und Ausströmgeschwindigkeiten in die Umlenkungen berechnet werden.
- Sind die Fadenendgeschwindigkeiten, sowie die Länge und Längenänderung bekannt, können mit Gleichung (1) aus den momentanen Fadenfeinheiten (Zustandsgrößen) die zeitlichen Änderungen der Feinheiten berechnet werden.
- Aus den Feinheiten und Feinheitsänderungen werden mit einem viskoelastischen Gesetz die Kräfte aller Fadenstrecken berechnet.
- Mit den bekannten Fadenkräften können nun die Bewegungsgleichungen der frei beweglichen Umlenkungen ausgewertet werden. Ergebnisse hierbei sind die translatorischen und rotatorischen Beschleunigungen.
- Mit den Kräften in jeder Fadenstrecke und den Fadengeschwindigkeiten ist es möglich, die Umschlingungsreibungskraft an jeder Umlenkung zu berechnen (Gleichung (4)).
- Im letzten Schritt werden mit Gl. (3) die Beschleunigungen der Fäden bestimmt, wobei die Massenbilanzen Gl. (2) als Nebenbedingungen berücksichtigt werden.

Durch wiederholtes Abarbeiten dieses Schemas kann der Zeitverlauf der Zustandsgrößen mittels numerischer Integration bestimmt werden.

Das Eingabefenster des Simulationsprogramms (Bild 4) ist im nebenstehenden Bild gezeigt. Die Oberfläche des Programms ist so gestaltet, daß nahezu beliebige Webmaschinenbauarten "zusammengeklickt" werden können. Die Eingabe der Parameter erfolgt interaktiv. Nach dem Ablauf der numerischen Integration stehen vielfältige Möglichkeiten des Postprocessings zur Verfügung.

## 5 Simulationsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse von Simulationsrechnungen, die mit dem auf der Basis der vorgestellten Gleichungen erstellten Programm gewonnen wurden, vorgestellt.

Als Beispiel für das Verhalten einer konventionellen Webmaschine (Sulzer Textil G6200 Bandgreifermaschine) wird auf der folgenden Abbildung die Bewegung des Webkettenspanners (WKS) und die Rotation der Walze am WKS (Spannbaum) dargestellt und mit Meßwerten verglichen. In Bild 5 ist die geometrische Anordnung der Maschinenkomponenten skizziert. Die Zeitverläufe sind in Bild 6 dargestellt. Es werden 5 Maschinentypen dargestellt. Der WKS oszilliert um ca.  $7^\circ$ , die „Delle“ in jedem Zyklus ist ein Überschwingen, da die WKS-Eigenfrequenz nahe an der Maschinenfrequenz liegt. Der Spannbaum führt eine entsprechende Rotation aus, die im Mittel dem Ketttransport entspricht. Diese Ergebnisse zeigen die gelungene Kopplung zwischen den Kräften der Fäden und der Bewegung der Elemente der Webmaschine.

## 6 Dank

An der Durchführung der Messungen und Rechnungen haben M. Brandenberger und R. Rossetti von Sulzer Innotec sowie W. Degen von SulzerTextil mitgewirkt.

## 7 Literatur

- [1] Azarschab, M.: *Analyse der Kettfadenbeanspruchung beim Webprozeß und Maßnahmen zu ihrer Reduzierung*. Dissertation Universität Stuttgart. Stuttgart 1988.
- [2] Backmann, R.: *Dynamische Analyse des Gewebebildungsvorganges*. Deutsche Textiltechnik 13 (1968) Heft 3, S.275–281.
- [3] Beyreuther, R.: *Dynamik von Fadenbildungs- und Fadenverarbeitungsprozessen*. VEB Fachbuchverlag Leipzig. Leipzig 1986.
- [4] Brandenburg, G.: *Über das dynamische Verhalten durchlaufender elastischer Stoffbahnen bei Kraftübertragung durch Coulomb'sche Reibung in einem System angetriebener, umschlungener Walzen*. Dissertation TU München. München 1971.
- [5] Brandenburg, G.: *Verallgemeinertes Prozeßmodell für Fertigungsanlagen mit durchlaufenden Bahnen und Anwendung auf Antrieb und Registerregelung bei Rotationsdruckmaschinen*. Fortschr.-Ber. VDI-Z., R. 1, Nr. 46. Düsseldorf: VDI-Verl. 1976.
- [6] Chen, M.: *Computergestützte Optimierung des Webprozesses bezüglich Kettfadenbeanspruchung und Kettlaufverhalten*. Dissertation Universität Stuttgart. Stuttgart 1998.
- [7] Eren, R.: *Realisierbarkeit einer positiven Kettzuführung in der Weberei*. Meiland Textilberichte 4/1998, S. 234–237.
- [8] de Weldige gen. Cremer, E.: *Prozeßsimulation der Kettfadenzugkräfte in Webmaschinen*. Dissertation TH-Aachen. Aachen 1996.

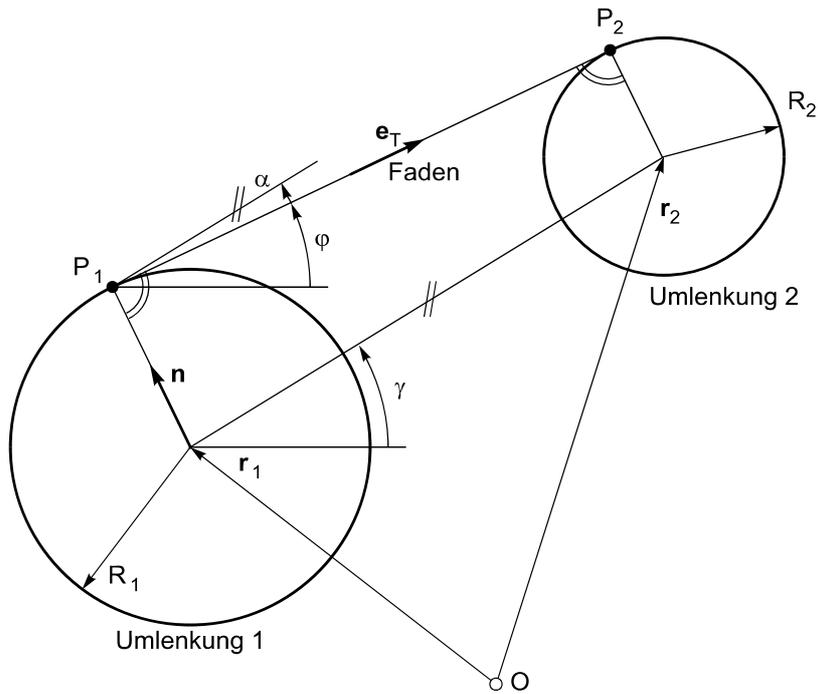


Bild 1: Geometrie einer Fadenstrecke zwischen zwei Umlenkungen

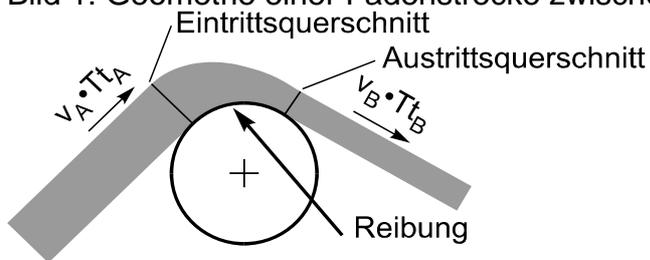


Bild 2: Fadenfluß um eine Umlenkung mit Reibung

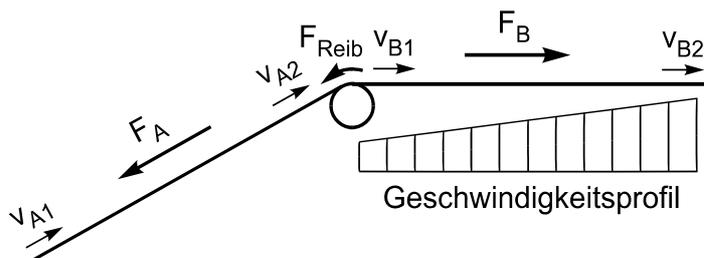


Bild 3: Geschwindigkeitsansatz für freie Strecken

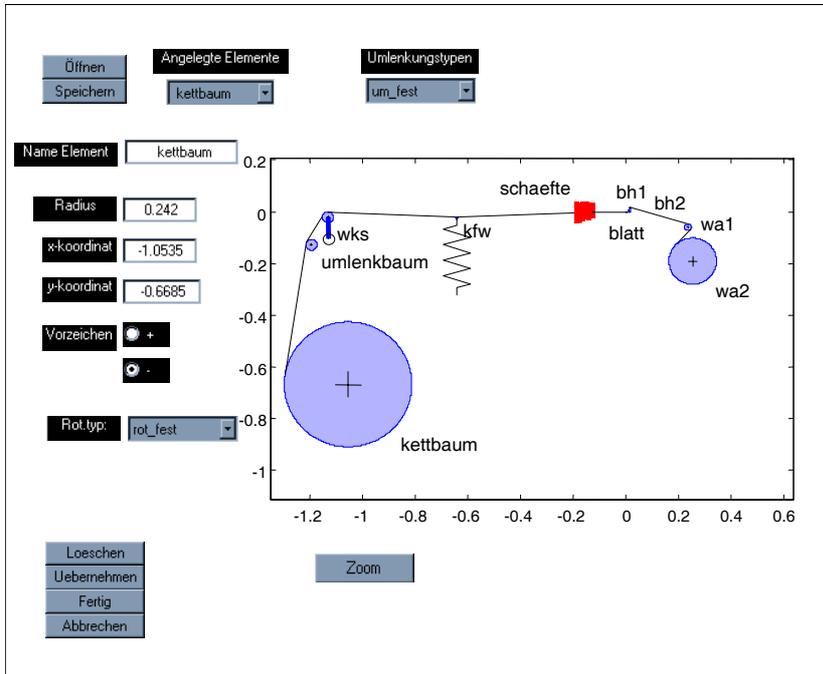


Bild 4: Graphisches Eingabetool des Simulationsprogrammes

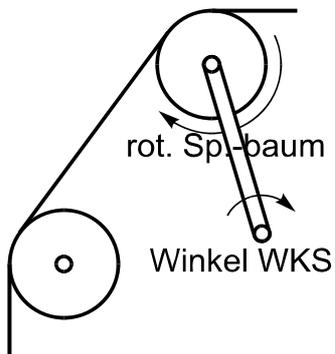


Bild 5: Geometrie des Webkettenspanners

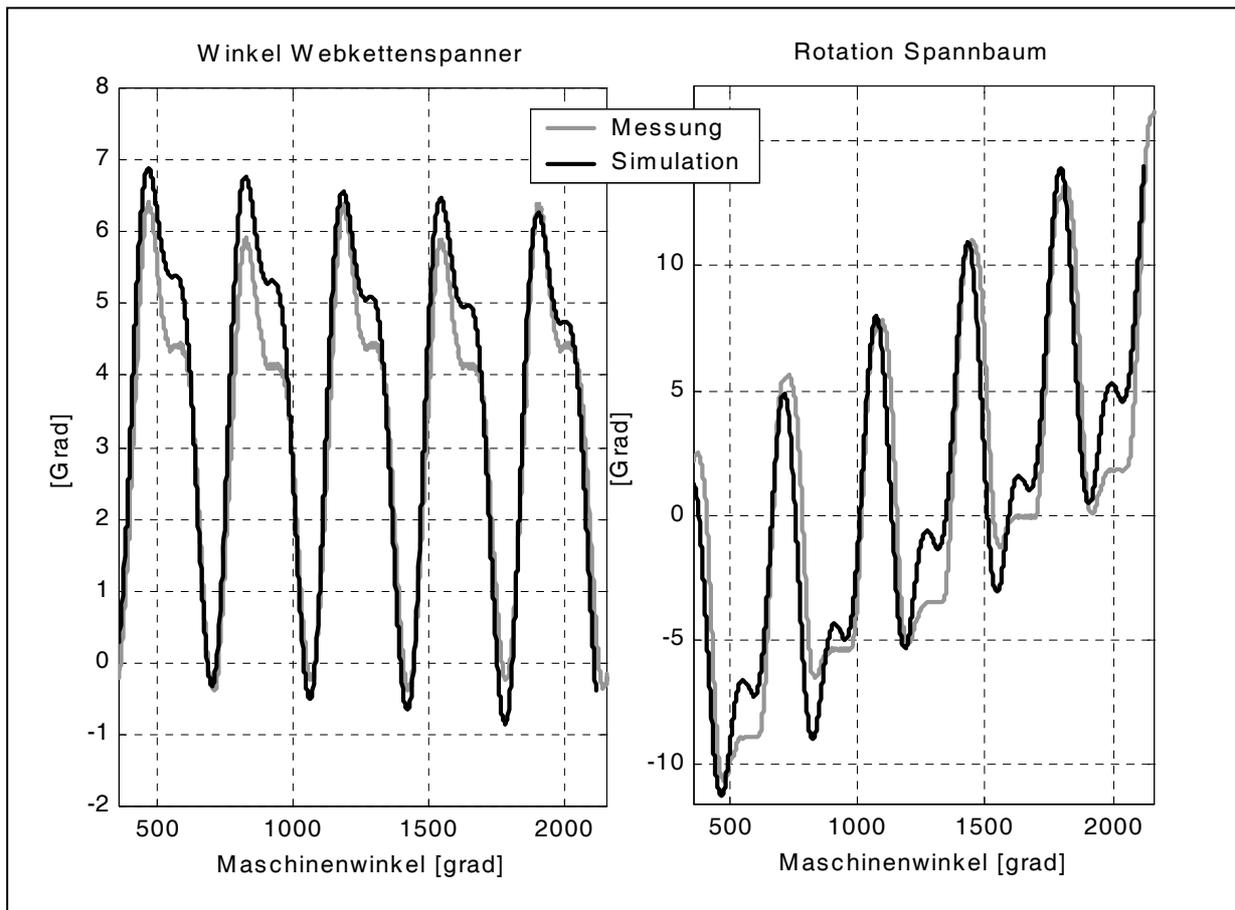


Bild 6: Simulationsergebnisse verglichen mit Messungen