

# Neue Ansätze des Condition Monitoring von Kettentrieben

## Novel Approaches for Condition Monitoring of Chain Drives

Jonas Nölcke

Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT)  
Abteilung für Maschinenentwicklung und Materialflussautomatisierung  
Universität Stuttgart

**Z**ustandsüberwachung von Kettentrieben bietet die Möglichkeit der Instandhaltungsplanung auch ohne allgemeine Lebensdauergleichung für dieses Maschinenelement. Zwei Konzepte der kamerabasierten Erfassung des Verschleißzustandes werden vorgestellt, die die mit fortschreitendem Verschleiß zunehmenden Trumsschwingungen erfassen und quantifizieren. Daneben wird ein Konzept für einen berührungslosen Längungssensor präsentiert, der die Kettenlängung unmittelbar während des Betriebs misst.

[Zustandsüberwachung, Rollenkette, Kamera, Hochgeschwindigkeitskamera, Längung]

**C**ondition Monitoring of chain drives allows maintenance planning without a general lifetime equation for this machine component. Two concepts for camera-based evaluation of the wear state are presented, that quantify the increasing span oscillation due to advanced wear. Next to that, a concept for a contact-less elongation sensor is presented, that measures the chain elongation directly during operation.

[Condition monitoring, roller chain, camera, high-speed camera, elongation]

### 1 EINLEITUNG

Ketten spielen eine bedeutende Rolle als Maschinenelement in verschiedensten Anwendungsszenarien, als Antriebsketten zur Drehmomentübertragung, Steuerketten zur Signalübertragung oder auch in Form von Förderketten für verschiedenste Anwendungen. Neben dem Versagen der Kette durch Laschen- oder Bolzenbruch stellt das Erreichen der Ablegereife infolge Gelenkverschleiß und daraus resultierender Längung der Ketten und dem damit verbundenen Teilungsfehler das zentrale Kriterium der Gebrauchstauglichkeit in der Anwendung dar. Aufgrund der großen Zahl an Einflussfaktoren auf den Kettenverschleiß, wie Fertigungseinflüssen, Belastungskollektiv, Schmierbedingungen und weiteren steht immer noch keine allgemeine Lebensdauergleichung zur Verfügung. Um trotzdem

belastbare Aussagen zum Zustand der Kette während des Betriebs abzuleiten und entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen planen zu können, bietet sich eine Zustandsüberwachung der Kette an. In diesem Beitrag werden entsprechend neben einigen etablierten Ansätzen auch mehrere neuartige Konzepte für das Condition Monitoring von Rollenkettenrieben vorgestellt.

### 2 GRUNDLAGEN

Der Verschleiß von Stahlgelenkketten äußert sich hauptsächlich durch Längung infolge verschlissener Gelenke. Die Gelenkbewegungen beim Ein- und Auslaufen aus den Kettenrädern führen zu einer Relativbewegung zwischen dem Bolzen des Außengliedes und der Buchse des Innengliedes. Während Bolzen und Buchse bei einer neuen Kette näherungsweise konzentrisch sind, bildet sich mit zunehmendem Materialabtrag an den Mantelflächen von Bolzen und Buchse ein Versatz  $\Delta p$  zwischen Bolzenmitte und Buchsenmitte heraus [1], wie in Abbildung 1 dargestellt.

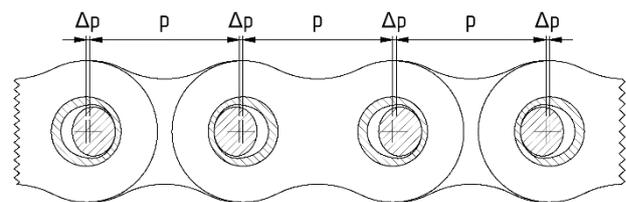


Abbildung 1. Kettenlängung durch Gelenkverschleiß

Dieser Versatz stellt die verschleißbedingte Längung der Kette dar, die zu einem Teilungsfehler gegenüber der nominellen Ursprungsteilung  $p$  und damit der Kettenradverzahnung führt. Über die Betriebsdauer einer Kette hinweg lässt sich dieses Längungsverhalten in einer Lebensdauerkurve darstellen, schematisch in Abbildung 2 für eine ausreichend geschmierte Kette gezeigt. Typischerweise können drei Bereiche identifiziert werden, der Einlaufverschleiß, in Abbildung 2 mit I markiert, während dem der Verschleiß durch fertigungsbedingte Spannungsüberhöhungen schnell voranschreitet [2].

Darauf folgt Phase II, die sich durch einen geringen Verschleißfortschritt über die Betriebsdauer hinweg auszeichnet. Phase III weist einen progressiven Verschleiß auf, was hauptsächlich auf das Durchdringen der Härteschicht von Bolzen und Buchsen zurückzuführen ist [1].

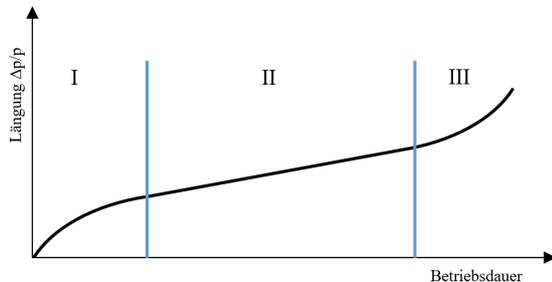


Abbildung 2. Schematische Lebensdauerkurve

Das Betriebsverhalten einer verschlissenen Kette weist gegenüber dem Neuzustand stärkere Vibrationen sowie Geräusch- und Wärmeentwicklung auf, die aus dem Teilungsfehler und den verschlissenen Gelenken resultieren. Dieses Verhalten lässt sich mit Methoden des Condition Monitoring messtechnisch erfassen, um den fortgeschrittenen Verschleiß nachzuweisen.

### 3 STAND DER TECHNIK

Der Stand der Forschung zum Condition Monitoring von Kettentrieben ist im Gegensatz zu anderen Anwendungsgebieten wie zum Beispiel Wälzlagern und Schneidwerkzeugen noch nicht sehr ausgeprägt. Die wenigen Veröffentlichungen beschränken sich auf die Vibrationsanalyse sowie das übertragene Drehmoment. Im Folgenden sollen diese vorgestellt werden.

Brecher et al. [3] untersuchen die beiden parallelen Kettentriebe einer Verpackungsmaschine. Bei der untersuchten Kette handelt es sich um eine Standard-Rollenkette, die über Sonderbolzen Mitnehmer für die zu verpackenden Produkte aufnehmen kann. Die Kette lässt sich dementsprechend bezüglich Belastungskollektiv und Geschwindigkeit als Förderkette bewerten. Das Verhalten der Kette im Betrieb wird mit Schwingungssensoren an den jeweiligen Umlenkrollen der beiden Kettentriebe sowie nahe der Antriebseinheiten gemessen. Darüber hinaus werden Drehmoment, Drehwinkel und Temperatur erfasst, zur Ermittlung des Kettenverschleißes wurde allerdings ausschließlich die Schwingungsmessung verwendet. Die verschleißbedingte Längung äußert sich in den beschriebenen Versuchen durch erhöhte Vibrationen infolge des längungsbedingten Eingriffsfehlers.

Lee et al. [4] unterziehen ebenfalls einen Kettentrieb einer Vibrationsanalyse, allerdings wurde bewusst auf die Betrachtung von Verschleiß an Kette und Kettenrädern verzichtet, die Messungen beschränken sich auf einge-

brachte Fehler an Antriebsmotoren, Getriebe und Lagerung. Der Erkenntnisgewinn für das Verschleißverhalten des Kettentriebs selbst fällt entsprechend gering aus.

Die Erfassung von akustischen Emissionen zur Erkennung von Rissen in Ketten wird von Angulo et al. [5] präsentiert, untersucht werden jedoch keine Stahlgelenkketten, sondern als Ankerketten eingesetzte Rundstahlketten. Die aufgenommene Frequenz wird dabei als geeigneter Indikator für einen Riss identifiziert, ein Anstieg der durchschnittlichen Frequenz wird mit Ausbreitung des Risses beobachtet.

Schließlich liegen einige Veröffentlichungen vor, in denen die Messung des Antriebsdrehmoments untersucht wurden. So präsentieren Kärcher und Schullerus [6] einen Versuch mit einer Standardrollenkette, deren Antriebsdrehmoment über 300 Stunden Versuchsdauer aufgezeichnet wird. Das Drehmoment verringert sich über den Tagesverlauf mit abnehmender Viskosität des Schmiermittels bei erwärmter Kette, langfristig nimmt es jedoch durch Verschleiß und Mangelschmierung zu.

Smieschek et al. [7] präsentieren einen neuen Zustandsindikator für langsam-laufende Rollenketten, für den sowohl Antriebsdrehmoment als auch Drehwinkel der Motorwelle berücksichtigt werden. Dadurch kann das momentane Drehmoment auf die einzelnen Rolleneingriffe während einer Umdrehung des Kettenrades bezogen werden. Dies ermöglicht eine Berechnung des mittleren Drehmoments für jeden Zahn des Kettenrades über die Kettenlebensdauer.

Schließlich untersuchen Sosnin et al. [8] anhand von Motordrehmomentmessungen den Verlauf des Reibkoeffizienten, um den Verschleißzustand der Kette abzuschätzen.

Zur Längungsmessung während des Betriebs, auf einzelne Teilungen aufgelöst, ist aktuell nur ein System bekannt, das mit induktiven Sensoren die Längung von Rollenketten erfassen kann [9].

### 4 KAMERABASIERTES CONDITION MONITORING VON KETTENTRIEBEN

Zwei neue Ansätze zur kamerabasierten Erfassung von Verschleiß an Kettentrieben werden im Folgenden vorgestellt. Beide Konzepte basieren darauf, auf Bildern der Kette mittels Kreiserkennung die Positionen aller sichtbaren Kettenbolzen zu ermitteln und aus deren Positionen gegenüber einem Referenzwert Aussagen über den Verschleißzustand der Kette abzuleiten. Sonderketten bieten alternativ zu den Kettenbolzen auch andere Elemente zur Kreiserkennung, beispielsweise die Staurollen bei Staurollenketten. Die detektierten Kreise können dabei nicht direkt zur Längungsberechnung über die Bolzenabstände verwendet werden, da die dafür erforderliche Messgenauigkeit

aufgrund von Abweichungen bei der Kreiserkennung nicht erreicht werden kann.

#### 4.1 HOCHGESCHWINDIGKEITSKAMERA

Der erste vorgestellte Ansatz verwendet eine Hochgeschwindigkeitskamera, die in regelmäßigen Abständen für wenige Sekunden Videos mit hoher Bildwiederholrate aufnimmt. Die Auswertung dieser Aufnahmen erlaubt durch den Videocharakter eine Objektverfolgung der untersuchten Kettenelemente, da diese sich einander über zwei aufeinanderfolgende Bilder hinweg zuordnen lassen. Für das vorgestellte Konzept werden die Kettenbolzen untersucht, um für jeden einzelnen Bolzen die Bolzentrajektorie zu ermitteln und auf deren Basis die Trumschwingung zu analysieren. Da der verschleißabhängige Teilungsfehler zu Schwingungen der Kette führt, kann aus diesen Trumschwingungen auf den Verschleißfortschritt geschlossen werden.

Erste Versuche des Konzeptes wurden während eines Verschleißversuchs an einer 12B-1 Hohlbolzenkette mit 19,05 mm Teilung durchgeführt. Die Kette wurde mit einer Geschwindigkeit von ca. 1,7 m/s bewegt, die Hochgeschwindigkeitskamera ist dabei auf den Auslauf des treibenden Kettenrades gerichtet. Der aufgenommene Bildausschnitt ist in Abbildung 3 abgebildet.



Abbildung 3. Aufnahmebereich der Hochgeschwindigkeitskamera am Auslauf des treibenden Kettenrades

Die Detektion der kreisförmigen Hohlbolzen wird gegenüber einer Standardkette durch den hohen Kontrast des dunkel erscheinenden Bolzeninneren vereinfacht. Die resultierenden Trajektorien von vier aufeinanderfolgenden Kettenbolzen sind in Abbildung 4 dargestellt.

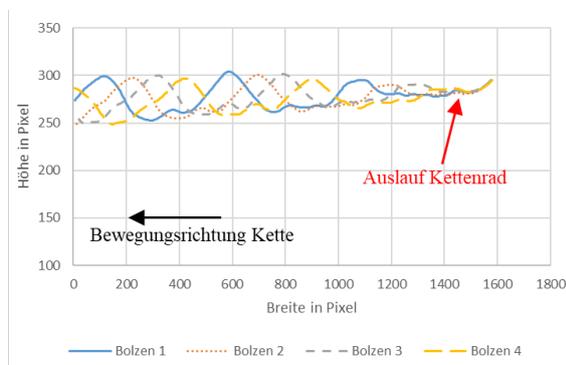


Abbildung 4. Bolzentrajektorien von vier aufeinanderfolgenden Bolzen der Hohlbolzenkette

Zur Quantifizierung des Verschleißzustandes können Eigenschaften der Trumschwingungen von verschiedenen Bolzen, darunter Schwingungsperiode, Amplitude und Phasenversatz, herangezogen werden.

#### 4.2 EINZELBILDER

Der zweite kamerabasierte Ansatz soll insbesondere den mit einer Hochgeschwindigkeitskamera verbundenen finanziellen Aufwand vermeiden. Anstatt eine Kamera zu verwenden, deren Sensor und Speichersystem auf extrem hohe Aufnahmeleistungen ausgelegt ist, sollen Aussagen über den Verschleißzustand der Kette hier mit einer kostengünstigen Kamera erzielt werden, deren Sensor und Speichersystem einfacher aufgebaut sind. Um dem verringerten Potenzial bezüglich Bildwiederholrate gerecht zu werden, ist das Konzept von vornherein darauf ausgelegt, keine Videos, sondern lediglich Bilder in größeren Abständen aufzunehmen. Hierzu werden in regelmäßigen Abständen in der Größenordnung einiger Minuten Einzelbilder des Kettentrums aufgenommen. Durch die großen zeitlichen Abstände zwischen zwei Bildern lassen sich keine Bolzentrajektorien ermitteln, eine unmittelbare Analyse der Trumschwingungen ist dementsprechend nicht möglich. Stattdessen basiert das Messkonzept auf dem Ansatz, dass die aus den Trumschwingungen resultierenden Positionsabweichungen der Bolzen auch in Einzelbildern sichtbar sind. Wenngleich keine Aussage über Frequenzen, Amplituden oder Phasenverschiebungen der Trumschwingung gemacht werden kann, so erlaubt die Abweichung von einem Referenzzustand trotzdem eine Quantifizierung des Verschleißfortschritts.

Umgesetzt wird dies, analog zur Methode mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, mit einer Kreiserkennung aller im Bild sichtbaren Kettenbolzen. Mit den resultierenden Bolzenkoordinaten sowie im neuwertigen Zustand aufgenommenen Referenzwerten lässt sich der Verschleißfortschritt quantifizieren. Eine Option ist die Berechnung des Abstands zur Referenzlinie für jeden Kettenbolzen. Der Mittelwert dieser Abstände kann im Folgenden als Kennzahl herangezogen werden, die mit dem Kettenverschleiß korreliert. Weitere Konzepte der Statistik wie Standardabweichung, relative Abweichung und andere sind potenziell geeignet, um den Verschleißzustand abzubilden. Durch den verhältnismäßig großen zeitlichen Abstand zwischen zwei Bildern steht zudem ausreichend Zeit zur Verfügung, um Kreiserkennung und Auswertung auch mit wenig Rechenleistung während des Betriebs der Kette durchzuführen. Der aktuelle Verschleißzustand kann somit einige Sekunden nach einer Aufnahme aktualisiert werden. Ein Vorteil für die praktische Anwendung ist die massive Reduktion der Datenmengen durch die Extraktion der Bolzenkoordinaten aus den Rohdaten. Wird mit einer Dateigröße von 2 MB pro Bild und einem Bild pro Minute gerechnet, ergibt sich über eine typische Kettenlebensdauer von 15.000 h eine Datenmenge von 1,8 TB. Der für die Aus-

wertung interessante Informationsgehalt pro Bild beschränkt sich dagegen abhängig von der Anzahl sichtbarer Kettenbolzen auf eine zweistellige Zahl Punktkoordinaten. Der Aufwand zur Speicherung dieser Daten in der praktischen Anwendung, mitunter bei einer großen Zahl von Kettentrieben, kann hierdurch reduziert werden.

Eine Herausforderung stellt der Verschlussmodus der verwendeten Kamera dar, da schnell bewegte Objekte aufgenommen werden. So führt das bei CMOS-Sensoren verbreitete zeilenweise Belichten der Bildpunkte, der sogenannte Rolling Shutter, zu Verschiebungen auf den aufgenommenen Bildern. Die erzeugten Bilder ermöglichen keine Auswertung hinsichtlich der Bolzenposition, eine Kamera mit Rolling Shutter ist daher nicht für das Messkonzept geeignet. Eine Lösung bietet der sogenannte Global Shutter, bei dem alle Bildpunkte des Sensors gleichzeitig belichtet werden. Eine Verschiebung des aufgenommenen Objektes tritt dadurch nicht auf. Aufgrund der komplexeren Ausleseelektronik sind Kameras mit hoher Auflösung allerdings wesentlich teurer als solche mit Rolling Shutter. Um dem Ziel des geringen finanziellen Aufwands gerecht zu werden, wurde in der ersten Erprobung daher ein Sensor mit einer Auflösung von lediglich 1 MP verwendet.

Um die Eignung des Konzeptes zur Quantifizierung von Kettenverschleiß nachzuweisen, wurde das Konzept im Rahmen eines Verschleißversuches erprobt. Dabei wird ein OV9281 Global Shutter Sensor mit einer Auflösung von 1280x800 Pixel verwendet, in Verbindung mit dem verwendeten Objektiv mit einer Brennweite von 4 mm wurde in der Ebene des Kettentrums ein Bildausschnitt von 461 x 288 mm aufgenommen. Jeder Pixel bildet dementsprechend eine Fläche von etwa 0,36 x 0,36 mm ab. Die im Versuch verwendete Kette ist eine Staurollenkette mit 12,7 mm Teilung, abgebildet in Abbildung 5. Um für die erste Erprobung des Konzeptes die Kreiserkennung zu vereinfachen, werden statt der Kettenbolzen die Staurollen detektiert, da diese gegenüber dem weißen Hintergrund einen höheren Kontrast aufweisen.



Abbildung 5. Staurollenkette

Auf die weiße Hintergrundplatte sind Kalibriermarken in definierten Abständen aufgebracht, die den Bezug verschiedener Aufnahmen aufeinander erlauben, auch wenn die Kamera nicht beide Male exakt gleich ausgerichtet ist. Zur Ansteuerung der Kamera und zur Kreiserkennung wird die Python-Bibliothek OpenCV verwendet [10]. Abbildung 6 zeigt ein Beispiel der von der Kamera erfassten

Rohdaten, dabei bewegt die Kette sich mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s vor der Kamera.



Abbildung 6. Rohdaten der Kamera

Das aufgenommene Bild wird mit einem Gauß-Filter geglättet und die Positionen der Staurollen in Leer- und Lasttrum sowie der sechs Kalibriermarken mit einem Kreiserkennungsalgorithmus ermittelt. Dazu wird der Hough Circle Transform-Algorithmus nach Yuen et al. [11] eingesetzt. Das gefilterte Bild mit den detektierten Kreisen ist in Abbildung 7 gezeigt.

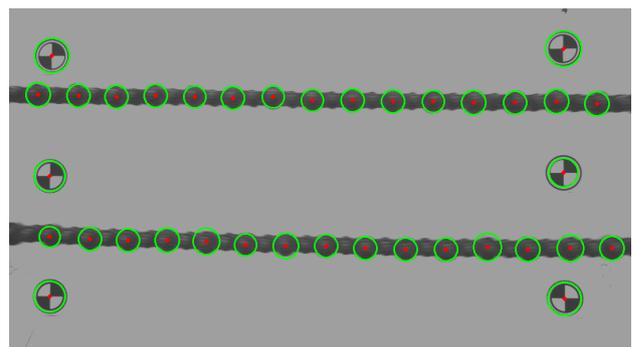


Abbildung 7. Kreiserkennung an der Staurollenkette

Aus den derart ermittelten Koordinaten lässt sich gemeinsam mit einem Referenzwert eine Aussage über den Verschleißzustand ableiten. Der Referenzwert wird mit einer unverschlissenen Kette im unbewegten Zustand ermittelt. Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen beispielhafte Auswertungen vom Lasttrum der Kette, einmal nach 20 Stunden und einmal nach 120 Stunden. Nach 120 Stunden wurde an der Kette eine Längung von etwa 0,15 % gemessen.

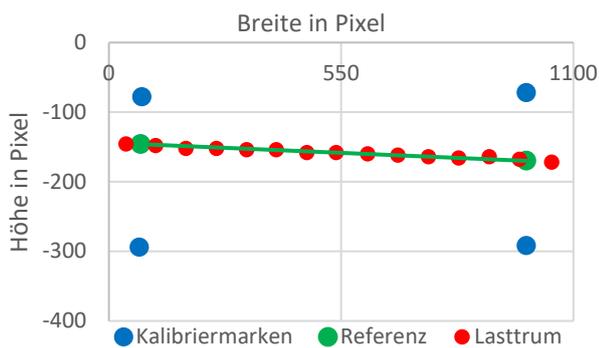


Abbildung 8. Staurollenpositionen nach 20 Stunden

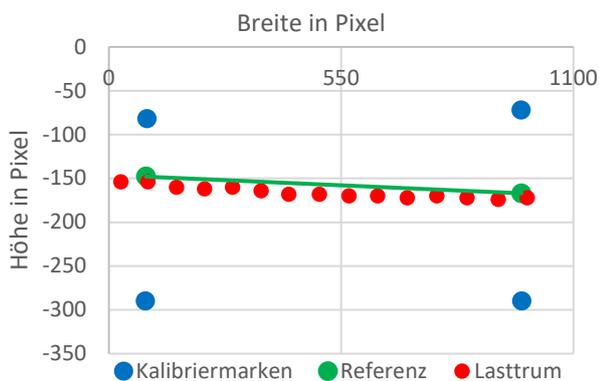


Abbildung 9. Staurollenpositionen nach 120 Stunden

Anhand der Kalibriermarken kann die Referenzlinie in beiden Bildern passend skaliert werden, so dass deren ermittelte Rollenpositionen vergleichbar sind. Während die Staurollen nach 20 Stunden noch weitestgehend auf der Referenzlinie liegen, ist nach 120 Stunden eine stärkere Abweichung der Rollenpositionen von der Referenz erkennbar. Die Berechnung der relativen Abweichungen aller Staurollen von der Referenzlinie ergibt für die Aufnahme nach 20 Stunden im Mittel einen Wert von 0,7 %, nach 120 Stunden im Mittel 5,9 %. Diese Werte deuten auf eine Quantifizierbarkeit des Kettenverschleißes durch die Auswertung der Staurollenpositionen hin, die in weiteren Versuchen intensiv untersucht werden soll.

## 5 LASERLÄNGUNGSSENSOR

Während die beiden zuvor vorgestellten kamerabasierten Ansätze zur Verschleißerkennung den Zustand der Kette nur mittelbar über die aus dem Teilungsfehler resultierenden Trumschwingungen ableiten, kann der Verschleiß auch unmittelbar über die Längungsmessung während des Betriebs abgeleitet werden.

Vorgestellt wird dazu ein Längungssensor, der auf dem Prinzip einer Lichtschranke basiert. Dabei wird ein Laserstrahl derart auf die Kette ausgerichtet, dass abwechselnd die Lücken zwischen zwei Rollen durchdrungen werden oder der Laserstrahl von einer Rolle unterbrochen wird.

selnd die Lücken zwischen zwei Rollen durchdrungen werden oder der Laserstrahl von einer Rolle unterbrochen wird. Auf der anderen Seite der Kette ist eine Photodiode platziert, die den Laserstrahl beim Durchdringen der Rollenlücken detektiert. Die Einstrahldauer des Laserstrahls auf die Photodiode ergibt in Verbindung mit der Kettengeschwindigkeit ein Maß für den Abstand zwischen zwei Rollen und somit unmittelbar für die Kettenlänge. Das Prinzip ist in Abbildung 10 veranschaulicht.

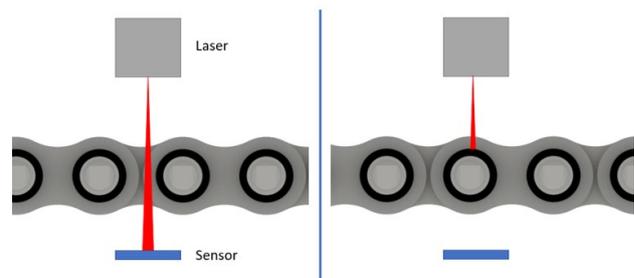


Abbildung 10. Funktionsprinzip Laserlängungssensor

Der Sensor erfordert zum einen eine hinreichend schnelle Auswerteelektronik, um aus der Zeit zwischen steigender und fallender Flanke die Größe der Rollenlücke zu ermitteln. Zum anderen bringt die berührungslose Längungsmessung anhand der Rollen zusätzliche Herausforderungen mit sich. Mit zunehmendem Verschleiß der Kettengelenke verschleßen auch die Rollen, was sich in erweitertem Spiel auf den Buchsen äußert. Auch wenn die Rollen in der Theorie symmetrisch verschleßen sollen, kann ein exzentrischer Verschleiß in der Praxis nicht ausgeschlossen werden. Je nach Orientierung der Rollen auf der Buchse können die gemessenen Werte daher deutlich voneinander abweichen. Darüber hinaus kann die Rolle durch die berührungslose Messung nicht in eine definierte Position gezwungen werden. Abhängig von der Rollenposition und -orientierung auf der Buchse können somit verschiedene Werte für die Länge der Rollenlücke gemessen werden. Die Umsetzung des Sensors erfordert deshalb ein besonderes Augenmerk auf die Interpretation der Messwerte.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorgestellten kamerabasierten Konzepte erlauben eine Erfassung des Kettenverschleißes während des Betriebs über die aus dem Teilungsfehler resultierenden Trumschwingungen. Diese können dabei ohne Umweg über Maschinenvibrationen direkt aus den Positionen der Kettenbolzen abgeleitet werden. Insbesondere der in 4.2 vorgestellte Ansatz mit Einzelbildern ermöglicht dies mit vertretbarem finanziellem Aufwand durch die Verwendung einer günstigen Kamera. Im Folgenden werden diese Konzepte in Kettenverschleißversuchen intensiv erprobt, um die Eignung zur Feststellung des Verschleißzustandes zu ermitteln. Der präsentierte Laserlängungssensor hat das Potenzial, die direkte Längungsmessung im Betrieb zu

vereinfachen und somit in Echtzeit Messdaten über die Kettenlänge als etabliertem Verschleißmerkmal zu liefern. Ein Prototyp befindet sich aktuell im Aufbau und wird in Zukunft ebenfalls in Verschleißtests erprobt.

---

**Jonas Nölcke, M.Sc.**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart

Tel: +49 711 685-83967,  
E-Mail: jonas.noelcke@ift.uni-stuttgart.de

Adresse: Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart, Holzgartenstraße 15 B, 70174 Stuttgart

## 1 LITERATUR

- [1] H.-G. Rachner, *Stahlgelenkketten und Kettentriebe*. Berlin Göttingen Heidelberg: Springer-Verlag, 1962.
- [2] H. Binz, „Untersuchung des Einlaufverschleißverhaltens von Rollenketten unter besonderer Berücksichtigung der Buchse-Lasche-Pressverbindung“. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1985.
- [3] C. Brecher, G. Pohlmann und W. Herfs, „Zustandsbasierte Diagnose an Rollenketten von Verpackungsmaschinen: Höchste Beanspruchung bei 140 Takten/min“, *wt Werkstattstechnik online*, Jg. 99, 7/8, S. 498–503, 2009.
- [4] S. K. Lee, J. Back, K. An, S. Kim, C. Lee und P. Kim, „Condition Monitoring of Chain Sprocket Drive System Based on IoT Device and Convolutional Neural Network“, *Shock and Vibration*, Jg. 2020, S. 1–17, 2020, doi: 10.1155/2020/8826507.
- [5] Á. Angulo, J. Tang, A. Khadimallah, S. Souza, C. Mares und T.-H. Gan, „Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Crack Growth in Mooring Chains“, *Applied Sciences*, Jg. 9, Nr. 11, S. 2187, 2019, doi: 10.3390/app9112187.
- [6] T. Kärcher und G. Schullerus, „Correlation-Based Condition Monitoring of a Roller Chain“, *Proceedings 1st World Congress on Condition Monitoring*, 2017.
- [7] M. Smieschek, T. Hinrichs, A. Stollenwerk, S. Kowalewski und R. Preuß, „A New Condition Indicator for Slow-Rotating Roller Chains based on the Angle and Torque of the Driving Motor“ (eng), *2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, S. 642–644, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8536777>
- [8] K. Sosnin, O. Gerasina, Y. Ribalchenko und G. Schullerus, „Disclosure of state uncertainty of the roller chain based on cross-correlation“, *Nauk. visn. nat. hirn. univ.*, Nr. 1, S. 57–62, 2022, doi: 10.33271/nvngu/2022-1/057.
- [9] iwis antriebssysteme GmbH & Co. KG, Hg., „CCM-S - Chain Condition Monitoring "Smart": Das Kettenlängungs-Überwachungssystem“, Juli 2021.
- [10] *Open Source Computer Vision Library*, 2015.
- [11] H. K. Yuen, J. Princen, J. Dlingworth und J. Kittler, „A Comparative Study of Hough Transform Methods for Circle Finding“ in *Alvey Vision Conference 1989*, Reading, 1989, 29.1-29.6, doi: 10.5244/C.3.29.