

---

# Multifunktionale Führungsschienen zur integrierten Verschleißmessung an Tragkettenförderern

Hagen Bankwitz\*, Pascal Winkler, Norman Katzer, Jörg Hübler

*Hochschule Mittweida, Professur Intelligente Maschinensysteme*

\* Correspondence: [bankwitz@hs-mittweida.de](mailto:bankwitz@hs-mittweida.de); Tel.: +49 3727 581591

## **Peer reviewed article**

Received 01 July 2024; Revised 02 September 2024; Accepted 03 September 2024; Available online December 2024

© 2024 by H. Bankwitz and the other authors. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The innoTRAC logo and third-party content are excluded from this.

---

## **ABSTRACT**

In industriellen Anwendungen sind Tragkettenförderer weit verbreitet, wobei die Kunststoffführungsschienen als wesentliche Komponenten des Fördersystems dienen und als primäre Verschleißteile dienen. Aktuell erfolgt die Verschleißüberwachung entweder visuell durch menschliche Inspektion, was höhere Kosten und Ausfallzeiten verursacht, oder durch die Integration externer Sensorik, die spezielles Fachwissen bei Installation, Wartung und Auswertung erfordert und mit hohen Installationskosten verbunden ist. In einem aktuellen Forschungsprojekt wird eine neuartige Lösung entwickelt, bei der die Verschleißsensoren direkt in die Führungsschienen integriert werden. Diese Sensoren sollen nicht nur den Verschleiß überwachen, sondern auch als tragende multifunktionale Strukturen fungieren. Der Beitrag konzentriert sich auf die Entwicklung des Sensordesigns, die Materialentwicklung des Sensors sowie die Demonstration der Funktionalität mittels numerischer Simulationen. Die Integration von Verschleißsensoren in die Führungsschienen verspricht, den Überwachungsprozess zu optimieren, indem manuelle Inspektionen und die Integration externer Sensoren vermieden werden. Die Herausforderung besteht darin, Materialien und Sensoren zu entwickeln, die den Anforderungen industrieller Umgebungen gerecht werden und gleichzeitig eine präzise Verschleißüberwachung ermöglichen. Numerische Simulationen spielen eine entscheidende Rolle bei der Bewertung und Optimierung der Leistungsfähigkeit der Sensoren unter verschiedenen Betriebsbedingungen. Mit dem neuartigen Lösungsansatz können sowohl zukünftige als auch Bestandsanlagen ausgerüstet und die Überwachung kostengünstig automatisiert werden. Dies kann zu einer verbesserten Effizienz, Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Anlagen führen.

**KEYWORDS** condition monitoring, Tragkettenförderer, Führungsschiene, Gleitschiene, multifunktionale Strukturen, Industrie 4.0, Predictive Maintenance, leitfähige Kunststoffe

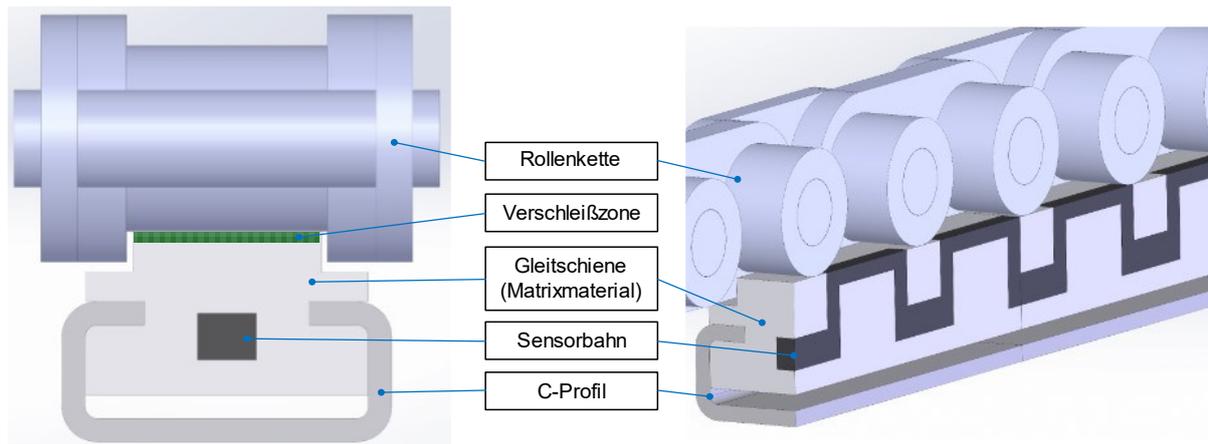
---

## 1. Einleitung

Die Effizienz und Zuverlässigkeit von Tragkettenförderern sind entscheidende Faktoren für den reibungslosen Betrieb industrieller Fertigungsprozesse. Tragkettenförderer sind in einer Vielzahl von Branchen weit verbreitet, darunter Bergbau, Automobilherstellung und Lebensmittelverarbeitung, wo sie zum Transport schwerer Lasten und Materialien verwendet werden. Trotz ihrer Robustheit unterliegen diese Förderanlagen, insbesondere die Führungsschienen, einem kontinuierlichen Verschleiß, der durch die ständige mechanische Belastung und den Kontakt mit abrasiven Materialien entsteht. Traditionelle Wartungsstrategien basieren häufig auf festen Intervallen oder reaktiven Maßnahmen nach dem Auftreten von Problemen, was zu ungeplanten Ausfallzeiten und erhöhten Betriebskosten führen kann. Diese herkömmlichen Ansätze sind oft ineffizient, da sie entweder zu häufige und damit kostenintensive Wartungen oder unvorhergesehene Ausfälle und Störungen im Betriebsablauf zur Folge haben. In einem aktuellen Forschungsprojekt mit der Terbrack Kunststoff GmbH & Co. KG und der Kessler Systems GmbH wird eine neuartige Lösung entwickelt, bei der Verschleißsensoren direkt in die Führungsschienen integriert werden. Diese innovativen Systeme kombinieren die Führung der Ketten mit Sensorik zur kontinuierlichen Überwachung des Verschleißes, wodurch eine proaktive und zustandsbasierte Wartung ermöglicht wird. Diese Technologie verspricht nicht nur eine Reduzierung der Wartungskosten und Minimierung der Ausfallzeiten, sondern auch eine Verlängerung der Lebensdauer der Förderanlagen durch präzise und rechtzeitige Instandhaltungsmaßnahmen.

## 2. Sensordesign und Funktion

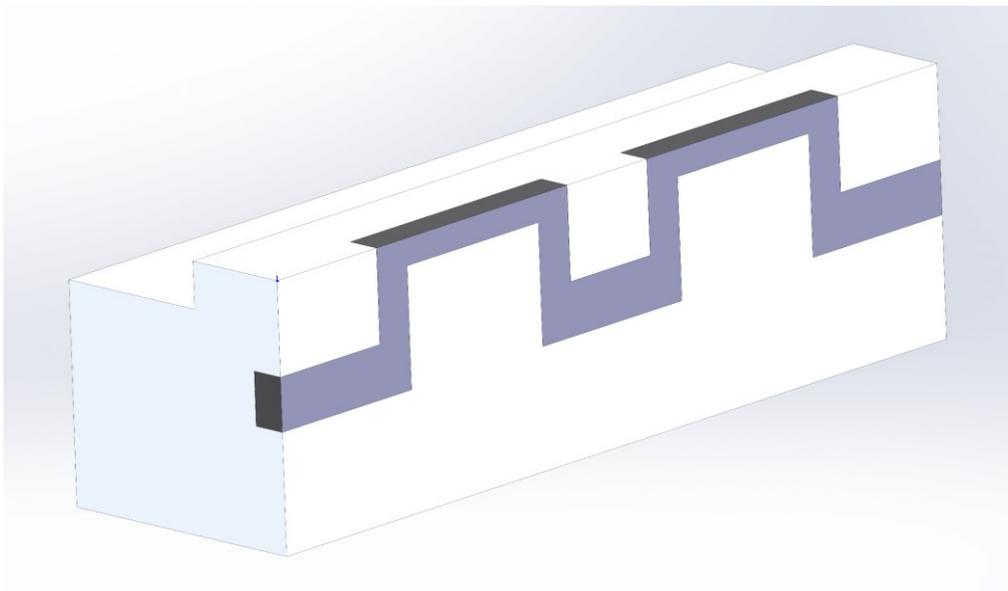
Der Aufbau des sensorintegrierten Führungselementes besteht im Gegensatz zur herkömmlichen Gleitschiene aus zwei unterschiedlichen Materialien (siehe Abbildung 1). Ein Teil der Schiene wird dabei durch einen Kunststoff mit elektrisch leitfähigen Eigenschaften ersetzt und mittels Formpressen/Sintern in das Ausgangsmaterial der Schiene integriert. Das Matrixmaterial besteht im Anwendungsbeispiel aus einem PE-UHMW und dient weiterhin als primäre Verschleißschicht, sodass die Lebensdauer der Schiene durch die integrierte Sensorbahn eine nur geringe Beeinflussung erfahren sollte. Die Sensorbahn ist an beiden Enden der Gleitschiene kontaktiert und mit einer elektrischen Spannung beaufschlagt. Über eine extern angebrachte Auswerteelektronik wird kontinuierlich oder intermittierend der elektrische Widerstand dieser Sensorbahn ermittelt.



**Abbildung 1:** Konzept des sensorintegrierten Führungselements mit darüber laufender Rollenkette

Im Betrieb unterliegen sowohl das Matrixmaterial als auch die im Kontakt befindliche Sensorbahn einem Verschleißprozess, wodurch sich die Querschnittsfläche verringert und folglich der elektrische Widerstand ansteigt.

Auf Grund der Leitfähigkeit der in der Regel verwendeten Stahlketten, kann die Sensorbahn nicht konstant parallel zur Gleitschiene verlaufen, da sonst die Kette einen Kurzschluss verursachen und das Messprinzip nicht funktionieren würde. Um den Kurzschluss des Sensorelements durch die Kette zu vermeiden, muss während des Betriebs sichergestellt werden, dass es einen Zeitpunkt gibt, an den höchstens eine Rolle der Kette sich mit dem Sensor im Kontakt befindet. Dies muss auch die verschleiß- und kraftbedingte Kettenlängung berücksichtigen. In Abbildung 2 ist ein mögliches Sensordesign dargestellt.



**Abbildung 2:** Schnittdarstellung eines möglichen Sensordesigns

Wird der Abstand der aktiven Verschleißsensoren so gewählt, dass er gerade die Kettenlängung kompensiert, kann das System auch als Sensor für die Überschreitung der Längung der Kette benutzt werden. Wenn dieser Wert den Grenzwert überschreitet,

wird die Sensorik kurzgeschlossen und der Widerstandswert fällt konstant. Dies ist dann ein Zeichen, dass die Kette verschlissen ist und gewechselt werden muss. Zu diesen Zeitpunkt funktioniert die Verschleißüberwachung der Führungsschiene nicht mehr. Mit (1) kann der erforderliche Querschnitt  $A$  abhängig von der Sensorlänge  $L$  und dem spezifischen Widerstand  $\rho$  näherungsweise bestimmt werden.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

Ziel der Auslegung ist es, einen Gesamtwiderstand von  $1 \text{ k}\Omega$  des Sensorelements zu erreichen. Ebenfalls kann so die potenzielle Widerstandsänderung in Folge des Verschleißes ermittelt werden. Eine genauere Dimensionierung bzw. Widerstandsänderung kann auf Grund der komplexen Geometrie nur numerisch bestimmt werden, siehe Kapitel 4.

Die finale Geometrie ist außerdem von Fertigungskriterien bzw. -restriktionen abhängig, die einen starken Einfluss auf das Sensordesign haben.

### 3. Sensormaterialentwicklung und experimentelle Untersuchungen

#### 3.1. Materialauswahl und Herstellung

Damit die bisherige Einsatzdauer der Gleitschiene durch die Sensorintegration nicht nachteilig beeinflusst wird, muss der elektrisch leitfähige Kunststoff über vergleichbare Reibungs- und Verschleißigenschaften wie das Ausgangsmaterial verfügen, gleichzeitig aber eine ausreichend hohe elektrische Leitfähigkeit aufweisen, sodass die Widerstandsunterschiede mit einer entsprechenden Sensorik hinreichend genau detektiert werden können. Hierfür eignen sich extrinsisch leitfähige Kunststoffe. Aufgrund abrasiver Effekte, hoher Kosten oder mangelnder Korrosionsbeständigkeit metallischer Additive wurden kohlenstoffbasierte Additive, genauer Carbon Blacks (CB) gewählt, die sich im Vergleich zu besser leitenden Carbon Nanotubes oder Graphen Nanoplatelets einfacher verarbeiten lassen und geringere Kosten aufweisen. Während sich die elektrische Leitfähigkeit bei diesen mit steigendem Füllanteil des leitfähigen Additivs erhöht, verschlechtern sich in der Regel gleichzeitig die tribologischen Eigenschaften [1]. Entsprechend dieser Zusammenhänge sollte der Additivanteil also so hoch wie nötig und so gering wie möglich sein, auch im Sinne der Wirtschaftlichkeit. Forschungsberichte zeigen, dass sich mit Carbon Blacks, die eine kleine Primärpartikelgröße (meist  $<30 \text{ nm}$ ) bei gleichzeitig hohem Verhältnis der Polymerpartikelgröße zur Additivpartikelgröße, eine mittlere bis hohe Porosität und eine mittlere spezifische Oberfläche ( $>80 \text{ m}^2/\text{g}$ ) aufweisen, bereits auch bei geringen Füllmengen (3-15 Gew.-%) ausreichend hohe Leitfähigkeiten (10-100 S/m) erreichen lassen [2][3][4][5]. Diese Leitfähigkeiten werden dabei durch eine sogenannte segregierte Struktur erreicht, die sich wiederum durch trockenes Vermischen des Additivs mit dem Polymerpulver und anschließendes Formpressen herstellen lässt [6][7][8]. Dabei kommt es zu einer Anlagerung der deutlich kleineren Additivpartikel um die Polymerpartikel herum, sodass nach dem Formpressen ein durchgehendes leitfähiges 2D-/3D-Netzwerk entsteht, bei dem die Additivpartikel nicht homogen und

zufällig innerhalb der Polymerpartikel sondern konzentriert um diese herum verteilt sind [6][7][8].

Eine solche Struktur wurde somit auch zur Herstellung der Kunststoffcompounds für den Verschleißsensor angestrebt. Als Polymer wurde Celanese GUR<sup>®</sup>4120 als ein mittlerer Vertreter der PE-UHMW mit einer mittleren molaren Masse von  $4,7 \cdot 10^6$  g/mol und einer mittleren Partikelgröße von 120  $\mu\text{m}$  gewählt [9]. Als leitfähige Additive wurden die drei hinsichtlich ihrer Qualität bezogen auf die BET-SSA (nach Brunauer-Emmett-Teller Methode ermittelte spezifische Oberfläche der Partikel)[10], die OAN (oil-absorption-number, Maß für die Struktur der Carbon Blacks)[10] und dem d50-Wert (50.Perzentil (Median) des Partikeldurchmessers)[11] verschiedene Carbon Blacks:

- JP 49137-1 (BET-SSA: 109 m<sup>2</sup>/g, OAN: 99 ml/100g, d50: 30 nm),
- JP 47572-1 (BET-SSA: 115 m<sup>2</sup>/g, OAN: 118 ml/100g) und
- JP 48165 (BET-SSA: 500 m<sup>2</sup>/g, OAN: 270 ml/100g)

verwendet. Folgende Probenmischungen (siehe Tabelle 1) wurden dabei bislang zur Erforschung der Eigenschaften eines für die Sensoranwendung geeigneten Materials hergestellt.

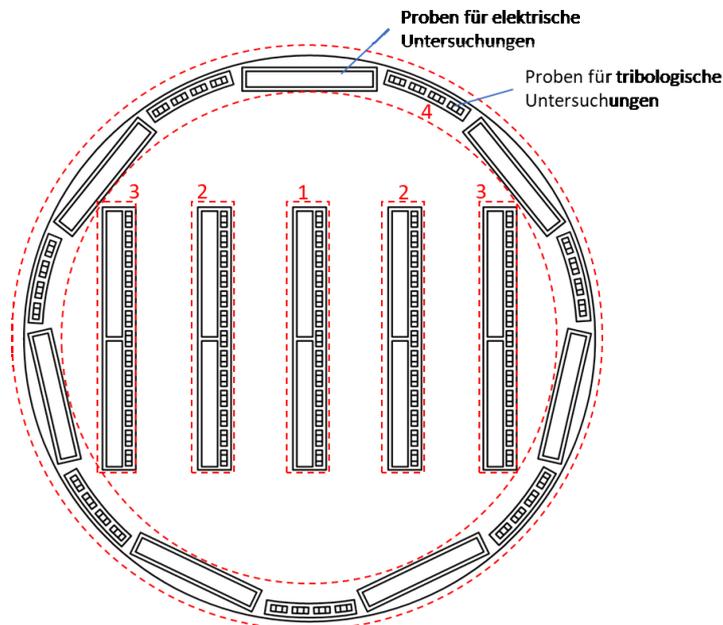
**Tabelle 1:** Materialzusammensetzungen der Proben

Probenbezeichnung	Verwendetes Additiv	Additivfüllmenge in Gew.-%
0-CB	-	-
10-CBL	JP 49137-1	10,0
5-CBM/10-CBH	JP 47572-1; JP 48165	5,0; 10,0
7,5-CBL	JP 49137-1	7,5
5-CBL	JP 49137-1	5,0
2,5-CBL	JP 49137-1	2,5
1,5-CBL	JP 49137-1	1,5

Die Herstellung erfolgte durch trockenes Vermischen der Pulver im Trommelmischer für eine Zeitdauer von 45 min bei 198 U/min und nachfolgendem Formpressen in einer Laborpresse zu zylinderförmigen Platten mit einem Durchmesser von 360 mm und einer Dicke von 6 mm unter einem Druck von 180 bar bei einer Temperatur von 215°C und einer Zeitdauer von 60 min sowie einer anschließenden Abkühlphase von ebenfalls 60 min. Die für die Untersuchungen benötigten Proben wurden aus den Platten durch Fräsbearbeitungen entnommen. Die Platte wurde zudem in vier Probenbereiche unterteilt, um auch die Homogenität der Eigenschaften und Additivverteilung zu untersuchen (siehe Abbildung 3).

Die in diesem Beitrag verwendete Probenbezeichnung x-CBy-z setzt sich aus dem Carbon-Black-Anteil x in Gew.-%, dem verwendeten Carbon Black y mit  $y = \{L, M, H\}$ , wobei L für low BET-SSA (JP 49137-1), M für medium BET-SSA (JP 47572-1) und H für high BET-SSA (JP 48165) steht sowie dem Probenbereich z mit  $z = \{1, 2, 3, 4\}$  zusammen, beispielsweise 10-CBL-4 welches der aus Bereich 4 entnommenen Probe die mit 10 Gew.-% JP 49137-1 hergestellt wurde, entspricht. Im Falle mehrere Additive bei der gleichen Probe, werden diese durch einen Schrägstrich getrennt, wie beispielsweise

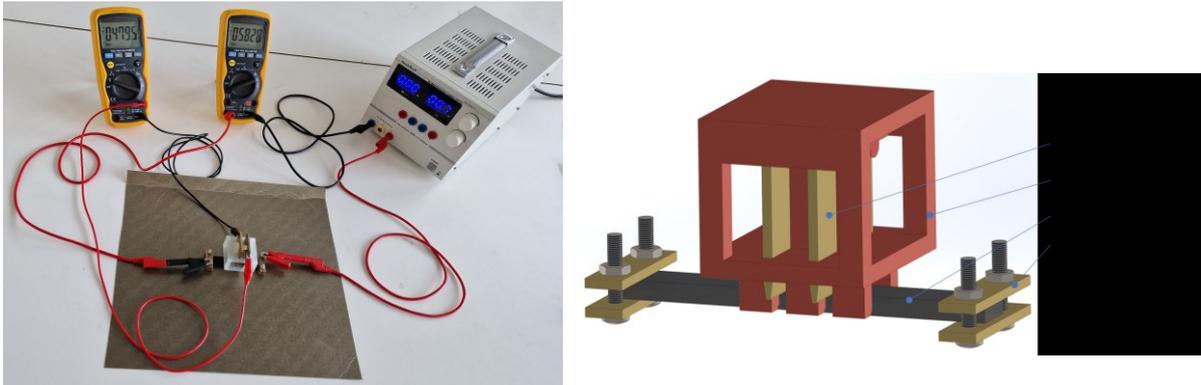
5-CBM/10-CBH-2 für die aus Bereich 2 entnommene Probe mit einem zusammengesetzten Additivanteil von 5 Gew.-% JP 47572-1 und 10 Gew.-% JP 48165.



**Abbildung 3:** Probenanordnung innerhalb der Versuchsplatte

### 3.2. Versuchsdurchführung

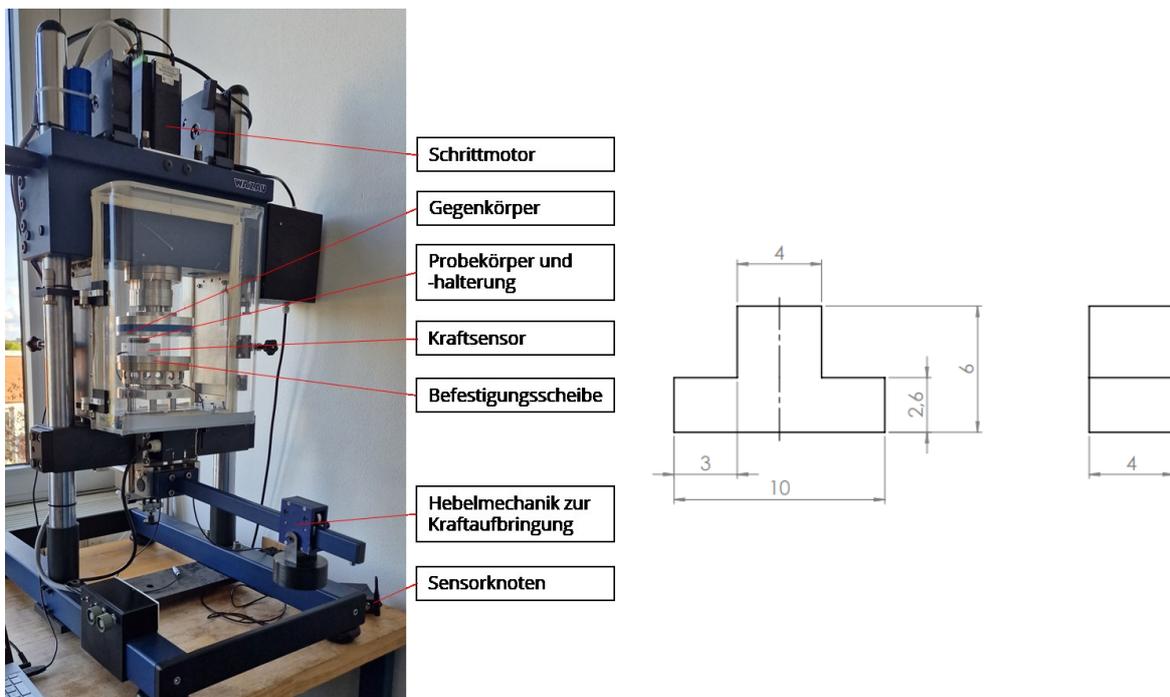
Vor den Versuchen wurden alle Proben in einer Klimakammer für 5 h bei 60°C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit konditioniert, um eventuell vorhandene Eigenspannungen aus vorangegangenen Bearbeitungsschritten zu mindern [12]. Die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit der Proben erfolgte nach dem Vierleitermessverfahren entsprechend DIN EN ISO 3915 [12]. Die Probenabmessungen betragen 80 mm x 10 mm x 4 mm. Über 5 mm breite Stromklemmen wurde an den Probenenden eine Konstantstromquelle angeschlossen und mithilfe einer Messvorrichtung bestehend aus zwei Messing-Messelektroden der Potentialabfall über eine Breite von 10 mm gemessen. Die Stromstärke betrug dabei weniger als 1 mA, um eine Probenerwärmung und damit einhergehende Verfälschung der Messergebnisse zu vermeiden. Zur Messung der Stromstärke und des Potentialabfalls wurde das Digital-Multimeter DM9199 verwendet. Als Konstantstromquelle diente ein PeakTech 6053D Labornetzteil. Der Messaufbau ist auch in Abbildung 4 dargestellt. Die Messung wurde jeweils an drei verschiedenen Bereichen der Probe mit einem Abstand der Messelektrode von 20 mm, 30 mm und 40 mm von der Stromelektrode durchgeführt. Für Bereich 1 wurden zwei Proben und für die Bereiche 2, 3 und 4 jeweils 4 Proben untersucht und anschließend aus Stromstärke, Spannung, Probenquerschnitt und der Messbreite der Median und der arithmetische Mittelwert der elektrischen Leitfähigkeit aus den somit erhaltenen 6 bzw. 12 Messwerten berechnet.



**Abbildung 4:** Versuchsaufbau der Leitfähigkeitsmessungen (li.) und Messsystem im Detail (re.)

Für die Untersuchungen der tribologischen Eigenschaften wird der schlechteste Fall angenommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Kette einen unzureichenden Schmierungsstatus aufweist und einzelne Rollen der Kette blockieren. In diesem Zustand rollen die Rollen der Kette nicht mehr auf der Führungsschiene ab, sondern gleiten. Die Untersuchungen der tribologischen Eigenschaften beziehen sich somit auf den Gleitreibungskoeffizient und den Verschleißkoeffizient für die Gleitreibung an einem Rotationstribometer in Anlehnung an DIN ISO 7148-2 nach dem Stift-Scheibe Verfahren, siehe Abbildung 5 [13].

Um möglichst anwendungsfallsspezifische Messungen durchführen zu können, wurde die rotierende Scheibe aus 42CrMoS4+QT mit einem arithmetischen Mittenrauwert von  $0,48 \mu\text{m}$  gefertigt und die statische T-förmige Unterprobe (siehe Abbildung 5) aus den Versuchsplatten entnommen, sodass die realitätsnahe Materialpaarung und vereinfacht die Bewegungsform einer Rollenkette für den Extremfall gleitende Bewegung über eine Führungsschiene nachgebildet werden konnte.



**Abbildung 5:** Versuchsstand zur tribologischen Untersuchung (li.) und Abmessungen der dafür verwendeten Proben (re.)

Die auf die Probe wirkenden Kräfte wurden mithilfe des Kraftsensors K3D60a  $\pm 500\text{N/VA}$  bei einer Messfrequenz von 4 Hz gemessen und aus diesen der Gleitreibungskoeffizient als laufender Mittelwert über jeweils 120 s Messdauer errechnet. Die Versuchsdauer wurde für jede Probe zunächst auf 24 h limitiert, sofern diese nicht bereits vor Ende dieser Zeit das Verschleißlimit erreicht hatte. Während der Versuchsläufe wurde zudem stichprobenweise die Temperatur direkt an der Probe mithilfe einer Wärmebildkamera aufgezeichnet. Um verschiedene Einsatzfälle zu untersuchen, wurden nachfolgende Gleitgeschwindigkeits-Flächenpressungen-Kombinationen für die tribologischen Versuche gewählt.

**Tabelle 2:** Versuchsparameter der tribologischen Untersuchungen

Versuch	Flächenpressung (MPa)	Gleitgeschwindigkeit (m/s)	pv-Wert (MPa·m/s)
1	20	0,075	1,5
2	10	0,13	1,3
3	3	0,3	0,9
4	1,7	0,6	1

Zur Ermittlung des gravimetrischen Verschleißbetrages  $W_m$  erfolgte jeweils unmittelbar vor und nach den Versuchen die Messung der Probenmasse auf der Analysewaage Sartorius BP210S. Die Dichte der Proben wurde aus den ermittelten Massen und der bekannten Geometrie der Proben für die Leitfähigkeitsuntersuchungen berechnet und ist in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3:** Dichte der untersuchten Proben

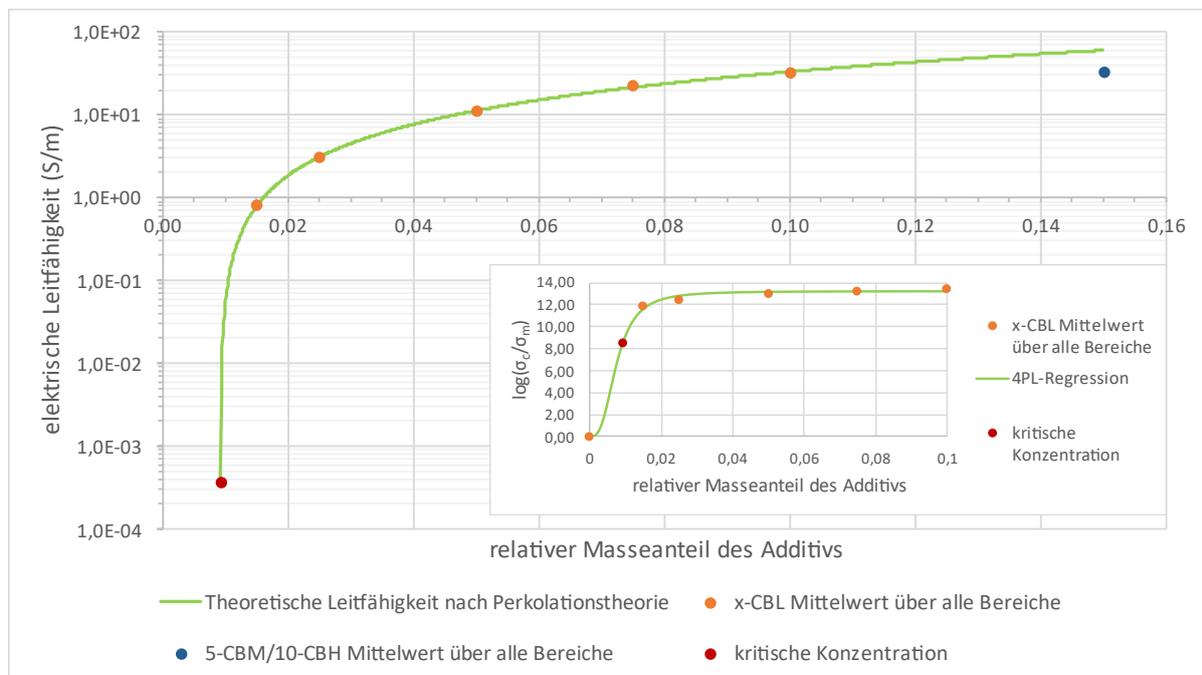
Probenbezeichnung	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )
0-CB	0,930
10-CBL	0,947
5-CBM/10-CBH	0,968
7,5-CBL	0,942
5-CBL	0,938
2,5-CBL	0,934
1,5-CBL	0,932

Mithilfe der Probenabmessungen, der Dichte  $\rho_c$ , der Normalkraft  $F_N$  und dem Gleitweg  $s$  wurde daraus, zur besseren Vergleichbarkeit der Proben untereinander, der Verschleißkoeffizient  $k$  berechnet [14].

$$k = \frac{W_m}{F_N \cdot s \cdot \rho_c} \quad (2)$$

### 3.3. Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Die elektrische Leitfähigkeit der untersuchten Platten in Abhängigkeit des Additivfüllanteils ist in nachfolgendem Diagramm (Abbildung 6) einfachlogarithmisch dargestellt.



**Abbildung 6:** Elektrische Leitfähigkeiten in Abhängigkeit des gravimetrischen Füllgrades

Der Perkolations-theorie entsprechend steigt die elektrische Leitfähigkeit auch bei diesen Compounds mit steigendem Füllanteil zunächst progressiv bis zur kritischen Konzentration und anschließend degressiv an [15]. Die Kurve oberhalb der kritischen Konzentration lässt sich nach der Perkolations-theorie durch nachfolgende Potenzfunktion beschreiben [2][5][7][16].

$$\sigma_c = \sigma_a(\varphi - \varphi_c)^t \quad (3)$$

Dabei sind  $\sigma_c$  die elektrische Leitfähigkeit des Compounds,  $\sigma_a$  ein Faktor, der die Leitfähigkeit des Additivs beschreibt,  $\varphi$  der Anteil des leitfähigen Additivs,  $\varphi_c$  die kritische Konzentration und  $t$  der kritische Exponent, der die Dimensionalität des Netzwerkes beschreibt [2][5][7][16]. Durch Plotten von  $\log(\sigma_c)$  über  $\log(\varphi - \varphi_c)$  und anschließendes variieren von  $\varphi_c$  bis die größte Übereinstimmung zwischen einer linearen Regression und den gemessenen Daten erzielt wird [7][16], ließ sich unter Bildung des Mittelwertes aller gemessener Proben der gesamten Platte eine kritische Konzentration von 0,92 Gew.-% und ein kritischer Exponent von 1,35 ermitteln. Unter Betrachtung der einzelnen Probenbereiche ergaben sich für die Bereiche 1-4 kritische Konzentrationen von 0,93 Gew.-%, 0,93 Gew.-%, 0,91 Gew.-% und 0,90 Gew.-%. Um eine sichere Sensoranwendung realisieren zu können, muss die Additivfüllmenge demnach oberhalb dieser kritischen Konzentration liegen. Zwischen den einzelnen Bereichen der gleichen Platte ließen sich wiederum nur geringe Unterschiede feststellen, die in der Regel innerhalb der zweifachen Unsicherheit oder andernfalls

innerhalb des nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetzes berechneten, mittleren Fehlers lagen, sodass davon auszugehen ist, dass bei allen Platten eine hinreichend homogene Additivverteilung vorliegt.

Die ermittelten Gleitreibungskoeffizienten sind beispielhaft für Versuch 1 (20 MPa; 0,075 m/s) und Versuch 3 (3 MPa; 0,3 m/s) in nachfolgenden Diagrammen aufgeführt.

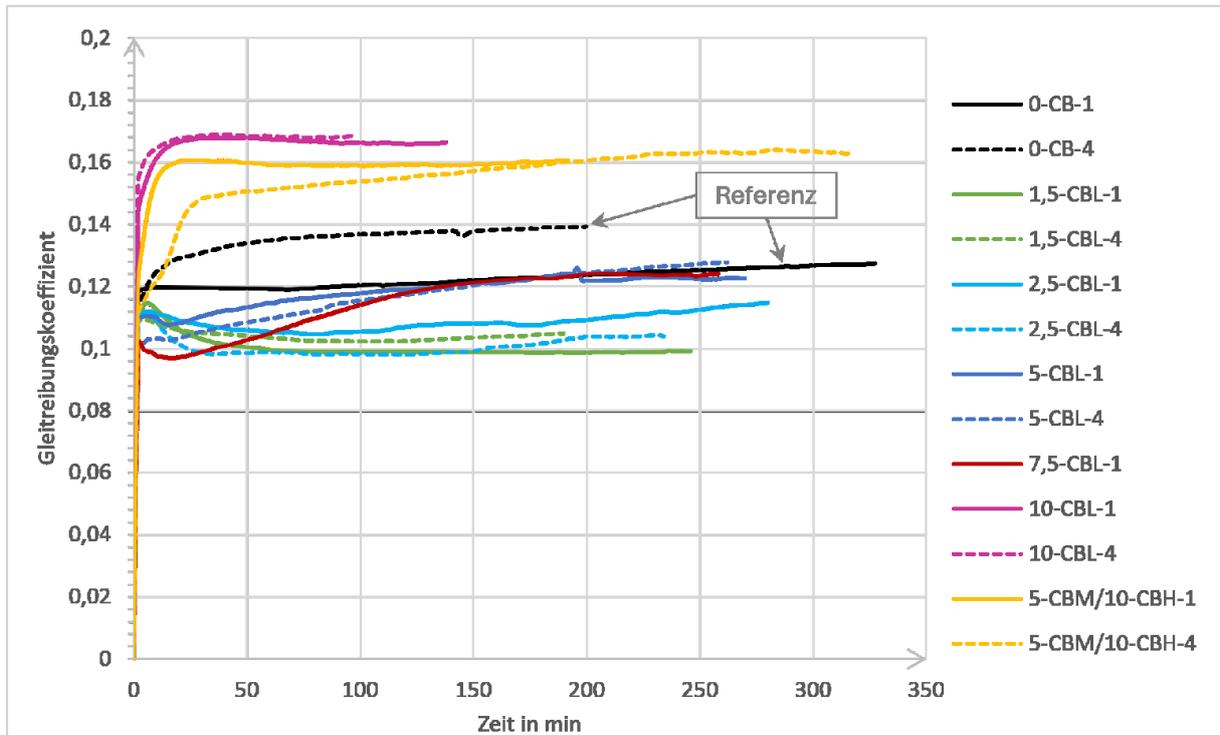


Abbildung 7: Gleitreibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Versuchsdauer bei 20 MPa und 0,075 m/s

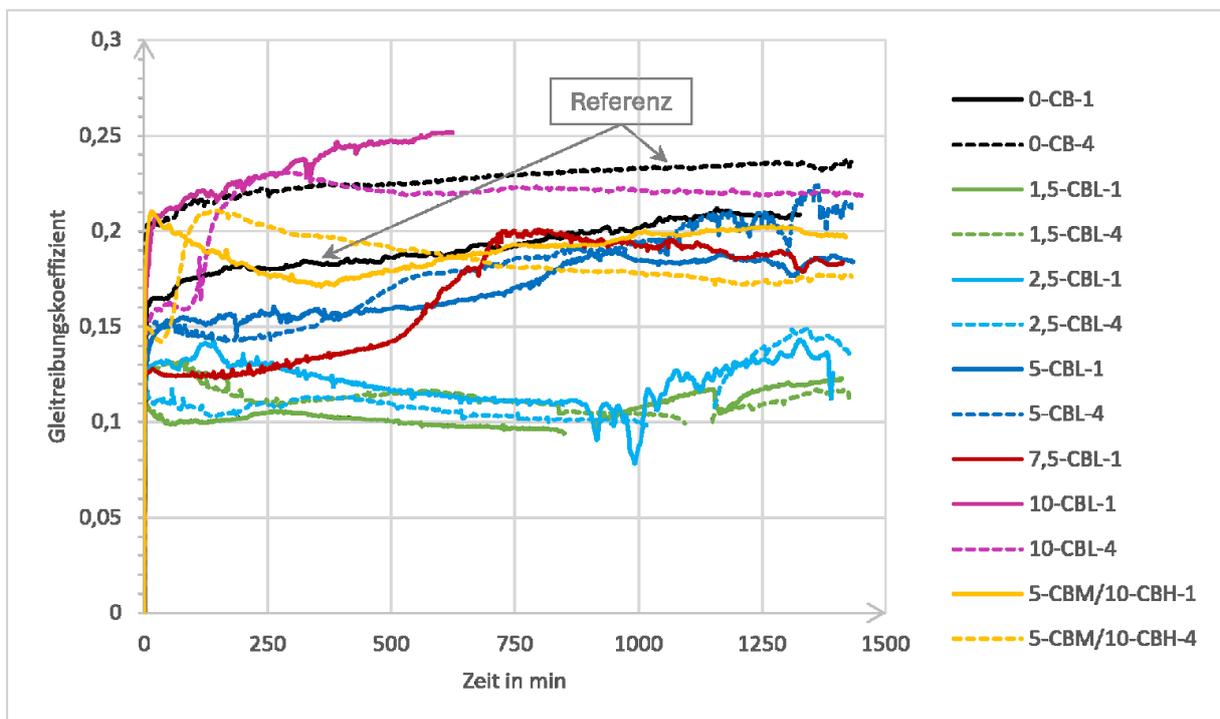
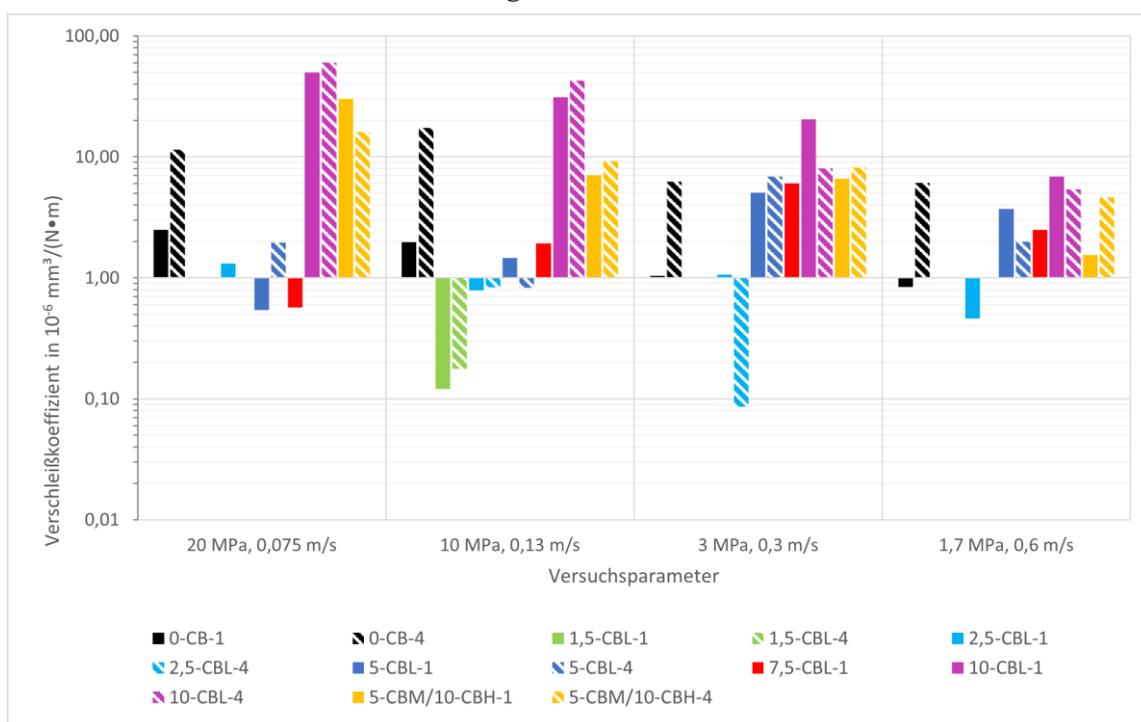


Abbildung 8: Gleitreibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Versuchsdauer bei 3 MPa und 0,3 m/s

Während sich bei höheren Gewichtsanteilen (>5 Gew.-%) in der Regel ein vergleichbarer oder geringfügig größerer Gleitreibungskoeffizient als bei der nicht leitfähigen Referenzplatte (0-CB-x) zeigt, so weisen die Proben mit geringeren Gewichtsanteilen (<3 Gew.-%) in den meisten Fällen einen zum Teil deutlich geringeren Gleitreibungskoeffizienten auf. Diese Zusammenhänge lassen sich vor allem bei geringen Flächenpressungen gepaart mit hohen Gleitgeschwindigkeiten feststellen, wohingegen die betragsmäßigen Unterschiede bei hohen Flächenpressungen gepaart mit geringen Gleitgeschwindigkeiten deutlich geringer ausfallen. Geringere Additivfüllmengen eignen sich somit besser für den Einsatz als Verschleißsensor, da das ursprüngliche Reibungsverhalten nicht negativ, sondern zum Teil sogar positiv beeinflusst und damit die Leistung, die der Motor, welcher die Kette antreibt, benötigt, beibehalten oder sogar verringert werden kann. Zwischen den Temperaturen der Proben ließen sich während der Versuche wiederum nur geringe Unterschiede feststellen, die zudem keinen direkten Zusammenhang zu den Gleitreibungskoeffizienten aufwiesen. Die maximal auftretenden Differenztemperaturen zwischen den Proben, die bei gleichen Versuchsparametern untersucht wurden, betragen dabei zwischen 4,3 K und 7,2 K, während der Unterschied zwischen den Proben, die jeweils den maximalen bzw. minimalen Gleitreibungskoeffizienten aufweisen je nach Versuchsgruppe nur zwischen 0,3 K und 5,8 K beträgt. Ein geringerer Gleitreibungskoeffizient deutet hierbei also nicht zwangsläufig auf eine geringere Temperatur hin und vice versa. Die höchsten Temperaturen waren dabei in der Regel bei den Proben 5-CBL-x und 7,5-CBL-1 zu verzeichnen, während die Referenzproben 0-CBL-1 die geringsten und die restlichen Proben vergleichbare Werte aufwiesen.

Während die Unterschiede bei den Gleitreibungskoeffizienten größtenteils gering ausfallen, so zeigen sich bei den Verschleißkoeffizienten bei vielen Proben deutlich größere Unterschiede (siehe Abbildung 9).

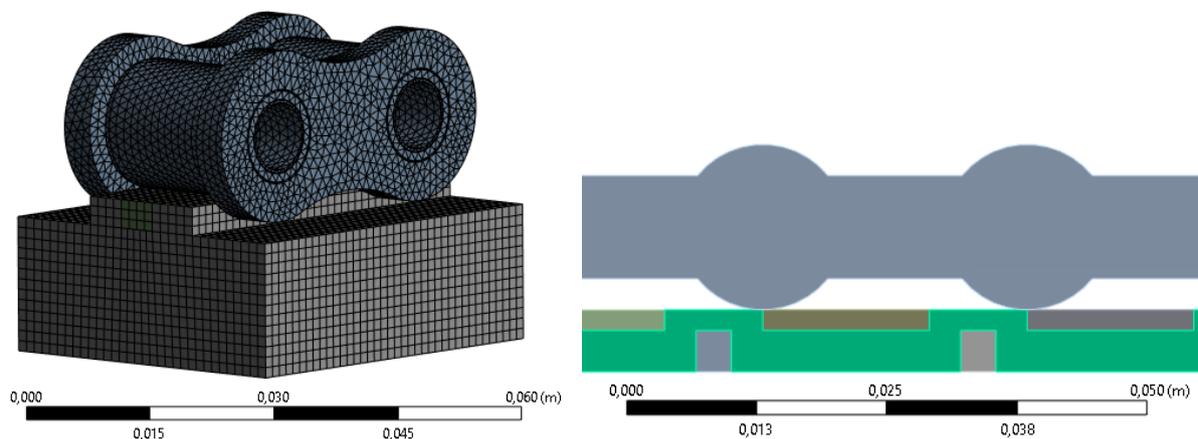


**Abbildung 9:** Verschleißkoeffizienten aller Proben in Abhängigkeit der Last

Besonders die hochgefüllten Proben (>7,5 Gew.-%) weisen einen deutlich höheren Verschleißkoeffizienten als die Referenzplatte auf, der je nach späterem Anteil des leitfähigen Materials an der Kontaktfläche zur Kette die Einsatzdauer der Gleitschiene stark verringern würde, wodurch diese nicht für den Sensor verwendet werden können. Bei einem Großteil der Proben 1,5-CBL-1, 1,5-CBL-4 und 2,5-CBL-4 war der gravimetrische Verschleißbetrag wiederum so gering, dass dieser auch mithilfe der Analysewaage mit einer Auflösung von 0,1 mg bei einer Ausgangsprobenmasse von ca. 150 mg nicht erfasst werden konnte. Um bei diesen Proben ebenfalls eine quantitative Aussage über den Verschleiß zu ermöglichen, müssen diese Versuche erneut bei längeren Versuchsdauern durchgeführt werden. Generell zeigt sich aber auch bei der Verschleißauswertung, dass geringere Additivfüllanteile besser für den Sensoreinsatz geeignet sind und die Einsatzdauer der Gleitschiene unter Umständen gegebenenfalls sogar erhöhen könnten.

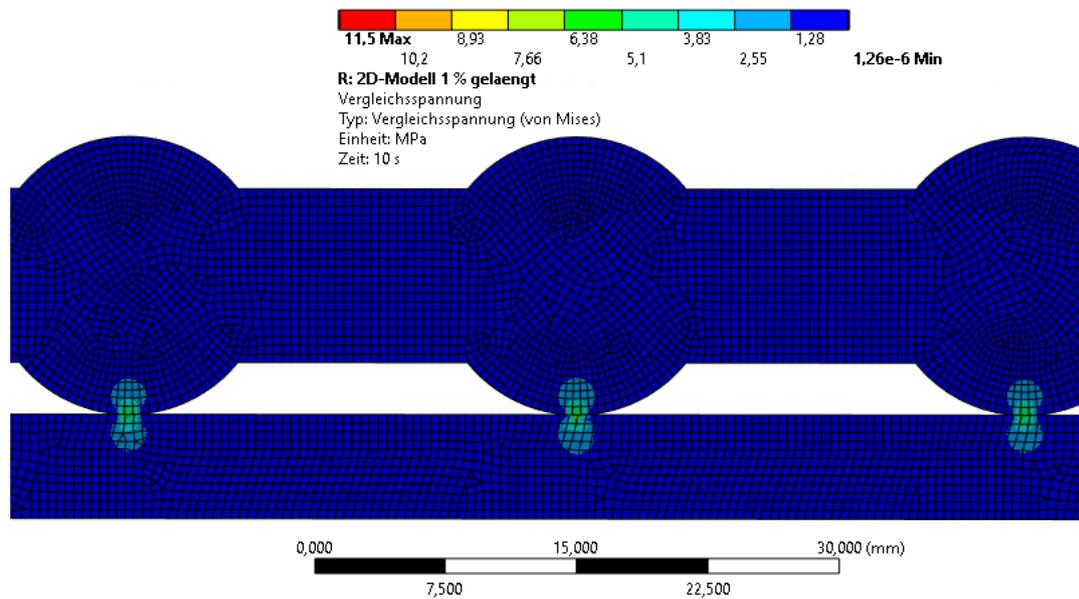
#### 4. Numerische Simulation

Um ein besseres Verständnis über die elektrischen Eigenschaften bei einer Bewegung der Kette über die Schiene zu bekommen, wurden umfangreiche numerische Untersuchungen durchgeführt. Dazu wurde ein vereinfachtes Simulationsmodell aus einer Rollenkette und einer Gleitschiene mit integrierter Verschleißsensorik aufgebaut. Um Rechenzeit zu sparen, wurde aus einem 3D-Modell ein 2D-Modell abstrahiert (Abbildung 10). Dabei wurde eine 16B-1 Kette stark vereinfacht. Hauptaugenmerk lag dabei auf einer möglichst korrekten Abbildung der elektrischen Zusammenhänge.



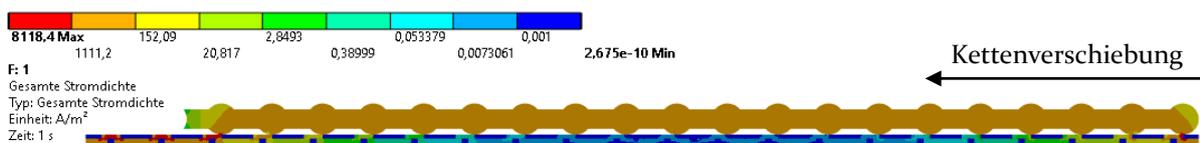
**Abbildung 10:** Überführung des 3D-Modells (links) in ein 2D-Modell mit Sensorbahn (rechts, Ausschnitt)

Zunächst wurde mithilfe einer quasistatisch-mechanischen Berechnung die Verschiebung der Kette auf der Gleitschiene simuliert. Dazu wurde eine Kraft von 800 N normal auf die obere Kante der Kette aufgebracht und zusätzlich die Kette mittels einer vorgegebenen Verschiebung von einmal der Kettenteilung über die Gleitschiene bewegt. Die Verschiebung entspricht dabei genau der Länge eines Kettenglieds und dem Abstand zwischen zwei leitfähigen Sensoren. Die Gleitschiene wurde auf der Unterseite fixiert.



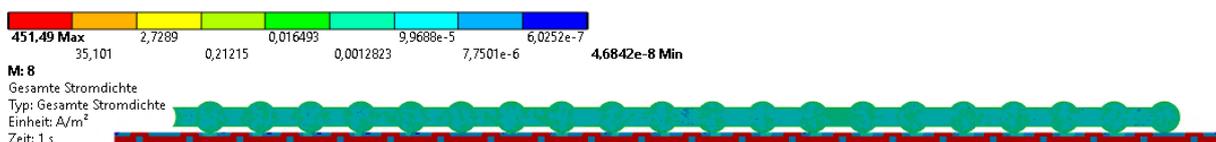
**Abbildung II:** Ausbildung der Hertz'schen Pressung zwischen Kettenglied und Gleitschiene

Anschließend wurde das 2D-Modell mittels einer elektrischen Simulation untersucht, um herauszufinden, wie sich der Widerstand über das Gesamtsystem bei verschiedenen Kettenpositionen ändert. Dazu wurde eine Spannung von 5 V am Eingang und 0 V am Ausgang der Sensorbahn angelegt. Durch den Potentialunterschied fließt ein Strom je nach aktueller Position der Rollenkette durch Teile der Sensorbahn und Kette. Wird das Simulationsmodell an verschiedenen Positionen der Kette hinsichtlich der Stromdichteverteilung ausgewertet, zeigt sich, dass der Großteil des Stromflusses im unverschobenen Zustand über die Kette erfolgt (siehe Abbildung 12). Dies liegt daran, dass die elektrische Leitfähigkeit der metallischen Rollenkette um ein Vielfaches (Faktor  $10^6$ ) höher ist als die des leitfähigen Kunststoffes.



**Abbildung 12:** Stromdichteverteilung im Ausgangszustand

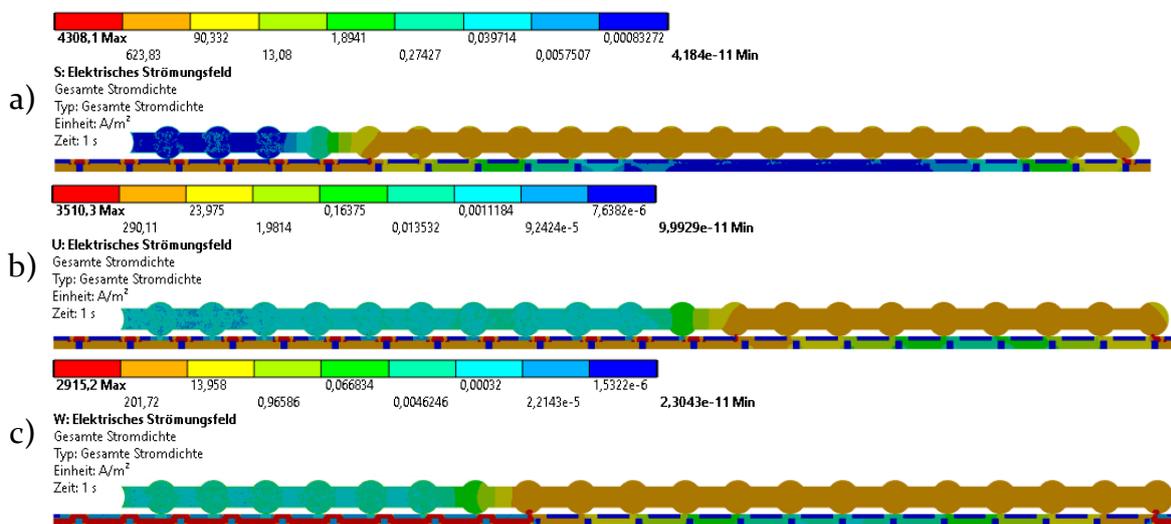
Bewegt sich die Rollenkette über die Gleitschiene weiter, so kommt es im zeitlichen Verlauf zu einer Positionierung der Kette, bei der sie ausschließlich in Kontakt mit nichtleitenden Elementen steht. Dadurch steigt der Widerstand des Gesamtsystems stark an, bzw. die Stromdichte nimmt ab und wird vorwiegend durch die elektrische Leitfähigkeit des leitenden Kunststoffes bestimmt, vgl. Abbildung 13. Die hellgrüne Färbung der Rollenkette zeigt, dass hier der Stromfluss nahezu bei 0 liegt.



**Abbildung 13:** Stromdichteverteilung bei einer Verschiebung der Kette um 19,76 mm

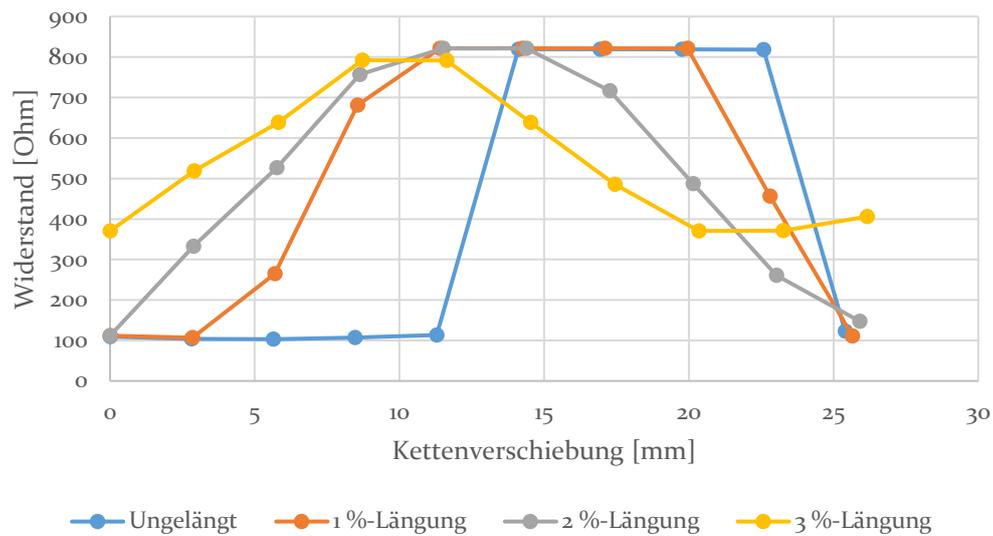
Bei Auswertung der Simulationsergebnisse zu unterschiedlichen Kettenpositionen zeigt sich, dass nur die beiden oben dargestellten Zustände existieren. Der Strom fließt also entweder primär über die Kette oder über die Sensorbahn. Dies liegt an der genau abgestimmten Sensorbahngeometrie, bei welcher der Abstand zwischen zwei Sensoroberflächen gleich dem Abstand der Kettenglieder ist.

Im Betrieb treten während der Lebensdauer der Rollenkette Verschleißerscheinungen auf, die sich u. a. durch ein Längen der Kettenglieder bemerkbar machen. Dies führt dazu, dass der Abstand zwischen zwei Kettengliedern nicht mehr genau dem Abstand zweier Sensoroberflächen entspricht. Dadurch kommt es an unterschiedlichen Positionen zum Kontakt zwischen Kettenglied und Sensorbahn. Beispielhaft ist dies in Abbildung 14 für unterschiedliche Kettenlängen von 1-3 % dargestellt.



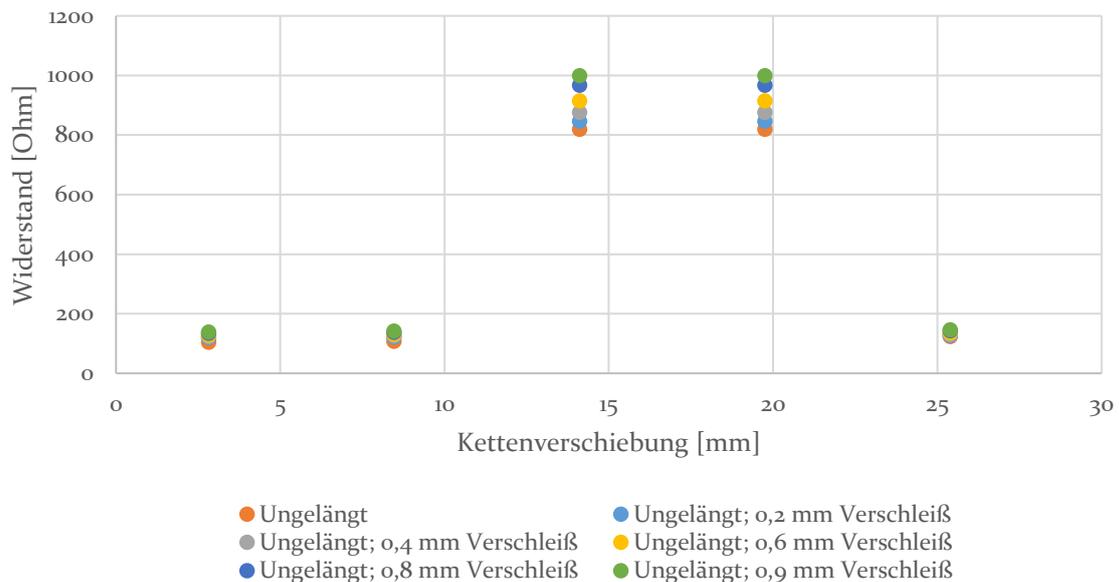
**Abbildung 14:** Stromdichteverteilung bei a) 1 % Kettenlänge und 5,6 mm Kettenverschiebung; b) 2 % Kettenlänge und 5,7 mm Kettenverschiebung; c) 3 % Kettenlänge und 0 mm Kettenverschiebung

Mittels einer Stromreaktion wurden für verschiedene Kettenlängen und Kettenverschiebungen die Stromflüsse ermittelt und anschließend in Widerstände umgerechnet. Die Ergebnisse in Abbildung 15 zeigen, dass je mehr die Kette mit dem leitfähigen Kunststoff der Sensorbahn in Kontakt steht, es zu einem höheren Stromfluss und damit zu einem niedrigeren Widerstand kommt. Entscheidend ist dabei vor allem, dass das erste und letzte Kettenglied mit der Sensorbahn in Kontakt steht. Weiterhin ist erkennbar, dass sich mit zunehmender Kettenlänge ein immer größerer Zwischenbereich ausbildet, bei dem der Strom zum Teil über die Sensorbahn und zum Teil über die Rollenkette fließt.



**Abbildung 15:** Widerstandsverlauf bei einer Bewegung der Rollenkette über die Gleitschiene für verschiedene Kettenlängen

Daran anschließend wurde untersucht, wie sich der Widerstand bei unterschiedlichen Verschleißzuständen der Gleitschiene ändert. Dafür wurde die Gleitschiene bis zur maximalen Verschleißgrenze von 0,9 mm in 0,2 mm Schritten abgetragen und anschließend wurde erneut der Widerstand ausgewertet, siehe Abbildung 16. Es zeigt sich, dass der Widerstand bei allen Kettenpositionen zunimmt. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass der Querschnitt der Sensorbahn abnimmt und dementsprechend zwangsläufig der Widerstand gemäß Gleichung (1) zunehmen muss. Weiterhin wird ersichtlich, dass dieser Effekt einen deutlich höheren Einfluss auf größere Widerstandswerte hat. Ursächlich dafür ist, dass bei diesen hohen Werten der komplette Strom über die Sensorbahn der Gleitschiene fließt und daher der Querschnitt über die komplette Länge verringert ist. Bei niedrigen Widerstandswerten fließt der Großteil des Stroms hingegen über die Rollenkette und der Einfluss der Querschnittsänderung durch den Verschleiß ist dementsprechend gering.



**Abbildung 16:** Einfluss des Verschleißes der Gleitschiene auf den Widerstand des Gesamtsystems

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Integration von Verschleißsensoren in Führungsschienen von Tragkettenförderern zeigt großes Potenzial zur Optimierung der Wartung und Überwachung industrieller Fördersysteme. Diese Forschungsarbeit demonstriert, dass multifunktionale, leitfähige Kunststoffe zur kontinuierlichen Überwachung des Verschleißes der Führungsschienen und des Zustands der Förderkette eingesetzt werden können.

Ein zentraler Vorteil ist die Reduzierung manueller Inspektionen und damit verbundenen Wartungskosten sowie die Minimierung ungeplanter Ausfallzeiten. Die Verwendung von Carbon Black in einem PE-UHMW-Matrixmaterial zeigte sich als geeignet, um die notwendigen tribologischen und elektrischen Eigenschaften zu erreichen. Die Optimierung des Füllgrades ermöglichte eine ausreichende Leitfähigkeit ohne signifikanten Verlust der Verschleißbeständigkeit.

Das entwickelte Sensordesign verhinderte permanente Kurzschlüsse und ermöglichte eine hinreichend genaue Verschleißmessung. Numerische Simulationen und experimentelle Untersuchungen bestätigten die Zuverlässigkeit und Effektivität des Systems unter verschiedenen Betriebsbedingungen. Das gewählte Sensordesign ermöglicht die Kompensation der Einflüsse von Verschleißlängenänderungen der Kette bis zur maximalen Verschleißgrenze. Die thermische Längenänderung der Führungsschiene muss durch Messung der Schientemperatur herausgerechnet werden.

Für die industrielle Umsetzung sind jedoch weitere Forschungen nötig. Zunächst muss eine effiziente Fertigungstechnologie entwickelt werden. Diese soll in einem mehrstufigen Prozess erfolgen, wo zunächst die Sensorbahn sowie der untere Teil der Schiene erstellt und diese anschließend miteinander verpresst und mit einer erneuten Schicht des Matrixmaterials überzogen werden, sodass nach einem finalen Fräsprozess die fertige Gleitschiene entsteht. Weiterhin müssen Langzeitstudien in realen Umgebungen durchgeführt werden, um die Zuverlässigkeit und Stabilität der Sensoren zu testen. Die Erforschung neuer leitfähiger Additive und Hybridmaterialien könnte die Leistungsfähigkeit weiter steigern. Flexible Designs und modulare Lösungen würden eine breitere Anwendung und einfache Integration in verschiedene Fördersysteme ermöglichen.

Die Entwicklung dieser Sensorik stellt einen innovativen Schritt in Richtung Industrie 4.0 und Predictive Maintenance dar. Sie bietet eine vielversprechende Lösung zur Verbesserung der Effizienz und Zuverlässigkeit von Tragkettenförderern und könnte die Instandhaltungsstrategien in vielen Industriebereichen nachhaltig verändern. Durch kontinuierliche Forschung und Optimierung können diese Technologien zur Marktreife gebracht und zur nächsten Generation intelligenter Fördersysteme weiterentwickelt werden.

## Quellen

- [1] Wright W.M., Woodham G.W.: Conductive Plastics. In: Conductive Polymers and Plastics (Margolis J.M.), pp. 125-127 (Springer, Boston, MA, 1989)
- [2] Lebedev O. V., Ozerin A. N., Kechek'yan A. S., Shevchenko V. G., Kurkin T. S., Golubev E. K., Karpushkin E. A., Sergeyev V. G.: A Study of Oriented Conductive Composites with Segregated Network Structure Obtained via Solid-State Processing of UHMWPE Reactor Powder and Carbon Nanofillers. *Polymer Composites*, Bd. 40, pp. 146-155 (2017)
- [3] Zhang C., Ma C.-A., Wang P., Sumita M.: Temperature dependence of electrical resistivity for carbon black filled ultra-high molecular weight polyethylene composites prepared by hot compaction. *Carbon*, Bd. 43 (Nr. 12), pp. 2544-2553 (2005)
- [4] Yacubowicz J., Narkis M.: Electrical and Dielectrical Properties of Segregated Carbon Black-Polyethylene Systems. *Polymer Engineering and Science*, Bd. 30 (Nr. 8), pp. 459-468 (1990)
- [5] Cui C.-h., Yan D.-x., Pang H., Jia L.-c., Bao Y., Jiang X., Li Z.-m.: Towards Efficient Electromagnetic Interference Shielding Performance for Polyethylene Composites by Structuring Segregated Carbon Black/Graphite Networks. *Chinese Journal of Polymer Science*, Bd. 34 (Nr. 12), pp. 1490-1499 (2016)
- [6] Bhattacharya S. K., Chaklader A. C. D.: Review on Metal-Filled Plastics. PartI. Electrical Conductivity. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Bd. 19 (Nr. 1), pp. 21-51 (1982)
- [7] Al-Saleh M. H., Jawad S. A., Ghanem H. M.: Electrical and dielectrical behaviors of dry-mixed CNT/UHMWPE nanocomposites. *High Performance Polymers*, Bd. 26 (Nr. 2), pp. 205-211 (2014)
- [8] Mao Z., Zhou Z., Zhang J., Wang T.: Comparison between randomly distributed structure and 3D segregated structure in chlorinated polyethylene/MWCNT composites: electrical conductivity, mechanical property, flame resistance and rheological property. *Composites Science and Technology*, Bd. 221 (2022)
- [9] Celanese Corporation: GUR® 4120 (Technisches Datenblatt). 01.09.2023, URL: [https://materials.celanese.com/products/datasheet/SI/GUR%C2%AE%204120#properties\\_9](https://materials.celanese.com/products/datasheet/SI/GUR%C2%AE%204120#properties_9), Zugriff 29.05.2024
- [10] Spahr M. E., Rothern R.: Carbon Black as Polymer Filler. In: *Polymers and Polymeric Composites: A Reference Series* (Palsule S.), pp. 12-17 (Springer, Berlin, Heidelberg, 2016).
- [11] Kirchberg S.: Einfluss von Füllgrad und Geometrie weichmagnetischer Partikel auf die Verarbeitungs- und Materialeigenschaften ausgewählter Thermoplaste [Dissertation], (Papierflieger-Verlag, Clausthal, Deutschland, 2009).
- [12] DIN e. V.: DIN EN ISO 3915:2022 (D), Kunststoffe - Messung des spezifischen elektrischen Widerstands von leitfähigen Kunststoffen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2022
- [13] DIN e. V.: DIN ISO 7148-2:2014-07, Gleitlager - Prüfung des tribologischen Verhaltens von Gleitlagerwerkstoffen - Teil 2: Prüfung von polymeren Gleitlagerwerkstoffen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014
- [14] Czichos H.: Verschleiß. In: *Tribologie-Handbuch - Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik* (Czichos H., Habig K.-H.), pp. 158-160 (Springer Vieweg, Wiesbaden, Deutschland, 2020)

- 
- [15] Kauffmann A., Emmerich R., Pinkwart K.: Elektrisch leitfähige Polymere. In: Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen (P. Elsner, P. Eyerer und T. Hirth), pp. 1334-1345 (Springer Verlag, Heidelberg, Deutschland, 2012)
- [16] Mierczynska A., Mayne-L'Hermite M., Boiteux G. and Jeszka J.K.: Electrical and mechanical properties of carbon nanotube/ultrahigh-molecular-weight polyethylene composites prepared by a filler prelocalization method. *J. Appl. Polym. Sci.*, Bd. 105 (Nr. 1), pp. 158-168 (2007)