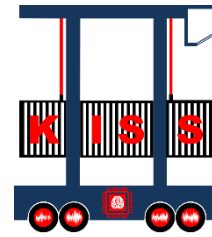


Schlussbericht



KISS KI-Basiertes Schadens- und Verschleißerkennungs-
system zur cloudbasierten Zustandsüberwachung von
Hybrid-Container-Fahrzeugen

Teilvorhabenbezeichnung:

Sensorbasierte Schadenserkenung in Radantrieben

Förderkennzeichen:

19I21015B

Laufzeit:

1. Juli 2021 – 30. Juni 2024



Kessler & Co. GmbH & Co. KG
Hüttlinger Str. 18-20
73453 Abtsgmünd
Tel.: +49 7366 / 81-0
Fax: +49 7366 / 81-69
sales@kessler-axles.com
www.kessler-axles.de



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Teil 1 – Kurzdarstellung	5
1 Aufgabenstellung	5
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wird	7
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wird	10
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
Teil 2 – Eingehende Darstellung	12
6 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	12
6.1 Radantrieb	13
6.2 Grundsatzuntersuchungen auf den Laborprüfständen	15
6.2.1 Vorbereitungen	15
6.2.2 Leerlaufprüfstand	21
6.2.3 Leistungsprüfstand	21
6.3 Analyse von Verschleiß- und Schadensbildern	25
6.4 Weiterführende Untersuchungen auf den Laborprüfständen.....	30
6.4.1 Leerlaufprüfstand	30
6.4.2 Leistungsprüfstand	32
6.5 Drehzahlmessung	34
6.6 Funktionsmuster	39
6.7 Fazit	41
7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	41
8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	41
9 Verwertbarkeit der Ergebnisse	42
10 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	42
11 Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	42
12 Literaturverzeichnis	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Systemdarstellung des KI-Analysesystems zur Überwachung von Sonderfahrzeugen	6
Abbildung 3.1 Projektphasen des Forschungsprojektes KISS	8
Abbildung 3.2 Struktogramm zur Bearbeitung der Arbeitspakete	9
Abbildung 3.3 Arbeitspaketstruktur und Zeitplan des Vorhabens	10
Abbildung 6.1 Bestandteile des KI-Basierten Schadens- und Verschleißerkennungssystems	12
Abbildung 6.2: Explosionszeichnung Radantrieb	13
Abbildung 6.3: Explosionszeichnung des inneren (a) und äußeren (b) Planetengetriebes.	14
Abbildung 6.4: Verschleißerkennungen an einem Radlager	14
Abbildung 6.5: Planflächen an den zylindrischen Außenkonturen	15
Abbildung 6.6: Planflächen am Steg und Messschrauben an der Radnabe	16
Abbildung 6.7: Messschrauben am Bremsenträger	17
Abbildung 6.8: Prüfstandsaufnahme zur Abstützung des Antriebssystems Teil 1	18
Abbildung 6.9: Prüfstandsaufnahme zur Abstützung des Antriebssystems Teil 2	19
Abbildung 6.10: Antriebsflansch	20
Abbildung 6.11: Messungen der statischen Transferpfadanalyse	21
Abbildung 6.12: Aufbau des neuen Radantriebes auf dem Leistungsprüfstand	22
Abbildung 6.13: Sensorik am Radantrieb auf dem Leistungsprüfstand	22
Abbildung 6.14: Sollwertkurve - Leerlauf	23
Abbildung 6.15: Sollwertkurve - Drehzahlstufen	23
Abbildung 6.16: Sollwertkurve - Momentenstufen	24
Abbildung 6.17: Sollwertkurve - Drehzahlrampen	24
Abbildung 6.18: Sollwertkurve - Momentensprünge	24
Abbildung 6.19: Äußeres Radlager – Rollen	25
Abbildung 6.20: Äußeres Radlager - Außenring	26
Abbildung 6.21: Planet langsames Planetengetriebe	26
Abbildung 6.22: Planet schnelles Planetengetriebe	27
Abbildung 6.23: Zahnwellenverbindung des Achstrichters	27
Abbildung 6.24: Rollen der äußeren Radlager	28
Abbildung 6.25: Außenringe der inneren Radlager	29
Abbildung 6.26: Rollen des äußeren Radlagers am VC102 Rad 6 im Vergleich	29
Abbildung 6.27: Außenring des inneren Radlager am VC102 Rad 6 im Vergleich	30
Abbildung 6.28: synthetische Schäden am Radlager	32
Abbildung 6.29 schnelle Sonne mit leichten synthetischen Schäden	33
Abbildung 6.30 langsamer Planet mit schweren synthetischen Schäden	34
Abbildung 6.31: Zusammenbau der Teile für die Drehzahlmessung am Leerlaufprüfstand ...	35
Abbildung 6.32: Halter für Drehzahlsensor (Leerlaufprüfstand)	36
Abbildung 6.33: Zentrier-Adapter für Drehzahlsensor (Leerlaufprüfstand)	36
Abbildung 6.34: Geber für Drehzahlsensor (Leerlaufprüfstand)	37
Abbildung 6.35: Einbausituation Elektromotor mit Resolver im Fahrzeug	37
Abbildung 6.36: Integrationsuntersuchung des Sensorgehäuses	38
Abbildung 6.37: Detaillierung des Sensorgehäuses	38
Abbildung 6.38 Schäden an den neuen Drehzahlmessstellen im Feldeinsatz	39
Abbildung 6.39: Hardware-Komponenten des Funktionsmusters (vorne links) und mobiles Messsystem (rechts)	40

Abbildung 6.40: Sensorik des Funktionsmusters am Radantrieb 40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6.1 Schadenkomponenten auf dem Leerlaufprüfstand 31
Tabelle 6.2 Schadenkomponenten auf dem Leistungsprüfstand - Einzelschäden 32
Tabelle 6.3 Schadenkomponenten auf dem Leistungsprüfstand - Kombinationsschäden 33

Teil 1 – Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

Das Projekt „KI-basiertes Schadens und Verschleißerkennungssystem zur cloudbasierten Zustandsüberwachung von Hybrid-Container Fahrzeugen“ (KISS) verfolgte das Ziel, unter Nutzung der Künstlichen Intelligenz eine intelligente Zustands-Überwachung der Radantriebe von Sonderfahrzeugen in Echtzeit zu ermöglichen. Dabei sollten Schäden frühzeitig erkannt und automatische Wartungsentscheidungen getroffen werden, um ungeplante Ausfälle zu minimieren und die Lebensdauer der Fahrzeuge zu maximieren. Das Vorhaben, das im Rahmen des Förderprogramms „Künstliche Intelligenz als Schlüsseltechnologie für das Fahrzeug der Zukunft“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert wurde, ist eine Kooperation zwischen den Partner:

- ANEDO GmbH (ANEDO)
- Kessler & Co. GmbH & Co. KG (Kessler)
- SEGNO Industrie Automation GmbH (SEGNO)
- der Universität Bremen, FB1 ITEM – Elektronische Fahrzeug- und Mobilitätssysteme (ITEM)
- HHLA Container Terminal Tollerort GmbH (HHLA)

Im Fokus des Projekts stand die Herausforderung, verschiedene Verschleißerscheinungen und spontan auftretende Schäden an den Radantrieben der Fahrzeuge zu erkennen. Besonders anspruchsvoll waren dabei die Bedingungen, unter denen die Fahrzeuge, wie z. B. Van-Carrier, betrieben werden, da diese oft in rauen Umgebungen wie Häfen eingesetzt werden. Da der Fahrer beim Beispiel des Van-Carrier durch die Konstruktion etwa 12 Meter von den Radantrieben entfernt sitzt, können akustische Warnsignale nicht wahrgenommen werden, was eine zusätzliche Komplexität in der Überwachung darstellt.

Das entwickelte Überwachungssystem nutzt Körperschallsignale, die an den Radantrieben erfasst und zusammen mit weiteren Fahrzeugdaten, wie beispielsweise den Drehzahlen, von KI-Algorithmen analysiert werden. Aufgrund der begrenzten Rechenleistung vor Ort werden die erfassten Daten bei erkannten Anomalien in ein Cloud-System übertragen, wo sie mittels rechenintensiver Verfahren weiter ausgewertet werden. Dieses System zur Schadenserkennung kann spezifische Schadentypen und deren Schweregrad erkennen und so gezielt zur Vermeidung von Folgeschäden beitragen. Zusätzlich ermöglicht ein ergänzendes System die Ermittlung der Restlebensdauer der Radantriebe, wodurch ein genauer Wartungszeitpunkt bestimmt werden kann.

Beide Systeme arbeiten zusammen in einem Gesamtsystem, das über eine cloudbasierte Web-Oberfläche standortunabhängig abrufbar ist. Diese Oberfläche ermöglicht Flottenbetreibern, detaillierte Informationen über den Zustand ihrer Fahrzeuge einzusehen, was sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile bieten kann. Durch die Analyse der Verschleißdaten und den Vergleich mit weiteren Parametern wie der Bodenbeschaffenheit oder der Qualität des Getriebeöls, können Maßnahmen ergriffen werden, um die Lebensdauer der Antriebe weiter zu optimieren. Die Systemtopologie des Gesamtsystems ist in Abbildung 1.1 gezeigt.

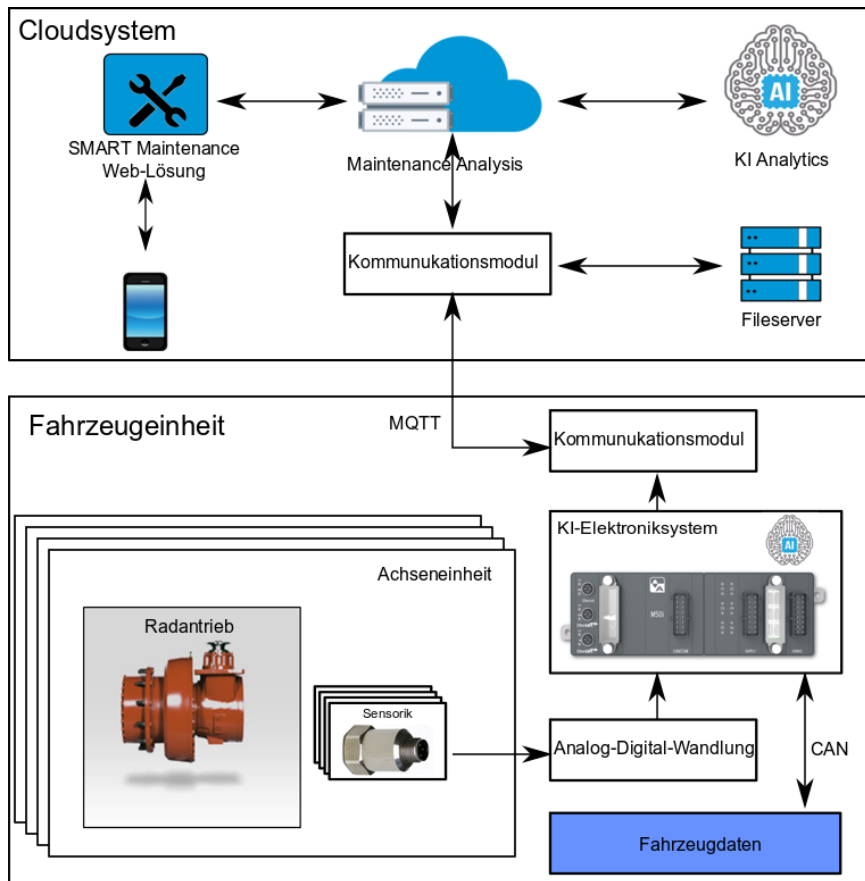


Abbildung 1.1 Systemdarstellung des KI-Analysesystems zur Überwachung von Sonderfahrzeugen

Die Umsetzung des Projekts KISS stellt somit einen bedeutenden Fortschritt in der intelligenten Überwachung und Instandhaltung von Sonderfahrzeugen dar, indem es dazu beiträgt, die Verfügbarkeit dieser Fahrzeuge zu steigern und gleichzeitig potenzielle ökologische Schäden zu minimieren.

Für das Teilvorhaben „Sensorbasierte Schadenserkennung in Radantrieben“ teil sich die Hauptverantwortung der Kessler & Co. GmbH & Co. KG (Kessler) auf in:

- Konzeption und Ausrüstung des Prüffeldes für die Radantriebserprobung und die Nachbildung typischer Schadens- und Verschleißbilder aus dem Feldgeschehen
- Konzeption, Durchführung und Bewertung von Prüffelderprobungen
- Konzeption, Entwicklung und Bewertung der sensorischen Zustandserfassung der Radantriebe und deren Komponenten
- Auswahl der Sensorik für die echtzeitfähige Zustandserfassung und Integration in die Radantriebe und deren Komponenten
- Aufbau von Aggregate-Prototypen und deren messtechnische Ausrüstung
- Messtechnische Untersuchung des nominalen Betriebsverhaltens und spezifischer Verschleiß- und Schadenbilder sowie Bereitstellung und Bewertung der Messdaten
- Analyse und Befundung der Verschleißerscheinungen und der Schadenbilder
- Ableitung und Bewertung charakteristischer Kenngrößen für die Verschleiß- und Schadenanalyse

Unterstützende Tätigkeiten finden unter anderem statt in den Bereichen:

- Analyse und Bewertung der Messdaten zur Ableitung charakteristischer Merkmale zur Zustandsanalyse
- Integration und Erprobung der KI-Elektronik-Komponenten und Sensorik im Prüffeld
- Planung und Bewertung der Feldversuche im realen Hafeneinsatz

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wird

Das Projekt KISS mit dem Förderkennzeichen 19I21015 wurde im Zeitraum vom 01.07.2021 bis zum 30.06.2024 durchgeführt.

Das Projekt KISS profitiert von den langjährigen Erfahrungen der Projektpartner in ihrem jeweiligen Fachgebiet. Durch dieses eingebrachte Know-How liefert jeder Projektpartner einen wichtigen Beitrag zur erfolgreichen Durchführung des Projekts.

Mit 20 Jahren Markterfahrung entwickelt und produziert die Firma ANEDO GmbH am Unternehmensstandort in Eydelstedt/Niedersachsen zukunftssichere Steuerungssysteme für alle Automatisierungsaufgaben, mit bis zu 15.000 Geräten pro Jahr. Durch ein modulares Baukastensystem werden individuelle Herausforderungen, sowohl einfachste Anwendungen als auch hochkomplexe Steuerungsprozesse, skalierbar umgesetzt. Dabei erstreckt sich die Wirkkette von der Sensorik und Aktorik bis hin zur Maschinenkommunikation.

Seit 1994 steht der Name SEGNO Industrie Automation für ein modernes und leistungsfähiges Unternehmen mit den Schwerpunkten Prozessvisualisierung, Datenbanken, ERP/MES Systeme, Reporting, Fernwirktechnik, Automatisierungstechnik und IT-Sicherheit. Zu den Kunden zählen sowohl die Betreiber von Produktionsanlagen wie auch Anlagen- und Maschinenbauunternehmen.

Kessler + Co ist ein führender Hersteller von Antriebskomponenten und Steuerungssoftware für schwere Mobilfahrzeuge. Auf einer Produktionsfläche von 130.000 m² entwickelt, fertigt und vertreibt Kessler Planetenachsen, Getriebe, Radantriebe und elektrische Antriebssysteme für eine Vielzahl an unterschiedlichen Anwendungen, darunter Baumaschinen, Mobilkrane, Umschlaggeräte und Untertagefahrzeuge.

Die Arbeitsgruppe Angewandte Elektronik- und Softwaresysteme am Institut für Theoretische Elektrotechnik und Mikroelektronik (ITEM) an der Universität Bremen beschäftigt sich mit der Algorithmen Entwicklung auf eingebetteten Systemen. Die Schwerpunkte liegen in der Entwicklung von modellbasierten Funktionen zur Signalanalyse und in der Entwicklung neuartiger Kommunikationsarchitekturen. Durch bereits getätigte Projekte können Erfahrungen mit körperschallbasierten Systemen für das Projekt KISS genutzt werden, um grundlegende Anforderungen an die Wirkkette eines Echtzeitsystems zu definieren.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt KISS wurde entsprechend der Gesamtvorhabenbeschreibung durchgeführt. Über etwaige Abweichungen innerhalb der Arbeitspakete wurde im Rahmen der Zwischenberichte informiert. Um die Arbeitspakete, gerade in der Anlaufphase des Projektes, effektiv zu gestalten, wurde eine Regelkommunikation der Projektpartner ANEDO, SEGNO, KESSLER und ITEM

im vierwöchigen Rhythmus durchgeführt. Hierbei konnten aktuelle Herausforderungen und Handlungsbedarfe effizient abgestimmt werden. Umgesetzt wurde die Regelkommunikation als Web-Meeting.

Zudem wurde nach Bedarf alle sechs bis 12 Monate ein Gesamtkonsortiumstreffen durchgeführt, in welchem eine gemeinsame Bewertung der bisherigen Ergebnisse und Planung der restlichen Aufgaben zur Erreichung der Projektziele erfolgte. Ergänzt wurden diese Treffen um Workshops, welche in kleineren Besetzungen zur Erarbeitung spezifischer Aufgaben veranstaltet wurden. So erfolgte beispielsweise eine Reihe an Workshops unter Beteiligung der Partner ITEM und ANEDO für die Messungen auf den Prüfständen des Partners KESSLER.

Das dreijährige Forschungsprojekt KISS wurde in drei einjährige Phasen aufgeteilt und durchgeführt, wie in Abbildung 3.1 dargestellt.

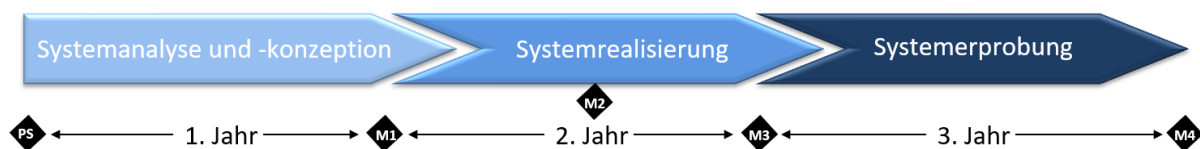


Abbildung 3.1 Projektphasen des Forschungsprojektes KISS

In der ersten Phase, der Systemanalyse und -konzeption, wurden wichtige Anforderungen und Spezifikationen an das Gesamtsystem sowie an die Teilsysteme erarbeitet. Die Ableitung der Spezifikationen erfolgte durch die Auswertung diverser Grundsatzuntersuchungen, welche sowohl dynamische Messungen auf den Prüfständen und im Hafenumfeld als auch statische Messungen zur Charakterisierung des Prüfgetriebes beinhalteten. Dadurch konnten die Messsysteme zusammengestellt und validiert werden.

In der zweiten Projektphase, der Systemrealisierung, erfolgte die Durchführung von strukturierten Messkampagnen. Mit Hilfe dieser wurde eine Signalverarbeitungskette aufgesetzt. Nachgelagert wurden die KI-Systeme zur Schadensüberwachung und zur Prognose der Restlebensdauer für die im Prüfstand aufgezeichneten Daten durch den Partner ITEM entworfen.

In der letzten Projektphase, der Systemerprobung, wurden Messkampagnen im Hafenumfeld, unter Verwendung der von der Firma ANEDO im Fahrzeug integrierten Elektronik, durchgeführt. Anhand dieser erfolgte die Anpassung und Optimierung der im Prüfstandumfeld entwickelten KI-Systeme. Diese wurden im Anschluss in das Gesamtsystem integriert.

Nach Abschluss jeder Projektphase erfolgte eine Zielkontrolle durch vorab definierte Meilensteine. Zudem erfolgte nach der Hälfte der Projektlaufzeit eine Bewertung der bisherigen Ergebnisse sowie eine Prüfung, ob eine Erreichung der Projektziele zum Projektende möglich ist. Die Meilensteine sind im Folgenden aufgelistet:

Projektstart (PS):

- Kooperationsvertrag ist von allen Projektpartnern unterschrieben
- Organisation des Projektmanagements und Zeitplan im Konsortium ist abgestimmt
- Projekt Kick-Off terminiert und geplant

Meilenstein 1 (M1):

- Systemkonzept ist verabschiedet und Einsatzfälle definiert
- Konzepttauglichkeit der Verschleiß- und Schadenerkennung liegt vor
- Realisierbarkeit und Integrationsfähigkeit der Systemkomponenten ist nachgewiesen

Meilenstein 2 (M2):

- Die Verbaubarkeit des Elektroniksystems an bzw. in den Antriebskomponenten der Van Carrier ist nachgewiesen
- Lager- und Verzahnungsschäden können verlässlich durch die elektronische Zustandsüberwachung erkannt werden
- Die gesamte Wirkungskette des Systems von der Erfassung des Schadens über Auswertung in der Cloud (BigData/KI) ist konzeptionell entwickelt

Meilenstein 3 (M3):

- Teilsystemkomponenten liegen als fahrzeugtaugliche Muster vor
- Systemelektroniken zur Verschleiß- und Schadenerkennung sind in den Versuchsfahrzeugen verbaut

Meilenstein 4 (M4):

- Versuchsfahrzeuge sind als Demonstratoren aufgebaut und einsatzbereit
- Felduntersuchungen sind abgeschlossen und Bewertung der Ergebnisse liegt vor
- Erste Szenarien für eine mögliche Markteinführung liegen vor

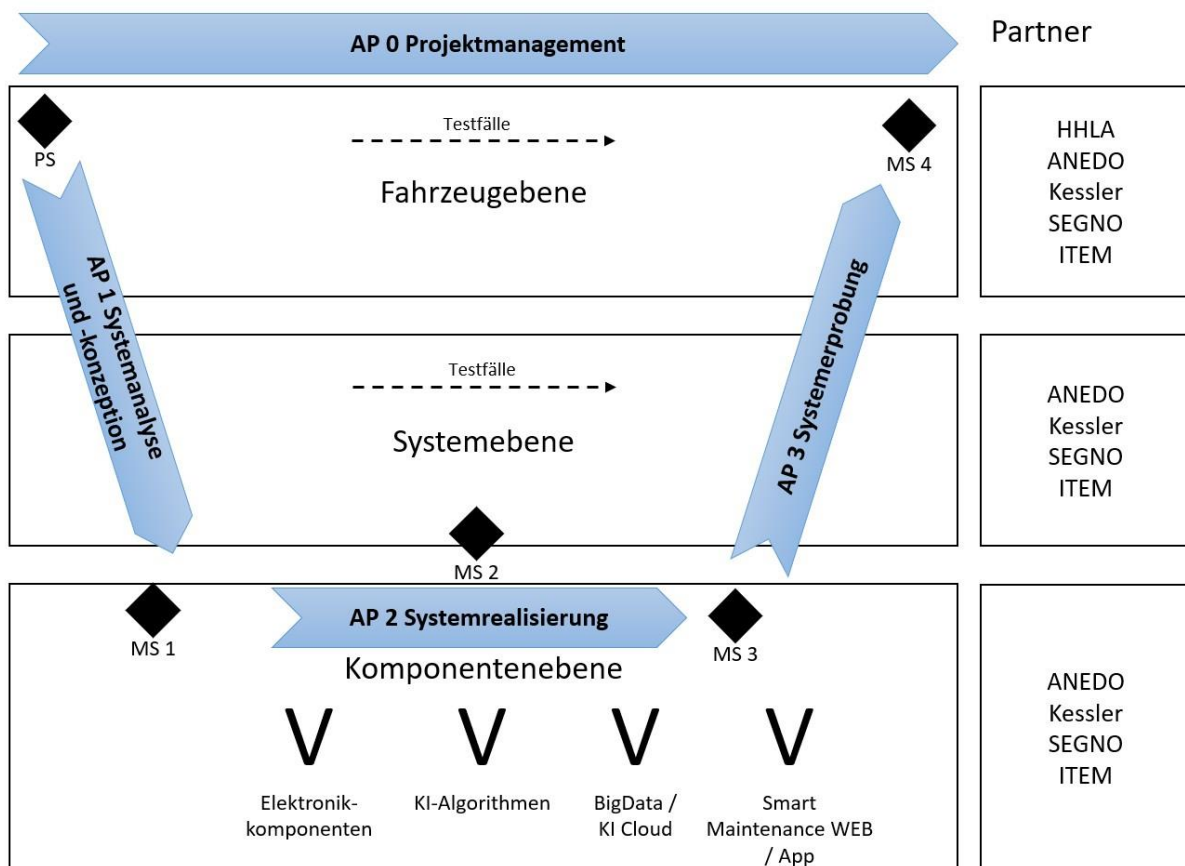


Abbildung 3.2 Struktogramm zur Bearbeitung der Arbeitspakete

Die Planung der Arbeitspakete erfolgte in Form eines V-Modells zur sukzessiven Zerlegung der Aufgaben in einzelne Ebenen und anschließender Zusammenführung der Ergebnisse in ein Gesamtsystem auf Fahrzeugebene. Die Struktur ist in der Abbildung 3.2 dargestellt.

Zur Gewährleistung einer erfolgreichen Zusammenarbeit bei der verteilten Entwicklung der Einzelkomponenten wurden pro übergeordnetem Arbeitspaket mehrere Teilarbeitspakete definiert, die gemeinsam im Gesamtkonsortium abgearbeitet wurden. In Abbildung 3.3 sind neben den übergeordneten Arbeitspaketen auch die insgesamt fünfzehn Teilarbeitspakete und deren zeitliche Einordnung im Projektverlauf dargestellt.

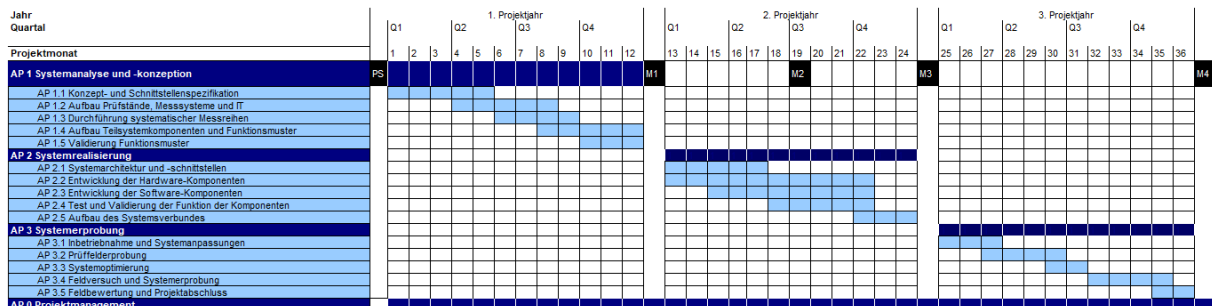


Abbildung 3.3 Arbeitspaketstruktur und Zeitplan des Vorhabens

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wird

Die Logistikbranche weist steigende Umschlagszahlen auf. Besonders im Hafenumfeld ist Zeit das entscheidende Kriterium, die Liegezeiten von Schiffen sollen möglichst kurzgehalten werden, um die Kosten zu verringern und den Umschlag zu erhöhen. Der Hamburger Hafen ist der größte deutsche und drittgrößter Hafen in Europa. Der assoziierte Partner HHLA ist ein führender europäischer Hafen- und Transportlogistikkonzern. Um im internationalen Wettbewerb mithalten zu können, ist ein reibungsloser Ablauf unerlässlich. Um diesen zu gewährleisten ist ein planungssicherer Einsatz der Van-Carrier notwendig, welche für den bodenseitige Umschlag eine Schlüsselrolle spielen.

Eine der entscheidenden und verschleißanfälligen Komponenten im Van-Carrier stellen die Antriebseinheiten und insbesondere die zweistufigen Planetengetriebe dar. Im Bereich der Antriebstechnik sind die Anforderungen in den letzten Jahren stark gestiegen. Anforderungen im Bereich Dimensionierung, Kosten, Energieverbrauch und Langlebigkeit müssen erfüllt werden, um im internationalen Wettbewerb mithalten zu können. Zugleich sind auch Steigerungen im Umsatz im Bereich der Antriebstechnik in Deutschland zu erkennen. Nach einem, vermutlich durch Corona bedingten Einbruch im Jahr 2020 setzt sich der steigende Trend seit 2021 fort und erzielte 2022 den bislang höchsten Umsatz mit 20,17 Millionen Euro [1].

Im Bereich der Zustandsüberwachung von Antriebseinheiten ist eine Reihe von Veröffentlichungen bereits vor zu finden. Allerdings beziehen diese sich größtenteils auf separate Untersuchungen von Lager- oder Verzahnungskomponenten. Eine Untersuchung im Getriebeverbund ist selten. Zudem ist eine Betrachtung im Feldeinsatz, im Projekt KISS der Hafen, nicht bekannt. Im Folgenden werden einzelne Ergebnisse präsentiert, die als Ausgangspunkt für das vorliegende Projekt herangezogen wurden.

In [3] erfolgt ein Review von gängigen Methoden im Bereich der Schadensüberwachung von Planetengetrieben. Dieses enthält sowohl Grundlagen zum Aufbau des Planetengetriebes als auch Charakteristika. Zudem wird ein guter Überblick über den wissenschaftlichen Stand der

Schadensüberwachung gegeben. Unterschieden wird dabei in Methoden, welche auf Simulationen basieren, sowie in Signalverarbeitungsmethoden. Unter die Simulationsmodelle fallen Ansätze zur Simulation der Schwingungsantwort, Simulationen von Schäden oder die Entwicklung von Finite Elemente Methoden zur Abbildung von Schwingungsausbreitungen.

Für Signalverarbeitungsmethoden werden Methoden basierend auf Signale im Zeit-, Frequenz- und Zeit-Frequenzbereich vorgestellt. Bei Untersuchungen im Zeitbereich werden typischerweise statistische Merkmale verwendet, im Frequenzbereich hingegen ist die Überwachung von Schadensfrequenzen und deren Seitenbänder üblich.

Der erfolgreiche Einsatz von Simulationsansätzen sowie Frequenzüberwachungen ist allerdings für nicht-stationäre Schwingungssignale bereits mehrfach widerlegt worden. In [4] werden beispielsweise die Grenzen der Fourier-Transformation für Überwachungen unter variierenden Betriebsbedingungen vorgestellt. Das benannte Review-Paper stellt dabei die Schwierigkeiten bei der Überwachung vor und gibt einen Überblick über alternative Ansätze. Diese basieren überwiegend auf Untersuchungen im Zeit-Frequenzbereich. Üblich ist dabei zum Beispiel die Verwendung der Short Time Fourier Transformation oder die Verwendung von Signalzerlegungen wie Wavelet Transform oder Empirical Mode Decomposition. Als Grundlage zur Signalzerlegung von Schwingungssignalen zur Maschinenüberwachung kann das Review in [5] herangezogen werden.

Die vorgestellten Datengrundlagen können dann für Deep Learning Methoden zur Überwachung der Antriebseinheiten verwendet werden. In [6] erfolgt ein Überblick über Machine und Deep Learning Methoden, die bereits erfolgreich für die Detektion von Lagerschädigungen verwendet wurden. Beispielsweise konnte unter Zuhilfenahme eines adaptiven Deep Convolutional Neural Networks (CNN) eine Differenzierung in vier Lagerschädigungen erfolgen in [7]. In [8] hingegen wurden adaptive überlappende CNNs verwendet, um die Detektion anhand von Zeitsignalen zu verbessern. Diese Methode konnte für einen öffentlichen Datensatz sehr gute Ergebnisse erzielen, wobei nur 5 % der Daten fürs Training verwendet wurden.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Realisierung der definierten Arbeitsziele war eine enge Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern (ITEM, Anedo, Kessler, SEGNO) während der gesamten Projektlaufzeit notwendig. Zum fachlichen Abgleich und zur Bewertung der Zwischenergebnisse in der laufenden Projektarbeit wurden regelmäßige meist digitale Arbeitstreffen mit den Projektpartnern durchgeführt. Zudem wurden zusätzlich der assoziierte Partner (HHLA) stark eingebunden und deren Fachwissen konsultiert und genutzt.

Im Rahmen des Projektes KISS gab es keine weitere Zusammenarbeit mit externen Partnern außerhalb des Projektkonsortiums.

Teil 2 – Eingehende Darstellung

6 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Wie in Kapitel 1 erläutert, ist das Gesamtziel des Projektes KISS die Zustands-Überwachung der Radantriebe von Sonderfahrzeugen. Die Radantriebe – in diesem Projekt von dem Partner Kessler hergestellt und durch den assoziierten Partner HHLA in den Van-Carrier am Hafen eingesetzt – werden in Kapitel 6.1 kurz erläutert.

Das zu entwickelnde System teilt sich auf in die Fahrzeuginheit und das Cloudsystem. Die Fahrzeuginheit wiederum setzt sich zusammen aus dem Fahrzeug – in diesem Projekt dem Van-Carrier – und insbesondere dessen Radantrieben, der Sensorik, der On-Bord-Elektronik sowie dem MQTT Broker als Kommunikationsmodul zum Cloudsystem. Das Cloudsystem ist untergliedert in das KI-System, den File-Server und die Datenbank, siehe Abbildung 1.1 und Abbildung 6.1.

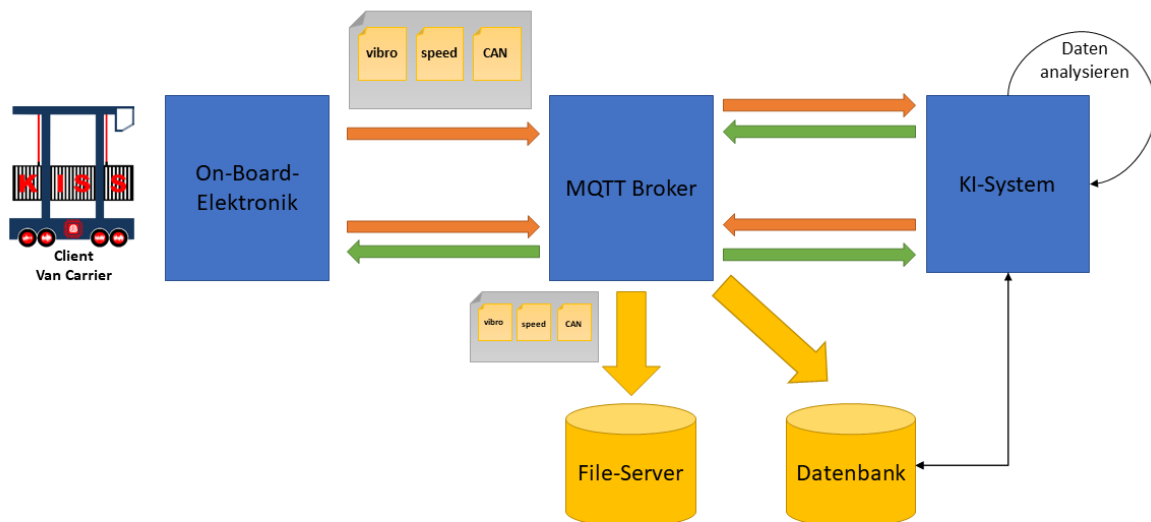


Abbildung 6.1 Bestandteile des KI-Basierten Schadens- und Verschleißerkennungssystems

Die Aufgaben von Kessler waren im Wesentlichen bezogen auf den Radantrieb, dessen Grundsatzuntersuchen bezüglich des Schwingungsverhaltens auf den Laborprüfständen, die erforderliche akustische Kopplung der geeigneten Sensorik an den Radantrieb zur Erfassung der Schwingungen desselben, den systematischen Messreihen und der Validierung des Funktionsmusters im Rahmen der Systemanalyse und -konzeption sowie der Prüffelderprobung im Rahmen der Systemrealisierung und der Systemerprobung.

Es stehen zwei neue Radantrieb und drei gebrauchte Radantriebe aus dem realen Feldeinsatz bei dem Projektpartner HHLA für die Laborversuche zur Verfügung. Da die Lagervorspannung einen hohen Einfluss auf die akustische Anregung durch die Radlagerung hat, wurden in einer ersten Messreihe ein neuer Radantrieb und die drei gebrauchten Radantriebe auf den Laborprüfständen untersucht, bevor die Befundung der Zustände der gebrauchten Radantriebe durchgeführt wurde, welche eine Zerlegung derselben und damit ein Öffnen der Radlagerung einschließt. Diese erste Messreihe, erweitert um die erforderlichen Vorbereitungen damit die

Radantrieb auf den Prüfständen betrieben werden können ist in Kapitel 6.2 erläutert. Die anschließende Befundung nach der Zerlegung bzw. Demontage der Radantriebe ist in Kapitel 6.3 beschrieben und die weiteren Messreihen in Kapitel 6.4.

Kapitel 6.5 enthält Erläuterungen zur realisierten Drehzahlmessung an den Radantrieben und Kapitel 6.6 stellt die Inbetriebnahme des Funktionsmusters dar.

6.1 Radantrieb

Ein Ausschnitt des relevanten Radantriebes ist in Abbildung 6.2 und in Abbildung 6.3 dargestellt. Anhand von Erfahrungswerten der Partner Kessler und insbesondere HHLA als Betreiber sind erste Festlegungen getroffen worden, welche Schäden detektiert werden sollen. Dafür ist der Radantrieb auf den Typ R085.168.3g festgelegt worden. Zudem sind sowohl die Verschleißerkennungen am inneren und äußeren Radlager, die in der Abbildung 6.2 dargestellt sind, als auch am inneren und äußeren Planetengetriebe (PL), die in der Abbildung 6.3 aufgeführt sind, als Fokus festgelegt worden.

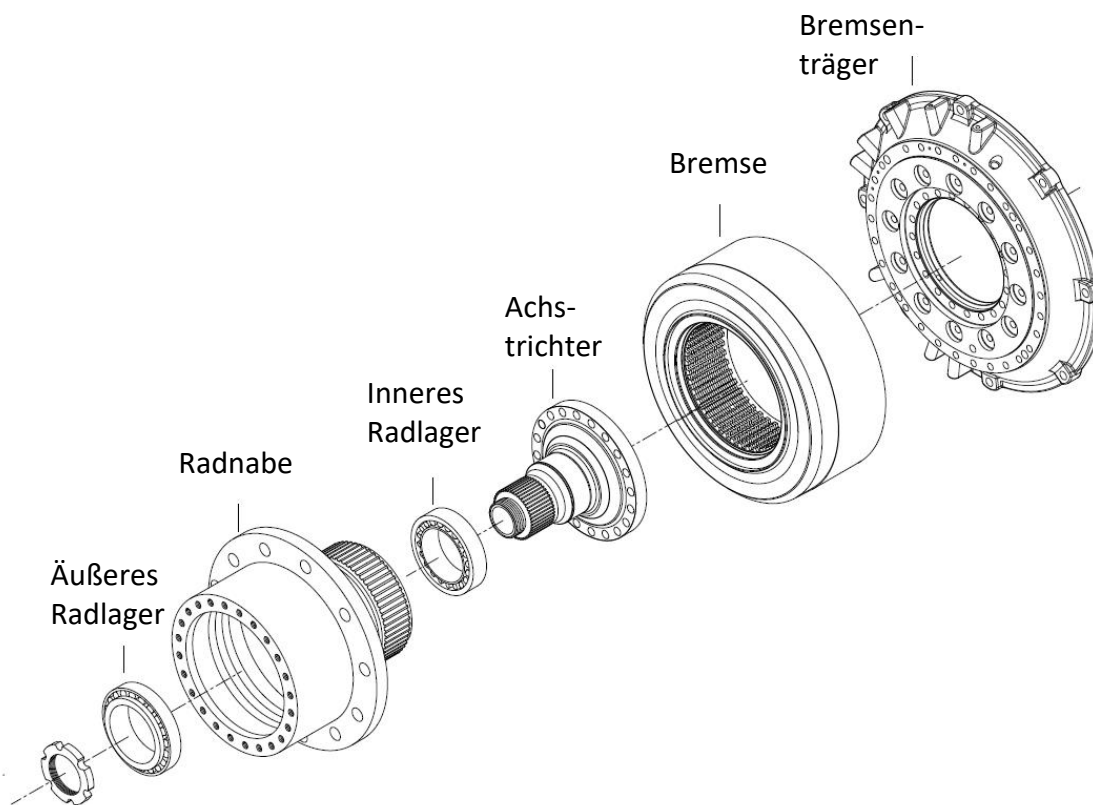


Abbildung 6.2: Explosionszeichnung Radantrieb.

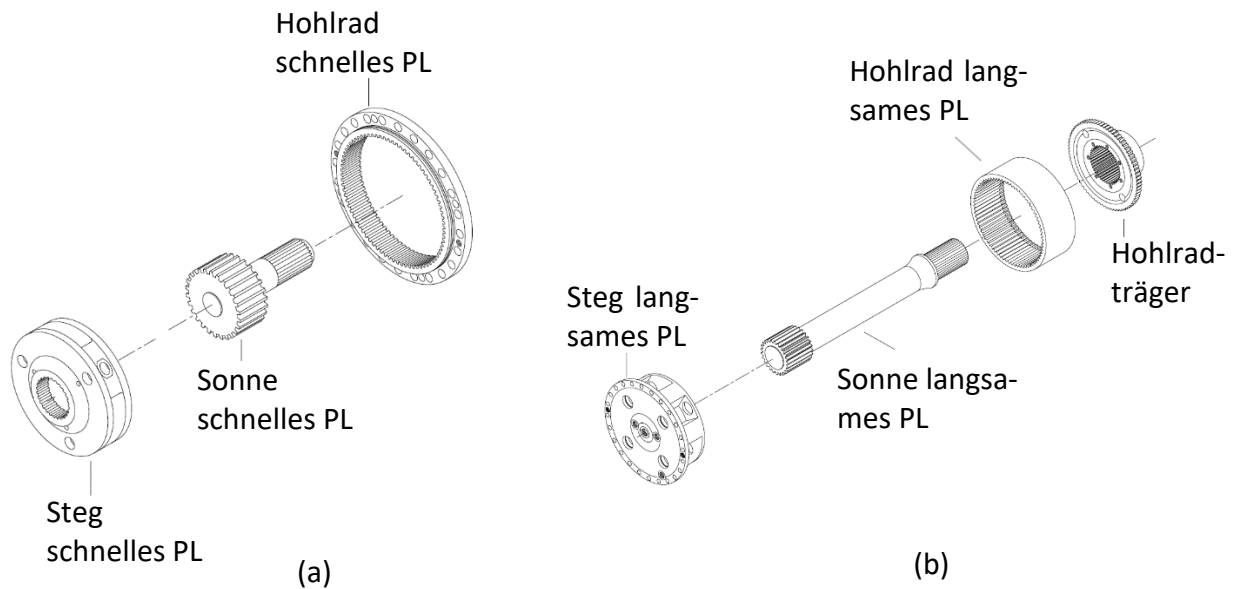


Abbildung 6.3: Explosionszeichnung des inneren (a) und äußeren (b) Planetengetriebes.

Des Weiteren sind auch einzelne schadbehaftete Komponenten aus dem Feldeinsatz untersucht worden. Die im Feld auftretenden Verschleiß- und Schadensbilder sollen die Basis für die zu erarbeitende Zustandserkennung bilden. In der Abbildung 6.4 ist exemplarisch ein stark beschädigtes Radlager aus dem Feldeinsatz dargestellt.



Abbildung 6.4: Verschleißerkennungen an einem Radlager.

Zuletzt ist für die Analyse des Feldgeschehens eine Priorisierung der Schadensklassen vorgenommen worden. Diese soll Informationen darüber bereitstellen, welche Schäden am häufigsten auftreten und welche Schäden am schwerwiegendsten sind, sodass hieraus die Relevanz der einzelnen Schäden für den Feldeinsatz abgeleitet werden kann. In diesem Zuge erfolgte eine Befragung durch den Projektpartner ITEM der Projektpartner HHLA und Kessler,

da diese Informationen aus dem Praxiseinsatz vorweisen. Der Projektpartner HHLA kann dabei wesentliche Informationen aus dem Langzeitbetrieb, aufgrund der umfangreichen Reparatur- und Wartungsarbeiten an den Hybrid-Van-Carriern, bereitstellen. Das Unternehmen Kessler hat hingegen einen Einblick in Schäden, die in den zeitlichen Rahmen der Garantie fallen. Die Rückmeldung der Firma HHLA wird fokussiert, da insbesondere die Langzeitschäden für das Projekt bedeutend sind.

6.2 Grundsatzuntersuchungen auf den Laborprüfständen

6.2.1 Vorbereitungen

Für die Laborversuche stehen zwei neue Radantriebe und drei gebrauchte Radantriebe mit unterschiedlicher Anzahl an Betriebsstunden im realen Feldeinsatz (bei dem Projektpartner HHLA) zur Verfügung. Der erste neue Radantrieb ist mit Modifikationen zur Befestigung von Beschleunigungssensoren mittels Magnethalter ausgestattet. Dies sind gefräste Planflächen in die zylindrischen Außenkonturen von Bremse und Radnabe, siehe Abbildung 6.5, sowie in die Stirnfläche des Steges (langsames Planetengetriebe), siehe Abbildung 6.6. Hierdurch werden verschiedene Messpositionen für die Beschleunigungssensoren zur Verfügung gestellt und damit die statische Analyse der Transferpfade sowie die Beurteilung von geeigneten Messpositionen für den Feldeinsatz ermöglicht. Neben den Planflächen wurden noch zwei verschiedene Arten von „Messschrauben“ realisiert, welche neben ihrer eigentlichen Funktion zusätzlich ein Außengewinde zur Befestigung von Beschleunigungssensoren aufweisen und somit die akustische Kopplung von Radantrieb und Beschleunigungssensor darstellen. Die Messschrauben können an der Verschraubung von Steg (langsames Planetengetriebe) und Radnabe verwendet werden, siehe Abbildung 6.6, sowie an der Verschraubung des Bremsenträger mit der Prüfstandsaufnahme beziehungsweise der Radgabel im Fahrzeug, siehe Abbildung 6.7.

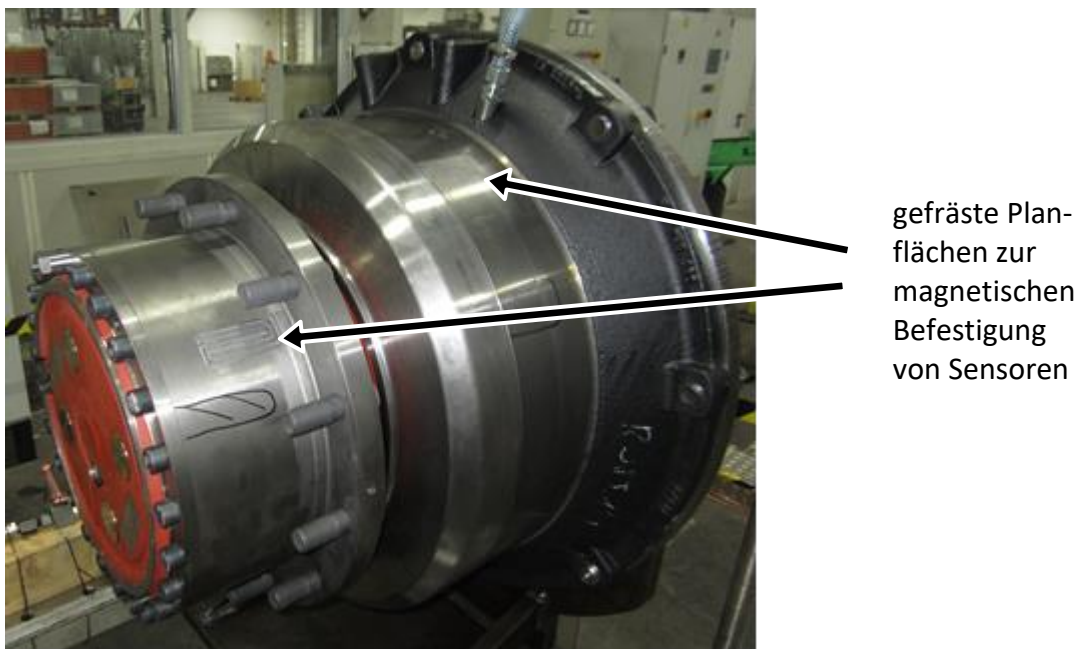
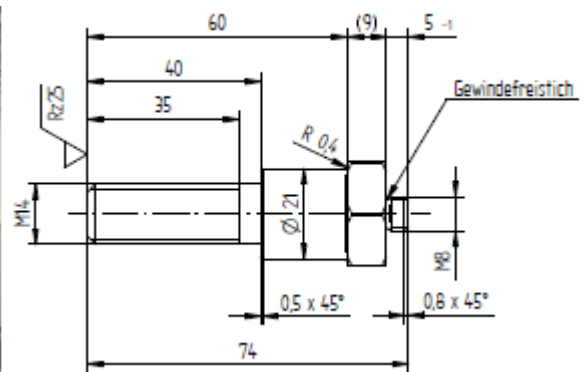
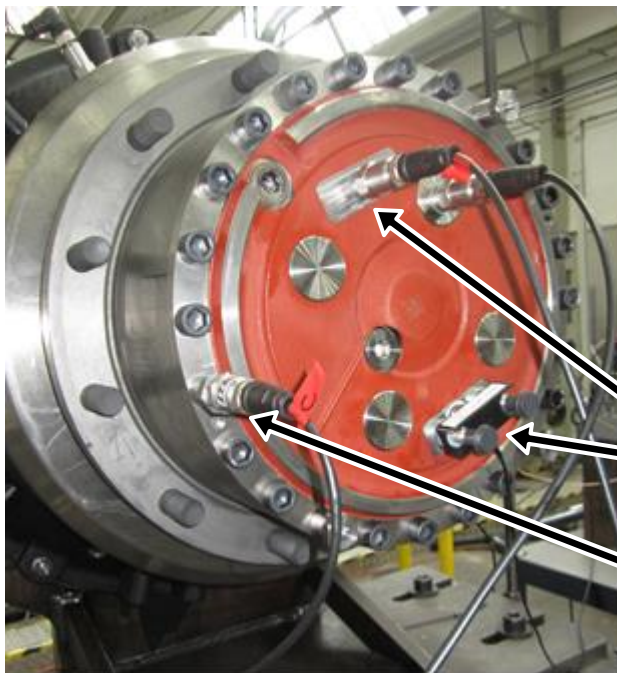


Abbildung 6.5: Planflächen an den zylindrischen Außenkonturen

Die drei gebrauchten Radantriebe weisen Betriebsstunden von

- > 10000
- > 22000 und
- > 33000

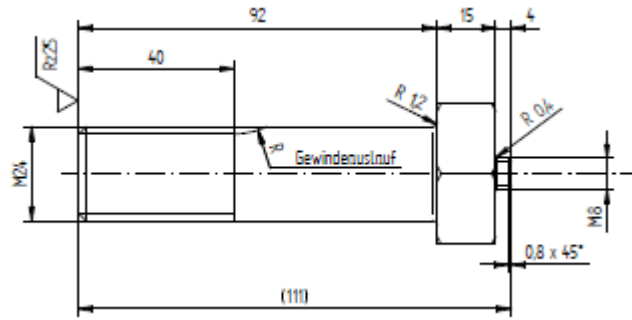
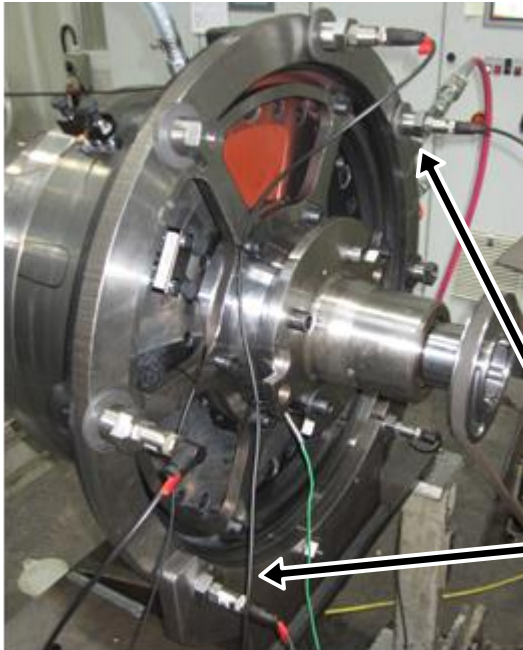
auf und bilden damit eine gute Verteilung über die gesamte Lebensdauer der Radantriebe beim Partner HHLA. Da die Vorspannung der Radlager bis zu den ersten Untersuchungen auf dem Leistungsprüfstand nicht beeinflusst werden soll – um eine Vergleichbarkeit mit den Feldmessungen zu gewährleisten – wurden die drei gebrauchten Radantriebe ohne vorherige Befundung und ohne eine Demontage einzelner (Teil-) Komponenten auf dem Leerlaufprüfstand der Grundsatzuntersuchung, jedoch nur mit eingeschränkter Analyse der Transferpfade, unterzogen.



gefräste Planflächen zur magnetischen Befestigung von Sensoren

Sensorschraube zur Befestigung von Sensoren an der Verschraubung von Steg und Radnabe

Abbildung 6.6: Planflächen am Steg und Messschrauben an der Radnabe



Sensorschraube zur Befestigung von Sensoren an der Verschraubung des Bremsenträgers

Abbildung 6.7: Messschrauben am Bremsenträger

Um die Radantriebe im Labor auf den Prüfständen betreiben zu können wurden Prüfstands-aufnahmen konstruiert und gefertigt. Diese setzen sich aus mehreren Teilkomponenten zu-sammen, welche eine prüflingspezifische Schnittstelle zur Montage des Prüflings (Radan-trieb), eine universelle Schnittstelle zur Montage am Prüfstand bzw. Prüfstandsbock und eine Schnittstelle zum Antriebssystem enthält. Hierdurch ist der Prüfling sicher am Prüfstand mon-tiert, Antriebs- und ggf. Bremsleistung können beaufschlagt werden und Betriebsmedien wie das Bremsbetätigungsöl können zugeführt werden. Beispielhaft sind in Abbildung 6.8 und Ab-bildung 6.9 die Prüfstands-aufnahmen zur Abstützung und Lagerung des Antriebssystems am Bremsenträger dargestellt sowie in Abbildung 6.10 der Antriebsflansch, über welchen die Ein-gangsleistung an dem Keilwellenprofil auf die Sonne des schnellen Planetengetriebes übertra-gen wird. Diese Komponenten sind auch in montiertem Zustand mit Riementrieb in Abbildung 6.7 zu sehen.

Für die Messungen wurde das ‚mobile Messsystem zur Messung im Prüfstandsumfeld‘ des Partners ITEM verwendet. Diese setzt sich zusammen aus einer Sensorankopplung, der Signal-verarbeitung, der Datensynchronisation und dem Datenexport. Über die Sensorankopplung werden zum einen die Beschleunigungssensoren angeschlossen, zum anderen aber auch – je nach Prüfstand – das Drehzahl-signal und das Momentensignal. Auf dem Leerlaufprüfstand wird das Drehzahl-signal durch eine extra realisierte Drehzahlmessung zur Verfügung gestellt, siehe Kapitel 6.5. Auf dem Leistungsprüfstand werden sowohl das Drehzahl-signal als auch das Momentensignal aus der Prüfstandsautomation als Spannungssignal zur Verfügung gestellt.

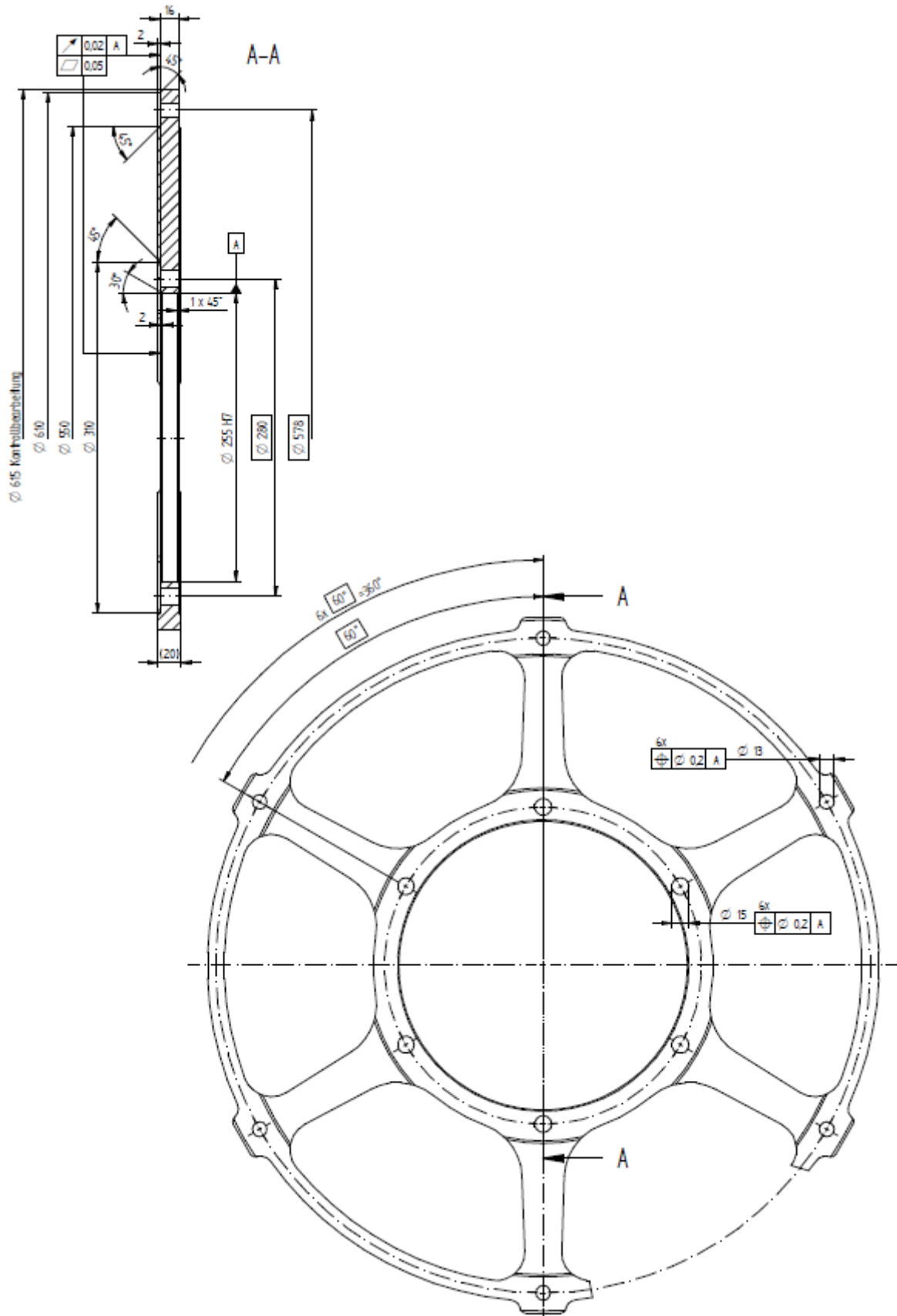


Abbildung 6.8: Prüfstandsaufnahme zur Abstützung des Antriebssystems Teil 1

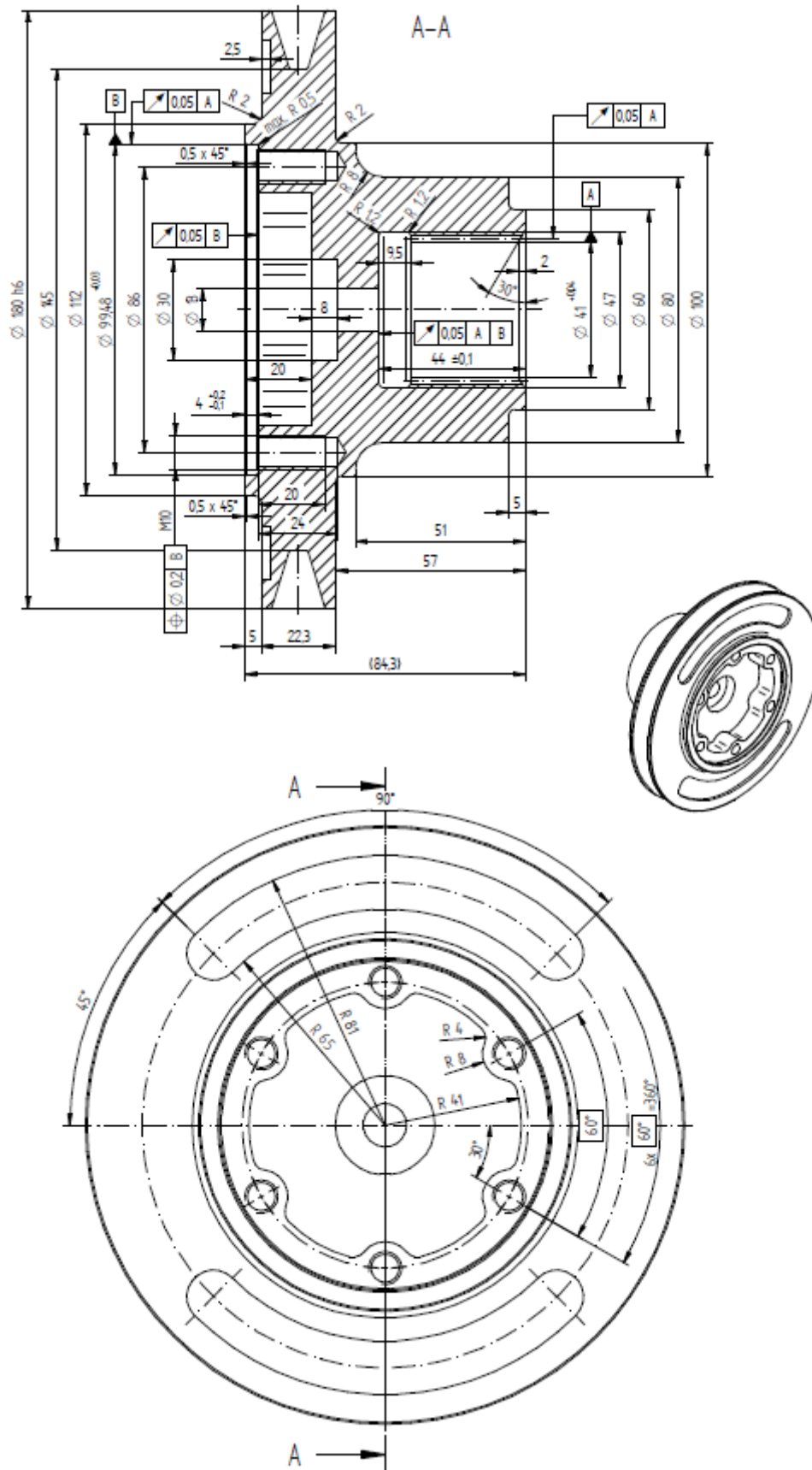


Abbildung 6.10: Antriebsflansch

6.2.2 Leerlaufprüfstand

Im Rahmen der Grundsatzuntersuchungen wurden die Radantriebe auf einem „Leerlaufprüfstand“ betrieben. Durch den Leerlaufprüfstand können die Radantriebe mit definierter Drehzahl beziehungsweise Drehzahlkurven betrieben werden, jedoch ohne Aufprägung einer Abtriebslast. Die Grundsatzuntersuchungen auf dem Leerlaufprüfstand teilen sich auf in eine Transferpfadanalyse im statischen Fall (Stillstand) und eine im dynamischen Betrieb (Drehzahl). Im statischen Fall wurde der modifizierte neue Radantrieb sowohl als Gesamtsystem als auch in diversen Teilsystemen analysiert, siehe Abbildung 6.11, wobei an unterschiedlichen Stellen zum Beispiel mittels eines Impulshammers angeregt wurde. Im dynamischen Fall wurden alle vier Radantriebe nacheinander mit einem Drehzahlkollektiv, bestehend aus einzelnen Stufen und auch Rampen über den gesamten Drehzahlbereich, beaufschlagt. In diesem Falle dienen die mechanischen Kontakte der Zahnräder und Lager als Anregung.

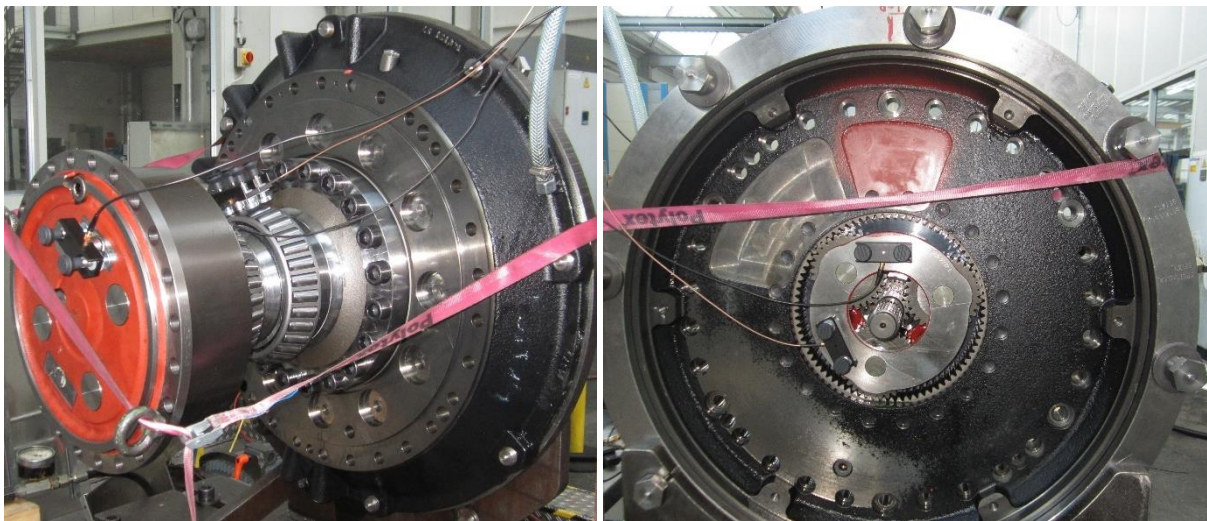


Abbildung 6.11: Messungen der statischen Transferpfadanalyse

6.2.3 Leistungsprüfstand

Im Anschluss an die Grundsatzuntersuchungen auf dem Leerlaufprüfstand wurden die Radantriebe auch auf einem Leistungsprüfstand betrieben, wodurch neben einer definierten Drehzahl auch ein definiertes Moment gestellt werden kann und somit systematische Messreihen gefahren werden können.

In Abbildung 6.12 ist der Aufbau des neuen Radantriebes auf dem Leistungsprüfstand zu sehen. Der Bremsenträger des Radantriebes ist über zwei Winkel mit dem Maschinenbett ortsfest verbunden. Die Antriebseinheit (A1) des Prüfstandes treibt über eine Gelenkwelle und – den bereits am Leerlaufprüfstand verwendeten – Antriebsflansch den Radantrieb an. Die Lasteinheit (A2) des Prüfstandes ist über einen Abtriebsflansch mit der Radnabe des Radantriebes verbunden und kann somit ein Moment aufprägen. Die Sensorik ist in Abbildung 6.13 gezeigt. Dies ist grundsätzlich die gleiche Sensorik wie vorher auf dem Leerlaufprüfstand, wobei hier aufgrund des anderen Aufbaus (Abtriebsflansch, steifere Anbindung des Bremsenträgers um die Momente abstützen zu können) im Vergleich zum Leerlaufprüfstand weniger Messstellen zur Verfügung stehen. Dies sind zwei Messstellen an der Verschraubung des Bremsenträgers mit den gleichen „Messschrauben“ wie auf dem Leerlaufprüfstand (oben auf „12 Uhr“ und unten auf „6 Uhr“) und eine Messstelle über einen Magnethalter an einer Planfläche des Bremsengehäuses. Die Messstellen mit Messschraube an der Verschraubung von Steg und

Radnabe sowie mit Magnethalter an Planflächen am Steg des langsamen Planetengetriebes und der Radnabe stehen am Leistungsprüfstand nicht zur Verfügung.

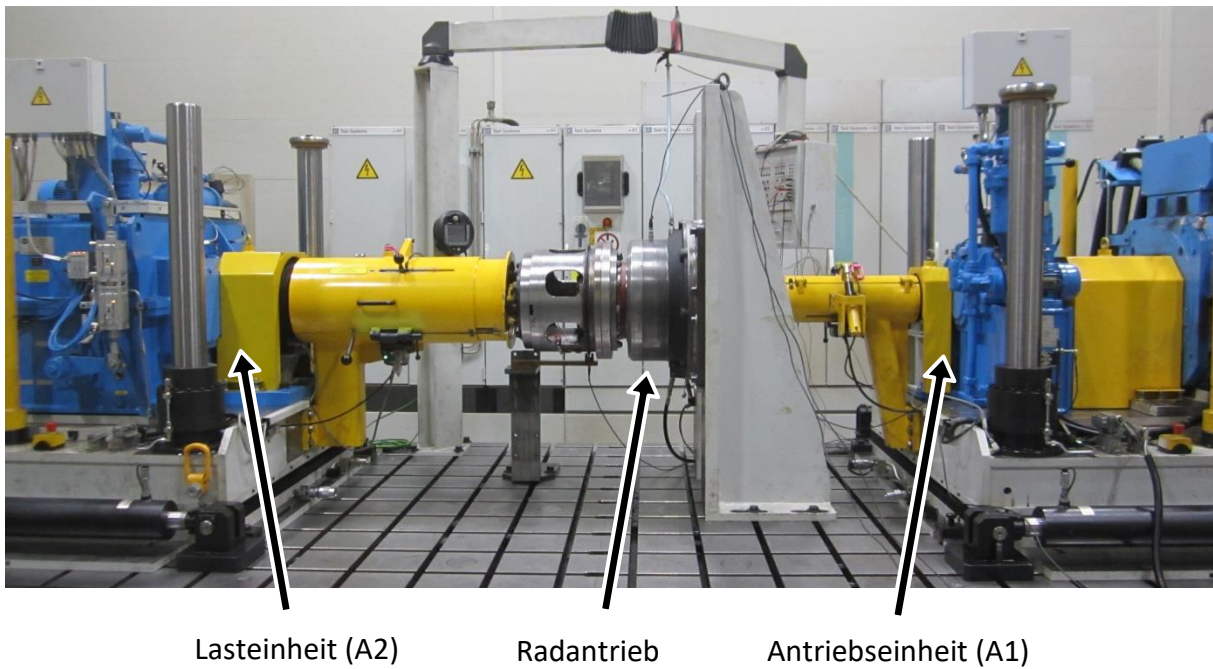


Abbildung 6.12: Aufbau des neuen Radantriebes auf dem Leistungsprüfstand

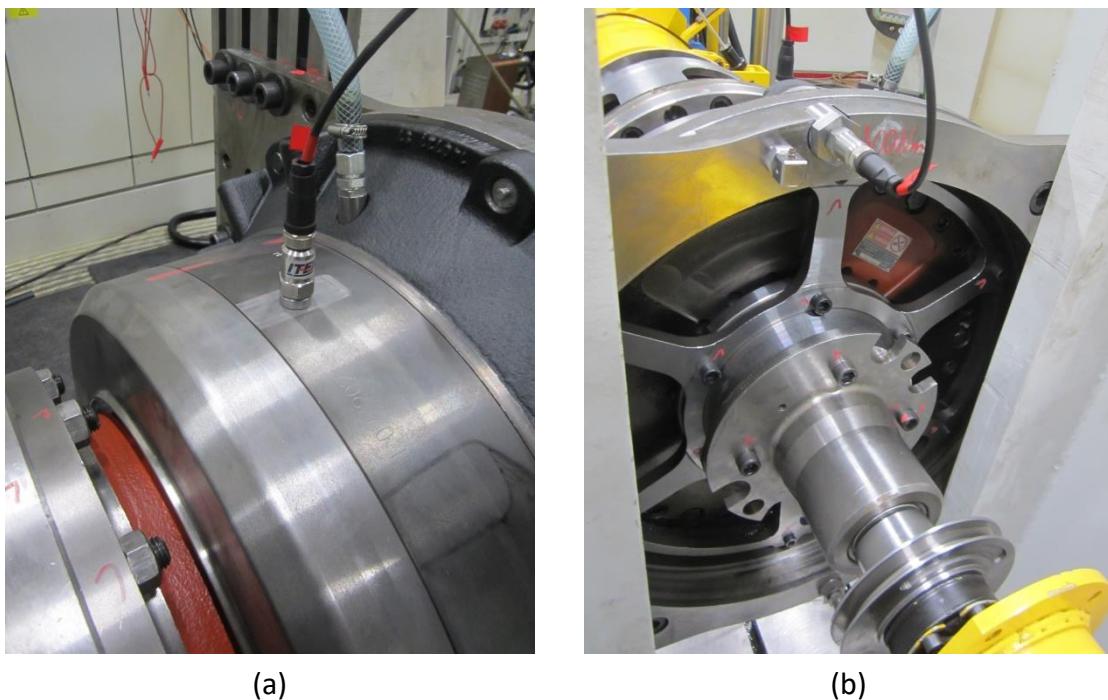


Abbildung 6.13: Sensorik am Radantrieb auf dem Leistungsprüfstand

In Abbildung 6.14 bis Abbildung 6.18 ist eine Auswahl der gefahrenen Sollwertkurven für die Drehzahl und das Moment für den Radantrieb auf dem Leistungsprüfstand gezeigt. Der Leerlauf in Abbildung 6.14 ermöglicht den direkten Vergleich zum Leerlaufprüfstand, da dort die gleichen Drehzahlen angefahren wurden. Die Drehzahlstufen wurden bei unterschiedlichen

Momenten – auch mit negativem Vorzeichen um den Schubetrieb sowie negativer Drehzahl um die Rückwärtsfahrt darzustellen – abgefahren, eine Teil-Sollwertkurve ist in Abbildung 6.15 gezeigt. Außerdem wurden Momentenstufen bei unterschiedlichen Drehzahlen angefahren, ebenfalls mit Schub- und Zugbetrieb als auch Vor- und Rückwärtsfahrt, siehe Teil-Sollwertkurve in Abbildung 6.16. Um neben den quasi stationären Betriebspunkten auch erste Untersuchungen mit veränderlicher Drehzahl zu ermöglichen wurden auch Drehzahlrampen gefahren, siehe Abbildung 6.17. Um eine mögliche Detektion von Verschleiß an der Zahnwellenverbindung zwischen Achstrichter und Hohlradträger zu ermöglichen wurden auch Momentensprünge bei unterschiedlichen Drehzahlen gefahren, siehe Abbildung 6.18. Durch diese Momentensprünge wird ein Wechsel zwischen Beschleunigung und (rekuperativer) Verzögerung des Fahrzeugs nachgebildet, was zu einem Wechsel der Anlagenflächen in der Zahnwellenverbindung führt, wenn die Vorspannung der Radlagerung ausreichend gesunken ist.

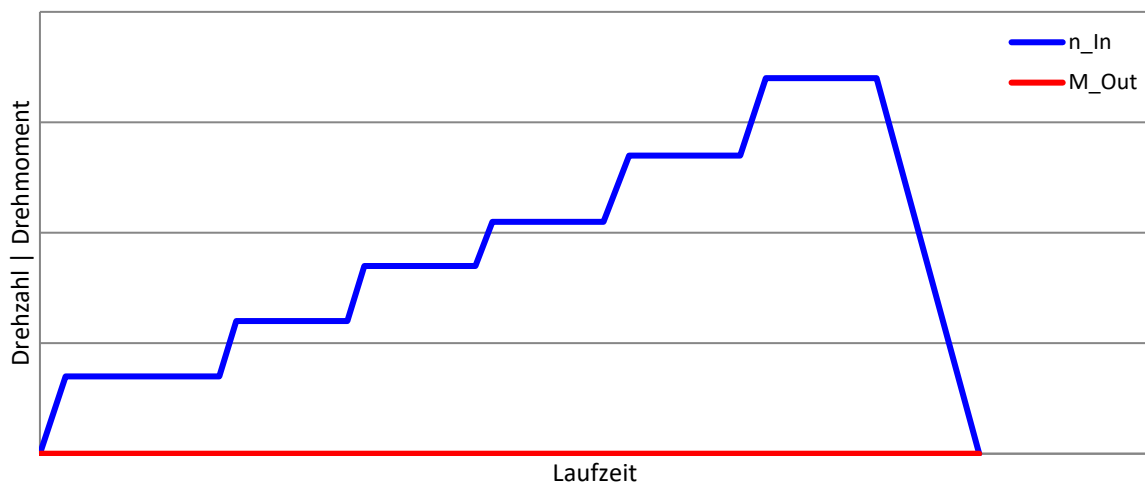


Abbildung 6.14: Sollwertkurve - Leerlauf

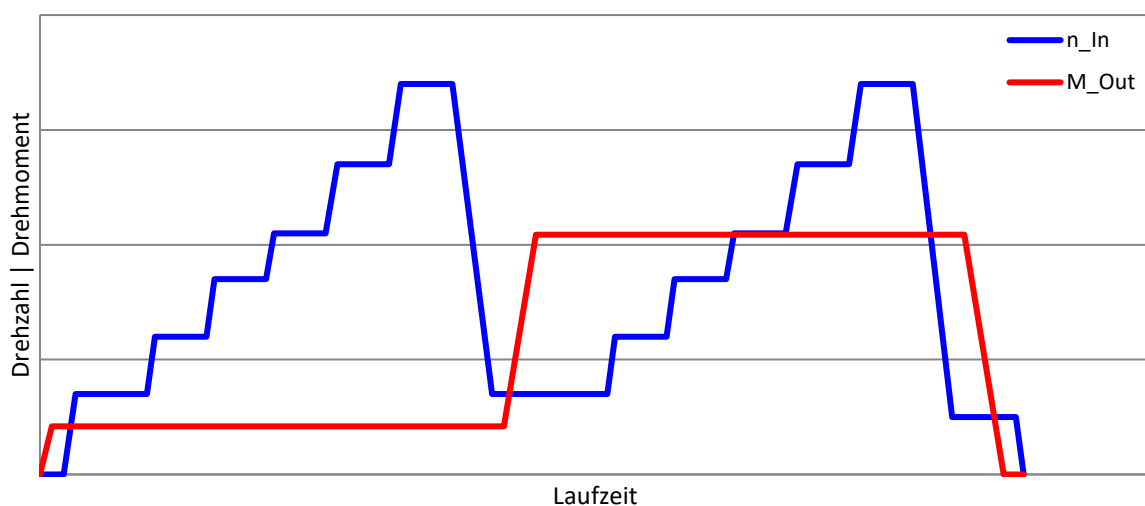


Abbildung 6.15: Sollwertkurve - Drehzahlstufen

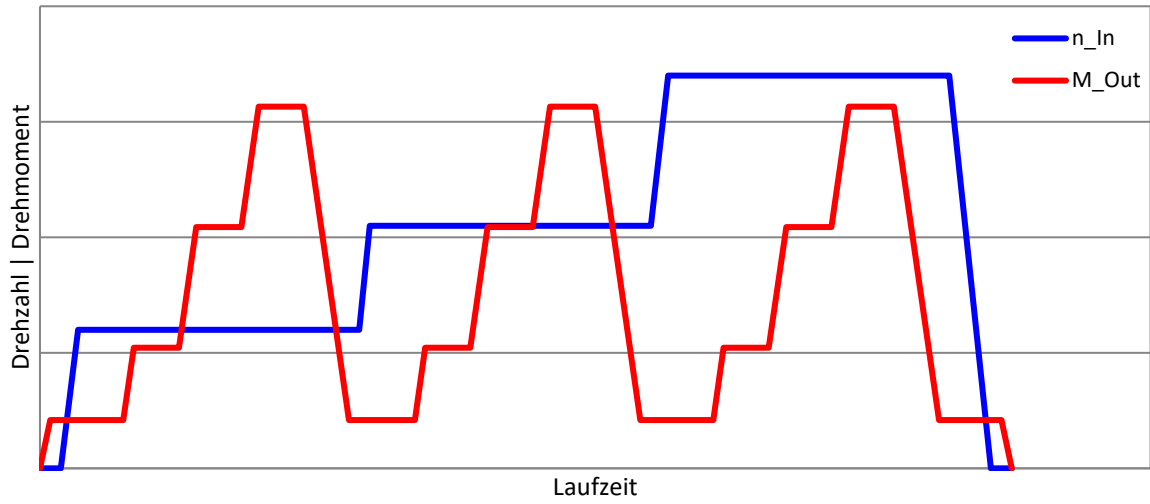


Abbildung 6.16: Sollwertkurve - Momentenstufen

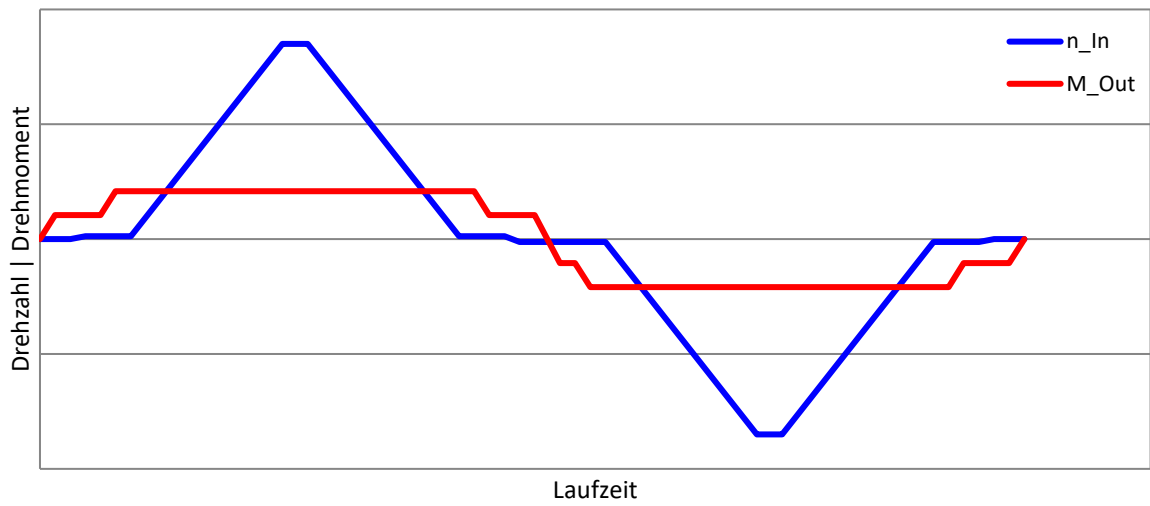


Abbildung 6.17: Sollwertkurve - Drehzahlrampen

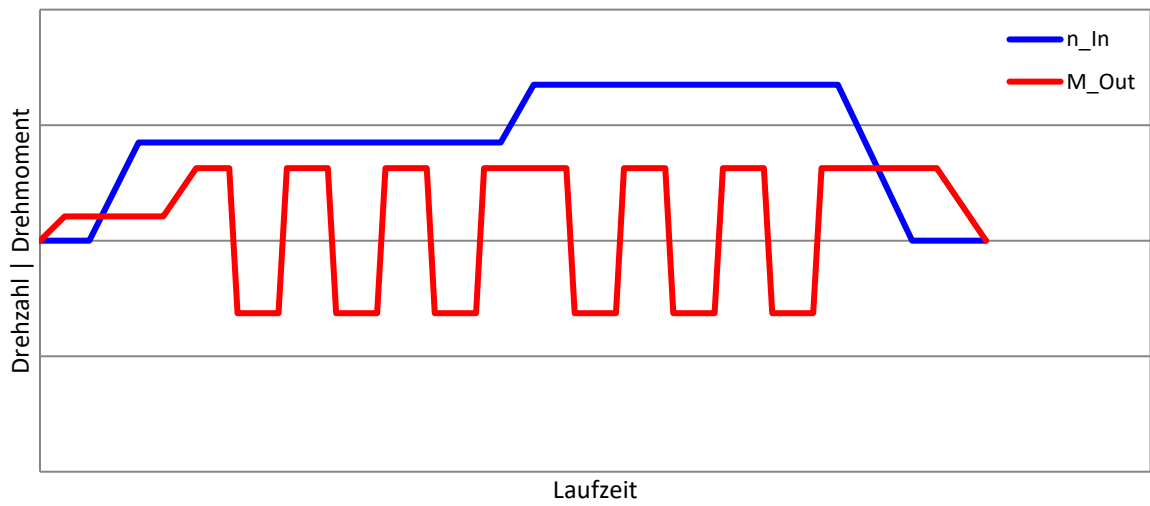


Abbildung 6.18: Sollwertkurve - Momentensprünge

6.3 Analyse von Verschleiß- und Schadensbildern

Im Anschluss an die durchgeführten Grundsatzuntersuchungen des in diesem Projekt betrachteten Radantriebes wurden die drei gebrauchten Radantriebe befundet. Die Befundung wurde erst nach den ersten Grundsatzuntersuchungen auf dem Leistungsprüfstand durchgeführt, da durch die erforderliche Demontage zur Befundung die Radlagerung gelöst werden muss. Für die Vergleichbarkeit mit dem Feldeinsatz ist jedoch eine unveränderte Vorspannung der Radlagerung wichtig.

In Abbildung 6.19 bis Abbildung 6.23 sind beispielhaft Fotos einer Auswahl der befundeten Komponenten dargestellt, jeweils für (a) vom neuen Radantrieb (als Referenz), für (b) vom gebrauchten Radantrieb mit über 10000 Betriebsstunden, für (c) vom Radantrieb mit über 22000 Betriebsstunden und für (d) vom Radantrieb mit über 33000 Betriebsstunden. Abbildung 6.19 und Abbildung 6.20 zeigen die Rollen (im Käfig) und die äußeren Lagerschalen des äußeren Radlagers der Radantriebe. Hier wird deutlich, dass für (a), (b) und (c) keine Verschleißerscheinungen vorliegen, (d) jedoch schwere Pittings aufweist. Die Planeten des langsamen Planetengetriebes in Abbildung 6.21 zeigen für (a) bis (c) keine Verschleißerscheinungen, (d) jedoch erste leichte Pittings. Die Planeten des schnellen Planetengetriebes in Abbildung 6.22 weisen für (a) und (b) keine Verschleißerscheinungen auf, (c) jedoch leichte Einlaufgrübchen unterhalb des Wälzkreises. Zahnwellenverbindung zwischen Achstrichter (und Hohlradträger) in Abbildung 6.23 weisen für (a) und (b) keine Verschleißerscheinungen auf, für (c) jedoch leichten Verschleiß der Zahnwellenverbindung und für (d) schweren Verschleiß.



(a) neu



(b) > 10000 Bh



(c) > 22000 Bh



(d) > 33000 Bh

Abbildung 6.19: Äußeres Radlager – Rollen



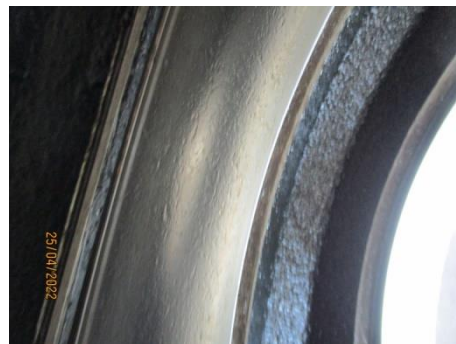
(a) neu



(b) > 10000 Bh

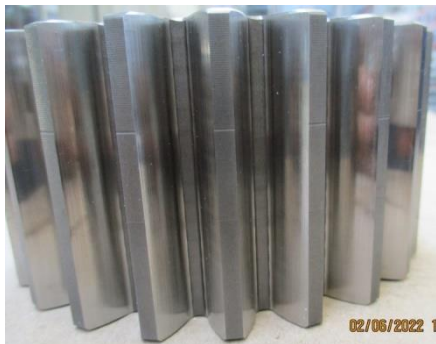


(c) > 22000 Bh



(d) > 33000 Bh

Abbildung 6.20: Äußeres Radlager - Außenring



(a) neu



(b) > 10000 Bh



(c) > 22000 Bh



(d) > 33000 Bh

Abbildung 6.21: Planet langsames Planetengetriebe



(a) neu



(b) > 10000 Bh



(c) > 22000 Bh

Komponente
nicht verfügbar
(wurde durch HHLA nicht mit-
geliefert)

(d) > 33000 Bh

Abbildung 6.22: Planet schnelles Planetengetriebe



(a) neu



(b) > 10000 Bh



(c) > 22000 Bh



(d) > 33000 Bh

Abbildung 6.23: Zahnwellenverbindung des Achstrichters

Da für den Radantrieb mit über 33000 Betriebsstunden vom Partner HHLA das schnelle Planetengetriebe nicht mitgeliefert wurde, ist die Komponente dieses Radantriebes in Abbildung 6.22 (d) nicht verfügbar.

Im weiteren Projektverlauf wurden durch den Partner HHLA weitere Radantriebe und Teilkomponenten von Radantriebes nach deren Demontage aus unterschiedlichen Van-Carrier der Flotte für die Analyse und Beurteilung zur Verfügung gestellt, da sie im regulären Einsatz Auffälligkeiten zeigten oder im Rahmen von Generalüberholungen (GÜ) gewechselt wurden:

- 3 einzelne demontierte Radlager aus Radantrieben welche einer Generalüberholung (GÜ) bei jeweils rund 20000 Betriebsstunden unterzogen wurden
- Teilkomponenten des Radantriebes VC63 Rad 5
 - Verzahnungsteile mit > 30000 Betriebsstunden
 - Radlagerung mit 11430 Betriebsstunden (wurden während des Feldeinsatzes bereits einmal gewechselt)
- Teilkomponenten des Radantriebes VC83 Rad 3 mit unbekannter Laufzeit
- VC74 R4 (komplett)
 - Verzahnungsteile mit rund 30000 Betriebsstunden
 - Radlagerung mit 9197 Betriebsstunden (wurden während des Feldeinsatzes bereits einmal gewechselt)
- Teil der Verzahnungskomponenten des Radantriebes VC107 Rad 6 mit 37914 Bh
- Teil der Verzahnungskomponenten des Radantriebes VC108 Rad 5 mit 37800 Bh

An den Radantrieben VC74 Rad 4 und VC108 Rad 5 wurde vor dem Ausbau derselben jeweils Messungen mit dem mobilen ITEM-Messsystem bei der HHLA auf dem Hafengelände durchgeführt, wodurch eine Vergleichsmöglichkeit von Messergebnissen aus dem Feldeinsatz und dem Prüfstandsbetrieb geschaffen wurde.

Die Befundungsergebnisse der drei einzelnen Radlager und der des Radantriebes VC83 Rad 3 liegen innerhalb der bisherigen Erkenntnisse und festigen diese dadurch. Die Radlager aus den Radantrieben VC63 Rad 5 und VC74 Rad 4 weisen zu den bisher bekannten Schadenbildern überlagerte Schäden auf und erweitern damit die Erkenntnisse, was aus den Darstellungen (a) und (b) in Abbildung 6.24 sowie Abbildung 6.25 im Vergleich zu den bereits bekannten Zuständen – beispielhaft durch die Darstellungen in (c) der genannten Abbildungen verdeutlicht – dargestellt wird.



(a) VC63 Rad 5
11430 Bh nach GÜ



(b) VC74 Rad 4
9197 Bh nach GÜ



(c) > 33000 Bh
(zum Vergleich)

Abbildung 6.24: Rollen der äußeren Radlager

Die in Abbildung 6.24 und Abbildung 6.25 gezeigten Komponenten weisen alle gleichermaßen rund 10000 Betriebsstunden in jeweils einem generalüberholten Radantrieb auf. Hierbei ist zu beachten, dass die jeweils in (c) dargestellten Lagerkomponenten im Rahmen einer Generalüberholung (GÜ) bei gut 20000 Bh erneuert wurden und somit ebenfalls rund 10000 Betriebsstunden aufweisen.



Abbildung 6.25: Außenringe der inneren Radlager

Die Verzahnungsteile der Radantriebe VC63 Rad 5, VC83 Rad 3 und VC74 Rad 4 liegen ebenfalls innerhalb der bisher befundeten Komponenten und festigen damit auch die daraus gewonnenen Erkenntnisse. Dies gilt auch für die gelieferten Verzahnungsteile der Radantriebe VC107 Rad 6 und VC108 Rad 5, lediglich deren jeweilige schnelle Sonne weisen beide – jedoch etwas unterschiedlich ausgeprägt – ein überlagertes Schadensbild auf, wodurch die gewonnenen Erkenntnisse auch für die Verzahnungskomponenten erweitert werden konnten.

Abschließend zu den bisher durchgeführten Analysen und Bewertungen bezüglich Verschleiß- und Schadenbildern des in diesem Projekt betrachteten Radantriebes wurde im vierten Projektjahr der Radantrieb VC102 R6 (komplett) aus dem Feldeinsatz bei dem Partner HHLA befundet, da er ebenfalls im regulären Einsatz Auffälligkeiten zeigte. Die Verzahnungsteile des Radantriebes weisen rund 40000 Betriebsstunden auf, die Radlagerung rund 20000 Betriebsstunden (wurden während des Feldeinsatzes bereits einmal gewechselt).



Abbildung 6.26: Rollen des äußeren Radlagers am VC102 Rad 6 im Vergleich

Die Befundungsergebnisse der Radlager und der Verzahnungskomponenten liegen innerhalb der bisherigen Erkenntnisse und festigen diese dadurch, siehe beispielhaft einige Radlager-Komponenten verschiedener generalüberholter (GÜ) Radantriebe aus dem Feldeinsatz in Abbildung 6.26 und Abbildung 6.27 jeweils (c).



Abbildung 6.27: Außenring des inneren Radlager am VC102 Rad 6 im Vergleich

6.4 Weiterführende Untersuchungen auf den Laborprüfständen

Zusätzlich zu den bisherigen Grundsatzuntersuchen aus Kapitel 6.2 wurden – auf Grundlage der Erkenntnisse der Analysen der Verschleiß- und Schadensbilder (siehe Kapitel 6.3) – weiterführende Untersuchungen mit sowohl geschädigten Komponenten aus dem Feld als auch gezielt eingepprägten Schädigungen auf den Prüfständen durchgeführt.

Für die Messungen wurde wieder das ‚mobile Messsystem zur Messung im Prüfstandsumfeld‘ des Partners ITEM verwendet und als Betriebsbedingungen wieder die in Kapitel 6.2 bereits definierten Sollwertkurven, wodurch eine Vergleichbarkeit gegeben ist.

6.4.1 Leerlaufprüfstand

Auf dem Leerlaufprüfstand wurden weiterführende Untersuchungen bezüglich der Radlagerungen mit:

- 1) Neuer Radantrieb als Referenzmessung
- 2) Gebrauchter Radantrieb mit > 33000 Betriebsstunden nach der Befundung
- 3) Manuell eingepprägter schwerer lokaler Schaden auf dem Außenring, siehe Abbildung 6.28 (a)
- 4) Zusätzlich zu 3) ein manuell eingepprägter leichter lokaler Schaden auf derselben Lager- schale mit tangentialem Versatz, siehe Abbildung 6.28 (b)
- 5) Zusätzlich zu 4) ein manuell eingepprägter Schaden an einer Rolle (Wälzkörper), siehe Abbildung 6.28 (c)

durchgeführt, wobei die synthetisch erzeugten Schäden zu 3) bis 5) jeweils am äußeren Rad- lager des neuen Radantriebes zu 1) eingebracht wurden. Hierbei wurden die bereits im Rah- men der Grundsatzuntersuchungen verwendeten Drehzahl-Kollektive wieder verwendet, wodurch die Vergleichbarkeit gewährleistet wird.

Als nennenswerter Einfluss auf die beiden ersten Messreihen der obigen Auflistung im Ver- gleich zu den bereits durchgeführten Messungen in Kapitel 6.2 ist die Befundung zu beachten,

in deren Rahmen die Radlagerung gelöst und im Rahmen der anschließenden Montage mit einer definierten Vorspannung wieder montiert wird. Hierdurch können Unterschiede zu den vorherigen (sich im Laufe des Feldeinsatzes eingestellten bzw. gesetzten) Vorspannungen der Radlagerung entstehen. Aus diesem Grund ist die erneute Referenzmessung für die Vergleichsmöglichkeit wichtig.

Die 6 einzelnen Messungen sind in Tabelle 6.1 zusammenfassend dargestellt. Nach der Messung mit dem intakten Radantrieb als Referenzmessung folgen die umlaufenden Schäden mit Komponenten aus dem Feldeinsatz. Da die lokalen Schäden der Radlagerung im Feld seltener auftreten, liegen hierzu keine Komponenten aus dem Feldeinsatz vor, weshalb diese synthetisch nachgebildet wurden, siehe Abbildung 6.28.

Die Messung zu Index L3 wurde auch direkt vor der Demontage im Feldeinsatz bei der HHLA vermessen.

Tabelle 6.1 Schadenkomponenten auf dem Leerlaufprüfstand

Index	Schaden	Herkunft	Informationen zur Schadensausprägung
L0	Intakt		Intaktes Getriebe, Referenzmessung
L1	Umlaufend 0	Aus dem Feldeinsatz (33.000 Bh), VC108R3	Schwere Pittings an allen Komponenten
L2	Umlaufend 1	Aus dem Feldeinsatz (9.000 Bh), VC74R4	Inneres Lager, Wälzkörper: Pittings leicht Rest: Schwere Pittings an allen Komponenten
L3	Umlaufend 2	Aus dem Feldeinsatz (11.000 Bh), VC63R5	Schwere Pittings an allen Komponenten
L4	Lokal 0	synthetisch	Schwerer Schaden lokal am Außenring des äußeren Lagers
L5	Lokal 1	synthetisch	Schaden L4 ergänzt um leichten Schaden lokal am Außenring des äußeren Lagers
L6	Lokal 2	synthetisch	Schaden L5 ergänzt um schweren Schaden lokal am Wälzkörper des äußeren Lagers

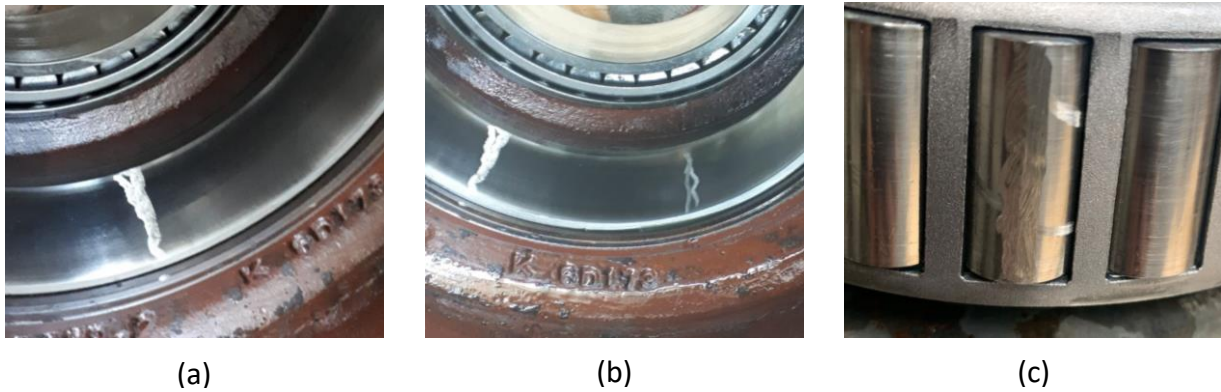


Abbildung 6.28: synthetische Schäden am Radlager

6.4.2 Leistungsprüfstand

Auf dem Leistungsprüfstand wurden weiterführende Untersuchungen mit unterschiedlichen Schadensschweren an unterschiedlichen Komponenten durchgeführt. Beginnend mit einzelnen Schäden jeweils an einer Verzahnungskomponente, siehe Tabelle 6.2, und anschließend mit Kombinationen von mehreren Schädigungen – auch an Lager- und Verzahnungskomponenten gemischt – während einer Messung, siehe Tabelle 6.3.

Tabelle 6.2 Schadenkomponenten auf dem Leistungsprüfstand - Einzelschäden

Index	Akronym	Komponente	Stufe	Schadensschwere
V0	Intakt	-	-	-
V1	Sonne ₁ ⁺	Sonne	Schnell	Leicht
V2	Sonne ₁ ⁺⁺	Sonne	Schnell	Schwer
V3	Planet ₁ ⁺	Planet	Schnell	Leicht
V4	Planet ₁ ⁺⁺	Planet	Schnell	Schwer
V5	Sonne ₂ ⁺	Sonne	Langsam	Leicht
V6	Sonne ₂ ⁺⁺	Sonne	Langsam	Schwer
V7	Planet ₂ ⁺	Planet	Langsam	Leicht
V8	Planet ₂ ⁺⁺	Planet	Langsam	Schwer

Die Messung zu Index V1 und V2 sowie K2, K4 und K6 wurde anschließend auch im Feldeinsatz wiederholt.

Die Definition der synthetisch eingebrachten Schadensschwere an den Verzahnungskomponenten ist wie folgt: Leichte Schäden werden durch eine eingefräste „Nut“ mit einer Breite von 25% der maximalen Zahnbreite mittig in axialer Richtung und einer Höhe von 2mm in radialer Richtung erzeugt. Schwere Schäden werden durch eine eingefräste „Nut“ mit einer Breite von 50% der maximalen Zahnbreite mittig in axialer Richtung und einer Höhe von 4mm in radialer Richtung erzeugt. Beispielhaft sind in Abbildung 6.29 für die schnelle Sonne ein leichter synthetischer Schaden und in Abbildung 6.30 für den langsamen Planeten ein schwerer synthetischer Schaden gezeigt. Auf den Planeten sind immer nur auf einer Zahnflanke der

Zähne Schäden eingefräst, da so sichergestellt werden kann, dass jeweils nur an einem Zahn-
eingriff der beiden vorliegenden Eingriffe mit Hohlrad und Sonne durch den Schaden eine An-
regung stattfindet.

Tabelle 6.3 Schadenkomponenten auf dem Leistungsprüfstand - Kombinationsschäden

Index	Schädigungen	Beschreibung
K0	Intakt	Intakt
K1	V1 + V3	Sonne ⁺ , Planet ⁺
K2	V2 + V3	Sonne ⁺⁺ , Planet ⁺
K3	V2 + V6	Sonne ⁺⁺ , Sonne ⁺⁺
K4	V1 + L3	Sonne ⁺ , Lager ⁺⁺
K5	V2 + L3	Sonne ⁺⁺ , Lager ⁺⁺
K6	V2 + V3 + L3	Sonne ⁺⁺ , Planet ⁺ , Lager ⁺⁺
K7	V2 + V6 + L3	Sonne ⁺⁺ , Sonne ⁺⁺ , Lager ⁺⁺

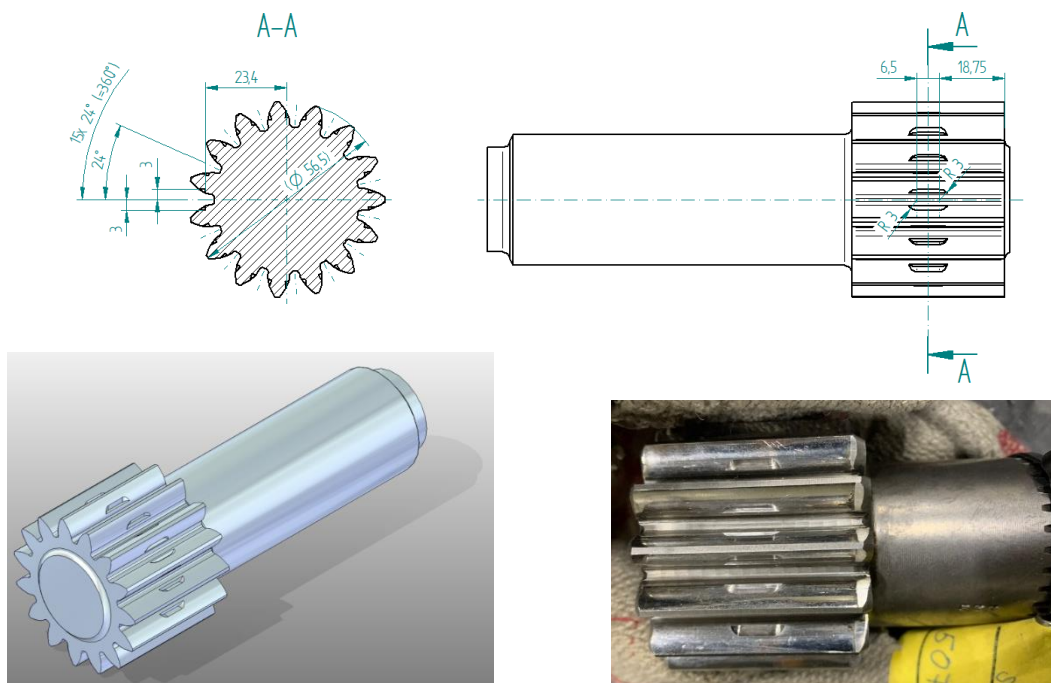


Abbildung 6.29 schnelle Sonne mit leichten synthetischen Schäden

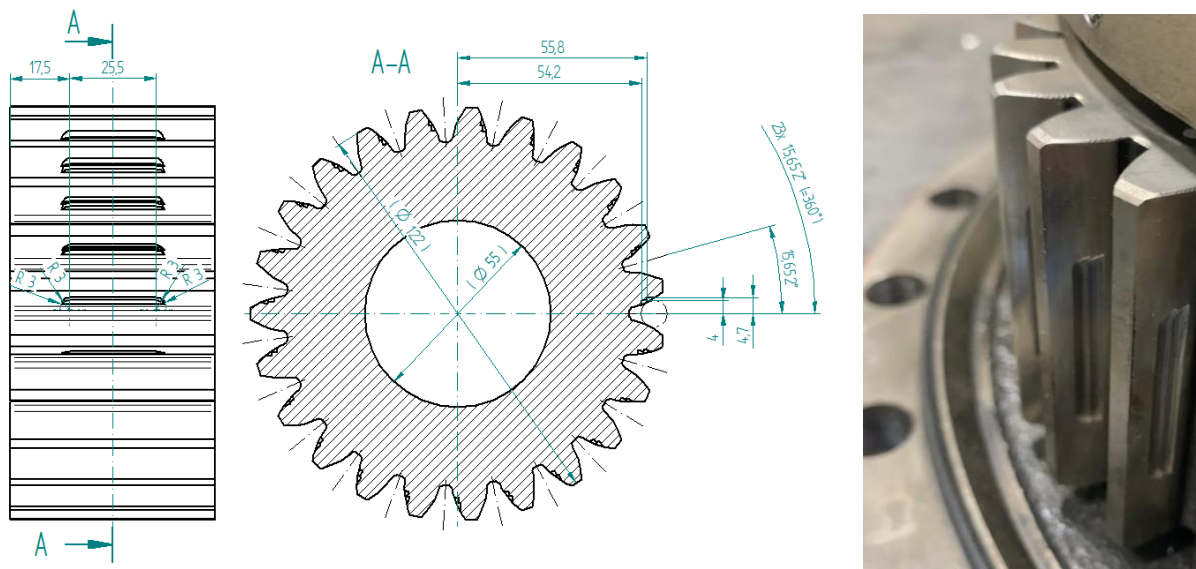


Abbildung 6.30 langsamer Planet mit schweren synthetischen Schäden

6.5 Drehzahlmessung

Für die Messungen im Rahmen der schwingungsbasierten Analyse der Radantriebe auf den Laborprüfständen und auch für die ersten Messungen im Feld ist ein hochaufgelöstes und zeitlich fein abtastbares Drehzahlsignal erforderlich. Hintergrund ist, dass die aktuelle Drehzahl einen direkten Einfluss auf die Eingriffsfrequenz der Verzahnungskomponenten und damit die akustische Anregung derselben sowie auch die Anregung durch die Radlagerung hat. Dies gilt auch für Drehzahlungleichheiten innerhalb einer Umdrehung der Planetengetriebe bzw. Radlager. Die Automation des Leistungsprüfstandes stellt ein entsprechendes Signal zur Verfügung. Am Leerlaufprüfstand ist jedoch durch die kraftschlüssige Verbindung zwischen Motor und Radantrieb über einen Riemen, siehe Abbildung 6.7, und dessen Schlupffähigkeit das Drehzahlsignal des Motors nicht ausreichend. Hier kann jedoch mit ausreichender Güte die Drehzahl am Antriebsflansch, siehe Abbildung 6.10, mit einem vorhandenen Sensor gemessen werden.

Da im Feld bei dem Partner HHLA kein geeignetes Drehzahlsignal von einer bereits vorhandenen Messstelle abgegriffen werden kann (z.B. auf die Signale der Resolver der Antriebsmotoren für die Radantriebe durfte nicht zugegriffen werden) muss eine eigene Drehzahlmessstelle der Radantriebe für dieses Projekt geschaffen werden.

Innerhalb des Radantriebes und auch zwischen Radantrieb und Antriebsmotor sind keine geeigneten Positionen für eine Drehzahlmessstelle vorhanden, wodurch die Wahl auf die Rückseite des Antriebsmotors – „aufgesattelt“ auf den Resolver desselben – gefallen ist. Herausforderung hierbei ist, dass dort nur sehr wenig axialer Raum bis zum abschließenden Deckel ist, welcher gemeinsamen mit der Außenkontur der Radgabel vor mechanischem Kontakt – und damit Beschädigung – mit den Containern schützt.

Da der geplante Drehzahlsensor auch durch die Hardware-Komponenten der OnBoard-Elektronik der Firma ANDEO eingelesen wird und somit bei der Inbetriebnahme des Funktionsmusters auf dem Prüfstand bei Kessler ebenfalls von Relevanz ist, musste – zusätzlich zu der bisher genutzten Drehzahlmessung auf dem Leerlaufprüfstand im Rahmen der Grundsatzuntersuchungen am Antriebsflansch – für diesen neuen Drehzahlsensor noch ein Halter sowie ein

Flansch mit Wellenstummel als Geber für den Drehzahlsensor – jeweils als Sonderteile – konstruiert und gefertigt werden.

In Abbildung 6.31 ist der Zusammenbau der Teile am Radantrieb zur Drehzahlmessung am Leerlaufprüfstand dargestellt. Der Halter, siehe Abbildung 6.32, gewährleistet über eine Zentrierung zur Drehachse und eine entsprechende Steifigkeit sowie Verwendung eines Zentrier-Adapters, siehe Abbildung 6.33, für die Befestigung des Drehzahlsensors die hohe Anforderung bezüglich Rundlaufs des Drehzahlsensors über einen nennenswerten axialen Abstand und bietet die ortsfeste Befestigung des Sensorgehäuses. Über einen Flansch mit Wellenstummel, siehe Abbildung 6.34, wird von der Riemenscheibe abgreifend dem Drehzahlsensor die Drehbewegung am Prüfstand zur Verfügung gestellt.

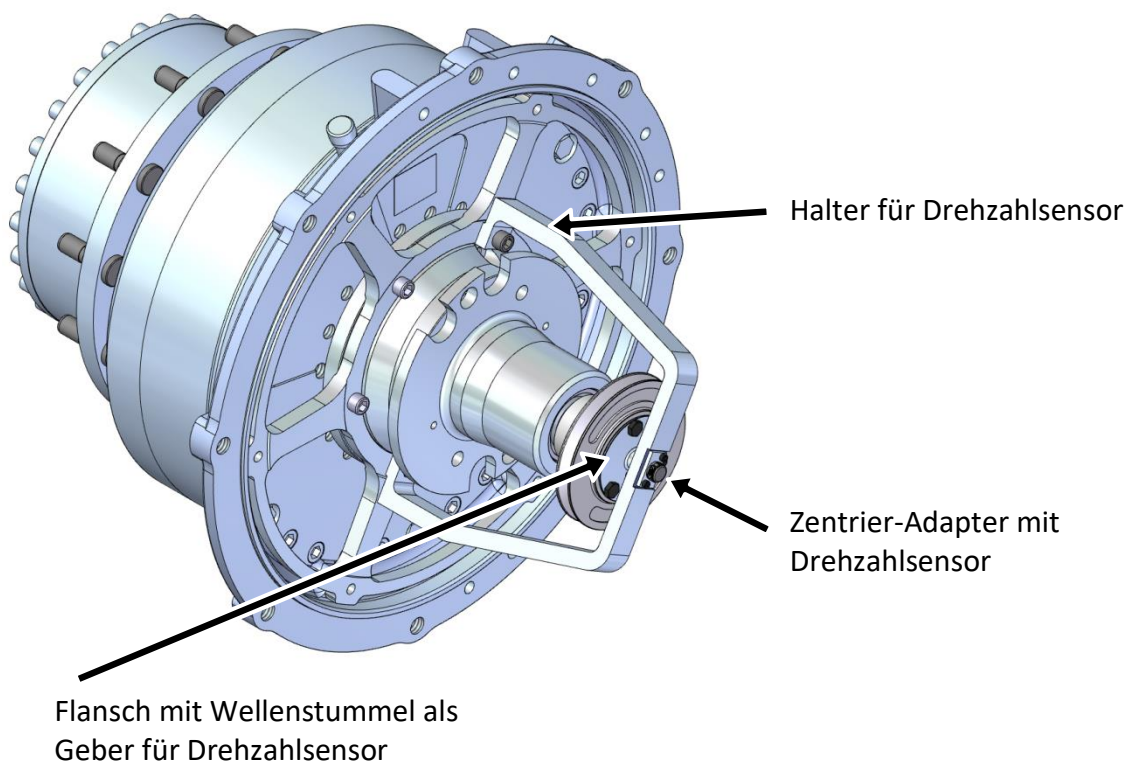


Abbildung 6.31: Zusammenbau der Teile für die Drehzahlmessung am Leerlaufprüfstand

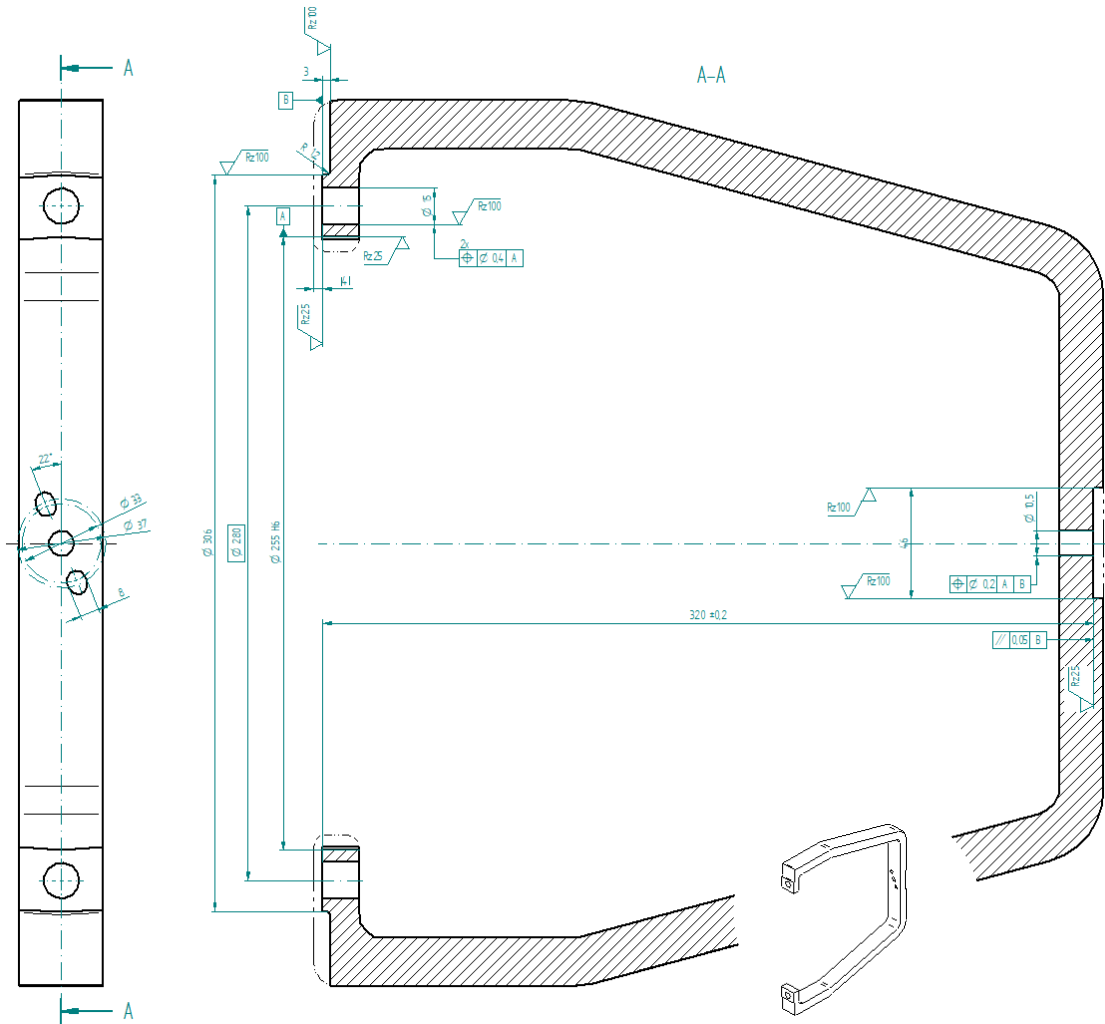


Abbildung 6.32: Halter für Drehzahlsensor (Leerlaufprüfstand)

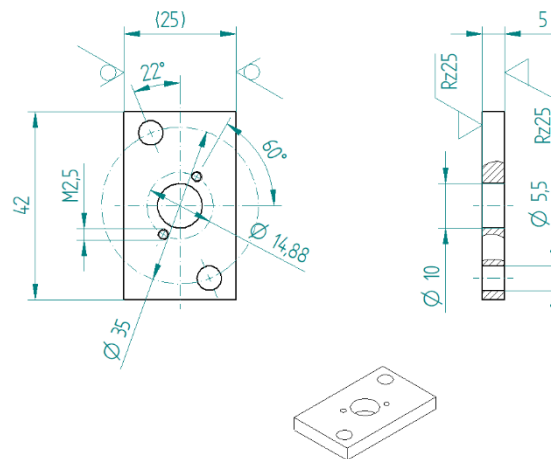


Abbildung 6.33: Zentrier-Adapter für Drehzahlsensor (Leerlaufprüfstand)

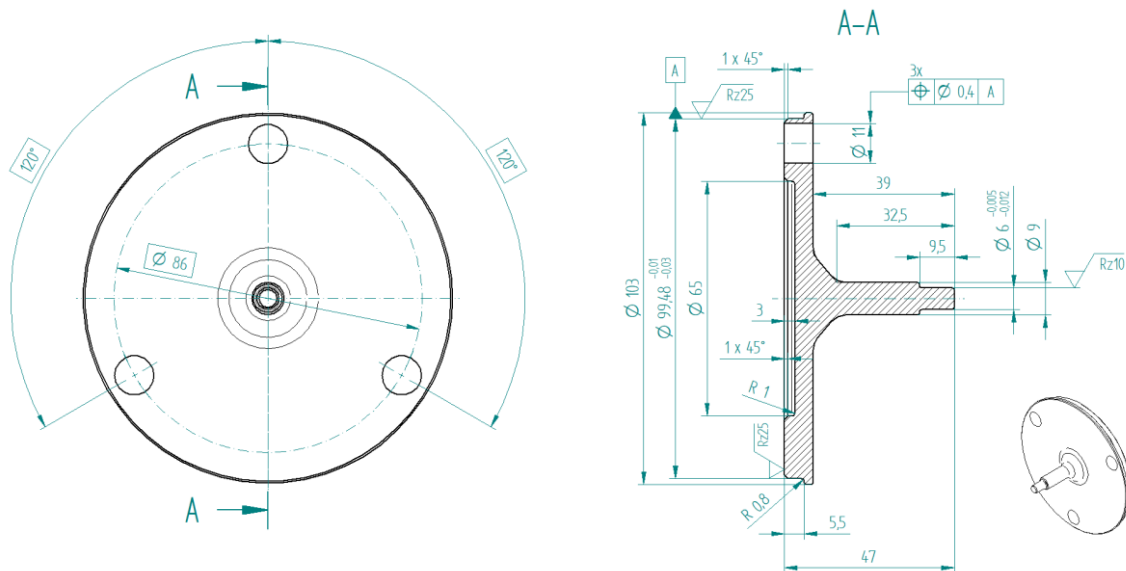


Abbildung 6.34: Geber für Drehzahlsensor (Leerlaufprüfstand)

Im Fahrzeug muss der Drehzahlsensor rückseitig am Elektromotor integriert werden um dessen Drehzahl zu erfassen. Herausforderung hierbei ist – wie bereits oben erwähnt, dass dort bereits ein Resolver montiert (dessen Signal aus Sicherheitsgründen nicht abgegriffen werden kann) und wenig zusätzlich verfügbarer Platz vorhanden ist, siehe Abbildung 6.35. Da der Drehzahlsensor auch vor Umgebungseinflüssen wie Wasser, Sand und Staub geschützt werden muss, diesen Schutz aufgrund des geringen Bauraumes jedoch nicht selbst gewährleistet, wird die Integration des Drehzahlsensors in ein modifiziertes Gehäuse des Resolvers untersucht, siehe Abbildung 6.36. Die Detailierung des Sensorgehäuses ist in Abbildung 6.37 dargestellt.

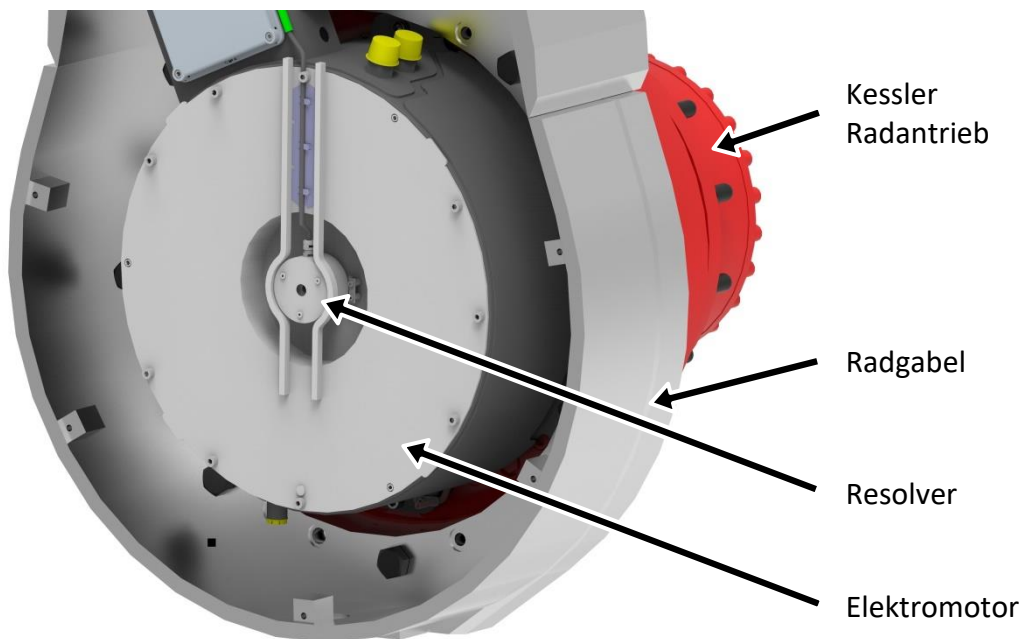


Abbildung 6.35: Einbausituation Elektromotor mit Resolver im Fahrzeug

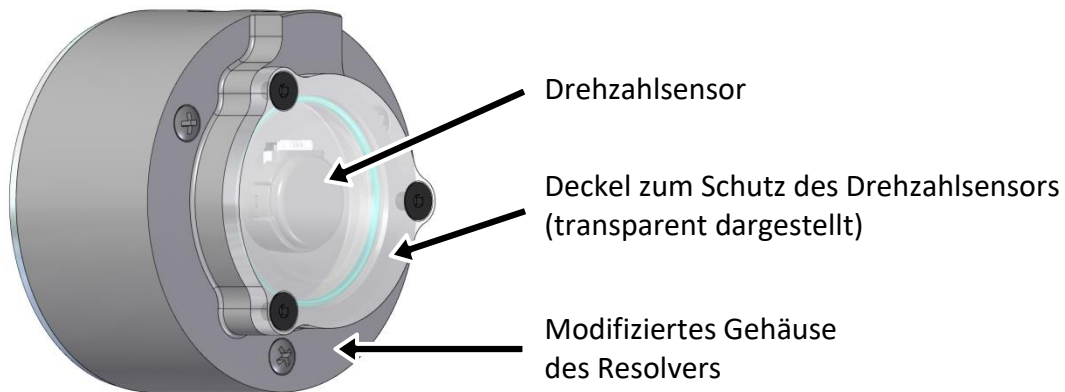


Abbildung 6.36: Integrationsuntersuchung des Sensorgehäuses

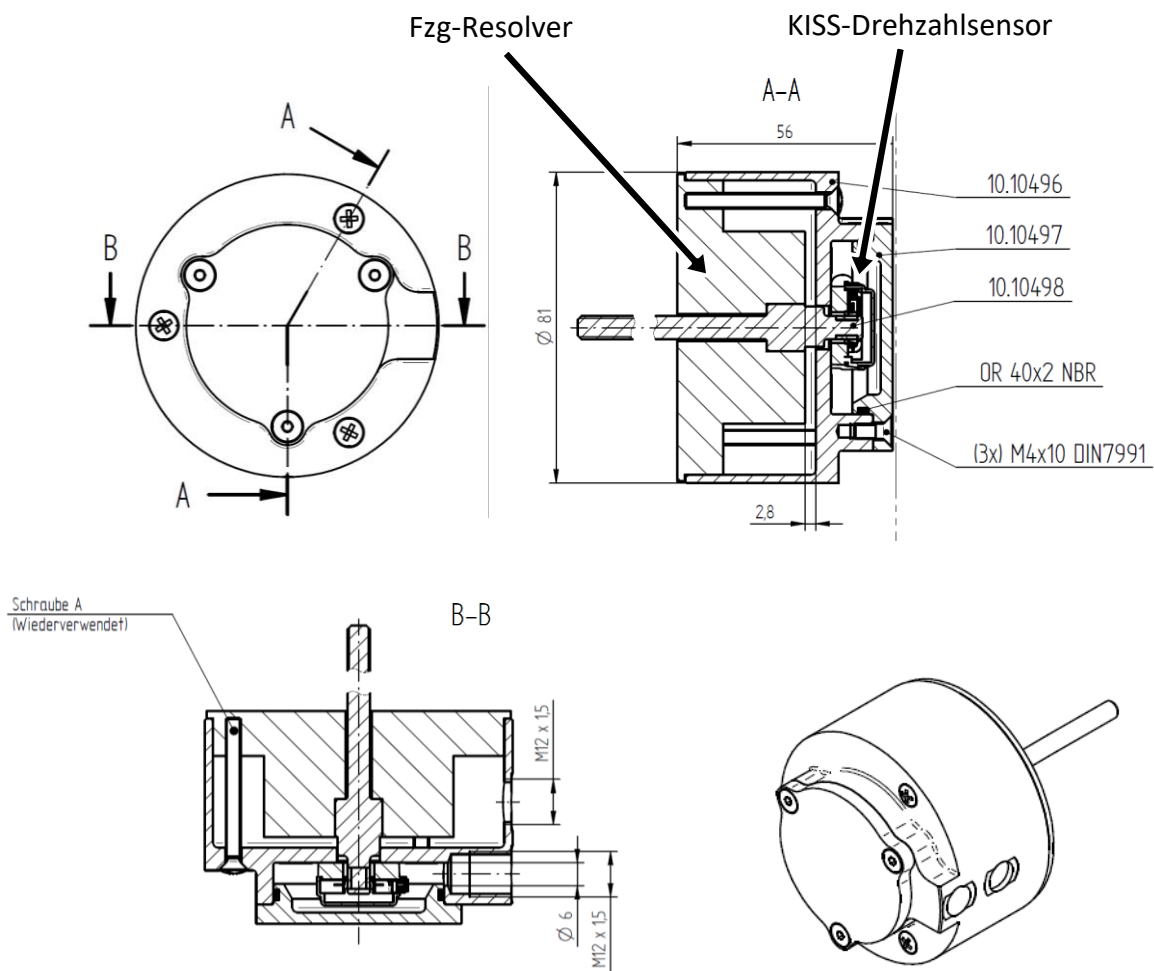


Abbildung 6.37: Detaillierung des Sensorgehäuses

Der Feldeinsatz stellt für die neue Drehzahlmessstelle mit dem Sensorgehäuse Anforderungen, welche diese nicht auf Dauer erfüllen kann. In Abbildung 6.38 sind Schäden an den neuen Drehzahlmessstellen im Feldeinsatz gezeigt, wobei jeweils der Deckel mit seiner Abdichtung zum modifizierten Gehäuse des Resolvers demontiert sind. Dies sind bei (a) ein Wassereintrich sowie bei (b) und (c) verschieden weit fortgeschrittenen Schäden durch für den Sensor zu große Abweichungen des Rundlaufes. Die Exzentrizität der Messwelle führt zu einem

mechanischen Kontakt wischen drehenden und stillstehenden Teilen innerhalb des Sensors, was zu mechanischem Abrieb führt. Dies ist in einem beginnenden Stadium in Abbildung 6.38 (b) und in einem weit fortgeschrittenen Stadium in (c) gezeigt.

Durch den Hafenbetreiber HHLA ist bekannt, dass die Motorwelle und damit auch die Messwelle mit steigender Anzahl an gelaufenen Betriebsstunden eine größer werdende Abweichung des Rundlaufes aufweist.



(a) Wassereinbruch



(b) beginnender Exzentrizität-Schaden



(c) vorgeschrittener Exzentrizität-Schaden

Abbildung 6.38 Schäden an den neuen Drehzahlmessstellen im Feldeinsatz

Die Drehzahlmessstellen sind jedoch im Feldeinsatz ausreichen lang gelaufen um einen Vergleich mit den Messungen auf den Laborprüfständen zu ermöglichen. Des Weiteren hat sich im Projektverlauf gezeigt, dass die – deutlich langsameren, da seltener abgetastet – Drehzahl-signale, welche auf dem CAN-Bus des Fahrzeuges zur Verfügung stehen, ausreichend sind.

6.6 Funktionsmuster

Das Funktionsmuster mit den Hardware-Komponenten der OnBoard-Elektronik der Firma ANDEO, den IEPE-Sensoren und der in Kapitel 6.5 vorgestellten Drehzahlmessstelle wurden auf dem Leerlaufprüfstand aufgebaut und im August 2022 gemeinsam mit der Firma ANEDO und dem ITEM in Betrieb genommen. Parallel wurde das mobile Messsystem des ITEMs (mit welchem auch die bisherigen Untersuchungen auf den Prüfständen und bei der HHLA begleitet wurden) eingesetzt, wodurch ein direkter Vergleich der Messergebnisse beider Systeme ermöglicht wird. Abbildung 6.39 zeigt den Aufbau des Funktionsmusters auf dem Kessler Leerlaufprüfstand mit dem Radantrieb (ohne Bremse da deren Einfluss auf die Messungen vernachlässigt werden kann) im Hintergrund, den Hardware-Komponenten des Funktionsmusters der Firma ANEDO mit einer labor-üblichen „fliegenden“ Verkabelung vorne links und dem mobilen Messsystem des ITEMs rechts. Die Sensorik des Funktionsmusters mit dem Drehzahlsensor und den IEPE-Schwingungssensoren, welche teils durch die Hardware-Komponenten der Firma ANEDO eingelesen werden und teils durch das mobile System des ITEMs, ist in Abbildung 6.40 dargestellt.

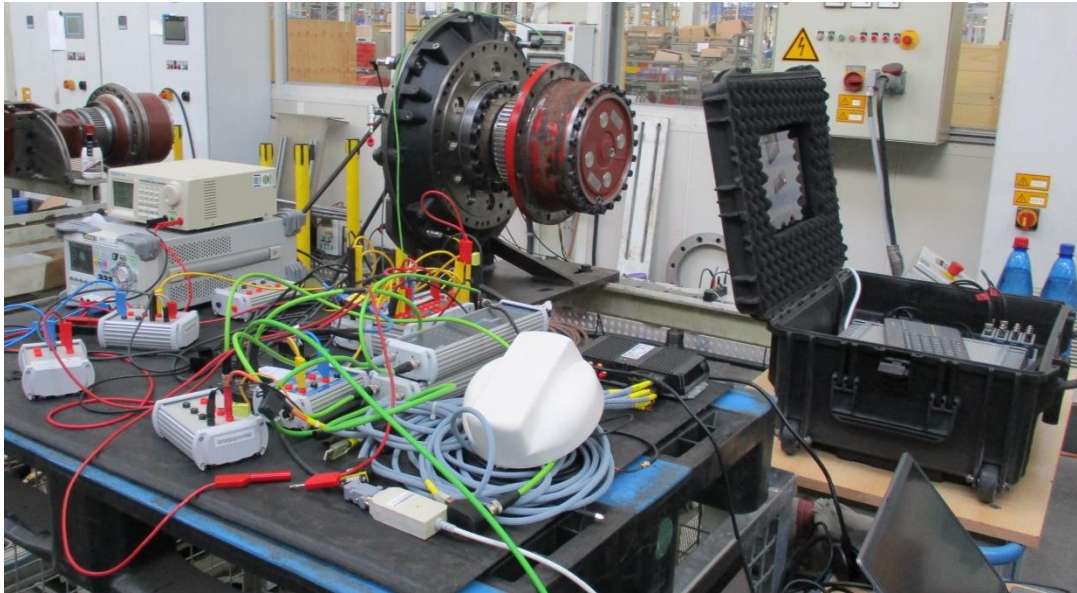
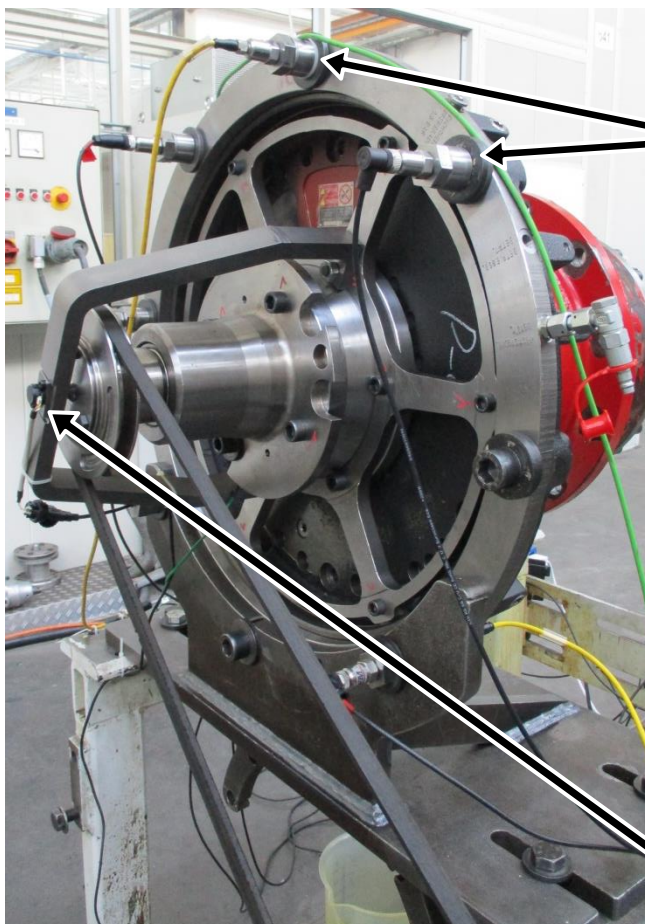


Abbildung 6.39: Hardware-Komponenten des Funktionsmusters (vorne links) und mobiles Messsystem (rechts)



IEPE-Schwingungssensor
an Messschraube

Drehzahlsensor

Abbildung 6.40: Sensorik des Funktionsmusters am Radantrieb

Nach einigen Weiterentwicklungen und Optimierungen des Funktionsmusters im Rahmen der Systemrealisierung wurde dieses für die Systemerprobung an drei Van-Carriern mit jeweils 4 überwachten Radantrieben bei dem Partner HHLA aufgebaut und in Betrieb genommen.

6.7 Fazit

In Zusammenarbeit mit den Firmen ANEDO GmbH, SEGNO Industrie Automation GmbH, dem ITEM an der Universität Bremen sowie mit dem assoziierten Partner Hamburger Hafen und Logistik Aktiengesellschaft konnte im Forschungsprojekt KISS gezeigt werden, dass eine Schadens- und Verschleißüberwachung eines zweistufigen Planetengetriebes, das in den Radantrieben von Van-Carriern verbaut ist, möglich ist. Das Projekt hat dabei ein vollumfassendes Überwachungssystem, inklusive Messtechnik, Vernetzung, KI-Auswertung und Ergebnisbereitstellung via Smart Maintenance, realisiert.

Im Rahmen der Schadensüberwachung wurde gezeigt, dass eine Detektion von Schäden im zweistufigen Planetengetriebe sowohl im Prüfstand- als auch im Hafenumfeld möglich ist. Dabei ist eine Überwachung der Lager- und Verzahnungskomponenten implementierbar. Die Untersuchungen belegen, dass eine Differenzierung auftretender Schäden hinsichtlich des Schweregrades eines Schadens, der betroffenen Komponente und der Lokalisierung in den zwei Planetenstufen realisierbar ist. Das auf Basis von Prüfstanduntersuchungen entwickelte System zur Schadenserkenkung konnte in das störbehaftete Hafenumfeld überführt werden.

Das Prognosemodell ermöglicht, als Ergänzung zur Schadensüberwachung, eine Vorhersage der Restlebensdauer des Getriebes. Dabei ist eine Verschleißprognose für einen definierten Zeitraum möglich. Auf diese Weise ist eine frühzeitige Feststellung eines Systemausfalls möglich. Die Abbildung des Verschleißes wird durch eine merkmalsbasierte Zustandsbeschreibung des Getriebes vorgenommen. Auf Basis des historischen Verlaufs wird eine Prognose über die Weiterentwicklung des Getriebezustandes getätigt. Beim Überschreiten einer experimentell festgelegten Verschleißgrenze wird ein prognostizierter Ausfallzeitpunkt mit Vertrauensintervall berechnet. Analog zur Schadensüberwachung wurde das System anhand von Prüfstanduntersuchungen entwickelt und anschließend in das störbehaftete Hafenumfeld überführt.

Durch das Forschungsprojekt KISS ist eine Überwachung der Radantriebe im Van-Carrier hinsichtlich gegenwärtiger Schäden und prognostizierten Ausfallwahrscheinlichkeiten einsetzbar. Dies trägt einen wesentlichen Anteil zur Optimierung der Wartungsarbeiten, zur Reduktion der Stillstandzeiten und somit insgesamt zu einem ökonomischen Nutzen bei.

7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) bewilligten Mittel wurden zum größten Teil zur Finanzierung des Personals verwendet. Weitere Positionen sind Material- und Reisekosten. Unter die Materialkosten fallen insbesondere die Herstellung der Radantriebe.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Forschungsprojekts KISS durchgeführten Arbeiten sowie die dafür eingesetzten Ressourcen waren sowohl notwendig als auch angemessen, da sie weitgehend den im

Projektantrag formulierten Planungen entsprachen und alle wesentlichen Aufgaben des Arbeitsplans umgesetzt wurden. Das eingesetzte Personal verfügte über die erforderlichen Qualifikationen, fachlichen Kompetenzen und innerbetrieblichen Erfahrungen, um die anspruchsvollen Aufgaben des Projekts erfolgreich zu bewältigen. Darüber hinaus wurde bei der Durchführung des Projekts ein hohes Maß an Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit eingehalten, wobei die geplanten Kosten weitgehend gemäß der Planung des Projektantrags blieben.

9 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen der Prüfstands- und Feldversuche konnten tiefgreifende Erfahrungen bezüglich des Schwingverhaltens der Radantriebe und dessen Teilkomponenten gewonnen werden. Auch im Bereich der Messtechnik und Signalverarbeitung von Körperschal-Signalen an Antriebskomponenten, nicht nur auf den Prüfständen, sondern insbesondere bei den Feldmessungen mit mobiltauglichem System konnten Erfahrungen gesammelt werden, welche weitere Entwicklungen unsere Komponenten Achse, Getriebe und Radantrieb unterstützen können.

Der Einblick in die Zustände unserer Komponenten im Feldeinsatz, weit über die Gewährleistungszeit hinaus, bietet ebenfalls einen wertvollen Erfahrungsschatz, der in die Auslegung und Konstruktion aktueller und zukünftiger Produkte einfließt. Somit wird ermöglicht die Anforderungen von hoher Lebensdauer – auch in weiteren Anwendungen – zu halten oder gar zu erhöhen.

Es konnte die akustische Ankopplung der Sensorik zur Erfassung der Körperschalsignale des Randantriebes über die Messschrauben und die Radgabel an die Radantriebe nachgewiesen werden. Dies kann auch bei zukünftigen Fragestellungen der akustischen Ankopplung von Sensorik als Referenz dienen.

Durch die Aktivitäten in diesem Projekt – unterstützt auch durch die Partner des interdisziplinären Projektkonsortiums – konnten sich die beteiligten Mitarbeiter weiterbilden und somit durch den Kompetenzaufbau im Unternehmen die Position desselben im Markt – mit Produktionsstandort Deutschland – festigen.

10 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurden keine weiteren Fortschritte im Bereich der echtzeitfähigen Antriebsüberwachung im Hafenumfeld festgestellt.

11 Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Das Forschungsprojekt „KI-Basiertes Schadens- und Verschleißerkennungssystem zur cloud-basierten Zustandsüberwachung von Hybrid-Container-Fahrzeugen“ (KISS) wurde auf der Homepage www.kiss.uni-bremen.de mit einer Kurzbeschreibung der Projektziele und der Nennung der beteiligten Projektpartner der Öffentlichkeit vorgestellt.

Die wesentlichen erreichten Ergebnisse des Projektes KISS wurden in Form einer Pressemitteilung auf der Website der [HHLA](http://www.hhla.de) und der [Uni Bremen](http://www.uni-bremen.de) veröffentlicht.

Zudem hat die Universität Bremen (ITEM) mehrere wissenschaftliche Veröffentlichungen herausgegeben, siehe Kapitel 12.

12 Literaturverzeichnis

1. **Bundesamt, Statistisches.** Statistika. [Online] Juni 2024. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/235436/umfrage/umsatz-im-bereich-antriebstechnik-in-deutschland/>.
2. **Reichel, Jens, Müller, Gerhard und Haeffs, Jean.** *Betriebliche Instandhaltung*. s.l. : Springer, 2018.
3. **Lei, Yaguo, et al.** *Condition monitoring and fault diagnosis of planetary gearboxes: A review*. s.l. : Elsevier, 2014.
4. **Zhang, Xin, Wang, Lei und Miao, Qiang.** Fault diagnosis techniques for planetary gearboxes under variable conditions: A review. [Hrsg.] IEEE. *2016 Prognostics and System Health Management Conference*. 2016.
5. **Feng, Zhipeng, Zhang, Dong und Zuo, Ming.** Adaptive Mode Decomposition Methods and Their Applications in Signal Analysis for Machinery Fault Diagnosis: A Review With Examples. *IEEE Access*. 2017, Bd. 5.
6. **Zhang, Shen, et al.** Machine Learning and Deep Learning Algorithms for Bearing Fault Diagnostics -- A Comprehensive Review. *IEEE Access*. 2020, Bd. 8.
7. **Guo, Xiaojie, Chen, Liang und Shen, Changqing.** Hierarchical adaptive deep convolution neural network and its application to bearing fault diagnosis. *Measurement*. 2016, Bd. 93.
8. **Qian, Weiwei, et al.** An intelligent fault diagnosis framework for raw vibration signals: adaptive overlapping convolutional neural network. *Measurement Science and Technology*. 2018, Bd. 29, 9.
9. **Scholtyssek, Julia, Krickmann, Kai und Krieger, Karl-Ludwig.** *Untersuchung der Schwingungscharakteristik und Merkmalsausprägung verschiedener Schädigungsgrade von Kegelrollenlagern in hybriden Radantrieben*. Hamburg : DAGA, 2023. Konferenzbeitrag. 978-3-939296-21-8.
10. **Scholtyssek, Julia, et al.** Vibration-Based Detection of Bearing Damages in a Planetary Gearbox Using Convolutional Neural Networks. *Applied Sciences*. Special Issue: Modern Research of Gears and Power Transmission, 2023, Bd. 13, 14.
11. **Scholtyssek, Julia, Cordes, Felix und Krieger, Karl-Ludwig.** *Investigation of different class structures for detection and classification of gearing damages in a two-stage planetary gearbox of an electrically driven wheel drive*. Hannover : DAGA, 2024. Konferenzbeitrag. 978-3-939296-22-5.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Verbundprojekt: KISS - KI-Basiertes Schadens- und Verschleißerkennungssystem zur cloudbasierten Zustandsüberwachung von Hybrid-Container-Fahrzeugen; Teilvorhaben: Sensorbasierte Schadenserkenung in Radantrieben	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Oltmanns, Daniel	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2024
	6. Veröffentlichungsdatum -
	7. Form der Publikation Document Control Sheet
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Kessler & Co. GmbH & Co. KG Hüttlinger Str. 18-20 73453 Abtsgmünd Deutschland	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 19I21015B
	11. Seitenzahl 43
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Scharnhorststraße 34-37 10115 Berlin Postanschrift : 11019 Berlin	13. Literaturangaben 11
	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 44
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	
18. Kurzfassung Ziel des Vorhabens KISS ist die Entwicklung und Realisierung eines Systems, das eine Schadenserkenung der Komponenten des zweistufigen Planetengetriebe der hochbelasteten Radantriebe von Van-Carrier ermöglicht. Darüber hinaus wird aus den vibroakustischen Zustandsdaten mit Hilfe eines Prognosemodelles die Restlebensdauer der Komponenten der Radantrieben geschätzt und kontinuierlich angepasst. Eine Zustandsüberwachung der stark belasteten Radantriebe ist aus ökonomischer und ökologischer Sicht sinnvoll, um Stillstandszeiten oder gar einen Ausfall der Van-Carrier zu vermeiden. Die Darstellung der Zustandsgröße der Spezialfahrzeuge erfolgt über ein Smart-Maintenance-Web-Interface. Dieses Smart-Maintenance-Frontend ermöglicht die Aufschlüsselung der einzelnen überwachten Van-Carrier mit den ermittelten Kenngrößen der KI-basierten Schadensüberwachung sowie der Lebenszeitprädiktion der Komponenten des Radantriebes. Das Gesamtsystem zur Schadenserkenung und Lebenszeitprädiktion ist auf Basis von Vibrationssignalen aufgebaut. Die Vibrationssignale werden direkt an den jeweiligen Radantrieben aufgenommen, aufbereitet und über die entwickelte IT-Infrastruktur an einen externen Rechenserver für die Datenauswertung geleitet. Für die Entwicklung der Algorithmen zur Schadenserkenung und Lebenszeitprädiktion werden im ersten Schritt Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, um die Mess- und Signalverarbeitungskette zu realisieren. Es folgen Prüfstanduntersuchungen, in denen die Systemkonzeption der beiden Teilsysteme validiert und methodische Vorgehensweisen für die Signalanalyse ausgearbeitet werden. Abschließend erfolgt die Übertragung der Teilsysteme ins Feld. Dies beinhaltet eine Optimierung und Anpassung der Signalvorverarbeitung, um die im Hafenumfeld auftretenden Störgrößen zu kompensieren sowie eine Anpassung der Signalanalyseverfahren. Abschließend erfolgen die Systemerprobung und nachgelagerte Optimierungen am Gesamtsystem.	
19. Schlagwörter KISS, KI, Künstliche Intelligenz, Planetengetriebe, Körperschall, Sonderfahrzeuge, Hafen	
20. Verlag -	21. Preis -

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Compositeproject: KISS - AI-based damage and wear detection system for cloud-based condition monitoring of hybrid container vehicles; Sub-project: Sensor-based damage detection in wheel drives	
4. author(s) (family name, first name(s)) Oltmanns, Daniel	5. end of project 30.06.2024
	6. publication date -
	7. form of publication Document Control Sheet
8. performing organization(s) (name, address) Kessler & Co. GmbH & Co. KG Hüttlinger Str. 18-20 73453 Abtsgmünd Deutschland	9. originator's report no. -
	10. reference no. 19I21015B
	11. no. of pages 43
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Scharnhorststraße 34-37 10115 Berlin Postanschrift : 11019 Berlin	13. no. of references 11
	14. no. of tables 3
	15. no. of figures 44
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) -	
18. abstract The goal of the KISS project is the development and implementation of a system that enables damage detection for the components of the two-stage planetary gearbox in the heavily loaded wheel drives of Van Carriers. Additionally, the remaining service life of the wheel drive components will be estimated and continuously adjusted based on vibroacoustic condition data using a predictive model. Condition monitoring of the heavily stressed wheel drives is economically and ecologically beneficial to avoid downtime or even failure of the Van Carriers. The condition of the special vehicles is displayed via a smart maintenance web interface. This smart maintenance frontend enables the breakdown of individual monitored Van Carriers, including the key metrics derived from AI-based damage monitoring and the service life prediction of the wheel drive components. The overall system for damage detection and service life prediction is based on vibration signals. These vibration signals are captured directly at the respective wheel drives, processed, and transmitted through the developed IT infrastructure to an external server for data analysis. For the development of the algorithms for damage detection and service life prediction, initial fundamental research is conducted to establish the measurement and signal processing chain. This is followed by test bench studies, where the system design of the two subsystems is validated, and methodological approaches for signal analysis are developed. Finally, the subsystems are transferred to field operations, which involves optimizing and adapting the signal preprocessing to compensate for the disturbances encountered in the port environment, as well as adjusting the signal analysis methods. The process concludes with system testing and subsequent optimizations of the overall system.	
19. keywords KISS, AI, artificial intelligence, planetary gear, structure-borne noise, special vehicles, harbour	
20. publisher -	21. price -