

TAGUNGSBAND

13.

FACH-  
KOLLOQUIUM  
20. + 21.  
September  
2017



Institut für Technische Logistik / Technische Universität Graz

**Tagungsband zum 13. Fachkolloquium  
der Wissenschaftlichen Gesellschaft  
für Technische Logistik e. V. (WGTL)**

Graz, 20. und 21. September 2017

# IMPRESSUM

---

Tagungsband zum 13. Fachkolloquium  
der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V. (WGTL)

---

**Herausgegeben von:**

Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik e. V. (WGTL)  
c/o Universität Rostock  
Lehrstuhl für Produktionsorganisation und Logistik  
Richard-Wagner-Straße 31  
18119 Rostock-Warnemünde



**Redaktion, Layout, Lektorat & Titelbild:**

Dipl.-Ing. Thomas Stöhr  
Institut für Technische Logistik - Technische Universität Graz  
Inffeldgasse 25e  
8010 Graz

Der Tagungsband wurde mit Mitteln der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik finanziert.

Für den Inhalt der Beiträge sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und die Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung der Rechte Dritter. Schadensersatz für fehlerhafte, unvollständige oder nicht abgedruckte Beiträge ist ausgeschlossen. Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © 2017 Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik e. V. und die Fachautoren

Druck: Printservice Technische Universität Graz

# INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>VORWORT</b>	<b>IX</b>
<b>PAPERS ZU DEN VORTRÄGEN</b>	<b>1</b>

---

<b>Themengruppe: Konstruktion und maschinenbauliche Gestaltung</b>	<b>1</b>
<b>Semi-analytischer Ansatz zur Berechnung der Reibtemperaturen in Gleitkettenförderern</b>	<b>1</b>
<i>Ralf Bartsch, Jens Sumpf, Klaus Nendel</i>	
<i>Professur Fördertechnik Institut für Fördertechnik und Kunststoffe Fakultät Maschinenbau Technische Universität Chemnitz</i>	
<b>Skalierbarer modularer Brückenkranträger in Segmentbauweise</b>	<b>7</b>
<i>Steffen Bolender, Jan Ollerich, Meike Braun, Markus Golder</i>	
<i>Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</i>	
<b>PiRo – Ein autonomes Kommissioniersystem für inhomogene, chaotische Lager</b>	<b>15</b>
<i>Dominik Colling, Jonathan Dziedzitz, Patric Hopfgarten, Kai Markert, Kira Neubehler, Florian Eberle, Maximilian Gilles, Matthias Jung, Alp Kocabas, Kai Furmans</i>	
<i>Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</i>	
<b>Ermittlung des Längsschlupfes eines angetriebenen Kranrads bei bombiertem Schienenkopf</b>	<b>25</b>
<i>Georg Havlicek, Georg Kartnig</i>	
<i>Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik Forschungsbereich: Konstruktionslehre und Fördertechnik (KLFT) Technische Universität Wien</i>	
<b>Eigenfrequenzbestimmung von Wafern</b>	<b>35</b>
<i>Tobias Müller<sup>1</sup>, Thorsten Schmidt<sup>1</sup>, Sebastian Rank<sup>1</sup>, Germar Schneider<sup>2</sup></i>	
<i><sup>1</sup> Professur für Technische Logistik und Arbeitssysteme Fakultät Maschinenbau Technische Universität Dresden</i>	
<i><sup>2</sup> Infineon Technologies Dresden GmbH</i>	
<b>Beitrag zur Entwicklung und Herstellungstechnologie hybrider Förderketten</b>	<b>47</b>
<i>Clemens Rohne<sup>1</sup>, Michael Schreiter<sup>2</sup>, Jens Sumpf<sup>1</sup>, Klaus Nendel<sup>1</sup>, Lothar Kroll<sup>2</sup></i>	
<i><sup>1</sup>Professur Fördertechnik Institut für Fördertechnik und Kunststoffe Fakultät Maschinenbau Technische Universität Chemnitz</i>	
<i><sup>2</sup>Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung Institut für Strukturleichtbau (IST) Fakultät Maschinenbau Technische Universität Chemnitz</i>	

# Ermittlung des Längsschlupfes eines angetriebenen Kranrads bei bombiertem Schienenkopf

Determining the longitudinal creep of a driven crane wheel on a crowned rail

Georg Havlicek  
Georg Kartnig

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik  
Forschungsbereich: Konstruktionslehre und Fördertechnik (KLFT)  
Technische Universität Wien

Der Längsschlupf an einem Kranrad hat sowohl für die Konstruktion als auch für die Antriebstechnik eines modernen Kranes erhebliche Bedeutung. Die im Betrieb auftretenden Schlupfwerte sind jedoch weitgehend unbekannt. Dieser Beitrag stellt ein Berechnungsmodell für den Längsschlupf an einem angetriebenen Kranrad vor, das für eine schnelle analytische Bestimmung verwendet werden kann. Ausgehend von der Berührfläche zwischen Kranrad und Schiene wird statt dem nur aufwendig berechenbaren realen Punktkontakt eine flächeneiche Linienberührung zur Schlupfabstimmung herangezogen. Validiert wurde der Ansatz am Rad-Schiene-Rüfstand des Instituts.

*Längsschlupf, Kranrad, Rad-Schiene-Kontakt, analytisches Verfahren, Einlaufverhalten*

The longitudinal creep on a crane wheel has considerable effects, both for the design and the control of the drive technology of a modern crane. The creep values occurring during operation are, however, widely unknown. This article presents a calculation model for longitudinal creep of a driven crane wheel, which can be used for a fast analytical determination. Based on the contact area between the crane wheel and the rail, instead of the complex real point contact situation an equivalent line contact is calculated. The approach was validated at the Institute's wheel-rail test rig.

*Longitudinal creep, crane wheel, rail-wheel-contact, analytic method, running-in characteristic*

## EINLEITUNG

Aktuell geltende Normen für die Kranauslegung (DIN EN 13001 und Unternormen [1]) berücksichtigen beim Kontakt zwischen Kranrad und Kranschiene nur eine Schienengeometrie mit ebenem Kopf. Zum Einsatz kommen heutzutage jedoch fast ausschließlich bombierte Schienen. Infolge des verschleißspezifischen Einlaufver-

haltens kommt es mit zunehmender Betriebsdauer (Überrollungszyklen) zu einer Änderung des Schienenkopfprofils. Daraus resultiert auch eine Veränderung der anfänglich ideal elliptischen Kontaktfläche zu einer näherungsweise linienförmigen Berührgeometrie, jedoch nicht über die gesamte Schienenbreite.

Aus diesem Grund wurde am KLFT im Jahr 2014 ein Forschungsprojekt in Kooperation mit der Fa. Hans Künz GmbH gestartet das zum Ziel hat, bestehende Ansätze zur statischen und konstruktiven Auslegung für den ebenen Schienenkopf auf den allgemeinen Fall einer bombierten Schiene zu übertragen. Die Auswirkungen der geänderten Schienengeometrie auf relevante Systemparameter wie z.B. Kontaktpressung, Rollreibung, Schräglaufräfte, Längsschlupf, Kraftschluss sowie Verschleiß von Kranrädern und Schiene sollen dabei untersucht werden. Weiters wird die Charakteristik des Einlaufverhaltens des Schienenkopfs infolge plastischer Deformationen im Rahmen des Projekts näher betrachtet.

In dieser Veröffentlichung soll der Längsschlupf (Tangentialschlupf) zwischen einem angetriebenen bzw. gebremsten Kranrad und einer bombierten Schiene näher beschrieben werden.

Aus verschiedenen Gründen ist es notwendig, den Schlupf zu kennen:

- Die maximal übertragbare Brems- und Antriebskraft ist abhängig vom Schlupfverhältnis (Kraftschlussfunktion).
- Das Ausnützen des Haftreibungskoeffizienten ist bei höherem Schlupf mit höherem Verschleiß verbunden.
- Bei unterschiedlichen Radlasten an den einzelnen Laufrädern ergeben sich unterschiedliche Schlupfverhältnisse. Auch Fertigungstoleranzen an den Laufreddurchmessern resultieren in unterschiedlichen Umfangskräften an den Rädern und somit abweichenden Schlupfwerten. Der

Kran verschränkt oder verspannt sich durch die unterschiedlichen Radgeschwindigkeiten.

Die tatsächlichen Schlupfwerte am Kranrad im Betrieb sind jedoch weitgehend unbekannt. Daher ist ein anwendungsorientierter und schnell zu berechnender analytischer Ansatz für den Längsschlupf an aktuellen Krananlagen erstrebenswert.

Grundlegend ist bei Betrachtung des Schlupfs zwischen Mikro- und Makroschlupf zu unterscheiden. Bei Mikroschlupf unterteilt sich die Berührfläche in ein Haftgebiet mit gleicher Geschwindigkeit sowie ein Gleitgebiet mit Relativgeschwindigkeit zwischen den Kontaktpartnern. Der Haftreibungskoeffizient ist der begrenzende Faktor für die übertragbare Tangentialkraft. Wird der Schlupf größer verschwindet das Haftgebiet und das Gleitgebiet erstreckt sich über die gesamte Berührfläche. Ab dem Zeitpunkt des reinen Gleitens spricht man von Makroschlupf; hier ist der Gleitreibungskoeffizient bestimmend (siehe Abbildung 1). An einem angetriebenen oder gebremsten Rad entspricht Makroschlupf einem Durchrutschen des Rades, im Kranbau ist dies prinzipiell zu vermeiden. Die in dieser Arbeit betrachteten Schlupfverläufe bilden alle den Mikroschlupfbereich ab.

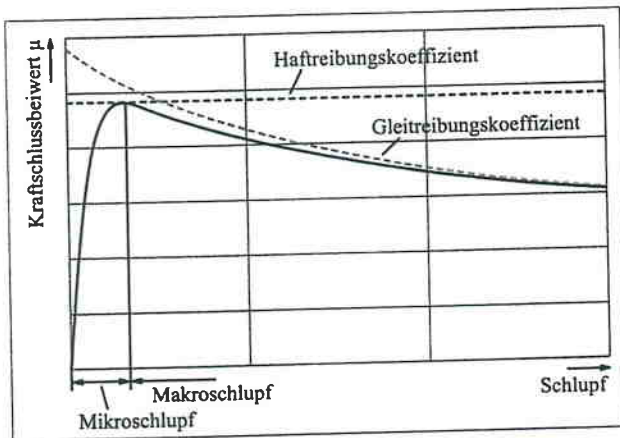


Abbildung 1. Kraftschluss-Schlupf-Beziehung (Qualitativ)

## 2 BESTEHENDE BERECHNUNGSANSÄTZE

Die folgenden Berechnungsansätze werden nur in Hinsicht auf den tangentialen Schlupfanteil beschrieben. Axialer Schlupf (Querschlupf) und Bohrschlupf werden, soweit in den Berechnungsmethoden berücksichtigt, in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Weiters wird speziell von einer Berührgeometrie zwischen Kranrad und Kranschiene nach DIN 536 ausgegangen [2].

Der Tangentialschlupf ist allgemein definiert als bezogene Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der Umfangsgeschwindigkeit des Rades und der Absolutgeschwindigkeit.

$$\xi_T = \frac{R\omega - V}{\max(R\omega, V)} \quad (1)$$

## 2.1 BERECHNUNGSANSATZ FÜR LINIENBERÜHRUNG NACH CARTER

Für den schlupfbehafteten Kontakt eines Zylinders mit einer Ebene wurden bereits 1926 von F.W. Carter Beziehungen für den Längsschlupf hergeleitet [3]. Von G. Heinrich und K. Desoyer wurden diese in [4] nochmals vollständig erarbeitet und auf Querschlupf ausgeweitet.

In Abhängigkeit von Aufstandskraft  $F_R$ , Umfangskraft am Rad  $F_T$ , Radradius  $R$ , Berührbreite im Kontakt  $b_K$  sowie Haftreibungskoeffizient  $\mu_0$  und Werkstoffkonstanten  $G$ ,  $\nu$  ergibt sich folgender Zusammenhang für den Längsschlupf [4]:

$$\xi_T = \sqrt{\frac{4(1-\nu)F_R}{\pi G R b_K}} \mu_0 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{F_T}{\mu_0 F_R}} \right) \quad (2)$$

Abbildung 2 zeigt den Kontaktbereich sowie die Schubspannungsverteilung in der Kontaktfläche zwischen rollendem Zylinder und Ebene unter radialer Last und Übertragung eines Drehmoments.

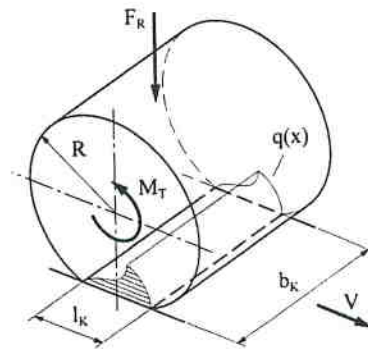


Abbildung 2. Kontakt zwischen Zylinder und Ebene

Entlang der Berührlänge  $l_K$  ergibt sich die Aufteilung in Gleit- und Haftbereich sowie die Schubspannungsverteilung gemäß Abbildung 3.

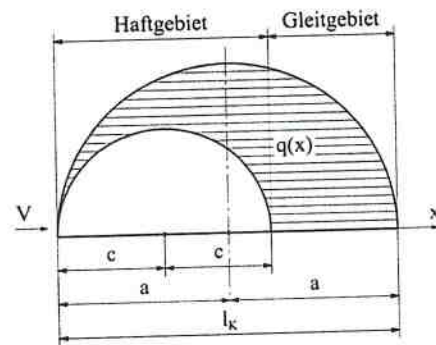


Abbildung 3. Schubspannungsverteilung und Aufteilung in Gleit- und Haftbereich im Kontakt

Der letzte Term der Formel (2) entspricht dem Anteil des Haftgebiets an der gesamten Berührlänge und ist die bestimmende Größe für den Schlupf.

$$a^* = \frac{c}{a} = \sqrt{1 - \frac{F_T}{\mu_0 F_R}} \quad (3)$$

In die Formel (2) einbezogen ist der Zusammenhang zwischen Berührlänge und Berührbreite bei Linienkontakt nach Hertz.

$$\frac{l_K}{2} = \sqrt{\frac{8(1-\nu)^2 F_R R}{\pi E b_K}} \quad (4)$$

Somit kann die Formel umgeschrieben werden, um statt der Breite der Berührfläche die Länge einsetzen zu können. Entlang dieser wird auch die Aufteilung in Haft und Gleitgebiet bestimmt.

$$\xi_T = \frac{l_K}{2R} \mu_0 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{F_T}{\mu_0 F_R}} \right) \quad (5)$$

Die Korrektheit des Ansatzes wurde unter anderem von J.J. Kalker mit Hilfe numerischer Methoden bestätigt [5].

Für den Kontakt zwischen Kranrad und ebenem Schienenkopf können die Formeln (2) oder (5) direkt herangezogen werden. Gewisse Abweichungen zum realen Kontakt zwischen Rad und Schiene sind zu erwarten, da der Ansatz keine Randeffekte an den Grenzflächen des Zylinders berücksichtigt.

## 2.2 BERECHNUNGSANSÄTZE FÜR PUNKTBERÜHRUNG

Ansätze zur Berechnung der Schlupfverhältnisse bei Punktberührung, wie sie bei einem bombierten Schienenkopf auftritt, sind nicht so einfach zu lösen. Die übertragene Tangentialkraft ist über die Breite der Berührfläche (hier die lange Halbachse der Berührellipse) nicht konstant. Die Verteilung der Schubspannung und die Aufteilung in Gleit- und Haftbereich der Berührfläche ist in Abbildung 4 dargestellt.

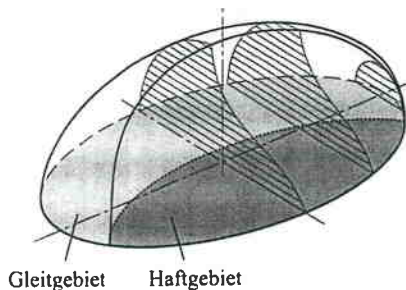


Abbildung 4. Schubspannungsverteilung bei Punktberührung (qualitativ)

### 2.2.1 STREIFENMODELL NACH HAINES UND OLLERTON

Das Streifenmodell ist ein rein analytisches Berechnungsverfahren, bei dem die elliptische Berührfläche quer

zur Laufrichtung in Längsstreifen geteilt und aufintegriert wird. Jeder einzelne Streifen wird wie eine Linienberührung behandelt, ein Einfluss der Streifen auf einander wird jedoch vernachlässigt. Der Ansatz von B.J. Haines und E. Ollerton für reinen Tangentialschlupf wurde von J.J. Kalker ausgearbeitet und später auch weiterentwickelt um Quer- und einen geringen Anteil an Bohrschlupf berücksichtigen zu können [6, 7, 8]. Abbildung 5 zeigt die Diskretisierung der Berührfläche und die Schubspannungsverteilung im Streifen.

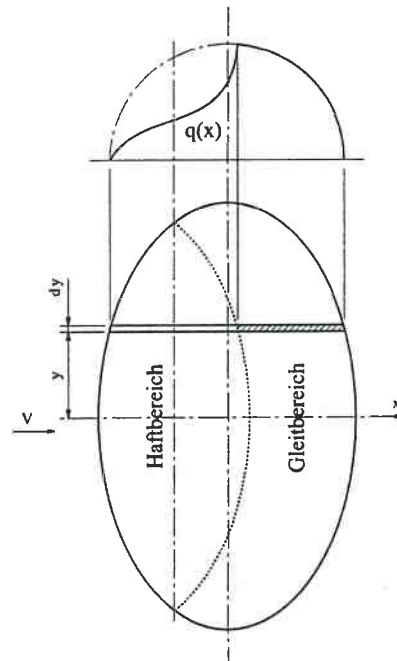


Abbildung 5. Streifenmodell nach Haynes und Ollerton

Der Zusammenhang zwischen Tangentialkraft und Schlupf ist über die folgenden Beziehungen definiert:

$$F_T = \mu_0 F_R \left\{ \frac{3}{2} \zeta \cos^{-1}(\zeta) + \left[ 1 - \left( 1 + \frac{1}{2} \zeta^2 \right) \sqrt{1 - \zeta^2} \right] \right\} \quad (6)$$

mit dem Faktor  $\zeta$  in Abhängigkeit vom Schlupf  $\xi_T$  und der Hertz'schen Pressung  $p_0$  im Kontakt:

$$\zeta = \xi_T \frac{E}{2 \mu_0 (1+\nu) p_0} \quad (7)$$

Die Ergebnisse dieser Berechnungsmethode stimmen bei schlanken Berührellipsen (Halbachsenverhältnis  $a/b \approx 0,2$ ) sehr gut mit Versuchsergebnissen und numerischen Methoden überein. Weichen die Kontaktflächen von dieser Form jedoch stärker ab, werden die Fehler durch den fehlenden Einfluss der Streifen aufeinander groß [7].

Das Modell wurde nach Entwicklung der vereinfachten Theorie von Kalker zugunsten der genaueren numerischen Berechnung nicht weiterverfolgt.

## 2.2.2 NUMERISCHE METHODEN NACH KALKER

Die von Kalker entwickelten Berechnungsmodelle der exakten und der vereinfachten Theorie sind nur numerisch lösbar. Sie sind in den Kontaktmodellen der Programme CONTACT (exakt) bzw. FASTSIM (vereinfacht) implementiert. Beide Modelle teilen die Berührfläche in rechteckige Bereiche ein, die über die gesamte Berührfläche gerechnet in Hinsicht auf den Spannungszustand im Gleichgewicht sein müssen. Die exakte Theorie nach Kalker liefert genaue Ergebnisse, bei reiner Tangentialbelastung des Kontakts weicht die vereinfachte Theorie um bis zu 5 % ab. [9]

Für genauere Informationen zu den numerischen Methoden nach Kalker siehe [5] und [10].

## 2.2.3 LINEARE THEORIE NACH KALKER

Die Theorie verwendet für den Zusammenhang zwischen Schlupf und Tangentialspannung die mittels numerischer Methoden bestimmten Kalker-Koeffizienten. Diese sind in Abhängigkeit der Halbachsenlängen der Berührellipse und der Querdehnungszahl tabellarisch definiert. Bei Zwischenwerten sind Interpolationen notwendig. Die lineare Theorie ist nur für sehr kleine Schlupfwerte anwendbar, da die Existenz eines Gleitbereichs bei diesem Ansatz vernachlässigt wird. Sie gibt die Steigung des linearen Astes der Schlupfkurve aus dem Ursprung wieder. Größere Schlupfwerte, die durch den Einfluss des größer werdenden Gleitbereichs entstehen werden nicht korrekt abgebildet. Die Abweichung der linearen Theorie vom realen Schlupfverlauf ist in Abbildung 6 qualitativ dargestellt.

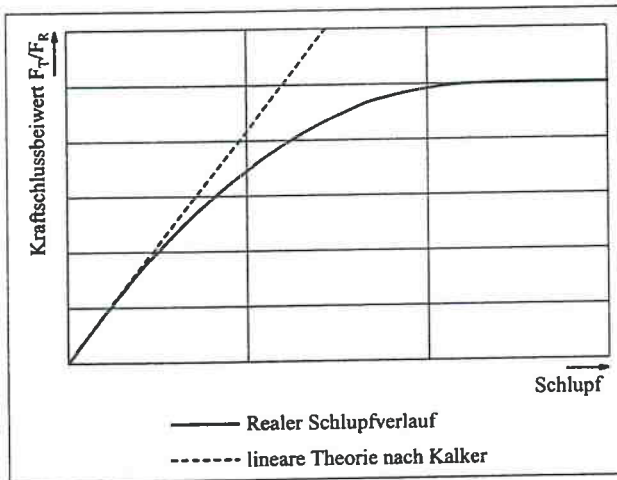


Abbildung 6. Schlupfkurve lineare Theorie und realer Verlauf

Die Abhängigkeit der Tangentialkraft vom Längsschlupf besteht nach der linearen Theorie nach Kalker über die folgende Beziehung:

$$F_T = GabC_{11} \xi_T \quad (8)$$

Für das reine Tangentialkontaktproblem wird nur der Kalker-Koeffizient  $C_{11}$  benötigt. (Für Werte siehe [5].)

## 3 BERECHNUNGSANSATZ FÜR DIE TATSÄCHLICHE BERÜHRGEOMETRIE

Die tatsächliche Berührgeometrie zwischen Kranrad und Schiene entspricht bereits nach kurzer Betriebsdauer der Krananlage keiner idealen Punktberührung mehr. Durch plastische Deformation verändert sich die Bombierung am Schienenkopf so lange bis die Spannungen im Inneren der Schiene die Streckgrenze nicht mehr überschreiten.

Mittels Druckmessfolien ermittelte Abdrücke zeigen bei einem neuen Kran bereits in der Inbetriebnahmephase ein Einlaufverhalten, das zu einer Einebnung des Schienenkopfes führt. Die auftretenden Kontaktdrücke können aufgrund des zu geringen Messbereichs der Fuji Prescale Folien nicht ausgewertet werden, über die Form der Kontaktfläche geben sie aber sehr gut Auskunft. Abbildung 7 zeigt die Messfolie an der Kranschiene nach der Belastung durch das Kranrad. In Abbildung 8 ist der entstandene Abdruck auf der Folie zu sehen, zusätzlich ist die berechnete Berührellipse bei idealem Punktkontakt dargestellt. Da der Kran auf die Folie gefahren wurde, ist die genaue Kontur der Berührfläche nicht erkennbar, die Berührbreite ist jedoch deutlich größer als das Ergebnis nach der Hertz'schen Theorie.

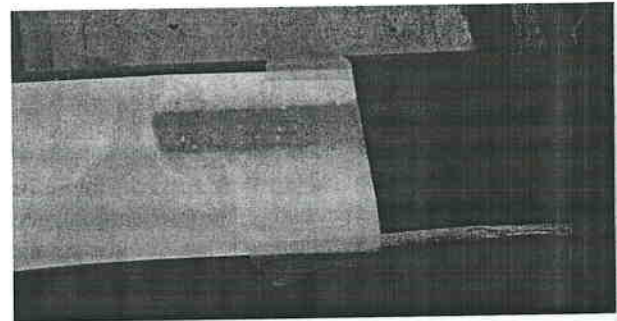


Abbildung 7. Fuji Druckmessfolie auf Kranschiene

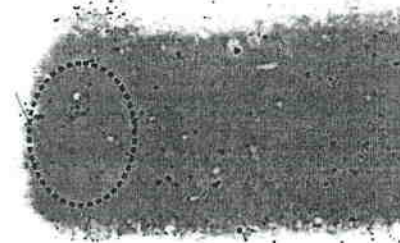


Abbildung 8. Abdruck der Berührfläche bei Überrollung und theoretische Berührellipse

Die Berührbreite stabilisiert sich nach einer gewissen Zeit, sodass, auch bei Kranen welche sich bereits seit Jahren in Betrieb befinden, die Kontaktfläche nicht über die volle Schienenbreite geht. Beispielhaft dazu eine Aufnahme einer Kranschiene nach rund sieben Jahren Betrieb (Abbildung 9).