

Kontaktlose Temperatur- und Belastungsmessung in Vollgummireifen

Wireless Temperature and Load Measuring Inside of Full-Cushion Tires

Steffen Kleinert
Ludger Overmeyer

Institut für Transport- und Automatisierungstechnik
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

In diesem Beitrag werden Methoden zur Integration von Sensorsystemen in Superelastikreifen für Flurförderzeuge auf Basis passiver RFID-Transponder vorgestellt. Die Konzeption der Sensor-Transponder darf einerseits die Tragfähigkeit des Reifens nicht negativ beeinträchtigen und muss andererseits die Leistungs- und Überlebensfähigkeit des Transponders sicherstellen. Neben der Gestaltung eines Transponders mit einer flexiblen Antennenstruktur werden Anwendungsmöglichkeiten für die Reifen- und Fahrzeugzustandsüberwachung beschrieben.

[Schlüsselwörter: drahtlose Sensoren, Flurförderzeuge, Reifen, Unfallschutz, Systemüberwachung]

In this paper we present methods for the integration of sensor systems, based on passive RFID technology, in full-cushion tires for industrial trucks. On the one hand, the design of the sensor transponder must avoid any negative influence on the mechanical stability of the tire and on the other hand, the performance and stability of the transponder must be ensured. Besides presenting a transponder design with a flexible antenna, we show possible applications for monitoring the tire and vehicle condition.

[Keywords: wireless sensors, industrial trucks, tires, safety, system monitoring]

1 EINLEITUNG

Die Bereifung eines Flurförderzeugs (FFZ) stellt eine Schlüsselkomponente für dessen sicheren und effizienten Betrieb dar und ist während des Fahrbetriebs besonders hohen mechanischen Belastungen unterworfen. Der für FFZ am häufigsten verwendete Reifentyp ist der Superelastik-Reifen (SE-Reifen), welcher sich neben seiner hohen Tragfähigkeit besonders durch die Kombination von Stoßdämpfung und geringer Einfederung für den Warentransport mit FFZ auszeichnet. SE-Reifen sind eine spezielle Bauart von Vollgummireifen, die Ihre vorteilhaften Fahreigenschaften ihrem schichtweisen Aufbau aus unter-

schiedlichen Gummimischungen mit angepassten mechanischen Eigenschaften verdanken.

Die durch die Reifenverformung eingebrachte Energie wird überwiegend in der weicheren, mittig im Reifen befindlichen Zwischenschicht (siehe Abbildung 1) in Wärme umgewandelt. Die Verformbarkeit dieser Materialschicht ermöglicht das angestrebte Einfederungsverhalten des SE-Reifens. Die radial darunter befindliche Bodenschicht mit eingebetteten Stahlarmierungen verformt sich kaum und dient vor allem dem festen Sitz des Reifens auf der Felge. Umschlossen wird die Zwischenschicht von der äußeren Laufschrift, welche besonders abriebfest und beständig gegenüber Beschädigungen ist. Während der Lebensdauer eines Reifens kann die Laufschrift nahezu vollständig abgefahren werden, wodurch sich die Belastungen in der Zwischenschicht kontinuierlich verändern.

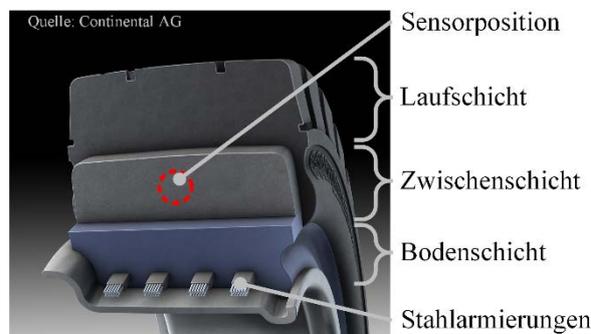


Abbildung 1. Schichtweiser Aufbau eines SE-Reifens mit Sensorposition zur Temperaturerfassung

In der Zwischenschicht entstehende Wärme wird daher entweder durch die Laufschrift auf die Umgebungsluft bzw. den Bodenbelag oder über die Bodenschicht auf die Felge abgegeben. Auf Grund der geringen Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Gummimischungen erwärmt sich in Folge dessen das Reifenzentrum deutlich schneller und stärker als die Reifenaußenseite. Eine Temperaturüberwachung, mit dem Ziel, bevorstehende Reifenschädigungen vor dem Erreichen einer kritischen Innentemperatur zu erkennen und zu vermeiden ist daher an der Außenseite des Reifens nicht möglich und muss im Inneren des Reifens erfolgen.

Temperaturmessleitungen, die aus dem Reifen heraus führen und beispielsweise an der Felge ausgewertet werden, stellen kritische Störstellen an der Reifenaußenseite dar, an denen es verstärkt zu Rissbildung kommen kann. Zudem sind Komponenten an der Reifenaußenseite einem erhöhten Beschädigungspotential ausgesetzt. Daher wird am Institut der Autoren und im Rahmen des IGF-Vorhabens 18066 erforscht, wie Zustandsinformationen über Temperatur und Reifenlast aus dem Reifeneninneren kontaktlos an das Fahrzeug übermittelt werden können. Hierzu wird ein passiver RFID Transponder im UHF-Frequenzbereich (868 MHz) mit entsprechenden Sensoren ausgestattet und in den Reifen integriert. Die besonderen Herausforderungen sind hierbei einerseits die außergewöhnlich hohen mechanischen und thermischen Belastungen auf den integrierten Transponder und andererseits die elektrischen und elektromagnetischen Eigenschaften des umgebenden Reifenmaterials (vgl. Tabelle 1), welche eine erhebliche Verminderung der auf den Transponder übertragbaren Energie bewirken.

Tabelle 1. Elektromagnetische Eigenschaften ausgesuchter Gummimischungen für SE-Reifen

Materialmischung für den Einsatz in der...	Relative Permittivität		Verlustfaktor $\tan \delta$
	ϵ' [$\frac{As}{Vm}$]	ϵ'' [$\frac{As}{Vm}$]	
Bodenschicht	20,4	9,1	0,45
	17,6	3,1	0,18
Zwischenschicht	14,2	3,9	0,27
	8,5	1	0,11
Laufschicht	11,5	2,4	0,21
	13,5	4,3	0,32
Laufschicht (Hell)	2,8	0,03	0,01

Aufgrund der Fahrbelastung auf den Reifen von bis zu 2,4 t Radlast und Betriebstemperaturen von bis zu 150 °C sind herkömmliche Transponderbauweisen, beispielsweise Folientransponder, nicht zur Integration geeignet. Das im Reifen verwendete Gummi bewirkt insbesondere durch den hohen Rußanteil, aber auch durch andere Zusätze und Materialeigenschaften, eine erhebliche Dämpfung des elektromagnetischen Feldes. Für die Integration der Transponder in einem SE-Reifen wurde daher sowohl ein mechanisches Konzept erarbeitet, das Beständigkeit der eingebetteten elektronischen Komponenten ohne eine Schwächung des umgebenden Reifenmaterials ermöglicht, als auch ein Schaltungskonzept, welches die Aufnahme und Übertragung der Reifenzustandsgrößen ermöglicht.

2 TRANSPONDERGESTALTUNG FÜR DIE INTEGRATION IN HOCHBELASTETE ELASTOMERKOMPONENTEN

Während der zyklischen Fahrbelastung eines Flurförderzeugreifens durchläuft eine eingebettete Komponente drei Belastungsphasen (Abbildung 2), bei denen eine Biegewechselbelastung durch die Abflachung des Reifens im Bereich der Aufstandsfläche erfolgt (Übergänge zwischen Zone I und II). Die entstehenden Zug- und insbesondere Scherkräfte als Folge der Verformung stellen für einen Transponder im Reifeneninneren das größte mechanische Beschädigungspotential dar und werden bei der Transponderkonzeption berücksichtigt.

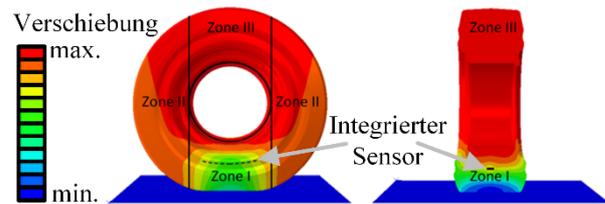


Abbildung 2. Verformung eines SE-Reifens in Folge der Normalkraft und Verformungszonen [Mis14] vgl. [Lot11]

Wie in [Klt16] erörtert wurden zur Erfassung der Reifenzustandsgrößen zwei unterschiedliche Messkonzepte mit entsprechenden Transponderkonzepten erarbeitet. Die Temperaturmessung erfolgt dabei durch den im verwendeten Transponderchip integrierten Temperatursensor der bereits für eine Anwendung in Messbereichen bis 150°C untersucht wurde. Eine Verformungsmessung mit einer Vollbrücke aus laserstrukturierten Dehnungsmessstreifen (DMS) auf einem mehrlagigen Platinentransponder und die Druckbelastungsmessung mit einem folienbasierten piezoresistiven Sensor auf der Oberseite eines Nahfeldtransponders mit induktiv gekoppelter Fernfeldantenne auf Gewebebasis.

2.1 MEHRLAGENPLATINE MIT LASERSTRUKTURIERTEN DEHNUNGSMESSSTREIFEN

Für die DMS-Verformungsmessung mit einem eingebetteten Platinentransponder auf Basis des Transponderchips SL900A von ams, steht eine maximale Messleistung von 0,68 mW bei 3,4 V Betriebsspannung im passiven Betrieb [ams13] zur Verfügung. Um eine für den integrierten 10-Bit-AD-Wandler des Chips ausreichend große Widerstandsänderung durch die zu erwartende Verformung zu erzielen ist eine Vollbrückenschaltung aus vier individuell hergestellten Messgittern mit Operationsverstärker erforderlich. Die einzelnen Messgitter müssen dabei jeweils mindestens 3 kΩ als Nennwiderstand aufweisen, da anderenfalls die verfügbare Messleistung des Transponderchips nicht ausreicht. Standardisierte DMS-Messgitter sind am Markt nicht mit dem erforderlichen Widerstandsnennwert verfügbar, so dass bei der Herstellung der Transponder eine ausreichend große Kupferfläche auf der Transponderober- und Unterseite vorgesehen wird, um eine anschließende Laser-Strukturierung

[DSK12] zu realisieren. Die erforderliche Größe der DMS Flächen, ergibt sich gemäß der Berechnung in Abbildung 3 aus der Kupferschichtdicke der Platine von $9 \mu\text{m}$, der Grundanforderung eines möglichst quadratischen Leiterbahnquerschnitts und der für den Sollwiderstand erforderlichen Länge zu ca. $13 \times 24,8 \text{ mm}$ (unter zusätzlicher Berücksichtigung von Fertigungsabständen zwischen den DMS-Mäandern, Radien und Zuleitungen der Sensorfläche).

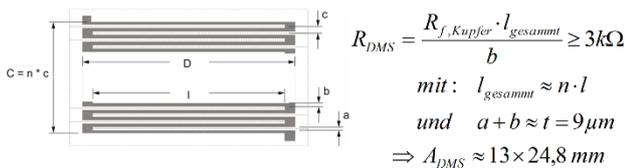


Abbildung 3. Berechnungsgrundlagen für die Auslegung eines Widerstandsgitters für die Dehnungsmessung

Vorversuche (vgl. [BLB12]), Analysen mit einem Versuchstransponder (siehe Abbildung 4, [Jüt15]) und Simulationen der Antenneneigenschaften legen dar, dass das Messprinzip funktionsfähig ist.

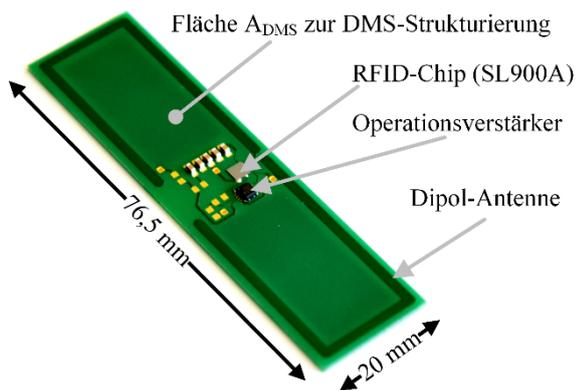


Abbildung 4. Versuchstransponder für die Verformungsmessung mit DMS (ohne Laser-Strukturierung)

Die durch die DMS-Flächen und die komplexe Messschaltung hervorgerufene Dämpfung des Antennenfeldes die am Transponder verfügbare Leistung jedoch erheblich reduziert. Eine Messung bei einer reduzierten verfügbaren Leistung erfordert unter anderem eine Erhöhung des Messbrückennennwiderstands und somit eine Vergrößerung der DMS-Fläche, wodurch wiederum die Dämpfung des Antennenfeldes zusätzlich verstärkt wird. Zudem ist für die Integration im Reifen ein möglichst kleiner Transponder von Vorteil, um Beschädigungsrisiken am Reifen und dem Transponder zu minimieren. Eine platzsparende Transponder-Antennengestaltung, beispielsweise umschließend um die DMS-Flächen, ist somit nicht realisierbar. Eine räumliche Entkoppelung der Antenne und der DMS-Flächen zur Dämpfungsreduzierung führt dagegen zu einer nicht akzeptablen Vergrößerung des Transponders und somit erhöhten Beschädigungsrisiken.

Daher ist die Verwendung des konzeptionierten Platinentransponders in der anvisierten Form für die Integration im SE-Reifen nicht erfolgsversprechend. Optimierungspotentiale für dieses Konzept liegen in der Verwendung eines weiterentwickelten Chips mit einer besseren Leistungsversorgung und der Verwendung der DMS-Flächen als Bestandteile der Transponderantenne, wobei eine Trennungsmöglichkeit der HF-Antennenfunktion und der DC-Widerstandsmessung elektrotechnisch noch untersucht werden muss.

2.2 NAHFELDTRANSPONDER MIT INDUKTIV GEKOPPELTER FERNFELDDANTENNE

Eine Alternative zur DMS-Verformungsmessung besteht in der Verwendung eines piezoresistiven Foliensensors, der auf eine senkrechte Druckbelastung mit einer Widerstandsverringerng reagiert (Abbildung 5).

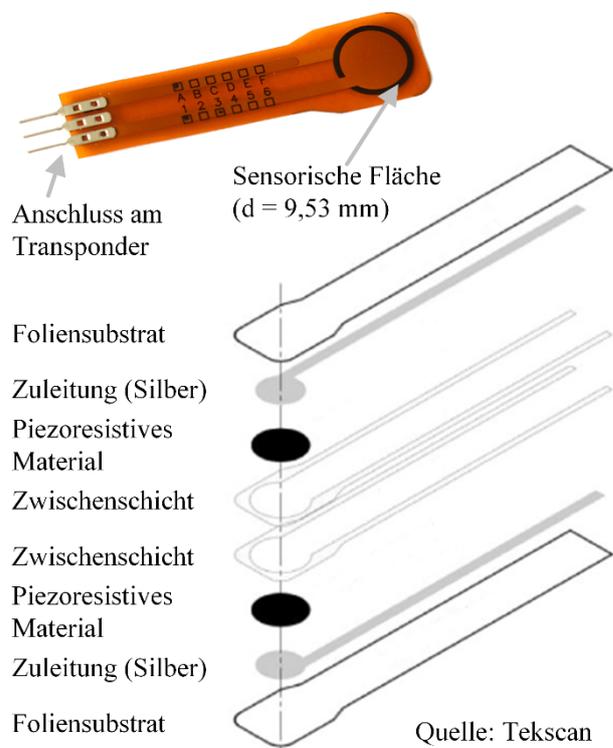


Abbildung 5. Piezoresistiver Foliensensor zur Druckkraftfassung (HT201-H von Tekscan)

Die erforderliche Messfläche, sowie der elektrotechnische Aufwand zur Aufnahme des Messwerts sind im Vergleich zu einer Messung mit DMS erheblich geringer. Außerdem ist der Energiebedarf für die Messung vergleichsweise gering, da kein zusätzlicher Operationsverstärker oder andere Komponenten benötigt werden und sich die zu messenden Widerstandswerte für die erwarteten Druckbelastungen im Bereich oberhalb von $20 \text{ k}\Omega$ (Abbildung 6) befinden.

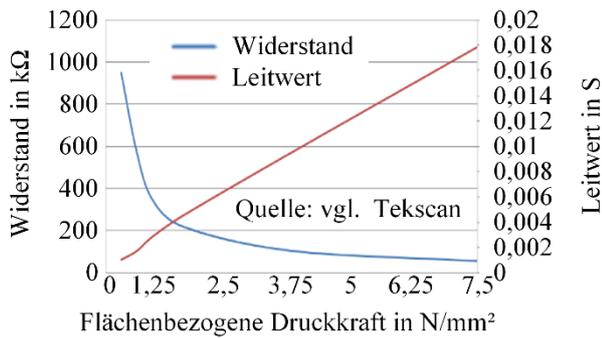


Abbildung 6. Typisches Messverhalten eines piezoresistiven Sensors

Die Größe des Transponders wird daher nicht wie bei dem vorgestellten Platinenkonzept durch die Sensorfläche sondern durch die Antennenfläche maßgeblich bestimmt. Um die Störstelle im Reifen zu minimieren wurde als Transponderbauform eine Kombination aus einem kleinen runden Nahfeldtransponder und einer flexiblen auf Glasfasergewebe aufgetragenen Fernfeldantenne gewählt. In Abbildung 7 ist der Verbund aus Nahfeldtransponder und flexibler Fernfeldantenne dargestellt.

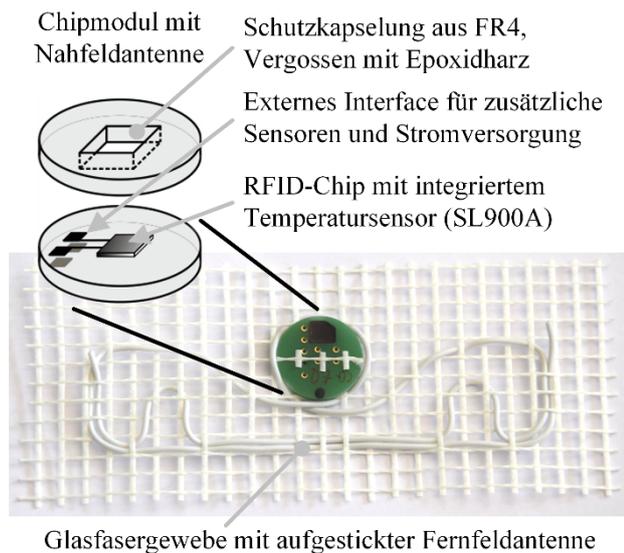


Abbildung 7. Aufbau des Gewebetransponders aus Chipmodul und Fernfeldantenne

Der Nahfeldtransponder, im Folgenden als Chipmodul bezeichnet, besteht aus einer mehrlagigen Platine und dient dem mittig integrierten Transponderchip als mechanischer Schutz. Die Fernfeldantenne wird induktiv mit dem Chipmodul gekoppelt, so dass keine mechanisch starre Verbindung zwischen beiden Komponenten besteht. Durch diese Koppelung sind geringfügige Relativbewegungen der Komponenten möglich, ohne dass es zu einer Abscherung der Antenne und somit einer Zerstörung des Transponders kommt. Das Glasfasergewebe mit der Antenne wird durch das Reifenmaterial vollständig durchdrungen und bewegt sich bei Belastung mit, so dass die Fernfeldantenne nicht als Störstelle im Reifen wirkt.

Eine Integration des Belastungssensors direkt auf der Oberfläche des Chipmoduls, wie in [Klt16] ursprünglich geplant (Abbildung 8), führt zu einer zusätzlichen Dämpfung des Antennenfeldes und reduziert die Reichweite des Transponders. Der piezoresistive Foliensensor wird daher für die Umsetzung in Form eines Demonstrators als eine zusätzliche Transponderkomponente außerhalb der Transponderantenne angeordnet. Durch diesen Aufbau ist der Sensor höheren Scherkräften ausgesetzt und die Störstelle im Reifen wird vergrößert.

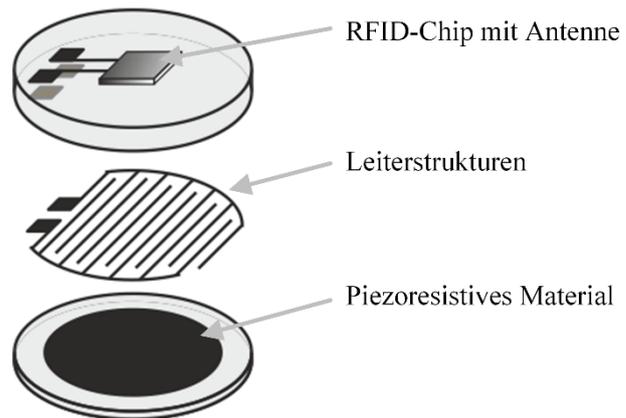


Abbildung 8. Konzept zur Integration des piezoresistiven Sensors auf der Chipmoduloberseite

Ein weiterer Vorteil dieser Transponderbauform ist neben der geringen Baugröße die Möglichkeit durch einen Austausch der Komponenten Antenne bzw. Chipmodul unterschiedliche Konfigurationen zu testen ohne vollständig neue Transponder herstellen zu müssen. Abweichende Antennendesigns mit angepassten Feldeigenschaften können mit minimalen Aufwand über die induktive Kopplung mit dem Chipmodul verbunden werden. Das Chipmodul ist zudem in drei unterschiedlichen Ausführungen realisiert worden (Abbildung 9), die sich hinsichtlich der Anschlussmöglichkeiten unterscheiden.

In der einfachsten Variante (Typ 1) sind keine weiteren Komponenten anschließbar. Ein Transponder mit diesem Chipmodul ist in der Lage eine Identifikationsnummer zu senden und die Temperatur zu messen. Die zweite Variante (Typ 2) verfügt über zusätzliche Anschlüsse zur Energieversorgung und ermöglicht somit die Speicherung von Messwerten sowie die Leistungssteigerung bei Messung und Datenübertragung. Für die dritte Variante (Typ 3) wurden Anschlüsse für den Betrieb von Komponenten wie dem piezoresistiven Foliensensor herausgeführt. Allerdings ist auch der Anschluss alternativer Systeme wie beispielsweise einem zusätzlichen zweiten Temperatursensor implementiert.

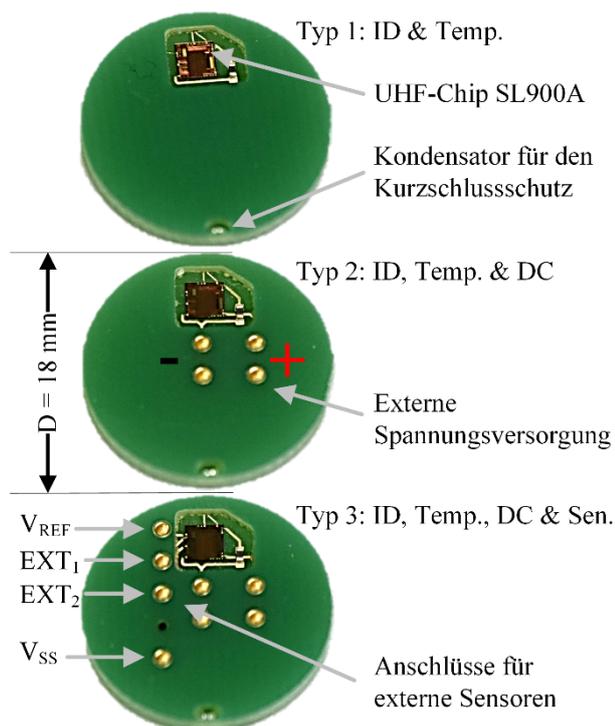


Abbildung 9. Varianten des Chipmoduls mit unterschiedlichen Anschlüssen

2.3 INTEGRATION DER TRANSPONDER IN EINEN SE-REIFEN

Beim Herstellungsprozess eines SE-Reifens wird das vorgewärmte weiche Reifenmaterial (Rohkautschuk) schichtweise übereinander gewickelt, wobei die Materialmischung je nach Reifenschicht und -modell gewechselt wird. Der fertiggestellte Reifenrohling wird in einer Vulkanisierpresse über mehrere Stunden bei ca. 150°C und hohem Druck geformt. Während des Vulkanisierprozesses und der damit verbundenen Formgebung finden erhebliche Fließprozesse statt, die sich auch auf eingebettete Komponenten erstrecken. Allerdings finden die komplexeren mehrachsigen Fließprozesse überwiegend im Bereich der Laufschrift statt, so dass die Transponder in der Zwischenschicht zwar ihre Position und Krümmung geringfügig verändern, eine vollständige Form- oder Positionsänderung jedoch nicht beobachtet werden konnte und auch nicht zu erwarten ist. Derart geringe Formabweichungen der Antenne werden durch eine geeignete breitbandige Auslegung der Antennenstruktur kompensiert. Die praktischen Auswirkungen der Positionsabweichungen auf die Temperaturmessung lassen sich ohne weitere statistische Untersuchungen nicht abschließend beurteilen. Neben der exakten Position des Sensors haben auch die Reifenabnutzung, das Belastungskollektiv und weitere Umgebungseinwirkungen einen Einfluss auf die exakte lokale Temperaturverteilung innerhalb der Zwischenschicht.

Die Integration der Transponder während des Produktionsprozesses ist mit minimalem Aufwand realisierbar, insofern die Transponderausrichtung entlang der Wickel Ebene tangential bzw. axial auf einer der Materiallagen erfolgen kann. Aufgrund von Schwankungen der Materialstärke im Wicklungsprozess ist eine exakte Höhenpositionierung des Transponders derzeit aber nicht ohne weiteren messtechnischen Aufwand möglich. Eine praxistaugliche Umsetzung der Sensortransponder muss daher tolerant genug gegenüber den Positionsabweichungen bei der Platzierung und in Folge der anschließenden Fließprozesse sein.

Für eine mechanisch belastbare Integration der Transponder in den Reifen ist die Anhaftung des Reifenmaterials an der Transponderoberfläche besonders wichtig. Trennschichten durch Oberflächenanhaftungen auf den Transpondern oder eine fehlende Haftgrundierung führen zu einem Ablösen zwischen Transponder und umgebenden Reifenmaterial. Die entstehende zusätzliche Reibung an der Transponderoberfläche erhöht die mechanische und thermische Belastung und bewirkt die Zerstörung des Reifens und des Transponders.

3 SYSTEMINTEGRATION IN EINEM BEISPIELHAFTEN GABELSTAPLER

Neben der Integration eines Transponders mit sensorischen Fähigkeiten in einen SE-Reifen ist für die Überwachung des Reifenzustands im Fahrzeugbetrieb auch die Integration eines geeigneten Readersystems am Gabelstapler erforderlich (Abbildung 10, oben). Als Antennenkonfiguration kommen im Wesentlichen drei unterschiedliche Bauformen in Frage: Die klassische Dipol-Antenne erfordert zu viel Raum und hat eine ungerichtete Abstrahlung, wodurch sie für diese Anwendung nicht optimal ist. Eine Schlitzantenne stellt aufgrund der Integrierbarkeit in bestehende Konstruktionsteile eine interessante Möglichkeit dar, ist allerdings in Form eines baulich geeigneten Standardsystems nicht verfügbar. Der zum Einsatz kommende Reader mit Patch-Antenne (UDL100 von deister electronic) hat eine gerichtete Abstrahlung und ist sowohl vom erforderlichen Bauraum als auch hinsichtlich der mechanischen Robustheit für die Integration geeignet.

Für einen mit Hilfe von ANSYS HFFS beispielhaft untersuchten Gegengewichtstaplers des Herstellers Still (Typ RX 20-20) wurden mehrere realistische Anbaupositionen des Readers hinsichtlich ihrer Feldausbreitung und der vorherrschenden Umgebungsbedingungen untersucht. Ein Einbau im hinteren Bereich des Radkastens (Abbildung 10, unten links) bietet einen optimalen Schutz vor mechanischen Beschädigungen des Readers und deckt einen vergleichsweise großen Bereich des Reifens elektromagnetisch ab. Allerdings ist die Entfernung zwischen Reader und Transponder bei dieser Einbauposition maximal.

Ein senkrechter Einbau fahrzeugseitig neben dem Reifen (Abbildung 10, unten mittig) hat in der Simulation die größte Reifenabdeckung, da das elektromagnetische Feld sich um die Felge herum ausdehnen kann. Ein senkrechter Einbau des Readers erfordert die passende tangentielle Einbringung der Transponder, um eine Lesbarkeit zu gewährleisten. Hierbei entstehen größere Verformungen auf den Transponder als bei einer Einbringung quer zur Laufrichtung des Rades. Zudem ist der Transponder im Bereich der Reifenaufstandsfläche aufgrund einer ungünstigen Ausrichtung zwischen Transponder- und Readerfeld nicht oder nur über Reflexionen lesbar.

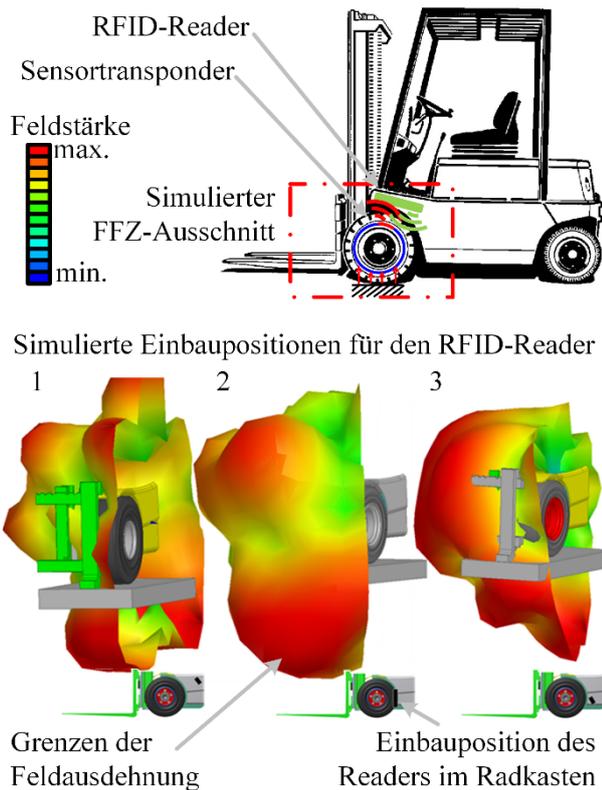


Abbildung 10. Gesamtkonzept für die Verwendung eines Sensortransponders an einem Gabelstapler und Simulationsergebnisse aus HFSS für unterschiedliche Einbaupositionen am FFZ (vgl. [Mey15])

Die dritte dargestellte Einbauposition (Abbildung 10, unten rechts) befindet sich näher am Reifen und insbesondere näher an der Reifenaufstandsfläche, wodurch die Feldabdeckung für die Belastungserfassung verbessert wird, was aber eine geringere Abdeckung der vorderen Reifenseite zur Folge hat.

Für die Erfassung der Reifenaufstandskraft ist Einbaupositionen 2 nicht ausreichend geeignet, so dass bei der praktischen Untersuchung die Einbaupositionen 1 und 3 sowie Varianten dieser Positionierungen näher untersucht werden.

Vorderer linker Kotflügel RFID-Reader UDL100 mit einer RX 20-20 variabler Positionierung



SE-Reifen mit integrierten Sensor-Transpondern Messrechner zur Leserateerfassung

Abbildung 11. Prüfstand für die Untersuchung der erreichbaren Leserate mit einem Sensor-Transponder und einem am Fahrzeugmodell verbauten RFID-Reader

Für die praktischen Untersuchungen der Lesbarkeit insbesondere im Fahrbetrieb des Fahrzeugs wird der in Abbildung 11 dargestellte Leserateprüfstand verwendet, bestehend aus einem elektrischen Antrieb sowie dem Originalkotflügel eines Gabelstaplers (Still RX 20-20) und für die Feldausbreitung relevanten additiv erstellten und metallisch beschichteten Fahrwerkskomponenten. Anhand des Prüfstands werden unter elektromagnetisch realitätsnahen Bedingungen unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten lastfrei simuliert und die Erreichbarkeit der integrierten Transponder bei unterschiedlichen Readeranbaupositionen und Fahrgeschwindigkeiten untersucht. Hierbei konnten die Ergebnisse der Simulation nur teilweise bestätigt werden. Die überprüften Anbaupositionen, bei denen Variationen der Positionen 1 und 3 verwendet wurden, ermöglichen bei nahezu allen realistischen Positionierungen und allen untersuchten Fahrgeschwindigkeiten (bis zu 25 km/h) ein Auslesen des Sensorsignals auf nahezu 180° des Reifenumfangs. Ein Auslesen der Transponder auf der readerabgewandten Seite war bei keinem Versuch möglich. Für die praxisnahe Umsetzung eines am Gabelstapler integrierten RFID-Readers ist daher die Entwicklung eines angepassten Readers erforderlich, der ein Auslesen der Transponder auf 360° des Reifenumfangs ermöglicht.

4 WEITERE ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN FÜR INTEGRIERTE SENSOR-TRANSPONDER

Der entwickelte Transponder kann neben dem Einsatz in SE-Reifen auch in anderen vergleichbaren Komponenten verwendet werden beispielsweise in Luftreifen, elastischen Kupplungen, Schläuchen, Matten oder Dämpfern. Durch den Austausch des piezoresitiven Foliensensors gegen einen zweiten Temperatursensor oder andere Sensorkomponente sind zudem Einsatzbereiche möglich, bei denen nicht Temperatur und Belastung son-

dem beispielsweise Feuchtigkeit oder Vibrationen gemessen werden sollen.

In Verbindung mit einer dauerhaften Energieversorgung sind darüber hinaus auch Anwendungen möglich, bei denen ein Loggen der Spitzenlasten oder zeitgesteuerter Messwerte für die Prozess- und Produktüberwachung erforderlich sind, beispielsweise bei der Montage von Komponenten oder zur Vermessung des Vulkanisierprozesses eines Gummibauteils.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Für die Überwachung des inneren Belastungs- und Temperaturzustandes eines SE-Reifens wurden passive RFID-Transponder mit integrierten Sensoren entwickelt. Die Verwendung von laserstrukturierten Dehnungsmessstreifen sowie die Integration eines piezoresitiven Foliendruckensors zur Belastungsmessung wurden untersucht und entsprechende Versuchstransponder realisiert. Transponder bestehend aus einem festen Chipmodul und einer flexiblen Gewebeantenne haben sich als besonders geeignet für die Integration gezeigt.

Das verwendete Chipmodul besteht aus einer vergossenen mehrlagigen Platine und schützt die innenliegende Elektronik. Die auf Glasfasergewebe gestickte Transponderantenne wird vom Reifenmaterial durchdrungen, so dass der Transponder eine minimale Störstelle im Reifen darstellt und dennoch in der Lage ist Messdaten aus dem Reifinneren zu senden. Der verwendete Chip verfügt über einen integrierten Temperatursensor mit einem einstellbaren Messbereich von bis zu 150 °C und kann über den angeschlossenen piezoresitiven Foliensensor die senkrechte Druckbelastung im Gummi aufnehmen.

Für die Untersuchung des Zusammenwirkens von Transponder und Reader an einem Gabelstapler wurden Simulationen mit ANSYS HFSS durchgeführt und ein Leseratenprüfstand aufgebaut, an dem die Fahrgeschwindigkeit des Gabelstaplers und die Anbauposition des Reader variiert werden. Eine Kommunikation mit den Transpondern konnte bei Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 25 km/h auf 180° des Reifenumfangs realisiert werden.

Weitere Anwendungen für die vorgestellten Transpondersysteme neben der Echtzeitüberwachung sind die Produkt- und Produktionsüberwachung sowie die Datengenerierung zur Prozessoptimierung.

6 FÖRDERHINWEIS

Das IGF-Vorhaben 18066 n/1 der Forschungsgemeinschaft Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme e.V. (IFL) wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

LITERATUR

- [ams13] ams: *Technische Dokumentation SL900A - SL900A-Frequently Asked Questions*. Revision 1.0 – 23/05/2013, www.ams.com
- [BLB12] Bär, Florian; Lotz, Christoph; Bouzakis, Antonios, et al: *Sensorintegration in Flurförderzeugreifen*. Konferenzbeitrag, 9. Hamburger Staplertagung, 2012, Forschungskatalog Flurförderzeuge, S. 43-50. Hamburg, ISBN 978-3-86818-037-4
- [DSK12] Düsing, Jan; Suttman, Oliver; Koch, Jürgen et al: *Ultrafast Laser Patterning of Thin Films on 3-D Shaped Surfaces for Strain Sensor Applications*. JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering 3 (7), 311–315 (2012), DOI: 10.2961/jlmn.2012.03.0014
- [Jüt15] Jüttner, Jan-Florian: *Aufbau eines drahtlosen Sensornetzwerks zur thermischen und mechanischen Überwachung von SE-Reifen*. unveröffentlichte Bachelorarbeit, Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, Hannover 2015
- [Klt16] Kleinert, Steffen; Kleinert, Steffen; Overmeyer, Ludger: *Integrierte drahtlose Sensorsysteme für Flurförderzeugreifen*. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2016. DOI: 10.2195/lj_Proc_kleinert_de_201605_01
- [Lot11] Lotz, Christoph: *Integration von UHF-Transpondern in hochbelastete Erzeugnisse aus Gummimaterialien*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, Hannover 2011

- [Mey15] Meyer, Jan: *Aufbau eines RFID-Reader-Systems für die Erfassung von drahtlosen Reifensensoren an Flurförderzeugen*. unveröffentlichte Masterarbeit, Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, Hannover 2015
- [Mis14] Missal, Thomas: *Finite-Elemente-Analyse der dynamischen Spannungszustände in Super-Elastik-Reifen*. Unveröffentlichte Stud. Arbeit, Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, Hannover 2014
- [Tek10] Tekscan: *FlexiForce Sensor User Manuel (Rev H)*. www.tekscan.com, 2010
- [Tek16] Tekscan: www.tekscan.com; Abgerufen 07.06.2016

Dipl.-Ing. Steffen Kleinert, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer, Leiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Adresse: Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA), An der Universität 2, 30823 Garbsen
Phone: +49 511 762-18159, Fax: +49 511 762-4007
E-Mail: steffen.kleinert@ita.uni-hannover.de