

Einlauf- und Alterungseffekte von Flurförderzeugrädern mit Polyurethanbandage

Running-in Warmup effects of industrial truck wheels with polyurethane tread

Matthias Hofmann, Robert Schulz

Institut für Fördertechnik und Logistik
Abteilung Maschinenentwicklung und Materialflussautomatisierung
Universität Stuttgart

Räder und Rollen verkörpern für sämtliche logistische und fördertechnische Prozesse des Materialflusses ein unverzichtbares Konstruktionselement. Die vielfach eingesetzten Vollmaterial-Laufbeläge aus Heißgießpolyurethan weisen ein komplexes Betriebsverhalten auf, welches durch zahlreiche Parameter bzgl. innerer und äußerer Reibung geprägt ist. Während bislang hinsichtlich der Auslegung der Materialspezifikation primär die Geschwindigkeit, die Nutzlast, und damit einhergehend das Durchmesser- und Breitenverhältnis gegenüberständig waren, zeigen neue Versuchsergebnisse, dass das erzielbare Leistungsvermögen einer derartigen Polyurethanbandage auch Abhängigkeiten bezüglich der Charakteristik des initialen Einlaufprozesses aufweist. Die vorliegenden Ergebnisse belegen, dass eine Korrelation im Hinblick auf Belastung und Temperatur während der Einlaufphase zu der im weiteren Verlauf erzielbaren Belastungsgrenze besteht. Zudem konnten alterungsbedingte Effekte nachgewiesen werden, so dass die hier vorgestellten Versuchsergebnisse und darauf basierend weitergehende Untersuchungen einerseits in einem geschärften Anwenderwissen münden können, andererseits aber auch Ausgangspunkt für Entwicklungen in puncto Radkonstruktion und Laufbelagsmaterialeigenschaften darstellen.

[Schlüsselwörter: Flurförderzeugräder, Traglast von Räder und Rollen, Einlaufverhalten von Polyurethanbandagen, Alterung von Polyurethanbandagen]

Wheels and castors are an essential design element for all logistical and material handling processes. The frequently used solid material treads made of polyurethane have a complex operating behaviour, which is characterised by numerous parameters with regard to internal and external friction. Whereas up to now, the design of the material specification was primarily based on speed, payload and the associated diameter and width ratio. Recent test results show that the achievable performance of such a polyurethane tread is also dependent on

the characteristics of the initial running-in process. The present results prove that there is a correlation between the load and temperature during the running-in phase and the load limit that can be achieved in the further course. In addition, age-related effects could be proven, so that the test results presented here and further investigations based on them can on the one hand lead to a improved user knowledge, but on the other hand also represent the starting point for developments in terms of wheel design and tread material properties.

[Keywords: industrial truck wheels, payload of wheels and castors, running-in warmup effects of polyurethane treads, aging of polyurethane treads]

1 MOTIVATION UND PROBLEMSTELLUNG

Für den Betrieb von Flurförderzeugen sind deren Räder und Rollen nicht nur ein Verschleißelement, denn neben den Hauptanforderungen, Antriebs- und Seitenführungskräfte, bei hoher Traglastkapazität und Geschwindigkeit, zu übertragen, kommen u.a. Forderungen nach langer Standzeit, Dämpfungsvermögen und Bodenschonung hinzu. Dementsprechend ergibt sich bereits aus technischer Sicht ein veritables Spannungsfeld der Anforderungen. Dabei ist auf Grund steigender Anforderungen und der Erweiterung der Einsatz- und Anwendungsgebiete festzustellen, dass sich die Lebensdauer dieses klassischen Konstruktionselements zunehmend zu einem ökonomisch und ökologisch relevanten Faktor entwickelt. Räder und Rollen stellen insofern einen ökonomischen Faktor für den Betrieb einer Flurförderzeugflotte dar, indem sich die Kosten für Ersatzbeschaffung und Ausfallzeiten summieren. Eine möglichst lange Haltbarkeit ist jedoch nicht nur aus ökonomischen Gesichtspunkten erstrebenswert, vielmehr gewinnen Aspekte des Ressourcenverbrauchs zunehmend an Bedeutung. Dies betrifft sowohl den Betrieb, in dem ein geringer Rollwiderstand zu niedrigerem Energieverbrauch und längeren Ladezyklen führt, aber auch den Ressourcenbedarf für die Herstellung und das Recycling von Rädern und Rollen mit Polyurethanlaufbelag. Demzufolge ist die Haltbarkeit solcher Räder und

Rollen aus heutiger Sicht in vielschichtiger Weise von Belang. Essenziell ist dementsprechend eine präzise Abstimmung der Räder und Rollen auf deren im Einsatz vorherrschenden Anforderungen und Betriebsbedingungen.

Lange Zeit führten im Wesentlichen steigende Belastungen hinsichtlich der Traglast und der Fahrgeschwindigkeit zu einem stetigen Rückgang der erzielbaren Lebensdauer und Laufleistung von Flurförderzeugrädern und -rollen [WB11]. Diese Entwicklung ist vorrangig dem Wunsch nach hoher Umschlagleistung geschuldet, was durch entsprechend hohe Nutzlasten und Fahrgeschwindigkeiten bei Flurförderzeugen erreicht wird. Die tatsächlich in der Anwendungspraxis erzielten Standzeiten sind letztlich aber von den individuell vorherrschenden Betriebsbedingungen und Einsatzcharakteristika, wie u.a. Gewichtsbelastung, Fahrzeitanteil bei Maximalgeschwindigkeit und den Beschleunigungswerten abhängig, die stark variieren können.

1.1 BETRIEBSVERHALTEN VON POLYURETHANRADBANDAGEN

Hinsichtlich des Leistungsvermögens ist in erster Linie das mechanische und thermische Belastungs- und Beanspruchungskollektiv relevant, wobei einige Parameter einer gegenseitigen Abhängigkeit unterliegen und Polyurethane in der hier vorliegenden Anwendung ein spezifisches und komplexes Betriebsverhalten aufweisen. Die Ursachen für das Versagen beziehungsweise das Eintreten der Gebrauchsuntauglichkeit von Rädern und Rollen ist dabei ebenso vielschichtig wie deren Anwendungsspektrum. Das Erreichen des Endes der Gebrauchsdauer ist vorwiegend durch die folgenden Erscheinungen charakterisiert:

- Abnahme des Bandagenquerschnitts durch mechanischen Abrieb und Verschleiß
- Beulenbildung und Austritt verflüssigten Materials infolge thermischer Überlastung der Bandage
- Schlagartiges Versagen durch dynamische Stoßbelastung
- Rissbildung und Materialausbrüche
- Ablösen der Bandage von der Felge

Die Erscheinungsformen des Eintritts der Gebrauchsuntauglichkeit gestalten sich jedoch ebenso individuell wie das zugrundeliegende anwendungsspezifische Belastungs- und Beanspruchungskollektiv. Das auf das System, bestehend aus Bandage und Felge, einwirkende Kollektiv setzt sich dabei aus mechanischen, thermischen und chemischen Komponenten zusammen, so dass sich das Betriebsverhalten entsprechend komplex gestaltet. Dies ist einerseits auf den Verbundaufbau der Räder und Rollen, bestehend aus einer in der Regel metallischen Felge und der Bandage zu-

rückzuführen, andererseits ergeben sich innerhalb der Bandage auf Grund der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von Elastomerwerkstoffen während des Betriebs Änderungen der relevanten spezifischen Kennwerte wie E-Modul, Festigkeit und Weiterreißwiderstand. Diese sind einerseits temperaturabhängig, andererseits ergeben sich auch infolge chemischen Angriffs strukturelle Änderungen des Materials, welche sich nachteilig auf die Kennwerte auswirken.

Bedingt durch die Temperaturabhängigkeit des Werkstoffverhaltens von Polyurethanen, korreliert die thermische mit der mechanischen Belastung. Bezüglich des Temperaturverhaltens und des Wärmeeintrags in die Bandage müssen in erster Linie die aus dem Fahrbetrieb resultierenden Kräfte betrachtet werden. Abhängig von der Nutzlast zählen hierzu unter anderem Antriebs-, Beschleunigungs- und Lenkkräfte infolge derer sich, resultierend aus innerer und äußerer Reibungsvorgänge, ein Wärmeeintrag in die Bandage ergibt. Zur äußeren Reibung zählen die Parameter des tribologischen Systems des Rad-Boden-Kontaktes, der u.a. durch Kraftschluss und Schlupf charakterisiert wird. Die Reibung zwischen Laufbelag und Fahrbahnoberfläche resultiert aus einer adhäsiven Komponente und der Hysteresereibung. Adhäsive Reibung beruht auf der Bildung und dem Aufbrechen molekularer Bindungen zwischen den Reibpartnern, während Hysteresereibung auf Deformation der Radbandage beruht. Der Anteil der Komponenten an der resultierenden Reibungskraft, aber auch der Absolutwert der Reibungskraft ist sowohl von der Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche, als auch von den Kenngrößen der Radbandage abhängig, wobei die Reibungspartner nicht isoliert voneinander betrachtet werden dürfen, da letztlich der sich einstellende Reibungszustand ein Resultat des Zusammenwirkens aller Komponenten des tribologischen Systems ist. Innere Reibung bezieht sich auf die Vorgänge, die innerhalb des Laufbelags zu Verlusten führen. Ein Maß hierfür ist der Rollwiderstand, der mit der Verformung des Laufbelags im Latsch korreliert. Stellt man sich den Laufbelag eines Rades bzw. einer Rolle in radialer Richtung unterteilt in Segmente vor, erfahren diese im Latsch, aber auch im Bereich des Ein- und Auslaufs, bei Rotation unter Einwirkung von Normalkraft eine wechselnde Verformung, vgl. Abbildung 1. Der Koeffizient der Rollreibung ist über $f_R = \frac{e}{r_{\text{dyn}}}$ definiert. Je größer die Verformung, desto höher wird der Wert der Exzentrizität e und umso geringer der dynamische Radhalbmesser r_{dyn} , so dass im Ergebnis der Rollreibungskoeffizient und damit auch der Rollwiderstand steigt.

Der dynamische Radhalbmesser ist demnach abhängig von der Verformung der Bandage im Latsch. Statisch betrachtet stellt sich diese zunächst durch die Normalkraftbeaufschlagung des Rades bzw. der Rolle ein und korreliert mit der Härte des Bandagenwerkstoffs. Im dynamischen Fall, während der Rotation, hängt das Maß der Verformung/Eindrückung der Bandage in radialer Richtung zu-

dem von den dynamischen Eigenschaften des Bandagenwerkstoffs und im Falle von Antriebsrädern zudem vom wirkenden Antriebsmoment und der dadurch resultierenden Zugkraft ab. Die an einem angetriebenen Rad wirkenden Kräfte sind in Abbildung 1 dargestellt.

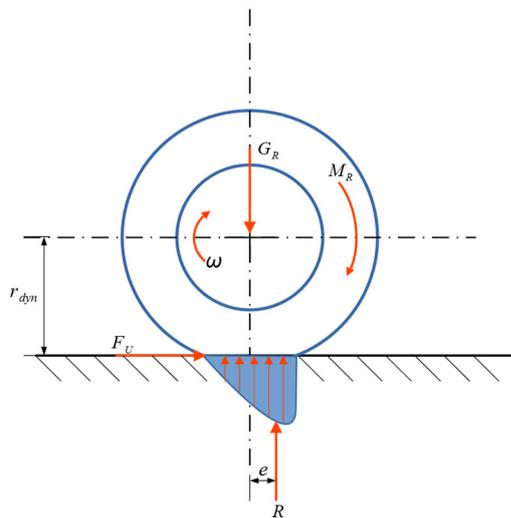


Abbildung 1. Kräfte am angetriebenen, mit Kreisfrequenz ω rotierenden, Rad.

F_U stellt die resultierend aus dem Antriebsmoment M_R wirkende Umfangskraft dar, wobei G_R die Radlast (Normalkraft) und R die Reaktionskraft darstellt, die um eine Exzentrizität e versetzt zur Radachse wirkt. Aufgrund der Verformung im Latsch ist der Abrollradius nicht statisch, so dass ein dynamischer Radhalbmesser r_{dyn} für die Betrachtung in Ansatz zu bringen ist.

Die Verformungsenergie, die sich als Rollwiderstand äußert, wird teilweise dissipiert, was zur Erwärmung der Bandage führt. Aufgrund der Wärmeleitungseigenschaften der bekannten Polyurethane, die als Bandagenwerkstoffe dienen, kann die entstehende Wärme nur unzureichend abgegeben werden. Dies gilt vor allem für den Bereich in der Mitte des Bandagenquerschnitts, da am Übergang zur Felge und an der Oberfläche ein Wärmeübergang zur Felge respektive der Umgebung besteht. Für kompakte Gießpolyurethane liegt der Wärmedurchgangskoeffizient λ in einem Bereich von 0,1 bis 0,35 W/mK, während dieser Wert für einen herkömmlichen Baustahl im Bereich zwischen 48 und 58 W/mK liegt. Insofern ist der Dicke des Bandagenquerschnitts nicht nur im Hinblick auf das Dämpfungsverhalten im Fahrbetrieb eine besondere Bedeutung beizumessen, da diese geometrische Größe eben auch einen zentralen Einflussfaktor für das thermische Betriebsverhalten darstellt. Da Festigkeit und E-Modul eines Polyurethanwerkstoffs mit steigender Temperatur abnehmen, und somit auch unter Last die Verformung im Latsch zunimmt, wird dadurch der Wärmeeintrag infolge des Walkens verstärkt. Wird hierbei eine kritische Grenze überschritten und der Bereich der Beharrung verlassen, kommt es trotz gleichbleibender äußerer Belastung zu einer Temperaturerhöhung in der Bandage. Wie weit dieser Temperaturanstieg

reicht und welche Folgen sich hieraus ergeben, hängt letztlich von der Dauer der einwirkenden kritischen Belastung in Form von Radlast und Fahrgeschwindigkeit ab. Im Extremfall kann es zur Verflüssigung des Bandagenmaterials, und somit zum Totalausfall des Laufbelags, kommen. Kann jedoch der Wärmeeintrag dergestalt reduziert werden, dass die Last und/oder die Fahrgeschwindigkeit verringert wird, respektive durch kompletten Stillstand dieser unterbrochen wird, kann sich gegebenenfalls die Bandage wieder erholen und wieder in einen stabilen Zustand gelangen. Sofern bis dahin keine irreversible Schädigung des Bandagenmaterials in Form von Verflüssigung auftrat, ist nach der Abkühlphase die weitere uneingeschränkte Gebrauchstauglichkeit gegeben. Tritt jedoch eine – wenn auch nur partielle – Verflüssigung ein, rekristallisiert das Material, sofern es bis dahin zu keinem Aufbrechen der Bandage mit Materialaustritt kam. Diese Strukturänderung des Polyurethans kann sich gegebenenfalls durch Beulenbildung infolge der Volumenzunahme bemerkbar machen, aber selbst wenn dies nicht der Fall ist, kann sich die Konsistenz des Werkstoffs ändern und damit einhergehend auch die physikalisch-mechanischen Eigenschaften. Das thermische Betriebsverhalten einer Polyurethanbandage von Flurförderzeugrädern und –rollen korreliert demzufolge direkt mit der einwirkenden mechanischen Belastung, vorwiegend in Gestalt von Fahrgeschwindigkeit und Traglast. Bestehen somit werkstoffseitig dahingehend stabile Verhältnisse, als dass die Bandagentemperatur im Betrieb dauerhaft unterhalb des kritischen Bereichs liegt, lässt sich das Temperaturfenster unter den gegebenen Betriebsbedingungen und entsprechendem Anwendungswissen sehr vorhersehbar über die Festlegung der zulässigen Belastung einstellen.

Jüngste im Rahmen von Industrieprojekten am Kreisaktuatorprüfstand des IFT durchgeführte Versuchsreihen mit Antriebsrädern von Gabelstaplern in der Dimension 343 x 114 mm zeigen nun, dass sich diese Korrelation zwischen mechanischer Belastung und thermischem Betriebsverhalten über die Lebensdauer einer Polyurethanbandage hinweg nicht konstant verhält und womöglich eine signifikante Abhängigkeit zum Alter und Gebrauchszustand des Bandagenwerkstoffs besteht.

1.2 DYNAMISCHES TESTSZENARIO ZUR ERMITTLUNG DES LEISTUNGSVERMÖGENS

Zielstellung der Versuchsreihen war, ein Testscenario zu entwerfen, um einen Vergleich zwischen verschiedenen Bandagenmaterialien hinsichtlich derer maximal erreichbaren Nutzlast unter dynamischen Fahrbedingungen zu erhalten. Mit diesem Test soll insbesondere das thermische Betriebsverhalten des Laufflächenmaterials ermittelt werden. Zu diesem Zweck wurde ein Prüfscenario mit intervallartig steigender Nutzlast und einer Geschwindigkeit von 14 km/h konzipiert. Jede Prüfung beginnt jedoch mit einer Aufwärmphase von 20 Minuten bei einer konstanten Geschwindigkeit von 10,8 km/h und einer Anfangs-Radlast von 26,5 kN. Die Aufwärmphase wird nach 7 Minuten und

12 Minuten für eine kurze Messpause unterbrochen, um die Temperatur des Laufbelags im Inneren zu ermitteln. Nach 7 Minuten und am Ende der Aufwärmphase wird zusätzlich der Rollwiderstand bei einer reduzierten Geschwindigkeit von 7 km/h gemessen.

Während des dynamischen Belastungs/Zyklustests, siehe Tabelle 1, nach Abschluss der Aufwärmphase, wird die Geschwindigkeit nicht konstant gehalten, sondern es wird zyklisch von Null auf 14 km/h beschleunigt und nach einer kurzen konstanten Fahrt wieder auf Null abgebremst. Danach folgt das gleiche Fahrprofil, jedoch mit umgekehrter Bewegungsrichtung. Ein Beispiel für ein solches Fahrprofil ist in Abbildung 1 dargestellt. Durch das hohe übertragene Drehmoment beim Beschleunigen und Bremsen wird die Lauffläche zyklisch zusätzlich mechanisch beansprucht. Das resultierende Drehmoment hängt von den vorherrschenden Kraftschlussverhältnissen ab und ist, wie im Diagramm zu sehen ist, daher während der Beschleunigungs- und Bremsvorgänge nicht konstant, sondern unterliegt Schwankungen, indem die Antriebsregelung der Motoren auf den entstehenden Schlupf reagiert. Weitere Inhomogenitäten im Drehmomentverlauf sind im Schaubild beim Übergang zur Konstantfahrt zu erkennen, da hier die Drehzahl-Drehmomentregelung der Antriebsmotoren ein Verspannen und damit Zwangsschlupf verhindert, was der Versuchskonstellation und dem Aufbau des Prüfstandes geschuldet ist, siehe [WB11].

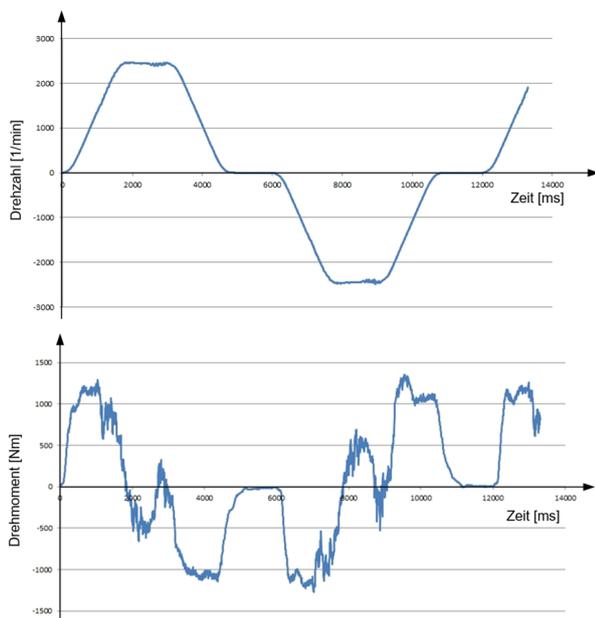


Abbildung 2. Drehzahl-Drehmomentenverlauf des dynamischen Testszenarios.

Im Grundversuch wird die Radlast beginnend bei 26,5 kN in vier Schritten erhöht, nach zwei, drei, vier und sechs Stunden der Testdauer. Der Versuch endet bei Versagen des Rades, respektive wenn die maximale Netto-Fahrzeit von acht Stunden Zyklusfahrt erreicht ist. Der Prüfablauf und die zugehörigen Parameter des Grundversuchs sind in

der Tabelle 1 dargestellt. Nach jeweils Vollendung einer vollen Stunde Zyklusfahrt erfolgt eine Messpause, in der die Temperatur im Stillstand ermittelt wird.

Tabelle 1. Ablauf und Parameter des Grundversuchs

	Zeitdauer Gesamt/ Intervall	Radlast [kN]	Geschwindigkeit [km/h]
Warmup	20 min.	26,5	10,8
Pause nach 7 min.			
Messung Rollwider- stand		26,5/32,5	7,2
Pause nach 20 min.			
Zyklustest	8h		14
	2h/1h	26,5	14
	1h	28,0	14
	1h	29,5	14
	2h/1h	31,0	14
	2h/1h	32,5	14

2 TEMPERATURMESSUNG

Die Überwachung der Temperatur des Laufbelags erfolgt bei dem Versuch mit drei unterschiedlichen Messmethoden. Die kontinuierliche Messung der Oberflächentemperatur erfolgt berührungslos mittels eines Pyrometers. Zusätzlich wird in regelmäßigen Abständen ein Bild des Rades mit einer Infrarotwärmebildkamera aufgenommen, um nicht nur eine punktuelle Messung der Oberflächentemperatur, sondern auch die Temperaturverteilung zu ermitteln. Anhand des Thermobildes ist es möglich, die Betriebstemperatur an der Lauffläche, der Flanke sowie der Felge während der Stillstandzeiten zu ermitteln. Die während der Fahrt durch das Pyrometer messbaren Werte sind aufgrund von Konvektion und Wärmeübertragung vom Rad auf den Boden deutlich niedriger, als im Kern der Bandage und dem sich im Stillstand einstellenden Temperaturniveau, siehe Abbildung 3. Hier ist ausschnittsweise eine Messkurve dargestellt, wie sie durch das Pyrometer ermittelt wird. Der mit Ziffer 2 markierte Bereich stellt dabei das Zeitintervall der Zyklusfahrt dar, während der Be-

reich 1 die Messpause zur Temperaturmessung im Stillstand markiert. In den mit Ziffer 3 markierten Bereichen sind letztlich die im Stillstand mittels des Pyrometers ermittelten Temperaturmaxima gekennzeichnet. Deutlich zu erkennen ist dabei, dass sich diese Werte deutlich von jenen während der Fahrt abheben.

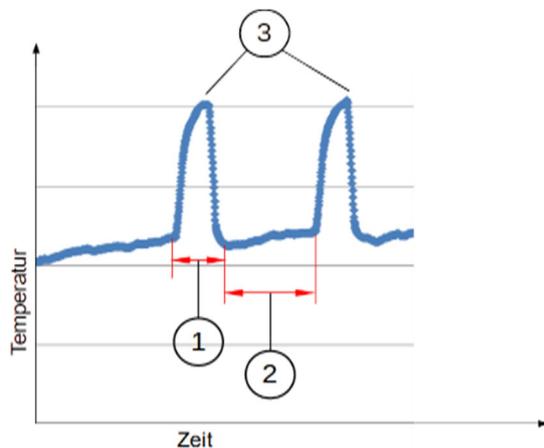


Abbildung 3. Mittels Pyrometer ermittelter exemplarischer Temperaturverlauf an der Oberfläche der Bandage. Der mit Ziffer 1 gekennzeichnete Bereich stellt eine 7-minütige Messpause dar, in der aufgrund des Stillstandes die Temperatur ein mit Ziffer 3 gekennzeichnetes Maximum an der Oberfläche der Bandage annimmt. Der Bereich 2 markiert den Messschrieb der Temperatur während der Zyklusfahrt.

Insofern erfolgt nach jeder vollen Stunde Zyklusfahrt eine Unterbrechung für sieben Minuten als Messpause. Die Dauer der Messpause ist dem Umstand geschuldet, dass das Temperaturmaximum in radialer Richtung in der Mitte der Lauffläche anzusiedeln ist und aufgrund der Wärmeleitfähigkeit des Bandagenmaterials die maximale Oberflächentemperatur erst nach einer gewissen Stillstandszeit ermittelt werden kann. Die dafür benötigte Zeit korreliert mit der Dicke der Bandage und der Wärmeleitfähigkeit des Materials. Diese Auswirkungen sind in Abbildung 4 ersichtlich, indem der Effekt der Wärmeleitung mithilfe der Infrarotwärmebildkamera visualisiert ist. Deutlich zu erkennen ist hierbei in der oberen Aufnahme, dass direkt nach Abbremsen in den Stillstand der Bereich in der Mitte der Flanke maßgebend für die an der Bandage messbare Höchsttemperatur ist. Visualisiert ist dies durch einen durchgehenden weißen Ring an der Flanke in der Mitte der Bandage, siehe auch Temperaturskala rechts im Bild. Dagegen ist bei Ende der Stillstandszeit nach sieben Minuten ein Wärmeübergang erfolgt, wie im unteren Teil der Abbildung zu sehen ist. Sowohl der Absolutwert der Oberflächentemperatur der Lauffläche liegt hier deutlich über dem Niveau zu Beginn der Stillstandphase, als auch die Verteilung hat sich in dieser Zeit massiv verschoben und unterstreicht den Wärmeleitungseffekt des Bandagenwerkstoffs. Die farbliche Visualisierung der Temperaturverteilung zeigt, dass an der Flanke zu diesem Zeitpunkt eine homogene Verteilung vorherrscht und somit ein Übergang zur Lauffläche erfolgt ist.

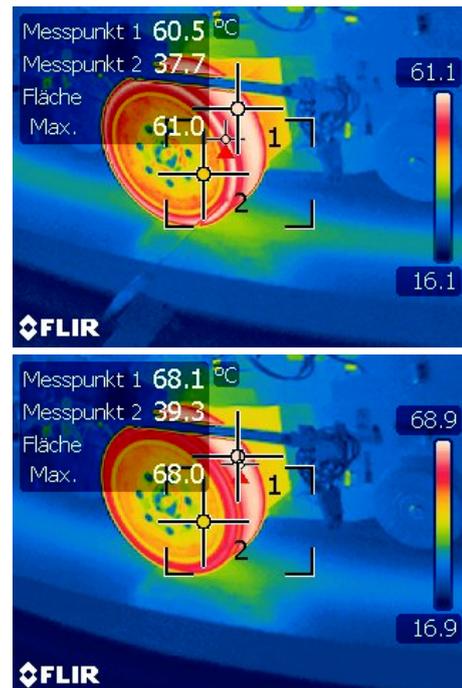


Abbildung 4. Ermittlung der Temperaturverteilung am Rad im Stillstand, zu Beginn (oben) und am Ende der Messpause (unten) nach 7 Minuten Stillstandszeit.

Ergänzend zur Ermittlung der Oberflächentemperaturen mithilfe des Pyrometers und der Infrarotkamera wird während des Stillstands auch die Temperatur im Inneren der Bandage ermittelt. Hierzu befindet sich in der Mitte in radialer Richtung der Bandage eine Bohrung mit drei Millimeter Durchmesser, um eine Messsonde einzuführen. Hierdurch kann der infolge innerer Reibung generierte Wärmeeintrag und die daraus resultierende Temperatur in der Bandage direkt nach Stillstand ohne Einflüsse durch Wärmeleitung gemessen werden, während die beiden anderen Messmethoden lediglich indirekt an der Oberfläche ansetzen und der messbare Absolutwert dabei vom Wärmeleitverhalten des Polyurethans abhängig ist. Eine beachtliche strukturelle Schwächung der Bandage durch das Einbringen der Messbohrung ist dabei nicht feststellbar. Dies kann einerseits durch die Auswertung anhand der Wärmebildkamera festgestellt werden, da in dem Bereich der Bohrung sonst ein Wärmehotspot entstehen müsste. Andererseits konnten Versagensfälle der im Testfeld befindlichen Räder ausnahmslos nicht auf den fraglichen Bereich zurückgeführt werden.

3 VERSUCHSERGEBNISSE

Im Grundversuchs-Prüflauf wurde, wie in Tabelle 1 verzeichnet, beginnend mit einer Anfangslast von 26,5 kN getestet und die entsprechenden Laststeigerungen nach jeweils einer bzw. zwei Stunden Fahrdauer durchgeführt. Die Wahl der Intervalldauer ist auf das charakteristische thermische Verhalten der Räder ausgerichtet, während die Festlegung der Laststufen auf der Traglastspezifikation

bzw. dem Auslegungsbereich der Räder beruht. So wird die Anfangslast über 2 Stunden hinweg gefahren, da sich trotz anfänglicher Aufwärmphase nach einer Stunde Zyklusfahrt oftmals noch keine Beharrungstemperatur mit vollständiger Erwärmung von Bandage, Felge und Nabe einstellt. Dies ist jedoch für eine solide Beurteilung des thermischen Betriebsverhaltens in Abhängigkeit einer Belastung unerlässlich. Die vierte und fünfte Laststufe mit 31,0 und 32,5 kN markieren hinsichtlich der ertragbaren Nutzlastbeaufschlagung markante Stellen, so dass hier ebenfalls eine Intervalldauer von zwei Stunden gewählt wurde, um etwaige Effekte, wie eingangs beschrieben, welche im Kontext zum Verlust von Festigkeit und Steigerung der infolge Walkarbeit dissipierten Wärme anzusiedeln sind, gegenüber den anderen Laststufen eindeutig abgrenzen zu können. Bei einer Intervalldauer von lediglich einer Stunde ließe sich der Effekt des „Aufschaukelns“ der gegenseitigen Beeinflussung von Belastung, Temperatur und Festigkeit des Bandagenwerkstoffs nicht eindeutig einer Belastungsstufe zuordnen, da sich das infolge Lasterhöhung einstellende Temperaturdelta erst nach geraumer Zeit feststellen lässt und sich die Effekte des temperaturbedingten Werkstoffverhaltens sowie ein mögliches Kollabieren der Bandage nicht ad hoc einstellen. Die Steigerung der Belastung schlägt sich bei entsprechend langer Einwirkdauer demzufolge direkt auf die Temperatur der Bandage nieder. Hinsichtlich der Einwirkdauer ist jedoch nicht nur die Beharrung relevant, denn die Versuchsergebnisse zeigen, dass es auch im nicht-kritischen Temperaturbereich einer Polyurethanbandage nennenswerte Effekte und Anpassungsreaktionen zu geben scheint, welche sich dergestalt äußern, dass sich trotz Erhöhung der Belastung dennoch keine nennenswerte Steigerung der Bandagentemperatur ergibt, respektive sich sogar ein signifikanter Rückgang der Bandagentemperatur einstellen kann. Ein Beispiel für erstgenanntes ist in Abbildung 5 ersichtlich. Dort ist die Aufzeichnung der Oberflächentemperatur mittels Pyrometer während eines Versuchs mit einem Probanden des Typs A dokumentiert. Zur Lesart des Diagramms sei auf Abbildung 3 verwiesen. Auffällig ist, dass die Steigerung der Last von 28,0 kN auf 29,5 kN mit Intervalldauer von einer Stunde Zyklusfahrt zu einer lediglich marginalen Erhöhung der Temperatur führt, was durch die grüne Niveaulinie im Diagramm gekennzeichnet ist. Das Versagen trat bei diesem Probanden nach einer Stunde und 16 Minuten in der höchsten Laststufe von 32,5 kN ein, wobei zum Zeitpunkt des Versagens durch das Pyrometer keine aussagekräftige Messung mehr erfolgen konnte, da durch Materialaustritt und das rasche oberflächliche Erstarren des verflüssigten Materials die Messwerte verfälscht werden und demzufolge der letzte protokollierte Messpunkt hier im Diagramm nicht repräsentativ ist. Die im Inneren der Bandage mittels Sonde ermittelte Temperatur betrug zu diesem Zeitpunkt 140°C.

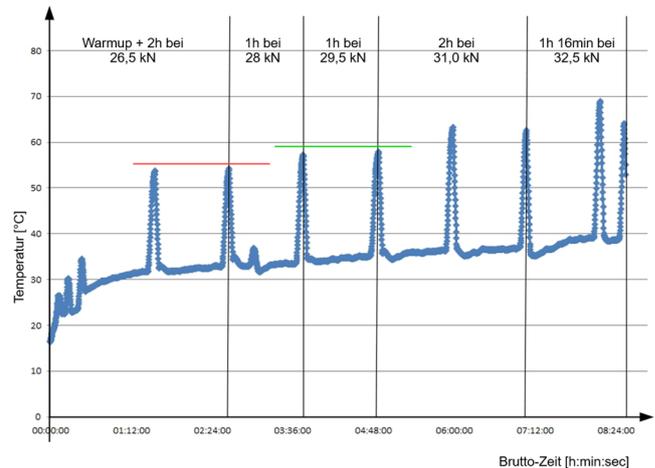


Abbildung 5. Temperaturmessschrieb der mittels Pyrometer ermittelten Oberflächentemperatur an einem Probanden des Typs A im Grundversuch.

Bei dem Probanden einer Materialspezifikation des Typs B, dessen Temperaturaufzeichnung in Abbildung 6 zu sehen ist, tritt zwischen den Messpunkten bei 28,0 kN und 29,5 kN sogar eine Abnahme der Temperatur ein, was ebenfalls durch die grüne Niveaulinie ersichtlich wird. Da dieser Vorgang reproduzierbar feststellbar ist, kann somit davon ausgegangen werden, dass sich unter der Einwirkung mechanischer Kräfte und der Wärme relevante substantielle Änderungen am Werkstoffgefüge der Bandage vollziehen.

Beim Probanden des Typs B besteht mit Ausnahme des oben beschriebenen Temperaturrückgangs bei 29,5 kN ab Erreichen der Beharrung bei der Anfangslast bis zur Vollendung der zweiten Stunde bei 31,0 kN ein weitestgehend linearer Zusammenhang, was im Diagramm durch die magentafarbige Linie angedeutet ist.

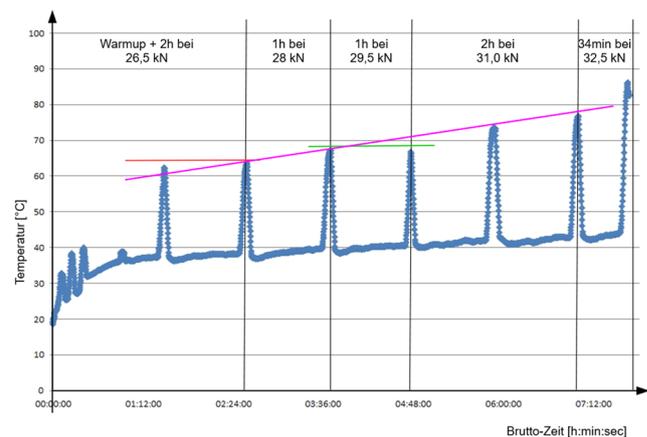


Abbildung 6. Temperaturmessschrieb der mittels Pyrometer ermittelten Oberflächentemperatur an einem Probanden des Typs B im Grundversuch.

In dieser Temperaturaufzeichnung ist zudem gut zu erkennen, dass sich die vollständige Beharrungstemperatur für die Laststufe 26,5 kN aufgrund des Starts bei Raumtemperatur mit 20°C erst nach 2 Stunden Zyklusfahrt einstellt,

vgl. rote Niveaulinie im Diagramm. Zudem fällt der verzeichnete Sprung der Temperatur vom Messpunkt bei 31,0 kN mit 78°C bis zum vollständigen Versagen nach weiteren 34 Minuten Fahrtdauer bei 32,5 kN sehr deutlich aus.

Bei dem Probanden vom Typ B ist davon auszugehen, dass bereits bei 31,5 kN ein kritischer Punkt erreicht war und letztlich die Laststeigerung das Kollabieren der Bandage lediglich beschleunigt hat, indem von der ersten zur zweiten Stunde in der Laststufe bei 31,0 kN nochmals eine Zunahme der Bandagentemperatur um ca. 3°C zu verzeichnen war. Dieses Temperaturdelta konnte auch innerhalb der Bandage im Kern so gemessen werden. Die absoluten Werte lagen hier bei 137°C respektive 140°C, was unstrittig im kritischen Bereich liegt. Letztlich zeigen diese Absolutwerte folglich, dass das Versagen auch ohne weitere Lasterhöhung eingetreten wäre, indem die Temperatur des Polyurethans bereits einen kritischen Punkt überschritten hatte und der Wärmeeintrag aufgrund Verformung und Walkarbeit trotz konstanter Last einen Anstieg aufweist. Bei Probanden, welche den achtstündigen Test, und somit alle Laststufen ohne Schäden absolvierten, konnte hingegen innerhalb der höchsten Laststufen jeweils in der zweiten Stunde keine weitere Temperaturerhöhung verzeichnet werden. Insofern wird bei diesen Materialspezifikationen der Punkt, ab dem der Mechanismus, der letztlich zum Kollabieren führt, nicht überschritten. Bei den hier vorgestellten Probanden handelt es sich demnach nicht um die gleiche Materialität der Bandage, so dass unterschiedliche Rezepturen vorliegen, wobei der Proband des Typs A eine geringere Shore-Härte aufweist, als der Typ B, was die Komplexität des Betriebsverhaltens unterstreicht. Trotz der unterschiedlichen Materialausprägungen lassen sich jedoch qualitative Analogien in deren Verhalten feststellen, auch wenn hinsichtlich des maximalen Leistungsvermögens deutliche Unterschiede existieren.

Hinsichtlich des Leistungsvermögens haben die hier gegenständlichen Versuchsreihen jedoch gezeigt, dass dies nicht nur von der nominellen Auslegung und Werkstoffspezifikation bestimmt wird, sondern auch die initiale Belastung und der Temperaturanstieg aus dem kalten Zustand heraus gravierenden Einfluss darauf nimmt.

3.1 EINLAUFABHÄNGIGES LEISTUNGSVERMÖGEN

Die oben aufgezeigten Temperaturaufzeichnungen und betrachteten Ergebnisse wurden durchgehend mit denselben Versuchsbedingungen hinsichtlich der Belastungsparameter, wie in Tabelle 1 dargestellt, gewonnen und demzufolge starteten die Prüfläufe im Grundversuch einheitlich mit einer initialen Radlast von 26,5 kN, sodass in der vierten Stunde der Zyklusfahrt die Laststufe mit 29,5 kN anliegt. Alle vorliegend vorgestellten Probanden waren demnach in der Lage, ohne Schädigung, welche die Gebrauchstauglichkeit der Räder einschränken würde, die Radlast von 29,5 kN zu bewältigen, wenngleich sich – absolut betrachtet – beträchtliche Unterschiede bezüglich der

resultierenden Bandagentemperatur zwischen den verschiedenen Materialspezifikationen ausmachen lassen. Um fertigungsbedingte Unzulänglichkeiten oder Materialfehler und die damit etwaig verbundene Beeinflussung der Messergebnisse ausschließen zu können, wurden jeweils drei Probanden aus der gleichen Fertigungsladung diesem Testprozedere unterzogen. In einer weiteren Versuchsreihe sollte der Test beginnend mit 29,5 kN als initialer Radlast – auch in der Aufwärmphase – durchgeführt werden. Auf Basis der Bewertung der Ergebnisse aus der vorangegangenen Versuchsreihe bestand demnach kein Anhaltspunkt, dass für die hier in Rede stehenden Probanden eine Radlast von 29,5 kN als kritisch einzustufen wäre. Entgegen der Erwartung kam es jedoch bei allen getesteten Probanden bereits innerhalb dieser Laststufe zum Versagen infolge Überhitzung der Bandage in Form von Verflüssigung des Polyurethans, obgleich alle Probanden in der vorherigen Versuchsreihe im Grundversuch auch höhere Radlasten bewältigt hatten. Dieses Betriebsverhalten konnte durch entsprechende Anzahl an Versuchen ebenfalls reproduzierbar festgestellt werden. Exemplarisch für die Temperaturentwicklung in dieser Versuchskonstellation sei auf Abbildung 7 in Gestalt der Aufzeichnung der Oberflächentemperatur eines Probanden des Typs B verwiesen. Auffällig dabei ist, dass sich bereits in der Aufwärmphase, trotz der dabei reduzierten Fahrgeschwindigkeit, eine markant höhere Temperatur einstellte, als im Falle der 26,5 kN als initialer Last, vgl. Abbildung 6.

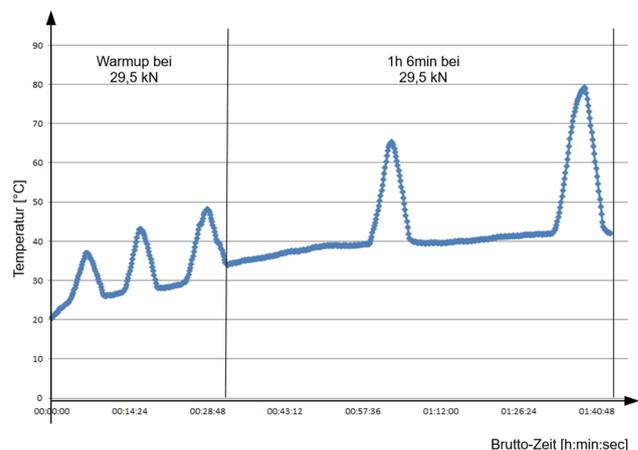


Abbildung 7. Temperaturmessschrieb der mittels Pyrometer ermittelten Oberflächentemperatur an einem Probanden des Typs B im Test mit initialer Last in Höhe von 29,5 kN.

Die resultierende Oberflächentemperatur nach 20 Minuten Aufwärmphase bei 29,5 kN und 10,8 km/h konstanter Fahrgeschwindigkeit reicht bei diesem Probanden zwar nicht ganz an jenes Niveau, welches im Grundversuch während der Zyklusfahrt bei 14 km/h unter Einwirkung der Beschleunigungs- und Bremskräfte ermittelt wurde, heran, jedoch wurde bei anderen Probanden dieses Niveau erreicht. Insofern ist in der Folge der Bewertung dieser Ergebnisse davon auszugehen, dass die insgesamt tolerierbare Radlast vom Vorzustand der Polyurethanbandage

abhängig ist, indem sich offenbar bei der erstmaligen Erwärmung aus dem kalten Zustand heraus Änderungen/Anpassungen des Werkstoffgefüges vollziehen und es von der zu diesem Zeitpunkt anliegenden Belastung abhängig ist, ob sich ein stabiler Betriebszustand einstellt. Für den vorliegend in Rede stehenden Versuch muss daher konstatiert werden, dass dies im Falle von 26,5 kN als Radlast gegeben ist, jedoch 29,5 kN als Startlast zur vollständigen Zerstörung der Bandage führt. Beachtlich ist hierbei, dass bei der hier gewählten Versuchskonstellation offenbar die einwirkende Normalkraft einen beträchtlichen Anteil an diesem Phänomen beizutragen scheint, unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit und der im dynamischen Fall während der Zyklusfahrt zusätzlich wirkenden Umfangskräfte. Somit scheint der Vor- und Gebrauchszustand einer Polyurethanbandage in Gestalt der initialen Erwärmung insbesondere eines neuen unbenutzten Rades erheblichen Einfluss auf dessen im weiteren Betrieb erzielbares Leistungsvermögen zu haben, da sich während der Aufwärmphase womöglich relevante strukturelle Änderungen der Materialeigenschaften vollziehen. Wie die Versuchsergebnisse zeigen, muss hinsichtlich des Gebrauchszustandes vor Testbeginn eine Differenzierung dahingehend erfolgen, ob die Polyurethanbandage zuvor bereits eine entsprechende Erwärmung erfahren hat, oder ob ein gänzlich ungebrauchter Zustand vorliegt. Dies legen Ergebnisse und Beobachtungen mit Probanden nahe, die bereits den Grundversuch absolvierten und im Versuch mit höherer Anfangslast eine längere Standzeit bis zum Versagen aufwiesen, als jene, die im Neuzustand diesem Test unterzogen wurden. Insofern kann von einer Konditionierung der Bandage während des Betriebs gesprochen werden, die womöglich ebenso wie Temperprozesse während des Herstellungsverfahrens Einfluss auf die Materialeigenschaften der Bandage nimmt.

3.2 ALTERUNGSEFFEKTE

Ein beachtlicher Effekt sowohl auf das Leistungsvermögen hinsichtlich Traglast und Geschwindigkeit aber auch auf das Verschleißverhalten konnte zudem in Verbindung mit lagerungsbedingter Alterung der Bandagen festgestellt werden. Hierfür wurde der hier vorgestellte Grundversuch mit den genannten Parametern sowohl mit neuen Rädern durchgeführt, als auch mit solchen, welche über 15 Monate hinweg bei normalen – saisonal bedingt schwankenden – Umgebungsbedingungen ohne Einwirkung direkter UV-Strahlung gelagert worden sind. Die Umgebungsbedingungen entsprechen somit denen, wie sie in einer nicht-klimatisierten Lagerhalle üblicherweise anzutreffen sind, bei der Temperatur und Luftfeuchtigkeit witterungs- und jahreszeitenbedingt einer natürlichen Schwankung unterliegen. Diejenigen Probanden, die vor der Nutzung eingelagert waren, zeigten im Versuch ein signifikant geringeres Leistungsvermögen indem das Versagen infolge Überschreitung der Grenztemperatur, welche zur Verflüssigung des Materials führt, bei einer niedrigeren Laststufe

eintrat, als bei den nicht zuvor gelagerten Probanden. Zudem konnte festgestellt werden, dass das Versagen auch durch dauerhaftes Fahren der dynamischen Zyklusintervalle ohne stufenweise Steigerung der Last bei konstant 26,5 kN hervorgerufen werden konnte. Eine grundlegende Abweichung war zudem auch im Verschleißverhalten der gelagerten Probanden dahingehend zu verzeichnen, als dass sich der Abrieb sowohl qualitativ als auch quantitativ unterschied. Während bei den nicht-gelagerten Probanden mit steigender Temperatur das Verschleißvolumen insgesamt anstieg und auch die Abriebrösel selbst in der Größe zunahm, war der Abrieb bei den gelagerten Probanden durchweg sehr feinmehlig und auch insgesamt sehr gering. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Standzeiten zwischen den zwei verschiedenen Probandentypen hinsichtlich deren Standzeit im Belastungstest konnten jedoch keine absolut vergleichbaren Messwerte generiert werden, so dass dies noch in gesonderten spezifischen Versuchen zu verifizieren ist und dieses Phänomen somit bislang lediglich eine im Zuge der Durchführung der Belastungstests gewonnene Beobachtung darstellt. Für die hier vorgestellten Ergebnisse ist insgesamt festzuhalten, dass es sich um erste Erkenntnisse handelt, die sich aus nicht spezifisch auf die Untersuchung dieser Fragestellungen konzipierten Versuchsreihen ergaben.

3.3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die hier vorgestellten Ergebnisse legen nahe, dass hinsichtlich des Leistungsvermögens von Polyurethanbandagen von Flurförderzeugrädern eine Abhängigkeit zur Belastung und Charakteristik der Einlaufphase aus dem kalten Zustand – insbesondere im ungebrauchten Neuzustand der Räder – besteht. Die dokumentierten Versuchsaufzeichnungen weisen darauf hin, dass sich trotz ausgeprägter Temperprozeduren im Herstellungsverfahren der Räder dennoch im Betrieb noch Änderungen des vernetzten Werkstoffgefüges dergestalt vollziehen, als dass sich trotz gleichbleibender Belastung die inneren Reibungsprozesse dahingehend verändern, dass ein geringerer Wärmeintrag infolge Walken generiert wird. Gleichermäßen konnten Auswirkungen auf das Leistungsvermögen, aber auch das Verschleißverhalten, in Abhängigkeit des Alters der Bandagen festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigen insofern weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich des Betriebsverhaltens von polymerwerkstoffbasierten Radbandagen auf. In diesem Kontext ist auch die Varianz der Materialausprägungen zu nennen, indem die hier gegenständlichen Schlussfolgerungen auf Beobachtungen innerhalb eines – wenn auch bzgl. der Materialspezifikationen breit gefächerten – begrenzten Testfeldes an Probanden beruhen. In einem nächsten Schritt sollen daher die im Zuge der hier gegenständlichen Versuche gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse in spezifisch darauf ausgerichteten Versuchsreihen vertieft werden und das Auftreten sowie die Ausprägung der detektierten Vorgänge unter Variation von Belastungsparametern und Einwirkdauer noch detaillierteren Untersuchungen unterzogen werden. Hier sind u.a. Fragen

gegenständlich, ob und inwieweit Korrelationen zwischen bestimmten Werkstoffspezifikationen mit dem lastabhängigen thermischen Einlaufverhalten sowie der Frage der Alterungsproblematik jeweils in Verbindung mit der dynamischen Belastbarkeit bestehen.

Literatur

- [WB11] Wehking, K.-H., Bruns, R. (2011). Inno-Rad - Erhöhung der Lebensdauer von Rädern und Rollen aus Polyurethan, Abschlussbericht. Stuttgart, Hamburg

Dr.-Ing. Matthias Hofmann, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart.

Adresse: Universität Stuttgart
Institut für Fördertechnik und Logistik
Holzgartenstraße 15 B, 70174 Stuttgart

Telefon: +49 711 685-83792, Fax: +49 711 685-83769
E-Mail: matthias.hofmann@ift.uni-stuttgart.de

Univ.- Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz, Leiter des Instituts für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart.

Adresse: Universität Stuttgart
Institut für Fördertechnik und Logistik
Holzgartenstraße 15 B, 70174 Stuttgart

Telefon: +49 711 685-83771, Fax: +49 711 685-83769
E-Mail: robert.schulz@ift.uni-stuttgart.de