

Dezentrales Steuerungskonzept für antreibende Tragrollen

Distributed Control Concept for Drive Roller

Lars Bindszus
Daniel Hötte
Ludger Overmeyer

Institut für Transport- und Automatisierungstechnik
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

In diesem Beitrag wird ein Steuerungskonzept für antreibende Tragrollen als neuartige Zwischenantriebe für Gurtförderanlagen im Bereich des Berg- und Tagebaus vorgestellt. Die Steuerung erfolgt auf zwei Hierarchieebenen über ein dezentrales Optimierungsmodell, welches die notwendigen Steuerungsparameter für den Betrieb der antreibenden Tragrollen ermittelt. Das Optimierungsmodell entsteht auf der Grundlage des experimentell untersuchten Kraftübertragungsverhaltens von antreibenden Tragrollen und wurde hinsichtlich einer schnellen und vor allem antriebsanzahlunabhängigen Anwendbarkeit weiterentwickelt.

[Antreibende Tragrollen, dezentrale Optimierung, Zwischenantriebe, Gurtförderanlagen, Lagrange-Optimierung]

This paper presents a distributed control concept for drive roller as a novel approach for intermediate drives for belt conveyor systems in the field of mining. The control is based on a two-level, distributed optimization model which determines necessary control parameters for the operation of driven idlers. Experimentally investigated power transmission behavior of drive roller is used as an input for the distributed optimization model. The main target of the used model is a rapid solution finding irrespective of the number of drive roller.

[Drive roller, distributed optimization, intermediate drives, belt conveyor systems, Lagrange optimization]

1 EINLEITUNG

Weltweit werden Gurtförderanlagen im Bereich des Berg- und Tagebaus eingesetzt, weil sie sich deutlich auf Grund ihrer hohen, kontinuierlichen Förderleistung sowie ihrer hohen Verfügbarkeit von diskontinuierlichem Materialtransport absetzen [LIE94]. In den vergangenen Jahrzehnten wurden große Entwicklungsschritte sowohl im Bereich der Antriebe als auch im Bereich der Gurttechnologien erzielt [ALS04]. Hierdurch sind Gurtlän-

gen von knapp 35 Kilometern [PHO18a] und Förderleistungen von 40.000 Tonnen pro Stunde aktuell realisierbar [PHO18b]. Aber trotz der erreichten Förderdistanzen und -leistungen sind sämtliche Anlagen durch ihre Bewegungswiderstände und die daraus resultierenden Gurtzugkräfte limitiert [PFE77]. Bei konventionellen Kopfantrieben werden die gesamten Bewegungswiderstände lokal am Kopf der Anlage durch die, über die Antriebstrommel in den Gurt, eingeleitete Antriebskraft überwunden (vgl. Abbildung 1 a). Die Zugfestigkeitsklasse des Gurtes und der Gurtverbindung muss entsprechend der auftretenden Kräfte gewählt werden. Dabei führen höhere Zugfestigkeitsklassen direkt zu höheren Gurtkosten, wobei der Gurt einer Gurtförderanlage mit einem Anteil von rund 40% an den Gesamtkosten die größte Einzelbauteilinvestition darstellt. Durch den unvermeidbaren Verschleiß des Gurtes im Betrieb einer Gurtförderanlage sind die Instandhaltungskosten, zuzüglich der Entsorgungskosten des abgenutzten Gurtes, bei der monetären Bewertung der Gesamtanlage zu berücksichtigen [AND16].

In der Folge von Kosteneffizienzsteigerungen und technischen Limitierungen der Gurtzugfestigkeit wird seit langem der Ansatz verfolgt, die Einleitung der Antriebskraft in den Fördergurt zu dezentralisieren [ALS03]. Hierzu kommen Zwischenantriebe zum Einsatz, welche entweder mittels Treibgurten oder Zwischenantriebstrommeln die Antriebskraft übertragen. Durch die Verwendung von Zwischenantrieben ist es bei der Anlagenauslegung möglich die maximale Gurtzugkraftspitze, welche bei konventionellem Antrieb am Anlagenkopf entsteht, deutlich zu reduzieren. Somit kann bei gleichbleibenden Förderbedingungen die notwendige Gurtzugfestigkeitsklasse durch die Verwendung von Zwischenantrieben reduziert werden.

Der Zwischenantrieb mittels Treibgurten führt zu deutlich größeren Investitionskosten bei der Anlagenerstellung, weil eine oder mehrere kleine Förderanlagen in der eigentlichen Förderanlage benötigt werden. Außerdem wächst der steuerungstechnische Aufwand zur Synchronisation der Gurtgeschwindigkeiten der Förderanlage und der Treibgurtanlage, um eine Relativgeschwindigkeit

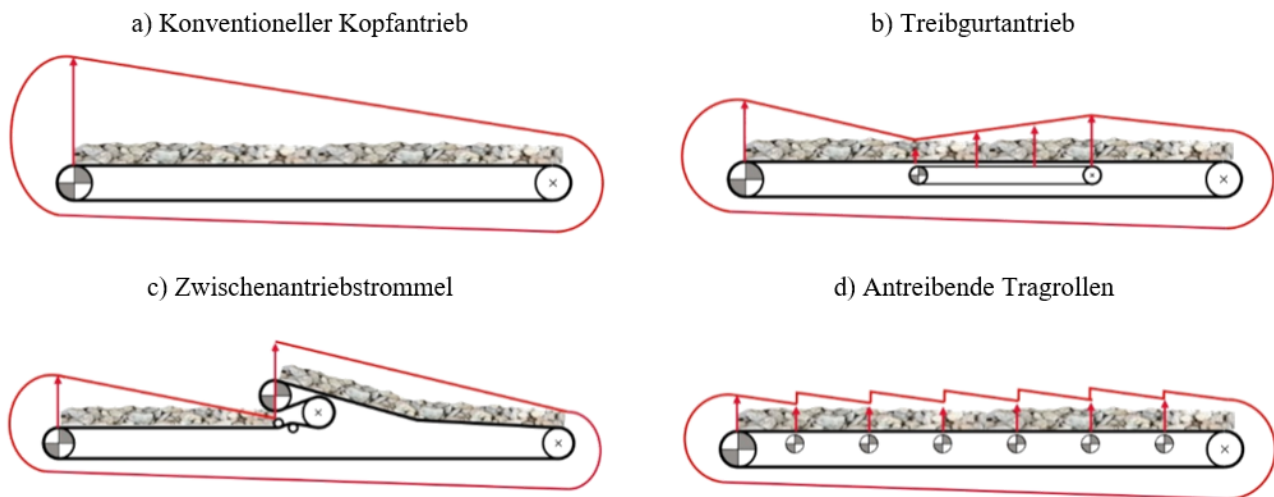


Abbildung 1. Gurtzugspannungen bei verschiedenen Antriebskonzepten

(Schlupf) und somit starken Verschleiß an beiden Gurten zu vermeiden. Wie in Abbildung 1 b dargestellt, kann die Gurtzugspannung der eigentlichen Gurtförderanlage im Bereich des Treibgurttantriebs gleichmäßig durch die eingeleitete Antriebskraft der Treibgurttanlage reduziert werden.

Zusätzliche Antriebe in Form von Zwischentrommelantrieben ähneln in ihrer Realisierung den klassischen Kopfantrieben (vgl. Abbildung 1 c). Um große Umschlingungswinkel und somit größtmögliche Kraftübertragungen zu realisieren ist es, neben der mechanischen Gurtführung mittels Umlenkrollen, notwendig das Fördergut vom Gurt zu trennen. Durch das erneute Aufbringen des Fördergutes steigt der Verschleiß der Gurtdeckplatten und führt zu kürzeren Gurtlebensdauern. Es ist somit zu erkennen, dass die beiden geläufigsten Zwischenantriebsvarianten neben der Reduktion der Gurtzugkräfte auch diverse Nachteile mit sich bringen.

Die Idee der dezentralen Kräfteinleitung zur Reduktion der Gurtzugkräfte ist in dem Forschungsvorhaben „Neuartiges Antriebskonzept für Gurtfördersysteme auf der Basis von direkt angetriebenen Tragrollen“ gefördert durch AIF / IFL konsequent weitergeführt worden. Neben dem Ziel die finanziellen Nachteile von konventionellen Zwischenantrieben zu überwinden, liegt der Hauptfokus vor allem auf der Überwindung der aktuellen technischen Restriktionen. In aktuellen Förderanlagen mit Zwischenantrieben ist die Anzahl dieser und somit die Anzahl der lokalen Gurtzugkraftreduktionen auf einige wenige begrenzt, wobei die lokal eingebrachte Kraft zu einer deutlichen Reduktion der Zugspannung führt. Die Idee der antreibenden Tragrollen hingegen verfolgt den Ansatz, mit einer großen Anzahl an Kräfteinleitungspunkten und einem, im Verhältnis zu konventionellen Zwischenantrieben, kleinen Antriebskraftübertrag die lokal entstehenden Bewegungswiderstände ebenfalls auch lokal abzubauen. Bei einer

entsprechenden Anzahl an antreibenden Tragrollen kann somit neben der Minimierung der Gurtzugfestigkeitsklasse ebenfalls eine Lösung der maximalen Längenrestriktionen erreicht werden. So kann es in der Zukunft möglich sein, Förderdistanzen von mehr als 100 Kilometern, wie beispielsweise in der Phosphatmine bei Bou Craa (Marokko), durch eine einzige Bandanlage zu realisieren und nicht durch die Aneinanderreihung von diversen Einzelanlagen.

2 ANTREIBENDE TRAGROLLEN

2.1 KRAFTÜBERTRAGungsverhalten

Tragrollen in Gurtfördersystemen sind im eigentlichen Sinne ausschließlich zur Formstabilisierung des Fördergurtes sowie der Gurtführung vorgesehen. Bei dem Konzept der antreibenden Tragrolle (engl. drive roller) wird eine konventionelle Tragrolle um einen Elektromotor ergänzt, um dezentral und ohne Veränderung in der Gurtführung eine zusätzliche Antriebskraft in den Gurt einzuleiten. Dies ist schematisch in Abbildung 1 d gezeigt. Im Gegensatz zu konventionellen Kopfantrieben bzw. Zwischenantriebstrommeln erfolgt die reibschlüssige Kraftübertragung nicht durch einen hohen Umschlingungswinkel der Trommel und durch die Vorspannung des Gurtes, sondern durch die Anpresskraft aus Fördergut und Fördergut [HÖT17]. Durch den relativ geringen Kontaktwinkel zwischen antreibender Tragrolle und Fördergurt folgt die Kraftübertragung nicht mehr der Euler-Eytelwein-Formel, welche zur Berechnung von übertragbaren Antriebskräften bei Zwischenantriebstrommeln und Kopfantrieben verwendet wird [ALL76].

In Versuchen am Institut wurde das Kraftübertragungsverhalten von antreibenden Tragrollen hinsichtlich verschiedener technischer und umweltbedingter Parameter untersucht. Als maßgebliche Einflussgrößen haben sich

hierbei, neben dem Durchmesser der antreibenden Tragrolle und ihrer Beschichtung, die Auflast und der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Gurt und antreibender Tragrolle herausgestellt. In Abbildung 2 ist das Kraftübertragungsverhalten für vier exemplarische Auflastsituationen dargestellt. Es ist eindeutig zu erkennen, dass sowohl eine Erhöhung der Auflast als auch eine Erhöhung des relativen Geschwindigkeitsunterschieds zwischen antreibender Tragrolle und Gurt (Erhöhung des Schlupfes) zu einer höheren Kraftübertragung führt. Für die zugrunde liegenden Messungen wurde jeweils die Auflast auf der antreibenden Tragrolle variiert und anschließend durch schrittweise Erhöhung der Motordrehzahl die maximal übertragbare Umfangskraft gemessen [HÖT18].

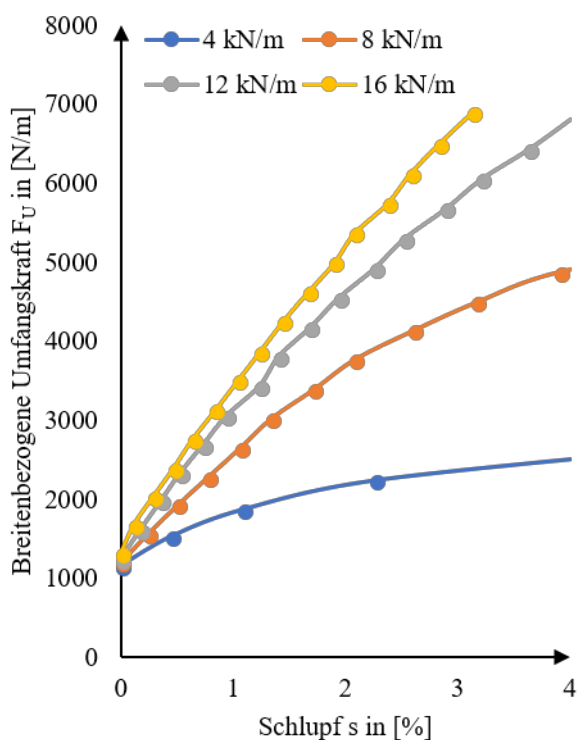


Abbildung 2. Übertragbare Antriebskraft

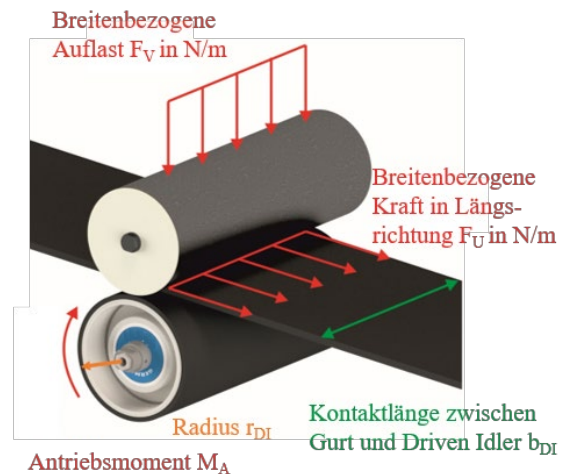


Abbildung 3. Übersicht Kräfte und Momente

Wie in Abbildung 2 deutlich zu erkennen ist, ist die übertragbare Antriebskraft sehr stark abhängig von der Auflast auf der antreibenden Tragrolle. Dadurch, dass bei einer dreiteilig gemuldeten Tragrollenstation etwa 70% der Gewichtskraft aus Gurt und Fördergut auf der mittleren Tragrolle lastet, wurden die Versuche am institutseigenen Prüfstand mit einem nicht gemuldeten Gurt und nur einer antreibenden Tragrolle durchgeführt. Um eine Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse zu gewährleisten, wurden sowohl die Auflast als auch die Umfangskraft in das Verhältnis der tangentialen Kontaktlänge zwischen Tragrolle und Gurt gesetzt.

In Abbildung 3 sind die Auflast und Umfangskraft entsprechend eingezeichnet. Die Durchführung der Messungen erfolgte mit einer Gurtbreite von 495 mm.

2.2 FUNKTIONSEMERGENZ

Die Kraftübertragung bei antreibenden Tragrollen ist von zwei Parametern essentiell abhängig: Auflast auf der antreibenden Tragrolle und der Relativgeschwindigkeit zwischen Gurt und Tragrollenmantel (Schlupf). Der Schlupf ist durch die Motordrehzahl (unter Kenntnis der lokalen Gurteschwindigkeit) direkt im laufenden Betrieb beeinflussbar und berechnet sich entsprechend folgender Formel:

$$s = \frac{v_{Rolle} - v_{Gurt}}{v_{Gurt}} \text{ in } [\%]$$

Wobei die Geschwindigkeit der antreibenden Tragrolle v_{Rolle} abhängig ist von der Drehzahl und dem Durchmesser der Rolle.

Die Auflast kann durch eine Steuerung hingegen nur sehr bedingt beeinflusst werden. Gurtförderanlagen werden in der Regel mit einer hohen Auslastung betrieben, so dass eine aktive Variierung der Auflast zu einer Verände-

rung der avisierten Förderleistung führt. Somit kann im all-
 gemeinen Betrieb von einer konstanten Auflast ausgegan-
 gen werden, welche lediglich in einem gewissen Maße
 durch Unregelmäßigkeiten im Schüttgut schwankt. Zusätz-
 lich zu beachten ist, dass durch mögliche Einbautoleranzen
 der antreibenden Tragrollen, die tatsächliche Auflast auf
 dem Rollenmantel vom Erwartungswert abweichen kann.
 Sowohl eine zu hohe Einbauposition der antreibenden
 Tragrolle im Vergleich zu den benachbarten Tragrollen als
 auch eine Abweichung im Abstand zwischen den Tragrol-
 len führt zu einer höheren Gewichtskraft auf der antreiben-
 den Tragrolle. Eine präzise Erkennung der situations- und
 positionsabhängigen Auflast ist somit für die Steuerung
 nicht kalkulierbar. Zusätzlich zu diesen technischen bzw.
 mechanischen Abweichungen haben Umgebungsbedin-
 gungen wie Feuchtigkeit und Verschmutzung ebenfalls ein-
 en Einfluss auf die Kraftübertragung.

Um die antreibenden Tragrollen derart zu steuern, dass
 die jeweils lokal benötigten Antriebskräfte übertragen wer-
 den, bedarf es folglich zwei Informationen: die lokale Gurt-
 geschwindigkeit zur Einstellung des benötigten Schlupfs
 und die Kenntnis der Kraftübertragungsfunktion.

Die lokale Gurtgeschwindigkeit ist über die gesamte
 Länge der Gurtförderanlage nicht als konstant anzusehen,
 da es auf Grund der viskoelastischen Eigenschaften von
 Gummi und der lokal unterschiedlichen Gurtzugspannun-
 gen zu unterschiedlichen lokalen Längenänderungen im
 Gurt kommt. Durch den anvisierten Arbeitsbereich von we-
 nigen Prozent Schlupf, ist es notwendig, die lokale Gurtge-
 schwindigkeit präzise zu bestimmen. Die Kraftübertra-
 gungsfunktion ist von der Auflast auf der antreibenden
 Tragrolle abhängig und somit individuell für jede antrei-
 bende Tragrolle.

Ein möglicher Lösungsansatz zur Bestimmung der
 notwendigen Parameter ist die Einbringung von entspre-
 chender Messtechnik an jeder antreibenden Tragrolle zur
 Messung der Auflast und der lokalen Gurtgeschwindigkeit.
 Dies würde neben der drastischen Erhöhung der Investiti-
 onskosten ebenfalls zu einem Anstieg der Systemkomple-
 xität führen und sollte somit nach Möglichkeit vermieden
 werden. Die Lösung für dieses Informationsbeschaffungs-
 problem liegt in der Funktionsemergenz, welche die ein-
 zelle antreibende Tragrolle bietet. Der Energie- bzw.
 Kraftbedarf für das Anfahren einer Anlage übersteigt deut-
 lich die notwendigen Antriebskräfte für den kontinuierli-
 chen Betrieb. Folglich sind in einer Gurtförderanlage, wel-
 che über antreibende Tragrollen verfügt immer
 Antriebsreserven vorhanden, welche für den normalen
 Dauerbetrieb nicht benötigt werden. Diese Überkapazität
 kann entsprechend genutzt werden, um die benötigten lo-
 kalen Informationen zu sammeln und darüber hinaus lokal
 zu verteilen. Die antreibenden Tragrollen verfügen somit
 nicht nur über eine Antriebsfunktion, sondern können je
 nach Bedarf die Gurtgeschwindigkeit messen oder die in-
 dividuelle Kraftübertragungsfunktion aktualisieren.

2.3 DEFINITION VON BETRIEBSZUSTÄNDEN

Die Motoren für die antreibenden Tragrollen werden
 mittels Frequenzumrichter gesteuert, wobei eine Drehzahl-
 regelung mit Drehmomentbegrenzung verwendet wird. Die
 antreibende Tragrolle verfügt auf der Grundlage ihrer
 Funktionsemergenz über insgesamt drei Betriebszustände.
 Im ersten Betriebszustand ist die antreibende Tragrolle in
 der Lage die lokale Gurtgeschwindigkeit zu messen.
 Hierzu erfolgt eine deutliche Erhöhung der Soll-Drehzahl
 des Motors bei gleichzeitiger Reduktion des maximal zu-
 lässigen Drehmoments. Die Drehmomentgrenze wird hier-
 bei derart gewählt, dass der Motor lediglich in der Lage ist
 das eigene Trägheitsmoment der antreibenden Tragrolle zu
 überwinden. Hierdurch wird der Fördergurt nicht gebremst
 und ist folglich in der Lage die widerstandsfrei drehbare
 antreibende Tragrolle auf die lokale Gurtgeschwindigkeit
 zu beschleunigen. Durch die anschließende Auswertung
 der Ist-Drehzahl des Motors kann unter Zuhilfenahme des
 Tragrollendurchmessers die lokale Gurtgeschwindigkeit
 bestimmt werden. In Abbildung 4 ist diese Ansteuerung
 des Motors sowohl für die qualitativen Verläufe von Soll-
 und Ist-Drehzahl als auch für das Soll- und Ist-Drehmo-
 ment über die Zeit dargestellt.

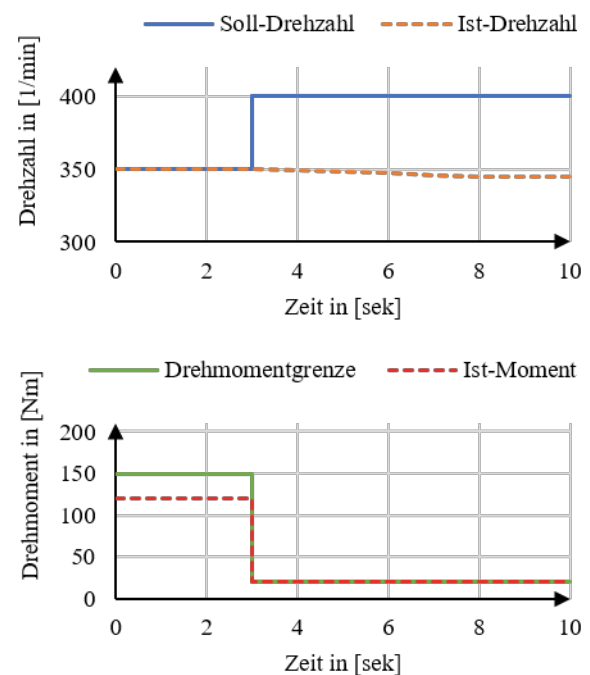


Abbildung 4. Drehzahl und -Moment im Betriebszustand 1

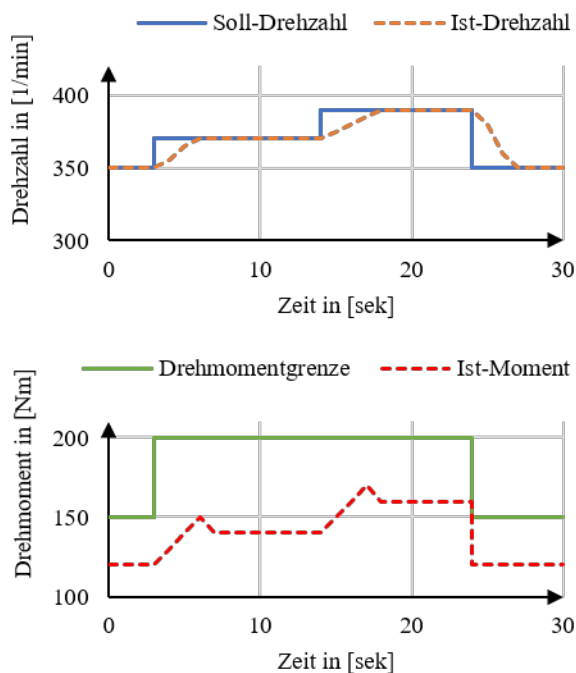


Abbildung 5. Drehzahl und -Moment im Betriebszustand 2

Der zweite Betriebszustand dient zur Bestimmung der individuellen Kraftübertragungsfunktion. Hierbei werden unter der Verwendung der lokalen Gurtgeschwindigkeit spezifische Schlupfwerte angefahren und die übertragbaren Kräfte als Resultat des Ist-Drehmoments bestimmt. In der Abbildung 5 sind die qualitativen Verläufe von Drehzahl und Drehmoment zu erkennen. Die Erhöhung der Soll-Drehzahl erfolgt in Abhängigkeit von der lokalen Gurtgeschwindigkeit, um spezifische Schlupfwerte anzufahren. Die Drehmomentgrenze wird für diesen Betriebszustand deutlich angehoben, damit der Motor in der Lage ist die notwendige Beschleunigung der antreibenden Tragrolle sowie die Erhöhung der Umfangskraft abzubilden. Nach einer kurzen Einschwingzeit kann aus dem neuen Ist-Drehmoment des Motors die übertragbare Antriebskraft in Abhängigkeit des spezifischen Schlupfwertes ermittelt werden.

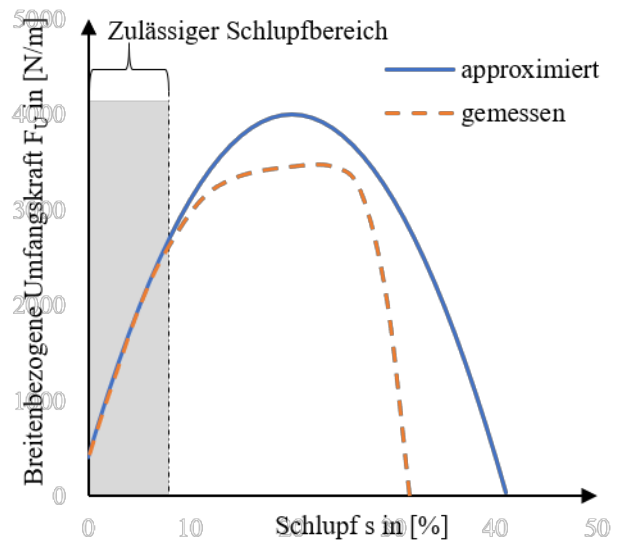


Abbildung 6. Qualitative Darstellung des realen und approximierten Kraftübertragungsverhaltens für gleiche Auflasten

Durch eine anschließende quadratische Approximation der gemessenen Einzelwerte erfolgt die Festlegung der Kraftübertragungsfunktion. In Abbildung 6 sind die qualitativen Darstellungen von realem (gemessenem) Kraftübertragungsverhalten und approximierter Kraftübertragungsfunktion in den Vergleich gesetzt. Es ist zu erkennen, dass für den zulässigen Schlupfbereich eine hohe Übereinstimmung zwischen den beiden Funktionen besteht. Außerhalb dieses Bereichs kann das reale Verhalten nicht mehr durch eine quadratische Approximation beschrieben werden. Eine Übereinstimmung in diesem Bereich ist für die Steuerung nicht zwingend, weil der Schlupf zwischen antreibender Tragrolle und Gurt innerhalb der zulässigen Grenzen gehalten werden soll. Dies dient dazu, den Gurt bzw. die Laufseite des Gurts nicht durch zu hohe Schlupfwerte zu beschädigen und somit dessen Lebensdauer vorzeitig zu reduzieren. Im Gegensatz zum ersten Betriebszustand wird in diesem Zustand weiterhin eine Kraft in den Gurt übertragen. Eine antreibende Tragrolle in diesem Betriebszustand steht somit der Hauptaufgabe, dem Antrieb des Fördergurtes, weiterhin zur Verfügung.

Im dritten Betriebszustand überträgt die antreibende Tragrolle die Antriebskraft in den Gurt. Hierzu wird die Soll-Drehzahl des Motors entsprechend des avisierten Schlupfs eingestellt, welcher auf der Grundlage der Kraftübertragungsfunktion und der Zielantriebskraft bestimmt wurde. In diesem Betriebszustand wird ebenfalls die erwartete und gemessene Antriebskraft verglichen. Im Gegensatz zum zweiten Betriebszustand wird allerdings nur ein Punkt auf der Kraftübertragungsfunktion beobachtet. Dies führt dazu, dass bei einer ausreichend großen Abweichung eine Verschiebung der Kraftübertragungsfunktion entlang der Ordinate erfolgt, wobei die Funktion als solche erhalten bleibt.

Mittels dieser drei Betriebszustände ist die Steuerung der antreibenden Tragrollen in der Lage die notwendigen

Informationen bereitzustellen, die notwendigen Motorparameter zu bestimmen und die anvisierte Antriebskraft in den Gurt einzubringen. Damit das Konzept der antreibenden Tragrolle variabel einsetzbar ist, wird eine dezentrale Steuerungsarchitektur verwendet. Wobei eine antreibende Tragrolle aus den folgenden Einzelkomponenten besteht: Mikroprozessor für dezentrale Steuerung, Frequenzrichter zum definierten Motorbetrieb, Servo-Asynchronmotor, eventuell Getriebe und modifizierte Tragrolle. Hierbei ist es für die Kraftübertragung sowie für die Steuerung irrelevant, ob der Motor extern an die Tragrolle angeschlossen wird oder in diese integriert ist. Dies hat lediglich Auswirkungen auf die Handhabung im Feld und soll an dieser Stelle nicht differenziert betrachtet werden.

2.4 STEUERUNGSHIERARCHIE

Aufgrund der teilweise sehr großen räumlichen Ausdehnung von Gurtfördersystemen und damit der möglichen hohen Anzahl an eingesetzten antreibenden Tragrollen ist es notwendig den Informationsaustausch zwischen den einzelnen dezentralen Steuerungseinheiten (engl. Distributed Control Unit – kurz DCU) zu reglementieren. Wie bereits erläutert, ist die Information über die lokale Gurtgeschwindigkeit von essentieller Bedeutung für eine funktionsfähige Steuerung der antreibenden Tragrollen. Aus dem viskoelastischen Verhalten des Fördergurtes ist es ersichtlich, dass direkt benachbarte antreibende Tragrollen (Abstand von wenigen Metern) mit einer nahezu gleichen lokalen Gurtgeschwindigkeit konfrontiert sind. Wohingegen sich die lokalen Gurtgeschwindigkeiten, global über die gesamte Förderlänge betrachtet, deutlich unterscheiden können. Es bietet sich somit an antreibende Tragrollen, welche eine räumliche Nähe aufweisen, in Nachbarschaften zusammenzufassen. In einem solchen Abschnitt der Gurtför-

deranlage kann die Gurtgeschwindigkeit zur Vereinfachung als konstant angenommen werden. Durch den Normalfall des konstanten Anlagenbetriebs sollen anfahrbedingte Schockwellen im Fördergurt, welche ein starkes Schwingen der lokalen Gurtgeschwindigkeiten erzeugen können, nicht betrachtet werden. Diese nur kurzfristig herbeigeführten Änderungen der lokalen Gurtgeschwindigkeiten sollen durch die antreibenden Tragrollen nicht berücksichtigt werden, weil so die Gefahr eines verstärkten Aufschwingens des Gesamtsystems vermieden wird.

Hierzu werden Nachbarschaften aus mehreren DCUs gebildet, welche gemeinsam und unabhängig von den anderen Nachbarschaften ihre Betriebszustände untereinander verteilen und in optimierter Weise die Krafteinleitung in den Fördergurt realisieren. Durch die Bildung von Nachbarschaften ergibt sich insgesamt eine zweistufige Steuerungshierarchie. In der unteren Stufe kooperieren die einzelnen Steuerungen innerhalb ihrer Nachbarschaften und in der oberen Stufe interagieren die einzelnen Nachbarschaften miteinander [ART15].

In der oberen Hierarchiestufe werden die Soll-Antriebskräfte pro Nachbarschaft verteilt. Hierbei werden vor allem die lokal unterschiedlichen Bewegungswiderstände sowie etwaige Abweichungen der Ist-Antriebskraft einzelner Nachbarschaften von ihrem Soll berücksichtigt. Ziel ist es, die lokal entstehenden Widerstände durch das lokale Einbringen von Antriebskraft zu überwinden, um möglichst kleine Gurtzugspannungen zu erzielen. Sollten die lokalen Bewegungswiderstände nicht vollständig von den lokalen antreibenden Tragrollen überwunden werden können, dann ist es möglich, dass die Differenz zum Soll von den nachfolgenden Nachbarschaften übernommen werden. Die Koordination auf der oberen Hierarchiestufe erfolgt durch eine zentrale Steuerung (engl. Central Control Unit

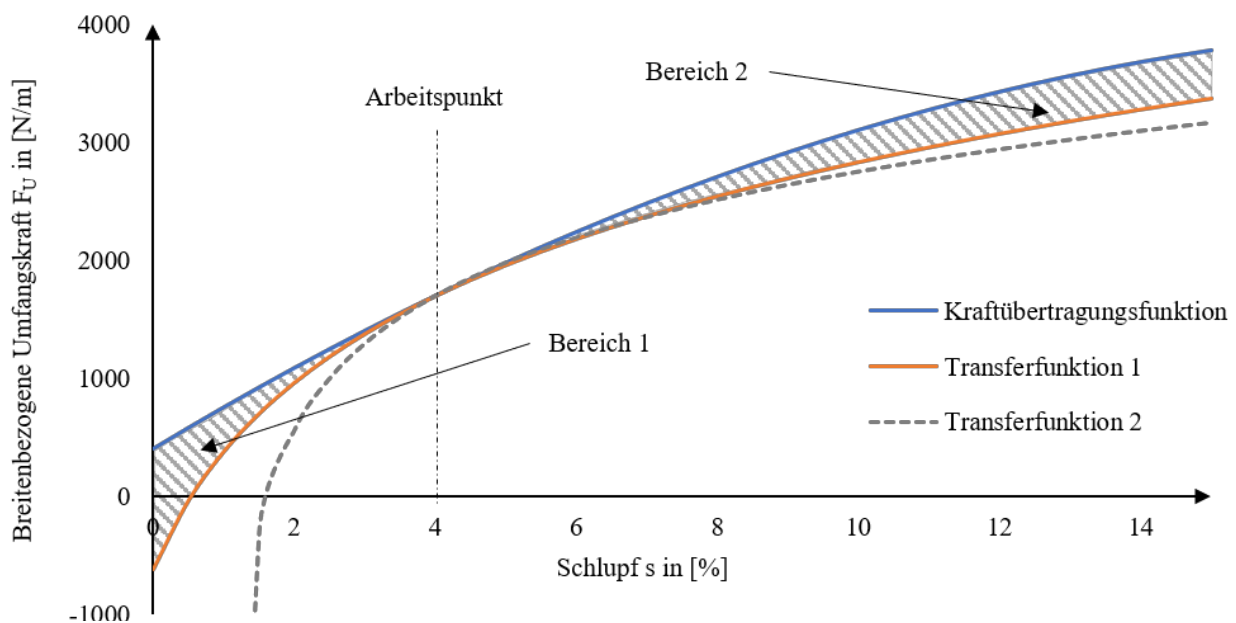


Abbildung 7. Kraftübertragungsfunktion und Transferfunktion im zulässigen Schlupfbereich

– kurz CCU). Die CCU bestimmt aus dem Wissen über die Gurtförderanlage die aktuellen Bewegungswiderstände sowie den zusätzlichen Antriebskraftbedarf um Abweichungen der Ist-Geschwindigkeit am Anlagenkopf zu überwinden. Die Koordination zwischen CCU und den einzelnen Nachbarschaften wird seitens der Nachbarschaften durch einzelne DCUs geregelt, um das Gesamtaufkommen an notwendigen Nachrichten zu reduzieren. Somit existiert in jeder Nachbarschaft eine DCU, welche den Informationsaustausch mit der CCU und den anderen Nachbarschaften durchführt. Diese Aufgabe ist unabhängig vom Betriebszustand der DCU und verbleibt permanent bei der selben DCU. Im Fall eines Ausfalls der koordinierenden DCU kann die Aufgabe innerhalb der Gruppe weitergeleitet werden, um den Ausfall einer gesamten Nachbarschaft zu vermeiden. Ein weiterer Aspekt der Fehlerbehebung ist die konsequente Analyse des Anlagenstatus durch die CCU. Durch die Beobachtung der Anlagenkopfgeschwindigkeit und dem Wissen über die übertragenen Kräfte in den einzelnen Nachbarschaften, kann die CCU im laufenden Betrieb die Berechnung der situationspezifischen Antriebskräfte korrigieren und somit einer schleichenden Erhöhung der Bewegungswiderstände durch bspw. verschlechterte Laufeigenschaften der Tragrollen oder fehlerbehaftete Messergebnisse der Bandwaage kompensieren.

In der zweiten Hierarchiestufe werden die so bestimmten Soll-Antriebskräfte pro Nachbarschaft auf die einzelnen Nachbarschaftsmitglieder verteilt. Hierbei ist es zwingen notwendig, sämtliche Betriebszustände ebenfalls zu verteilen. Exemplarisch soll von einer Nachbarschaftsgröße von zehn antreibenden Tragrollen ausgegangen werden. Von diesen zehn Mitgliedern muss eines die lokale Gurtgeschwindigkeit messen und an die anderen Mitglieder verteilen. Diese Aufgabe muss permanent von einem Mitglied übernommen werden, da die lokale Gurtgeschwindigkeit essentiell für die Steuerung ist. Darüber hinaus werden die Mitglieder im ständigen Wechsel gemäß Betriebszustand 2 ihre Kraftübertragungsfunktion aktualisieren, wobei nicht mehrere antreibende Tragrollen zur gleichen Zeit in diesem Betriebszustand sein dürfen. Somit stehen acht antreibende Tragrollen für den dritten Betriebszustand zur Verfügung. Die Verteilung der Betriebszustände 1 und 3 sowie die antriebsindividuellen Antriebskräfte erfolgt in Abhängigkeit der Kraftübertragungsfunktion. Ziel ist es, die notwendige Soll-Antriebskraft mit einem Minimum an Schlupf zu realisieren. Die Verteilung des Betriebszustands 2 wird hingegen konstant von einem Mitglied zum nächsten weitergereicht, sobald die Messungen abgeschlossen sind. Hierbei wird lediglich berücksichtigt, dass Mitglieder, welche zum aktuellen Zeitpunkt im ersten Betriebszustand sind, übersprungen werden.

3 OPTIMIERUNGSMODELL

3.1 TRANSFERFUNKTION

Das Ziel des Optimierungsmodells ist es die Soll-Antriebskraft für die einzelne Nachbarschaft derart auf die Mitglieder zu verteilen, dass das Einbringen dieser Antriebskraft in Summe mit einem minimierten Gesamtschlupf realisiert wird. Hierfür ist es notwendig, eine Transferfunktion zu definieren, welche neben der Abhängigkeit von der Kraftübertragungsfunktion von weiteren Parametern beeinflussbar ist. Auf Grundlage dieser Transferfunktion erfolgt zum einen die Verteilung der Soll-Antriebskräfte je antreibender Tragrolle. Zum anderen geht diese Funktion auch in die Verteilung der Betriebszustände ein. Die quadratisch approximierten Kraftübertragungsfunktion hat folgendes Aussehen:

$$F_{U,i} = m_i * s_i^2 + n_i * s_i + o_i$$

Diese wird nun in die Transferfunktion mit folgendem Aussehen überführt:

$$T_i(x_i, t_i) = a_{N,i}(t_i) * \ln(x_i + c_i(t_i)) + b_{k,i}(t_i) + b_{N,i}(t_i)$$

Die Überführung der Kraftübertragungsfunktion in eine angepasste logarithmische Funktion führt dazu, dass die Transferfunktion über kein Maximum verfügt und somit ex ante keine maximale Grenze für die Lösung des Optimierungsmodells existiert.

In Abbildung 7 sind die beiden Funktionen (Kraftübertragungsfunktion und Transferfunktion 1) gegenübergestellt. Der eingezeichnete Arbeitspunkt bei einem Schlupf von vier Prozent entspringt der Anlagenauslegung und Antriebsauswahl. Durch die notwendige Anlagenauslegung im Vorfeld der Realisierung wird dieser Arbeitspunkt definiert als jener Punkt, an welchem die antreibenden Tragrollen arbeiten sollen. Entsprechend der Annahme, dass die antreibenden Tragrollen im späteren Dauerbetrieb mit einer entsprechenden Schlupfzahl gefahren werden sollen, ergibt sich dieser Arbeitspunkt als Schnittpunkt zwischen der approximierten Kraftübertragungsfunktion und der Transferfunktion 1. In den, in Abbildung 7 eingezeichneten, Bereichen 1 und 2 erfolgt eine Unterschätzung des Kraftübertragungsverhaltens der antreibenden Tragrolle gegenüber der Transferfunktion. Dadurch, dass die Transferfunktion im zulässigen Bereich des Schlupfs immer unterhalb der Kraftübertragungsfunktion liegt bzw. diese nur im Arbeitspunkt tangiert, kann das Ergebnis der Optimierung auf Grundlage der Transferfunktion durch eine Rückprojizierung auf die Kraftübertragungsfunktion nochmals verbessert werden.

3.2 ZIELFUNKTION UND NEBENBEDINGUNG

Das verwendete Optimierungsmodell hat folgende Zielfunktion:

$$\min_x \sum_{i=1}^N x_i$$

Diese Funktion gilt es unter der nachstehenden Nebenbedingung zu lösen:

$$-F_W + \sum_{i=1}^N T_i(x_i, t_i) = 0$$

In der Nebenbedingung steht F_W für die Soll-Antriebskraft der Nachbarschaft. Durch die dezentrale Steuerungsarchitektur wird für die Lösung des Modells steuerungsindividuelle Information benötigt. Durch die Verwendung der Lagrange-Methode zur Lösung des Optimierungssystems konnte eine Steuerungslogik konzipiert werden, welche durch den Austausch spezifischer Einzelwerte die verteilte, optimierte Lösung des Modells ermöglicht. Die Lagrange-Funktion für dieses Optimierungsmodell hat folgende Form:

$$\Lambda(x_i, \lambda) = \sum_{i=1}^N x_i + \lambda \left[-F_W + \sum_{i=1}^N (a_{N,i}(t_i) * \ln(x_i + c_i(t_i)) + b_{k,i}(t_i) + b_{N,i}(t_i)) \right]$$

Entsprechend der Vorgehensweise des verwendeten Lagrange-Lösungsverfahrens gilt es die Funktion $\Lambda(x_i, \lambda)$ sowohl nach x_i als auch nach λ zu differenzieren. Als Ergebnis folgt ein Gleichungssystem mit $N+1$ Gleichungen. Auf Grund der gewählten Form des Modells und der Transferfunktion kann dieses Gleichungssystem analytisch gelöst werden, womit die Notwendigkeit eines komplexen dezentralen numerischen Lösungsverfahrens entfällt.

Durch die Lösung dieses Gleichungssystems ergibt sich λ zu folgender Form:

$$\lambda = e^{\frac{F_W - k_1 - k_3}{k_2}}$$

Mit

$$k_1 = \sum_{i=1}^N a_{N,i}(t_i) * \ln(a_{N,i}(t_i))$$

$$k_2 = \sum_{i=1}^N a_{N,i}(t_i)$$

$$k_3 = \sum_{i=1}^N b_{k,i}(t_i) + b_{N,i}(t_i)$$

Mit der Verwendung dieses, für die einzelne Nachbarschaft, allgemein gültigen Wertes, kann jede Steuerung den numerischen Wert ihrer Variable x bestimmen. Durch die Struktur dieses Optimierungsmodells muss im laufenden Betrieb das Optimierungsmodell nicht aufwendig dezentral gelöst werden, sondern kann durch die verteilte und fortlaufend aktualisierte Berechnung von drei Einzelwerten k_1 , k_2 und k_3 bestimmt werden. Hierdurch kann die optimale Berechnung der Variable x in $N+1$ Schritten erfolgen. N steht in diesem Zusammenhang für die Anzahl an Steuerungen in der betrachteten Nachbarschaft. Bei der Ergebnisfindung müssen die entsprechenden Summen für die k -Werte gebildet werden und anschließend einmalig an alle Gruppenmitglieder verteilt werden.

3.3 VERTEILUNG DER BETRIEBSZUSTÄNDE 1 UND 2

Der vorgestellte Algorithmus verteilt die antriebsindividuellen Soll-Antriebskräfte derart, dass die Summe aller Schlupfwerte minimiert wird, bei gleichzeitiger Erreichung des Soll-Antriebswertes für die betrachtete Nachbarschaft. Damit dieser Algorithmus ebenfalls die Verteilung des Betriebszustand 1 abbilden kann, bedarf es einer Anpassung bei der Berechnung der k -Werte.

Damit das Ziel der Minimierung der Schlupfwerte erreicht wird, ist es zielführend, die antriebsindividuellen Soll-Antriebswerte derart zu verteilen, dass antreibende Tragrollen mit guten Kraftübertragungsfunktionen höhere Anteile an der Gesamtantriebskraft erbringen als antreibende Tragrollen mit schlechteren Kraftübertragungsfunktionen. Die Unterscheidung von guten bzw. schlechten Kraftübertragungsfunktionen gründet dabei alleinig darauf, dass gute Kraftübertragungsfunktionen bei gleichem Schlupfwert in der Lage sind höhere Kraftwerte zu übertragen. Durch die essentielle Notwendigkeit mindestens eine antreibende Tragrolle pro Nachbarschaft im Betriebszustand 1 zu haben, bietet es sich im Kontext der Optimierungsaufgabe an, die antreibende Tragrolle mit dem schlechtesten Kraftübertragungsverhalten auszuwählen. Bei der Berechnung der k -Werte würde diese antreibende Tragrolle nicht berücksichtigt. Die Summe würde also über alle $i = 1$ bis N gebildet mit der Ausnahme $i = j$ wobei j der Index der antreibenden Tragrolle mit dem schlechtesten Kraftübertragungsverhalten wäre.

Eine dauerhafte Festlegung des Betriebszustands 1 für eine antreibende Tragrolle ist dabei allerdings nicht zielführend, weil dem Gesamtsystem somit die Fähigkeit genommen wird auf Veränderungen der Kraftübertragungsfunktionen im laufenden Betrieb zu reagieren. Hierzu ist es im Algorithmus vorgesehen, die einzelnen Parameter der Transferfunktion $a_{N,i}(t_i)$, $c_i(t_i)$, $b_{k,i}(t_i)$ und $b_{N,i}(t_i)$ derart zu manipulieren, dass die Messaufgabe berücksichtigt werden kann.

Das anvisierte Ziel der Verteilung des Betriebszustands 1 ist es, dass jede antreibende Tragrolle innerhalb

einer bestimmten Zeitspanne mindestens einmal in den Betriebszustand 1 versetzt wird. Um dies zu erreichen, wird die bereits beschriebene Transferfunktion um den Arbeitspunkt derart gekrümmt, dass die in Abbildung 7 gezeigte Transferfunktion 2 entsteht. Diese zeitabhängige Transferfunktion wird im Vorfeld einer jeden Neuverteilung der individuellen Antriebskräfte neu berechnet. Durch die Krümmung der Funktion um den Tangentialpunkt mit der Kraftübertragungsfunktion werden die Bereiche 1 und 2 zwischen der Transferfunktion und der Kraftübertragungsfunktion vergrößert. Dies führt zu einer verstärkten Unterschätzung der Kraftübertragungsfähigkeit der einzelnen Tragrolle. Dadurch, dass sich immer nur eine begrenzte Anzahl an antreibenden Tragrollen im Betriebszustand 1 befinden, werden die restlichen antreibenden Tragrollen im Betriebszustand 3 gleichmäßig unterschätzt. Durch die Rückprojektion des optimalen Ergebnisses auf die individuellen Kraftübertragungsfunktionen entsteht dabei allerdings keine negative Beeinflussung der realen Kraftverteilung. Als zeitabhängige Variable geht in die Krümmung der Transferfunktion die vergangene Zeit seit dem letzten eigenen Wechsel in den Betriebszustand 1 ein. Hierdurch wird gewährleistet, dass, in Abhängigkeit der Kraftübertragungsfunktion, der Betriebszustand 1 derart verteilt wird, dass jede antreibende Tragrolle die Aufgabe der Gurtgeschwindigkeitsmessung in einem spezifischen Intervall übernehmen wird.

3.4 BEISPIELHAFT ANWENDUNG DES OPTIMIERUNGSMODELLS

Die Funktionsweise des vorgestellten Optimierungsmodells soll exemplarisch anhand einer Nachbarschaft von zehn antreibenden Tragrollen gezeigt werden. Hierbei sind die Kraftübertragungsfunktionen der einzelnen antreibenden Tragrollen zufällig in einem plausiblen Intervall verteilt angenommen worden, um die Varianzen in den Kraftübertragungsfunktionen im Feld zu berücksichtigen.

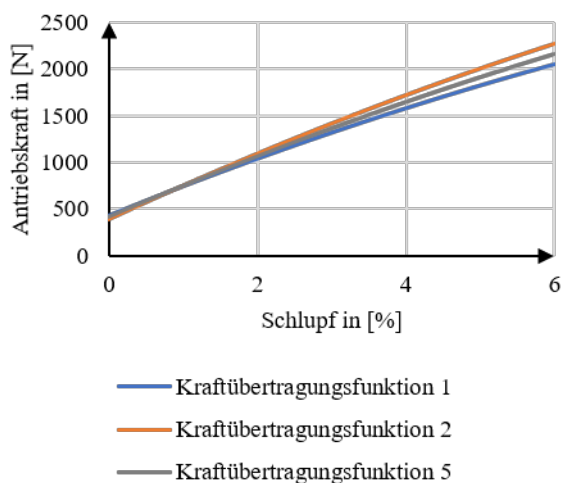


Abbildung 8. Auswahl an Kraftübertragungsfunktionen

In Abbildung 8 sind exemplarisch drei Kraftübertragungsfunktionen abgebildet. Es ist zu erkennen, dass gemäß der beschriebenen Unterscheidung die antreibende Tragrolle 2 ein besseres Kraftübertragungsverhalten besitzt als Nummer 5 und 1. Mittels dieser Übertragungsfunktionen wurde für ein Zeitintervall von 120 Zeitpunkten die Betriebszustandsverteilung dezentral berechnet.

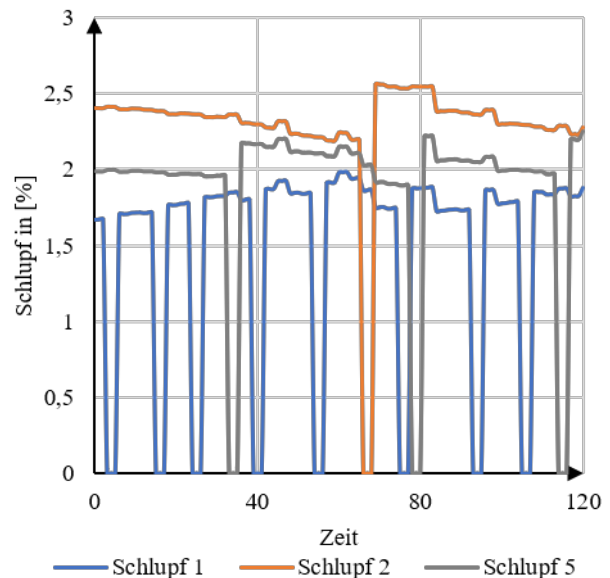


Abbildung 9. Verteilung der Betriebszustände 1 und 3 für ausgewählte antreibende Tragrollen

In der Abbildung 9 sind die jeweiligen Schlupfwerte für die drei ausgewählten antreibenden Tragrollen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die antreibende Tragrolle Nummer 2 mit dem besten Kraftübertragungsverhalten deutlich seltener die Aufgabe der Geschwindigkeitsmessung übernehmen muss als die antreibende Tragrolle Nummer 1. Die Tragrolle Nummer 1 übernimmt die Aufgabe der Geschwindigkeitsmessung mit einer hohen Frequenz. Außerdem ist zu erkennen, dass für den Betriebszustand 3 der antreibenden Tragrolle Nummer 1 der anvisierte Schlupf deutlich niedriger ist als bei den beiden anderen. Dies liegt daran, dass eine Erhöhung des Gesamtschlupf durch eine Erhöhung des Schlupfwertes von Nummer 1 zu einem kleineren Anstieg in der Gesamtantriebskraft führt als im Vergleich eine Schlupferhöhung von Nummer 2. Diese ist konstant mit einem großen Kraftanteil an der Erreichung der Soll-Gesamtantriebskraft beteiligt. Die Schwankungen im Verlauf des Schlupfwertes spiegeln die jeweils individuell neu zusammengesetzten Verteilungen der Antriebskraft wieder, je nachdem welche andere antreibende Tragrolle in den Betriebszustand 1 wechselt.

Außerdem stellt der Algorithmus sicher, dass zu jedem Zeitpunkt eine antreibende Tragrolle die Gurtgeschwindigkeit misst und diese an ihre Nachbarschaft weiterleitet, damit diese die optimierten Schlupfwerte über ihre Motordrehzahlen einstellen können.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Wie in den vorhergehenden Kapiteln dargelegt, ist das Konzept der antreibenden Tragrolle in der Lage den aktuellen Zielkonflikt zwischen dem Bedarf an höheren Förderleistungen und größeren Förderdistanzen sowie den technischen Restriktionen aus den resultierenden Gurtzugspannungen zu lösen. Hierfür wird das aktuell eingesetzte Verfahren von wenigen aber großen Zwischenantrieben dahingehend weiterentwickelt, dass die Krafterbringung zum Großteil dezentralisiert wird. Durch die verteilte Überwindung von lokalen Bewegungswiderständen werden die Gurtzugkraftspitzen drastisch reduziert und eröffnen somit die Möglichkeit neue Gurtförderanlagen mit deutlich weniger zugfesten Gurten auszustatten. Dies führt neben der zusätzlichen Reduktion der Bewegungswiderstände, in Folge des geringeren Gurtgewichts, auch zu finanziellen Vorteilen.

Damit ein solches Antriebskonzept effektiv und situationsspezifisch gesteuert werden kann, wurde eine dezentrale Steuerung implementiert, welche in der Lage ist, durch die Bildung von Nachbarschaften, die Steuerungskomplexität zu reduzieren. Darüber hinaus bietet der gewählte hierarchische Aufbau die Möglichkeit eine beliebige Anzahl von antreibenden Tragrollen zu steuern.

Der beschriebene Optimierungsansatz mit dem Ziel die Antriebskräfte innerhalb einer Nachbarschaft zu verteilen, sodass der notwendige Schlupf aller antreibenden Tragrollen minimiert wird, ist mit N+1 Schritten analytisch lösbar. Außerdem ist es durch die Anpassung dieses Lösungsansatzes gelungen die Verteilung der essentiellen Messaufgabe zur lokalen Gurtgeschwindigkeitsermittlung derart zu gestalten, dass eine dynamische Zustandsverteilung erfolgt, in welcher die Verteilung von mehreren Einflussparametern abhängt.

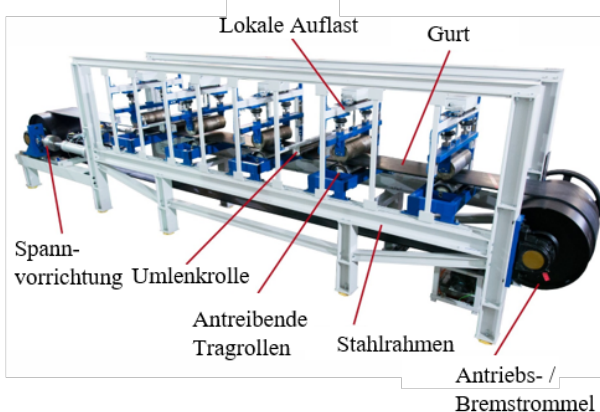


Abbildung 10. Prüfstand für antreibende Tragrollen

Neben der Validierung der Kraftübertragungsverhalten von antreibenden Tragrollen sowohl hinsichtlich der konstruktiven Gestaltung der Tragrollen als auch unter verschiedenen Witterungs- und Umgebungsbedingungen, ist

es das Ziel am institutseigenen Prüfstand für antreibende Tragrollen ebenfalls das Steuerungskonzept zu validieren. Der in Abbildung 10 dargestellte Prüfstand bietet die Möglichkeit bis zu fünf antreibende Tragrollen gleichzeitig in einer Förderanlage zu steuern. Hierbei wird neben der Validierung der Steuerungslogik und des Optimierungsmodells auch die Validierung der Betriebszustände durchgeführt. Hierbei ist es von entscheidender Bedeutung vor allem negative Effekte in der gegenseitigen Beeinflussung der antreibenden Tragrollen verlässlich zu identifizieren und entsprechend in der Steuerungslogik zu implementieren. Die Validierung der Steuerungslogik hinsichtlich einer deutlich größeren Anzahl an antreibenden Tragrollen erfolgt anschließend unter Verwendung der gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der gegenseitigen Beeinflussung der Betriebszustände im Rahmen einer Simulationsumgebung.

LITERATUR

- [ALL76] Alles, R. (1976): Zum Zwischenantrieb von Gurtförderern mittels angetriebener Tragrollen und Linearmotoren [Dissertation]. Hannover: Universität Hannover
- [ALS03] Alspaugh, M. A. (2003). The evolution of intermediate driven belt conveyor technology. In: Bulk solids handling. Ausgabe 23 (3). ISSN 0173-9980
- [AND16] Andrejiova, M.; Grincova, A.; Marasova, D. (2016): Measurement and simulation of impact wear damage of industrial conveyor belts. In: Wear, Ausgabe 368 - 369, Seiten 400 - 407. – DOI: 10.1016/j.wear.2016.10.010
- [ART15] Artur Küpper GmbH & Co. KG (2015). Förderbandanlage mit dezentralem Förderbandantrieb und Verfahren zum Betrieb der Förderbandanlage. Erfinder: Schwandtke, R.; Overmeyer, L.; Kleiner, S.; Hötte, S.; Daake, S.: 28.05.2014. DE, Offenlegungsschrift DE102014107591A1.
- [HÖT17] Hötte, D.; Bindzus, L.; Overmeyer, L. (2017). Development of an alternative drive concept for belt conveyors by using driven idlers. In: AST 2017 – Scientific Symposium on Automated Systems and Technologies. St. Petersburg, 14. und 15. Juni 2017.
- [HÖT18] Hötte, D.; Bindzus, L.; Overmeyer, L. (2018). Antreibende Tragrollen als alternatives Antriebskonzept für Gurtförder-

anlagen. In: Gurtförderer und ihre Elemente. Ausgabe 14. Haus der Technik, Essen

- [LIE94] Lieberwirth, H. (1994). Economic advantages of belt conveying in open-pit mining. In: Mining Latin America - Challenges in the mining industry. Springer, Dordrecht. ISBN 978-94-010-4533-9
- [PFE77] Pfeifer, H. (1977). Grundlagen der Fördertechnik. 1. Auflage. Braunschweig: Vieweg. ISBN 978-3-528-04061-1
- [PHO18a] Phoenix Conveyor Belt Systems GmbH: The longest conveyor belt. [Zugriff am 24.07.2018]. Verfügbar unter <https://bit.ly/2mIvnAT>
- [PHO18b] Phoenix Conveyor Belt Systems GmbH: The highest capacity conveyor belt. [Zugriff am 24.07.2018]. Verfügbar unter <https://bit.ly/2mJgu19>

Lars Bindszus, M.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, Leibniz Universität Hannover.

Lars Bindszus wurde 1990 in Minden (Deutschland) geboren. Zwischen 2010 und 2016 studierte er Wirtschaftsingenieurwesen an der Leibniz Universität Hannover.

Adresse: Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland, Phone: +49 511 762 3846, Fax: +49 511 762 4007, E-Mail: lars.bindszus@ita.uni-hannover.de