

**Beitrag zur  
Dimensionierung von Fördersystemen  
mit Staurollenketten**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Chemnitz  
genehmigte

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Titels

Doktor-Ingenieur  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Uwe Dombeck  
geb. am 30.06.1981 in Annaberg-Buchholz  
eingereicht am 16. Januar 2013

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel  
Prof. Dr.-Ing. Egon Müller

Chemnitz, den 03. April 2013

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-109852>



## **Bibliografische Beschreibung**

Dombeck, Uwe

### **„Beitrag zur Dimensionierung von Fördersystemen mit Staurollenketten“**

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, Chemnitz, 2013

128 Seiten

76 Bilder

13 Tabellen

44 Literaturangaben

3 Anlagen

#### ***Kurzreferat***

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Beanspruchungen von Staurollenketten. Zunächst wurde in den Grundlagen der Aufbau von unterschiedlichen Staurollenkettenarten dargestellt, die Eigenschaften miteinander verglichen und kategorisiert. Aufbauend auf dem anschließend geschaffenen Verständnis der wirkenden Reibpaarungen bzw. -arten wurden FEM-Analysen durchgeführt, um dadurch auftretende Spannungen zu detektieren und das thermische Verhalten der unterschiedlichen Werkstoffpaarungen zu ermitteln. Innerhalb der praktischen Versuche der Arbeit kam es zur Ermittlung der Bruch- und Dauerfestigkeiten nach ISO15654 [DIN04]. Zur Untersuchung der Eigenschaften der Ketten unter praxisnahen Randbedingungen wurde ein Versuchsstand konzipiert, welcher die Ermittlung von Kennwerten zwei unterschiedlicher Kettengrößen unter härtesten Bedingungen ermöglicht. Durch diesen Versuchsstand wurden die Staukraft, die Kettenzugkraft durch das Drehmoment am Antrieb, die Kettengeschwindigkeit, die Kettenlängung und das Temperaturverhalten dauerhaft überwacht. Im letzten Kapitel der Arbeit wurde eine Überwachungsstation für unterschiedliche Baugrößen von Staurollenketten entwickelt und die Funktionsweise durch Versuche nachgewiesen.

#### ***Schlagworte***

- Staurollenkette
- Fördertechnik
- Transfersystem
- Staukraft
- Zugkraft
- Kettenförderer

***Abstract:***

This dissertation is dealing with the investigation of the load behaviour of accumulation roller chains. Initially, the structures of different types of accumulation roller chains are described, properties are compared and categorised. Based on the created understanding of acting tribological pairing and friction mechanisms, FEM analysis have been performed to evaluate occurring stresses and determine the thermal behaviour of the various material combinations. Within the testing procedures, breaking strength and fatigue strength have been investigated in accordance with DIN ISO 15654 [cf. DIN04]. A test bench has been developed for practically relevant testing of the chains, where determination of characteristic values can be done under hard testing conditions for two different chain types. The test bench ensures measurement and survey of accumulation forces, tensile chain forces (by torque moment at drive), chain speed, chain elongation and chain temperature during whole testing time. The last chapter of the dissertation deals with the development of a 'control and monitoring unit' for accumulation roller chains with various dimensions including proof of function by trials.

***Keywords***

- accumulation roller chain
- conveyor technology
- transfer system
- tensile force
- chain conveyor

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Professur Fördertechnik im Institut für Fördertechnik und Kunststoffe der Technischen Universität Chemnitz.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Klaus Nendel, der mich stets als Doktorvater uneingeschränkt unterstützt hat und mir den nötigen Freiraum für die Verwirklichung meiner Ideen einräumte. Seine Bereitschaft zur Diskussion und die daraus entstandenen Anregungen haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Für seine Betreuung in diesem interessanten und vielseitigen Aufgabenfeld möchte ich ihm meinen herzlichen Dank aussprechen.

Bei Herrn Professor Dr.-Ing. Egon Müller möchte ich mich für die Übernahme des Koreferates und die Bereitschaft zur Diskussion bedanken.

Des Weiteren danke ich den Mitarbeitern des Institutes für Fördertechnik und Kunststoffe, die mir bei zahlreichen wissenschaftlichen Problemen hilfreich zur Seite standen. Hierbei sollen drei Personen namentlich genannt werden, weil sie besonders zur Realisierung dieser Arbeit beigetragen haben. Herrn Dr. Thomas Risch und Herrn Hagen Bankwitz danke ich hiermit für viele gute Ideen und längere Gespräche über den Inhalt der Arbeit. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Karl-Heinz Harnack für die technische Unterstützung beim Aufbau der Versuchseinrichtungen und der Unterstützung beim Optimieren des Versuchsstandes bedanken.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Lebenspartnerin Sabine Georgi für ihre dauerhafte und uneingeschränkte Unterstützung beim Schreiben meiner Arbeit bedanken. Ihre positiven Worte haben mich auch in Zeiten von Schwierigkeiten und Rückschlägen motiviert die Arbeit fertig zu stellen. Ebenfalls möchte ich meiner kleinen Tochter Holly danken, die es wohl eher unbewusst geschafft hat mich dauerhaft bei der Fertigstellung der Arbeit zu unterstützen. Ihr möchte ich diese Arbeit widmen. Danke.

Chemnitz, den 03. April 2013

Uwe Dombeck



# Abkürzungen und Formelzeichen

## Abkürzungen

Kurzzeichen	Erklärung
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
DMS	Dehnmessstreifen
FEM	Finite Elemente Methode
FFT	Fast Fourier-Transformation
FR	Förderrollen
FT	Fourier-Transformation
LR	Laufrollen
M1	Messpunkt1
M2	Messpunkt2
PA	Polyamid
PE-UHMW	Polyethylen ultrahochmolekular
PTFE	Polytetrafluorethylen
WT	Werkstückträger

## Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Erklärung
a	m/s <sup>2</sup>	Beschleunigung
A	mm <sup>2</sup>	Fläche
b	mm	Abstand
b <sub>b</sub>	mm	Lichte Weite (Kette)
b <sub>FR</sub>	mm	Förderrollenbreite
b <sub>Lasche</sub>	mm	Laschenbreite
b <sub>LR</sub>	mm	Laufrollenbreite
d	N	Schrittweite nach ISO15654 [DIN04]
d <sub>a</sub>	mm	Außendurchmesser
d <sub>Bolzen</sub>	mm	Außendurchmesser Bolzen
d <sub>Buchse</sub>	mm	Außendurchmesser Buchse
d <sub>i</sub>	mm	Innendurchmesser
dv	m/s	Änderung der Geschwindigkeit
dy	mm	Wegänderung in y-Richtung
f	Hz	Frequenz
F	N	Kraft
F <sub>B</sub>	N	Gemittelte Dauerfestigkeit nach ISO15654 [DIN04]
F <sub>Bruch</sub>	N	Bruchfestigkeit
F <sub>D</sub>	N	Dauerfestigkeit nach ISO15654 [DIN04]

---

$F_{\text{Führ}}$	N	Führungskraft
$F_{\text{Gelenk}}$	N	Gelenkkraft
$F_{\text{min}}$	N	Minimalkraft
$F_{\text{max}}$	N	Maximalkraft
$F_{\text{R}}$	N	Reibkraft
$F_{\text{res}}$	N	Resultierende Kraft
$F_{\text{Rolle}}$	N	Kraft pro Rolle
$F_{\text{Stau}}$	N	Staukraft
$F_{\text{sonst}}$	N	Sonstige Kräfte
$F_{\text{t}}$	N	Testkraft
$F_{\text{Zug}}$	N	Zugkraft
$g$	$\text{m/s}^2$	Erdbeschleunigung
$i_{\text{FR}}$	-	Übersetzung Förderrollendurchmesser
$i_{\text{LR}}$	-	Übersetzung Laufrollendurchmesser
$k_{\text{l}}$	mm	Länge des Gewichtes am Pendel
$l_{\text{p}}$	mm	Pendellänge
$m$	kg	Masse
$m_{\text{FG}}$	kg	Masse Fördergut
$M_{\text{D}}$	Nm	Drehmoment
$p$	mm	Kettenteilung
$p_{\text{BB}}$	$\text{N/cm}^2$	Pressung Bolzen/Buchse
$p_{\text{FRB}}$	$\text{N/cm}^2$	Pressung Förderrolle/Buchse
$p_{\text{LRB}}$	$\text{N/cm}^2$	Pressung Laufrolle/Bolzen
$r_{\text{a}}$	mm	Außenradius
$r_{\text{i}}$	mm	Innenradius
$s$	N	Standardabweichung
$s_{\text{r}}$	mm	Reibweg
$S$	-	Sicherheitsfaktor
$t$	s	Laufzeit
$T$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
$v_{\text{kette}}$	$\text{m/s}$	Kettengeschwindigkeit
$W_{\text{pot}}$	J	Potentielle Energie
$W_{\text{r}}$	Nm	Reibenergie
$z$	-	Anzahl der Kettenstränge
$\alpha$	$^{\circ}$	Auslenkwinkel
$\varepsilon$	mm	Dehnung
$\eta$	$\text{Ns/m}^2$	Dynamische Viskosität
$\mu$	-	Reibwert/Reibbeiwert
$\mu_{\text{Gleit}}$	-	Gleitreibwert
$\mu_{\text{Roll}}$	-	Rollreibwert
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Dichte
$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$	Kinematische Viskosität

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Zielstellung und Abgrenzung .....</b>	<b>13</b>
2.1. Ziel der Arbeit .....	13
2.2. Lösungsweg .....	14
2.3. Abgrenzung der Aufgabe.....	15
<b>3. Grundlagen .....</b>	<b>17</b>
3.1. Staurollenkettens in Tragkettenförderern .....	17
3.2. Klassifizierung und Bauarten von Staurollenkettens .....	19
3.3. Aktuelle Auslegung.....	22
3.3.1. Rollenlast .....	22
3.3.2. Zugkraft.....	23
3.4. Aufbau von Fördersystemen mit Staurollenkettens .....	24
3.4.1. Führungselemente .....	25
3.4.2. Antrieb- und Umlenkstation .....	25
3.4.3. Werkstückträger .....	26
3.5. Reibung.....	27
3.6. Verschleiß.....	30
3.7. Schmierung .....	31
<b>4. Analytische Untersuchungen an Staurollenkettens.....</b>	<b>35</b>
4.1. Betriebszustände.....	35
4.2. Reibwertanalyse.....	36
4.2.1. Werkstoffe.....	36
4.2.2. Reibpaarungen .....	38
4.2.3. Experimentelle Untersuchungen .....	42
4.3. Kräfteanalyse .....	49
4.3.1. Staukraft .....	50
4.3.2. Zugkraft.....	51
4.3.3. Gelenkflächenpressung .....	53
4.4. FEM-Analyse .....	54
4.4.1. Voraussetzungen .....	54
4.4.2. Ergebnisse .....	56

---

4.5. Bewertung der Analysen.....	59
<b>5. Experimentelle Untersuchungen.....</b>	<b>61</b>
5.1. Übersicht .....	61
5.2. Versuchsaufbau.....	62
5.2.1. Dynamisches Prüfsystem .....	62
5.2.2. Praxisnahe Versuchsstrecke .....	63
5.2.3. Messtechnik .....	64
5.3. Versuchsprogramm .....	65
5.3.1. Untersuchungen am dynamischen Prüfsystem .....	65
5.3.2. Ermittlung Einflussgrößen auf die Stau- bzw. Kettenzugkraft .....	66
5.3.3. Untersuchung der Dauerfestigkeit am Versuchsstand .....	66
5.4. Versuchsdurchführung .....	67
5.4.1. Untersuchungen am dynamischen Prüfsystem .....	67
5.4.2. Ermittlung Einflussgrößen .....	68
5.4.3. Untersuchung der Dauerfestigkeit am Versuchsstand .....	68
5.5. Versuchsergebnisse.....	69
5.5.1. Untersuchungen am dynamischen Prüfsystem .....	69
5.5.2. Ermittlung Einflussgrößen .....	72
5.5.3. Untersuchung der Dauerfestigkeit am Versuchsstand .....	78
5.6. Schlussfolgerungen .....	93
<b>6. Überwachungssystem für Staurollenketten.....</b>	<b>95</b>
6.1. Anforderungen an das Überwachungssystem.....	95
6.2. Konzipierung.....	96
6.3. Ergebnisse und erreichte Parameter .....	100
6.4. Ausblick und Optimierungsvorschläge .....	105
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>107</b>
7.1. Zusammenfassung .....	107
7.2. Ausblick .....	108
Literaturverzeichnis .....	109
Abbildungsverzeichnis .....	113
Tabellenverzeichnis .....	116
Anlage 1: Dauerfestigkeit Ermittlungsprotokolle ISO15654 [DIN04] .....	117
Anlage 2: Diagramme Dauerversuch $\frac{3}{4}$ Zoll Standardstaurollenkette .....	121
Anlage 3: Technische Zeichnungen Überwachungsstation - $\frac{1}{2}$ Zoll .....	122

## 1. Einleitung

Durchgängige automatische Verkettungen von Maschinen gewinnen in Produktionsabläufen immer mehr an Bedeutung. Tragkettenfördersysteme mit Staurollenketten zum Transport von Werkstückträgern werden hierzu in immer mehr Anwendungsbereichen eingesetzt. Vor allem in Systemen mit Pufferstationen ist der Anteil der eingesetzten Staurollenketten enorm angestiegen. Selbst in Förderanlagen ohne geplanten Staubetrieb können verschiedenste Faktoren zum Stillstand des Fördergutes führen. Besonders für einen Mischbetrieb aus Transport- und Staubetrieb ist die Staurollenkette durch ihre günstigen Fördereigenschaften hervorragend geeignet. Im Gegensatz zu Tragkettenförderern mit herkömmlichen Rollenketten weisen Staurollenketten extrem schonende Eigenschaften der Systemkomponenten, wie Werkstückträger und Führungsprofil, auf.

Maschinen können lose und starr verkettet werden. So werden Fördersysteme mit Staurollenkettensystemen als lose Verkettungen oftmals zur Zwischenpufferung eingesetzt. Neben einer Vielzahl von Vorteilen, wie z.B. den geringen Staukräften bei Gutstillstand, dem robusten Aufbau und dem formschlüssigen Antrieb weisen die Systeme aber auch einige Nachteile auf. Es handelt sich hierbei um geschmierte Systeme, welche trotz ausreichender Initialschmierung regelmäßig nachgeschmiert werden müssen. Als weitere Nachteile sind auftretende Geräusche und der auftretende Polygoneneffekt am Antriebskettenrad zu nennen.

Die Planung und Auslegung von Fördersystemen mit Staurollenketten setzen die Kenntnis der Kettenkennwerte sowie der auftretenden realen Belastungen voraus. Nur durch eine richtige Dimensionierung solcher Systeme kann eine hohe Lebensdauer und Zuverlässigkeit sowie die Ausfallsicherheit bei möglichst geringen Kosten erreicht werden. Staurollenketten gibt es in mehreren Arten und Größen. Die verschiedenen Kettenarten sind mit stark unterschiedlichen Eigenschaften verbunden. Je nach Anwendungsgebiet und Belastungsfall kommen die verschiedenen Bauarten zum Einsatz. Zusatzkomponenten, wie Beschleunigungsschienen und Schutzelemente, sollen den Ketten zusätzliche Eigenschaften verleihen, um sie so dem Anwender noch attraktiver zu machen und den Transportvorgang weiter zu optimieren.

Aktuell basieren nahezu alle Kennwerte von Staurollenketten auf Erfahrungswerten. Danach können solche Fördersysteme nur sehr ungenau ausgelegt werden und sind deshalb meist stark überdimensioniert und dadurch kostenintensiv. Ziel der Arbeit ist es, die verschiedenen konstruktiven Ausführungen der Staurollenketten näher zu untersuchen, um Kennwerte für eine fundierte Dimensionierung zu ermitteln. Durch diese Untersuchungen in Verbindung mit theoretischen Betrachtungen von wirkenden Kräften, Momenten und Einflussfaktoren wird eine Einschätzung der Lebensdauer sowie eine an die jeweilige Anwendung angepasste Auslegung von Tragkettenförderern mit Staurollenketten möglich.



## **2. Zielstellung und Abgrenzung**

### **2.1. Ziel der Arbeit**

Trotz der Erschließung von immer mehr Anwendungsbereichen und dadurch steigenden Anbietern und Herstellern von Staurollenketten sowie Fördersystemen ist das Wissen über die Staurollenkette noch sehr gering. So basieren alle Kennwerte auf sporadischen, meist nur firmenbezogene Analysen. Allein nach dieser geringen Anzahl an Versuchen und durch Erfahrungswerte von Kettenherstellern werden Fördersysteme mit Staurollenketten schon seit längerer Zeit ausschließlich sehr grob dimensioniert. Derzeit sind nahezu keinerlei aussagekräftigen Dimensionierungs- bzw. Auslegungsvorschriften und Kettenkennwerte zu Staukettenförderern vorhanden. Trotz steigender Anzahl an Patenten zu diesen Zug- und Tragmitteln sind auch in der Literatur und in den Normen keine verwertbaren Angaben zu finden. In den zum Thema gehörenden Patenten sind aktuell ausschließlich verschiedene Bauarten und Teilkomponenten der Staurollenketten geschützt.

Das Hauptziel der Arbeit besteht darin, Wissenslücken über die Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von Staurollenketten zu schließen und dadurch eine aussagekräftige Auslegung der entsprechenden Fördersysteme mit hoher Verlässlichkeit zu ermöglichen. Es müssen alle Kenngrößen mit Einfluss auf die Lebensdauer ermittelt und untersucht werden. Dadurch und durch aufwendige theoretische Untersuchungen soll das Verständnis von Staurollenketteneigenschaften auf einen Stand gebracht werden, von dem aus sich neben einer korrekten Auslegung auch Optimierungsvorschläge ableiten lassen.

Die Arbeit soll über die theoretischen Grundlagen zu Staurollenketten hinaus ebenfalls das Verständnis über das Komplettsystem schaffen, um so eine Anpassungs- oder auch eine Neukonstruktion einer Staurollenkette zu vereinfachen. Durch das komplette Wissen der Einflussfaktoren auf wirkende Kräfte innerhalb der Kettensysteme ist es möglich, durch diese Arbeit eine geometrisch abgeänderte Staurollenkette zu schaffen, welche in ihren positiven Eigenschaften die bestehenden Ketten übertrifft. Genau dafür sollen alle geometrischen und analytischen Kenngrößen und deren Zusammenhänge genutzt werden.

## 2.2. Lösungsweg

Das vorher genannte Ziel der Arbeit kann nur durch sehr zeitaufwendige Versuchsreihen erreicht werden. So bedarf es zunächst einer theoretischen Betrachtung der Wechselwirkungen der einzelnen Komponenten. Nach diesen ausführlichen Vorbetrachtungen ist es notwendig, sich mit der Versuchsplanung zur sinnvollen Ermittlung der Kettenkennwerte zu beschäftigen.

Eine komplette theoretische Betrachtung aller auftretenden Kräfte und Reibpaarungen bildet die Grundlage zum Verständnis der Staurollenkettensysteme. Hierbei werden auftretende Reibarten näher definiert und bereits erste Reibwerte experimentell ermittelt, ohne aufwendige Versuchsreihen zu durchlaufen. Aufbauend auf diese Voruntersuchungen sollen mit der Hilfe einer FEM-Simulation bereits auftretende Spannungsspitzen detektiert und das thermische Verhalten der Ketten untersucht werden.

Zur Ermittlung der Festigkeit der Ketten werden in unterschiedlichen Belastungsfällen (Staubeetrieb, Förderbetrieb, Leerlauf) unter dynamischer Belastung Dauerversuche auf entsprechenden Versuchsförderstrecken durchgeführt. Vergleichend werden dazu Versuche auf einer linearen dynamischen Prüfmaschine durchlaufen, um dadurch die ermittelten Kennwerte auf die unter praxisnahen Einsatzbedingungen gewonnenen Werte übertragen zu können. Erst die Gesamtheit der in den verschiedenen Versuchen ermittelten Werte erlaubt es, sinnvolle Rückschlüsse auf die wichtigsten Kenngrößen hinsichtlich der Lebensdauer der unterschiedlichen Staurollenketten zu ziehen. Dadurch werden ebenfalls neue Dimensionierungsvorschriften abgeleitet.

Die ermittelten Eigenschaften mit den dazugehörigen Zusammenhängen können aufbauend auf diese Arbeit in Datenbanken hinterlegt werden, um somit mit der Hilfe einer Software eine optimale Auslegung von Fördersystemen mit Staurollenketten zu erreichen. Dadurch wird es dem Anwender erstmals möglich, durch Eingabe der für seinen Anwendungsfall relevanten Randbedingungen, sich automatisch das hinsichtlich der Lebensdauer optimalste System erstellen zu lassen. Diese Dissertation soll für dieses Vorhaben erste Kennwerte sammeln und als Grundlage für nachfolgende Untersuchungen an Staurollenketten dienen.

### 2.3. Abgrenzung der Aufgabe

Wie bereits an Rollenketten gezeigt wurde, ist die Lebensdauer von einer großen Anzahl Einflussfaktoren abhängig. [Ass79] [Rin91] Diese sind bei Staurollenketten bisher nur zu einem sehr geringen Teil ermittelt worden. Dazu zählen neben den zeitlichen Belastungsunterschieden auch verschiedene Fertigungsparameter und Umwelteinflüsse. Hinzu kommt, dass auch die konstruktiv verschiedenen Bauarten der Staurollenketten zu stark unterschiedlichen Einflussfaktoren führen. Somit bedarf es neben ausführlichen und damit sehr zeitaufwendigen Untersuchungen an einem praxisnahen Versuchsstand auch der Ermittlung von Kettenkennwerten an unterschiedlichen Prüfmaschinen.

Zur Ermittlung des Einflusses von geometrischen, thermodynamischen und belastungsabhängigen Kenngrößen wird ein Versuchsstand verwendet, der sich an den häufigen Anwendungsfällen von Staurollenketten orientiert. Es wird von einem Fördersystem einer Fabrikhalle, welche eine trockene Umgebung unter Raumtemperatur mit nur sehr kleinen Temperaturschwankungen aufweist, ausgegangen. Dadurch lassen sich die Ergebnisse dieser Einsatzart sinnvoll auf die Praxis übertragen. Jedoch sind diese Erkenntnisse nicht oder nur ansatzweise auf schwere Bedingungen wie extreme Temperaturbereiche, sehr feuchte oder strahlungsreiche Umgebungen oder auf sehr staubige Plätze übertragbar. Zur Kennwertermittlung für diese speziellen Anwendungsfälle sind weitere umfangreiche Untersuchungen notwendig, um für jede Umgebung die relevanten Parameter zu ermitteln. Dies kann in Folgearbeiten zu dieser Dissertation erfolgen, um somit das Wissen über Staurollenketten und ihre Auslegung zu vervollständigen.

Eine genaue Dauerfestigkeitsermittlung von Staurollenketten setzt zunächst eine Ermittlung von statischen und dynamischen Belastungsgrenzen voraus. Diese müssen nach ISO15654 [DIN04] durchgeführt werden. Durch die begrenzte Anzahl an Lastfrequenzwechsel der Prüfmaschine sind diese Versuche allein schon sehr zeitaufwendig und beanspruchen je Kettentyp mehrere Wochen. Dadurch ist die Auswahl von Kettenarten und -größen auf ein sinnvolles Maß zu reduzieren. Es müssen Ketten gewählt werden, welche Ergebnisse liefern, die es ermöglichen Rückschlüsse auf andere Arten bzw. Größen zu ziehen. Somit muss die Marktsituation genauestens untersucht werden, um festzulegen, welche Ergebnisse zur Beschreibung der aktuellen Anwendungsgegebenheiten zu ermitteln sind. Durch große konstruktive Gemeinsamkeiten und ähnliche Belastungen der Kettenarten in der Praxis lassen sich sinnvolle Rückschlüsse auf die verschiedenen Variationen ziehen.



### 3. Grundlagen

#### 3.1. Staurollenketten in Tragkettenförderern

Tragkettenförderer mit Staurollenketten werden in der Literatur häufig als Staukettenförderer bezeichnet. Diese Förderer gehören zur Gruppe der mechanischen Stetigförderer. Die Ketten arbeiten hierbei als Zugmittel, welches das Fördergut durch Trag- oder Mitnehmerelemente wie Becher, Kratzer, Platten usw. transportiert. Die Abbildung 3.1 verdeutlicht die Stellung der Staukettenförderer in der nach DIN 15201 – Teil 1 [DIN01] festgelegten Einteilung der Kettenförderer.

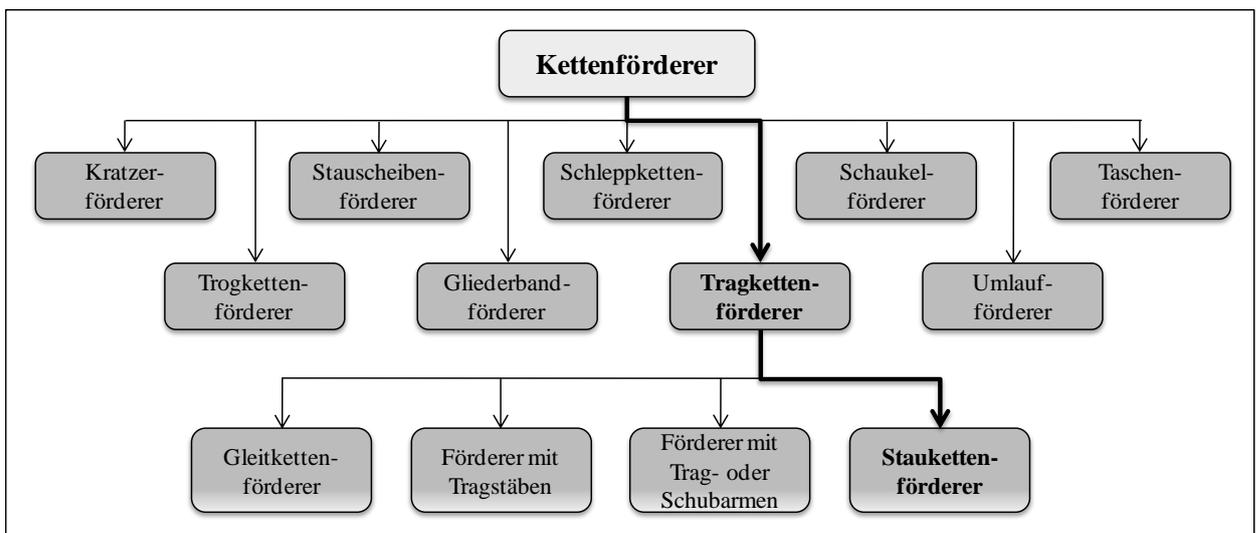


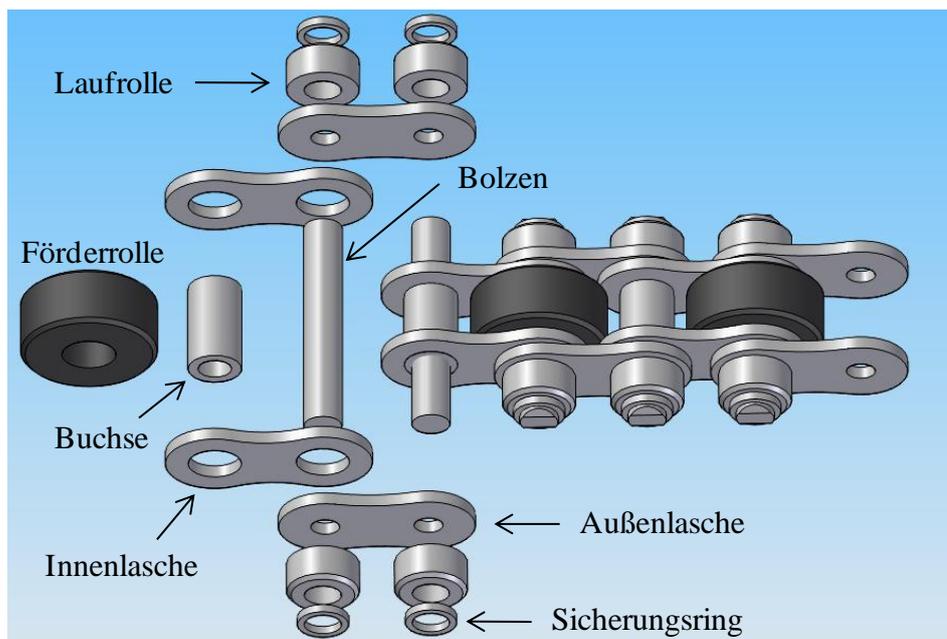
Abb. 3.1: Einordnung der Staukettenförderer nach DIN 15201 Teil 1 [DIN01]

Bei Staukettenfördersystemen wird das Fördergut auf mindestens zwei Kettensträngen transportiert. Als Mitnehmerelemente dienen hierzu auf den Kettenbuchsen angebrachte Förderrollen.



Abb. 3.2: Fördersystem mit Staurollenketten im Einsatz [Bos09]

Eines der größten Anwendungsgebiete solcher Systeme ist die Verkettung von verschiedenen Montagestationen. Da es zwischen den verschiedenen Stationen oft zu gewünschten und ungewünschten Unterbrechungen des Transportes kommt, zeichnet sich die Staurollenkette mit ihrer Eigenschaft der problemlosen Pufferung als bestens geeignet aus. Ebenfalls finden sie Anwendung im Bereich des Paletten- und Behältertransportes. Da zur Staurollenkette keine Norm existiert, gibt je nach Anwendung unterschiedliche Bauarten, welche sich konstruktiv unterscheiden. Der Grundaufbau einer Staurollenkette entspricht dem Aufbau einer standardisierten Rollenkette. [DIN03] Jede zweite Rolle zwischen den Innenlaschen einer Rollenkette wurde durch eine große Förderrolle ersetzt. Dadurch ist eine Führung auf den Laschen durch die bei Rollenketten nach DIN 8187 [DIN03] genutzten Schienen nicht mehr möglich. Durch eine Verlängerung der Bolzen können zusätzliche Rollen an der Kette angebracht werden. Diese Laufrollen ermöglichen eine Führung auf speziell dafür angefertigten Profilen. Die Grundabmessungen der Stauförderketten orientieren sich an den Standardrollenkettensystemen, wobei Staurollenketten nur mit  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$  und 1 Zoll Kettenteilung gefertigt und verwendet werden. Die Abbildung 3.3 zeigt den allgemeinen Aufbau einer Staurollenkette.



**Abb. 3.3:** Aufbau einer Staurollenkette mit Kunststoffförderrollen

Aus dem konstruktiven Aufbau der Ketten ergeben sich folgende Merkmale der Staurollenkettensysteme:

- schonender Transport des Fördergutes
- im Staubetrieb nur Rollreibung am Werkstückträger bzw. Fördergut
- kostengünstig schwere Lasten transportierbar
- zwischen den parallelen Ketten ist Platz für den Einbau von zusätzlichen Funktionselementen vorhanden

- einfacher Aufbau des Fördersystems
- einfacher Transport von mehreren Werkstücken gleichzeitig
- zuverlässiger Transport von Werkstücken
- auf den Rollen ist kein Schmierstoff vorhanden, da nur Gelenkstellen geschmiert sind
- Förderrollen aus gehärtetem Stahl oder Kunststoff wählbar
- große Auswahl an verschiedenen Staurollenkettentypen
- Kettengrößen größtenteils standardisiert
- modularer Aufbau des Fördersystems

Beim Stau des Transportgutes kommt es zur Drehbewegung der Förderrollen. Dadurch kann das Gut ohne Probleme, wie Verschleiß und Erwärmung, auch im Staubetrieb auf den Ketten liegen.

### 3.2. Klassifizierung und Bauarten von Staurollenketten

Da Staurollenketten keinen Normungen unterliegen, gibt es mittlerweile schon eine Vielzahl an Bauarten. So wurden zunächst nur einzelne Komponenten gestaltet. Später erschienen immer mehr unterschiedliche Bauarten. Somit lassen sich Staurollenketten nach folgenden Kriterien klassifizieren:

- nach der Lage der Förderrollen: - innerhalb des Kettengliedes  
- außerhalb des Kettengliedes
- nach Anzahl der Kettenstränge: - Einstrang-Staurollenkette  
- Mehrstrang-Staurollenkette
- nach Anzahl der Förderrollen: - eine Rolle je Kettenglied  
- zwei Rollen je Kettenglied
- nach Art der Förderrollen: - Stahlförderrollen  
- Kunststoffförderrollen
- nach Schmierungszustand: - vorgeschmiert  
- ungeschmiert
- nach Größe der Kettenteilung: - 1/2 Zoll Teilung  
- 3/4 Zoll Teilung  
- usw.

**Standardstaurollenkette:** Diese Bauart der Staurollenkette ist die in der Praxis am häufigsten eingesetzte Kette. Der Aufbau ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Jeweils eine Förderrolle aus Stahl

oder Kunststoff ist in der Mitte eines Kettengliedes angeordnet. Die Laufrollen befinden sich außen auf den Bolzen, welche im Gegensatz zur Standardrollenkette nach DIN 8187 [DIN03] extra zur Aufnahme der Rollen verlängert sind. Zur Funktionserweiterung und Steigerung der Sicherheit gibt es verschiedene Elemente, die nachträglich oder bei der Fertigung der Ketten auf die Buchsen ohne Förderrolle montiert werden können. So gibt es neben verschiedensten konstruktiven Ausführungen von Füllstücken zum Teile- und Fingerschutz auch unterschiedliche Bürstenelemente, welche zur Reinigung und zur Verhinderung von elektrostatischen Ladungen angebracht werden. In der Abbildung 3.4 ist eine mit Teile- und Fingerschutz ausgerüstete Standardstaurollenkette mit Stahlförderrollen der Firma Flexon GmbH zu sehen.

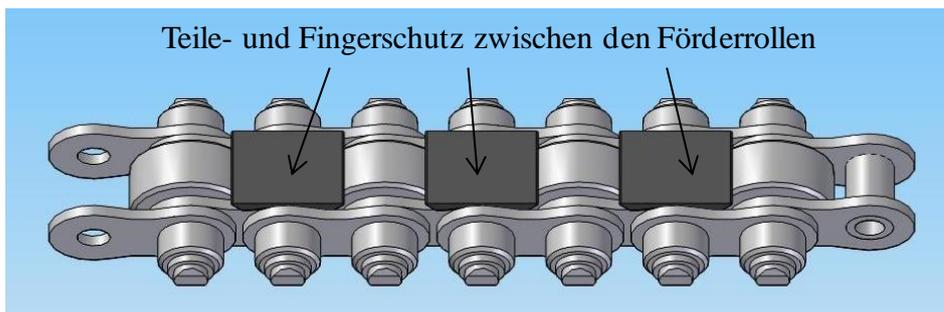


Abb. 3.4: Standardstaurollenkette mit Teile- und Fingerschutz

**Staurollenkette mit versetzten Förderrollen:** Bei dieser Art einer Staurollenkette handelt es sich im Grundaufbau um eine Standardstaurollenkette. Die Breite der Förderrollen ist hierbei jedoch halbiert. Dadurch ist es möglich, je Kettenglied zwei Förderrollen zu montieren. Dies ist durch eine Versetzung, dieser zur Förderung verwendeten Rollen, realisiert. Ein ruhiger und schonender Transport des Fördergutes ist das Ergebnis dieser konstruktiven Umgestaltung. Die Gewichtskraft des zu fördernden Gutes verteilt sich somit bei gleicher Auflagefläche auf mehr Rollen. Als Nachteil können die fehlende Möglichkeit zur Umrüstung mit Zusatzelementen und die reduzierte Belastbarkeit der einzelnen Förderrollen genannt werden. Auch bei dieser Staurollenkettentyp gibt es Förderrollen aus Kunststoff oder Stahl. Die Abbildung 3.5 zeigt eine Ausführung der Kette mit versetzten Förderrollen aus Kunststoff.

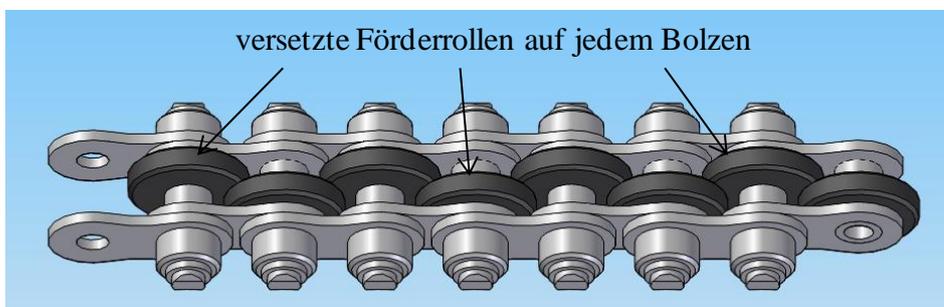


Abb. 3.5: Staurollenkette mit dünnen versetzten Kunststoffförderrollen

**Mehrstrang-Staurollenkette:** Mehrstrang-Staurollenketten bestehen aus mehreren aneinander geketteten Einzelsträngen, welche durch einen gemeinsamen Bolzen verbunden sind. Der größte Vorteil dieser Kettenart ist die erhöhte Leistungsfähigkeit. Wie bei Rollenketten ist jedoch nicht von einer mit der Strängigkeit linear steigenden Leistungsfähigkeit auszugehen. Je mehr Einzelstränge verwendet werden, desto größer ist der prozentuale Abfall der Leistungsfähigkeit im Vergleich zu einer Einstrangkette. Bei Rollenketten ist bei Duplexketten mit einem Minderungsfaktor von ca. 15 % und bei Triplexketten von ca. 20 % zu rechnen. [Fle03] Durch den zu einer Standardrollenkette nahezu identischen Grundaufbau einer Staurollenkette ist auch hier mit diesen Werten zu rechnen. In der Abbildung 3.6 ist eine Mehrstrang-Staurollenkette dargestellt.

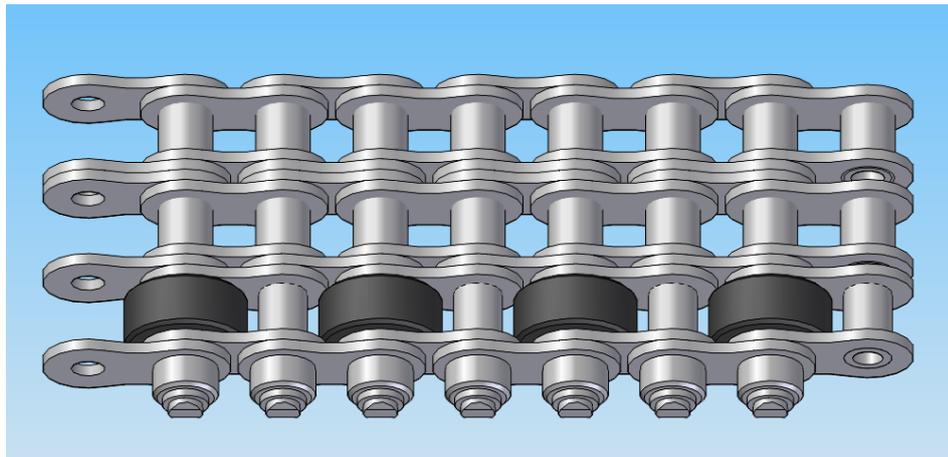


Abb. 3.6: Mehrstrangstaurollenkette

**Staurollenkette mit Förderrollen außerhalb des Kettengliedes:** Der Antrieb dieser Bauart der Staurollenkette kann aufgrund der Lage der Förderrollen durch ein Kettenrad für Standardrollenketten erfolgen. Die Bolzen der Ketten sind richtungswechselnd einseitig verlängert, um so die Förderrollen außerhalb des Kettengliedes befestigen zu können. In der Abbildung 3.7 ist eine solche, auch Langgliederstaurollenkette genannte, Kette mit außenliegenden Förderrollen dargestellt.

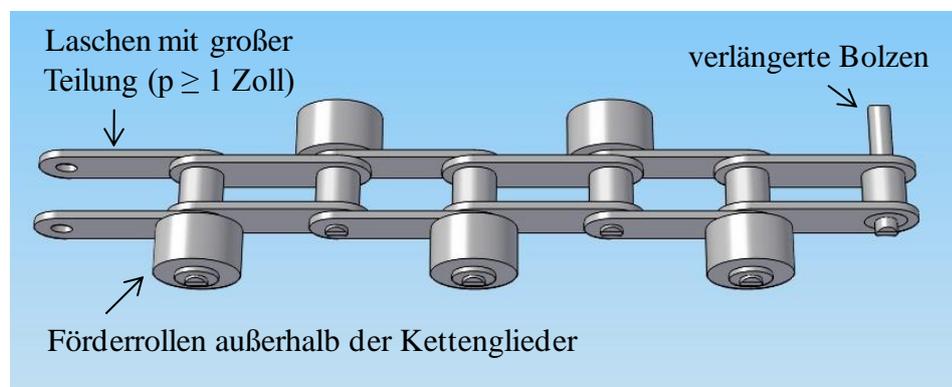


Abb. 3.7: Langgliederstaurollenkette mit Förderrollen außerhalb des Kettengliedes

**Wartungsfreie Kunststoff-Staurollenkette:** Um die bei Staurollenketten übliche Schmierung zu vermeiden, wurde eine wartungsfreie Kette entwickelt, welche größtenteils aus Kunststoff besteht. [Sum02] Die Herstellung der Kunststoffteile erfolgt im Spritzgießverfahren. Dadurch ist es möglich, die Materialien mit unterschiedlichen Gleitmitteln zu modifizieren, um die Ketten an die jeweiligen Anforderungen anpassen zu können. Ein Außenglied der Kette bilden zwei stahlverstärkte Gleitschuhe aus Kunststoff. Das Innenglied ist ein spritzgegossener Laschenblock, welche je nach Ausführung mit Stahleinlagen versehen ist. Gemeinsam mit den Stahlbolzen und den Kunststoffförderrollen wird die Kette montiert. Die Vorteile dieser Kettenart sind die Wartungsfreiheit, die niedrigen Laufgeräusche und die dadurch reduzierten Wartungskosten. Eine Verlängerung oder Verkürzung der Kette ist durch den modularen Aufbau der Kette jederzeit möglich. Der Aufbau einer solchen Staurollenkette ist in der Abbildung 3.8 dargestellt.

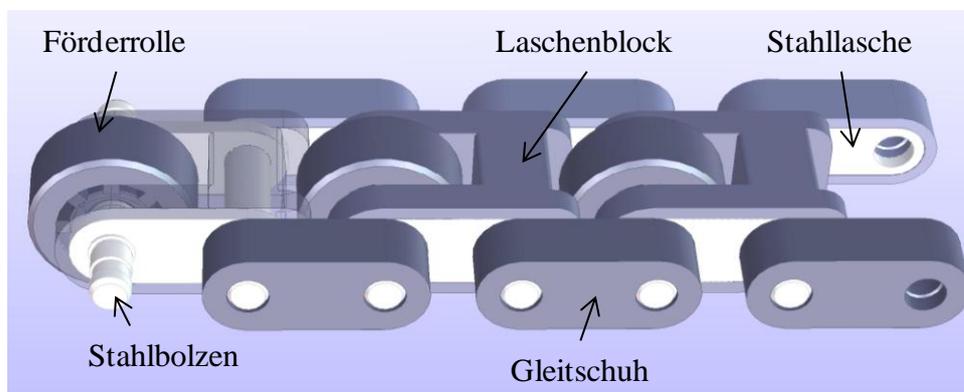


Abb. 3.8: Wartungsfreie Staurollenkette aus Kunststoff [Sum02]

### 3.3. Aktuelle Auslegung

Der Einsatz von Staurollenketten wird aktuell durch zwei Kenngrößen begrenzt. Neben der maximalen Kraft pro Rolle ist hierbei auch die maximale Zugkraft zu berücksichtigen.

#### 3.3.1. Rollenlast

Die maximale Tragfähigkeit pro Rolle bzw. Last pro cm Kette wird von nahezu allen Kettenherstellern in ihren Katalogen angegeben. Hierbei wird im Normalfall nach Kettengröße und Förderrollenmaterial unterschieden. Nach Angaben der Hersteller sind diese Werte besonders bei Kunststoffförderrollen wichtig und durch Versuche ermittelt. Durch zu hohe Last kommt es hier schnell zur Abplattung der Rollen und dadurch neben der Änderung der Flächenpressung und damit des Reibwertes im extremen Fall zum Bruch einzelner Rollen im Gesamtsystem. Das Kriechverhalten von unterschiedlichen Kunststoffen und die damit erhöhten Zugkräfte bei Start des Systems wurden bereits in anderen Arbeiten [Ras12][Sum99] untersucht und sind somit nicht Teil dieser Arbeit. Die vorhandene Pressung ergibt sich zu folgender Formel:

$$p_{FRB} = \frac{F_{Rolle} \cdot 100}{d_{Buchse} \cdot b_{FR}} \quad (3.1)$$

**Tab. 3.1:** Zulässige Pressungen [Jun07]

Werkstoff Rolle	Werkstoff Buchse	Zulässige Pressungen
Einsatzstahl gehärtet	Einsatzstahl gehärtet	800 N/cm <sup>2</sup>
Vergütungsstahl	Einsatzstahl gehärtet	300 N/cm <sup>2</sup>
Kunststoff	Einsatzstahl gehärtet	50 N/cm <sup>2</sup>

### 3.3.2. Zugkraft

Aktuell wird die vorhandene Zugkraft von Staurollenketten in Fördersystemen nur sehr überschlägig nach folgender Formel [Iwi10] berechnet.

$$F_{Zug} = \frac{\mu \cdot g \cdot m_{Fg} \cdot 1,4}{\text{Anzahl Kettenstränge}} \quad (3.2)$$

$$F_{Zug} \leq F_{Zul} \quad (3.3)$$

Eine gleichmäßige Verteilung der Gewichtsbelastung auf die Kettenstränge wird in dieser Formel vorausgesetzt. Die Wichtigkeit der Ermittlung von Kettenkennwerten verdeutlicht der Reibbeiwert  $\mu$ , welcher zwischen 0,08 und 0,3 je nach Werkstoffpaarung, Schmierzustand und Verschmutzungsgrad angenommen werden kann. Diese Werte und der Sicherheitsfaktor von 1,4 basieren jedoch nur auf Erfahrungswerte und sind nicht ausreichend analysiert. Ebenso steigt der Reibbeiwert schon nach kurzer Laufzeit der Fördersysteme stark an. Weiterhin wird für die Auslegung der Ketten lediglich eine Dauerfestigkeit als zulässige Kraft angesetzt, welche sich an den Werten der Rollenketten nach ISO606 [DIN02] orientiert. Hierbei ergibt sich die Dauerfestigkeit zu ca. 13 - 14 % der Bruchkraft. Ob diese Annahme jedoch auch bei Staurollenketten angewendet werden kann, ist aktuell nicht nachgewiesen und wird in dieser Arbeit in Kapitel 5 näher untersucht.

**Tab. 3.2:** Bruch- und Dauerfestigkeiten Rollenkette [DIN02]

	Bruchfestigkeit	Dauerfestigkeit
½ Zoll Rollenkette	17,8 kN	2,48 kN
¾ Zoll Rollenkette	28,9 kN	3,72 kN

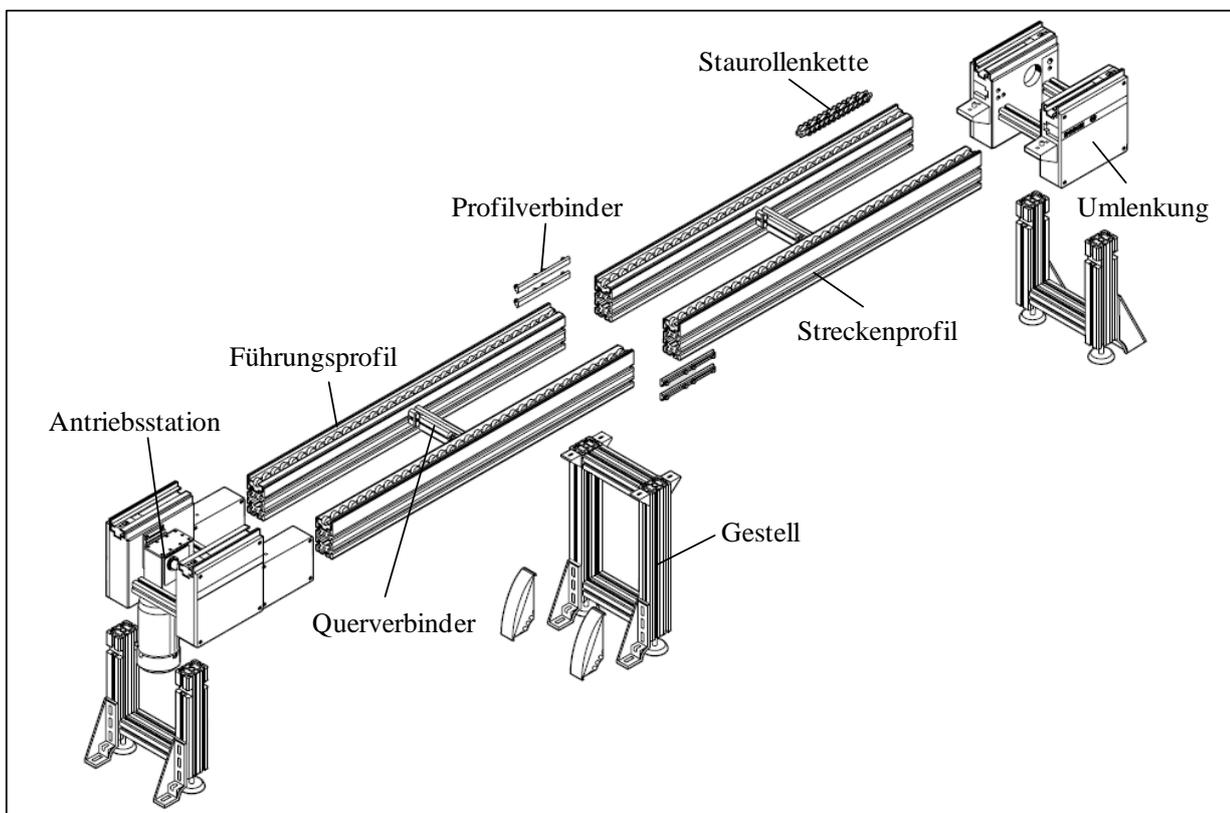
Jedoch ist dies eine relevante Größe für die Auslegung der Ketten, wobei sie demzufolge noch unbekannt ist und aktuell nur überschlägig geschätzt wird. Aufgrund dieser lückenhaften Vorun-

tersuchungen ist eine genaue Ermittlung der Kettenkenngrößen für eine korrekte Auslegung notwendig.

Höhere Zugkräfte führen zur Erhöhung der Kettenlängung. Bei einer Längung von bis zu 2 % behalten Staurollenketten nach dem Kettenhersteller Iwis ihre volle Funktionsfähigkeit. [Iwi07] Für Rollenketten wird eine Kette ab 3 % Änderung der Länge als verschlissen angesehen und muss durch eine neue Kette ersetzt werden. [Fle03]

### 3.4. Aufbau von Fördersystemen mit Staurollenketten

Neben dem Hauptvorteil des schonenden Transportes auch im Staubetrieb ist ein weiterer Vorteil der modulare Aufbau der Fördersysteme. Aufgrund der Kettenkonstruktion sind diese immer linear ausgeführt und lassen eine Weitergabe an Folgesysteme durch verschiedene Ausschleuse- und Hubeinrichtungen zu. Durch diese modulare Bauweise der Systeme ist eine Anpassung an spezifische Anwendungen schnell und komfortabel möglich. Die wichtigsten Bestandteile eines derartigen Fördersystems sind neben der Staurollenkette (siehe Abschnitt 3.2), Profilelemente zur Kettenführung und Streckengestaltung, Antrieb und Umlenkung sowie verschiedene Gestellbauteile zur Stützung bzw. Stabilisierung des Systems. Sie werden in den nächsten Abschnitten eingehender dargestellt. Daneben existiert ein reichhaltiges Sortiment an Zubehör und Zusatzkomponenten wie Seitenführungen, Beschleunigungselementen etc. Die Abbildung 3.9 zeigt den modularen Aufbau eines Fördersystems mit Staurollenketten.



**Abb. 3.9:** Aufbau eines Fördersystems mit Staurollenketten [Bos08]

### 3.4.1. Führungselemente

Weit verbreitet sind gezogene Aluminium Profile mit meist symmetrischem Querschnitt, die sowohl Ober- als auch Untertrum der Kette aufnehmen. Auf dem Führungsprofil werden Gleitschienen aus Stahl oder Kunststoff befestigt. Diese dienen der Verminderung von Reibung und Verschleiß an der Kette sowie der Geräuschdämmung. Durch diese Gleitschienen wird das kostenintensivere Aluminiumprofil vor Verschleiß geschützt und kann somit problemlos über sehr lange Laufzeiten genutzt werden.

Die Führung der Staurollenkette erfolgt an den Laufrollen der Kette. Aufgrund der linearen Führung der Ketten dienen die Führungselemente nur der Aufnahme und Gewichtskraft von Ketten und Werkstück. Seitlich wird die Kette durch ein extra für Staurollenketten gefertigtes Kettenrad und der anliegenden Vorspannung geführt. Aktuell werden als Werkstoff für die Gleitschienen Stahl oder Polyamid verwendet.

### 3.4.2. Antrieb- und Umlenkstation

Antriebs- und Umlenkstation befinden sich jeweils an den Enden der Aluminium Streckenprofile. Die Umlenkstation dient neben der Umlenkung der Ketten von Leertrum zum Lasttrum auch noch zur seitlichen Führung der Kette. Umgelenkt wird die Kette durch ein Gleitstück bzw. bei längeren Förderwegen durch ein in der Station gelagertes Kettenrad. Die folgenden zwei Abbildungen zeigen diese unterschiedlichen Varianten.

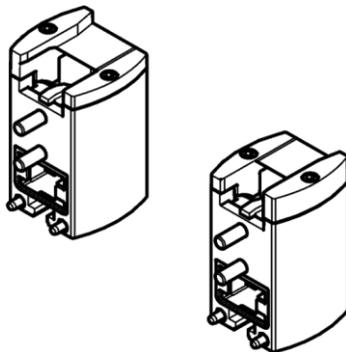


Abb. 3.10: Umlenkung mit Gleitstück [Bos08]

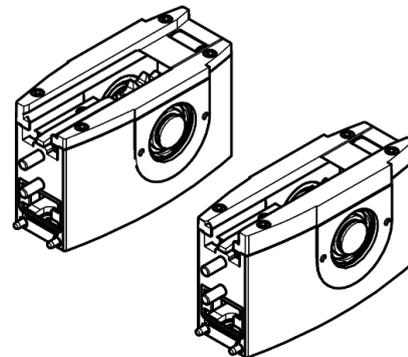
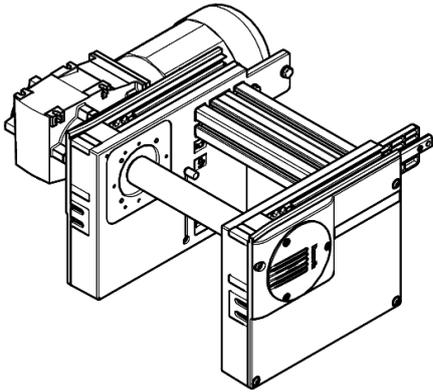


Abb. 3.11: Umlenkung mit Kettenrad [Bos08]

Auch die Antriebsstation ist komplett modular aufgebaut. Je nach Platzbedarf kann man hierbei wählen, ob man den Motor rechts, links oder in der Mitte der Streckenprofile möchte. Neben der Hauptfunktion des Antreibens dient die Station auch der Kettenspannung und reguliert während des Betriebs die Vorspannung der Ketten mit Hilfe unterschiedlicher Mechanismen. Aufgrund der Sonderform der Kettenräder für Staurollenketten werden die Ketten angetrieben und gleichzeitig seitlich geführt.



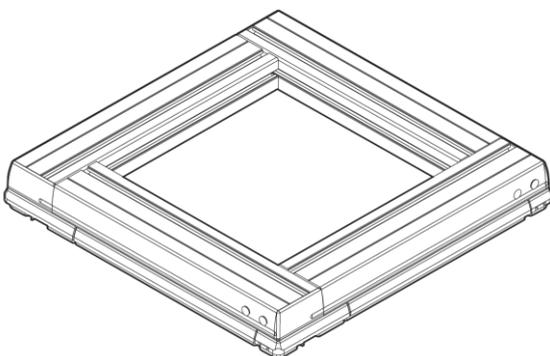
**Abb. 3.12:** Antriebsstation [Bos08]



**Abb. 3.13:** Kettenrad für Staurollenketten [Wip11]

### 3.4.3. Werkstückträger

Als Werkstückträger werden viele verschiedene Ausführungen angeboten. Am häufigsten zum Einsatz kommen Werkstückträger der Firma Bosch-Rexroth [Bos08]. Hierbei werden neben Fertigmodellen für standardisierte Baugrößen auch Werkstückträgerbausteine vertrieben, durch die Sondermaße realisiert werden können. Diese sind wahlweise als einfaches Rahmengestell oder als Träger mit Plattform ausgeführt. Je nach geplanter Belastung sind diese mit Kunststoff- oder Aluminiumplatte ausgestattet. Weiterhin können diese WT's durch integrierte Buchsen mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,3$  mm positioniert werden. Ein weiterer großer Hersteller von Werkstückträgern ist die Firma Altratec Montagesysteme GmbH [Alt08]. Hier werden die Träger aus Kunststoff- bzw. Aluminiumprofil nach Kundenwunsch hergestellt. Im Bereich von hohen Lasten und unter Verwendung von  $\frac{3}{4}$  Zoll Staurollenketten hat es sich gezeigt, dass diese WT's optimal zur problemlosen Förderung geeignet sind. Auch diese Systeme werden mit Positionierbuchsen angeboten. Die folgende Abbildung 3.14 zeigt einen Rahmen-Werkstückträger der Firma Bosch-Rexroth. [Bos08]



**Abb. 3.14:** Rahmen-Werkstückträger [Bos08]

### 3.5. Reibung

Im Zusammenhang mit Staurollenketten ist die Kenntnis von Reibung, besonders bei der Auslegung solcher Systeme, erforderlich. Die Reibung ist als Wechselwirkung zwischen sich berührenden Stoffbereichen von Körpern, die einer Relativbewegung entgegenwirkt, definiert. Sie ist durch den Reibwert  $\mu$  gekennzeichnet und ergibt sich aus dem Verhältnis aus der der Bewegung entgegenwirkenden Kraft (Reibkraft) und Normalkraft zu Formel (3.1).

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad (3.4)$$

Innerhalb der Arbeit wird neben dem Begriff „Reibwert“ ebenfalls der Begriff „Reibbeiwert“ eingesetzt. Dieser wird verwendet, wenn ein Wert mehrere Reibpaarungen beinhaltet. Dies ist beispielsweise bei der Ermittlung der Staukraft am Versuchsstand der Fall. Hierbei wird neben der Reibung der Förderrollen mit den Werkstückträgern auch die Reibung zwischen WT und Seitenschiene mit gemessen.

Die Einteilung der Reibung erfolgt nach dem Bewegungszustand, nach der Art der Relativbewegung und nach dem Aggregatzustand. Die Abbildung 3.15 zeigt eine schematische Einteilung der Reibung mit verschiedenen Reibungsarten.

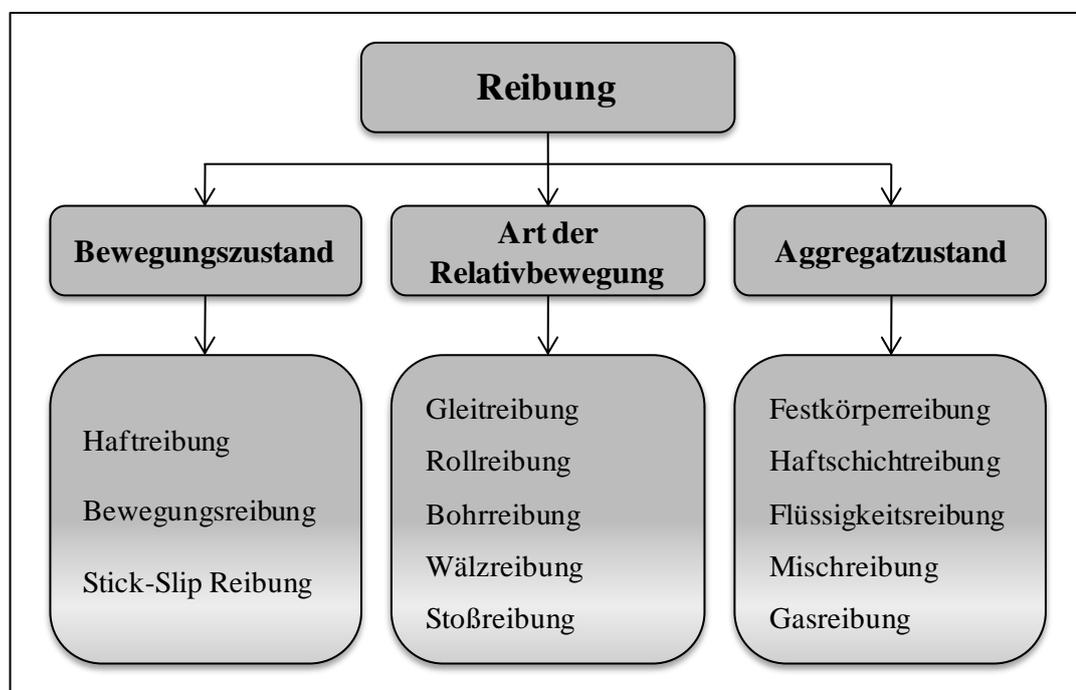


Abb. 3.15: Einteilung der Reibung

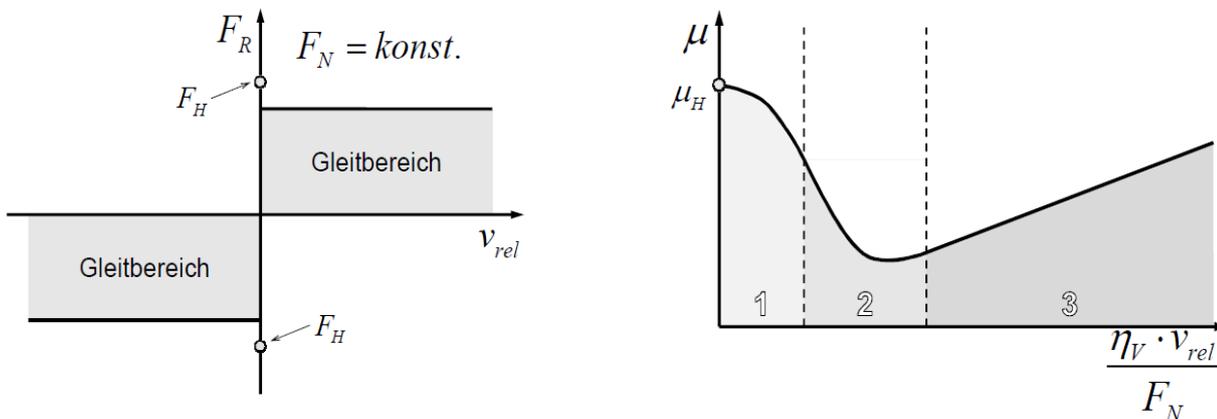
Während eines Prozesses der Festkörperreibung treten nach Czichos [Czi10] folgende Mechanismen auf.

- Abscheren und Auflösen von Adhäsionsschweißbrücken
- plastische Deformation der sich kontaktierenden Rauheitsspitzen
- Furchung durch Rauheitsspitzen im Reibpartner
- elastische Verformung und Dämpfung im Kontaktbereich

Diese können einzeln, nacheinander und in unterschiedlicher Intensität auftreten, wobei die Stoffeigenschaften und die Dimension der Beanspruchung diese Prozesse beeinflussen.

Es existieren verschiedene Modelle zur Beschreibung der auftretenden Reibungen. Die Abbildung 3.16 vergleicht das Modell nach Coulomb (links) mit dem Reibmodell von Stribeck (rechts).

In der Technik hat sich zur mathematischen Formulierung der trockenen Reibung fester Körper das Coulombsche Reibmodell durchgesetzt [C1785], da dieses viele technische Prozesse in ausreichender Näherung beschreibt. Sowohl die Haft- als auch die Gleitreibungskraft stehen in proportionaler Abhängigkeit zur wirkenden Normalkraft zwischen den Reibpartnern. Unwichtig ist hierbei die Größe der Kontaktfläche. Der Haft- und der Gleitreibungswert sind systemspezifische Proportionalitätsfaktoren, welche angeben, in welchem Maße die Reibkraft zwischen den Reibpartnern bei steigender Normalkraft anwächst. Die Gleitreibungskraft wirkt nach Coulomb entgegen der Bewegungsrichtung und ist unabhängig vom Betrag der Geschwindigkeit.



**Abb. 3.16:** Vergleich Reibmodelle [Ris11]

Die Reibkurve nach Stribeck [Bei01] beschreibt die Änderung des Reibkoeffizienten  $\mu$  geschmierter Gleitpaarungen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Viskosität des Schmierstoffes. Sie wird in der Dissertation [Ris11] ausführlich und einfach verständlich erklärt:

„Befinden sich beide Reibpartner in relativer Ruhe zueinander herrscht Haftreibung vor. Der Zustand beginnender Relativbewegung (Bereich 1 in Abb. 3.16) wird durch die Grenzreibung geprägt. Die Oberflächen der Reibpartner stehen solange in direktem Kontakt, bis es zum Auf-

schwimmen auf einzelne Schmierstoffmoleküle kommt. Zunächst werden die Oberflächen nur durch wenige Schmierstoffmoleküle voneinander getrennt und es kommt immer noch zu teilweisen Verhakungen der Rauigkeitsspitzen (Bereich 2). In diesem Bewegungszustand liegt Mischreibung vor. Mit zunehmender Reibgeschwindigkeit (Bereich 3) werden die Oberflächen vollständig voneinander getrennt und das tribotechnische System befindet sich im Zustand der Flüssigkeitsreibung. In diesem Bereich nimmt die Reibkraft wieder zu, da mit steigender Reibgeschwindigkeit der Schmierpalt anwächst und mehrere Schmierstoffschichten aufeinander abgleiten.“ [Ris11-Seite 27]

Beim Vergleich dieser zwei Systeme wird deutlich, dass bei der Betrachtung von geschmierten Staurollenketten das Modell nach Stribeck [Bei01] angesetzt werden sollte. Hierbei handelt es sich um ein geschmiertes System, welches dadurch unterschiedliche Viskositäten aufweisen kann. Hinzu kommt, dass bei Staurollenkettensystemen in variablen Kettengeschwindigkeitsbereichen gearbeitet wird.

Bei ungeschmierten Staurollenkettensystemen sollte das Modell nach Coulomb [C1785] angewendet werden. Dieses wird z.B. bei Untersuchungen an den wartungsfreien Kunststoff-Staurollenketten angesetzt.

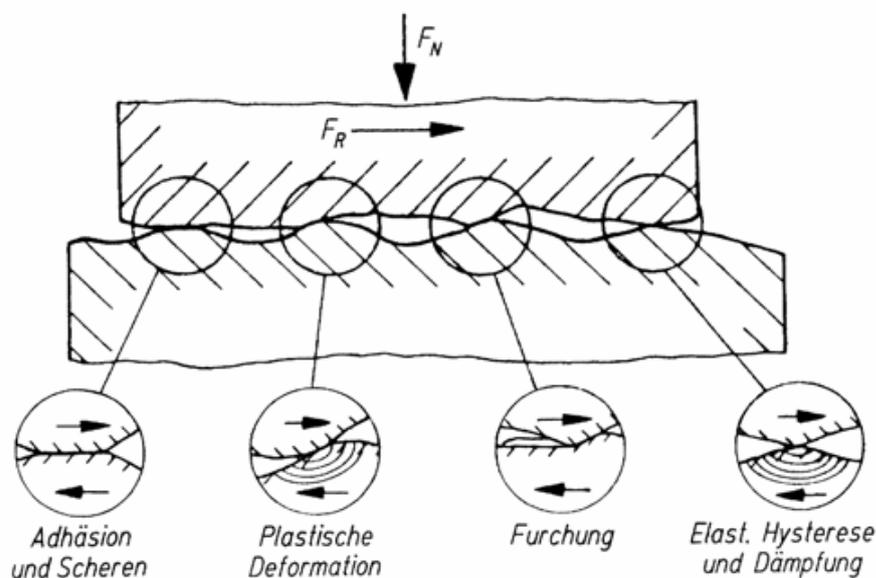


Abb. 3.17: Reibungsmechanismen nach Czichos [Czi10]

Die Einflussfaktoren auf den Reibwert lassen sich innerhalb des tribologischen Systems in vier Hauptbereiche einteilen. So wirken sich die Beanspruchung, der Werkstoff und die Umgebung auf das tribologische System und damit auf den Reibwert aus. Die Abbildung 3.18 zeigt ein Schema dieser Größen mit ausgewählten Einflussfaktoren.

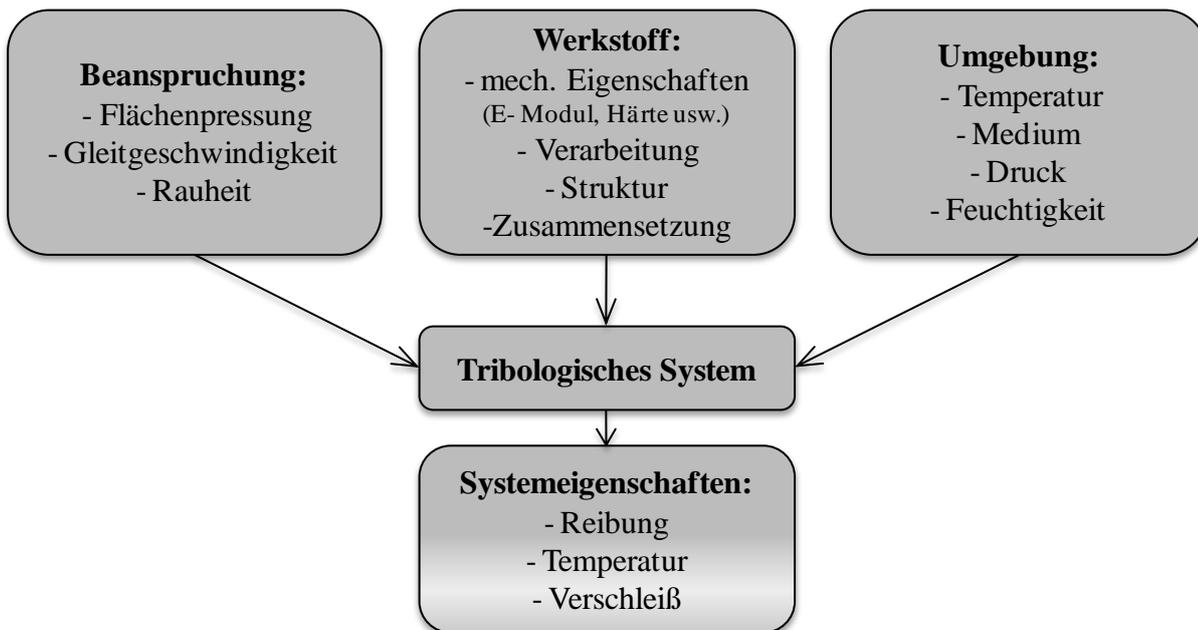


Abb. 3.18: Einflussfaktoren auf das tribologische System

### 3.6. Verschleiß

Allgemein lässt sich der Verschleiß als fortschreitender Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers beschreiben. Durch unterschiedliche physikalische und chemische Prozesse kommt es beim Verschleiß hauptsächlich zu vier unterschiedlichen Verschleißmechanismen, welche oftmals gemeinsam auftreten und sich gegenseitig stark beeinflussen können.

- *Abrasion:*

Materialabtrag durch Mikrozerspanung, bedingt durch harte Rauheitshügel des Gegenkörpers bzw. harte Partikel des Zwischenstoffs, z.B. Riefen, Kratzer, Mulden, Wellen

- *Adhäsion*

Bildung und Trennung von atomaren Bindungen (Mikroverschweißungen) zwischen Grund- und Gegenkörper, z.B. Fresser, Löcher, Kuppen, Schuppen

- *Oberflächenzerrüttung*

Ermüdung und Rissbildung bzw. Risswachstum in der Oberfläche, schließlich Abtrennung von Partikeln infolge Wechselbeanspruchung, z.B. Risse, Grübchen

- *Tribochemische Reaktionen*

Chemische Reaktion von Grund-, Gegenkörper, Schmierstoff oder Umgebungsmedium infolge tribologischer Beanspruchung, z.B. Reaktionsprodukte (Schichten, Partikel)

Analog zu den unter 3.5 erwähnten Reibungsarten lässt sich der Verschleiß in Gleitverschleiß, Rollverschleiß, Bohrverschleiß, Wälzverschleiß und Stoßverschleiß einteilen. [Kra82][Sum12] Die folgende Abbildung zeigt die Vielzahl an Einflussgrößen auf den Verschleiß.

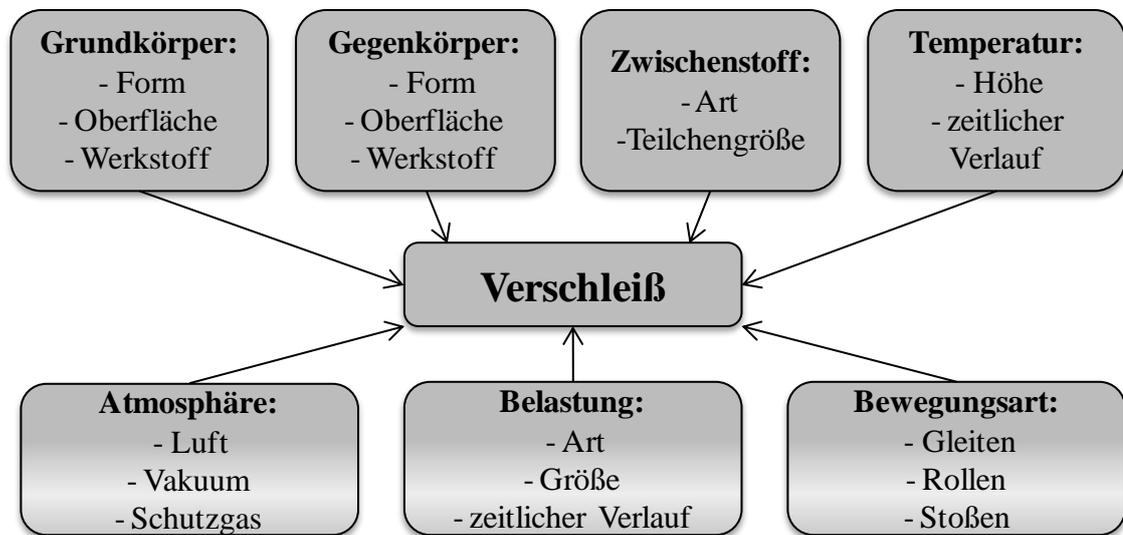


Abb. 3.19: Einflussgrößen auf den Verschleiß

### 3.7. Schmierung

Genau wie bei Rollenketten und anderen tribologischen Systemen ist die Schmierung ein nicht zu unterschätzender Faktor für die Lebensdauer von Staurollenkettensystemen. Der Begriff Schmierung ist als Reibungs- und Verschleißminderung in tribologischen Systemen durch vollständige bzw. teilweise Trennung von Grund- und Gegenkörper definiert. [Czi10] Hierbei beruht die Wirkungsweise von Schmierstoffen auf die Trennung der festen Reibpartner. Bei vollständiger Trennung wird die Reibung komplett durch die Schmierstoffeigenschaften (z.B. Viskosität) bestimmt. Unterschieden werden sie in die Klassen Schmieröle, Schmierfette und Festschmierstoffe.

#### *Schmieröl:*

Schmieröle werden nach ihrer Herkunft in Mineralöle, tierische und pflanzliche Öle, synthetische Öle und sonstige Öle wie Wasser und flüssige Metalle eingeteilt. Hierbei besitzen die Mineralöle die größte Bedeutung und werden aktuell am häufigsten eingesetzt. Neben dieser Einteilung nach der Herkunft der Öle können sie zusätzlich nach ihrer Hauptanwendung klassifiziert werden. Motorenöle, Getriebeöle, Maschinenöle, Hydrauliköle und Textilmaschinenöle sind nur einige der gängigsten Arten.

Die Eigenschaften von Schmierölen können durch Zugaben von unterschiedlichsten Additiven modifiziert werden. Durch diese Zugabe können tribologisch beanspruchte Oberflächen gezielt verändert werden. Dabei können die Additive an den Oberflächen chemisch reagieren, Verbindungen bilden oder absorbiert werden. Eine Übersicht der Additive und deren Wechselwirkun-

gen mit den beanspruchten Werkstoffoberflächen sind in der Literatur unter anderem in Meyer [Mey85] zu finden.

Als wichtige Kenngröße von Schmierölen ist die Viskosität von großer Bedeutung. Sie lässt sich als innere Reibung des Schmieröles definieren und kann als ein Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluids gesehen werden. Der Kehrwert der Viskosität ist die Fluidität, welche ein Maß für die Fließfähigkeit eines Fluids ist. Bei steigender Viskosität wird ein Fluid somit dickflüssiger und dadurch weniger fließfähig und umgekehrt. Unterteilt wird hierbei in die dynamische und die kinematische Viskosität.

Definition der Viskosität [Mes06][Tip06]:

Zum Verständnis betrachtet man zwei Platten der Fläche  $A$ , welche zueinander einen Abstand  $y$  haben. Zwischen diesen Platten befindet sich eine Flüssigkeit, die an den beiden Platten haftet und parallel zu diesen in Schichten unterteilt wird. Bewegt man die obere Platte mit der Geschwindigkeit  $v$ , so bewegt sich die Schicht direkt an der Platte mit der gleichen Geschwindigkeit mit, weil die Teilchen an dieser haften. Weiter innen liegende Schichten gleiten dabei mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten abnehmend in Richtung der ruhenden Platte aneinander vorbei. Die Geschwindigkeit nimmt im einfachsten Fall von der bewegten Platte bis zur ruhenden Platte linear ab. Um überhaupt die Platte in Bewegung zu versetzen, ist eine Kraft nötig die proportional zur Fläche der Platten, zur Geschwindigkeit und antiproportional zum Abstand der Platten zueinander ist. Es ergibt sich somit folgende Gleichung mit dem Geschwindigkeitsgradienten  $dv/dy$ :

$$F = \eta A \frac{dv}{dy} \quad (3.5)$$

Hierbei ist  $\eta$  ein Proportionalitätsfaktor und wird dynamische Viskosität bezeichnet. In der Praxis ist mit dem Wort „Viskosität“ oft genau diese dynamische Viskosität gemeint.

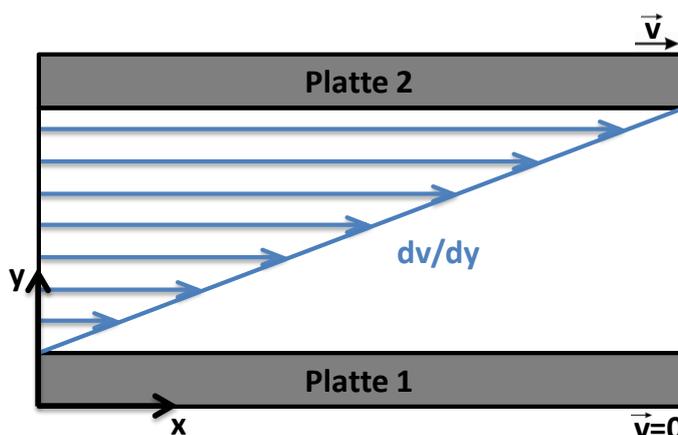


Abb. 3.20: Abbildung zur Definition der Viskosität

Jede Flüssigkeit mit einer Abhängigkeit der Viskosität von der Geschwindigkeit wird als nicht-newtonsche Flüssigkeiten bezeichnet. Dabei erkennt man, dass mehr Kraft nötig ist, um die Flüssigkeitsschichten gegeneinander zu bewegen, wenn die Viskosität sehr groß ist.

Die dynamische Viskosität ist generell von der Temperatur und vom Druck  $p$  abhängig. Neben dieser dynamischen Viskosität gibt es die kinematische Viskosität, welche sich aus dem Quotienten der dynamischen Viskosität und der Dichte  $\rho$  ergibt:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.6)$$

#### *Schmierfett:*

Schmieröle (ohne oder mit Additiv) mit dem eindickenden Stoff Seife werden Schmierfette genannt. Hierbei liegt die Seife als faserförmiges Gerüst vor, indem das Schmieröl festgehalten wird. Schmierfette werden nach der Art der vorhandenen Seife unterschieden z.B. Natriumfett, Aluminiumfett etc. Neben der Abgabe einer geeigneten Menge von flüssigem Schmierstoff durch langsame Separation gehören auch die Abdichtung gegen Wasser und Fremdpartikel zu den Hauptaufgaben der Schmierfette.

#### *Festschmierstoff:*

Diese Art der Schmierstoffe wird vor allem zur Schmierung unter extremen Bedingungen eingesetzt. So finden diese oftmals unter sehr niedrigen bzw. hohen Temperaturen und im Einsatz mit aggressiven Medien Anwendung. Festschmierstoffe lassen sich nach Wäsche und Habig [Wäs89] in Verbindungen mit Schichtstruktur (Graphit, hexagonales Bornitrid), oxydische und fluoridische Verbindungen der Übergangs- und Erdalkalimetalle (Bleioxid, Zinkoxid usw.), weiche Metalle (Blei, Silber, Zinn, Indium) und Polymere (PTFE, Polyimid u. a.) unterteilen. So suchen aktuell auch Hersteller von Staurollenkettensystemen nach neuen Schmierarten für ihre Systeme und greifen immer mehr auch zu Festschmierstoffen, um Nachschmierintervalle deutlich verkürzen zu können. [Kla82]

In ebenfalls durchgeführten Dauerversuchen mit unterschiedlichen Schmierstoffen hat sich gezeigt, dass eine Bestimmung der Qualität eines Schmiermittels nur extrem schwer zu realisieren ist. Als Grund hierfür ist eine ungenaue Initialschmierung zu sehen. Dadurch ist ein direkter Vergleich unterschiedlicher Schmierungen nahezu unmöglich, weil bereits die Wiederholgenauigkeit der Initialschmierung zu gering ist. [Dom12]



## 4. Analytische Untersuchungen an Staurollenketten

### 4.1. Betriebszustände

Zur genauen Betrachtung der Prozesse in der Kette müssen zunächst vier Betriebszustände unterschieden werden.

**Lastfreier Zustand:** Im lastfreien Zustand befindet sich kein Werkstück bzw. -träger auf den Ketten. Hierbei liegen die Förderrollen aufgrund des Eigengewichtes auf den Buchsen der Ketten und sind keinerlei weiteren Kräften ausgesetzt. Die äußeren Laufrollen werden durch das Gewicht der Kette auf das Führungsprofil gedrückt. Somit muss der Motor ein Drehmoment aufbringen, um die Reibkraft bei Gleit- und Rollreibung der Laufrollen und den Widerstand in der Antriebs- und der Umlenkstation zu überwinden. Hierbei hat die Werkstoffpaarung Führungsprofil-Laufrolle, die Kettenlänge und die Anzahl der eingesetzten Kettenstränge Einfluss auf das benötigte Antriebsdrehmoment und die resultierende Zugkraft in der Kette.

**Förderbetrieb:** Während des Förderbetriebes befindet sich das Fördergut, in der Regel auf einem Werkstückträger. Dieser wird von den Förderrollen getragen, wodurch diese auf die Kettenbuchsen gedrückt werden. Da im reinen Förderbetrieb keine Staukraft erzeugt wird, wirkt auf die Förderrollen neben dem Gewichtsanteil des Gutes nur das Trägheitsmoment beim Anfahren bzw. Beschleunigen der Kette. Dadurch ist die wirkende Kraft zwischen Förderrolle und Buchse groß genug, um die Rollen fest auf den Buchsen zu lagern. Somit bleiben diese stehen und transportieren das Fördergut, ähnlich einer normalen Förderkette, bis zur Entnahme- bzw. Umlenkeinheit. Die folgende Abbildung 4.1 zeigt schematisch den Förderbetrieb mit der Hilfe von zwei Staurollenkettensträngen.

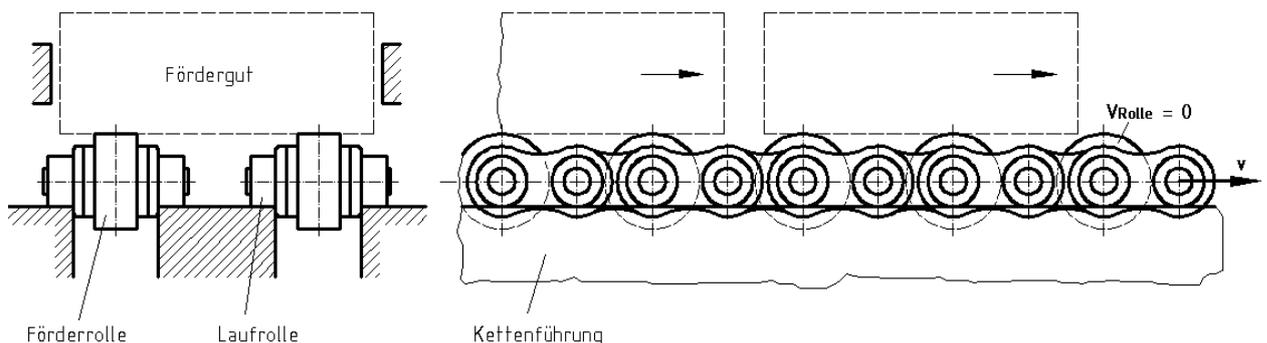


Abb. 4.1: Funktionsschema des Förderbetriebes

**Staubetrieb:** Im Staubetrieb kommt es zur gewünschten bzw. ungewünschten Anstauung des Fördergutes. Oftmals wird der Staubetrieb eingeleitet, um z.B. an Montageplätzen zu stoppen und anschließend weiter zu transportieren. Durch diese in der Praxis sehr unterschiedlich reali-

sierten Haltevorrichtungen wird eine Staukraft  $F_{\text{Stau}}$  erzeugt, welche die Förderrolle zum Rollen bringt. Da zwischen Werkstück- bzw. Werkstückträger und Förderrolle in diesem Betriebszustand Rollreibung wirkt, ist diese sehr schonend und hat dadurch nur sehr geringen Verschleiß des Trägers zur Folge. Nach der Aufhebung der Halte- bzw. Stauvorrichtung wird das Werkstück wieder auf die Kettengeschwindigkeit beschleunigt, um so problemlos weiter gefördert zu werden.

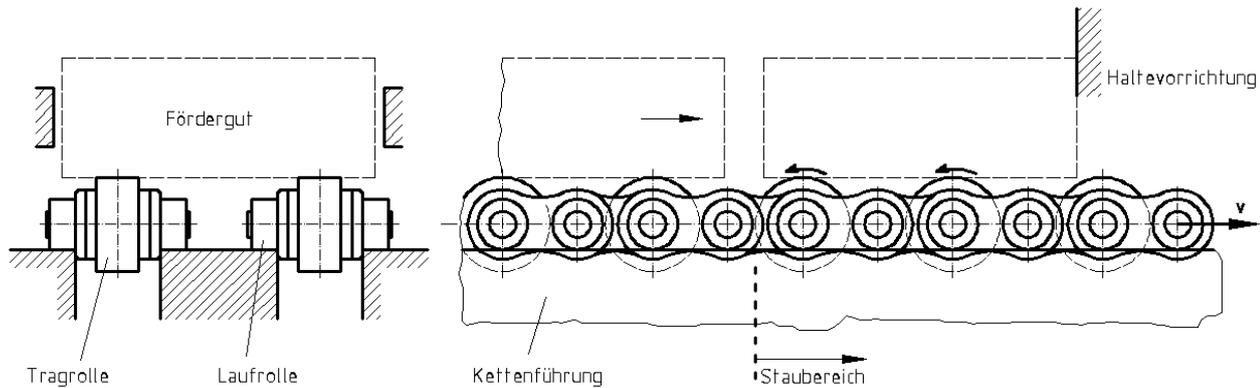


Abb. 4.2: Funktionsschema mit Förder- und Staubetrieb

**Beschleunigung:** Um Werkstücke bzw. Werkstückträger nach Übergabestationen zu beschleunigen, werden Staurollenkettensysteme mit Beschleunigungselementen ausgestattet. Hierbei sitzen die Förderrollen einer Kette auf dem eingesetzten Element auf und beschleunigen die Werkstückträger auf die doppelte Kettengeschwindigkeit. Der Staubetrieb ist an den Stellen der Beschleunigungselemente nicht mehr möglich. Die Abbildung 4.3 zeigt das System mit eingesetzten Beschleunigungselementen unter den Förderrollen.

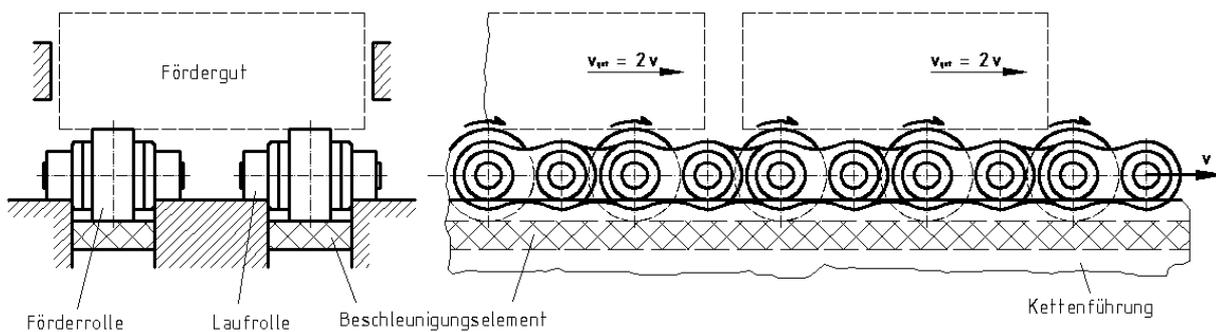


Abb. 4.3: Funktionsschema Beschleunigung

## 4.2. Reibwertanalyse

### 4.2.1. Werkstoffe

Staurollenketten werden aktuell nahezu ausschließlich in Stahlbauweise angeboten, wobei sich lediglich der Werkstoff der Förderrolle je nach maximaler Belastung unterscheidet.

Für die Kettenlaschen, Buchsen und Bolzen werden Stahllarten verwendet, welche möglichst hohe Zugkräfte ohne Beachtung des Reibwertes in Wechselwirkung mit anderen Teilen ermöglichen. Hinzu kommt, dass Kettenhersteller zur Herstellung der Staurollenketten die Einzelteile der Standardrollenketten aus ihrem jeweiligen Kettenprogramm verwenden und anschließend nur Förder- bzw. Laufrollen (durch verlängerten Bolzen) angebracht werden.

**Bolzen:** Einsatzstahl z.B. 16 MnCr5 Werkstoff-Nr. 1.7131

**Buchsen:** Kaltstauchstahl z.B. Cq15 Werkstoff-Nr. 1.1132

**Laschen:** Vergütungsstahl z.B. C45E Werkstoff-Nr. 1.1191

Häufig sind die Laufrollen im Lastrum der Ketten dauerhaft in Bewegung und müssen somit neben einer hohen Verschleißfestigkeit auch gute Reibwerte zum Bolzen bzw. zur Führungsschiene aufweisen. Laufrollen werden aktuell nahezu ausschließlich aus Stahl verbaut. Wobei je nach Hersteller auch unterschiedliche Stahllarten eingesetzt werden und diese oftmals als werksinterne Informationen nicht offen gelegt werden. Es kommt z.B. Automatenstahl zum Einsatz, wobei man in Verbindung mit der Rotationsbewegung auf dem Bolzen, der großen Anzahl an Laufrollen und der damit verbundenen Lastverteilung mit einer Stahl-Stahl Paarung nicht die idealen Reibpartner gewählt hat.

Anders ist dies bei den Förderrollen. Diese müssen bei hoher Belastung einer Standardstaurollenkette die vierfache Normalkraft aufnehmen. Somit lässt sich unter hohen Förderlasten die Stahl-Stahl Paarung zwischen der Förderrolle und Buchse oftmals nicht vermeiden. Hierbei wird zunehmend mit Kunststoffförderrollen gearbeitet, wenn mit mittleren Normalbelastungen zu rechnen ist. Als Kunststoffe werden hierbei neben einfachen Polyamiden (PA) auch Polyamide in unterschiedlichen Modifikationen eingesetzt.

**Förderrolle Kunststoff:** Polyamid z.B. PA6.6

**Förderrolle Stahl:** Automatenstahl z.B. 11SMn30 Werkstoff-Nr. 1.0715

Neben diesen Kettenwerkstoffen sind für das Komplettsystem noch andere Werkstoffe von großer Bedeutung für die Auslegung bzw. Lebensdauer der Komponenten. So sind der Werkstoff der Werkstückträgerunterseite und das Material der Lauf- bzw. Führungsschienen ebenfalls von großem Interesse.

Durch die kompakte Bauweise der Staurollenketten und Führungssysteme dürfen weder die Kette noch die Unterseite der Werkstückträger während des Betriebes große Verschleißerscheinungen aufweisen. Eine Verschleißsumme der einzelnen Bauteile von 1 - 2 mm kann schon zum

Verlust der Fördereigenschaften des Systems führen, da die Träger dadurch schon auf den Förderstrecken liegen und nicht mehr komplett auf den Förderrollen aufsitzen. So werden für Staurollenketten in der Praxis Werkstückträger angeboten, welche durch eine ultrahochmolekulare PE-UHMW Laufsohle für eine Verwendung mit Staurollenketten auch bei längerer Betriebsdauer ausgestattet sind.

#### **Laufsohle Werkstückträger: PE-UHMW z.B. Iso-Len**

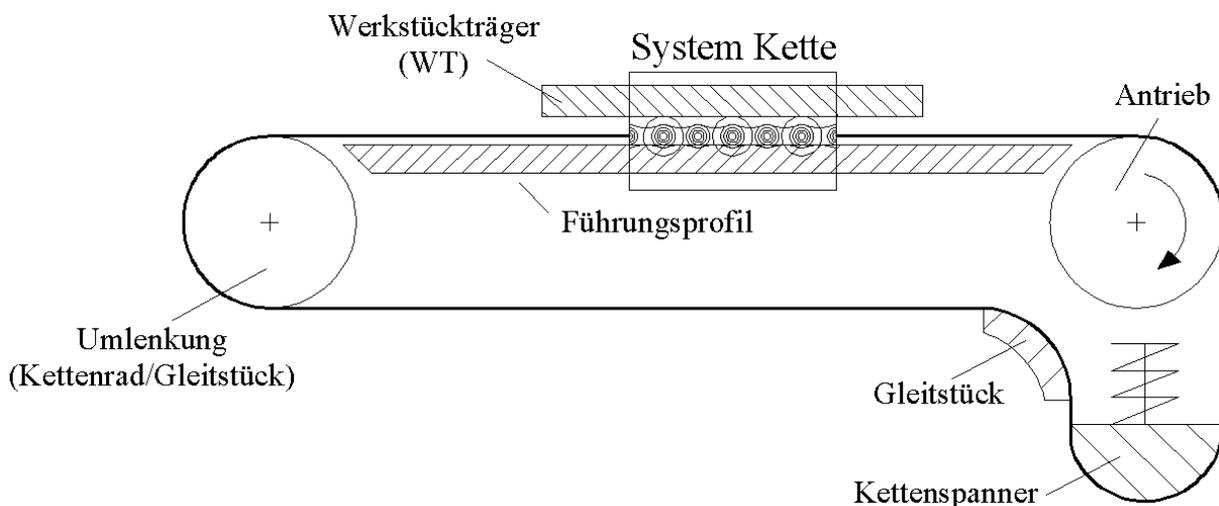
Als Material der Führungsschienen für die Laufrollen wird je nach der Belastung Stahl bzw. Kunststoff verwendet. Eine Überlastung führt neben dem Eindringen des Kunststoffes auch zu erhöhtem Verschleiß der Schienen, welche sich während des Betriebes nur sehr aufwendig tauschen lassen.

#### **Führungsschienen Kunststoff: PE-UHMW z.B. Iso-Len**

#### **Führungsschienen Stahl: Edelstahl z.B. X5CrNi18-10 Werkstoff-Nr. 1.4301**

#### *4.2.2. Reibpaarungen*

Die Anzahl an Reibpaarungen ist bei Staurollenketten im Vergleich zu den Standardrollenketten aufgrund des Aufbaus deutlich höher. So werden nachfolgend die Reibpaarungen im System näher dargestellt. Es wird die Art der Reibung und auch die jeweilige Wirkstelle näher betrachtet. Neben den für die Auslegung am wichtigsten Reibpaarungen, zwischen Kette und Werkstückträger bzw. Kette und Führungsschiene, treten im Staurollenkettensystem noch andere Reibpaarungen auf. Die folgende Abbildung zeigt schematisch weitere Reibpartner neben dem Hauptsystem „Kette“, welches im Anschluss näher betrachtet wird.



**Abb. 4.4:** Auftretende Reibpartner im Komplettsystem

### System Kette:

Wie unter 4.1 beschrieben, treten im Staubetrieb die größten Kräfte auf und die Kette ist dadurch am stärksten belastet. Somit wird nachfolgend immer vom Staubetrieb der Ketten ausgegangen. Die folgende Abbildung 4.5 zeigt einen Kettenausschnitt und die dabei auftretenden Reibpaarungen.

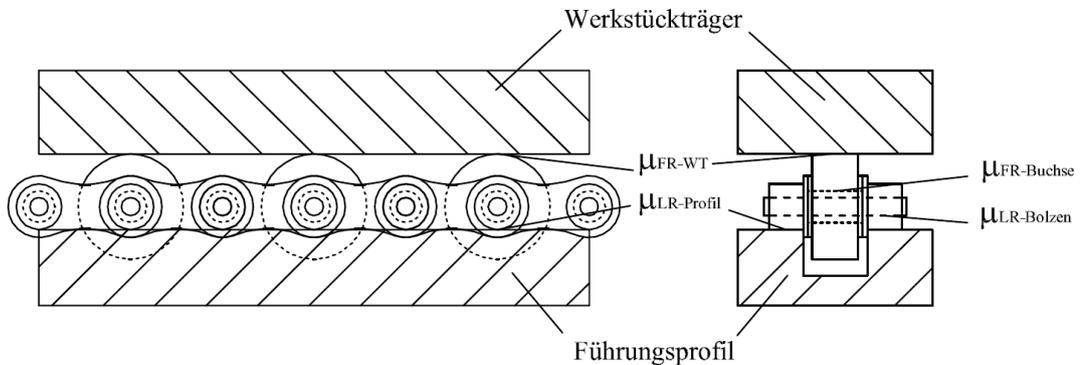


Abb. 4.5: Reibpaarungen im System "Kette"

### Laufrolle-Führungsprofil:

Die auf dem Bolzen gelagerte Laufrolle rollt während des Fördervorganges auf dem Führungsprofil ab und führt dadurch im Idealfall zur Rollreibung. Dieser ideale Zustand kann sich aber schnell nach dem Einlauf des Systems durch Verschleiß an den Komponenten ändern. Zusätzlich spielt die Kettenschmierung hierbei eine entscheidende Rolle, da eine schlecht geschmierte und stark überbelastete Kette zu erhöhtem Verschleiß des Führungsprofils bzw. der Laufrolle führen kann. Dadurch verlieren einzelne Rollen eventuell Kontakt zum Profil und es wirkt teilweise Gleitreibung, welche um den Faktor 10 höher sein kann. [Wol11] Somit ist es möglich, dass mit zunehmenden Betriebsstunden die anfängliche Rollreibung immer mehr in Gleitreibung übergeht und dadurch die Temperatur der Laufrollen und des Profils stärker ansteigen und somit noch stärker verschleifen. Durch eine möglichst genaue Herstellung der Laufrollen und das Montieren der Ketten aus einer Fertigungscharge wird vom Hersteller bereits versucht diesen Effekt gerade zu Beginn der Laufzeit möglichst gering zu halten.

### Laufrolle-Bolzen:

Laufrolle und Bolzen bewegen sich im Förderzustand der Kette relativ zueinander. Hierbei tritt nach der Definition der Reibungsarten Gleitreibung auf. Aus umfangreichen Voruntersuchungen auf dem Gebiet der Tribologie [Wol11] hat sich gezeigt, dass der Wert der Gleitreibung  $\mu_{\text{gleit}}$  sich zum Rollreibungswert  $\mu_{\text{roll}}$  um bis zu Faktor 10 unterscheiden kann. Somit wird deutlich, dass die Reibpaarung Laufrolle-Bolzen einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Entwicklung der Kettenzugkraft als die Reibpaarung Laufrolle-Führungsprofil ausübt.

### Förderrolle-Werkstückträger:

Die hier auftretende Reibpaarung ist analog zu der Paarung Laufrolle-Führungsprofil zu bewerten. Es handelt sich um reine Rollreibung, die durch die unterschiedlichen Werkstoffe der Förderrollen bzw. des Werkstückträgers, wie unter 4.2.1 erwähnt, beeinflusst wird und sich ebenfalls durch eine ausreichende Schmierung noch positiv beeinflussen lässt. Als Reibbeiwerte für die Rollreibung lassen sich theoretisch je nach Werkstoffpaarung und Schmierstoff Werte von 0,01 - 0,03 ansetzen, wobei hier, gerade nach Initialschmierung der Kette, mit der unteren Grenze des Wertebereichs gerechnet werden sollte.

### Förderrolle-Buchse:

Auch hier lässt sich die Reibpaarung mit der Paarung von Laufrolle zum Bolzen vergleichen. Das tribologische System macht hierbei deutlich, dass bei der Paarung Förderrolle und Buchse mit dem Gleitreibwert gerechnet werden muss. Somit sind Werte von 0,1 bis 0,4 anzusetzen, welche im praktischen Versuch an einer Streckeneinheit später durch das Verhältnis der Rollendurchmesser übersetzt werden. In Kapitel 4.3.1 wird der Einfluss der Rollendurchmesser genauer untersucht.

Neben diesen Reibpaarungen gibt es noch einige zusätzliche Reibpaarungen im System. Die Abbildung 4.6 zeigt schematisch die Komponenten einer Förderstrecke, welche zusätzlich in Kontakt zur Kette stehen. An diesen Stellen tritt somit zusätzliche Reibung auf.



Abb. 4.6: Reibpaarungen im System

### Antrieb:

Hier schwenkt das Kettengelenk bzw. das Kettenglied beim Erreichen des ersten Kettenradzahnes von der linearen Bahn in die radiale Umlaufbahn des antreibenden Kettenrades. Die Gelenkbewegung erfolgt unter voller Belastung der zu übertragenden Zugkraft. Die Gelenkbewegung ergibt sich zu folgender Formel (4.1):

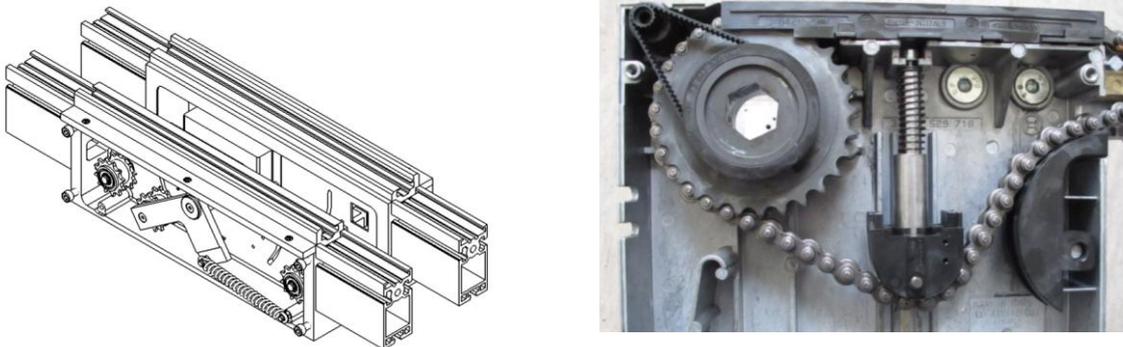
$$\alpha = \frac{360}{\text{Zähnezahl}} \quad (4.1)$$

Der Einlauf ins treibende Kettenrad ist als kritischster Punkt für das Kettengelenk im System zu sehen, da hier die höchste Zugkraft wirkt. Im Leertrum der Kette läuft die Kette danach nahezu ohne Zugkraft weiter. Diese baut sich dann im Lastrum des beladenen Systems wieder auf bis sie ihr erneutes Maximum am Antriebskettenrad erreicht.

Im Gegensatz zu Antriebsketten sind die Kettenglieder dieser kritischen Stelle nur recht selten ausgesetzt, weil hierbei mit deutlich langsamerer Kettengeschwindigkeit gefahren wird. So kann es durchaus vorkommen, dass bei langen Förderstrecken diese Stelle nur einmal pro Minute oder seltener durchfahren wird. Die hier auftretenden Gelenkflächenpressungen werden unter Punkt 4.3.3 näher betrachtet.

### **Kettenspanner:**

Wie in jedem Kettensystem wird auch in Staurollenkettanlagen ein Kettenspanner benötigt. Er spannt die Kette und gleicht eventuelle Kettenlängung aus. Kettenspanner gibt es in den unterschiedlichsten Ausführungen. Oftmals werden Federn eingesetzt, um die benötigte Vorspannkraft zu erzeugen. Die folgende Abbildung zeigt zwei Kettenspannerarten.



**Abb. 4.7:** Arten von Kettenspannern [Sch10]

Um hierbei den Reibbeiwert so gering wie möglich zu halten, werden entweder Kugellager oder Gleitstücke benutzt, welche möglichst verschleißarm sind. Diese spannen die Ketten durch das Drücken auf die Laufrollen der Staurollenkette. Die Förderrollen bleiben hierbei unbelastet. Somit sind am Kettenspanner wieder die Bestandteile der Rollreibung zwischen Laufrolle und Gleitstück und der Gleitreibung zwischen Laufrollen und Bolzen anzusetzen. Wie oben erwähnt ist der Gleitreibungsanteil deutlich größer zu berücksichtigen.

**Gleitstück/Umlenkung:**

Nach dem Kettenspanner muss die Kette zunächst wieder in die Unterseite des Führungsprofils geführt werden. Dies geschieht durch Gleitstücke, wobei es nochmals zu auftretender Reibung kommt. Hierbei werden analog zum Gleitstück am Kettenspanner die Laufrollen wieder beansprucht. Diese Beanspruchung erfolgt nochmals in der Umlenkung des Kettensystems. Dort wird ebenfalls immer mehr mit Gleitstücken gearbeitet, um die kostenintensiveren Varianten mit gelagertem Kettenrad abzulösen.

*4.2.3. Experimentelle Untersuchungen*

Wie unter 4.2 beschrieben, ist besonders der Reibwert zwischen der Förderrolle bzw. der Laufrolle und der Buchse bzw. des Bolzens sehr schwer zu ermitteln. Um diesen Reibwert jedoch exakter bestimmen zu können, wurden die Reibwerte nach dem Pendelprinzip durch einen Versuchsstand ermittelt. Grundlage für diese Ermittlung bildet die Aussage, dass die potentielle Energie zum Großteil durch die Reibarbeit von Schwingung zu Schwingung umgewandelt wird. Der zusätzliche Einfluss des Strömungswiderstandes kann als vernachlässigbar angenommen werden, weil dieser nach mathematischer Überprüfung im ungünstigsten Fall lediglich ca. 3 % der potentiellen Energie umwandelt. Ausgegangen wird von einer laminaren Strömung. [Bei01][Dob03][Ris11]

*Funktionsweise:*

Das Innenglied der Kette wird fest eingespannt. Durch eine Vorrichtung ist es möglich, die auf der Buchse des Kettengliedes angeordnete Förderrolle an ein starres Pendel mit der Länge  $l_p$  mit Schwungmasse  $m$  zu befestigen. Die Bewegung des Masseklotzes wird während des Schwingprozesses dauerhaft mit einem Lasertriangulationssensor gemessen und kann anschließend ausgewertet werden. Die Abbildung 4.8 zeigt das Funktionsprinzip des Pendels mit den dort definierten Kenngrößen.

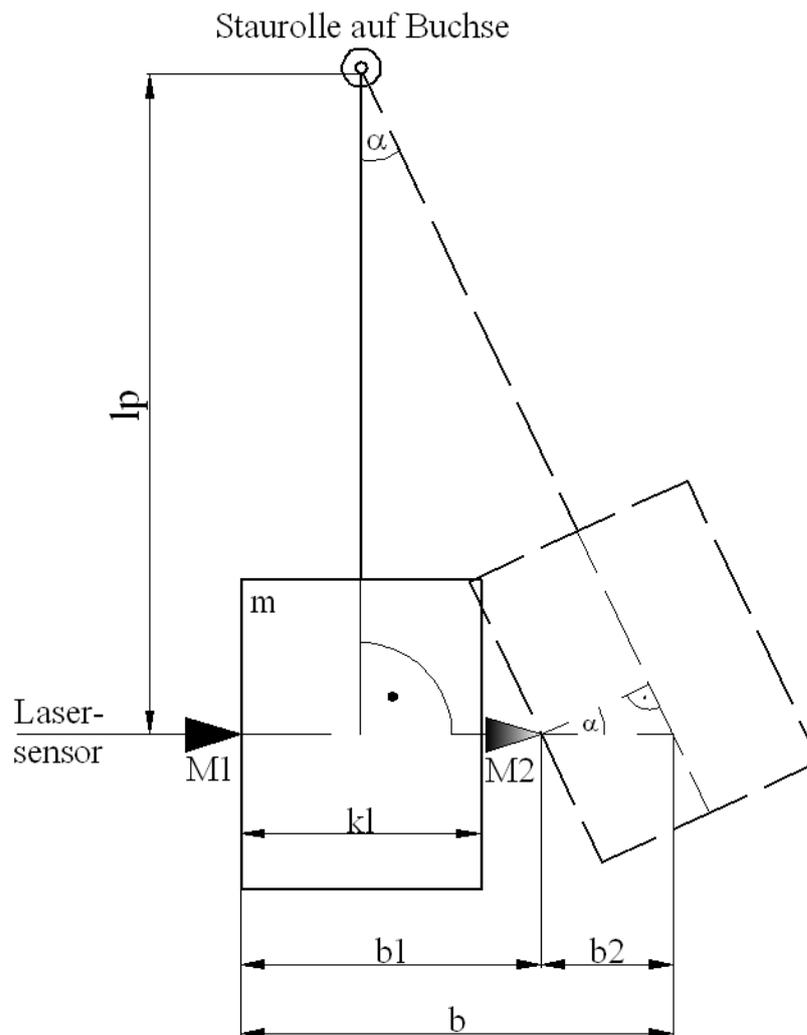


Abb. 4.8.: Funktionschema Pendel

Um den Reibbeiwert zu ermitteln sind zunächst einige Zusammenhänge zu definieren:

Änderung Reibenergie  $\Delta W_r$ :

$$\mathbf{W}_r = \mathbf{F}_r \cdot s_r \quad (4.2)$$

$$\mathbf{F}_r = \mu \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{g} \quad (4.3)$$

$$s_r = \frac{\Delta\alpha \cdot d_{\text{Buchse}}}{2} \quad (4.4)$$

Änderung pot. Energie  $\Delta W_{\text{pot}}$ :

$$\Delta W_{\text{pot}} = \Delta h \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{g} \quad (4.5)$$

$$\Delta h = (l_p - \cos(\alpha_1) \cdot l_p) - (l_p - \cos(\alpha_2) \cdot l_p) \quad (4.6)$$

Nach dem Gleichsetzen der Reibenergie mit der potentiellen Energie lässt sich die Formel nach  $\mu$  umstellen und vereinfachen.

$$\Delta W_r = \Delta W_{\text{pot}} \quad (4.7)$$

$$\mu = -2l_p \cdot \frac{\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2)}{(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot d_{\text{Buchse}}} \quad (4.8)$$

Da der Sensor während des Vorganges immer den Abstand der Seitenwand des Klotzes zum Sensor ermittelt, muss durch eine mathematische Formel der momentane Winkel  $\alpha$  ermittelt werden. Aus dem Funktionsschema in Abbildung 4.8 wird deutlich, dass die Länge  $b_1$  durch den Sensor ermittelt wird. Jedoch ist zur Ermittlung des Winkels die Länge  $b$  für weitere Betrachtungen von Interesse. Somit werden zunächst folgende Formeln aus den rechtwinkligen Dreiecken im Schema abgeleitet, wobei nach dem Lösen eines Gleichungssystems der aktuelle Auslenkungswinkel  $\alpha$  in Abhängigkeit der Messgröße  $b_1$  ermittelt werden kann:

Kleines Dreieck:

$$\cos(\alpha) = \frac{0,5 \cdot kl}{b_2} \quad (4.9)$$

Großes Dreieck:

$$\tan(\alpha) = \frac{b_1 + b_2 - 0,5 \cdot kl}{l_p} \quad (4.10)$$

nach  $b_2$ : 
$$b_2 = -b_1 + 0,5 \cdot kl + \tan(\alpha) \cdot l_p$$

Nach dem Einsetzen dieses Terms in die oben ermittelte Formel (4.9) entsteht eine Arcustangens Funktion mit zwei Argumenten, wobei zunächst eine Lösung herausgefiltert werden kann, welche mit der Hilfe von Formel (4.11) in eine einfache Arcustangens Funktion umgestellt werden kann.

$$\mathbf{atan2(x, y) = atan(y/x)} \quad (4.11)$$

Somit ergibt sich folgende komplexe Formel für  $\alpha$ :

$$\alpha(b_1) := \mathbf{atan} \left[ \frac{2 \cdot \frac{kl \cdot a^2 + 2 \cdot b_1 \cdot \left[ a^2 \cdot \left( a^2 + b_1^2 - b_1 \cdot kl \right)^{\frac{1}{2}} - kl \cdot \left[ a^2 \cdot \left( a^2 + b_1^2 - b_1 \cdot kl \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[ (-2) \cdot b_1 \cdot kl + kl^2 + 4 \cdot \left[ a^2 \cdot \left( a^2 + b_1^2 - b_1 \cdot kl \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \right] \cdot a}} \right] \quad (4.12)$$

Durch die Formeln (4.12) und (4.8) ist es möglich, den Reibbeiwert der Förderrolle bzw. der Laufrolle und der Buchse bzw. des Bolzens zu ermitteln. Ausgegangen wird dabei von kleinen Auslenkungen unter  $5^\circ$ . Um einen aussagekräftigen Wert zu erhalten, müssen je Wirkpaarung mehrere Versuche durchgeführt werden, wobei aus mindestens 10 Pendelvorgängen der Reib-

beiwert zu ermitteln ist. Bei der Auswertung sind die sinkenden Geschwindigkeiten und die auftretende Änderung des Reibwertes nach Stribeck [Bei01] mit zu beachten. Die folgende Abbildung 4.9 zeigt den Versuchsstand „Pendel“ mit eingespanntem ½ Zoll Kettenglied mit Kunststoffförderrolle.



**Abb. 4.9.:** Versuchsstand Pendel

Die Tabelle 4.1 zeigt das Versuchsprogramm am Pendel, bei dem Laufrollen und Förderrollen getrennt voneinander untersucht werden.

**Tab. 4.1:** Versuchsprogramm Pendel

	<b>½ Zoll geschmiert</b>	<b>¾ Zoll geschmiert</b>
Förderrollen aus Stahl	x	x
Förderrollen aus Kunststoff	x	x
Laufrollen	x	x

Anhand einer Beispielfunktion zeigt folgende Abbildung 4.10 die drei Bereiche einer mit dem Triangulationssensor ermittelten Messkurve. Zur Ermittlung der Reibwerte wird lediglich der Messbereich 2 herangezogen, bei dem wiederum immer ein Delta Alpha  $\Delta\alpha$  einer ganzen Schwingung verglichen wird.

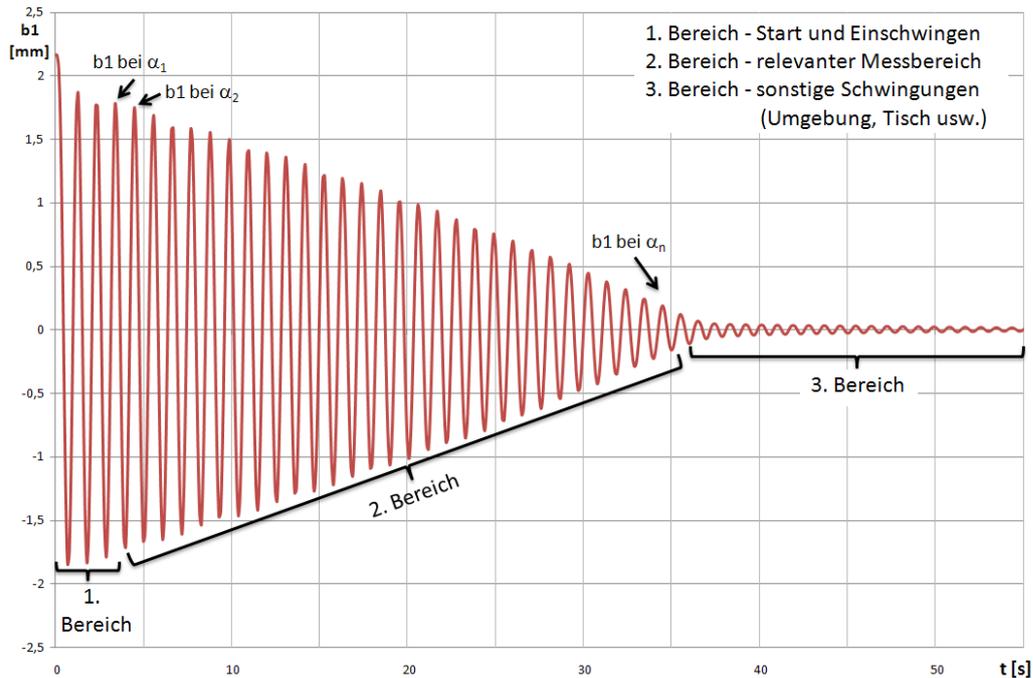


Abb. 4.10: Beispielfunktion der Messkurve am Pendel

### Ergebnisse:

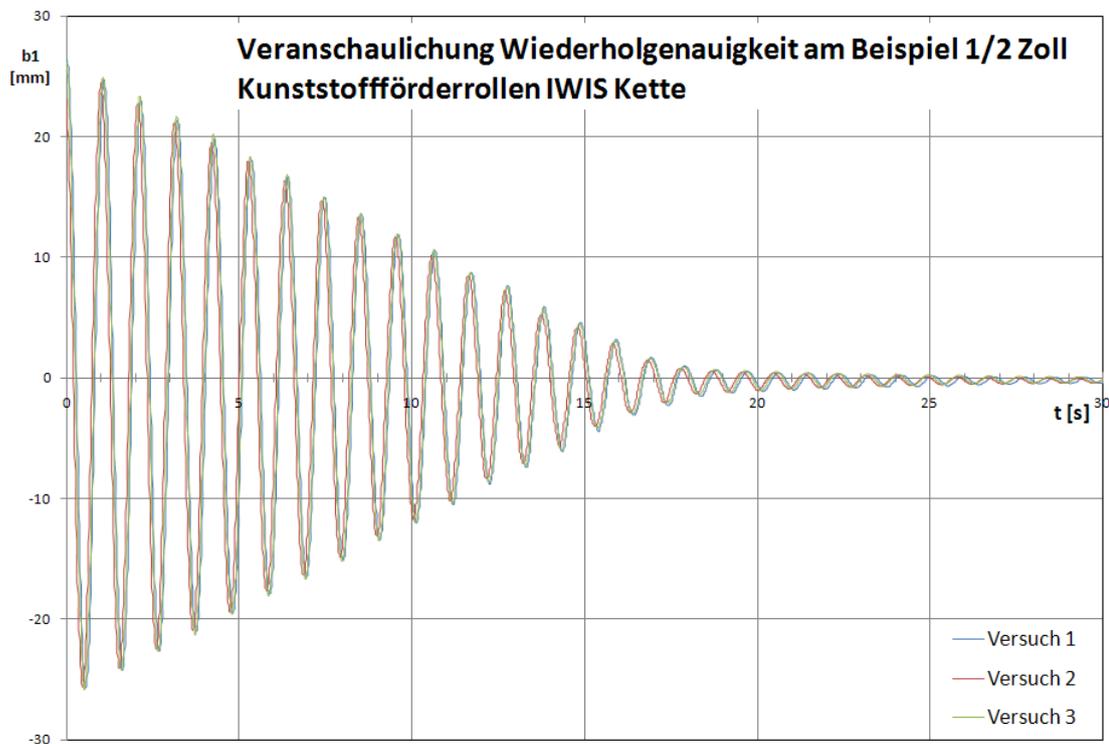
Durch die Anfertigung mehrerer Rollenaufnahmen für die unterschiedlichen Durchmesser konnte eine gute Fixierung am Pendel realisiert werden, wodurch aussagekräftige Funktionen ermittelt werden konnten. Nachfolgende Tabelle beinhaltet die durch den Pendelversuch ermittelten Reibwerte verschiedener Rollenarten und -werkstoffe.

Tab. 4.2: Reibwerte aus Pendelversuche

	<b>½ Zoll Geschmiert (Flexon)</b>	<b>½ Zoll Geschmiert (IWIS)</b>	<b>¾ Zoll Geschmiert (IWIS)</b>
Förderrollen aus Stahl	0,116	0,103	0,13
Förderrollen aus Kunststoff	0,09	0,122	0,209
Laufrollen	0,08	0,101	0,074

Da es sich bei dem System Rolle-Buchse eigentlich um ein geschmiertes System handelt, kann es zu einer Abhängigkeit des Reibwertes von der Geschwindigkeit kommen. Um dies zu kontrollieren wurden aus den ermittelten Werten im Bereich 2 aus Abbildung 4.10 immer mehrere Reibwerte ermittelt. Bei diesen Untersuchungen zeigte sich kein auswertbares Verhalten der Reibwerte in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit.

Nach einer ausreichenden Anzahl an Pendelversuchen je Förderrolle zum Nachweis der Wiederholgenauigkeit wurden von jeder Förderrolle mehrere Rollen getestet, um so ebenfalls die Reproduzierbarkeit ermitteln zu können. Das folgende Diagramm zeigt die Funktionen von drei nacheinander durchgeführten Pendelversuchen an 1/2 Zoll Förderrollen aus Kunststoff der Firma IWIS. Hierbei wird deutlich, dass eine hohe Wiederholgenauigkeit gegeben ist.



**Abb. 4.11:** Wiederholgenauigkeit im Pendelversuch am Beispiel

Zusätzlich zu mehreren Pendelvorgängen wurden ebenso mehrere Förderrollen getestet, um so die Reproduzierbarkeit und Schwankungen von Rolle zu Rolle nachzuweisen. Es wurde deutlich, dass es gerade durch unterschiedliche Fertigungschargen und bereits kleinere Fertigungs- und Schmierunterschiede bzw. -toleranzen zu Abweichungen im Reibwert und dadurch im Pendelverhalten kommen kann. Hierbei kommt es bis zu 15 % Unterschied im ermittelten Reibwert durch den Pendelversuch.

#### *Erste Verifizierung:*

Im Abschnitt 5 der Arbeit werden verschiedene Kettenversuche durchgeführt. Dadurch lassen sich die hier ermittelten Werte verifizieren. Eine erste Überprüfung der ermittelten Reibwerte aus den Pendelversuchen kann hier bereits durch frühere Staukraftermittlungen [Dom07] durchgeführt werden. Hier wurden vergleichende Versuche zum Verhalten von Kunststoff- bzw. Stahl-

förderrollen durchgeführt. Die folgende Abbildung zeigt zwei unterschiedliche Staukraftverläufe, welche an unterschiedlichen Förderrollen gemessen wurden.

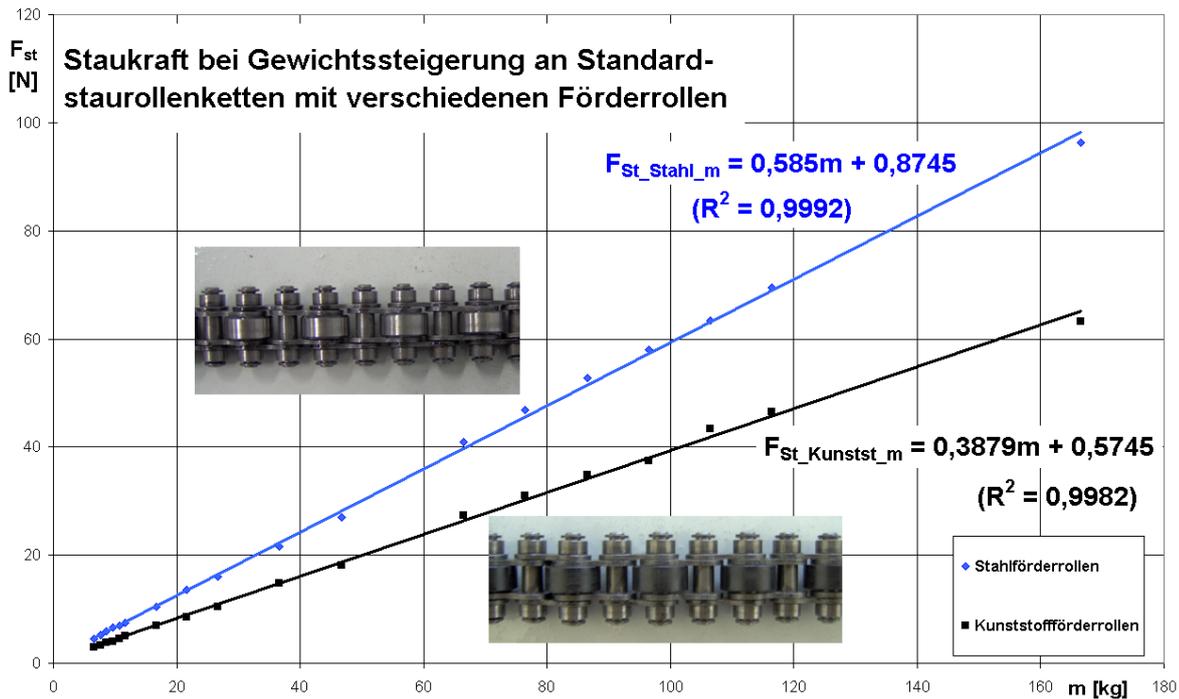


Abb. 4.12: Vergleich der Staukraft mit verschiedenen Förderrollen [Dom07]

Aus dem Anstieg der hier ermittelten Funktionen und dem Anstieg der Staukraft lassen sich hierbei die Reibbeiwerte für die Stahl- und die Kunststoffförderrollen (Flexon) ermitteln. Diese ergeben sich zum Quotient aus dem Anstieg und der Fallbeschleunigung  $g$ :

$$\mu = \frac{\text{Anstieg}}{g} \quad (4.13)$$

$$\mu_{\text{Stahl-Flexon}} = \frac{0,585}{g} = \underline{\underline{0,0596}}$$

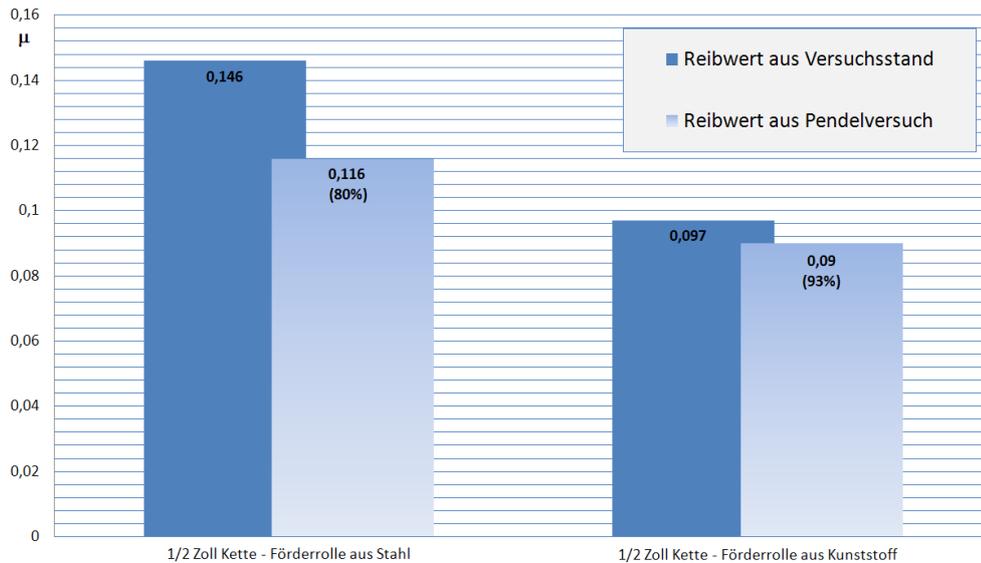
$$\mu_{\text{Kst-Flexon}} = \frac{0,3879}{g} = \underline{\underline{0,0395}}$$

Da es sich in den Versuchen um eine Staukraftmessung am Werkstückträger handelt, welcher sich auf den Förderrollen befindet, ist hierbei noch als wirkender Hebel das Verhältnis von Innendurchmesser zu Außendurchmesser zu berücksichtigen. (siehe Abschnitt 4.3) Somit ergeben sich die Reibbeiwerte zwischen Förderrolle und Buchse zu folgenden Werten:

$$\mu_{\text{Stahl-Flexon}} = \underline{\underline{0,146}}$$

$$\mu_{\text{Kst-Flexon}} = \underline{\underline{0,097}}$$

Das folgende Diagramm zeigt zum Vergleich dazu die ermittelten Reib- bzw. Reibbeiwerte aus den Pendelversuchen:



**Abb. 4.13:** Vergleich Reib- bzw. Reibbeiwerte (Versuchsstand/Pendelversuch)

Beide Werte aus den Pendelversuchen sind geringer als die Versuche aus praxisnahen Untersuchungen am Versuchsstand. Dies lässt sich auf die vereinfachte Messung am Pendel zurückführen. So wird dort z.B. nur die reine Reibung zwischen Rolle und Buchse ermittelt, ohne den Reibanteil zwischen Rolle und Lasche der Kette mit zu berücksichtigen, welche sporadisch am Versuchsstand je nach Rollenposition beim Einlauf unter dem Werkstückträger auftreten. Ebenso enthalten die Reibbeiwerte am Versuchsstand noch den Anteil der Rollreibung, welcher in der Staukraftbetrachtung am Pendel nicht berücksichtigt wird.

Somit liegen die ermittelten Reibbeiwerte aus dem Pendelversuch etwas unter den realen Reibbeiwerten aus dem praxisnahen Versuch am kompletten Staurollenkettensystem, wobei die Vorteile im einfachen Versuchsaufbau und in der problemlosen Versuchsdurchführung liegen. Durch diese Erkenntnis können zukünftig Eigenschaften von Staurollenkettensystemen deutlich schneller ermittelt werden. Somit können geometrische und werkstoffseitige Optimierungsideen am Pendel schnell auf ihre zu erwartenden Kräfte überprüft werden, ohne erst einen kompletten Versuchsstand bauen zu müssen.

Zu beachten gilt hierbei, dass es sich bei der Ermittlung am Pendel nur um eine Momentanbetrachtung der Reibpartner handelt. Über Aussagen bei Dauerbelastung des Systems können hierbei keine Schlussfolgerungen getroffen werden.

### 4.3. Kräfteanalyse

Die für die Auslegung von Staurollenkettensystemen wichtigste Kraft ist neben der Staukraft besonders die Zugkraft innerhalb der Ketten. Weiterhin sind Pressungen wichtige Kenngrößen für die Auslegung der Ketten.

### 4.3.1. Staukraft

Als Staukraft ist die Kraft zu verstehen, die benötigt wird, um den Bewegungszustand der Fördergüter zu verändern. Die Förderrollen beginnen sich zu drehen. So ist diese Kenngröße auch für den Anwender von großem Interesse. Durch eine geringere benötigte Staukraft lassen sich Werkstücke einfacher stauen und verschieben. Hinzu kommt, dass die Staukraft sich direkt auf die Auslegung der Kettenantriebe auswirkt. Um hier energiesparend auslegen zu können, sollte eine möglichst geringe Staukraft angestrebt werden.

Die Staukraft besteht aus zwei verschiedenen Reibanteilen innerhalb der Ketten. So wirkt zwischen dem Werkstückträger und der Förderrolle im Staubetrieb reine Rollreibung. Zu dieser Rollreibung kommt ein deutlich größerer Reibanteil zwischen Buchse und Förderrolle. Hierbei handelt es sich um eine saubere Gleitreibung. Es ist das Verhältnis des Rolleninnenradius zum Außenradius zu beachten, weil die Staukraft am Außenradius der Rolle aufgebracht werden muss. Innerhalb der Arbeit wird dieses Verhältnis als Rollenübersetzung der Förderrollen  $i_{FR}$  bzw. der Laufrollen  $i_{LR}$  bezeichnet.

$$i_{FR} = \frac{r_{i-FR}}{r_{a-FR}} \quad (4.14)$$

Die Abbildung 4.14 verdeutlicht die zwei Reibanteile und zeigt den Einflussfaktor der Rollenübersetzung.

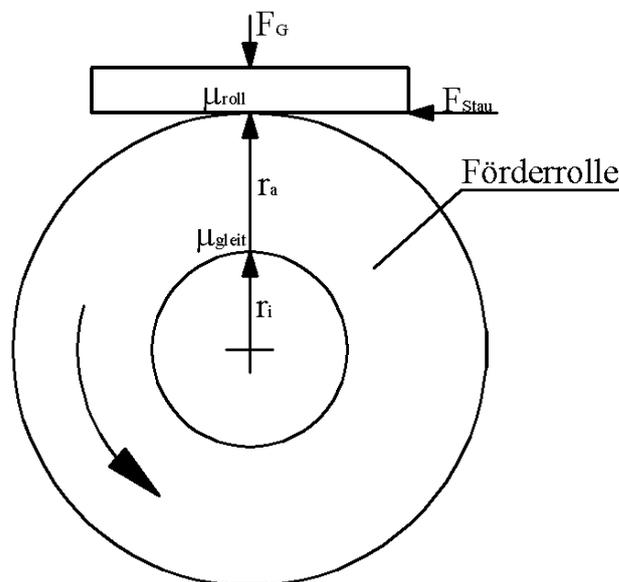


Abb. 4.14: Rollenübersetzung an der Förderrolle

Dadurch ergibt sich die Staukraft zu folgender Formel, welche neben beiden Teilen der Reibung auch das Rollenverhältnis und die Anzahl der tragenden Förderrollen mit beinhaltet.

$$\mathbf{F}_{\text{Stau}} = \mu_{\text{roll}} \cdot \mathbf{m}_{\text{FG}} \cdot \mathbf{g} + \mu_{\text{gleit}} \cdot \mathbf{i}_{\text{FR}} \cdot \mathbf{m}_{\text{FG}} \cdot \mathbf{g} \quad (4.15)$$

$$\mathbf{F}_{\text{Stau}} = \mathbf{Rollreibungsanteil} + \mathbf{Gleitreibungsanteil} \quad (4.16)$$

In weiteren Betrachtungen der Staukraft wird der Rollreibungsanteil vernachlässigt, weil die Gleitreibung um bis zu ca. Faktor 10 höher ist und damit den Hauptanteil der Staukraft bildet. Dies zeigt unter anderem die Veröffentlichung [Wol11] in Abbildung 4.15 in der die Reibwerte einer Kette auf einer Gleitschiene mit Rollelementen verglichen werden.

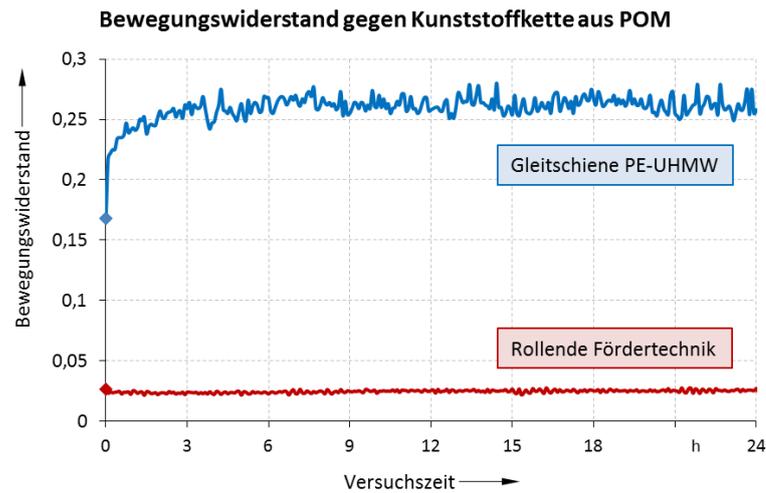


Abb. 4.15: Vergleich des Bewegungswiderstandes der Gleitreibung zu Rollreibung [Wol11]

Somit kann mit folgender Formel gerechnet werden.

$$\mathbf{F}_{\text{Stau}} = \mu_{\text{gleit}} \cdot \mathbf{i}_{\text{FR}} \cdot \mathbf{m}_{\text{FG}} \cdot \mathbf{g} \quad (4.17)$$

#### 4.3.2. Zugkraft

Die Zugkraft setzt sich aus verschiedenen Kraftkomponenten zusammen. Sie beinhalten neben dem Anteil der Staukraft (nur im Staubetrieb) und dem der Führungskräfte, welche die äußeren Laufrollen im Profil erzeugen, auch die Gelenkkkräfte beim Einknicken der Kettenglieder und sonstige Verlustkräfte. Diese Verlustkräfte sind zusätzliche Kräfte durch Reibungen in Antriebs-, Umlenkstation und am Kettenspanner des Systems.

$$\mathbf{F}_{\text{Zug}} = \mathbf{F}_{\text{Stau}} + \mathbf{F}_{\text{Führ}} + \mathbf{F}_{\text{Gelenk}} + \mathbf{F}_{\text{sonst}} \quad (4.18)$$

Der Anteil der Staukraft auf die Zugkraft lässt sich nahezu analog zu den Betrachtungen unter 4.3.1 ermitteln. Jedoch geht die Formel von einer reinen Belastung der Rolle durch das Fördergut aus. In der Anwendung wird die Kette jedoch durch den Antrieb zusätzlich noch in Förderrichtung gezogen. Hinzu kommt, dass der Innendurchmesser der Förderrolle immer etwas größer als

der Außendurchmesser der Buchse ist. Das hier entstandene Spiel und die zusätzliche Zugkraft in Förderrichtung führen zur Verschiebung der Wirkstelle der Reibpartner und erzeugen eine resultierende Kraft, welche in die Formel (4.18) als eigentliche Belastung eingesetzt werden muss. Die Abbildung 4.16 zeigt diese Verschiebung und verdeutlicht die resultierende Kraft aus Gewichtskraft und wirkender Zugkraft.

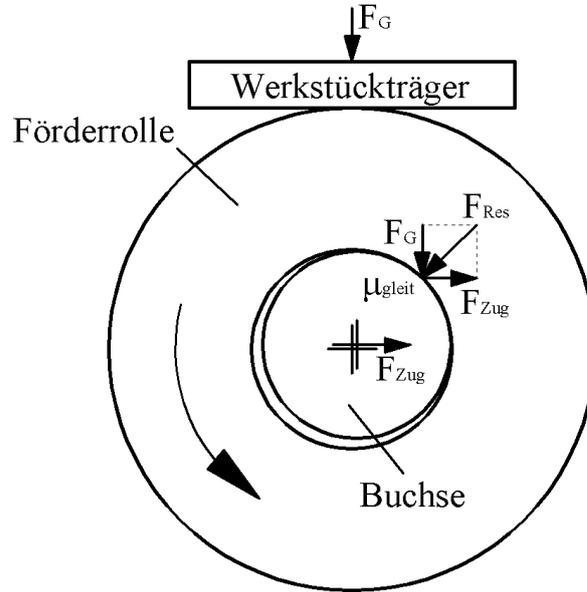


Abb. 4.16: Kräfte an Förderrolle zur Ermittlung der Zugkraft

Somit ergibt sich die resultierende Kraft und somit der Anteil der Staukraft, welcher zur Ermittlung der Kettenzugkraft benötigt wird zu folgenden Formeln.

$$\mathbf{F}_{\text{Res}} = \sqrt{\mathbf{F}_{\text{G}}^2 + \mathbf{F}_{\text{Zug}}^2} \quad (4.19)$$

$$\mathbf{F}_{\text{Stau-Z}} = \mu_{\text{gleit}} \cdot \mathbf{i}_{\text{FR}} \cdot \mathbf{F}_{\text{res}} \quad (4.20)$$

Da die Zugkraft der Kette vor dem Antriebskettenrad am höchsten ist, wirkt hier auch die größte resultierende Kraft und die Verschiebung des Wirkungspunktes der Gleitreibung verschiebt sich mit steigender Anzahl an Förderrollen (belastet durch Fördergut) in Antriebsrichtung immer weiter nach unten. Da das Verhältnis Gewichtskraft zu Zugkraft im Normalfall sehr groß ist, wird sich die Staukraft aus Formel (4.20) kaum ändern. Es kann also mit der Staukraft aus Formel (4.17) gerechnet werden.

Einen weiteren Anteil der Zugkraft bilden die Führungskräfte der Laufrollen im System. Analog zu den Untersuchungen an den Förderrollen herrschen hierbei wieder zwei verschiedene Reibarten. Zwischen dem Führungsprofil und der Außenfläche der Laufrollen tritt Rollreibung auf. Der deutlich einflussreichere Reibanteil der Gleitreibung findet zwischen den Bolzen der Kette und

den aufgebracht Laufrollen statt. Er ergibt sich folgende Formel (4.21) in der zur Vereinfachung die Rollreibung wieder vernachlässigt werden kann.

$$\mathbf{F}_{\text{Führ}} = \mu_{\text{roll}} \cdot \mathbf{F}_G + \mu_{\text{gleit}} \cdot \mathbf{i}_{\text{LR}} \cdot \mathbf{F}_G \quad (4.21)$$

Aufgrund der im Vergleich zu Antriebskettensystemen extrem langsamen Kettengeschwindigkeiten und längeren Kettenlängen findet die Gelenkbewegung unter Last bei Staurollenkettensystemen nur sehr selten statt. Hierbei kommt es an der Antriebsstation zum Einknicken des Ketten gelenkes und damit zur Gleitreibung zwischen Bolzen und Buchse.

Nahezu ohne messbare Auswirkung sind die sonstigen Kräfte im System. Diese entstehen beim Durchlaufen der Kette vom Kettenspanner und von den verschiedenen Umlenkungen. Da diese Kräfte unabhängig vom Fördergewicht sind, steigen diese auch nicht mit Erhöhung der Last an und wirken sich nur sehr gering auf die Zugkraft der Kette aus.

Bei der wartungsfreien Kunststoff-Staurollenkette fällt aufgrund des eingesetzten Gleitschuhs die Rollenübersetzung  $i_{\text{LF}}$  weg. Es kommt hierbei zu direkter Gleitreibung zwischen Schuh und Führungsschiene, wodurch mit deutlich höheren Zugkräften zu rechnen ist.

#### 4.3.3. Gelenkflächenpressung

Die Gelenkflächenpressung ist bei der Auslegung von Ketten eine wichtige Kenngröße. Nach der Auswahl einer entsprechenden Kette ist eine rechnerische Kontrolle der unter Last zu erwartenden Gelenkflächenpressung  $p_{\text{BB}}$  zwischen Bolzen und Buchsen notwendig. Bei Staurollenketten kommen zu dieser Pressung zusätzlich noch die Pressungen zwischen Förderrolle und Buchse und zwischen Laufrolle und Bolzen hinzu. Nachfolgend sind die Formeln zur Nachrechnung der zu erwarteten Pressungen dargestellt.

Pressung zwischen Bolzen und Buchse:

$$p_{\text{BB}} = \frac{\mathbf{F}_{\text{Zug}} \cdot 100}{d_{\text{bolzen}} \cdot \left( d_b + 2 \cdot b_{\text{lasche}} \right)} \quad (4.22)$$

Pressung zwischen Förderrolle und Buchse:

$$p_{\text{FRB}} = \frac{\mathbf{F}_{\text{Rolle}} \cdot 100}{d_{\text{Buchse}} \cdot b_{\text{FR}}} \quad (4.23)$$

Pressung zwischen Laufrolle und Bolzen:

$$p_{\text{LRB}} = \frac{F_{\text{Rolle}} \cdot 100}{d_{\text{Bolzen}} \cdot b_{\text{LR}}} \quad (4.24)$$

Die hierbei angesetzte Kraft pro Rolle  $F_{\text{Rolle}}$  ergibt sich aus dem anteiligen Kettengewicht und der anteiligen Belastung des Fördergutes auf eine Rolle. Aus den Gleichungen ermittelte Pressungen müssen unter den zulässigen Pressungen liegen, um so möglichst lange Laufzeiten realisieren zu können. Nur eine geringe Anzahl von Kettenherstellern geben hierbei zulässige Gelenkflächenpressungen an. Diese beruhen jedoch nach eigenen Aussagen lediglich auf Erfahrungswerte, welche nicht über Versuche ermittelt bzw. verifiziert worden sind. Einen festen Wert für diese Grenze anzugeben erweist sich wegen der hohen Anzahl an Einflussfaktoren z.B. Kettengeschwindigkeit, Schmiermittel, Schmierzustand, Umgebungstemperatur usw. als sehr schwer. Die geschmierte Paarung Buchse aus Stahl und Bolzen aus Stahl wird von der Firma Brandau Gelenkketten GmbH [Bra07] bei 0,5 m/s Kettengeschwindigkeit beispielweise mit 2500 N/cm<sup>2</sup> angegeben. Bei Rolle zu Bolzen werden hier 800 N/cm<sup>2</sup> als zulässige Pressung angesetzt. In Staurollenkettensystemen bewegen sich die Ketten mit langsamerer Geschwindigkeit. Dadurch sind hier höhere zulässige Pressungen vorstellbar.

## 4.4. FEM-Analyse

### 4.4.1. Voraussetzungen

Im Vorfeld von praktischen Untersuchungen werden in der Regel bereits erste Analysen mittels einer Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt.

Die FEM ist ein numerisches Verfahren zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen. Mittlerweile ist sie ein weit verbreitetes Berechnungsverfahren und ist das Standardwerkzeug der Festkörpersimulation. Zunächst wird ein Berechnungsgebiet in eine beliebig große Anzahl von finiten (endlichen) Elementen unterteilt. Innerhalb dieser Elemente werden verschiedene Ansatzfunktionen definiert. Setzt man diese Funktionen in die zu lösende Differentialgleichung ein, erhält man zusammen mit Anfangs-, Rand- und Übergangsbedingungen ein Gleichungssystem, welches numerisch gelöst wird. Mit steigender Anzahl von finiten Elementen steigt auch die Größe des zu lösenden Gleichungssystems. [Frö95][Kno91][Mül64][Ran97]

Aktuelle Konstruktionsprogramme verfügen mittlerweile nahezu alle über ein extra FEM Modul, welches eine Simulation des konstruierten Bauteiles direkt nach Fertigstellung erlaubt. So können bereits im Vorfeld mögliche Spannungsspitzen, thermisches Verhalten usw. detektiert werden.

In dieser Arbeit wurden zwei Simulationsarten durchgeführt. Neben der trivialen Simulation eines Zugversuches wird ebenfalls das thermische Verhalten der Ketten im Versuchsstand simuliert. Es werden folgende Randbedingungen angesetzt.

Zugversuch:

- ½ Zoll Staurollenkette
- Förderrollen aus Stahl
- angesetzte Zugkraft: 9000 N (nach ISO606 [DIN02])
- reale Kontaktbedingungen der Einzelkomponenten
- statisch-mechanische Analyse

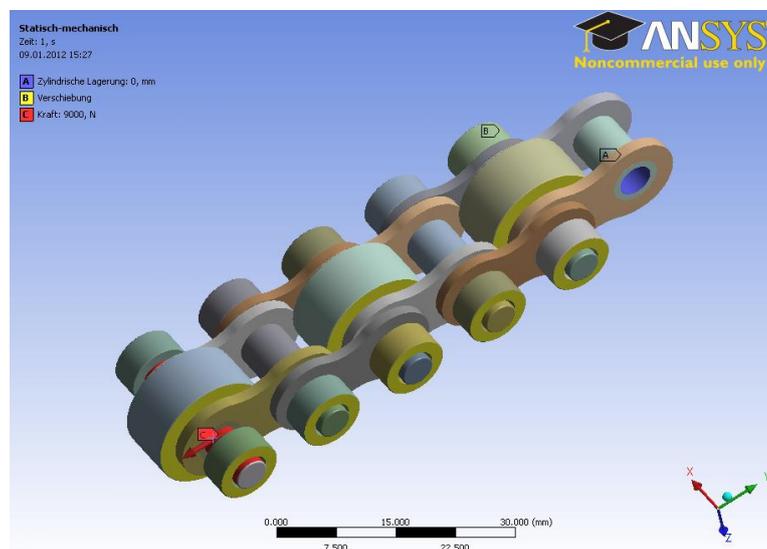


Abb. 4.17: FEM Modell Zugversuch

Thermisches Verhalten:

- ½ Zoll Staurollenkette
- Förderrollen aus Stahl und Kunststoff
- Laufschiene aus Stahl und Kunststoff
- Staubetrieb der Kette
- Raumtemperatur von 22 °C
- reale Kontaktbedingungen der Einzelkomponenten
- Kettengeschwindigkeit von 0,3 m/s
- thermisch-transiente Analyse

Alle Simulationen wurden mit der Software ANSYS durchgeführt.

#### 4.4.2. Ergebnisse

##### Zugversuch:

Die Simulation eines Zugversuches stellt für aktuelle PC-Systeme keinen größeren Rechenaufwand dar und lässt sich bereits nach einigen Stunden Rechenzeit schnell lösen. An den folgenden Abbildungen sind deutlich Spannungsspitzen zu erkennen. Hierbei zeigt sich, dass die höchsten Spannungsspitzen innerhalb der Außenlaschen der Ketten zu finden sind. Diese erhöhten Spannungen können dazu führen, dass die Ketten bei erhöhter Kraft zerstört werden. In dem experimentellen Versuch unter Abschnitt 5.5.1 zeigt sich dieses Verhalten ebenfalls im statischen Zugversuch.

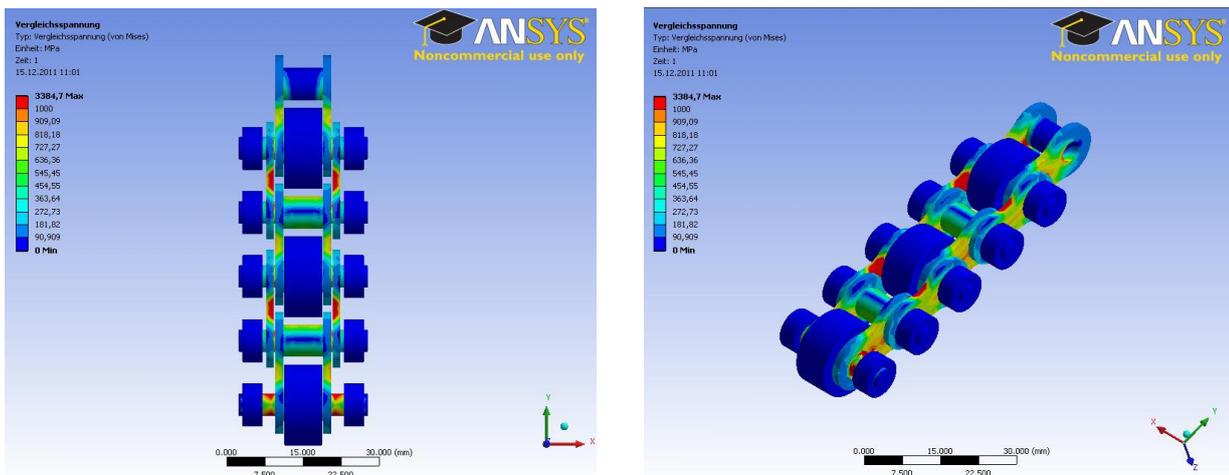


Abb. 4.18: Simulierte Spannungsverteilung im Zugversuch

Durch verschiedene konstruktive Maßnahmen wie z.B. die Vergrößerung der Außenlasche kann eine Verteilung der Spannungen in der Lasche möglich sein, um somit die Bruchkraft der Kette noch zu erhöhen.

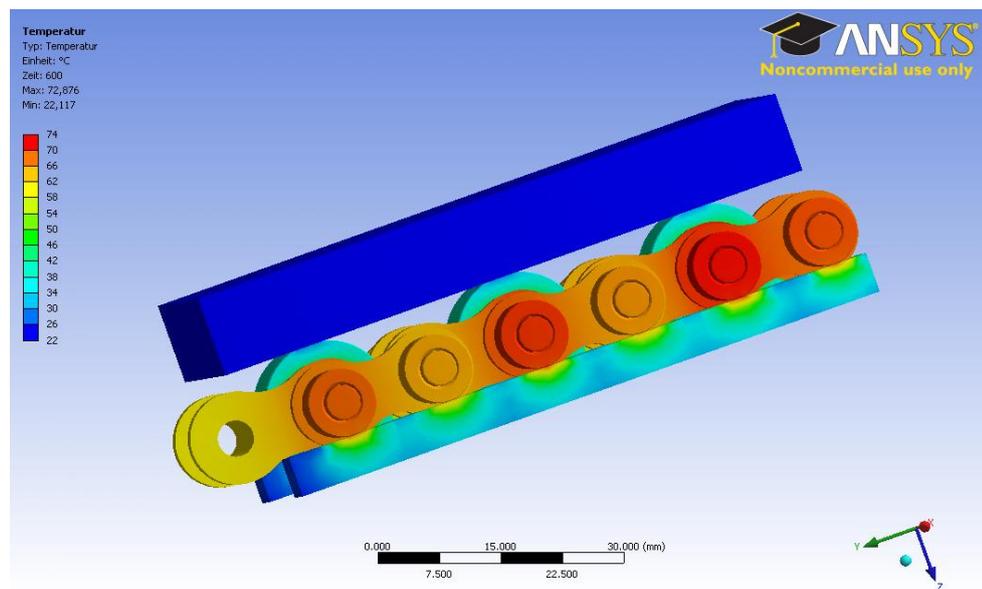
Zusätzliche Komponenten an der Staurollenkette bleiben beim reinen Zugversuch unbelastet, da diese auf Bolzen bzw. Buchse der Ketten mit einem minimalen Spiel aufgebracht sind. Dadurch behalten diese natürlich auch ihre Eigenschaften des Abrollens. Bei diesen Simulationen wird deutlich, dass durch die Bestimmung der Bruchkraft der Kette keinerlei Rückschlüsse auf die Lebensdauer der Staurollenkette in der Praxis zu ziehen sind, weil es im Zugversuch zu keinerlei Belastung der Förder- bzw. Laufrollen kommt.

##### Thermisches Verhalten:

Zur Simulation des thermischen Verhaltens der Staurollenkette wurde die thermisch-transiente Analyse angewendet. Hierbei ist es softwaretechnisch leider nicht möglich, eine Translation der Kette mit zu simulieren. Somit zeigen die folgenden Ergebnisse lediglich den thermischen Verlauf im System ohne die Temperatur noch auf die Laufschienen zu verteilen. Es entstehen auf dem Führungsprofil Temperaturbereiche, welche sich im laufenden Betrieb zu einem Tempera-

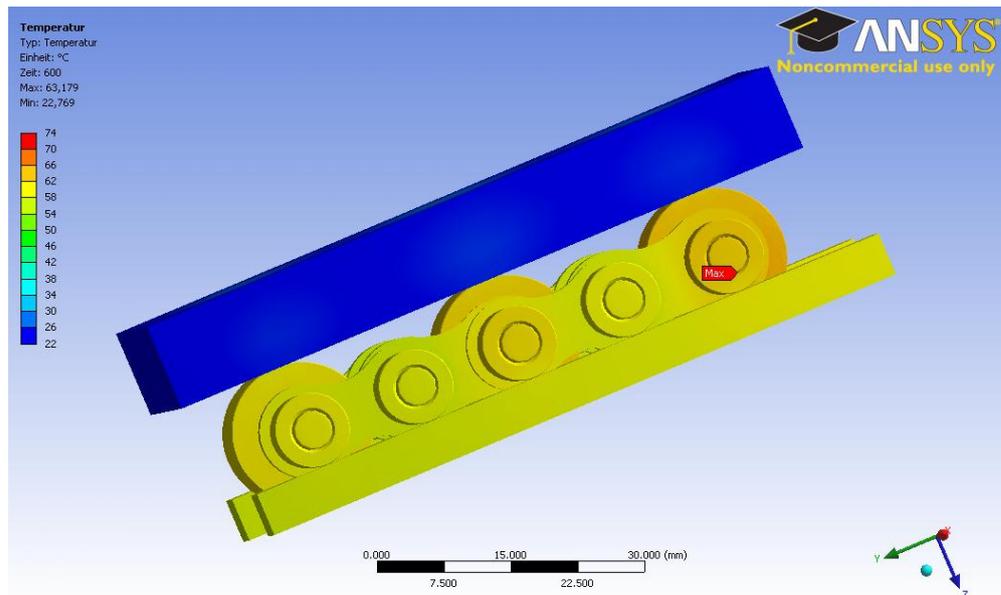
turband ausbreiten werden. Aufgrund der kleinen Kettenteilungen und langen Laufzeiten des Kettensystems ist jedoch von der gleichen absoluten Temperatur auszugehen.

Die Aufbringung der Wärmeströme im simulierten System ergibt sich über die unter 4.2.3 ermittelten Reibbeiwerte. Somit lassen sich diese mit Heranziehen der praktischen Versuche nochmals verifizieren. Die daraus entstandene Leistung lässt sich als Wärmestrom auf die Reibstellen im System anbringen. Es entsteht die größte Wärmeeintragung an den Stellen der Gleitreibung im System (Förderrolle-Buchse, Laufrolle-Bolzen). In alle simulierten Systeme wird die Strahlung an die Umgebung und die Konvektion der einzelnen Materialien berücksichtigt, um so die absolute Temperatur des Systems ermitteln zu können.



**Abb. 4.19:** Thermisches Verhalten bei Kunststoffschienen bzw. -rollen (FEM)

Die Abbildung 4.19 zeigt die entstandenen Temperaturen im Staurollenkettensystem mit Kunststoffführungsschienen und -förderrollen. Hierbei zeigt sich die geringe Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes und es entsteht ein großes Temperaturspektrum von 22 °C (angesetzte Raumtemperatur) bis maximal 74 °C. Das Maximum der Temperatur ist hierbei rechnerisch am Bolzen direkt unter der Förderrolle zu finden. Da diese Temperatur im laufenden System messtechnisch nur schwer zu ermitteln ist, müssen für den Vergleich sichtbare Komponenten herangezogen werden. Im sichtbaren Bereich der Kette haben die Innenlaschen und die Laufrollen des Systems die höchsten Temperaturen. Aufgrund der genau definierten Randbedingungen und der vorher ermittelten Reibbeiwerte aus den Pendelversuchen sind die angezeigten Temperaturen als absolut anzusehen. Innerhalb der Versuche können jedoch später durch unterschiedliche Faktoren (Fertigungstoleranzen, ungenaue Auflage der Güter usw.) Abweichungen auftreten.



**Abb. 4.20:** Thermisches Verhalten bei Stahlschienen bzw. -rollen (FEM)

Unter der Verwendung von hohen Förderlasten werden in der Praxis häufig Staurollenketten in Verbindung mit Stahlführungsschienen eingesetzt. Hierbei wird nach der Simulation schnell deutlich, dass die Temperaturverteilung in diesem „Stahlsystem“ viel schneller erfolgt. Aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes kann die Temperatur besser im System verteilt werden und die maximale Temperatur liegt deutlich unter der Maximalen des Stahl-Kunststoffsystems. Da geometrisch die Ketten sich nicht von der vorhergegangenen Simulation unterscheiden, ist auch hier wieder die maximale Temperatur unterhalb der Förderrolle direkt auf der Buchse zu finden.

Ebenso kommen in der Praxis Mischsysteme zur Anwendung. Besonders häufig werden hier Kunststoffführungsschienen in Verbindung mit Stahlförderrollen eingesetzt. Die Abbildung 4.21 zeigt ein solches simuliertes System. In dieser Materialkombination wird wieder deutlich weniger Temperatur über die Führungsschienen abgeleitet. Somit entstehen im System höhere Temperaturen, wobei diese analog zur vorherigen Simulation zwischen Förderrolle und Buchse zu finden sind.

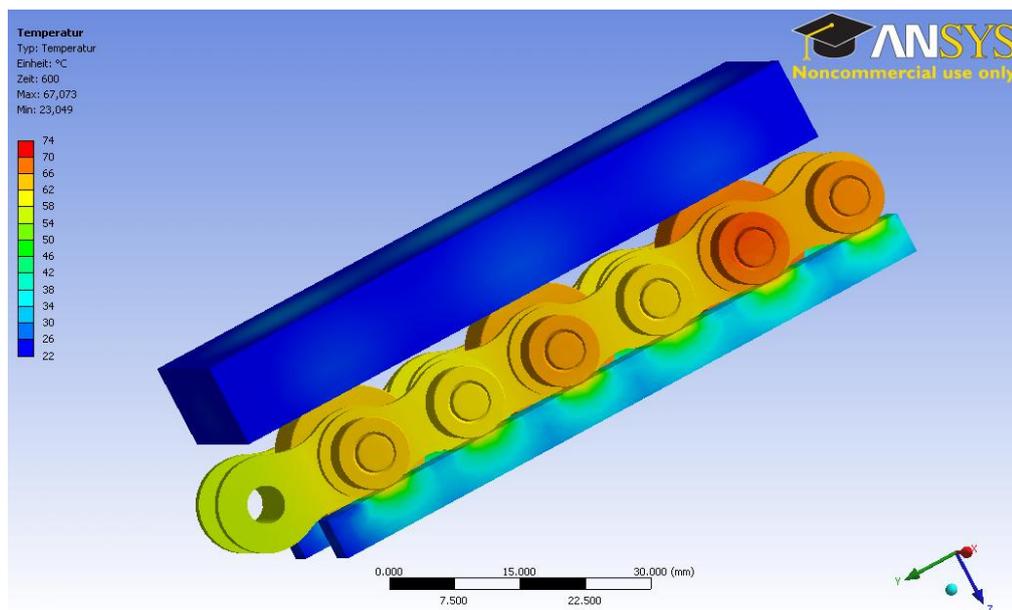


Abb. 4.21: Thermisches Verhalten bei Kunststoffschienen und Stahlrollen (FEM)

In allen simulierten Varianten ist der Werkstückträger thermisch nur sehr gering belastet. Lediglich direkt über den Förderrollen entsteht ein Temperaturband, welches sich durch die wirkende Rollreibung im Staubetrieb zwischen Förderrolle und Werkstückträger ausbildet. Kunststoffrollen sind hierbei durch ihre Wärmeleitfähigkeit zu bevorzugen. Bei der Verwendung von Stahlförderrollen wird die maximale Temperatur zwischen Förderrolle und Buchse schnell bis an die Oberfläche der Förderrolle abgeleitet und somit auch auf den Werkstückträger übertragen.

#### 4.5. Bewertung der Analysen

Durch die analytischen Untersuchungen wurde deutlich, dass im Staurollenkettensystem zahlreiche Kräfte auf die Kette bzw. die Systemkomponenten einwirken. Dies sind u.a. Gewichtskräfte des Gutes, Reibungskräfte zur Schiene und zum Gut und Schwenkkräfte die je nach Anwendung an verschiedenen Orten am Kettenglied angreifen. Die Kettenzugkraft stellt die Summe der Reibkräfte dar, die während eines Umlaufes durch das Führungssystem auf die Kette einwirken, und ist daher im Staurollenkettensystem die größte Kraft.

Mit dem Versuchsstand „Pendel“ konnten auf einfache und schnelle Art die Reibbeiwerte zwischen den verschiedenen Einzelelementen der Staurollenketten ermittelt werden. Dadurch wurden konkrete Werte ermittelt, welche mit durchgeführten Versuchen verglichen und dadurch verifiziert werden können. Erste Vergleiche mit vorangegangenen Versuchen zum Thema Staurollenketten konnten bereits den Reibbeiwert der Paarung Förderrolle-Buchse verifizieren.

Die Simulation des Zugversuchs zeigte auftretende Spannungsspitzen an den Außenlaschen der Staurollenketten. An den Stellen dieser Spitzen sollten somit die Ketten im statischen Zugver-

sich zerstört werden. Die durchgeführten Untersuchungen unter Punkt 5.5.3 bestätigen die Richtigkeit der durchgeführten FEM-Simulation.

Als deutlich aufwendiger stellte sich die Berechnung des thermischen Verhaltens heraus. Hierbei zeigt sich, dass es zu enormen Temperaturunterschieden bei unterschiedlichen Werkstoffkombinationen kommt. Besonders die Verteilung der Temperatur unterscheidet sich auffällig. In der Praxis wird diese Verteilung bei falscher Werkstoffwahl dazu führen, dass sich Führungsprofil und andere Komponenten stärker erwärmen. Zur Schonung der Kette ist eine Kombination zu wählen, welche die entstandene Wärme schnell ableiten kann, um so die Kettentemperatur auf Dauer im nicht kritischen Bereich zu halten.

Den Simulationen liegt ein Wärmeeintrag zugrunde, welcher durch die Reibbeiwerte aus den Pendelversuch unter 4.2.3 ermittelt wurde. Eine Erhöhung des Reibbeiwertes kann ungewollt während der Verwendung der Systeme durch unterschiedliche Einwirkungen erfolgen. Dies würde laut Simulation schnell zur Temperaturerhöhung der Komponenten führen, was sich wiederum auf den Verschleiß der Kette auswirken wird. Somit ist der Reibbeiwert während der Praxisanwendung möglichst gering zu halten, wobei man auf jeden Fall eine korrekte Nachschmierung und eine spanfreie Umgebung gewährleisten sollte.

## 5. Experimentelle Untersuchungen

### 5.1. Übersicht

Die durchgeführten Untersuchungen lassen sich in drei Gruppen einteilen. Hierbei wird nach den zu verwendeten Versuchseinrichtungen unterschieden:

1. Messung der Bruchkraft  $F_{\text{Bruch}}$  und Dauerfestigkeit  $F_D$  am Kettenprüfstand
2. Kurzzeitversuche am Versuchsstand zur Einflussermittlung von Kenngrößen
3. Dauerversuche am Versuchsstand zur Ermittlung der Dauerfestigkeit

Hierbei werden zunächst in Punkt 1 die Bruchkraft der zur Untersuchung gewählten Staurollenkettensystemen statistisch abgesichert ermittelt. Diese Kenngröße zeigt sich als Grundlage zur Ermittlung der aktuell zur Auslegung verwendeten Dauerfestigkeit am Kettenprüfstand nach ISO15654. [DIN04] Vergleichend zu diesen zeitlich sehr aufwendigen Ermittlungen werden bereits bekannte Dauerfestigkeiten von Rollenketten mit zum Vergleich herangezogen. Ein Vorteil dieser Art der Bauteilprüfung ist die geringere Anzahl und vor allem die bessere Kontrollierbarkeit der Einflussfaktoren wie Frequenz, Temperatur und Belastung der Kette gegenüber einem Versuchsförderer.

Durch Kurzzeitversuche im Punkt 2 werden der Einfluss unterschiedlicher Kenngrößen wie Kettengeschwindigkeit, Belastung usw. auf die Kettenzugkraft detektiert und erfasst. Dadurch entstehen Datenbanken, welche es ermöglichen, Staurollenkettensysteme nach den Anforderungen der Anwender auszulegen. Gleichzeitig lassen sich aus dem Vergleich der Staukraft mit dem auftretenden Drehmoment am Antrieb Rückschlüsse auf wirkende Reibbeiwerte ziehen, um somit das Verständnis des Systems deutlich zu erhöhen.

Im Punkt 3 werden an einer praxisnahen Förderstrecke mit Staurollenkettensystemen Versuche durchgeführt, um so die Dauerfestigkeit unter realen Betriebsbedingungen mit der Dauerfestigkeit aus Punkt 1 zu vergleichen und die Relevanz dazu zu ermitteln. Hierzu wurde ein Versuchsstand entwickelt, welcher mit Messtechnik ausgestattet wurde und so konzipiert ist, dass mehrere Kettengrößen unter hoher Belastung untersucht werden können. Da eine Vielzahl an zusätzlichen Kräften auftreten, ist hierbei die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Punkt 1 zu überprüfen. Der praxisorientierte Dauerversuch verdeutlicht die Vor- bzw. Nachteile der unterschiedlichen zur Untersuchung herangezogenen Staurollenkettensysteme und sorgt somit für eine optimale Auslegung solcher Systeme. Weiterhin werden Verschleißuntersuchungen am Komplettsystem vorgenommen.

## 5.2. Versuchsaufbau

### 5.2.1. Dynamisches Prüfsystem

Die Untersuchungen erfolgen auf der dynamischen Prüfmaschine 8501 der Firma Instron. Im Laufe der Jahre wurde die Maschine aufgerüstet und weist folgende technische Kenngrößen auf:

- maximale Kraft: +/-100 kN (dynamisch)
- Querhauptklemmung/verstellung: Hydraulisch
- Kolbenweg: +/- 50 mm
- Aufzeichnungsmöglichkeit von Weg/Zeitverläufen

Die Aufnahme des Prüfkörpers erfolgt über eine extra konstruierte Vorrichtung in der das Kettenrad der Staurollenkette aufgenommen wird. Somit kann der Doppelstrang der Ketten nach ISO15654 [DIN04] aufgenommen werden. Die Größe der Aufnahme ist so dimensioniert, dass alle Staurollenkettenarten bzw. -größen eingespannt werden können, um somit das zu testende Spektrum möglichst groß zu halten.

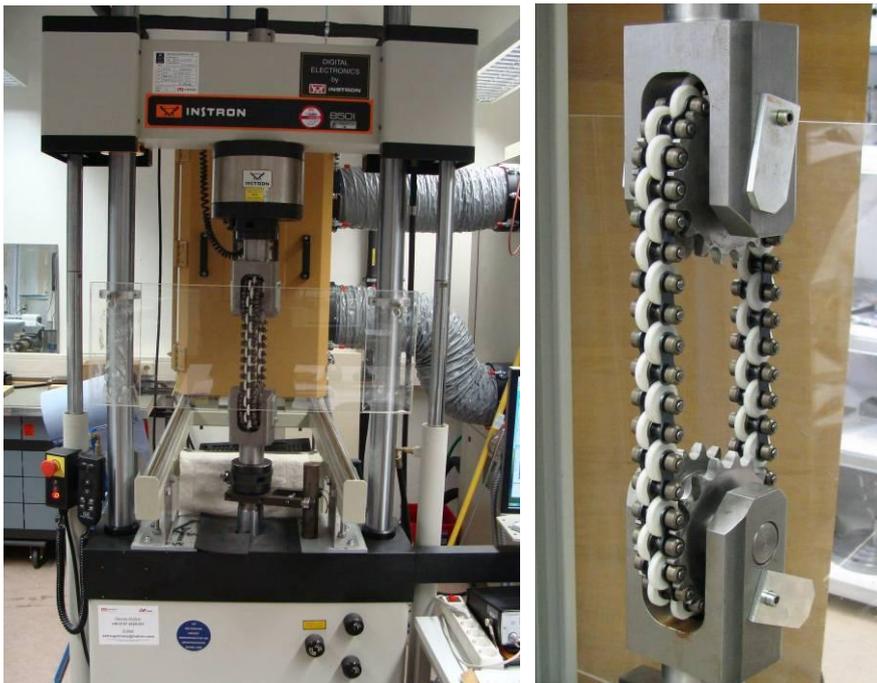


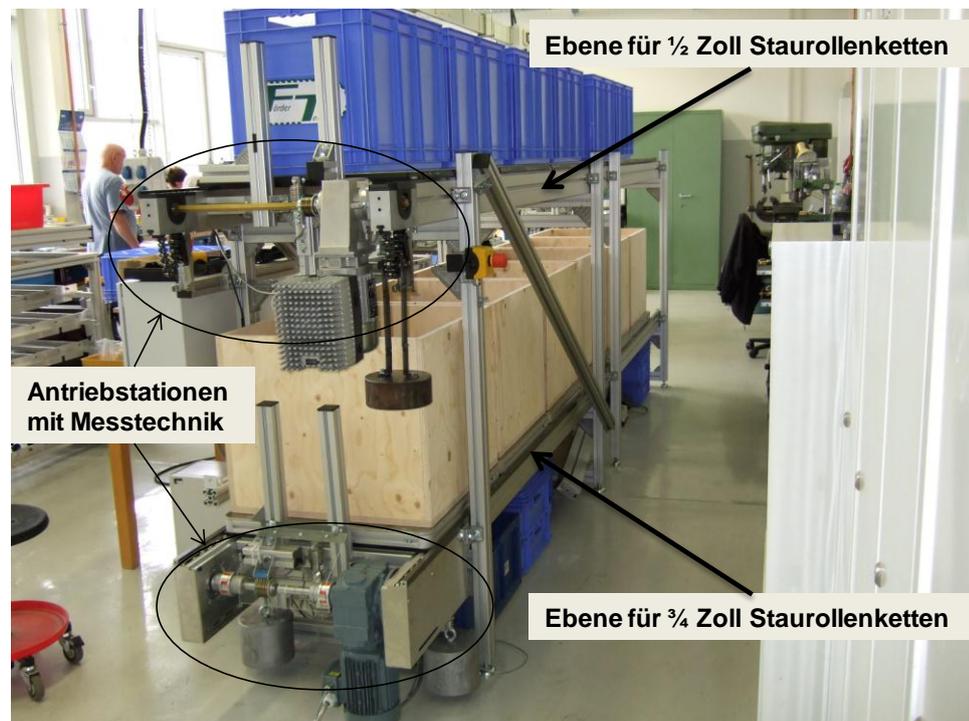
Abb. 5.1: Dynamische Prüfmaschine mit eingespannter Probe

Durch einen am Prüfstand angebrachten PC lassen sich die vordefinierten Kenngrößen (Testkraft, maximale und minimale Kraft) einstellen und werden während des dynamischen Versuches konstant gehalten. Weiterhin werden aktuelle Werte wie die Anzahl der Lastwechsel usw. ständig in Funktionen dargestellt.

### 5.2.2. Praxisnahe Versuchsstrecke

Zur Ermittlung von Kenngrößen der Staurollenkette wurde ein Versuchsstand konzipiert, gebaut und mit Messtechnik ausgerüstet, mit dessen Hilfe realistische Versuchsbedingungen geschaffen werden können. Bei der Konzeption des Versuchsstandes wurden folgende Anforderungen berücksichtigt:

- Möglichkeit des Testens verschiedener Staurollenkettentypen und -größen
- stufenlos regelbare Drehzahl bzw. Fördergeschwindigkeiten
- Möglichkeit des Aufbringens unterschiedlicher Fördermassen
- Möglichkeit zur hohen Belastung der Ketten
- dauerhafte Messung von Zugkraft, Drehzahl, und Staukraft
- Möglichkeit der Messung der Temperaturentwicklung durch Thermokamera bzw. berührungslose Sensoren
- Möglichkeit zur Messung der Laufruhe (Beschleunigung) der Werkstückträger



**Abb. 5.2:** Versuchsstand zur Kennwertermittlung

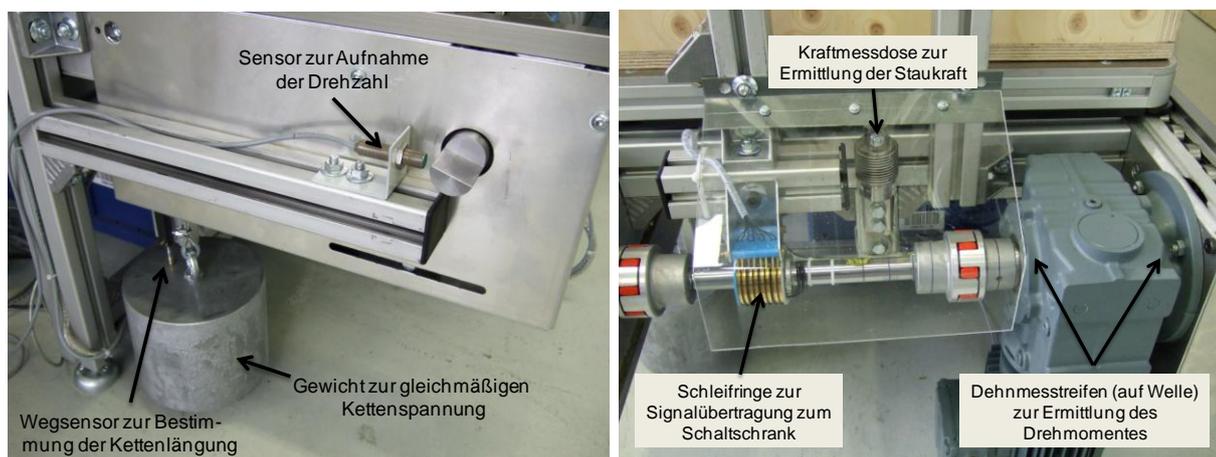
In der Abbildung 5.2 ist der 4,5 m lange Versuchsstand mit seinen zwei Ebenen dargestellt. In der oberen Ebene können 1/2 Zoll Staurollenkettentypen getestet werden. Dazu sind zwei parallele Kettenstränge zum Transport von Werkstückträgern der Firma Bosch-Rexroth vorgesehen. Zur Möglichkeit der Variation der Normalkraft sind die Träger mit Kunststoffbehältern ausgestattet, welche durch Sand unterschiedlich belastet werden können. Als Antriebseinheit wurde eine Station aus dem Programm TS2 plus von Bosch-Rexroth mit in der Mitte angebrachtem Motor

ausgewählt. Dadurch konnte Platz zur Integration von Messtechnik geschaffen werden. Die Umlenkung der Ketten erfolgt über einen Gleitbock und somit ohne Kettenrad.

In der unteren Ebene können  $\frac{3}{4}$  Zoll Staurollenketten getestet werden. Das Komplettsystem stammt aus dem Sortiment der Firma Altratec Montagesysteme GmbH, wobei auch hier der Motor zwischen den zwei Kettensträngen angebracht ist. Die Werkstückträger sind hierbei mit Holzkisten bestückt, um so die Ketten unterschiedlich belasten zu können.

### 5.2.3. Messtechnik

Zur Ermittlung der Änderungen der spezifischen Kennwerte des Fördersystems (z.B. Kettenlänge, Reibbeiwert, Temperaturerhöhung) ist die Ausrüstung des Versuchsstandes unter 5.2.2 mit entsprechender Messtechnik erfolgt. Die folgende Abbildung 5.3 zeigt die am Versuchsstand angebrachte Messausrüstung zur Realisierung der im letzten Punkt erwähnten Anforderungen.



**Abb. 5.3:** Messtechnik an der Antriebstation für  $\frac{3}{4}$  Zoll Ketten

Analog zu der in der unteren Ebene angebrachten Messtechnik wurde die Ebene für  $\frac{1}{2}$  Zoll Staurollenketten mit Messtechnik ausgestattet. Die in den Systemen vorhandenen Kettenspanner wurden durch ein Massstück ersetzt, um so die Vorspannung der Kettenstränge während der Versuche konstant zu halten. Zur Ermittlung der Drehmomente am Antrieb und der daraus resultierenden Kettenzugkräfte wurden die Antriebswellen beidseitig mit Dehnmessstreifen beklebt, wobei die Datenübertragung über einen ebenfalls auf der Welle angebrachten Schleifring erfolgt. Die durchschnittliche Kettengeschwindigkeit wird durch einen Sensor über die Drehzahl der Antriebswelle bestimmt. Dadurch lässt sich der Einfluss der Fördergeschwindigkeit auf die Kettenzugkraft usw. bestimmen. Tabelle 5.1 zeigt die am System angebrachte Messtechnik und ihre daraus resultierenden Ergebnisse zur Eigenschaftsermittlung der Staurollenketten.

**Tab. 5.1:** Messtechnik und ihre Ergebnisse

<b>angebrachte Messtechnik</b>	<b>resultierende Ergebnisse</b>
Kraftmessdose am Stopper der Werkstückträger	Ermittlung der durch WT erzeugten Staukraft
Dehnmessstreifen auf Antriebswelle	Ermittlung der Drehmomente am Antrieb und der daraus resultierenden Kettenzugkraft
Wegsensor am Massestück	Ermittlung der Kettenlänge
Induktiver Sensor an Antriebswelle	Ermittlung der aktuellen Kettengeschwindigkeit
Digitale Pyrometer	Ermittlung des Temperaturverlaufes
Beschleunigungssensor am WT	Ermittlung der Laufruhe

### 5.3. Versuchsprogramm

#### 5.3.1. Untersuchungen am dynamischen Prüfsystem

Zur Untersuchung auf der Kettenprüfmaschine Instron 8501 werden verschiedene Staurollenkettentypen aus dem großen Spektrum an erhältlichen Ketten ausgewählt. Hierbei wurden die Ketten untersucht, welche in der Praxis am meisten Anwendung finden. Weiterhin werden zwei verschiedene Kettengrößen herangezogen.

Die Überprüfung erfolgt exakt nach dem Verfahren zur Dauerschwingprüfung von Präzisions-Rollenketten (ISO15654 [DIN04]), wozu die Prüflinge im Zugschwellbereich bei Raumtemperatur mit einer definierten Prüfkraft in axialer Zugrichtung der Kette geprüft werden. Bei der Bestimmung der Prüfkraft wird in der Norm von der Bruchkraft der Rollenketten aus ISO606 [DIN02] ausgegangen. Da es eine solche ISO für Bruchkräfte der Staurollenkettentypen nicht gibt, müssen diese zunächst für die unterschiedlichen Kettentypen bestimmt werden. Aus der angestrebten Zuverlässigkeit der Ergebnisse von 95 % ergeben sich die Anzahl der mindestens zu testenden Prüfungen je Kettenart. Hierbei wird der Prüfling bis zu  $10^7$  Lastwechsel mit den definierten Kräften beansprucht. Das Versuchsprogramm der Untersuchungen an der Kettenprüfmaschine wird in Tabelle 5.2 genauer dargestellt.

**Tab. 5.2:** Versuchsprogramm Kettenprüfmaschine

	<b>1/2 Zoll</b>	<b>3/4 Zoll</b>
Standardstaurollenkette	x	x
Staurollenkettentypen mit versetzten Förderrollen	x	x

### 5.3.2. Ermittlung Einflussgrößen auf die Stau- bzw. Kettenzugkraft

In Kapitel 4 wurde festgestellt, dass die Staukraft bzw. die Zugkraft der Staurollenketten durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren bestimmt werden. Hierbei werden folgende Einflüsse auf die genannten Kräfte näher untersucht.

- Einfluss der Fördergutmasse
- Einfluss der Kettengeschwindigkeit
- Einfluss der Materialpaarungen
- Einfluss der Kettenart

Folgende Kettenarten werden zu den neuen Untersuchungen hinzugezogen, wobei diese mit unterschiedlichen Werkstoffen der Förderrolle ausgestattet sind.

**Tab. 5.3:** Versuchsprogramm Einflussfaktoren

	1/2 Zoll	3/4 Zoll
Standardstaurollenkette (Stahl-Förderrolle)	x	x
Staurollenketten mit versetzten Stahl - Förderrollen	x	(x)

Die Ermittlung der Einflussfaktoren erfolgt am Versuchsstand aus Abbildung 5.2. Wobei systematisch die Versuchsparameter variiert werden, um somit die genauen Auswirkungen nachweisen zu können. Zu diesen neuen Ermittlungen werden zur Verifizierung der Annahmen ebenso Ergebnisse von Vorarbeiten mit hinzugezogen [Dom07]. Durch diese Kombination aus neuen und vorhergegangenen Untersuchungen können eine Vielzahl an möglichen Paarungen erschlossen werden. Als Bewegungszustand des Systems wird hierbei ausschließlich von der Stauförderung ausgegangen, da dieser deutlich kritischer als der Bewegungszustand „Förderung“ ist.

### 5.3.3. Untersuchung der Dauerfestigkeit am Versuchsstand

Im Dauerversuch an der Versuchsstrecke werden unter definierten Belastungen folgende Untersuchungen durchgeführt, um so mehr Erfahrungen zum Verhalten von Staurollenketten zu erlangen. Ebenso werden dadurch Kenngrößen ermittelt, welche sich besonders positiv bzw. negativ auf die Lebensdauer des Systems auswirken.

- Staukraftverhalten
- Zugkraftverhalten (über Drehmoment an Antriebswelle)
- Temperaturverhalten
- Kettenlängung
- Verschleißbetrachtungen
- Laufverhalten

Ausgegangen wird hierbei von der nach Herstellerangaben maximalen Belastung der Förderrollen. Ebenso erfolgt der Dauerversuch im Bewegungszustand „Stau“. Die Versuche werden so lange durchgeführt, bis es zum Ausfall der Förderstrecken bzw. es zu kritischen Änderungen im System kommt.

## 5.4. Versuchsdurchführung

### 5.4.1. Untersuchungen am dynamischen Prüfsystem

Zu Beginn der Untersuchungen wird von den gewählten Ketten die Bruchkraft ermittelt. Dazu wird der Mittelwert aus je drei Proben für jeden Kettentyp bzw. -größe gebildet. Anhand der Bruchkraft können die konkreten Laststufen entsprechend des Versuchsprogrammes und der ISO15654 [DIN04] bestimmt werden. Als untere Kraft  $F_{\min}$  der schwellenden Belastung wird 5 % der ermittelten Bruchkraft angesetzt. Die benötigte maximale Kraft  $F_{\max}$  wird durch die Formel (5.1) ermittelt, welche sich aus der aktuellen Testkraft  $F_t$  ergibt.

$$F_{\max} = \frac{F_t \cdot F_{\text{Bruch}} + F_{\min} \cdot (F_{\text{Bruch}} - F_t)}{F_{\text{Bruch}}} \quad (5.1)$$

Aufgrund der technischen Möglichkeiten der Maschine beträgt die Belastungsfrequenz der Instron 17 Hz. Alle Versuche erfolgen unter einer Raumtemperatur von ca. 22 °C (+/-1 °C). Nach dem aus der ISO hervorgehenden Treppenstufenverfahren werden die Ketten so bis max.  $10^7$  Lastwechsel belastet. Anschließend wird die Kette mit der nächsten Testkraft gefahren. Um die sich ergebende Kraft mit einer Sicherheit von 95 % bestimmen zu können, müssen je nach Art der resultierenden Treppe eine unterschiedliche Anzahl an Proben getestet werden. Bei einer 3-stufigen Treppe müssen dazu 10 gültige Stichproben existieren.

#### 5.4.2. Ermittlung Einflussgrößen

Die Ermittlung der Einflussfaktoren unterteilt sich in verschiedene Punkte:

- Einfluss Fördermasse:

Der Einfluss der Fördermasse erfolgt durch die schrittweise Anhebung der Förderlast durch das Aufbringen unterschiedlicher Gewichtsstücke auf den Werkstückträger des Systems. So wird die Masse zunächst auf einem WT erhöht und später mehrere Träger analog dazu hinzugefügt und belastet. Somit kann der Einfluss auf die Staukraft und das Drehmoment bzw. die Zugkraft der Kette ermittelt werden.

- Einfluss Kettengeschwindigkeit:

Durch das Anbringen eines Frequenzumrichters an den Motor des Systems kann die Kettengeschwindigkeit stufenlos reguliert werden. Da durch den Drehzahlsensor dauerhaft die aktuelle Kettengeschwindigkeit ermittelt werden kann, ist eine Regulierung der Frequenz auf einen vordefinierten Geschwindigkeitsbereich problemlos möglich. Gefahren werden hierbei Geschwindigkeiten von 100 mm/s bis zu 300 mm/s in 50 mm/s Schritten. Die maximale Geschwindigkeit kann durch den Umrichter nicht in jedem Versuch realisiert werden. In diesen Fällen wird als Obergrenze die maximal zu erreichende Geschwindigkeit angesetzt.

- Einfluss Kettenart:

Wie unter 5.3 beschrieben, besteht das Versuchsprogramm aus mehreren unterschiedlichen Kettenarten bzw. Kettengrößen. Der Ablauf der Versuche ist hierbei immer identisch gewählt, um im Nachhinein eine gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten. So werden die Belastungen und Geschwindigkeiten immer gleich angesetzt. Dadurch kann der Einfluss der verschiedenen Kettenarten und -größen auf die gemessenen Kenngrößen ermittelt und die Ergebnisse vergleichbar ausgewertet werden.

#### 5.4.3. Untersuchung der Dauerfestigkeit am Versuchsstand

Im Dauerversuch werden die Strecken über längere Zeit mit einer vordefinierten hohen Förderlast im Staubetrieb gefahren. Hierbei wird die komplette Länge der Versuchsanlage genutzt, um so durch die Fördermasse möglichst viel Stau- und dadurch Zugkraft zu erzeugen. Während des kompletten Dauerversuchs werden die Staukraft, das Drehmoment, die Kettenlängung und die Kettentemperatur aufgezeichnet. Weiterhin wurde am Werkstückträger ein Beschleunigungssensor angebracht, um das Einlaufverhalten der Förderrollen zu überwachen. Der Verlauf der Temperatur am Versuchsstand wurde hierbei in den ersten Versuchen mit der Thermokamera überwacht. Später wurden berührungslose Temperatursensoren nachgerüstet, um so dauerhaft die

Temperatur mitschreiben zu können. Diese Sensoren sind so platziert, dass sie die Stelle der maximal auftretenden Temperatur innerhalb der Kette messen, welche durch das Thermobild der Kamera detektiert wird.

**Tab. 5.4:** Versuchsparameter Dauerversuch

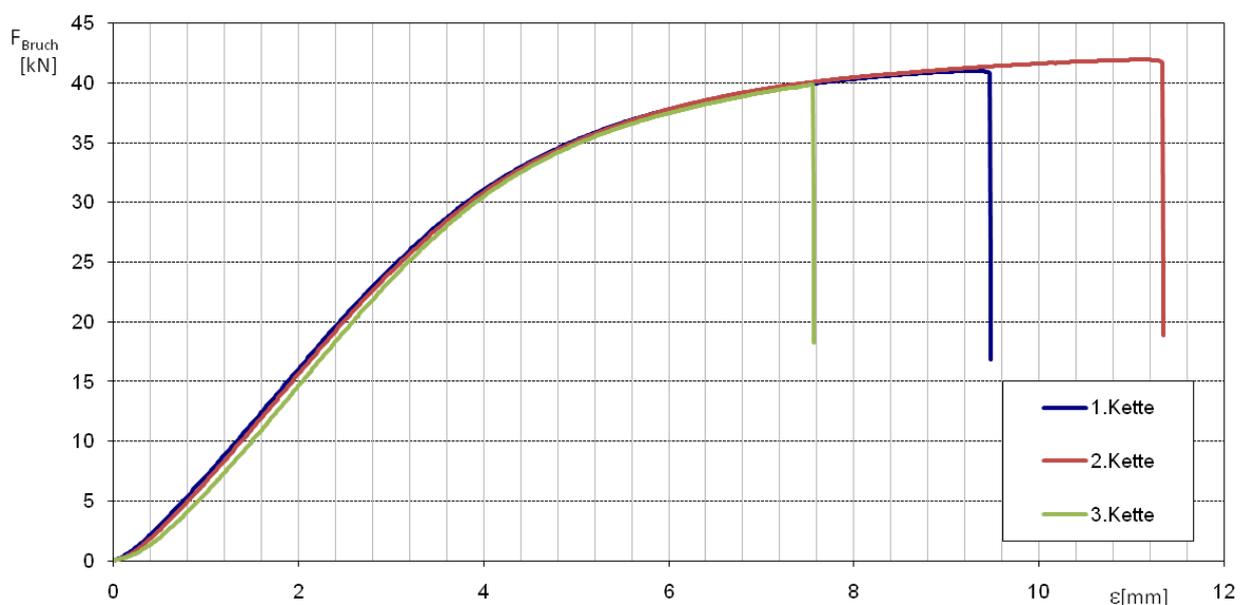
Kettengröße	Anzahl WTs	Fördermasse gesamt	Kettengeschwindigkeit
½ Zoll	6	1038 kg	300 mm/s
¾ Zoll	6	1100 kg	250 mm/s

Als Kettengeschwindigkeit wird hierbei die unter der extremen Belastung maximal erreichbare Geschwindigkeit gewählt, wodurch die Anzahl der Kettenumläufe möglichst hoch ist, um so die Anzahl der Gelenkbewegungen beim Einlauf in das antreibende Kettenrad zu maximieren.

## 5.5. Versuchsergebnisse

### 5.5.1. Untersuchungen am dynamischen Prüfsystem

Die Ermittlungen der Bruchkraft einer Kettenart zeigte zwischen den drei genommenen Proben nur eine geringe Abweichung der maximal ertragbaren Kraft. Unterschiede gab es hierbei jedoch in der Dehnung der Ketten, welche durch die Zugkraft verursacht wird. Das folgende Diagramm zeigt die Kraft-Dehnungskurve der drei Proben der Standardstaurollenkette der Größe ½ Zoll. Die ermittelten Kräfte beziehen sich hierbei auf den Doppelstrang der Kette.



**Abb. 5.4:** Kraft-Dehnungsdiagramm Standardstaurollenkette (Doppelstrang)

Die somit ermittelten Bruchkräfte der unterschiedlichen Ketten werden in folgender Tabelle dargestellt. Hierbei werden neben ermittelten Werten auch die Bruchkräfte von vergleichbaren Rollenketten mit angegeben, welche den Staurollenketten im Grundaufbau nahezu identisch sind. Durch diese Gemeinsamkeit verhält die sich Bruchkraft der Rollenkette nach DIN8781-1 [DIN03] ähnlich der Bruchkraft der Staurollenketten mit der gleichen Kettenteilung. Die vergleichbare Kunststoff-Staurollenkette weist trotz der eingesetzten Laschen aus Stahl eine Bruchfestigkeit von 5,2 kN auf, welche deutlich unter der ermittelten Festigkeit der Standardstaurollenkette liegt.

**Tab. 5.5:** Bruchkräfte Staurollenkette

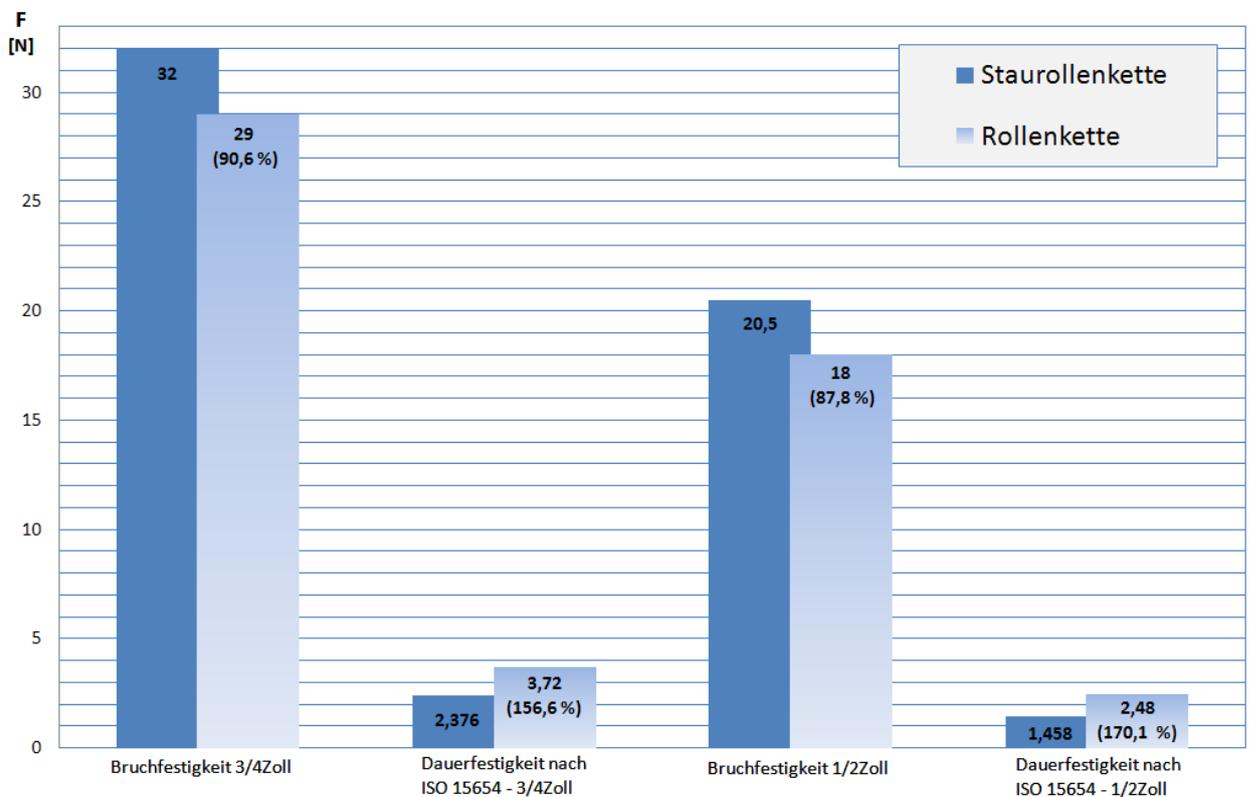
	½ Zoll	¾ Zoll
Standardstaurollenkette	20,5 kN	32,0 kN
Vergleichbare Rollenkette [DIN04]	18,0 kN	29,0 kN
Staurollenkette mit versetzten Rollen	10,6 kN	17,8 kN
Kunststoff-Staurollenkette [Sum02]	5,2 kN	-

Bei der dynamischen Belastung und der daraus resultierenden Dauerfestigkeit nach ISO15654 [DIN04] bei reiner Zugbelastung der Kette kam es bei allen Kettenarten bzw. -größen zu 3-stufigen Treppen, wobei 10 gültige Stichproben getestet wurden, um eine Aussagekraft von 95 % zu erhalten. Im Gegensatz zur Bruchkraft weisen die Dauerfestigkeiten nun deutliche Unterschiede zu Rollenketten auf. Diese Abweichungen lassen sich mit großer Wahrscheinlichkeit auf Unterschiede im Material bzw. auf Fertigungsunterschiede beim Zusammensetzen der Ketten zurückführen. In Tabelle 5.6 sind die ermittelten Dauerfestigkeiten der Staurollenkette und die vergleichbaren Werte der Rollenketten dargestellt. Die Dauerfestigkeit nach ISO15654 [DIN04] liegt bei fast allen getesteten Staurollenketten bei ca. 7 - 8 % Bruchfestigkeit. Lediglich die ¾ Zoll Staurollenkette mit versetzten Förderrollen schafft es hierbei auf 12,6 % und liegt damit im Bereich der Dauerfestigkeiten für Rollenketten.

**Tab. 5.6:** Dauerfestigkeit  $F_D$  von Staurollenkette nach ISO15654 [DIN04]

	½ Zoll	¾ Zoll
Standardstaurollenkette	1,458 kN (7,1 % $F_{Bruch}$ )	2,376 kN (7,4 % $F_{Bruch}$ )
Vergleichbare Rollenkette [DIN02]	2,480 kN (13,8 % $F_{Bruch}$ )	3,720 kN (12,8 % $F_{Bruch}$ )
Staurollenkette mit versetzten Rollen	0,761 kN (7,2 % $F_{Bruch}$ )	2,235 kN (12,6 % $F_{Bruch}$ )

Das nachfolgende Balkendiagramm verdeutlicht die prozentualen Unterschiede der Bruch- bzw. Dauerfestigkeit der Rollenkette zur Staurollenkette. Hierbei zeigt sich, dass die Dauerfestigkeit der Rollenketten bei mindestens 150 % Dauerfestigkeit vergleichbaren Staurollenkette liegt.



**Abb. 5.5:** Vergleich Bruch- und Dauerfestigkeit Staurollenkette-Rollenkette

Maximale Spannungen im statischen Zugversuch wurden in den FEM Simulationen an den Außenlaschen ermittelt. Genau an diesen Stellen sind die Ketten bei der Ermittlung der Bruchkräfte gebrochen. Innerhalb der dynamischen Versuche kam es jedoch immer zum Bruch der Innenlaschen. Dies lässt sich auf den erhöhten Einfluss der Kerbwirkung mit ihrer dynamischen Kerbwirkungszahl  $\beta_K$  und den geringeren Querschnitt der Innenlaschen an der Buchsenausparung zurückführen. In Anlage 1 befinden sich die Protokolle aller ermittelten Dauerfestigkeiten nach ISO15654 [DIN04].



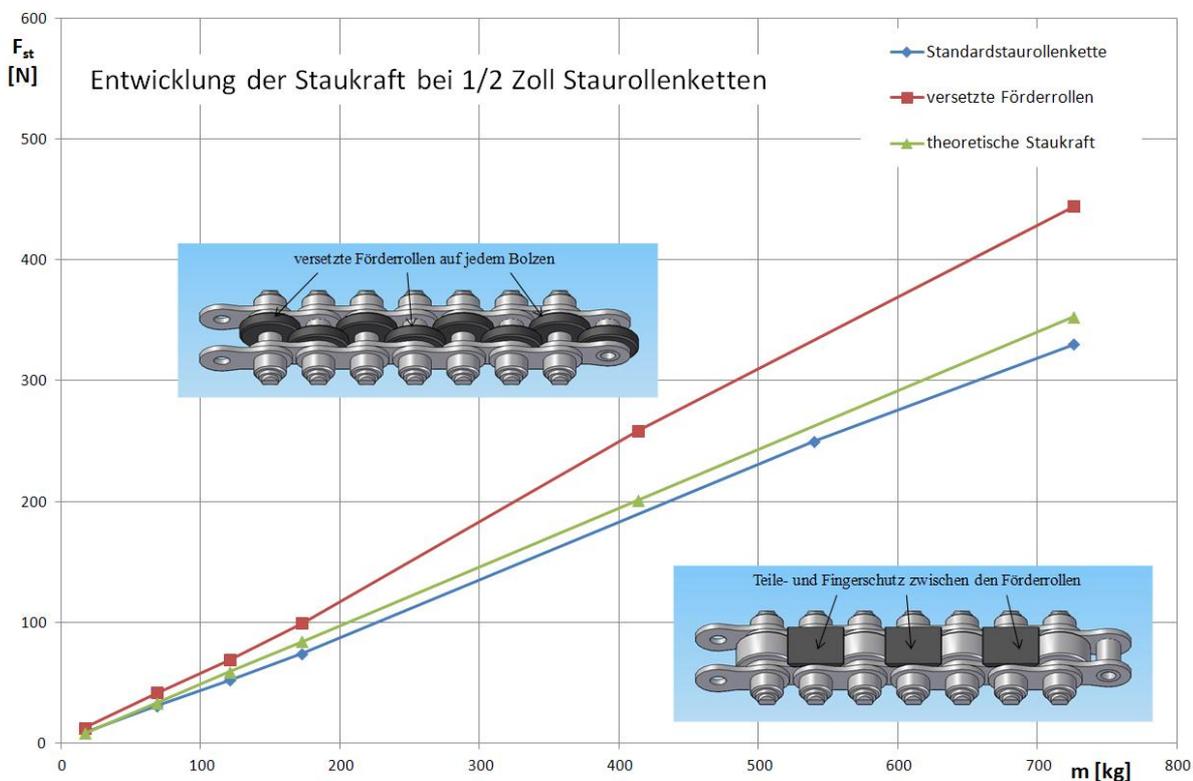
**Abb. 5.6:** Bruchbild Staurollenkette (Innenglied)

### 5.5.2. Ermittlung Einflussgrößen

Die Staukraft im Staurollenkettensystem ist direkt in der Kettenzugkraft der Ketten wieder zu finden. Um das System aber in seine Bestandteile zu zerlegen, wird die Staukraft von der Zugkraft zunächst separat untersucht.

*Staukraft:*

Hierbei wird das Staukraftverhalten unter Variation der Förderlast ermittelt und ausgewertet. Die Fördergeschwindigkeit wurde hierbei konstant gehalten, um so den reinen Einfluss der Gutmasse bestimmen zu können. Der Verlauf der Staukraft von zwei unterschiedlichen Staurollenketten mit Stahlförderrollen ist in Abbildung 5.7 abgebildet. Zur vergleichenden Betrachtung ist dort ebenfalls die theoretische Staukraft eingezeichnet, welche unter 4.2.3 im Pendelversuch ermittelt wurde.



**Abb. 5.7:** Vergleich Staukraftverhalten 1/2 Zoll Staurollenketten

Bei der Auswertung der Messergebnisse wird deutlich, dass alle Kurven einen nahezu linearen Verlauf aufweisen. Bei ca. 180 kg Belastung kommt es zu einer geringfügigen Erhöhung des Anstiegs der Messfunktionen. Dies lässt sich auf die Benutzung von mehreren Werkstückträgern ab 180 kg Last zurückführen. Durch die Erhöhung der benutzten Werkstückträger kommt es zu mehreren zusätzlichen Einflussgrößen, welche in ihrer Summe die Staukraft des Systems leicht erhöhen. Dazu gehören eine zusätzliche Reibkraft zwischen Werkstückträger und seitlichem Führungsprofil der Träger und eine Erhöhung der eingreifenden Förderrollen, die einen Anstieg

der Reibkräfte hervorrufen, welche zwischen Förderrollen und Innenlaschen wirken können, wenn diese nicht ihre ideale Lage besitzen.

Es zeigt sich weiterhin, dass die theoretisch ermittelte Staukraft und die an der Versuchsstrecke gemessene Staukraft der Standardstaurollenkette sehr eng beinander liegen und die Reibbeiwerte somit ebenfalls übereinstimmen. Die erzeugte Staukraft der Staurollenkette mit versetzten Förderrollen liegt jedoch über den Kennlinien der Standardstaurollenkette bzw. der theoretischen Staukraft. Dies lässt sich analog auf die oben erwähnten zusätzlich eingreifenden Förderrollen und der daraus folgenden Reibkrafteerhöhung zurückführen.

Ebenso wurden alle Versuche in unterschiedlichen Kettengeschwindigkeiten durchgeführt. Zunächst bleibt die Staukraft bei kleineren Fördergutmassen bis ca. 400 kg nahezu unabhängig von der gefahrenen Kettengeschwindigkeit. Das Kettensystem wurde bis zu über einer Tonne Fördergutmasse belastet. Hierbei zeigt sich bei ½ Zoll Staurollenketten ein auffälliges Verhalten bei dieser hohen Belastung. Mit steigender Fördergeschwindigkeit steigt die Staukraft ebenfalls an. Diese Erhöhung ist besonders bei der gefahrenen Maximalbelastung linear. Das Ansteigen der Staukraft kann bei steigender Geschwindigkeit durch ein Gleiten der Förderrolle beim Einlaufen in einen Werkstückträger auftreten. Somit tritt beim Einlaufen der Rolle zunächst Gleitreibung auf bevor der Rollvorgang beginnt und somit die Rollreibung bei steigender Geschwindigkeit später auftritt. Hinzu kommt, dass diese erhöhte Belastung nur durch die Verwendung von mehreren Werkstückträgern zu realisieren ist. Durch kleine Abstände zwischen den Trägern steigt die Anzahl der Einläufe der Rollen in die Werkstückträger.

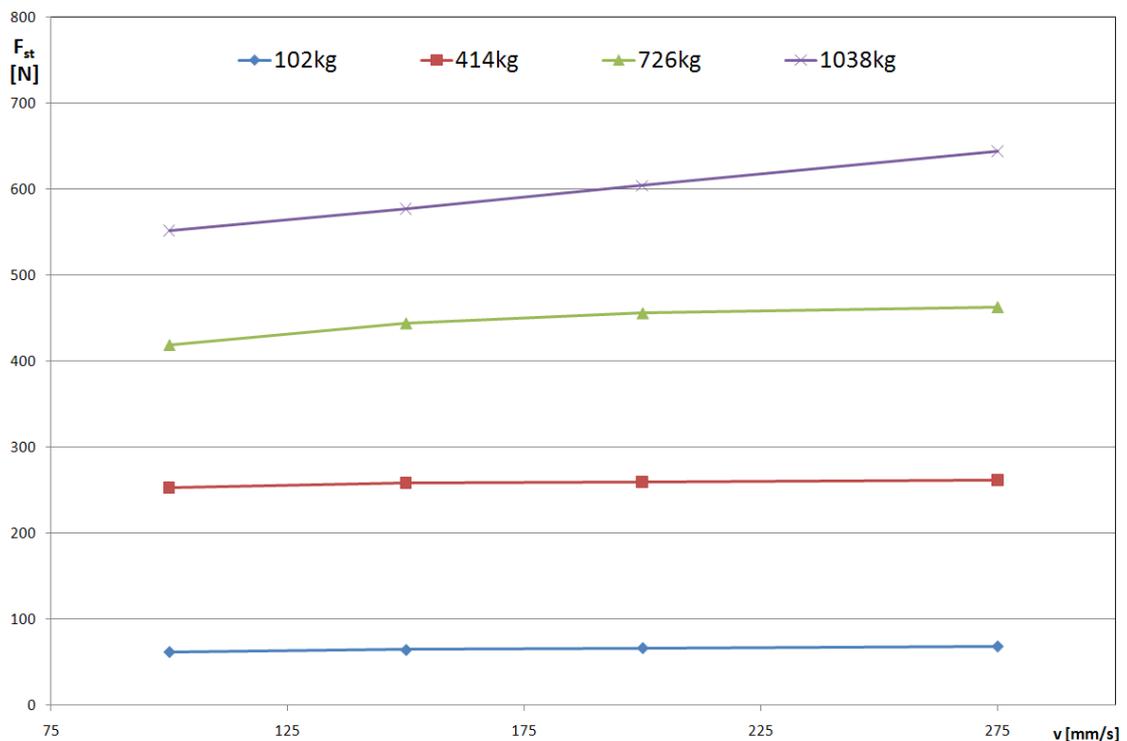


Abb. 5.8: Geschwindigkeitsabhängigkeit ½ Zoll Staurollenkette mit versetzten Rollen

Somit zeigt sich, dass der Ansatz des geschmierten Systems und das Reibmodell nach Stribeck [Bei01][Kra71] für Staurollenketten mit  $\frac{1}{2}$  Zoll Teilung gut angewendet werden kann. Zu beachten ist hierbei, dass der Zwischenraum zwischen Förderrolle und Buchse sehr gering ist, wodurch der Schmierstoff entweder nicht in die Zwischenräume fließen kann oder er komplett von der Förderrolle verdrängt bzw. nach außen gedrückt wird.

Bei analog durchgeführten Versuchen mit einer Standardstaurollenkette mit  $\frac{3}{4}$  Zoll Teilung ist das Verhalten schon komplett anders. Hier fällt die Staukraft mit Erhöhung der Fördergeschwindigkeit bereits bei geringen Fördermassen deutlich ab. Hierbei sinkt die Staukraft um ca. 30 - 50 %. Die folgende Abbildung 5.9 zeigt dieses Verhalten der gemessenen Kraft bei vier unterschiedlichen Förderlasten.

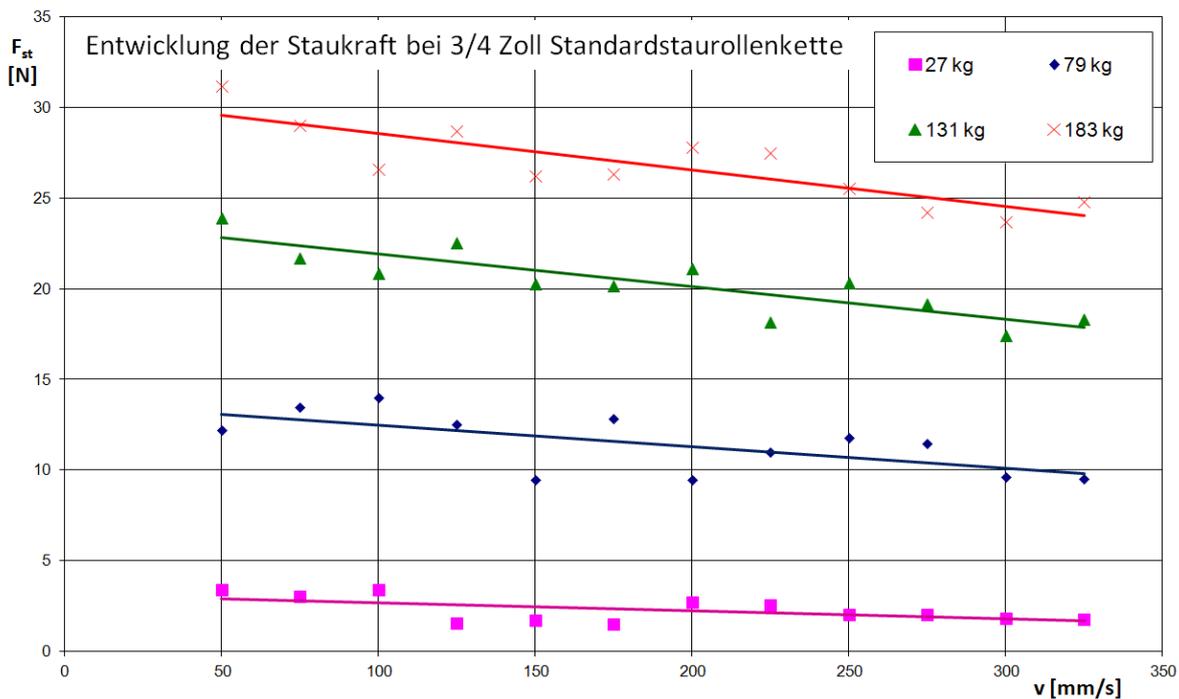


Abb. 5.9: Geschwindigkeitsabhängigkeit  $\frac{3}{4}$  Zoll Standardstaurollenkette

Es lässt sich aus den Messkurven erkennen, dass das Reibmodell nach Stribeck auch bei größeren Staurollenketten angewendet werden kann. Jedoch befindet sich das System hierbei nun auf der charakteristischen Stribeckkurve an einer Position an der der Reibbeiwert bei steigender Geschwindigkeit sinkt.

Aus diesem Verlauf der Geschwindigkeit lässt sich vermuten, dass es sich nun bei der nächst größeren Kettenteilung um ein ausreichend gut geschmiertes System handelt, wodurch ein Abfall des Reibbeiwertes bei steigender Geschwindigkeit zu verzeichnen ist. Die geometrischen Abmessungen bzw. Abstände lassen hierbei genug Raum, um einen optimalen Schmierfilm entstehen zu lassen und alle Reibpartner ideal zu schmieren.

Diese Bedingungen der Verteilung des Schmierstoffes bewirken ebenfalls im Gegensatz zur ½ Zoll Staurollenkette starke Abweichungen zwischen dem im Pendelversuch ermittelten Reibwert und des Wertes aus den Versuchen. Die Reibwerte aus dem Pendelversuch liegen auch bei den Versuchen mit der ¾ Zoll Staurollenkette über den ermittelten Werten auf der Versuchsstrecke. Die Abbildung 5.10 zeigt die ermittelte Staukraft und die theoretische Staukraft aus dem Pendelversuch. Hieraus zeigt sich, dass die Reibbeiwerte aus dem Pendelversuch bei ¾ Zoll Staurollenketten ebenfalls mit ausreichender Genauigkeit zur schnellen Auslegung angewendet werden können.

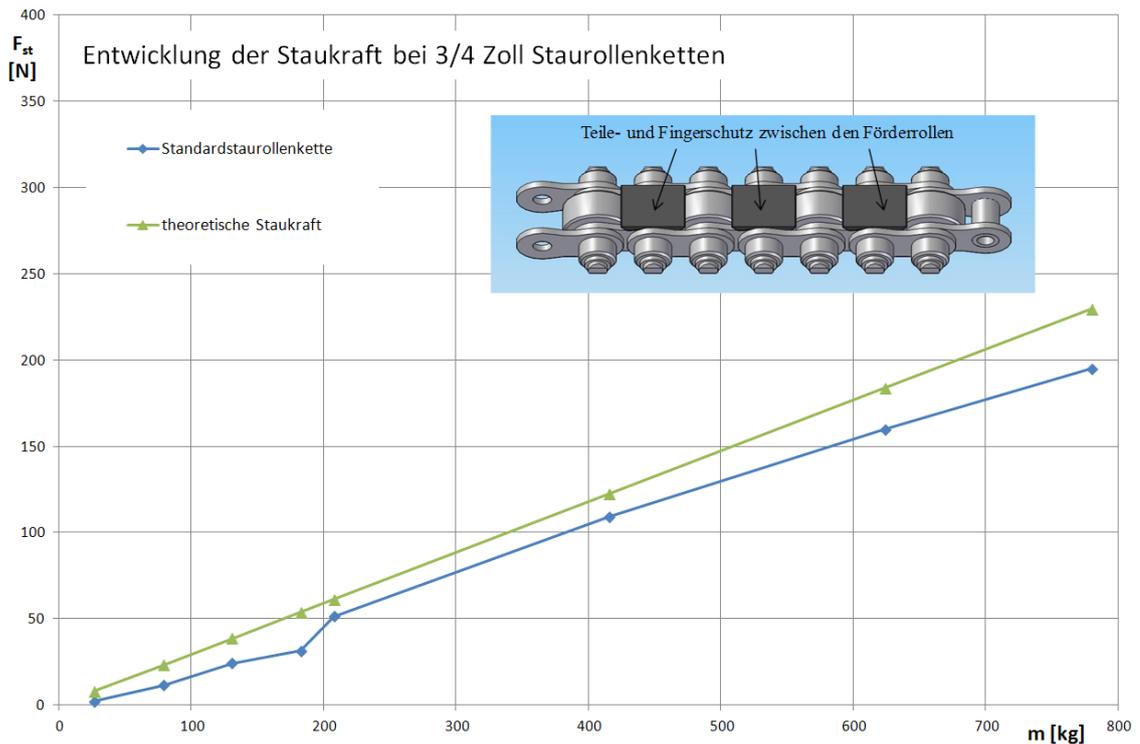


Abb. 5.10: Vergleich Staukraftverhalten bei 3/4 Zoll Teilung

*Zugkraft:*

Die Zugkraft der Kette setzt sich nach der unter 4.3 aufgestellten Formel wie folgt zusammen:

$$\mathbf{F}_{\text{Zug}} = \mathbf{F}_{\text{Stau}} + \mathbf{F}_{\text{Führ}} + \mathbf{F}_{\text{Gelenk}} + \mathbf{F}_{\text{sonst}} \quad (5.2)$$

Experimentell konnte über das Drehmoment am Antrieb die gesamte Zugkraft gut ermittelt werden. Ebenso wurde, wie oben beschrieben, der Teil der Staukraft separat ermittelt. Somit lässt sich bereits durch die Subtraktion der Staukraft von der Zugkraft die Summe der fehlenden drei Bestandteile ermitteln. Die folgenden Diagramme zeigen die ermittelte Zugkraft bei unterschiedlichen Belastungen und die dazu gehörige Staukraft der ½ Zoll Staurollenketten. Neben der oben bereits ermittelten größeren Staukraft durch die höhere Anzahl an möglichen Wandrei-

bungen bei Staurollenketten mit versetzten Förderrollen zeigt sich hierbei ebenfalls, dass die Staukraft bei hohen Belastungen bis zu 50 % der Zugkraft der Kette darstellt.

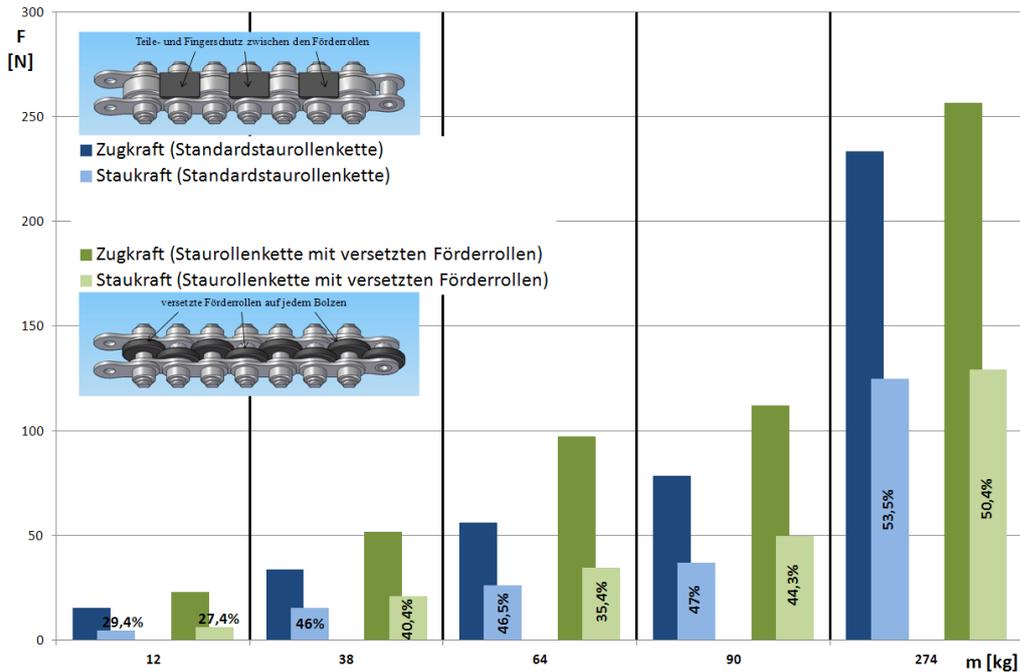


Abb. 5.11: Ermittelte Zugkraft mit Staukraftanteil am Versuchsstand (½ Zoll)

Somit bleiben nur maximal 50 % für die drei anderen Komponenten der Zugkraft (Kraft durch Reibung der Laufrollen mit Bolzen, Kraft durch Gelenkbewegung am Kettenrad, sonstige Kräfte). Da die erzeugte Kraft der Laufrollen nicht direkt im Versuchsfeld gemessen werden kann, müssen zur Verifizierung der gemessenen Reibbeiwerte aus dem Pendelversuch aus Abschnitt 4.2.3 die Summe der drei Restkräfte verwendet werden. Da die Gelenkkraft und die sonstigen Kräfte auch bei steigender Belastung nahezu gleich groß bleiben und dann nur einen sehr geringen Teil der gesamten Zugkraft ausmachen, ist mit folgendem Kräfteverhältnis zu rechnen:

$$\mathbf{F}_{\text{Zug}} - \mathbf{F}_{\text{Stau}} \approx \mathbf{F}_{\text{Führ-Pendel}} > \mathbf{F}_{\text{Gelenk}} + \mathbf{F}_{\text{sonst}} \quad (5.3)$$

Durch die Reibbeiwerte aus den Pendelversuchen und dem Einfluss der Übersetzung der Rollendurchmesser ergibt sich folgende Formel für die durch die Laufrollen erzeugte Kraft.

$$\mathbf{F}_{\text{Führ-Pendel}} = \mu_{\text{gleit-LR}} \cdot \mathbf{i}_{\text{LR}} \cdot \mathbf{m}_{\text{FG}} \cdot \mathbf{g} \quad (5.4)$$

Die hierbei entstandene Kraft der Laufrollen konnte im Versuch nicht direkt messtechnisch ermittelt werden. Dadurch wird in der nachfolgenden Zerlegung der Zugkraft dazu der Reibwert aus dem Pendelversuch hinzugezogen. Auftretende sonstige Kräfte im System werden hierbei durch folgende triviale Formel mathematisch ermittelt:

$$F_{\text{sonst}} = F_{\text{Zug}} - F_{\text{Stau}} - F_{\text{Führ-Pendel}} \tag{5.5}$$

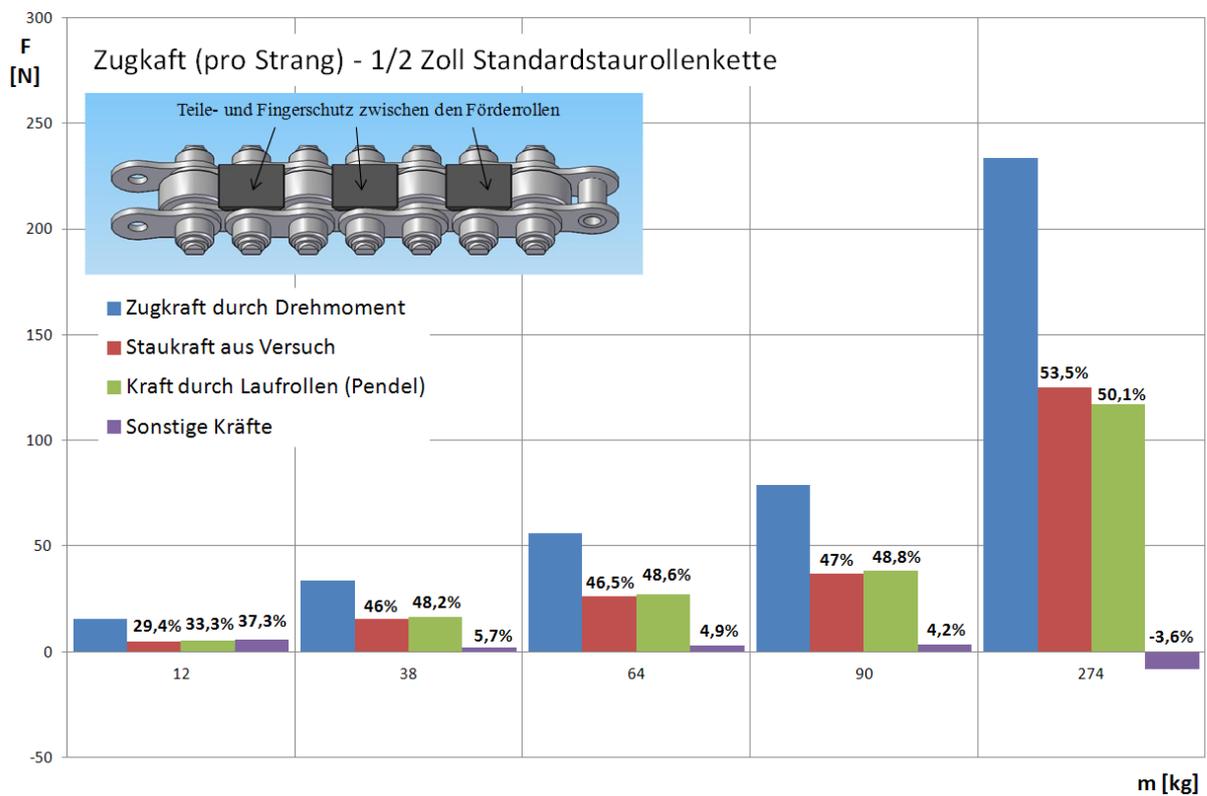


Abb. 5.12: Zusammensetzung der Zugkraft (Standardstaurollenkette)

Bei steigender Belastung der Werkstückträger wird der Anteil der sonstigen Kräfte prozentual immer geringer. Der negative Wert bei hoher Belastung ganz rechts im Diagramm kann so theoretisch nicht auftreten. Er lässt sich auf Messfehler am Versuchsstand bzw. während des Pendelvorganges zurückführen.

Tab. 5.7: Übersicht Reibbeiwerte

	Reibbeiwert Versuch (FR-Buchse)	Reibbeiwert Pendel (FR-Buchse)	Reibbeiwert Pendel (LR-Bolzen)
Standardstaurollenkette Teilung: 1/2 Zoll	0,113	0,116	0,08
Standardstaurollenkette Teilung: 3/4 Zoll	0,11	0,13	0,074

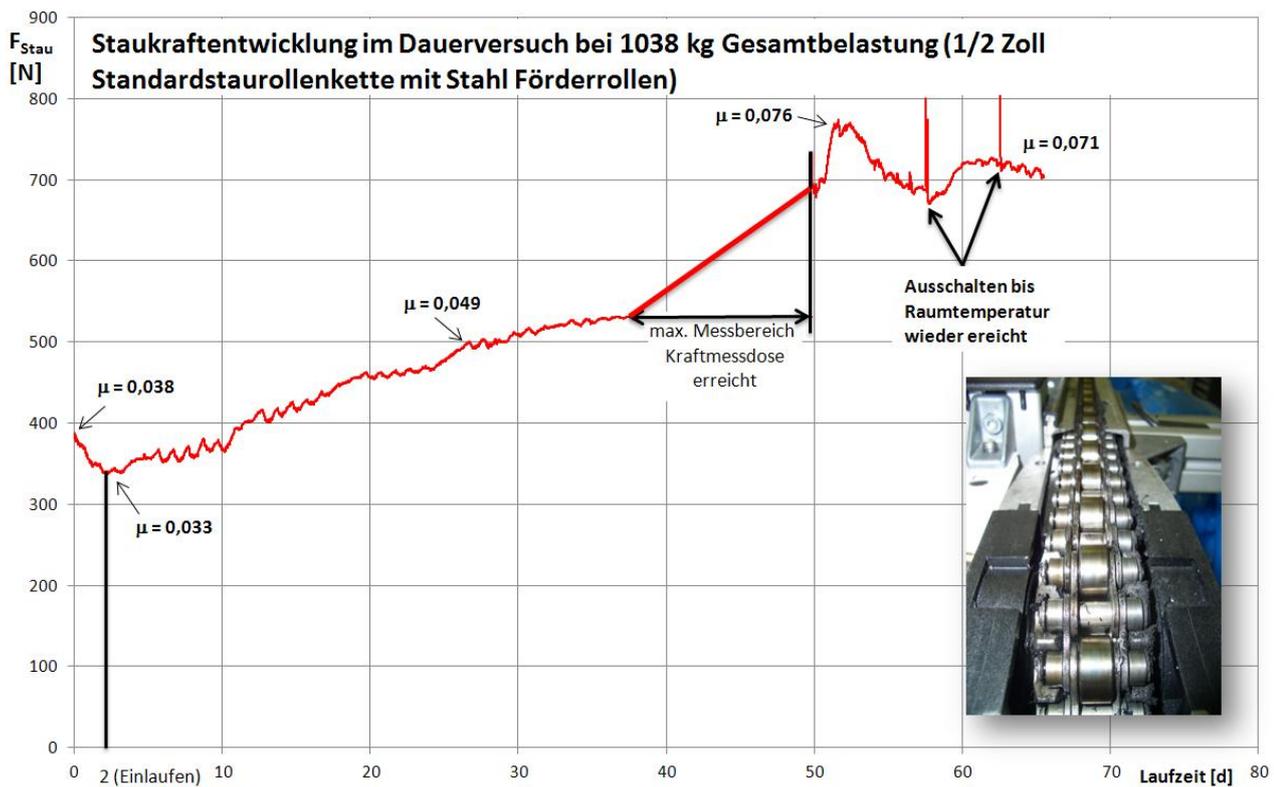
Bei Staurollenketten mit versetzten Förderrollen zeigen sich die Kräfte analog zur Abbildung 5.12, wobei die Staukraft, wie oben bereits beschrieben, etwas höher entsteht. Die aus den Einzelversuchen entstandenen Ergebnisse verdeutlichen zunächst einmal ausschließlich Werte, welche durch die Initialschmierung der Kettenhersteller entstanden sind. Der folgende Abschnitt untersucht das Verhalten der Kräfte unter praxisrelevanten Randbedingungen im Dauerversuch.

### 5.5.3. Untersuchung der Dauerfestigkeit am Versuchsstand

Hauptaugenmerk der folgenden Auswertungen im Dauerversuch der Staurollenketten liegt hierbei in der Untersuchung der  $\frac{1}{2}$  Zoll Staurollenkette. Ergebnisse der  $\frac{3}{4}$  Zoll Staurollenketten befinden sich in Anlage 2 dieser Arbeit und werden nachfolgend in Auszügen erwähnt.

#### Verhalten Stau- und Zugkraft:

Im Dauerversuch wurden neben den Messgrößen aus den Einzelversuchen auch die Kettenlängung und das Temperaturverhalten näher untersucht. Beim Verlauf der Staukraft im Dauerversuch zeigt sich zunächst einmal das für geschmierte Systeme typischen Einlaufverhalten innerhalb der ersten zwei Tage. Ab diesem Zeitpunkt beginnt die Staukraft des stark belastenden Gesamtsystems stetig anzusteigen. Hierbei verdoppelt sich die Staukraft innerhalb der nächsten 50 Tage unter der dauerhaften Staubelastung. Durch den unerwartet starken Anstieg der zu messenden Kraft musste zwischenzeitlich die Kraftmessdose ausgetauscht werden. Der fehlende Messbereich wurde im folgenden Diagramm durch eine lineare Funktion ersetzt.



**Abb. 5.13:** Staukraftentwicklung im Dauerversuch (1/2 Zoll Standardstaurollenkette)

Dieser enorme Anstieg des Reibbeiwertes der Förderrollen mit der Kettenbuchse wirkt sich demzufolge auch auf das gemessene Drehmoment am Antrieb und damit auch auf die wirkenden Zugkräfte der Kettenstränge aus. Die folgende Abbildung zeigt die ermittelten Zugkräfte durch die Drehmomentermittlung am Antrieb.

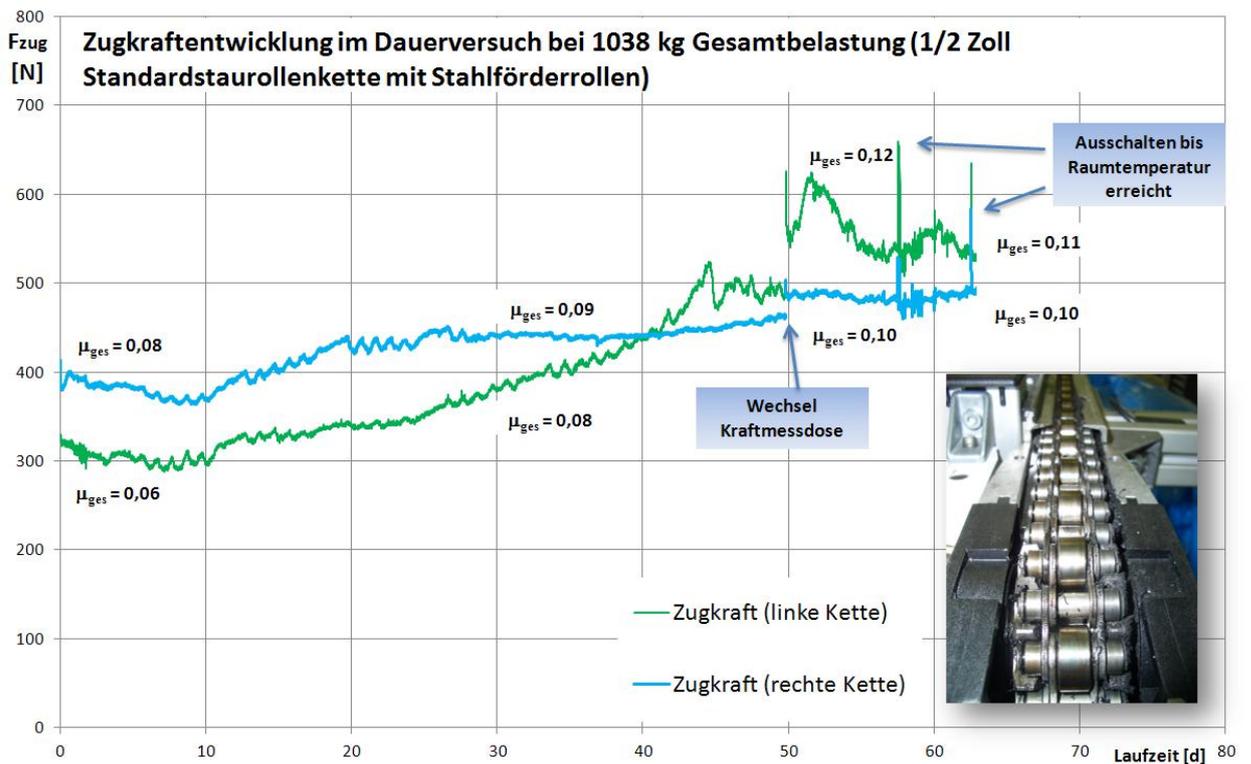


Abb. 5.14: Zugkraftentwicklung im Dauerversuch (1/2 Zoll Standardstaurollenkette)

Somit wurden als wichtige Kenngröße bei der Auslegung von Staurollenkettensystemen zunächst die Staukraft des Systems und dadurch der Reibbeiwert der Förderrollen und der Kettenbuchse definiert. Hierbei kann vermutet werden, dass durch eine ausreichende Schmierung bzw. rechtzeitiges Nachschmieren die wirkenden Zugkräfte deutlich optimiert werden können.

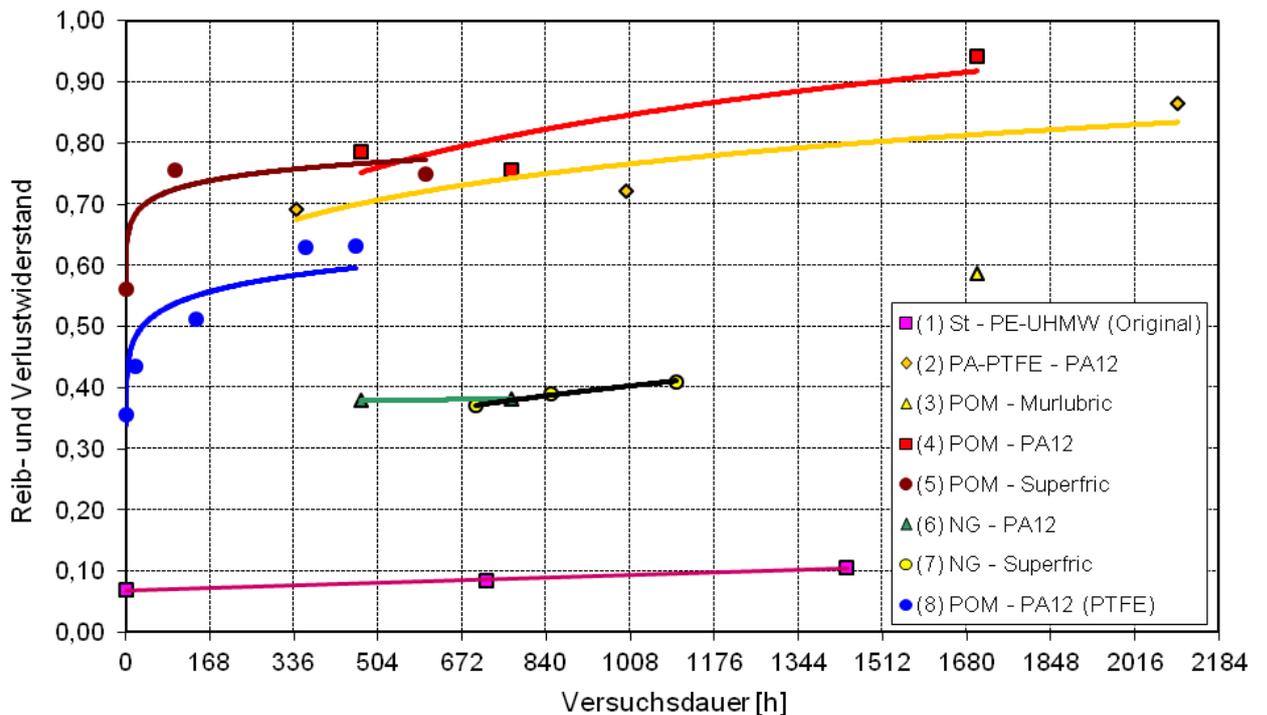


Abb. 5.15: Vergleich Gesamtreibbeiwert wartungsfreie Kunststoff-Staurollenkette [Sum02]

Während der Entwicklung der wartungsfreien Staurollenkette [Sum02] wurden verschiedene Kunststoffpaarungen im Dauerversuch getestet, um so unterschiedliche Reibbeiwerte zu ermitteln.

Die Abbildung 5.15 zeigt den Verlauf der Gesamtreibbeiwerte der wartungsfreien Kunststoff-Staurollenkette (Funktionen 2-8). Die Funktion 1 ergibt sich hierbei aus den ermittelten Werten der Standardstaurollenkette innerhalb dieser Arbeit. Die Werte liegen dauerhaft deutlich unter den Werten der anderen Werkstoffpaarungen der Kunststoff-Staurollenkette. Aufgrund der fehlenden zusätzlichen Schmierung zwischen Gleitschuh und Führungsschiene ist hier mit höheren Werten zu rechnen. Der Hauptbestandteil der ermittelten Reibbeiwerte entsteht durch die direkt wirkende Gleitreibung zwischen Schuh und Führungsprofil.

Bei Standardstaurollenketten kommt es zwischen Bolzen und Laufrollen zwar ebenfalls zu Gleitreibung, welche aber durch das in Punkt 4.3.1 beschriebene Verhältnis der Rollendurchmesser übersetzt wird und somit nur noch deutlich geringe Kräfte wirken. So zeigt sich, dass die Wahl von Gleitschuhen eher als ungünstig zu bewerten ist.

Die entwickelte wartungsfreie Kunststoff-Staurollenkette weist bei gleicher Belastung neben deutlich höheren auftretenden Zugkräften auch schlechtere Bruchfestigkeiten auf (Absatz 5.5.1). Trotz der eingesetzten Stahllaschen liegen die Bruchfestigkeiten hier bei ca. 25 % der Bruchfestigkeit der Standardstaurollenkette.

Somit ist der Einsatz der wartungsfreien Kunststoff-Staurollenkette aktuell nur in Bereichen zu empfehlen, in denen man auf die Möglichkeiten der hohen Belastung der Staurollenketten verzichten kann. Im Gegensatz dazu handelt es sich hierbei um eine komplett ungeschmierte Kette, welche sich sauber installieren lässt und wenig Wartungsaufwand verursacht.

#### *Kettenlängung:*

In Verbindung mit Kettensystemen wird oft die Kettenlängung als eines der wichtigsten Ausfallkriterien definiert. [Fle03] [Iwi07] [Rin91] Hierbei wird von einer notwendigen Auswechslung der Ketten bei 3 % Längung gesprochen. In unserem Versuchsstand wäre diese eine Ausfalllängung von ca. 360 mm. Am Versuchsstand wurde die Messung der Kettenlängung am Kettenspanner realisiert, wobei die Wegänderung des konstanten Spanngewichtes ermittelt wurde.

Die Abbildung 5.16 verdeutlicht die real erfahrene Kettenlängung innerhalb der 68 Tage Dauerversuchslaufzeit. Neben den Tag/Nacht Phasen kann man hierbei ebenso den Zeitraum der Wochenenden deutlich erkennen. Dies lässt sich auf die konstanten Raumbedingungen in der Versuchshalle zurückführen, welche nur nachts bzw. an Wochenenden vorzufinden sind. Diese Auffälligkeiten lassen sich in den anderen Messkurven wie z.B. der Staukraft ebenso wiederfinden, wobei hier die Auswirkung nicht so deutlich zu erkennen ist.

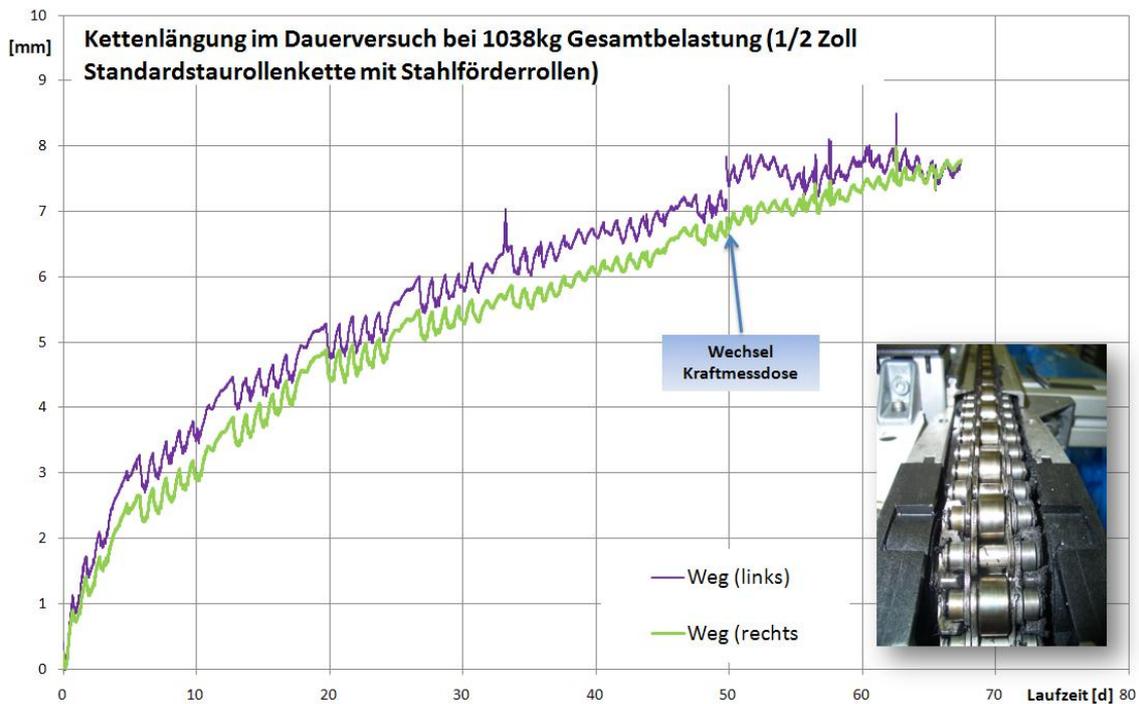


Abb. 5.16: Kettenlänge

Hier zeigt sich, dass die Kette nur maximal 8 mm Kettenlänge erfährt und so aktuell nur eine Längung von ca. 0,1 % aufweist. Es ist jedoch aus Gesprächen mit Kettenherstellern deutlich geworden, dass das lineare Verhalten der Kettenlänge später progressiv ansteigen wird. Jedoch ist die Kettenlänge von 8 mm noch weit von der Ausfalllänge der Kette entfernt. Analog durchgeführte Versuche zu Staurollenketten innerhalb diverser Industrieprojekte zeigten ebenfalls, dass das Kriterium der Kettenlänge von Staurollenketten bei der Auslegung der Ketten-systeme keine Rolle spielt. [Dom12]

Analog zur Untersuchung der Standardstaurollenkette wurde ebenfalls die Kette mit versetzten Förderrollen im Dauerversuch getestet. Es zeigt sich im Gegensatz zur Standardstaurollenkette, dass die Staukraft bereits in den ersten vier Tagen des Dauerversuches stark (um ca. 30 %) ansteigt. Ein Einlaufverhalten ist hierbei nicht zu erkennen. Diese Erhöhung des Reibbeiwertes zwischen Förderrolle und Buchse lässt auf eine schnellere Verteilung der Initialschmierung schließen, welche auf die Berührung der Förderrollen untereinander zurückzuführen ist. Nach fünf Tagen Dauerversuch bleibt die Staukraft nahezu konstant. Auch dieses Verhalten lässt sich durch die nun bessere Schmierung durch Berührung der Förderrollen untereinander begründen.

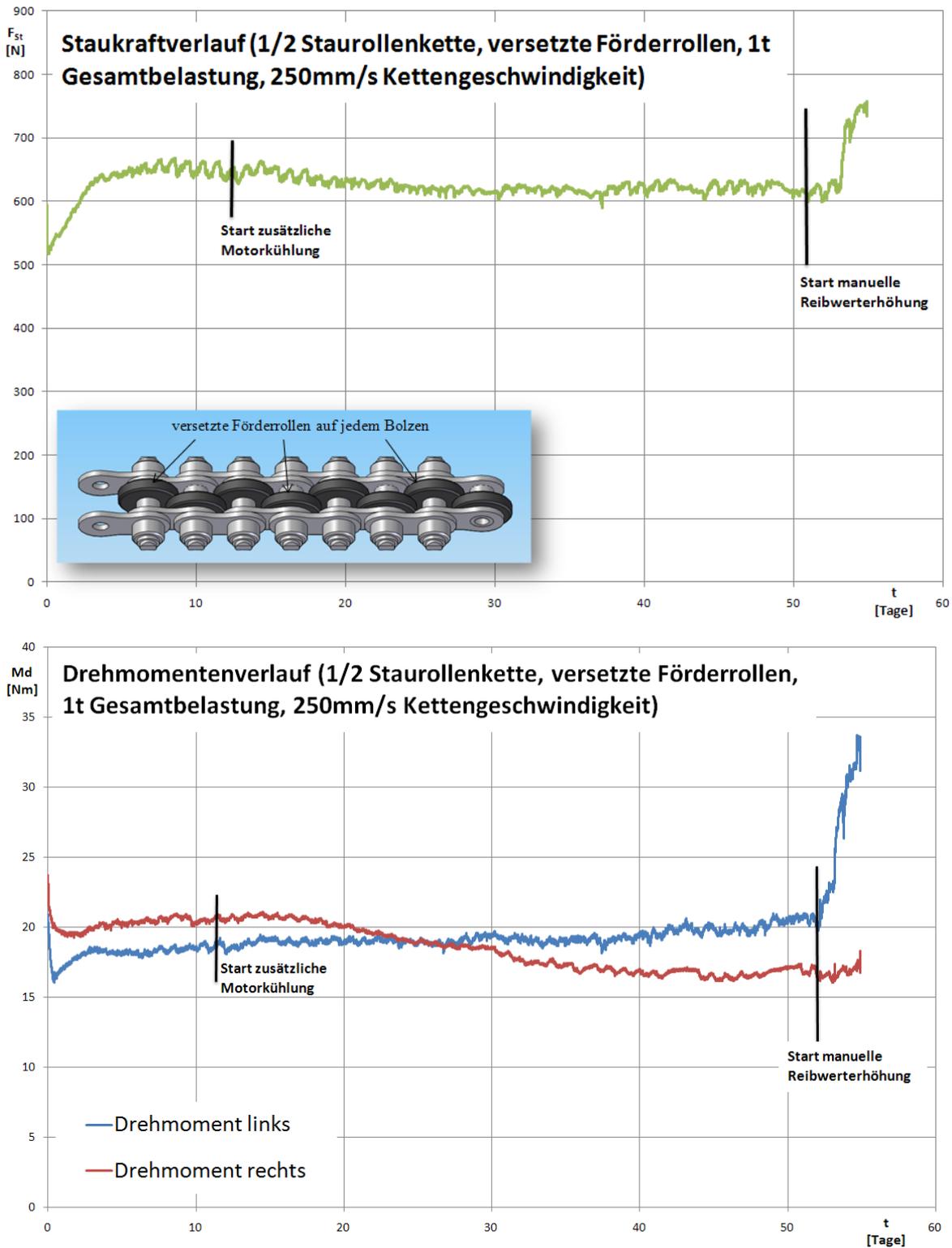


Abb. 5.17: Messkurvenverlauf Dauerversuch (1/2 Zoll mit versetzten Förderrollen)

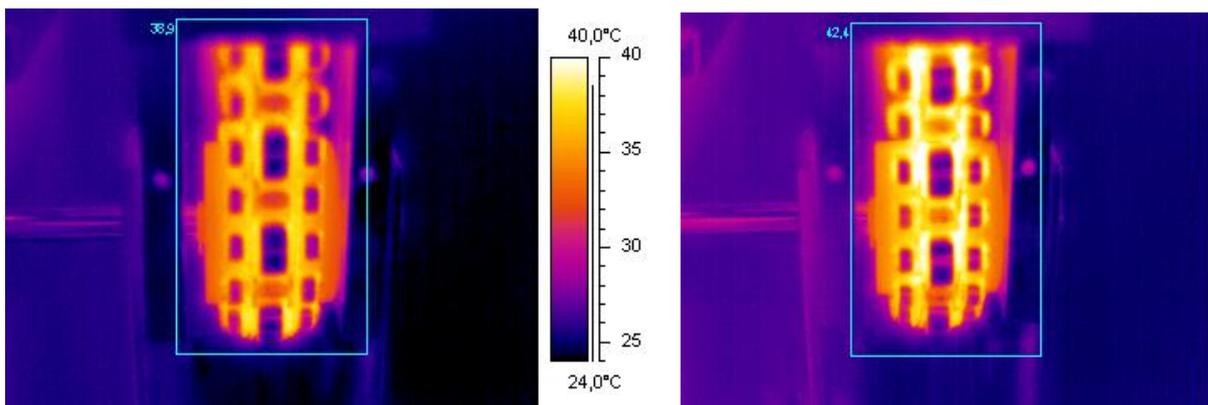
Im Diagramm lässt sich erkennen, dass nach ca. 51 Tagen eine manuelle Erhöhung der Reibwerte durchgeführt wurde. Diese wurde durchgeführt, um die Funktion der entwickelten Überwachungsstation unter Kapitel 6 nachzuweisen. Dadurch wurde die ermittelte Staukraft in 3 bis 4 Tagen um ca. 22 % erhöht. Analog dazu lässt sich diese Erhöhung ebenfalls im Drehmoment am

Antrieb und dadurch in der Zugkraft der Kette erkennen. Hierbei fällt die Erhöhung noch höher aus, weil nicht nur das System Förderrolle-Buchse, sondern auch das System Laufrolle-Bolzen manuell modifiziert wurde und somit gleich zwei Bestandteile der Zugkraft nach Formel (5.2) deutlich erhöht wurden.

#### *Temperaturverhalten:*

Die Untersuchung des Temperaturverhaltens der Staurollenketten wurde auf zwei unterschiedliche Arten durchgeführt. In regelmäßigen Abständen wurden Bilder mit der Thermokamera angefertigt. Nach dem Dauerversuch der Standardstaurollenkette konnte der Versuchsstand durch zwei berührungslose Temperatursensoren ergänzt werden. Durch diese Sensoren konnte eine dauerhafte Ermittlung der maximalen Kettentemperaturen erfolgen.

Nachfolgend sind zwei Thermobilder zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten dargestellt. Im linken Bild sind ca. fünf Tage Laufzeit des Dauerversuches vergangen und die Zugkraft im System ist hierbei während der gesamten Laufzeit am geringsten. Als maximale Temperatur lassen sich zu diesem Zeitpunkt ca. 37 °C ermitteln.



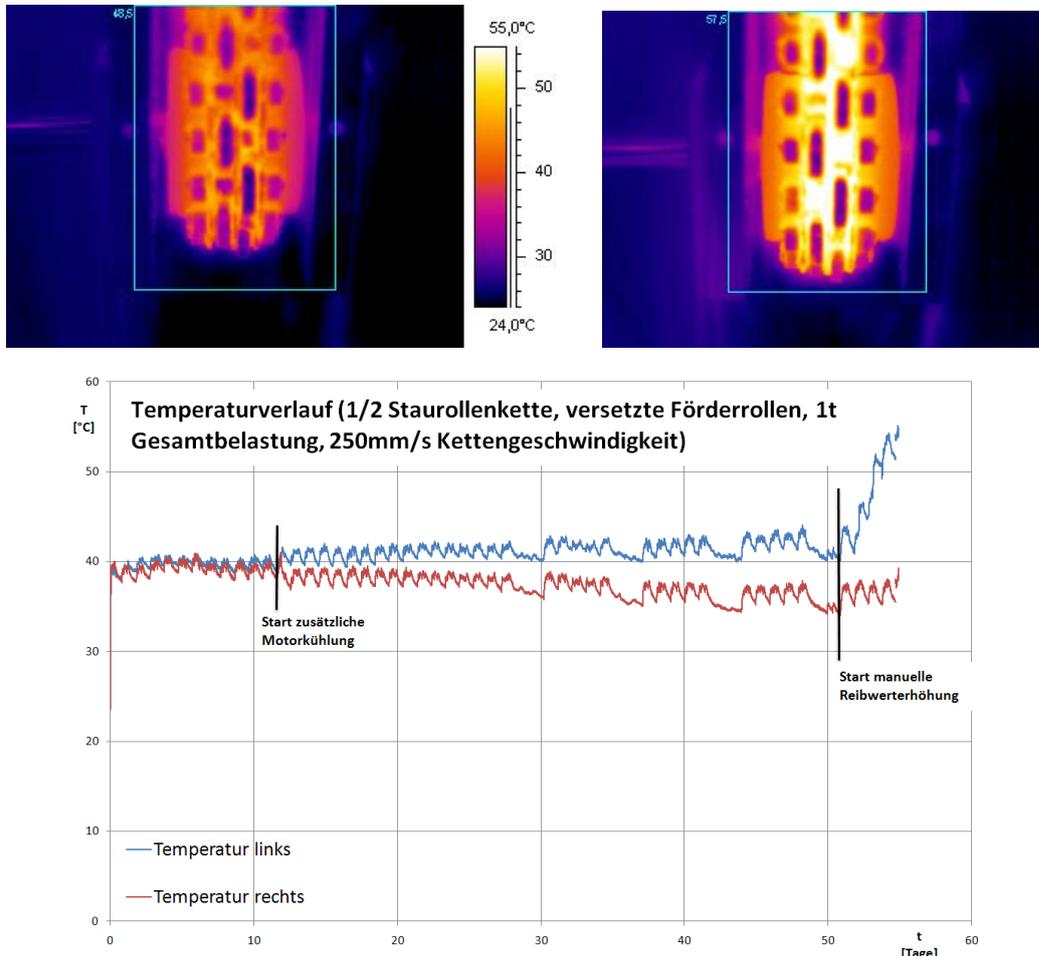
**Abb. 5.18:** Thermobilder 1/2 Zoll Standardstaurollenkette

Im Gegensatz dazu zeigt das rechte Bild die Kette nach einer Laufzeit von ca. 50 Tagen und einer maximalen Temperatur von ca. 42,5 °C. Genau nach dieser Laufzeit war die gemessene Zugkraft im System am höchsten. Eine Temperatur von unter 50 °C kann jedoch für die Kette mit ausschließlich Stahlkomponenten nicht als kritisch gesehen werden.

Wenn man diese gemessenen Temperaturen mit den durch die FEM Simulation ermittelten Werten vergleicht, wird deutlich, dass die absoluten Temperaturwerte im Versuch unter den durch die Simulation ermittelten Werte liegen. Dies lässt auf einen besseren Wärmeübergang im kompletten System schließen, welcher in der Simulation nur teilweise berücksichtigt werden konnte. Die Temperaturverteilung entspricht aber zum Großteil dem simulierten Verlauf. So ist die maximale simulierte Temperatur direkt unterhalb der Förderrolle, welche im Thermobild leider nicht angezeigt werden kann. Abweichungen zum Ergebnis der FEM können unterschied-

liche Ursachen haben. In der FEM wird z.B. ein ideales System frei von Fertigungstoleranzen und Inhomogenitäten bei dauerhaft konstanter Raumtemperatur angesetzt.

Durch das Nachrüsten der Temperatursensoren konnte im Dauerversuch der Staurollenkette mit den versetzten Förderrollen die Temperatur dauerhaft aufgezeichnet werden. Zunächst wurde mit der Thermokamera die Stelle mit der maximalen messbaren Temperatur ermittelt und die Sensoren darauf ausgerichtet und gegen mögliche Störfaktoren geschützt.



**Abb. 5.19:** Temperaturentwicklung 1/2 Zoll Staurollenkette mit versetzten Förderrollen

Maximale Temperaturen entwickeln sich hierbei ebenfalls unter der Förderrolle. Da es sich bei dieser Kettenart um Förderrollen in halber Breite gegenüber einer Standardstaurollenkette handelt, können in diesem Fall die Temperaturen direkt an dieser Stelle durch die Thermokamera angezeigt und durch die Sensoren dauerhaft überwacht werden. Demzufolge sind die maximalen Temperaturen im Messfeld der Kamera höher als bei der Standardstaurollenkette, wo die Stelle der maximalen Temperatur durch die breite Förderrolle verdeckt ist.

Aus dem Temperaturverlauf während des gesamten Dauerversuches lässt sich erkennen, dass sich die Kettenstränge unterschiedlich erhitzen und somit unterschiedliche Reibbeiwerte entstehen. Dies kann die Folge unterschiedlicher Auslöser sein. So ist z.B. eine unsymmetrische Belastung des Werkstückträgers nicht auszuschließen. Weiterhin könnte die Position des Motors im System eine Rolle spielen. Der rechts angeordnete Motor wurde durch einen zusätzlichen Venti-

lator nach ca. 12 Tagen Laufzeit gekühlt. Durch die daraus entstandene zusätzliche Strömung ist eine bessere Wärmeableitung des rechten Kettenstranges vorstellbar und die gemessenen Werte sind, gerade nach der Anbringung der zusätzlichen Lüftung, geringer als beim linken Kettenstrang.

Nach der manuell durchgeführten Modifikation, wodurch die Reibbeiwerte des Systems durch das gezielte Einstreuen von Sand erhöht wurden, ist ein deutlicher Temperaturanstieg zu verzeichnen. Es konnten Temperaturen bis ca. 57,5 °C gemessen werden.

Aus den Thermobildern lässt sich zusätzlich erkennen, dass es bei den Laufrollen teilweise zu größeren Temperaturunterschieden von bis zu 5 °C kommt. Gerade bei den Laufrollen ist es vorstellbar, dass einzelne Rollen nicht das gewünschte Bewegungsverhalten durchführen. So ist es möglich, dass es zum Wechsel der auftretenden Reibart kommt und die Rolle teilweise zum Gleiten kommt. Somit wird aus der Rollreibung zwischen Laufrolle und Führungsprofil, welche in vorangegangenen Betrachtung vernachlässigt wurde, wieder Gleitreibung, die eine zusätzliche Wärmequelle in das System Rolle-Bolzen bringt und somit einzelne Rollen sich deutlich stärker erhitzen können. Förderrollen sind von diesem Wechsel der Reibarten aufgrund ihrer größeren Bauform nicht bzw. nur in geringem Umfang betroffen.

Die Temperaturbetrachtungen der  $\frac{3}{4}$  Zoll Staurollenkette wurden analog zu den eben beschriebenen Untersuchungen durchgeführt und konnten die eben erwähnten Auffälligkeiten und Eigenschaften verifizieren.

Folgende Abbildung 5.20 wurde aus der Menge der Thermobilder zur  $\frac{3}{4}$  Zoll Kette herausgegriffen, weil diese nochmals die unterschiedliche Temperaturentwicklung einzelner Laufrollen verdeutlicht. Hier sind in einem kleinen Kettenstück von nur ca. 60 cm gleich mehrere auffällige Laufrollen zu sehen. Mit steigender Laufzeit des Dauerversuches ist auch die Anzahl solcher Laufrollen angestiegen.

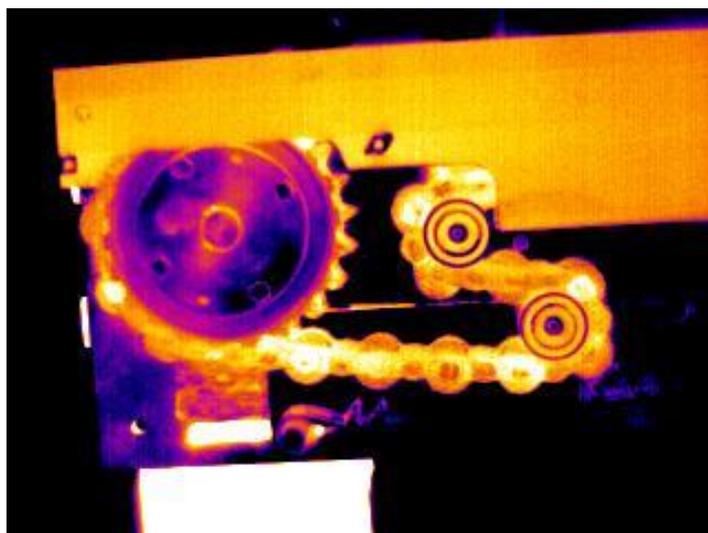
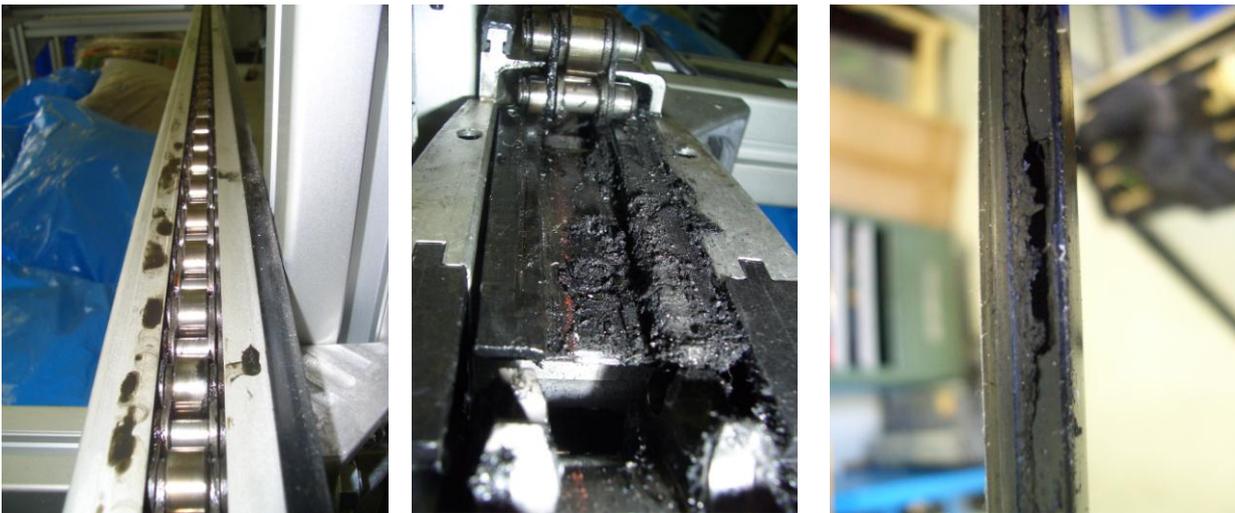


Abb. 5.20: Temperaturentwicklung an den Laufrollen ( $\frac{3}{4}$  Zoll)

### *Verschleißuntersuchungen:*

Nach dem Dauerversuch ist eine Betrachtung der einzelnen Systemkomponenten notwendig, um so mögliche Schwachstellen der Bauteile zu detektieren. So zeigt sich schnell, dass die Initialschmierung der ½ Zoll Staurollenkette aus dem Hause Flexon gerade zu Beginn des Dauerversuchs zur Verschleppung des Öls durch die Werkstückträger führt. Besonders gut lässt sich dies im linken Bild in Abbildung 5.21 erkennen. Anbieter von Staurollenkettensystemen wollen, dass ihre Systeme komplett ohne außen auftretendes Öl laufen. So ist ein Schmiermittel, welches an Antrieb- und Umlenkstation tropft nicht für ihre Ketten einsetzbar, weil der Kunde ein komplett sauberes System wünscht. Weiterhin zeigt sich nach dem Dauerversuch ein starker Verschleiß an den Führungsschienen im System. Aus der Mischung von Kunststoffabrieb und verschmutztem Öl bildet sich eine Verbindung, welche sich durch die laufenden Ketten im System verteilt und sich somit negativ auf die Reibbeiwerte auswirkt. Die hohe Belastung der Komponenten im System hat ebenfalls dazu geführt, dass die Führungsschienen teilweise komplett verschliffen waren. Dieser Zustand lässt sich im rechten Bild erkennen.

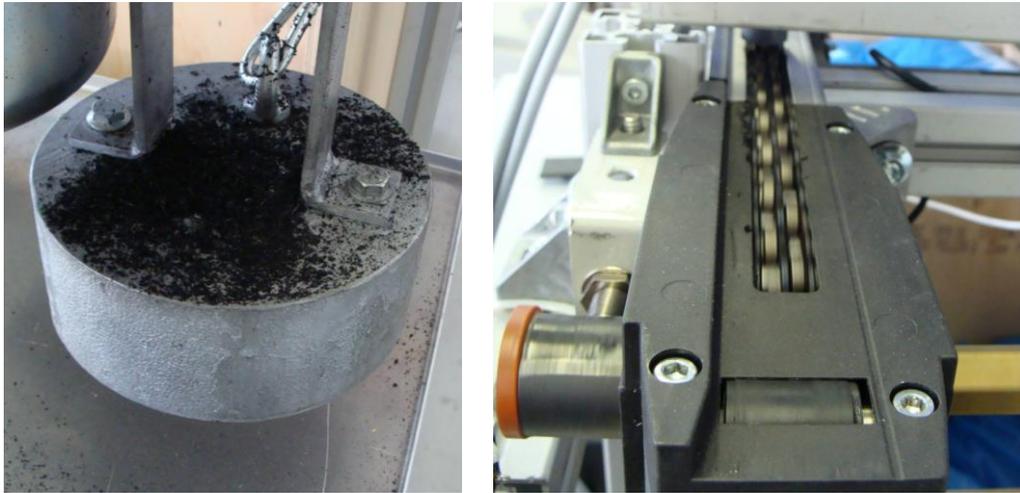


**Abb. 5.21:** Verschleißbetrachtung nach Dauerversuch ½ Zoll Standardstaurollenkette

Bei Werkstückträgern der Firma Bosch Rexroth, welche für die Verwendung mit Staurollenkettensystemen extra mit PE-UHMW Laufschiene ausgestattet sind, tritt nahezu kein Verschleiß auf. Lediglich die Laufbahn der Förderrollen ist optisch zu erkennen, wobei aber keine Eindruckstellen oder ähnliche Verschleißmerkmale aufgetreten sind.

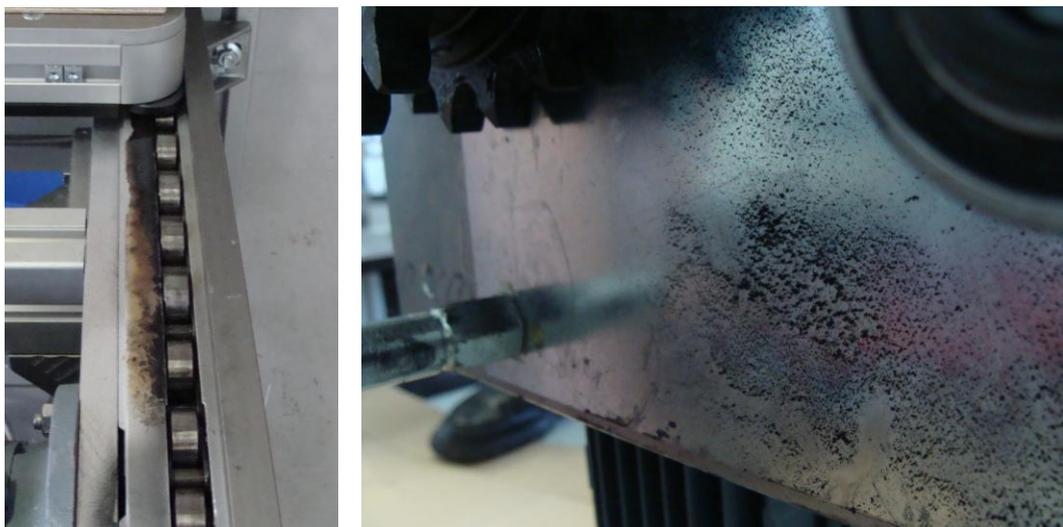
Bei der zweiten getesteten ½ Zoll Kette der Firma Iwis zeigt sich nach dem Dauerversuch ein ähnliches Bild. Auf dem angebrachten Gewicht zur konstanten Kettenspannung ist deutlicher Abrieb zu erkennen. Dieser Abrieb ist auch in diesem Fall wieder zum Großteil durch den Verschleiß der Führungsschienen entstanden und wird dann durch die laufenden Ketten verschleppt. Besser als bei der Standardstaurollenkette ist hierbei die Initialschmierung zu bewerten. Es treten zum Beginn des Versuchs keine Ölflecken oder -tropfen auf. Neben einem Schmierstoff mit

einer höheren Viskosität kann dies ebenfalls auf eine bessere Verteilung der Initialschmierung durch die höhere Anzahl an Rollen zurückzuführen sein.



**Abb. 5.22:** Verschleißbetrachtung nach Dauerversuch 1/2 Zoll Kette mit versetzten Rollen

Aufgrund der eingesetzten Stahlführungsschienen im Dauerversuch mit den 3/4 Staurollenketten war hierbei nach dem Dauerversuch der Abrieb nicht mit Versuchen bei Kunststoffleisten zu vergleichen. Jedoch tritt hierbei analog zur 1/2 Zoll Standardstaurollenkette wieder eine Verschleppung der Initialschmierung auf. In Abbildung 5.23 kann man erkennen, dass der Schmierstoff nicht vom Werkstückträger verschleppt wird, sondern der Schmierstoff durch Fliehkräfte direkt auf das Profil herausgedrückt wird. Besonders intensiv geschieht dies in den ersten Stunden des Dauerversuches. Nachdem der überflüssige Schmierstoff aus dem System ausgetreten ist, entsteht in diesem Fall nur noch ein feiner Metallabrieb, der sich innerhalb des kompletten Systems verteilt. In der Abbildung rechts ist die Wand der Antriebsstation und der sich darauf abgelagerte Abrieb zu sehen.



**Abb. 5.23:** Verschleißbetrachtung nach Dauerversuch 3/4 Zoll Standardstaurollenkette

Der Großteil dieses Abtriebes stammt von den Führungsschienen, welche für die hohen Lasten zwar aus Stahl sind, aber trotzdem noch Verschleiß aufweisen. Die folgende Abbildung zeigt ein Stück dieser Leiste aus dem Programm der Firma Altratec und die deutlich zu erkennenden Zerstörungen der Führungsschiene, welche in dieser Ausführung mit einer extra Erhöhung für die Laufrollen ausgestattet ist.



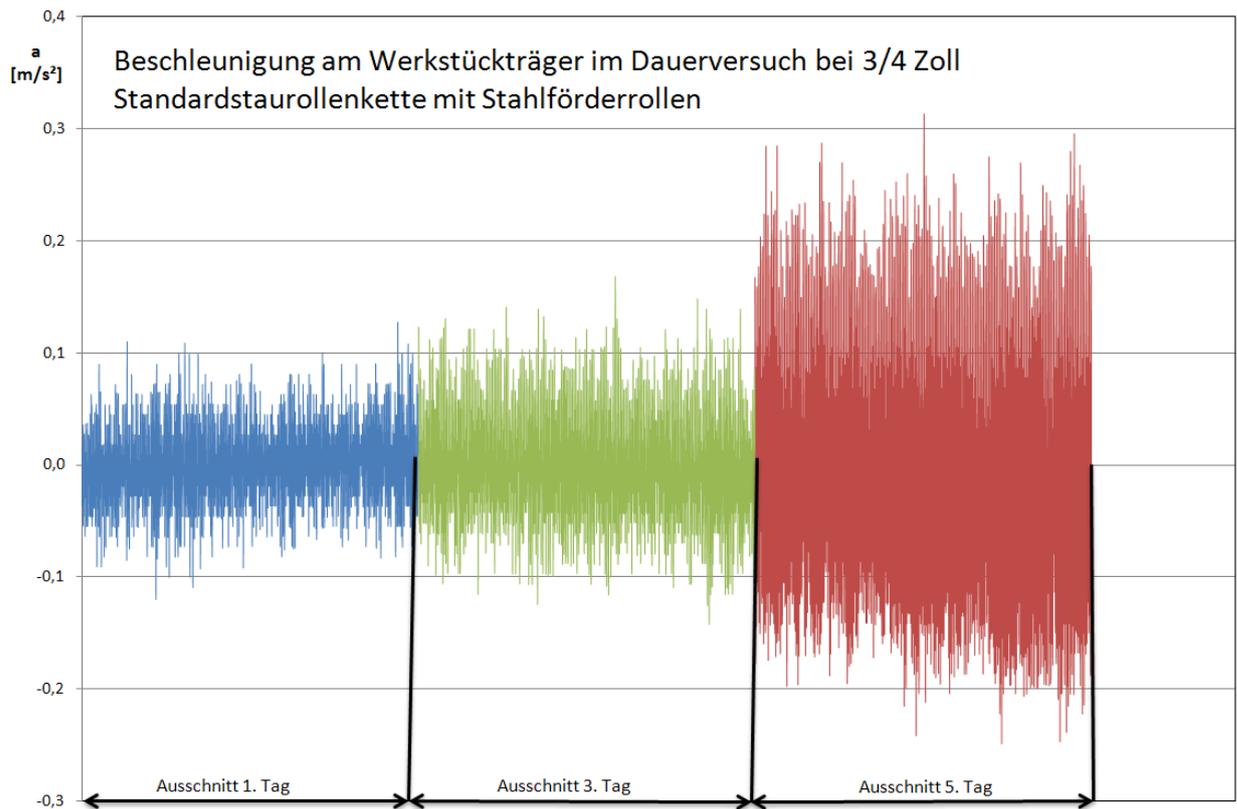
**Abb. 5.24:** Führungsschiene Firma Altratec mit Erhöhung für Laufrollen

#### *Laufverhalten der Werkstückträger im Staubetrieb:*

Um den aktuellen Zustand zu ermitteln wurde ein Beschleunigungssensor in Richtung der Staustelle an der Mitte des ersten Werkstückträgers im Dauerversuch befestigt. Dieser ermittelt die Beschleunigung, die auf den Werkstückträger in horizontaler Richtung wirkt.

Hierbei lässt sich deutlich erkennen, dass die Amplituden der gemessenen Beschleunigungen deutlich mit steigender Laufzeit bis auf 300 % ansteigen. Da diese im Staubetrieb direkt am Werkstückträger gemessen werden, sind diese Beschleunigungen auf das Einlaufen der Förderrollen unter dem Träger zurückzuführen. Durch gut geschmierte Rollen im Neuzustand der Ketten wirkt sich dieses Einlaufen kaum aus, wobei jedoch schnell die Initialschmierung der Kette aufgebraucht ist und die Rollen schwerer abrollen und zu größeren Beschleunigungen am Werkstückträger führen.

Eine Darstellung der gemessenen Beschleunigungen zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten im Dauerversuch der  $\frac{3}{4}$  Zoll Staurollenkette ist in Abbildung 5.25 zu sehen.



**Abb. 5.25:** Beschleunigungen am Werkstückträger

Um mögliche Gründe und die Intensitäten der Verursacher zu finden, wurde hier zunächst eine FT-Analyse durchgeführt. Hierbei wurde zwischen einer allgemeinen DFT und der schnelleren FFT - Analyse gewählt.

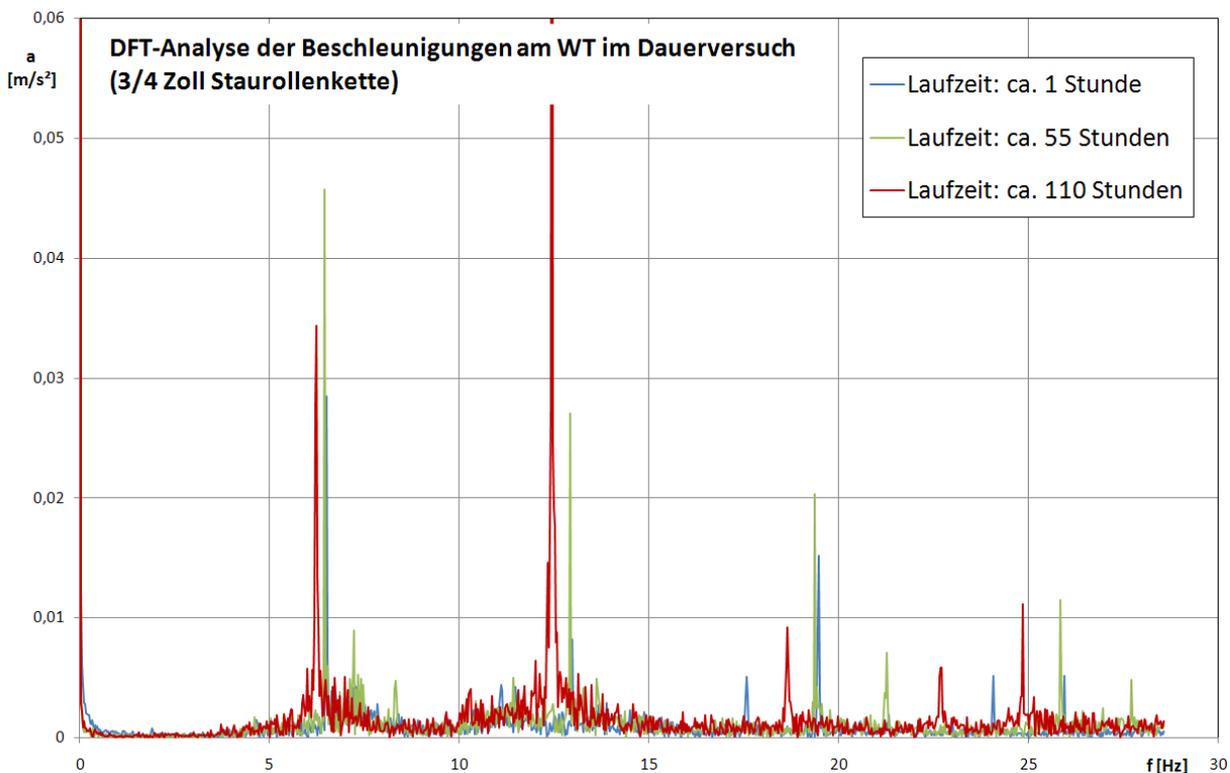
Die Fast Fourier Transform (FFT - Schnelle Fourier-Transformation) zerlegt ein Zeitsignal (oder andere Variable) in komplexe Exponentialfunktionen (Sinus, Kosinus). Eine Fourier-Transformation bietet komplette Information über den Frequenzbereich, enthält aber keinerlei Information über das zeitliche Auftreten von Signalkomponenten. Deshalb muss das Signal stationär sein (mit konstantem Mittelwert und Varianz über weite Zeitbereiche) oder es macht nur qualitative Aussagen über spektrale Komponenten möglich, wenn diese irgendwo im erfassten Zeitbereich auftreten. Die FFT ist ein schneller Algorithmus zur Erzeugung einer Diskreten Fourier-Transformation (DFT). Eine Diskrete Fourier-Transformation und ihre Rücktransformation sind wie folgt definiert [Wei03]:

$$\mathbf{X}_n = \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{x}_k e^{i2\pi kn} \quad (5.6)$$

$$\mathbf{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{X}_n e^{-i2\pi kn} \quad (5.7)$$

Die DFT ist relativ einfach durchzuführen, hat jedoch eine Laufzeit, welche proportional zu  $n^2$  ist. Ein FFT ist dagegen proportional zu  $n \log_2(n)$ . Der Unterschied in der Berechnungsgeschwindigkeit ist nur für sehr große Datensätze von Vorteil. Dadurch werden die Untersuchungen hier mit der DFT durchgeführt.

Das vergleichende Ergebnis dieser Analyse innerhalb des Dauerversuchs der  $\frac{3}{4}$  Zoll Staurollenkette ist im folgenden Diagramm dargestellt. Anhand dieser Analyse wird es möglich, aus dem Messsignal auffällige Frequenzen herauszufiltern und die Stärke der Einflüsse bekannter Frequenzen zu ermitteln. Ebenso können durch eine DFT neue noch unbekannte Eigenfrequenzen gefunden werden, um so auftretende Störeinflüsse zu beseitigen.



**Abb. 5.26:** DFT-Analyse im Dauerversuch (3/4 Zoll Staurollenkette)

Aus der eingestellten Kettengeschwindigkeit und der Teilung der Kette lässt sich über folgende Formel die Frequenz des Einlaufes der Förderrollen unter dem WT ermitteln. Hierbei ist zu beachten, dass bei einer Standardstaurollenkette nur jede zweite Buchse mit einer Förderrolle belegt ist.

$$f = \frac{v_{\text{kette}}}{p} \quad (5.8)$$

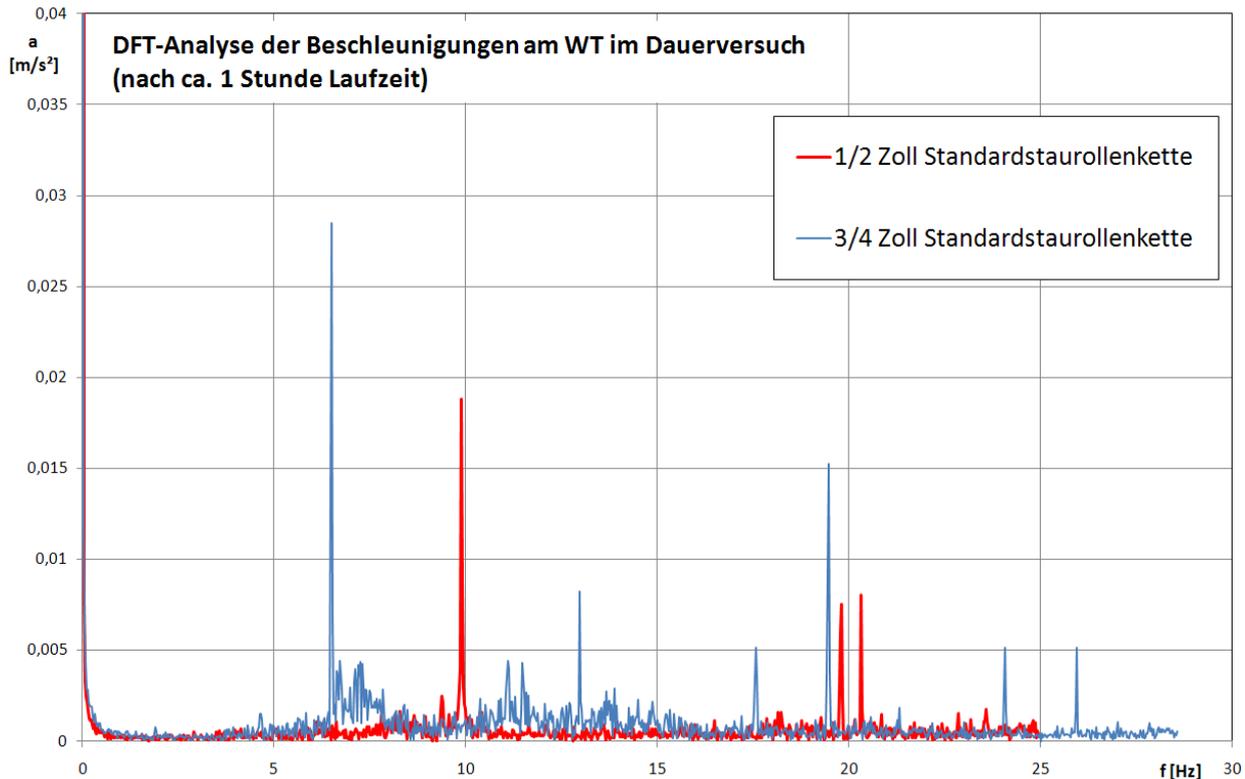
Es ergibt sich bei einer angesetzten Geschwindigkeit von 250 mm/s die Einlauffrequenz von 6,6 Hz, welche durch die DFT Analyse mit allen ihren Ordnungen in Abbildung 5.26 deutlich zu erkennen ist. Mit steigender Laufzeit des Dauerversuchs kommt es zu einer Reduzierung dieser Frequenz. Dies lässt sich auf eine sinkende Geschwindigkeit der Ketten zurückführen, welche durch den steigenden Motorschlupf bei Erhöhung des Drehmomentes auftritt. Die folgende Tabelle zeigt die über die DFT Analyse ermittelte Frequenz und die aus der Kettenteilung ermittelten Kettengeschwindigkeiten. Nach 110 Stunden Laufzeit ist diese um ca. 4 % abgesunken.

**Tab. 5.8:** Geschwindigkeitsabfall im Dauerversuch

	<b>über DFT ermittelte Frequenz</b>	<b>Kettengeschwindigkeit</b>
<b>ca. 1 Stunde Laufzeit</b>	6,49 Hz	247,3 mm/s
<b>ca. 55 Stunden Laufzeit</b>	6,46 Hz	246,1 mm/s
<b>ca. 110 Stunden Laufzeit</b>	6,23 Hz	237,4 mm/s

Besonders auffällig ist in der DFT Analyse die stark erhöhte Amplitude der Kurve nach 110 Stunden Laufzeit. Diese lässt sich auf unterschiedliche Einschlüsse zurückführen. Es handelt sich hierbei um eine Überlagerung mehrerer Einflüsse. Neben dem Eingriff der Förderrolle findet hier ebenfalls der Eingriff der Laufrollen in das Kettenrad statt. Genau bei diesem Einlauf kommt es zum Polygoneffekt der Ketten. Bei gleichförmig bewegtem Kettenrad führen die Kettengelenke eine ungleichförmige Bewegung aus. Bedingt durch diese Ungleichförmigkeit treten am Kettentrieb zusätzliche Beschleunigungen auf, welche mit steigendem Verschleiß z.B. Kettenlängung ansteigen. Ebenso kann eine Eigenfrequenz zusätzlich zu der Erhöhung der Amplitude dieser Messkurve führen. Die gesunkene Geschwindigkeit und die damit verbundene Frequenzverschiebung können dazu führen, dass diese Eigenfrequenz sich erst bei der Messkurve nach 110 Stunden Laufzeit mit überlagert.

Weiterhin treten bei unterschiedlichen Frequenzen kleine auffällige Amplituden auf. Diese sind ebenfalls auf vorhandene Eigenfrequenzen im System zurückzuführen. In ihrer Stärke liegen sie jedoch bei durchschnittlich ca. 15 % der Amplitude der Einlauffrequenz der Förderrollen unter den Werkstückträger.



**Abb. 5.27:** DFT-Vergleich unterschiedlicher Kettengrößen

Zum Vergleich unterschiedlicher Kettengrößen sind in der Abbildung 5.27 die Diagramme der durchgeführten DFT Analysen der  $\frac{1}{2}$  und der  $\frac{3}{4}$  Zoll Standardstaurollenketten nach einer Stunden Laufzeit dargestellt. Durch die unterschiedlichen Teilungen liegen die markanten Amplituden selbstverständlich bei verschiedenen Frequenzen. Im Vergleich zeigt sich, dass die Intensität der auftretenden Amplituden bei der  $\frac{3}{4}$  Zoll Staurollenkette um 47 % höher liegen. Zurückzuführen ist dies auf die unterschiedlich großen Förderrollen und den dadurch härteren Stoß auf den Werkstückträger.

Auffällig ist bei der  $\frac{1}{2}$  Zoll Staurollenkette, dass es neben der ermittelten Frequenz des Einlaufes der Förderrolle bei ca. 9,8 Hz noch eine weitere markante Amplitude erster Ordnung bei der Frequenz von 20,3 Hz gibt. Hierbei kann auf eine Eigenfrequenz geschlossen werden, weil die Frequenz auch bei sinkender Kettengeschwindigkeit durch höhere Motorlast konstant bei ca. 20,3 Hz bleibt. Es lässt sich auf eine Gestellschwingung schließen, welche durch das System hervorgerufen wird. Da diese Versuchsstrecke in der oberen Etage des Versuchstandes angeordnet ist, können diese Schwingungen nur schlecht abgebaut werden.

## 5.6. Schlussfolgerungen

Aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen konnten die Bruch- und Dauerfestigkeiten nach ISO15654 unterschiedlicher Staurollenketten ermittelt werden. Hierbei zeigte sich, dass die Bruchkräfte der Ketten mit den Werten der Standardrollenketten nach ISO606 [DIN02] übereinstimmen. Starke Unterschiede konnten aber bei der Ermittlung der Dauerfestigkeiten nach ISO15654 [DIN04] ermittelt werden. Hierbei lagen die Dauerfestigkeiten ca. 52 % unter den Werten der vergleichbaren Rollenketten. Durch gleiche geometrische Abmessungen ist die Schlussfolgerung hieraus, dass für Rollenketten qualitativ hochwertigeres Material für Bolzen bzw. Laschen verwendet wird, weil es in der ISO606 [DIN02] feste Werte für die Bruchkräfte der Ketten gibt. Für Staurollenketten existiert dazu jedoch noch kein Regelwerk.

Durch die Ermittlung von Einflussgrößen auf die wirkenden Kräfte im Staurollenkettensystem wurden unterschiedliche Kettenarten durch eine Vielzahl von Versuchen untersucht. Dadurch konnten verschiedene Reibbeiwerte absolut ermittelt werden. Eine wichtige Vereinfachung innerhalb der durchgeführten Ermittlungen ist die Annahme, dass man den Anteil der Rollreibung zwischen Förderrolle und Werkstückträger, sowie die Rollreibung zwischen Laufrollen und Führungsschiene im Verhältnis zu den deutlich höheren Reibbeiwerten der Gleitreibung im Inneren der jeweiligen Rollen vernachlässigen kann. Dies wurde in den Untersuchungen ausreichend nachgewiesen. Es ergeben sich die folgenden Formeln zur Auslegung der Förderketten in denen das Verhältnis der Rollendurchmesser der Förder- ( $i_{FR}$ ) bzw. der Laufrollen ( $i_{LR}$ ) eingeht. Als hier einzusetzende Reibbeiwerte können die schnell zu ermittelnden Werte aus den Pendelversuchen herangezogen werden.

$$F_{Zug} = \frac{(\mu_{FR-Buchse} \cdot i_{FR} + \mu_{LR-Bolzen} \cdot i_{LR}) \cdot m_{FG} \cdot g \cdot S}{\text{Anzahl Kettenstränge}} \quad (5.9)$$

$$F_D \geq F_{Zug} \quad (5.10)$$

Bei der Auslegung ist darauf zu achten, dass die hierbei bestimmte Zugkraft nicht über der nach ISO15654 [DIN04] ermittelten Dauerfestigkeit liegen darf. Der Sicherheitsfaktor  $S$  ergibt sich aus den gefahrenen Dauerversuchen und den daraus ermittelten Verlauf der Reibbeiwerte bei härtester Belastung, welche im Normalfall in der Praxisanwendung nicht auftreten werden. Selbst bei der als Lebensdauer einer Staurollenkette angegebenen Laufzeit von 3000 Stunden [Bos08] haben Versuche gezeigt, dass der Sicherheitswert von 2 nicht überschritten wird. Hierbei wurde unter höchsten Belastungen ohne Nachschmierung getestet. [Dom07][Dom12]

Im Pendelversuch wurden, ohne einen kompletten Versuchsstand aufbauen zu müssen, die in den Formeln benötigten Reibwerte ermittelt. Durch Versuche an einer Teststrecke konnten diese

Werte für  $\frac{1}{2}$  und  $\frac{3}{4}$  Zoll Staurollenketten in unterschiedlichen Werkstoffvarianten als ausreichend genau verifiziert werden.

Über Dauerversuche konnte das Verhalten der Reibbeiwerte untersucht werden. Es zeigte sich, dass  $\frac{1}{2}$  Zoll Ketten sehr lange Laufzeiten ohne kritische Erhöhung dieser Werte unter höchsten Lasten gefahren werden können. Im Gegensatz dazu kam es bei  $\frac{3}{4}$  Zoll Ketten bereits nach 5 Tagen zur Überlastung des Antriebsmotors, weil der Reibbeiwert zwischen Laufrollen und Bolzen sich enorm erhöht hat. Die Überwachung von auftretenden Temperaturen machte deutlich, dass sich hierbei die Laufrollen stark unterschiedlich erwärmen und somit die Rollreibung zwischen Rolle und Führungsprofil zu einem Gleitvorgang übergegangen sein könnte.

Innerhalb aller Dauerversuche wurde dauerhaft die Kettenlängung der einzelnen Kettenstränge ermittelt. Nach der kompletten Laufzeit der Dauerversuche stellte sich hierbei eine Längung von ca. 0,1 % ein. Da Ketten ab 3 % Längung als verschlissen gelten [Fle03], ergibt sich die wichtige Schlussfolgerung, dass bei der Auslegung und bei Verschleißbetrachtungen die Kettenlängung bei Fördersystemen mit Staurollenketten vernachlässigbar ist.

Zusätzlich konnten durch DFT-Analysen die Beschleunigungen am Werkstückträger genauer zerlegt und untersucht werden. Hierbei konnte als markanteste Frequenz der Einlauf der Förderrollen unter den WT ermittelt werden. Durch Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des Dauerversuches zeigt sich die sinkende Kettengeschwindigkeit durch Anstieg des Motorschlupfes bei Erhöhung der Drehmomente am Antrieb. Aus den Ergebnissen kann ebenfalls geschlussfolgert werden, dass die  $\frac{1}{2}$  Zoll Ketten zu einem ruhigeren Laufverhalten führen. Mit steigender Laufzeit nehmen die gemessenen Beschleunigungen am Werkstückträger zu. Ebenso konnten einige unauffälligere Eigenfrequenzen detektiert werden, welche nur geringe Amplituden aufweisen, aber bei einigen Messungen zu Überlagerungen mit dem Polygoneffekt bei Einlauf der Laufrollen in das Kettenrad und der Förderrollen unter dem Werkstückträger geführt haben.

Bei vergleichenden Untersuchungen der Standardstaurollenketten mit den wartungsfreien Kunststoff-Staurollenketten hat sich gezeigt, dass der Einsatz der wartungsfreien Kunststoff-Staurollenkette aktuell nur in Bereichen zu empfehlen ist, in denen man auf die Möglichkeiten der hohen Belastung der Staurollenketten verzichten kann. Jedoch erhält man eine komplett ungeschmierte Kette, welche sich sauber installieren lässt und wenig Wartungsaufwand verursacht. Durch die eingesetzten Gleitschuhe kommt es zu reiner Gleitreibung, welche deutlich höhere Reibbeiwerte erzeugt als die über die Rollendurchmesser übersetzte Gleitreibung zwischen Laufrollen und Bolzen der Standardstaurollenkette. Somit sollten die Gleitschuhe durch kleine Rollen ersetzt werden, um somit den Vorteil der Rollenübersetzung nutzen zu können. Aktuell existieren bereits kleine Rollenelemente, welche den hohen Belastungen bei geringem Verschleiß dauerhaft standhalten. [Ras12]

## 6. Überwachungssystem für Staurollenketten

### 6.1. Anforderungen an das Überwachungssystem

Die aus den ersten Versuchen gewonnenen Ergebnisse verdeutlichen die Wichtigkeit einer dauerhaften Überprüfung des Reibbeiwertes der Rollen. Deshalb wurde eine Überwachungsstation konzipiert und entwickelt, welche durch spezielle Druckfedern die Kraft pro Rolle des Dauerversuchs simuliert. Diese Überwachungsstation ermittelt während des Betriebes der Transfersysteme die Gesamtheit der Reibbeiwerte von Förder- bzw. Laufrollen ohne den laufenden Betrieb zu behindern. Somit können rechtzeitig feste bzw. schwer laufende Rollen detektiert werden und der Reibbeiwert durch Nachschmierung bzw. Austausch der Ketten wieder gesenkt werden, um so einen Ausfall des Systems zu verhindern.

Mit der für Staurollenketten zu entwickelnden Überwachungsstation wurden zunächst eine Reihe zu erreichender Parameter definiert:

- Möglichkeit zur Integration in bestehende Transfer- und Buffersysteme
- genaue Ermittlung des aktuellen Kettenzustandes
- kein manueller Überwachungsbedarf durch Onlinemessung
- Ausschließung von Kettenfehlern in der Herstellung
- Vermeidung von größeren Ausfallzeiten
- gute Handhabbarkeit
- Übertragbarkeit auf normale Rollenketten

Die hohe Anzahl der angestrebten Parameter verdeutlicht die Vorteile einer solchen Überwachungsstation für den Anwender in der Praxis. So ist z.B. eine Vermeidung von Ausfallzeiten aus wirtschaftlicher Sicht einer der größten Vorteile des Vorhabens. Die Möglichkeit zur Integration in bestehende Transfer- und Buffersysteme stellt hierbei eine unumgängliche Randbedingung der Einheit dar, weil z.B. Autokonzerne mehrere hundert Meter Förderstrecke im Einsatz haben und ein Austausch dieser Strecken einen enormen Aufwand und hohe Kosten nach sich ziehen würde. Moderne Systeme sind größtenteils elektronisch vernetzt, wodurch eine Online Messung bzw. eine Möglichkeit zur Vernetzung mit anderen Systemen von enormem Vorteil wäre.

## 6.2. Konzipierung

Rückblickend auf die durchgeführten Versuche unter Punkt 5.5.3 kann eine Überwachung der Kettenlänge ausgeschlossen werden, weil diese auch bei härtesten Belastungen über eine lange Laufzeit keinen kritischen Punkt erreicht. Es hat sich gezeigt, dass die Staukraft und die damit in Verbindung stehenden Zugkräfte der Ketten überwacht werden sollten. Erste Überlegungen führten zu dem Vorschlag, eine Art intelligentes Kettenglied zu entwickeln, welches über Dehnmessstreifen dauerhaft die aktuelle Zugkraft im Glied ermittelt. Aufgrund des Aufwandes bei der Integration in das bestehende System und vor allem wegen des Problems der Signalübertragung des Kettengliedes zur Rechentechnik wurde diese Idee wieder verworfen. Ein weiterer Nachteil dieses Kettengliedes wäre die alleinige Überwachung der Zugkraft in genau diesem einen Kettenglied, wodurch z.B. einzelne feste Rollen usw. schlecht detektiert werden können.

Dadurch wurde die Idee der Überwachung der Rollbewegungen geboren und für die Station favorisiert. Durch die Simulation eines belasteten Stück Fördereinrichtung im Staubetrieb im Leertrum der Kette können Änderungen von Roll- bzw. Gleitbewegungen der einzelnen Lauf- und Förderrollen überwacht werden. Die Station muss somit folgende Vorgänge simulieren:

- *Normalbelastung der Förder- und Laufrollen durch den Werkstückträger:*

Um vergleichende Untersuchungen mit den ermittelten Messwerten der Staukraft und der Drehmomente am Antrieb und der damit verbundenen Zugkraft durchführen zu können, wird hierbei als Belastung genau die wirkende Normalkraft im Lastrum gewählt. Hierbei wird die Belastung pro Rolle ermittelt, um die Station in ihrer Breite möglichst kompakt zu halten.

- *Staubetrieb:*

Der Staubetrieb ist der Betriebszustand, in dem die meisten Kräfte auftreten. Die Staukraft wirkt sich direkt auf die Zugkraft der Kette aus. Eine Simulation des Zustandes in der Überwachungsstation ist somit zwingend notwendig. Die Förderrollen müssen genau wie im Staubetrieb durch die Förderlast um die Kettenbuchsen rotieren.

- *Materialeigenschaften:*

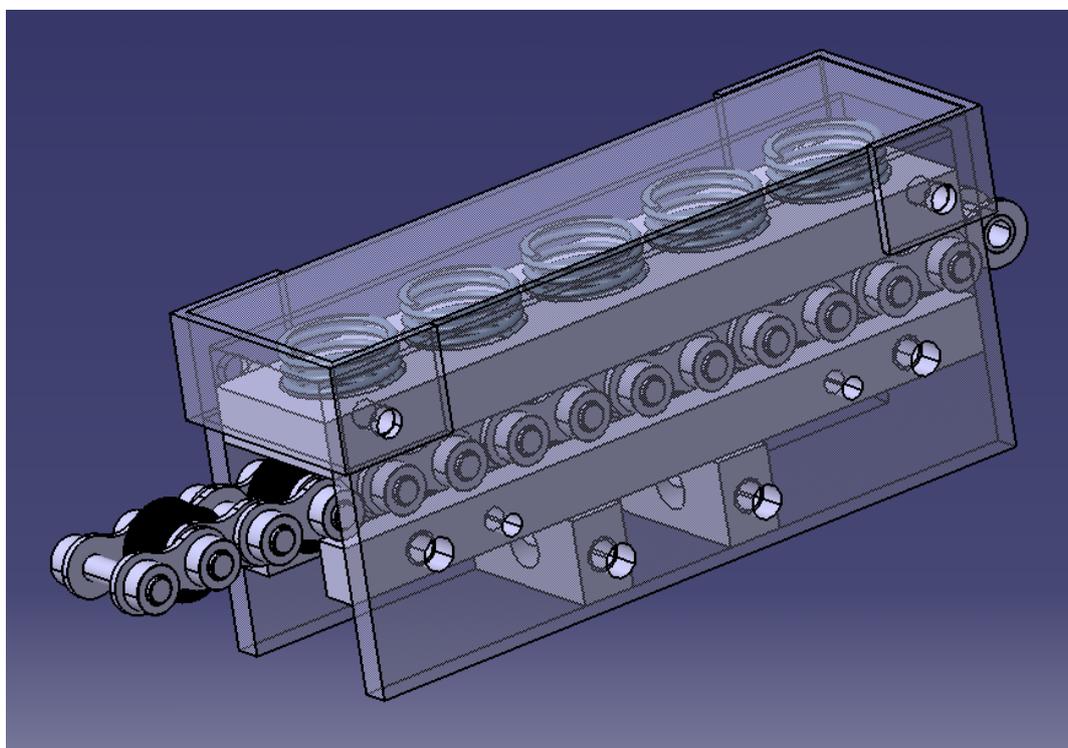
Da unterschiedliche Werkstoffe unterschiedliche Reibwerte aufweisen, muss das Überwachungssystem aus den Materialien bestehen, welche die aktuelle Konfiguration des Staurollenkettensystems besitzen.

- *System mit mehreren Kettensträngen:*

Aus den Ergebnissen der Versuche dieser Arbeit im Kapitel 5 hat sich gezeigt, dass die verschiedenen Kettenstränge eines Fördersystems unterschiedliche Eigenschaften bzw.

Reibbeiwerte aufweisen können. Somit muss eine Überwachung aller eingesetzten Kettenstränge gewährleistet sein.

Über eine einfache mechanische Vorrichtung ist es möglich, einen Teil der Förderstrecke nachzubilden. Dadurch können alle geforderten Vorgänge simuliert werden. Die Gewichtskraft der Belastung der Werkstückträger wird hierbei durch richtig dimensionierte Federn erzeugt, die genau die Kraft pro Rolle erzeugen, welche durch die in den Versuchen gewählte Belastung erzeugt wird. Zur Ermittlung der aktuell erzeugten Kräfte wird das System mit einem Biegebalken ausgestattet. Dadurch ist, zunächst für den Prototyp, ein einfacher Anschluss an das Messsystem „Spider Beam“ möglich, um so möglichst schnell die Kräfte ermitteln und auswerten zu können. Nachfolgend ist die Überwachungsstation mit unten angebrachter Vorrichtung für einen Biegebalken zur Ermittlung der wirkenden Kräfte dargestellt.

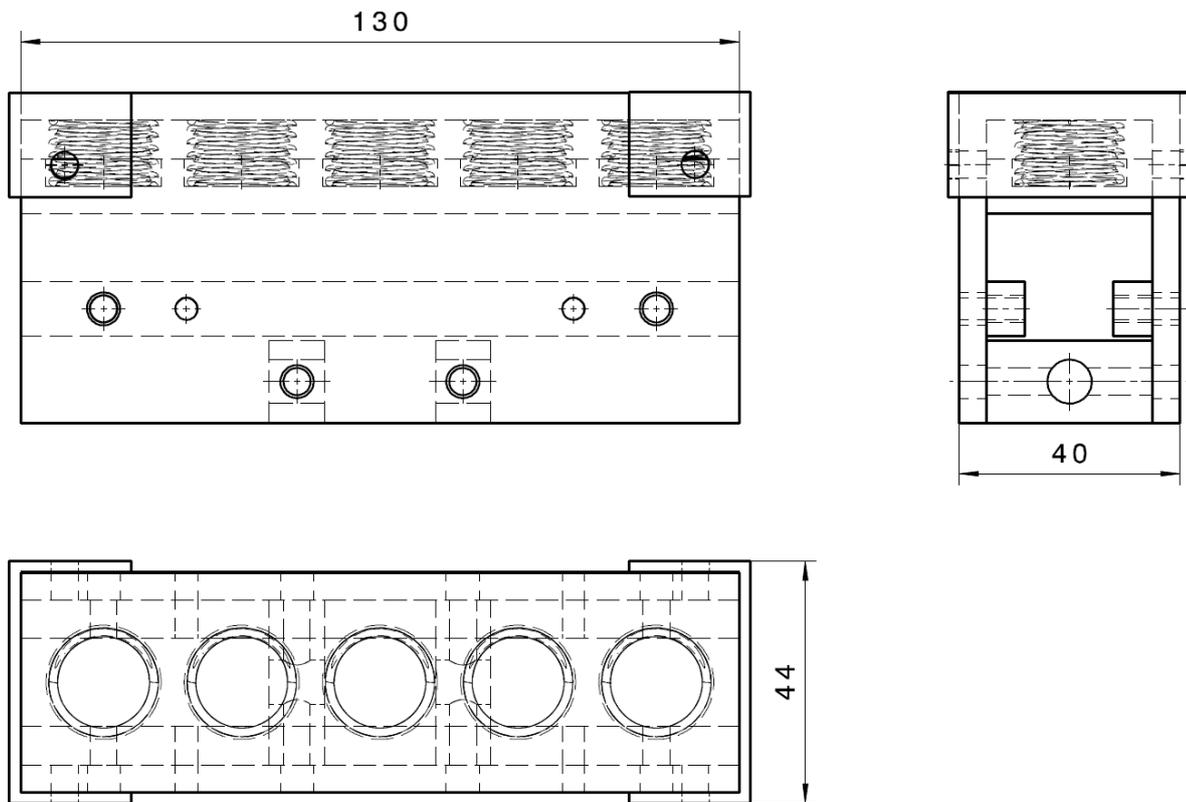


**Abb. 6.1:** Überwachungseinheit für Staurollenketten

In der Abbildung 6.1 ist ein Stück Kette mit Kunststoffförderrollen in die Station eingespannt. Das Federpaket besteht in dieser Version aus fünf gleichmäßig verteilten Federn, welche die definierte Normalkraft bei eingespannter Kette erzeugen. Dadurch müssen alle geometrischen Größen exakt abgestimmt werden, was eine Befestigung der Führungsschienen mit Stiften unumgänglich macht.

Aufgrund einer möglichst langen angestrebten Lebensdauer der Überwachungsstation sind die Führungsprofile und die von den Federn auf die Förderrollen gedrückte Platte aus Stahl. Dies

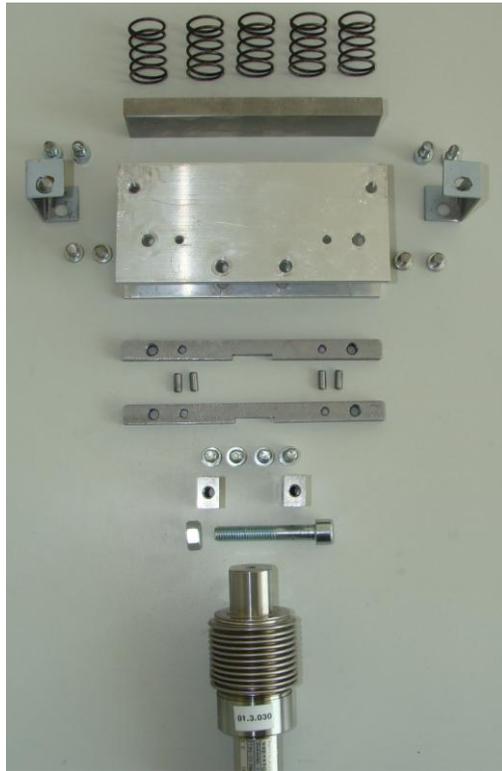
widerspricht einem der gewünschten simulierten Vorgänge, aber innerhalb der Arbeit wurden die Teile der Rollreibung als vernachlässigbar angenommen. Somit werden hierbei Materialien mit einem geringeren Verschleiß gewählt. Nachfolgend ist zur Verdeutlichung der Abmessungen die Überwachungsstation für ½ Zoll Staurollenketten mit ihren Außenmaßen abgebildet.



**Abb. 6.2:** Zeichnung der Überwachungsstation mit Außenmaßen

Die als CAD Model (Anlage 3) vorhandene Überwachungseinheit wurde anschließend in die Praxis umgesetzt und in die bestehende Strecke für ½ Zoll Staurollenketten integriert. Dazu musste die Kette im System und ein Stück Strecke entfernt werden. Durch die Positionierung der Station im Leertrum des Systems kann die gewünschte Voraussetzung der Nachrüstbarkeit in bestehende Systeme gewährleistet werden. Somit kann die Station einfach und relativ zeitsparend installiert werden.

Besonders kostenschonend ist der einfache Aufbau der Grundstation. Zur Verdeutlichung ist dazu nachfolgend die Station mit ihren Einzelteilen abgebildet. Die durch die Federn simulierte Belastung der Kette wurde so dimensioniert, dass sie mit den auf den Ketten verwendeten Versuchen übereinstimmt und die Ergebnisse dadurch besser auswertbar sind. Da die durch die Federn erzeugte Kraft dabei relativ groß ist, muss die optimale Kraft des Federnpakets später noch angepasst werden, um die Kette noch mehr zu schonen.



**Abb. 6.3:** Aufbau Überwachungsstation für Staurollenketten

Der einfache Aufbau der Überwachungseinheit lässt sich für alle Staurollenkettenarten anwenden. Für jede Kettengröße wird jedoch eine separate Einheit benötigt. Da aktuell lediglich drei Staurollenkettengrößen ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$  und 1 Zoll) angeboten werden, bleibt die Variantenvielfalt hierbei übersichtlich. Durch Variation der Federpakete kann man die für die jeweilige Anwendung am häufigsten auftretende Belastung der Ketten einstellen und so die Überwachung der Ketten auf den eigenen Bedarf anpassen.



**Abb. 6.4:** Nachträglich eingebaute Überwachungseinheit

### 6.3. Ergebnisse und erreichte Parameter

Nach der erfolgreichen Integration der Station wurden die angesetzten Dauerversuche mit der Staurollenkette mit versetzten Förderrollen durchgeführt. Nachfolgend sind die entstandenen Diagramme der Staukraft und der Drehmomente am Antrieb nach 55 Tagen Laufzeit bei einer Gesamtbelastung von ca. 1000 kg und einer Kettengeschwindigkeit von 250 mm/s grafisch dargestellt.

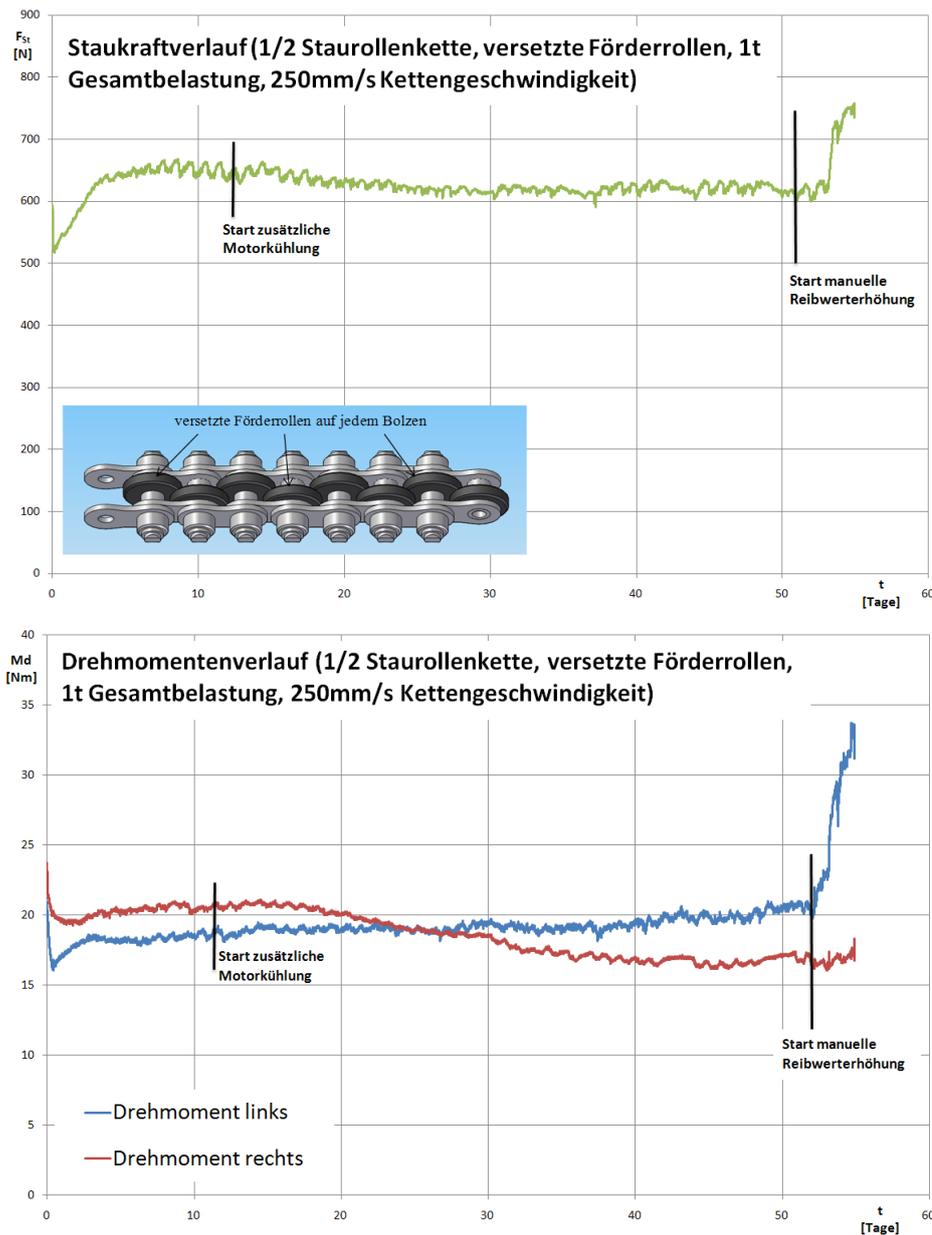
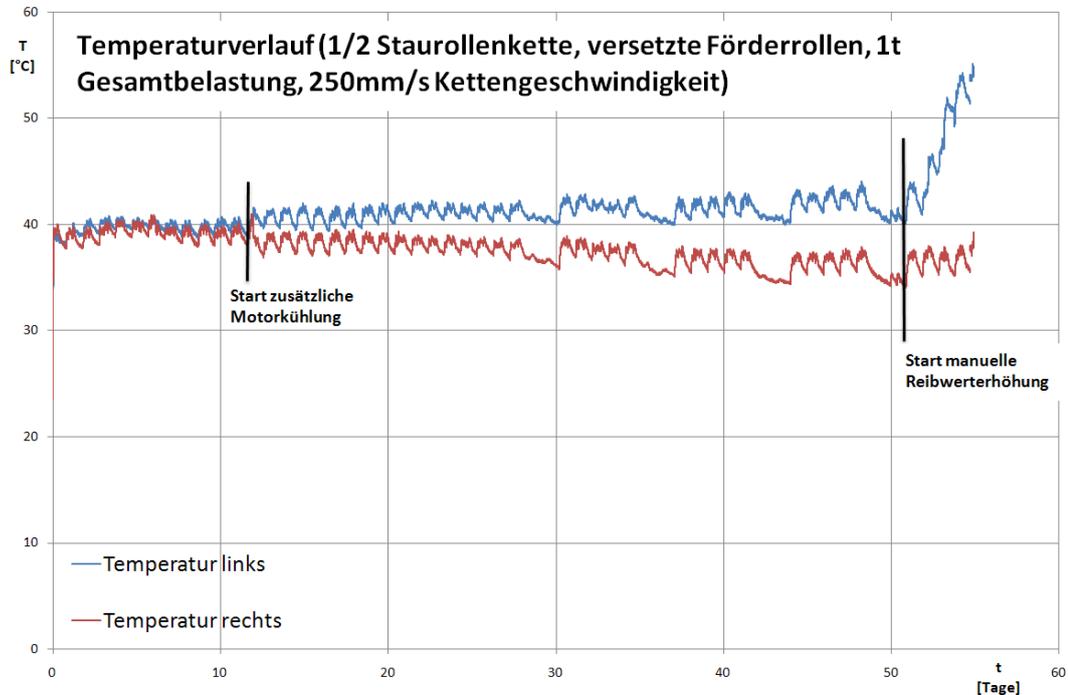


Abb. 6.5: Entwicklung der Kräfte im Dauerversuch

Zunächst müssen zwei markante Zeitpunkte näher beschrieben werden, weil sich diese von sonstigen Dauerversuchen unterscheiden:

- Nach 12 Tagen Dauerversuch wurde der Motor mit einem separat angebauten Lüfter gekühlt, weil dieser nach kurzer Zeit auffällig heiß geworden ist. Da dieser Motor rechts an die Antriebstation angeflanscht ist, führt die zusätzliche Lüftung zur ungewünschten Temperaturreduzierung am rechten Kettenstrang. Deutlich macht dies die Abbildung 6.6.



**Abb. 6.6:** Temperaturverlauf im Dauerversuch

- Nach ca. 52 Tagen Dauerversuch wurde zunächst eine Möglichkeit gesucht, den Dauerversuch zu verkürzen, um die Funktionalität der Überwachungsstation nachweisen zu können. Dazu wurden die Reibbeiwerte des Systems manuell durch das Einstreuen von feinem Sand in die Umlenkstation der Transferstrecke langsam erhöht. Besonders wichtig war hierbei, dass beide Kettenstränge exakt gleich modifiziert werden. Die vorhergehenden abgebildeten Diagramme zeigen, dass diese Manipulation der Reibbeiwerte sich sofort auf die gemessenen Kennwerte auswirkt.

Zur Überprüfung der Funktionalität der Überwachungsstation wurden die auftretenden Kräfte in den zwei Stationen gemessen. Das folgende Diagramm zeigt den Verlauf der Reibbeiwerte in den beiden Überwachungsstationen im Vergleich zu den Reibbeiwerten aus den Zugkräften im Dauerversuch.

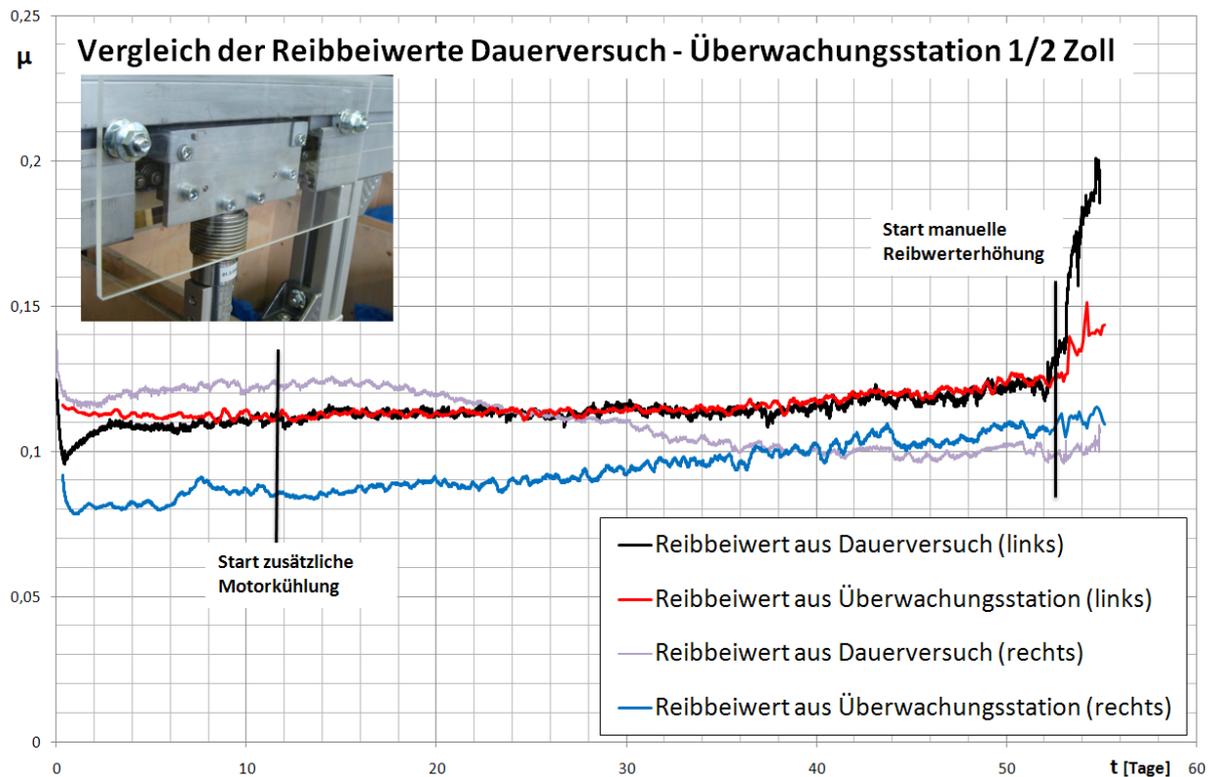
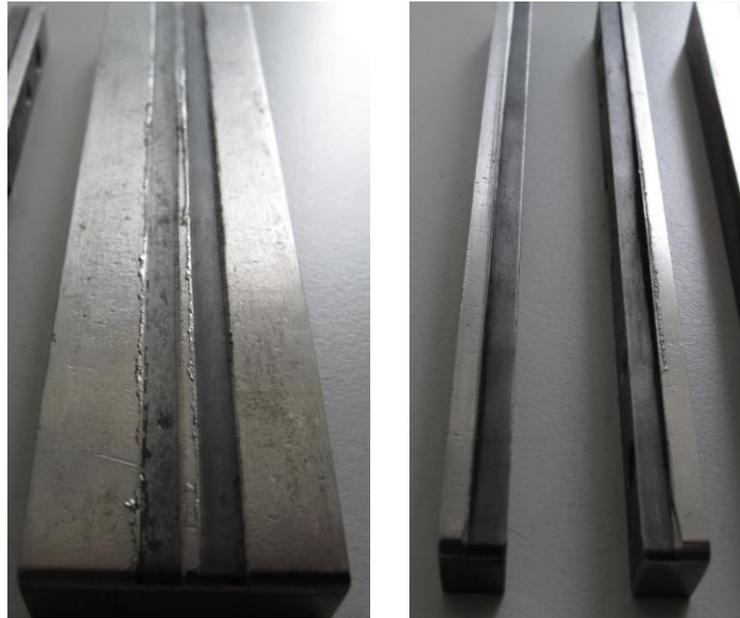


Abb. 6.7: Vergleich der Reibbeiwerte mit Überwachungsstation

Aus dem Diagramm wird deutlich, dass der Verlauf der wirkenden Kräfte der Überwachungsstation sich genauso wie der Verlauf der Zugkräfte des Gesamtsystems verhält. Besonders gut zeigt sich dies nach der manuellen Reibbeiwernerhöhung zum Ende des Dauerversuchs. Im linken Kettenstrang des Systems liegen die beiden ermittelten Kräfte über den gesamten Verlauf auf gleichem Niveau. Im Gegensatz dazu weist der rechte Strang größere Unterschiede auf. Dies lässt sich auf die nahe Lage des Motors zum rechten Strang zurückführen. Durch die hohen Temperaturen direkt am Motor werden alle Komponenten (Lager, Kettenrad, Führungen usw.) im rechten Strang zusätzlich erwärmt. Durch eine zusätzlich angebrachte Motorkühlung konnten diese hohen Zugkräfte langsam wieder an die Werte der Station bzw. des anderen Stranges angeglichen werden. Innerhalb der Station führen diese Temperatureinflüsse zu keinerlei Auswirkungen. Die Abweichungen der zwei Stationen untereinander lassen sich auf Unterschiede in der Fertigung der Einzelkomponenten und ungenaue Federsteifigkeiten zurückführen. Ebenso kann ein ungenauer Einbau der Station zu Fehlern führen. Das Diagramm macht deutlich, dass die Funktion der Überwachungsstationen nachgewiesen werden konnte. Es ist somit möglich durch die nachrüstbare Einheit dauerhaft wirkende Zugkräfte innerhalb 1/2 Zoll Staurollenketten zu überwachen. Erste durchgeführte Untersuchungen an 3/4 Zoll Staurollenketten haben gezeigt, dass dies jedoch für diese Größe nicht so einfach möglich ist. Hierbei erzeugt die einlaufende Kette aufgrund ihrer großen Rollen zu große Schläge, um eine saubere Messung garantieren zu können.

Nach dem Dauerversuch wurde neben Verschleißbetrachtungen an den Systemkomponenten ebenfalls die Überwachungsstation näher betrachtet. Hierbei lassen sich ähnliche Verschleißspuren feststellen. So erfolgt an der Platte, welche von oben auf die Förderrollen gedrückt wird, ein starkes Eindringen der Rollen. Da diese am getesteten Kettentyp versetzt angebracht sind, entstehen dadurch zwei Eindruckbahnen über die komplette Platte. Die folgende Abbildung zeigt neben dieser Platte ebenfalls die Führungsschienen, welche im Bereich der Laufrollen ebenfalls deutlich verschlissen sind.



**Abb. 6.8:** Verschleißerscheinungen an der Überwachungsstation

Die folgende umfangreiche Tabelle verdeutlicht, welche der angestrebten Parameter durch umgesetzte Maßnahmen erreicht wurden. Über die Spalte „Priorität“ kann die Wichtigkeit der angestrebten Parameter erkannt werden. Die Priorität „hoch“ erhalten hierbei Parameter, welche unumgänglich sind, um die Überwachungsstation in der Praxis einsetzbar machen zu können. Auf angestrebte Eigenschaften mit niedrigen Prioritäten kann verzichtet werden. Jedoch wäre das Erreichen für die Station von Mehrwert. Ein Großteil der Parameter konnten durch das konstruierte und getestete System realisiert werden.

Tab. 6.1: Erreichte Parameter der Überwachungsstation

Angestrebte Parameter	Priorität	Erreichte Parameter
Möglichkeit zur Integration in bestehende Transfer- und Buffersysteme	hoch	Die im Projekt entstandenen Überwachungseinheiten lassen sich mit geringem umbautechnischen Aufwand problemlos in bestehende Systeme integrieren, da sich die Stationen im Leertrum des Systems befinden
Genauere Ermittlung des aktuellen Kettenzustandes	hoch	Die realisierten Überwachungseinheiten messen die auftretenden Kräfte dauerhaft und geben diese aktuell noch an die Auswerteeinheit „Spider“ weiter. Später soll über eine Integration einer Messkarte und einer Software ein einfacher Anschluss an ein PC System ermöglicht werden.
Kein manueller Überwachungsbedarf durch Onlinemessung	normal	Wie im eben genannten erreichten Parameter messen die Überwachungseinheiten auftretende Kräfte dauerhaft und geben diese aktuell noch an die Auswerteeinheit weiter. Aufbauend darauf soll über eine Integration einer Messkarte und einer Software eine komfortable Onlinemessung ermöglicht werden.
Ausschließung von Kettenfehlern in der Herstellung	niedrig	Da die Überwachung des Kettenzustandes im Leertrum der Kette über die Messung der auftretenden Kräfte beim Einlaufen in der Überwachungsstation erfolgt, können auftretende Fehler in der Herstellung der Kette nicht ausgeschlossen werden. Diese Aufgabe liegt in den Händen des jeweiligen Kettenherstellers. Die Recherchen bei Herstellern haben jedoch gezeigt, dass Herstellungsfehler nur in sehr geringem Maße auftreten und auf die Lebensdauer der Kette nur geringen Einfluss haben. Der daraus folgende schnellere Verschleiß der Kette wird dann wiederum von der Überwachungsstation erfasst.

Vermeidung von größeren Ausfallzeiten	hoch	Aufgrund der dauerhaften Messung des Überwachungssystems ist es möglich den aktuellen Kettenzustand jederzeit abzufragen. Wenn der prozentuelle Anstieg einer Kette ein definiertes Maß erreicht hat, sollten die Ketten zunächst geschmiert und bei erneutem Ansteigen ausgewechselt werden. Somit werden ungeplante Ausfallzeiten verhindert und das System läuft effizienter.
Gute Handhabbarkeit	normal	Die Überwachungsstation ist so konstruiert und gefertigt worden, dass man sie nach dem Öffnen der Kette relativ einfach in bestehende Systeme integrieren kann. Die Handhabbarkeit des eingebauten Systems ist ebenso einfach. Nach dem Anschluss am „Spider“ (später dann eine Messkarte) kann die Überwachungsstation an einen PC angeschlossen werden.
Übertragbarkeit auf normale Rollenketten	niedrig	Gewonnene Ergebnisse und Art der Kettenprüfung lassen sich nur begrenzt auf normale Rollenketten übertragen, da die Messergebnisse durch die Förder- bzw. Laufrollen der Ketten definiert werden. Diese Rollen existieren bei einer Rollenkette nicht. Jedoch lassen sich die Ergebnisse nahezu komplett auf alle Arten und Größen von Staurollenketten übertragen. Somit kann ein großes Spektrum abgedeckt werden.

#### 6.4. Ausblick und Optimierungsvorschläge

Die ersten Prototypen der Überwachungsstation für Staurollenketten konnten das gewählte Messprinzip für ½ Zoll Staurollenketten bestätigen und zeigen, dass der Großteil der von einem solchen System geforderten Parameter erreicht werden. Um das Produkt für Endanwender benutzbar zu machen, sind jedoch noch eine Reihe an Optimierungen notwendig. Erst ein einfach und schnell nachrüstbares System, welches sich optisch ins Gesamtsystem einfügt, hat Chancen in laufende Systeme nachgerüstet zu werden. Weiterhin ist eine Ermittlung von weiteren Ketten-

kennwerten anderer Staurollenkettenarten für das Überwachungssystem ein wichtiger Bestandteil zur Vervollständigung der Station.

Aus den gefahrenen Versuchen und den Anforderungen an ein Überwachungssystem in der Praxis lassen sich verschiedene Optimierungsvorschläge ableiten.

Zunächst sollten die in den Versuchen benutzten Biegebalken durch Dehnmessstreifen ausgetauscht werden. Dadurch können die Abmessungen des Systems deutlich reduziert und das System kann besser in laufende Systeme integriert werden. In den Versuchen wurde der Messverstärker „Spider8“ mit der dazugehörigen Software „Spider Beam“ benutzt. Eine weitere wichtige Optimierung besteht darin, die Station ohne dieses Messsystem zu betreiben. Ideal wäre ein autark arbeitendes System mit Display, um den Benutzer über den Stand des Staurollenkettensystems zu informieren. Hierbei ist die Integration einer Schnittstelle zum PC (z.B. USB) notwendig, um dem System Parameter usw. zur Verfügung stellen zu können. Weiterhin besteht dadurch die Möglichkeit, das System später mit Updates wie z.B. Kennwerte neuer Kettentypen versorgen zu können.

Durch den auftretenden Verschleiß der Versuchsüberwachungsstationen lässt sich ableiten, dass am System eine Optimierung der Werkstoffpaarungen erfolgen sollte. Innerhalb der Arbeit wurde der Anteil der Rollreibung zwischen Förderrolle und Werkstückträger vernachlässigt. Dies konnte durch praktische Versuche ausreichend verifiziert werden. Dadurch wird deutlich, dass bei der Optimierung der eingesetzten Werkstoffe besonders auf ein gutes Verschleißverhalten und nicht auf die verwendeten Paarungen im Lasttrum zu achten ist. Dies gilt für die Platte, welche eine definierte Kraft auf die Förderrollen drückt und auch für die Führungsprofile auf denen die Laufrollen in der Überwachungsstation laufen.

Selbst durch eine optimale Werkstoffauswahl der Komponenten der Überwachungsstation wird immer noch Verschleiß auftreten. Hierbei kommt zum Verschleiß der Station noch der Verschleiß der eigentlichen Förderstrecke hinzu. Dieser wird im Leertrum durch die Kette bis zur Station getragen und kann sich dort dann von der Kette lösen. Somit ist eine weitere Optimierung das Hinzufügen einer Auffangvorrichtung für Abrieb. In dieser Vorrichtung sollte die Möglichkeit der Späneentleerung existieren, um so die Station auch über sehr lange Dauer nutzen zu können.

Ebenfalls sollte die Aufbringung der Normalkraft, welche in den Untersuchungen durch Federpakete realisiert wurde, neu überdacht werden. Für die Versuche der  $\frac{1}{2}$  Zoll Staurollenketten wurden fünf große Federn eingesetzt, wobei die Überwachungsstation für  $\frac{3}{4}$  Zollketten mit acht kleinen Federn zur Verteilung der Kraft ausgerüstet wurde.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1. Zusammenfassung

Ausgangspunkt der Arbeit war der lückenhafte Wissensstand zum Thema Staurollenketten. Der Großteil der Kenntnisse bezüglich der auftretenden Kräfte und Zusammenhänge stammt aus Erfahrungen und sind nicht wissenschaftlich hinterlegt. Deutlich wird dies bereits durch die fehlenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Thematik. Immer wieder werden als Kenngrößen Werte der Rollenketten hinzugezogen, welche zwar einen ähnlichen Aufbau aufweisen, aber im System andere Kräfte wirken und unterschiedliche Reibzustände auftreten. Der steigende Einsatz von Transfersystemen mit Staurollenketten verdeutlicht die Wichtigkeit der Kenntnisse der wirkenden Kräfte und der Zusammenhänge der einzelnen Kennwerte. So führt ein ungeplant stillstehendes Fördersystem z.B. in der Automobilbranche schnell zu enormen finanziellen Ausfällen.

Ziel der Arbeit bestand darin, genau diese Wissenslücken über Staurollenketten zu beseitigen und dadurch bei der Auslegung der entsprechenden Fördersysteme durch fundierte Kenngrößen unterstützen zu können. Diese Arbeit sollte neben den theoretischen Grundlagen zu Staurollenketten ebenfalls das Verständnis über das Komplettsystem schaffen, um so eine Optimierung oder auch eine Neukonstruktion einer Staurollenkette zu erleichtern.

Zunächst wurden unter dem Kapitel Grundlagen der Aufbau von unterschiedlichen Staurollenkettenarten dargestellt, die Eigenschaften miteinander verglichen und kategorisiert. Im Anschluss daran wurden die Bewegungszustände im Staurollenkettensystem näher betrachtet und das Komplettsystem in seine wirkenden Kräfte und Reibzustände zerlegt, um dadurch das Verständnis der unterschiedlichen Kenngrößen zu erlangen. Bei der Ermittlung der Reibzustände können die wirkenden Reibbeiwerte zwischen Förderrollen und Buchse und zwischen Laufrollen und Bolzen ohne aufwendige Versuchstrecken durch Pendelversuche an einem dafür entwickelten Prüfstand ermittelt werden. Hierbei erfolgte eine erste positive Verifizierung mit den Reibbeiwerten aus Untersuchungen am Versuchsstand. Aufbauend auf das Wissen der wirkenden Reibpaarungen bzw. -arten wurden FEM-Analysen durchgeführt, um dadurch auftretende Spannungen zu detektieren und das thermische Verhalten der unterschiedlichen Werkstoffpaarungen zu ermitteln.

Innerhalb der praktischen Versuche der Arbeit wurden zunächst die Bruch- und Dauerfestigkeiten nach ISO15654 [DIN04] ermittelt. In diesen sehr zeitintensiven Versuchen konnten bereits enorme Unterschiede zu den zur Auslegung oft angesetzten Werten der Standardrollenketten ermittelt werden. Hierbei werden die Dauerfestigkeiten nach ISO606 [DIN02] bei ungefähr 14% der Bruchfestigkeit der Ketten angesetzt. Der Großteil der ermittelten Werte der Staurollenketten liegt hier jedoch bei nur ca. 7%. Somit ist der Grundzustand der Staurollenketten bereits deutlich schlechter als der der Rollenketten.

Zur Untersuchung der Eigenschaften der Ketten unter praxisnahen Randbedingungen wurde ein Versuchsstand konzipiert, welcher die Ermittlung von unterschiedlichen Kennwerten zweier Kettengrößen auf zwei Ebenen unter härtesten Bedingungen ermöglicht. Durch diesen Versuchsstand wurden die Staukraft, die Kettenzugkraft durch das Drehmoment am Antrieb, die Kettengeschwindigkeit, die Kettenlängung und das Temperaturverhalten dauerhaft überwacht.

Durch unterschiedliche Kurzzeit- und Dauerversuche konnte verifiziert werden, dass die über den Pendelversuch ermittelten Reibbeiwerte bei  $\frac{1}{2}$  und  $\frac{3}{4}$  Zoll Staurollenketten ausreichend genau zur Auslegung angesetzt werden können. Neben dieser Erkenntnis konnte eine Reihe von weiteren Ketteneigenschaften ermittelt werden, welche den Anfang einer Staurollenkettendatenbank bilden können. Innerhalb der Dauerversuche konnten verschiedene, noch unbekannte, Eigenschaften ermittelt werden. So gilt bei Rollenketten die Kettenlängung als wichtiges Verschleißkriterium (bei ca. 3 % Längung gilt eine Kette hier als verschlissen [Fle03]). Bei allen Versuchen mit Staurollenketten hat sich gezeigt, dass die Kettenlängung hierbei nicht an diese kritische Stelle kommt und nur eine Änderung von 0,1 % ( $\frac{1}{2}$  Zoll Staurollenkette nach ca. 68 Tagen Laufzeit) auftritt.

Über Vergleiche der durchgeführten FEM Analysen mit den Versuchen auf der praxisnahen Strecke konnten gute Übereinstimmungen ermittelt werden. Über DFT Analysen konnte der Förderprozess in markante auftretende Schwingungen zerlegt werden, um den Prozess des Kettenumlaufes in der Anwendung noch besser zu verstehen.

Durch Vergleiche der Standardstaurollenkette mit der wartungsfreien Kunststoff-Staurollenkette wurde gezeigt, dass das Einsatzgebiet der Staurollenketten mit den Gleitschuhen aktuell noch sehr begrenzt ist. Mit der Hilfe der theoretischen Betrachtungen der Kapitel 3 und 4 dieser Arbeit können bereits erste Verbesserungsvorschläge abgeleitet werden, um so mit geringem Aufwand die komplett ungeschmierten Ketten deutlich verbessern zu können.

Im sechsten Kapitel der Arbeit wurde eine Überwachungsstation für unterschiedliche Baugrößen von Staurollenketten entwickelt. Hierbei wurden zunächst zur Konzipierung die wichtigsten Parameter zusammengesammelt und nach ihrer Wichtigkeit bewertet. So ist z.B. die Möglichkeit zur Integration in bestehende Transfer- und Buffersysteme einer der wichtigsten Parameter einer solchen Station. Dies konnte durch die Integration der Station in den Leertrum der Kettensysteme erreicht werden. Es wurde eine kompakte Station konzipiert, welche nahezu alle geforderten Parameter abdecken kann. Nach der Integration der Station in den Versuchsstand wurde die Funktionsweise der Entwicklung für  $\frac{1}{2}$  Zoll Staurollenketten nachgewiesen.

## 7.2. Ausblick

Durch die Arbeit konnten neben der Entwicklung des Ablaufes einer vollständigen Eigenschaftsermittlung auch eine Vielzahl an Kennwerten ausgewählter Kettentypen ermittelt werden. Jedoch

ist die Anzahl der am Markt erhältlichen Staurollenketten etwas größer. Zusätzlich dazu existieren hierbei noch unterschiedliche Rollenarten bzw. -materialien. Um eine komplexe Staurollenkettendatenbank anbieten zu können, sind somit noch weitere Untersuchungen fehlender Ketten notwendig. Im Gegensatz zu den Rollenketten ist die Anzahl hierbei jedoch deutlich übersichtlicher. Durch die in der Arbeit beschriebenen Pendelversuche lassen sich ohne die hohen Kosten von Versuchsstrecken die Reibwerte der wichtigsten Wirkpaarungen bestimmen. Um den Verlauf der Reibbeiwerte bei steigender Laufzeit zu ermitteln, wird man zukünftig noch zu den kosten- und zeitintensiven Dauerversuchen an einer Versuchsstrecke greifen müssen. Eine solche vollständige Datenbank stellt einen Mehrwert sowohl für Kettenhersteller als auch für die Hersteller der Streckensysteme für Staurollenketten dar.

Mit der Entwicklung eines Prototyps einer Überwachungsstation für Staurollenketten wurde die Möglichkeit geschaffen, den aktuellen Verschleißzustand der Ketten während des Betriebes dauerhaft zu ermitteln. Dadurch können lange und kostenverursachende Ausfallzeiten vermieden bzw. verkürzt werden. Durch eine Reihe an Optimierungen aus Kapitel 6.4 ist es möglich, eine kompakte und benutzerfreundliche Station zu erstellen, welche problemlos in bestehende Systeme integriert werden kann und auf großes Anwenderinteresse stößt.

Weiterhin lassen sich aus dieser Arbeit neue Themen für Folgearbeiten generieren, um so z.B. das Prinzip des Pendelns zur Reibwertermittlung bei Staurollenketten weiter zu verifizieren bzw. auszubauen, um so andere Anwendungsfelder zu finden. Ebenfalls bietet die wartungsfreie Kunststoff-Staurollenkette ausreichend Potential, um diese für weitere Einsatzbereiche zu optimieren. Neben den in dieser Arbeit vorgeschlagenen Verbesserungen lassen sich hierbei z.B. mit anderen Werkstoffen die Eigenschaften der Kette deutlich verbessern.



## Literaturverzeichnis

- [Ass79] Assmann, Nestler, Poller: *Berechnungsverfahren für Rollenkettengetriebe unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse zu Schmierung, Einlaufstoss und Kettenradfehlern*, Dissertation, 1979.
- [Alt08] ALTRATEC Montagesysteme GmbH: *Umlaufförderer*, Firmenschrift, Schwieberdingen, 2008.
- [Bei01] Beitz, W., Grothe, K.-H.: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. 20. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2001. ISBN3-540-67777-1.
- [Bat96] Bathe, K.-J.: *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1982, 1996.
- [Bos08] Bosch Rexroth AG, *Transfersystem TS2plus*, Firmenschrift, Ausgabe 4.0, 2008, 3542531138 (2008.03).
- [Bos09] Bosch Rexroth AG, *Transfersystem TS4plus*, Firmenschrift, Ausgabe 3.1, 2009, 3842527530 (2009.07).
- [Bra07] Brandau Gelenkketten GmbH und Co. KG - *Technik*, Firmenschrift, Friedewald, 04/2007.
- [C1785] Coulomb, C. A.: *Die Theorie einfacher Schwingungen*. Memories de mathématique et de physique de l'Académie des Sciences, 1785.
- [Czi10] Horst Czichos, Karl-Heinz Habig: *Tribologie-Handbuch*, 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [DIN01] DIN 15201-1: *Stetigförderer, Benennungen*. Ausgabe 04.1994. Berlin: Beuth Verlag, 1994.

- [DIN02] DIN ISO 606: *Kurzgliedrige Präzisions-Rollen- und Buchsenketten, Befestigungsglaschen und zugehörige Kettenräder*, Ausgabe 09.2009. Berlin: Beuth Verlag, 2009.
- [DIN03] DIN 8187-1: *Rollenketten, Europäische Bauart*, Ausgabe 03.1996. Berlin: Beuth Verlag, 1996.
- [DIN04] DIN ISO 15654: *Verfahren zur Dauerschwingprüfung von Präzisions-Rollenketten*, Ausgabe 05.2009. Berlin: Beuth Verlag, 2009.
- [Dob03] Dobrinski, P.; Krakau, G.; Vogel, A.: *Physik für Ingenieure*. 10., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Teubner, 2003.
- [Dom07] Dombeck, U.: *Belastungs- und Geschwindigkeitsuntersuchungen an Staurollenkett*en, Diplomarbeit, Chemnitz, TU Chemnitz, 2007.
- [Dom09] Dombeck, U.: *Eigenschaftsermittlung zur optimalen Auslegung von Staurollenkett*en. Tagungsband zum 5. WGTL-Fachkolloquium 01.-02.10.2009, Universitätsverlag Ilmenau, 2009.
- [Dom12] Dombeck, U.: *Schmierstoffuntersuchungen in Bosch-Rexroth TS2 Systemen*, Forschungsbericht, Chemnitz, TU Chemnitz - intern , 2012.
- [Fle03] Flexon GmbH – *Technisches Handbuch für Rollenketten und Flyerketten*, Ausgabe Deutsch 07/2003.
- [Frö95] Fröhlich, P.: *FEM-Leitfaden*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1995.
- [Iwi07] iwis motorsysteme GmbH & Co. K: *Gesamtkatalog – Präzisionskettensysteme für Antriebs- und Förderzwecke*, München, Ausgabe Deutsch 08/2007.
- [Iwi10] iwis motorsysteme GmbH & Co. KG: *Handbuch Kettentech*nik, München, Ausgabe Deutsch 08/2010.

- [Jun07] Jungbluth Kettenfabrik GmbH & Co. KG, *Förderketten und Kettenräder*, Firmenschrift, Bad Hersfeld 2007
- [Kra71] Kragelski, I. W.: *Reibung und Verschleiß*. Berlin: VEB Verlag Technik, 1971.
- [Kra82] Kragelski, I.W.: *Grundlagen der Berechnung von Reibung und Verschleiß*. Berlin: Verlag Technik, 1982.
- [Kno91] Knothe, K., Wessels, H.: *Finite Elemente*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg New York, 1991.
- [Kla82] Klamann, D.: *Schmierstoffe und verwandte Produkte: Herstellung - Eigenschaften - Anwendung*. Weinheim: Verlag Chemie. 1982.
- [Mes06] Meschede, D., Vogel, H.: *Gerthsen Physik – Die ganze Physik zum 21. Jahrhundert*, Lehrbuch, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006, ISBN 3-540-25421-8.
- [Mey85] Meyer, K.: *Schichtbildungsprozesse und Wirkungsmechanismen schichtbildender Additive für Schmierstoffe*. Tribol. Schmierungstech. 32 (1985) 254.
- [Mül97] Müller, G., Groth C.: *FEM für Praktiker*, expert Verlag Böblingen, 3. Auflage 1997.
- [Nie81] Niemann, G., Hirt, M.: *Maschinenelemente - Band I*, zweite Auflage, berichtigter Nachdruck, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1981.
- [Ran97] Rannacher, R., Stein E., Ramm, E. u.a., Schweizerhof K., Möller H., Bayer U. u.a.: *Finite Elemente*, Spectrum der Wissenschaften, Heidelberg, März 1997.
- [Ras12] Rasch, F.: *Reibungsminderung an Stütz- und Führungselementen für Kunststoffketten*, Dissertation TU Chemnitz, 2012.
- [Rex05] Rexnord Kette GmbH & Co. KG: *Die Technik des Kettentriebes*, Betzdorf, Ausgabe Deutsch 2005.

- [Rin91] Rinschede, A.: *Methodik zur optimalen Dimensionierung von Buchsenförderketten*, Dissertation, Dortmund, 1991.
- [Ris11] Risch, T.: *Zweidimensionale Bewegungsformen in der Vibrationsförderertechnik*, Dissertation TU Chemnitz, 2011
- [Sch10] Schnaithmann Maschinenbau GmbH, *Modulares Transfersystem MTS3*, Katalog, Remshalden 2010
- [Sum99] Sumpf, J.: *Grenzbeanspruchung für Rollenketten in der Fördertechnik*, Dissertation TU Chemnitz, 1999.
- [Sum02] Sumpf, J.: *Entwicklung eines neuen Kettenfördersystems aus Hybridwerkstoffen*, Abschlussbericht, TU Chemnitz - intern, 2002.
- [Sum12] Sumpf, J.: *Reibung und Verschleiß in Fördermitteln*, Vorlesungsskript, TU Chemnitz, 2012.
- [Tip06] Tipler, P.: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, Lehrbuch, Spektrum-Verlag, München, 2. Auflage, 2006, ISBN 3-8274-1164-5.
- [Wäs89] Wäsche, R., Habig, K-H.: *Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung – Literaturübersicht*, Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Forschungsbericht Nr. 158, 1989.
- [Wei03] Weisang GmbH: *Handbuch Flexpro*, Version 6.0.35, St. Ingbert 2003.
- [Wip11] Wippermann jr. GmbH: *Hauptkatalog 2011*, Hagen, 2011.
- [Wol11] Wolfer, W.; Sumpf, J.; Rasch, F.; Nendel, K.: *Höchstleistung durch Rollende Fördertechnik aus Kunststoff*. Tagungsband zur 22. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren, Chemnitz 10.-12.11.2011, Vortrag 5.4, S. 1-10.

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 3.1:</b> Einordnung der Staukettenförderer nach DIN 15201 Teil 1 [DIN01] .....	17
<b>Abb. 3.2:</b> Fördersystem mit Staurollenketten im Einsatz [Bos09] .....	17
<b>Abb. 3.3:</b> Aufbau einer Staurollenkette mit Kunststoffförderrollen .....	18
<b>Abb. 3.4:</b> Standardstaurollenkette mit Teile- und Fingerschutz .....	20
<b>Abb. 3.5:</b> Staurollenkette mit dünnen versetzten Kunststoffförderrollen .....	20
<b>Abb. 3.6:</b> Mehrstrangstaurollenkette .....	21
<b>Abb. 3.7:</b> Langgliederstaurollenkette mit Förderrollen außerhalb des Kettengliedes .....	21
<b>Abb. 3.8:</b> Wartungsfreie Staurollenkette aus Kunststoff [Sum02] .....	22
<b>Abb. 3.9:</b> Aufbau eines Fördersystems mit Staurollenketten [Bos08] .....	24
<b>Abb. 3.10:</b> Umlenkung mit Gleitstück [Bos08] .....	25
<b>Abb. 3.11:</b> Umlenkung mit Kettenrad [Bos08] .....	25
<b>Abb. 3.12:</b> Antriebsstation [Bos08] .....	26
<b>Abb. 3.13:</b> Kettenrad für Staurollenketten [Wip11] .....	26
<b>Abb. 3.14:</b> Rahmen-Werkstückträger [Bos08] .....	26
<b>Abb. 3.15:</b> Einteilung der Reibung .....	27
<b>Abb. 3.16:</b> Vergleich Reibmodelle [Ris11] .....	28
<b>Abb. 3.17:</b> Reibungsmechanismen nach Czichos [Czi10] .....	29
<b>Abb. 3.18:</b> Einflussfaktoren auf das tribologische System .....	30
<b>Abb. 3.19:</b> Einflussgrößen auf den Verschleiß .....	31
<b>Abb. 3.20:</b> Abbildung zur Definition der Viskosität .....	32
<b>Abb. 4.1:</b> Funktionsschema des Förderbetriebes .....	35
<b>Abb. 4.2:</b> Funktionsschema mit Förder- und Staubetrieb .....	36
<b>Abb. 4.3:</b> Funktionsschema Beschleunigung .....	36
<b>Abb. 4.4:</b> Auftretende Reibpartner im Komplettsystem .....	38
<b>Abb. 4.5:</b> Reibpaarungen im System "Kette" .....	39
<b>Abb. 4.6:</b> Reibpaarungen im System .....	40
<b>Abb. 4.7:</b> Arten von Kettenspannern [Sch10] .....	41
<b>Abb. 4.8.:</b> Funktionschema Pendel .....	43

<b>Abb. 4.9.:</b> Versuchsstand Pendel.....	45
<b>Abb. 4.10:</b> Beispielfunktion der Messkurve am Pendel.....	46
<b>Abb. 4.11:</b> Wiederholgenauigkeit im Pendelversuch am Beispiel.....	47
<b>Abb. 4.12:</b> Vergleich der Staukraft mit verschiedenen Förderrollen [Dom07] .....	48
<b>Abb. 4.13:</b> Vergleich Reib- bzw. Reibbeiwerte (Versuchsstand/Pendelversuch).....	49
<b>Abb. 4.14:</b> Rollenübersetzung an der Förderrolle .....	50
<b>Abb. 4.15:</b> Vergleich des Bewegungswiderstandes der Gleitreibung zu Rollreibung [Wol11] ..	51
<b>Abb. 4.16:</b> Kräfte an Förderrolle zur Ermittlung der Zugkraft .....	52
<b>Abb. 4.17:</b> FEM Modell Zugversuch .....	55
<b>Abb. 4.18:</b> Simulierte Spannungsverteilung im Zugversuch .....	56
<b>Abb. 4.19:</b> Thermisches Verhalten bei Kunststoffschienen bzw. -rollen (FEM).....	57
<b>Abb. 4.20:</b> Thermisches Verhalten bei Stahlschienen bzw. -rollen (FEM) .....	58
<b>Abb. 4.21:</b> Thermisches Verhalten bei Kunststoffschienen und Stahlrollen (FEM) .....	59
<b>Abb. 5.1:</b> Dynamische Prüfmaschine mit eingespannter Probe .....	62
<b>Abb. 5.2:</b> Versuchsstand zur Kennwertermittlung .....	63
<b>Abb. 5.3:</b> Messtechnik an der Antriebstation für $\frac{3}{4}$ Zoll Ketten .....	64
<b>Abb. 5.4:</b> Kraft-Dehnungsdiagramm Standardstaurollenkette (Doppelstrang).....	69
<b>Abb. 5.5:</b> Vergleich Bruch- und Dauerfestigkeit Staurollenkette-Rollenkette .....	71
<b>Abb. 5.6:</b> Bruchbild Staurollenkette (Innenglied).....	71
<b>Abb. 5.7:</b> Vergleich Staukraftverhalten $\frac{1}{2}$ Zoll Staurollenkette.....	72
<b>Abb. 5.8:</b> Geschwindigkeitsabhängigkeit $\frac{1}{2}$ Zoll Staurollenkette mit versetzten Rollen .....	73
<b>Abb. 5.9:</b> Geschwindigkeitsabhängigkeit $\frac{3}{4}$ Zoll Standardstaurollenkette .....	74
<b>Abb. 5.10:</b> Vergleich Staukraftverhalten bei $\frac{3}{4}$ Zoll Teilung .....	75
<b>Abb. 5.11:</b> Ermittelte Zugkraft mit Staukraftanteil am Versuchsstand ( $\frac{1}{2}$ Zoll) .....	76
<b>Abb. 5.12:</b> Zusammensetzung der Zugkraft (Standardstaurollenkette) .....	77
<b>Abb. 5.13:</b> Staukraftentwicklung im Dauerversuch ( $\frac{1}{2}$ Zoll Standardstaurollenkette).....	78
<b>Abb. 5.14:</b> Zugkraftentwicklung im Dauerversuch ( $\frac{1}{2}$ Zoll Standardstaurollenkette) .....	79
<b>Abb. 5.15:</b> Vergleich Gesamtreibbeiwert wartungsfreie Kunststoff-Staurollenkette [Sum02] ...	79
<b>Abb. 5.16:</b> Kettenlängung .....	81
<b>Abb. 5.17:</b> Messkurvenverlauf Dauerversuch ( $\frac{1}{2}$ Zoll mit versetzten Förderrollen).....	82

<b>Abb. 5.18:</b> Thermobilder 1/2 Zoll Standardstaurollenkette .....	83
<b>Abb. 5.19:</b> Temperaturentwicklung 1/2 Zoll Staurollenkette mit versetzten Förderrollen .....	84
<b>Abb. 5.20:</b> Temperaturentwicklung an den Laufrollen (3/4 Zoll).....	85
<b>Abb. 5.21:</b> Verschleißbetrachtung nach Dauerversuch 1/2 Zoll Standardstaurollenkette .....	86
<b>Abb. 5.23:</b> Verschleißbetrachtung nach Dauerversuch 3/4 Zoll Standardstaurollenkette .....	87
<b>Abb. 5.22:</b> Verschleißbetrachtung nach Dauerversuch 1/2 Zoll Kette mit versetzten Rollen .....	87
<b>Abb. 5.24:</b> Führungsschiene Firma Altratec mit Erhöhung für Laufrollen.....	88
<b>Abb. 5.25:</b> Beschleunigungen am Werkstückträger.....	89
<b>Abb. 5.26:</b> DFT-Analyse im Dauerversuch (3/4 Zoll Staurollenkette).....	90
<b>Abb. 5.27:</b> DFT-Vergleich unterschiedlicher Kettengrößen.....	92
<b>Abb. 6.1:</b> Überwachungseinheit für Staurollenketten .....	97
<b>Abb. 6.2:</b> Zeichnung der Überwachungsstation mit Außenmaßen .....	98
<b>Abb. 6.3:</b> Aufbau Überwachungsstation für Staurollenketten .....	99
<b>Abb. 6.4:</b> Nachträglich eingebaute Überwachungseinheit.....	99
<b>Abb. 6.5:</b> Entwicklung der Kräfte im Dauerversuch.....	100
<b>Abb. 6.6:</b> Temperaturverlauf im Dauerversuch .....	101
<b>Abb. 6.7:</b> Vergleich der Reibbeiwerte mit Überwachungsstation.....	102
<b>Abb. 6.8:</b> Verschleißerscheinungen an der Überwachungsstation.....	103

# Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 3.1:</b> Zulässige Pressungen [Jun07].....	23
<b>Tab. 3.2:</b> Bruch- und Dauerfestigkeiten Rollenkette [DIN02].....	23
<b>Tab. 4.1:</b> Versuchsprogramm Pendel.....	45
<b>Tab. 4.2:</b> Reibwerte aus Pendelversuche .....	46
<b>Tab. 5.1:</b> Messtechnik und ihre Ergebnisse .....	65
<b>Tab. 5.2:</b> Versuchsprogramm Kettenprüfmaschine .....	65
<b>Tab. 5.3:</b> Versuchsprogramm Einflussfaktoren .....	66
<b>Tab. 5.4:</b> Versuchsparameter Dauerversuch .....	69
<b>Tab. 5.5:</b> Bruchkräfte Staurollenkette .....	70
<b>Tab. 5.6:</b> Dauerfestigkeit $F_D$ von Staurollenkette nach ISO15654 [DIN04].....	70
<b>Tab. 5.7:</b> Übersicht Reibbeiwerte .....	77
<b>Tab. 5.8:</b> Geschwindigkeitsabfall im Dauerversuch .....	91
<b>Tab. 6.1:</b> Erreichte Parameter der Überwachungsstation.....	104

# Anlage 1: Dauerfestigkeit Ermittlungsprotokolle ISO15654

<b>Prüfprotokoll Staurollenkette ½ Zoll - Standard</b>																																																																			
<i>Test-Nr.:</i> 1/4		<i>Seiten:</i> 1 von 1			<i>Datum:</i> 17.04.2009																																																														
<b>Kette:</b>																																																																			
<i>Marke:</i> Iwis L88	<i>Bezeichnung:</i> L88 (1/2')	<i>Teilung:</i> 12,7 mm	<i>Probenlänge:</i> Ring,42 Teilungen	<i>Sonstiges:</i>																																																															
Mechanische Eigenschaften: statische Mindest-Bruchkraft eigene Prüfung (3 Versuche): 20,46 kN																																																																			
<b>Test:</b>																																																																			
<i>Typ:</i> Stufentest 95%		<i>Dauer:</i> 10 <sup>7</sup> Lastwechsel		<i>Temperatur:</i> ca. 20°C		<i>Sonstiges:</i>																																																													
<b>Maschine:</b>																																																																			
<i>Marke:</i> Instron 8501		<i>Typ:</i> Servohydraulisch		<i>Kalibrierung:</i>		<i>Kraftaufbringung:</i> periodisch																																																													
Test-Nr.	Frequenz Hz	F <sub>max</sub> kN	F <sub>min</sub> kN	F <sub>t</sub> kN	Lastwech- sel	Aus fall	Bemer- kung																																																												
1	17	3,732	1,023	2,851	1577625	X	ungültig																																																												
2	17	3,130	1,023	2,218	3920639	X	Innenglied																																																												
3	17	2,528	1,023	1,584	10 <sup>7</sup>	O																																																													
4	17	3,130	1,023	2,218	10 <sup>7</sup>	O																																																													
5	17	3,732	1,023	2,851	1096258	X	Innenglied																																																												
6	17	3,130	1,023	2,218	6464107	X	Innenglied																																																												
7	17	2,528	1,023	1,584	10 <sup>7</sup>	O																																																													
8	17	3,130	1,023	2,218	2089391	X	Innenglied																																																												
9	17	2,528	1,023	1,584	10 <sup>7</sup>	O																																																													
10	17	3,130	1,023	2,218	10 <sup>7</sup>	O																																																													
11	17	3,732	1,023	2,851	3294467	X	Innenglied																																																												
<b>Ergebnisse und Schlussfolgerungen</b>																																																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>F<sub>t</sub> [kN]</th> <th colspan="10">Ausfall (ohne Bruch: O, Bruch: X)</th> <th>Histogramm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2,851</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td>X</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>X</td><td></td><td>XX</td> </tr> <tr> <td>2,218</td> <td>X</td><td></td><td>O</td><td></td><td>X</td><td></td><td>X</td><td></td><td>O</td><td></td><td></td><td></td><td>XOXXO</td> </tr> <tr> <td>1,584</td> <td></td><td>O</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>O</td><td></td><td>O</td><td></td><td></td><td></td><td>OOO</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100px; float: right; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td><b>F<sub>b</sub></b></td> <td>2,15</td> </tr> <tr> <td><b>s</b></td> <td>0,443</td> </tr> <tr> <td><b>F<sub>d</sub></b></td> <td><b>1,458</b></td> </tr> </tbody> </table>								F <sub>t</sub> [kN]	Ausfall (ohne Bruch: O, Bruch: X)										Histogramm	2,851					X						X		XX	2,218	X		O		X		X		O				XOXXO	1,584		O					O		O				OOO	<b>F<sub>b</sub></b>	2,15	<b>s</b>	0,443	<b>F<sub>d</sub></b>	<b>1,458</b>
F <sub>t</sub> [kN]	Ausfall (ohne Bruch: O, Bruch: X)										Histogramm																																																								
2,851					X						X		XX																																																						
2,218	X		O		X		X		O				XOXXO																																																						
1,584		O					O		O				OOO																																																						
<b>F<sub>b</sub></b>	2,15																																																																		
<b>s</b>	0,443																																																																		
<b>F<sub>d</sub></b>	<b>1,458</b>																																																																		

# Anlage 1: Dauerfestigkeit Ermittlungsprotokolle ISO15654

Prüfprotokoll Staurollenkette ½ Zoll – versetzte Förderrollen																																																																				
Test-Nr.: 2/4			Seiten: 1 von 1			Datum: 15.06.2009																																																														
<b>Kette:</b>																																																																				
Marke: Iwis L88 SF		Bezeichnung: L88 SF (1/2')		Teilung: 12,7 mm		Probenlänge: Ring, 42 Teilungen		Sonstiges:																																																												
Mechanische Eigenschaften: statische Mindest-Bruchkraft eigene Prüfung (3 Versuche): 10,59 kN																																																																				
<b>Test:</b>																																																																				
Typ: Stufentest 95%			Dauer: 10 <sup>7</sup> Lastwechsel			Temperatur: ca. 20°C		Sonstiges:																																																												
<b>Maschine:</b>																																																																				
Marke: Instron 8501			Typ: Servohydraulisch			Kalibrierung:		Kraftaufbringung: periodisch																																																												
Datum	Test-Nr.	Frequenz Hz	F <sub>max</sub> kN	F <sub>min</sub> kN	F <sub>t</sub> kN	Lastwechsel	Ausfall	Bemerkung																																																												
15.04.2009	1	17	2,577	0,530	2,155	492598	X	ungültig																																																												
20.04.2009	2	17	1,975	0,530	1,521	3523182	X	Innenlasche																																																												
27.04.2009	3	17	1,373	0,530	0,888	10 <sup>7</sup>	O																																																													
30.04.2009	4	17	1,975	0,530	1,521	3447649	X	Innenlasche																																																												
07.05.2009	5	17	1,373	0,530	0,888	10 <sup>7</sup>	O																																																													
14.05.2009	6	17	1,975	0,530	1,521	10 <sup>7</sup>	O																																																													
15.05.2009	7	17	2,577	0,530	2,155	846135	X	Innenlasche																																																												
19.05.2009	8	17	1,975	0,530	1,521	1743140	X	Innenlasche																																																												
26.05.2009	9	17	1,373	0,530	0,888	10 <sup>7</sup>	O																																																													
02.06.2009	10	17	1,975	0,530	1,521	10 <sup>7</sup>	O																																																													
03.06.2009	11	17	2,577	0,530	2,155	616798	X	Innenlasche																																																												
<b>Ergebnisse und Schlussfolgerungen</b>																																																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>F<sub>t</sub> [kN]</th> <th colspan="10">Ausfall (ohne Bruch: O, Bruch: X)</th> <th>Histogramm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2,155</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>X</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>X</td><td></td><td>XX</td> </tr> <tr> <td>1,521</td> <td>X</td><td></td><td>X</td><td></td><td>O</td><td></td><td>X</td><td></td><td>O</td><td></td><td></td><td></td><td>XXOXO</td> </tr> <tr> <td>0,888</td> <td></td><td>O</td><td></td><td>O</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>O</td><td></td><td></td><td></td><td>OOO</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 150px; margin-left: 20px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td><b>F<sub>b</sub></b></td> <td>1,46</td> </tr> <tr> <td><b>s</b></td> <td>0,443</td> </tr> <tr> <td><b>F<sub>d</sub></b></td> <td><b>0,761</b></td> </tr> </table>									F <sub>t</sub> [kN]	Ausfall (ohne Bruch: O, Bruch: X)										Histogramm	2,155						X					X		XX	1,521	X		X		O		X		O				XXOXO	0,888		O		O					O				OOO	<b>F<sub>b</sub></b>	1,46	<b>s</b>	0,443	<b>F<sub>d</sub></b>	<b>0,761</b>
F <sub>t</sub> [kN]	Ausfall (ohne Bruch: O, Bruch: X)										Histogramm																																																									
2,155						X					X		XX																																																							
1,521	X		X		O		X		O				XXOXO																																																							
0,888		O		O					O				OOO																																																							
<b>F<sub>b</sub></b>	1,46																																																																			
<b>s</b>	0,443																																																																			
<b>F<sub>d</sub></b>	<b>0,761</b>																																																																			

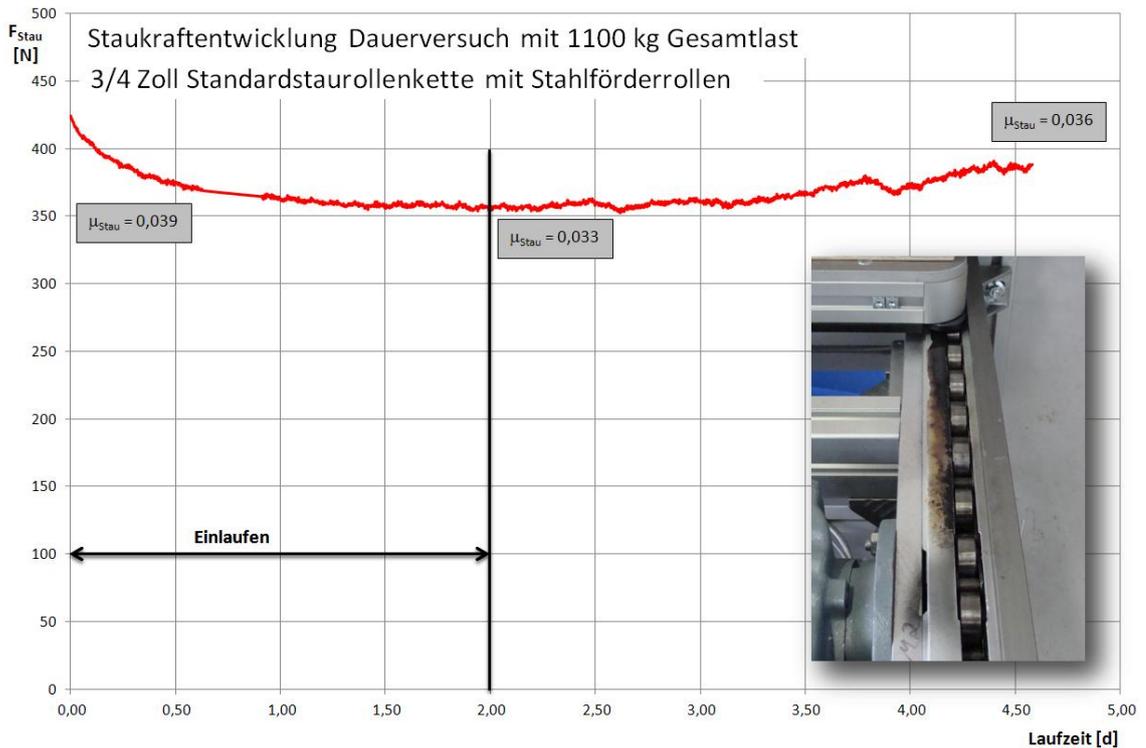
# Anlage 1: Dauerfestigkeit Ermittlungsprotokolle ISO15654

<b>Prüfprotokoll Staurollenkette 3/4 Zoll - Standard</b>																										
<i>Test-Nr.:</i> 3/4			<i>Seiten:</i> 1 von 1			<i>Datum:</i> 30.09.2009																				
<b>Kette:</b>																										
<i>Marke:</i> Iwis M127		<i>Bezeichnung:</i> M127 (3/4')		<i>Teilung:</i> 19,05 mm		<i>Probenlänge:</i> Ring,42 Teilungen		<i>Sonstiges:</i>																		
Mechanische Eigenschaften: statische Mindest-Bruchkraft eigene Prüfung (3 Versuche): 32,03 kN																										
<b>Test:</b>																										
<i>Typ:</i> Stufentest 95%			<i>Dauer:</i> 10 <sup>7</sup> Lastwechsel		<i>Temperatur:</i> ca. 20°C		<i>Sonstiges:</i>																			
<b>Maschine:</b>																										
<i>Marke:</i> Instron 8501			<i>Typ:</i> Servohydraulisch		<i>Kalibrierung:</i>		<i>Kraftaufbringung:</i> periodisch																			
Datum	Test-Nr.	Frequenz Hz	F <sub>max</sub> kN	F <sub>min</sub> kN	F <sub>t</sub> kN	Lastwechsel	Ausfall	Bemerkung																		
28.07.2009	1	17	8,503	1,601	7,265	163793	X	ungültig																		
28.07.2009	2	17	7,398	1,601	6,101	158365	X	ungültig																		
29.07.2009	3	17	6,292	1,601	4,937	609379	X	ungültig																		
01.08.2009	4	17	5,186	1,601	3,773	1234919	X	Innenglied																		
10.08.2009	5	17	4,080	1,601	2,609	10 <sup>7</sup>	O																			
13.08.2009	6	17	5,186	1,601	3,773	1593762	X	Innenglied																		
21.08.2009	7	17	4,080	1,601	2,609	10 <sup>7</sup>	O																			
29.08.2009	8	17	5,186	1,601	3,773	10 <sup>7</sup>	O																			
01.09.2009	9	17	6,292	1,601	4,937	618601	X	Innenglied																		
08.09.2009	10	17	5,186	1,601	3,773	10 <sup>7</sup>	O																			
10.09.2009	11	17	6,292	1,601	4,937	748666	X	Innenglied																		
16.09.2009	12	17	5,186	1,601	3,773	5468691	X	Innenglied																		
25.09.2009	13	17	4,080	1,601	2,609	10 <sup>7</sup>	O																			
<b>Ergebnisse und Schlussfolgerungen</b>																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">F<sub>t</sub> [kN]</th> <th style="width: 45%;">Ausfall (ohne Bruch: O, Bruch: X)</th> <th style="width: 40%;">Histogramm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4,937</td> <td style="text-align: center;">X X</td> <td style="text-align: center;">XX</td> </tr> <tr> <td>3,773</td> <td style="text-align: center;">X X O O X</td> <td style="text-align: center;">XXOOX</td> </tr> <tr> <td>2,609</td> <td style="text-align: center;">O O O</td> <td style="text-align: center;">OOO</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 150px; margin-left: 20px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: right;"><b>F<sub>b</sub></b></td> <td style="text-align: center;">3,66</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><b>s</b></td> <td style="text-align: center;">0,815</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;"><b>F<sub>d</sub></b></td> <td style="text-align: center;"><b>2,376</b></td> </tr> </table>									F <sub>t</sub> [kN]	Ausfall (ohne Bruch: O, Bruch: X)	Histogramm	4,937	X X	XX	3,773	X X O O X	XXOOX	2,609	O O O	OOO	<b>F<sub>b</sub></b>	3,66	<b>s</b>	0,815	<b>F<sub>d</sub></b>	<b>2,376</b>
F <sub>t</sub> [kN]	Ausfall (ohne Bruch: O, Bruch: X)	Histogramm																								
4,937	X X	XX																								
3,773	X X O O X	XXOOX																								
2,609	O O O	OOO																								
<b>F<sub>b</sub></b>	3,66																									
<b>s</b>	0,815																									
<b>F<sub>d</sub></b>	<b>2,376</b>																									

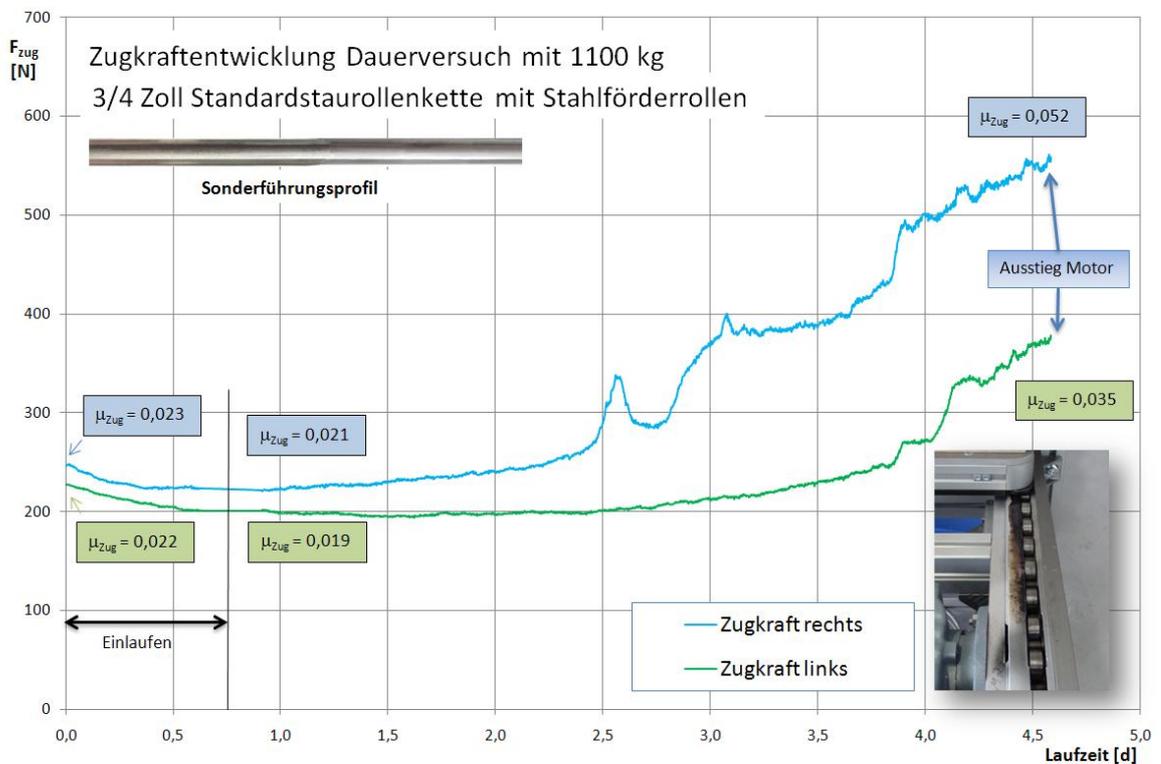
# Anlage 1: Dauerfestigkeit Ermittlungsprotokolle ISO15654

Prüfprotokoll Staurollenkette ¾ Zoll – versetzte Förderrollen																																																																	
Test-Nr.: 4/4			Seiten: 1 von 1			Datum: 31.11.2009																																																											
<b>Kette:</b>																																																																	
Marke: Iwis M120 vFR		Bezeichnung: M120 (3/4)		Teilung: 19,05 mm		Probenlänge: Ring,42 Teilungen		Sonstiges:																																																									
Mechanische Eigenschaften: statische Mindest-Bruchkraft eigene Prüfung (3 Versuche): 17,83 kN																																																																	
<b>Test:</b>																																																																	
Typ: Stufentest 95%		Dauer: 10 <sup>7</sup> Lastwechsel			Temperatur: ca. 20°C		Sonstiges:																																																										
<b>Maschine:</b>																																																																	
Marke: Instron 8501		Typ: Servohydraulisch			Kalibrierung:		Kraftaufbringung: periodisch																																																										
Datum	Test-Nr.	Frequenz Hz	F <sub>max</sub> kN	F <sub>min</sub> kN	F <sub>t</sub> kN	Lastwechsel	Ausfall	Bemerkung																																																									
01.10.2009	1	17	4,243	0,891	3,528	385505	X	ungültig																																																									
03.10.2009	2	17	3,690	0,891	2,946	1050371	X	Bolzen Innenlasche																																																									
11.10.2009	3	17	3,137	0,891	2,364	10 <sup>7</sup>	-																																																										
14.10.2009	4	17	3,690	0,891	2,946	1262271	X	Bolzen Innenlasche																																																									
22.10.2009	5	17	3,137	0,891	2,364	10 <sup>7</sup>	-																																																										
23.10.2009	6	17	3,690	0,891	2,946	659393	X	Bolzen Innenlasche																																																									
01.11.2009	7	17	3,137	0,891	2,364	10 <sup>7</sup>	-																																																										
05.11.2009	8	17	3,690	0,891	2,946	3671407	X	Bolzen Innenlasche																																																									
13.11.2009	9	17	3,137	0,891	2,364	10 <sup>7</sup>	-																																																										
22.11.2009	10	17	3,690	0,891	2,946	10 <sup>7</sup>	-																																																										
25.11.2009	11	17	4,243	0,891	3,528	709146	X	Bolzen Innenlasche																																																									
<b>Ergebnisse und Schlussfolgerungen</b>																																																																	
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>F<sub>t</sub> [kN]</th> <th colspan="10">Ausfall (ohne Bruch: O, Bruch: X)</th> <th>Histogramm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3,528</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>X</td> <td>X</td> </tr> <tr> <td>2,946</td> <td>X</td><td></td><td>X</td><td></td><td>X</td><td></td><td>X</td><td></td><td>O</td><td></td><td></td> <td>XXXXO</td> </tr> <tr> <td>2,364</td> <td></td><td>O</td><td></td><td>O</td><td></td><td>O</td><td></td><td>O</td><td></td><td></td><td></td> <td>OOOO</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <tr> <td><b>F<sub>b</sub></b></td> <td>2,77</td> </tr> <tr> <td><b>s</b></td> <td>0,373</td> </tr> <tr> <td><b>F<sub>d</sub></b></td> <td>2,235</td> </tr> </table>									F <sub>t</sub> [kN]	Ausfall (ohne Bruch: O, Bruch: X)										Histogramm	3,528											X	X	2,946	X		X		X		X		O			XXXXO	2,364		O		O		O		O				OOOO	<b>F<sub>b</sub></b>	2,77	<b>s</b>	0,373	<b>F<sub>d</sub></b>	2,235
F <sub>t</sub> [kN]	Ausfall (ohne Bruch: O, Bruch: X)										Histogramm																																																						
3,528											X	X																																																					
2,946	X		X		X		X		O			XXXXO																																																					
2,364		O		O		O		O				OOOO																																																					
<b>F<sub>b</sub></b>	2,77																																																																
<b>s</b>	0,373																																																																
<b>F<sub>d</sub></b>	2,235																																																																

## Anlage 2: Diagramme 3/4 Zoll Standardstaurollenkette



- Staukraft zeigt typisches Einlaufverhalten
- Motorüberlastung nach ca. 4,5 Tagen (Staukraft ist nicht der Auslöser)
- Verschleppung des Schmierstoffes nach außen

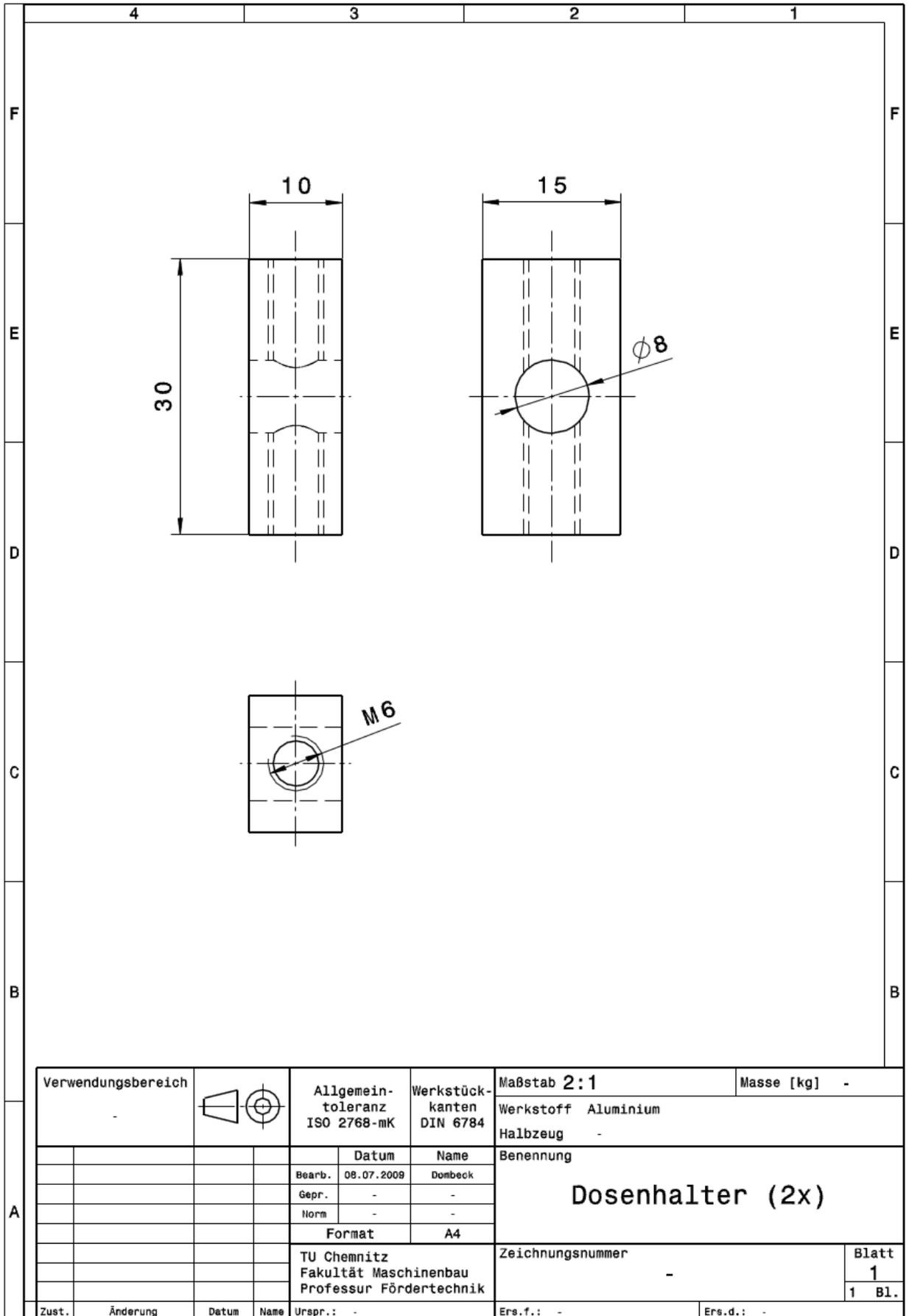


- starke Erhöhung der Zugkraft dadurch Motorausfall nach ca. 4,5 Tagen
- Sonderführungsprofil mit passenden Laufrollen zeigen sich als ungünstig

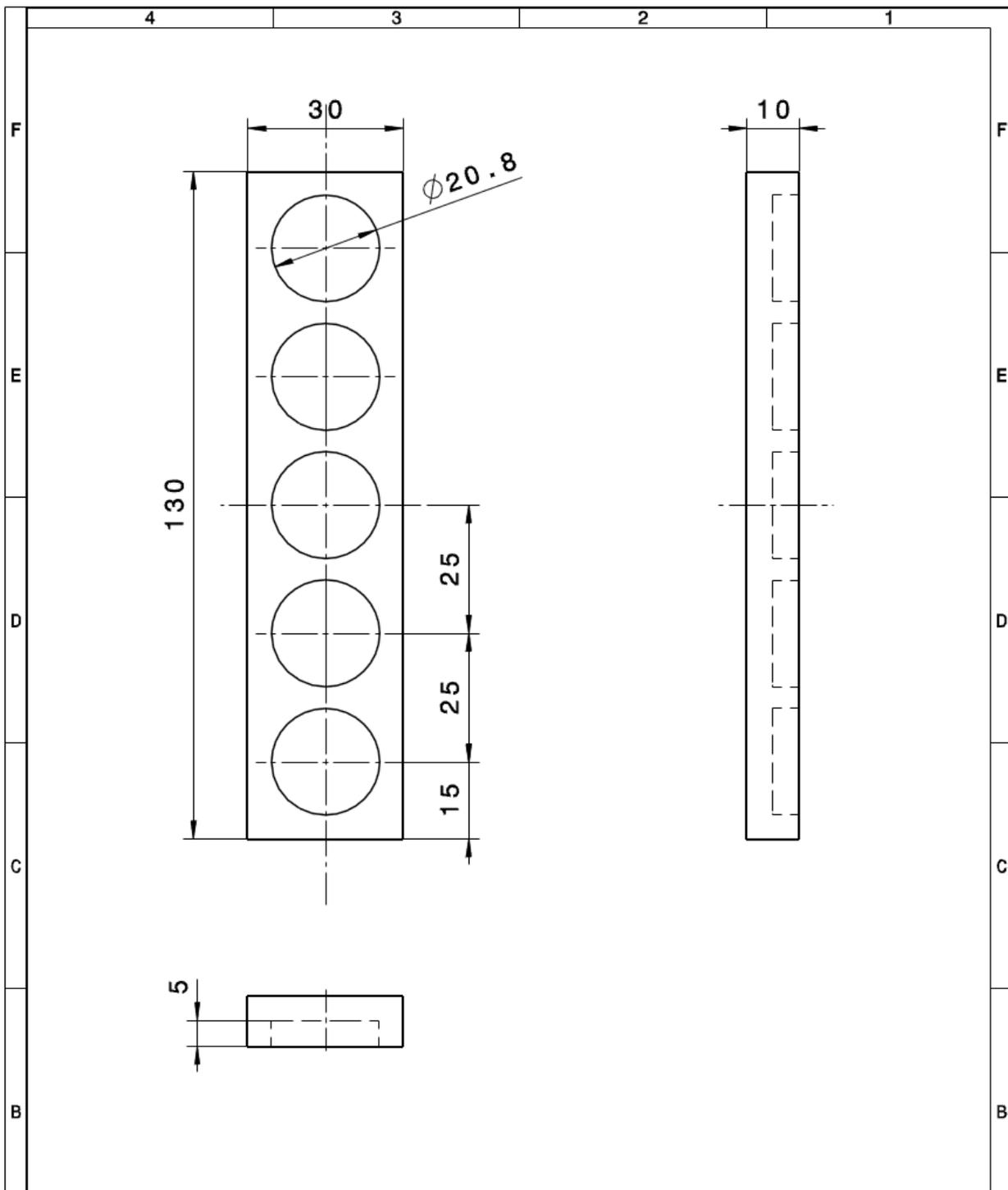
# Anlage 3: Technische Zeichnungen Überwachungsstation - 1/2 Zoll

6	5	4	3	2	1																																																										
D	C	B	A																																																												
<p>The drawing shows a rectangular housing with a total width of 130 and a total height of 60. It features a central vertical slot with a width of 40 and a depth of 5. There are four circular holes: one at the top center (M6), one at the bottom center (7.5 diameter), and two on the right side (4 H7 diameter). The distance between the two side holes is 15, and they are 8 units from the right edge. The distance from the top hole to the top edge is 13. The drawing is divided into sections B, C, and D.</p>																																																															
D	C	B	A																																																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%;">Verwendungsbereich</td> <td style="width: 15%; text-align: center;"> </td> <td style="width: 15%;">Allgemein- toleranz ISO 2768-mK</td> <td style="width: 15%;">Werkstück- kanten DIN 6784</td> <td style="width: 15%;">Maßstab 1:1</td> <td style="width: 15%;">Masse [kg] -</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Zust.</td> <td style="text-align: center;">Änderung</td> <td style="text-align: center;">Datum</td> <td style="text-align: center;">Name</td> <td colspan="2" rowspan="4" style="text-align: center; vertical-align: middle;"> <b>HÜLLE (1x)</b> </td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">Bearb.</td> <td style="text-align: center;">Name</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">Gepr.</td> <td style="text-align: center;">Dombeck</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">Norm</td> <td style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">Format</td> <td style="text-align: center;">A4</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">Zeichnungsnummer</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="3" style="text-align: center;">TU Chemnitz Fakultät Maschinenbau Professur Fördertechnik</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">Blatt</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="3" style="text-align: center;">Urspr.: -</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="3" style="text-align: center;">Ers.f.: -</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">1 Bl.</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="3" style="text-align: center;">Ers.d.: -</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>						Verwendungsbereich		Allgemein- toleranz ISO 2768-mK	Werkstück- kanten DIN 6784	Maßstab 1:1	Masse [kg] -	Zust.	Änderung	Datum	Name	<b>HÜLLE (1x)</b>				Bearb.	Name			Gepr.	Dombeck			Norm	-			Format	A4	Zeichnungsnummer				TU Chemnitz Fakultät Maschinenbau Professur Fördertechnik			Blatt				Urspr.: -			1				Ers.f.: -			1 Bl.				Ers.d.: -				
Verwendungsbereich		Allgemein- toleranz ISO 2768-mK	Werkstück- kanten DIN 6784	Maßstab 1:1	Masse [kg] -																																																										
Zust.	Änderung	Datum	Name	<b>HÜLLE (1x)</b>																																																											
		Bearb.	Name																																																												
		Gepr.	Dombeck																																																												
		Norm	-																																																												
		Format	A4	Zeichnungsnummer																																																											
		TU Chemnitz Fakultät Maschinenbau Professur Fördertechnik			Blatt																																																										
		Urspr.: -			1																																																										
		Ers.f.: -			1 Bl.																																																										
		Ers.d.: -																																																													
D	C	B	A																																																												

# Anlage 3: Technische Zeichnungen Überwachungsstation - 1/2 Zoll

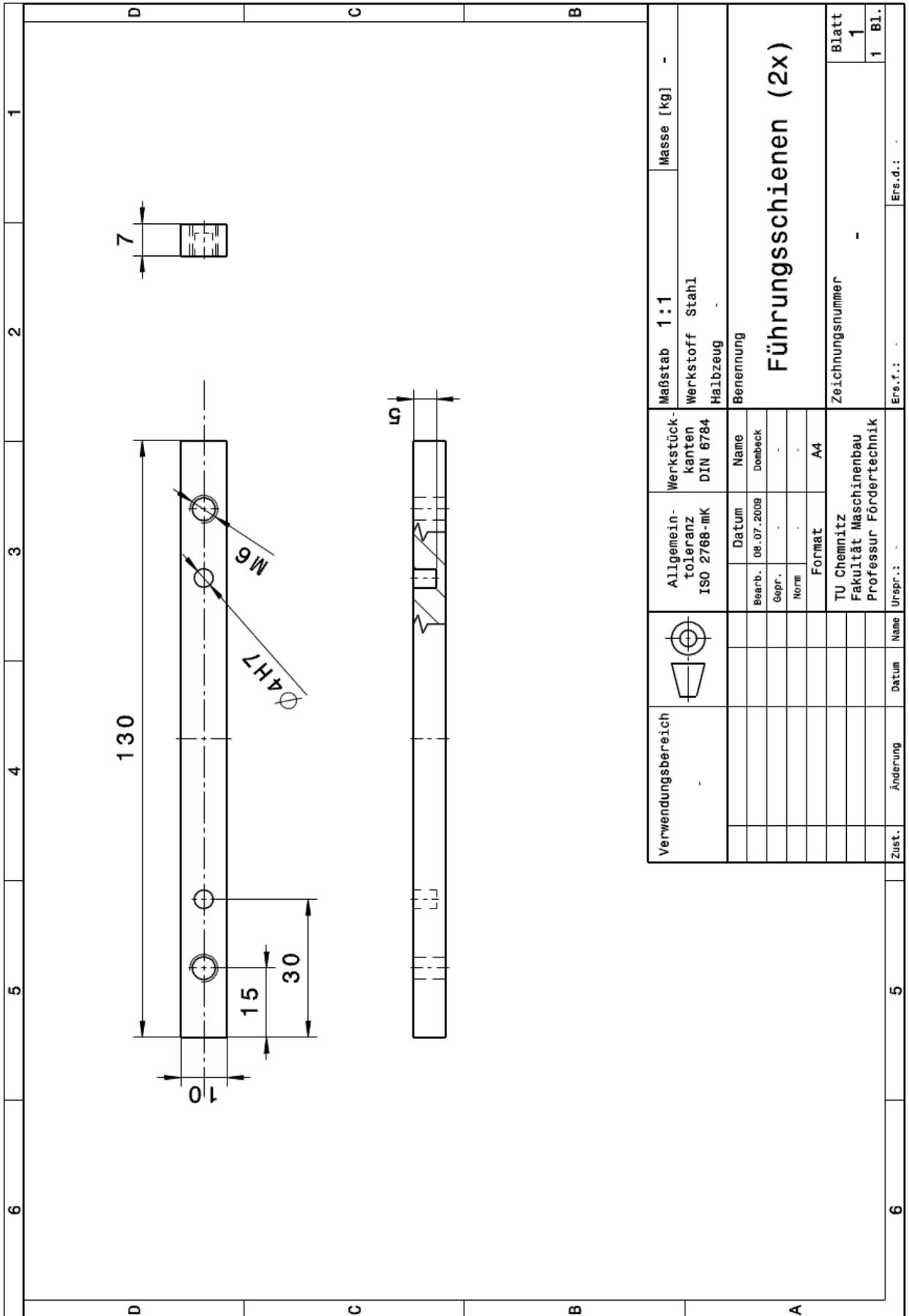


# Anlage 3: Technische Zeichnungen Überwachungsstation - 1/2 Zoll



A	Verwendungsbereich		Allgemein-toleranz ISO 2768-mK	Werkstück-kanten DIN 6784	Maßstab 1:1	Masse [kg] -
					Werkstoff STAHL	
					Halbzeug -	
					Benennung	
			Datum	Name	<b>Federhalter</b>	
			Bearb. 07.07.2009	Dombeck		
			Gep. -	-		
			Norm -	-		
			Format	A4		
			TU Chemnitz Fakultät Maschinenbau Professur Fördertechnik		Zeichnungsnummer	Blatt
					-	1
						1 BL.
	Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr.: -	Ers.f.: -
						Ers.d.: -

# Anlage 3: Technische Zeichnungen Überwachungsstation - 1/2 Zoll



Verwendungsbereich		Allgemeintoleranz ISO 2768-mK	Werkstückkanten DIN 6784	Maßstab 1:1	Masse [kg] -
		Datum 08.07.2009	Name Dombeck	Werkstoff Stahl	
		Gepr.		Halbzeug	
		Norm		Benennung	
		Format A4		<b>Führungsschienen (2x)</b>	
		TU Chemnitz Fakultät Maschinenbau Professor Fördertechnik			
Zust.	Änderung	Urpr.	Zeichnungsnummer	Blatt	
			-	1	
				1 Bl.	
			Ers.f.:	Ers.d.:	

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Uwe Dombeck  
Geburtsdatum: 30. Juni 1981  
Geburtsort: Annaberg-Buchholz  
Familienstand: ledig  
Staatsangehörigkeit: deutsch

## Ausbildungsdaten

1988 – 1994 Grundschole Crottendorf  
1994 – 1998 Realschole Crottendorf  
1998 – 2001 Berufliches Schulzentrum für Wirtschaft, Ernährung und Hauswirtschaft - Abschluss: Abitur  
2001 – 02/2007 Technische Universität Chemnitz – Studium Maschinenbau  
Abschluss: Diplomingenieur

## Praktikums- und Tätigkeitszeiten

08/2004 – 02/2005 Praktikum am Fraunhofer Institut Werkzeugmaschinen und Umformtechnik Chemnitz, Thema: Prozessanalyse beim kinematisch determinierten Biegen  
06/2005 – 12/2005 Studentische Hilfskraft am Fraunhofer Institut Werkzeugmaschinen und Umformtechnik Chemnitz  
ab 03/2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Chemnitz Professur Fördertechnik