

# Sensorintegration in Flurförderzeugreifen

Vorhaben Nr. 18066

---

Integration von Sensoren zur Aufnahme relevanter Zustandsgrößen in Flurförderzeugreifen

---

## Abschlussbericht

### Kurzfassung:

Das Ziel des Vorhabens bestand darin, anwendungsspezifische Verfahren zur Integration einer Drahtlos-Sensorik zur Temperatur- und Kraft- beziehungsweise Belastungsmessung im Hinblick auf die Anforderungen in Superelastik-Reifen (SE-Reifen) zu erforschen.

Zu diesem Zweck wurden RFID-Transponder konzipiert und realisiert, die neben der klassischen Identifikation auch sensorische Informationen im passiven Betrieb erfassen können. Untersucht wurden zwei unterschiedliche Transponderbauformen mit unterschiedlichen Sensorkonzepten zur Belastungserfassung: Ein mehrlagiger Platinentransponder mit laserstrukturierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und ein Transponder, bestehend aus einer flexiblen Gewebeantenne und einem kompakten Chipmodul mit einem piezoresistiven Kraftsensor.

Aufgrund der hohen elektromagnetischen Dämpfung durch die DMS bei einem ausreichend kompakt gestalteten mehrlagigen Platinentransponder, ist die Eignung dieses Konzepts für eine Integration eingeschränkt. Daher wurde nach der Konzeptüberprüfung das erfolgversprechendere Konzept des flexiblen Gewebetransponders weiter verfolgt.

Der realisierte Transponder besteht aus einer auf Glasfasergewebe gestickten Fernfeldantenne, die induktiv über eine Antennenspule mit dem Chipmodul gekoppelt wird. Die erreichte mechanische Entkoppelung bei der Energie- und Datenübertragung zwischen Antenne und Chipmodul ermöglicht die Durchdringung der Antenne durch das Reifenmaterial und minimiert somit die vom Transponder hervorgerufene Störstelle im Reifen. Für die Belastungserfassung wurde ein piezoresistiver Foliensensor verwendet, welcher auf Belastungen mit einer Verringerung des elektrischen Widerstands reagiert. Die Temperaturerfassung wird mit Hilfe eines im Transponderchip integrierten Temperatursensors durchgeführt. Mit diesem Transpondersystem wurden Kommunikationsreichweiten von bis zu einem Meter ermöglicht.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang: 64 S., 51 Abb., 6 Tab., 6 Lit.

Beginn der Arbeiten: 01.05.2014

Ende der Arbeiten: 30.06.2016

Zuschussgeber: BMWi / IGF-Nr. 18066

Forschungsstelle: Leibniz Universität Hannover,  
Institut für Transport- und Automatisierungstechnik

Leiter: Prof. Dr.-Ing. L. Overmeyer

Bearbeiter und Verfasser: Steffen Kleinert

Obmann des Arbeitskreises: Hartmut Weinhold, Continental Reifen GmbH

Vorsitzender des Beirates: Peter Dibbern, Jungheinrich AG



## Inhaltsverzeichnis

1	Management Report.....	1
2	Einleitung.....	2
3	Projektziele.....	3
4	Projektergebnisse.....	4
4.1	Analyse der mechanischen Belastungen auf eingebettet Komponenten.....	4
4.2	Konzepte für die Transpondergestaltung und die Erfassung der Zustandsgrößen ...	7
4.2.1	Voruntersuchungen und verwendbare Transponderbauweisen .....	7
4.2.2	Transponderchip SL900A .....	10
4.2.3	Geeignete Sensorkonzepte für den Einsatz in SE-Reifen .....	11
4.2.4	Konzepte für den Aufbau von Sensortranspondern.....	15
4.3	Realisierung und Untersuchung von Versuchstranspondern.....	17
4.3.1	Platinentransponder mit DMS-Vollbrücke .....	17
4.3.2	Flexibler Gewebetransponder mit piezoresistiver Messfolie.....	19
4.3.3	Praktische Versuche mit den erstellten Gewebetranspondern .....	24
4.3.4	Verwendete Hard- und Software.....	26
4.4	Anwendung des Messsystems an einem beispielhaften Flurförderzeug .....	29
5	Zusammenfassung und Ausblick .....	31
6	Veröffentlichungen und studentische Arbeiten .....	33
6.1	Nicht veröffentlichte studentische Arbeiten .....	33
7	Anhang.....	35
7.1	Literaturverzeichnis.....	35
7.2	Abkürzungsverzeichnis .....	35
7.3	Lastenheft (Zusammenfassung) .....	36
7.4	Softwaredokumentation des Python Messtools.....	40
7.5	Messprotokolle und Daten .....	47
7.6	Schaltungslayouts.....	52



## 1 Management Report

Goal of the project was to investigate application-specific processes to integrate passive wireless sensors for temperature and force, respectively load measurement with regard to the requirements in industrial truck tires.

For this purpose RFID transponders, that are able to capture sensor information in passive mode, have been designed and examined. Two different transponder types with different sensor concepts for detecting mechanical stress are compared: The first transponder concept based on a multilayer circuit board with four laser-structured strain gauges and the second concept, consisting of a flexible textile antenna and a compact so called chip module with a piezoresistive force sensor. The concept with the flexible fabric transponder is more promising for the tire integration and has therefore been prioritized after the practical concept review.

The realized transponder consists of a remote field antenna embroidered on glass fiber fabric, which is inductively coupled via an antenna coil with the chip module. The mechanical decoupling of energy and data transfer between the antenna and the chip module enables the tire material to interfuse the antenna and minimizes the mechanical separation inside the material texture caused by the transponder. A piezoresistive foil sensor is used for the load detection, which responds to the applied pressure with a reduction of its electrical resistance. The temperature measurement is implemented by using a temperature sensor built into the transponder chip. The achievable communication ranges, with this transponder system and the selected reader are of up to one meter.

To detect a beginning overturning of an industrial truck with the system, a strain sensor around the complete tire and secure communication with the transponders in each tire position are required. With a smaller strain sensor and the logging function of the chip, it is still possible to create a documentation of the tire loads and to determine necessary service processes and tire replacements.

An implemented sensor transponder supports temperature monitoring as well as storing temperature gradients over the operating period. An alternative use of the transponder is the temperature log during the tire vulcanization procedure. For this purpose, an external power supply has to be attached to the transponder because a wireless power supply inside the vulcanization form is not possible due to the electromagnetic closed shell.

For an optimal integration of the transponder, the size of the chip module has to be as small as possible, to minimize the mechanical effect on the surrounding material. A further reduction of the chip module size can be done by optimizing the board layout, as well as by improving the board structure and the used potting compounds.

To make a practical use of the transponder possible, an adaptation of the far field antenna design to each surrounding material has to be done. The two-piece design of the transponder enables the possibility to combine identical chip modules with different far field antennas and therefore to reduce the development effort significantly.

In addition to the usage in the exemplarily examined industrial truck tires (size: 180/70 - 8) the transponders are especially relevant if integrated into more resilient, and thus more costly tire sizes. Furthermore, the transponders can be used in other rubber components. For example: rotational elastic couplings, conveyor belts or pneumatic tires.

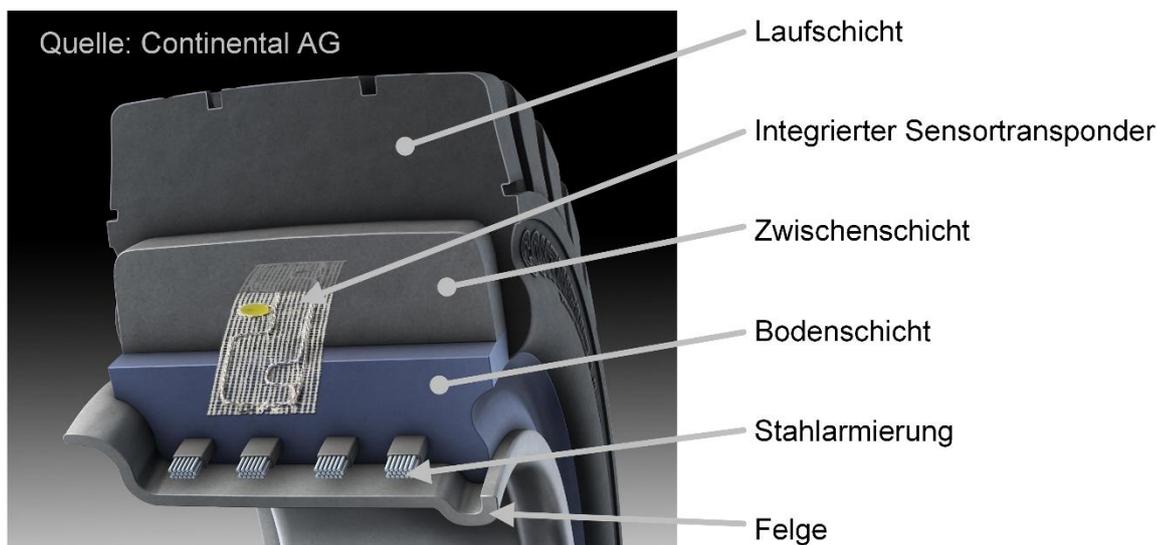
## 2 Einleitung

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 unterschiedlichen Gummimischungen mit angepassten mechanischen Eigenschaften verdanken (Abbildung 2-1). Jede Reifenschicht wird dabei für eine spezielle Funktion angepasst.

Die Laufschrift ist besonders Abrieb- und Schnittfest und kann im Betrieb nahezu vollständig abgefahren werden. Sie gewährleistet die Kraftübertragung auf die Fahrbahn und schützt die darunter befindlichen Materialschichten vor äußeren Einflüssen.

Die besonders elastische Zwischenschicht nimmt den Großteil der Verformung des Reifens auf und wirkt stoßdämpfend. Dieser Schicht verdankt der SE-Reifen seinen Namen.

Die Bodenschicht des Reifens ist besonders hart und je nach Ausführung mit Stahlarmierungen verstärkt. Sie gewährleistet den sicheren Halt des Reifens auf der Felge.



**Abbildung 2-1: Aufbau eines handelsüblichen SE-Reifens mit integriertem, beispielhaften Sensortransponder**

Die durch die Reifenverformung in Folge des Fahrbetriebs eingebrachte Energie wird in der Zwischenschicht in Wärme umgewandelt. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Reifenmaterials kommt es im Reifenzentrum zu einem Wärmestau, wobei sich die Zwischenschicht auf über 140° C aufheizen kann, während die äußeren Reifenbereiche kaum erhöhte Temperaturen aufweisen. Derart hohe Temperaturen im Reifeninneren führen zu einem Verlust der Materialstabilität im Reifenzentrum und somit zum Verlust der Reifentragfähigkeit. Fahrzeugausfälle, bis hin zu Unfällen mit zerreißen oder platzenden Reifen sind die Folge.

Um die Betriebssicherheit der Bereifung zu steigern wurde im Rahmen des Vorhabens untersucht, wie Zustandsgrößen aus dem Reifeninneren drahtlos erfasst werden können um Schäden und Unfälle anhand der Daten zu verhindern, bzw. diese in einem frühen Anfangsstadium zu erkennen.

### 3 Projektziele

Das Ziel des Vorhabens bestand darin, anwendungsspezifische Verfahren zur Integration einer Drahtlos-Sensorik zur Temperatur- und Kraftmessung beziehungsweise Belastungserfassung im Hinblick auf die Anforderungen in SE-Reifen zu erforschen.

Wird ein SE-Reifen belastet, verformt dieser sich aufgrund des viskoelastischen Verhaltens der verwendeten Gummimaterialien im Bereich über der Bodenaufstandsfläche. Dabei entstehen komplexe Spannungszustände, die auf eingebettete Fremdkörper im SE-Reifen übertragen werden. Während des Reifenbetriebs durchlaufen die eingebrachten Fremdkörper diesen Belastungsbereich bei jeder Umdrehung. Dies führt zu einer kontinuierlichen Biegewechselbelastung der integrierten Komponenten. Das zu integrierende System muss in der Lage sein, sowohl den statischen als auch den dynamischen Belastungen während der gesamten Reifenlebensdauer standhalten zu können und darf seinerseits die Lebensdauer und Tragfähigkeit des Reifens nicht negativ beeinflussen. Um dieses Ziel zu erreichen sind Maßnahmen zur Erhöhung der mechanischen Belastbarkeit der eingebetteten Komponenten wie Materialanpassungen und der Einsatz anwendungsorientierter Sensorgehäuse zu erproben. Als Grundlage für die Auslegung des mechanischen Aufbaus und der Festlegung von Spezifikationen der Sensorgestaltung sollten zunächst die Belastungen auf eingebetteten Komponenten in SE-Reifen untersucht werden.

Die Reifen sind das Verbindungselement des Fahrzeugs zur Fahrbahn und somit für den sicheren Betrieb essentiell. Alle Messungen relevanter Zustandsgrößen, wie die Reifeninnentemperatur und die Bodenaufstandskraft, sind außerhalb des Reifens nicht oder nur mit Verzögerungen möglich. Das zweite Ziel des beantragten Forschungsprojekts war daher die Erfassung und Übermittlung der relevanten Zustandsgrößen aus einem SE-Reifen während des Fahrbetriebs. Durch die Auswertung dieser Daten sollten die Ursachen kritischer Zustände des Fahrzeugs und der SE-Reifen detailliert analysiert und Schadensfälle bzw. Unfälle frühzeitig erkannt werden.

Neben der mechanisch beständigen Gestaltung der Sensorik und der Aufnahme von Zustandsgrößen ist auch die Übertragung der Daten an ein Fahrzeug für das nachgelagerte Ziel, der Realisierung eines Sicherheitssystems für Flurförderzeuge, von grundsätzlicher Bedeutung. Daher wurden die Projektziele in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss dahingehend erweitert, dass auch die drahtlose Datenübertragung auf ein exemplarisches Flurförderzeug untersucht wird.

Durch die Verwendung eines transponderbasierten Systems mit einer eindeutigen Identifizierung des Reifens sollte zudem die Rückverfolgbarkeit und die Zuordnung von Produktionsdaten jedes einzelnen Reifens ermöglicht werden.



**Abbildung 3-1: Ziele des Forschungsvorhabens**

## 4 Projektergebnisse

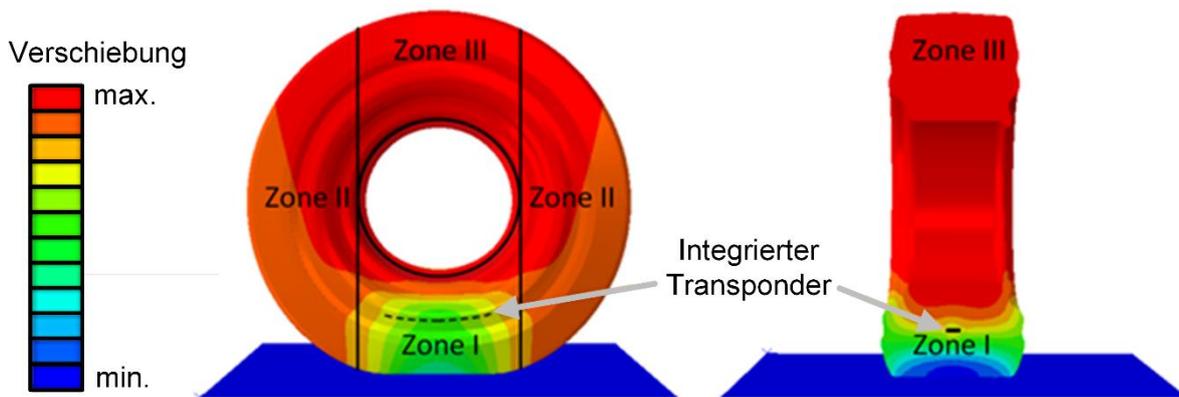
Die Ergebnisse des Vorhabens gliedern sich in vier aufeinander aufbauende Schwerpunkte: Die Analyse der mechanischen Belastungen auf in SE-Reifen eingebettete Komponenten, die aus der Analyse abgeleitete Konzeption von drahtlosen Sensorsystemen und die anschließende Umsetzung und Untersuchung sowie die Betrachtung der Messdatenübertragung an ein Fahrzeug.

### 4.1 Analyse der mechanischen Belastungen auf eingebettete Komponenten

Aufbauend auf den Ergebnissen mehrerer Vorarbeiten am ITA [BLB12] wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, um die Spannungszustände und Belastungsverläufe im SE-Reifen ausführlicher zu analysieren.

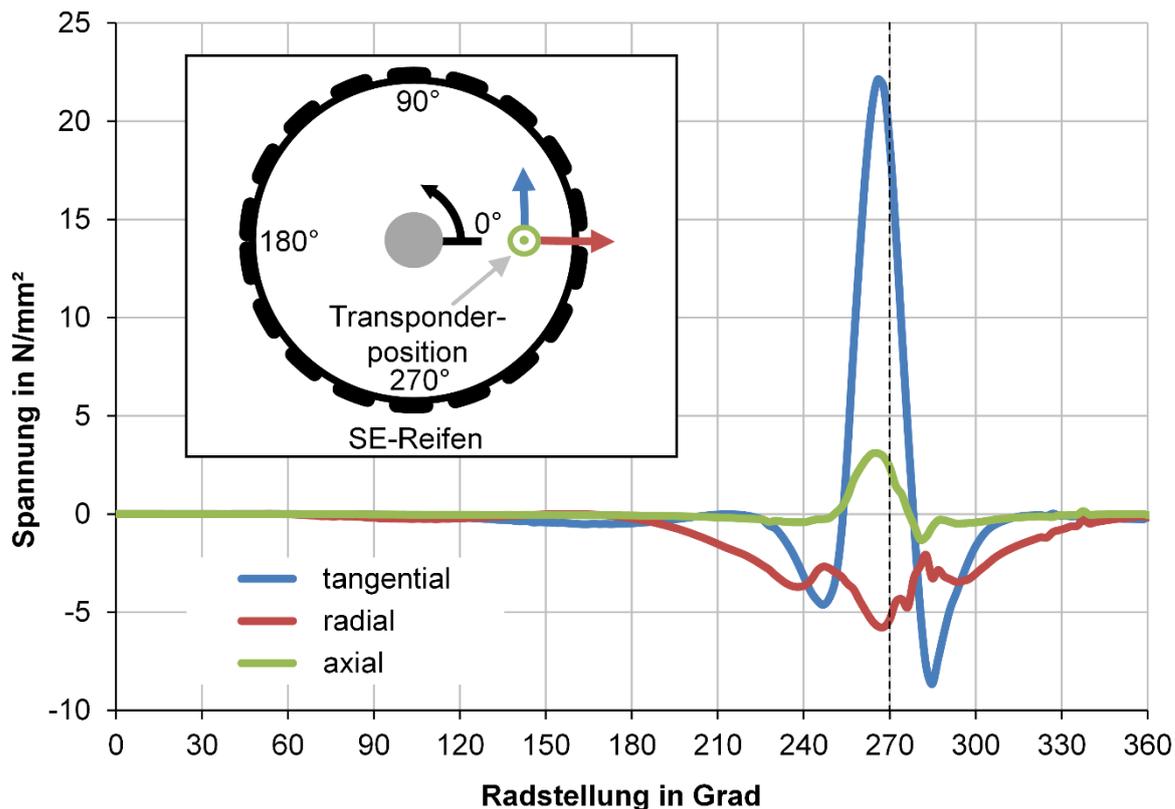
Anhand mehrerer FE-Simulationen mit der Simulationssoftware Abaqus [Mis14, Hak14], wurde die statische Belastungsverteilung und der dynamische Belastungsverlauf im Inneren eines SE-Reifens mit einem integriertem Sensorsystem und die zu erwartenden Belastungen auf die integrierten Komponenten während des Durchlaufens der Bodenaufstandszone untersucht.

Anhand der statischen Belastungsanalyse wurden drei Belastungszonen (Abbildung 4-1) identifiziert. Zone I, direkt unterhalb der Felge, stellt dabei den Bereich mit der deutlichsten Verformung und Belastung des Reifens dar. Zone III dagegen weist praktisch keine Verformungen auf und die außen liegenden Zonen II zeigen einen Übergang, bei dem die Verformung von der Reifen-Laufläche nach innen geringer wird. Bei den Übergängen zwischen Zone I und II treten Biegewechselbelastungen auf, welche aufgrund der entstehenden Zug- und insbesondere Scherkräfte für einen Transponder im Reifeninneren das größte mechanische Risiko darstellen und bei der Transponderkonzeption berücksichtigt werden. Die Verformung des Reifens beschränkt sich in allen Zonen (vgl. Abbildung 2-1) vorwiegend auf die Lauf- und Zwischenschicht. Die Bodenschicht wird nur minimal verformt.



**Abbildung 4-1: Finite Elemente Analyse eines SE-Reifenmodells mit integriertem Transponder in der Zwischenschicht**

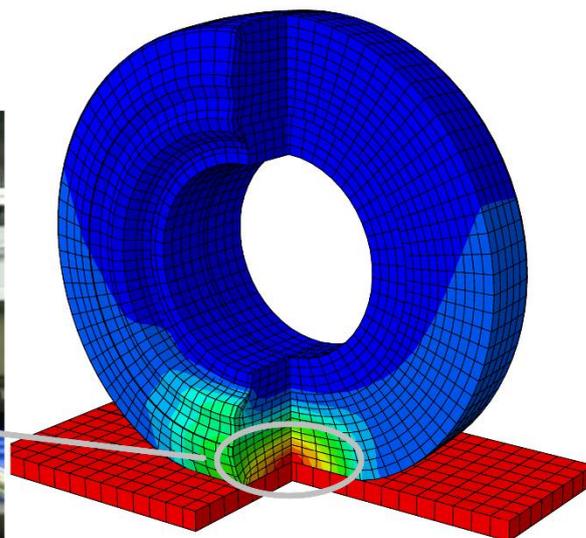
Die Untersuchungen der dynamischen Reifenbelastung bestätigen im Wesentlichen die zu erwartenden maximalen Spannungen in tangentialer Richtung des Sensorsystems (Abbildung 4-23). Zudem wird der Einfluss durch den Reifenlatsch deutlich. Dieser führt dazu, dass die Belastungsspitze nicht bei einer Winkelstellung von 270°, sondern seitlich verschoben auftrat und der Spannungsverlauf zudem asymmetrisch ist. Basierend auf den ermittelten Spannungsbelastungen im Bereich des Reifenlatsches wurde für die Auslegung der Sensoren von maximal 22 N/mm<sup>2</sup> Zugspannung in Transponderlängsrichtung und maximal 6 N/mm<sup>2</sup> senkrechter Druckbelastung ausgegangen.



**Abbildung 4-2: Tangentialer, radialer und axialer Spannungsverlauf an einem integrierten Transponder während der Fahrt**

Die Herstellung eines SE-Reifens mit integrierter Sensorik und die anschließende Untersuchung an einem Prüfstand stellen einen wesentlichen Kostenfaktor und zusätzlich einen erheblichen zeitlichen Aufwand dar. Durch die Entwicklung einer reduzierten Untersuchungsmethodik für in Reifengummi integrierte Sensor- bzw. Transpondersysteme (Abbildung 4-3) wurde geprüft, ob anhand einer Laboruntersuchung Kosten- und Zeitaufwand für die Validierung der erarbeiteten Sensoren eingespart werden kann.

Nachgebildeter Bereich zur Untersuchung auf einer servohydraulischen Prüfeinrichtung



FE-Simulation eines SE-Reifens mit integriertem Sensorsystem

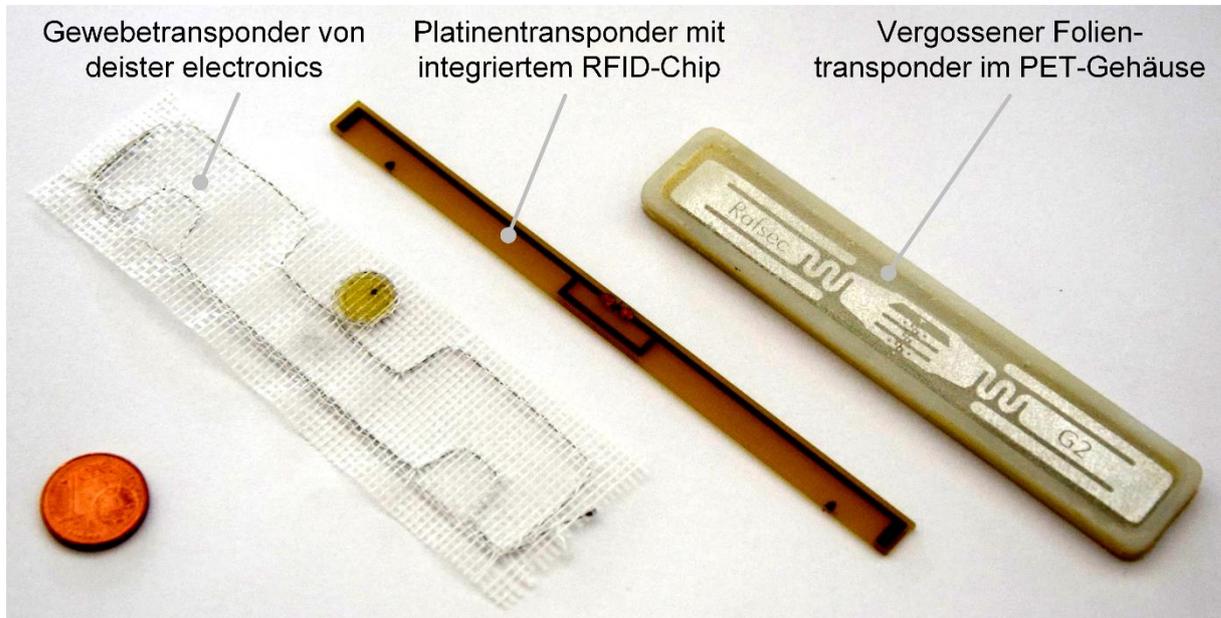
**Abbildung 4-3: Laboruntersuchung integrierter Transponder**

Die Nachstellung eines realitätsnahen Belastungsumfeldes ist jedoch nur für statische Untersuchungen ausreichend gegeben. Komplexere dynamische Verformungs- und Belastungszustände, wie sie bei integrierten Komponenten auftreten, sind dagegen nicht mit einem vertretbaren Aufwand realisierbar.

## 4.2 Konzepte für die Transpondergestaltung und die Erfassung der Zustandsgrößen

### 4.2.1 Voruntersuchungen und verwendbare Transponderbauweisen

Auf Grundlage umfangreicher Untersuchungen und FE-Analysen (siehe Kapitel 4.1) wurden verschiedene Bauformen für drahtlose Sensortransponder verglichen (Abbildung 4-4).



**Abbildung 4-4: Transponderbauformen für die Integration von drahtlosen Belastungssensoren**

Für die Auswahl geeigneter Bauformen wurden konventionelle Transponder ohne Sensorfunktion in SE-Reifen integriert und hinsichtlich Ihrer Belastbarkeit auf Reifenprüfständen untersucht.

Für alle durchgeführten Belastungsversuche wurde die Auflast des Reifens stufenweise von 50 % der Reifennennlast (8,1 kN) bis auf 175 % (28,33 kN) gesteigert. Jede Laststufe wurde jeweils 20 Minuten bei 10 km/h aufgebracht, so dass nach der Versuchsdurchführung eine Gesamtfahrstrecke von 20 km zurückgelegt wurde.

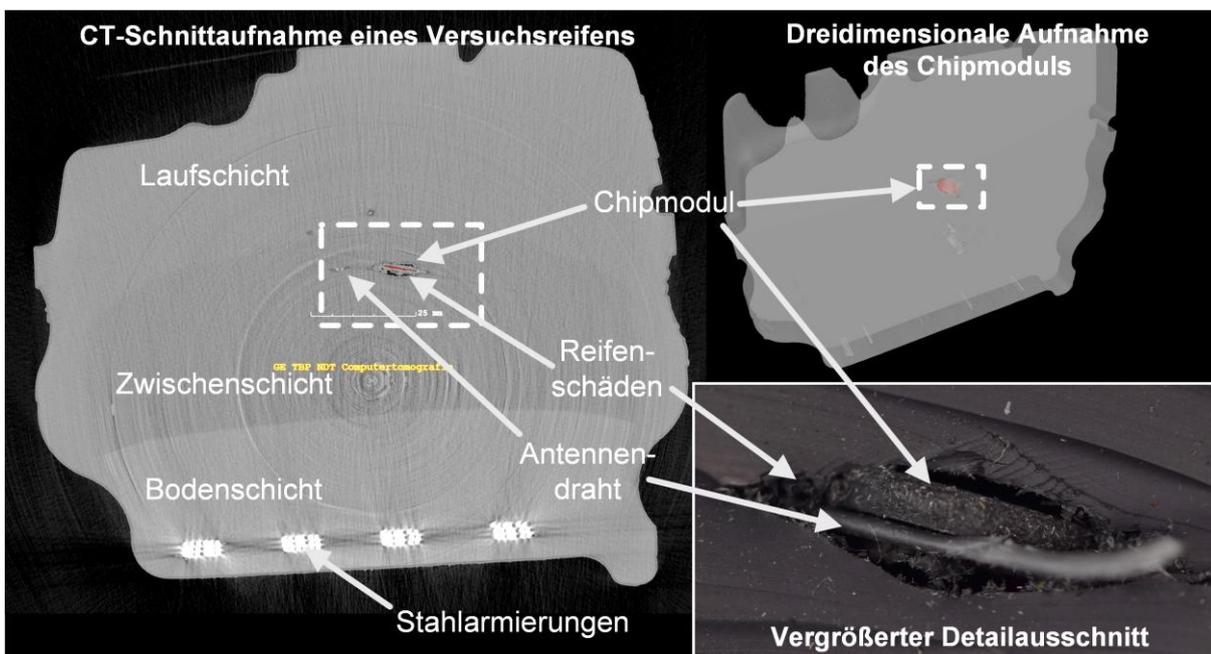


**Abbildung 4-5: Integration, Belastung und Freilegung der Transponder**

Folientransponder, wie sie für kostengünstige RFID-Lösungen angeboten werden, sind den mechanischen Belastungen im Reifeninneren nicht gewachsen. Starre Konstruktionen, wie gekapselte Transponder und Platinen- oder Chipkartenbauformen (Abbildung 4-4, mittig und

rechts), verhalten sich je nach Konstruktion unterschiedlich und stellen eine Störstelle innerhalb des Materialgefüges dar, deren Einfluss auf die Tragfähigkeit beachtet werden muss. Verwendete Kapselungen müssen zudem gegenüber Rissbildungen aufgrund der wirksamen Verformungskräfte geschützt sein. Komplexe Kapselungen scheiden daher wegen ihrer Baugröße und der damit verbundenen Störung im Material als Lösung aus.

Eine weitere, weniger weit verbreitete Lösung stammt aus der Textilindustrie. Diese Bauform (Abbildung 4-4, links) besteht aus einer auf flexiblem Gewebe aufgebrachten Fernfeldantenne, die induktiv mit dem so genannten Chipmodul, einer kleinen runden Platine mit der erforderlichen Elektronik, verbunden ist. Diese Bauform ermöglicht die Durchdringung der Antennenstruktur mit Reifenmaterial und eine erhebliche Verringerung der wirksamen Störstelle im Materialgefüge des Reifens. Allerdings ist die Ausrichtung des Chipmoduls relativ zur Fernfeldantenne besonders wichtig für die Kommunikationsfähigkeit des Transponders. Eine nicht ausreichende Haftung zwischen Chipmodul und umgebendem Reifenmaterial führt zu Beschädigungen und Wanderungsbewegungen des Chipmoduls aus dem Fernfeldantennenbereich heraus, wodurch eine Kopplung beider Komponenten nicht mehr möglich ist (siehe Abbildung 4-6).



**Abbildung 4-6: CT-Aufnahmen eines Reifens mit integrierten Gewebetranspondern nach einem Belastungstest (weitere Detailaufnahmen: Anhang 7.8)**

Um die Wanderungsbewegungen des Chipmoduls zu vermeiden, wurden verschiedene Materialien als Zwischenschicht zwischen Chipmodul und Gewebeantenne untersucht. Ziel der Untersuchung war es, Möglichkeiten zu finden, welche eine Koppelung der Transponderkomponenten sichern und gleichzeitig die wirksame Störstelle im Reifen nicht vergrößern. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 4-1 dargestellt.

**Tabelle 4-1: Versuchsergebnisse für integrierte Gewebetransponder und unterschiedlichen Schutzmaßnahmen**

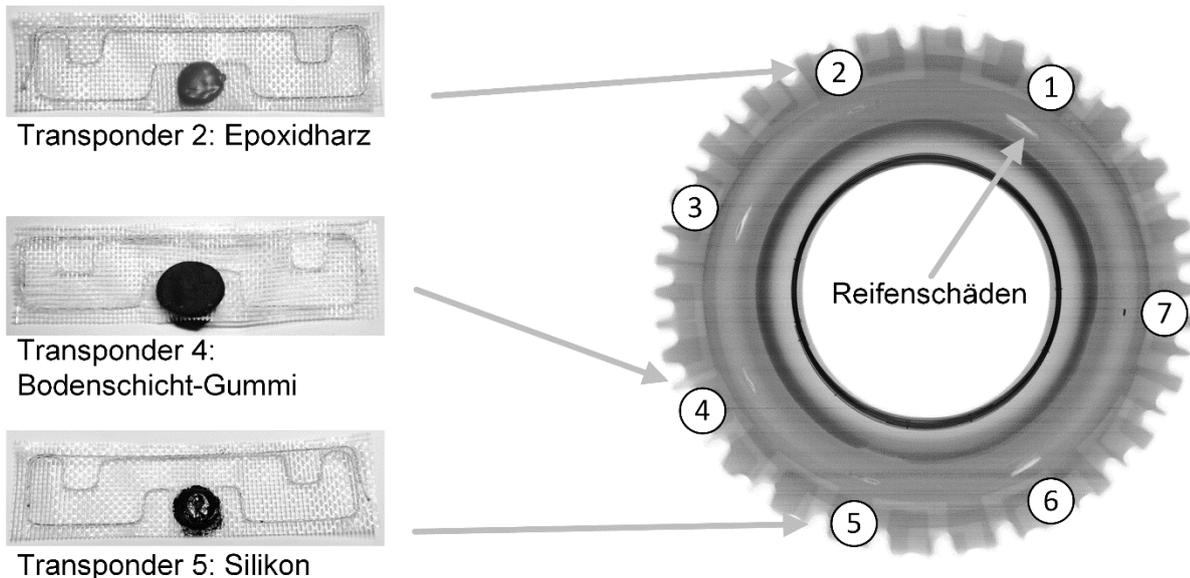
<i>Messung (Reifenlast)</i>	<i>Funktionsfähige Transponder</i>						
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
Nach der Vulkanisation (~137°C)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Nach der Abkühlung (~21°C)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
50 % (~8.100 N)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
75 % (~12.150 N)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100 % (~16.200 N)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
131 % (~21.220 N)	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
151 % (~24.920 N)	-	✓	-	✓*	✓	-	✓*
175 %** (~28.330 N)	-	-	-	-	-	-	-

\* Funktionsfähig im Stand, ansonsten bei 10 km/h Prüfstandsgeschwindigkeit; \*\* Außentemperatur der Reifenoberfläche > 90°C

Für den Versuch wurden insgesamt 7 Transponder (6 Gewebetransponder und 1 Platinentransponder als Vergleichsbasis) mit Schutzmechanismen versehen und in den Reifen integriert. Nach der Vulkanisation wurde auf einem Reifenprüfstand des Projektpartners Continental, wie schon in dem in Abbildung 4-5 dargestellten Versuch, ein Laststufenlauf durchgeführt.

Die verwendeten Transponder wurden folgendermaßen vorbereitet:

- Transponder 1:** Das Chipmodul wurde in einer Tasche aus Glasfasergewebe mit der Antennenstruktur vernäht und vor der Integration mit Haftvermittler (3M Primer 83) versehen.
- Transponder 2:** Wie Transponder 1, mit einem zusätzlichen Closetop aus Zwei-Komponenten Epoxidharz (Shore-Härte (A) ~80, Permabond ET 5401) über Chipmodul und Fernfeldantennenloop.
- Transponder 3:** Wie Transponder 2, mit einem anderen, wesentlich weicheren Zwei-Komponenten Epoxidharz (Shore-Härte (A) ~34, Loctide 9492).
- Transponder 4:** Wie Transponder 1, mit einem zusätzlichen Closetop aus Gummimaterial aus der Bodenschicht des Reifens. Für die praxistaugliche Umsetzung insbesondere relevant aufgrund der Materialhomogenität mit dem umgebenden Reifenmaterial.
- Transponder 5:** Wie Transponder 1, mit einem zusätzlichen Closetop aus Zwei-Komponenten Silikon (Shore-Härte (A) ~65, Loctide 5615) mit einer besseren Temperaturfestigkeit als das Epoxidharz.
- Transponder 6:** Standard-Ausführung des Gewebetransponders mit einem zusätzlichen verklebten Gewebeband im Bereich des Chipmoduls und Haftvermittler.
- Transponder 7:** Kompakter Platinentransponder als Vergleichsbauteil beschichtet mit Haftvermittler.



**Abbildung 4-7: Röntgenaufnahme des SE-Reifens nach dem Belastungsversuch mit den relevantesten Transpondern**

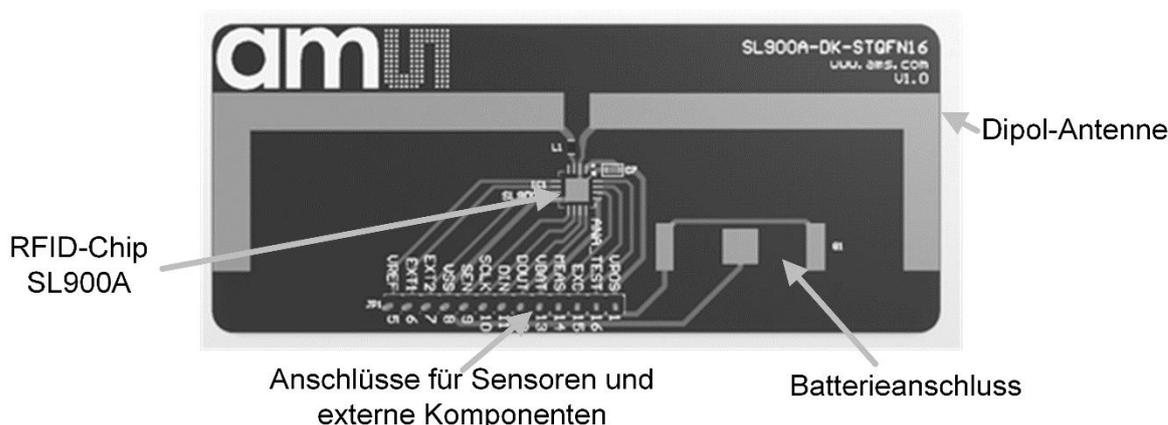
Der Laststufenversuch hat gezeigt, dass keine der untersuchten Schutzmaßnahmen eine herausragende Steigerung der Überlebensfähigkeit der Transponder erzielen konnte. Die geringsten Beschädigungen im umgebenden Reifenmaterial und somit die beste Anhaftung und Überlebensfähigkeit weist der Platinentransponder auf. Bei den Schutzstrategien verursachten Transponder 2 und 5 die geringsten Beschädigungen im Reifen, wobei Transponder 4 aufgrund der Verwendung von reifeneigenem Material prozesstechnisch zu bevorzugen ist.

Für die weitere Entwicklung einer für ein Produkt geeigneten Integrations- und Schutzstrategie ist die Anhaftung des Reifenmaterials an den Transponderkomponenten von besonderer Bedeutung. Für eine abschließende Bewertung weiterer Schutzstrategien ist eine umfangreiche statistische Untersuchung mit fertigungstechnisch ausgereiften Transpondern erforderlich, welche zum Zeitpunkt des Vorhabens noch nicht vorlagen.

#### 4.2.2 Transponderchip SL900A

Der Projektpartner ams bietet mit dem UHF-Transponder-Chip SL900A ein System an, das deutlich mehr Funktionen aufweist, als konventionelle, für die drahtlose Identifikation entwickelte Transponderchips. Der Chip ist in der Lage, neben einer definierbaren Identifikation, auch Messdaten über einen internen Temperatursensor oder externe, an einem 10-Bit Analog/Digital-Wandler angeschlossene, Sensoren auszugeben. Zudem verfügt er über Schnittstellen für eine externe Energieversorgung und für den Anschluss von Mikrocontrollern und anderen integrierten Schaltkreisen.

Zum Zeitpunkt der Projektdurchführung stellte der SL900A das einzige geeignete System im UHF-Bereich dar. Für die weiteren Untersuchungen der favorisierten Sensorkonzepte wird auf dem von ams zur Verfügung gestellten Demonstrationstransponder (Abbildung 4-8) aufgebaut. Der gezeigte Transponder ist als eine ein Millimeter starke Platine aufgebaut und mit einer Batteriehalterung sowie Anschlüssen für zusätzliche Bauteile und Sensoren ausgestattet. Eine einfach gefaltete Dipolantenne befindet sich auf der Platine. Der SL900A ist ein EPC Class 3 Gen 2 Chip und in der Lage eine Spannung von 3,4 V bei einem Strom von bis zu 200  $\mu$ A zur Verfügung zu stellen.



**Abbildung 4-8: Layout des SL900A-Demonstrationsboards**

#### 4.2.3 Geeignete Sensorkonzepte für den Einsatz in SE-Reifen

Hinsichtlich der Auswahl geeigneter Sensortechnologien für eine Integration in SE-Reifen hat eine Recherche ergeben, dass die Kombination aus hohen Temperaturen und Belastungen zusammen mit der Anforderung der Integrierbarkeit in SE-Reifen für die Belastungsmessung ein erhebliches Hindernis darstellt.

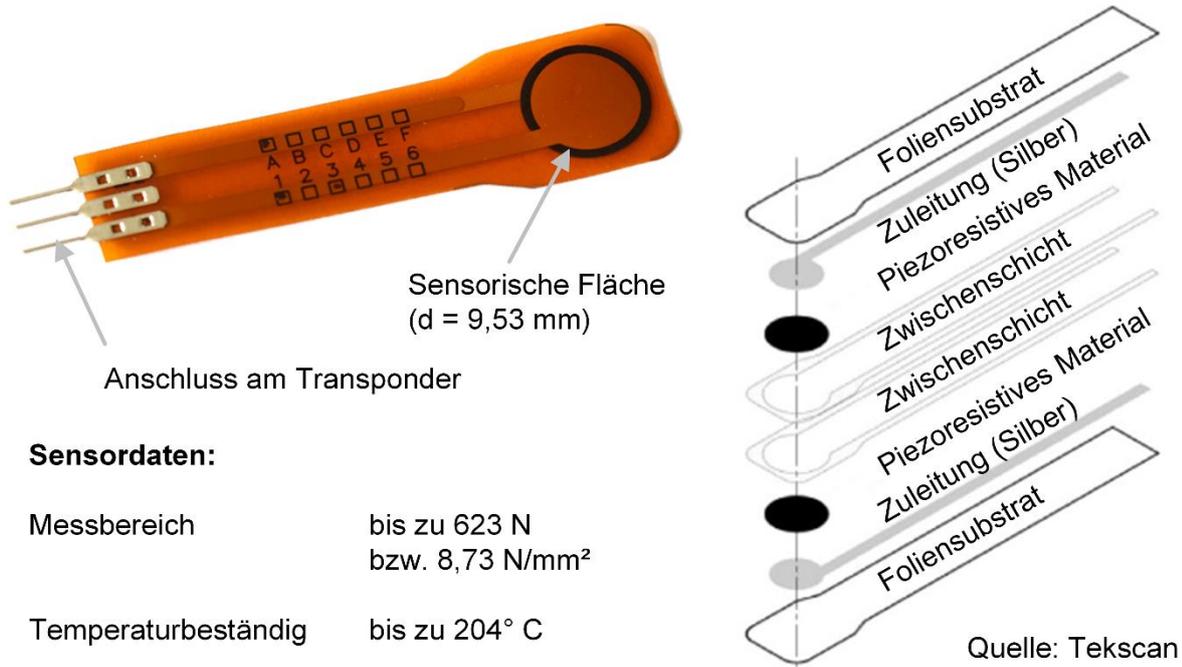
Druck- beziehungsweise Kraftsensoren mit einer ausreichenden mechanischen Belastbarkeit sind in der Regel nicht für Temperaturen über 85 °C einsetzbar. Klassische piezoelektrische Kraftaufnehmer beispielsweise beinhalten Materialschichten, die bei den erforderlichen Temperaturen von 150° C zerstört werden. Zudem muss die Messwertumformung aus einer mechanischen in eine digitale Messgröße mit so wenig Energie und technischem Aufwand realisierbar sein wie möglich, damit die Robustheit und Leistungsfähigkeit des späteren Sensortransponders nicht beeinträchtigt wird.

Aufgrund dieser Anforderungen standen abschließend zwei Messkonzepte für die weitere Untersuchung im Fokus: Die Erfassung der senkrechten Druckbelastung mit einem piezoresistiven Drucksensor und die Verformungsmessung mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS).

Der FlexiForce® HT201 (Abbildung 4-9) ist der einzige zum Projektzeitpunkt verfügbare folienbasierte Belastungssensor, der sowohl der aus den Simulationen abgeleiteten senkrechten Belastung, als auch den bei der Vulkanisation und dem Reifenbetrieb auftretenden Temperaturen standhalten kann [Tek10].

Auf senkrechte Druckbelastung reagiert die piezoresistive Schicht mit einer Widerstandsverringerung (Abbildung 4-10), welche direkt von dem für die Anwendung vorgesehenen RFID-Chip gemessen werden kann. Zudem bietet der Hersteller der Sensoren an, diese durch eine Abstimmung der Zusammensetzung des piezoresistiven Materials speziell für einen bestimmten Belastungsbereich anzupassen und das Layout für Leiterbahnen und Sensorfläche individuell zu fertigen, wodurch eine optimale Integration des Sensors im Rahmen einer Industrialisierung der Sensortransponder möglich ist. Die Kosten für eine derartige Anpassung überstiegen allerdings die im Rahmen des Vorhabens zur Verfügung stehenden Mittel, so dass alle Untersuchungen mit Standardsensoren durchgeführt wurden.

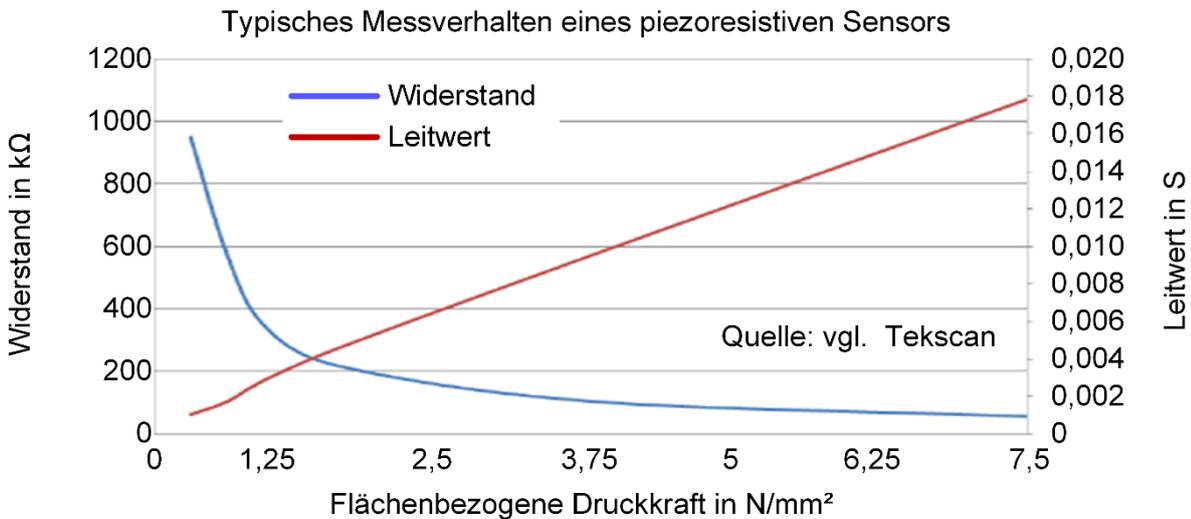
Das nur bereichsweise annähernd lineare Messverhalten des piezoresistiven Sensors ist zunächst für die Erfassung der Reifenbelastung nicht optimal, kommt der anvisierten Anwendung als Kippdetektion allerdings entgegen, da im unteren Lastbereich die Messwertänderungen, bezogen auf die Laständerungen, erheblich größer sind als im oberen Lastbereich. Der quasi-lineare Bereich unterhalb von ca. 1 N/mm<sup>2</sup> vereinfacht zudem die messtechnische Umsetzung für niedrige Lasten. Ein Abheben eines Reifens ist daher deutlicher zu erfassen, als eine Reifenüberlastung. Dennoch können hohe Lasten ausreichend gut bestimmt werden, da bei einer Überlast deutlich höhere Toleranzen angenommen werden können, als bei der sprunghaften Entlastung eines Reifens im Fall eines beginnenden Kippvorgangs.



**Sensordaten:**

Messbereich	bis zu 623 N bzw. 8,73 N/mm <sup>2</sup>
Temperaturbeständig	bis zu 204° C

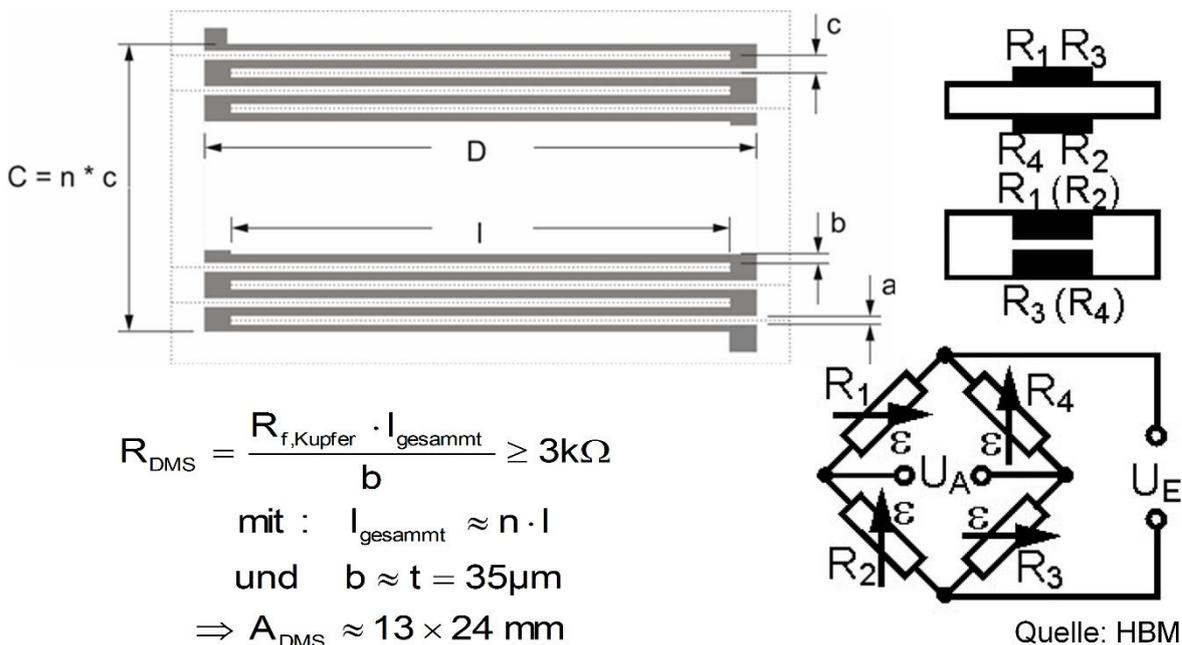
**Abbildung 4-9: Piezoelektrischer Drucksensor FlexiForce® HT201 [Tek16]**



**Abbildung 4-10: Beispielhaftes Messverhalten eines piezoresistiven Foliensensors**

Als Alternative zur Kraftmessung mit Foliensensoren wird die indirekte Belastungsmessung mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS) vorgesehen, welche die Transponderverformung bei der Durchbiegung im Reifenlatsch erfassen. Für die DMS-Messung mit einem eingebetteten Transponder auf Basis des SL900A steht im passiven Betrieb eine maximale Messleistung von 0,68 mW bei 3,4 V Betriebsspannung [ams13] zur Verfügung (siehe Kapitel 4.2.2). 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 einem Operationsverstärker erforderlich. Eine optimale Anordnung der DMS-Gitter wird erreicht, wenn diese, wie in Abbildung 4-11 dargestellt, gegenüberliegend beispielsweise auf der Ober- und Unterseite einer Platine angeordnet werden. Die einzelnen Messgitter müssen dabei jeweils mindestens 3 kΩ als Nennwiderstand

aufweisen, da anderenfalls die verfügbare Messleistung des Transponderchips nicht ausreichend ist.



**Abbildung 4-11: DMS-Vollbrücke für die Verformungsmessung des Transponders [Hof15] und Berechnung der erforderlichen DMS-Fläche**

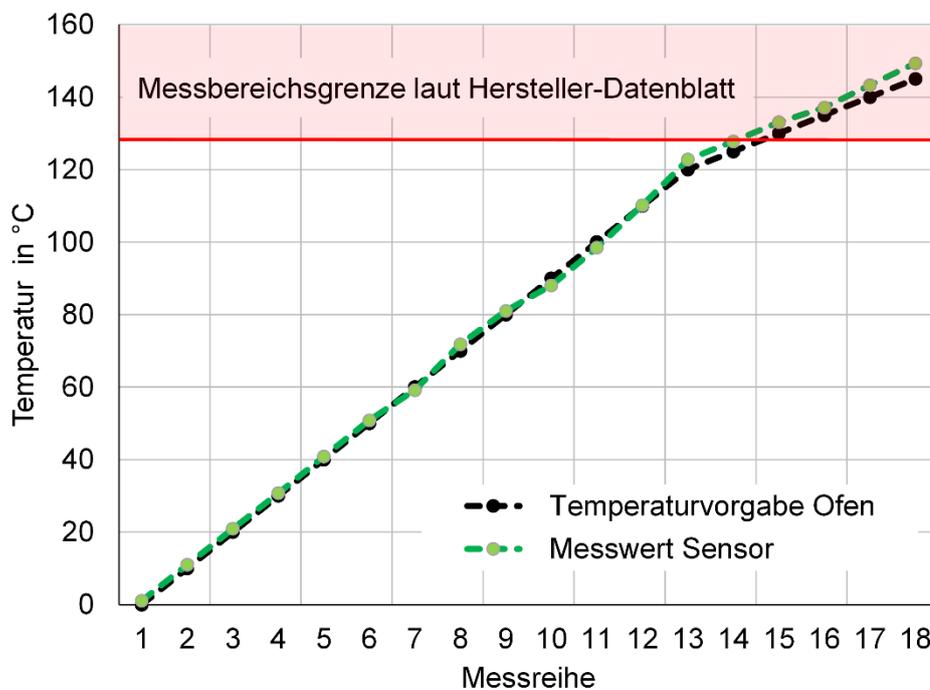
Standardisierte DMS-Messgitter sind am Markt nicht mit dem erforderlichen Widerstandsnennwert von mindestens 3 kΩ verfügbar, so dass für die Transponder individuelle Messgitter hergestellt werden müssen. Hierzu wurde ein Verfahren der Laserstrukturierung [DSK12] vorgesehen, wobei auf einer Platine eine definierte Fläche mit einer möglichst dünnen Kupferschicht hergestellt wird und anschließend die Messgitter strukturiert werden. Dieses Verfahren ermöglicht die Integration der DMS in den Sensortransponder ohne zusätzliche Bauteile und Anschlüsse zu verwenden, die bei einer Belastung weitere Schwachstellen darstellen. Die vorkalkulierte erforderliche Größe der Messgitterflächen, ergibt sich gemäß der Berechnung in Abbildung 4-11 aus der realisierbaren Kupferschichtdicke der Platine von 9 μm, der Grundanforderung eines möglichst quadratischen Leiterbahnquerschnitts und der für den Sollwiderstand erforderlichen Länge von ca. 13 x 24,8 mm (unter pauschaler Berücksichtigung von Fertigungsabständen zwischen den DMS-Mäandern, den Radien und den Zuleitungen der Sensorfläche).

Für die Messung der Reifeninnentemperatur bietet der SL900A die Möglichkeit einen integrierten Temperatursensor zu verwenden. Dieser Sensor verfügt über eine einstellbare Messauflösung von bis zu 0,18 K und einer laut Hersteller maximalen Einsatztemperatur von 125° C. Um die Einsatzfähigkeit bei den erforderlichen 150° C zu überprüfen wurde ein Temperaturversuch (Abbildung 4-13) durchgeführt.



**Abbildung 4-12: Versuchsaufbau für die Untersuchung des integrierten Temperatursensors des SL900A**

Der Test konnte die Eignung des Sensors für den vorgesehenen Einsatz belegen (Abbildung 4-13), obwohl die Einsatztemperatur vom Hersteller nur bis zu 125 °C angegeben ist, konnten Temperaturen bis zu 150 °C zuverlässig gemessen werden. Langfristige Auswirkungen eines Einsatzes oberhalb von 125 °C und Schwankungen bei der Produktion waren nicht Schwerpunkt der Untersuchungen, haben allerdings für die weitere Umsetzung eines Produktes auf Basis des integrierten Temperatursensors erhebliche Bedeutung und müssen mit dem Hersteller abgestimmt werden.



**Abbildung 4-13: Laboruntersuchung des im SL900A integrierten Temperatursensors für einen Temperaturbereich von bis zu 150°C**

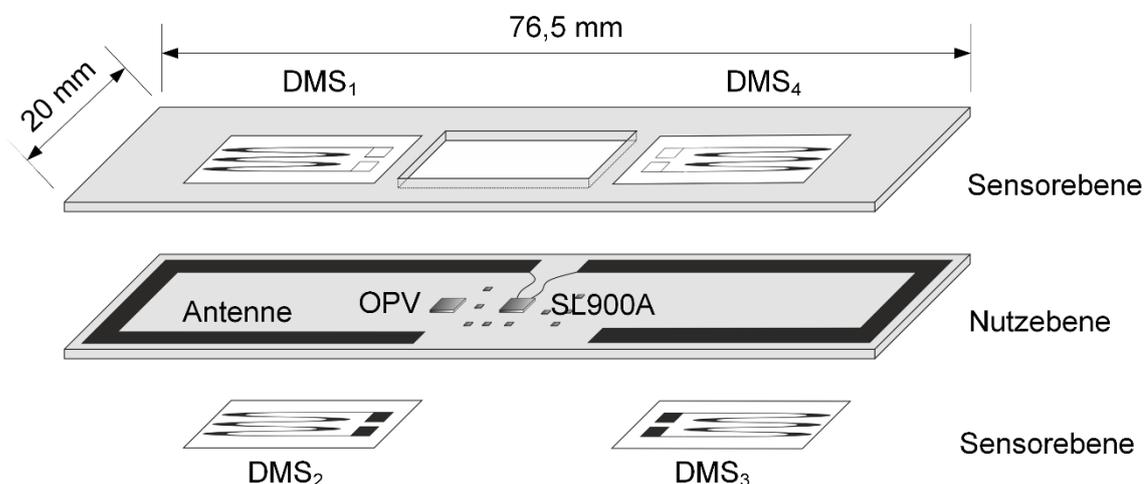
Zusätzlich bzw. als Alternative zu dem integrierten Temperatursensor ist der Anschluss eines weiteren externen Thermowiderstands, beispielsweise eines Platinsensors, möglich. Dadurch sind mit dem Sensortransponder auch Messpositionen entfernt vom Transpondereinbauort sowie die Aufnahme von Temperaturgradienten zwischen zwei Messpunkten realisierbar.

#### 4.2.4 Konzepte für den Aufbau von Sensortranspondern

Basierend auf den Ergebnissen der Analysen und Voruntersuchungen sowie der getroffenen Sensorauswahl wurden zwei unterschiedliche Konzepte für Sensortransponder ausgelegt und im weiteren Projektverlauf auf ihre Tauglichkeit untersucht.

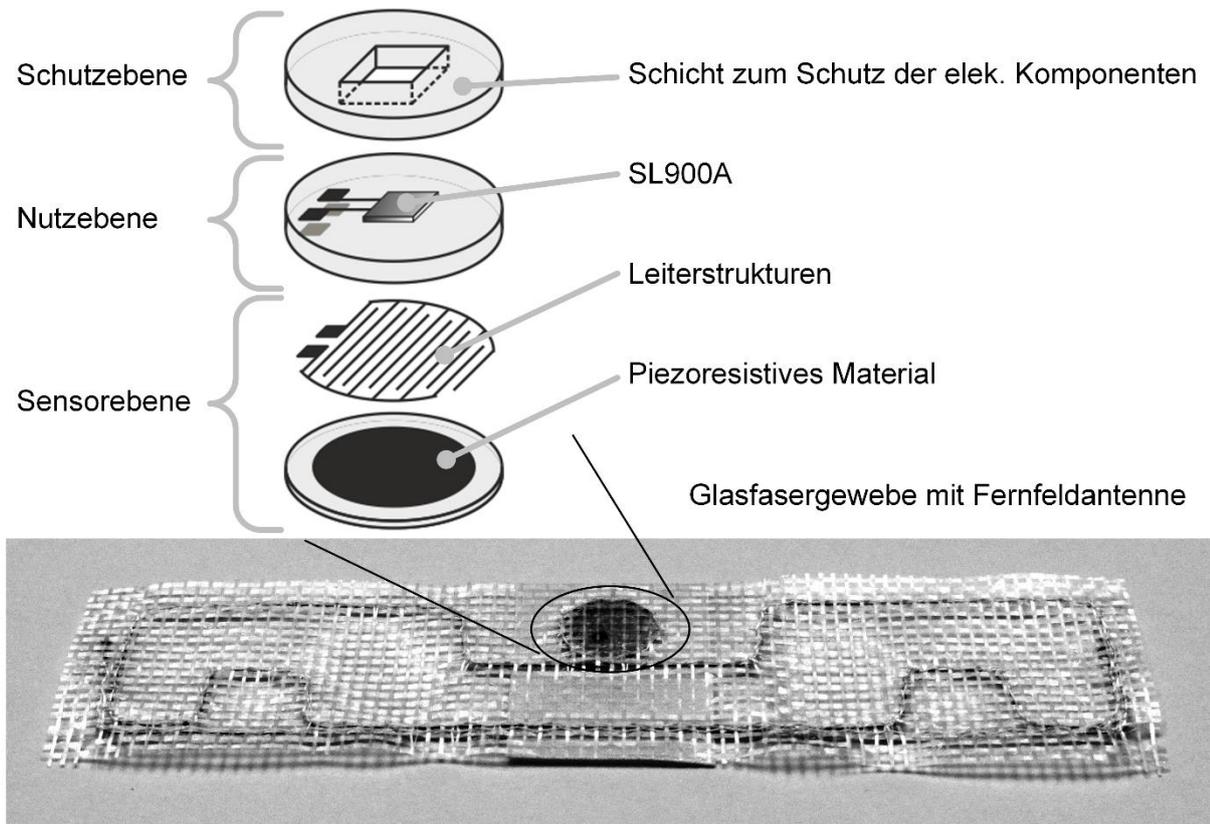
Das erste in Abbildung 4-14 dargestellte Konzept orientiert sich an konventioneller Platinentechnologie und verwendet einen mehrlagigen Aufbau aus FR4, bei dem der Transponderchip geschützt in der biege-neutralen Ebene zwischen zwei Schichten der Platine platziert ist. Die Belastungsmessung erfolgt indirekt über die Verformungsmessung mit Hilfe von vier laserstrukturierten DMS in einer Vollbrückenschaltung (vgl. Kapitel 4.2.3). Da trotz der individuellen Auslegung der DMS-Messgitter keine ausreichend große Spannungsdifferenz für den direkten Betrieb der Messbrücke am SL900A zu erwarten ist, wurde für die Verstärkung der Differenzspannung in Folge der Transponderverformung ein Operationsverstärker (OPV) vorgesehen.

Zum Schutz der elektronischen Komponenten vor mechanischen Belastungen ist eine Platzierung auf der Transponderoberseite nicht sinnvoll. Daher wird eine Aussparung in der oberen Platinenlage vorgesehen, die nach der Applikation der Bauteile vergossen wird. Neben dem mechanischen Schutz gegen äußere Einwirkungen befinden sich durch diesen Aufbau die Verbindungsstellen zwischen den Bauteilen und den Leiterbahnen möglichst nahe der Biege-neutralen Ebene der Transponder und sind somit bestmöglich gegen verformungsbedingte Scherkräfte geschützt. Die Dipol-Antenne für die Kommunikation und Energieversorgung des Transponders wird entlang der Kante der Platine gefaltet.



**Abbildung 4-14: Transponderaufbau basieren auf einer mehrlagigen Platine mit vier DMS in Vollbrückenschaltung und OPV**

Das zweite Konzept (Abbildung 4-15) beinhaltet keine starre, auf einer Platine angeordnete, Antennenstruktur sondern eine auf flexiblem Glasfaser-Gewebe vernähte Antenne, die den Bewegungen des umgebenden Reifenmaterials aufgrund seiner Flexibilität keinen Widerstand entgegen setzt.



**Abbildung 4-15: Transponderaufbau basierend auf einem Chipmodul und einer induktiv gekoppelten, flexiblen Antenne**

Die Anbindung zwischen Fernfeldantenne und dem RFID-Chip erfolgt über eine zusätzliche Nahfeldantenne, die auf einem vergleichsweise kleinen Platinen-Element, dem so genannten Chipmodul, integriert ist. Durch diesen Aufbau werden Relativbewegungen zwischen dem flexiblen Gewebe und dem starren Platinen-Element, welches den RFID-Chip und das Sensorsystem enthält, ausgeglichen. Das Platinen-Element ist, wie im ersten Konzept, als mehrlagige Platine aus FR4 gestaltet, um die integrierte Elektronik vor Beschädigungen zu schützen.

Bei dem Gewebetransponderkonzept ist die Minimierung der im Reifen wirksamen Störstelle der für die Konzeptauswahl entscheidende Vorteil. Flächen, wie sie für die DMS-Messung benötigt werden, sind auf dem Chipmodul nicht vorhanden. Daher wurde vorgesehen, den piezoresistiven Foliensensor auf die Unterseite des Chipmoduls zu applizieren und abweichend von der ursprünglichen Anwendungsweise des Sensors die Kräfte nur einseitig über eine ineinander greifende Leiterbahnstruktur abzugreifen. Auf diese Weise kann der Foliensensor in die Oberfläche des Chipmoduls integriert werden, ohne dass eine Vergrößerung der Fläche erforderlich ist.

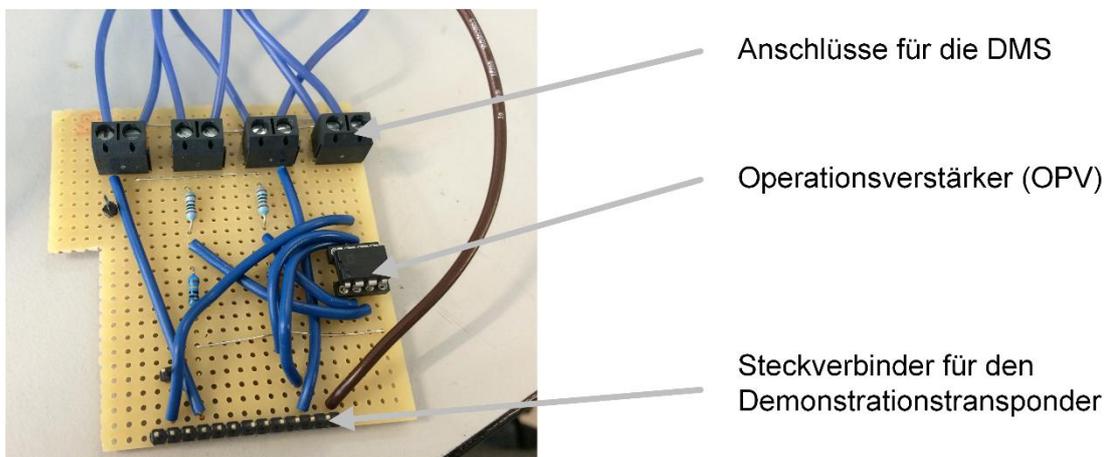
### 4.3 Realisierung und Untersuchung von Versuchstranspondern

Basierend auf den beiden entwickelten Konzepten aus Kapitel 4.2.4 wurden die einzelnen Systemkomponenten sowie das Gesamtsystem prototypisch aufgebaut, untersucht, und soweit erforderlich, angepasst. Da für die Messung der Reifentemperatur bei beiden Konzepten der integrierte Temperatursensor des SL900A verwendet wird, sind insbesondere die Gestaltung der Antennen bzw. die Daten- und Energieübertragung sowie die Umsetzung der Belastungsmessung genauer zu untersuchen.

#### 4.3.1 Platinentransponder mit DMS-Vollbrücke

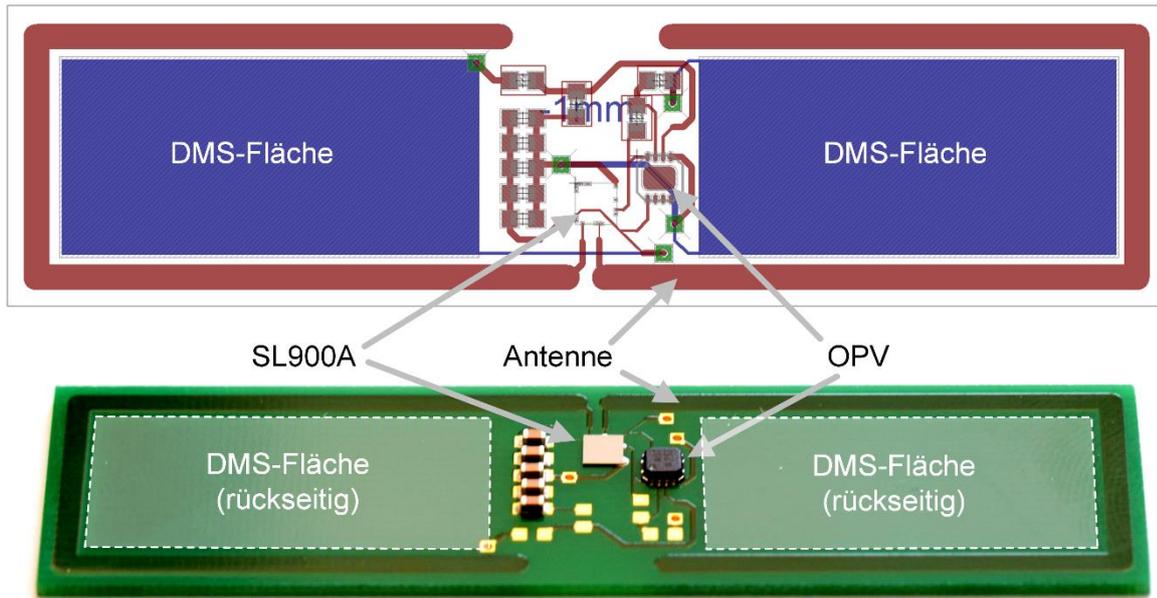
Die Verformungsmessung mit DMS ist ein gut dokumentierter Stand der Technik und die Applikation der DMS mit Hilfe von Laserstrukturierung an Stelle der Verwendung von standardisierten DMS hat keinen wesentlichen Einfluss auf die messtechnische Umsetzung der elektronischen Schaltung. Daher wurden zunächst Versuche mit standardisierten DMS-Gittern und dem Demonstrationstransponder aus Abbildung 4-8, Seite 11, zur Verifikation der Funktionalität durchgeführt.

Für den Versuchsaufbau wurde eine Adapterplatine mit einem OPV und Anschlüssen für vier als Vollbrücke verschalteten DMS mit jeweils 1 k $\Omega$  Nennwiderstand hergestellt (Abbildung 4-16). Die Platine wurde auf einen Demonstrationstransponder gesteckt und die verfügbaren Messspannungen abgegriffen. Da die erforderliche Leistung auf Grund der zu geringen DMS-Widerstände und des Energiebedarfes des OPV zu hoch war für eine rein passive Dehnungsmessung wurde eine zusätzliche Batterie auf dem Transponder verwendet. Mit dieser Schaltung war es möglich, die aufgetragenen Dehnungen reproduzierbar zu messen.



**Abbildung 4-16: Adapterplatine für die Dehnungsmessung mit DMS an einem SL900A-Demonstrationstransponder**

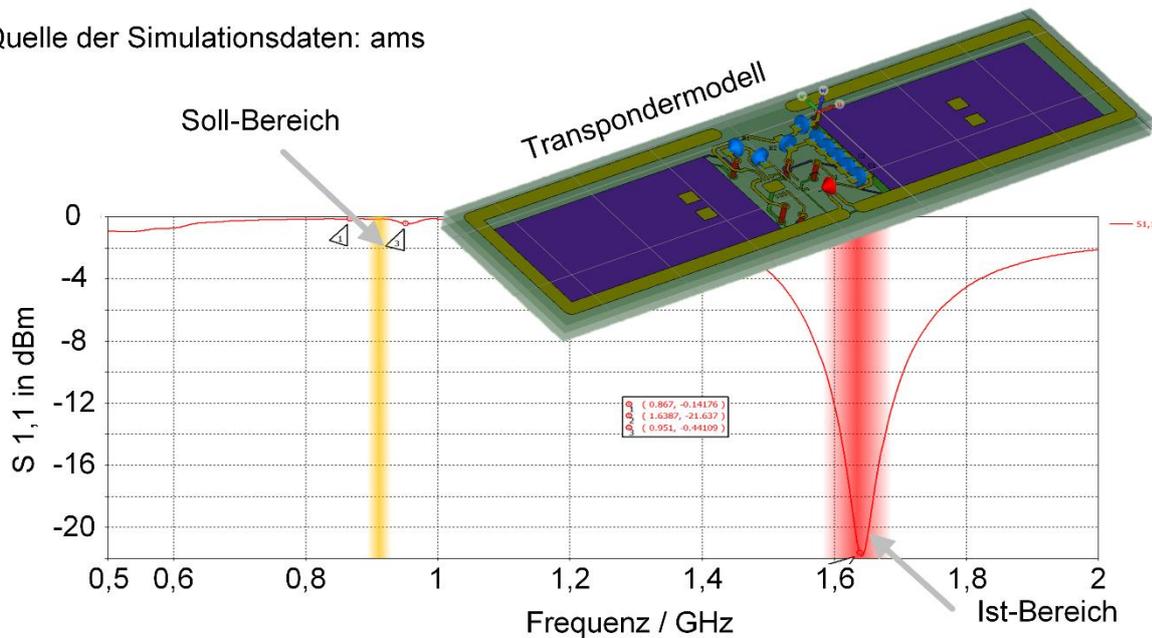
Die Untersuchung der Transponderantenne erforderte einen vorläufig ausgelegten Transponder mit einer vereinfachten DMS-Geometrie. Da die feinen Strukturierungen innerhalb eines DMS-Gitters und die Materialstärke im betrachteten Bereich für HF-Felder nicht relevant sind, wurde zunächst auf eine Strukturierung verzichtet und lediglich ein Transponder mit der erforderlichen OPV-Schaltung, der Antenne und Kupferflächen mit 35  $\mu$ m Materialstärke in Form und Größe der DMS-Flächen, erstellt (Abbildung 4-17).



**Abbildung 4-17: Transponderplatine mit Schaltungsaufbau für die Verformungsmessung mit DMS**

Erste Kommunikationsversuche mit den bestückten Transpondern bleiben deutlich hinter den Erwartungen hinsichtlich Reichweite und Kommunikationszuverlässigkeit zurück, so dass die Antennenkonfiguration mit Hilfe einer HF-Simulation näher untersucht wurde. Das Ergebnis der Untersuchung (Abbildung 4-18) zeigte, dass die elektronischen Komponenten und insbesondere die DMS-Flächen eine erheblich stärkere dämpfende Wirkung auf das Kommunikationsfeld des Transponders haben als zunächst angenommen.

Quelle der Simulationsdaten: ams



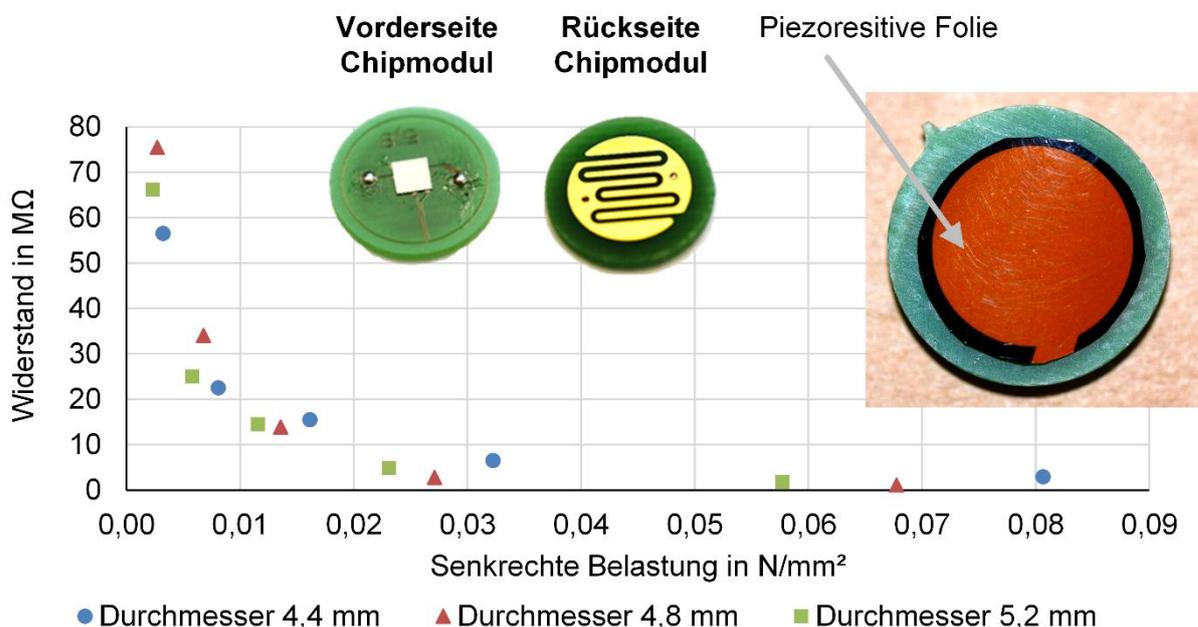
**Abbildung 4-18: Simulativ berechnete Resonanzfrequenz des Transponders mit hervorgehobenem Soll- und Ist-Bereich der Resonanzfrequenz**

Weitere Simulationen mit angepassten Antennenformen und -längen sowie zusätzlichen elektronischen Komponenten für eine Anpassung der Resonanzfrequenz führten nicht zu der erwünschten Verschiebung der Resonanzfrequenz in Richtung 868 MHz, bei gleichzeitig ausreichendem Antennengewinn. Nur durch eine Entkopplung der DMS-Flächen und der Antennenstruktur konnten Transponderlayouts identifiziert werden, die im UHF-Bereich ausreichend resonant waren. Die Größe der so gestalteten Transponder stellt allerdings ein Problem für die Integration in einen SE-Reifen dar. Die Größe einer durch einen kommunikationsfähigen Platinentransponder hervorgerufene Störstelle erschwert einen praktischen Einsatz. Aus diesem Grund wurde in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss das Platinenkonzept nicht weiter verfolgt.

### 4.3.2 Flexibler Gewebetransponder mit piezoresistiver Messfolie

Die Belastungsmessung mit Hilfe einer piezoresistiven Sensorfläche, wie sie für das Gewebetransponderkonzept vorgesehen ist, wurde wie auch die DMS-Messung an einem Demonstrationstransponder untersucht. Hierbei wurde zudem untersucht, wie eine platzsparende Kontaktierung des Sensors auf dem späteren Chipmodul möglich ist.

Das im Sensor verwendete piezoresistive Material weist keine Richtungsabhängigkeit bei der Widerstandsänderung auf, so dass für die piezoresistiven Sensoren die Möglichkeit besteht, Druckbelastungen auf einem flächigen, einseitigen Kontakt über die in Abbildung 4-19 dargestellte Mäanderstruktur auf der Rückseite des Chipmoduls zu detektieren. In Ermangelung eines individuell hergestellten passenden Foliensensors, wurden Sensoren, wie in Abbildung 4-9 auf Seite 12 dargestellt, zerteilt und für die Voruntersuchungen passend ausgeschnitten.



**Abbildung 4-19: Aufbau der piezoresistiven Sensorik am Chipmodul**

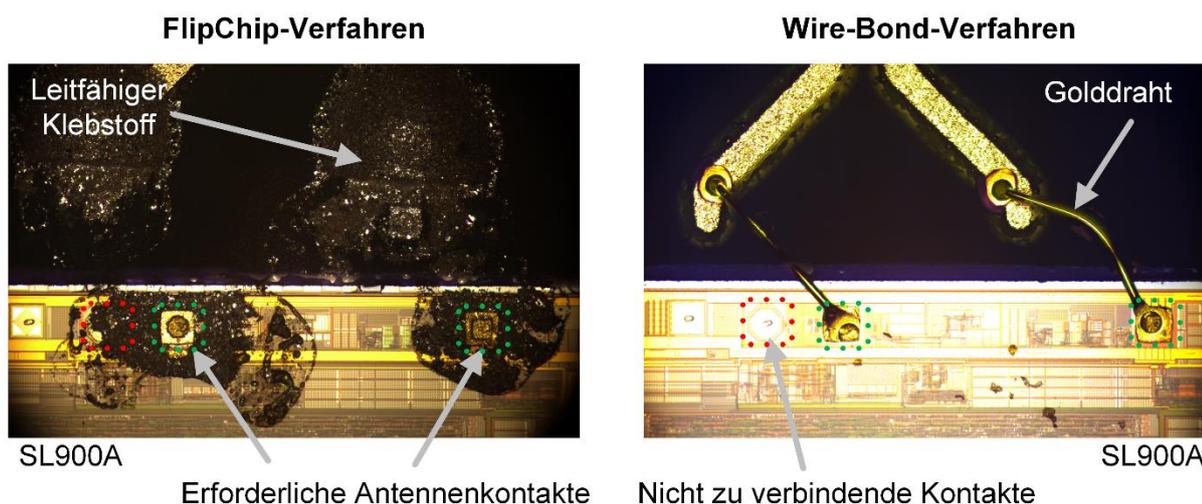
Bei der Untersuchung wurden drei unterschiedliche Größen für das Chipmodul verglichen, wobei der jeweilige Durchmesser der wirksamen Sensorfläche 4,4 mm, 4,8 mm und 5,2 mm betrug. Die Messpunkte entsprechen dabei dem zu erwartenden, charakteristischen Verlauf, sind allerdings hinsichtlich des Messbereichs erheblich reduziert. Die in Abbildung 4-9 auf Seite 12 angegeben 8,75 N/mm² werden nicht erreicht. Der Hauptgrund für diese Abweichung ist in der Mäanderstruktur zu identifizieren. Bei der einseitigen Kontaktierung wird der Messkreislauf nicht wie bei der beidseitigen Anwendung über den entlang der Fläche gleichmäßigen Abstand der Kontaktierungsfolien, sondern über die Abstände der beiden Mäander zueinander

geschlossen. Jede Änderung an der Kontaktierungsstruktur führt daher zu einer Änderung im Messverhalten des Sensors, so dass eine individuelle Anpassung der Sensorkontaktierung und der Zusammensetzung des Sensormaterials mit dem Sensorhersteller für eine derartige Anwendung erforderlich ist.

Neben den Herausforderungen der Sensorkontaktierung bewirkt die Mäanderstruktur zusammen mit dem piezoresistiven Material eine erhebliche Dämpfung der auf dem Chipmodul befindlichen Nahfeldantenne. Daher wurde für die weitere Umsetzung des Vorhabens eine Applikation des Belastungssensors in der Standardausführung verfolgt.

Für die induktive Kopplung des Chipmoduls mit der Fernfeldantenne wird eine Spulenantenne aus einer einzelnen Wicklung am äußeren Rand des Chipmoduls hergestellt, dessen Induktivität zusammen mit der Kapazität des Chips einen Schwingkreis bildet. Um die Größe des Chipmoduls zu verringern, wurde durch die Zuleitungen des Chips eine zusätzliche Kapazität erzeugt. Alternativ dazu ist die Verwendung eines parallel geschalteten SMD-Kondensators möglich. Nach anfänglichen Fehlversuchen bei der Antennenkoppelung und der nachfolgenden Schaltungsreduktion auf ausschließlich einen RFID-Chip mit verschiedenen Spulendurchmessern konnte weiterhin keine reproduzierbare Verbindung hergestellt werden.

Bei der Fehlersuche wurde zunächst davon ausgegangen, dass die Kontaktierung fehlerhaft ist, da die Anschlusspatches des verwendeten, nicht-eingehausten Chips im Datenblatt mit  $85 \times 85 \mu\text{m}$  sehr klein und zudem nur ca.  $130 \mu\text{m}$  voneinander angegeben werden. Da eine FlipChip-Verbindung mit leitfähigem Klebstoff (Abbildung 4-20, links) für die mechanische Stabilität des Transponders von Vorteil ist, wurde ursprünglich dieses Verfahren konzipiert. Die zur Verfügung stehenden Chips sind allerdings nicht an allen erforderlichen Kontaktstellen für ein FlipChip-Verfahren mit isotrop leitfähigem Klebstoff vorbereitet, so dass nur anisotroper Klebstoff verwendet werden kann. Eine zielgenaue funktionssichere Dosierung des Klebstoffs, so dass keine Kontaktierung benachbarter Anschlüsse erfolgt, konnte auf diese Weise nicht gewährleistet werden. Die einzige zuverlässige Kontaktierungsmethode für den Chip besteht daher in der Verwendung des Wire-Bond-Verfahrens, da hier gezielt einzelne Kontaktstellen verbunden werden und die Verbindung optisch gut kontrolliert werden kann (Abbildung 4-20, rechts). Somit konnten Kontaktierungsfehler für die nachfolgenden Versuchsreihen weitestgehend ausgeschlossen werden.

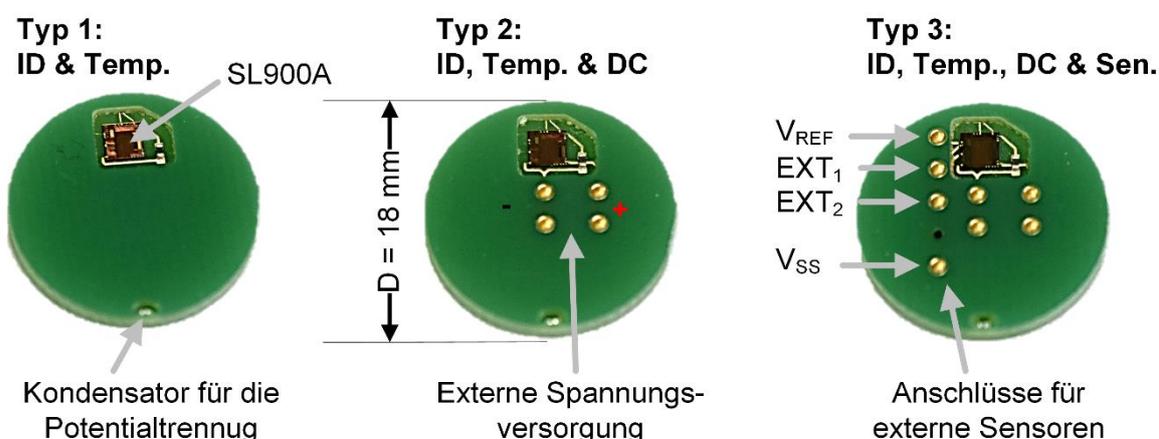


**Abbildung 4-20: Detailaufnahmen der Anschlusssituation an den Antennenpatches des SL900A; links FlipChip, rechts Wire-Bond**

Trotz der Anpassungen bei der Kontaktierung blieb das Kopplungsverhalten der Chipmodule unzuverlässig und hinter den Anforderungen zurück. Nach Rücksprache mit Experten aus dem

projektbegleitenden Ausschuss wurde überprüft, ob der SL900A entgegen allen üblichen Konventionen aktueller RFID-Chips keine integrierte Potenzialtrennung an den Antennenanschlüssen besitzt. Hierzu wurde ein zusätzlicher Kondensator mit möglichst geringer Kapazität mit der Antennenspule in Reihe geschaltet, woraufhin sich das Kopplungsverhalten erheblich verbesserte und in vollem Umfang den Erwartungen entsprach. Ohne eine zusätzliche Potentialtrennung ist der Betrieb des SL900A als Nahfeldtransponder mit Spulenantenne somit nicht möglich.

Auf Basis der festgelegten Anpassungen bei der Transponderfertigung wurden neue Chipmodule konzipiert, die für die Verwendung des Wire-Bond-Verfahrens und eines nicht integrierten piezoresistiven Foliensensors geeignet sind und zudem über eine Potentialtrennung mit einem zusätzlichen Kondensator verfügen. Außerdem wurde zu Versuchszwecken ein Anschluss für eine externe Spannungsversorgung vorgesehen. Um die Dämpfungseigenschaften der integrierten Anschlüsse vergleichen zu können, wurde die drei in Abbildung 4-21 abgebildeten Chipmodule mit unterschiedlichem Funktionsumfang hergestellt.



**Abbildung 4-21: Ausführungsvarianten des Chipmoduls**

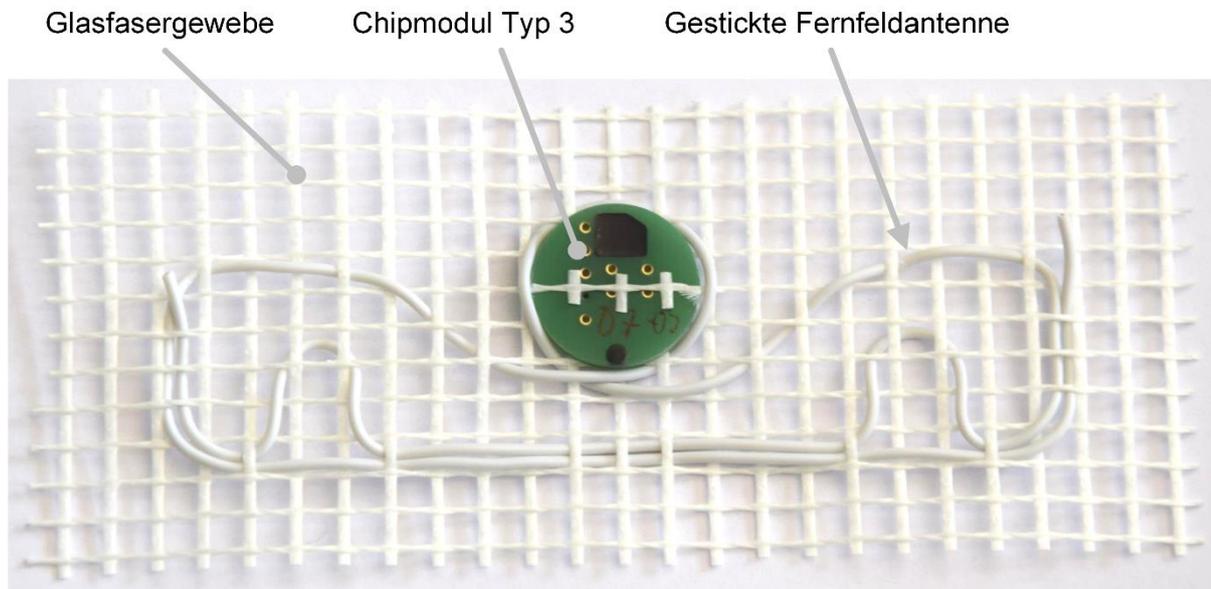
In der einfachsten Variante (Typ 1) sind keine weiteren Komponenten anschließbar. Ein Transponder mit diesem Chipmodul ist in der Lage eine Identifikationsnummer zu senden und die Temperatur zu messen. Die zweite Variante (Typ 2) verfügt über zusätzliche Anschlüsse zur Energieversorgung und ermöglicht somit die Speicherung von Messwerten ohne aktives Erregfeld 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 Temperatursensor implementiert. Der RFID-Chip und alle weiteren elektronischen Komponenten befinden sich in Vertiefungen der Platine, die nach der Kontaktierung vergossen werden.

Die Materialien im Bereich eines integrierten Transponders weisen sehr unterschiedlich ausgeprägte elektromagnetische Eigenschaften auf und sind aufgrund ihres elastischen Verhaltens mit handelsüblichen Analysemethoden nur schwer zu charakterisieren (siehe Tabelle 4-2). Daher wurde für die Herstellung der Fernfeldantenne eine möglichst breitbandige Antennengeometrie gewählt (Abbildung 4-22), die auf handelsüblichem Glasfasergewebe, wie es auch für Armierungen im Bauwesen eingesetzt wird, gestickt wurde. Das Glasfasergewebe hat bei dieser Anwendung lediglich die Aufgabe die Antennengeometrie bis zur Vulkanisation zu gewährleisten und muss den Belastungen im Reifen nicht zwangsläufig widerstehen. Nach der Vulkanisation wird die Position und Form der Antenne durch das umgebende Reifenmaterial gewährleistet.

**Tabelle 4-2: Parameter für typische SE-Reifenmaterialien, sortiert nach dem Einsatzbereich in den Reifenschichten**

<i>Material</i>	<i>Rel. Primitivität</i>		<i>Standardabw. <math>\sigma</math></i>		<i>Verlustfaktor</i>	
	$\epsilon' \text{ in } \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$	$\epsilon'' \text{ in } \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$	$\epsilon' \text{ in } \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$	$\epsilon'' \text{ in } \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$	$\tan \delta$	$\sigma$
<i>Bodenschicht</i>	20,45	9,14	2,31	3,61	0,45	0,14
	17,56	3,14	0,44	0,30	0,18	0,01
<i>Zwischenschicht</i>	14,18	3,85	0,12	0,04	0,27	0,00
	8,49	0,96	0,18	0,96	0,11	0,00
<i>Laufschicht</i>	13,89	5,04	0,34	0,38	0,45	0,02
	13,53	4,30	0,60	0,46	0,32	0,02
<i>Clean</i>	2,84	0,03	0,01	0,00	0,01	0,00

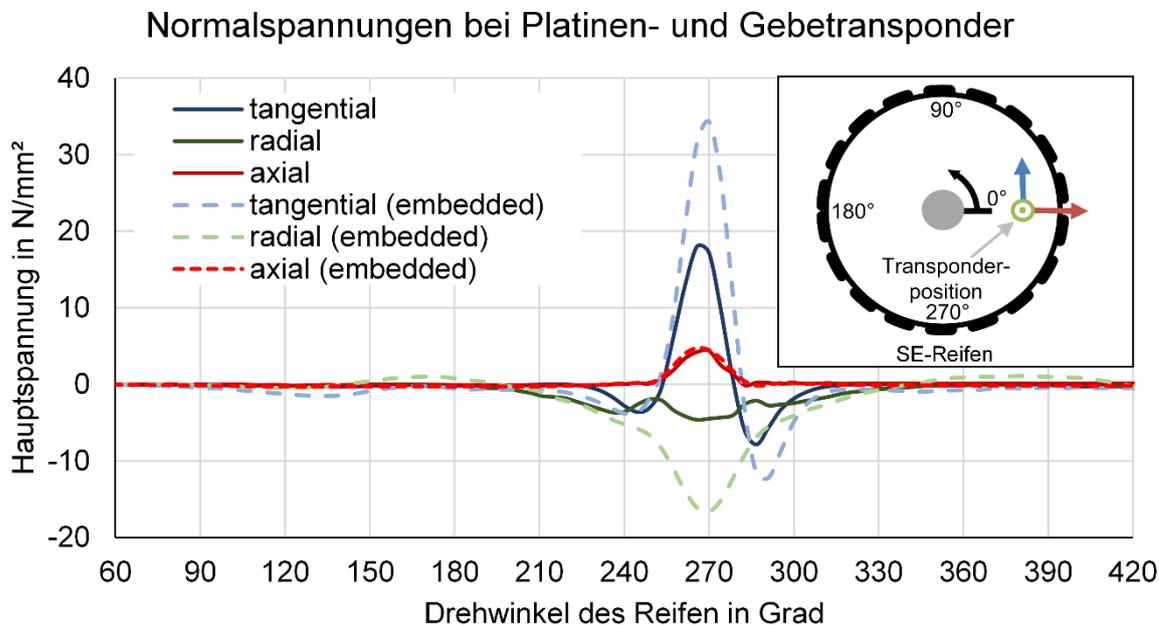
Abschließend wurde eine FE-Analyse des erstellten und im Reifen integrierten Gewebetransponders durchgeführt, bei der die Belastung und Belastungsverteilung der Transponderkomponenten im Vordergrund standen. Hierzu wurde das dynamische Modell aus Kapitel 4.1 modifiziert, um die komplexen Geometrien des Transponders aufnehmen zu können. Dabei musste eine andere Einbettungsmethode für den Gewebetransponder gewählt werden als bei der ursprünglichen Simulation mit einem vereinfachten Platinentransponder. Die in Abbildung 4-22 abgebildeten Antennenwindungen, das Gewebematerial und das Chipmodul wurden dazu als einzelne Komponenten modelliert und mittels „embedded constrained“ in des Reifenmodell eingebettet. Dieses Verfahren ermöglicht die Integration von Komponenten, ohne zuvor die entsprechenden Bereiche im umgebenden Material aussparen zu müssen.



**Abbildung 4-22: Vollständiger Gewebe-Transponder mit Chipmodul vom Typ 3 und gestickter Fernfeldantenne**

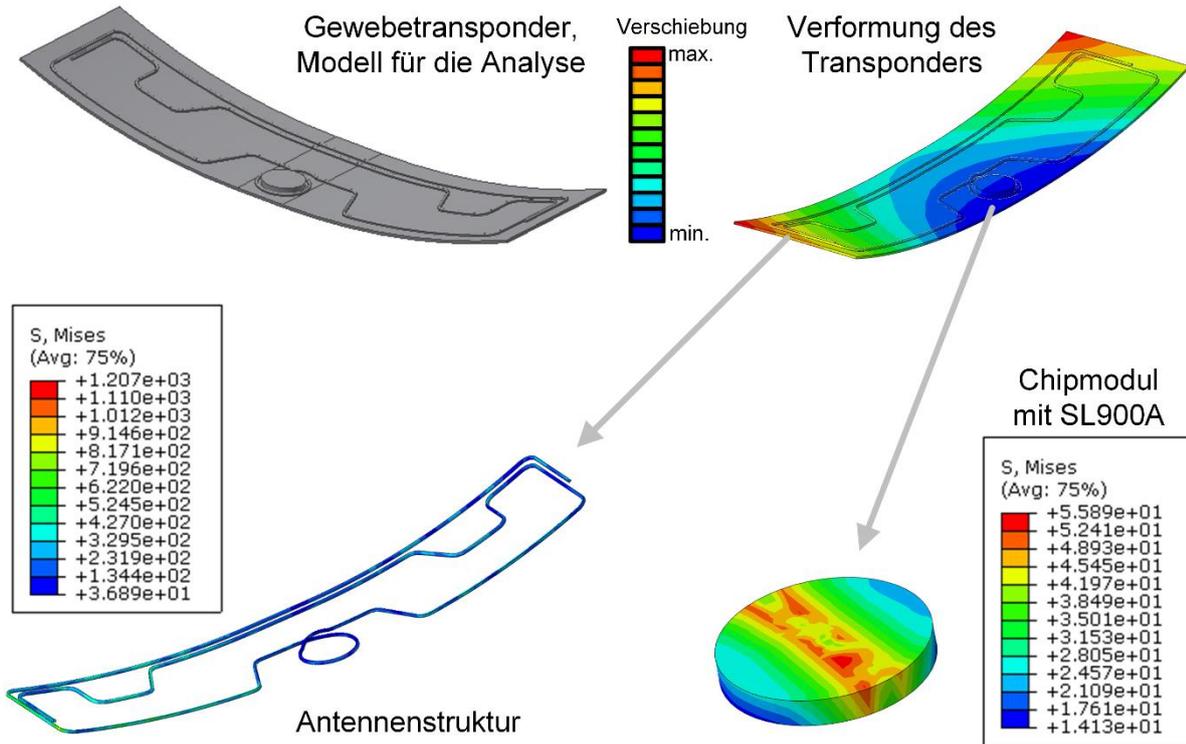
Anhand eines direkten Vergleichs beider bisher verwendeten Analysemodelle (siehe Abbildung 4-23) werden deutliche Unterschiede zwischen den jeweiligen Ergebnissen sichtbar. Vor allem die Spitzenbelastungen in tangentialer und axialer Richtung weichen bei dem „embedded constrained“-Verfahren deutlich voneinander ab. Zudem ist der Verlauf der radialen Be-

lastung bei der Untersuchung des Gewebetransponders mit dem alternativen Einbettungsverfahren gleichförmiger und weist einen deutlicher ausgeprägten Tiefpunkt auf, als in den bisherigen Untersuchungen. Eine Aussage darüber welche Ergebnisse realitätsnäher sind, lässt sich abschließend nur durch einen Vergleich mit realen Messdaten treffen.



**Abbildung 4-23: Dynamischer Spannungsverlauf von FE-Untersuchungen mit unterschiedlichen Einbettungsmethoden für integrierte Transponder**

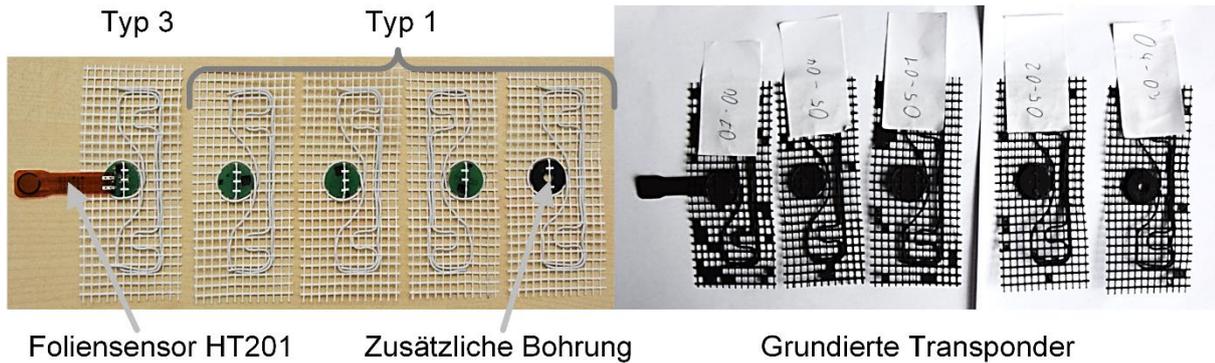
Konstruktive Schwachstellen des Transponders in Form von überproportional großen Spannungsdifferenzen lassen sich anhand der Simulation (Ergebnisse in Abbildung 4-24) nicht eindeutig identifizieren, zumal das langfristige Verhalten der Komponenten im Reifen nur durch weitere praktische Untersuchungen bestimmt werden kann.



**Abbildung 4-24: Modellierung und Ergebnisse der FE-Analyse eines in SE-Reifen integrierten Gewebetransponders**

**4.3.3 Praktische Versuche mit den erstellten Gewebetranspondern**

Für die abschließende Bewertung der Sensortransponder wurden 5 Transponder (3 x Typ 1, 1 x Typ 3 mit Belastungssensor und 1 x Typ 1, flächig vergossen und mit einer zusätzlichen Bohrung) in einen SE-Reifen integriert. Um die Anhaftung des Reifenmaterials sicher zu stellen, wurden alle Transponder, wie in Abbildung 4-25 rechts abgebildet, grundiert.

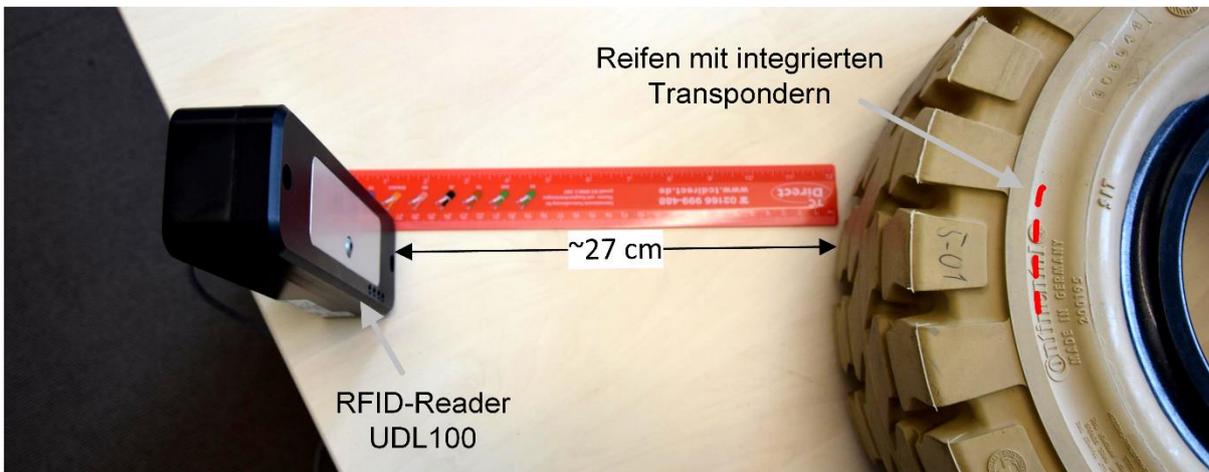


**Abbildung 4-25: Gewebetransponder vor der Reifenintegration**

Alle Transponder waren vor der Integration sowie nach der Grundierung funktionsfähig und in der Lage auf eine Entfernung von 10 bis 40 cm aktuelle Temperaturmesswerte auszugeben. Die Reichweite und die Bereiche in denen eine Kommunikation erfolgreich war, schwankten jedoch zwischen den einzelnen Transpondern, wobei der Transponder mit Foliensensor die geringsten Reichweiten aufwies. Auch unmittelbar nach der Vulkanisation des Reifens bei ca. 147° C waren alle Transponder funktionsfähig und reagierten auf Anfragen des Readers. Die Übermittlung von Messwerten war dagegen nur noch sporadisch erfolgreich. Ein möglicher Grund für die Verschlechterung der Kommunikation ist in der zunehmende Betriebstemperatur

des Readers zu begründen. Die Strahlungswärme des Reifens sowie der benachbarten Vulkanisierpressen und anderer noch warmer Reifen im Versuchsbereich, bewirkten eine deutlich spürbare Erwärmung des Readers, welche ein Durchführen von weiteren Messungen vor Ort unmöglich machte.

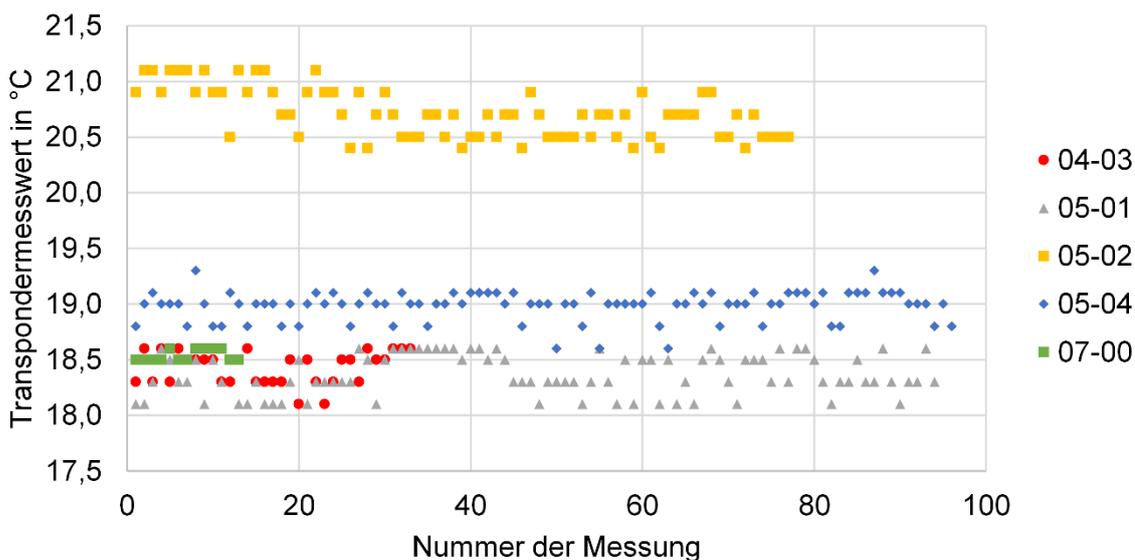
Am abgekühlten Reifen konnten dagegen wieder sichere Kommunikationsreichweiten von 15 bis 50 cm realisiert werden (Abbildung 4-26), wobei auch vereinzelt Transponder noch in einer Entfernung von 1 Meter kommunizieren konnten.



**Abbildung 4-26: Versuchsanordnung mit einem Reifen mit integrierten Gewebetranspondern und RFID-Reader (UDL100)**

Die Abweichungen zwischen den Reichweiten in den Versuchen vor und nach der Integration sind vorwiegend in der Versuchsumgebung begründet, die im Bereich der Vulkanisierpressen nicht gleichermaßen kontrolliert werden konnte, wie unter Laborbedingungen.

Die Auswertung der Temperaturmesswerte der in Abbildung 4-25 abgebildeten Transponder unmittelbar vor der Integration, belegt die grundsätzliche Eignung des Sensors für die Messung der Reifentemperatur.



**Abbildung 4-27: Schwankungen der Transpondermesswerte unmittelbar vor der Integration der Gewebetransponder**

Die Messwertschwankungen liegen, wie in Abbildung 4-27 dargestellt, bei allen Transpondern unterhalb von einem Grad Celsius. Insbesondere die Messwerte des Transponders 05-02 weichen von den übrigen Messwerten deutlich ab. Zudem ist anhand von Abbildung 4-27 die Kommunikationsfähigkeit der Transponder abschätzbar. Alle Transponder wurden 100 mal gemessen und lediglich erfolgreiche Messungen wurden dem Diagramm als Messwert hinzugefügt. Die Transponder mit der Nummer 05-04 und 05-01 haben am sichersten geantwortet, gefolgt von Transponder 05-02. Die wenigsten erfolgreichen Messungen zeigte Transponder 07-00 mit dem Foliensensor. Eine genauere, richtungsabhängige Analyse der Kommunikationsfähigkeit der Transponder stand zum Zeitpunkt des Projektendes noch aus.

Um die unterschiedlichen Mittelwerte der jeweiligen Messreihen genauer zu untersuchen und eine Abschätzung für individuelle Messwertkompensationen zu erhalten wurde eine erneute Untersuchung wie in Kapitel 4.2.3 mit zusätzlichen Transpondern durchgeführt. Für eine korrigierte Berechnung der Temperaturwerte ist folgende Formel erforderlich:

$$T \cdot (^{\circ}\text{C}) = \frac{V_{02}[\text{mV}] \cdot (\text{code} + 1024) - \text{code} \cdot V_{01}[\text{mV}]}{1024 \cdot 1.686} - 273.15$$

Für die Kompensation der Abweichungen der berechneten, von den tatsächlich gemessenen Temperaturmesswerten ist eine anschließende Ausgleichsberechnung erforderlich:

$$T_{\text{komp}} = T - m \cdot T + b$$

$$T_{\text{komp}} = \left( \frac{V_{02}[\text{mV}] \cdot (\text{code} + 1024) - \text{code} \cdot V_{01}[\text{mV}]}{1024 \cdot 1.686} - 273.15 \right) \cdot (1 - m) + b$$

Für sieben exemplarisch untersuchte Transponder zeigt sich, dass trotz identischer Einstellungen eine deutliche Abweichung der tatsächlichen von den gemessenen Werten besteht (Tabelle 4-3), so dass eine Kalibrierung der Temperaturmessfunktion für jeden Transponder individuell erfolgen muss (Messdaten aller Transponder sind dem Anhang in Abschnitt 7.5.2 zu entnehmen).

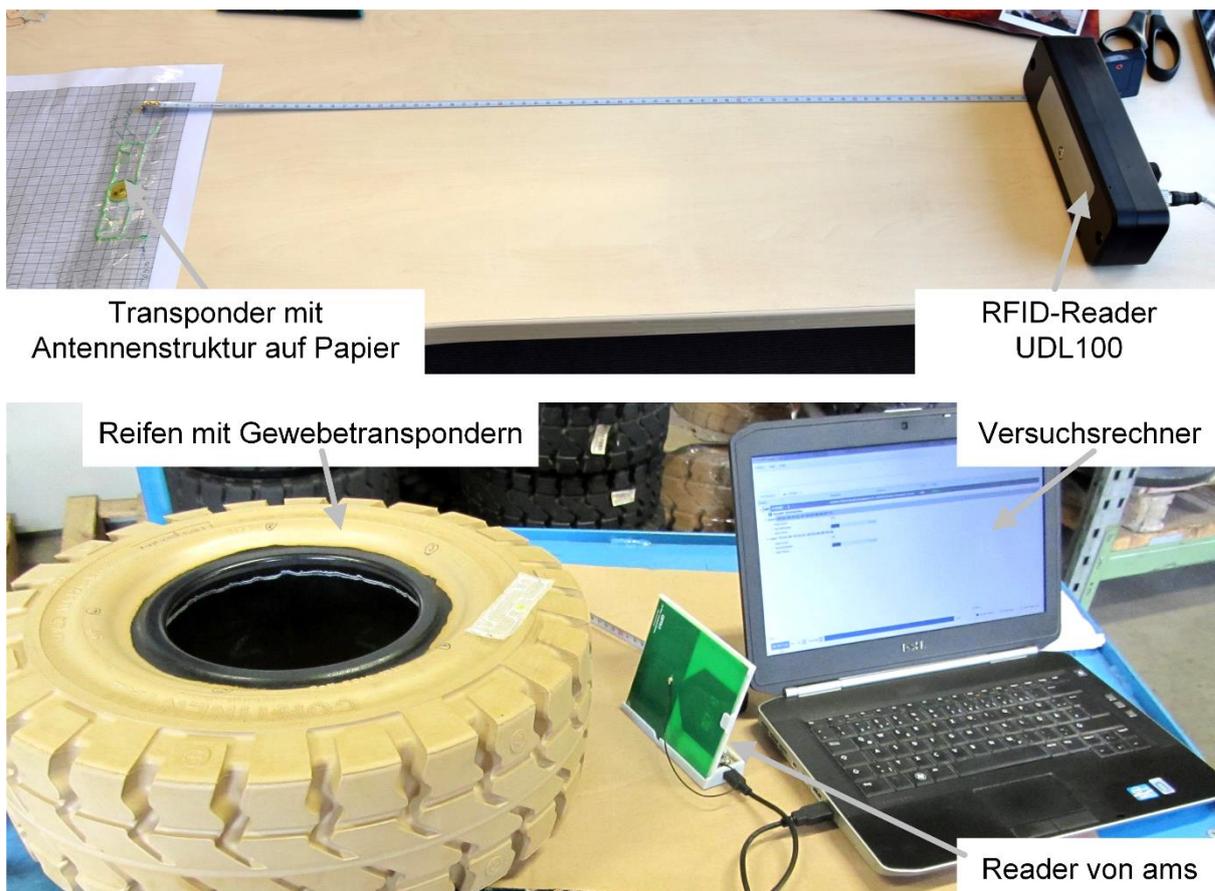
**Tabelle 4-3: exemplarische Auflistung der Kompensationsparameter für die Temperaturmessung der Gewebetransponder**

<i>Transponder-ID</i>	<i>V<sub>01</sub> in mV</i>	<i>V<sub>02</sub> in mV</i>	<i>m</i>	<i>b in K</i>
<b>05-10</b>	160	460	0,1135	2,43
<b>05-11</b>	160	460	-0,0638	93,85
<b>05-12</b>	160	460	-0,4567	-4,72
<b>05-13</b>	160	460	0,5702	-5,84
<b>05-14</b>	160	460	0,1971	1,12
<b>07-03</b>	160	460	-0,4797	-0,69
<b>07-10</b>	160	460	-0,7021	10,60

#### 4.3.4 Verwendete Hard- und Software

Für die Aufnahme der Messwerte und Identifikation der Transponder wurden zwei unterschiedliche Reader und drei unterschiedliche Programme verwendet.

Der UDL100 von deister electronic (siehe Abbildung 4-28, oben) ist ein für industrielle Anwendungen speziell geschützter Reader, der ursprünglich für den Einsatz am Gabelrücken eines Gabelstaplers entwickelt wurde. Er hat mit 2 Watt eine vergleichsweise hohe Sendeleistung und ein nach vorne gerichtetes Kommunikationsfeld. Der Versuchsreader AS3993 – Fermi von ams (siehe Abbildung 4-28, unten) ist dagegen deutlich kompakter und kaum geschützt, wird allerdings speziell für den Einsatz mit dem SL900A vom Hersteller empfohlen.



**Abbildung 4-28: In den Versuchen verwendete Reader-Systeme UDL100 von deister electronic und AS3993 – UHF-Reader**

Die wichtigsten technischen Eigenschaften beider Reader-Systeme sind in Tabelle 4-4 zusammengefasst.

**Tabelle 4-4: Technische Spezifikationen der verwendeten Reader**

<b>Reader</b>	<b>AS3993 – UHF RFID FERM1</b>	<b>UDL100</b>
<i>Gehäuse</i>	ohne	industrietauglich
<i>Anschlussaufwand</i>	Minimal (1x USB)	Hoch (4 Komponenten)
<i>Kommunikationsreichweite*</i>	Ca. 10 bis 25 cm	Ca. 20 bis 40 cm
<i>Kommunikationszuverlässigkeit (subjektiv)**</i>	Gut	mittel
<i>Preis</i>	Ca. 360 €	Ca. 1.800 €

\* Getestet in Luft ohne besondere Messapparaturen, abhängig vom Transponder; \*\* Untersucht anhand der Temperaturmessung in einem klimatisierten Versuchsumfeld

Als Messprogramme wurden einerseits die jeweiligen Standardmessprogramme der Readerhersteller „R-Demo“ und die „AS3993 – ReaderSuite“ verwendet, als auch ein in Python erstelltes Messprogramm, das insbesondere erforderlich war, da keines der Standardprogramme in der Lage ist Messwerte der Gewebetransponder direkt in eine weiter verwendbare

Messdatei zu schreiben. Der Funktionsumfang der verwendeten Programme ist in Tabelle 4-5 angegeben.

**Tabelle 4-5: Funktionsumfang der verwendeten Messprogramme**

<i>Reader-Software</i>	<i>AS3993 – ReaderSuite</i>	<i>UDL100 R-Demo</i>	<i>UDL100 Python-Program</i>
<i>Tags suchen (Identifizieren)</i>	✓	✓	✓
<i>Temperatur messen</i>	✓	x*	✓
<i>Weitere Sensoren messen</i>	✓	x*	✓**
<i>Messkonfiguration ändern</i>	✓	x*	x
<i>Temperatur speichern</i>	x	x	✓

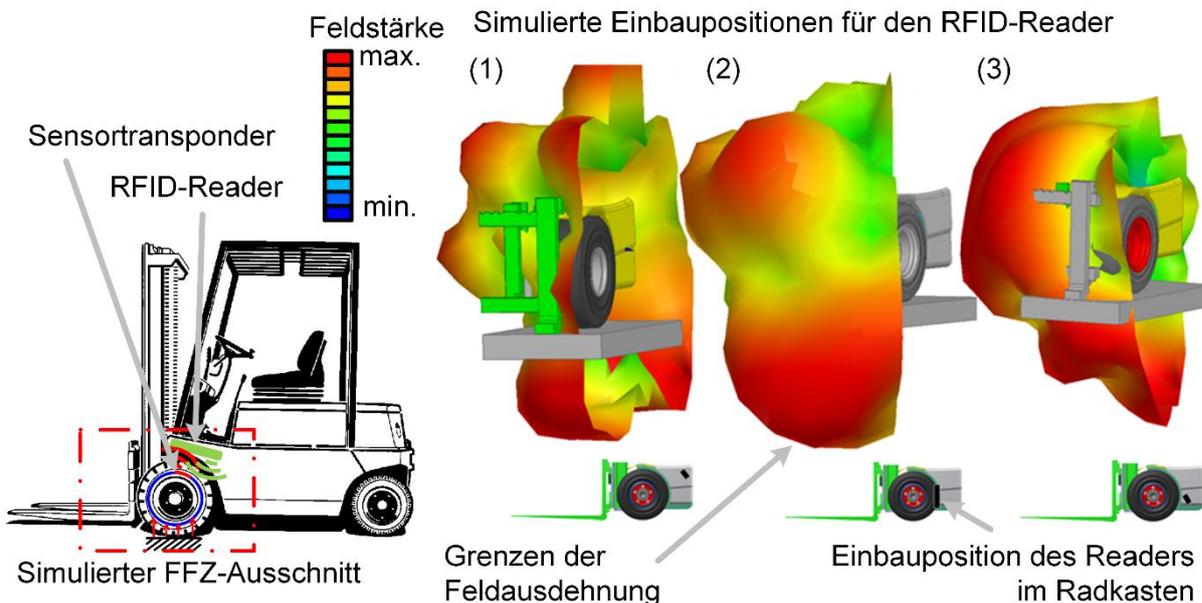
\* nur mit manuellem Kommando möglich, \*\*mit Anpassungen im Programablauf möglich

#### 4.4 Anwendung des Messsystems an einem beispielhaften Flurförderzeug

Neben dem Aufbau eines geeigneten Transponders ist für die praxisnahe Umsetzung des Projektziels ebenfalls ein Reader-System an einem entsprechenden Fahrzeug erforderlich, welches die Messdaten auslesen und an eine übergeordnete Instanz übertragen kann. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen einer HF-Simulation unterschiedliche Readeranbaupositionen an einem Gabelstapler verglichen und ein Versuchsstand aufgebaut, um den Einbau des Readers zu testen und realitätsnahe Versuche durchführen zu können.

Als Antennenkonfiguration kommen für die fahrzeugseitige Integration im Wesentlichen drei unterschiedliche Bauformen in Frage: Eine klassische Dipolantenne erfordert mehr Raum im Radkasten als bei gängigen Fahrzeugen verfügbar 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, siehe Kapitel 4.3.4) 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 HFSS beispielhaft untersuchten Gegengewichtstaplers des Herstellers Still (Typ RX20-20) wurden mehrere realistische Anbaupositionen des Readers hinsichtlich ihrer Feldausbreitung und der vorherrschenden Umgebungsbedingungen untersucht. Ein Einbau im hinteren Bereich des Radkastens (Abbildung 4-29, Nr. 1) 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.



**Abbildung 4-29: HFSS-Simulation der Feldausdehnung eines UDL100 im Radkasten eines Still RX20-20**

Ein senkrechter Einbau fahrzeugseitig neben dem Reifen (Abbildung 4-29, Nr. 2) 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 tangentiale 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 Reifenauflandsfläche aufgrund einer ungünstigen Ausrichtung zwischen Transponder- und Readerfeld nicht oder nur über Reflexionen lesbar.

Die dritte dargestellte Einbauposition (Abbildung 4-29, Nr. 3) 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 Einbauposition 2 nicht ausreichend geeignet, so dass für die weitere praktische Untersuchung die Einbaupositionen 1 und 3 sowie Varianten dieser Positionierungen näher untersucht wurden.

Die praktischen Untersuchungen der Lesbarkeit insbesondere im Fahrbetrieb des Fahrzeugs wurden anhand des in Abbildung 4-30 dargestellten Prüfstands durchgeführt. Der Versuchsaufbau besteht aus einem elektrischen Antrieb sowie dem Originalkotflügel eines Gabelstaplers (Still RX20-20) und für die Feldausbreitung relevanten, additiv erstellten und metallisch beschichteten Fahrwerkskomponenten. Der Prüfstand ermöglicht die Untersuchung des Kommunikationsverhaltens des Transponder-Reader-Systems unter elektromagnetisch realitätsnahen Bedingungen. Hierzu können unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten lastfrei simuliert und die Erreichbarkeit der integrierten Transponder in Abhängigkeit der Readerposition und der Rotationsgeschwindigkeit verglichen werden. Die Ergebnisse der Simulation konnten dabei nur teilweise bestätigt werden. Die überprüften Anbaupositionen, bei denen es sich um Variationen der Positionen 1 und 3 aus Abbildung 4-29 handelt, ermöglichen bei nahezu allen realistischen Positionierungen und allen untersuchten Fahrgeschwindigkeiten (bis zu 25 km/h) ein Auslesen des Sensorsignals auf nahezu 180° des Reifenumfangs.



**Abbildung 4-30: Prüfstand für die Untersuchung der erreichbaren Leserate mit einem Sensortransponder und einem am Fahrzeugmodell verbauten RFID-Reader**

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. Hierbei ist eine Integration direkt auf der Oberfläche des Radkastens beispielsweise als Schlitz- oder integrierte Patchantenne konstruktiv besonders sinnvoll.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Überwachung des inneren Belastungs- und Temperaturzustandes eines SE Reifens wurden passive RFID-Transponder mit integrierten Sensoren entwickelt. Die Verwendung von laserstrukturierten Dehnungsmesstreifen sowie die Integration eines piezoresistiven Folien-drucksensors zur Belastungsmessung wurden untersucht und entsprechende Versuchssysteme realisiert. Transponder bestehend aus einem festen Chipmodul und einer induktiv gekoppelten flexiblen Gewebeantenne haben sich in den praktischen Untersuchungen als besonders geeignet für die Integration dargestellt.

Das verwendete Chipmodul besteht aus einer vergossenen mehrlagigen Platine und schützt die zwischen den Lagen eingebettete Elektronik. Die Platine dient somit zum einen als Trägermaterial für die elektrischen Leiter sowie als Schutzkapsel für die verwendete 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 piezoresistiven Foliensensor die senkrechte Druckbelastung im Gummi aufnehmen. Eine vollständige Integration des Foliensensors in die Chipmoduloberfläche bewirkte eine zu starke Dämpfung der Kopplung zwischen der Nah- und Fernfeldantenne, so dass der Sensor ein zusätzliches Bauteil am Transponder innerhalb des Reifens darstellt.

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. Die realisierbare Kommunikationsreichweite der abschließenden Transponderversion betrug zwischen 25 Zentimetern und ca. einem Meter, wobei die Reichweite aufgrund der individuell hergestellten Transponder ebenfalls höchst unterschiedlich war.

Weitere Anwendungen für die vorgestellten Transpondersysteme, neben der Echtzeitüberwachung, sind die Produkt- und Produktionsüberwachung sowie die Datengenerierung zur Prozessoptimierung. So können neben der Speicherung von Daten auf dem Chip bzw. der Rückverfolgbarkeit einzelner Produkte über den gesamten Produktlebenszyklus auch Belastungskollektive, beispielsweise Häufigkeit und Dauer von kritischen Temperaturwerten, langfristig erfasst werden. Diese Daten können Anwendern und Herstellern dabei helfen ihre Reifen optimal anzupassen bzw. auszuwählen und die Lebensdauer, Leistung oder andere Zielgrößen besser zu erreichen. Für die Anwendung in Leasingfahrzeugen kann über die Sensortransponder eine belastungs- bzw. verschleißindividuelle Abrechnung der Leasingraten erfolgen. Für beide Anwendungen ist nicht zwingend ein voll funktionsfähiger Reader am Fahrzeug erforderlich. Eine ausreichende Energieversorgung durch ein elektromagnetisches Feld genügt, um Messungen automatisiert durchzuführen und zu speichern, bis eine erneute Auslesung durch den Service oder einen stationären Reader erfolgt.

Eine weitere Anwendung für die entwickelten Transponder ist ihr Einsatz als einfach zu handhabendes Temperaturmesssystem. Bei der Vermessung des Temperaturverlaufs während der Reifenvulkanisation wird nach dem Stand der Technik für jeden Messpunkt ein Sensorelement mit zwei Zuleitungen in den Reifen eingebracht. Die Verwendung von Sensortranspondern ermöglicht durch eine externe Energieversorgung nahezu beliebig viele Messpunkte in Reihe zu schalten, wobei lediglich zwei Energieanschlüsse aus der Reifenform herausgeführt werden müssen. Vor der Vulkanisation wird der Messbetrieb der Transponder drahtlos gestartet, so dass nach einem vorgegebenen Takt Temperaturwerte in den Speicher geschrieben werden. Die Zuordnung der Messstellen erfolgt nach der Vulkanisation des Reifens über die Identifikationsnummer des jeweiligen Transponders.

Neben der Reduzierung der Größe des Chipmoduls und der gleichzeitigen mechanischen Optimierung der Chipmodulkomponenten bietet insbesondere die Fernfeldantenne großes Optimierungspotential. Die Abstimmung der Antennengeometrie auf die jeweilige umgebende Materialmischung stellt die erfolgversprechendste Anpassung zur Reichweiten- und Zuverlässigkeitssteigerung dar. Zudem können andere Materialien als Grundlage für die flexible Antenne verwendet werden. Durch eine Prägung der Antennenstruktur direkt auf eine anschließend vorvulkanisierte Gummilage kann die Verformung des Transponders bei der Reifenvulkanisation minimiert und gleichzeitig ein weiterer Fremdkörper im Reifen eingespart werden.

## 6 Veröffentlichungen und studentische Arbeiten

Kleinert, S.; Overmeyer, L (2016): Sensorintegration in Flurförderzeugreifen, Temperatur- und Belastungsüberwachung in SE-Reifen, 11. Hamburger Staplertagung, Forschungskatalog Flurförderzeuge, Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, S. 5 - 6; ISBN:978-3-86818-084-8.

Kleinert, S.; Overmeyer, L. (2016): Sensorintegration in Flurförderzeugreifen, Temperatur- und Belastungsüberwachung in SE-Reifen, Hebezeuge Fördermittel, Technische Logistik München: HUSS-MEDIEN GmbH, S.29. ISSN: 0017-9442 A 06792.

Kleinert, S.; Overmeyer, L. (2016): Drahtlose Temperatur- und Belastungsmessung in Flurförderzeugreifen, 11. Hamburger Staplertagung, Forschungskatalog Flurförderzeuge, Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität, S. 113 – 124; ISBN:978-3-86818-084-8.

Kleinert, S.; Overmeyer, L. (2016): Integrierte drahtlose Sensorsysteme für Flurförderzeugreifen, Logistics Journal, Volume 2016, 27 May 2016, Open Access, DOI: 10.2195/lj\_Proc\_kleinert\_de\_201605\_01 sowie 11. Fachkolloquium Logistik der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL), S. 221 - 226. Duisburg: TuL – Lehrstuhl für Transportsysteme und Logistik der Universität Duisburg-Essen.

Kleinert, S. (2015): Unfallvermeidung durch drahtlose Sensoren in Gabelstaplerreifen, phi – Produktionstechnik Hannover informiert.

Kleinert, S. ; Overmeyer, L. (2014): Sensorintegration in Flurförderzeugreifen, Temperatur- und Belastungsüberwachung in SE-Reifen, 10. Hamburger Staplertagung, Forschungskatalog Flurförderzeuge. Hamburg: Helmut Schmidt Universität, S. 29

### Ausstehend:

Kleinert, S.; Overmeyer, L.: Kontaktlose Temperatur- und Belastungsmessung in Vollgummireifen, 12. Fachkolloquium Logistik der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL), 28. + 29.09.216, Stuttgart sowie Logistics Journal voraussichtlich 2016

Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0, Bd.1, Springer Verlag, ISBN 978-3-662-45278-3, Veröffentlichung Ende 2016

### 6.1 Nicht veröffentlichte studentische Arbeiten

Chen, Q.: FE-Analyse von RFID-Sensortranspondern auf Basis von Glasfasergewebe zur Belastungserfassung in FFZ-Reifen. Masterarbeit 2016

Du, S.: Integration und Untersuchung eines RFID-Reader-Systems zum Auslesen von Reifensensoren an Flurförderzeugen. Studienarbeit 2016

Jüttner, J.-F.: Aufbau eines drahtlosen Sensornetzwerks zur thermischen und mechanischen Überwachung von SE-Reifen. Bachelorarbeit 2015

Swientek, P. D.: Aufbau eines drahtlosen Sensornetzwerks auf Basis von flexiblen UHF-Transpondern zur Überwachung von SE-Reifen. Bachelorarbeit 2015

Meyer, J.: Aufbau eines RFID-Reader-Systems für die Erfassung von drahtlosen Reifensensoren an Flurförderzeugen. Masterarbeit 2015

Hakimi, A.: Konzeption und Umsetzung eines Verfahrens für die Laboruntersuchung von elektronischen Komponenten in Super-Elastik-Reifen. Bachelorarbeit 2014

Missal, T.: Finite-Elemente-Analyse der dynamischen Spannungszustände in Super-Elastik-Reifen. Bachelorarbeit 2014



## 7 Anhang

### 7.1 Literaturverzeichnis

- [ams13] ams: Technische Dokumentation SL900A - SL900A-Frequently Asked Questions. Revision 1.0 – 23/05/2013, [www.ams.com](http://www.ams.com)
- [BLB12] Bär, F.; Lotz, C.; Bouzakis, A., 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; Suttmann, 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
- [Hof15] Hoffman, Karl: Anwendung der Wheatstoneschen Brückenschaltung. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, unter: [www.hbm.com/fileadmin-/media-pool/hbmdoc/technical/s1267.pdf](http://www.hbm.com/fileadmin-/media-pool/hbmdoc/technical/s1267.pdf) (abgerufen am 25.08.2015).
- [Tek10] Tekscan: FlexiForce Sensor User Manuel (Rev H). [www.tekscan.com](http://www.tekscan.com), 2010
- [Tek16] Tekscan: [www.tekscan.com](http://www.tekscan.com); Abgerufen 07.06.2016

### 7.2 Abkürzungsverzeichnis

AD-Wandler	Analog / Digital-Wandler
DMS	Dehnungsmessstreifen
FE	Finite Elemente
FFZ	Flurförderzeug
HF	Hochfrequenz
OPV	Operationsverstärker
RFID	Radio Frequency Identification
SE-Reifen	Super-Elastik-Reifen
UHF	Ultrahochfrequenz

### 7.3 Lastenheft (Zusammenfassung)

#### 7.3.1 Festlegungen im Rahmen des Forschungsprojekts

Als primärer Untersuchungsgegenstand des Forschungsvorhabens werden in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss SE-Reifen vom Typ 18 x 7 – 8 (180/70 – 8) festgelegt. Dieser Reifentyp ist für die Forschungsziele besonders interessant, da er in der FFZ-Technik weit verbreitet ist. Die Herstellung der ausgewählten Reifen ist vergleichsweise günstig, wodurch eine ausreichend große Anzahl an Versuchsreifen mit den vorgesehenen Mitteln gefertigt werden kann. Die Handhabung der Versuchsreifen ist aufgrund von Größe und Gewicht verhältnismäßig einfach und eine Untersuchung auf den Prüfständen der beteiligten Reifenhersteller sowie der Ausstattung des ITA möglich.

Zusätzliche Untersuchungen des funktionsfähigen Systems an anderen Reifen (z. B. 355/65 – 15, 12.0 – 20 oder 27 x 10 – 12) werden im Projektverlauf abgestimmt, sind jedoch nicht Kernziel des Vorhabens.

#### 7.3.2 Anforderungslisten

Die Anforderungen bezüglich der Projektergebnisse werden nach ihren thematischen Zusammenhängen und nach den geplanten Arbeitspaketen gegliedert, tabellarisch aufgeführt und nach Relevanz, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beispielhaft gezeigt, bewertet (E: erforderlich, W: wünschenswert, O: optional).

#### 7.3.3 Analyse der Spannungszustände; AP1

Lfd. Nr.	Anforderung	Rel.
7.3.3-01	Die inneren Spannungszustände bzw. Verschiebungen in SE-Reifen werden mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) abgebildet (AS 1.1).	E
7.3.3-02	Das FEM-Modell wird anhand experimenteller Untersuchungen validiert (AS 1.2).	E
7.3.3-03	Der Einfluss, den eingebettete Fremdkörper z. B. Sensoren, Transponder usw. auf die inneren Spannungszustände eines SE-Reifens haben, wird untersucht.	W
7.3.3-04	Änderungen der inneren Spannungszustände durch äußere Abnutzung (Verringerung des Reifendurchmessers durch Abrieb) werden untersucht.	W
7.3.3-05	Die Ergebnisse der Spannungsanalyse sind mit den Erfahrungswerten und Erkenntnissen der Reifenhersteller abzugleichen. Diskrepanzen beim Vergleich der Ergebnisse sind zu klären bzw. zu untersuchen.	E

**7.3.4 Allg. Anforderungen an Konzeptentwicklung und prototypischen Aufbau**

Lfd. Nr.	Anforderung	Rel.
7.3.4-01	Der Einbauort des Transponders wird derart gewählt, dass eine optimale Kombination aus Lesbarkeit, Messsignalgenerierung sowie mechanischer und thermischer Belastung erreicht wird.	E
7.3.4-02	Der Einbau der Komponenten (Sensoren, Transponder, Antenne) wird derart gestaltet, dass er in den bestehenden Fertigungsablauf der SE-Reifen kostengünstig integrierbar ist.	W
7.3.4-03	Die integrierten Komponenten führen nicht zu einer Schwächung des Reifens.	E
7.3.4-04	Die entwickelten Konzepte haben Allgemeingültigkeit für die vorgesehenen SE-Reifen. Unabhängigkeit vom Einsatz als linker, rechter, vorderer oder hinterer Reifen bzw. unabhängig vom FFZ-Typ.	W
7.3.4-05	Die entwickelten Konzepte sind auf andere SE-Reifen-Typen als das Ausgewählte möglichst einfach übertragbar.	W
7.3.4-06	Die entwickelten Konzepte sind auf andere Reifen-Typen z. B. luftgefüllte Schwerlastreifen übertragbar.	W
7.3.4-07	Die integrierten Komponenten widerstehen den mechanischen Belastungen am Integrationsort und bei der Reifenherstellung (Vulkanisation).	E
7.3.4-08	Die integrierten Komponenten widerstehen den thermischen Belastungen am Integrationsort und bei der Reifenherstellung (Vulkanisation).	E

**7.3.5 Konzeption und Aufbau des Transponders**

Lfd. Nr.	Anforderung	Rel.
7.3.5-01	Der Transponder ist in jeder Reifenstellung lesbar.	W
7.3.5-02	Der Transponder ist während der Fahrt lesbar (rotierender Reifen).	E
7.3.5-03	Der Transponder ist bei einer FFZ-Fahrgeschwindigkeit von bis zu 25 km/h lesbar.	W
7.3.5-04	Der Transponder ermöglicht eine Datenübertragungsrate von mindestens einem vollständigen Datensatz pro Reifenumdrehung. Mit den Werten aus 7.3.5-03 ergibt sich eine minimale Auslesefrequenz von 15,2 Hz.	W
7.3.5-05	Für die Aufnahme und Übertragung der Belastung im Reifeninneren wird ein Konzept gefunden, welches die Messung der relevanten Größen garantieren kann.	E
7.3.5-06	Es wird überprüft, ob aktive, passive oder semi-aktive Transponder besser für die Integration geeignet sind.	W
7.3.5-07	Bei der Verwendung aktiver Transponder muss die Lebensdauer der Batterie als begrenzender Faktor min. 5 Jahre betragen.	O
7.3.5-08	Der Transponder ist in der Lage, die angeschlossenen Sensoren mit mindestens der unter Kap. 7.3.6 geforderten Auswertungsrate auszuwerten und auszugeben.	W

**7.3.6 Konzeption und Aufbau der Sensoren**

Lfd. Nr.	Anforderung	Rel.
7.3.6-01	Der Temperatursensor misst die Reifenkerntemperatur (Hot-Spot) in der Zwischenschicht des SE-Reifens.	E
7.3.6-02	Der Druck-/Kraftsensor misst die aktuelle Reifenaufstandskraft.	E
7.3.6-03	Der Druck-/Kraftsensor misst die Kraft entlang des gesamten Reifenumfangs.	W
7.3.6-04	Sensoren für die Erfassung der Reifenabnutzung (Radiusverringern) werden integriert.	O
7.3.6-05	Der Temperatursensor erfasst Messwerte mit einer Messrate von mindestens 0,1 Messungen/Sekunde.	E
7.3.6-06	Der Temperatursensor misst in einem Temperaturbereich von mindestens 100 bis 150° C.	E
7.3.6-07	Der Temperatursensor erfasst auch Temperaturen im Bereich ab 20°C.	W
7.3.6-08	Der Temperatursensor misst mit einer Auflösung von mindestens 5°C.	E
7.3.6-09	Der Druck bzw. die Kraft im Reifen wird mit einer Messrate erfasst, die der erforderlichen Ausleserate entspricht.	E
7.3.6-10	Der Druck bzw. die Kraft im Reifen wird in einem Messbereich bis mindestens der 1,5-fachen Nennlast des Reifens erfasst (3,3 t).	E
7.3.6-11	Der Druck bzw. die Kraft im Reifen wird in einem Messbereich bis mindestens der doppelten Nennlast des Reifens erfasst (4,4 t).	W
7.3.6-12	Der Druck bzw. die Kraft im Reifen wird mit einer Auflösung erfasst, die bei abnehmender Belastung feiner wird.	W
7.3.6-13	Die Reifenabnutzung wird mindestens einmal täglich erfasst.	O

**7.3.7 Konzeption und Aufbau der Verbindungstechnik**

Lfd. Nr.	Anforderung	Rel.
7.3.7-01	Die Verbindungstechnik gewährleistet eine zuverlässige Verbindung zwischen Transponder, Sensoren und Antenne.	E
7.3.7-02	Die verwendeten Lötmittel und Kleber halten den Temperaturen bei der Reifenfertigung (Vulkanisation) und im Betrieb des Fahrzeugs stand.	E
7.3.7-03	Die verwendeten Lötmittel und Kleber halten den mechanischen Belastungen bei der Reifenfertigung (Vulkanisation) und im Betrieb des Fahrzeugs stand.	E
7.3.7-04	Die verwendeten Lötmittel und Kleber gehen keine ungewollte chemische Wechselwirkung mit dem umschließenden Reifenmaterial ein.	E

**7.3.8 Verifikation und Anpassung; AP4**

Lfd. Nr.	Anforderung	Rel.
7.3.8-01	In Abstimmung mit den Reifenherstellern und anhand der Ergebnisse aus AP1 werden Belastungskollektive für die Prüfung der Sensor-Reifen definiert.	E
7.3.8-02	Die in SE-Reifen integrierte Elektronik wird im Laborversuch getestet.	E
7.3.8-03	Neben vollständig integrierten Reifen werden Versuche mit in Gummi-proben integrierte Elektronik im Laborversuch untersucht.	E
7.3.8-04	Ein (oder mehrere) SE-Reifen mit integrierten Sensoren werden in einem Dauerversuch analysiert.	W
7.3.8-05	Mit den Projektergebnissen wird ein Demonstrator-Fahrzeug aufgebaut, welches mit einem Sensor-Reifen und einem Kommunikationsmodul ausgestattet ist.	W

**7.3.9 Projektmanagement; AP5**

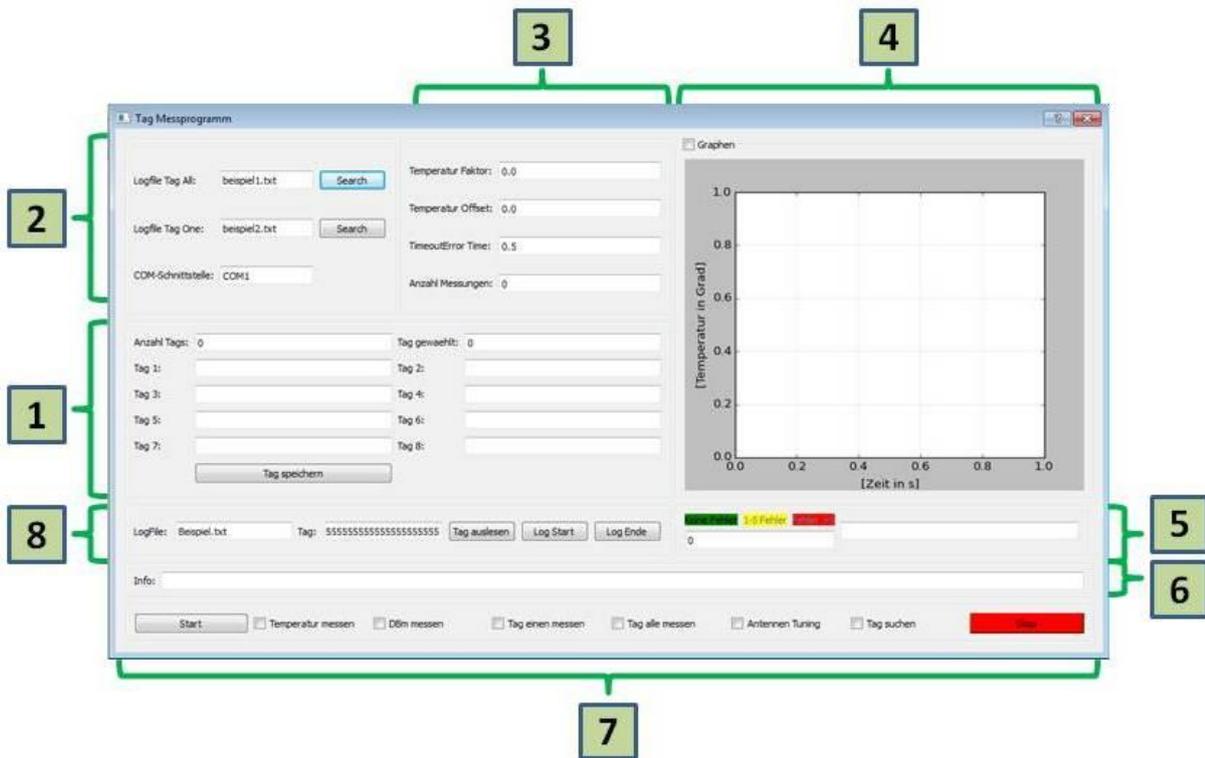
Lfd. Nr.	Anforderung	Rel.
7.3.9-01	Es muss ein Zwischenbericht nach 15 Monaten Projektlaufzeit erstellt werden.	E
7.3.9-02	Es muss ein Abschlussbericht im Anschluss an das Projekt erstellt werden.	E
7.3.9-03	Das ITA plant regelmäßige Treffen des projektbegleitenden Ausschusses, um aktuelle Ergebnisse vorzustellen und zu diskutieren.	E
7.3.9-04	Die Präsentationen und Protokolle werden dem projektbegleitenden Ausschuss durch das ITA zur Verfügung gestellt.	E
7.3.9-05	Das ITA stellt das Forschungsvorhaben und die Ergebnisse der Öffentlichkeit durch schriftliche Veröffentlichungen und Präsentationen vor.	

### 7.4 Softwaredokumentation des Python Messtools

In diesem Kapitel wird die Bedienung des Python Messprogramms erläutert. Dieses geschieht in zwei Abschnitten. In dem ersten Abschnitt wird die grafische Oberfläche mit den Anzeige und Bedienelementen erläutert. Im zweiten Abschnitt wird der Programmaufbau in Programmablaufplänen (PAP) beschrieben.

#### 7.4.1 Aufbau der Grafischen Oberfläche

In dem Bild 7.1 ist die Benutzeroberfläche (GUI) des Python Messprogramms zu sehen. Die Tabelle 7-1 erläutert die einzelnen Bedienelemente des Python Messprogramm.



**Bild 7.1 Aufbau der Grafischen Oberfläche des Python Messprogramm**

**Tabelle 7-1 Erläuterung zur Bedienung des Python Messprogramm**

<b>1</b>	In diesem Bereich werden alle gefundenen Transponder (Tags) aufgelistet. Des Weiteren befindet sich hier das Auswahlfeld für einen gewählten Transponder.
<b>2</b>	In diesem Bereich sind Eingabefelder für die Datenverbindung mit dem Reader und für die Protokollierung der Messdaten. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dateipfad für das Messprotokoll eines einzelnen Transponders</li> <li>• Dateipfad für das Messprotokoll aller Transponders</li> <li>• Eingabefeld zur Auswahl der COM-Schnittstelle der Readers</li> </ul>

<b>3</b>	<p>Eingabefelder für die Temperaturumrechnung und Messung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatur Offset und Temperaturfaktor</li> <li>• Das Eingabefeld „Timeout Error Time“ gibt den Bediener die Möglichkeit beim Auslesen der RS485-Schnittstelle einen früheren Abbruch zu erwirken. Diese Zeit ist standardmäßig auf 0,5 s eingestellt.</li> <li>• „Anzahl Messungen“ gibt an, wie viele Messungen durchgeführt werden sollen. Dabei steht die Eingabe des Werts „inf“ für einen unendlich fortgesetzten Messvorgang.</li> </ul>
<b>4</b>	<p>In dieser Gruppe ist die graphische Ausgabe dargestellt. In der finalen Version nicht unterstützt.</p>
<b>5</b>	<p>In dieser Gruppe werden die fehlerhaften Kommunikationsversuche mit einem Transponder angezeigt. In der finalen Version nicht aktiviert.</p>
<b>6</b>	<p>Anzeige von Meldungen zum Programmablauf.</p>
<b>7</b>	<p>Bedienfläche für die unterschiedlichen Programmfunktionen (siehe Kap. 7.4.2).</p>
<b>8</b>	<p>Auslesen, Starten und Beenden eines Transponder-Logfiles In der finalen Version nicht unterstützt.</p>

#### 7.4.2 Programmfunktionen und Programmablauf

- **„Start“**  
Startet den durch die Checkboxen definierten Programmablauf
- **„Temperatur messen“**  
Im Programmablauf werden für den ausgewählten oder alle gefundenen Transponder die Temperaturwerte abgefragt (siehe „Tag einen messen“ und „Tag alle messen“)
- **„DBm messen“**  
Im Programmablauf werden die Verbindungswerte der Transponderkommunikation gemessen
- **„Tag einen messen“**  
Für den Programmablauf wird lediglich ein ausgewählter Transponder gemessen
- **„Tag alle messen“**  
Für den Programmablauf werden alle gefundenen Transponder gemessen

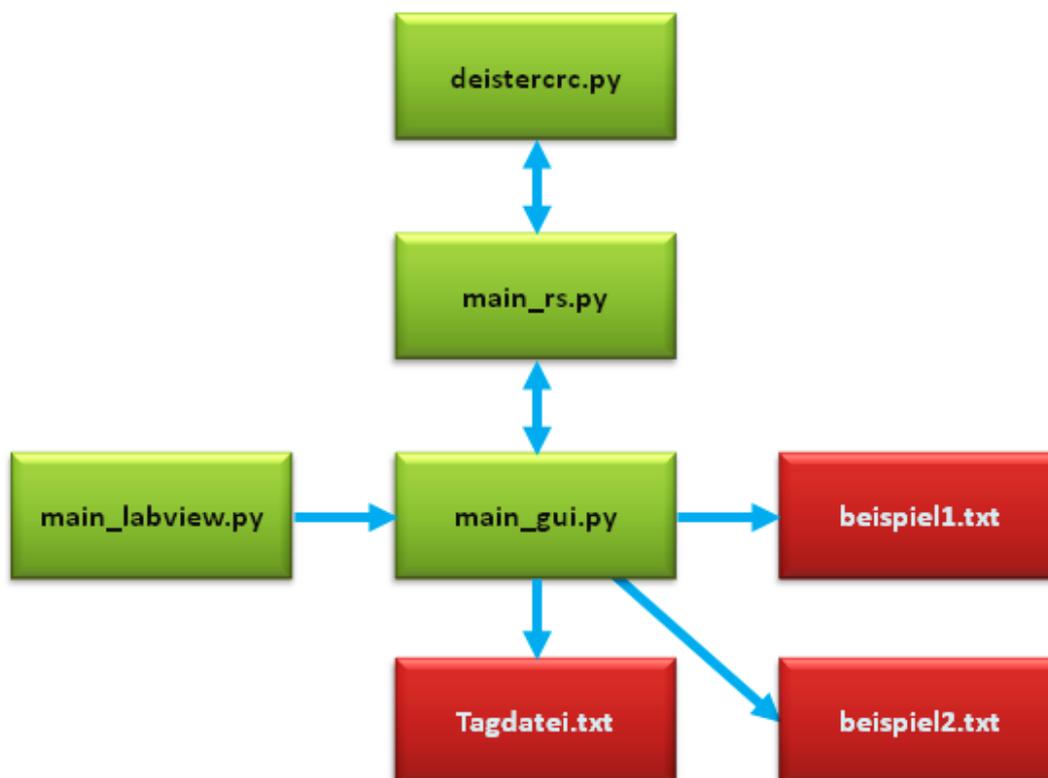
- **„Antennen Tuning“**  
Der Programmablauf dient der Optimierung der Readerantenne
- **„Tag suchen“**  
Es wird nach Transpondern in Readerreichweite gesucht
- **„Stopp“**  
Beendet den aktuellen Programmablauf

### 7.4.3 Anzeige in der DOS-Konsole

Da die Weiterleitung von Rückmeldungen an die GUI in der aktuellen Programmversion nicht vollständig integriert ist, sollte die Überwachung der Programmfunktion über die angezeigte DOS-Konsole erfolgen. Hier werden, je nach Programmdurchlauf, empfangene und gesendete Nachrichten sowie ausgewertete Daten und Fehlermeldungen angezeigt. Die Funktionsprüfung des Readers bzw. Transponders ist somit über dieses Fenster realisierbar.

### 7.4.4 Aufbau der Programmstruktur

Der Aufbau des Python Messprogramm wird in Bild 7.2 dargestellt. Dieses besteht aus vier Python-Dateien (grün) und drei Textdateien (rot).



**Bild 7.2 Aufbau des Python Messprogramm**

Die beispielhaften Textdateien "beispiel1.txt" und "beispiel2.txt" dienen der Speicherung der Messwerte in Logfiles. Die Textdatei "Tagdatei.txt" enthält die vorhandenen und vom Bediener gespeicherten Transponder. Diese bestehen aus der Seriennummer (SNR), dem Temperaturfaktor und dem Temperaturoffset.

Die Dateien "deistercrc.py", "main\_rs.py" werden für die Durchführung der Messungen benötigt. In der Klasse "deistercrc.py" sind die Funktionen zur Ermittlung der Prüfsumme hinterlegt. Die Klasse "main\_rs.py" beinhaltet alle Funktionen um Befehle an den UDL100 zu schicken. In der "main\_gui.py" werden die Funktionen zur Erstellung der grafischen Oberfläche(GUI) verwaltet. Über die Datei „main\_labview.py“ wird das Messprogramm aufgerufen.

#### 7.4.5 Anwendungsbeispiele

In diesem Kapitel werden mehrere Beispiele dargestellt, die zur leichteren Bedienung der beiden Programme dienen sollen.

##### Beispiel 1: Messen eines einzelnen Transponders

In diesem Beispiel möchte der Bediener an der COM4 Schnittstelle einen Transponder messen mit der SNR 55-55. Dieser Transponder soll 1000-mal gemessen werden. Weiterhin ist der Temperaturfaktor 0,5 und der Temperaturoffset 75 Kelvin. Es sollen die Temperatur und die DBm Werte gemessen werden. Der Timeout-Error soll 1500 ms betragen. Zur Verbesserung des Empfangs soll auch ein Antennentuning durchgeführt werden. Die Messdatei soll den Namen „Messungstest.txt“ haben.

Schritt 1: Einstellen der COM Schnittstelle auf den Wert „COM4“

Schritt 2: Anklicken der Checkbox „Antennen Tuning“

Schritt 3: Starten des Vorgangs mit der Taste „Start“

→ Das Antennentuning wird durchgeführt

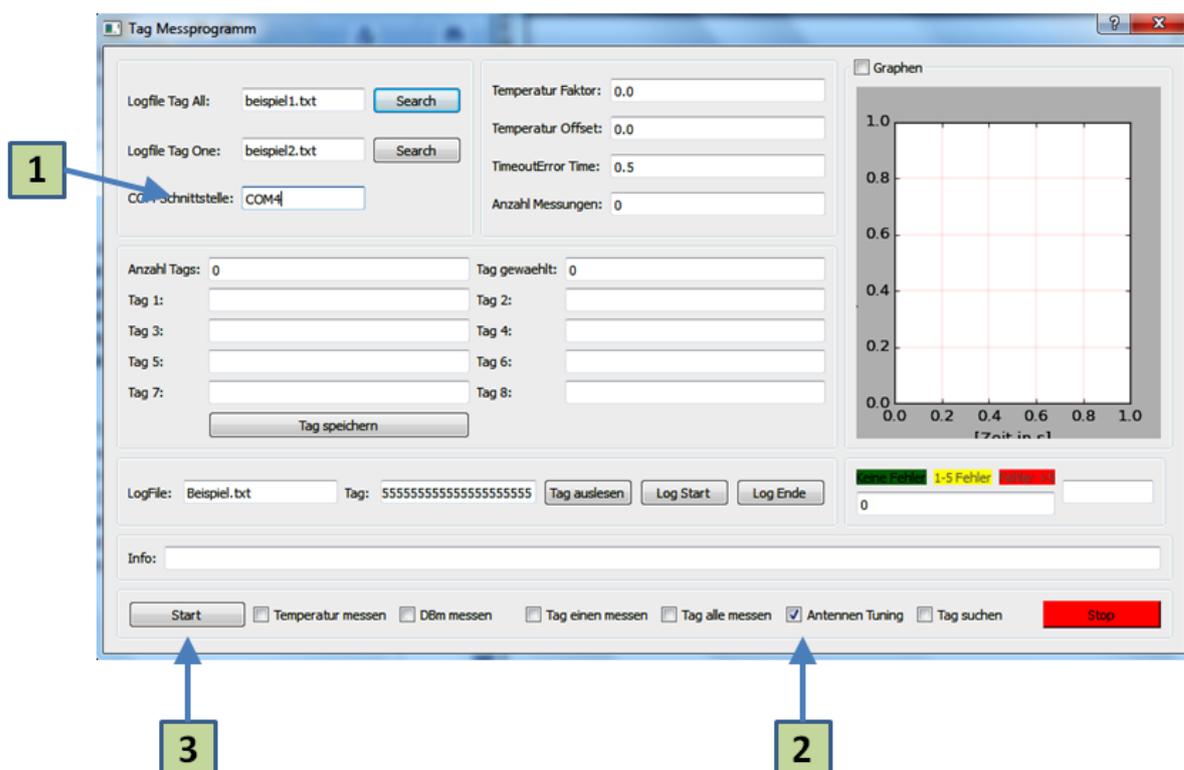
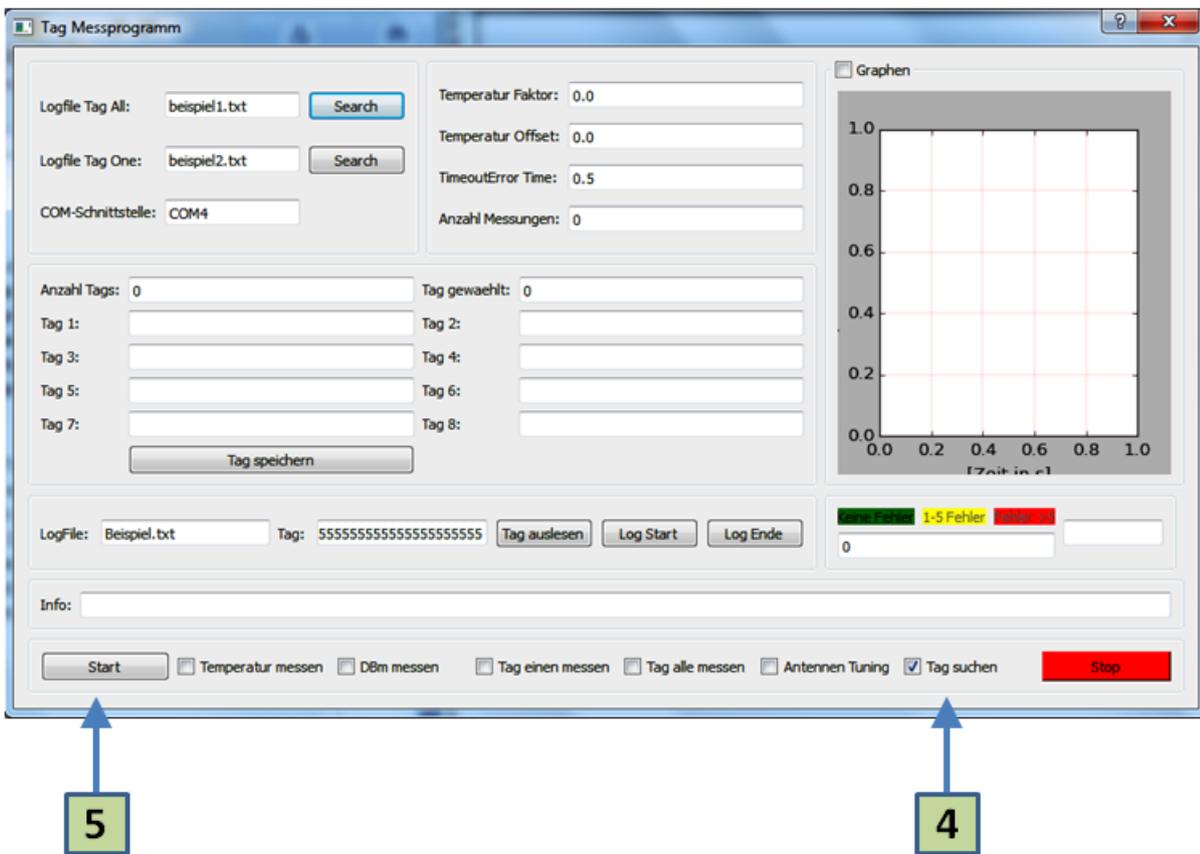


Bild 7.3 Beispiel 1, Einstellen der Schnittstelle und Antennentuning

Schritt 4: Die Checkbox „Tag suchen“ betätigen

Schritt 5: Dem Vorgang mit den Button „Start“ starten

→ Das Programm sucht nach Transpondern im Empfangsbereich



**Bild 7.4 Beispiel 1, Suchen der Transponder**

Schritt 6: Die Checkbox „Tag einen messen“ betätigen

Schritt 7: Die Checkbox „DBm messen“ betätigen

Schritt 8: Die Checkbox „Temperatur messen“ bestätigen

Schritt 9: Transponder 1 auswählen indem „1“ im Feld „Tag gewählt“ eingetragen wird

Schritt 10: Die Bezeichnung der Messdatei „Messungstest.txt“ eingeben

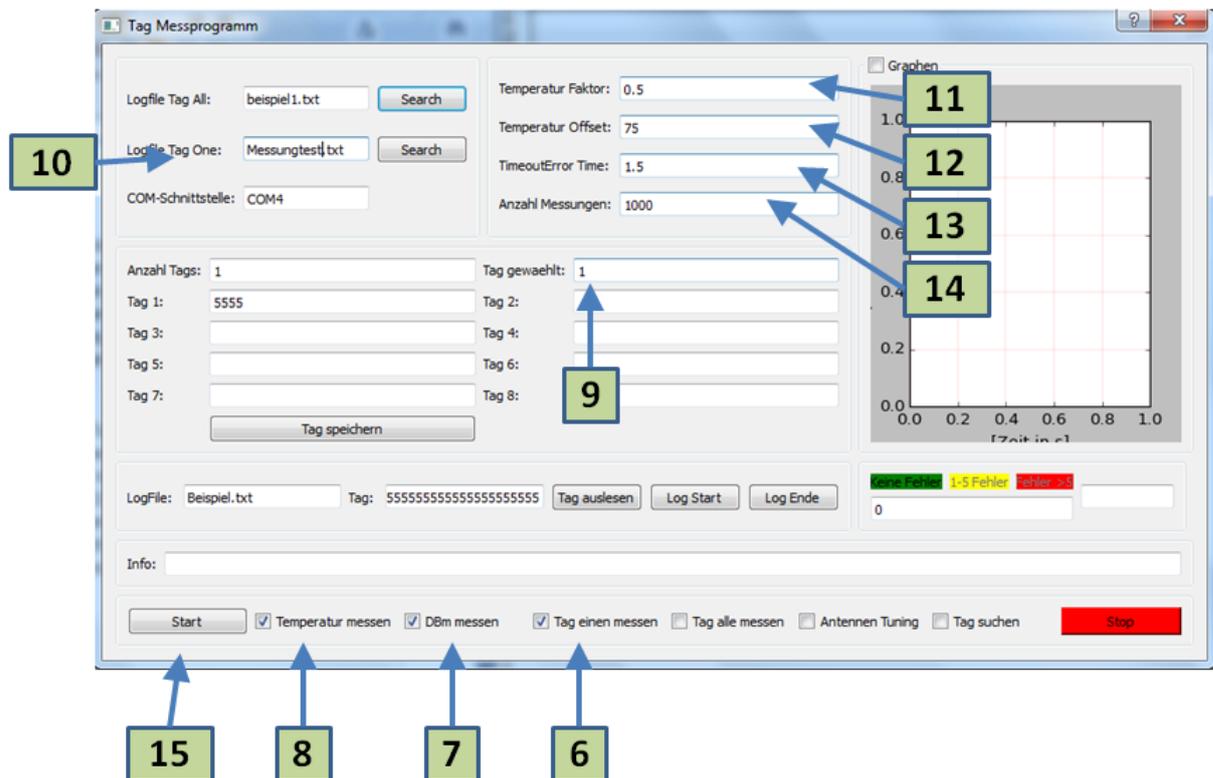
Schritt 11: Den Temperaturfaktor von „0,5“ einstellen

Schritt 12: Den Temperaturoffset von „75“ einstellen

Schritt 13: Den Timeout-Error auf „1500“ ms einstellen

Schritt 14: Die Anzahl der Messungen auf „1000“ setzen

Schritt 15: Das Programm mit den Button „Start“ starten



**Bild 7.5 Beispiel 1, Vollständige Einstellungen**

### Beispiel 2: Alle gefundenen Transponder messen

In diesem Beispiel soll die Temperatur aller gefundenen Transponder gemessen werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Transponder schon gesucht worden sind (siehe Beispiel 1). Die COM Schnittstelle hat den Namen COM4. Der Temperaturfaktor ist in diesem Fall 0,6 und der Temperaturoffset hat einen Wert von 20 K. Das Logfile trägt den Name „test.txt“. Die Anzahl der Messungen soll unendlich sein und nur durch Eingabe des Bedieners gestoppt werden können. Desweiteren soll die Timeout Error Zeit 2000 ms betragen.

Schritt 1: Die Checkbox „Tag alle messen“ anklicken

Schritt 2: Die Checkbox „Temperatur messen“ anklicken

Schritt 3: Die korrekte COM Schnittstelle „COM4“ ist von der Suche bereits eingestellt

Schritt 4: Die Messdatei „test.txt“ eingeben

Schritt 5: Den Temperaturfaktor von „0,6“ einstellen

Schritt 6: Den Temperaturoffset von „20“ K einstellen

Schritt 7: Den Timeout-Error auf „2000“ ms setzen

Schritt 8. Die Anzahl der Messungen mit „inf“ auf unendlich einstellen

Schritt 9: Das Programm mit den Button „Start“ starten

Schritt 10: Nach ausreichend vielen Messungen mit dem Button „Stop“ beenden

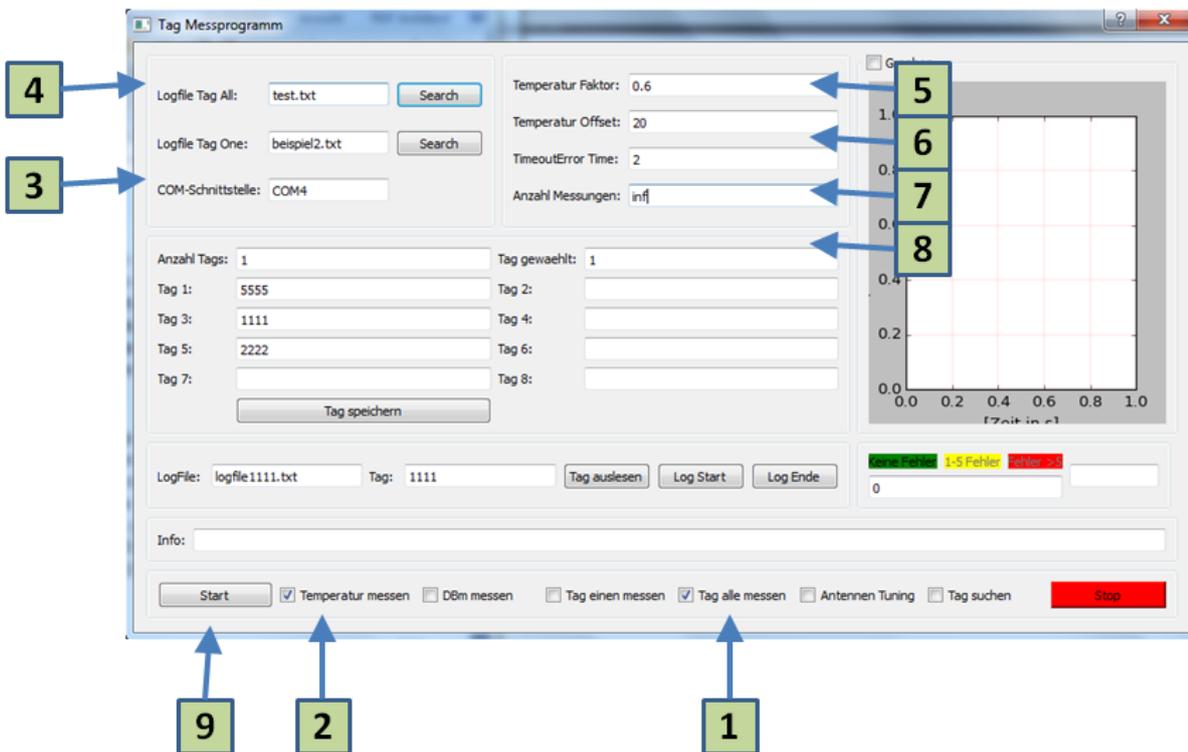


Bild 7.6 Beispiel 2, Messung mit mehreren Transpondern

## 7.5 Messprotokolle und Daten

### 7.5.1 Daten der Untersuchung des piezoresistiven Foliensensors für die Chipmodulin- tegration, vgl. Abbildung 4-19, Seite 19

<b>Gewicht in g</b>	<i>Durchmesser in mm</i>		<i>Fläche in mm<sup>2</sup></i>	
	<b>Nr. 1 in MΩ</b>	<b>Nr. 2 in MΩ</b>	<b>Druck in N/mm<sup>2</sup></b>	<b>MW</b>
	4,4		60,8212	
20,00	55,00	58,00	0,0032	56,50
50,00	21,00	24,00	0,0081	22,50
100,00	14,00	17,00	0,0161	15,50
200,00	8,00	5,00	0,0323	6,50
500,00	2,90	3,00	0,0806	2,95

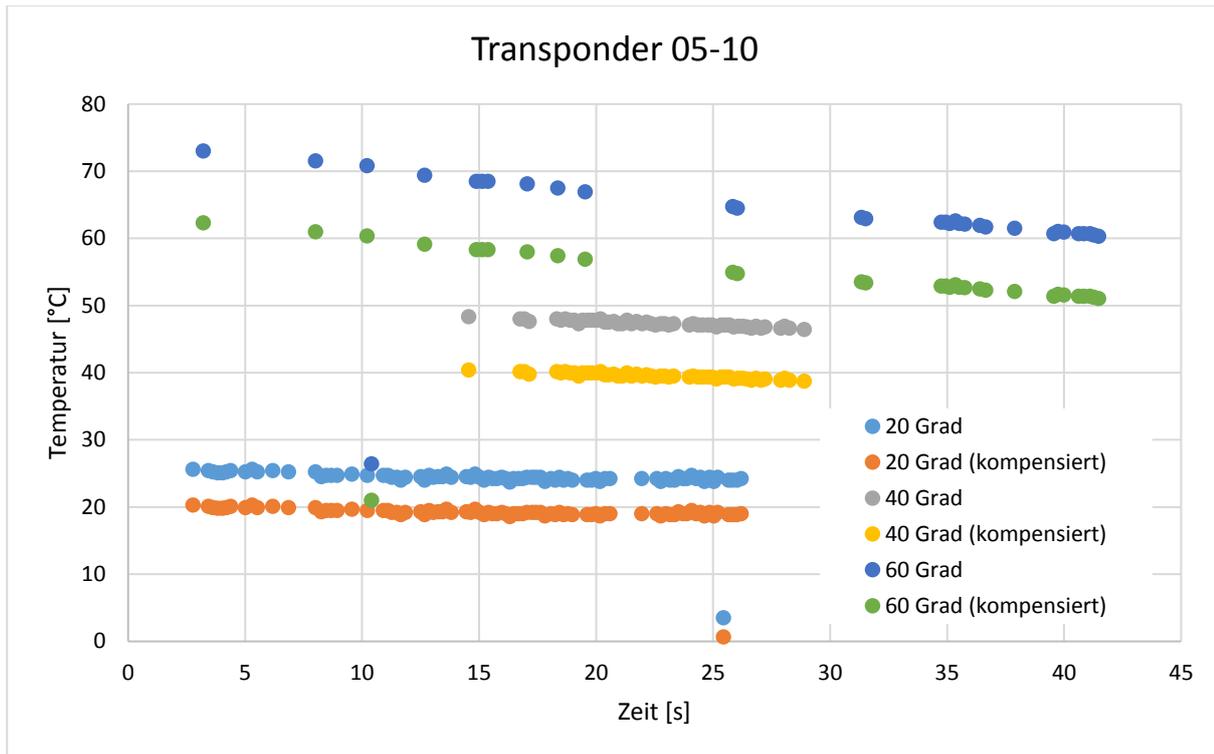
<b>Gewicht in g</b>	<i>Durchmesser in mm</i>		<i>Fläche in mm<sup>2</sup></i>	
	<b>Nr. 1 in MΩ</b>	<b>Nr. 2 in MΩ</b>	<b>Druck in N/mm<sup>2</sup></b>	<b>MW</b>
	4,8		72,3823	
20,00	80,00	71,00	0,0027	75,50
50,00	37,00	31,00	0,0068	34,00
100,00	14,76	13,00	0,0136	13,88
200,00	3,50	2,00	0,0271	2,75
500,00	0,96	1,20	0,0678	1,08

<b>Gewicht in g</b>	<i>Durchmesser in mm</i>		<i>Fläche in mm<sup>2</sup></i>	
	<b>Nr. 1 in MΩ</b>	<b>Nr. 2 in MΩ</b>	<b>Druck in N/mm<sup>2</sup></b>	<b>MW</b>
	5,2		84,9487	
20,00	60,70	71,70	0,0023	66,20
50,00	23,00	27,00	0,0058	25,00
100,00	15,00	14,00	0,0115	14,50
200,00	6,00	3,80	0,0231	4,90
500,00	2,00	1,54	0,0577	1,77

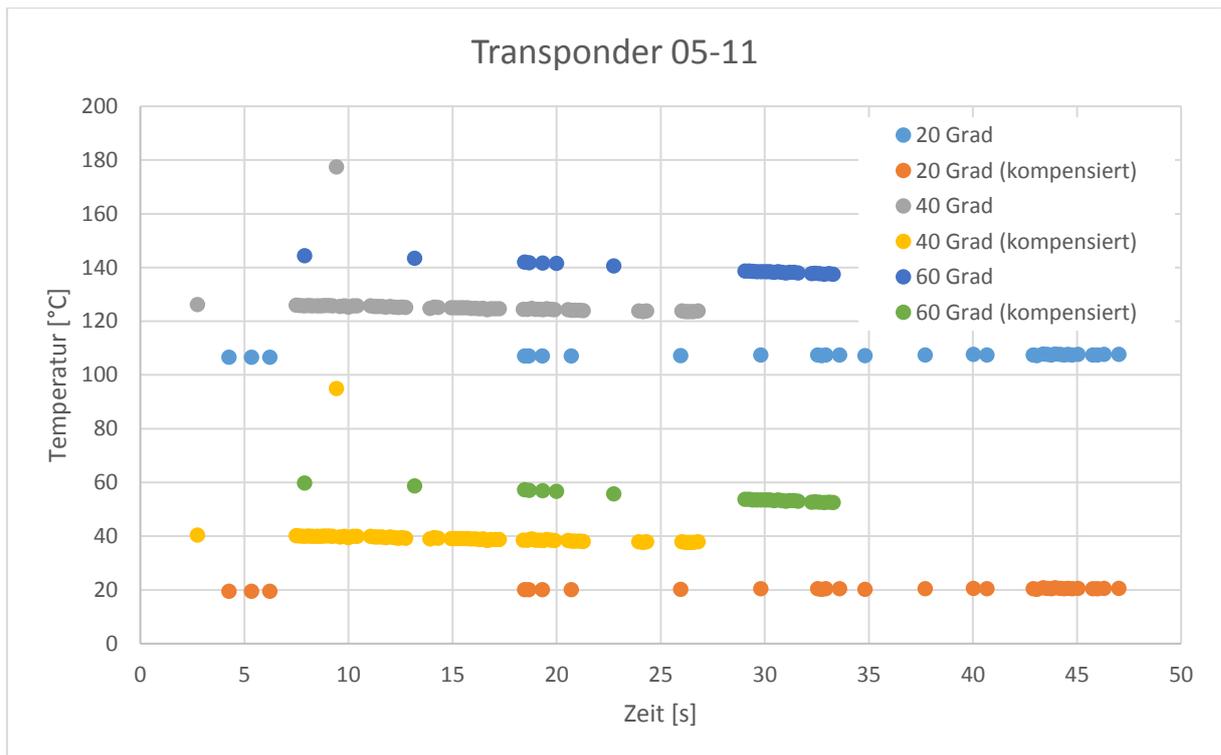
### 7.5.2 Temperaturmessungen mit mehreren Gewebetranspondern

Die Messreihe mit 60° C Solltemperatur weichen aufgrund der Versuchsanordnung (siehe Abbildung 4-12, Seite 14) bei fortlaufender Messdauer deutlich ab, da eine Messung der Gewebetransponder aufgrund der elektromagnetischen Störungen in ofeninneren nur mit geöffneter Ofentür möglich war.

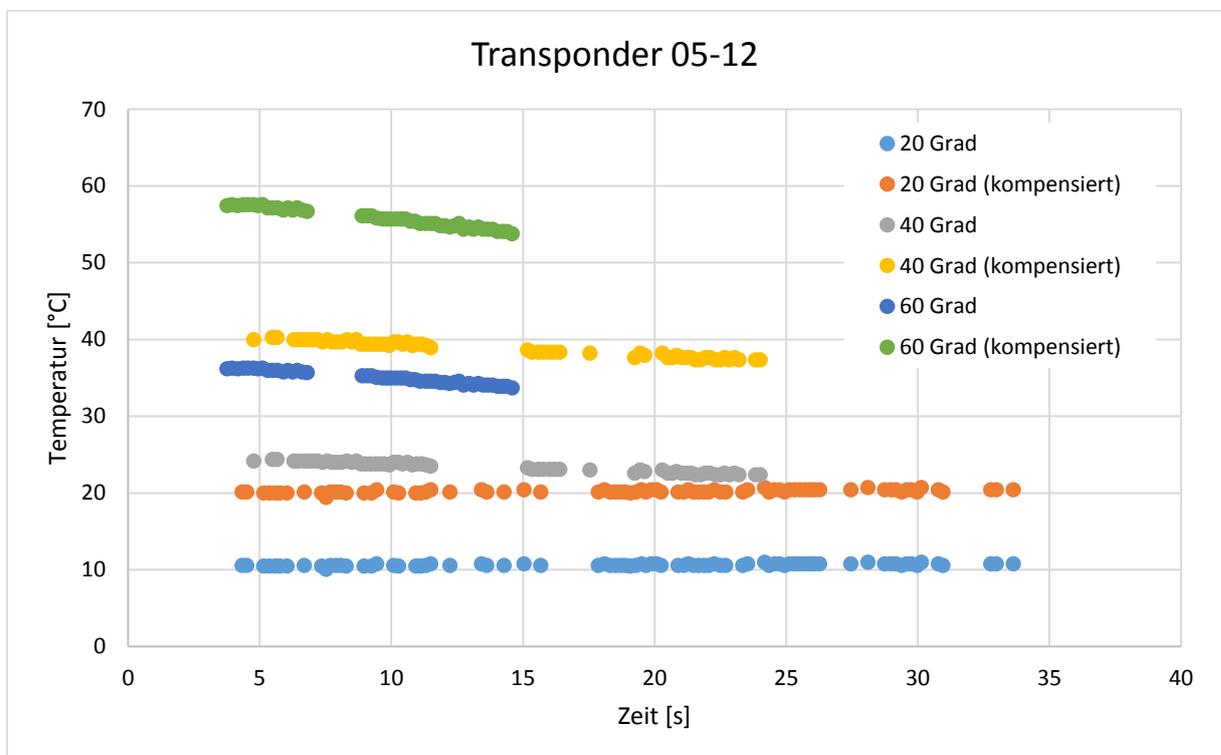
Die Kompensation der Messwerte wurde unter Berücksichtigung der Umgebungseinflüsse lediglich anhand der Messreihen für 20 und 40 Grad Celsius und für eine Stichprobe der ersten 10 Messwerte berechnet.



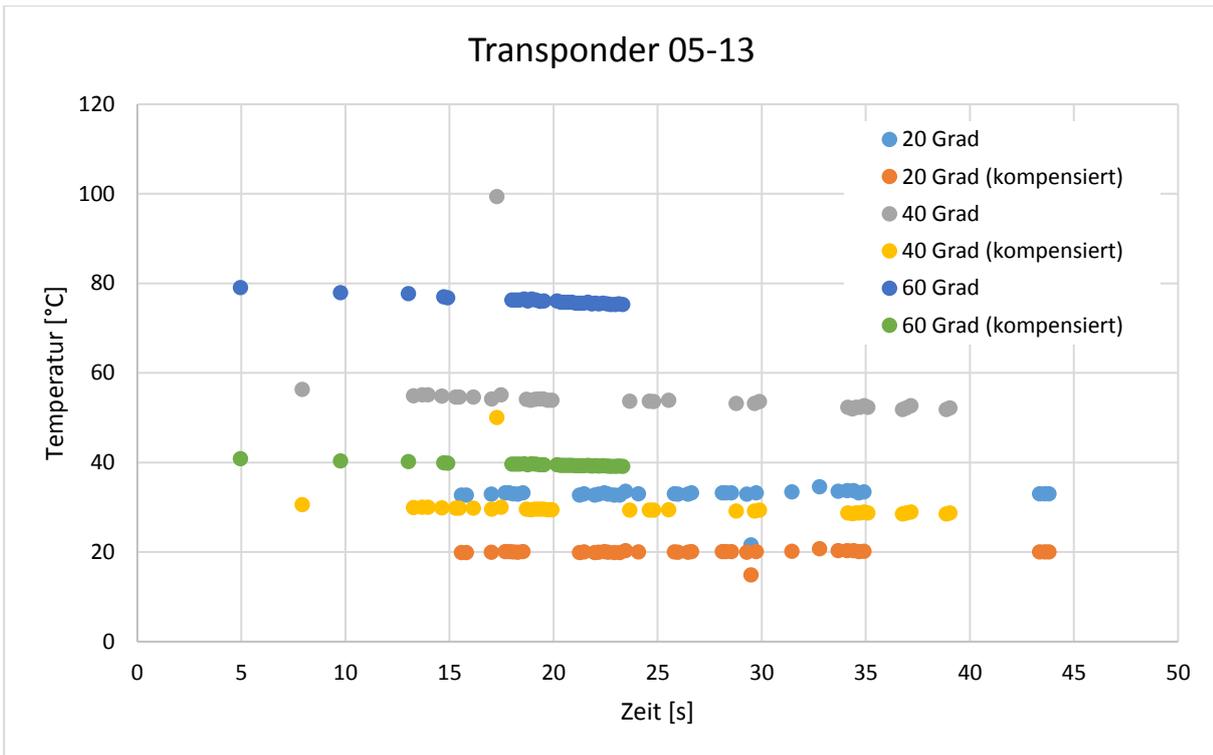
**Abbildung 7-1:** Temperaturmessreihe (20; 40; 60° C) für Gewebetransponder 05-10 (Typ 1) mit linearkompensierten Messwerten



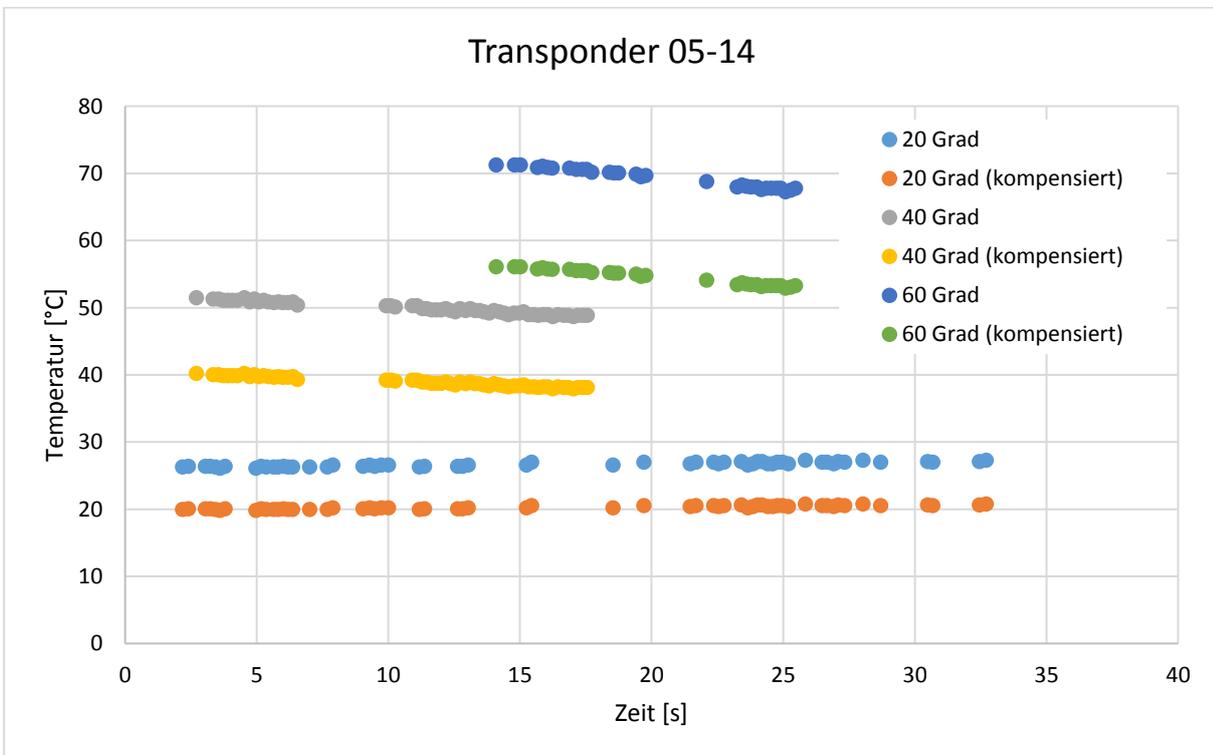
**Abbildung 7-2:** Temperaturmessreihe (20; 40; 60°C) für Gewebetransponder 05-11 (Typ 1) mit linearkompensierten Messwerten



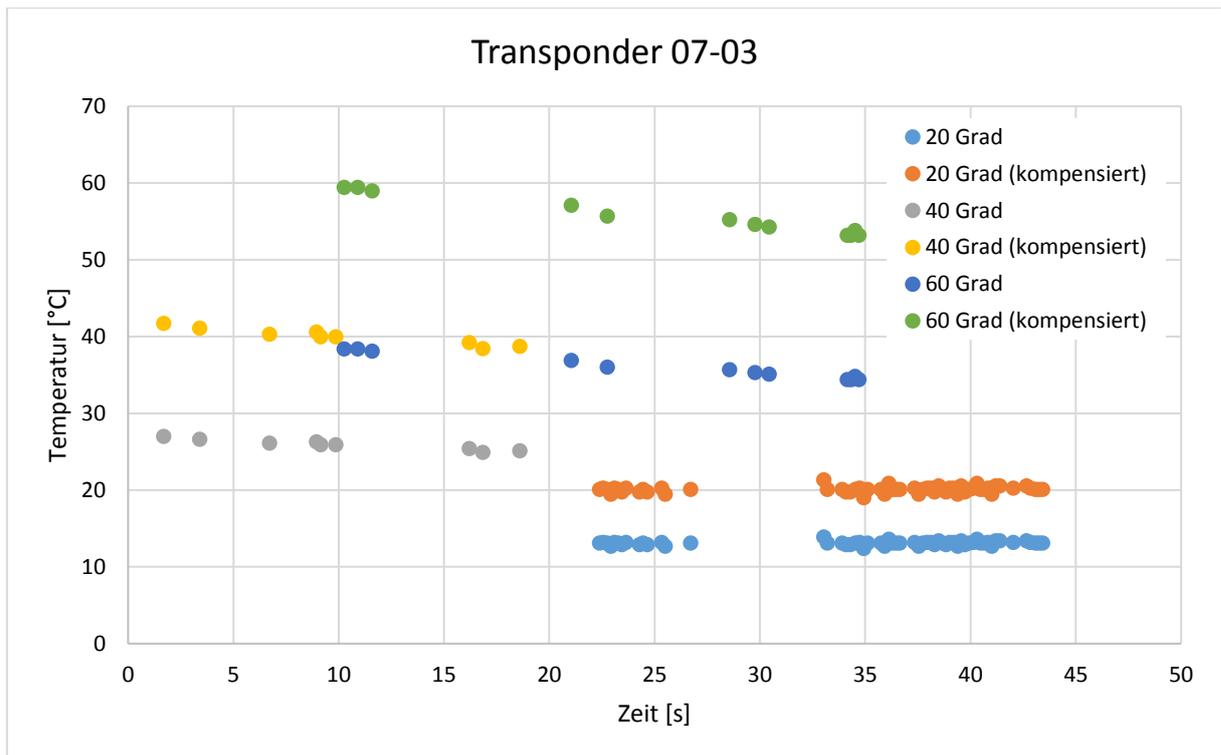
**Abbildung 7-3:** Temperaturmessreihe (20; 40; 60°C) für Gewebetransponder 05-12 (Typ 1) mit linearkompensierten Messwerten



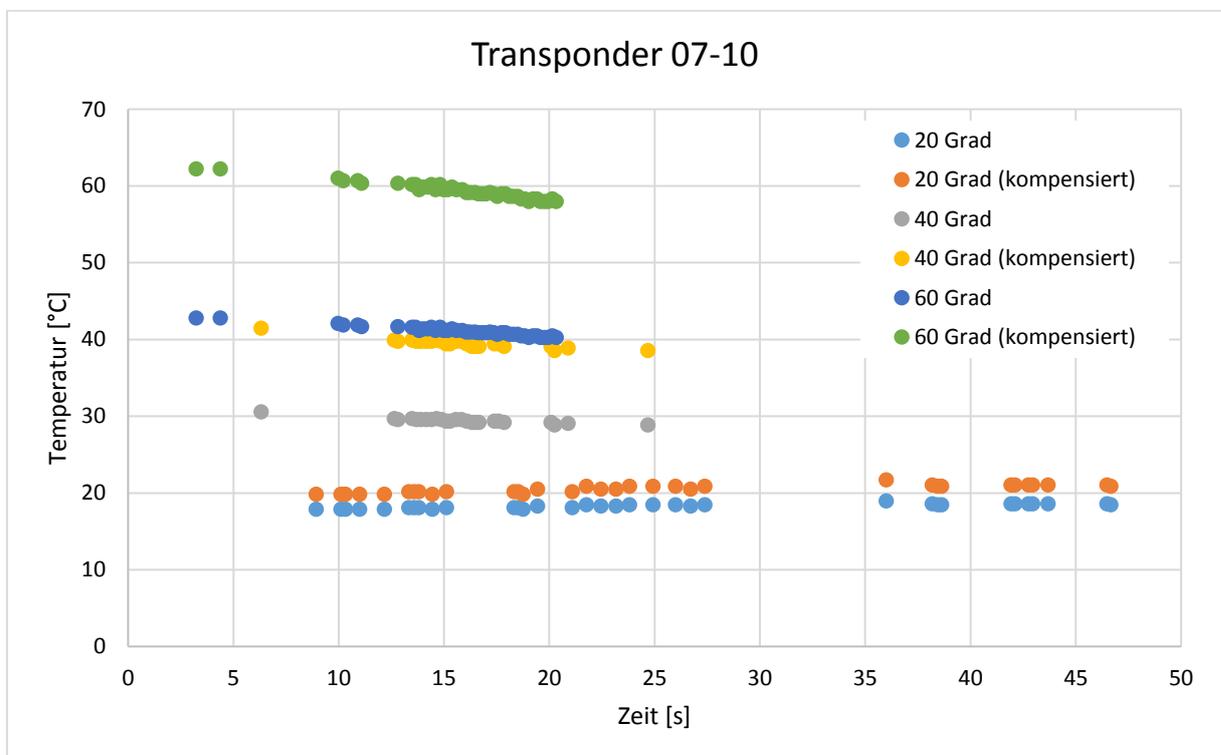
**Abbildung 7-4:** Temperaturmessreihe (20; 40; 60°C) für Gewebetransponder 05-13 (Typ 1) mit linearkompensierten Messwerten



**Abbildung 7-5:** Temperaturmessreihe (20; 40; 60°C) für Gewebetransponder 05-14 (Typ 1) mit linearkompensierten Messwerten

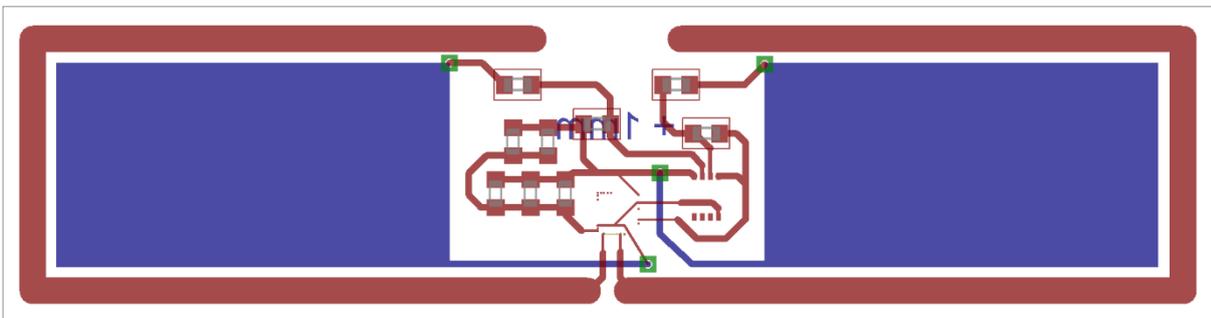
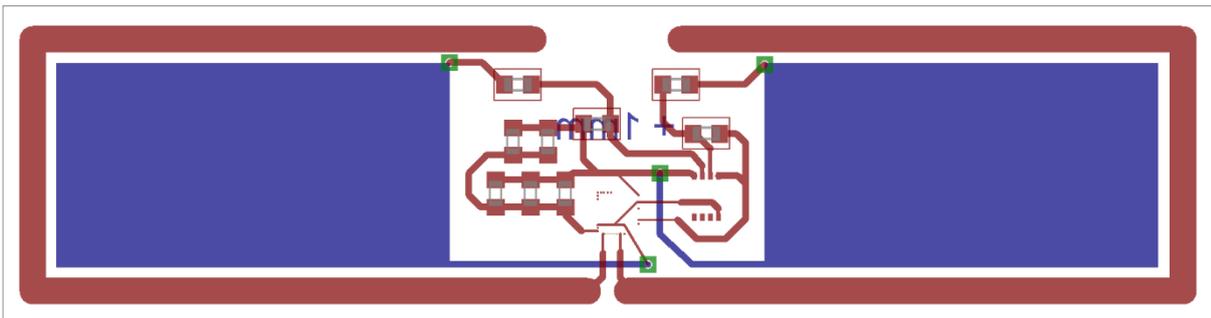
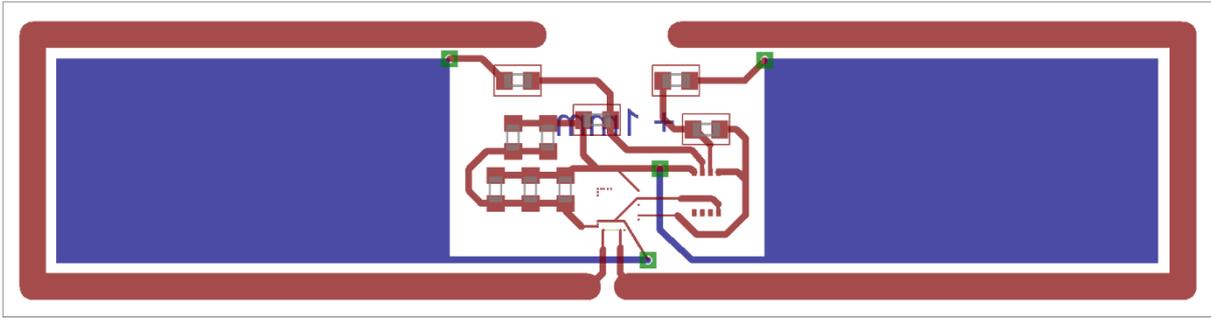


**Abbildung 7-6: Temperaturmessreihe (20; 40; 60°C) für Gewebetransponder 07-03 (Typ 3) mit linearkompensierten Messwerten**

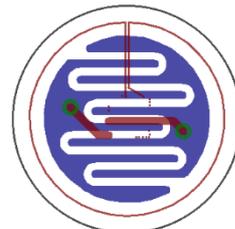
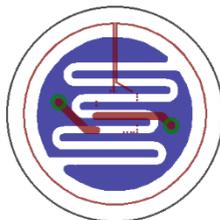
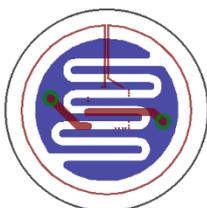


**Abbildung 7-7: Temperaturmessreihe (20; 40; 60°C) für Gewebetransponder 07-10 (Typ 3) mit linearkompensierten Messwerten**

## 7.6 Schaltungslayouts



**Abbildung 7-8:** Layout der Versuchstransponder in Platinenbauweise mit drei Variationen der Antennenlängen



**Abbildung 7-9:** Layout der Chipmodule für die Vorversuche mit drei Variationen des Antennenloops und Kapazität durch parallele Zuleitungen

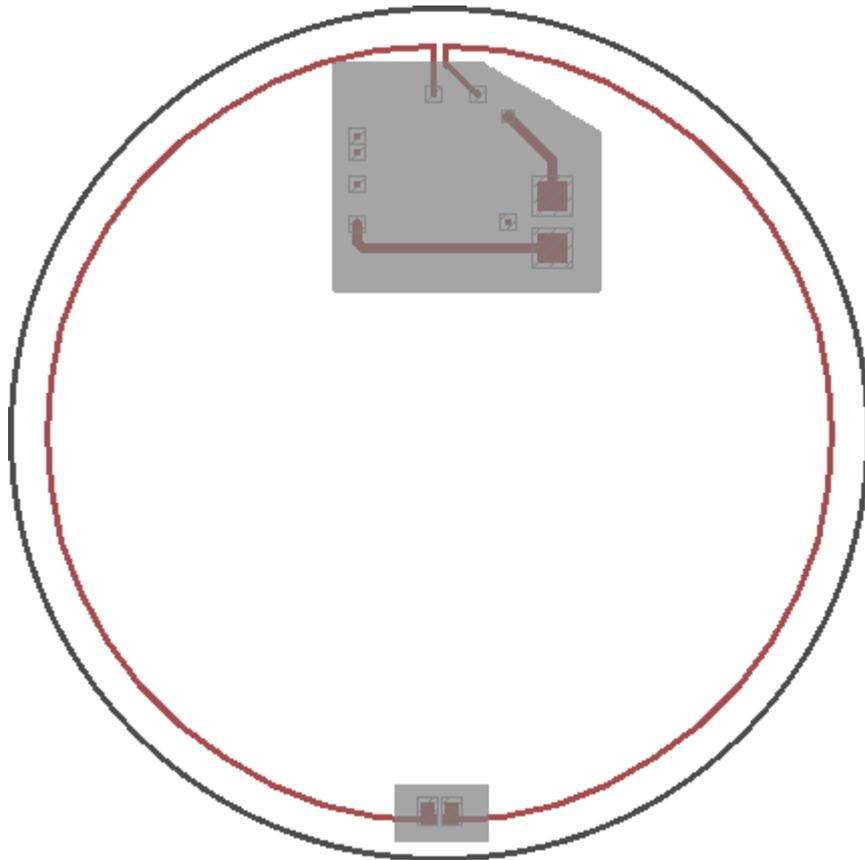


Abbildung 7-10: Finales Chipmodul Typ 1

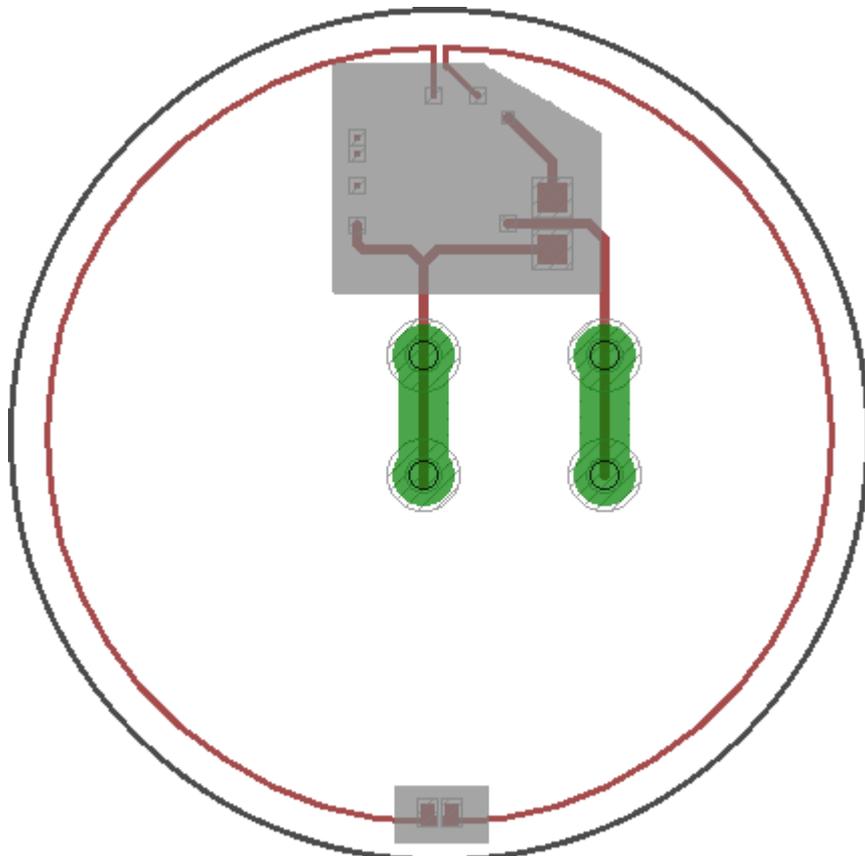


Abbildung 7-11: Finales Chipmodul Typ 2

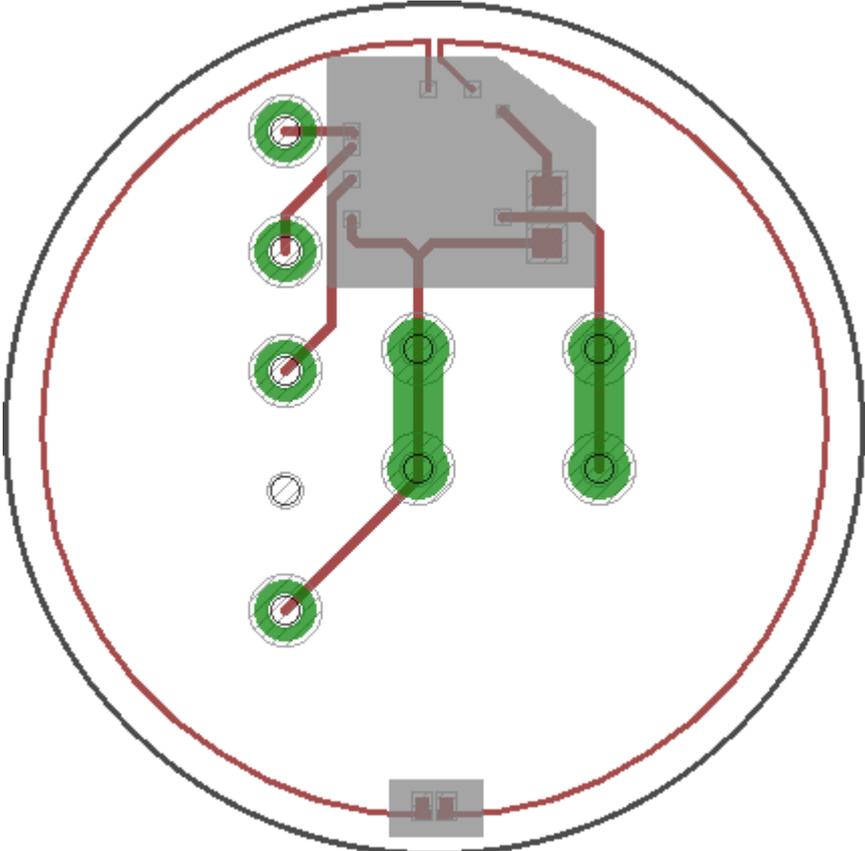
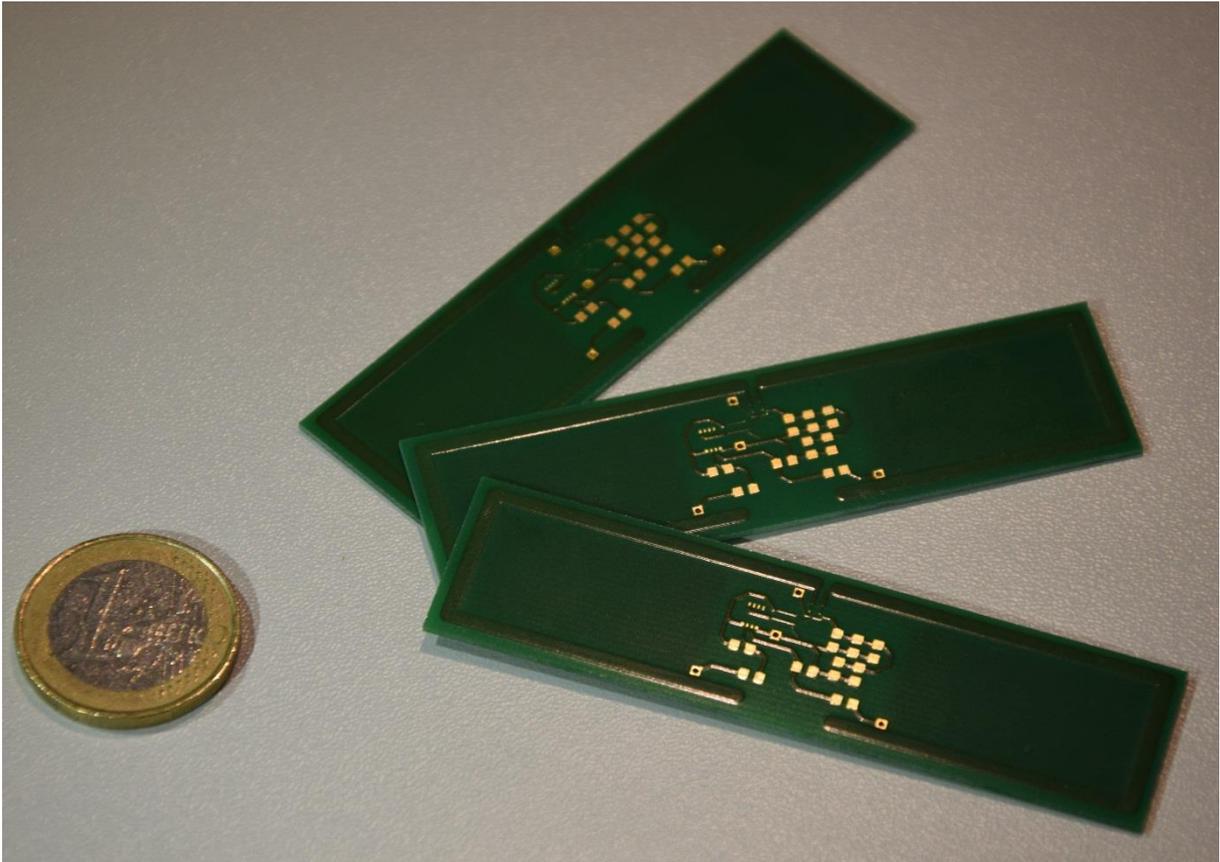
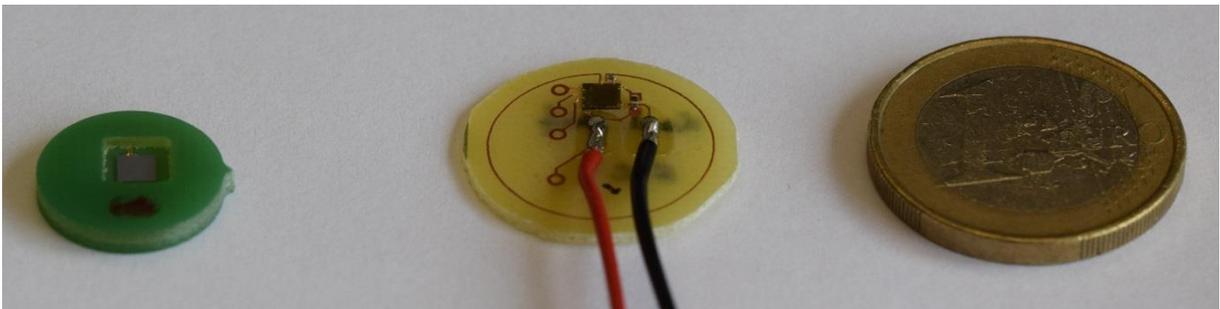


Abbildung 7-12: Finales Chipmodul Typ 3

## 7.7 Größenvergleich der fertig gestellten Platinentransponder und Chipmodule

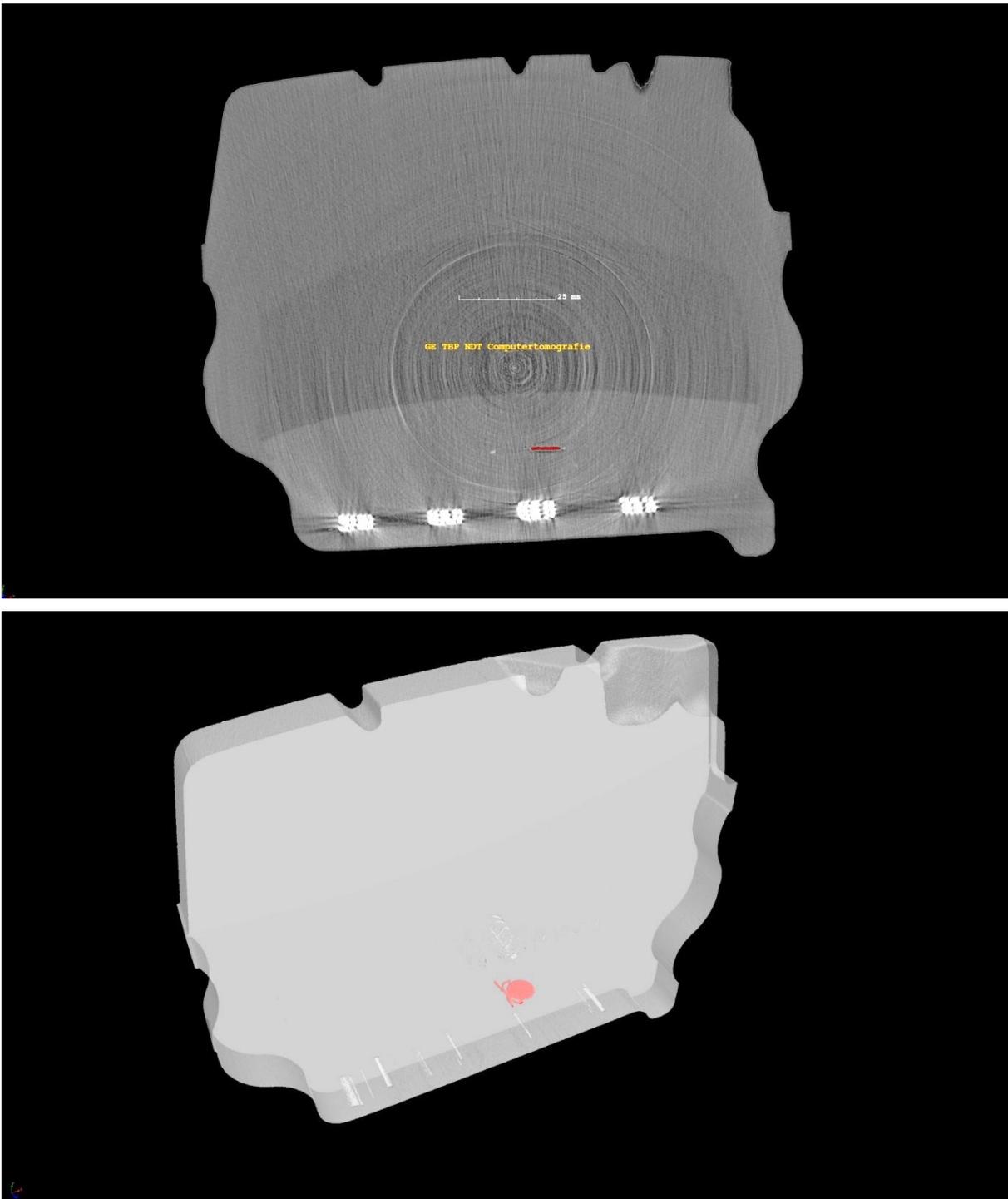


**Abbildung 7-13** Unbestückte Platinentransponder mit Layout für Operationsverstärkerschaltung und laserstrukturierte Dehnungsmessstreifen

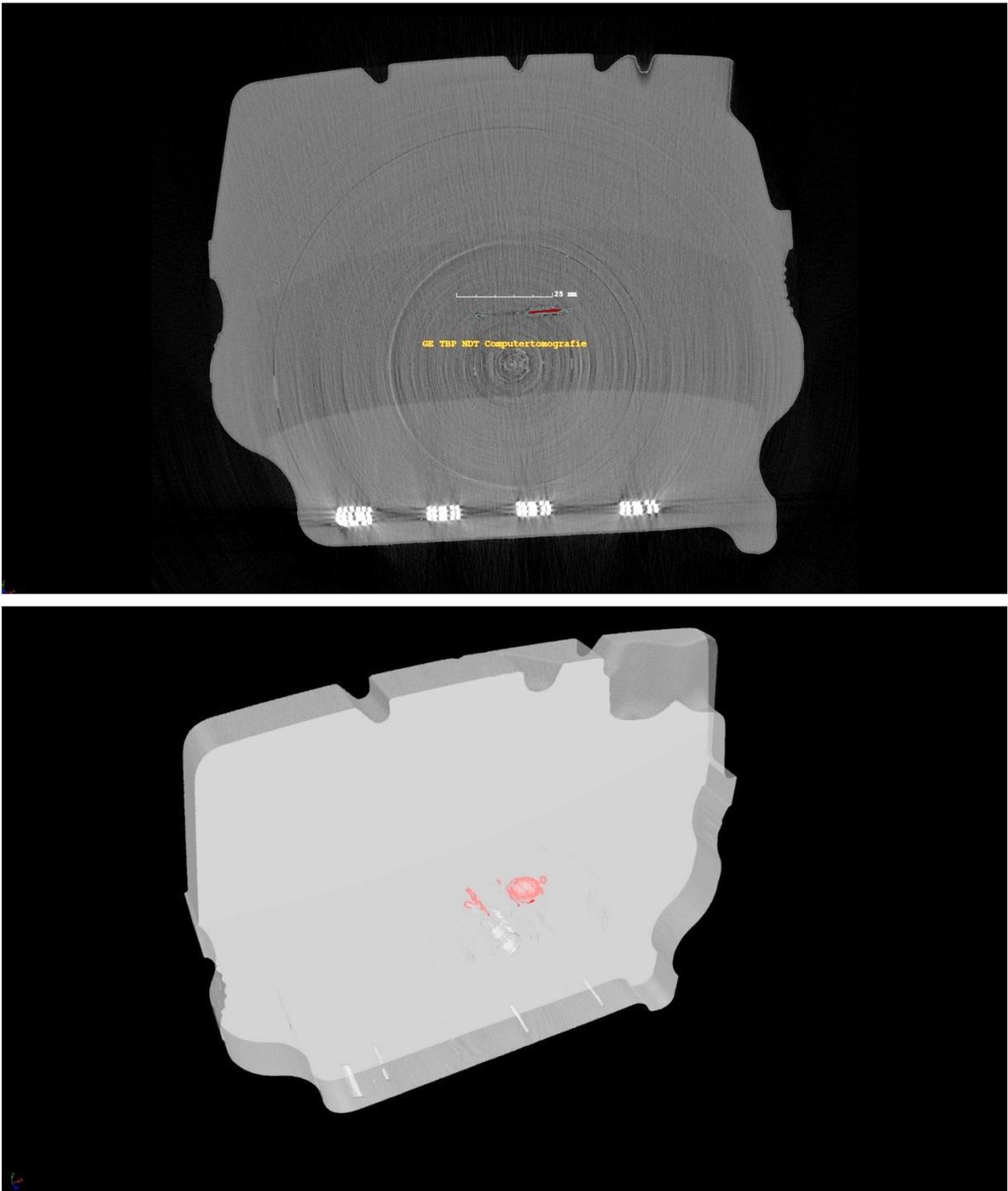


**Abbildung 7-14** Links: kompaktes Chipmodul ohne Belastungssensor und mit fehlender galvanischer Trennung der Spulenantenne, Mitte: Zwischenstand mit galvanischer Trennung und Anschlüssen für Belastungssensor und externe Spannungsversorgung

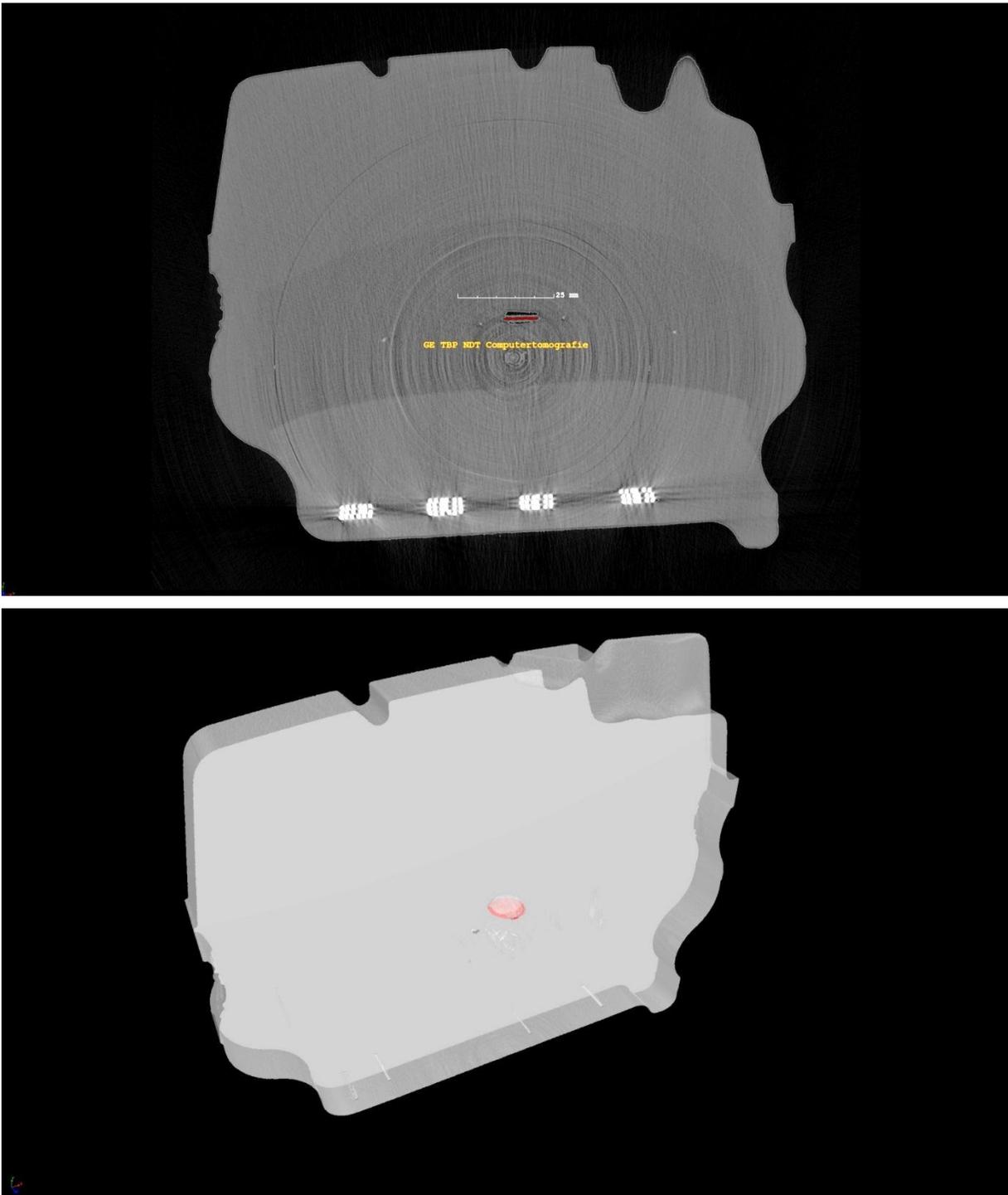
**7.8 CT-Aufnahmen von Integrations- und Belastungsversuchen mit Gewebetranspondern in unterschiedlichen Reifenlagen und Transponderausrichtungen**



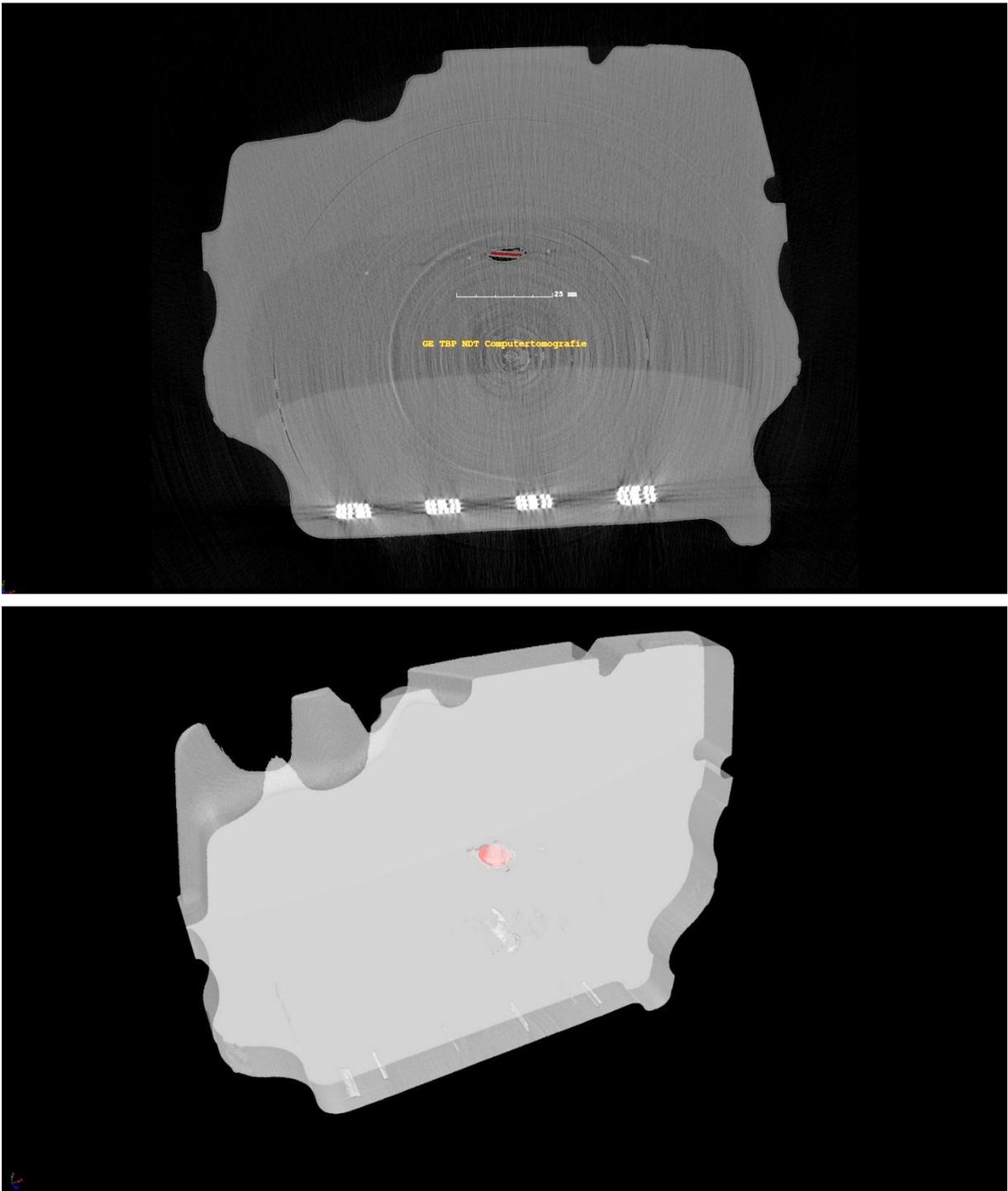
**Abbildung 7-15 Standard-Gewebetransponder längs zur Laufrichtung in der Bodenschicht des Reifens**



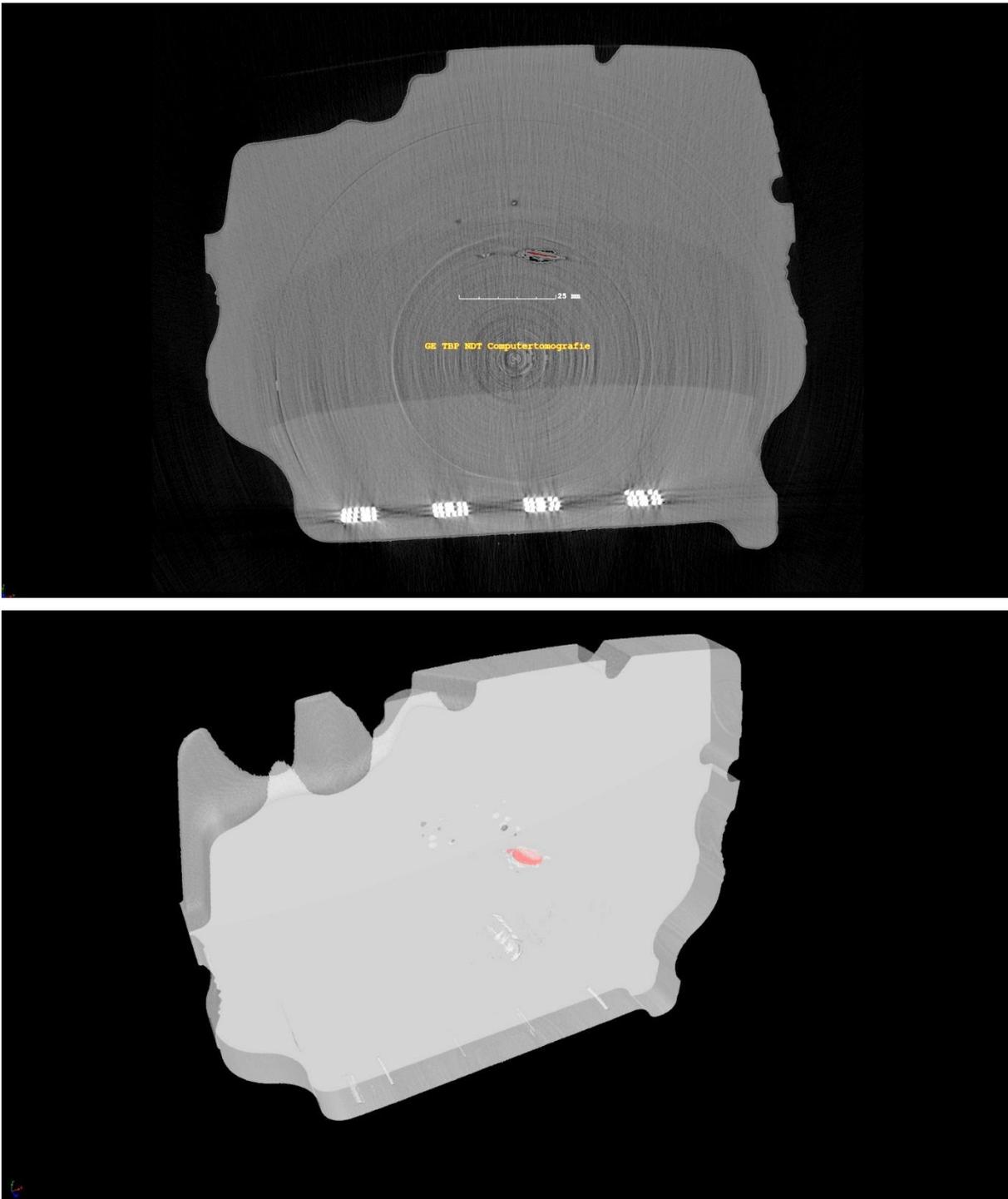
**Abbildung 7-16 Standard-Gewebetransponder längs zur Laufrichtung im Zentrum der Zwischenschicht des Reifens**



**Abbildung 7-17 Standard-Gewebetransponder quer zur Laufrichtung im Zentrum der Zwischenschicht des Reifens**



**Abbildung 7-18** Standard-Gewebetransponder quer zur Laufrichtung im oberen Bereich der Zwischenschicht des Reifens



**Abbildung 7-19 Standard-Gewebetransponder längs zur Laufrichtung im oberen Bereich der Zwischenschicht des Reifens**