



Sensorsystem zur autonomen Fahrbahn-  
zustandserkennung (SEEROAD)

## Schlussbericht

Teilvorhabenbezeichnung:

„Elektrodenstrukturen, Sensorelektronik und Sensorintegration“

Förderkennzeichen:

19A16016A

Laufzeit:

1. März 2017 – 29. Februar 2020



HELLA Fahrzeugkomponenten GmbH

Dr. rer. nat. Bastian Kanning

Dortmunder Str. 5

28199 Bremen

Tel.: +49 421 5951 37656

Fax: +49 421 5951 4678

bastian.kanning@hella.de

<http://www.hella.com>



# Inhaltsverzeichnis

<b>Teil 1 - Kurzdarstellung .....</b>	<b>4</b>
<b>1 Aufgabenstellung .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....</b>	<b>5</b>
<b>3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....</b>	<b>6</b>
<b>4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....</b>	<b>6</b>
<b>5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....</b>	<b>7</b>
<b>Teil 2 - Eingehende Darstellung .....</b>	<b>8</b>
<b>1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse .....</b>	<b>8</b>
1.1 Technisch-organisatorische Arbeitsinhalte .....	8
1.2 Elektrodenstrukturen .....	10
1.3 Sensorelektronik .....	14
1.3.1 Spritzwassersensoren.....	14
1.3.2 Radar .....	18
1.3.3 Verbundsystem .....	23
1.3.4 Fazit .....	27
1.4 Systemintegration .....	30
1.4.1 Versuchsträger .....	30
1.4.2 Applikation .....	32
1.4.3 Prüfstandtests und Fahrerprobung.....	38
1.5 Zusammenfassung.....	40
<b>2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....</b>	<b>41</b>
<b>3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....</b>	<b>42</b>
<b>4 Verwertbarkeit der Ergebnisse .....</b>	<b>42</b>
4.1 Wissenschaftliche Veröffentlichungen .....	42
<b>Literatur .....</b>	<b>43</b>

# Teil 1 - Kurzdarstellung

## 1 Aufgabenstellung

In dem 2015 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) ausgeschriebenem Fördervorhaben „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ sollen innovative Fahrzeugsysteme erforscht werden. Den Schwerpunkt dieses Vorhabens bildet das hoch- und vollautomatisierte Fahren für anspruchsvolle Fahrsituationen. Anspruchsvoll bedeutete in diesem Zusammenhang, dass Haftreibung bzw. Kraftschluss zwischen Fahrbahn und Reifen eines Fahrzeugs witterungsbedingt eingeschränkt sind. Im Verbundprojekt „Sensorsystem zur autonomen Fahrbahnzustandserkennung“ (SEEROAD) bestand die Hauptaufgabe in der Entwicklung eines Sensorsystems zur automatischen Klassifikation der witterungsbedingten Zwischenschicht zwischen Reifen und Fahrbahn, bei der es sich um flüssiges Wasser, Schnee oder Eis handeln kann. Die Aufgabe bestand darin, vorhandene Umfeldsensorik des Fahrzeugs, um innovative Messprinzipien zu ergänzen. Als notwendige Bestandteile eines solchen Systems wurden vom Konsortium neben der Sensorik auch die Signalverarbeitung und -auswertung in einem zentralen Steuergerät entwickelt, und ein beispielhaftes Einsatzszenario sowie die Auswirkung der Verbreitung des Systems im Straßenverkehr untersucht.

In zukünftigen Fahrzeugen wird ein solches System Fahrer oder Assistenzsysteme auf signifikante Änderungen des vorliegenden Reibwertes hinweisen. Insbesondere im hochautomatisierten Fahrbetrieb ist eine sichere Bahnführung nur dann gewährleistet, wenn dem Fahrzeug die fahrdynamischen Grenzen bekannt sind. Eine autonome Fahrbahnzustandserkennung dient einerseits dem Insassenschutz, kann aber ebenfalls als Schlüsseltechnologie betrachtet werden, wenn es um die Automatisierung hochdynamischer Manöver, wie z.B. einem Überholvorgang bei 130 km/h geht.

Im Teilprojekt „Elektrodenstrukturen, Sensorelektronik und Sensorintegration“ der HELLA Fahrzeugkomponenten GmbH (HFK) liegen die Schwerpunkte in der Konzeption, Auslegung und Realisierung der Sensorelektronik sowie der Entwicklung und Implementierung der zugehörigen Sensorsoftware. Des Weiteren übernimmt HFK anteilig die Vernetzung der Sensorkomponenten in das seriellen Bussystem des Fahrzeuges, sowie Erprobungen von Komponenten und System. Explizit ausgeschlossen wurden die Bestimmung der jeweiligen Zustände von Reifen oder Fahrbahnbelag (der sog. Deckschicht), sowie die Erfassung des Fahrzeugvorfeldes, wie es z.B. durch Frontkameras geschieht.

## 2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt SEEROAD mit dem Förderkennzeichen 19A16016 wurde im Zeitraum vom 01. März 2017 bis zum 29. Februar 2020 durchgeführt. Das Vorhaben wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) mit insgesamt 1.470.051,00 € gefördert. Die Aufteilung der Fördersumme auf die Teilprojekte bzw. Partner ist in Tabelle 1 dargestellt.

HELLA Fahrzeugkomponenten GmbH (HFK)	335.776,00 €
Intedis GmbH & Co. KG (Intedis)	166.139,00 €
Dr. Ing. h.c. F. Porsche Aktiengesellschaft (Porsche)	243.985,00 €
Universität Bremen, Institut für Theoretische Elektrotechnik und Mikroelektronik (ITEM)	603.125,00 €
Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Mechatronik (IMECH)	121.026,00 €

Tabelle 1: Übersicht über die Verteilung der Fördersummen.

Das Konsortium deckt mit seinen jeweiligen Geschäftsfeldern bzw. Tätigkeitsbereichen die Aufgaben innerhalb von SEEROAD ab. In den 2 öffentlich geförderten Verbundprojekten „KESS“ und „TraZu“ (BMBF bzw. BMWi) wurden vom Institut für Theoretische Elektrotechnik und Mikroelektronik der Universität Bremen (ITEM) und HFK Grundlagen der Körperschallsensorik in verschiedenen Anwendungsfeldern entwickelt. Sowohl die technischen Ergebnisse dieser Projekte als auch die etablierte Kooperation der Partner ITEM und HFK wirkten sich vorteilhaft auf die Ergebnisse von SEEROAD aus.

Der Partner Intedis GmbH & Co. KG (Intedis) greift auf Erfahrung bei der Softwareentwicklung zur Fahrdynamikregelung und Fahrzeugzustandsbeobachtung mit Hilfe der Fusion verschiedener Sensordaten und der Anwendung von Methoden des maschinellen Lernens zurück. Am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen (IMECH) wurden über Jahre numerische Modelle der Fahrzeugtechnik entwickelt und angewendet. Der Einsatz von Modellen bietet für ein Vorhaben wie SEEROAD den Vorteil, dass Handlungsstrategien in kritischen Situationen anhand von Simulationen getestet werden können. Vervollständigt wurde das Konsortium durch den Partner Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG (Porsche), der im Verbund die Sicht der Automobilhersteller und dessen Anforderungen repräsentiert.

### **3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Verbundprojekt SEEROAD wurde entsprechend der Gesamtvorhabenbeschreibung durchgeführt. Abweichungen innerhalb der Arbeitspakete wurden mit Konsortium und Projektträger abgestimmt und im Rahmen der Zwischenberichte dokumentiert. Es gab 3 Phasen zu je 12 Monaten. In der ersten Phase, der Systemkonzeption, wurden Grundsatzuntersuchungen zur Fahrbahnzustandserfassung durchgeführt und die Anforderungen an das System abgeleitet. In der zweiten Projektphase, der Systemrealisierung, wurden Teilsysteme im Fahrzeug getestet und optimiert. Bei der Systemerprobung in der dritten Phase wurde insbesondere an der Integration einer Telematikeinheit (Car2X) gearbeitet und das Gesamtsystem erprobt.

Um die Arbeitspakete zu dem Themengebiet Sensorik, Labor- und Fahrzeugversuche effektiv zu gestalten, wurde eine Regelkommunikation der Projektpartner HFK, Intedis und ITEM im dreiwöchigen Rhythmus durchgeführt. Hierbei konnten aktuelle Problemstellungen effizient angesprochen und abgearbeitet werden. Für die Absprache von größeren Arbeitsinhalten und die Planung von Versuchen und Messfahrten wurde in einem sechswöchigen Rhythmus ein Webmeeting mit allen Projektpartnern unter der Leitung von HFK durchgeführt. Zusätzlich wurde alle sechs Monate ein Konsortialtreffen durchgeführt, bei dem Vertreter aller Projektpartner anwesend waren. Bei diesen Treffen wurde der aktuelle Entwicklungsstand präsentiert, es wurde gemeinsam an Lösungskonzepten gearbeitet und gemeinsame Zwischenziele wurden geplant.

Die Planungen für das Projekt SEEROAD begannen im Frühjahr des Jahres 2016, damals noch unter einem anderen Akronym. Mitte 2016 erfolgte die Einreichung der Projektskizze sowie die Vorstellung beim Projektträger TÜV Rheinland GmbH. Im Herbst 2016 wurden die Gesamtvorhabenbeschreibung sowie die jeweiligen AZKs bzw. AZAs beim Projektträger eingereicht. Am 28. Februar 2017 erfolgte der Zuwendungsbescheid mit der Bewilligung der Projektmittel für den Zeitraum vom 01.03.2017 bis zum 29.02.2020.

### **4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Motiviert durch Entwicklungen hin zum hoch- und vollautomatisierten Fahren ist die Bestimmung der zu erwartenden Haftreibung im Automobilbereich ein aktives Feld der Untersuchung. Darunter fallen auch Methoden zur Fahrbahnzustandserkennung, wie sie im Projekt SEEROAD behandelt wurden. Neben stationären Systemen, die u. A. Luft- und Fahrbahntemperatur, Wind, oder Niederschlag messen werden mobile Systeme in Form von speziell ausgerüsteten Messfahrzeugen eingesetzt, um die Beschaffenheit von Fahrbahnen zu erfassen und zu bewerten. Der Stand der Technik in Bezug auf Sensorik, die als Teilsystem in PKW verbaut wird, beschränkt sich im Wesentlichen auf die Sensorik der Fahrwerksdynamik, insbesondere das Antiblockiersystem (ABS) und die Antischlupfregelung (ASR). Mit diesem System wird der Verlust des Kraftschlusses detektiert. Systeme oder Methoden zur aktiven Bestimmung der Zwischenschicht gehörten zu Beginn des Projektes nicht zum Stand der Technik. An dieser Stelle sei einerseits angemerkt, dass bei andauerndem Regen zumindest automatisch ausgeschlossen werden kann, dass die Fahrbahn trocken ist, wenn ein Regensensor verbaut ist.

Die Verwendung von vibroakustischen, kapazitiven und mikrowellenbasierten Messprinzipien ist in Form von Einzelsensorsystemen in verschiedenen Anwendungsgebieten bekannt. Kapazitive Sensorik zur Erkennung des Fahrbahnzustands im stationären Betrieb ist bereits kommerziell verfügbar und wird derzeit erfolgreich eingesetzt, siehe [1]. Dabei sind einzelne Sensoren in die Fahrbahn integriert und werden drahtlos über eine Wetterstation am Fahrbahnrand ausgewertet, siehe [2]. Die installierten Sensoren liefern hier wertvolle Informationen zu den Witterungsbedingungen und zum Fahrbahnzustand, die dann zentral gesammelt und bei Bedarf an Verkehrsteilnehmer durch einen Warnhinweis über digitale Straßenschilder oder über fahrzeugeigene Navigationssysteme übermittelt werden

Der Stand der Wissenschaft in Bezug auf die Bestimmung der Zwischenschicht umfasste zu Beginn des Projektes Untersuchungen zum Einsatz von Kameras, Mikrowellen und verschiedenen Emissionen des Rades in Richtung der Radhausschale, vgl. [3]. Das EU-Projekt *Friction* hatte das Ziel, den Fahrbahnzustand direkt zu erkennen, vgl. [4]. Dazu wurden eine Polarisationskamera und ein Laserscanner eingesetzt. Über die Analyse des von der Straße reflektierten wurde auf mögliche Gefahren durch Glätte geschlossen. Mittels eines Laserscanners wird versucht, Regentropfen oder Schneeflocken zu detektieren, siehe [4, 5].

Im BMBF-geförderten Projekt "Konfigurierbares elektronisches Schadenidentifikationssystem" (KESS) wurde ein auf der Auswertung von Körperschallsignalen basierendes elektronisches Schadenidentifikationssystem für Kraftfahrzeuge entwickelt. Dieses System ermöglicht es, Bagatellschäden wie beispielsweise Dellen an Kraftfahrzeugen zu erkennen, zu klassifizieren und räumlich zuzuordnen. Die Schadenserfassung erfolgt über ein Sensornetzwerk, das den bei einem Schaden entstehenden charakteristischen Körperschall auswertet. Für die Klassifizierung der Beschädigung greift das System zudem auf aktuelle Umgebungsdaten zurück, wie z. B. die Geschwindigkeit oder den Status des Motors. Da das dabei entwickelte System modular aufgebaut ist kann es bei geeigneter Applikation für andere Anwendungen genutzt werden. Als weiteres Forschungsprojekt mit dem thematischen Schwerpunkt in der Vibroakustik ist das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Projekt "Elektronisches Zustandsüberwachungssystem zur vorbeugenden Wartung von Trailern" (TraZu) zu nennen. Darin wurde ein auf der Auswertung von akustischen Emissionen basierendes elektronisches Schadenfrüherkennungssystem für Trailer-Rahmen entwickelt. Dieses System ermöglicht es, Risse im Material der Rahmenstruktur aufgrund von zyklischer Belastung frühzeitig zu erkennen und gegebenenfalls das Flottenmanagement oder den Fahrer auf die drohende Gefahr aufmerksam zu machen. In beiden Projekten konnte HFK zusammen mit dem Partner ITEM Erfahrungen bei dem Einsatz von vibroakustischen Sensoren in Automobilen sammeln.

## **5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Neben der Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern gab es keine Kooperation mit anderen Stellen im Sinne einer Beauftragung.

# Teil 2 - Eingehende Darstellung

## 1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

### 1.1 Technisch-organisatorische Arbeitsinhalte

Das Teilprojekt „Elektrodenstrukturen, Sensorelektronik und Sensorintegration“ des Verbundprojekts SEEROAD wurde gemäß Projektplanung durchgeführt. Kleinere Abweichungen gegenüber der Planung in der Antragsphase ergaben sich bei der Zuständigkeit bzgl. der Grundsatzuntersuchungen der Mikrowellensensorik. Hier wurden in Abstimmung mit dem Projektträger Aufgabenpakete der Radar Sensorik wurden vom Partner Intedis bearbeitet, und Aufgabenpakete der kapazitiven und infrarot Sensorik vom Partner ITEM bearbeitet. Zusätzlich konnte die Vergabe von Aufgabenpaketen im Zusammenhang mit der Mikrowellenbasierten Sensorik (kapazitiv und Radar) an Unterauftragnehmer nicht wie geplant durchgeführt werden. Die geplante Kooperation mit dem Unterauftragnehmer HS42 GmbH zur Entwicklung des kapazitiven Sensors wurde nicht wie geplant gestartet. Die Anforderungen an das System konnten in der frühen Phase des Projektes nicht konkret genug formuliert werden, um an das Team von HS42 GmbH mit ausreichend hoher Zuversichtlichkeit bzgl. des Erfolges abgegeben werden zu können. Firma InnoSenT GmbH wurde innerhalb des Projektes mehrfach zur Klärung unterschiedlicher Fragestellungen konsultiert. Die geplante Vergabe eines Unterauftrages kam jedoch auch hier nicht zu Stande, da der benötigte Software Support durch InnoSenT GmbH nicht angeboten werden konnte.

Am 06. und 07. April 2017 wurde ein Kick-Off Meeting zum Projekt *SeeRoad* bei der HELLA Fahrzeugkomponenten GmbH (HFK) in Bremen abgehalten, bei dem Vertreter jedes Konsortialpartners und des Projektträgers anwesend waren. Dabei hat sich das Konsortium auf halbjährliche Face-to-Face Projekttreffen wurde ein Regeltermin für eine Telefonkonferenz aller Partner im 6 Wochen Takt beschlossen. Ein weiteres Regelmeeting zwischen den Partnern ITEM und HFK wurde im Juni 2017 eingeführt, und im Dezember 2017 um die Teilnahme des Partners Intedis GmbH (Intedis) erweitert. Die regelmäßige Durchführung dieser Meetings wurde über die Dauer des Projektes beibehalten. Des Weiteren wurde die bereits während der Antragsvorbereitung eingesetzte freie webbasierte Projektmanagementsoftware *Redmine* für den allgemeinen Datenaustausch und insbesondere für die Dokumentation und das Tracking des Projektfortschrittes in Form eines Ticketsystems verwendet. Der Zwischenstand der Entwicklung wurde am 06. Dezember 2018 bei der Fachtagung „Forschung



und Technologie für automatisiertes und vernetztes Fahren“ der Bundesministerien BMBF und BMWi vorgestellt.

Die inhaltlichen Schwerpunkte des Teilprojektes „Elektrodenstrukturen, Sensorelektronik und Sensorintegration“ sind rückblickend

- Konzeption und Umsetzung der Montage- und Verbaukonzepte für die Sensorsysteme bzw. Sensorframe in die Anbauteile bzw. Karosserie,
- Spezifikation und Auslegung der Sensorsignalaufbereitung,
- Konzeption, Auslegung und Realisierung von Sensorelektroniken und Integration in den Sensorframe,
- Konzeption der Softwarearchitektur für Steuereinheiten der Sensoren,
- Konzeption und Umsetzung der Vernetzung der Sensoren sowie Integration in das serielle Bussystem des Fahrzeuges,
- Realisierung vibroakustischer, kapazitiver und mikrowellenbasierter Funktionsprototypen für Labor-, Prüfstands- und Fahrzeugerprobung,
- Auslegung und Realisierung der Elektrik-Komponenten (Verkabelung, Stecker) zwischen Sensorik und Demonstratorsteuergerät sowie Integration in Energiemanagement des Fahrzeugbordnetzes,
- Konzeption und Entwicklung der Algorithmen zur Auswertung und Weiterverarbeitung der Sensorsignale,
- Software-technische Integration der Algorithmen zur Fahrbahnzustandserkennung in Sensor-Steuereinheiten,
- Test und Validierung der Sensoren im Labor, Prüfstand und Fahrzeug in Hinblick auf die Automotive-Anforderungen.

## 1.2 Elektrodenstrukturen

Kapazitive Sensorik zur Erkennung des Fahrbahnzustands ist im stationären Betrieb bereits kommerziell verfügbar und wird erfolgreich eingesetzt, siehe [1]. Dabei sind einzelne Sensoren in die Fahrbahn integriert und werden drahtlos über eine Wetterstation am Fahrbahnrand ausgewertet, siehe [2]. Die installierten Sensoren liefern hier wertvolle Informationen zu den Witterungsbedingungen und zum Fahrbahnzustand, die dann zentral gesammelt und bei Bedarf an Verkehrsteilnehmer durch einen Warnhinweis über digitale Straßenschilder oder über fahrzeugeigene Navigationssysteme übermittelt werden. Ebenso können die Messdaten für einen zustandsorientierten und damit kosteneffizienten Winterdienst genutzt werden.

Wie auch in diesem Fall kann hinsichtlich verschiedener Fragestellungen bzgl. des automatisierten Fahrens grundsätzlich zwischen stationären Lösungen innerhalb geeigneter Infrastrukturelemente und mobilen Lösungen im Fahrzeug unterschieden werden. Für SEEROAD wurden mobile Alternativen zu den oben beschriebenen stationären kapazitiven Sensoren untersucht. In diesem Abschnitt wird ein Laborprüfstand beschrieben, der zu diesem Zweck entwickelt und gefertigt wurde.

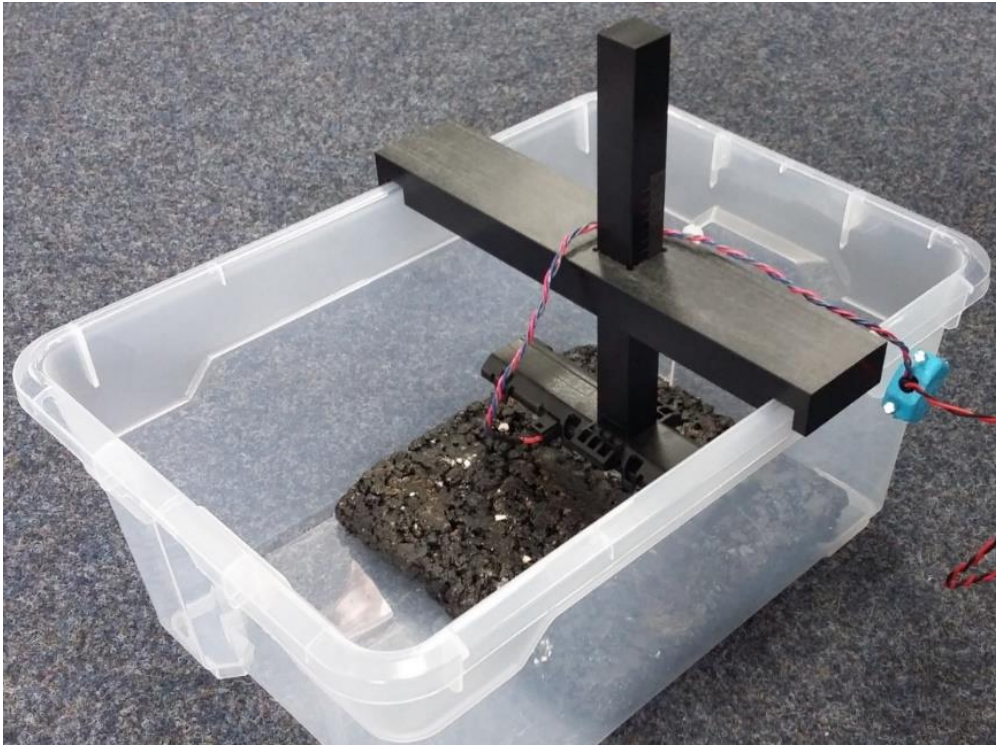


Abb. 1: Stationärer Prüfstand mit prototypischem Kapazitätssensor.

Während eines gemeinsamen Workshops mit dem Projektpartner ITEM wurden im Juni 2017 die Anforderungen an diesen Laboraufbau in Form eines Prüfstandes für Grundsatzuntersuchungen erarbeitet. Hier sind nachträglich insbesondere drei Punkte hervorzuheben. Zum einen ist es wünschenswert, Oberflächen im Prüfstand verwenden zu können, die ein gewisses Maß an Ähnlichkeit mit Fahrbahnoberflächen aufweisen. Als zweites wurde die Anforderung formuliert, dass eine Relativbewegung zwischen Sensor und Untergrund möglich ist. Dazu ist es auf Grund der im Projekt angestrebten Erkennung von Eis und Schnee notwendig, Oberflächen in einem gewissen Maß unterhalb des Gefrierpunktes vermessen zu können. Gemäß den definierten Anforderungen wurde bei HFK ein Konzept entwickelt und zweifach angefertigt.

Für den bei HFK realisierten Prüfstand wurden Asphaltplatten hergestellt, die beidseitig verwendbar sind und so insgesamt vier verschiedene Fahrbahnoberflächen nachbilden. Die Asphaltplatten sind in Abb. 2 zu sehen. Dazu wurden Behälter aus Kunststoff beschafft, in die die Asphaltplatten eingelegt werden. Dies ist notwendig, um mit elektronischen Bauteilen an feuchtem und nassem Asphalt arbeiten zu können. Es wurde eine Vorrichtung entworfen und gefertigt, die einen kapazitiven Sensor oder einen Radar Sensor aufnehmen und definiert zur Oberfläche positionieren kann. Diese wurde ebenfalls vollständig aus Kunststoff hergestellt, da von metallischen Teilen ein Einfluss auf die Messung erwartet wird. Der Messaufbau ist in Abb. 1 dargestellt.

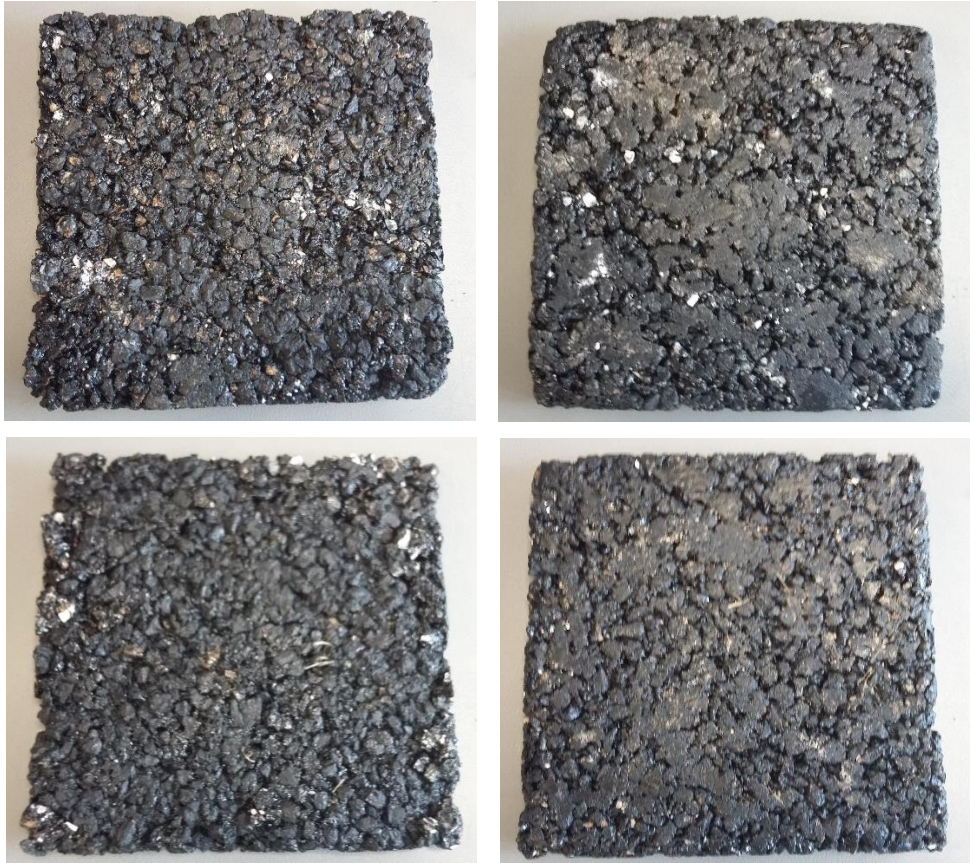


Abb. 2: Zwei Asphaltplatten, Oberseite jeweils links und Unterseite rechts.

Erste Messungen mit kapazitiver Sensorik und unterschiedlich beschaffenen Fahrbahnoberflächen konnten mit einer ursprünglich für die Bestimmung von Füllständen bei HFK entwickelten prototypischen Sensorkomponente mit kapazitiver Messstruktur durchgeführt werden. Für die Erzeugung unterschiedlicher Nässegrade wurde die Wanne mit Wasser gefüllt. Als Beispiel zeigt Abbildung 3 (a) den Messaufbau mit 500 ml Wasser in der Wanne und 0 mm Abstand zwischen Sensor und Asphalt, und Abbildung 3 (b) zeigt den Messaufbau mit 700 ml Wasser und 20 mm Abstand.

In Zusammenarbeit mit ITEM wurde der stationäre Prüfstand in einer weiteren Messreihe im Klimaschrank betrieben. Abbildung 4 zeigt den Prüfstand mit dem prototypischen Kapazitätssensor und einer Eisschicht auf dem Asphalt. Wie in der vorangegangenen Messreihe wurden Messungen bei verschiedenen Abständen zum Asphalt und verschiedenen Wassermengen in der Wanne durchgeführt. Dazu kam in dieser Messreihe, dass die Messungen bei definierten Temperaturen durchgeführt wurden. Die Grundaussage, dass sich die gemessene Kapazität mit zunehmender Wassermenge auf dem Asphalt erhöht konnte hier zum Teil bestätigt werden.

Abschließend ist zu notieren, dass die Grundsatzuntersuchungen zur kapazitiven Sensorik in erster Linie vom Partner ITEM bearbeitet wurde. Für die Dokumentation der Ergebnisse wird an dieser Stelle auf den Bericht des Partners ITEM verwiesen.



(a)



(b)

Abb. 3: Kapazitätssensor auf nassem Asphalt mit 500 ml Wasser und 0 mm Abstand zum Asphalt (a), und 700 ml Wasser und 20 mm Abstand (b).

## 1.3 Sensorelektronik

Als Referenz für die gemessenen Signale wurde auf ein bereits bei HFK verfügbares System der Firma G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH mit dem Namen MARWIS zurückgegriffen werden. Dieses System, das in erster Linie auf optischen Messungen basiert ist prinzipiell tauglich, Nässe und Reibwert auf der Fahrbahn quantitativ zu beurteilen. Das System ist in der vorhandenen Ausführung nicht für den Straßenverkehr zugelassen und kann somit nur bei Testfahrten auf speziellen Prüfstrecken als Referenz eingesetzt werden. Da Testfahrten auf diesen Prüfstrecken nur durch ausgebildete Fahrer vorgenommen werden dürfen wurde im Laufe des Projektes ein weiteres MARWIS beschafft, das durch Fa. Lufft speziell für den Einsatz im Kofferraum eines Porsche 911 modifiziert wurde. Mit dieser modifizierten Variante des Systems konnten etwa ab der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit referenzierte Messungen im öffentlichen Straßenverkehr gemacht werden.

### 1.3.1 Spritzwassersensoren

In der Deutschen Patentschrift mit der Nummer DE 42 13 221 C 2 des Partners Porsche aus dem Jahr 1992 wird beschrieben, wie mittels eines akustischen Sensors aufgewirbeltes Spritzwasser an der Radhausschale detektiert wird, siehe [3]. Die gemessenen Signale korrelieren mit dem Benetzungsgrad der Fahrbahnoberfläche. Für die ersten Grundsatzuntersuchungen zur Detektion von Spritzwasser in der Radhausschale innerhalb von SEEROAD wurde die im Forschungsprojekt KESS entwickelte und unter dem Namen SHAKE bei HFK intern weiterentwickelte prototypische Sensorik verwendet. Es handelt sich bei den Sensoren um piezoelektrische Filmelemente in einem Gehäuse, mit denen Schwingungen der Fahrzeugkarosserie in elektrische Spannungen umgewandelt werden. Das Auftreffen von Wassertropfen auf der Radhausschale erzeugt jedoch nicht nur Vibrationen bzw. Schall, sondern wirkt sich im direkten Umfeld jedes Wassertropfens auch auf die Ausbreitung elektrischer Felder aus. Ein geeignet in der Radhausschale platzierter kapazitiver Sensor bietet somit ein weiteres (physikalisch unabhängiges) Messprinzip zur Detektion von Spritzwasser in der Radhausschale. Nach eingangs erwähnter Umverteilung der Zuständigkeiten bei der Elektronikentwicklung innerhalb des SEEROAD Konsortiums wurde bei HFK eine Komponente entwickelt, die die Messprinzipien Vibroakustik und Kapazität in einem Gehäuse vereint (K-VAS).



Abb. 4: Stationärer Prüfstand mit Kapazitätssensor und vereistem Asphalt.

Zu diesem Zweck wurden Körperschallsensoren nach dem Vorbild des SHAKE Sensors mit alternativer Auswertelektronik und CAN-Kommunikation aufgebaut (VAS). Die alternative Auswertelektronik umfasst ein Programmable System on Chip mit zur Laufzeit schaltbaren und parametrisierbaren, digital-analogen Systemkomponenten wie z.B. PGA, ADC, DAC, Filter oder Timer, eine flexible Abtastrate von bis zu 1 MHz und einen integrierten Capacity-to-Digital Converter (CDC). Ausgehend von dieser Basis wurden Varianten zur ausschließlichen Messung der Kapazität oder des Körperschalls aufgebaut und getestet, bevor das finale Muster aufgebaut und getestet wurde, in dem beide Messprinzipien praktisch parallel arbeiten.

Das kapazitive Messelement wird aus einem Messelektrodenpaar in Form einer Flex-Leiterplatte mit Klebeschicht und Lötkontakten gebildet. Die Elektrodenpaare wurden gemäß Spezifikation mit Hilfe von COMSOL Multiphysics entworfen und anschließend beim Lieferanten PCB-Pool gefertigt. Abbildung 5 zeigt links die Oberseite (nicht klebend) der Flex-Leiterplatte mit den Messelektroden und rechts das Gehäuse des kapazitiven Sensors (äußerlich wie Körperschallsensor).

Zwei Erprobungsfahrzeuge wurden vor Beginn der Wintererprobung 2019 mit jeweils einem reinen Körperschallsensor dieser Art in der rechten und einem rein kapazitiven Sensor in der linken vorderen Radhausschale ausgestattet. Das primäre Ziel beim Einsatz des kapazitiven Sensors ist es, die geringe Sensitivität des Körperschallsensors im Bereich geringer Nässe (Wassersäule  $< 200 \mu\text{m}$ ) zu verbessern. Visualisierung und Interpretationen von Messdaten des Sensors sind in Abschnitt 1.4.3 enthalten. Der hier verwendete rein kapazitive Ansatz diente der Komplementierung des SEEROAD-Systems für die Wintererprobung und stand in keinem Konflikt mit den Arbeiten zum gleichen Thema, die beim Projektpartner ITEM durchgeführt wurden. Alle Messdaten wurden den Partnern zur Verfügung gestellt.

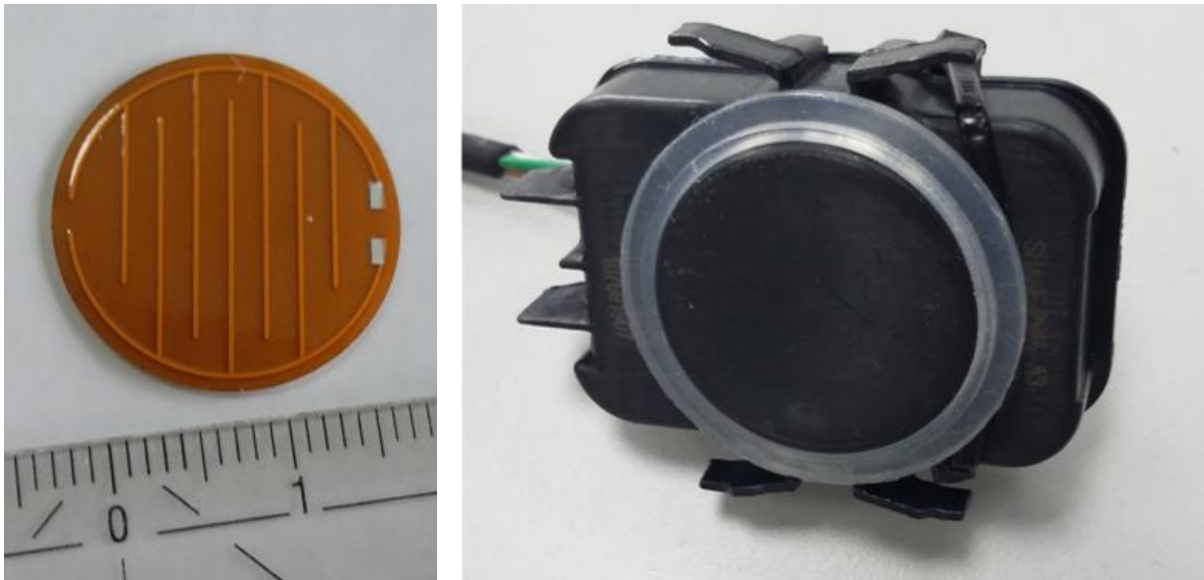


Abb. 5: Messelektrodenpaar (links) und Sensorgehäuse (rechts) des kapazitiven Sensors.

Bereits bei geringer Nässe (feuchte Straßen) und ausreichender Geschwindigkeit ist in den Messdaten ein guter Rauschabstand im Signal des kapazitiven Sensors sichtbar. Abbildung 11 zeigt Messwerte des kapazitiven Sensors bei Nässe. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Signale ist in Abbildung 6 mittig zu erkennen, wo die Fahrgeschwindigkeit (obere gelbe Linie) zwei lokale Minima aufweist, die zwar zeitgleich mit lokalen Maxima des Referenzsignals (mittlere rote Linie) auftreten, jedoch im Messsignal des kapazitiven Sensors (untere grüne Linie) ebenfalls in Form von lokalen Minima ausprägt. Die prinzipielle Korrelation zwischen kapazitivem Sensor und Referenzsensor sind in Abbildung 7 zu erkennen (gelb hinterlegt). Allgemein ist der kapazitive Sensor in der aktuellen Ausprägung ab Wasserfilmen von etwa  $300\ \mu\text{m}$  (Abb. 6, gestrichelte Linie) in einer Art Sättigung. Die Erkenntnisse zur Eignung eines kapazitiven Sensors in der Radhausschale, die vom Projektpartner ITEM erarbeitet wurden, decken sich grundsätzlich mit den hier dargestellten. Im Schlussbericht des Partners ITEM sind ausführliche Untersuchungen verschiedener Elektrodenstrukturen und Verbaupositionen beschrieben. Die durch die Wintererprobung gewonnenen Erkenntnisse sind in dem Zusammenhang als Robustheitsnachweis bzgl. des operativen Temperaturbereichs und der Langzeitstabilität zu bewerten.

Wie geplant wurde ein Sensormuster aufgebaut, das die Messprinzipien der Kapazitäts- und der Körperschallmessungen in einem Gehäuse vereint. Für diese Komponente wurde ein spezifischer Fusionsalgorithmus entwickelt, in dem die Stärken der beiden Messprinzipien kombiniert wurden, um die Funktionalität gegenüber dem Stand der Technik zu erhöhen. Insbesondere wurde so eine höhere Sensitivität bei geringer Nässe erzielt. Die Vorgehensweise war iterativ, wobei am PC entwickelte Ansätze zur gemeinsamen Interpretation der Messsignale im Fahrzeug getestet wurden. Beispielhaft sind in Abbildung 7 ein Messergebnis des Fusionsalgorithmus mit den Beiträgen der beiden Messprinzipien und das Referenzsignal dargestellt. Darin ist eine grundsätzliche Korrelation mit der Referenz zu erkennen.



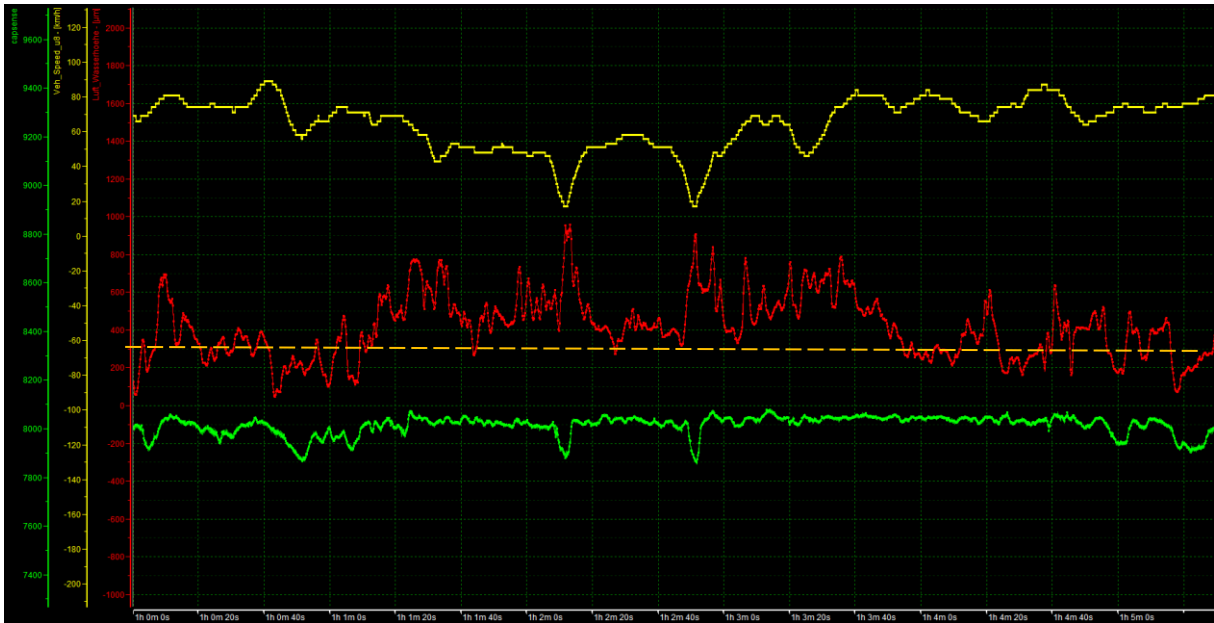


Abb. 6: Messwerte des kapazitiven Sensors (grün, unten) bei Nässe, Messsignal des Referenzsensors (rot, mittig) und Fahrgeschwindigkeit (gelb, oben).

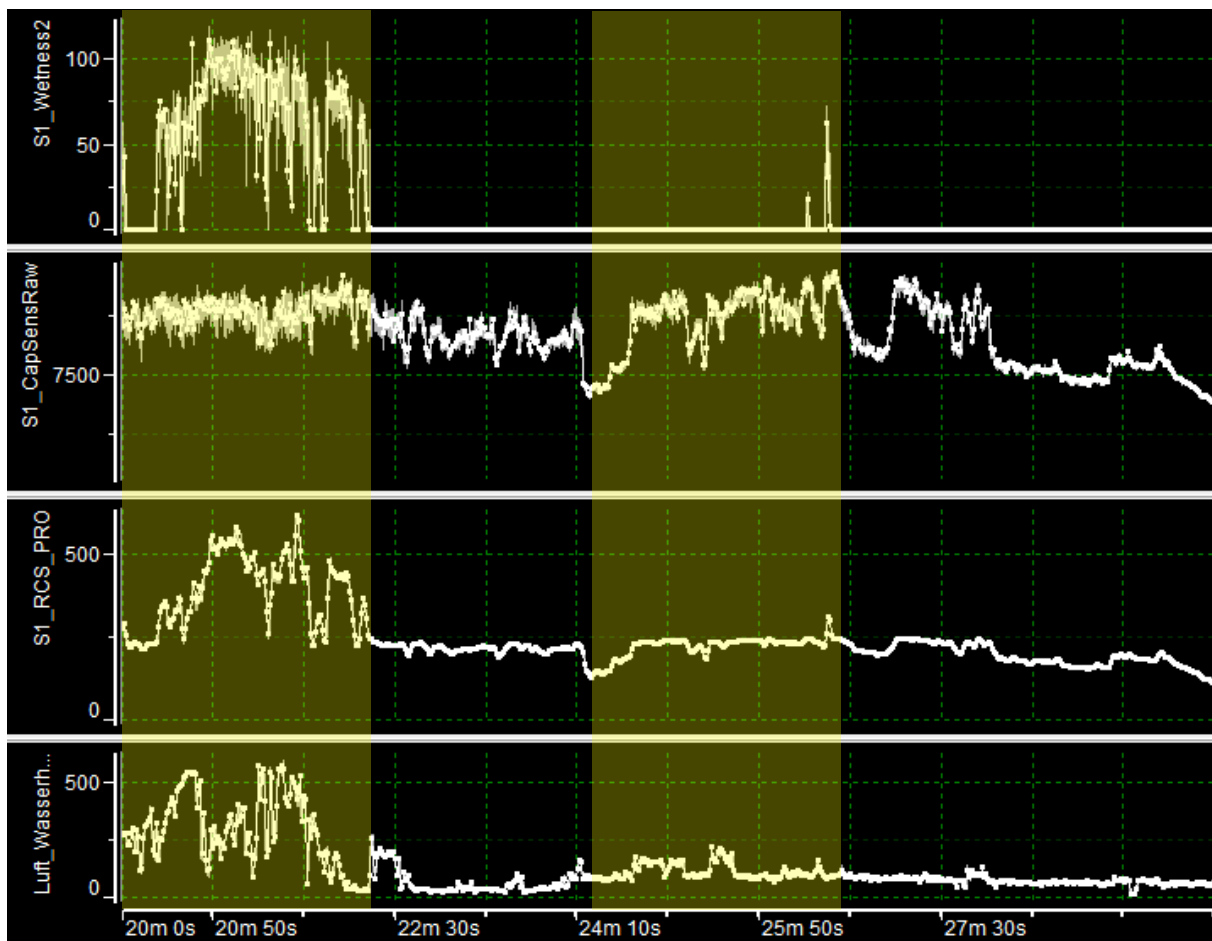


Abb. 7: Aus Körperschall (oben) und Kapazität (2. von oben) fusionierte Messung der Fahrbahnässe (2. von unten) und Referenzmessung der Wasserfilmhöhe in  $\mu\text{m}$  (unten).

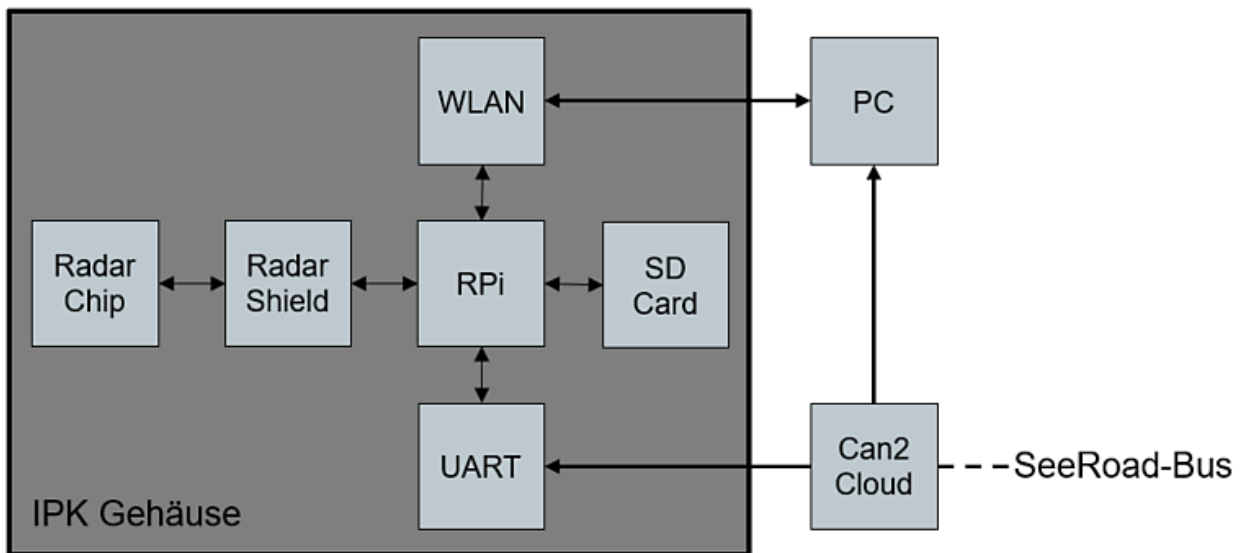


Abb. 8: Blockschaltbild des Radarsystems.

### 1.3.2 Radar

Die Fahrbahnzustandserkennung mithilfe von Mikrowellen wurde z.B. im Patent EP1512964 beschrieben, vorwiegend zur Erkennung von Straßenglätte und -nässe, vgl. [6]. Dabei wird von einer Sendeeinheit am Fahrzeuguntergrund elektromagnetische Strahlung mit unterschiedlichen Frequenzen im GHz-Bereich in Richtung der Fahrbahnoberfläche ausgesendet und von dieser reflektiert. Die reflektierte Strahlung wird wiederum von einer Empfangseinheit aufgenommen und anschließend ausgewertet. Wasser weist aufgrund seiner molekularen Struktur ein permanentes elektrisches Dipolmoment auf und kann durch elektrische Wechselfelder zu Drehbewegungen angeregt werden, sog. Orientierungspolarisation. Bei niedrigen Frequenzen unterhalb von ca. 100 MHz besitzt die komplexe Permittivität einen hohen Realteil. Oberhalb der Relaxationsfrequenz von ca. 10 GHz können Wassermoleküle der Anregung nicht mehr folgen, wodurch der Realteil sinkt und der Imaginärteil der Permittivität steigt. Ähnliche Systeme werden in den Veröffentlichungen [7, 8, 9] beschrieben. Die Detektion von nassen Fahrbahnoberflächen wird in [10] durch Aussenden von Mikrowellen mit horizontaler und vertikaler Polarisation realisiert. Die reflektierten elektromagnetischen Wellen werden, je nach Polarisation und Fahrbahnoberfläche, unterschiedlich stark gedämpft und lassen damit eine Bestimmung des Zustands der Fahrbahnoberfläche zu.

Der hier zusammengefasste Stand der Wissenschaft bzgl. der Oberflächenklassifikation anhand von Radarwellen ist ebenfalls im zweiten Zwischenbericht des Jahres 2018 des Partners Intedis enthalten. Insbesondere ist dort beschrieben, welche Nachteile eine auf diese Weise wissenschaftlich fundierte Herangehensweise an die Entwicklung eines Radarsystems im Rahmen des Verbundprojektes SEEROAD mit sich bringt. Der von HFK verfolgte Ansatz besteht darin, mit Radarmodul und Referenzmesssystem Messdaten von unterschiedlichen Straßen und Zwischenschichten aufzunehmen um anschließend mit Hilfe von Methoden des maschinellen Lernens einen Algorithmus zur automatischen Klassifikation zu entwickeln.

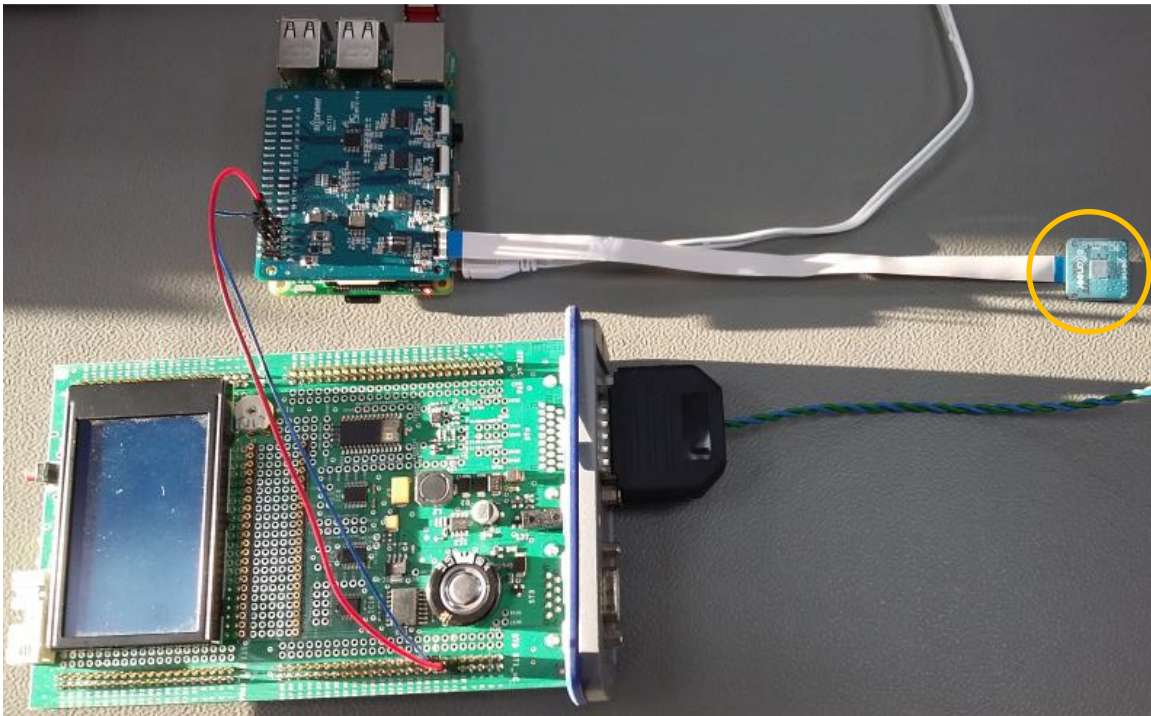


Abb. 9: Tischaufbau des Radar Systems bestehend aus Radar Chip (rechts, gelb umrandet), Auswertelektronik (oben) und Gateway (unten).

Dazu wurde bei HFK eine passende Entwicklungsplattform bestehend aus einem 60 GHz Ultra Wide Band (UWB) Radar Chip mit integrierter Antenne und zugehöriger Peripherie auf einer Leiterplatte (Radar Chip), sowie einer weiteren Leiterplatte (Radar Shield) als aufsteckbarer Erweiterung eines Raspberry Pi (RPI) beschafft. Prinzipbedingt produziert ein Radar große Mengen an Rohdaten, so dass eine wesentliche Herausforderung darin bestand, ein Konzept für die effiziente Datengenerierung und -speicherung zu entwickeln und umzusetzen.

Für die Mitte Februar 2019 startende Fahrerprobung in Schweden wurde ein prototypisches System entwickelt und aufgebaut, das in Abbildung 8 als Systemskizze in Form eines Blockschaltbildes dargestellt ist. Die oben genannten Systembausteine Radar Chip, Radar Shield und RPI sind hier inklusive des Speichermediums (SD Card) und den Schnittstellen zur Interaktion (WLAN, PC) und zur Synchronisation mit dem Gesamtsystem (UART, Can2Cloud) abgebildet. Zusätzlich ist die Integration in ein Gehäuse mit IP Schutzklasse dargestellt. Das Gehäuse wurde unterhalb des Stoßfängerüberzugs im Frontbereich des GTS montiert.

Die Systemkomponente Radar wurde in der Projektplanung als Alternative zur kapazitiven Sensorik geführt, da die Verwendung des kapazitiven Sensors ursprünglich unter dem Fahrzeug vorgesehen war, so dass sich die Feldlinien in Richtung der Fahrbahnoberfläche ausbreiten. Diese Verwendung der kapazitiven Sensorik wurde innerhalb der Grundsatzuntersuchungen als technisch nicht umsetzbar erkannt.

Aufbau und Applikation des Radar Sensors zielen darauf ab, anhand der empfangenen Echos der ausgesendeten Radarwellen Informationen über den Fahrbahnzustand zu erhalten. Vom System werden Serien von Wellenpaketen ausgesendet, die auf eine Trägerfrequenz von 60 GHz moduliert sind. Ein solches Wellenpaket ist in seiner zeitlichen Ausdehnung so kurz, dass es praktisch als Impuls ausgesendet wird. Angesteuert wird der initiale Aufbau so, dass

100 Impulse innerhalb von 30 ms ausgesendet, deren Echos empfangen und ausgewertet werden. Nach dem Senden eines Impulses wird ein zeitliches Fenster geöffnet, so dass nur Reflexionen im Bereich von 8 cm bis 25 cm Entfernung von der Antenne empfangen werden. In Fahrtrichtung beträgt der Öffnungswinkel insgesamt etwa  $40^\circ$ , die leicht vorwärtsgerichtet sind. Orthogonal zur Fahrtrichtung beträgt der Öffnungswinkel etwas über  $80^\circ$ .

Empfangene Signale werden automatisch mit der Geoposition und der Fahrgeschwindigkeit synchronisiert. Dazu wird jeder Messung manuell ein Fahrbahntyp und -zustand zugeordnet, der bei der späteren Datenverarbeitung als Referenz dient. Beispielhaft ist in Abbildung 11 das arithmetische Mittel aller Messungen auf trockenem Asphalt dargestellt. Dabei entspricht die blaue Linie dem Realteil und die rote Linie dem Imaginärteil der empfangenen Radarwelle. An der Position des Extremwertes kann der Abstand zum Boden abgelesen werden. Zum Vergleich ist in Abbildung 12 das arithmetische Mittel aller Messungen auf festgefahrener Schneedecke dargestellt. Die blaue Linie entspricht wieder dem Realteil und die rote Linie entspricht wieder dem Imaginärteil der Welle. Der Betrag des Integrals des empfangenen Signals bei festgefahrener Schnee ist deutlich kleiner als das bei Trockenheit. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die empfangene Energie bei festem Schnee geringer ist als bei trockenem Asphalt. Anteile der ausgesendeten Welle werden vom Schnee absorbiert oder breiter gestreut, so dass weniger Leistung wieder bei der Antenne ankommt.

Des Weiteren wurden die Erkenntnisse der Test der beschriebenen Radarkomponente verwendet, um aussagekräftige Merkmale des befahrenen Untergrunds bzgl. der Zwischenschicht zu identifizieren. In Zusammenarbeit mit dem Partner Intedis wurden Merkmale innerhalb der empfangenen Signale identifiziert, mittels derer eine automatische Klassifikation vorgenommen werden kann. Diese werden in einer weiterentwickelten Variante der Komponente (SRR v1) aus den reflektierten Radarwellen extrahiert und dem SEEROAD System mit geringer Latenz übergeben. Darüber hinaus wurde ein weiterer Musterstand (SRR v2, siehe Abb. 13) entwickelt, der den Funktionsumfang in einem kleineren Gehäuse darstellt.

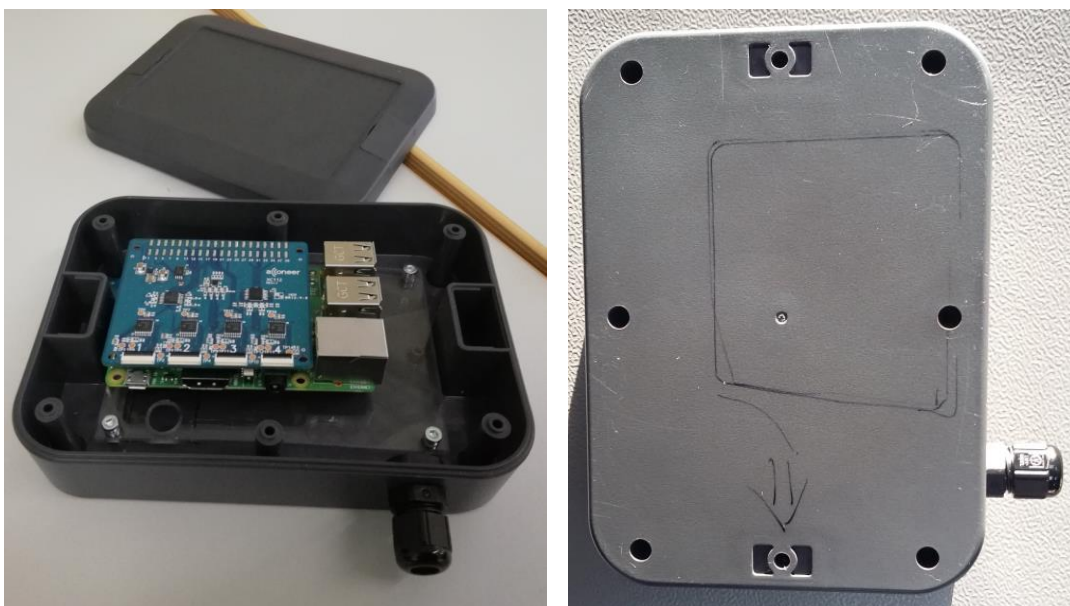


Abb. 10: Radar Sensor im Gehäuse mit offenem Deckel (rechts) und von unten (links).

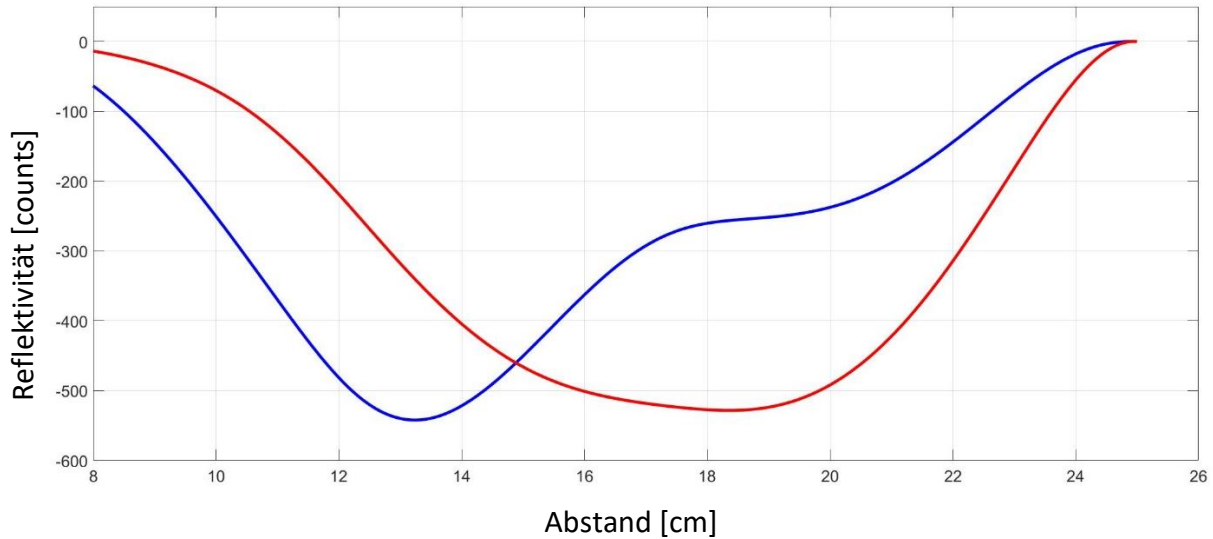


Abb. 11: Beispiel empfangener Radarwellen bei trockenem Asphalt.

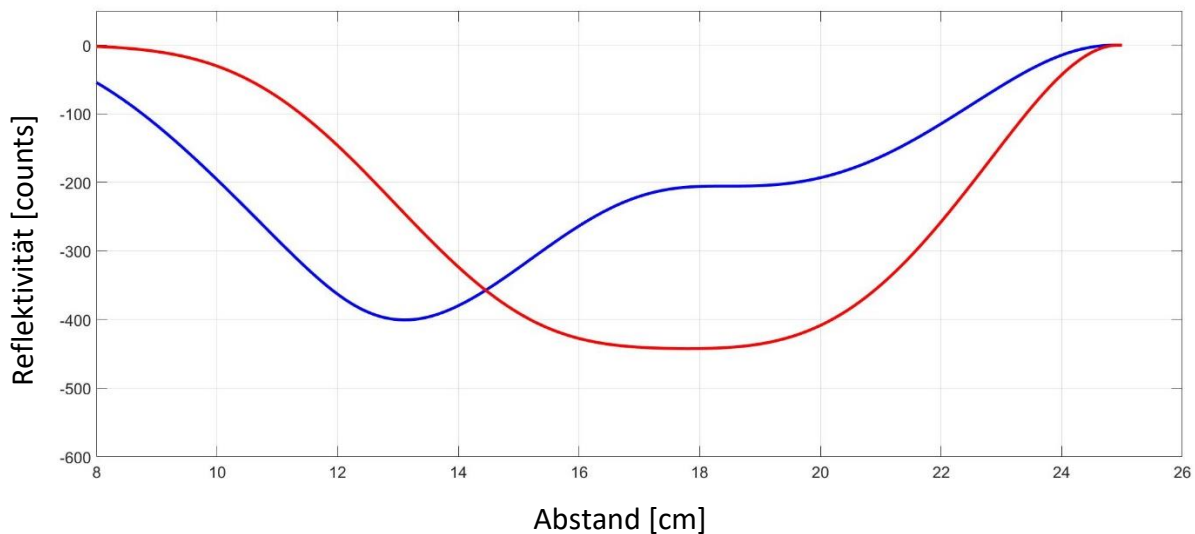


Abb. 12: Beispiel empfangener Radarwellen bei festgefahretem Schnee.

Als Ergebnis der Weiterentwicklung der Komponente ist allem voran die Automatisierung der Messung zu nennen. Die Schnittstellen der Komponente wurden ausgebaut, so dass ausgewählte Daten in Echtzeit und parallel zum Referenzsensor auf den CAN-Bus geschrieben werden. Entgegen dem Musterstand SRR v0, bei dem eine Messung vom Beifahrer über einen Befehl in einer Kommandozeile eines Raspberry Pi von Hand gestartet wurden, misst das angepasste Muster SRR v1 durchgehend und übergibt Messwerte im Sekundentakt an das Bus-system.

Ein wichtiger Aspekt der Entwicklung, der diese Echtzeitkommunikation ermöglichte war eine Kompression der Messwerte ohne Verlust des Informationsgehalts. Die Reflexion einer ausgesendeten Radarwelle benötigt für die Verarbeitung einen Speicherplatz von etwa 5,6 kB. Sekündlich sendet und empfängt die Komponente 100 Radarwellen dieser Art, woraus sich ein benötigter Speicherplatz von 560 kB/s ergibt. Die im Kommunikationsnetz übertrag-

bare Datenmenge würde damit von nur einer Komponente überschritten, so dass eine Kompression der Radardaten notwendig ist. Zu diesem Zweck wurde der Informationsgehalt unterschiedlicher Merkmale der reflektierten Wellen in Bezug auf die Unterscheidung der Zwischenschichten untersucht. In einem ersten Schritt wird das arithmetische Mittel über die Absolutbeträge 100 aufeinanderfolgender Wellen gebildet. Dieser Mittelwert wird mittels eines Polynoms 4. Ordnung approximiert. Dadurch werden wesentliche Merkmale, wie Extremwerte und asymptotisches Verhalten der reflektierten Wellen durch 5 Koeffizienten repräsentiert. Als weitere aussagekräftige Merkmale wurden das Integral, das Maximum und die Varianz des berechneten Mittelwerts und 2 weitere Merkmale identifiziert. Die Verwertbarkeit der identifizierten Merkmale für den Fusionsalgorithmus wurde mit dem Partner Intedis abgestimmt.

Das Muster SRR v2 wurde nicht im Versuchsträger appliziert, da ein Einfluss der Veränderung des Gehäuses und der Einbaulage auf die Verwertbarkeit der identifizierten Merkmale nicht ausgeschlossen werden kann. Für die Identifikation entsprechender Merkmale für die Komponente SRR v2 fehlen die notwendigen Messdaten der verschiedenen Zwischenschichten.



Abb. 13: Vorder- (links) und Rückseite (rechts) des Musters des SEEROAD Radar v2.



Abb. 14: Regensensor der 4. Generation der Firma HELLA.

### 1.3.3 Verbundsystem

Neben den Verantwortungen bei der Entwicklung prototypischer Sensorelektronik hat HFK an der Entwicklung weiterer Bestandteile des Verbundsystems mitgewirkt. Im folgenden Abschnitt werden die Komponenten des Verbundsystems und deren Vernetzung beschrieben. Anschließend werden Ergebnisse der Systemspezifikation, die funktionale Analyse und Bewertung von Komponenten, Teil- und Verbundsystem beschrieben.

Im Abschnitt 1.3.1 und 1.3.2 wurden bereits die bei HFK entwickelten Prototypen zur kapazitiv-, vibroakustisch- und mikrowellengestützten Einschätzung des Fahrbahnzustandes beschrieben. Beim Partner ITEM wurden als Ergänzung des Verbundsystems dazu noch weitere Prototypen zur kapazitiven Messung entwickelt (SRC), die als Ergebnis der Grundsatzuntersuchungen zur Verwendbarkeit und Performance der kapazitiven Messtechnik entstanden und im finalen Versuchsträger eingesetzt wurden. Dabei handelte es sich um verschieden gestaltete Elektrodenpaare in Form von Interdigitalstrukturen und zugehörigen elektronische Auswerteeinheiten, mit denen Änderungen des elektrischen Feldes in unmittelbarer Nähe der Interdigitalstrukturen messbar gemacht werden (vgl. Abschnitt 1.3.1). Anwendung fand die kapazitive Sensorik vom Partner ITEM ebenfalls bei der Einschätzung geringer Nässe oder Nässe bei geringen Geschwindigkeiten.

Des Weiteren wurden vom Partner ITEM Komponenten zur Klassifizierung des Fahrbahnzustandes in das Verbundsystem eingebracht, die auf der Reflektivität der Fahrbahn bzw. der Zwischenschicht im infraroten Teil des Lichtspektrums basieren (SRO). Für diese Art der Messung wird Licht in unterschiedlichen Wellenlängen oberhalb von 900 nm ausgesendet, und das von der Fahrbahn reflektierte Licht breitbandig gemessen. Unterschiede in der Absorption spezieller Wellenlängen lassen so auf den Fahrbahnzustand schließen. In der Theorie lassen sich mit diesem Messprinzip verschiedene Nässegrade, Schnee und Eis unterscheiden.

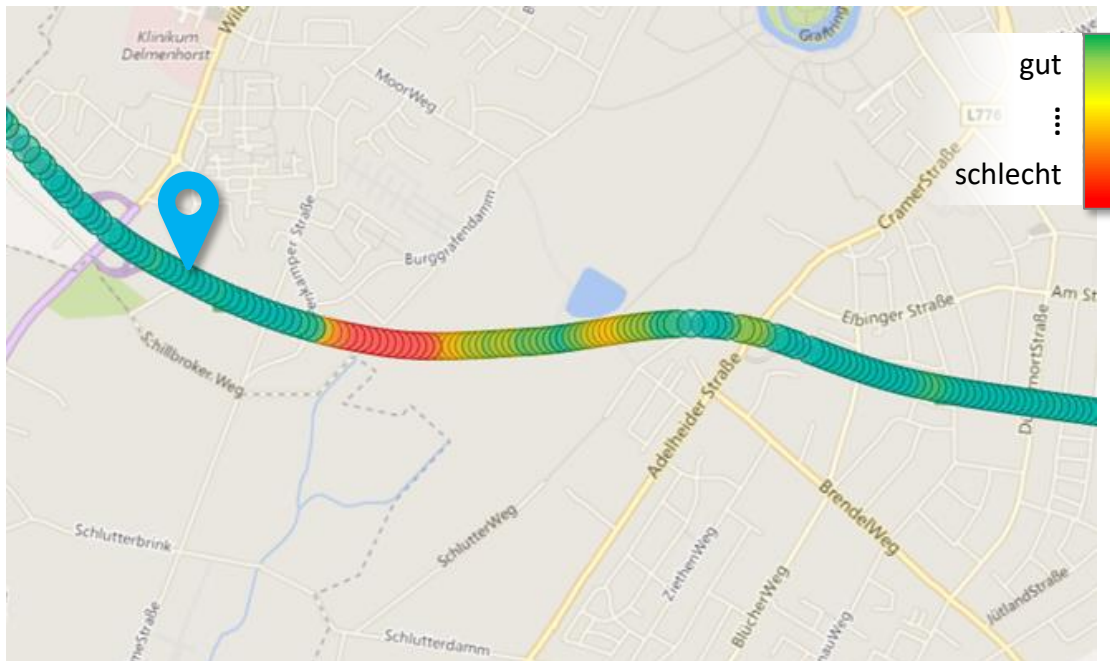


Abb. 15: Mögliche Visualisierung von Fahrbahnzustand und Geoposition des Egofahrzeugs.

Zu den funktionspezifisch entwickelten Prototypen wurden in das SEEROAD Verbundsystem noch Bordkomponenten und Referenzmesssysteme integriert, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden. Die serienmäßig im Fahrzeug verbaute Messtechnik zur Regelung der Fahrwerksdynamik bildet dabei ein wesentliches Teilsystem. Raddrehzahl- und Schlupfsensoren, Längs- und Querschleunigungssensoren, Lenkwinkelsensoren sowie Federwegsensoren des Fahrwerks bilden Systemrelevante Randbedingungen ab und wurden bei jeder Erprobung im Fahrzeug synchron zu den Messungen der Prototypen aufgezeichnet. Im Verbund werden diese Sensoren schon heute eingesetzt, um Informationen zum Fahrbahnzustand bzw. zur Kraftschlussreserve abzuleiten.

Als weitere Bordkomponente wurde der Regensensor in das Verbundsystem integriert. Handelsübliche Regensensoren werden nahe dem Rückspiegel von innen an der Windschutzscheibe appliziert und detektieren nach dem Prinzip der Totalreflexion, ob Wasser die sensitive Fläche des Sensors an der Oberfläche der Windschutzscheibe benetzt. Es handelt sich bei dieser Art Sensor um eine ausgereifte Technologie, die Niederschläge zuverlässig erkennt. Durch die erprobte Zuverlässigkeit des Regensensors leistet dieser einen weiteren wichtigen Beitrag zum SEEROAD Verbundsystem, da uneingeschränkter Kraftschluss bei fallendem Niederschlag ausgeschlossen werden kann. In Abbildung 14 ist ein Regensensor der 4. Generation der Firma HELLA zu sehen. Es handelt sich dabei um einen Multifunktionssensor, der neben dem aktuellen Niederschlag verschiedene Lichtverhältnisse und die Beschlagsneigung der Innenseite der Windschutzscheibe detektiert.

Mit dem Regensensor ist die Liste der Komponenten, aus deren Signalen im Verbundsystem eine Entscheidung bzgl. des Fahrbahnzustandes abgeleitet wurde, vollständig. Für die Funktionsentwicklung des Systems war es zudem erforderlich, Referenzmesssysteme zu integrieren. Gleichzeitig zur Dokumentation und zur visuellen Referenz wurde eine Frontkamera in das Verbundsystem integriert, deren Bilder synchron zu den Messsignalen der Sensorkomponenten aufgezeichnet wurden. Als objektive Referenz wurde während des Projektes vom



gesamten Konsortium das System MARWIS der Firma Lufft GmbH verwendet. Dieses mobile Messgerät wird am Fahrzeug appliziert und bestimmt neben der Wasserfilmhöhe (aktuelle Benetzung der Fahrbahn mit Wasser in  $\mu\text{m}$ ) auch die Fahrbahntemperatur und weitere Parameter der aktuellen Witterung. Mittels einer prototypischen Telematikeinheit, die ebenfalls bei HFK entwickelt und angefertigt wurde, konnten Botschaften des Verbundsystems aus dem fahrenden Fahrzeug an einen entfernten Server gesendet werden (Can2Cloud). Dieses Feature ermöglicht dem System bei ausreichender Verbreitung im Markt eine örtliche Voraussicht, obwohl der Fahrbahnzustand im direkten Umfeld bzw. unterhalb des Egofahrzeugs erfasst und bewertet wird. Eine mögliche Visualisierung des Fahrbahnzustands ist in Abbildung 15 dargestellt. Mit Informationen aus dem Telematiksystem und Kooperation mit anderen Verkehrsteilnehmern können Fahrerinnen und Fahrer über Gefahrenstellen auf der Route hingewiesen werden.

Die beschriebenen Komponenten wurden im Verlauf des Projektes in unterschiedlichen Varianten, als Teil- und Gesamtsystem appliziert. Dazu wurden zu Beginn des Projektes mögliche Netzwerkarchitekturen diskutiert. Zu unterscheiden sind dabei insbesondere die Entwicklungsarchitektur und die Zielarchitektur. Die Zielarchitektur ist durch eine Sterntopologie beschrieben, deren zentrales Element das SEEROAD Steuergerät bildet. In diesem Steuergerät werden alle Signale der Prototypen und der Bordkomponenten einem Klassifikationsalgorithmus übergeben, der neben der Einschätzung des aktuellen Fahrbahnzustandes auch eine Einschätzung der Belastbarkeit der eigenen Einschätzung ausgibt. Abbildung 16 zeigt eine Skizze einer solchen Architektur.

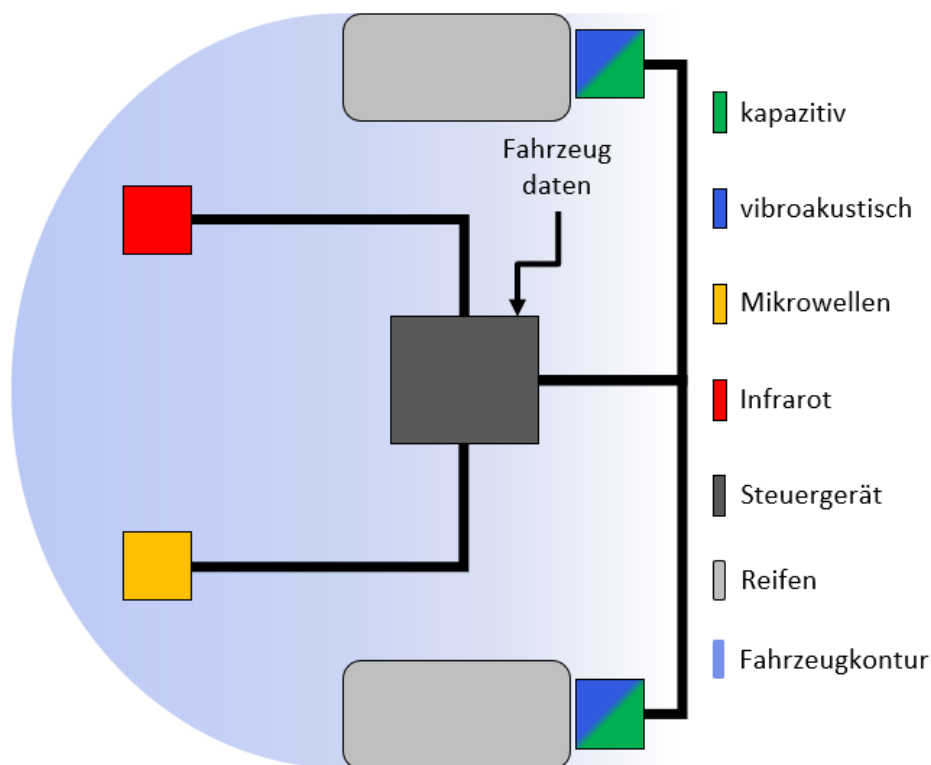


Abb. 16: Skizze der Netzwerkarchitektur des Zielsystems.

	A/B	weighting factor
1	Scientific foundation	1
2	Direct measurement	3
3	Experience with technology	7
4	Reference available	6
5	Test environment available	6
6	Numerical model available	7

(a)

	A/B	weighting factor
1	Robustness	6
2	Range	6
3	Resolution	6
4	Accuracy	6
5	Reaction	6
6	Explicit utility	6
7	Technical availability	6

(b)

Tab. 1: Vergleichskriterien für Entwicklungsaufwand (a) und Funktionalität (b) der Sensoren.

Für die Entwicklungsarchitektur war im Unterschied zur Zielarchitektur vereinbart, dass zusätzliche Steuergeräte bzw. Gateways wenn nötig zu integrieren sind. Als zentrales Steuergerät war von Beginn an vorgesehen, die MicroAutobox II (MABx) der Firma DSPACE zu verwenden. In allen verwendeten Architekturen bildete ein privater SEEROAD CAN Bus die Basis des Kommunikationsnetzwerkes.

Die Verwendung einer speziellen Softwareumgebung zur Dokumentation der Systemanforderungen stellte sich als nicht zielführend heraus, da die Komponentenübergreifenden funktionalen Anforderungen mit wenigen Worten zusammengefasst sind. Das Verbundsystem sollte bei unbeschleunigten Geradeausfahrten im Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 130 km/h messfähig sein. Die Temperaturanforderungen an das System wurden durch die Witterungsbedingungen bei den Fahrerproben gestellt und reichten von -40°C im Winter im Norden Schwedens bis 85°C im Sommer, in der Sonne stehend.

Die Erwartungen des Konsortiums an die Performance der jeweiligen Prototypen wurde mit Hilfe einer Bewertungsmatrix dokumentiert und gepflegt. Dazu wurden zunächst Kriterien festgelegt, bzgl. derer die Komponenten mit einander verglichen werden. Die Kriterien lassen sich in die Bereiche Entwicklung/Risiko und Performance/Qualität gliedern. In die erste Kategorie fallen Aspekte wie die wissenschaftliche Grundlage der Verwendung des Messprinzips im speziellen Anwendungsfall oder die bestehende Erfahrung mit der verwendeten Technologie. In der zweiten Kategorie wurden explizit die Robustheit gegen Störeinflüsse, die Messgenauigkeit gegenüber der Referenzmessung oder die mögliche Auflösung des Messbereichs bewertet.

<i>Distinguish wet from dry</i>			<b>Radar</b>	
<b>complexity/time line</b>	<i>Nr.</i>	<i>Criteria</i>	<b>d: matching requirements</b>	<b>e = C*d result</b>
	1	Scientific foundation	3	3
	2	Direct measurement	8	12
	3	Experience with technology	2	14
	4	Reference available	8	4,8
	5	Test environment available	6	3,6
	6	Numerical model available	3	21
	7	0		0
	8	0		0
	9	0		0
<b>Complexity absolut</b>			<b>0</b>	<b>58,4</b>
<b>Complexity relative [%]</b>			<b>33,0</b>	<b>%</b>
<b>performance/technical</b>	1	Robustness	8	24
	2	Range	3	10,8
	3	Resolution	1	3
	4	Accuracy	7	31,5
	5	Reaction	9	27
	6	Explicit utility	7	42
	7	Technical availability	8	36
	8	0		0
	9	0		0
	<b>Performance absolute</b>			<b>0</b>
<b>Performance relative [%]</b>			<b>63,2</b>	<b>%</b>

Tab. 2: Einschätzung der Eignung des Radars zur Unterscheidung von trocken und nass.

Die einzelnen Kriterien wurden anschließend gemäß ihrer Bedeutung für die Gesamteinschätzung gewichtet. Tabelle 1 zeigt die Listen der Kriterien inkl. der jeweiligen Gewichtung. Bewertet wurden die Komponenten hinsichtlich ihrer Eignung für die Unterscheidung von je zwei Fahrbahnzuständen. Als Beispiel ist hier in Tabelle 2 die Einschätzung der Experten dargestellt, wie gut sich die Radarkomponente eignet, um nasse von trockenen Straßen zu unterscheiden. Die Gegenüberstellung der Einschätzung im oberen Block (complexity/time line), der sich auf den zu erwartenden Entwicklungsaufwand bzw. das Risiko bezieht und dem unteren (performance/technical), in dem die erwartete funktionale Performance quantifiziert wird zeigt, dass trotz eines relativ hoch eingeschätzten Aufwandes (33 bei *Complexity relative [%]*) keine optimale Performance erwartet wird (63,2 bei *Performance relative [%]*).

### 1.3.4 Fazit

Nach verschiedenen Umverteilungen der Zuständigkeit von den Grundsatzuntersuchungen bis zu Verantwortungen für Subsysteme wurden alle Ziele, die im Projektantrag formuliert wurden, erreicht. Während der Antragsphase und zu Beginn des Projektes war nicht absehbar, dass die Entwicklung eines rein vibroakustisch messenden Sensors bis zur Serienreife parallel zum Projekt SEEROAD ablaufen würde. Diese Entwicklung hat den Verlauf des Projektes SEEROAD positiv beeinflusst, da früh auf vorhandene Funktionsmuster zurückgegriffen werden konnte.

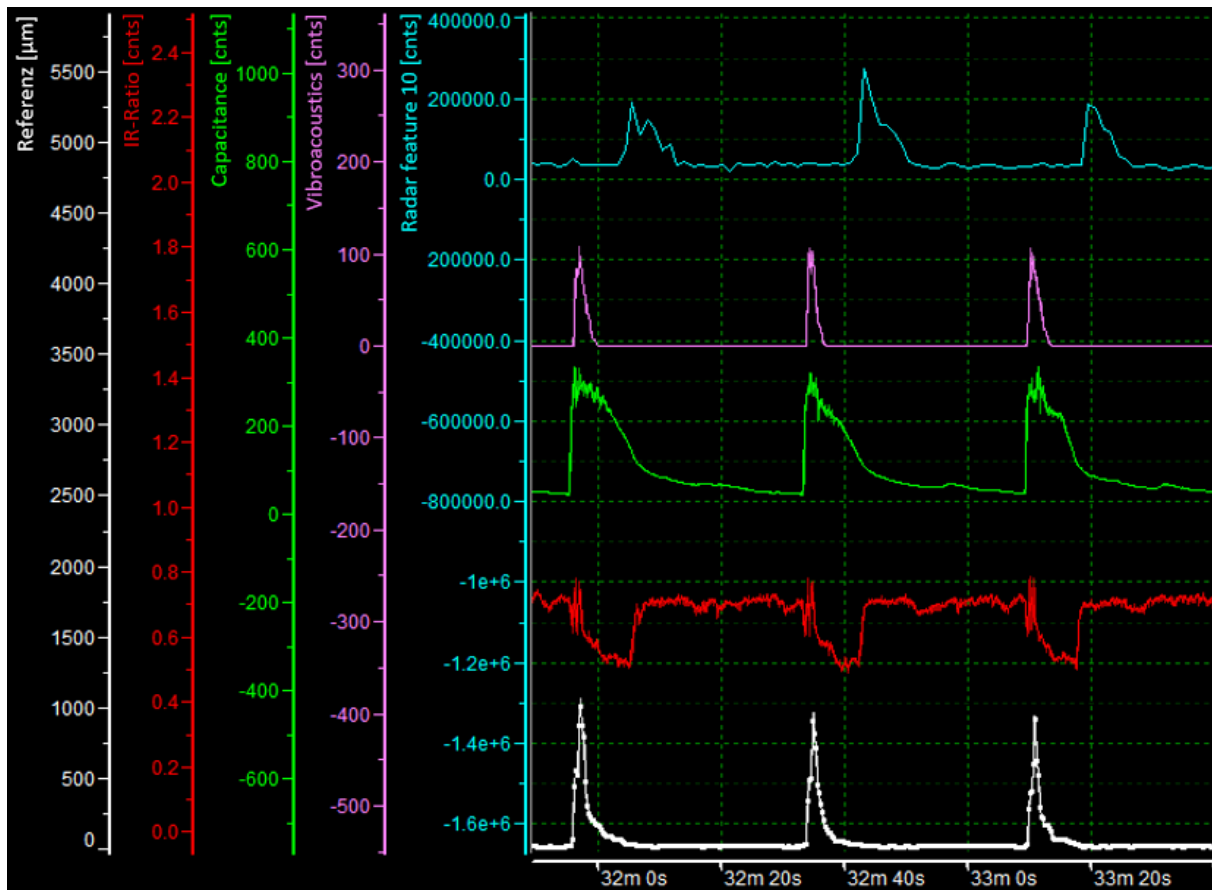


Abb. 17: Plot einer Messung mit dem Verbundsystem auf einem bewässerten Rundkurs.

Alle vorgestellten Sensoren konnten Nässe auf der Fahrbahn detektieren, siehe Abbildung 17. In den interpretierten Signalen des Radars lässt sich ein zeitlicher Versatz von etwa 9 Sekunden erkennen, dessen Ursache bis zum Projektende nicht behoben werden konnte. Zur Quantifizierung der Nässe eignen sich je nach Verhältnis der Wassersäule auf der Straße zur aktuell gefahrenen Geschwindigkeit das vibroakustische bzw. das kapazitive Messprinzip am besten. Tests mit Schnee und Eis konnten nur mit Teilsystemen erfolgen. Dabei zeigte sich, dass die vibroakustische und die kapazitive Sensorik (HFK) Dauerbelastungen und winterlichen Temperaturen standhalten. Die Radarkomponente konnte diesen Test ebenfalls bestehen und Messwerte auf winterlichen Straßen konnten offline richtig klassifiziert werden.

Bei der Bewertung des Reifegrads der Kerninnovationen des Vorhabens werden hier die einzelnen Komponenten des Teilprojektes differenziert betrachtet. Für die einfachere Einordnung der Teilsysteme wird im nachfolgenden der Technologiereifegrad (TRL) zu Projektbeginn und Projektende der Komponenten mit den zugrundeliegenden unterschiedlichen Aufgaben zur Bestimmung des Fahrbahnzustandes getrennt betrachtet. Im Teilprojekt „Elektrodenstrukturen, Sensorelektronik und Systemintegration“ wurden die Ziele zur Erhöhung des Technologiereifegrades eingehalten. Die Signalbewertung innerhalb der jeweiligen Komponenten wird hier mitberücksichtigt. Die im Projektplan vorgesehene Steigerung des TRL der vibroakustischen Sensorik ist in Tabelle 3 ausgegraut, da die Entwicklung der Komponente parallel und unabhängig von SEEROAD stattfand.

<b>Kerninnovation</b>	<b>TRL Projektbeginn</b>	<b>TRL Projektende</b>
• Vibroakustische Sensorik	4	9
• Kapazitive Sensorik	3	7
○ Fusion mit Vibroakustik	3	7
• Mikrowellen-Sensorik	3	7

Tab. 3: Übersicht der Technologiereifegrade.

## **1.4 Systemintegration**

### **1.4.1 Versuchsträger**

Im Dezember 2017 wurde HFK durch den Projektpartner Porsche ein Porsche 991 Carrera 4S (C4S) als Erprobungsfahrzeug zur Verfügung gestellt. Das Fahrzeug wurde bis Oktober 2018 von Bremen aus als Träger für prototypische Sensoren verwendet. Bis Oktober 2018 wurde das Fahrzeug als Versuchsträger für Prinzipversuche mit frühen Mustern kapazitiver, vibroakustischer und optischer Sensorik eingesetzt. Es wurden prototypische Sensoren der Partner ITEM und HFK, sowie eine HELLA Frontkamera Entwicklungsumgebung verbaut. Dazu wurde der Versuchsträger genutzt, um erste Erfahrungen zum Informationsgehalt der Signale der Fahrwerksdynamik zu sammeln. Auf Abbildung 18 ist zu sehen, wie der Referenzsensor MARWIS an der Fahrzeugfront befestigt wurde. Da ein solcher Aufbau im Straßenverkehr nicht zulässig ist, konnten mit dem C4S ausschließlich auf ausgewiesenen Prüfgeländen referenzierte Messungen gemacht werden.

Beim Partner Porsche wurden 2 weitere Versuchsträger insbesondere für eine Wintererprobung im Februar und März 2018 eingesetzt. Es handelte sich dabei um einen weiteren Carrera 4S und einen GTS des Typs 991. Beide Versuchsträger wurden mit je einem Regensensor der Firma HELLA, und prototypischen vibroakustischen Sensoren ausgerüstet. Dazu waren beide Versuchsträger mit der in Abschnitt 1.3 erwähnten Variante des MARWIS ausgestattet, die speziell für den Verbau im Kofferraum der 911er angepasst wurden.



Abb. 18: SEEROAD Versuchsträger Porsche 991 Carrera 4S am Prüfstand.



Abb. 19: SEEROAD Versuchsträger Porsche 991 GTS.

Der Versuchsträger GTS wurde HFK ab Dezember 2018 als SEEROAD Versuchsträger überlassen. Durch den im Kofferraum verbauten Referenzsensor konnte das Fahrzeug bis zum Ende des Projektes für Feldversuche und Prüfstanderprobungen verwendet werden. Es wurden Muster aller Messprinzipien, die Telematikeinheit und das zentrale Steuergerät verbaut. Das Fahrzeug ist in Abbildung 19 zu sehen.



Abb. 20: Radhausschale des C4S mit 6 Elektroden zur kapazitiven Messung (orange) und 1 Membran zur Körperschallmessung (gelb umrandet).

### 1.4.2 Applikation

Für die Applikation der kapazitiven Sensorik des Partners ITEM wurden im Oktober 2018 in einem gemeinsamen Workshop verschiedene Elektrodenpaare auf Flexleiterplatten in den Radhausschalen und von unten am Schweller des C4S verklebt und verdrahtet. Die zugehörige Auswerteelektronik konnte hinter der jeweiligen Radhausschale verbaut werden. Auf dieselbe Weise wurden im späteren Versuchsträger GTS weitere Muster der kapazitiven Sensorik des Partners ITEM verbaut. Die Applikation der Sensorik an und hinter der Radhausschale ermöglichte hier einen einfachen Ein- und Ausbau. Verklebte Elektrodenpaare in einer Radhausschale des C4S sind in Abbildung 20 zu sehen. Abbildung 21 zeigt eine weitere Musterstufe der kapazitiven Sensorik des Partners ITEM, bei der Elektroden und Auswerteelektronik in einem Bauteil realisiert wurden. Für die Applikation dieser Muster wurde selbstklebendes Klettband verwendet.





Abb. 21: Kapazitive Sensoren in der Radhausschale des GTS.

Ein Muster eines vom Partner ITEM entwickelten optischen Sensors wurde während des gemeinsamen Workshops im Oktober 2018 in einem geschützten Bereich unterhalb der Fahrzeugfront auf der Beifahrerseite des C4S appliziert, siehe Abbildung 22. Diese Musterstufe kam bei Testfahrten im Oktober 2018 zum Einsatz. Im GTS wurden 2 Varianten des optischen Sensors appliziert. Dabei wurde ein Muster (siehe Abbildung 23) analog zur Applikation des Musters am C4S unterhalb der Fahrzeugfront montiert, das andere Muster wurde innerhalb des Kofferraums appliziert. Da ein optischer Pfad zwischen Sensor und Fahrbahn bestehen muss, wurde eine Bohrung durch den Kofferraum und den Unterboden des Fahrzeugs vorgenommen. Abbildung 24 zeigt den Sensor in seiner Verbauposition durch das Loch im Boden des GTS.

Ebenfalls auf Abbildung 20 zu sehen ist die Membran eines vibroakustischen Sensors (gelb umrandet). Die vibroakustischen Sensoren wurden mit Hilfe einer Vorrichtung von hinten an den vorderen Radhausschalen montiert. Der Bereich, an dem die Membran von hinten an der Radhausschale anliegen würde, wurde im Vorfeld freigeschnitten. Da die äußere Form des rein vibroakustischen Sensors und die der Fusion aus kapazitiver und vibroakustischer Messung identisch sind, konnte hier mit wenig Aufwand zwischen verschiedenen Ausprägungen der Muster gewechselt werden. Sensoren dieser Bauform wurden in allen Erprobungsfahrzeugen eingesetzt. Parallel zum optischen Sensor im Frontbereich wurde ein Muster des Radar Sensors auf der Fahrerseite des GTS appliziert, siehe Abbildung 25.

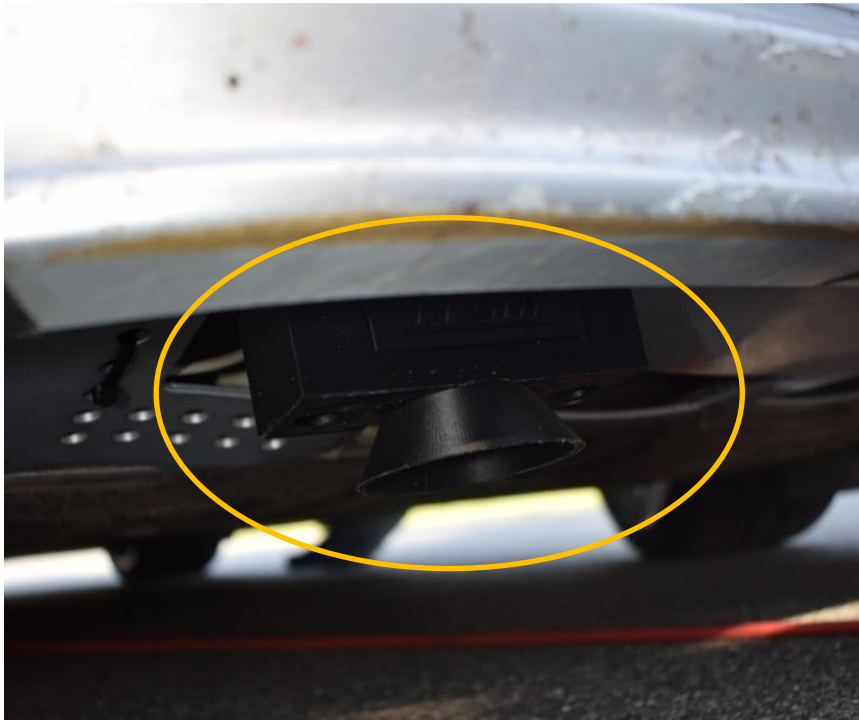


Abb. 22: Der optische Sensor in seiner Verbauposition unterhalb des C4S.

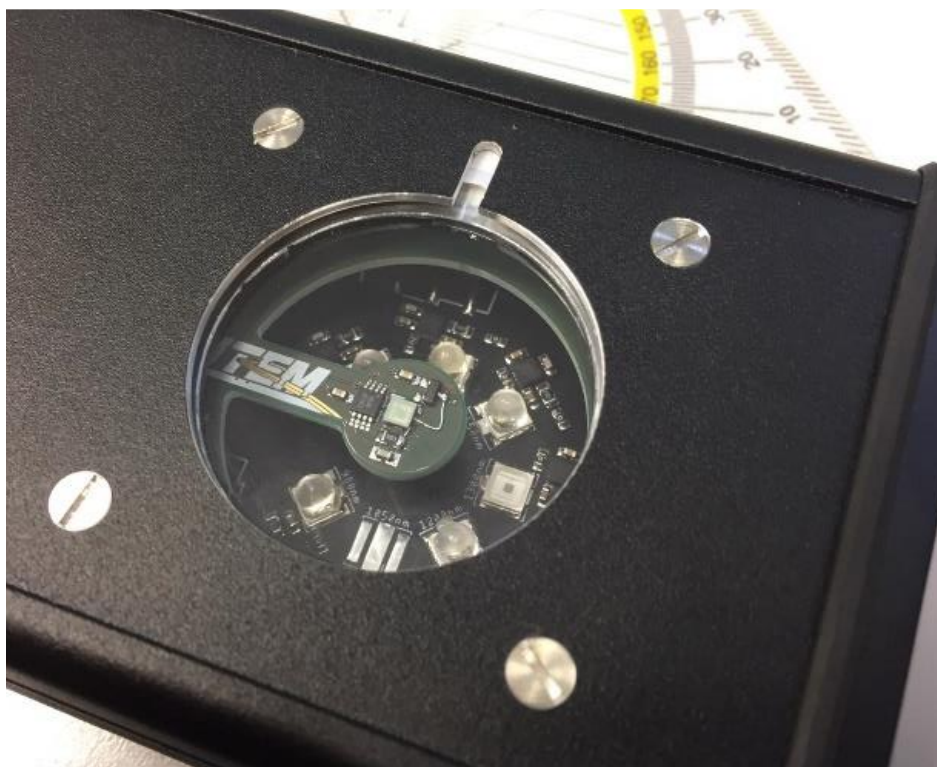


Abb. 23: Muster des optischen Sensors, wie er im Demonstrator verbaut wurde.

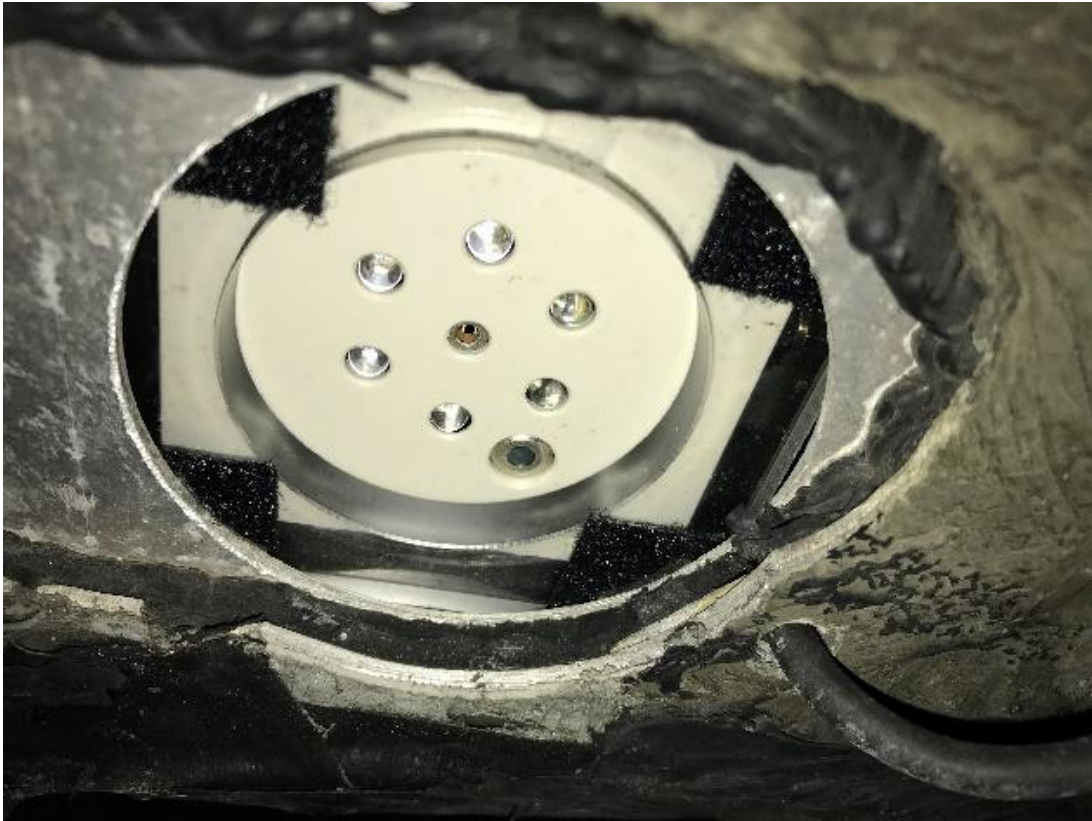


Abb. 24: Appliziertes Muster des optischen Sensors am GTS.



Abb. 25: Radar (gelb umrandet) im Frontbereich des GTS unterhalb des Fahrzeugs appliziert.

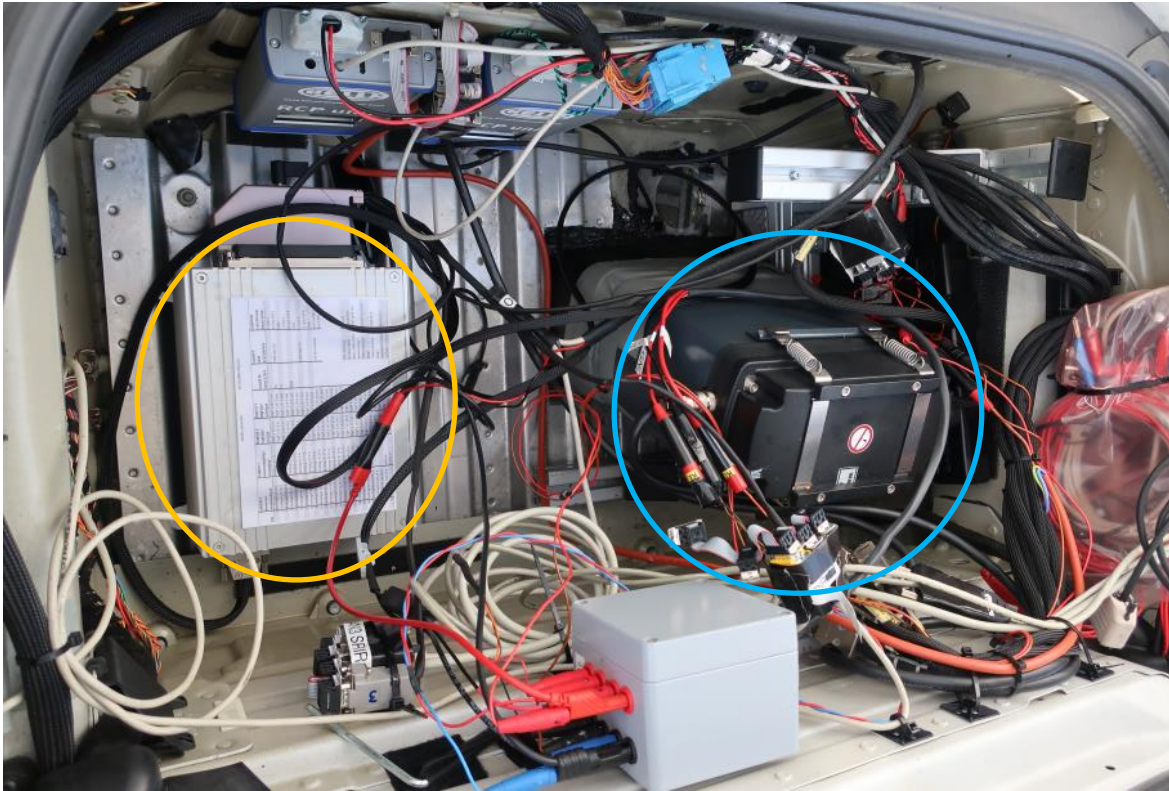


Abb. 26: Kofferraum des GTS mit MicroAutobox II (gelb umrandet), MARWIS (blau umrandet) und weiterer SEEROAD Messtechnik.

Des Weiteren wurden bei HFK eine MABx als zentrales Steuergerät, verschiedene HELLA Rapid Control Units als Sensorsteuereinheit oder Gateway, die Telematikeinheit und der SEEROAD Kabelbaum appliziert. Abbildung 26 zeigt das im Kofferraum verbaute MARWIS und die MABx. Besonderer Aufwand entstand bei der Applikation des Regensensors und der Frontkamera. Beide Systeme müssen für jeden Fahrzeugtyp aufgrund spezifischer Scheibenneigung und Einbauhöhe appliziert werden. Der Aufwand für Montage und Anpassung der internen Parameter beläuft sich in beiden Fällen auf etwa 40 Stunden. Abbildung 27 zeigt eine Skizze der finalen Architektur des SEEROAD Systems inkl. Kabelbaum. Hier ist zu erkennen, dass für alle untersuchten Messprinzipien Muster verbaut sind. Die Radar Komponente wurde in einer 2-Bauteil Lösung mit ausgelagerter Signalvorverarbeitung verbaut. Bei 2 Komponenten mussten Gateways eingesetzt werden, um das von der jeweiligen Komponente gesendete LIN Signal in den SEEROAD CAN Bus aufzunehmen. Die von den Komponenten gesendeten Signale werden über einen CAN-Bus an einen Rechner (Car PC) gesendet und aufgezeichnet. Die Skizze in Abbildung 27 zeigt 3 Steuergeräte (ECU), die für die Übersetzung der jeweiligen Kommunikationsprotokolle ins Zielformat zuständig sind. Diesen ECUs ist in Abbildung 27 der Name der zugehörigen Komponente vorangestellt. Die ECU FW-CAN dient zum einen dazu, nur die Signale weiterzuleiten, die im SEEROAD System benötigt werden, und zum anderen dazu, dass keine Signale an das Fahrzeug zurückgesendet werden. Eine objektive Referenz wird vom MARWIS generiert. Zusätzlich können der aktuelle Fahrbahnuntergrund und -zustand vom Beifahrer über eine grafische Benutzeroberfläche am Display des Car PCs synchron geloggt werden. Einen letzten Teilverbund des Systems bildet die Car2X Kommunikation, bestehend aus einem UMTS Modul, einem GPS Empfänger und einer Telematik ECU in der die eingehenden Signale des CAN-Bus gebündelt und das Protokoll übersetzt werden.

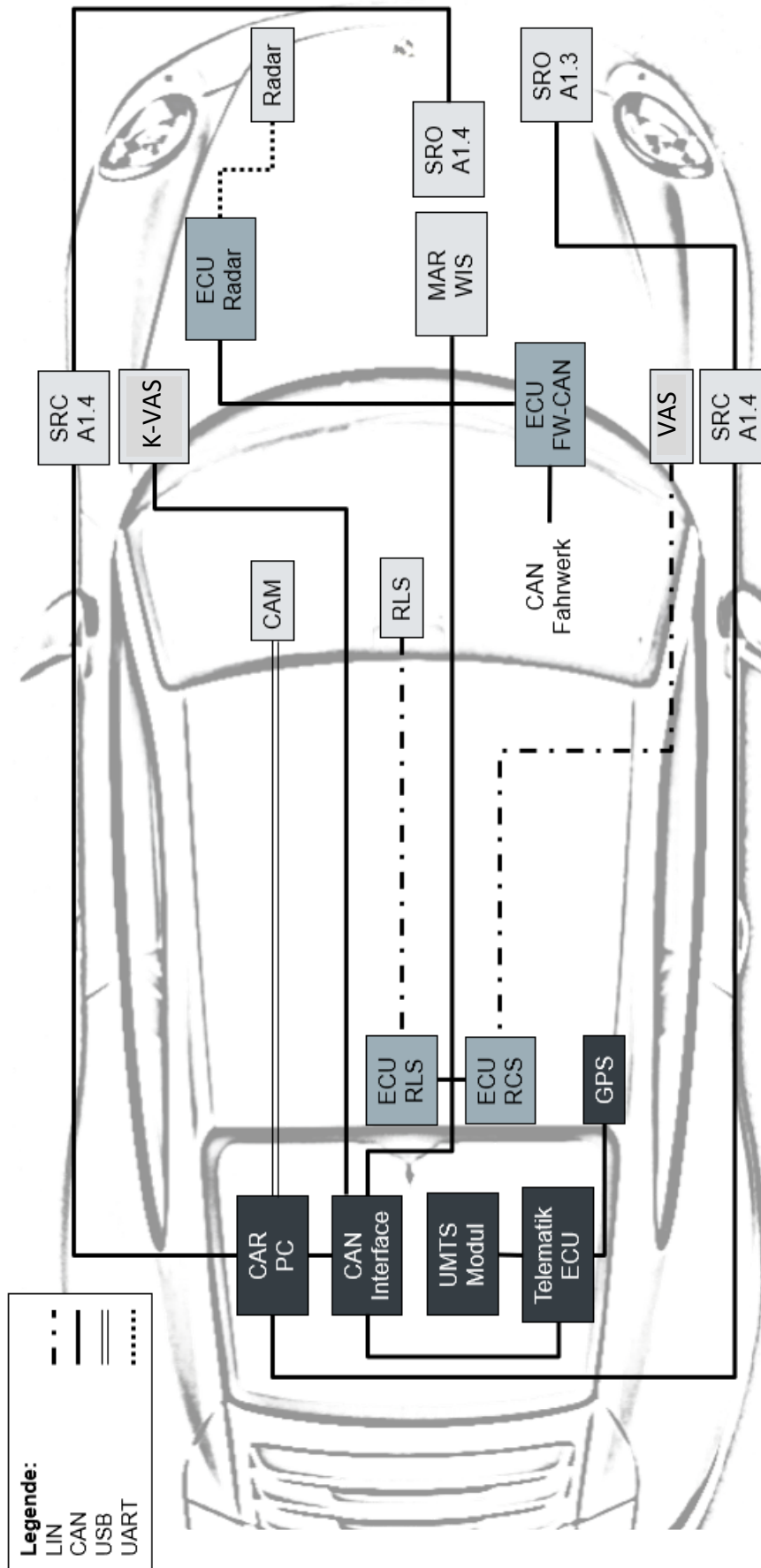


Abb. 27: Skizze des SEEROAD-Systems im Erprobungsfahrzeug.



Abb. 28: Beispiele trockener und nasser Fahrbahnen.



Abbildung 29: Momentaufnahmen der Winterprobung 2019 auf feuchter (links), nasser (mittig) und verschneiter (rechts) Fahrbahn.

### 1.4.3 Prüfstandtests und Fahrerprobung

Ab der zweiten Hälfte des Jahres 2018 wurden bei HFK Prüfstandtests und Fahrerprobungen mit SEEROAD Komponenten oder Teilsystemen durchgeführt. Hervorzuheben sind in diesem Kontext

- die Wintererprobung des Partners Porsche im Februar und März 2018, bei der Mitarbeiter der Firma Porsche von Weissach nach Finnland und zurückfuhren, u. A. zur Sammlung synchronisierter Daten von Regensensor und Vibroakustik,
- die Prüfstanderprobung im Oktober 2018 auf dem Trainingsgelände des ADAC in Bremen, die zusammen mit Teilnehmern des Partners ITEM erfolgte, bei der Vibroakustik, kapazitive und optische Sensorik eingesetzt wurden,
- die gemeinsame Wintererprobung der Partner IMECH, HFK und Porsche im Februar 2019, die von Weissach nach Arjeplog in Schweden führte, und bei der Vibroakustik, kapazitive Sensorik und Radar eingesetzt wurden,
- Fahrten in und um Bremen im Sommer und Herbst 2019 mit Mustern aller Messprinzipien und Telematik, sowie
- Prüfstanderprobungen im Herbst 2019 auf dem Gelände der Automotive Testing Papenburg GmbH mit gezielten Einfahrten in bewässerte Streckenabschnitte.

Winterliche Fahrbahnzustände konnten mit dem Verbundsystem nicht befahren werden. Gemäßigt nasse Fahrbahnen, wie sie im regulären Fahrbetrieb zu erwarten sind, konnten in ausreichenden Umfang befahren und vermessen werden. Abbildung 28 zeigt 3 Momentaufnahmen von unterschiedlich stark bewässerten Fahrbahnen, die während einer Fahrerprobung aufgenommen wurden. Zusammenfassend sind in den folgenden Tabellen 4 und 5 die gefahrenen Minuten bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Fahrbahnzuständen gelistet. Dabei wurden die Messungen in Tabelle 4 mit allen SEEROAD Komponenten gemacht. Die Messungen in Tabelle 5 wurden zur Vorbereitung der abschließenden Fahrerprobungen mit unterschiedlichen Subsystemen durchgeführt.

		Nässe [ $\mu\text{m}$ ]			
		Trocken	Feucht	Nass	Sehr nass
		< 10	< 100	< 500	$\geq 500$
Geschwindigkeit [km/h]	0...10	47.72	18.25	23.77	5.95
	10...20	20.12	7.97	3.77	0.53
	20...40	34.68	14.75	9.45	2.33
	40...60	65.73	30.58	25.87	9.75
	60...85	94.28	42.30	28.37	4.85
	85...115	83.28	46.97	38.48	6.93
	115...150	40.82	55.95	32.10	7.60

Tab. 4: Gefahrene Minuten bei referenzierter Fahrbahnnässe zwischen dem 11.10.2019 und dem 31.12.2019.

		Nässe [ $\mu\text{m}$ ]			
		Trocken	Feucht	Nass	Sehr nass
		< 10	< 100	< 500	$\geq 500$
Geschwindigkeit [km/h]	0...10	140.38	47.08	28.05	2.45
	10...20	31.37	10.72	10.00	0.97
	20...40	72.58	34.47	21.80	5.22
	40...60	122.33	55.97	32.13	6.97
	60...85	146.67	43.97	30.30	9.12
	85...115	121.28	86.82	160.95	92.50
	115...150	165.17	111.80	85.77	30.92

Tab. 5: Gefahrene Minuten bei referenzierter Fahrbahnnässe zwischen dem 12.08.2019 und dem 11.10.2019.

## 1.5 Zusammenfassung

Mit dem Verbundvorhaben „System zur autonomen Fahrbahnzustandserkennung“ hat sich ein Konsortium aus Partnern der Wissenschaft und Automobilindustrie der Aufgabe gewidmet, einem Fahrzeug mittels innovativer Technologie, eine automatische Klassifikation der lokalen Zwischenschicht bereitzustellen. Dabei wurden neue Sensoren, Methoden der Sensorfusion, des maschinellen Lernens und Regelsysteme für die Fahrerassistenz untersucht und bewertet. Das Verbundsystem, das zum Ende der Projektlaufzeit vorgestellt werden konnte ist in der Lage automatisch und zuverlässig unterschiedlich starke Benetzungen der Fahrbahnoberfläche mit Wasser zu klassifizieren. Die Funktionalität des Systems unter winterlichen Bedingungen konnte in diesem Zusammenhang nur für einzelne Komponenten, und nicht im Verbund gezeigt werden, was in erster Linie auf die Witterungsbedingungen im Winter 2019/2020 zurückzuführen ist. Dazu konnte simulativ gezeigt werden, dass eine flächendeckende Verwendung eines Abstandsregelautomaten, der die lokale Zwischenschicht berücksichtigt, Verkehrsunfälle reduzieren kann.

Im Teilprojekt „Elektrodenstrukturen, Sensorelektronik und Systemintegration“ konnte genutzt werden, dass Spritzwasser aufgrund von Fahrbahnnässe in der Radhausschale aufprallt und neben akustischen Signalen auch eine Änderung des Dielektrikums bewirkt. Kapazitive Sensoren in den Radhausschalen sind eine sinnvolle Ergänzung zur vibroakustischen Messung des Spritzwassers und ermöglichen z.B. eine Erweiterung des Messbereichs nach unten. Als Ergebnis entstand ein Sensor zur fusionierten Messung von Vibroakustik und Kapazität. Darüber hinaus wurde ein Radarsystem aufgebaut und getestet, mit dem senkrecht zur Fahrbahnoberfläche Impulsfolgen ausgesendet werden, aus deren Reflektion auf die vorliegende Zwischenschicht geschlossen werden kann.

Bei HFK wurden alle prototypischen Systeme, die innerhalb von SEEROAD entwickelt wurden an Versuchsträgern appliziert und in diversen Erprobungsfahrten auf Prüfgeländen und im Straßenverkehr getestet. Zusätzlich wurde in einen Versuchsträger ein Telematikmodul integriert, das es ermöglicht, die lokalen Messergebnisse des Systems mit anderen Verkehrsteilnehmern zu teilen.



## 2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die im bewilligten Fördergelder wurden fast ausschließlich zur Finanzierung des Personals eingesetzt. Dabei entstanden geringe Abweichungen gegenüber der Budgetplanung. In den Abbildungen 30 und 31 sind die prozentualen Verteilungen der Budgetplanung und der Ausgaben gegenübergestellt. Die Position Sonstiges dient der verbesserten Lesbarkeit der Diagramme und stellt die Summe kleinerer Positionen dar.

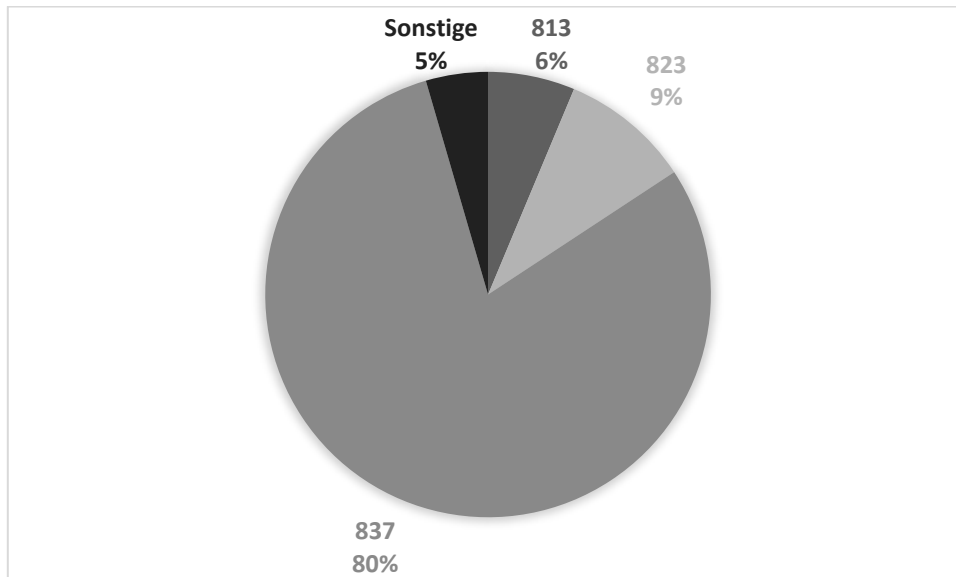


Abb. 30: Prozentuale Verteilung der geplanten finanziellen Aufwände.

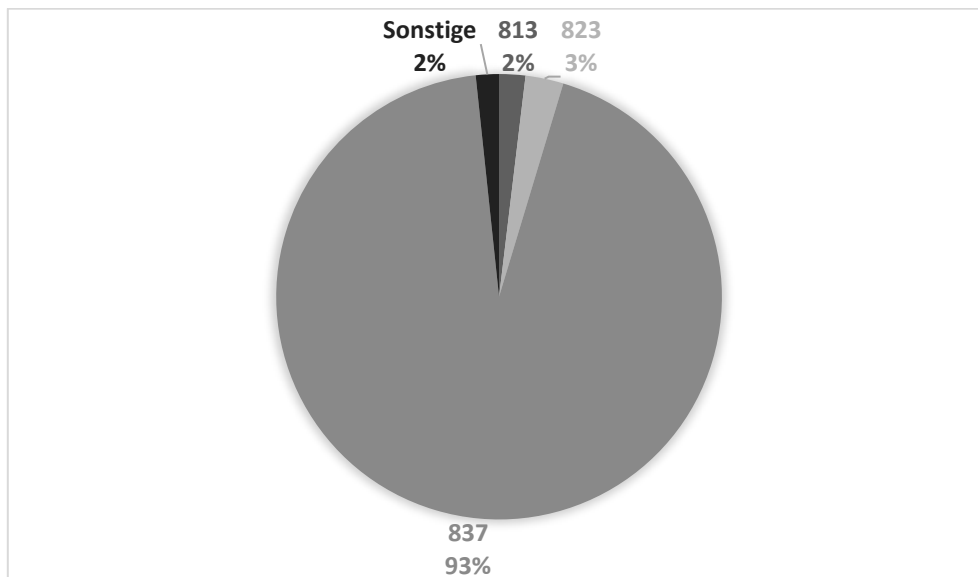


Abb. 31: Prozentuale Verteilung der tatsächlichen finanziellen Aufwände bei HFK.

### **3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die durchgeführten Arbeiten sowie die verwendeten Mittel waren notwendig und angemessen. Das Projekt wurde im Wesentlichen gemäß der im Projektantrag vorgestellten Planung durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen. Der Fortschritt bei der Bearbeitung der Arbeitspakete wurde dem Projektträger in regelmäßigen Zwischenberichten mitgeteilt. Die entstandenen Kosten entsprechen ebenfalls bis auf geringe Abweichungen der Planung, siehe Abschnitt 1.1.

### **4 Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die im Rahmen des Verbundvorhabens SEEROAD erzielten Ergebnisse, die gewonnenen Daten und Erkenntnisse sind im Rahmen zukünftiger Entwicklungen bei HELLA verwertbar. Zum einen wurden unterschiedliche innovative Messmethoden zur Erfassung des Fahrbahnzustands in Form von Prototypen getestet, deren Wirtschaftlichkeit bisher nicht ausreichend untersucht wurde. Hier besteht die Möglichkeit neuer Produktentwicklungen in einem relativ neuen Marktsegment. Neben der Verbesserung des dynamischen Verhaltens automatisierter Fahrzeuge kann die Kenntnis des Fahrbahnzustands bei elektrischen Fahrzeugen zur Verbesserung des Rekuperationsmanagements verwendet werden. Sowohl im Zusammenhang mit der Automatisierung als auch mit der Elektrifizierung wird in der Automobilindustrie von Megatrends gesprochen.

#### **4.1 Wissenschaftliche Veröffentlichungen**

Seitens HFK wurden keine Ergebnisse oder Inhalte des Projektes SEEROAD veröffentlicht. Dies ist zum aktuellen Zeitpunkt auch nicht geplant.

# Literatur

- [1] **Mowic AB**, With TrackIce you detect slippery roads in time. [Online] <http://www.mowic.se/en/ice-warning-system/>.
- [2] **A. Troiano, E. Pasero, L. Mesin**, *New System for Detecting Road Ice Formation*, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT. 2011, Bd. 60, 3.
- [3] **H.-J. Görich, S. Jacobi**, Verfahren zur Erfassung der Benetzung einer Fahrbahnoberfläche, *DE 4 213 221 C2*, April 1992.
- [4] **S. Koskinen et. al.**, *FRICTION Abschlussbericht*. 2009.
- [5] **Continental Corporation**, New sensor fusion approach recognizes rain, snow and ice on the road. *Pressemitteilung*. 2010.
- [6] **K. Böhm**, Method and device for determining the roadway condition, *US 7 374 006 B2*, Mai 2008.
- [7] **G. Macelloni, R. Ruisi, P. Pampaloni, S. Paloscia**, Microwave radiometry for detecting road ice. *IEEE*. 1999.
- [8] **R. Finkle, A. Schreck, G. Wanielik**, Polarimetric road condition classification and data visualization. *IEEE*. 1995.
- [9] **G. Magerl, W. Pritzl, P. W. Fröhling**, Remote Sensing Of Road Condition. *IEEE*. 1991.
- [10] **N. Kees, J. Detlefsen**, Road surface classification by using a polarimetric coherent radar module at millimeter waves. *IEEE*. 1994.