

Der Polygoneffekt – was hilft?!

Assoc.Prof. DI Dr.techn. Christian Landschützer*

Dipl.-Ing. Reiner Thoß**

* TU Graz – Institut für Technische Logistik, Professor für Fördertechnik und stellv. Institutsvorstand

** Jena, Statiker und Kransachverständiger

Der Polygoneffekt sorgt in der Hebetchnik mit Rundstahlkettenzügen für immanente Schwingungsprobleme an hängenden Lasten, Kranen und Trägern sowie tragenden Strukturen. Die Autoren des Beitrages haben jahrelange Erfahrung in der Thematik und vereinen in Ihrer Darstellung die praktische mit der theoretisch-wissenschaftlichen Sicht.

Im diesjährigen Beitrag wird erneut auf die Wichtigkeit des Problems hingewiesen und Möglichkeiten zur Beherrschung des Phänomens aufgezeigt. Damit soll die Fachwelt aufmerksam gemacht werden, dass mit Folgeforschungsarbeit eine einfach anwendbare Auslegung für den schwingungssicheren Betrieb von Rundstahlkettentrieben erarbeitet werden kann. Das umfangreich vorhandene und verfügbare Grundlagen- und Erfahrungswissen ist im vorliegenden Beitrag überblicksartig dargestellt, eine Einführung in die wichtigsten Zusammenhänge ergänzt die Ausführungen.

1 Umfeld

Gehoben wird schon immer!

In seinem Hauptwerk „De Re Metallica“, das aus dem Lateinischen bereits früh in unzählige Sprachen übersetzt wurde, stellt uns Georg Agricola [AGR56] nicht nur das Wissen der Bergbau- und Hüttentechnik des 16. Jahrhunderts dar, sondern bezieht auch die nötigen Fördermittel mit ein. Dass damals – und noch viel früher – Kettentriebe auch schon eine entscheidende technische Rolle spielten zeigt bspw. Abbildung 1 eines Kettenbecherwerkes.



Abbildung 1: Kettenbecherwerk (16. Jahrhundert) [AGR56]

Unschwer ist eine kreative Form der heute bekannten Rundstahlkette, die aus 90° zueinander verdrehten und aus Drähten gebogenen und verschweißten Einzelgliedern besteht, darin erkennbar. Auch im Schiffsbau stellte die Ankerkette bald eine technische Notwendigkeit dar, während landläufig die Kette eher als etwas freiheitsberaubendes Negatives bekannt ist.

Die spezifische Fördertechnikliteratur lässt sich nach einigen Recherchen ins 19. Jahrhundert zurückverfolgen, wo Pohlhausen einen Rundstahlkettentrieb für Hebezwecke – sehr ähnlich unserer heutigen Bauweisen – darstellt [POL94]. Abbildung 2 stellt diesen historischen Kettentrieb mit einem modernen gegenüber.

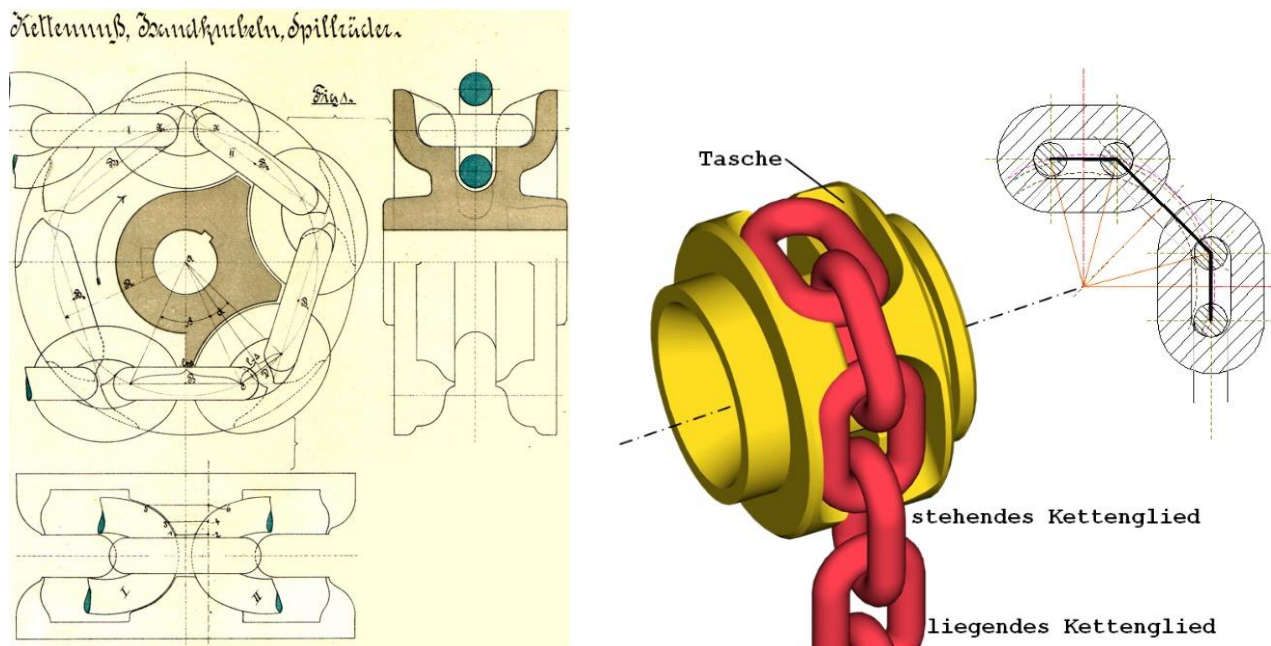


Abbildung 2 Kettentrieb nach Pohlhausen [POL94] und Taschenrad-Kettentrieb eines Kettenhebezeuges mit Rundstahlkette [WIK18] bzw. eigene Darstellung

Bevor auf die näheren Details des Kettenzuges bzw. des Rundstahlkettentriebes näher eingegangen wird, seien einige Merkmale tabellarisch aufgelistet und in Erinnerung gerufen. Bekannterweise unterscheiden sich Ketten von Seilen in vielen Eigenschaften, die im übertragenen Sinne auch für die entsprechenden Serienhebezeuge Kettenzug und Seilzug gelten; Details bietet die einschlägige Literatur der Fördertechnik (bspw. [MAR08]) oder auch die Fachvorlesungen [LAN17]), einen Überblick gibt als Einstieg in die Thematik Tabelle 1.

Heute gehören Seil- und Kettenzüge zu den Serienhebezeugen und sind – gemäß ihrer Bezeichnung – weit verbreitet als kostengünstige Hebewerkzeuge weltweit in unterschiedlichsten Bedingungen und Umfeldern eingesetzt. Ohne auf die Details näher einzugehen, die unter [DIR18] jederzeit nachrecherchierbar sind, soll Abbildung 3 einen Eindruck vermitteln, wie groß die Anzahl der Hersteller von Ketten- und Seilzügen ist

Natürlich korrespondiert die große Vielfalt der Hersteller mit relevanten Umsätzen und Marktzahlen für Serienhebezeuge und Kettenzüge im Speziellen. Mit 3,6 Mrd.€ liegt der Anteil der Serienhebezeuge am Gesamtproduktionsvolumen der deutschen Fördertechnikbranche an dritter Stelle und trägt 16,9 % dazu bei. Ein kontinuierliches Wachstum zwischen 2 % und 5% seit 2013

spricht ebenfalls für die herausragende Bedeutung der Branche und die Spitzenwerte von 2008 sind längst wieder überboten [STA18].

Aus wirtschaftlicher und erster technischer Sicht scheint soweit alles gut zu sein. Die Probleme stecken allerdings in der Natur des Kettentriebes – Physik ist eben nicht verhandelbar!

Kette	Seil
serielle Bauelemente (Glieder rund oder als Laschen)	parallele Bauelemente (Draht und Litze)
wenig Bruchsicherheit („schwächstes Glied“)	hohe Bruchsicherheit („Seil stirbt langsam“)
vergleichsweise schwer	vergleichsweise leicht
gut reparierbar	schwer reparierbar
Zusatzelemente einfach anbringbar	Zusatzelemente aufwendig anbringbar
Lauf geräuschvoll und unruhig (Polygoneffekt, Querschwingungen)	leiser, schwingungsarmer Lauf
robust gegenüber äußeren und Umwelteinflüssen	sensibel
geringe Umlenkradien	große Umlenkradien und daraus hohe (Biege)belastung an Anschlussbauteilen

Kettenzug	Seilzug
kompakte Maschine auch für/bei große(n) Hubhöhen	ausladende Bauweise (Seiltrommel)
kleine Getriebe und Antriebsmomente (geringe Kettenumlenkradien)	große Getriebe und Antriebsmomente
unruhiger Lauf und Resonanzen im Hebevorgang, Kettenquerschwingungen möglich	ruhiger Lauf (nur Anfahrstoß v.a. bei unregelmäßigen Antrieben)
definiertes Ablegekriterium für den Kettentrieb (2% Teilungszunahme mit Lehre einfach messbar)	Seilprüfung aufwendig nötig für Bestimmung der Ablegereife
Blockierungen und Aufklettern der Kette möglich	Blockierungen unwahrscheinlich

Gemeinsamkeiten Effekte an der Last sind weitgehend unbeeinflusst v. der Art des Antriebskonzepts (Handbetrieb, elektromechanisch geregelt/ungereg., pneumatisch), einfacher Aufbau, ungeführte Last kann querschwingen, ungeregelte Antriebe mit robusten und einfachen Sicherheitsmechanismen möglich, aufgrund hoher Stückzahlen günstig.

Tabelle 1: Unterschiede Kette-Seil und Kettenzug Seilzug (als Serienhebezeug)



Abbildung 3: Logoübersicht einiger Kettenzughersteller [DIR18]

2 Aus der Praxis

Ob und v.a. wie tatsächlich ein Kettenriss eines Hebwerkzeuges für die spektakuläre Quasi-Vernichtung der nagelneuen Zugspitzbahn sorgte entzieht sich im Detail den Kenntnissen der Autoren, s. Abbildung 4.



Abbildung 4: „Kette eines Hebwerkzeuges reißt und löst Kettenreaktion aus“ [MER18]

Dass aus diversesten Gründen Kettenzüge bzw. die dort verwendeten Ketten aber nicht annähernd die versprochenen Lauf- bzw. Tragleistungen erlangen, bzw. manche Installation gar nicht in Betrieb genommen werden kann, davon will dieses Kapitel erzählen.

2.1 Erfahrungen mit Kranen und Kettenzügen

Je nach Bauart des Kettentriebs im Kettenzug entsteht eine Erregungsfrequenz, da die Kette immer über ein nicht rundes Rad läuft, das mit nahezu konstanter Geschwindigkeit angetrieben ist (s. Abbildung 2 rechts). Meist liegt diese Erregerfrequenz im Bereich weniger Hertz, was prima mit den veränderlichen Eigenfrequenzen des Schwingensystems visko-elastische Kette und Hubmasse zusammenpasst. Diese Erregung und v.a. die daraus entstehende (nur aufwendig vermeidbare) Resonanz ist in der Lage, nicht nur am Kettentrieb selbst sondern darüber hinaus Strukturschwingungen an Kranen, angrenzenden Bauteilen, Aufbauten,... anzuregen (für einen Überblick der Theorie s. Kap.3 und die dort angegebene Literatur).

Die meisten Kettenzüge kommen keinem Kransachverständigen mehr in die Hände, und wenn dann nur als Hubwerk abnahmepflichtiger Krane. Die Betriebssicherheitsverordnung sieht nur eine Abnahmeprüfung für Krane vor, die nicht im angelieferten Zustand in Betrieb gehen. Deshalb sind solche Abnahmeprüfungen meist bei Brückenkranen vorgeschrieben, da diese vor Ort erst fertig montiert werden. Die Sachverständigen haben dabei in erster Linie die Einbauverhältnisse zu prüfen und führen Funktionsproben mit Lasten durch. Dabei wird davon ausgegangen, dass für Kran und Hubwerk Konformitätserklärungen nach der EG Maschinenrichtlinie [MAS06] vorliegen, dann entfallen alle Prüfungen an technischen Details, wie dem Hubwerk.

Wenn Prüflasten, besonders für hochbeanspruchte Krane nach der DIN EN 13001—2 [DIN14] und DIN EN 15011 [DIN11] verlangt werden, kann das über die allgemeine Forderung der EG Maschinenrichtlinie mit 1,1 facher Last dynamisch und 1,25 facher Last hinausgehen. Das aber trifft für Krane mit Kettenzügen selten zu.

Bei einer Abnahmeprüfung am Brückenkran wird also in der Regel eine Funktionsprobe ohne Last und eine Lastprobe mit vorgeschriebener Überlast vorgenommen. Kaum ein Sachverständiger wird auf die Idee kommen, auch mit 0,3 ; 0,5..... –facher Last zu prüfen¹. Das kostet Zeit und letztlich auch Geld, also sind solche Teillastproben eher selten.

Auch die Autoren haben einen kleinen Brückenkran mit 1 t Kettenzug nur mit den vorgeschriebenen Lasten geprüft. Dabei ist schon die bei Kettenzügen übliche Schwingung des Tragwerkes aufgefallen. Das ist bekannt und wird üblicherweise so hingenommen.

Kurze Zeit später ging der Kran in Betrieb, ausgerechnet mit einer extrem empfindlichen Last von 0,7 t, in Form einer feinmechanisch optischen Maschine. Das war das erste Hubspiel beim bis dahin glücklichen Betreiber eines neuen Kranes. Dabei geriet der Kran derartig in Schwingungen, dass man vernünftigerweise die Last mit Feinhub absetzte und den Kran außer Betrieb nahm. Ein einfaches Amateurvideo zeigt bedenkliche Schwingungserscheinungen, leider nur in kurzen Sequenzen, da längere Einschaltdauern einfach zu gefährlich waren.

Natürlich ging sofort eine Reklamation an den Errichter des Kranes, der diese prompt an den Hersteller des Kettenzuges und den Kransachverständigen weitergab. Man fing dann mit einem Prüfgewicht von 250 kg an, der Kran kam stark in Schwingungen, setzte mit 500 kg fort und konnte den Grobhub mit 4 m/min Hubgeschwindigkeit nicht mehr benutzen, da der Kranträger, ein HE-A 160 in eine kombinierte Biege-Torsionsschwingung kam, die extrem zunahm, je länger Grobhub oder Grobsenken eingeschaltet war. Nach Antippen des Hubwerkes schwang der Kran sofort gefährlich.

Der Kranhersteller hat dann ein stärkeres und vor allem torsionssteiferes Trägerprofil eingesetzt, wohl wissend, dass damit die Wirkung gemildert, aber die Ursache nicht beseitigt war. Der Kranbetreiber, der empfindliche optische Maschinen mit dem Kran im Versandraum handeln wollte, war nun verständlicherweise stark sensibilisiert. Selbst nach dem Hauptträgerwechsel kam der Kran noch stark in Schwingungen, wohl weniger als vorher, vor allem weniger tordierend, aber für den Betreiber immer noch nicht hinnehmbar.

Offenbar handelt es sich bei dem Hubwerk um eine besonders schwingungserregende Konstruktionsform, auf die hier nun etwas näher eingegangen werden soll. Ergänzt sei noch, dass stets extrem kurze Kettenlängen vorhanden war, der kleine Einträgerkran hatte nur eine kleine Hubhöhe, er war eher so ausgelegt, dass er in ein komfortables Wohnzimmer passen würde. Abbildung 5 zeigt schematisch seine Grundstruktur.

¹ Eine Darstellung in [1] zeigt, dass mit Volllast an einem ausgewählten Kettenzug 3 m/s^2 Schwingbeschleunigung entstehen, bei 1/5-Volllast hingegen 9 m/s^2 .

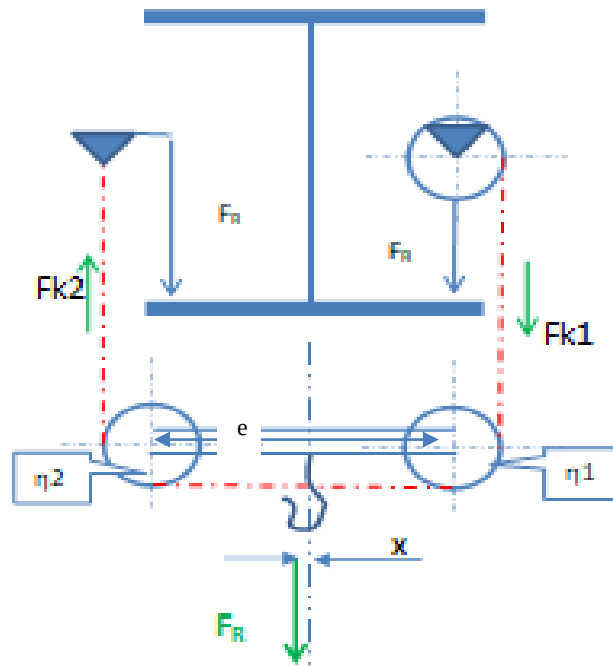


Abbildung 5: Einträgerkran mit Zweistrangkettenzug

Für die beiden Strangkkräfte F_k eines doppelsträngigen Hebezeuges auf HE-A 160-Träger mit Traverse gilt Gleichung 1:

$$F_{k2} = \frac{F_{k1}}{\eta_1 + \eta_2} \quad \text{Gleichung 1}$$

Die Exzentrizität x in Abbildung 5 scheint dabei besonders gefährlich, vor allem im Hinblick auf die Torsionsschwingungen. Asymmetrische Umlenkungen, die auch bei ungeradzahligen Taschenrädern entstehen können, scheinen also dahingehend problematisch zu sein. Gleichung 2 zeigt den Einfluss der Exzentrizität.

$$x = \frac{e \left(1 - \frac{1}{\eta^2} \right)}{1 + \frac{1}{\eta^2}} \quad \text{bei } \eta_1 = \eta_2 = \eta \quad \text{Gleichung 2}$$

Die Hersteller von Kettenzügen verlangen aus eben diesen Schwingungsproblemen, gerade bei solchen oft umgelenkten Ketten, eine höhere Hubwerkseinstufung, was letztlich auch einer Erhöhung der Eigenfrequenz des Krantragsystems dient. Meist tritt das alles nur bei kleineren Brückenkränen auf, viele Betreiber haben sich auch stillschweigend mit den bis zur Unbrauchbarkeit schwingenden Konstruktionen abgefunden.

Die folgende theoretische Aufarbeitung stellt den Stand der Technik zum Problem dar, der praktische Nutzen daraus ist Gegenstand weiterer Arbeiten sowie einer Synthese aus vorhandener Theorie mit den praktischen Erfahrungen in der Branche; der vorliegende Aufsatz soll dazu ein erster Schritt sein.

3 Theorie

Ein auf ein notwendiges Minimum abgespekter Theorieteil soll dem Leser helfen, die fortan besprochenen Arbeiten und die auftretenden Phänomene besser zu verstehen. Für Details sei auf die angegebene Literatur verwiesen.

3.1 Problembeschreibung

Seit der frühesten in der Literatur auffindbaren Darstellung [POL94] hält sich hartnäckig die sog. „Teilkreisgleichung“, die beim Kettenrad durch den Mittenschnitt einen Kreis durch die Drahtquerschnittsmittelpunkte des liegenden Kettengliedes zieht und jenen als wirksamen Durchmesser (D_m bzw. r_m) des Kettentriebes identifiziert. Damit werden die kinematischen Verhältnisse bzw. die Übertragungsfunktion vom Drehwinkel zum Kettenhub beschrieben. Für den einfachen Betrachtungsfall und sogar die maschinendynamische Betrachtung des Schwingensystems Kettenzug-Anschlussbauteile genügt diese Betrachtung auch; eine Folie aus eigener Vorlesung soll dies auch unterstreichen (Abbildung 6).

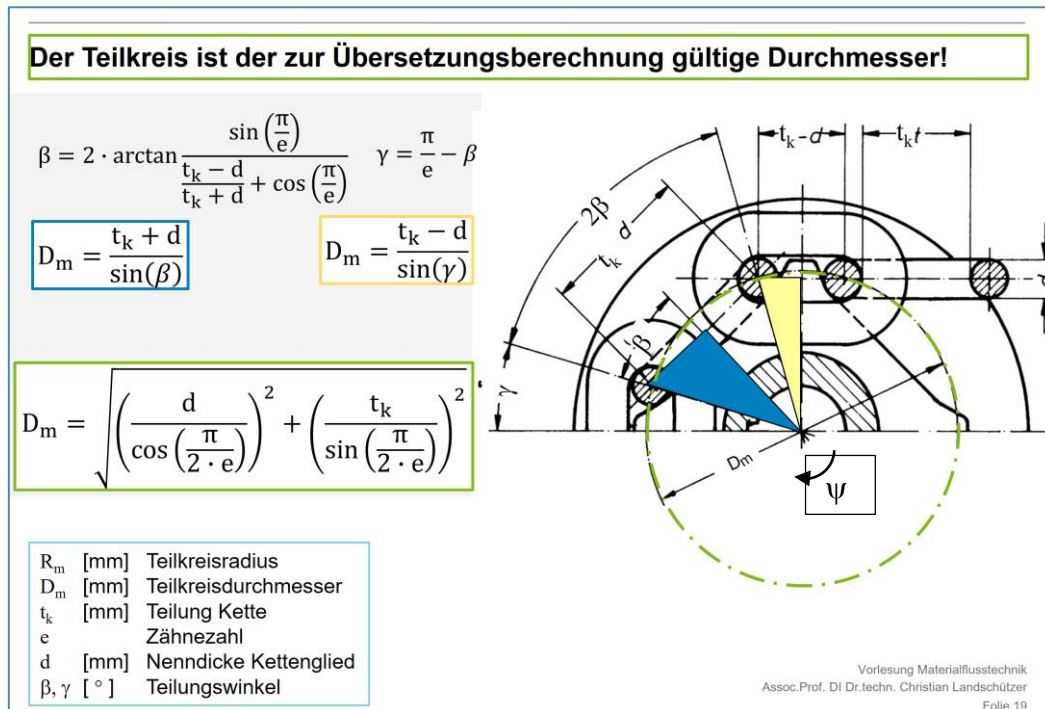


Abbildung 6: Herleitung des Teilkreisdurchmessers für Rundstahlkettentriebe [LAN17]

Kette und Rad wirken allerdings real nicht so zusammen, wie in den Randbedingungen der Teilkreisgleichung vorausgesetzt. Der Zusammenhang ist ausreichend beschrieben und Abbildung 7 zeigt die Abweichungen für einen Kettentrieb mit 4-Taschenrad und Kettendimension 9 x 27 mm [LAN13].

Schlussendlich, ob eine Lage nach Teilkreistheorie oder die reale Lage nach [LAN13] herangezogen wird, läuft die Kette immer über ein un rundes Rad (Polygon), was den Polygoneffekt hervorruft.

Daher bietet sich eine um die Gleichförmigkeit der äquivalenten Seiltrommel befreite Darstellung der Hubwegabweichung am Kettentrieb an, was durch $y_k - D_m/2 \cdot \psi_k$ berechnet werden kann. Nimmt man noch die reale Lage der Kette in der Nuss mit hinzu, gelangt man zur tatsächlichen (realen) Hubgeschwindigkeit, die deutlich von jener durch die Teilkreisgleichung beschrieben abweicht. Schwingungsanregend wirkt allerdings die Hubwegabweichung, was sich in der Beschleunigungsfunktion anhand zweier Sprünge äußert. Der Unterschied dieser Erregung zwischen Teilkreisgleichung und realen Lagen ist nicht relevant. Die Sprünge in der Beschleunigungsfunktion unterscheiden sich wohl, es ist aber das periodische (zweimalig je Drehung um ein liegendes und ein stehendes Kettenglied) Auftreten relevanter, als die minimalen Größenunterschiede (Abbildung 9: Geschwindigkeitskurven). Für diverse Ansätze zur Vermeidung des Polygoneffekts, wie sie in der Literatur versucht, real aber nur zögerlich umgesetzt, wurden, muss natürlich die reale Lage verwendet werden.

Die Beschreibung der Kinematik am Kettenzug hat mathematisch abschnittsweise definierte Funktionen im Hintergrund, die nicht geschlossen lösbar sind. Die Kinetik mit der Beschreibung der Schwingungsgleichungen wird durch Systeme von skleronomen Differentialgleichungen abgebildet, die nur mehr numerisch lösbar sind. Dies kann in Mathematikprogrammen oder ingenieurlicher durch Mehrkörper- bzw. Systemsimulation erfolgen. Dazu sind signalfluss- oder objektorientierte Beschreibungen bekannt.

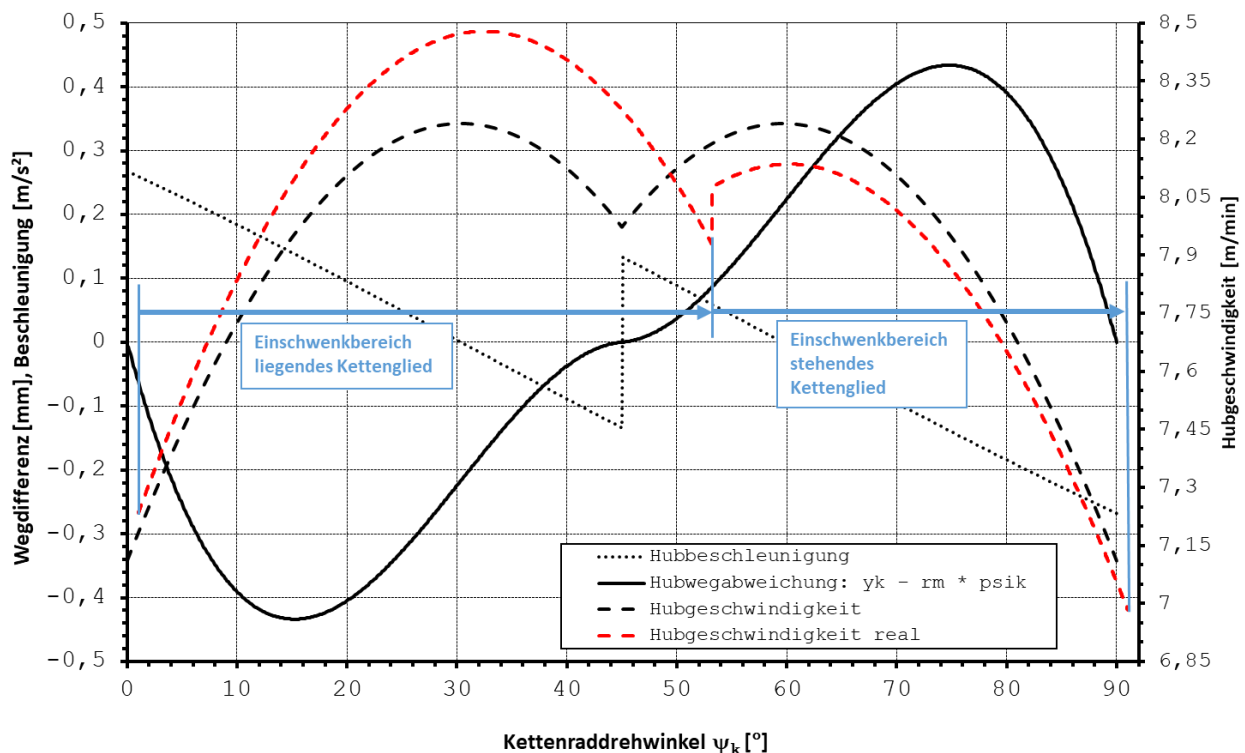


Abbildung 9: Kinematik eines Kettentriebes 4-Taschenrad, 9 x 27 mm Kette

Bevor ein Überblicksbild auf die Instrumente zur Beschreibung des Polygoneffekts sowie dessen Auswirkungen eingeht, sind einige stichwortartige Begriffsklärungen angebracht:

- **Kettenzugdaten:**
 - Typenschild:
Gibt üblicherweise Auskunft über Hubklasse und Laufzeitklasse, Motornennleistung und -drehzahl und die Hubgeschwindigkeit(en).
 - Allgemein:
 - Kettenrad:
auch als Taschenrad oder Kettennuss bezeichnet ist durch seine Anzahl von Taschen für die Aufnahme der liegenden Kettenglieder und einer kreisrunden Rille (oder Sonderbauform) für die Stehenden gekennzeichnet
 - Kettendimension:
in EN 818/7 [EN08] festgelegte Grunddimensionen der Kette, wovon für die kinematische Betrachtung die Teilung t_k (Abbildung 6) relevant ist.
- **Resonanz-**
 - kettenlänge:
auf Grund der längenveränderlichen Kette ist die Eigenfrequenz des visko-elastischen Systems Kette-Masse längenabhängig. Bei der Resonanzkettenlänge n -ter Ordnung ($n=1,2,\dots$) stimmen Erregerfrequenz (abhängig vom n -Vielfachen des Quotienten aus Hubgeschwindigkeit und zweifacher Kettenteilung t_k , Details in [LAN10]) und ein n -Vielfaches der Eigenfrequenz überein.
 - kraft:
Kraftmaximum der Kraft in der Kette in der Resonanz (n -ter Ordnung) bei der zugehörigen Resonanzkettenlänge
- **Kran, Katzposition, Tragwerk, Anschlagmittel:**
Weitere visko-elastische Elemente im Verbund mit dem Kettenzug haben Einfluss auf die Resonanzkettenlänge. Während das Anschlagmittel direkt eine Serienschaltung elastischer Elemente mit der Kette darstellt, tragen die Tragwerke bzw. der Kran nur entsprechend der Diskretisierung schwingfähiger Kontinua bei (s. [SCH03], [EN08] bzw. allgemein [HOL94]). Die Position einer ggf. eingesetzten Laufkatze verändert die Masse der Tragstruktur anteilig.

Was nun passiert, wenn das unrunde Kettenrad (Polygon) mit nahezu konstanter Drehgeschwindigkeit das längenveränderlich-visko-elastische Schwingsystem Kette-Last erregt, zeigt Abbildung 10 mit der Hubhöhe (inverse Kettenlänge) über den dynamischen Kettenzugkräften auf der x -Achse. Beim dargestellten Szenario kommt es zu Schwingbeschleunigungen von 3 m/s^2 die die entsprechende Kraftüberhöhung hervorrufen. Die Kettenmaximalkraft wird – Szenariountersuchungen zufolge – stets bei der maximalen Hublast erreicht, die Schwingbeschleunigungen können 10 m/s^2 und mehr bei geringeren Lasten erreichen, was einer Entlastung und daher einer Instabilität während des Hebens/Senkens entspricht (vgl. Kap. 2.1)!

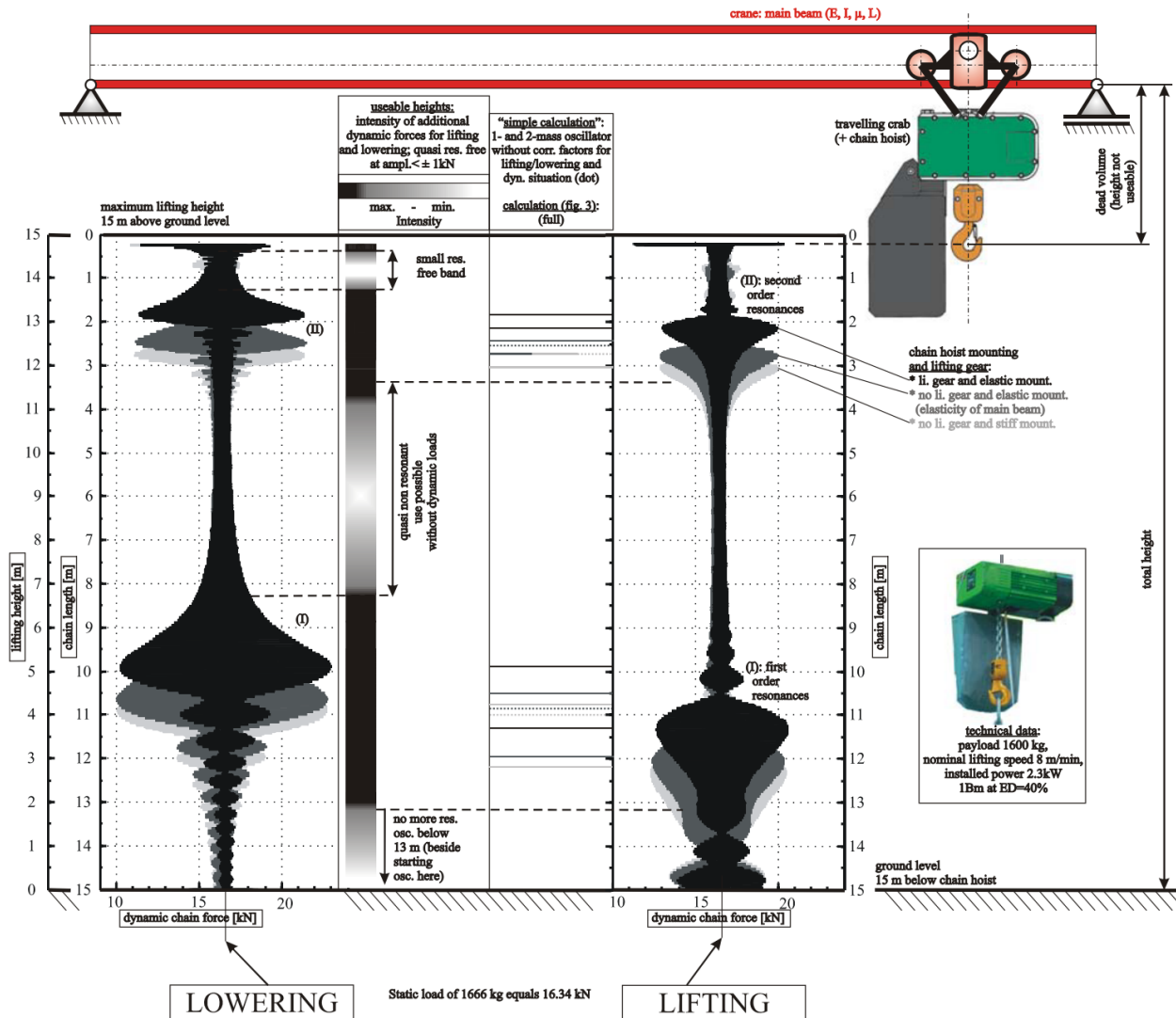


Abbildung 10: dynamische Kettenszugkräfte während des Hebens (Abszisse) von 1600 kg mit einem 2,3 kW 9 x 27 mm Kettenszug bei 8 m/min [LAN09]

Die Darstellung in Abbildung 10 ist Ergebnis der Lösung der systembeschreibenden Differentialgleichungen. Die Theorie dazu ist in [LAN10] dargestellt, die Modelle und v.a. deren Parameter sind umfangreich durch Messungen validiert. Zur modelltechnischen Abbildung und Lösung wurde die Simulationssoftware SimulationX der ESI Group bzw. das Vorgängerprodukt ITI-Sim verwendet.

Abbildung 11 versucht nun zusammenzufassen, wie die interessierenden Größen **Resonanzkettenlänge** und **–kraftmaximum ermittelt werden können**. Folgend soll nach einem Literaturstudium der Lösungspfad (orange) von den Grunddaten der Objekte über eine einfache Berechnungssoftware hin zu den praktischen Auswirkungen und Problemen beleuchtet werden.

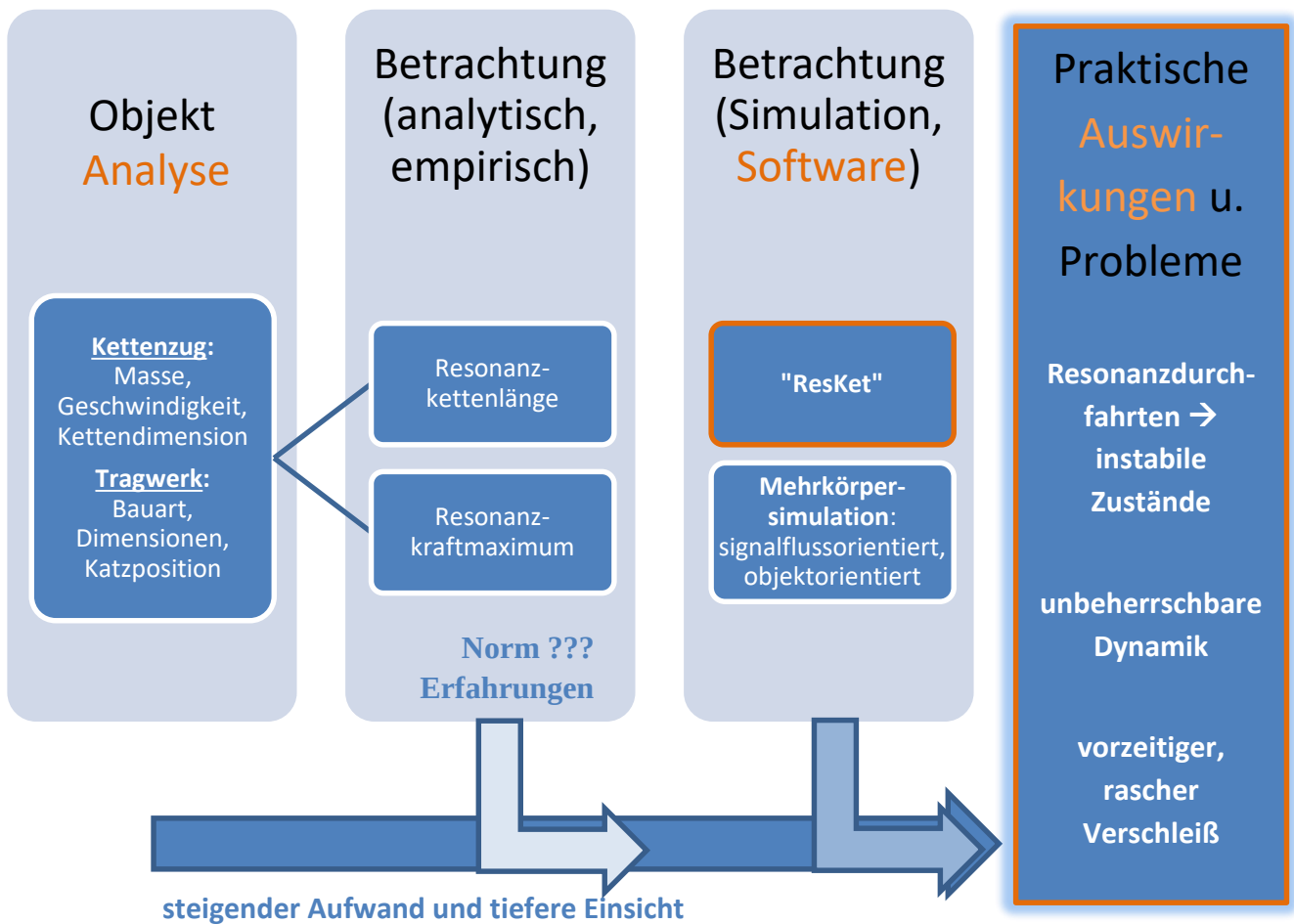


Abbildung 11: Lösungsansätze bzw. Lösungspfad (orange) zur Berechnung der Dynamik am Kettenzug

3.2 Literaturübersicht

Viele, v.a. auch eigene Arbeiten, wurden oben schon kurz zitiert, um die Problematik und die begleitende Theorie dahinter darzustellen. Im Folgenden sei dem Leser ein Überblick über nach Stand Dezember 2018 verfügbare Literatur zum Thema Rundstahlkettenzug und Polygoneffekt gegeben. Dies gliedert sich nach Einschätzung der Relevanz durch die Autoren zweiteilig in eine Überblickstabelle Kap. 3.2.1 sowie ein vollständiges Verzeichnis im Kap. 6 als Literaturanhang.

Der folgende Überblick zeigt, wo und woran in v.a. den Jahren 1970 bis 2005 am Thema „Rundstahlkette(ntrieb)“ geforscht wurde². Eine nähere Analyse³ lässt erkennen, dass in jüngerer Zeit das Thema stark von den Forschungsagenden verschwunden ist und – den Erfahrungen der Autoren zufolge – die relevanten Hersteller eher mit den Produktionskosten und dem Billigproduktmarkt zu kämpfen haben, als dem Thema aus physikalischer Sicht Aufmerksamkeit widmen.

3.2.1 Übersicht Forschungsarbeiten zum Thema Polygoneffekt - Rundstahlkette

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die aktuelle und aus Autorensicht relevante Kettenzugforschung.

² Auch die Publikationen der eigenen Arbeiten bis 2014 ist aus Forschungsarbeiten jener früheren Periode gegründet.

³ Auf eine heute so moderne vollständige bibliometrische Analyse wurde bewusst zugunsten eines Überblicks verzichtet.

Lit.	Thema	Jahr	Hauptobjekte	Methoden	Erkenntnisse	Bezug
[LAN10]	Schwingungen am Kettenzug	2009	einsträngiger Rundstahlkettenzug	Modellbildung und Simulation	Aufstellen aller Schwingungsgleichungen, Simulation und Szenariorechnungen zum Einfluss von Taschenzahl und Masse auf die Resonanzkettenlängen	
[OSE82]	Federsteifigkeit Kettenglied	1981	Rundstahlkette	Analytik	Berechnungsmodell für die Kettenfedersteifigkeit – stark abhängig vom schwer zu identifizierenden Kontaktwinkel	
[MOO08]	„ResKet“ - Software zur Resonanzkettenlängenberechnung	2008	einsträngiger Rundstahlkettenzug	Umsetzung der anal. Resonanzlängenberechnung in eine Software	Prototyp zur einfachen Berechnung der Resonanzkettenlängen mit Bibliotheks- und Vergleichsfunktion	[114]
[BEL11]	Federsteifigkeit von Rundstahlkettengliedern	2011	Rundstahlkette	FEM, Prüfstand	adaptierte Federsteifigkeitsberechnung (analytisch) für Rundstahlkette	[OSE82]
[ZOP14]	Software zur zweisträngigen Resonanzkettenlängenberechnung	2014	zweisträngiger Rundstahlkettenzug	Regression und analytische Resonanzlängenberechnung	Berechnungsschema für Resonanzkettenlänge an zweisträngigen Kettenzügen, prototypische Implementierung in „ResKet“ [MOO08].	[MOO08], [LUF07]
[MOS03]	Polygoneffekterregte (Quer)schwingungen von Ketten	2003	einsträngiger Rundstahlkettenzug	Modellbildung und Simulation	erste Grundlagen und Implementierung der Schwingungsberechnung in MATLAB/Simulink, Untersuchung Einfluss der Kettenquerschwingung (gering!).	
[OSE03]	Ausgleichsgetriebe	2003	Rundstahlkettentrieb	Unrundgetriebe f. ungleichförmige Winkelgeschwindigk.	Ausgleich des Polygoneffekts durch veränderliche Winkelgeschwindigkeit der Nuss prop. zum wirksamen Radius	
[LUF07]	Resonanzen am zweisträngigen Kettenzug	2007	zweisträngiger Rundstahlkettenzug	Modellbildung und Simulation	Aufstellen aller Schwingungsgleichungen, Simulation und Szenariorechnungen zum Einfluss Taschenzahl u. Masse auf die Resonanzkettenlängen	[LAN10]
[LAN14]	Resonanzkraftberechnung	2014	einsträngiger Rundstahlkettenzug	Regression	Berechnungsschema für Anfahrstoß- und Resonanzkraft, kritischer Vergleich mit EN 818/7	[EN08]
[MOS07]	Kräfte und Lagen Kette in der Nuss	2007	Rundstahlkettentrieb	Analytik, FEM, Messung	Berechnung kraftabhängige exakten Lage Rundstahlkette in Kettennuss	[SCH06]
[SCH06]	Vermessung Rundstahlketten	2006	Rundstahlkette	Vermessung	Messung der exakten 3D-Geometrie div. Rundstahlkettenchargen	
[LAN13]	Der Polygoneffekt (Rundstahlkette)	2013	Rundstahlkettentrieb	Analytik, MKS, Messung	Beschreibung der Rutsch- und Gleitvorgänge beim Einschwenken Kette in die Nuss, Herleitung exakte Beschreibung der Polygoneffekterregung.	[MOS07]
[LAN15]	neue Kettenradkonstruktionen	2015	Rundstahlkettentrieb	Konstruktion, Analytik, FEM	Vorstellung einer auch in das stehende greifenden Kettennuss	
[LAN09]	Berechnungsschema Resonanzlängenberechnung	2009	einsträngiger Rundstahlkettenzug	Regression und analytische Resonanzlängenberechnung	Berechnungsschema für Resonanzkettenlänge an einsträngigen Kettenzügen	
[LAN04]	Simulation Elektrokettenszug	2004	einsträngiger Rundstahlkettenzug	Modellbildung und Simulation, Messung	vollständige Beschreibung aller möglichen Schwingssysteme mit einsträngigem Kettenzug, Parameterdefinitionen, Messung u. Val.	[MOS03]
[VOL73]	Ersatzmodelle für Krankonstruktionen	1973	Brückenkran	Modellierung Schwingssystem Brückenkran, Messung	Modellbeschreibung mit Gleichungen.	

Lit.	Thema	Jahr	Hauptobjekte	Methoden	Erkenntnisse	Bezug
[SCH03]	Ersatzmodelle für Krankonstruktionen	2003	Brückenkran, Seiltrieb	Modellbildung, Messung	Einfaches Minimalmodell genügt zur Schwingungsbeschreibung bei Seiltrieben an Brückenkranen	
[DÖR94]	Kinematik Rollkettenrieb	1994	Rollkettentrieb	Modellbildung	Einfluss einer Kettenführung – Analogie für Rundstahlkette.	
[RAP01]	Failure of hoisting chain	2001	Rundstahlkette	FEM	Versagensmodell für Rundstahlketten zufolge Pittings	
[GLÜ93]	Seminar „Bergbauketten“ - RWTH	1993	Rundstahlkette und -trieb (Bergbaudim.)	diverse	Beschreibung System Kette-Rad, Kettenausfall.	

Tabelle 2: Übersicht Kettentriebsforschung

3.2.2 Normen und Standards – Kurzkomentar

Es existieren zwei Normenwerke bzw. Sammlungen, die der mit der Thematik befasste Leser beachten sollte – Details dazu finden sich in Abschnitt 6.3:

- DIN Taschenbuch 392: Rundstahlketten. [DIN10]
- EN 818/7: Kurzgliedrige Rundstahlketten für Hebezwecke; Sicherheit; Teil 7: Feintolerierte Rundstahlketten für Hebezeuge, Güteklasse T (Ausführung T, DAT und DT) [EN08]

Während das Taschenbuch alle Kettenarten und kettenähnlichen Teile (Anschlagmittel usw.) zusammenfasst und auch die EN 818/7 beinhaltet, geht jene als einzige Norm auf die Dynamik im Kettentrieb ein. Dort werden einige Faktoren für den Anfahrstoß und mögliche dynamische Überhöhungen definiert, die aber nur (ohne Angabe von Gültigkeiten) sehr bescheiden die reale Situation treffen. Details dazu sind in [LAN14] ausführlich festgehalten.

3.3 Lösungsmöglichkeiten - erste Erfolge

Der praktisch orientierte Leser wird nach dem Studium dieses Textes spätestens hier die Frage aufwerfen, wie er die dargestellten Erkenntnisse für sich einsetzen kann. Es gilt ja, folgende Dimensionierungsaufgabe zum sicheren Betrieb eines Kettenzuges zu lösen:

- Vermeidung von Resonanzdurchfahrten und einem Aufschwingen dabei.
- Beschränkung der maximalen Kettenkraft auf ein Minimum, jedenfalls kleiner als der Anfahrstoß.

3.3.1 Resonanzkettenlängenbestimmung und Resonanzkraftbestimmung.

Zur Lösung der oben angegebenen beiden Hauptaufgaben stehen einige Parameter zur Variation des Systems zur Verfügung. Es kann verändert werden:

- Anschlagmittel: macht das Gesamtsystem stets weicher
- Aufhängung, Kranträger, ...: macht das Gesamtsystem stets weicher
- Kettenzug:
Wenn man nicht einen eigenen Kettenzug bauen will, ist aus den Herstellerprogrammen sinngemäß auszuwählen. Wenn man berücksichtigt, dass die Erregerfrequenz ein n -Vielfaches des Quotienten aus Hubgeschwindigkeit und zweifacher Kettenteilung t_k ist, lässt sich ebendiese durch Geschwindigkeitsänderung oder die Verwendung einer anderen Kettendimension (bspw. kleiner und dafür zweisträngig) beeinflussen [LAN10].

Für eine exakte Berechnung ist die Kenntnis folgender Parameter nötig:

- Motor: Nennmoment und –drehzahl, Synchrondrehzahl
- Kette: Kettenmasse (spezifisch), Kettenteilung, Kettenfedersteifigkeit (ggf. mit [BEL11] zu ermitteln)
- Aufhängung (Kran): Masse und Steifigkeit (ggf. mit [SCH03] oder allg. mit [HOL94] zu ermitteln)
- Anschlagmittel: Steifigkeit (ggf. aus dem Datenblatt)
- Kettenrad: Taschenzahl
- Hublast
- Gesamtgetriebeübersetzung
- Gesamtwirkungsgrad

Für die Berechnung der Resonanzkettenlängen sei auf die Literatur [LAN09] verwiesen, eine erneute Darstellung hier wäre zu umfangreich. Besonders hervorgehoben sei, dass beide Berechnungsschemen derart gestaltet sind, dass keinerlei höhere Mathematik bzw. Numerik zu deren Lösung verwendet werden muss.⁴ Beide vorgestellten Berechnungsschemen sind Ergebnis umfangreicher Regressionsanalysen an den virtuellen Modellen der Schwingsysteme. Ihre Gültigkeit ist in den angegebenen Grenzen bewiesen, darüber hinaus ist in Kapitel 4 noch zu sprechen.

3.3.2 Programm „ResKet“

Prototypisch wurde eine Software erstellt [MOO08], die die vorgestellten Berechnungsschemen aus [LAN14] und [LAN09] bedienerfreundlich umsetzt und bei der Parameterspezifikation unterstützt. Abbildung 12 zeigt die zugehörige Ausgabemaske mit den spezifizierten Parametern und Abbildung 13 die Vergleichsfunktion des Programms, zur Identifizierung der Einflüsse der Parameter bzw. der unterschiedlichen Modell-Setups (s. Kap. 3.3.1).

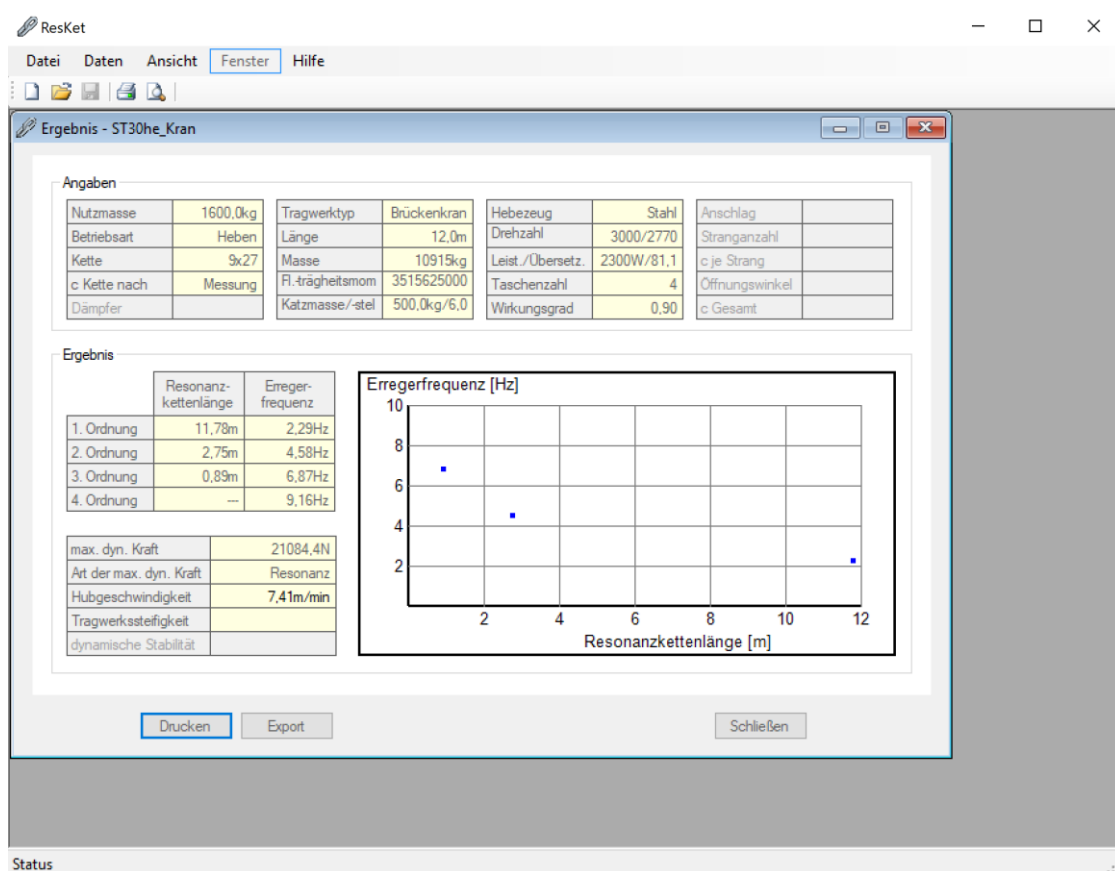


Abbildung 12: Ausgabemaske des Programms „ResKet“

⁴ Kap. 3.1 führt ein wenig in die dahinterliegende Modellbildung und die entstehenden Differentialgleichungssysteme ein.

Angaben

Bezeichnung	Stahl_MiMo	Stahl_Aufh	Stahl_Augh_Ans...	Stahl_Anschl	StahlSe
Datum	30.06.2009, 16:1...	30.06.2009, 16:1...	30.06.2009, 16:2...	30.06.2009, 16:2...	30.06.2009, 16:2...
Nutzmasse	1666,0kg	1666,0kg	1666,0kg	1666,0kg	1666,0kg
Betriebsart	Heben	Heben	Heben	Heben	Senken
Kette	9x27	9x27	9x27	9x27	9x27
c Kette nach	Parameter	Parameter	Parameter	Parameter	Parameter
Dämpfer					
Tragwerkbezeichnung		Halle	Halle		
Tragwerktyp		Brückenkran	Brückenkran		
Länge		12,00m	12,00m		
Masse		10914,9kg	10914,9kg		
Flächenträgheitsmom.		3515625000mm ⁴	3515625000mm ⁴		
Katzmasse/-stellung		500,0kg/6,0m	500,0kg/6,0m		
Kragträgerlänge		500,0kg/6,0m	500,0kg/6,0m		
log. Dekrement					
Hebezeugbezeich.	Stahl	Stahl	Stahl	Stahl	Stahl
Drehzahl nenn/sync	2770,0/3000,0	2770,0/3000,0	2770,0/3000,0	2770,0/3000,0	2770,0/3000,0
Leistung/Übersetzung	2300W/81,1	2300W/81,1	2300W/81,1	2300W/81,1	2300W/81,1
Taschenzahl	4	4	4	4	4
Wirkungsgrad	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Stranganzahl	1	1	1	1	1
Anschlag			Anschlag Diss.	Anschlag Diss.	
Stranganzahl			1	1	
c je Strang			7110000,0N/m	7110000,0N/m	
Öffnungswinkel			0,0°	0,0°	
c Gesamt			7110000,0N/m	7110000,0N/m	

Ergebnis

Ordnung						
Resonanzkettenlänge	1.	12,20m	11,97m	11,31m	11,55m	10,70m
	2.	3,08m	2,78m	2,13m	2,42m	2,70m
	3.	1,37m	0,90m	0,24m	0,71m	1,20m
	4.	0,77m			0,11m	0,68m
Erregerfrequenz	1.	2,28Hz	2,28Hz	2,28Hz	2,28Hz	2,62Hz
	2.	4,56Hz	4,56Hz	4,56Hz	4,56Hz	5,23Hz
	3.	6,84Hz	6,84Hz	6,85Hz	6,84Hz	7,84Hz
	4.	9,13Hz	9,13Hz	9,13Hz	9,13Hz	10,46Hz
Art der max. dyn. Kraft		Resonanz	Resonanz	Resonanz	Resonanz	Resonanz
max. dyn. Kraft		21660,6N	21660,7N	21660,8N	21660,8N	22036,6N
Hubgeschwindigkeit		7,39m/min	7,39m/min	7,39m/min	7,39m/min	8,47m/min
Tragwerkssteifigkeit			2,10e+007N/m	2,10e+007N/m		
dynamische Stabilität						

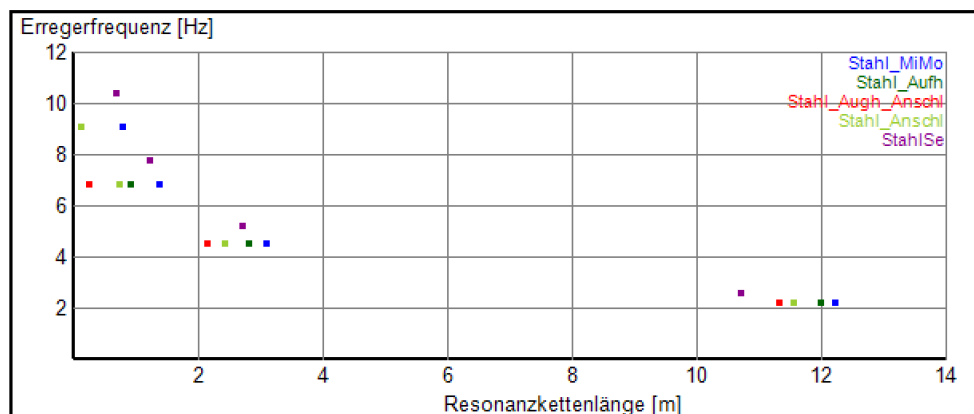


Abbildung 13: Vergleichsfunktion (Parameter- bzw. Modellsensitivität) des Programms „ResKet“

4 Nächste Schritte

Mit der Software „ResKet“ ließe sich also schon vorausschauend beurteilen, welche Probleme – wie in Kap. 2.1 beschrieben – bei einem schwingfähigen Kettenzug-Kransystem zu erwarten sind. Weiterführend im Gesamtvorhaben eines optimierten und schwingungsfreien Betriebs von Kettenzügen sind mittelfristig die folgenden Schritte vorgesehen, wofür die Autoren um interessierte Mitstreiter zu werben versuchen:

1. Berechnungsqualitätssicherung und Betrachtungsraumerweiterung der Simulationsmodelle (v.a. um schwingfähige Kranstrukturen) als Basis hinter „ResKet“
2. Nutzbarmachung der Software „ResKet“ (s. Kap. 3.3.2) für kommerziellen/industriellen Einsatz mit den gesicherten Berechnungsqualitäten aus Schritt 1 für den Nutzen in Kap. 4.1
3. Erstellung eines digital twin mit modularer Funktionalität zur teilweisen bzw. gänzlichen Vermeidung des Polygoneffekts⁵ (Forschungscharakter)

Abschließend sei angemerkt, dass alle Schritte nur bei entsprechendem Interesse bzw. Zustandekommens eines Forschungs-/Anwenderkonsortiums weiterverfolgt werden; man möge dazu die Brisanz des Themas, ausgeführt in Kap. 2.1, beachten!

4.1 Zu erwartende Erfolge

Mit den weiterentwickelten und qualitätsgesicherten Modellen ist ein schwingungssicherer bzw. gänzlich schwingungsfreier Betrieb jedes Kettenzug-Kransystems einfach, ohne tiefgreifende Simulationskenntnisse berechenbar und damit real erreichbar. Ansätze, wie das Unrundgetriebe [OSE03] oder ähnlich aufwendige Lösungen (vgl. Anm. 5) sehen die Autoren im low-cost-Bereich des Serienhebezeugs „Kettenzug“ als wenig zielführend. Vielmehr liefert die situationsangepasste, abgestimmte Lösung den gleichen Erfolg bei ungleich geringerem Aufwand.

Für die unterschiedlichen Anwendungsfälle, einer schwingungsoptimierten Auslegung von Kranen mit Kettenzügen ergibt sich für folgende Szenarien der konkrete Nutzen:

- Neuprojektierung:
proaktive Schwingungsvermeidung durch richtige Hebezeug und Kranträgerwahl (Steifigkeiten, Hubgeschwindigkeiten).*
- Retrofit:
Optimierung der Schwingungssituation durch Austausch des Kettezuges bzw. Kranträger (geeignetes Hebezeug).*
- „First-aid“:
Verschiebung der Resonanzen (Resonanzkettenlängen) in unkritische Bereiche durch Serienschaltung von dämpfenden aber v.a. verweichenden Elementen im Kettenstrang (sog. Schwingungsdämpfer zwischen Lasthaken/Umlenkflasche und Last, ggf. auch durch Anschlagmittel).*

* Variantenstudien sind mit ResKet möglich (s. Abb. 13 und die dort nicht dargestellte Datenbank- und Vergleichsfunktion)

Es zeigt sich schlussendlich, dass die erstellten Modelle, mit den avisierten Erweiterungsschritten, zusammen mit der Software „ResKet“ in der Lage sind, jegliche Kettenzug-Kransituation zu

⁵ Erste Ansätze mittels Eingriff in das Verhalten des Antriebsmotors sind aus der Industrie bekannt, wurden allerdings nach derzeitigem Kenntnisstand noch zu keinem Produkt weiterentwickelt.

analysieren und die bestimmenden Parameter so zu variieren, dass eine Resonanz (durch Verschiebung der hellgrauen Bereiche in Abb. 10) vermieden werden kann.

5 Zusammenfassung

Die Autoren haben über eine praktische Hinführung das Thema der resonanten Schwingungen von Kranen und Tragstrukturen mit Kettenzügen beschrieben. Aus den bisher durchgeführten Arbeiten konnte ein einfach zu bedienendes Dimensionierungsprogramm „ResKet“ entwickelt werden, das für jede beliebige Parameterkonfiguration des Kettenzug-Kransystems die interessierenden Größen Resonanzkettenlänge und dortige Maximalkraft ausgibt.

Dadurch können alle Rundstahlkettentriebe schwingungsoptimiert betrieben und gefährliche Situationen aus den Resonanzen vermieden werden. Freilich ist die Software noch nicht kommerziell und sicher einsetzbar, für deren Weiterentwicklung die Autoren mit dem vorliegenden Beitrag zu werben versuchen.

6 Literatur

6.1 Verwendet im Aufsatz

- [LAN10] LANDSCHÜTZER, C.: Schwingungssimulation von Rundstahl-Elektrokettenzügen. Konstruktion 4-2010, Springer-VDI-Verlag 2010, S.59-66
- [OSE82] OSER, J.: Zur Spannungsverteilung und Federsteifigkeit in Rundstahlkettengliedern (I+II). dhf (Deutsche Hebe- und Fördertechnik), Hefte 11/12-82, S. 2933 und 1/2-83, S.39-40
- [MOO08] MOOSHAMMER, L.: Auslegungssoftware für polygoneffekterregte Schwingungen bei Kettenzügen, Diplomarbeit TU Graz, 2008.
- [BEL11] BELETZ, M.: Berechnung der Federsteifigkeit von Rundstahlketten, Diplomarbeit TU Graz, 2011.
- [ZOP14] ZOPF, P.: Analyse und Softwareimplementierung zur Bestimmung von Resonanzkettenlängen (aus Schwingungsvorgängen) an zweisträngigen Elektrokettenzügen, Diplomarbeit TU Graz, 2014.
- [MOS03] MOSER, C.: Simulation von polygoneffekterregten Schwingungen, Diplomarbeit TU Graz, 2003.
- [OSE03] EP 1227056B1: OSER, J.: Kettentrieb mit einem polygonalen Kettenrad, 2003.
- [LUF07] LUFTENSTEINER, W.: Modelltechnische Abbildung und Simulation eines zweisträngigen Elektrokettenzuges, Diplomarbeit TU Graz, 2007.
- [LAN14] LANDSCHÜTZER, C. : Dynamische Lasten beim Betrieb eines Kettenzuges - eine neue Auslegungsberechnung im Vergleich zur EN 818/7. Krane in Materialflusstechnik und Logistik. Internationale Kranfachtagung in Magdeburg, S. 201 – 215 , selbst 2014, S.201-215
- [MOS07] MOSER, C.: Kraftübertragung an Hebezeugkettentrieben, Dissertation TU Graz, 2007.

-
- [SCH06] SCHALK, M.: Messung und Auswertung geometrischer Größen hochfester Hebezeugkettenglieder, Diplomarbeit TU Graz, 2006.
- [LAN13] LANDSCHÜTZER, C.: Der Polygoneffekt bei Rundstahlkettentrieben. 21. Kranfachtagung (2012), S. 21 – 35, Internationale Kranfachtagung 2013; Bochum.
- [LAN15] LANDSCHÜTZER, C.; WEINGÄRTNER, J.; WOLFSCHNLUCKNER, A.: Leistungssteigerung an Rundstahlkettenzügen. Internationale Kranfachtagung, Selbstverlag TU Dresden 2015, S.87-106
- [LAN09] LANDSCHÜTZER, C.: A new way to calculate for chain lengths with maximal dynamic forces at electric chain hoists. Proceedings of the XIX International Triennial Conference on Material Handling, Constructions and Logistics MHCL'09, 2009, S.79-84
- [LAN04] LANDSCHÜTZER, C.: Analyse von Schwingungen an einsträngigen Elektrokettenzügen, Dissertation TU Graz, 2004.
- [VOL73] VOLLING, K.: Schwingungsverhalten von Brückenkränen, fördern und heben 23 (1973), S.369-378
- [SCH03] SCHRÖDER, E.: Einfache Modellbildung von Hubwerksystemen, Hebezeuge und Fördermittel 43 (2003), S.524-526
- [DÖR94] DÖRSAM, E.: Kinematische Untersuchungen an Rollenkettentrieben mit Kettenführungen, Dissertation TH Darmstadt, 1994.
- [RAP01] RAPHAEL, J.J.; BOULET, J.A.M.: Modeling the Failure of Hoisting Load Chain, Practical Failure Analysis 1(2) 2001, S.59-68.
- [GLÜ93] GLÜCKAUF-Sammelband: Themenheft Förderung und Transport, 129. Jahrgang (1993).
- [EN08] EN 818/7: Kurzgliedrige Rundstahlketten für Hebezwecke; Sicherheit; Teil 7: Feintolerierte Rundstahlketten für Hebezeuge, Güteklasse T (Ausführung T, DAT und DT), Juli 2008.
- [DIN10] DIN-Taschenbuch 392: Rundstahlketten, Beuth-Verlag, 2010
- [AGR56] AGRICOLA, G.: De re metallica, 1556, Zugriff am 19.12.2018 auf <https://www.ncm.org.uk/downloads/8/deremetallica50agri.pdf>
- [POL94] POHLHAUSEN, A.: Ber. u. Konstr. d. wichtigsten Last-Hebemaschinen. Mittweida, Schulze, 1894.
- [WIK18] WIKIPEDIA „POLYGONEFFEKT“: Zugriff am 19.12.2018.
- [MAR08] MARTIN, H.; RÖMISCH, P.; WEIDLICH, A.: Materialflusstechnik - Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen der Fördertechnik, Springer Vieweg, 2008.
- [DIR18] PORTAL DIRECTINDUSTRY: Suchanfrage „Kettenzug“ am 19.12.2018 über <http://www.directindustry.de/industrie-hersteller/kettenzug-133486.html>
- [STA18] PORTAL STATISTA: Abfrage Wirtschaftsdaten Intralogistik und Fördertechnik am 18.12.2019 über <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/235983/umfrage/umsatz-der-foerdertechnik-in-deutschland/>

- [MER18] NACHRICHTENPORTAL Merkur: Zugriff am 14.9.2018 auf <http://Merkur.de>
- [LAN17] LANDSCHÜTZER, C.; KNÖDL, M.: Vorlesung Materialflusstechnik an der TU Graz, 2017.
- [HOL94] HOLZWEIßIG, F.; DRESIG, H.: Lehrbuch der Maschinendynamik. Leipzig, Köln: Fachbuchverlag Leipzig – Köln, 1994.
- [MAS06] RICHTLINIE 2006/42/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG
- [DIN14] DIN EN 13001-2: Kransicherheit - Konstruktion allgemein - Teil 2: Lasteinwirkungen; Deutsche Fassung EN 13001-2:2014
- [DIN11] DIN EN 15011: Krane - Brücken- und Portalkrane; Deutsche Fassung EN 15011:2011+A1:2014

6.2 Überblick weiterführende Aufsätze im Gesamtumfeld „Rundstahlkette“

Dank für die Verwendung dieser Aufstellung in Tabelle 3 geht an meinem geschätzten Ex-Kollegen Dr. Christian Moser.

Autor	Titel	Erscheinungsort, -jahr - Quelle
anonym	Die deutsche Rundstahlkette	Draht 37 (1986) 10
anonym	Für jeden Einsatz die richtige Kette	Technik Ausgabe 21, Supplement zu Werkstoffe 6/1976
Bitsch H.	Asymptotisches Optimum	KEM 1990, Juli
Blatz Rolf	Die deutsche Rundstahlkette	Draht 35 (1984) 5
Dengler Konrad	High-tech-Rundstahlketten	Transfil Europe, Nr. 39, März 1997
Dietz Peter, Rothe Frank	Rechnerische Ansätze zum Beanspruchungsverhalten von Ketten und symmetrischen Tragmitteln	fördern und heben 45 (1995) Nr. 11
Dietz Peter, Rothe Frank	Beanspruchungsverhalten und Optimierung von Ketten und symmetrischen Tragmitteln	fördern und heben 46 (1996) Nr. 4
Dolipski Marian	Untersuchungen an Gleitvorgängen von Rundstahlkettengliedern im Antriebsaschenrad	dhf 11/94
Drescher Thomas	Untersuchungen zur Entwicklung einer neuen Kette für die Übertragung hoher Zugkräfte und großer Antriebsleistungen	Dissertation TH Aachen, 1991
Eglseer Robert, Belyaev Alexander K.	Instabilitätsbereiche eines Kettentriebs	antriebstechnik 36 Nr. 11, 1997
Fasel Astrid	Grundsatzuntersuchungen an Kettentrieben zur Steigerung der übertragbaren Leistung	Dissertation TH Aachen 1998
Grotenhöfer Heinrich	Ergebnisse von Untersuchungen zur geometrischen Form hochfester Rundstahlketten	Glückauf-Forschungshefte 38 (1977) H. 4
Grotenhöfer Heinrich	Verfahren zur Ermittlung der geometrischen Form der Kettensterntaschen für hochfeste Rundstahlketten	Glückauf-Forschungshefte 39 (1978) H. 5
Grotenhöfer Heinrich	Untersuchung der geometrischen Größen von Ketten und Kettensternen sowie deren Einfluss auf das Laufverhalten bei Rundstahlkettentrieben für den Bergbau	Dissertation TH Aachen, 1978
Götte Elmar	Untersuchungen zur Verbesserung des Lauf- und Verschleißverhaltens von außengreifenden Kettenrädern für Rundstahlgliederketten im Bergbau	Dissertation TU Clausthal, 1979
Herkenrath Karl	Kostenreduzierung bei Förderanlagen durch selbstjustierendes Kettenrad	antriebstechnik 38 Nr. 6, 1999
Herkenrath Karl	Verschleißminderung in Fördersystemen, Energie- und Kostenreduzierung mit selbsteinstellendem Kettenrad	dhf 6/99

Hirt Peter	Kräfte und Bewegungen zwischen Kettenbuchse und Zahnflanke an Laschenkettten von Stahlgliederbändern	fördern und heben 21, 1971
Koch M., Schmidt A.	Tragfähigkeitsversuche an kurzgliedrigen Rundstahlketten	Hebezeuge und Fördermittel 18 (1978) 11
Koster Karl H.	Zur Auslegung von Kettenbecherwerken	Schüttgut 1 Nr. 2, 1995
Kostorz E.	Neue Antriebs-Kettensterne für Strebförderer	Glückauf 115 (1979) Nr. 7
Kupfersberger Karlhans	Über die Normung von Rundstahlketten	Draht 31 (1980) 1
Maier H. G.	Hochleistungsbecherwerke mit Rundstahlkette als Zugelement	Zement-Kalk-Gips Nr. 8/1992 (45. Jahrgang)
Mattheck C., Burkhardt S., Schulze H.-D.	Struktur- und Versagensanalyse eines Kettengliedes aus dem Bergbau – Vorschlag eines neuen Kettenglied-Designs	Der Maschinenschaden 59 (1986) Heft 5
Mehta Kewal K.	Vergleichende Sprödbbruchuntersuchungen an den Kettenstählen 20NiCrMo2 (SAE 8620), SAE 4620, 23MnNiCrMo52 und 23 MnNiCrMo 6 4	Thyssen Edelstahl, Technische Berichte, 4. Band 1978 Heft 1
Mehta Kewal K.	Vergleichende Sprödbbruchuntersuchungen an 18mm hochfesten Rundstahlketten aus 23 MnB 6 und 23 MnNiCrMo 6 4	Thyssen Edelstahl, Technische Berichte, 10. Band 1984 Heft 1
Merzkirch Klaus H.	Wissenswertes über die Rundstahlkette – Historie, Herstellung, Verwendung	dhf 1/2-87
Merzkirch Klaus H.	Entwicklung der Formeln zur Berechnung von Ketten und Gehängen zum Heben und Bewegen von Lasten	dhf 3/87
Metz H.	Rundgliederketten	Draht 30 (1979) 2
Moschik Erich	Kapitel 5: Verbesserung des tribologischen Verhaltens von Hebezeugketten, aus: Beiträge zur Verbesserung des mechanischen Verhaltens von hochfesten Rundgliederketten	Dissertation TU Graz 1988
Oechsle D.	Ein Beitrag zur Spannungsermittlung in Rundstahlkettengliedern	Konstruktion 28, 1976
Pfeiffer F.	Ketten in Antrieben	VDI Berichte Nr. 1416, 1998
Philipp Günther Bernhard	Die Rundstahlkette als Element der Leistungsübertragung bei Förderern im Strebbau	Dissertation TH Aachen, 1999
Plöchl M.	Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten von Rundstahlketten	Industrie-Anzeiger 98. Jg. Nr. 1 v. 7.1.1976
Remmel J., Hirschhain A.	Bauteilprüfung mit dem Ermüdungssystem am Beispiel von Rundstahlketten	Konferenz-Einzelbericht: Werkstoffprüfung 1983, DVM-DGM-VDEh-Tagung
Rieckhof Jürgen	Spannungsverteilung in Rundstahlkettengliedern bei Zugbelastung	Glückauf-Forschungshefte 39 (1978) H. 5
Rieckhof Jürgen	Spannungen in Rundstahlkettengliedern beim Lauf über den Kettenstern	Glückauf-Forschungshefte 39 (1978) H. 6
Rix Peter F.	Das Zusammenwirken von Ketten und Kettenrädern	Glückauf 129 (1993) Nr. 6
Rix Peter F.	Verschleiß in den Gelenken von Rundstahlketten bei hohen Zugkräften	Glückauf 129 Nr. 6, 1993
Rothe Frank	Spielbehaftete Laschenverbindungen bei quasistatischer Belastung unter Berücksichtigung nichtlinearer Randbedingungen	Dissertation TU Clausthal, 1994
Schaefer Wilhelm	Das Zusammenarbeiten von Kette und Kettenstern	Glückauf-Forschungshefte 36, 1975
Schaefer Wilhelm	Die Lage von Rundstahlketten in Kettensternen	Glückauf-Forschungshefte 37 (1976) H.2
Schaefer Wilhelm	Die Abstände der Kettenglieder von Rundstahlketten von der Drehachse der Kettensterne	Glückauf-Forschungshefte Dezember 37 (1976) H. 6
Schaefer Wilhelm	Der Einfluß von Toleranzen auf die Abmessungen der Kettensterne	Glückauf-Forschungshefte 39 (1978) H. 1
Schaefer Wilhelm	Lage und Beanspruchung kurzer Kettenglieder im Kettenstern	Glückauf-Forschungshefte 39 (1978) H. 4
Schaefer Wilhelm	Die Lage langer Kettenglieder im Kettenstern	Glückauf-Forschungshefte 40 (1979) H. 4
Schaefer Wilhelm	Zugbeanspruchung langer Kettenglieder im Kettenstern	Glückauf-Forschungshefte 41 (1980) H. 3
Sebulke J.	Theoretische und experimentelle Ermittlung der Feder-konstante von Rundstahlketten	fördern und heben, 2, 105-108

Schmiesing Walter	Anhaltswerte zum Entwurf senkrechter Ketten- und Gurtbecherwerke	fördern und heben 25 (1975) Nr. 5
Sidan Heribert, Woutselas Aristophanis	Festigkeitssteigerung und Versprödung von hitzebeständigen ferritischen und ferritisch-austenitischen Stählen durch thermische Beanspruchung und Möglichkeiten zur Regenerierung	Archiv für das Eisenhüttenwesen 53 (1982) Nr. 11
Sinz R., Schick M., Dalferth H.	Die Hebezeugkette – Kriterien für die Betriebssicherheit eines komplex beanspruchten Bauteils	dhf 6/96 und dhf 7/8-96
Sommer Jürgen	Untersuchungen zur Kraftübertragung von außengreifenden Kettenrädern auf die Rundstahlkette	Dissertation TH Aachen, 1988
Spies K., Sommer J., Drescher T., Koß Rudolf	Wechselwirkungen zwischen Rundstahlketten und außengreifenden Taschenrädern	Glückauf-Forschungshefte 49 (1988) Nr. 3
Spies Klaus	Leistungsübertragung mit Rundstahlketten	Glückauf 129 (1993) Nr. 6
Spies Klaus	Neue Verfahren zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Ketten und Kettenrädern	Glückauf 129 (1993) Nr. 6
Stoppler Waldemar, Wink Hans-Jürgen	Messung und Auswertung der dynamischen Beanspruchung von Rundstahlketten in Senkrecht-Förderanlagen	Fortschrittberichte der VDI Zeitschriften * Band 13 (1981) 20
Strümpfel H.	Zwei Getriebe zur Minderung des Polygoneffekts bei Kettengetrieben	Konstruktion 39 H. 11, 1987
Thiele A.	Die hochfeste Rundstahlkette – Entwicklung und Einsatzmöglichkeiten	Technik Report November 1974
Uhr Michael	Untersuchungen zur Verbesserung des Zusammenwirkens von Kette und Kettenrad	Glückauf 129 (1993) Nr. 6
Walenta Gerhard	Problemlösungsansätze bei der Produktion von hochverschleißfesten Hebezeugketten	Dissertation MU Leoben, 1992
Werbicky Peter	Berechnung und Gestaltung von Rundstahlkettennüssen	fördern und heben 21, 1971
Werbicky Peter	Umlenkräder für Rundstahlkettenzüge	fördern und heben 22, 1972
Werbicky Peter	Haspelräder für störungsfreien Kettenumlauf	fördern und heben 23, 1973

Tabelle 3: Überblick „Kettenforschung“

6.3 Normenübersicht

Aus [DIN10] sei ein Überblick über die in Rundstahlkettentrieben relevanten Kettentypen und Ihre Normen hier ergänzend mit Abbildung 13 zu Kap. 3.2.2 gegeben.

2 Ketten, geprüft, lehrenhaltig (feintoleriert)		
DIN 762-1	1992-09	Rundstahlketten für Stetigförderer – Güteklasse 2, lehrenhaltig, Teilung 5d, geprüft
DIN 762-2	1992-09	Rundstahlketten für Stetigförderer – Güteklasse 3, lehrenhaltig, Teilung 5d, geprüft
DIN 764-1	1992-09	Rundstahlketten für Stetigförderer – Güteklasse 2, lehrenhaltig, Teilung 3,5d, geprüft
DIN 764-2	1992-09	Rundstahlketten für Stetigförderer – Güteklasse 3, lehrenhaltig, Teilung 3,5d, geprüft
DIN 766	1986-01	Rundstahlketten – Güteklasse 3, lehrenhaltig, geprüft
DIN 5684-1	1984-05	Rundstahlketten für Hebezeuge – Güteklasse 5, lehrenhaltig, geprüft
DIN 5684-2	1984-05	Rundstahlketten für Hebezeuge – Güteklasse 6, lehrenhaltig, geprüft
DIN 5698-1	2001-10	Rundstahlketten – Rundstahlketten für Stetigförderer – Teil 1: Güteklasse 2, einsatzgehärtet
DIN 32895	1992-09	Rundstahlketten für Ladewagen und Dungstreuer, lehrenhaltig, geprüft
DIN 82056	2006-01	Rundstahlketten – Hangerketten
DIN EN 818-7	2002-09	Kurzgliebrige Rundstahlketten für Hebezwecke – Sicherheit – Teil 7: Feintolerierte Hebezeugketten, Güteklasse T (Ausführung T, DAT und DT); Deutsche Fassung EN 818-7:2002
PAS 1061	2006-04	Rundstahlketten für Anschlagketten, Güteklasse 10

Abbildung 14: DIN Taschenbuch 392 [DIN10] „Ketten, geprüft, lehrenhaltig“ – für Hebezeuge