

Sensoren zur Zustandsüberwachung von intralogistischen Anlagen

Reiner ZIELKE, Wolfgang TILLMANN, Hans-Georg RADEMACHER,
Norman SIEVERS

Lehrstuhl für Werkstofftechnologie
Technische Universität Dortmund
Leonhard-Euler-Str. 2
44227 Dortmund

Kurzfassung. Eine effektive Instandhaltungsstrategie stellt die zustandsbezogene Instandhaltung dar. Diese leitet Maßnahmen nicht nach festgelegten Inspektionsintervallen sondern in Abhängigkeit der Belastung ein. Grundlage hierzu ist die Kenntnis über den aktuellen Zustand der Anlage. Dieser wird mit entsprechender Sensorik ermittelt. Dabei kann, wie bei der Überwachung von Elektromotoren, auf Standardsensoren zurückgegriffen werden. Bei anderen Komponenten, die relevant für den Betrieb der Anlage sind, müssen jedoch neue Sensoren ausgewählt und ertüchtigt werden. Hierfür ist ein Bauteilprüfstand notwendig, der die im realen Betrieb ermittelten Belastungen in der Weise auf das Bauteil überträgt, so dass ein zeitgerafftes Nachfahren ermöglicht wird. Hierdurch erfährt das Bauteil in wesentlich kürzerer Zeit die gleiche Schädigung, wie im realen Betrieb nach einigen Jahren. Im Beitrag wird am Beispiel von Komponenten aus intralogistischen Anlagen diese Vorgehensweise demonstriert. So wird ausgehend von Nutzungs- und Belastungsprofilen ein Belastungsprogramm erstellt, welches ein zeitgerafftes Nachfahren ermöglicht. Parallel zu den Belastungsversuchen werden verschiedene Sensoren eingesetzt, um den Belastungszustand der Bauteilkomponenten aufzunehmen. Dabei werden auf Systeme zurückgegriffen, welche sich bereits zur zerstörungsfreien Prüfung bewährt haben. An Hand der Ergebnisse erfolgt dann eine Korrelation der Sensorsignale mit dem Bauteilzustand und eine Auswahl geeigneter Sensorik zur angestrebten Zustandsüberwachung.

1. Einführung

Schwerpunkt der Arbeiten ist die zustandsbezogene Instandhaltung intralogistischer Anlagen, wie sie beispielsweise in Flughäfen für den Gepäcktransport eingesetzt werden. Durch Einflüsse wie Schwingungen, Temperaturwechsel und Staub werden relevante Anlagenmodule, die eine stetige Förderung der Transportgüter realisieren, belastet. Diese Belastungen wurden in folgender Weise zeitgerafft nachgefahren: Die Basis bilden das Nutzungsprofil der Anlage sowie die Belastungsprofile der Anlagenkomponenten. Das Nutzungsprofil gibt die Häufigkeit des Auftretens von Beanspruchungen durch Transportgüter an. Das Belastungsprofil hingegen zeigt den Beanspruchungs-Zeit-Verlauf einer Anlagenkomponente und wird mit entsprechenden Sensoren, zum Beispiel Kraftsensoren, aufgenommen. Zusammen mit dem Nutzungsprofil geben sie die Gesamtbeanspruchung, die auf die Anlagenkomponente wirkt, wieder. Diese Gesamtbeanspruchung kann nun mit Hilfe eines Prüfstandes, der das Bauteil gemäß den Vorgaben belastet, nachgefahren werden. So würde jedoch keine zeitgeraffte Belastung realisiert werden, da die Realität eins zu eins auf dem Prüfstand abgebildet würde. Um in kürzerer Zeit eine Aussage über die Lebensdauer zu

erhalten, wurden Modelle eingesetzt, welche eine Komprimierung der aus Nutzungs- und Belastungsprofilen bestehenden Gesamtbeanspruchung ermöglichen. Hierzu wurde ein Klassierverfahren eingesetzt, mit dem Belastungskollektive erstellt wurden, die dann mit Hilfe eines Prüfprogramms auf dem Prüfstand nachgefahren wurden. Für die Funktionsüberwachung des Bauteils und um den Zeitpunkt des Bauteilversagens zu bestimmen, wurden Sensoren eingesetzt, die geeignet sind, den Schädigungszustand zu detektieren. Diese bilden dann die Grundlage für die angestrebte Zustandsüberwachung. Weiterhin wurden an Hand der in Versuchsreihen ermittelten Lebensdauern in Abhängigkeit von den Belastungskollektiven Bauteil-Wöhlerkurven ermittelt, die dann die Grundlage zur Lebensdauerabschätzung der Anlagenkomponente bildeten.

2. Das Prüfobjekt

Die nachfolgenden Arbeiten wurden an Tragrollen aus intralogistischen Anlagen, welche in der Abbildung 1 dargestellt sind, durchgeführt.



Abbildung 1: Tragrollenkomponenten; einzeln und im zusammengebauten Zustand für die Verwendung in einem Bauteilprüfstand

Die Tragrolle besteht aus mehreren Komponenten. Der Tragmantel ist ein verzinktes Stahlrohr. Die Kugellager sind in Kunststoffbuchsen gepresst und über Kunststoffkappen isoliert, wodurch das Lager vor äußeren Belastungen wie Staub geschützt ist. Die Rollenachse besteht aus einem 5 mm dicken Stahlstab, der durch die beiden Lager geführt ist und eine Befestigung der Tragrolle in der intralogistischen Anlage ermöglicht. Um nach der Belastung die Lager und Kunststoffteile einer visuellen Analyse unterziehen zu können, wurde auf der Rollenachse ein Stahlzylinder befestigt. Dieser ermöglicht eine zerstörungsfreie Demontage der Tragrolle, indem so die Lager aus dem Tragmantel gepresst werden können.

3. Ermittlung der Belastungskollektive

Die Belastungsprofile, die von den Transportgütern bei der Überfahrt über eine Messrolle hervorgerufen werden, wurden mit Hilfe des Rainflowverfahrens klassiert. Das obere Foto in Abbildung 2 zeigt den Messaufbau zur Bestimmung der Belastungsprofile. Ein exemplarisches Belastungsprofil sowie das Ergebnis der Rainflowklassierung zeigt der untere Teil der Abbildung 2. Das zweiparametrische Rainflowverfahren ermöglicht die Beschreibung der komplexen Belastung mit Hilfe einer statischen Grundlast und einer variierenden Schwin-

gungsbelastung. Somit ist für diese Anwendung eine realitätsnähere Abbildung als mit den einparametrischen Spitzenwert- oder Klassendurchgangsverfahren möglich.

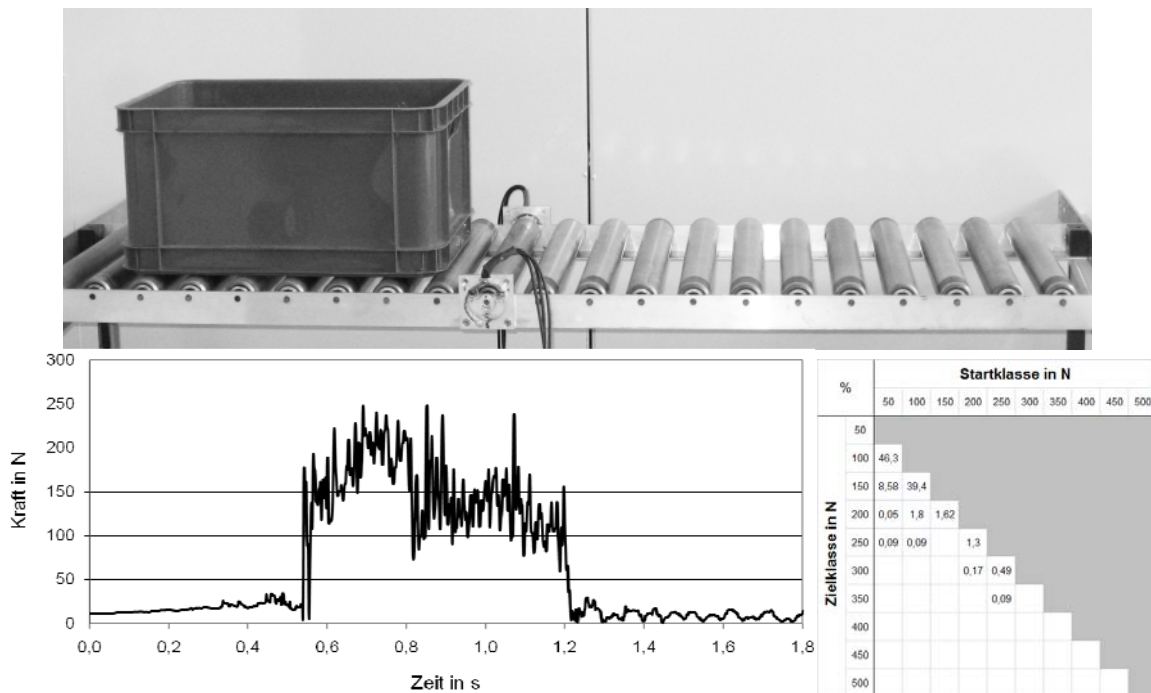


Abbildung 2: Messaufbau zur Ermittlung der Belastungsprofile, Belastungsprofil für einen 25 kg schweren Koffer und ermittelte Rainflowmatrix

Bei dieser Klassierung erhält man, unter Berücksichtigung des Nutzungsprofils, die so genannte Rainflowmatrix (Abbildung 2, unten rechts). Diese repräsentiert eine Belastung, die von einem durchschnittlichen, dem Nutzungsprofil entsprechenden Transportgut hervorgerufen wird. Mit der Kenntnis, der bis zum Versagen benötigten Lastwechselzahlen für jede aus der Matrix resultierende Belastung, kann unter Anwendung der Palmgren-Miner Regel, die Lebensdauer der Tragrolle abgeschätzt werden. Zur Ermittlung der zu erwartenden Prüfzeiten wurde zunächst eine zyklische Beanspruchung mit dem Maximalwert der Matrix durchgeführt. Da sich dabei herausstellte, dass das Versagen der Tragrollen im Bauteilprüfstand erst nach ca. zwei Monaten eintrat (kleinere Lasten hätten entsprechend noch längere Prüfzeiten erfordert), wurde die Last um den Faktor 10 erhöht.

4. Der Rollenprüfstand

Die Beanspruchung der Tragrollen gemäß den zuvor ermittelten Belastungskollektiven erfolgte mit dem in der Abbildung 3 schematisch dargestellten Rollenprüfstand. Die zu prüfende Tragrolle wird mit Hilfe des Antriebsrads auf eine durch das Belastungsprofil vorgegebene Geschwindigkeit beschleunigt. Das Antriebsrad ist über ein Getriebe mit dem Motor gekoppelt und in einem Rahmen befestigt, der vertikal durch Linearführungen verschiebbar ist. Durch diese Konstruktion unterliegt die Tragrolle einer konstanten, durch die Gewichtskraft von Rahmen, Motor, Getriebe und Antriebsrad ausgeübten Anpresskraft. Die Konstanz der Anpresskraft ist auch bei einem unrundern Tragrollenmantel gewährleistet, so wie dies auch im normalen Betrieb mit einem Antriebsriemen der Fall wäre. Die Belastung durch das Fördergut wird von unten über die Lastrolle eingeleitet, welche über eine Kraftmessdose mit dem servohydraulischen Zylinder verbunden ist. Auf diese Weise können nahezu beliebige Lastzustände eingestellt und das mit Hilfe der Klassierung gewonnene Prüfprogramm abgearbeitet werden. Da die Prüfung einer Tragrolle trotz Zeitraffung meh-

rere Tage beansprucht, würde eine kontinuierliche Datenaufzeichnung und Überwachung zu einem erheblichen Datenaufkommen führen. Daher wurde der Prüfablauf so festgelegt, dass der Zustand der Rolle nur diskontinuierlich erfasst wird. In der Abbildung 3 sind die zur Überwachung eingesetzten Sensorsysteme abgebildet, welche mit Hilfe eines Prüfprogramms angesteuert und ausgelesen werden.

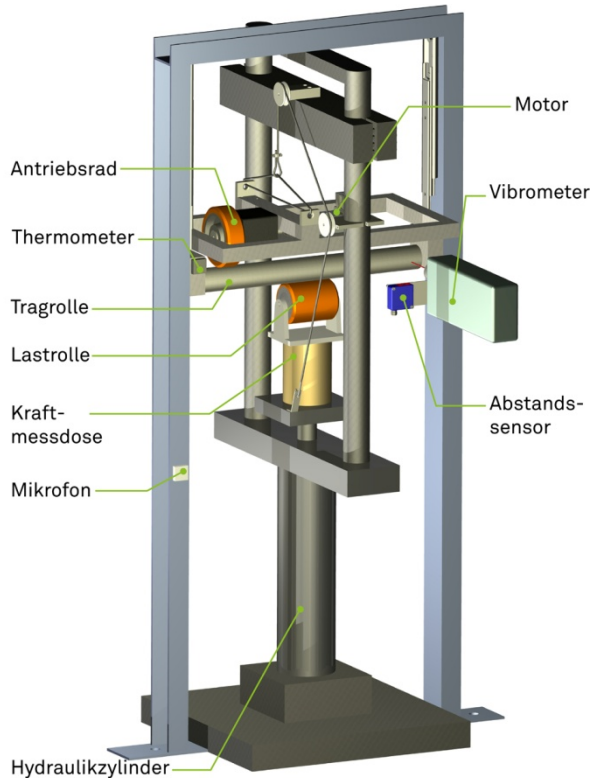


Abbildung 3: Aufbau des Rollenprüfstandes

Das Prüfprogramm setzt sich aus Zyklen zusammen, die jeweils aus einer Belastungs- und zwei Messphasen bestehen (siehe Abbildung 4).

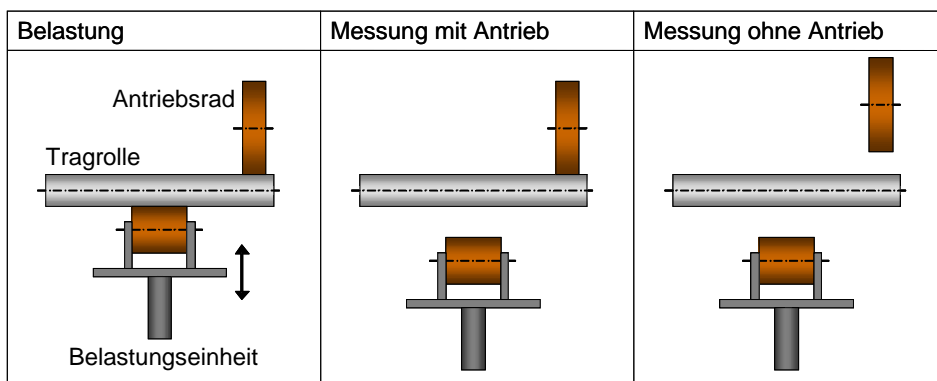


Abbildung 4: Die 3 Phasen eines Beanspruchungszyklusses

In der ersten Phase bringt der hydraulisch gesteuerte Zylinder die Prüfkraft auf die Rolle auf und führt die Belastung durch. Im kraftgeregelten Modus werden pro Zyklus 10.000 Schwingspiele durchgeführt. Die Eingabeparameter für ein Schwingspiel sind die Amplitude, die auf die Tragrolle aufgebrachte mittlere Last und die Belastungsfrequenz, welche aus den Belastungskollektiven entnommen werden. Ebenso wurde die Umfangsgeschwindigkeit der Tragrolle dem Belastungsprofil entsprechend auf 1 m/s gesetzt. In der zweiten Phase wird der Zustand der weiterhin angetriebenen, aber unbelasteten Rolle ge-

messen. Das Mikrofon und das Vibrometer nehmen die Schallsignale der sich bewegenden Rolle auf. Der Abstandssensor misst die Unwucht und die PT100-Fühler die Temperatur. Anschließend fährt das Antriebsrad von der Rolle weg und bleibt stehen, um das Ausrollverhalten der Rolle mit Hilfe des Abstandssensors und des Vibrometers zu überprüfen. Nachdem der Stillstand der Rolle detektiert ist, wird eine Klangprobe aktiviert und die Eigenfrequenz der Rolle gemessen. Diese Messgrößen werden auch zur Zustandsüberwachung der Tragrolle herangezogen. Überschreitet ein Parameter während der Messung einen festgelegten Wert, so wird das Belastungsprogramm automatisch gestoppt. Als relevantes Abbruchkriterium hat sich die Temperatur der Rollenlager herausgestellt. Überschreiten diese eine Temperatur von etwa 90 °C, verlieren die Kunststoffbuchsen ihre Festigkeit und verformen sich plastisch. Der Zugriff auf die Steuerung des Bauteilprüfstands und die Messdatendarstellung ist über das Internet möglich. Somit kann der Fortschritt der Bauteilprüfung leicht verfolgt werden. In der Abbildung 5 ist ein Screenshot der erstellten Internetseite abgebildet. In der oberen Zeile sind Informationen wie Startzeit und Laufzeit aufgelistet. Eine Webkamera zeigt ein Livebild des Bauteilprüfstandes. Hier sind die Tragrolle sowie der Hydraulikzylinder deutlich zu erkennen. Weiterhin sind die Messdaten zum Rollwiderstand, zur Temperaturentwicklung sowie zur Eigenfrequenz graphisch dargestellt.

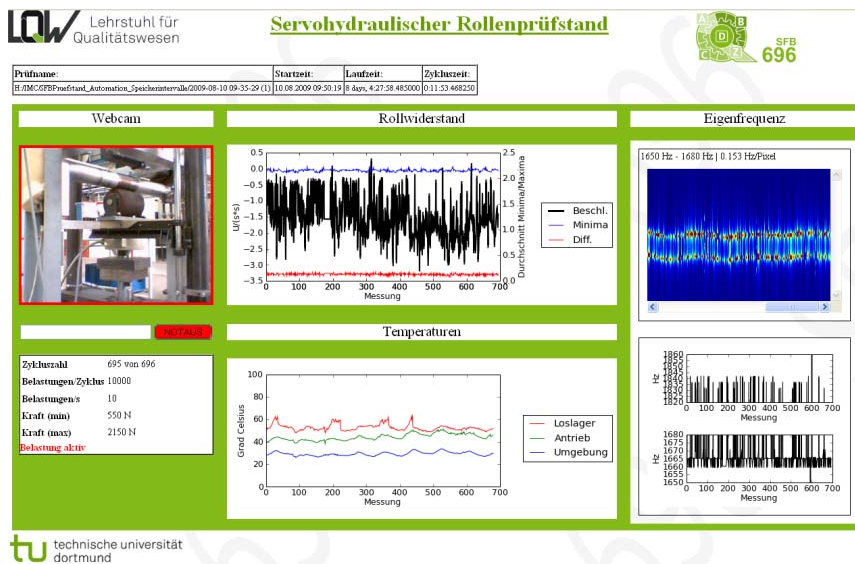


Abbildung 5: Zustandsüberwachung über Internetseite

5. Messergebnisse

Mit den oben beschriebenen Sensorsystemen wurden die Tragrollen bis zu ihrem Versagen überwacht. Dabei zeigten sich unterschiedliche Korrelationen des Messsignals zum Bauteilzustand. Durch die während der Belastung steigende Reibung innerhalb des Lagers stieg der Rollwiderstand an, was sich in einer Verkürzung der mittels Vibrometer und Abstandssensor in Messphase 2 gemessenen Ausrollzeit äußerte (siehe Bild 6 links). Die im Stillstand der Rolle durchgeführte Klangprobe zeigte eine Verschiebung der Eigenfrequenz mit zunehmender Beanspruchungsdauer. Wie der in der Abbildung 6 dargestellte Verlauf der Lagertemperatur in den letzten 420 Zyklen vor dem Versagen einer Tragrolle zeigt, steigt die Lagertemperatur kurz vor dem Bauteilversagen stark an (ca. 80°C). Parallel dazu nimmt die Schallemissionsaktivität zu. Dies äußert sich sowohl in der für den Frequenzbereich von 1 kHz bis 3 kHz ermittelten Leistungsdichte als auch in einer Änderung des Frequenzspektrums (insbesondere im Bereich von 3 kHz).

Nach Abschluss des Belastungsversuches wurden die Lager visuell auf Schädigungen untersucht. Dabei ergab sich folgender Schädigungsmechanismus. Durch die mechanische Belastung lösen sich Teile der Kunststoffbuchse, die in das Kugellager gelangen. Dort erfolgt durch die zunehmende Reibung eine Erwärmung, welche zu einer weiteren Schädigung führt. Diese führt dann zum Bauteilversagen.

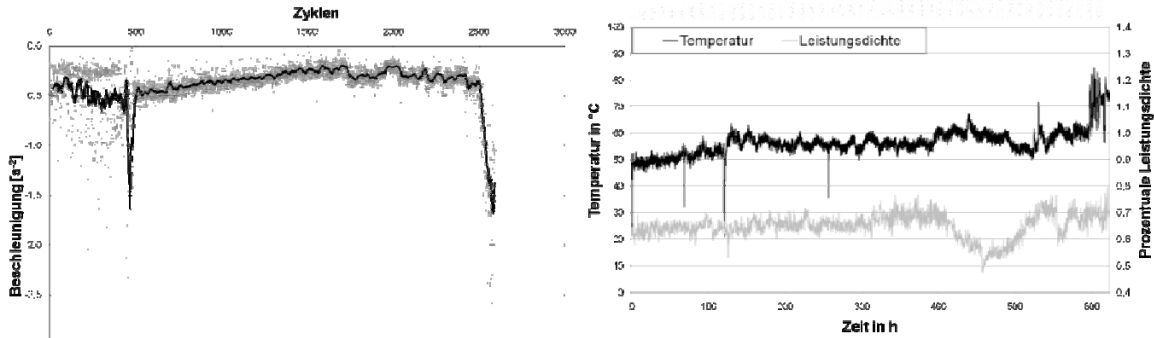


Abbildung 6: links: Rollwiderstand; rechts: Leistungsdichte und Frequenzspektrum der von der Tragrolle emittierten Schallsignale und Temperaturentwicklung

Die einzelnen Komponenten des verschleißenden Lagers sind in Abbildung 7 zu sehen. Zusätzlich sind rechts in der Abbildung Lichtmikroskopaufnahmen der Lauffläche des Kugellagers dargestellt. Dabei handelt es sich bei der oberen Aufnahme um eine neue Lauffläche und unten um die Lauffläche eines geschädigten Lagers. Im Fall der belasteten Lauffläche sind Materialausbrüche zu erkennen.



Abbildung 7: Visuelle Prüfung des belasteten Lagers

Neben der Ertüchtigung von Sensoren zur zustandsbezogenen Instandhaltung wurde an Hand der durchgeführten Belastungsversuche auch die Lebensdauer der Bauteile ermittelt. Die erreichten Lastwechselzahlen wurden in ein logarithmisches Wöhlerdiagramm der Tragrollen eingetragen (Abbildung 8). Da die Belastung wesentlich über den in der Rainflowmatrix ermittelten Lasten liegt und noch kein Dauerfestigkeitsbereich festgestellt wurde, wurden die existierenden Daten nach der elementaren Miner-Regel extrapoliert. Zur Abschätzung der Lebensdauer wurden aus dem Belastungsprofil die Anzahl der Koffer bis zum Schnittpunkt mit der extrapolierten Geraden ermittelt. Somit sind ungefähr 10^8 Transportgutüberfahrten bis zum Versagen möglich. Bei der ermittelten Nutzung einer Förderanlage des Flughafens Düsseldorf (8000 Koffer pro Tag) entspräche dies einer Lebensdauer von etwa 33 Jahren. Es stellte sich heraus, dass die Lebensdauer nicht nur von der Höhe der gewählten zyklischen Beanspruchung sondern auch von der Einbauweise der Lager in die Kunststoffbuchsen abhängt. Bei einer Lastamplitude von 2400 N führte zum Beispiel der Übergang vom optimalen zum stark verspannten Einbauzustand zu einer Verringerung der Lebensdauer um knapp 10^6 Lastwechsel.

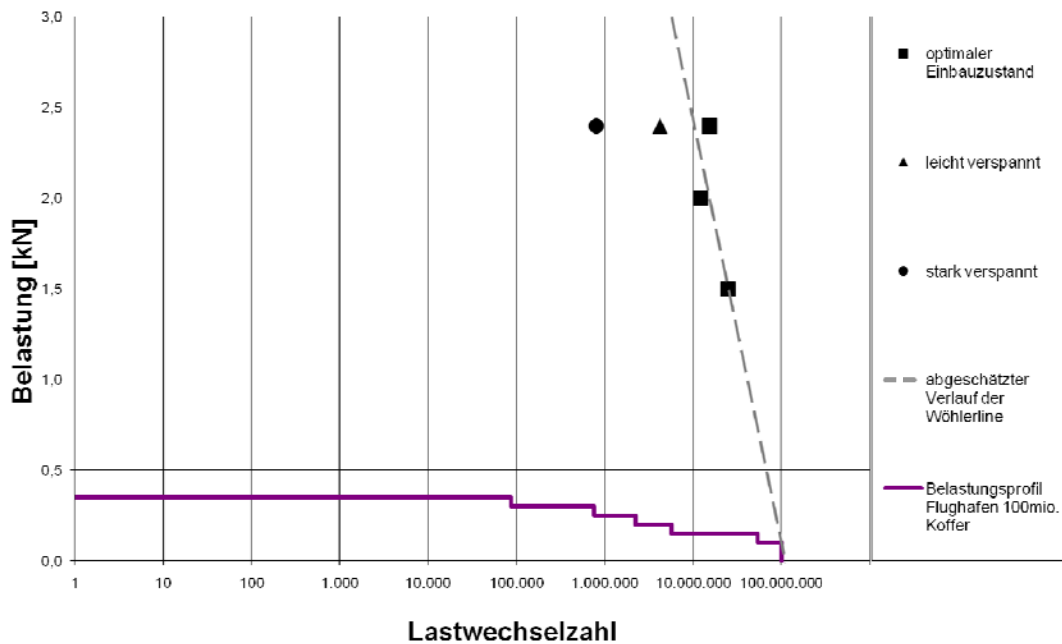


Abbildung 8: Wöhlerdiagramm der untersuchten Tragrollen

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die auf das Bauteil wirkende mechanische Belastung wurde mit Hilfe von Belastungsprofilen, zusammen mit dem Nutzungsprofil der intralogistischen Anlage, ermittelt. Zum zeitge-
 rafften Nachfahren der Belastung wurde das Rainflowverfahren zusammen mit der Palmgren-Miner-Regel gewählt, welche eine Bestimmung von Wöhlerkurven ermöglicht. Für die praktische Umsetzung wurde ein Rollenprüfstand erstellt. Der Prüfablauf, welcher aus der mechanischen Belastung, dem Einsatz von Sensorik und den darauf basierenden Abbruchkriterien besteht, erfolgt automatisch. Mit diesem System wurden Tragrollen bis zu einer definierten Versagensgrenze belastet. Die mittels integrierter Sensorik aufgezeichneten Daten zeigen, dass anhand der Temperaturentwicklung im Lager, des Rollwiderstands, der Leistungsdichte und des Frequenzspektrums des aus dem Lager emittierten Schalls sowie der in Klangproben ermittelten Eigenfrequenzen eine lebensdauerbedingte Zustandsänderung erkennbar ist. Insbesondere die parallele Zunahme von Lagertemperatur und Schallemissionsleistungsdichte deuten darauf hin, dass eine Korrelation der Signale zum Schädigungszustand des Bauteils vorliegt. Somit ist zu erwarten, dass mit Hilfe dieser Sensorik eine zustandsbezogene Instandhaltung möglich ist.

Die bisherigen Untersuchungen basieren auf ein Belastungsprofil, welches von einer Tragrolle aufgenommen wurde, die sich in einen Teilsegmentes eines geraden Rollenförderers befand und repräsentiert somit die Belastung der meisten Tragrollen. Allerdings kann die Belastung an Beschleunigungs- und Abbremsstrecken, in Kurvelementen oder auch an Einspeisungspunkten wesentlich höher sein. Um diese unterschiedlichen Belastungsprofile zu ermitteln, wurde eine autark arbeitende Messrolle entwickelt, die in der Abbildung 9 dargestellt ist. Die Kräfte werden mit Hilfe von drei Dehngsmessstreifen, die in einen Winkel von 120 Grad zueinander angeordnet sind, gemessen und ermöglichen so neben einer reinen Kraftbestimmung auch die Ermittlung des Angriffswinkels der Kraft auf die Tragrolle. Die Messeinheit wird seitlich an den Tragrollenfördere befestigt. Innerhalb des Tragtantels befinden sich weitere Systeme zur Bestimmung der Rotation und zur Bestimmung des Drehmomentes.

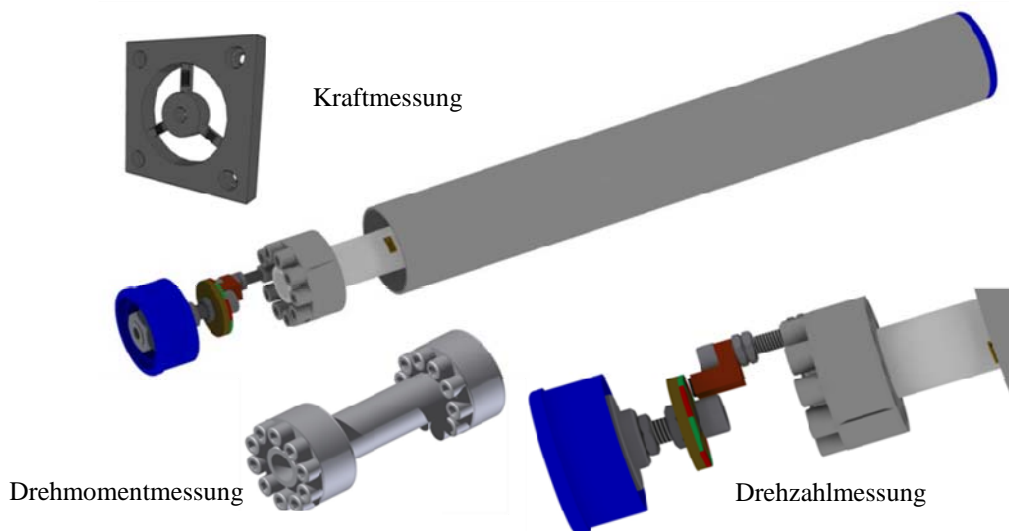


Abbildung 9: Messrolle zur Aufnahme von Belastungsprofilen

Anhand der zusätzlichen Informationen, der Drehzahl- und der Drehmomentmessung, kann nun auch der Wirkungsgrad verschiedener Antriebsriemen und –systeme bewertet werden. So kann das übertragende Drehmoment sowie der auftretende Schlupf direkt bestimmt werden. Mit Hilfe der neuentwickelten Messrolle können die Eingangsgrößen für die Belastungsversuche exakter und für unterschiedliche Einsätze der Tragrollen bestimmt werden.

7. Danksagung

Die in diesem Beitrag durchgeführten Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB 696 gefördert.

Referenzen

- [1] R. Zielke, H.-G. Rademacher: „Modelle zur Bestimmung von Belastungskollektiven von intralogistischen Systemen“, Beitrag im Buch "Das ist gar kein Modell! Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften“ (Hrsg. Gerhard Bandow, Hartmut H. Holzmüller), www.gabler.de, 2009, ISBN 978-3-8349-1842-0
- [2] R. Zielke, H.-G. Rademacher: “Structural health monitoring of intralogistics plants”, NDT in Progress 2009, Vth International Workshop of NDT Experts, PROCEEDINGS, October 12-14, 2009, Prague, Czech Republic, ISBN 978-80-214-3968-9
- [3] R. Zielke, H.-G. Rademacher, G. Fischer: „Automatisierte Prüfung von Komponenten intralogistischer Anlagen zur Abschätzung der Lebensdauer mit Hilfe von Bauteilwöhler-kurven“ Werkstoffprüfung 2009, 3.-4.12.2009 in Bad Neuenahr, ISBN 978-3-514-00769-7, p. 353-358
- [4] H.-G. Rademacher, G. Fischer, R. Zielke, T. Siebrecht: „Ergebnisbericht der Arbeitsgruppe B4: Prüfstandautomation am Beispiel eines Rollenprüfstandes“ Technical Report 0906, ISSN 1867-3473, Sonderforschungsbereich 696, Forderungsgerechte Auslegung von intralogistischen Systemen – Logistics on Demand, Technische Universität Dortmund, Dezember 2009
- [5] H.-G. Rademacher, G. Fischer, R. Zielke, N. Sievers: „Ergebnisbericht der Arbeitsgruppe B4: Belastungsuntersuchungen an Antriebs- und Transportgurten intralogistischer Anlagen“, Technical Report 0907, ISSN 1867-3473, Sonderforschungsbereich 696, Forderungsgerechte Auslegung von intralogistischen Systemen – Logistics on Demand, Technische Universität Dortmund, Dezember 2009