

Rollverlust bei Drehmomentbeaufschlagung von Flurförderzeugrädern mit Polyurethan-Bandage

Dr.-Ing. Matthias Hofmann¹

Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart, Abteilung Maschinenentwicklung und Materialflussautomatisierung

Der Einsatz von Rädern und Rollen mit Vollmaterial-Laufbelägen aus Polyurethan im Einsatzbereich von Flurförderzeugen birgt ein anspruchsvolles Kollektiv hinsichtlich der Anforderungen, zugleich aber auch ein den Werkstoffeigenschaften geschuldetes komplexes Betriebsverhalten. Die Übertragung von Antriebs- und Lenkkraft, Traglastvermögen sowie Haltbarkeit im Hinblick auf Abrieb und Rissbildung sind zentrale Merkmale in der Anwendung. Nicht nur für den Energieverbrauch eines Flurförderzeugs, sondern auch in Bezug auf die Eigenerwärmung der Laufbeläge ist jedoch der Rollwiderstand bzw. Rollverlust maßgebend, da durch den Abrollvorgang bedingte Verformungsenergie teilweise dissipiert wird. Der Rollwiderstand ist eine der Laufrichtung entgegengesetzt wirkende mechanische Kraft. Die Rollverlusttheorie ist jedoch weitergehend, so dass anhand der Eigenerwärmung eine energetische Bilanzierung erfolgen kann. Während der Rollwiderstand am momentenfrei rollenden Rad gemessen wird, deuten Ergebnisse der Eigenerwärmung auf Basis eines dynamischen Fahrszenarios unter Bezugnahme der Rollwiderstandswerte auf weiteren Forschungsbedarf hin.

[Schlüsselwörter: Rollwiderstand, Rollverlust, Flurförderzeugräder, Polyurethanbandages]

The use of wheels and castors with solid polyurethane treads in industrial trucks poses a challenging combination of requirements, but also complex operating behaviour due to the material properties. The transmission of driving and steering forces, load capacity and durability in terms of abrasion and cracking are key features in this application. However, rolling resistance or rolling loss is decisive not only for the energy consumption of an industrial truck, but also in terms of the self-heating of the treads, as the deformation energy caused by the rolling process is partially dissipated. Rolling resistance is a mechanical force acting in the opposite direction

to the direction of travel. The theory of rolling loss goes further, allowing an energy balance on the basis of self-heating. While rolling resistance is measured on a torque-free rolling wheel, the results of self-heating based on a dynamic driving scenario with reference to rolling resistance values indicate that further research is needed.

[Keywords: Rolling resistance, rolling loss, industrial truck wheels, polyurethane tread]

1 Ausgangslage und Forschungsbedarf

Der Energieverbrauch eines Personenkraftwagens wird im Durchschnitt zu 20 bis 30% dem Rollwiderstand der Reifen zugeschrieben [1]. Da der Rollwiderstand von der Beladungssituation, der Geschwindigkeit und dem Reifeninnendruck, bei luftbefüllten Reifen [2], und somit variablen Größen im Betrieb abhängig ist, ergibt sich dementsprechend eine Spreizung des Wertebereichs im realen Anwendungsszenario. Wenngleich die Fahrgeschwindigkeiten von Flurförderzeugen deutlich niedriger sind, als bei PKW, so sind die abrollbedingten Energieverluste dennoch eine betriebsrelevante Größe, die sich in der Reichweiten- und Ladezyklen- bzw. Batteriekapazitätsbemessung niederschlägt. Im praktischen Betrieb macht sich der Rollwiderstand primär als eine der Bewegungs-/Rollrichtung entgegengesetzt wirkende Kraft bemerkbar, die es zur Fortbewegung zu überwinden gilt und entsprechend in der Antriebsauslegung neben u.a. Beschleunigungs- und Steigungswiderstand zu berücksichtigen ist. Da der Rollwiderstand primär aus der elastischen Verformung des Reifens bzw. des Laufbelags resultiert [3, 4, 5, 6], macht sich dieser auch in Gestalt einer Erwärmung infolge von Energiedissipation bemerkbar. Kommen an Rädern und Rollen von Flurförderzeugen Laufbeläge aus kompaktem Heißgießpolyurethan in Gestalt einer Vollmaterial-Bandage zum Einsatz, ist diese Eigen-

erwärmung auch in erheblichem Umfang für das Betriebs- und Fahrverhalten von Antriebsrädern und Lastrollen ausschlaggebend.

Mit zunehmender Bandagentemperatur sind Veränderungen der Werkstoffeigenschaften von Polyurethan verknüpft. Bei steigender Temperatur ist eine Abnahme der relevanten mechanischen Werkstoffkennwerte bzgl. Festigkeit, Weiterreißwiderstand und des E-Moduls der Polyurethanwerkstoffe zu verzeichnen. Es besteht insofern auch ein kausaler Zusammenhang zwischen der Einfederung/-Deformation des Bandagenquerschnitts in radialer Richtung unter der Einwirkung einer Radlast. Neben dem Einfluss von Umgebungsbedingungen, wie die ambiente Lufttemperatur und Temperatur des Fahrbahnnuntergrundes, besteht bereits durch das mechanische Belastungskollektiv eine direkte Korrelation zwischen mechanischem und thermischem Betriebsverhalten der Bandagen. Mit zunehmender Erwärmung der Bandage steigt deren Verformung im Latsch, so dass das Walken dadurch intensiviert wird und damit die Gefahr einer Überhitzung des Materials mit Verflüssigung respektive irreversibler Gefügeänderung einhergeht. Die Last und Fahrgeschwindigkeit sind daher aus Anwendungssicht die zwei primären Parameter, die im Ergebnis vom thermischen Betriebsverhalten limitiert werden, andererseits aber auch ursächlich dafür sind. Die Wahl der für den Anwendungsfall geeigneten Bandagenspezifikation, sowohl hinsichtlich der Materialität als auch der Geometrie, liegt somit im originären Interesse der Anwenderschaft, da die Umschlagleistung eines Flurförderzeugs unweigerlich mit der Leistungsfähigkeit der Räder und Rollen verknüpft ist und im Falle eines irregulären Ausfalls außerplanmäßige Wartungskosten und Ausfallzeiten entstehen. Insofern ist die Betrachtung des Rollwiderstands keineswegs nur aus dem Blickwinkel eines möglichen Energieeinsparpotentials im Betrieb eines Flurförderzeugs zu werten. Vielmehr ist der Zusammenhang in puncto Eigenerwärmung und thermischem Betriebsverhalten weitergehend auch hinsichtlich des erzielbaren Leistungsvermögens einer Bandage relevant. Insofern sind der Rollwiderstand und die damit verbundenen bzw. daraus resultierenden betriebsrelevanten Faktoren von zentraler Bedeutung für den praktischen Einsatz.

2 Rollwiderstand und Rollverlust

Der Rollwiderstand bezieht sich, aus der klassischen Anschauung heraus, auf die mechanisch messbare Widerstandskraft, die der Bewegungsrichtung entgegenwirkt. Gemessen wird diese entweder unter Laborbedingungen an Prüfständen oder mit entsprechenden Messvorrichtungen im Fahrversuch am drehmomentfrei rollenden Rad. Angaben zum Rollwiderstand beziehen sich folglich stets auf Messungen an einem frei rollenden Rad ohne Beaufschla-

gung durch Drehmoment. Da der Rollwiderstand gemäß der einschlägigen Definition eine verformungsabhängige Größe ist, verkörpert er quasi auch einen abstrakten Gradmesser für die Vergleichbarkeit der abrollbedingten Energieverluste von Radspezifikationen. Da die Energieverluste primär auf Hysterese zurückzuführen sind und die Verformungsenergie teilweise dissipiert wird [7], resultiert daraus eine Eigenerwärmung der Bandage ohne Zuführung von Wärmeenergie von außen. Somit stellt sich am Rad, also an der Bandage und infolge von Wärmeübertragung auch an der Felge, eine Übertemperatur ohne Zuführung externer Wärmeenergie ein. Die Erwärmung ist somit das Resultat von Verlusten, die infolge der Verformung des elastischen/viskoelastischen Laufbelags entstehen. Eine auf der Erwärmung basierende, weitergehende Theorie, geht auf Schuring [8] zurück, indem nicht nur auf die mechanisch messbare Widerstandskraft abgestellt wird, sondern die Energieverluste umfassender betrachtet werden. Schuring geht dabei auf den Rollverlust ein, der sich in Gestalt der als Erwärmung messbaren Umwandlung von mechanischer Energie äußert und führt den Terminus rolling loss ein. Dabei nimmt er auch Bezug auf Arbeiten von Holt und Wormeley [9], die aus den frühen 20er Jahren des 20. Jahrhunderts stammen. Dass dieser Ansatz auch Berücksichtigung in ISO 28580, in der die Messung des Rollwiderstandes von PKW, NKW und Bussen unter Laborbedingungen definiert wird, belegt indes die Relevanz des Ansatzes. Hier wird der Rollwiderstand als loss of energy (or energy consumption) per unit of distance travelled definiert und rückt somit den faktischen Energieverbrauch pro zurückgelegter Wegstreckeneinheit in den Fokus.

3 Grundlage der Versuchsreihe

Hofmann hat in [10] experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung des Rollwiderstandes an Flurförderzeugantriebsrädern mit Polyurethanbandage durchgeführt. Diese Versuchsreihen wurden im Hinblick auf die klassische Rollwiderstandstheorie und der damit verbundenen Korrelation aus Deformation und resultierendem Rollwiderstand durchgeführt. In Anlehnung an die einschlägigen Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Forschung und Entwicklung luftbefüllter Reifen für den Einsatz an Kraftfahrzeugen, fokussierten die Versuchsreihen auf die Auswirkungen des Härtegrades und der Deformation auf den Rollwiderstand im Rollversuch ohne Drehmoment. Für diese Untersuchungen diente ein Testfeld mit 13 unterschiedlichen Polyurethanspezifikationen. Die Räder mit der einheitlichen Abmessung 343 x 114 mm, was einer Standardabmessung für Gabelstapler entspricht, haben eine einheitliche Bandagendicke von 32 mm. Des Weiteren weisen alle Räder dieselbe Felgenausführung auf, so dass weder konstruktiv noch hinsichtlich des Werkstoffes dahingehende Unterschiede bestehen, die sich bezüglich der Wärmeleitung und Konvektion, und damit dem Temperaturverhalten der Bandage, bemerk-

bar machen würden, insbesondere im Hinblick auf die zu messende Oberflächentemperatur. Für den vergleichenden Test wurde ein Spektrum des Härtegrades der Bandagen zwischen 85° und 95° Shore A herangezogen, siehe Tabelle 1. Hinsichtlich der Versuchsdurchführung und der Prüfeinrichtung wird auf [10, 11] verwiesen.

Im Ergebnis stellt Hofmann bezüglich der Probandengruppe fest, dass trotz vergleichsweise hoher Verformungswerte nicht zwingend eine entsprechend vergleichsweise hohe Eigenerwärmung resultiert, vgl. Abbildung 1, und dass eine vergleichsweise geringe Härte bzw. hohe Verformung auch nicht dem Erzielen eines vorteilhaften Rollwiderstandes/-Bewegungswiderstandes entgegenstehen muss.

Ein weiteres beachtliches Ergebnis besteht darin, dass es Materialspezifikationen gibt, bei denen ein vergleichsweise hoher gemessener Bewegungswiderstand nicht in einer entsprechend hohen Eigenerwärmung mündet. Somit konnte weder eine Analogie bzgl. Härte und Deformation zu den einschlägigen Grundlagen der luftbefüllten Reifen festgestellt werden, noch ließ sich ein einheitliches Betriebsverhalten innerhalb des Testfeldes ausmachen. Insbesondere die Ergebnisse hinsichtlich des thermischen Betriebsverhaltens während des Rollversuchs bzw. der vorhergehenden Aufwärmphase eröffnen Forschungsbedarf, indem der in der Versuchskonstellation mechanisch messbare Bewegungswiderstand entkoppelt von der als Eigenerwärmung der Bandage messbaren Energiedissipation – und somit des energetischen Rollverlustes – zu sein scheint. Die Erwartung, dass sich ein vergleichsweise schlechter Bewegungswiderstand auch auf Seiten der Erwärmung infolge Energiedissipation niederschlägt, konnte in Hofmanns Untersuchungen nicht durchgängig bestätigt werden. Vielmehr zeichnet sich für eine Probandengruppe ein gänzlich konträres Bild ab. Beachtlich ist dabei, dass Probanden, die einen innerhalb des Testfeldes vergleichsweise geringen Härtegrad besitzen und dementsprechend beim Abrollen einer hohen radialen Verformung unterliegen, sowohl hinsichtlich des Bewegungswiderstandes als auch in puncto Erwärmung vorteilhafter gegenüber deutlich härteren Bandagenspezifikationen abschneiden. Dies stellt den Ausgangspunkt dar, das Versuchsszenario zu erweitern, um das thermische Betriebsverhalten auch im Hinblick auf die für Antriebsräder im realen Betrieb auftretenden Fahrsituationen unter dem Einfluss von Drehmomentbeaufschlagung zu untersuchen. Indem der Terminus *rolling loss* auf den Energieverbrauch pro zurückgelegter Wegeinheit abstellt, eröffnet dies auch Raum für den Ansatz, die Verluste qualitativ anhand der Eigenerwärmung in einem anwendungsnahen Fahrszenario zu ermitteln, anstatt in einem Versuchsablauf, der auf die Ermittlung des Rollwiderstandes bei freiem Rollen ohne Drehmomentbeaufschlagung ausgerichtet ist. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass die Übertragung von Umfangskräften eine höhere Verformung des Latsches zur Folge hat, als dies beim reinen Abrollen der Fall ist. Legt man die klassische verformungsbasierte Rollwiderstandstheorie zu Grunde, sollte sich unter Einwirkung von Drehmoment eine an-

hand der Erwärmung detektierbare Verlustleistung feststellen lassen, die qualitativ mit dem Verhalten der Probanden im Rollwiderstandsversuch und den Rollwiderstandswerten korreliert.

4 Dynamisches Fahrszenario mit Drehmomentbeaufschlagung

Als Fahrszenario wurde ein Fahrtspiel gewählt, das sich zur Erprobung von Antriebsrädern bereits in der Vergangenheit bewährt hat und Hofmann auch in [11] bereits verwendete. Die Radlast beträgt konstant 26,5 kN und das Fahrtspiel besteht aus einer Beschleunigungsphase aus dem Stand heraus auf eine maximale Endgeschwindigkeit von 14 km/h mit anschließender Konstantfahrt. Dieses Intervall, bestehend aus Beschleunigung und Konstantfahrt beträgt insgesamt zehn Sekunden, wobei die nominelle Antriebsbeschleunigung 3,5 m/s² beträgt. Der exakte Konstantfahrtanteil kann je nach de facto vorherrschenden Kraftschlussverhältnissen somit geringfügig variieren. Nach der Konstantfahrt folgt das Abbremsintervall bis zum Stillstand inklusive anschließender kurzer Verweildauer, wobei die Intervalldauer fünf Sekunden beträgt. Die nominelle Bremsbeschleunigung entspricht betragsmäßig der Antriebsbeschleunigung. Diese Abfolge, Dauer der Intervalle sowie die grundsätzliche Ausprägung des Belastungskollektivs hat sich in der Vergangenheit bereits dergestalt bewährt, dass realitätsnahe Fahrsituationen unter Laborbedingungen reproduzierbar nachgestellt werden, aber gleichzeitig keine auf die Versuchskonstellation zurückzuführende vorzeitige thermische Überlastung feststellbar ist. Vielmehr stellt sich bei entsprechender Leistungsfähigkeit der Probanden ein Beharrungszustand ein, so dass in einem Betriebsfenster operiert wird, in dem abrasiver Verschleiß zur Ablegereife des Rades führt. Eine durch Beschleunigungsvorgänge zu hohe Drehmomentbeaufschlagung würde infolge des Schlupfes in einer übermäßigen Erwärmung der Oberfläche der Bandage resultieren. Der Wärmeeintrag infolge äußerer Reibung im Rad-Bodenkontakt würde die Erwärmung der Bandage zu stark dahingehend beeinflussen, als dass eine Aussage hinsichtlich der abrollbedingten, und auf Walkvorgänge im Inneren der Bandage zurückzuführenden, Eigenerwärmung nicht mehr möglich ist.

Um die Effekte der äußeren und inneren Reibungsvorgänge anhand der Erwärmung zu erfassen, wird die Temperatur sowohl auf der Oberfläche der Bandage, als auch im Inneren gemessen. Hierfür wird in radialer Richtung mittig in der Bandage eine Bohrung mit drei Millimeter Durchmesser eingebracht, um mittels einer Sonde dort die Temperatur taktil zu messen. Die Oberflächentemperatur wird hingegen berührungslos mittels Thermokamera gemessen. Die Messung an der Oberfläche der Bandage zeigt insbesondere in der Anfangsphase des Versuchs dementsprechend lediglich moderate Temperaturen, wohingegen auch bereits

Proband Nr.:	Härtegrad [° Shore A]	Statische radiale Verformung bei 26,5 kN Radlast [mm]
Typ 1	93	1.8
Typ 2	92	2.5
Typ 3	95	1.6
Typ 4	90	3.4
Typ 5	92	3.1
Typ 6	95	2.6
Typ 7	95	1.2
Typ 8	85	3.4
Typ 9	94	1.6
Typ 10	92	1.8
Typ 11	90	1.8
Typ 12	90	2.0
Typ 13	94	1.2
[5pt]		

Tabelle 1: Übersicht der Probanden bzgl. Härtegrad und statischer Verformung.

in der Aufwärmphase im Inneren ein markanter Temperaturanstieg zu verzeichnen ist. Die Wahl der Belastungsparameter ist insofern valide. Die Versuchsdauer beträgt zwei Stunden. Aufgrund der Erfahrung aus vorherigen Versuchen mit dieser Raddimension, stellt sich nach dieser Zeit ein Beharrungszustand der Temperatur ein. So lange noch keine vollständige Erwärmung der Felge und Bandage erfolgt ist, beeinflusst die Wärmeübertragung den im Inneren der Bandage messbaren Absolutwert der Temperatur. Als Ausgangspunkt und Referenz für die Messungen dienen die von Hofmann in [10] vorgestellten Ergebnisse, bei denen sich im Rollversuch bezüglich des Betriebsverhaltens zwei Cluster innerhalb des Testfeldes identifizieren ließen, vgl. Abbildung 2.

5 Rollwiderstand der Testprobanden

Die Untersuchungen Hofmanns in [10] adressieren die Relation von Rollwiderstand zu Härtegrad der Polyurethanbandagen. In Cluster 1 ist ein Anstieg des an der Versuchseinrichtung messbaren Roll- bzw. Bewegungswiderstandes mit steigendem Härtegrad einhergehend zu verzeichnen. Die Innentemperatur in obigem Diagramm wurde nach 20 Minuten freiem Rollen bei konstant 3,0 m/s gemessen. In

Cluster 1 ist demnach erkennbar, dass mit höherem Härtegrad, wie z.B. bei den Probanden des Typs 1, zwar ein vergleichsweise höherer Rollwiderstand als bei z.B. bei Proband Nr. 5 resultiert, jedoch im Vergleich dazu, eine geringere Eigenerwärmung feststellbar ist. Die in Cluster 2 gebündelten Messergebnisse folgen ebenfalls diesem Muster, indem Typ 12 mit 90° Shore A die geringste und die Typen 6,7 und 13 mit 95° Shore A die höchsten Härtegrade in diesem Cluster aufweisen. Beachtlich an diesen Ergebnissen, die mit jeweils 3 Probanden eines Bandagentyps von Hofmann ermittelt wurden, ist die offensichtliche Korrelation zwischen dem gemessenen Roll- bzw. Bewegungswiderstand und der Eigenerwärmung, die sich konträr zur Annahme verhält, dass der Rollwiderstand ein Maß für die Verluste ist. Bezieht man dies auf die Temperaturentwicklung, ließe sich dies in Bezug auf das hier vorliegende Testfeld von Hofmann nicht bestätigen, so dass die Tests mit dem oben genannten dynamischen Fahrtspiel eine Erweiterung des Versuchsszenarios darstellen, mit dem Fokus, diese Korrelation näher zu untersuchen.

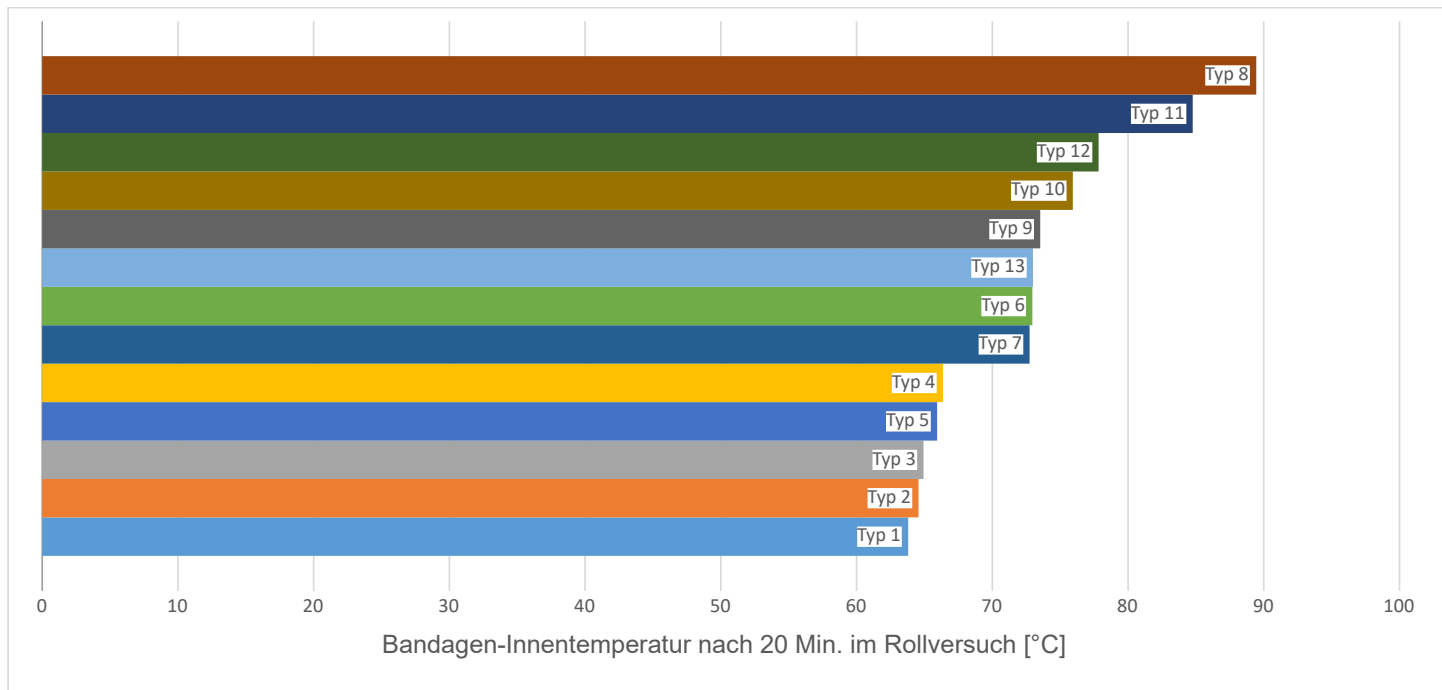


Abbildung 1: Gemessene Eigenerwärmung im Inneren der Bandage nach 20 Minuten Fahrtdauer im Rollversuch.

6 Resultate des dynamischen Versuchsszenarios

Die nach zwei Stunden Versuchsdauer detektierten Innentemperaturen sind in Abbildung 3 dargestellt. Wie bereits bei den Versuchen von Hofmann in [10] wurden jeweils drei Prüfläufe pro Probandentyp durchgeführt, so dass die im Diagramm ausgewiesenen Messwerte den Mittelwerten aus drei Messwerten/Prüfläufen entsprechen, obgleich zwischen den einzelnen Probanden eines Typs keine nennenswerte Streuung festzustellen ist. Bezieht man die Ergebnisse der Temperaturmessung auf die im Rollwiderstandsversuch ermittelten Werte des gemessenen Bewegungswiderstandes, siehe Abbildung 4, lassen sich die bereits in Abbildung 1 ersichtlichen Cluster ausmachen.

Für Cluster 1 ist bis auf Probandentyp Nr. 5 insgesamt festzustellen, dass das Ranking der resultierenden Innentemperatur qualitativ der Systematik folgt, dass mit einem – im vorliegenden Vergleichsumfeld – höheren Rollwiderstandswert auch eine höhere Erwärmung im dynamischen Versuch resultiert. Die niedrigsten Werte für die Eigenerwärmung weisen demnach die Bandagentypen 2 und 4 auf. Typ 5 stellt eine signifikante Ausnahme dar, indem diese Bandagenspezifikation ausweislich des Rollversuchs aus [10] zwar den geringsten Rollwiderstand aufweist, im dynamischen Versuch jedoch mit einer im Delta um ca. 7K höheren Eigenerwärmung deutlich hinter den Erwar-

tungen und den Typen 2 und 4 zurückbleibt. Beachtlich ist zudem, dass das Ranking der Temperatur in Bezug auf die Probanden 1, 3 und 5 im Vergleich zum momentenfreien Abrollen im Rollwiderstandsversuch umgekehrt ausfällt. Dies ist insofern beachtlich, als dass im Rollversuch die Situation dergestalt ist, dass mit höherem Härtegrad ein höherer Rollwiderstand, jedoch eine niedrigere Eigenerwärmung zu verzeichnen ist. Dies kehrt sich in Bezug auf die Probanden 1, 3 und 5 im dynamischen Versuch unter der Einwirkung von Drehmoment offensichtlich ins Gegenteil um. Insofern bestätigt für diese Probandengruppe der dynamische Versuch die erwartungsgemäße Annahme, dass sich vorteilhafte Rollwiderstandswerte in Gestalt einer geringeren Eigenerwärmung niederschlagen, so dass auch eine dahingehende Abstufung feststellbar ist und der als Kraft messbare Rollwiderstand als Indikator für die in Form von Eigenerwärmung resultierenden Energieverluste herangezogen werden kann. Gleichwohl lässt sich diese erwartungsgemäße Systematik innerhalb des Clusters 1 für den Typ 5 nicht bestätigen, indem dieser eine deutlich höhere Eigenerwärmung erreicht, als Probanden mit vergleichbarem Rollwiderstandsniveau.

Somit kann für Cluster 1 festgehalten werden, dass sich das qualitative Ranking der erzielten Rollwiderstandswerte bis auf eine Ausnahme auch im Ergebnis des

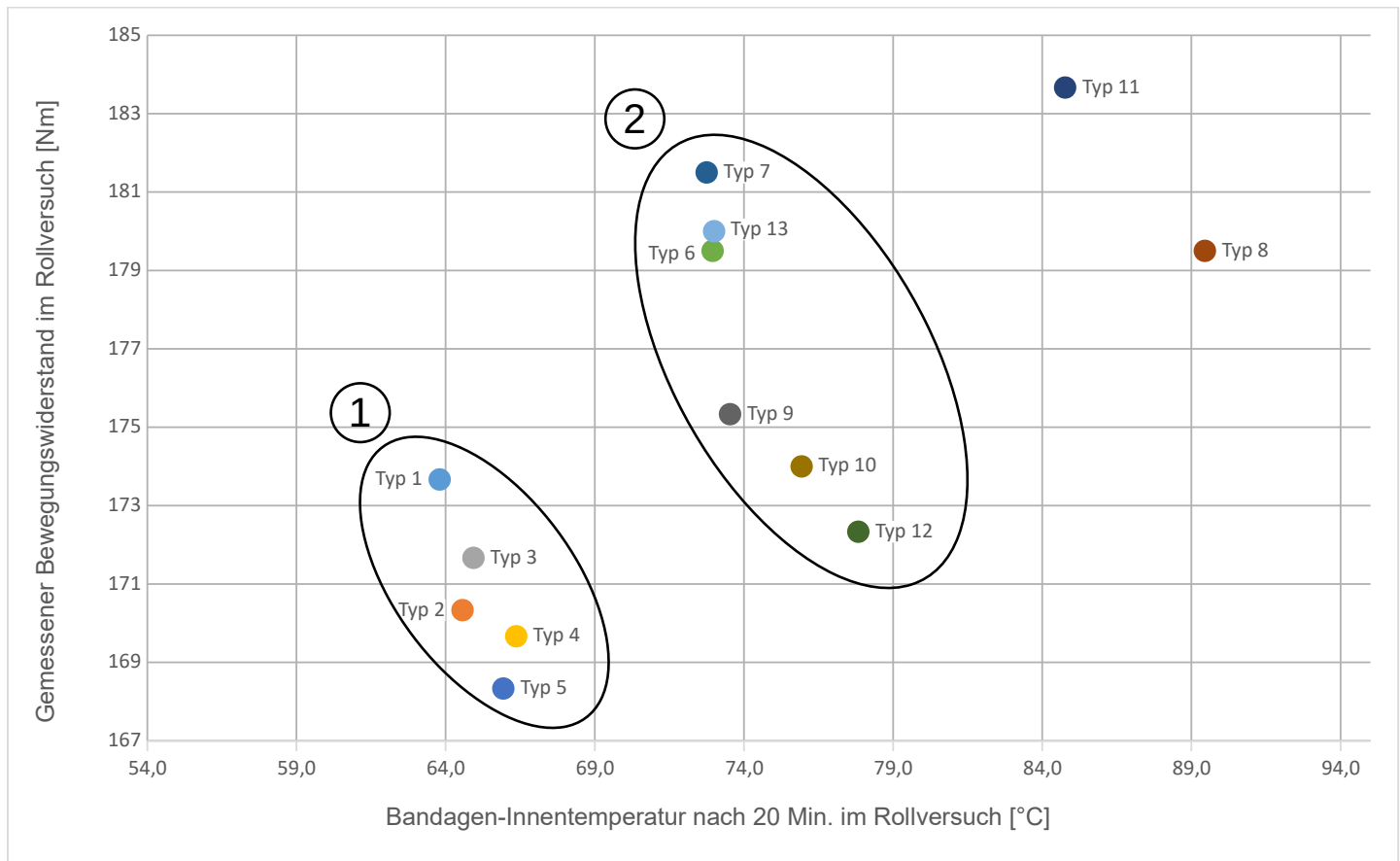


Abbildung 2: Gemessener Roll-/Bewegungswiderstand in Korrelation zur Innentemperatur der Bandage im Rollversuch mit den Clustern Ziff. 1 und Ziff. 2 nach 20 Minuten Versuchsdauer. [10]

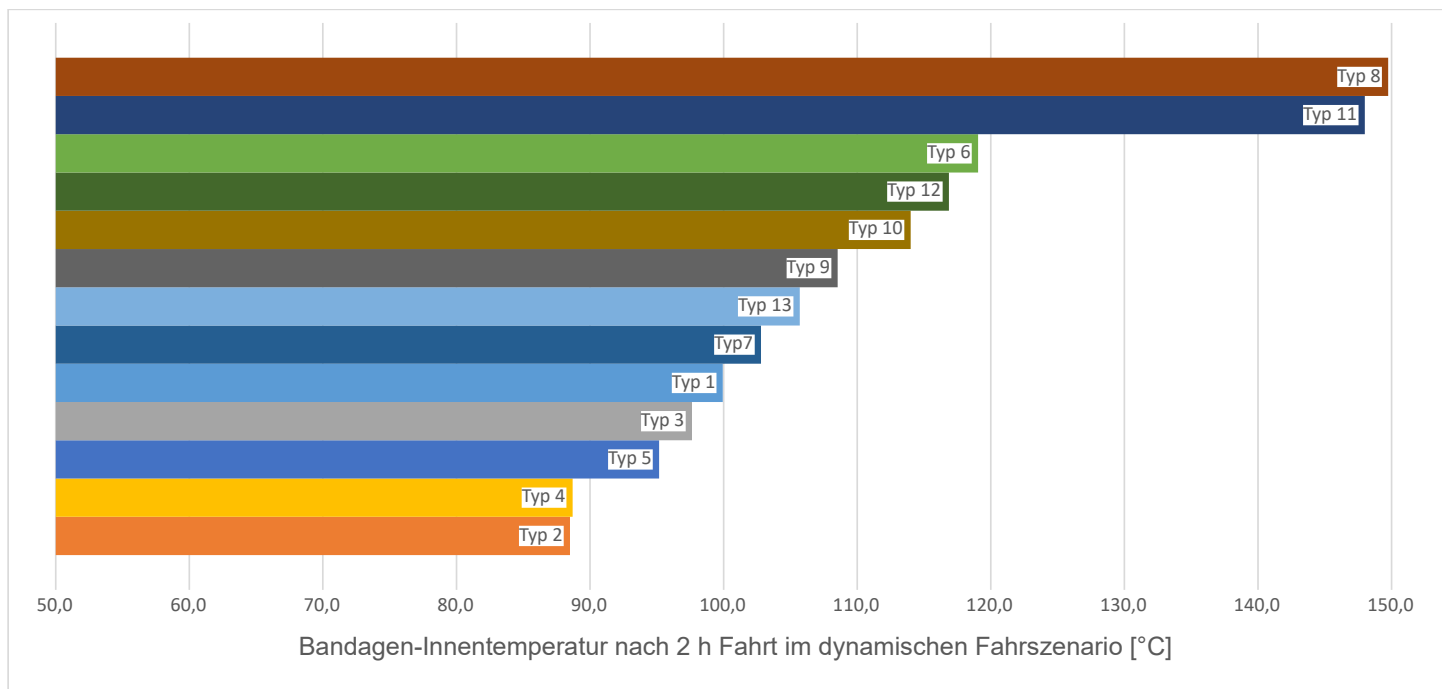


Abbildung 3: Gemessene Eigenerwärmung im Inneren der Bandage nach zwei Stunden Fahrtdauer im dynamischen Szenario mit Drehmomentbeaufschlagung.

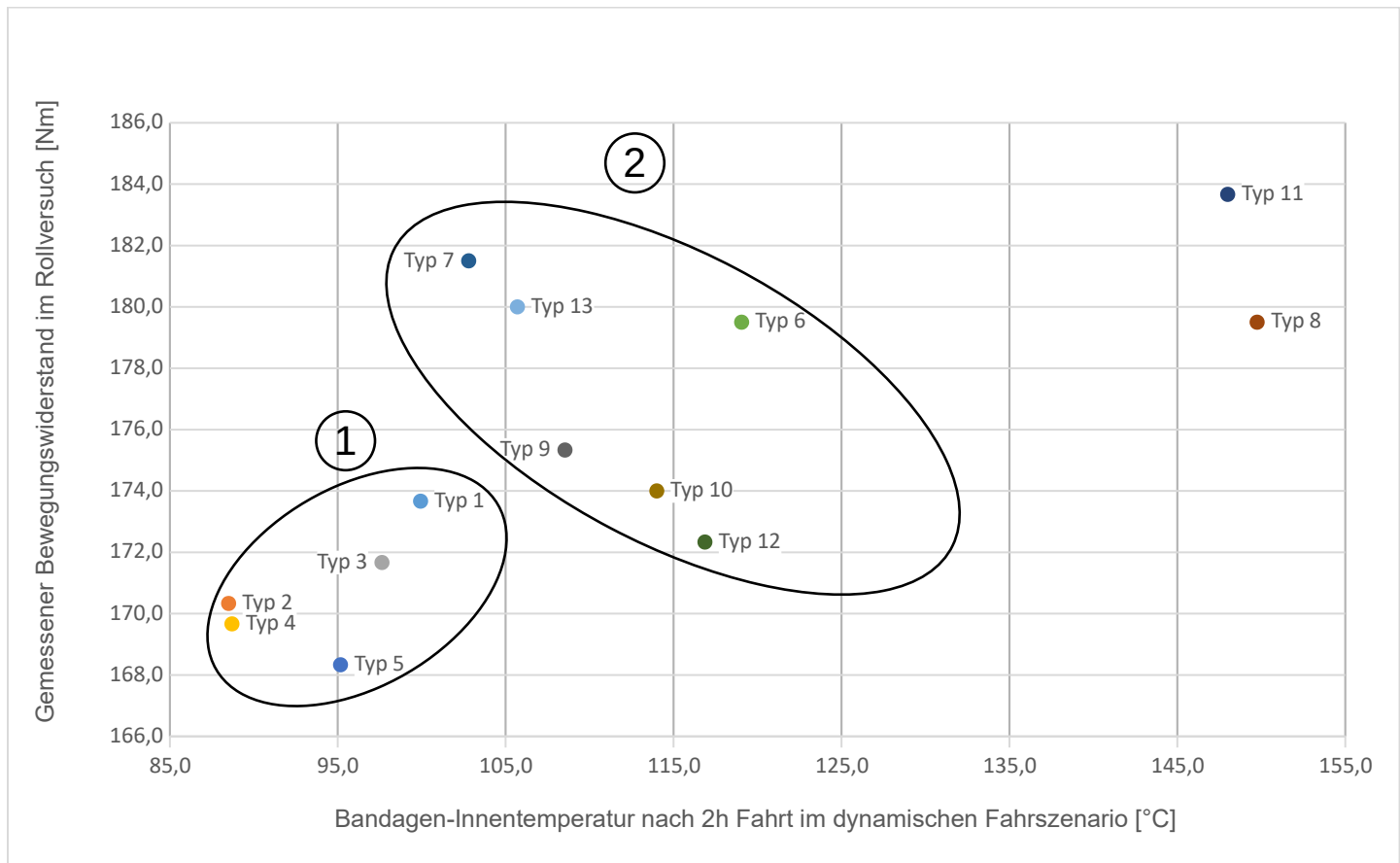


Abbildung 4: Gemessener Roll-/Bewegungswiderstand in Korrelation zur Innentemperatur der Bandage nach 2 Stunden Fahrzeit im dynamischen Versuchsszenario mit den Clustern Ziff. 1 und Ziff. 2.

Versuchsszenarios mit Drehmomentbeaufschlagung in Form der Erwärmung widerspiegelt. Für diese Probandengruppe kann somit der Rollwiderstandswert durchaus als Indikator für die Effizienz im Betrieb herangezogen werden. Fraglich bleibt hingegen das qualitativ konträre Erwärmungsverhalten der Typen 1, 3 und 5 im Vergleich zwischen Rollwiderstandsversuch und dynamischem Versuch unter Einwirkung von Drehmoment. Die Typen 1 und 3 zeigten im Rollwiderstandsversuch trotz ihres vergleichsweise hohen Rollwiderstandswerts dennoch die mitunter geringste Erwärmung innerhalb des Clusters Nr. 1. Für den Rollwiderstandsversuch gesprochen mag dies zwar noch bemerkenswert gewesen sein, dennoch bestätigen die Ergebnisse im dynamischen Versuch die Korrelation aus Rollwiderstand und Energieverlust. Vor diesem Hintergrund ist die unerwartet überproportional hohe Erwärmung von Typ 5 nicht nur als Ausreißer zu betrachten. Vielmehr drängen sich Forschungsfragen auf, die eine systematische Untersuchung erfordern. Eine Erklärung für das signifikant unvorteilhafte Erwärmungsverhalten lässt sich jedenfalls anhand der mittels des vorliegenden Versuchsaufbaus messbaren Parameter nicht ausmachen.

Fazit Cluster 1:

- Höherer Rollwiderstand führt auch zu höherer Erwärmung (Ausnahme Typ5). Die Typen 2 und 4 zeigen die geringsten Absoluttemperaturen nicht nur für Cluster 1, sondern auch global für das gesamte Testfeld gesprochen. Bei diesen zwei Spezifikationen ist somit keine qualitative Änderung des Betriebsverhaltens unter Drehmomenteinfluss im Vergleich zum freien Abrollen festzustellen.
- Bei den Typen 1, 3 und 5 verhält sich das Ranking der Erwärmung umgekehrt zum Rollwiderstandsversuch, bei dem mit zunehmender Härte zwar eine Zunahme des Rollwiderstandes zu verzeichnen war, sich die Erwärmung jedoch gegenläufig zum Rollwiderstand verhielt. Im dynamischen Versuch kehren sich diese Verhältnisse um.
- Die Auswirkungen des Einflusses von Drehmomentbeaufschlagung und der damit verbundenen Verformung, haben demnach unterschiedliche Auswirkungen auf die Probanden des Clusters 1 und lassen sich nicht verallgemeinert zusammenfassen.

Bis auf eine Ausnahme mit Typ 6 folgt das Cluster 2 der Systematik, dass sich ein vergleichsweise hoher Rollwiderstandswert gerade nicht in Gestalt einer höheren Eigenwärmerung niederschlägt, im Vergleich zu Probanden mit niedrigerem Rollwiderstand innerhalb dieses Clusters. Betrachtet man das Diagramm in Abbildung 3, ist ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Rollwiderstandswert und Innentemperatur zu verzeichnen, wie dies auch bereits im Rollwiderstandsversuch zu verzeichnen war, vgl.

Abbildung 2. Typ 6 ausgeklammert, weist dieses Cluster nach zwei Stunden im dynamischen Fahrscenario auch das identische Temperaturranking wie im Rollwiderstandsversuch auf. Somit bestätigen diese Versuchsergebnisse bis auf eine signifikante Ausnahme die im Rollversuch ermittelte Systematik, wonach diejenigen Probanden mit höherem Härtegrad eine niedrigere Eigenwärmerung zeigen, obgleich diese Probanden jedoch auch die höchsten Rollwiderstandswerte aufweisen. Insofern vermag diese Probandengruppe die Annahme der Kausalität zwischen Rollwiderstand und resultierender Erwärmung nicht zu bestätigen. Vielmehr bestätigen die Temperaturmessungen im dynamischen Versuch das bereits im Rollwiderstandsversuch beobachtete qualitative Temperaturverhalten des Clusters 2. Mit höherem Härtegrad ist somit zwar ein vergleichsweise höherer Rollwiderstand einhergehend, jedoch ist mit steigendem Härtegrad die Erwärmung eindeutig rückläufig. Somit ist für diese Probandengruppe auch festzuhalten, dass die grundsätzliche Systematik des Erwärmungsverhaltens weitestgehend unabhängig davon ist, ob die Bandagen lediglich frei rollen, oder unter Drehmomentbelastung betrieben werden.

Ein zudem beachtliches Ergebnis bzgl. des Betriebsverhaltens liefert innerhalb dieses Clusters der Probandentyp 6. Obgleich dieser Typ den gleichen Härtegrad und annähernd gleichen Rollwiderstand wie die Typen 7 und 13 aufweist, fällt das Temperaturdelta zu diesen Vergleichsprobanden mit 16 respektive 13 K unvorhersehbar hoch aus.

Fazit Cluster 2:

- Bis auf eine Ausnahme, in Gestalt von Typ 6, zeigen die Ergebnisse einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen Rollwiderstand und gemessener Innentemperatur dergestalt, dass mit höherem Härtegrad zwar ein größerer Rollwiderstand verbunden ist, sich jedoch die Temperaturentwicklung umgekehrt dazu verhält.
- Indem sich auch das Temperaturranking deckungsgleich zu jenem des Rollwiderstandsversuchs verhält, ist somit innerhalb des Clusters keine qualitative Veränderung des Betriebsverhaltens in Abhängigkeit von Drehmomentbeaufschlagung zu verzeichnen.
- Von einem vergleichsweise vorteilhaften mechanisch messbaren Rollwiderstand einer Bandagenspezifikation kann nicht auf eine geringe Erwärmung geschlossen werden. Rollwiderstand und energetischer Rollverlust sind, für die Probanden dieses Clusters gesprochen, somit eher unabhängig und stehen wider der Erwartung in keiner kausalen Beziehung.

Die Probanden der Typen 8 und 11 verhalten sich in puncto Temperaturentwicklung qualitativ ähnlich, wie im Rollwiderstandsversuch, indem deren absolute Erwärmung drastisch über der des restlichen Testfeldes liegt. Da diese Probanden jedoch hinsichtlich des Rollwiderstandes ähnliche Werte lieferten, wie 6, 7 und 13, ist das Temperaturverhalten umso beachtlicher und stellt die grundsätzliche Korrelation zwischen Energieverlust in Gestalt von Erwärmung und Rollwiderstand ebenso fundamental in Frage, wie die Ergebnisse des Clusters 2.

Im Ergebnis des dynamischen Fahrtests nach zwei Stunden Fahrtdauer unter Einwirkung von Drehmoment ist daher festzuhalten:

- Die geringste Erwärmung und Absoluttemperatur erreichen, global für das gesamte Testfeld betrachtet, diejenigen Probanden mit den geringsten Rollwiderstandswerten. Zudem resultierten bei diesen Probanden des Typs 2 und 4 bereits im Rollwiderstandsversuch die mit deutlichem Abstand geringsten Temperaturerhöhungen beim freien Abrollen, so dass sich unter Einwirkung von Drehmoment das Betriebsverhalten dieser Probanden qualitativ nicht ändert. Dies ist insoweit besonders beachtlich, als dass diese Probanden mit 90° bzw. 92° Shore A über einen vergleichsweise niedrigen Härtegrad verfügen und zudem hohe Verformungswerte unter Last aufweisen.
- Innerhalb des Testfeldes zeigen einzelne Probanden/Materialspezifikationen ein qualitativ analoges thermisches Betriebsverhalten wie bereits im Rollwiderstandsversuch. Im Hinblick auf die dort erzielten Widerstandswerte schneiden diese auch im Ranking relativ zu anderen Probanden bzgl. der Erwärmung im dynamischen Versuch entsprechend vorteilhaft ab. Ein vergleichsweise günstiger Rollwiderstand schlägt sich in einer entsprechend niedrigeren Erwärmung nieder. Eine grundsätzliche Beziehung zwischen Rollwiderstand und Erwärmung ist somit für diese Probanden zu bejahen.
- Demgegenüber erweisen sich im dynamischen Test Bandagenspezifikationen höheren Härtegrades innerhalb des Clusters 2 gegenüber anderen mit geringerer Härte und höherer Verformung hinsichtlich der Erwärmung als vorteilhaft, obgleich sie einen höheren Rollwiderstandswert aufweisen.
- Die Probanden der Spezifikationen Nr. 5 und 6 zeigen im dynamischen Test ein in Relation zu ihrer Vergleichsgruppe signifikant abweichendes Betriebsverhalten, unter Zugrundelegung der Ergebnisse des Rollwiderstandsversuchs. Insofern ist für diese Bandagenspezifikationen der Schluss naheliegend, dass deren Rollverlust qualitativ und quantita-

tiv davon abhängig ist, ob sie mit Drehmoment beaufschlagt werden oder momentenfrei abrollen.

7 Bewertung der Ergebnisse und Ausblick

Global, für das gesamte Testfeld an Probanden betrachtet, ist feststellbar, dass der dynamische Test in Analogie zum Rollwiderstandsversuch zwar qualitativ dieselbe Clusterbildung im Ergebnis hervorbringt, jedoch einige markante Verschiebungen feststellbar sind. Hier sind insbesondere die Probanden der Typen 5 und 6 zu nennen, die im dynamischen Versuch in Relation zu ihrer Vergleichsgruppe (Cluster) eine deutlich höhere Temperaturentwicklung zeigen. Im Cluster 1 kehren sich partiell, in Bezug auf die härteren Probanden der Typen 1 und 3, die Verhältnisse im Vergleich zum Rollwiderstandsversuch dergestalt um, dass im dynamischen Versuch der anhand der Erwärmung zu beziffernde Rollverlust bei größerem Härtegrad höher ausfällt.

Insgesamt ist demnach zu konstatieren, dass die im dynamischen Versuch erzielten Ergebnisse nur partiell eine Erweiterung und logische Konsequenz der im Rollversuch erzielten Rollwiderstandswerte und Erwärmungscharakteristika darstellen. Es lässt sich ebenso wenig eine einheitliche Aussage dahingehend treffen, inwieweit sich das Betriebsverhalten unter Einwirkung von Drehmoment im Vergleich zum freien Rollen ändert und inwieweit eine Korrelation von Materialität und den messbaren Parametern Härte und statischer Verformung zum thermischen Betriebsverhalten besteht. Da die Versuchsdauer im Rollwiderstandsversuch [10] lediglich 20 Minuten betrug, wurde nach Abschluss der vorliegenden Versuchsreihen noch mit einzelnen Probandentypen weitergehende Rollversuche mit einer Dauer von zwei Stunden durchgeführt, um in die Beharrungstemperatur zu kommen. Hierfür wurden erneut die Versuchsparmeter des Rollwiderstandsversuchs herangezogen, so dass bei konstanter Geschwindigkeit von 3 m/s und einer konstanten Radlast von 26,5 kN getestet wurde. Im Vergleich zum dynamischen Szenario erreichte der Typ 6 eine um fast 15 K geringere Temperatur im Inneren der Bandage. Auch bei Typ 10 fällt das Delta mit 15 K geringerer Erwärmung ebenso signifikant aus und zeigt, dass die Einflüsse der Drehmomentbelastung im dynamischen Fahrscenario signifikant sein können. Im Verhältnis dazu fällt bei Typ 7 das Delta mit 2,2 K geringerer Bandageninnentemperatur nach zwei Stunden konstanter Fahrt eher marginal aus, im Vergleich zum dynamischen Szenario. Demzufolge weist diese Bandagenspezifikation hinsichtlich des thermischen Betriebsverhaltens in puncto Rollverlust eine wesentlich geringere Abhängigkeit vom Belastungskollektiv auf. Demgegenüber stellt sich bei Typ 4 nach zwei Stunden Versuchsdauer bei freiem Abrollen mit den oben genannten Parametern eine um 6 K höhere Innentemperatur ein, als im dynamischen Szenario. Aufgrund mangelnder Anzahl zur

Verfügung stehender Probanden konnten diese Versuchsergebnisse nicht durch weitere Testläufe verifiziert werden und stellen demzufolge lediglich Stichproben dar. Auch ist nicht auszuschließen, dass bei dem Ergebnis von Typ 4 bereits alterungsbedingte Effekte zum Tragen kamen, auf die Hofmann bereits in [11] verwiesen hat.

Gleichwohl ist aus diesen stichprobenartigen Versuchen und den Versuchsreihen zum Rollverlust unter Drehmomentbeaufschlagung im dynamischen Fahrscenario weiterer Forschungsbedarf abzuleiten. Dies gilt einerseits im Hinblick auf die partielle Widersprüchlichkeit bei Betrachtung des mechanischen Rollwiderstandes und des in Gestalt der Erwärmung quantifizierten Rollverlustes, aber auch die Kausalitäten bzgl. der Ausprägungen der Bandagenmaterialien und der Betriebsparameter für das thermische Verhalten. Die im Rahmen der hier zur Verfügung stehenden, und messbaren, äußeren Parameter Härte und statische Verformung erscheinen unzureichend, um eine geschlossene These formulieren zu können. Vielmehr bedarf es weiterer Versuchsreihen, bei denen dezidiert die chemische Zusammensetzung von Materialspezifikationen und das resultierende Betriebsverhalten miteinander verknüpft betrachtet wird. Nur durch diese Verknüpfung wird es auch möglich sein, Auswirkungen von Materialalterung konkret anhand von Werkstoffparametern benennen zu können. Zudem wird es erforderlich sein, im Betrieb am rollenden Rad weitere Parameter zu messen. Hierzu zählen die Radaufstandskräfte im Latsch, die Pressung und deren Verteilung im Latsch sowie die dynamische Verformung und Rückstellkraft.

LITERATUR

- [1] H. Aldhufairi and O. Olatunbosun, “Developments in tyre design for lower rolling resistance: a state of the art review,” in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2017.
- [2] J. Ejsmont, S. Taryma, G. Ronowski *et al.*, “Influence of load and inflation pressure on the tyre rolling resistance,” in *International Journal of Automotive Technology*, vol. 17, 2016, pp. 237–244.
- [3] H. Lee, J. Cho, W. Jeong, and K. Kim, “Mesh generation and hysteretic loss prediction of 3-d periodic patterned tire,” in *International Journal of Automotive Technology*, vol. 15, no. 3, 2014, pp. 411–417.
- [4] G. Kunze, “Rollreibung der Paarung Plastlaufrolle–Stahlschiene,” in *Plaste und Kautschuk*, vol. 31, no. 11, 1984, pp. 427–430.
- [5] K. Knothe and G. Wang, “Zur Theorie der Rollreibung zylindrischer Kunststoffräder,” in *Konstruktion*, vol. 41, 1989, pp. 193–200.
- [6] F. Hiss, K. Knothe, and G. Wang, “Stationärer Rollkontakt für Walzen mit viskoelastischen Bandagen,” in *Konstruktion*, vol. 44, 1992, pp. 105–112.
- [7] D. Severin and X. Liu, “Roll- und Anfahrwiderstände von Rädern aus Polymerwerkstoffen,” in *Abschlussbericht Nr. Se 342/28 des DFG-Vorhabens 5173388*. Berlin, 2004, 30.12.2004.
- [8] D. Schuring, “A new look at the definition of tire rolling loss,” in *Proceedings of tire rolling losses and fuel economy – an R&D planning workshop*, Cambridge, MA, 1977, 18–20 October 1977.
- [9] W. Holt and P. Wormeley, “Power losses in automobile tires,” in *Technological Papers of the Bureau of Standards*, vol. 213, 1922, pp. 451–461.
- [10] M. Hofmann, “Rollwiderstand und Rollverlust von Flurförderzeugrädern mit Polyurethanbandage im Hinblick auf deren Härtegrad,” in *Logistics Journal: Proceedings*, vol. 20, 2024.
- [11] M. Hofmann and R. Schulz, “Running-in warmup effects of industrial truck wheels with polyurethane tread,” in *Logistics Journal: Proceedings*, vol. 19, 2023.

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