

Steuerungstechnik StG Georg Strotmann e.K.

49176 Hilter a. TW

in Kooperation mit

Technische Universität Dresden (TUD)

Professur für Agrarsystemtechnik

**Verbesserung der Umwelt beeinflussenden Bodenfaktoren
(Verdichtung, Wasserhaushalt, Ertragsoptimierung,
Schlupfminderung und Kraftstoffreduzierung) durch Integration
eines zu entwickelnden Radlastsensors in ein
Reifendruckregelsystem**

**Analyse von dynamischen Radlasten und resultierender
Bodenverdichtung im praktischen Einsatz
zur Auswahl und Anforderungsanalyse an die zu entwickelnden
Sensoren für eine Radlastbestimmung**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 35510/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von Georg Strotmann (StG) und Andi Günther (TUD)

September 2022

Inhaltsverzeichnis	
Verzeichnis von Abbildungen.....	II
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	IV
Zusammenfassung	V
1. Einleitung	1
2. Hauptteil	2
2.1. Stand der Wissenschaft und Technik (Literaturrecherche).....	2
2.2. Anforderungen an die Reifendruckverstelleinrichtung und die zugehörige Radlastsensorik (Pflichtenheft/Lastenheft).....	4
2.3. Auswahl verschiedener Messprinzipie an Felgen.....	6
2.4. Aufbau des Messsystems.....	8
2.4.1. Messtechnik im Rad.....	8
2.4.2. Weitere Versuchsmesstechnik	11
2.4.3. Datenübertragung per Funk	12
2.5. Prüfstandversuche.....	15
2.5.1. Photogrammetrisch Messungen	15
2.5.2. Sensorvergleiche im Prüfstand.....	16
2.6. Fahrten mit dem Messrad am Traktor	21
2.6.1. Versuche unter kontrollierten Bedingungen.....	21
2.6.2. Fahrten am Hang	27
2.6.3. Feldversuche unter Praxisbedingungen	30
2.7. Konzepte zum Aufbau der automatisierten Reifendruckverstelleinrichtung.....	32
3. Fazit.....	34
4. Literaturverzeichnis	35

Verzeichnis von Abbildungen

Abb. 1:	Wheeltag-Sensor von ZF und Maxion Wheels im Bett einer Felge (Maxxion Wheels, 2021)	3
Abb. 2:	Traktor mit Dehnungssensoren in den linken Felgen und Funkübertragern (Heinritz, 2021).....	7
Abb. 3:	Einteilung möglicher Messverfahren	8
Abb. 4:	DMS-Rosette mit Dehnungsstreifen in 3 Richtungen (vergrößert).....	9
Abb. 5:	Anordnung der Sensoren im Rad am Prüfstand (Ax – DMS im Außenbereich der Felge, lx – DMS im Innenbereich der Felge, NS – Näherungssensor).....	9
Abb. 6:	Messtechnik im Rad (Prüfstand)	10
Abb. 7:	Rotor und Stator des Winkelsensors.....	10
Abb. 8:	Schema des Datenflusses der Messtechnik am Traktor.....	11
Abb. 9:	links: Aufbau der Messtechnik im Rad am Traktor mit Drehmomentstütze des Winkelsensors, rechts Messtechnik in der Kabine	11
Abb. 10:	links: Messtraktor mit Bremstraktor und Zugstange rechts: Radlastwaage im Einsatz....	12
Abb. 11:	Sender-Empfänger-Funkübertragungssystem	13
Abb. 12:	Elektronik des Funkübertragungssystems.....	14
Abb. 13:	Komponenten des Funkübertragungssystems (links: Vorderansicht, rechts: Seitenansicht)	14
Abb. 14:	Felge unter Last im Prüfstand beim Abscannen.....	15
Abb. 15:	Schematische Darstellung der Verformung der Felge unter vertikaler Last	15
Abb. 16:	Dehnung für eine Sensorposition unter variierender Radlast über dem vollen Winkelumlauf.....	16
Abb. 17:	Dehnung für die Sensorposition A1 für drei verschiedene Reifeneinnendrucke.....	17
Abb. 18:	Kalibrationsbeispiel für einen Sensor anhand Delta-Wertes (Max – Min).....	18
Abb. 19:	Übersicht des zu erwartenden Messfehlers für alle Positionen für fünf Kalibrationsansätze.....	19
Abb. 20:	Beispiel für die Wirkung von Querkräften an einer Messposition.....	20
Abb. 21:	Traktor in unterschiedlichen Konfigurationen bei den Versuchen	21
Abb. 22:	Hohe Varianz des Signals bei tangentialer Sensorausrichtung	22
Abb. 23:	Hohe Präzision der Messungen mit dem Sensor in achsparalleler Ausrichtung.....	22
Abb. 24:	Darstellung der Streuung der Messwerte zwischen den einzelnen Radumdrehungen und des im folgenden verwendeten Mittelwertes.....	23
Abb. 25:	Fehler der Kalibrationen (Delta) der einzelnen Sensorpositionen.....	23

Abb. 26:	Fehler der Kalibrationen der kombinierten Sensorpositionen (achsparallel und tangential).....	24
Abb. 27:	Anwendung der ohne Zugkräfteinfluss entwickelten Kalibration auf Versuchsdaten mit Zugkraft.....	25
Abb. 28:	Validationsfehler bei Anwendung der ohne Zugkräfteinfluss errechneten Kalibration auf Versuche mit Zugkräfteinwirkung (Skalierung an Abb. 26 angepasst)	26
Abb. 29:	Abhängigkeit der Drehwinkellage des Dehnungsmaximums von der Zugkraft	27
Abb. 30:	Traktor am Hang in Schichtlinie	28
Abb. 31:	Vergleich der Dehnung am Beispiel der Position A2 (achsparallel) mit variierender Ausrichtung des Messrades	28
Abb. 32:	Delta bei jeweiliger Hangneigung und realer vertikaler Radlast.....	29
Abb. 33:	Versuchstraktor mit Saatbettkombination (links) und Wendepflug (rechts).....	30
Abb. 34:	Feldfahrt mit der Saatbettkombination	30
Abb. 35:	Feldfahrt mit Pflug: alle DMS-Messstellen	31
Abb. 36:	Feldfahrt mit Pflug: ausgewählte Messstelle: A5.....	32

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

CAN-Bus	Controller Area Network; serielles Bussystem mit einer Datenübertragungsgeschwindigkeit von bis zu 1 Mbit/s
CAN-Daten	Daten, die mittels CAN-Bus übertragen werden
CAN-Logger	Datenlogger: prozessorgesteuerte Speichereinheit, die Daten in einem bestimmten Rhythmus über eine Schnittstelle aufnimmt und auf einem Speichermedium ablegt; CAN-Logger: CAN-basierter Datenlogger
CAN-Port	Der Begriff „Port“ bezeichnet allgemein eine Schnittstelle. Ein CAN-Port ist somit eine Schnittstelle im CAN-Bus-System.
Delta-Wert	Differenz von Messgrößen
DMS	Dehn-Mess-Streifen
Post-Prozess	Nachbereitung und Aufbereitung einer Computersimulation
Wheeltag	Sensor der Unternehmen ZF (Friedrichshafen) und Maxion Wheels (Königswinter)

Zusammenfassung

In der Pflanzenproduktion stehen heute leistungseffiziente Traktoren und Großmaschinen zur Verfügung. Deren hohe Radlasten verbessern zwar die Traktionseffizienz, verdichten aber den Boden mit negativen Auswirkungen auf Pflanzenwachstum und Bodenwasserhaushalt.

Mit dem Ziel, Reifendruckregelsysteme mit Sensoren zur Ermittlung der dynamischen Radlasten zu entwickeln und in den Markt zu bringen, sieht das Konsortium einen praktikablen Weg, negative Effekte auf den Boden abzumildern.

Bei aktuellen Reifendruckregelanlagen wird die Radlast entweder geschätzt oder mit einer Brückenwaage bzw. Radlast-Waage erfasst.

Der Mangel an Sensoren erforderte eigene Untersuchungen zur Eignung verschiedener Sensorprinzipie, die im Rahmen des vorliegenden Projekts durchgeführt wurden. Aufgrund der einfachen Integrierbarkeit wurden Dehnungssensoren favorisiert. In umfangreichen Messreihen sowohl am Traktorrad im Prüfstand als auch auf dem Feld konnte nachgewiesen werden, dass die Messung von Verformungen an der Felge mittels Sensoren auf Basis von Dehnmessstreifen hinreichend genaue Rückschlüsse auf die Größe der Radlast zulässt. Durch eine permanente Erfassung der Radlast durch den Radlastsensor mit einer Genauigkeit von bis zu ca. +/-100 kg, wäre es möglich, den Luftdruck auf 0,02 bar genau entsprechend der technischen Daten (Reifendrucktabellen der Reifenhersteller) einzustellen.

In den Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass ein Druck-Verstellsystem mit DMS-Sensoren in der Felge innerhalb akzeptabler Zeit den optimalen Druck für konstante Arbeitsbedingungen ermitteln kann.

Es muss festgestellt werden, dass noch weitere notwendige Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten erforderlich sind:

- Alle bisherigen Ergebnisse sind nur an einer konkreten Felge belegt. Der Nachweis der Verallgemeinerbarkeit steht noch aus und bedarf weiterer Untersuchungen.
- Auf kurzzeitige große Schwankungen, wie bei Wendevorgängen, kann sowohl das Messsystem als auch das Verstellsystem nicht schnell genug reagieren. Hierzu sind mit noch zu entwickelnden „vorausschauenden Algorithmen“ besondere Betriebszustände zu erkennen und eine zusätzliche Intelligenz zu integrieren.

Erklärtes Ziel bleibt weiterhin, ein System zu schaffen, dass zu einer Reduzierung der Bodenverdichtungen und somit zu einer deutlichen Verbesserung des Wasserhaushalts sowie zur Ertragsoptimierung, Schlupfminderung sowie einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs führen wird.

1. Einleitung

In der Pflanzenproduktion stehen heute leistungseffiziente Traktoren und Großmaschinen zur Verfügung. Deren hohe Radlasten verbessern zwar die Traktionseffizienz, verdichten aber den Boden mit negativen Auswirkungen auf Pflanzenwachstum und Bodenwasserhaushalt.

Die Pflanzen wurzeln weniger tief, leiden in trockenen Jahren an Wassermangel und in regenreichen an Staunässe. Verdichtete Böden fördern Erosion und Hochwasser. Denn Niederschläge versickern weniger schnell, fließen deshalb in beträchtlichem Maß oberflächlich ab und reißen den Boden mit.

Ein niedriger Reifendruck bewirkt durch das Anwachsen der Kontaktfläche positive Effekte bei der Traktion durch Schlupfminderung und mit geringerer Bodenverdichtung günstigeres Pflanzenwachstum und bessere Regulierung des Wasserhaushaltes (Verdunstung und Speicherfähigkeit). Allerdings kann der Reifendruck nicht beliebig abgesenkt werden, ohne dass es zu Schäden an den teuren Reifen kommt. Um die Bodenschonung zu fördern, ohne den Reifen bei Änderungen der dynamischen Radlast durch Reaktionskräfte der Geräte, Antriebsmoment und Hangeinfluss zu schädigen, ist es folglich notwendig, den Reifeninnendruck kontinuierlich entsprechend der dynamisch auftretenden Lasten und Momente an die jeweiligen Einsatzbedingungen anzupassen.

Mit dem Ziel, Reifendruckregelsysteme mit Sensoren zur Ermittlung der dynamischen Radlasten zu entwickeln und in den Markt zu bringen, sieht das Konsortium einen praktikablen Weg, negative Effekte auf den Boden abzumildern. Mit derartigen Systemen können die beschriebenen Bodenverdichtungen und die damit einhergehenden negativen Folgen für die Umwelt bei gleichzeitiger Gewährleistung sicherer Fahrten schwerer Landmaschinen auf der Straße reduziert werden - ohne Nachteile für die Lebensdauer Reifen. Die Lebensdauer kann sogar erhöht werden, wenn kein Kompromissdruck mehr gefahren wird.

Der Antragsteller hat sich gemeinsam mit seinem Kooperationspartner das Ziel gesetzt, einen Radlastsensor in ein Reifendruckregelsystem zu integrieren. Im Rahmen des hier berichteten Vorprojektes wird die technisch-physikalische Machbarkeit des Konzeptansatzes überprüft. Im Fokus stehen Messverfahren, um innerhalb der Felge anhand deren Verformung unter Last auf die angreifenden Kräfte schließen zu können.

2. Hauptteil

2.1. Stand der Wissenschaft und Technik (Literaturrecherche)

Die Gefahr der schädigenden Verdichtung des Bodens durch Maschinen auf dem Feld wird seit Anbeginn der Mechanisierung der Feldwirtschaft diskutiert. Dazu wurden verschiedenste Untersuchungen durchgeführt und es gibt unzählige wissenschaftliche Veröffentlichungen, auf die hier im Detail nicht weiter eingegangen werden soll. Die Schlussfolgerung ist einleuchtend: hohe Radlasten verdichten den Boden: in Abhängigkeit von seinem aktuellen Zustand mehr und tiefer, je höher die Last ist. Aktuelle Maschinenkonzepte sind nicht darauf ausgelegt, die Radlasten zu verringern, weil andere Vorteile der schlagkräftigen Maschinen überwiegen. Deshalb ist ein praktikabler Weg, den Reifeninnendruck möglichst weit abzusenken, um wenigsten den Kontaktflächendruck zu senken (Bolling, 1987; Pohen, 2009; Uppenkamp et al., 2009; Geischeder, 2011; Volk, 2012; Michelin Reifenwerke AG & Co. KGaA, 2013; Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, 2022; Würfel et al., 2022).

An Straßenfahrzeugen wird die Rad- oder Achslast häufig in Federungssystem gemessen. Landmaschinen sind äußerst selten vollgedert, so dass dieser Ansatz entfällt. In wissenschaftlichen Untersuchungen mit anderen Fragestellungen wurden Radlasten mittels Dehnungen am Rahmen oder Chassis bestimmt (Mariutti, 2003). Oder es wurden spezielle Messräder gebaut, um die Kräfte in Rahmen von Forschungsprojekten im Feld zu ermitteln (Späth, 2004). Inzwischen gibt es neben Messrädern für PKW auch große Räder für Landmaschinen mit entsprechenden Kräften, die allerdings das Budget des aktuellen Projektes weit überschreiten (Fa. Kistler, 2014). Alle diese Lösungen eignen sich nicht für die Serienproduktion oder zur Nachrüstung.

Außerhalb der Felge wurden an der TU Braunschweig mit ähnlicher Zielstellung die Spannungen in den Steckachsen eines Traktors als Messgröße ausgewählt, um auf die Radlasten zu schließen (Peeters et al., 2018; Wieckhorst, 2019).

Direkt die Verformung des Reifens zu als Messgröße zu nutzen, ist ein weiterer Ansatz. Aktuell verfolgt das Thünen-Institut als Initiator des Projekts mit dem Reifen- und Räderhändler Grasdorf GmbH, der Fa. TerraCare als Hersteller für Reifendruckregelanlagen und Steyr Traktoren diesen Ansatz (Deter, 2020). An der Universität in Pretoria, Südafrika, wurden Kräfte direkt im Reifen gemessen (Pegram et al., 2021)

Mangels extern finanzierter Projekte wurden die Arbeiten zur Entwicklung von bodenschonenden Fahrwerken an der Professur für Agrarsystemtechnik seit 15 Jahren vor allem durch studentische

Arbeiten vorangetrieben. Erste Überlegungen zur Nutzung der Felgenverformung als Messgröße zur Bestimmung der Radlast an der TU Dresden wurden von Kochanek (2010) niedergeschrieben. Die Arbeiten wurden von Küttner (2012), Xu (2015), (He, 2017), Mengqi (2019), Heinritz (2021) und weiteren Studenten fortgesetzt.

Theoretische Untersuchungen zum Verformungsverhalten von Landmaschinenfelgen sind nur wenige veröffentlicht. In der Diplomarbeit von Krinke (2010) stand die Dauerfestigkeit im Fokus. Xu (2015) hat im Rahmen seiner Diplomarbeit die Struktur einer Felge im Vergleich zu den Prüfstanduntersuchungen nachgebildet. Dabei wurden Abweichungen zwischen der Simulation und den Versuchen festgestellt. Diese können möglicherweise mit einem anderen Ansatz zur Krafteinleitung vom Reifen in die Felge eliminiert werden. Im Rahmen der Projektbearbeitung sind deshalb an der TU Dresden weitere Diplomarbeitsthemen ausgeschrieben worden, um die mechanische Struktur von Felgen im Wirkkomplex mit Reifen zu simulieren, um mit weniger Aufwand im Vergleich zum praktischen Versuch verschiedene Felgen- und Reifendimensionen beurteilen zu können. Leider fanden sich erst gegen Ende der Projektlaufzeit Studenten zur Bearbeitung. Die Arbeiten liegen erst Anfang 2023 vor.

Das online-Tool Terranimo unterstützt Landwirte bei der Abschätzung der Befahrbarkeit ihrer Böden und empfehlen maximale Radlasten und minimale Reifeninnendrucke (Berner Fachhochschule, 2022). Dieses System hat die Fa. Claas in ihre Traktoren übernommen und angepasst, so dass der Fahrer auf der Maschine den Einsatz optimieren kann (Claas KgaA, 2022). Mit dem Ansatz, Beratungssysteme für den Anwender bereitzustellen, arbeiten auch andere (Fa. Farmnet365, 2022; Fa. Rauch, 2022).

Direkt zum Anbau an Felgen hat die Firma ZF als großer Zulieferer für die PKW- und Nutzfahrzeugindustrie ein Sensorsystem vorgestellt, das in Zusammenarbeit mit dem Felgenhersteller Maxion Wheels aus Königswinter entwickelt wurde (Maxion Wheels, 2021).



Abb. 1: Wheeltag-Sensor von ZF und Maxion Wheels im Bett einer Felge (Maxxion Wheels, 2021)

Der Aufbau des Sensors ist patentrechtlich geschützt (Brunner, 2018). Aufgrund der möglichen Ähnlichkeit des Sensors mit dem von den Projektpartnern angestrebten Sensorkonzept wurde zu ZF Kontakt aufgenommen. Die Gespräche zeigten, dass es bisher nur wenige Prototypen gibt. Der Wunsch, Sensoren zum Testen zu erhalten, konnte nicht erfüllt werden. Die Zielstellung des Wheeltags weichen von denen der Projektpartner ab, so dass der Sensor, wie er existiert, nicht die gewünschten Parameter liefern kann. Auf beiden Seiten besteht aber grundsätzliches Interesse an einer Zusammenarbeit. Der Austausch von Geheimhaltungsvereinbarungen läuft.

Es existiert derzeit keine Automatisierungslösung zur Regelung des Reifeninnendrucks unter Berücksichtigung der dynamischen Radlast und der Fahrgeschwindigkeit sowie des Zugkraftbedarfs. Die Ursache hierfür ist das Fehlen praxistauglicher und robuster Sensorik zur Bestimmung der dynamischen Radlast.

2.2. Anforderungen an die Reifendruckverstelleinrichtung und die zugehörige Radlastsensorik (Pflichtenheft/Lastenheft)

Die Anforderung an den zu entwickelnden Radlastsensor betreffen verschiedene Faktoren. Er sollte eine Genauigkeit von ca. +/-100 kg aufweisen. Bei aktuellen Reifendruckregelanlagen wird die Radlast entweder geschätzt oder mit einer Brückenwaage bzw. Radlast-Waage erfasst. Dabei ist zu beachten, dass je nach Reifentyp eine Abweichung in der Schätzung von 500 kg eher schon im Reifensolldruck zu einer Abweichung von 0,1 bar kommen kann. Siehe in der folgenden Beispieldabelle für den auszuwählenden Reifendruck, aus einem technischen Ratgeber eines Reifenherstellers.

Tab. 1: Reifentabelle

		Tragfähigkeit (kg) pro Reifen bei Reifenfülldruck (bar)								
km/h	bar	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	1,9
10		2 820	3 870	4 285	4 700	5 110	5 525	5 940	6 355	6 560
30		2 200	3 040	3 370	3 695	4 025	4 350	4 680		
40			2 840	3 150	3 455	3 765	4 070	4 380		
50			2 640	2 910	3 185	3 455	3 730	4 000		

Oder der Reifen wird bei der Schätzung des Reifendrucks, zum Beispiel bei einer Fehleinschätzung von 0,1 bar bereits mit 500 kg überlastet oder in anderer Richtung wird mit zu hohem Luftdruck gefahren. Zudem können sich Radlasten im Feld durch Beladung mit Erntegut oder Entladung von

zum Beispiel Düngemitteln und Flüssigkeiten enorm verändern. Da hilft eine vorherige Schätzung oder Verwiegung relativ wenig, da es auch nur ein Kompromiss ist. Somit ist es wichtig die Radlast permanent sehr genau zu kennen und den Reifendruck anhand der Radlast permanent aktiv einzustellen. Wird eine Reifendruckregelanlage jedoch bereits mit einem Kompromiss eingesetzt, kann der Nutzer aktuell schon mindestens 10 % Diesel, im Vergleich zum Betrieb ohne Reifendruckregelanlage sparen. Durch eine permanente Anpassung des Reifendrucks mittels der permanenten Radlast-Erfassung auf das stetige Optimum des minimalen Reifendrucks, könnten je nach Umfang weitere 2-3 % Diesel eingespart und der Bodendruck noch weiter minimiert werden. Ist der Boden nicht verdichtet, kann der Wasserhaushalt wesentlich leichter reguliert werden. Niederschläge können an Ort und Stelle leichter in den Boden bis hin zum Grundwasser versickern und Pflanzenwurzeln können auch in Dürrezeiten leichter durch das lockere Porenvolumen an das im tiefen Boden oder Grundwasser eingelagerte Wasser gelangen.

Mit aktueller Technik kann man den Reifendruck in 5-6 Sekunden um 0,1 bar absenken. Zum Befüllen von vier Standard-Traktorreifen um 0,1 bar bräuchte man mit einem Bremsenkompressor ca. 60 Sekunden. Mit einem hydraulisch angetriebenen Zusatzkompressor wäre eine Befüllung um 0,1 bar, je nach Kompressorleistung (3600 – 5800 Liter/Minute) möglich. Ein Traktor, der mit 6 km/h im Feld arbeitet, legt pro Sekunde 1,67 Meter Strecke zurück. Damit die aktuelle Leistung der Reifendruckregelanlage überhaupt die Möglichkeit hat den Reifendruck entsprechend zu verstellen, sollte in einem Raster von 10 m der Sollwert mit dem Radlast Sensor verändert werden. Man könnte nun annehmen, dass der Kompressor öfter läuft und somit mehr Energie verbraucht. Es ist so, dass die Reifen ohne den Radlastsensor einmal vom Feld-auf den Straßendruck befüllt werden. Mit dem Radlastsensor würde das in Etappen passieren, was aber nicht mehr Energieeinsatz für den Kompressor bedeuten würde. Lediglich bei Fahrten am Hang und dem Wechsel der Fahrtrichtung und beim Wenden im Vorgewende, könnte es zu zusätzlichen Kompressorlaufzeiten kommen, jedoch ist der Ertrag aus Bodenschonung, durch den niedrigeren, genaueren Reifendruck und die Dieselerparnis bei der Zugarbeit höher zu bewerten.

Weitere Anforderungen für die Entwicklung eines solchen Radlastsensors sind zum einen, dass sie sich einfach in der Nachrüstung und auch in der Serie von außen an der Felge montieren lassen. Zudem müssen verschiedene, stabile Gehäuseformen des Sensors für verschiedene Reifen- und Felgendimensionen hergestellt werden. Um Kosten für ein solches System in einem akzeptablen Bereich zu halten, sollte der Sensor so ausgestattet sein, dass man möglichst nur mit einem Sensor auf der Außen- und Innenseite der Felge auskommt. Der Sensor muss so konstruiert werden, dass er nicht nur an Traktoren sondern auch an Anhängern, verschiedenen selbstfahrenden Erntemaschinen, sowie radbereiften Sondermaschinen, wie zum Beispiel Drillmaschinen montiert werden kann. Zudem muss ein Drehwinkelsensor die Position des Sensors in der Felge erfassen, damit die Daten der Dehnungsmessstreifen (DMS) permanent mit einem Algorithmus berechnet werden können. Der

Drehwinkelsensor sollte dann bereits mit in den Drehübertrager für die Druckluft der Reifendruckregelanlage integriert sein. Des Weiteren muss das System so aufgebaut sein, dass die Stromversorgung für die Messtechnik in der Felge gewährleistet werden kann, was bisher noch nicht entwickelt und getestet wurde. Hier könnten ebenfalls Schleifringe in den Dreh übertrage montiert werden oder berührungslose Energy-Harvesting aus der Drehbewegung des Rades generiert werden. Die Datenübertragung der Radlast und des Drehwinkels sollte per Funkstrecke aus dem Rad zur Steuerung übertragen werden. Alle Baugruppen sollten möglichst wartungsfrei gehalten sein.

Der Radlast-Sensor muss sich jederzeit sehr einfach vom Nutzer kalibrieren lassen. Besonders, wenn die Räder auf verschiedenen Maschinen genutzt werden. Der Radlast Sensor, muss elektronisch eine ID übertragen. Das erspart die Neukalibrierung, wenn die Räder nach einem Wechsel wieder auf dem Traktor montiert werden. Die kalibrierten Werte sind der Steuerung nach der ersten Kalibrierung bekannt und werden gespeichert. So können diese Werte für unterschiedliche Reifen, mittels der ID und somit der Raderkennung, immer wieder aus dem Speicher abgerufen werden. Für die Kalibrierung ist angedacht, dass der Nutzer mehrfach mit verschiedenen Ballastierungen die genaue Radlast zum Beispiel mit einer Brücken- oder Radlastwaage als Referenz misst und die Werte dann jeweils in der Steuerung unter dem Menüpunkt Kalibrierung eingibt und speichert. Die Steuerung selbst speichert parallel die Werte der Radlast Sensoren in den Algorithmus und berechnet die Radlast anhand der Referenz von den Messergebnissen der Brücken- oder Radlastwaage.

Der Endkunde ist der langjährigen Erfahrung nach bereit, für ein solches System für vier Räder aktuell einen Aufpreis von ca. 2000 € zu bezahlen. Somit sollten die Herstellkosten in einen Bereich von maximal 600-800 € pro Fahrzeug mit vier Rädern kommen.

2.3. Auswahl verschiedener Messprinzipie an Felgen

Der Mangel an Sensoren erfordert eigene Untersuchungen zur Eignung verschiedener Sensorprinzipie. Aufgrund der einfachen Integrierbarkeit wurden Dehnungssensoren favorisiert. In einer ersten Arbeit wurden eigenentwickelte Dehnungsaufnehmer getestet (Mengqi, 2019). Diese werden an der Felge angeschraubt. In Fortführung des Gedankens wurde dann ein Messsystem zur Übermittlung der Messdaten aus dem drehenden Rad zusammen mit kommerziellen Dehnungssensoren der Fa. ME-Messsysteme beschafft und das linke Vorder- und Hinterrad eines Traktors damit ausgerüstet. Der Aufbau des Systems, die Versuchsplanung und –durchführung als auch die Auswertung erfolgten im Rahmen von Diplomarbeiten (Heinritz, 2021; Wei, 2021).

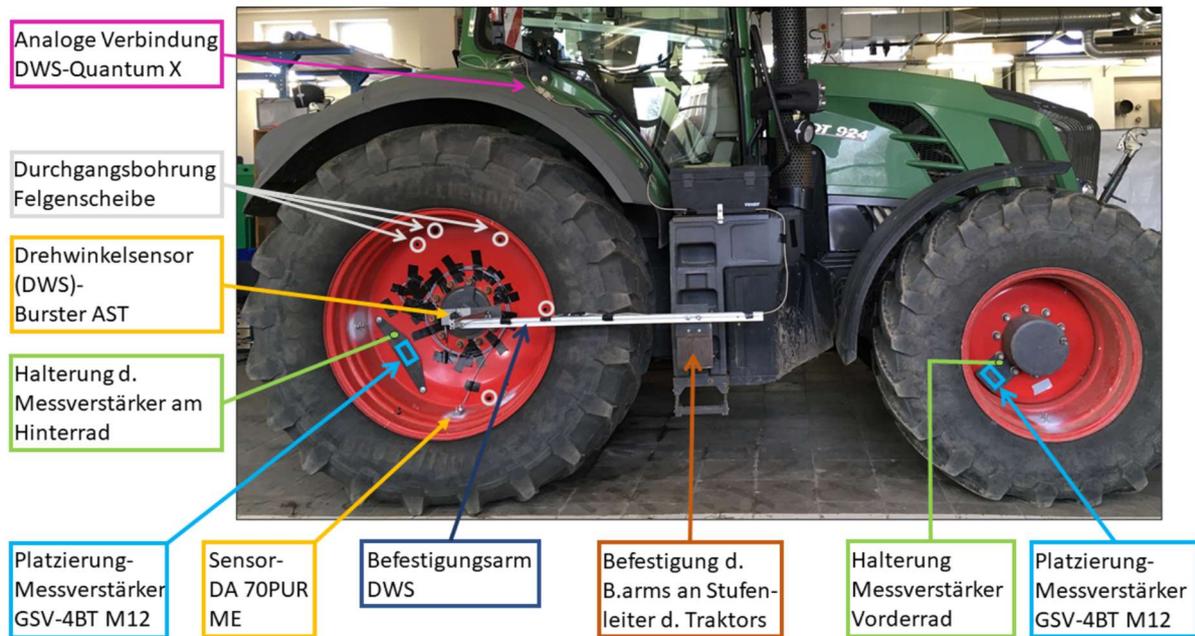


Abb. 2: Traktor mit Dehnungssensoren in den linken Felgen und Funkübertragern (Heinritz, 2021)

Es zeigte sich aber, dass die Verformungsstruktur der Felge im Bereich des Anbringensortes durch den Sensor selbst zu sehr versteift wird und die Messausschläge auf 10 % im Vergleich zu den in Vorgängerprojekten durchgeführten Prüfstandsversuchen mit direkt applizierten Dehnungsmesstreifen reduziert werden.

Bisherige Messungen an der Professur für Agrarsystemtechnik inklusive derer von Heinritz verdeutlichten, dass die Felge trotz ihres einfachen Aufbaus ein komplexes Verformungsverhalten im Zusammenspiel mit den Reifen zeigt. Zum besseren Verständnis der Felgenstruktur sind deshalb kontrollierbare Versuchsbedingungen von Vorteil.

Folgendes systematisches Vorgehen erfolgte bei der Evaluierung von Sensorprinzipien:

- 1) Messungen im Prüfstand
- 2) kontrollierte Messfahrten mit einem Traktor
- 3) Messungen bei der Feldarbeit

Grundsätzlich kann sowohl die lokale Dehnung als auch die globale Verformung der Felge Informationen über die Kräfte enthalten. Mögliche Szenarien enthält die Abb. 3.

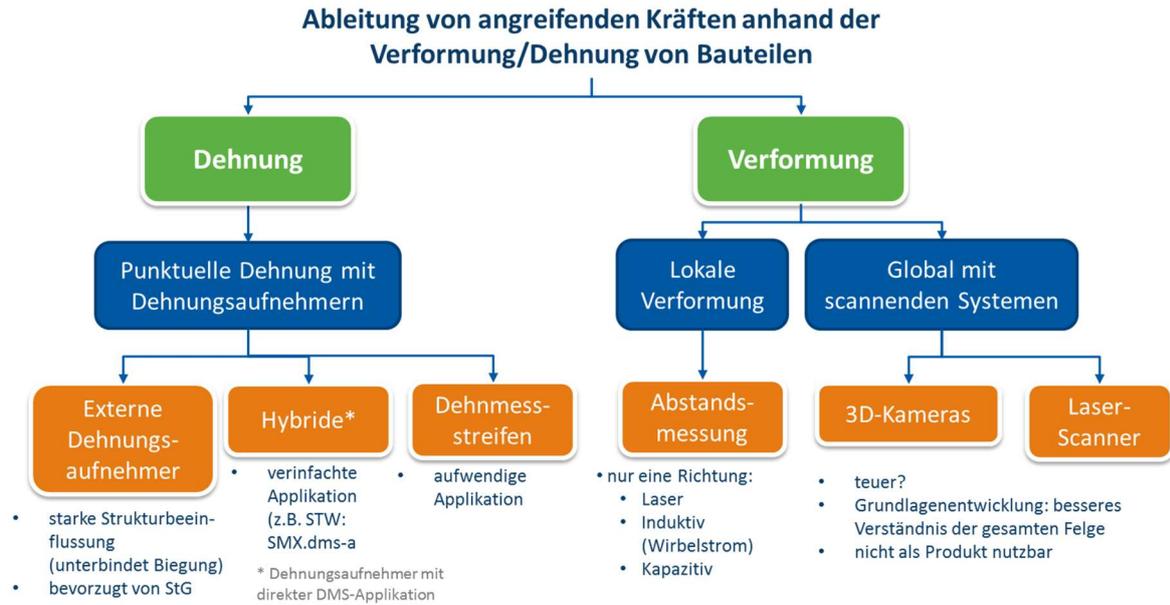


Abb. 3: Einteilung möglicher Messverfahren

Als grundsätzlich geeignet wurden folgende Messprinzipie ausgewählt, die aufgebaut werden sollen:

- Direkt applizierte Dehnmessstreifen zur ungestörten Erfassung der lokalen Dehnung
- Induktive Näherungssensoren zur Messung der globalen Verformung der Felgen relativ zum Fahrzeugrahmen
- Laserabstandssensoren zur Bestimmung der globalen Verformung
- (Photogrammetrische Messungen zur Gesamtverformung im Prüfstand)

2.4. Aufbau des Messsystems

2.4.1. Messtechnik im Rad

Alle Messungen finden nur an einem Rad statt: Hinterrad Fendt Vario 824 (180 kW):

- Reifen: Trelleborg TM900 710/70R42 (173D) (Profil weitestgehend abgefahren)
- Felge: DW23Bx42

Die Messtechnik wird weitestgehend mit dem Rad verbunden, um den einfachen Einsatz im Prüfstand und am Traktor zu gewährleisten. Die Sensorversorgung und Digitalisierung der Sensorwerte erfolgt mittels QuantumX (Universalmessverstärker der Fa. HBM), die im Zentrum des Rades mit drehen. Am Prüfstand erfolgt die Versorgung der Technik im Rad und die Datenübertragung mittels langer Kabel, die sich beim Drehen des Rades verdrillen.

Dehnmessstreifen sind Rosetten vom Typ 1-RY91-3/350 des Herstellers HBM mit einer Gitterlänge von 3 mm. Damit können an exakt ein und derselben Klebestelle Dehnungen in 3 Richtungen (0° , 45° , 90°) aufgenommen werden.

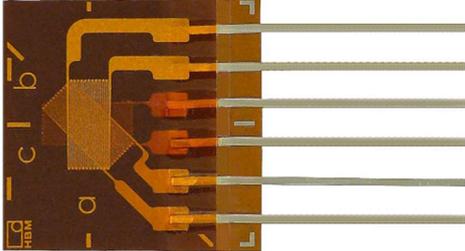


Abb. 4: DMS-Rosette mit Dehnungsstreifen in 3 Richtungen (vergrößert)

Für die Versuche wurden in der Felge erst mal nur die DMS unter 90° angeschlossen. Eine Rosette (A7) wurde an der Felgenschleife nahe des Schraubflansches appliziert, weil dort die größten Kräfte auftreten und entsprechend des Materials große Dehnungen zu erwarten sind. Hier wurden alle 3 Richtungen angeschlossen. Es wurden insgesamt 12 Positionen appliziert. Durch die beiden Richtungen: tangential und achsparallel (+ der dritten bei A7) ergeben sich 25 Messkanäle.

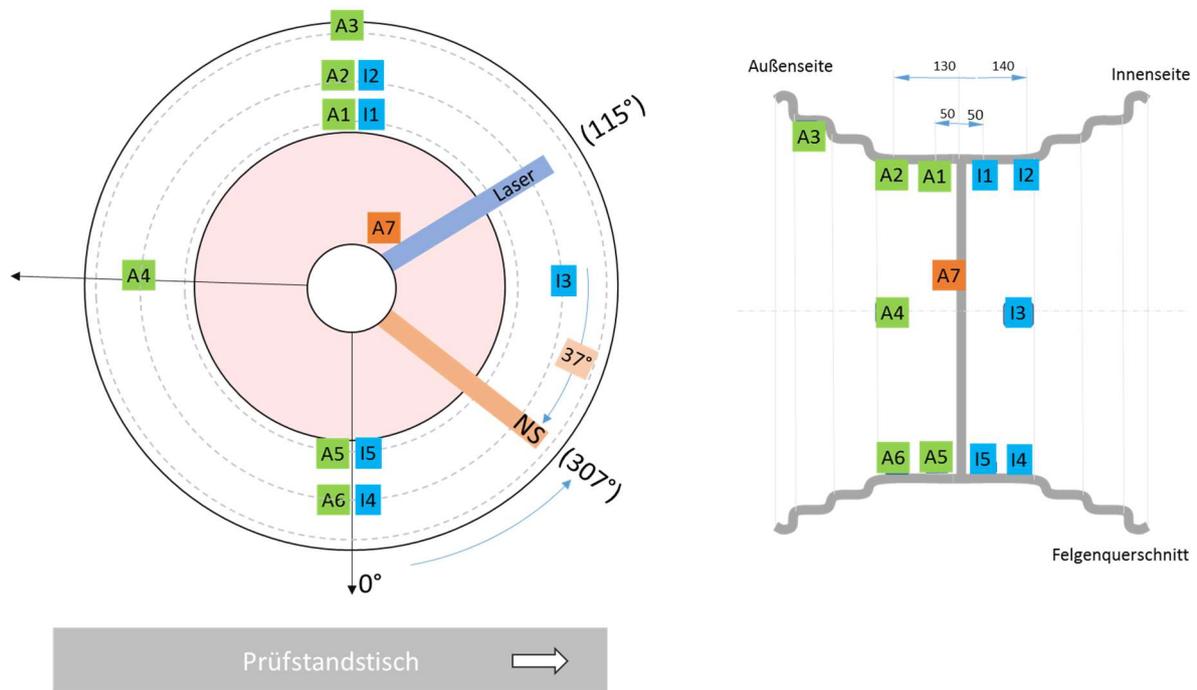


Abb. 5: Anordnung der Sensoren im Rad am Prüfstand (Ax – DMS im Außenbereich der Felge, Ix – DMS im Innenbereich der Felge, NS – Näherungssensor)

Um nur die Dehnungen aufgrund mechanischer Spannungen zu messen und thermische Dehnungen zu kompensieren, wurden alle DMS jeweils mit einem weiteren DMS zu einer Halbbrücke

ergänzt, die auf einer unbelasteten Metallplatte appliziert wurden. Diese Platte wurde mit im Zentrum des Rades befestigt.



Abb. 6: Messtechnik im Rad (Prüfstand)

Im Prüfstand laufen der Lasersensor und der Näherungssensor mit dem Rad um. Weiterhin kommt ein berührungslos arbeitender Winkelsensor zum Einsatz, um den Drehwinkel des Rades und damit die aktuelle Position der Sensoren zu erfassen.

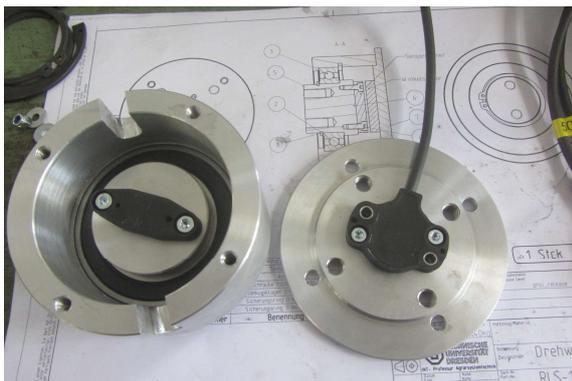


Abb. 7: Rotor und Stator des Winkelsensors

Am Traktor entfällt die stationäre Energieversorgung und Datenkommunikation. Die Versorgung der Technik im Rad erfolgt mit einem Akku (zwei im Wechsel, Betriebsdauer ca. 1 h). Zur Datenübertragung wurde von STG eine Funkstrecke aufgebaut (siehe Kapitel: 2.4.3). Diese war nicht in der Lage, die gesamte Datenmenge zu übertragen, so dass nur eine CAN-Botschaft zur späteren Synchronisation der Daten vom Rad und vom Traktor übertragen wurde. Die Hauptmenge der Daten wurde von einem zusätzlich installierten CAN-Logger, der ebenfalls mitdreht, gespeichert.

Vorzugsvariante: CAN-Hard- und Software

Signalsynchronisation mit dem drehenden Rad:
 - Telemetrie (StG Steuerungstechnik)

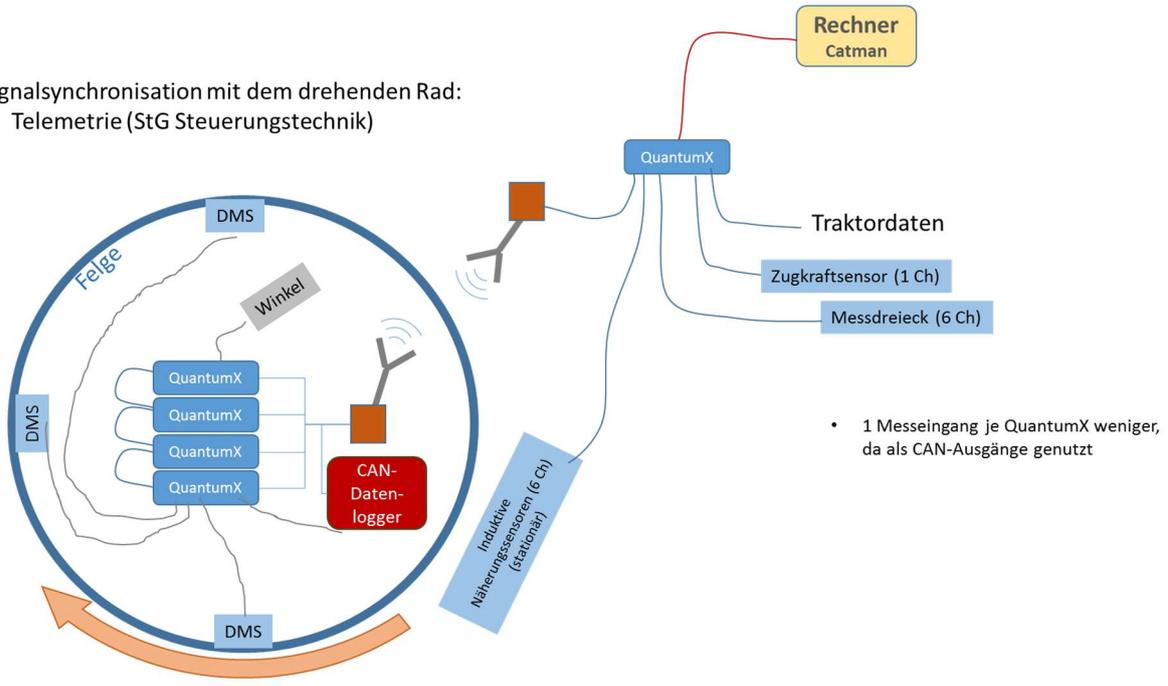


Abb. 8: Schema des Datenflusses der Messtechnik am Traktor

Die Näherungssensoren wurden im Bauraum zwischen Getriebe und Rad befestigt und an drei Winkeln (horizontal nach hinten, vertikal nach unten und vertikal nach oben) ausgerichtet. Jeweils ein Sensor ist achsparallel zur Radscheibe ausgerichtet, der andere radial zur Felge.



Abb. 9: links: Aufbau der Messtechnik im Rad am Traktor mit Drehmomentstütze des Winkelsensors, rechts Messtechnik in der Kabine

2.4.2. Weitere Versuchsmesstechnik

Zugkräfte wurden durch einen Bremstraktor gezielt eingeleitet. Dazu war in die Zugstange ein Zugkraftaufnehmer integriert (Abb. 10 links).

Die Messung der jeweiligen Radlast erfolgte statisch mit Radlastwaagen (Abb. 10 rechts).



**Abb. 10: links: Messtraktor mit Bremstraktor und Zugstange
rechts: Radlastwaage im Einsatz**

Im Feld kam weiterhin bei einem Teil der Versuche das Messdreieck der Professur für Agrarsystemtechnik zum Einsatz, um die zusätzlich vom Gerät eingeleiteten Kräfte zu ermitteln.

2.4.3. Datenübertragung per Funk

Um die Daten der im Rad rotierenden Systeme mit denen vom Traktor und den Sensoren im Reifen zu synchronisieren, wurden diese per Funkstrecke in die Traktorkabine übertragen. Dazu geben die Messverstärker der DMS im Rad alle Werte auf einen CAN-Bus.

Das Funksystem arbeitet mit einer Frequenz von 868 MHz und zwei Controllern mit je einem CAN-Port für den Sender und Empfänger. Der Sender ist innerhalb der Felge angebracht und empfängt die Daten vom CAN-Bus. Das Messsystem in der drehenden Felge wurde im Versuchsaufbau mit Strom aus einem auswechselbaren Akku versorgt. Die CAN-Daten vom Messverstärker werden vom im Sender befindlichen Controller empfangen und an den Funksenderpuffer des Funkmoduls übergeben und per Funk gesendet. Der Empfänger registriert die eintreffenden Funkdaten und schreibt diese direkt in den CAN-Puffer seines Controllers. Der Empfänger wurde in der Traktor-Kabine platziert und überträgt die CAN-Daten an das Mess-Laptop zur weiteren Auswertung.

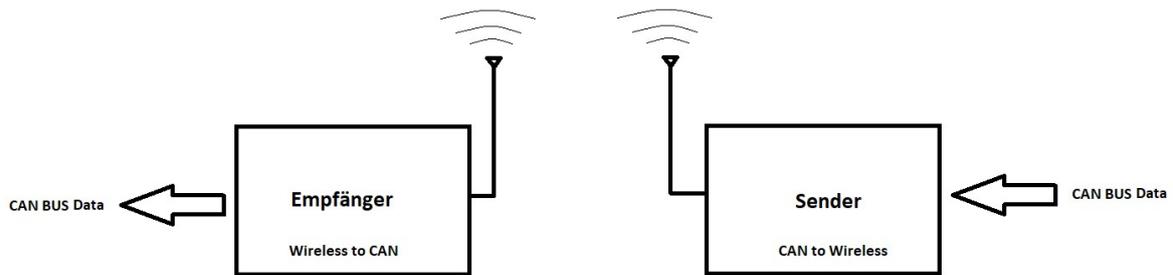


Abb. 11: Sender-Empfänger-Funkübertragungssystem

Tab. 2: Spezifikation des Funkübertragungssystems

Power Supply	Sender: 5VDC Empfänger: 9-18VDC (5V internal Isoliert Ausgang)
Power	360 mW max.
CAN-BUS-Data rate	250 kbps
Funk Carrier Frequency	868 mHZ
RF Output power	+12 dBm
RF Receiver sensitivity	-130 dBm
Gehäuse Abmessung (LxBxH)	122x120x57 mm
Processor	STM32F302R8T6 in NUCLEO-64 Board F302

Das Gerät arbeitet Plug-and-Play (nach dem Anschließen der Stromversorgung, Antenne und CAN-Kabeln ist es zum Senden und Empfangen der Daten bereit). LEDs am Sender und Empfänger zeigen den Betriebsstatus an.

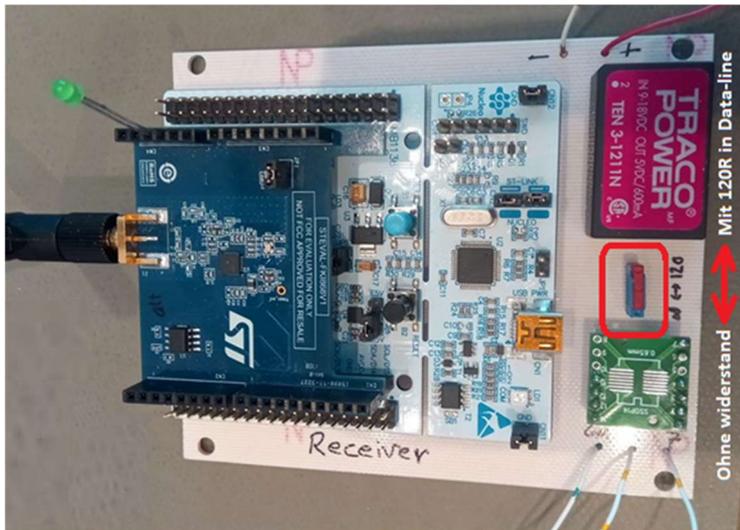


Abb. 12: Elektronik des Funkübertragungssystems

Während der ersten Inbetriebnahme zeigte sich, dass das System nicht die gesamte Datenmenge übertragen kann. Es wurde entschieden, dann die wichtigsten Daten im Sendepuffer zu bündeln und dann nur ein Signal mit den gesamten Daten sicher zu übertragen, als jede Botschaft einzeln zeitaufwendig zu senden. Die Daten wurden dann auch zur Synchronisation benutzt für die Daten im externen CAN-Logger. Für die verbleibenden Daten, die nicht per Funkstrecke übertragen werden konnten, wurde ein CAN-Logger in der Felge angebaut, der die Daten permanent lokal speichert. Die Daten mussten dann bei der Auswertung aufwendig im Post-Prozess zusammengeführt werden



**Abb. 13: Komponenten des Funkübertragungssystems
(links: Vorderansicht, rechts: Seitenansicht)**

2.5. Prüfstandversuche

Der Prüfstand wird hydraulisch gesteuert und kann vertikale Radlasten bis 16 t aufbringen. Der Tisch unter dem Rad ist längs und quer verfahrbar. Im Prüfstand wird die Referenzkraft in Kilonewton gemessen.

2.5.1. Photogrammetrisch Messungen

Mit Hilfe photogrammetrischer Messungen soll das globale Verformungsverhalten der Felge unter Last gemessen werden. Dazu wurde auf der gesamten Felge reflektierende Marker geklebt (siehe Abb. 14).



Abb. 14: Felge unter Last im Prüfstand beim Abscannen

Anhand der Verformungsvektoren kann die Gesamtverformung hergeleitet werden. Das vereinfachte Ergebnis gibt die Skizze in Abb. 15 wieder. Es zeigt sich unterschiedliches Verhalten innen und außen, was auf die Einpresstiefe der Felge und damit deren Asymmetrie zurückgeführt wird.

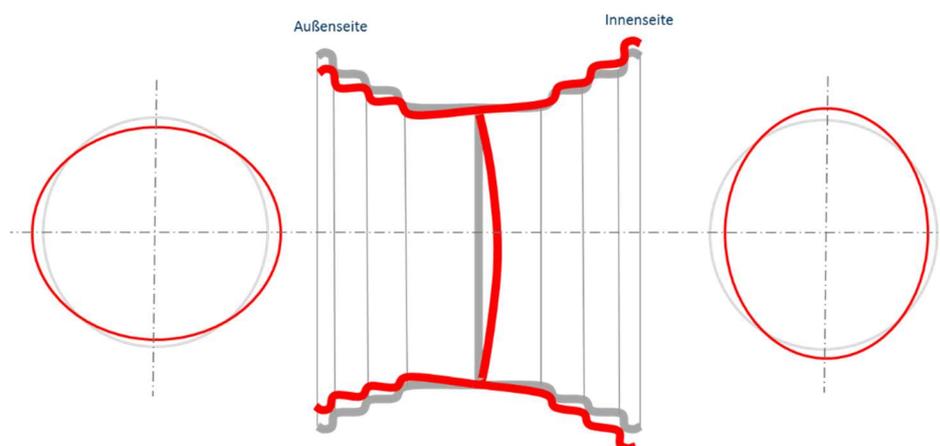


Abb. 15: Schematische Darstellung der Verformung der Felge unter vertikaler Last

Das Ergebnis macht deutlich, dass sich jede Felge aufgrund ihrer Geometrie und Dimensionierung im Detail anders verhält. Dieser Effekt ist bei der späteren Umsetzung unbedingt zu beachten.

2.5.2. Sensorvergleiche im Prüfstand

Bei den weiteren Messungen am Reifenprüfstand der TU-Dresden wurden Vertikal- und Querkräfte separat und kombiniert bei allen Winkelstellungen eingeleitet. Dazu wurde das Rad in mehreren Schritten durch Verfahren des Tisches mehr als zwei Umdrehungen gedreht, um jeder Winkelposition mehrfach zu durchlaufen und daraus robuste Mittelwerte zu berechnen.

Die Ergebnisse zeigen im Vergleich mit den Vorversuchen ähnliche Tendenzen, machen aber wiederum deutlich, dass sich jede Felge aufgrund ihrer Geometrie und Dimensionierung im Detail anders verhält. Hier sollen nur Ausschnitte und einzelne Effekte angerissen werden.

Messposition A6 (2.4 bar)

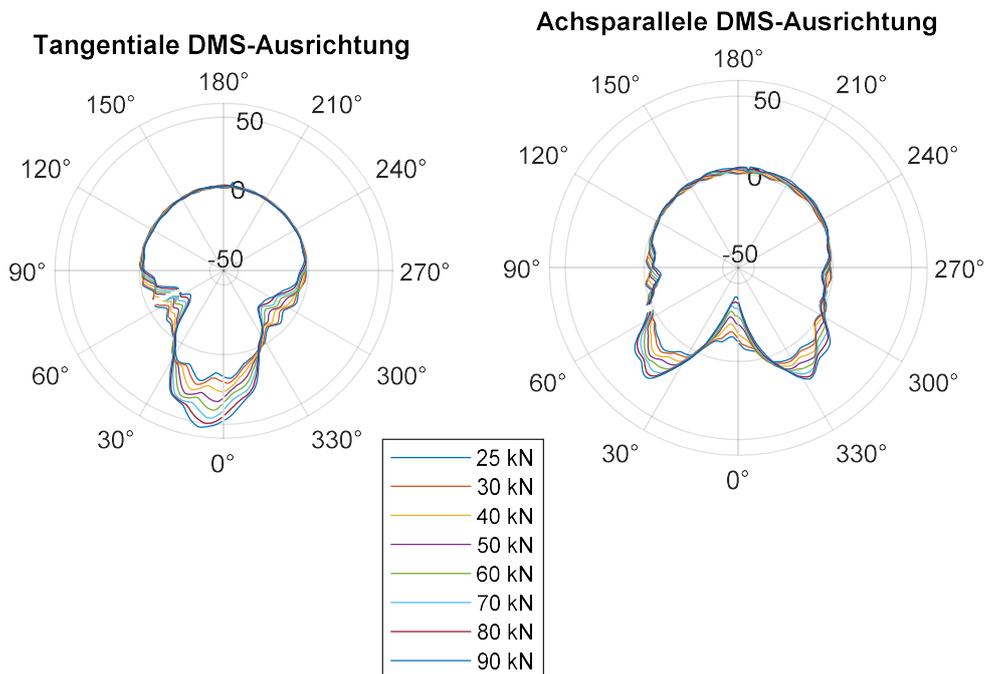


Abb. 16: Dehnung für eine Sensorposition unter variierender Radlast über dem vollen Winkelumlauf

Ohne Einwirkung von Zugkraft (Drehmoment am Rad) ergeben sich symmetrische Signalverläufe entlang der Vertikalachse. Eine leichte Verdrehung kann vom Rollwiderstand verursacht sein.

Die Abb. 16 zeigt, dass mit zunehmendem Reifeninnendruck die Welligkeit des Signals über dem Drehwinkel steigt. Dieser Effekt rührt daher, dass beim Umlauf der relative Anteil an Stollen mit Bodenkontakt bei hohen Drücken stärker schwankt und damit die Länge des Reifenlatsches (des Winkelsegmentes des Reifens) und damit die Form der Krafteinleitung in die Felge (Beispiel: niedriger Druck 5-6 Stollen, hoher Druck: 2-3 Stollen)

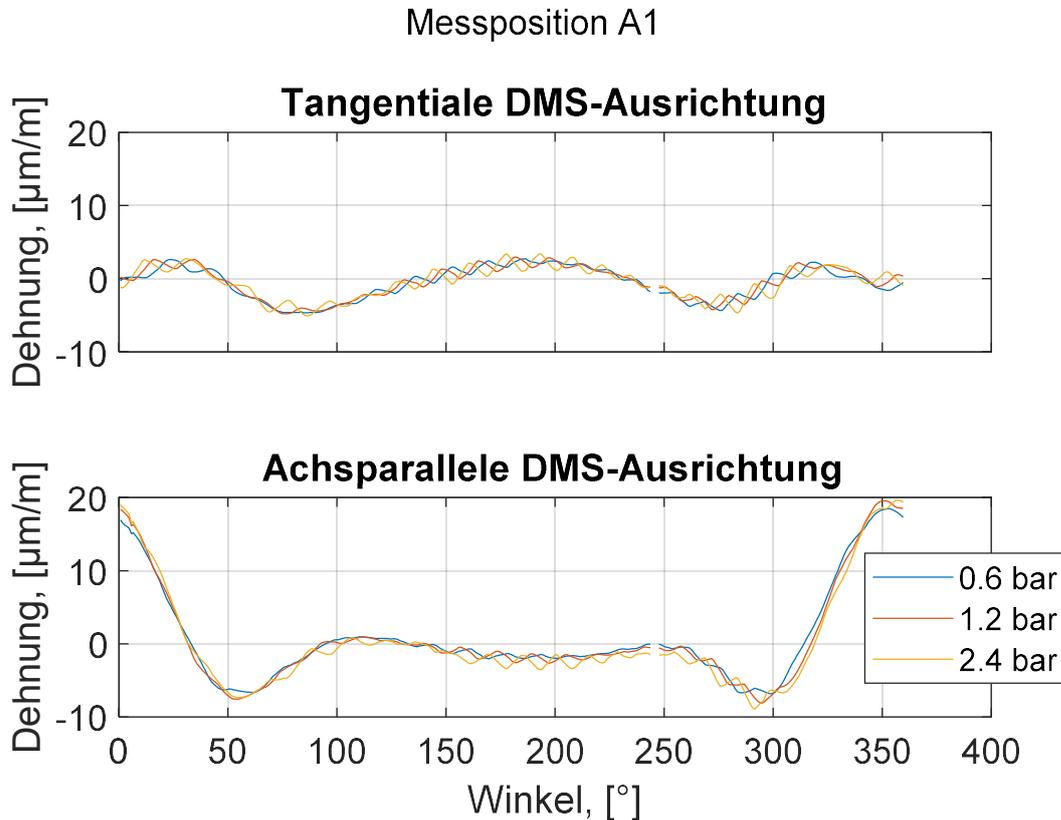


Abb. 17: Dehnung für die Sensorposition A1 für drei verschiedene Reifeneinnendrucke

Das vom Werkstoff Stahl vorgegebene lineare elastische Verformungsverhalten führt trotz der komplexen Wirkung der Felgegeometrie für alle Sensorpositionen zu einer weitestgehend linearen Korrelation zwischen der ungestörten Vertikalkraft und den Messwerten.

Die Verstärkung (der Anstieg der Sensorkennlinie) ist bei unterschiedlichen Winkelstellungen und an den verschiedenen Sensorpositionen sehr variabel. Höhere Verstärkungen führen zu einem besseren Signal-Rausch-Verhalten. Für diese Sensoren und Positionen ist später mit einem geringeren Einfluss von Störungen zu rechnen.

Um geeignete Sensorpositionen zu identifizieren, sind Kalibrationen bezüglich der Radlast für alle Sensoren mit folgenden Parametern berechnet worden:

- Maximum innerhalb einer Radumdrehung,
- Minimum innerhalb einer Radumdrehung,
- Delta: Differenz zwischen dem Maximum und dem Minimum innerhalb einer Radumdrehung,

- Maximum und Minimum innerhalb einer Radumdrehung (lineare Zweiparametergleichung), Abb. 19
- Maximum und Minimum innerhalb einer Radumdrehung sowie Reifeninnendruck (lineare Dreiparametergleichung)

Die Abb. 18 demonstriert den sehr guten linearen Verlauf zwischen der eingepprägten Radlast und dem Schätzwert, berechnet aus dem Delta ohne Zugkraft. Der RMSE (Root Mean Square Error - gibt an, wie gut eine Funktionskurve an vorliegende Daten angepasst ist) als statistisches Fehlermaß beschreibt die einfache Standardabweichung als zu erwartenden Messfehler. Mittels dieses Wertes können verschiedene Kalibrationsansätze und Sensorpositionen verglichen werden.

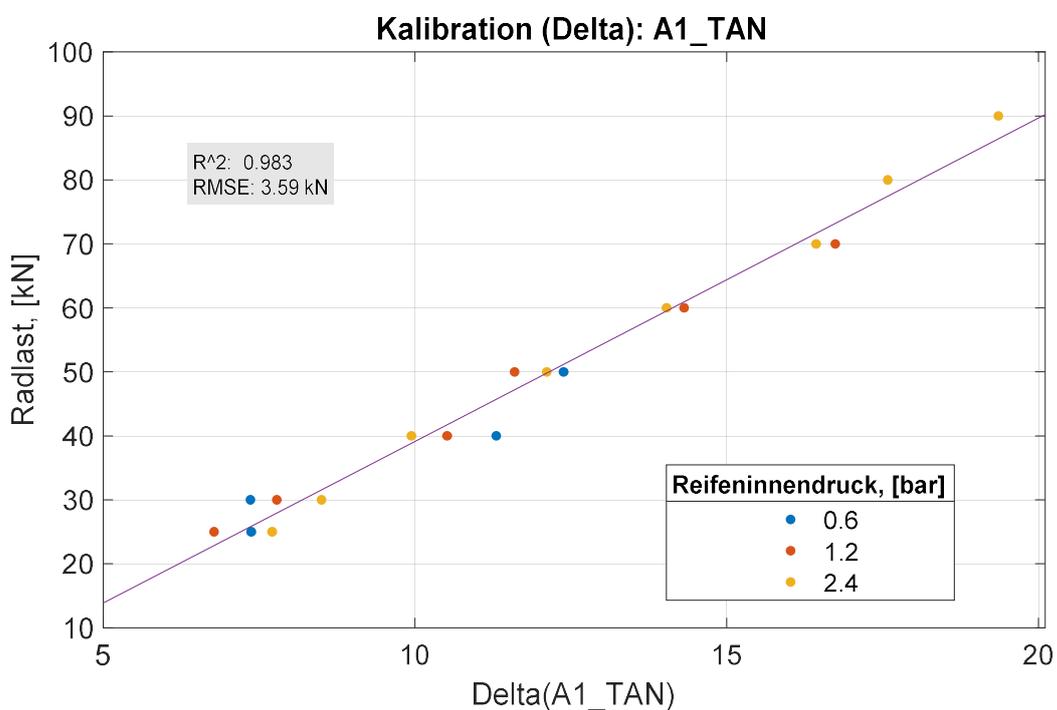


Abb. 18: Kalibrationsbeispiel für einen Sensor anhand Delta-Wertes (Max – Min)

In Abb. 19 sind die Ergebnisse aller Positionen und Kalibrationsansätze (Farben der Balken) gegenübergestellt. Schon hier zeigt sich, dass Fehler unter 2 kN erzielt werden können, ohne dass die gesamte Palette der zur Verfügung stehen Ansätze zur Datenanalyse ausgeschöpft wurde. Die Näherungssensoren können die Genauigkeit der DMS mit keinem Kalibrationsansatz annähernd erreichen. Der Lasersensor misst ebenfalls die globale Verformung und liefert (hier nicht mit dargestellt) ähnliche Ergebnisse, wie die Näherungssensoren. Mit den gewonnenen Erkenntnissen sollen die Versuchsfahrten mit dem Traktor gestartet werden, um bei Bedarf gezielt weitere Kalibrationsexperimente durchzuführen, wenn bei den Messfahrten Fragen auftauchen.

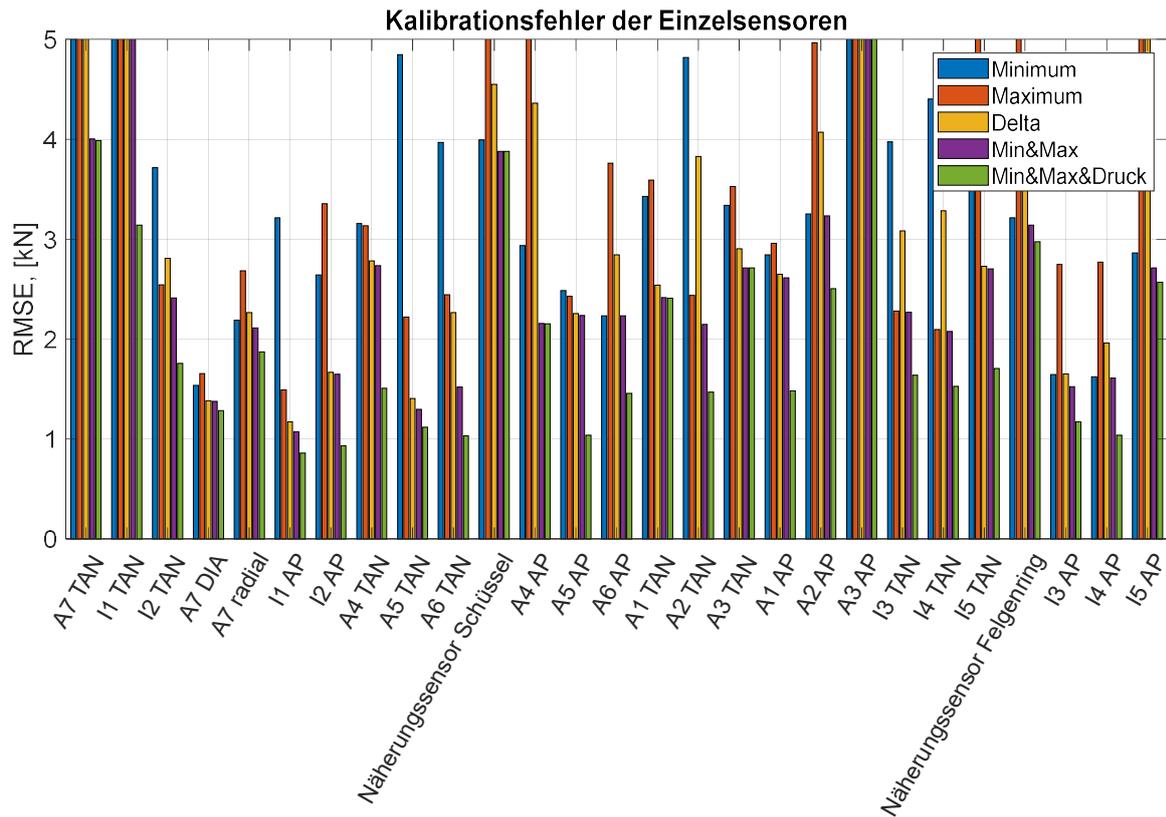


Abb. 19: Übersicht des zu erwartenden Messfehlers für alle Positionen für fünf Kalibrationsansätze

Der Fehler in der Referenzmessung liegt im Bereich von bis zu 2 kN. Dies ist bei der Beurteilung des Messfehlers zusätzlich zu berücksichtigen. Schlussfolgernd kann nach den Prüfstandsversuchen gesagt werden, dass nahezu alle Sensoren unter ungestörten Idealbedingungen in der Lage sind, die Anforderungen vom Gesamtsystem zu erfüllen.

Die zusätzliche Einbringung von Querkräften (siehe Abb. 20) zeigt die zu erwartende Komplexität bei der Datenanalyse im späteren Praxiseinsatz. Bei 50 kN Radlast sind Querkräfte von bis zu 10 kN eingepreßt worden. Die Dehnung an Pos. A5 ohne Querkraft ist als dicke schwarze Linie hervorgehoben.

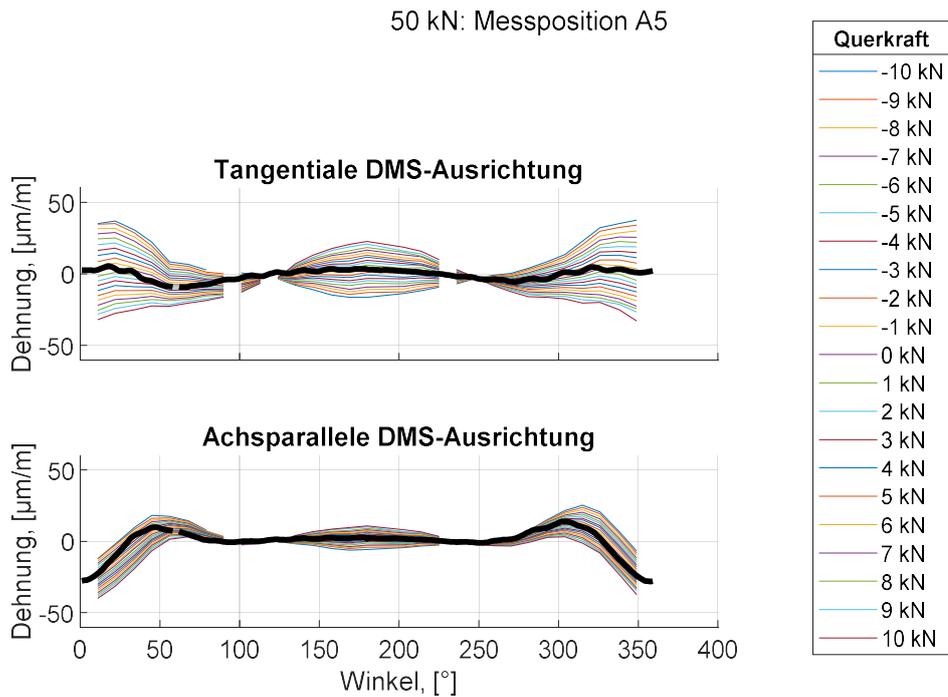


Abb. 20: Beispiel für die Wirkung von Querkräften an einer Messposition

In Abhängigkeit von der Winkelstellung beträgt die resultierende Dehnung ein Vielfaches der Dehnung nur durch Vertikallast. Die markanten Nulldurchgänge können später die Winkelmessung stützen. Zu einer Entkopplung der Wirkung der Krafrichtungen führen sie nach aktuellem Kenntnisstand nicht. Dem Einfluss der Querkraft ist bei Fortsetzung der Arbeiten besonderes Augenmerk zu schenken.

Die Ergebnisse vom Prüfstand stimmen mit den Vorarbeiten an der Professur für Agrarsystemtechnik für ähnliche Radgrößen größtenteils überein, zeigen aber auch Widersprüche zu Vorarbeiten. Küttner (2012) ermittelte für eine kleinere Felge (DW15Lx30) eine höhere Messempfindlichkeit und bessere Korrelationen für tangential ausgerichtete Dehnmesstreifen. In achspareller Ausrichtung lieferte die Dehnung kaum verwertbare Information. Bei einer großen Felge, wie sie hier zum Einsatz kam, wurde geschlussfolgert, dass die Dehnungen der Felge in achspareller wie in tangentialer Richtung ähnlich sind, weil es die konkreten Ergebnisse so anzeigten. An all dem wird deutlich, wie sehr die Dehnung vom konkreten Messort und der Bauform der Felge abhängt. Eine geringe Verlagerung der Messposition führt zu anderen Ergebnissen.

2.6. Fahrten mit dem Messrad am Traktor

2.6.1. Versuche unter kontrollierten Bedingungen

Als erstes wurden mit dem Traktor Messfahrten unter verschiedenen Radlasten (2600 bis 7440 kg) und Reifeninnendrücken (je nach erforderlichem Mindestdruck: 0.8, 1.0, 1.1, 1.2, 1.6, 2.0 bar) mit und ohne zusätzliche Zugkraft auf fester Fahrbahn durchgeführt. Dabei war Ziel, quasistationäre Bedingungen herzustellen, um aus den Daten die gewünschten Zusammenhänge zwischen Sensordaten und Referenzwerten: Radlast (und Zugkraft) extrahieren zu können.

Die Radlast wird mittels Radlastwaagen gemessen. Deshalb ist die vertikale Referenzkraft im Gegensatz zum Prüfstand in Kilogramm angegeben.



Abb. 21: Traktor in unterschiedlichen Konfigurationen bei den Versuchen

Die folgenden zwei Abbildungen verdeutlichen den Unterschied in der Signalqualität: hier am Beispiel der Ausrichtung der Dehnmessstreifen. Im Vergleich zu den Prüfstandsversuchen steigt die Streuung der Daten. Stolleneffekte nehmen bei größeren Lasten und damit größeren erforderlichen Reifeninnendrücken zu.

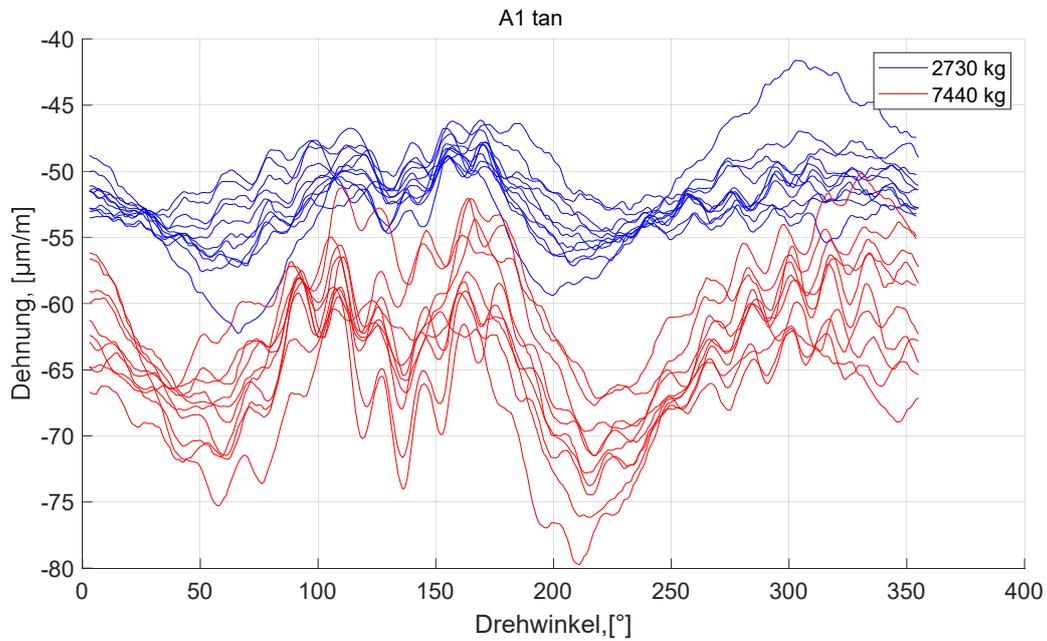


Abb. 22: Hohe Varianz des Signals bei tangentialer Sensorausrichtung

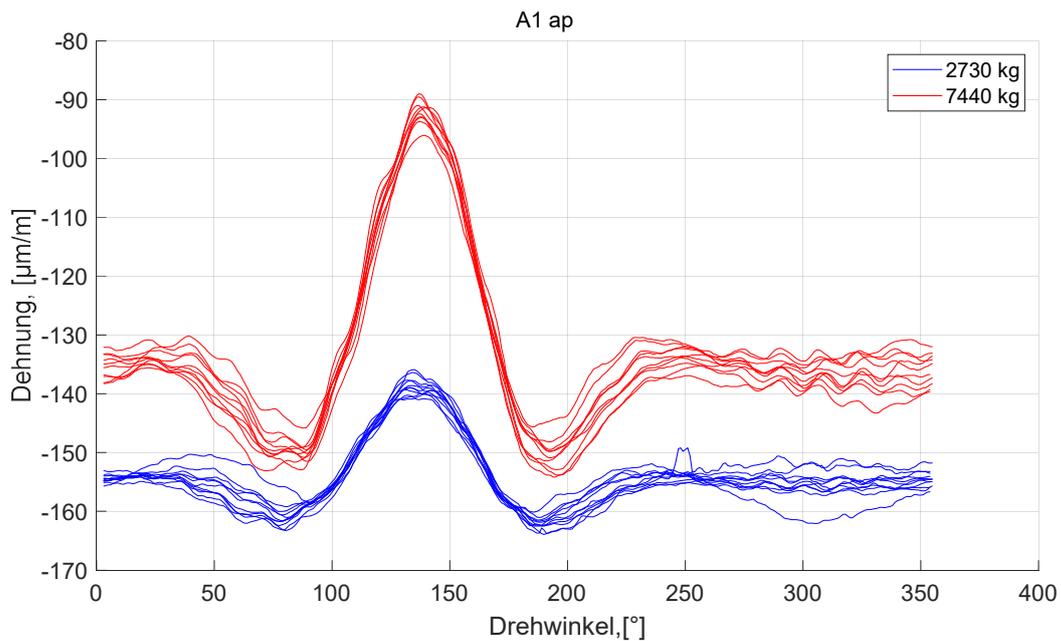


Abb. 23: Hohe Präzision der Messungen mit dem Sensor in achsparalleler Ausrichtung

Ähnliche Effekte treten auch zwischen unterschiedlichen Positionen auf. Entsprechend sind Sensorpositionen zu identifizieren, die strukturbedingt geringe Streuungen aufweisen (bei Positionen, an denen beide DMS-Richtungen stark variieren, kann auch die Qualität der DMS-Applikation Ursache sein).

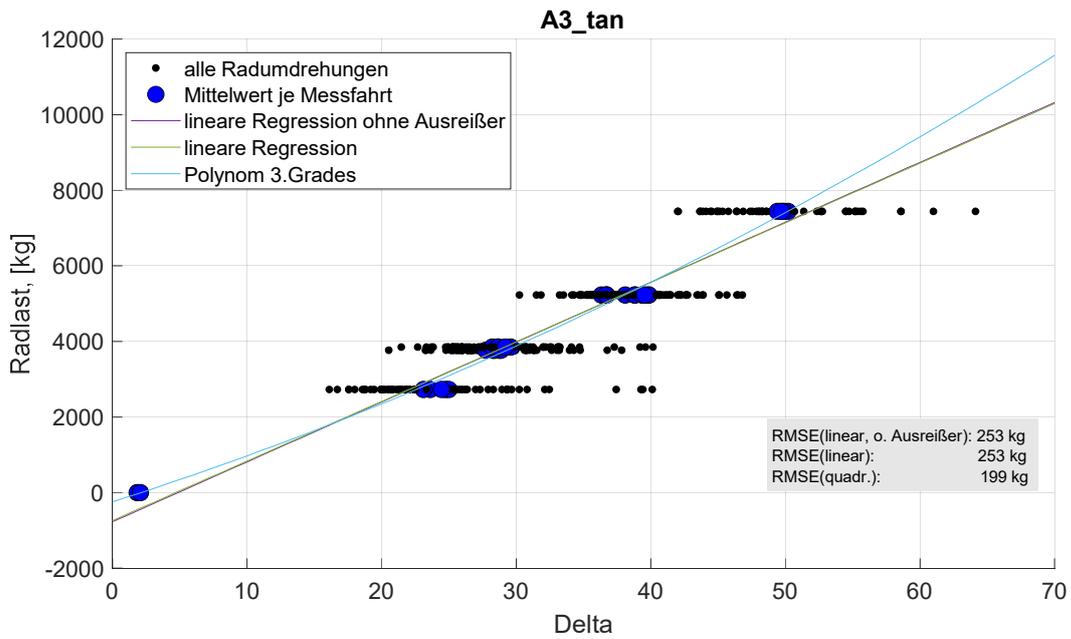


Abb. 24: Darstellung der Streuung der Messwerte zwischen den einzelnen Radumdrehungen und des im folgenden verwendeten Mittelwertes

Aufgrund der Fahrdynamik und von Fahrbahnunebenheiten kommt es trotz allem zu einer größeren Streuung der Einzelmesswerte als im Prüfstand.

Die Suche nach robusten Kalibrationsansätzen führte zur aktuell favorisierten Lösung, den Delta-Wert in Bezug zur Radlast zu setzen. Bei diesem Ansatz sind Langzeitdrifts der Messkette eliminiert. Die Sensoren müssen nicht tariert werden. Der absolute Messwert spielt keine Rolle.

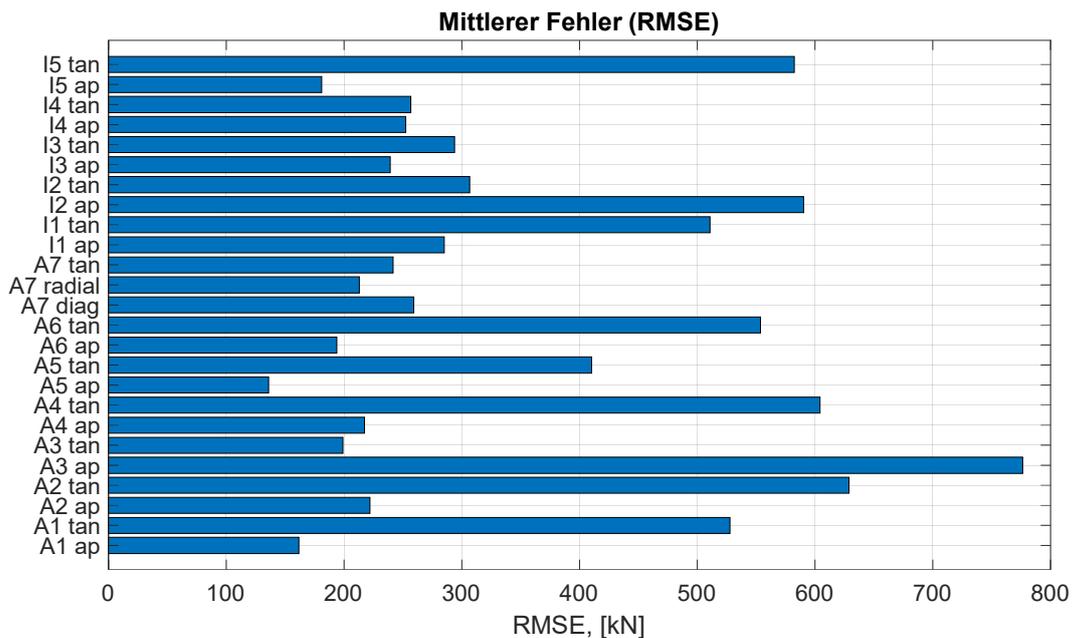


Abb. 25: Fehler der Kalibrationen (Delta) der einzelnen Sensorpositionen

Es zeigt sich wiederum, dass die Sensoren nahe an der Radscheibe, mit größerem Abstand zum Horn und in achsparalleler Ausrichtung (A1 ap, A4 ap) geringere Fehler aufweisen. Die Fehler können weiter verringert werden, wenn beide Sensorrichtungen gleichzeitig im Regressionsansatz berücksichtigt werden. Die Ergebnisse dieses Ansatzes, der beide Sensorrichtung linear berücksichtigt, sind in Abb. 26 zu sehen.

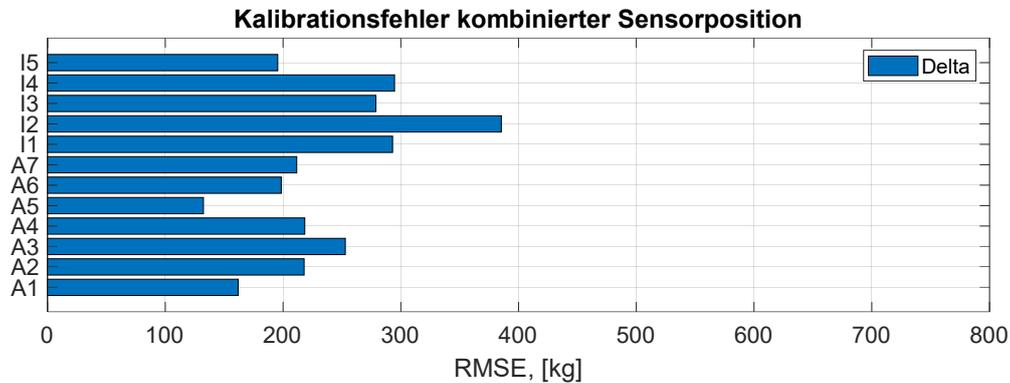


Abb. 26: Fehler der Kalibrationen der kombinierten Sensorpositionen (achsparallel und tangential)

Bisherige Fahrten ohne Drehmoment am Rad (Zugkraft am Traktor) sind im Praxiseinsatz selten. Einsatzzweck von Traktoren ist zu großem Teil Zugarbeit zu verrichten. Bei den dazu durchgeführten Versuchen wurde der Traktor definiert von einem zweiten Traktor gebremst. Die Bremskraft, die Radlast und die Anhöhe wurden variiert. Durch den Angriffspunkt der Zugkraft über der Fahrbahn kommt es zusätzlich zur Achslastverschiebung: Die Hinterachse wird belastet, die Vorderachse entlastet. Dieser Effekt kann nicht direkt und live gemessen werden. Er wurde unter Anwendung der geometrischen Zusammenhänge am konkreten Traktor berechnet und berücksichtigt.

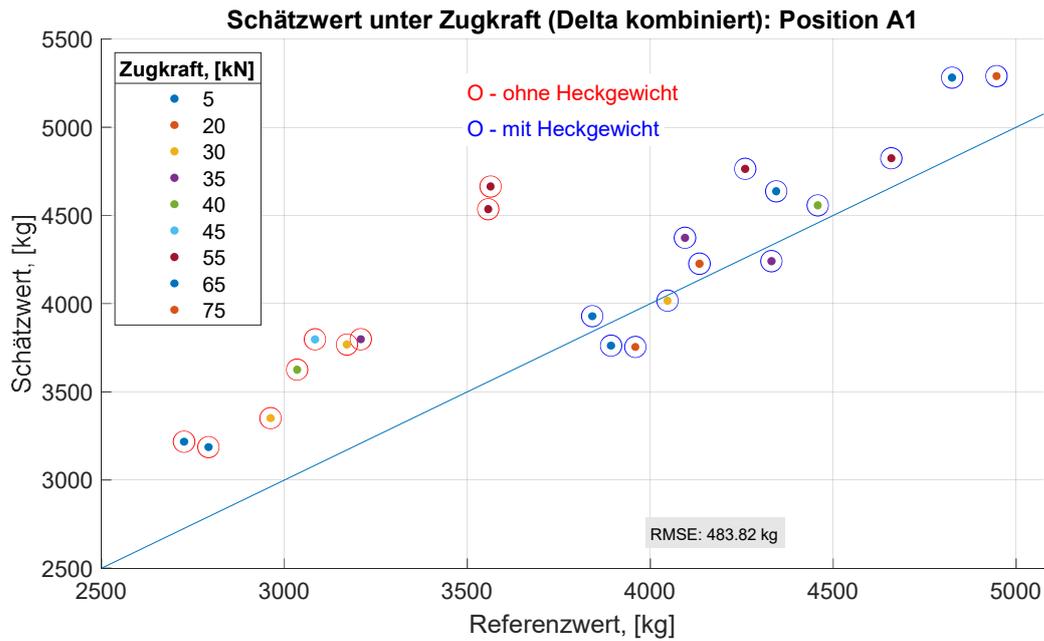


Abb. 27: Anwendung der ohne Zugkräfteinfluss entwickelten Kalibration auf Versuchsdaten mit Zugkraft

Generell überschätzt der Ansatz (Abb. 27) die vertikale Radlast. Dieser Effekt kann mit Kenntnis der Zugkraft kompensiert werden. Allerdings ist dies aus aktueller Sicht gar nicht erforderlich, weil nach Messwerten gesucht wird, die die jeweilige Reifenbelastung beschreiben. Die Einwirkung von Zugkraft stellt neben der vertikalen Radlast eine zusätzliche Beanspruchung des Reifens dar, die eine Anhebung des Reifeninnendruckes erforderlich macht. Ein durch Zugkräfteinwirkung erhöhter Wert führt automatisch zur gewünschten Erhöhung des Reifeninnendruckes unter Zugkraft.

Aufgrund des geringen Datenumfanges neigen multivariate Kalibrationsansätze, wie der mit beiden DMS-Richtungen (Abb. 26), zu überoptimistischen Ergebnissen. Die Validation des Ansatzes an kalibrationsfremden Daten ist eine Methode, diesen Effekt zu beurteilen. Die Kalibration wurde an Daten von Fahrten ohne Zugkraft entwickelt und mit unabhängigen Daten unter störender Zugkraft getestet. Es können mit einzelnen Sensorpositionen akzeptable Fehlermaße erreicht werden (vgl. Abb. 28), die dann auch in der Praxis bestehen.

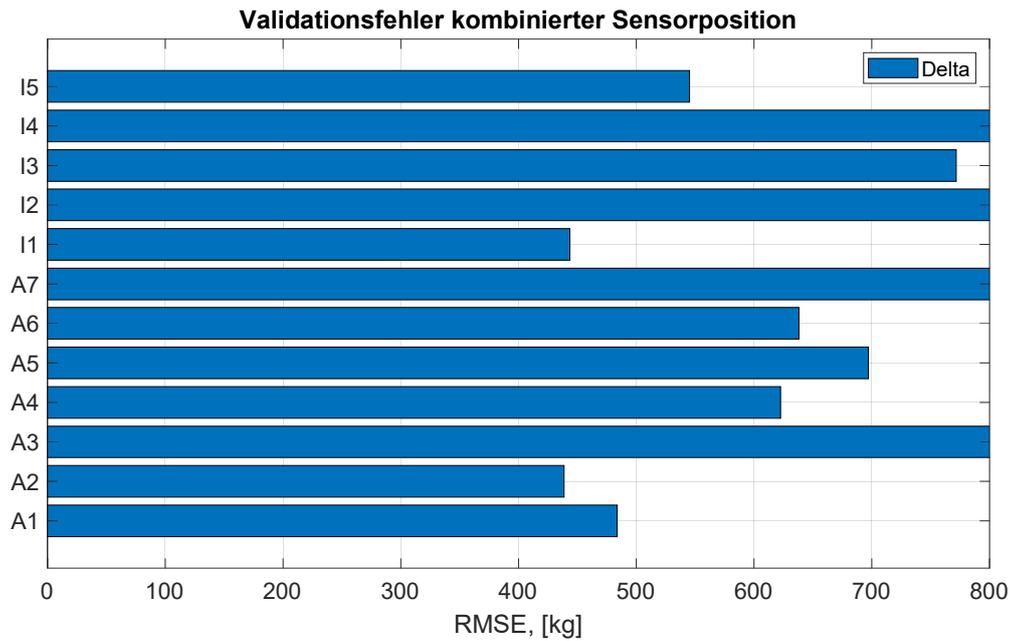


Abb. 28: Validationsfehler bei Anwendung der ohne Zugkräfteinfluss errechneten Kalibration auf Versuche mit Zugkräfteinwirkung (Skalierung an Abb. 26 angepasst)

Unter Zugkräfteinwirkung verdoppelt bis verdreifacht sich der Fehler (Abb. 28). Hier sind aber bei weitem nicht alle Möglichkeiten der Kompensation ausgeschöpft. Trotzdem fühlen sich die Projektpartner an dieser Stelle in der Umsetzbarkeit ihres Ansatzes bestätigt.

Der dargestellte Fehler erscheint dem Projektkonsortium akzeptabel und ermöglicht die Reifendruckverstellung ausreichend präzise. Beim getesteten Reifen erfordert eine Radlaständerung von ca. 500 kg eine Druckverstellung von 0,2 bar (Fa. Trelleborg, 2015).

Mit zusätzlichem sensorischen Aufwand kann aber auch die aufgebrachte Zugkraft des Rades ermittelt werden. Direkt mit den Daten der Dehnmessstreifen ist dies nicht möglich, da Zugkraft und Radlast nicht unabhängig einwirken. Da sich der resultierende Kraftvektor unter Angriff von Zugkraft im Winkel dreht, wird die Hypothese aufgestellt, dass das Kraftmaximum drehwinkelabhängig auftritt. Die Annahme bestätigt der Blick auf die Abb. 29.

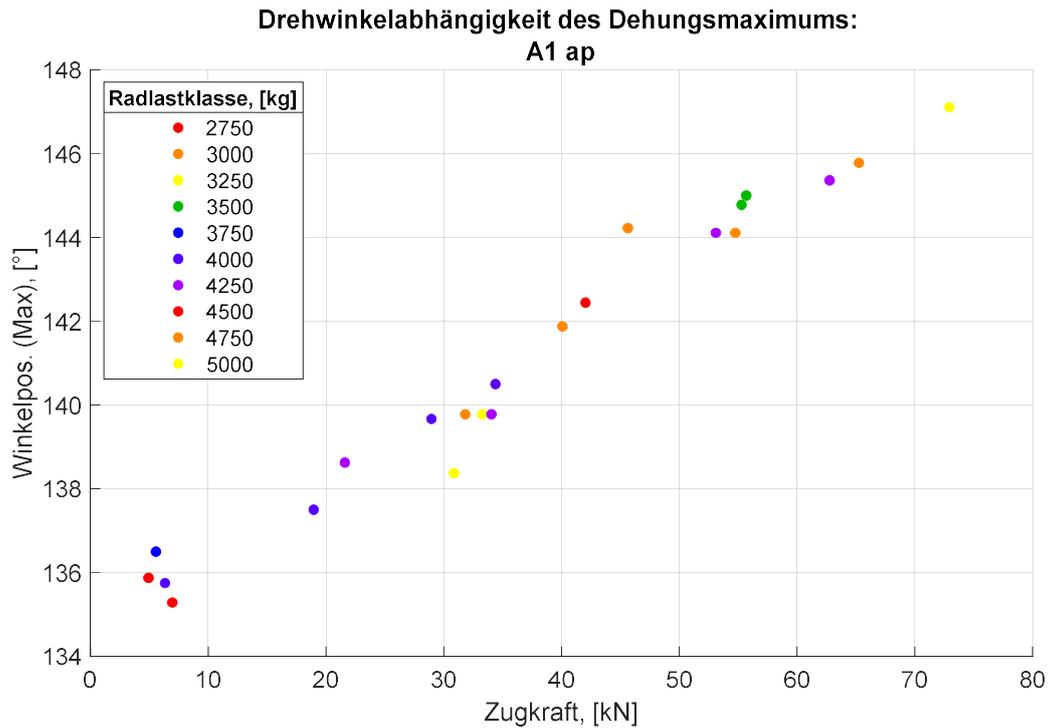


Abb. 29: Abhängigkeit der Drehwinkelage des Dehnungsmaximums von der Zugkraft

Mit Kenntnis des Raddrehwinkels ist eine Bestimmung der Zugkraft am Rad möglich. Dieser Wert ist nicht nur für die Reifendruckverstellung von Interesse, sondern auch für andere Optimierungsstrategien des Antriebsstranges des Traktors und der Prozessführung von Traktor und Gerät.

2.6.2. Fahrten am Hang

Neben der Vertikalkraft und der tangential angreifenden Zugkraft ist die Querkraft die dritte Krafrichtung, die im Latsch an den Reifen angreifen kann. Um in der Ebene gezielt und definiert ein Querkraft einzuleiten, existiert an der Professur für Agrarsystemtechnik keine Möglichkeit. Fahrten am Hang führen durch die Hangabtriebskraft auch zu einer Querkraft (und zusätzlich zu einer Radlastverschiebung).



Abb. 30: Traktor am Hang in Schichtlinie

Entsprechende Versuche erfolgten in einer Kiesgrube ohne Zugkrafteinleitung. Das Messrad wurde talwärts und bergwärts ausgerichtet.

Je nach Richtung der wirkenden Querkraft am Rad: zum Fahrzeug hin (Rad talwärts à negativer Winkel) oder vom Fahrzeug weg (bergwärts à positiver Winkel) kommt es zu einer unterschiedlichen nicht symmetrischen Verformung der Felge (siehe Abb. 31). Zum Vergleich ist die Signalform aus der Ebene grau hinterlegt. Gerade im Bereich der Extrema steigt die Streuung der Messwerte. Es gelten die Aussagen von den Prüfstandsuntersuchungen. (siehe 2.5.)

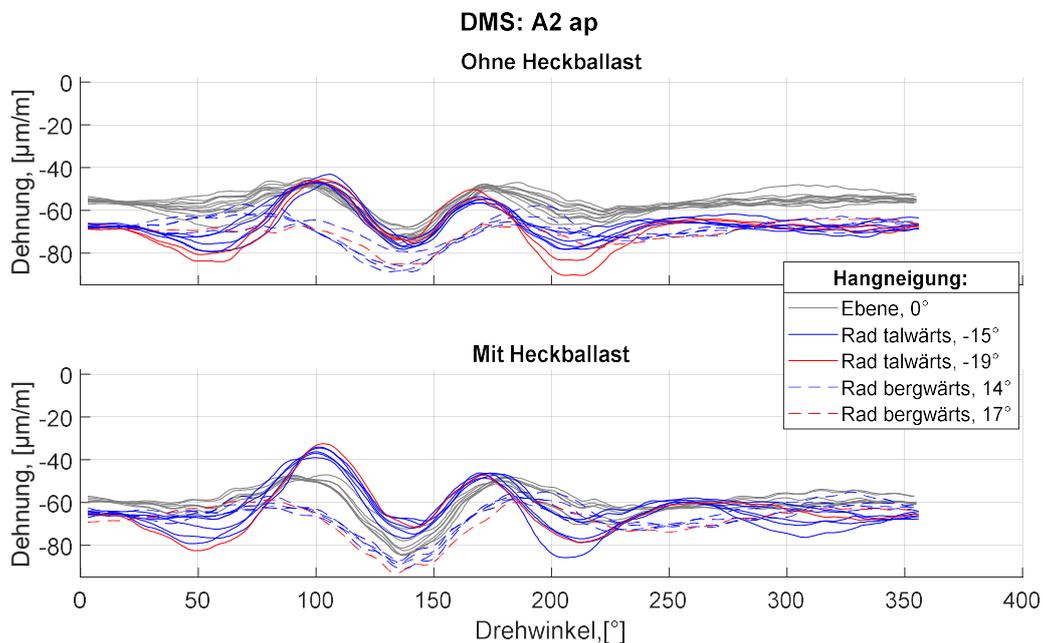


Abb. 31: Vergleich der Dehnung am Beispiel der Position A2 (achsparell) mit variierender Ausrichtung des Messrades

Ein einfacher Weg zur Kompensation des Einflusses von Querkraft ist bisher nicht gefunden worden. Generell gilt auch hier, bei Einwirkung von Querkraft muss der Reifeninnendruck erhöht werden, um einen sicheren Sitz des Reifens auf der Felge zu

gewährleisten. Eine Erhöhung des Messwertes führt also automatisch zu einer Erhöhung des Reifeninnendruckes. Der bisherige Versuchsumfang kann diesen Automatismus allerdings nicht ausreichend für alle Praxisfälle sicherstellen.

Unter Umständen kann, wie in Abb. 32 zu sehen, ein linearer Zusammenhang existieren, wenn die wirkende reale Vertikallast als Referenz angesetzt wird (Hier wurde diese aus Schätzgrößen der Traktorgeometrie, wie der Schwerpunkthöhe, und den Radlasten in der Ebene berechnet). Die Messpunkte der Ebene reihen sich gut ein. Das bedeutet, dass kein höherer Dehnungswert gemessen wird und damit der Reifeninnendruck nicht automatisch angehoben werden würde. Bei der Fahrt am Hang kann der Neigungswert direkt zur Vorsteuerung genutzt werden. Für zusätzlich eingeprägte Seitenkräfte gibt es noch keine Lösung. Diese treten aber auch nicht dauerhaft im Normalbetrieb auf.

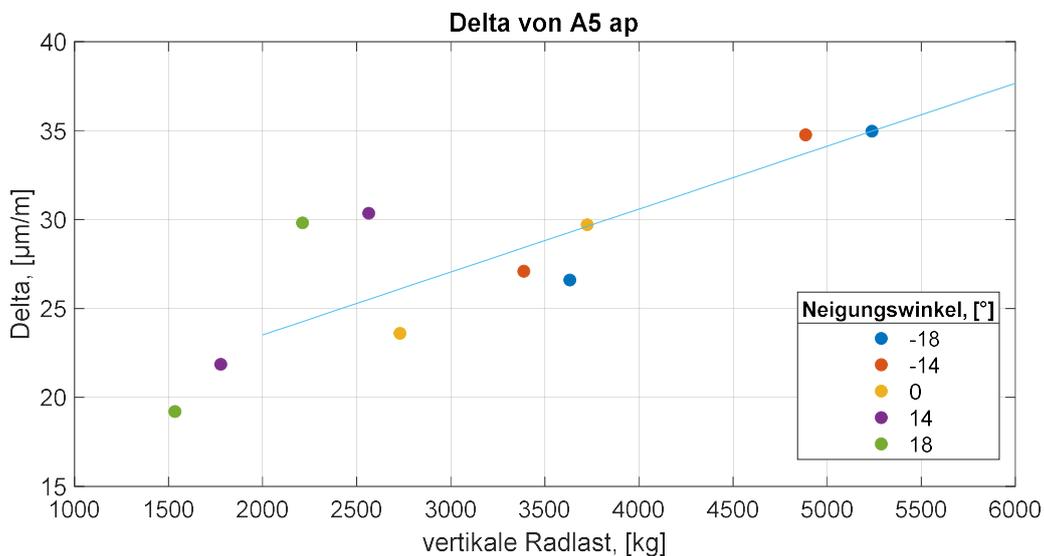


Abb. 32: Delta bei jeweiliger Hangneigung und realer vertikaler Radlast

Die bisher dargestellten Analyseergebnisse basieren nur auf einen Teil der denkbaren Ansätze zur Datenauswertung. Einzelne Zusammenhänge konnten aufgezeigt werden. Die Komplexität der Wirkzusammenhänge wird deutlich. Ein allumfassendes Konzept, das alle Einflüsse gleichzeitig berücksichtigt, muss noch erarbeitet werden. Die jetzt zur Verfügung stehenden Daten bilden dazu eine gute Grundlage. Mit deren weiterer tiefgründiger Untersuchung, für die Zeit und Ressourcen gebraucht werden, besteht die Möglichkeit, die Genauigkeit des Systems weiter zu erhöhen. Die Projektpartner sehen in den gezeigten Ergebnissen das Potenzial des Ansatzes bestätigt und suchen nach Möglichkeiten, die Ideen in praxiswirksame Produkte einfließen zu lassen.

2.6.3. Feldversuche unter Praxisbedingungen

Für die Feldversuche wurden zwei Geräte ausgewählt, die einen unterschiedlichen Bedarf an Zugkraft haben:

- Saatbettkombination: Dalbo 6 m.
- Vollandpflug: Kverneland Vario 100 mit 4 Scharen (2 m Arbeitsbreite)



Abb. 33: Versuchstraktor mit Saatbettkombination (links) und Wendepflug (rechts)

Bei der Saatbettkombination kommt es in besonderem Maße auf die Bodenschonung an, weil der vorher gelockerte Boden damit nur noch oberflächlich zerkleinert wird, um ein Saatbett zu erzeugen, ohne den Unterboden wieder zu verdichten. Der geringe Zugkraftbedarf ermöglichte das Fahren ohne Allradantrieb, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich die Zugkraft zu gleichen Teilen auf die beiden Hinterräder verteilt.

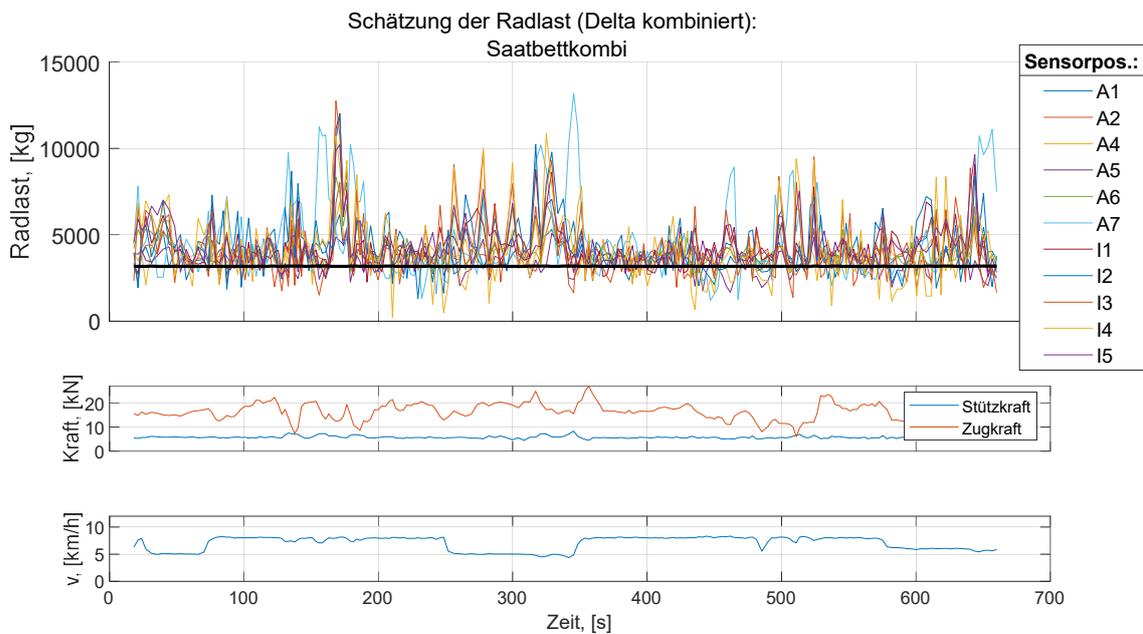


Abb. 34: Feldfahrt mit der Saatbettkombination

Die Schätzwerte der einzelnen Sensorpositionen streuen stark, wie aus Abb. 34 entnommen werden kann. Erst über einen längeren Zeitraum stellt sich ein verlässlicher Mittelwert ein, der sich der schwarzen Linie annähern sollte. Diese entspricht der dynamischen Radlast bestehend aus den Massen von Traktor und Messdreieck sowie den extern angreifenden Kräften, ermittelt mit dem Messdreieck. Da Zugkraft und Stützkraft gering sind und kaum variieren, erscheint die Referenzkraft als horizontale Linie. Alle Sensoren überschätzen den Sollwert im Mittel, wobei dieser auch nur auf angenommener Geometrie beruht.

Leider ließ sich der Pflug nicht zusammen mit dem Messdreieck anbauen, so dass extern angreifende Kräfte nicht gemessen werden konnten. Das Feld war leicht hängig. Auf dem Vorgewende muss der Pflug im Gegensatz zur Saatbettkombination ausgehoben werden und der Traktor rückwärtsfahren. Die Wendestelle ist in der Mitte des Zeitschriebes in Abb. 35 zu erkennen. Der Fahrtrichtungswechsel ist in der Auswerterroutine nicht korrekt berücksichtigt, weshalb dieser kritische Bereich nicht korrekt wiedergegeben wird.

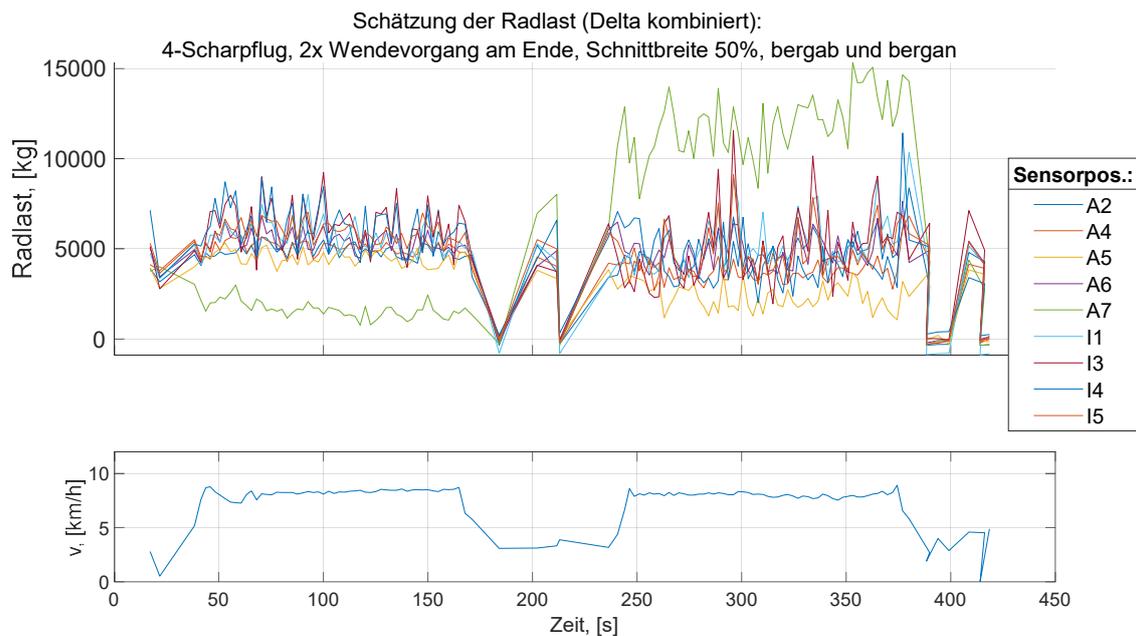


Abb. 35: Feldfahrt mit Pflug: alle DMS-Messtellen

Zu erkennen ist aber, dass die Einzelwerte stark streuen und dass im Mittel in einer Fahrtrichtung die Radlast höher ist als in der anderen (bergab/bergan, Rad in der Furche/außerhalb der Furche).

Wenn nur eine Sensorposition betrachtet wird, werden die Effekte deutlicher und es kann gezeigt (Abb. 36) werden, dass der Mittelwert stabil ein nutzbarer Wert ist.

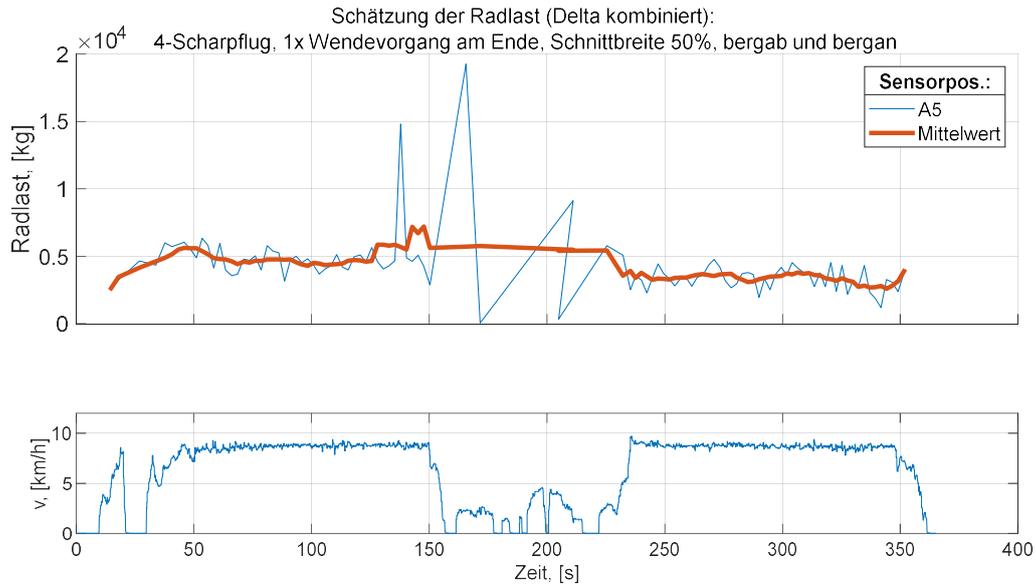


Abb. 36: Feldfahrt mit Pflug; ausgewählte Messstelle: A5

Eine direkte Validation der Schätzwerte ist nicht möglich. In ausgehobenem Zustand betrug die Radlast 4460 kg, wenn der Pflug nach rechts arbeitet und 4.200 kg, wenn er nach links wendet.

Die Feldversuche belegen, dass Messtechnik grundsätzlich auch im drehenden Rad funktionssicher untergebracht werden kann. Die Untersuchungsmethoden haben sich bewährt und können auch in zukünftigen Projekten angewendet werden. (Im Detail wird es immer etwas zu verbessern geben.)

Im normalen Feldbetrieb zeigen die Sensoren und die Analysedaten plausible Werte. Die Wendevorgänge müssen gesondert betrachtet werden. Hier sind vorausschauende Systeme erforderlich, um beim plötzlichen Lastwechsel den Reifendruck rechtzeitig auf den erforderlichen Wert eingestellt zu haben. Mit den aktuellen Methoden kann die Last nicht so schnell ermittelt werden, wie erforderlich.

2.7. Konzepte zum Aufbau der automatisierten Reifendruckverstelleinrichtung

Durch die permanente genaue Erfassung der Radlast durch den Radlastsensor mit einer Genauigkeit von bis zu ca. ± 100 kg, ist es möglich, den Luftdruck auf 0,02 bar genau entsprechend der technischen Daten (Reifendrucktabellen der Reifenhersteller) einzustellen. Auch wenn es jetzt möglich wäre, den Luftdruck auf jedem Quadratmeter Fläche richtig einzustellen, ist zu bedenken, dass die Reifendruckregelanlage zum Ablassen und Befüllen der Reifen speziell die Kompressoren eine gewisse Zeit zum Verstellen des Luftdrucks benötigen. Daher wird angedacht, eine Mittelung der Werte vorzunehmen, sodass dann eine Verstellung des Luftdruckes alle 10 m erfolgen kann. Wenn sich

Radlasten im Feld durch Beladung mit Erntegut oder Entladung von zum Beispiel Düngemitteln und Flüssigkeiten langsam verändern, kann die Reifendruckregelanlage auch den Luftdruck in den Reifen langsam mit anpassen. Auch in Hanglagen oder bei Seitenführungskräften, wenn zum Beispiel Anbaugeräte die seitlich an Traktor angehängt werden, schräg zur Längsachse des Traktors ziehen, kann die Auswertung der Dehnungsmessstreifen in der Felge dazu führen, dass einzelne Räder mit einem anderen Luftdruck als die anderen beaufschlagt werden. Somit schützt die Radlastsensorik in der Felge auch die Reifen gegen Überlastung oder vor einem Abspringen von der Felge.

Der Radlast-Sensor muss sich jederzeit sehr einfach vom Nutzer kalibrieren lassen. Besonders, wenn die Räder auf verschiedenen Maschinen genutzt oder wenn Räder zum Beispiel mit Pflegereifen getauscht werden. Hierzu ist angedacht, dass der Nutzer mehrfach mit verschiedenen Ballastierungen die genaue Radlast zum Beispiel mit einer Brücken- oder Radlastwaage als Referenz misst und die Werte dann jeweils in der Steuerung unter dem Menüpunkt Kalibrierung eingibt und speichert. Die Steuerung der Reifendruckregelanlage speichert parallel die Werte der Radlastsensoren in den Algorithmus und berechnet die Radlast anhand der Referenz von den Messergebnissen der Brücken- oder Radlastwaage.

Für verschiedene Felgen- und Reifendimensionen können Messwerttabellen angelegt werden, die zukünftig zum Beispiel online der Steuerung der Reifendruckregelanlagen zur Verfügung gestellt werden. Das erleichtert später die Kalibrierfunktion für den Nutzer.

Durch einen Drehwinkelsensor im Drehübertrager der Luftdruckübertragung der Reifendruckregelanlagen, ist es nach aktuellen Erkenntnissen aus der Machbarkeitsstudie möglich, mit jeweils einem DMS-Sensor auf der Außen- und Felgeninnenseite zu arbeiten. Somit lässt sich das System mit dem Radlastsensor für den Endkunden preisgünstig gestalten. Die Stromversorgung für die Sensorik und Messverstärker bzw. Funkübertragung wurde bisher noch nicht getestet. Hier können Schleifringe im Drehübertrager oder berührungslose Methoden wie zum Beispiel Energy-Harvesting genutzt werden.

3. Fazit

In den Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass ein Druck-Verstellsystem mit DMS-Sensoren in der Felge innerhalb akzeptabler Zeit den optimalen Druck für konstante Arbeitsbedingungen ermitteln kann.

Das Projekt hat gezeigt, dass

- stetige, langsame Veränderungen (z. B. Befüllen oder Entleeren von Transport-behältnissen) automatisch berücksichtigt werden können und
- messtechnisch allerdings alles „nur“ auf Mittelwertbildung von mindestens 6-8 Radumdrehungen (40 – 50 m) darstellbar ist.
- Ansätze zur Kompensation des Einflusses von Querkräften in der Praxis wurden noch nicht entwickelt. Deren Störpotenzial ist groß. Sie müssen kompensiert werden
- Die Fülle an Daten und deren komplexen Zusammenhänge mit den Zielgrößen lassen die Chance vermuten, dass zukünftige Untersuchungen und Datenanalysen zu verbesserten Ergebnissen führen.
- Unter kontrollierten Bedingungen kann die Radlast mit folgendem Fehler geschätzt werden:
 - ohne Zugkraft: ~150 kg (einfache Standardabweichung, bei Sensorik ist mind. 2σ üblich à 300 kg)
 - mit Zugkraft: ~ 300 kg (einfache Standardabweichung, bei 2σ à 600 kg)
- Mit Kenntnis des Raddrehwinkels kann die anliegende Zugkraft abgeleitet werden

Es muss festgestellt werden, dass noch weitere notwendige Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten erforderlich sind:

- Alle bisherigen Ergebnisse sind nur an einer konkreten Felge belegt. Der Nachweis der Verallgemeinerbarkeit steht noch aus und bedarf weiterer Untersuchungen.
- Auf kurzzeitige große Schwankungen, wie bei Wendevorgängen, kann sowohl das Messsystem als auch das Verstellsystem nicht reagieren. Hierzu sind mit noch zu entwickelnden „vorausschauenden Algorithmen“ besondere Betriebszustände zu erkennen und eine zusätzliche Intelligenz zu integrieren.

Die Menge an gesammelten Daten ist nicht allumfänglich ausgewertet. Sie bietet aber eine wertvolle Datengrundlage, um bei Auftauchen neuer Fragen bei der Weiterentwicklung der Projektidee diese an diesen systematisch erhobenen Daten zu untersuchen und zu beantworten.

4. Literaturverzeichnis

- Berner Fachhochschule. (2022): Willkommen bei Terranimo - Terranimo. <https://ch.terranimo.world/>, accessed: 11 August 2022.
- Bolling, I. (1987): Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen: neue Meß- u. Rechenmethoden. Braunschweig, Lehrstuhl für Landmaschinen, Techn. Univ. Braunschweig.
- Brunner, J.E. (2018): Fahrzeuggradanordnung mit verbesserten Überwachungsfähigkeiten für verschiedene Fahrzeugzustände und Überwachungsvorrichtung zur Durchführung einer solchen Überwachung.
- Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, J.H. von T.-I. (2022): BoNaRes: Sensorsystem und Messung von Bodendruck und Bodensetzung. <https://www.soilassist.de/themen/bodenverdichtung/sensorsystem-und-messung-von-bodendruck-und-bodensetzung/>, accessed: 11 August 2022.
- Claas KgaA. (2022): CLAAS integriert Terranimo® in CEMOS für Traktoren. <https://www.claas.de/aktuell/meldungen-veranstaltungen/meldungen/claas-integriert-terranimo--in-cemos-fuer-traktoren/2666362>, accessed: 11 August 2022.
- Deter. (2020): Steyr: Optimierter Reifeninnendruck dank Ultraschallsensor. <https://www.topagrar.com/technik/news/steyr-optimierter-reifeninnendruck-dank-ultraschallsensor-11971177.html>, accessed: 22 August 2022.
- Fa. Farmnet365. (2022): AgroPressure by Michelin. <https://www.365farmnet.com/en/products/components/agropressure-by-michelin/>, accessed: 22 August 2022.
- Fa. Kistler. (2014): Kistler News. <https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/automotive-research-test/vehicles-dynamics-and-durability/960-048d-06.14.pdf>, accessed: 19 October 2020.
- Fa. Rauch. (2022): RAUCH TerraService erhält Silbermedaille. <https://rauch.de/unternehmen/aktuelles/rauch-terraservice-erhaelt-silbermedaille.html>, accessed: 22 August 2022.
- Fa. Trelleborg. (2015): trelleborg-pressure-table. https://www.trelleborg.com/wheels/-/media/tires-aft/datatsheet/brochure/trelleborg-pressure-table_eng.pdf?rev=55d7697697ba4c09bf83a9dcde9fdc4c?&openpdf=1, accessed: 22 August 2022.
- Geischeder, R. (2011): Bodenbelastung und Bodenbeanspruchung unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen. 196.
- He, S. (2017): Untersuchung von Sensoren zur Bestimmung der Belastungsparameter Radlast, Drehmoment und Querkraft am Rad landwirtschaftlicher Fahrzeuge. Dresden, Technische Universität Dresden.
- Heinritz, C. (2021): Auswahl und Applikation eines Sensors zur Bestimmung der dynamischen Radbelastung an mobilen Arbeitsmaschinen. Diplomarbeit. Dresden, Technische Universität Dresden.

- Kochanek, C. (2010): Experimentelle Analyse der Radverformung großvolumiger landwirtschaftlicher Reifen unter definierter Belastung (Radlast/Reifendruck) mittels piezoelektrischer Geber am Reifenprüfstand der Professur Agrarsystemtechnik. Dresden, Technische Universität Dresden.
- Krinke, M. and Schumacher. (2010): Experimentelle Untersuchung und numerische Simulation einer Traktorfelge. Freiberg, TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERGAKADEMIE FREIBERG.
- Küttner, J. (2012): Untersuchung zur Bestimmung der Kräfte am Rad. Dresden, Technische Universität Dresden.
- Mariutti, H. (2003): Lastkollektive für die Fahrtriebe von Traktoren mit Bandlaufwerken. VDI-Verlag.
- Maxion Wheels. (2021): Maxion Wheels: ZF OPENMATICS and Maxion Wheels Partner on Wheel Connectivity Solution. <https://www.maxionwheels.com/news/zf-openmatics-and-maxion-wheels>, accessed: 11 August 2022.
- Mengqi, G. (2019): Untersuchung von autarken Sensoren zur Bestimmung von Belastungsparametern am Rad, insbesondere der Radlast, des Drehmoments und der Querkräfte. Dresden, Technische Universität Dresden.
- Michelin Reifenwerke AG & Co. KGaA (ed.). (2013): Michelin_Das-Bodenbuch.pdf. Karlsruhe.
- Peeters, M., V. Kloster, T. Fedde and L. Frerichs. (2018): Integrierte Radlastmessung für Traktoren. In: LANDTECHNIK: 116-128 Seiten. <https://doi.org/10.1515/LT.2018.3188>.
- Pegram, M.S., T.R. Botha and P.S. Els. (2021): Full-field and point strain measurement via the inner surface of a rolling large lug tyre. In: Journal of Terramechanics 96: 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.04.002>.
- Pohen, F.-H. (2009): Entwicklung einer radgebundenen Reifendruckregelanlage für landwirtschaftliche Fahrzeuge. Aachen, Shaker.
- Späth, R. (2004): Dynamische Kräfte an Standardtraktoren und ihre Wirkungen auf den Rumpf. Düsseldorf, VDI-Verl.
- Uppenkamp, N., M. Weißbach and G. Heitmann. (2009): DLG-Merkblatt 356: Reifen richtig wählen und einsetzen.
- Volk, L. (2012): Mehr Bodenschutz, mehr Fahrkomfort und mehr Dieseleffizienz. In: Mais (4/2012 (39.JG)): 170–173.
- Wei, F. (2021): Datenerfassung und Auswertung beim Einsatz von Radlastsensoren als Voraussetzung für die Regelung des Reifendrucks entsprechend den unterschiedlichen Einflussfaktoren. Dresden, Technische Universität Dresden.
- Wieckhorst, J. (2019): System zur automatischen Reifendruckeinstellung bei Traktoren. Universitätsbibliothek Braunschweig. <https://doi.org/10.24355/DBBS.084-202008031602-0>.
- Würfel, T., R. Vetter, E. Unterseher and M. Elsässer. (2022): Vorsorge gegen Bodenschadverdichtung.
- Xu, C. (2015): Simulationsmodell Radkräfte - Untersuchung zur rechnerischen Bestimmung der Kräfte am Rad (vertikale und horizontale Kräfte an Traktoren und Landmaschinen). Dresden, Technische Universität Dresden.