

Konstruktionselemente aus Kunststoff

Neuartige 2K-Laufrollen und ihre Kontaktmechanik

Neuartige 2K-Laufrollen haben einen Laufmantel hoher Steifigkeit und einen weichen Radkörper. Sie zeichnen sich durch hohe Laufruhe und eine weiche Verformungscharakteristik bei gleichzeitig kleinem Rollwiderstand und geringem Verschleiss aus. In einem aF+E-Projekt wurde das Kontaktverhalten solcher Kunststoffrollen untersucht, um Berechnungsformeln für die ingenieurmässige Auslegung zu erarbeiten.

Für Kunststoffrollen mit einem Laufmantel aus weichem Elastomer oder aus TPE typisch sind die hohe Laufruhe und eine weiche Verformungscharakteristik. Nachteilig sind jedoch der hohe Rollwiderstand und der Verschleiss. Eine neuartige 2K-Lösung mit einem Laufmantel höherer Steifigkeit und einem weichen Radkörper (Abb. 1) vermeidet diese Nachteile weitgehend [1]. Der vergleichsweise steife Laufmantel ermöglicht dank geringer lokaler Verformungen ein leichtes, reibungsarmes Abrollen, während der Radkörper mit seiner geringen Steifigkeit für die erwünschte Dämpfung und die hohe Nachgiebigkeit sorgt. Unbekannt war bisher, wie sich das Zusammenspiel der beiden Komponenten auf die Kontaktmechanik qualitativ und quantitativ auswirkt, das heisst Berechnungsformeln standen bis dato nicht zur Verfügung.

Herstellbar sind solche Rollen vorzugsweise im 2K-Spritzgiessverfahren. Von Bedeutung hierbei ist nicht nur ein einwandfreier Stoff-

Prof. Dipl.-Ing. Johannes Kunz, Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil, Dozent für Berechnen und Gestalten von Kunststoffteilen im MAS-Studiengang Kunststofftechnik an der Hochschule für Technik der FH Nordwestschweiz

Dipl.-Ing. Mario Studer, ETH Zürich, vormals wissenschaftlicher Mitarbeiter am IWK Rapperswil



Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung



Abb. 1: Zylindrische 2K-Laufrollen unterschiedlicher Laufmanteldicke (IWK Rapperswil; Kundert AG, Jona).

schluss zwischen Nabe und Weichkomponente, sondern auch zwischen den beiden Kunststoffen, um ein Ablösen des Laufmantels vom Radkörper zu vermeiden. Alternativ dazu wäre hier allenfalls auch ein Formschluss denkbar, der aber nicht ganz einfach zu realisieren ist.

Problemstellung

Das Kontaktverhalten derartiger 2K-Rollen wurde in einem aF+E-Projekt untersucht mit dem Ziel, Berechnungsgrundlagen für die ingenieurmässige Auslegung zu gewinnen [2, 3]. In der Kontaktmechanik der Laufmantelrollen, die auf die Hertzsche Theorie der Kontaktprobleme [4, 5] aufbaut, sind die generell bestimmenden Grössen nebst der Belastung die mechanischen Werkstoffeigenschaften und die Geometrie von Rolle und Unterlage (Abb. 2), insbesondere die resultierenden Krümmungs-

verhältnisse in der Kontaktzone. Primär interessieren der Kontaktdruck zwischen Rolle und Unterlage und die Rollenabplattung bzw. Achsverschiebung als kontaktmechanische Grössen (Abb. 3) sowie die Vergleichsspannungen und die maximalen

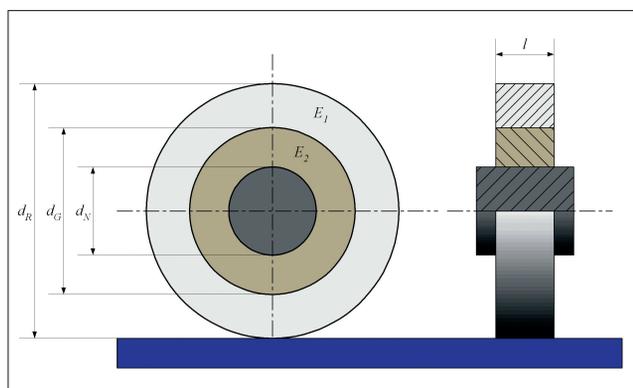


Abb. 2: Geometrie der 2K-Laufrollen. 1: Laufmantel aus steifem Kunststoff. 2: Radkörper aus weichem Kunststoff. 3: Nabe aus Metall. 4: Unterlage (Laufbahn). d_R : Rollendurchmesser [mm]. d_G : Grenzdurchmesser [mm]. d_N : Nabendurchmesser [mm]. l : Rollenbreite [mm].

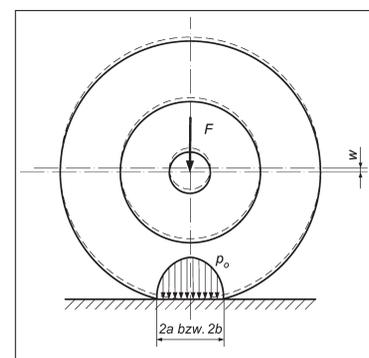


Abb. 3: Kontaktmechanische Grössen. a, b : Halbe Länge der Kontaktfläche in Umfangsrichtung [mm]. p_0 : Maximaler Kontaktdruck [N/mm²]. w : Abplattung bzw. Achsverschiebung unter Belastung [mm].

Dehnungswerte beider Komponenten. Zum weiteren Themenkreis zählt aber auch der Rollwiderstand, der von den geometrischen und werkstofflichen Parametern massgeblich mitbestimmt ist.

Vorgehen

Die angewendete Methodik verbindet in bewährter Weise theoretisch-analytische Betrachtungen, gezielte Versuche und rechnerisch-numerische Parameterstudien mittels der Finite Elemente Methode (FEM). Bei der Auswertung der Resultate werden die gefundenen Gesetzmässigkeiten qualitativ herausgearbeitet und anschliessend mathematisch beschrieben, um daraus geeignete Berechnungsformeln abzuleiten. Hierbei steht nebst der Erzielung realistischer Ergebnisse deren praktische Handhabbarkeit im Vordergrund. Deshalb werden da und dort zugunsten der Einfachheit gewisse Abstriche an der Genauigkeit hingenommen. Wie die bisherigen Erfahrungen zeigen, genügen die entwickelten Berechnungsformeln diesen Kriterien.

Voraussetzungen und Idealisierungen

Die Überlegungen gehen von folgenden Voraussetzungen und Idealisierungen aus:

- a) das Profil des Laufmantels ist zylindrisch (Abb. 2);
- b) Laufmantel, Radkörper und Nabe sind von gleicher Länge (Rollbreite);
- c) zwischen Nabe und Radkörper bzw. zwischen Radkörper und Laufmantel besteht ein Stoffschluss;
- d) die Kunststoffe von Laufmantel und Radkörper verhalten sich linear viskoelastisch, das heisst die zeitabhängigen Werkstoffsteifigkeiten, beschrieben durch die Kriechmoduln, sind keine Funktion der Last, und damit gilt das Boltzmannsche Zeit-Verformungs-Superpositionsprinzip;
- e) die Nabe besteht aus einem Werkstoff vergleichsweise hoher Steifigkeit, zum Beispiel Stahl oder eine Alu-Legierung, sodass ihre Verformung vernachlässigt werden kann;

f) die Belastung besteht aus einer statischen bzw. quasistatischen Radiallast im Zentrum der Nabe;

g) die Rolle wirkt als reine Laufrolle ohne Tangentialkräfte in der Berührungsfläche;

h) die Unterlage ist eben und wird als linear elastischer bzw. linear viskoelastischer Halbraum betrachtet;

i) die Rollenachse liegt parallel zur Unterlage, das heisst Verkanten wird ausgeschlossen.

Untersuchungen

Die erforderlichen Parametervariationen an den 2K-Rollen wurden in bewährter Weise mittels FEM-Rechnungen durchgeführt. Deren Verlässlichkeit kann aufgrund der Erfahrungen aus bisherigen Untersuchungen als gegeben gelten. Dies rechtfertigt die Beschränkung auf einige wenige Messungen zur Absicherung der FEM-Resultate anhand ausgewählter Geometrien mittels Videoextensometrie (Abb. 4) von Zwick GmbH, D-Ulm. Experimentell untersucht wurden Rollen mit einem zylindrischen Laufmantel aus dem Guss-Polyamid Tecast T natur und einem Radkörper aus weichem Polyurethan PUR UK-KA/85 ShA, beides Werkstoffe der Kundert AG, Jona, wo auch die Rollen durch Vergiessen hergestellt wurden. Als Werkstoff für die Nabe wurde eine Alulegierung verwendet. Die Rollen-geometrie wurde durch den Rollendurchmesser $d_R = 100$ mm und die Breite $l = 30$ mm bestimmt. Variiert wurden der Nabendurchmesser d_N von 40 bis 60 mm und der Übergangsdurchmesser d_G zwischen den beiden Kunststoff-Komponenten von 60 bis

80 mm. Als Unterlage wurde Stahl verwendet, der in der Auswertung als praktisch starr betrachtet werden konnte. Pro Rollengeometrie wurden drei Messungen durchgeführt. Dabei wurde jeweils innert 20 Sekunden die Belastung von 0 auf 2000 N aufgebracht und anschliessend während 10 Minuten konstant gehalten.

Die für die numerischen Berechnungen erforderlichen Kriechmoduln als Steifigkeitswerte von Laufmantel und Radkörper wurden im Druckversuch unter denselben Bedingungen bestimmt wie die Verformungen der Rollen. Ermittelt wurden $E_1 = 2150$ N/mm² für Guss-PA und $E_2 = 21,6$ N/mm² für das PUR. Für die Poissonzahl des Laufmantels wurde $\mu_1 = 0,35$ eingesetzt, während zur Erfassung des Querkontraktionsverhaltens des PUR-Radkörpers dessen Inkompressibilität zu berücksichtigen war. Mit dem Wert $\mu_2 = 0,499$ anstelle des theoretischen Wertes 0,5 liessen sich Singularitäten bei den FEM-Rechnungen vermeiden.

Die Brauchbarkeit der Formeln, herausgearbeitet aus den FEM-rechnerisch und experimentell gefundenen Gesetzmässigkeiten, wurde anhand weiterer FEM-Berechnungen mit variierten Geometrie- und Steifigkeitsverhältnissen überprüft. Dies mit dem Ziel, ein möglichst breit anwendbares Rechenmodell zu erhalten. Mittels FEM wurde schliesslich auch die Möglichkeit der Ausweitung auf andere als zylindrische Laufmantelprofile untersucht.

Ergebnisse

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Untersuchungen sind:

1. Die Verschiebung der Rollenachse lässt sich mit einer Formel beschreiben, die in Anbetracht der Vielfalt an Parametern vergleichsweise einfach ist und mit den Werten aus Messung und FEM-Analyse sehr gut korreliert (Abb. 5). Sie drückt die Tatsache aus, dass zwischen den Achsverschiebungen einer reinen 1K-Laufmantelrolle und der hier untersuchten 2K-Rolle ein direkter Zusammenhang besteht.

Abb. 4: Verformungsmessungen mittels Videoextensometrie von Zwick GmbH & Co. KG, D-Ulm.



2. Die Achsverschiebung einer 2K-Laufmantelrolle setzt sich aus der Abplattung der entsprechenden 1K-Rolle und einem Beitrag zusammen, der den Einfluss des weichen Radkörpers erfasst.

3. Die Formel für die Achsverschiebung kann so umgeformt werden, dass sie auch für 2K-Laufrollen mit dachartigem oder mit balligem Profil verwendbar ist.

4. Für den maximalen Kontaktdruck und die maximale Vergleichsspannung im steifen Laufmantel können mit guter Genauigkeit die Formeln aus der Hertzschen Theorie beigezogen werden.

5. Die maximale Vergleichsspannung im weichen Radkörper tritt im Lochreibungsbereich zwischen Nabe und Radkörper auf. Sie ist massgebend vom Rollendurchmesser und dem Verhältnis der Elastizitätsmoduln abhängig.

6. Die maximalen Dehnungen treten im weichen Radkörper auf, sind aber von unkritischer Grösse, und zwar für vernetzte und unvernetzte Elastomere.

7. Abweichungen von der eingesetzten Poissonzahl $\mu_1 = 0,35$ des Laufmantels sind von vernachlässigbar geringem Einfluss.

8. Die Resultate bestätigen die Tatsache, dass der neuartige Rollenaufbau zu einem vergleichsweise weichen Verformungsverhalten bei gleichzeitig sehr geringem Rollwiderstand führt.

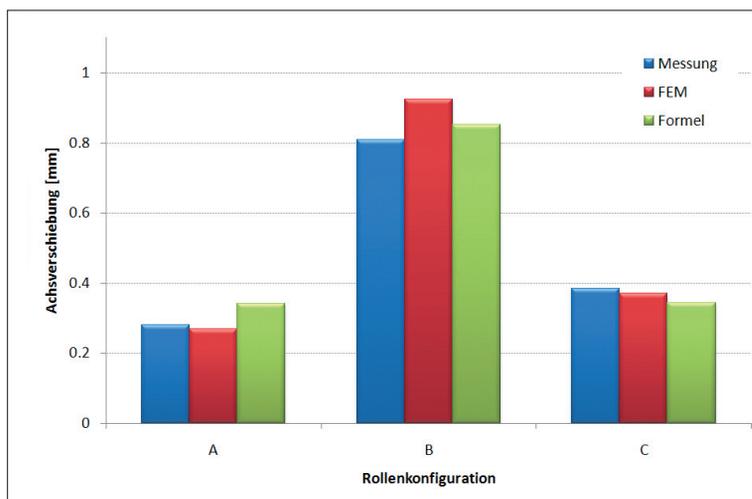
Die nachstehenden Berechnungsformeln gelten in den Bereichen $0,4 \leq d_G/d_R \leq 0,8$; $0,2 \leq d_N/d_R \leq 0,6$; $0,25 \leq d_N/d_G \leq 0,83$ bzw. $0,17 \leq (1 - d_N/d_G) \leq 0,75$; $0,15 \leq l/d_R \leq 0,6$; $1,0 \leq E_1/E_2 \leq 200$.

■ Achsverschiebung für zylindrische Laufmantelprofile

Die Verschiebung der Rollennachse, bei 1K-Rollen als Abplattung bezeichnet, unter der radialen Last F kann für zylindrische Laufmantelprofile anhand der Beziehung

$$w \approx w^* \cdot \left[1 + 1,1 \cdot \left(\frac{E_1}{E_2} - 1 \right)^{\frac{3}{4}} \cdot \left(\frac{d_G}{d_R} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{d_N}{d_G} \right)^{1 + \frac{l}{d_R}} \right] \quad (1)$$

Abb. 5: Achsverschiebung verschiedener Rollen ($d_R = 100$ mm, $l = 30$ mm) unter Belastung im Vergleich von Messung, FEM-Analyse und Berechnungsformel [2].
A: $d_G = 60$ mm, $d_N = 40$ mm.
B: $d_G = 80$ mm, $d_N = 40$ mm.
C: $d_G = 80$ mm, $d_N = 60$ mm.



berechnet werden, worin

$$w^* \approx 5,7 \cdot \frac{F}{E_V \cdot l} \cdot \left(1,2 - 0,65 \cdot \frac{d_N}{d_R} \right) \quad (2)$$

die Abplattung der entsprechenden 1K-Rolle bedeutet [6]. Mit (1) und (2) werden die Resultate aller untersuchten zylindrischen 2K-Rollen mit einer Standardabweichung von 14,2% erfasst. In (2) ist

$$E_V = 2 \cdot \frac{E_1 \cdot E_L}{E_1 + E_L} \quad (3)$$

der Vergleichs-Elastizitätsmodul für den Kontakt zwischen Kunststoff-Laufmantel (E_1 : Kriechmodul des Laufmantels in Abhängigkeit der statischen Belastungsdauer) und Laufbahn bzw. Unterlage (E_L : Elastizitätsmodul der Laufbahn).

■ Achsverschiebung für andere Laufmantelprofile

Unter der Voraussetzung einer relativ hohen Steifigkeit der Unterlage gilt $E_C \ll E_L$, und damit folgt aus (3) $E_V \approx 2 \cdot E_1$. Zwecks Separation der Verformungsanteile von Laufmantel und Radkörper lässt sich dann Beziehung (1) umformen zu

$$w \approx w_K + \pi \cdot \frac{F}{E_1 \cdot l} \cdot \left(1,2 - 0,65 \cdot \frac{d_N}{d_R} \right) \cdot \left(\frac{E_1}{E_2} - 1 \right)^{\frac{3}{4}} \cdot \left(\frac{d_G}{d_R} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{d_N}{d_G} \right)^{1 + \frac{l}{d_R}} \quad (4)$$

Darin ist der erste Summand w_K die lokale Verformung des Laufmantels in der Kontaktzone. Der zweite Summand erfasst den weichen Radkörper

Dank

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojekts «Grundlagen für die Auslegung von Kunststoffkonstruktionen». Für dessen Förderung danken die Verfasser dem Forschungsfonds der HSR Hochschule für Technik Rapperswil und der Gebert RUF Stiftung, Basel. Der Kundert AG, Jona, sei für die kostenlose Bereitstellung der 2K-Rollen gedankt.

mit seinem Verformungsbeitrag, der mit $E_1 = E_2$ verschwindet. Beziehung (4) ist zugleich auch eine Verallgemeinerung von (1) für andere als rein zylindrische Laufmantelprofile. Da die Abplattung kompakter Laufmantelrollen zur Hauptsache von der lokalen Verformung in der Kontaktzone bestimmt wird, kann bei solchen für w_K in guter Näherung die jeweils geltende Abplattungsformel eingesetzt werden, so namentlich für zylindrische Laufmantelrollen mit partieller Abstützung [7] sowie für Rollen mit dachartigem [8] oder mit balligem [9] Profil. Die Resultate aller untersuchten Varianten weisen je nach Profil und Abmessungsverhältnissen mit (4)

Standardabweichungen von 6,5 bis maximal 11,7% auf. Dies darf für die Praxis als gut brauchbar bezeichnet werden.

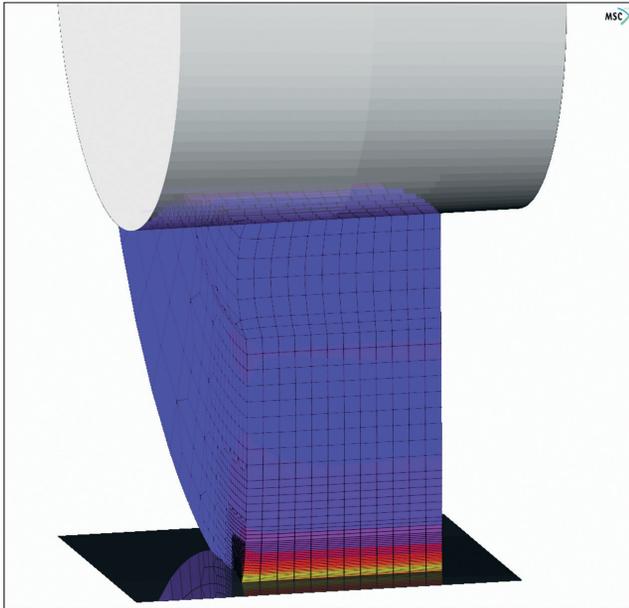


Abb. 6: Typisches FEM-Verformungsbild einer Rollenhälfte mit grosser axialer Querdehnung im weichen Radkörper (linksseitig; rechts liegt die unverformte Symmetrieebene).

■ **Maximaler Kontaktdruck und Vergleichsspannungen**

Der maximale Kontaktdruck im zylindrischen Laufmantel kann mit der bekannten Formel aus der Hertzschen Theorie [4, 5] berechnet werden, die zugleich auch der maximalen Vergleichsspannung nach der Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH, von Mises) entspricht gemäss

$$\sigma_v \approx p_0 \approx 0,59 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot E_v}{l_a \cdot d_R}} \quad (5)$$

Für andere als zylindrische Laufmantelprofile sind die jeweils geltenden Beziehungen zu verwenden, wobei zu beachten ist, dass der maximale Kontaktdruck und die maximale Vergleichsspannung unterschiedlich gross sind.

Im weichen Radkörper tritt die maximale Vergleichsspannung im Lochleibungsbereich zwischen Nabe und Radkörper auf, hängt aber nicht entscheidend vom Nabendurchmesser ab, sondern vom Rollendurchmesser und dem Verhältnis der Elastizitätsmoduln, nach der GEH in der Form

$$\sigma_v \approx \frac{F}{d_R \cdot l} \cdot \left[4 + 0,3 \cdot \ln \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \right] \quad (6)$$

■ **Maximale Dehnungen**

Die grössten positiven Dehnungen, die für die Abgrenzung gegenüber dem Versagenskriterium Rissbildung massgebend sind, treten im weichen Radkörper auf, und zwar infolge der vergleichsweise grossen Schubverformung des weichen Radkörpers an der Grenzfläche zwischen den beiden stoffschlüssig verbundenen Komponenten (Abb. 6). Ihre Grössenordnung von rund 1 bis 2% ist aber angesichts der hohen schädigungsfreien Verformbarkeit von vernetzten und unvernnetzten Elastomeren absolut unkritisch. Im Laufmantel gelten für die Dehnungen im Wesentlichen die Beziehungen, wie sie früher für kompakte Laufmantelrollen entwickelt worden sind.

■ **Rollwiderstand**

Obwohl die Bestimmung des Rollwiderstands nicht Gegenstand der Untersuchung war, wurde in einer FEM-Studie mit viskoelastischem Werkstoffgesetz der Rollwiderstand einer 2K-Rolle mit steifem Laufmantel und weichem Radkörper demjenigen von je einer kompakten Rolle aus steifem und aus weichem Kunststoff, aber mit sonst gleichen Abmessungen gegenübergestellt. Dabei zeigte sich, dass die 2K-Rolle einen nur unwesentlich grösseren Rollwiderstand aufweist als die kompakte Rolle hoher Steifigkeit, und dies trotz vergleichsweise weichem und damit abstandstolerantem Verformungsverhalten (Abb. 7). Dies bestätigt grundsätzlich die Vorstellung, dass der Rollwiderstand zur Hauptsache von der lokalen

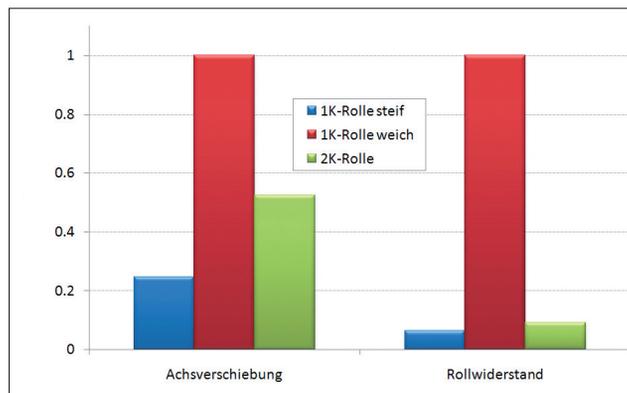


Abb. 7: Abplattung bzw. Achsverschiebung und Rollwiderstand der 2K-Rolle im Vergleich zur Massivrolle mit steifem (POM) bzw. weichem (TPU) Radkörper [2].

Verformung im Laufmantel abhängt. Genauere Angaben zur Bestimmung des Rollwiderstands bedürfen einer spezifischen Untersuchung mit Einbezug praktischer Versuche.

■ **Interessante Perspektiven**

Die dargelegten Gedanken stellen die neuartig aufgebaute 2K-Rolle mit ihrer günstigen Eigenschaftskombination – weiches Verformungsverhalten, geringer Rollwiderstand – vor. Sie ist damit ein ebenso einfaches wie überzeugendes Beispiel für die interessanten Perspektiven, die sich mit Anwendung der 2K-Technik als Konstruktionsprinzip bieten. Für die Auslegung solcher Rollen wird eine kontaktmechanische Beziehung präsentiert, die von der zylindrischen Laufmantelgeometrie ausgeht, sich aber in guter Näherung für die Erfassung von Anfasungen und partielle Abstützungen sowie auf dachartige und ballige Profile verallgemeinern lässt. Diese Erkenntnisse zu nutzen, ist die Herausforderung von Konstruktionspraxis und Verarbeitungstechnik.

■ **Literatur**

[1] Ehrig, F., Henne, M., Kunz, J.: Wenn ungleiche Partner sich binden. *Plastverarbeiter* 57(2006)12, S. 62–63.
 [2] Kunz, J., Studer, M.: Forschungsprojekt Auslegung von Kunststoff-Laufrollen. Diverse interne, unveröffentlichte Dokumente. HSR Hochschule für Technik Rapperswil, 2006/07.
 [3] Föllmi, M.: Untersuchung des Kontaktverhaltens von Kunststofflaufrollen in Zwei-Komponenten-Technik. Studienarbeit HSR Hochschule für Technik Rapperswil, 2004.
 [4] Grothe, K.-H., Feldhusen, J. (Hrsg.): *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer Verlag Berlin, 21. Aufl., 2005.
 [5] Czichos, H., Hennecke, M. (Hrsg.): *Hütte – Das Ingenieurwissen*. Springer Verlag Berlin, 32. Aufl., 2004.
 [6] Kunz, J.: Kontaktmechanik zylindrischer Kunststoff-Laufmantelrollen. *Kunststoffe-Synthetics* 52(2005)6, S. 19–22.
 [7] Kunz, J., Studer, M.: Zylindrische Laufmantelrolle mit partieller Abstützung. *Kunststoffe-Synthetics* 53(2006)1, S. 18–21.
 [8] Kunz, J., Holzinger, M.: Kunststoffrollen mit dachartigem Laufmantelprofil. *Kunststoffe-Synthetics* 53(2006)11, S. 24–27.
 [9] Kunz, J., Bürzle, W., Studer, M.: Kontaktmechanik balliger Kunststoff-Laufmantelrollen. *SwissPlastics* 29(2007)6, S. 31–34.