BMWi-Verbundprojekt: PräDEM

Forschung für eine prädiktive Diagnose von elektrischen Maschinen in Fahrzeugantrieben

Abschlussbericht

vom 1.10.2009 bis 30.09.2011

Förderkennzeichen: 19U9032

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter den Förderkennzeichen:

19U9032A Volkswagen AG

19U9032B Technische Universität Ilmenau

19U9032C Universität Kassel

gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren:

Volkswagen AG:	Dr. Gerd Stöhr, Matthias Huppert
Universität Kassel:	Prof. Dr. rer. nat. Ludwig Brabetz, Dr.-Ing. Mohammed Ayeb, Reza Azimpoor, Florian Dräger, Andrea Flach
Technische Universität Ilmenau:	Prof. Dr. phil. Heidi Krömker, Sascha Falke

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung 7
2 Aufgabenstellung 10
2.1 Abweichung vom Gut-Pfad detektieren 10
2.2 End-of-Line Test 13
2.3 Menschzentrierte Gestaltung 13
3 Vorstudien 15
3.1 Stand der Technik 15
3.1.1 Literaturrecherche 15
3.1.2 Normen-Recherche 15
3.2 Fehleranalyse 17
3.2.1 Fehlerbaumanalyse 17
3.2.2 Empirische Zusammenstellung einer Wissensbasis 17
3.2.3 Fertigungsprozess-FMEA 18
3.2.4 Alterungsprozesse 20
3.3 Analysierung des Nutzungskontexts 21
3.3.1 Nutzer 21
3.3.2 Arbeitsaufgabe 24
3.3.3 Arbeitsmittel 25
3.3.4 Umgebung 25
4 Modellierung 27
4.1 Thermisch 27
4.2 Akustisch 28
4.3 Elektromagnetisch 29
4.4 Nutzungsanforderungen festlegen 31
5 Experimentelle Aufbauten 33
5.1 Auslaufversuch 33
5.2 3-E-Prüfstand 33
5.2.1 Messsystem 34
5.2.2 IT Struktur 35
5.2.3 Messdurchführung 35
5.3 Rollenprüfstand 37
5.3.1 Fahrsimulator 37
5.3.2 Messsysteme 39

5.4 Prüflinge 40
5.4.1 Sensorsysteme 40
5.4.2 Fehlermaschinen 41
5.4.3 Temperaturmaschinen 42
5.5 Entwerfen von Gestaltungslösungen 43
5.5.1 Konzeption 43
5.5.2 Prototyping 44
6 Messungen und Auswertung 46
6.1 Charakterisierung, Modellparametrierung und -validierung 46
6.2 Fehlerdetektion 47
6.2.1 Vorgehensweise 47
6.2.2 Algorithmen 48
6.2.3 Prototypische Umsetzung 53
6.2.4 Produktionsprozess 54
6.2.5 Prüfstand EOL 54
6.3 Versuchsreihen zur Absicherung 56
6.3.1 Dauerläufe 56
6.3.2 Analyse von defekten E-Maschinen 57
6.3.3 Thermische Auswertung EOL 60
6.4 Evaluieren von Gestaltungslösungen 63
6.4.1 Empirische Evaluation 63
6.4.2 Analytische Evaluation 65
7 Zusammenfassung 67
8 Literaturverzeichnis 68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verarbeitungsstufen einer Fehlerdiagnose 11

Abbildung 2: Literaturdatenbank 15

Abbildung 3: Fehlerbaumanalyse 17

Abbildung 4: Temperaturschock-Zyklus 20

Abbildung 5: Übersicht über die Rollen im Projekt PräDEM 21

Abbildung 6: Thermisches Modell in Simulink 28

Abbildung 7: Erste und zweite Eigenform des Stators 28

Abbildung 8: Feldverläufe in der Elektrischen Maschine (Finite Elemente Simulation) 30

Abbildung 9: Zerlegung der Maschine in magnetische Widerstände 30

Abbildung 10: Das magnetische Ersatznetzwerk für die elektrische Maschine 31

Abbildung 11: Schema experimenteller Aufbau 33

Abbildung 12: Schematische Darstellung eines 3-E-Maschinenprüfstands 33

Abbildung 13: IT-Struktur 35

Abbildung 14: FPT 75 [1] 36

Abbildung 15: Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) [1] 36

Abbildung 16: Umbau Fahrsimulator 38

Abbildung 17: Fahrsimulator bestehend aus Fahrzeug und Rollenprüfstand 39

Abbildung 18: dSPACE MicroAutoBox II 39

Abbildung 19: Datenlogger zum Einsatz im Fahrzeug 40

Abbildung 20: Handelsüblicher und günstiger Klopfsensor 41

Abbildung 21: Lager mit manipuliertem Innenring 42

Abbildung 22: Abstrakter Papierprototyp 44

Abbildung 23: Mock-up einer prädiktiven Diagnosemeldung 45

Abbildung 24: Funktionaler high-fidelity Prototyp 45

Abbildung 25: Exemplarisch: zwei abgeglichene Arbeitspunkte (rot = Simulation, blau = Messung) .. 46

Abbildung 26: Vergleich zwischen der Simulation und Messung 47

Abbildung 27: Campbell-Diagramm: oben "Gutmaschine", unten Innenring manipuliert 49

Abbildung 28: Aufteilung der berechneten Verluste 50

Abbildung 29: Spannungsverlauf am Ende des Auslaufversuchs 50

Abbildung 30: Flussdichte in den Statorzähnen 51

Abbildung 31: Messergebnisse einer Gutmaschine im Kurzschluss-Betrieb 51

Abbildung 32: Messergebnisse einer fehlerbehafteten Maschine im Kurzschluss-Betrieb 52

Abbildung 33: Prinzipbild - Kurzschluss zwischen Phase und Gehäuse 53

Abbildung 34: Strommessung bei unterschiedlichen hochohmigen Kurzschlüssen 53

Abbildung 35: Kennlinienmessung der EOL-Abnahme 55

Abbildung 36: Pegelverläufe der E-Maschine 55

Abbildung 37: Körperschallverlauf über die Zeit 58

Abbildung 38: Lagerschaden mit zerstörtem Lagerkäfig 58

Abbildung 39: Loch in der Außenwand der Wuchtscheibe 59

Abbildung 40: Wärmebilder E-Maschine 60

Abbildung 41: Verteilung Differenz der Sensorsignale, S1 Test, 1700s 61

Abbildung 42: Standardabweichung der Differenz der Sensorsignale über Temperatur 61

Abbildung 43: Wickelkopftemperatur über Zeit bei max. Belastung, Fit Model (siehe Text) 62

Abbildung 44: Prognose der Wickelkopftemperatur nach kurzer Messzeit 63

Abbildung 45: Einflussfaktoren von User Experience für die prädiktive Diagnose in Elektrofahrzeugen [11, 31] 64

Abbildung 46: User Experience Testaufbau 65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definierte Fehlerzustände 18

Tabelle 2: Isolations-FMEA 19

Tabelle 3: Persona-Übersicht 23

Tabelle 4: Beispiel von Anforderungen einer prädiktiven Diagnose 32

Tabelle 5: Leistungskennwerte des 3E-Prüfstands 34

Tabelle 6: Übersicht der resultierenden Datenmengen 34

Tabelle 7: Leistungsdaten Rollenprüfstand 37

Tabelle 8: Auszug: Überblick Fehlermaschinen 41

Tabelle 9: Übersicht Gestaltungsparameter 44

Tabelle 10: Beispielhafte Empfehlungen zur Verbesserung der User Experience 65

Tabelle 11: Beispiele aufgedeckter Verstöße gegen Heuristiken 66

1 Zielsetzung

Elektrische Maschinen sind seit langer Zeit in einem breiten Leistungs- und Anwendungsbereich im Einsatz. Dennoch ergibt ihre Applikation in der Elektrotraktion eine Reihe von in dieser Kombination neuen Anforderungen, so z. B. geringe Masse und Volumen, lange Lebensdauer, exzellente Energieeffizienz und niedrige Kosten bei hoher Qualität unter den teilweise extremen physikalischen Randbedingungen mobiler Systeme.

Insbesondere die Zuverlässigkeit erhält beim Einsatz im Fahrzeug entscheidende Bedeutung, da eine unerwartet verminderte Leistungsfähigkeit der elektrischen Maschine bis hin zu einem völligen Ausfall in sicherheitskritischen Fahrsituationen mit erheblichen Unfallrisiken verbunden sind. Dieses Risiko wird bei separatem Antrieb der linken und rechten Räder noch um eine Größenordnung gesteigert, da hier das im Fehlerfall entstehende Moment direkt auf die Fahrzeuglenkung einwirkt. Neben einer hohen Qualität der elektrischen Maschine ergibt sich damit zwingend die Notwendigkeit, durch eine frühe, in diesem Sinne also prädiktive Diagnose ihrer Funktion, kritische Fahrsituationen zu vermeiden und/oder zumindest rechtzeitige Gegenmaßnahmen einleiten zu können.

Damit ist ein Verfahren notwendig, welches über die Fahrzeuglebensdauer die Diagnose der Maschinenkenndaten sowie die Prognose einer möglichen Fehlfunktion erlaubt. Anders als in bekannten sicherheitskritischen Anwendungen, wie z. B. in der Prozesstechnik, stehen dafür Mehraufwendungen in Form von Redundanz, Sensorik oder Wartung nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung. So wird ein innovatives Verfahren angestrebt, welches auf einer genauen Analyse der potentiellen Fehlerursachen, einer einfachen, volumentauglichen Sensorik und der zusätzlichen Auswertung der im mechatronischen System Fahrzeug bereits verfügbaren Daten basiert.
Die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen muss sowohl für den internen als auch für den externen Kunden systematisch auf der Ebene der Benutzerschnittstelle entwickelt werden. Für den internen Kunden (z. B. Mitarbeiter oder Mitarbeiterin der Werkstatt) spielt eine effiziente und leicht erlernbare Durchführung messtechnischer Aufgaben eine wesentliche Rolle. Das sichere Erkennen von Fehlern und deren Ursachen, deren Prädiktion sowie Prognosen von Wartungsintervallen sind dabei wesentliche Aufgaben. Aber auch für die Akzeptanz bei externen Kunden (Fahrer oder Fahrerin) ist die transparente und situationsbezogene Darstellung von Fahrzeugdaten sowie Fehlermeldungen während des Fahrens wesentlich.

Innovative Visualisierungen sowie intuitive Interaktionen sind wichtige Voraussetzung für eine langfristige Akzeptanz bei den beiden Zielgruppen. Dazu sind frühzeitig Nutzer in den

Entwicklungsprozess nach den neuesten Methoden des Usability Engineerings mit einzubeziehen, um deren Anforderungen systematisch auf die Mensch-Maschine-Schnittstelle abbilden zu können.
Das Ziel des Verbundprojektes „Forschung für eine prädiktive Diagnose von elektrischen Maschinen in Fahrzeugantrieben“ ist die Erforschung einer wissenschaftlichen methodischen Basis für die frühzeitige Erkennung von Fehlermodi der elektrischen Maschine im Gesamtsystem Fahrzeug. An dem Forschungsprojekt sind die folgenden Partner beteiligt:

- Volkwagen AG
- Universität Kassel
- Technische Universität Ilmenau

Neben der Entwicklung geeigneter Modelle für die Fehlerarten und Fehlerfortpflanzung im Gesamtsystem sowie der Algorithmen zur Fehlererkennung ist eine prototypische Umsetzung mit nachfolgender Validierung am Prüfstand und im Fahrzeug geplant. Der modellbasierte Ansatz sieht die Nutzung aller relevanten und bereits vorhandenen Fahrzeugdaten vor, so dass der zusätzliche messtechnische Aufwand minimiert wird. Die folgenden Randbedingungen und Kriterien sind zu erfüllen bzw. anzulegen:

Fehlererkennung:

- Möglichst hohe Erkennungsrate (Failure Coverage)
- Hohe Signifikanz und damit Ausschluss von Fehlalarm
- Eindeutigkeit der Fehlerzuordnung

Adaption:

- Anpassung an erlaubte zeitbedingte Änderungen
- Anpassung an komponentenspezifische Abweichungen

Prädiktion, Prognose:

- Langfristige Auswertung zur Wartungsintervallbeeinflussung
- Kurzfristige Auswertung für Notlauf und Fehlervermeidung
- Erweiterbare und skalierbare Methoden

Ergonomisch hochwertige Bedienoberfläche für alle Nutzergruppen:

- Produktion (End of Line),
- Service, Wartung
- sowie für Fahrzeugfahrer/in

Ausgangspunkt der Forschungsarbeiten war die Erfassung und Charakterisierung der möglichen Fehlerursachen einer elektrischen Maschine in Verbindung mit einer möglichst modellbasierten Analyse der Fehlerauswirkungen auf Antriebs- und Fahrzeugebene. Eine notwendige Modellierung der Fahrzeugdynamik und -elektrik wurde auf der Systemebene erstellt. Darauf aufbauend wurde die Sensitivität der Signale vorhandener (und virtueller) Fahrzeugsensoren auf die so definierten Fehlersymptome untersucht. Die zusätzliche Sensorik war auf ihre Eignung (akustisch oder thermisch) hin zu bewerten.

Im Prüfstandsversuch sind auf Maschinenebene die Fehlerauswirkungen durch gezielte Fehlerinjektion zu quantifizieren und die Antwort des Fahrzeugsystems modellbasiert abzuleiten.
Auf dieser Basis sind unterschiedliche Auswertungsalgorithmen zur Fehlererkennung vergleichend zu analysieren, eine Auswahl zu treffen und diese dann zu einem Versuchsmuster weiterzuentwickeln. Dieses unterscheidet drei Einsatzmöglichkeiten mit folgenden Randbedingungen:

Grundlagenuntersuchungen:

- Nicht Echtzeitfähig
- hohe Rechnerleistung

Prüfstandsuntersuchungen zur Zuverlässigkeit:

- Echtzeitfähig
- hohe Rechnerleistung

Onboard-Diagnose:

- Echtzeitfähig
- niedrige Rechnerleistung, wie bei eingebetteten System (ES)

Durch eine Validierung sowohl am Prüfstand als auch am Fahrzeug sind schließlich Umsetzbarkeit bzw. Restriktionen der Diagnosefähigkeit exemplarisch darzustellen. Die gewonnenen Ergebnisse sollen aufbereitet und eine Übertragung hinsichtlich der Bedienbarkeit für verschiedene Benutzergruppen überprüft werden.

2 Aufgabenstellung

2.1 Abweichung vom Gut-Pfad detektieren

Monitoring und Diagnose elektrischer Maschinen ist ein etablierter Forschungsbereich, da die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von elektrischen Aktoren in vielen Systemen sowohl kritisch für die Sicherheit sind, als auch einen wesentlichen Kostenfaktor darstellen. Beispielhaft seien stationäre Anwendungen in Kraftwerken und Chemieproduktionen sowie mobile Applikationen in der Luftfahrt aufgeführt. Dadurch liegt ein differenziertes Wissen über potentielle Fehlerursachen und Folgefehler vor. Diese sind im Wesentlichen elektrischer, thermischer, materialtechnischer oder mechanischer Natur, so z. B. in den Bereichen:

- Isolation,
- Kontaktierung,
- Teilentladung,
- elektrische Komponente,
- Lager,
- Befestigung,
- Toleranz,
- Exzentrität,
- andere konstruktive Parameter.

Ursächlich sind, wenn von einer korrekten Auslegung der Maschine gemäß Spezifikation ausgegangen wird, produktions-, montage- oder anwendungsbedingte (einsatzbedingte) Probleme sowie Verschleiß und Derating von Materialeigenschaften.

Der gegenwärtige Stand der Technik zeigt, dass die Regelungseinheit einschließlich Leistungselektronik über eine sehr weitreichende Eigendiagnose verfügt und darüber hinaus im begrenzten Maß nicht plausible Zustände der elektrischen Maschine erkennt. Durch den Einsatz zusätzlicher Sensorik, meist Temperatur-, Momenten-, Magnetfeld- oder Schwingungsaufnehmer, kann die Datenbasis erhöht werden, so dass mit empirischen und/oder modellbasierten Algorithmen Fehlererkennung, -identifizierung und -prognose ermöglicht werden.

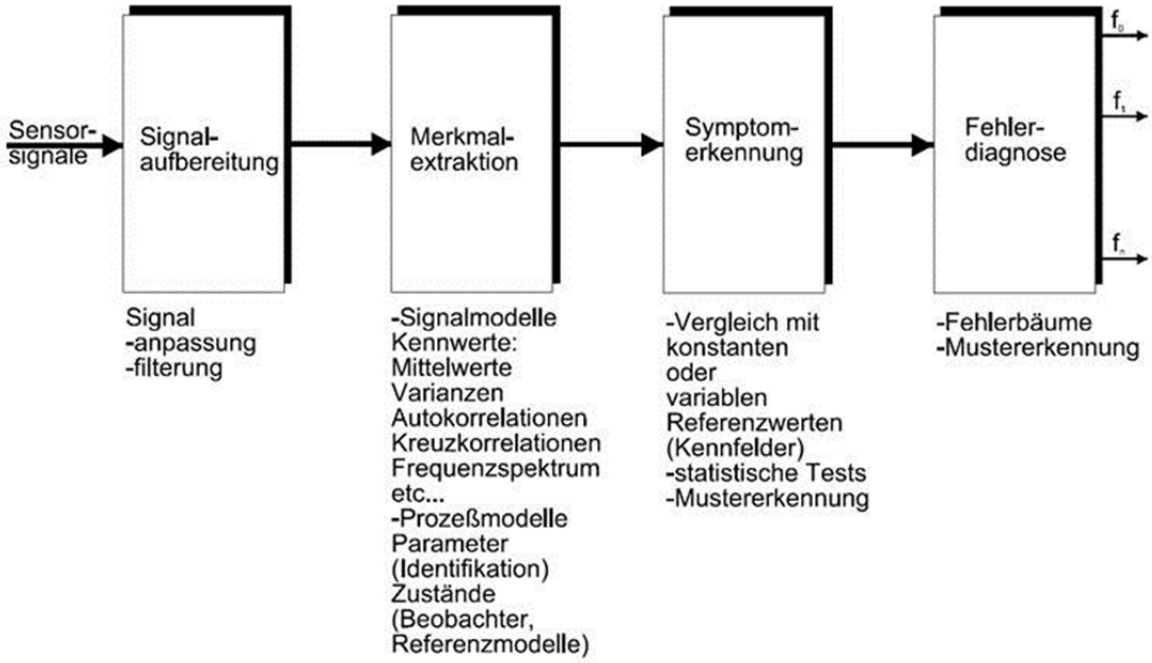


Abbildung 1: Verarbeitungsstufen einer Fehlerdiagnose

Die Vielfalt der technischen Systeme und der im Betrieb auftretenden verschiedenartigen Fehler haben zu einer Vielfalt von Ansätzen zur Überwachung bzw. Diagnose dieser Systeme und deren Komponenten geführt. Abhängig von der Komplexität der Systeme und der geforderten Schärfe der Diagnose-Aussage reichen die implementierten Diagnosefunktionen von der einfachen Erkennung von Leitungsunterbrechungen bzw. -kurzschlüssen bis hin zur vollständigen Funktionsdiagnose. Obwohl die eingesetzten Methoden zur Diagnose zum Teil sehr unterschiedlich sind, sind einige Funktionsstufen identisch (Abbildung 1).

Signalaufbereitung:
Die Signalaufbereitung hat zur Aufgabe, die von den Sensoren stammenden Signale in Datensätze umzuwandeln, mit denen die weitere Verarbeitung zur Gewinnung von Merkmalen ermöglicht wird.

Merkmalextraktion:
Die Merkmalextraktion findet in der Regel anhand eines Modells statt. Darunter ist der Einsatz von Signal- und/oder Prozessmodellen zu verstehen.

Bei Signalmodellen werden Kennwerte für bestimmte Signale gebildet. Diese sind u. a. Mittelwerte, Varianzen, Kreuz- und Autokorrelationen oder Frequenzspektren. Zur signalbasierten Verarbeitung der Sensordaten gehören auch die Hauptfaktorenanalysemethoden. Diese dienen zur Erfassung der

Hauptkorrelationen zwischen einer Vielzahl von Sensordaten im Normalbetrieb und können dadurch im Fehlerfall einen Ausfall erkennen und anzeigen. Auch ein minimales Abweichen vom Normalverhalten kann detektiert werden. Die gegenwärtigen Methoden können auf nichtlineare und dynamische Vorgänge erweitert und somit auf eine Vielzahl von mechatronischen Systemen wie Elektromotoren übertragen werden. Die Systeme sind in der Lage, ein von der Norm abweichendes Verhalten anzuzeigen, ohne detaillierte Aussagen zur Fehlerursache und -ort anzugeben.

Bei Prozessmodellen handelt es sich um die Nachbildung des Prozessverhaltens, also die Berechnung der Prozessausgänge in Abhängigkeit der vorliegenden Prozesseingänge und -parameter. Die Merkmale der Prozessmodelle können die Parameter des Modells sein, die bei der Merkmalextraktion aus den gemessenen Ein- und Ausgängen und unter der Festlegung einer Modellstruktur laufend berechnet werden. Merkmale können aber auch die Zustände des Modells sein, die bei Kenntnis der Modellparameter und beim Vorliegen der Ein- und Ausgänge des Systems bestimmt werden. Eine weitere Variante stellt der Einsatz eines Modells als Referenzmodell dar. Damit kann ein Soll-Zustand berechnet werden und mit einem gemessenen Ist-Zustand verglichen werden. Eine letzte Variante stellt der Einsatz eines Modells zur direkten Bestimmung des Merkmals als Modellausgang dar.

Symptom-Erkennung:
Die so gewonnenen Merkmale werden in einer weiteren Stufe zu Symptomen verarbeitet. Dabei reicht die Komplexität vom Vergleich mit konstanten Schwellwerten bis zum Einsatz von statistischen Tests oder Mustererkennungsmethoden.

Fehlerdiagnose:
Die abgeleiteten Symptome können dann mit Hilfe von Fehlerbäumen oder der Mustererkennung zur konkreten Diagnose der eventuell aufgetretenen Fehler (nach Art, Ort und/oder Umfang) weiterverarbeitet werden. So ist es z. B. möglich, mit Hilfe der Parameteridentifikationsverfahren die Wicklungswiderstände zu ermitteln und eine Überhitzung mit fatalen Folgen rechtzeitig zu detektieren.

Die eingeführten Methoden werden auf ihre Eignung für die verschiedenen Fehlerbilder von Elektromotoren im System Fahrzeug untersucht. Bewertet werden vor allem der Messaufwand, die benutzerfreundliche Applikation und der erforderliche Rechenaufwand der Algorithmen. Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse bei der Entwicklung und der Anwendung der Algorithmen werden Versuchsplanung und statische Tests eingesetzt.

Für die systematische Entwicklung einer benutzerfreundlichen Bedienoberfläche werden entwicklungsbegleitend die Methoden des Usability Engineerings eingesetzt.

2.2 End-of-Line Test

Die Durchführung eines EOL[1]-Tests ist in erster Linie eine qualitätssichernde Maßnahme zur Gewährleistung einer hohen Produktqualität. Dazu werden während der Produktion der einzelnen Antriebskomponenten und bei der Montage der E-Maschine, vor und nach verschiedenen Arbeitsschritten, elektrische und mechanische Messungen durchgeführt. Diese sind notwendig zur Ermittlung von Defektteilen bzw. zum Aufzeigen nicht korrekt durchgeführter Arbeitsschritte, die gegebenenfalls wiederholt oder optimiert werden müssen. Nach der Fertigung wird der E-Antrieb mit verschiedenen Messreihen auf seine Spezifikation getestet. Dabei wird u. a. eine Luft- und Körperschallmessung durchgeführt. Während der Prüfungen werden sämtliche Messdaten aufgezeichnet bzw. aus den Messgrößen ermittelt. In Bezug auf das Projekt gilt, dass die Messdaten bei Auftritt eines Fehlers Informationen über den Fehler liefern können. Eventuell sind sogar Aussagen über die Fehlerquelle selbst möglich. Infolgedessen kann die Vorgehensweise als Grundlage für eine prädiktive Diagnose genutzt werden, da es prinzipiell dem gleichen Prinzip entspricht. Für die Entwicklung einer Prädiktiven Diagnose müssen allerdings zuerst Fehlererkennungsalgorithmen entwickelt werden, die aus den Messdaten eigenständig Fehlermuster erkennen und letztendlich die Ursache lokalisieren. Als Weiterentwicklung ergibt sich die Möglichkeit, eine minimierte Form der EOL-Prüfung im Fahrzeug einzusetzen, um dieses Prinzip der Fehlererkennung als OBD[2] nutzen zu können. Die im EOL-Test verwendeten Messreihen können im Fahrzeug nicht ohne weiteres umgesetzt werden, da die Betriebsbedingungen nicht identisch sind. Daher sind für den OBD Einsatz andere Testszenarien zu entwickeln, die während des normalen Betriebs im Alltag durchgeführt werden können.

2.3 Menschzentrierte Gestaltung

Die Durchsetzungskraft von Elektromobilität als neue Antriebstechnologie am Markt hängt im hohen Maß von deren Sicherheit und Zuverlässigkeit im Alltag sowie von der Stabilität und Effizienz des Produktionsprozesses ab. Um dies garantieren zu können, ist die permanente Überwachung des elektrischen Antriebs unabdingbar. Dies stellt wiederum gänzlich neue Anforderungen an die Diagnose elektrischer Antriebe von frühen Phasen der Entwicklung über die Nutzung während der Fahrt bis zur Wartung in der Werkstatt. Der Mensch als Nutzer dieser Technologie ist dabei der Schlüssel für eine breite Akzeptanz, die vor allem von der Zuverlässigkeit und Nutzerfreundlichkeit der Systeme abhängt. Die Herausforderung ist, die Bedürfnisse und Anforderungen unterschiedlichster Rollen und Nutzertypen, die mit der Diagnose elektrischer Antriebe in Berührung kommen, zu identifizieren und auf den zugehörigen Mensch-Maschine-Schnittstellen abzubilden. Ein Lösungsansatz ist die menschzentrierte Gestaltung, die zunächst den Nutzungskontext systematisch

[1] EOL- End of Line
[2] OBD - Onboard Diagnose

analysiert, potentielle Nutzer so früh wie möglich in den Entwicklungsprozess einbezieht und deren Anforderungen in die Systementwicklung einfließen lässt [10].

Der im Projekt PräDEM verfolgte Ansatz zur menschzentrierten Gestaltung orientiert sich am nutzerorientierten Gestaltungsprozess nach ISO 9241-210. Er zielt auf die Entwicklung nutzerfreundlicher rechnergestützter interaktiver Systeme, setzt den Fokus auf den Nutzungskontext des Produkts und adaptiert Wissen und Methoden aus den Bereichen der Arbeitswissenschaften, Ergonomie und Usability [22]. Die Wahl auf diesen Prozess fiel aufgrund des international standardisierten und in der Praxis fest etablierten Verfahrens, der Möglichkeit von Iterationen sowie der Einbeziehung potentieller Nutzer von Beginn an, um Probleme in frühen Entwicklungsphasen identifizieren und kosten- und zeiteffizienter beheben zu können.

Der Gestaltungsprozess durchläuft vier Schritte iterativ: Nutzungskontext analysieren, Nutzungsanforderungen festlegen, Gestaltungslösungen entwerfen und Gestaltungslösungen evaluieren. Iterationen begegnen dem Problem sich zeitlich ändernder Nutzerbedürfnisse und erleichtern die Handhabung komplexer Gestaltungslösungen, die oft unterschiedlichste Bedürfnisse abdecken. Der Gestaltungsprozess endet mit Erfüllung der erhobenen Nutzungsanforderungen.

Nachfolgend wird ein Überblick der einzelnen Arbeiten der Projektpartner in chronologischer Abfolge gegeben. Die Volkswagen AG als Konsortialführer hat sich im Projekt vorrangig mit der Prüfung der elektrischen Maschine am Ende der Fertigung und auf dem Prüfstand beschäftigt. Die Universität Kassel war im Projekt hauptsächlich zuständig für die Entwicklung der Auswertealgorithmen, die Messtechnik und die On-Board Fehlererkennung. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle war der Fokus der Arbeiten der Technischen Universität Ilmenau.

3 Vorstudien

3.1 Stand der Technik

3.1.1 Literaturrecherche

Um zunächst Kenntnis über die relevanten Fehler in elektrischen Maschinen zu erlangen, wurde eine eingehende Literaturrecherche durchgeführt. Hierbei war es vor allem notwendig, die Informationen der verschiedenen Veröffentlichungen allen Projektbeteiligten zur Verfügung zu stellen. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen dieser Recherche eine Literaturdatenbank erstellt, in der etwa 270 Veröffentlichungen katalogisiert worden sind (Abbildung 2). Die Stärke der Datenbank besteht darin, die Veröffentlichungen nach verschiedenen Kriterien sortieren zu können. So lassen sich die Literatureinträge nach Fehlerart oder Analysemethode einteilen.

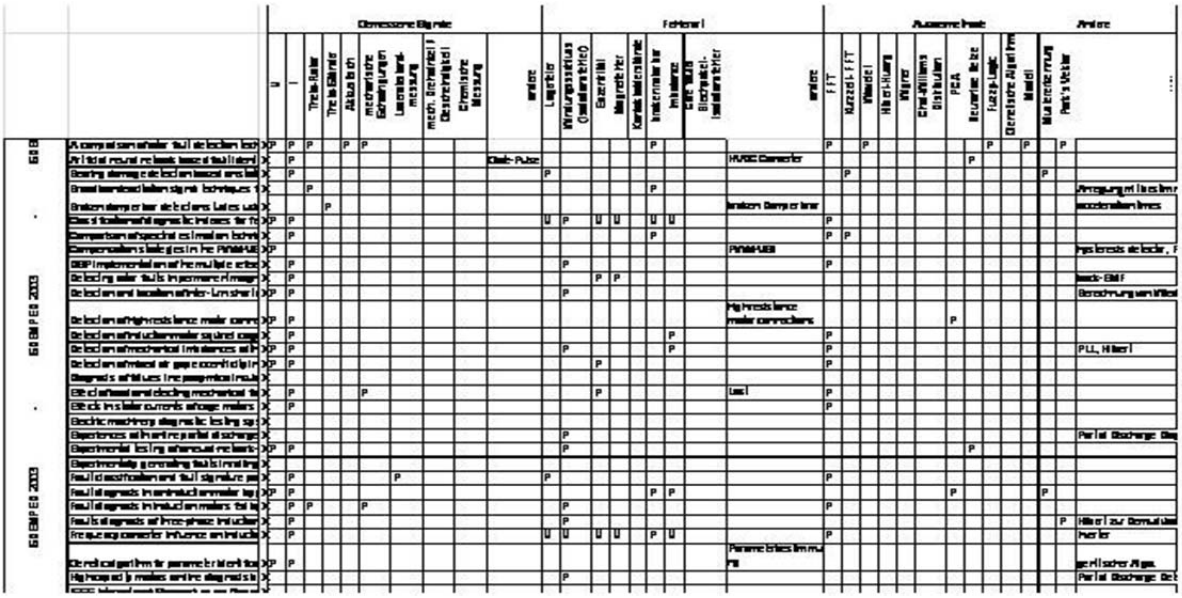


Abbildung 2: Literaturdatenbank

3.1.2 Normen-Recherche

Die Recherche von bestehenden Normen ist insofern sinnvoll, da es sich um Richtlinien handelt, welche auf dem internationalen Markt anerkannt und auch von Kunden gefordert werden. Die Richtlinien spiegeln im eigentlichen Sinne den derzeitigen Stand der Technik des jeweiligen Fachgebiets wieder. Die Situation im Bereich der Normung für Elektrische Antriebstechnik stellte sich jedoch zu Projektbeginn schwierig dar. Spezielle ISO-bzw. DIN-Normen waren für den Bereich der elektrischen Antriebe in Pkws noch nicht vorhanden oder waren bzw. sind noch immer in der Entstehung. Deshalb war es notwendig, sich an Normen aus einem ähnlichen Einsatzgebiet anzulehnen und zu orientieren, um daraus Grundlagen und Hinweise zur verbesserten Entwicklung und Prüfung der E-Maschine für den automotiven Bereich abzuleiten.

Es konnten Normen recherchiert werden, die sich z. B. mit folgenden Themen befassten:

- Fehler in Elektromotoren ausgehend von Gefährdungspotential und -wahrscheinlichkeit
- Temperaturklassen von Materialien
- Validationsprüfungen
    - Diagnosegrößen zur Bestimmung verschiedener Materialparameter
    - Zerstörungsfreies Messen von Isolationsmaterialien
    - Teilentladung
- Akustik
- Fahrzyklen wie z. B. NEFZ (Neuer europäischer Fahrzyklus), FTP 75 (Federal Test Procedure)

Beispielhaft werden einige Normen genauer erläutert:
Anhand der Normen für die Temperaturklassen von Materialien und Validationsprüfungen ließ sich eine Alterungsspezifikation entwickeln, die u. a. auf der sogenannten 10 K-Regel aufbaut und die Grundlagen für einen Temperaturschockzyklus, Vibrations- und Feuchtetest lieferte. Hinsichtlich der Spezifikation kann somit eine realitätsnahe Alterung der E-Antriebe durchgeführt werden.

Für die Durchführung der Teilentladungsmessung konnten ebenfalls Normen recherchiert werden. Diese vermittelten Grundlagen zur Teilentladungsmessung. Im Weiteren sind mögliche Messverfahren vorgestellt und der Frequenzgang der Messwerte diskutiert worden, um daraus resultierend die Möglichkeiten der Teilentladungs-Darstellung aufzuzeigen. Abgesehen davon wurde sehr detailliert auf die verschiedenen Messgeräte eingegangen, mit denen unterschiedliche Größen der Teilentladung gemessen werden können. Außerdem ist das Thema Kalibrierung des TE-Messsystems beschrieben, um die Eigenschaften des gesamten Systems aufrechtzuerhalten und eine Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Als letztes wichtiges Thema wurden die möglichen Prüfschaltungen und die Möglichkeiten zur Störunterdrückung bei der Messung vorgestellt. Unter Berücksichtigung dieser Normen war es möglich, geeignete Messverfahren zur Prüfung der E-Maschinen zu entwickeln.

Mithilfe der Normen, die sich mit mechanischen Schwingungen in elektrischen Maschinen und deren Bewertung befassten, konnten erste Eindrücke zum Vergleich der vorhandenen Akustik gewonnen werden. Die Normen beschrieben u. a. folgende Themen:

- Klassifizierung der E-Maschine
- Betriebsbedingungen
- bevorzugte Sensorankopplungen und Messpunkte
- Messverfahren und Möglichkeiten der Auswertung
- Grenzwerte für Schwingbeschleunigung, -geschwindigkeit und -weg

Mit diesen Normen ist eine Orientierung an anderen elektrischen Maschinen über die Messgrößen möglich. Weiterhin konnte eine Norm recherchiert werden, welche sich auf die Sicherheit von elektrischen Schaltungen bezieht. Diese galt als Grundlage für den Aufbau einer Hochspannungs-Messplatine. Die Norm schrieb in gewisser Weise den Aufbau der Schaltung vor, um die Sicherheit bei Hochspannungen zu gewährleisten.

3.2 Fehleranalyse

3.2.1 Fehlerbaumanalyse

Neben der umfangreichen Literaturrecherche, in der festgestellt wurde, welche Fehler auftreten können und wie diese diagnostiziert werden sollen, wurde eine Fehlerbaumanalyse durchgeführt. Diese zeigt neben den möglichen Fehlermodi auch deren Zusammenhänge. Es ist somit klar ermittelbar, auf welche Weise ein Fehler entsteht und welche Fehler auf Grund einer einzelnen Ursache zuzuordnen sind.

Der entstandene Fehlerbaum ist in Abbildung 3 exemplarisch dargestellt. Er umfasst elektrische Fehler (z. B. Windungsschlüsse, Phasenschlüsse, Hauptschlüsse), mechanische Fehler (z. B. Unwucht, Lagerfehler, Exzentrität, usw.) und Fehler, welche die Kühlung der Maschine betreffen.

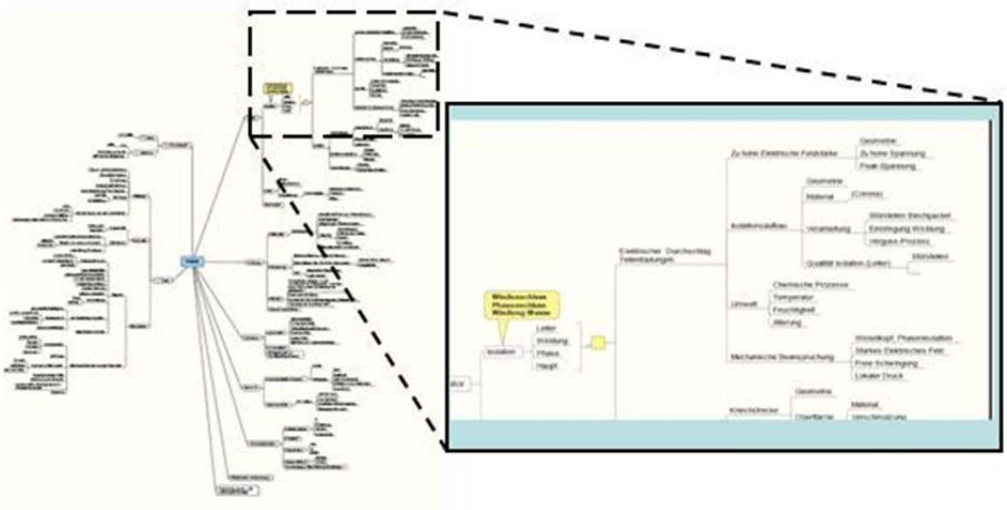


Abbildung 3: Fehlerbaumanalyse

3.2.2 Empirische Zusammenstellung einer Wissensbasis

Der oben beschriebene Fehlerbaum ist in einem Workshop zur Analyse von Fehlermöglichkeiten entstanden. Daneben wurden weitere Fehler von konstruktions- und fertigungserfahrenen Fachleuten der Firma Krebs & Aulich GmbH und der Volkswagen AG analysiert und dem Fehlerbaum hinzugefügt. Weiterhin konnten aus den Erfahrungen Möglichkeiten zur Fehlerkombination gesammelt werden, um mehrere Fehler in einer Testmaschine abzudecken, aber dennoch getrennt

voneinander erkennen zu können. Zusätzlich lieferte die Zusammenarbeit mit den Fachleuten Hinweise auf eine geeignete Implementierung bzw. Darstellung der Fehler und wie diese erkannt werden können. Nach Erstellung der Wissensbasis wurden einige Fehler zusammengestellt, welche als mögliche Fehler in Fehlermaschinen umgesetzt werden könnten. Beispiele dafür werden in Tabelle 1 dargestellt.

Fehler	Fehlerart / Test	Mögliche Umsetzung
Unwucht	Mechanisch / EOL	Integration eines nicht ausgewuchteten Rotors
Lagerfehler	Mechanisch / OBD	Verbau von gezielt präparierten Defektlagern
Magnetische Exzentrizität	Magnetisch / EOL u. OBD	Verwendung teilmagnetisierter Magnete
Hauptschluss	Elektrisch	Kurzschluss zwischen Gehäuse und Windung

Tabelle 1: Definierte Fehlerzustände

Die im Projekt beispielhaft realisierten Fehler werden im Abschnitt 5.4.2 genauer beschrieben.

3.2.3 Fertigungsprozess-FMEA

Zu Beginn des Projektes wurde außerdem eine Fertigungsprozess-FMEA[3]durchgeführt, um die Kosten für eine eventuelle Fehlerbehebung möglichst niedrig zu halten. Die FMEA soll sicherstellen, dass potentielle Fehler und deren Ursachen während der Produkt- bzw. Prozessentwicklung identifiziert und berücksichtigt werden. Entscheidend dafür ist die Analyse der verschiedenen Arbeitsschritte von einzelnen Produktionssystemen auf mögliche Fehler sowie die präzise Definition der Aufgabe und Funktionsweise von einzelnen Komponenten. Eine anschließend durchgeführte Fehleranalyse listet die möglichen Fehler auf, die sich im Prozess der Entwicklung, Fertigung, Montage oder im späteren Einsatz ergeben können. Die Vorgehensweise der Fehleranalyse ist dabei stufenweise, sodass die Fehlersuche bei der Gesamtkomponente beginnt und anschließend bis zur kleinsten Einheit heruntergebrochen wird. Dabei werden nicht nur Bauteile betrachtet, sondern auch dazugehörige Prozess- und Arbeitsschritte, die zum Fehler führen könnten. Als letzter Schritt der Fehleranalyse erfolgt die Ermittlung der Fehlerfolgen. Eine Funktions-, Fehleranalyse und Fehlerfolgenermittlung ist beispielhaft in Tabelle 2 aufgeführt.

[3] FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse

Funktion	pot. Fehler	pot. Folge	Ursache(n)	Maßnahme	empfohlene Maßnahme
Blechpaket von Wicklung elektrisch trennen	Blechpaket und Wicklung werden nicht elektrisch getrennt	Ausfall ohne Ankündigung	Falsche Materialauswahl der Nutisolation, Deckschieber, Lackdraht, Imprägniermedium	V: Einsatz bewährter Materialien	
				V: Materialauswahl nach Kenndaten des Herstellers	V: ggf. alternative Materialien prüfen
				V: Materialerprobung	V: ggf. alternatives Imprägniermaterial prüfen
				P: Prüfstandsversuche	
				P: Prozessbegleitende elektrische Prüfung	
			Falsches Fertigungsverfahren ausgewählt	V: Erfahrungswerte / Auswahl Fertigungsverfahren nach Stand der Technik	
				P: Einziehversuche	V: ggf. Fertigungs-verfahren optimieren
				P: elektrische Prüfungen (z. B. TE-Messungen)	

Tabelle 2: Isolations-FMEA

Die ermittelten Fehler werden einer Risikobewertung unterzogen, um aufzuzeigen, welcher Gefährdungsgrad von den betroffenen Fehlern ausgeht. Dazu werden zunächst Auftrittswahrscheinlichkeit, Bedeutung des Fehlers nach Gefährdung sowie die Entdeckungsmöglichkeit betrachtet und mit Kennzahlen von 1 bis 10 versehen. Die Kennzahl 10 entspricht dabei dem kritischsten Zustand. Die Bewertung erfolgt anhand der Risikoprioritätszahl (RPZ) und wird wie folgt berechnet:

$$RPZ = \text{Auftreten} \times \text{Bedeutung} \times \text{Entdeckung}$$

Das Ergebnis liefert ein Maß dafür, mit welcher Priorität Abstellmaßnahmen zur Systemverbesserung für die verschiedenen Fehlerursachen zu erarbeiten sind. Zur Systemverbesserung können Maßnahmen entwickelt werden, welche

- die Bedeutung des Fehlers durch Design- bzw. Prozessänderung reduzieren,
- die Auftrittswahrscheinlichkeit durch Ausschalten der Fehlerursache minimieren,
- die Entdeckungswahrscheinlichkeit durch Optimierung der Kontrollen erhöhen.

In der Regel erfolgt nach der abgeschlossenen FMEA die Freigabe für die Fertigung der Bauteilkomponenten.

3.2.4 Alterungsprozesse

Während des Betriebs sind die Komponenten der E-Maschine durch die Belastungen einer erhöhten Alterung ausgesetzt. Beispielsweise beschleunigt eine erhöhte Temperatur die Alterung der Komponenten. Daher ist es möglich, dass die Komponenten über die Lebensdauer ihre Eigenschaften verlieren und damit einen Defekt bzw. einen Ausfall der E-Maschinen hervorrufen können. Bei Ausfall kann die defekte Komponente aufgrund von konstruktiven Gegebenheiten nicht immer problemlos ausgetauscht werden.

Beschleunigte Alterungsversuche dienen der Erprobung von Komponenten über die gesamte Lebensdauer in einem verkürzten Prüfzyklus. Das neue Anwendungsgebiet der elektrischen Maschine im automobilen Umfeld spiegelt sich in gänzlich neuen Prüfanforderungen wieder. Hierfür wurden im Projektzeitraum mehrere Normen wie beispielsweise die DIN EN 60034-18-1 oder die DIN EN 60034-18-21 als Grundlage genutzt, um verschiedene Versuche zur Alterung von Maschinenkomponenten zu entwickeln. Auf diese Weise konnten die Einwirkungen der Alterung auf Komponenten simuliert und Gegenmaßnahmen entwickelt werden.

Eine beschleunigte Alterung wurde z. B. durch einen Temperaturzyklus erreicht (Abbildung 4) welcher nach der 10 K-Regel entwickelt wurde. Die 10 K-Regel wurde aus den oben genannten Normen abgeleitet.

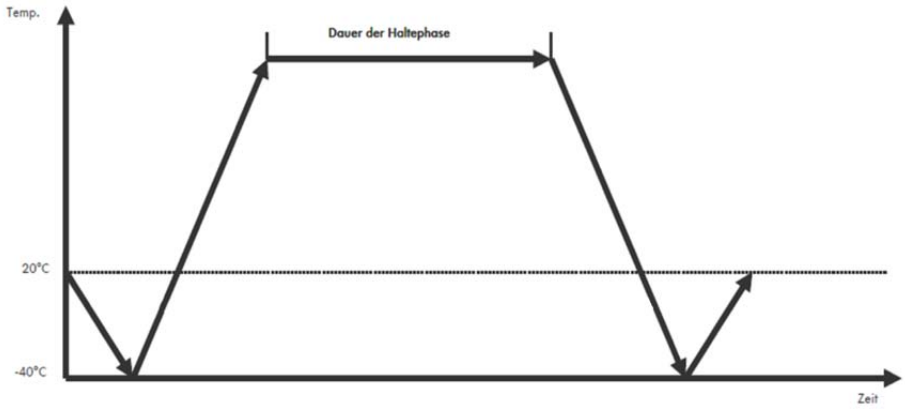


Abbildung 4: Temperaturschock-Zyklus

Neben dem Temperaturzyklus besteht die Möglichkeit, die E-Maschinen rasch durch einen Vibrations- oder Feuchtetest altern zu lassen. Nach der Alterung wurden die Prüflinge verschiedenen diagnostischen Prüfungen unterzogen, um eine Änderung feststellen zu können. Bei den Prüfungen handelte es sich u. a. um die Teilentladungsprüfung, Isolationswiderstandsmessung oder der Ermittlung des Prüflingsgewichts.

3.3 Analysierung des Nutzungskontexts

„Das Ausmaß der Gebrauchstauglichkeit und Zugänglichkeit von Produkten hängt vom Kontext ab, d.h. bestimmte Benutzer verfolgen bestimmte Ziele, führen bestimmte Arbeitsaufgaben in einer bestimmten Umgebung aus.“ [22]. Der Nutzungskontext definiert die Nutzer mit deren persönlichen Merkmalen, die Arbeitsaufgabe und damit verbundene Ziele der Nutzer, die zur Verfügung stehenden Arbeitsmittel (Hardware, Software und Materialien) sowie die physische und soziale Umgebung, in der das Produkt genutzt werden soll [15]. Das Verstehen und Festlegen des Nutzungskontexts nimmt eine Schlüsselposition im Gestaltungsprozess ein und dient als wesentliche Informationsquelle für die Festlegung der Nutzungsanforderungen [22].

3.3.1 Nutzer

Der Nutzer bezeichnet „die Person, die mit dem Produkt arbeitet.“ [15]. In der menschzentrierten Produktentwicklung nehmen die Nutzer als wichtigste Interessensgruppe eine zentrale Rolle ein. Sie werden von Beginn an systematisch in die Entwicklung von Systemen und Produkten einbezogen. Ziel ist es, die Nutzer eines Produkts bzw. Systems zu ermitteln und kennenzulernen, ihre Bedürfnisse sowie die Hintergründe zu verstehen und diese in die Entwicklung einfließen zu lassen. Existieren unterschiedliche Nutzer für ein Produkt, so ist es erforderlich, die Merkmale verschiedener Nutzertypen zu definieren, z. B. Nutzer mit unterschiedlicher Erfahrung oder körperlichen Fähigkeiten [22].

Grundlage der Nutzeranalyse im Projekt PräDEM bildete die Identifizierung relevanter Rollen einer prädiktiven Diagnose. Experteninterviews gaben zunächst einen Überblick über die beteiligten Rollen, die im Laufe der Produktlebenszyklus mit der prädiktiven Diagnose in Berührung kommen (Abbildung 5), und Hinweise auf unterschiedliche Nutzertypen innerhalb dieser Rollen.

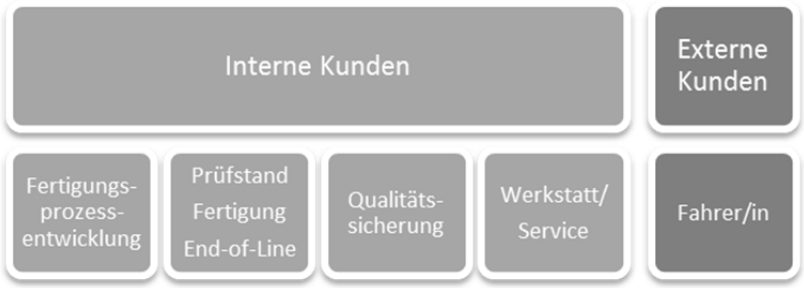


Abbildung 5: Übersicht über die Rollen im Projekt PräDEM

Nach dieser ersten Analyse wurde der Fokus auf die Gruppe der externen Kunden gelegt. Sie nehmen im Diagnoseprozess eine Schlüsselrolle ein, da sie das Bindeglied zwischen dem vom Fahrzeug prädiktiv detektierten Fehler und der Gruppe der internen Kunden sind. In einem ersten Schritt identifizierte ein Brainstorming zwei wesentliche Nutzertypen von Fahrern in Bezug auf die prädiktive

Diagnose, Enthusiasten und Pragmatiker. Zur Verifizierung wurden vier Fokusgruppen mit 20 potentiellen Nutzern durchgeführt, die wesentliche Erkenntnisse über deren Denkverhalten und Erfahrungen mit bisherigen Diagnosemeldungen sowie Erwartungen und Wünsche bezüglich der Informationsinhalte, Interaktion und visuellen Darstellung einer prädiktiven Diagnose lieferten. Ergänzende Nutzerfragebögen gaben einen detaillierten Einblick in spezifische Nutzereigenschaften, z. B. demographische Angaben und Persönlichkeitscharakteristiken. Aus den gewonnenen Daten wurden Muster im Nutzerverhalten identifiziert und erste Personas abgeleitet.

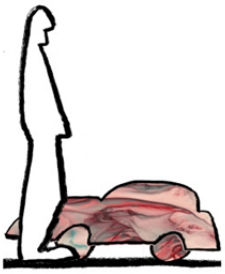
Eine Persona entspricht einer konkreten und spezifischen Repräsentation eines idealtypischen Nutzers einer realen Nutzergruppe mit individuellen Eigenschaften. Personas ersetzen die abstrakte Masse der späteren Nutzer durch prototypische, fiktive Persönlichkeiten mit spezifischen Eigenschaften. Sie geben damit der Nutzergruppe ein Gesicht, reflektieren deren Bedürfnisse und repräsentieren die einzelnen Nutzer mit ihren verschiedenen Eigenheiten. Im Projekt dienten Personas zur Vermittlung einer eindeutigen Vorstellung über das Verhalten, die Denkweisen, Ziele und die Motivation der künftigen Nutzer, zur Schaffung eines gemeinsamen Design Ziels im menschzentrierten Gestaltungsprozess sowie zur Erleichterung der Kommunikation von Nutzungsanforderungen.

Im Ergebnis entstanden drei Personas externer Kunden, die priorisiert und mittels Nutzerbefragung validiert wurden (Tabelle 3). Die Priorisierung zielt auf die Definition eines gemeinsamen Design Ziels für die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Gestaltungslösungen, die gleichzeitig die Bedürfnisse von drei oder mehr Personas abdecken, können schnell einen untragbaren Arbeitsaufwand erzeugen. Daher ist es notwendig, die Persona zu finden, deren Ziele und Bedürfnisse vollständig von einer einzigen Lösung befriedigt werden, ohne die anderen Personas einzuschränken [5, 27].

Daniela - Die Pragmatikerin

- 28, PR-Beraterin
- Beruflicher Außendienst
- Erwartungen: Flexibilität, Mobilität, Verständlichkeit

„Mein Auto ist für mich nur ein Gegenstand des alltäglichen Gebrauchs. Bei einem Fehler will ich nur wissen, wie schlimm er ist und was ich tun soll. Die kleinen Fehlerlämpchen sind für mich absolut kryptisch.“



Mike - Der Neugierige

- 22, Informatikstudent
- Kurzstreckenfahrer
- Erwartungen: Hoher Informationsgehalt, Kompetenzaufbau

„Ich fahre gern Auto und interessiere mich für die Technik dahinter. Fehlermeldungen meines Autos verstehe ich, finde sie aber zu wenig informativ."

Ralf - Der Enthusiast

- 34, Dipl.-Ing. Mechatronik
- Berufspendler
- Erwartungen: Detaillierte Diagnoseinformationen, Selbst Hand anlegen zu können

„Autos sind meine große Leidenschaft, ich schraube für mein Leben gern. Informationen über Fehler hole ich mir generell über meinen Diagnosetester und behebe sie nach Möglichkeit selbst."

Tabelle 3: Persona-Übersicht

Daniela beschreibt Fahrer, die im Arbeitsalltag auf ihr Auto angewiesen sind, die ihr Auto als Gebrauchsgegenstand sehen und weder tiefgreifendes technisches Verständnis noch fahrzeugspezifisches Fachwissen besitzen. Daniela erwartet, flexibel und mobil zu sein und in verständlicher Form über Betriebsstörungen informiert zu werden. Sie stellt damit die Grundanforderungen an die Gestaltungslösungen und wird zum primären Design Ziel. Mike beschreibt Kurzstreckenfahrer mit grundlegendem technischen Verständnis und etwas fahrzeugspezifischem Fachwissen. Von einer prädiktiven Diagnose erwartet er einen hohen Informationsgehalt, um seine eigenen Kompetenzen in diesem Bereich ausbauen zu können. Mike teilt die Grundbedürfnisse mit Daniela, stellt jedoch weiterführende Anforderungen an die Diagnose. Diese sollten in die Gestaltung einfließen, ohne den Umgang der primären Persona mit dem System negativ zu beeinflussen oder sie gar zu überfordern. Damit wird Mike als sekundäre Persona deklariert. Ralf beschreibt Berufspendler mit ausgeprägtem technischen Verständnis und fundiertem fahrzeugspezifischen Fachwissen. Er erwartet von einer prädiktiven Diagnose detaillierte Diagnoseinformationen und die Möglichkeit, Betriebsstörungen eigenhändig zu beheben. Ralfs Grundbedürfnisse sind durch primäre und sekundäre Persona vollständig abgedeckt. Weiterführende

Informationen beschafft er sich über die Diagnoseschnittstelle im Fahrzeug. Daher bedarf es keiner zusätzlichen Erweiterung der Mensch-Maschine-Schnittstelle.

3.3.2 Arbeitsaufgabe

Als Arbeitsaufgaben sind „die zur Zielerreichung erforderlichen Aktivitäten“ definiert [15]. In diesem Zusammenhang müssen einerseits die Ziele der Nutzer und andererseits die Gesamtziele des Systems betrachtet werden [6, 22]. Die detaillierte Beschreibung von Aufgaben und Arbeitsabläufen bildet die Grundlage für die Gestaltung und Evaluation der Interaktion mit dem Produkt.

Die Analyse der Arbeitsaufgaben im PräDEM-Projekt erfolgte mittels Experteninterviews und wissenschaftlicher Informationsrecherche. Für die Gruppe der internen Kunden konnten je Rolle Haupt- und Unteraufgaben definiert sowie Arbeitsablaufdiagramme generiert werden. Für die Gruppe der externen Kunden konnten zunächst Fahraufgaben, unterteilt nach Priorität, ermittelt werden: primäre, sekundäre und tertiäre Fahraufgaben [4, 7, 35]. Als Primäraufgaben gelten alle Tätigkeiten, die der direkten Fahraufgabe dienen, d.h. alle Fahraufgaben zur Navigation, Bahnführung und Stabilisierung des Fahrzeugs. Sekundäraufgaben umfassen alle Tätigkeiten, die der Unterstützung der primären Fahraufgabe in Abhängigkeit von der Verkehrssituation oder äußeren Umweltbedingungen dienen. Diese können aktiv, z. B. Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern, oder reaktiv, z. B. Reaktion auf die Verkehrssituation, ausgeführt werden. Tätigkeiten ohne direkten Zusammenhang zur primären Fahraufgabe, die allein der Befriedigung von Komfort-, Unterhaltungs- und Informationsbedürfnissen des Fahrers dienen, werden den Tertiäraufgaben zugeordnet. Bei der prädiktiven Diagnose handelt es sich um ein Fahrerinformationssystem, dessen Hauptaufgabe in der Vermittlung fahrzeugbezogener Informationen an den Fahrer besteht. Der Fahrer nimmt die Information wahr, verarbeitet sie und reagiert nach eigenem Ermessen mit einer entsprechenden Handlung. Daher sind die Aufgaben im Rahmen der prädiktiven Diagnose den Tertiäraufgaben zuzuordnen. Diese Aufgaben wurden in Szenarien zusammengefasst, um die Interaktion der Nutzer mit dem geplanten Produkt anhand realistischer Beispiele zu veranschaulichen. Dabei gilt es stets zu beachten, dass die primäre Fahraufgabe unberührt bleibt, um die Ablenkung des Fahrers zu vermeiden. Als wesentliche Ziele konnten die Erreichung des Fahrtziels, die Erhaltung der Fahrbereitschaft sowie die Wiederherstellung der Fahrbereitschaft festgehalten werden.

3.3.3 Arbeitsmittel

Unter Arbeitsmittel werden die zur Verfügung stehende Hard- und Software sowie die benötigten Materialien, die mit dem Produkt zusammenhängen, verstanden [15]. Ziel war es, einen Überblick über gegenwärtige Anzeige- und Bedienkomponenten in Fahrzeugen sowie rechnergestützte Diagnosesysteme zu gewinnen, um spezifische Anforderungen oder Beschränkungen benötigter Hard- und Software zu identifizieren und in die Systemgestaltung einfließen zu lassen.

Im Projekt PräDEM wurde die zu gestaltende Mensch-Maschine-Schnittstelle ins Fahrzeug transferiert und somit der Fokus bei den Arbeitsmitteln auf Anzeigemöglichkeiten für Informationssysteme in Fahrzeugen gelegt. Die Hardware lässt sich damit auf vier wesentliche Einsatzbereiche einschränken: Kombiinstrument, Windschutzscheibe, Mittelkonsole und Fond [23]. Das Kombiinstrument dient vorwiegend der Darstellung fahrerrelevanter, sicherheitsrelevanter oder situationsabhängiger Informationen am Rand des primären Blickfeldes des Fahrers und ist im Projekt erste Wahl für die Anzeige von Betriebsstörungen des elektrischen Antriebs. Als Ergänzung des Kombiinstruments können sogenannte Head-up Displays (HUDs) zum Einsatz kommen. Hierbei werden vor allem fahr- und sicherheitsrelevante Informationen über die Windschutzscheibe in das primäre Blickfeld des Fahrers eingespiegelt. Der Vorteil liegt dabei in der verringerten Akkomodationszeit der Augen beim Ablesen der Informationen im Vergleich zum Kombiinstrument [1]. Head-up Displays spielen im PräDEM-Projekt zunächst keine wesentliche Rolle. In der Mittelkonsole sind Center Information Displays (CIDs) zum Quasistandard geworden. Das CID dient dabei als zentrales Anzeige- und Bedienelement für alle Komfortfunktionen im Fahrzeug, wie Infotainment, Navigation, Klimasteuerung, Einstellung fahrzeugspezifischer Parameter, und ist somit auch für die Anzeigen der prädiktiven Diagnose von hoher Relevanz. Anzeigen für den Fond-Bereich eines Fahrzeugs werden unter der Kategorie Rear Seat Entertainment (RSE) zusammengefasst. Die Displays sind zumeist in die Kopfstützen von Fahrer oder Beifahrer integriert und dienen der Unterhaltung, dem Infotainment oder als mobiles Büro. Für die Gestaltung von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen, so auch im Projekt PräDEM, spielen die Anzeigen des RSE keine Rolle.

3.3.4 Umgebung

Unter der Umgebung werden die physischen und sozialen Randbedingungen, unter denen das System genutzt wird, verstanden. Hierunter fallen u. a. Merkmale des Weiteren technischen Umfeldes, der physischen Umgebung, der Umgebungsbedingungen und die soziale und kulturelle Umgebung [15]. Die Definition der Umgebung ist notwendig, da der Umgang der Nutzer mit dem Produkt stark von der gegebenen Situation abhängt, z. B. Fahrt unter Zeitdruck, beruflichem Stress oder in den Urlaub.

Um die Umgebung der prädiktiven Diagnose aus Nutzersicht zu definieren, wurden zahlreiche Studien im Kontext Elektromobilität analysiert [2, 8, 12, 24, 26, 33, 34, 36 - 39] und Informationen über das Wissen und Kenntnisse der Bevölkerung, Motivation und Ziele, derzeitiges Fahrverhalten, Erwartungen der Bevölkerung, Alltagstauglichkeit von E-Mobilen und Akzeptanz von E-Mobilität generiert. In der Schlussfolgerung wird das Elektroauto als Erstwagen gesehen und als typischer Kleinwagen genutzt. Werktags dient es vor allem als Fortbewegungsmittel auf dem Weg von zu Hause zur Arbeitsstätte und zurück. Der Weg führt vorrangig über Bundesstraßen und durch den Stadtverkehr. Getankt wird während der Bürozeit auf dem firmeneigenen Stellplatz. Die Batteriekapazität ist für beide Strecken ausreichend. Für längere Fahrstrecken steht ein Zweitwagen mit Verbrennungsmotor zur Verfügung. Die Erkenntnisse über die Umgebung wurden vorrangig in Form eines Hintergrundszenarios für die spätere Evaluation genutzt.

4 Modellierung

4.1 Thermisch

Zur analytischen Bestimmung der Temperaturverteilung in der elektrischen Maschine wurde ein Mehrkörpermodell (Wärmequellennetz) erstellt, wobei die Maschine zunächst in einzelne Teilkörper zerlegt wurde. Dabei wird später bei der Simulation davon ausgegangen, dass innerhalb eines jeden Teilkörpers eine räumlich konstante Temperatur herrscht. Deshalb ist es nötig, die Teilkörper so zu wählen, dass in ihm kein nennenswerter Temperaturgradient zu erwarten ist. Jeder Teilkörper kann Wärme speichern und tauscht über Wärmeübergänge mit den an den Grenzflächen anliegenden Teilkörpern Energie aus. Dies wird im Wärmequellennetz durch Wärmekapazitäten und Wärmeübergangswiderstände berücksichtigt.

Die in der elektrischen Maschine auftretenden Verluste, die zur Erwärmung der Maschine führen, werden im Wärmequellennetz als Quellen dargestellt. Dazu zählen vor allem:

- Kupferverluste in den Wicklungen
- Eisenverluste
    - Wirbelstromverluste
    - Hystereseverluste
- Wirbelstromverluste in den Permanentmagneten
- Reibungsverluste

Die Kühlung der Maschine wird als Senke (negative Quelle) in der Modellstruktur dargestellt.

Das Modell in Abbildung 6 ermöglicht gleichzeitig eine Beschreibung des Verhaltens der Maschine im Normalzustand als auch im Fehlerfall. Um Fehlermodi in die Modellstruktur zu implementieren, können Verlustquellen erhöht, Wärmeübergangswiderstände geändert oder die Kühlsenke verändert werden.

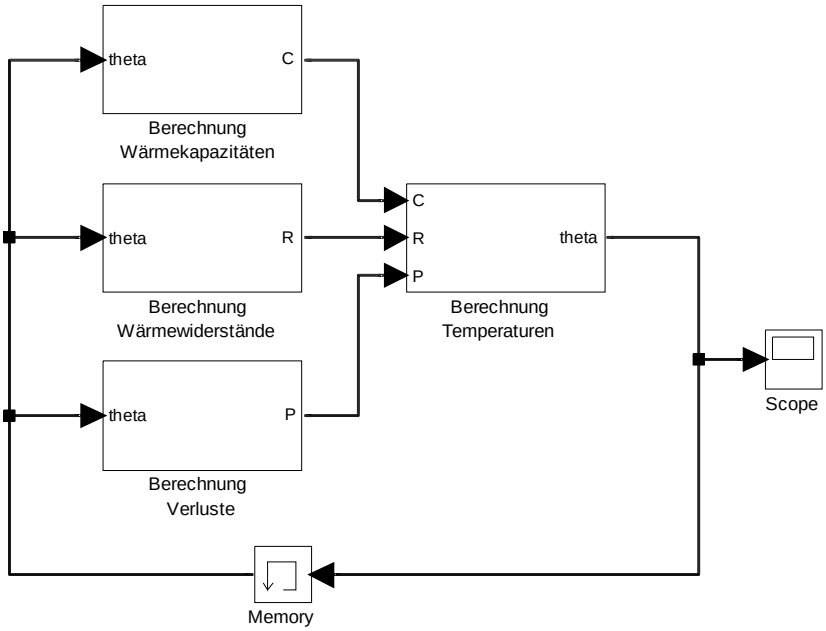


Abbildung 6: Thermisches Modell in Simulink

4.2 Akustisch

Zur optimalen Positionierung der Schwingungssensorik, wurde eine FEM-Berechnung durchgeführt, um die Koordinaten der optimalen Sensorposition zu bestimmen. Hierbei wurde eine Modalanalyse des Stators durchgeführt. Neben diesen Koordinaten werden gleichzeitig die Eigenformen und Eigenfrequenzen bestimmt. Die erste und zweite Eigenform werden in Abbildung 7 dargestellt.

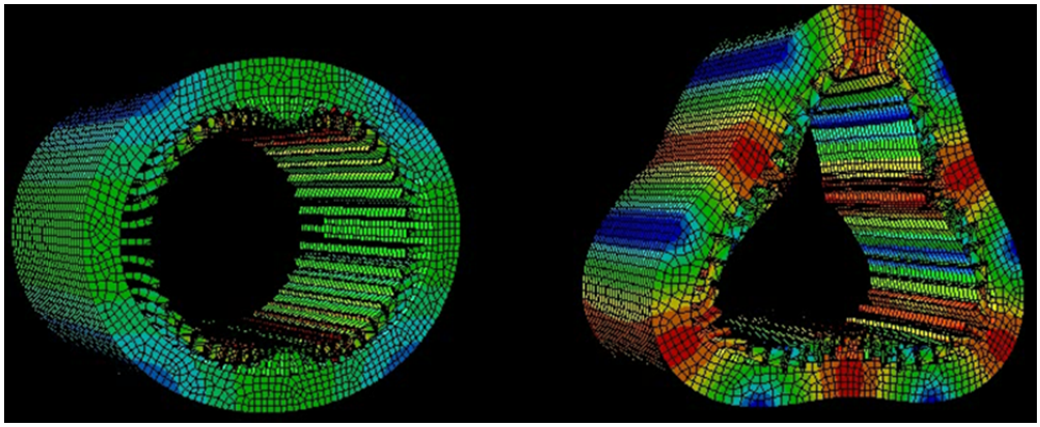


Abbildung 7: Erste und zweite Eigenform des Stators

Die simulierten Daten lassen sich mit zwei Experimenten bestimmen, wenn die Amplitudeninformation nicht notwendig ist. Zum einen lässt sich mit einem Laservibrometer die Fläche scannen, hier lassen sich die Koordinaten der maximalen Schwingung experimentell bestimmen. Außerdem kann durch die Hilfe eines Hochlaufs der Maschine untersucht werden, in welchem Bereich die Eigenfrequenz liegt.

4.3 Elektromagnetisch

Gewöhnlich wird die elektrische Maschine mit Hilfe von FEM Berechnungen elektromagnetisch charakterisiert. Diese FEM Berechnungen sind zeitintensiv und können nicht unmittelbar für Diagnosewerkzeuge verwendet werden. Daher wird hier eine Methode präsentiert über die mit relativ wenig Rechenaufwand eine Bestimmung der Flussdichte an verschiedenen Stellen der Maschine wie Statorrücken, Zahnbereich, Luftspalt oder Rotor möglich ist. Die räumliche Auflösung bleibt zwar dabei beschränkt, lässt aber trotzdem die Möglichkeit zu, einige Größen in der Maschine wie induzierte Spannung, Hysterese und Eisenverluste mit ausreichender Güte zu berechnen. Darüber hinaus ist eine Modellierung von Fehlerbildern wie unzureichende oder fehlende Magnetisierung gezielt bei ausgewählten Permanentmagneten realisierbar.

Die elektromagnetische Modellierung der elektrischen Maschine wird mit Hilfe einer Netzwerkmethode (Reluktanznetzwerk) durchgeführt. Zur Berechnung der magnetischen Kreise, die durch das Reluktanznetzwerk aufgestellt werden, wird die Analogie zwischen magnetischem und elektrischem Feld ausgenutzt. Dabei wird der magnetische Kreis in eine endliche Anzahl von kleinen magnetischen Widerständen und Quellen zerlegt. Die Widerstände stellen magnetisch aktive Bereiche mit einer homogenen Feldverteilung dar. So richtet sich die Zerlegung der Maschine in magnetische Widerstände nach der Geometrie und den eigesetzten Materialen, damit für jeden magnetischen Widerstand die gleiche Permeabilität bzw. Magnetisierungskennlinie gilt. Anschließend kann das Netzwerk aufgestellt und mit Hilfe der Maschen- und Knotengleichungen gelöst werden.

Zerlegung der Maschine in magnetische Widerstände

Die Voraussetzung für die Zerlegung der Elektrischen Maschine in magnetische Widerstände basiert auf FEM Berechnungen. Diese zeigen den Verlauf der Felder in der Maschine (Abbildung 8).

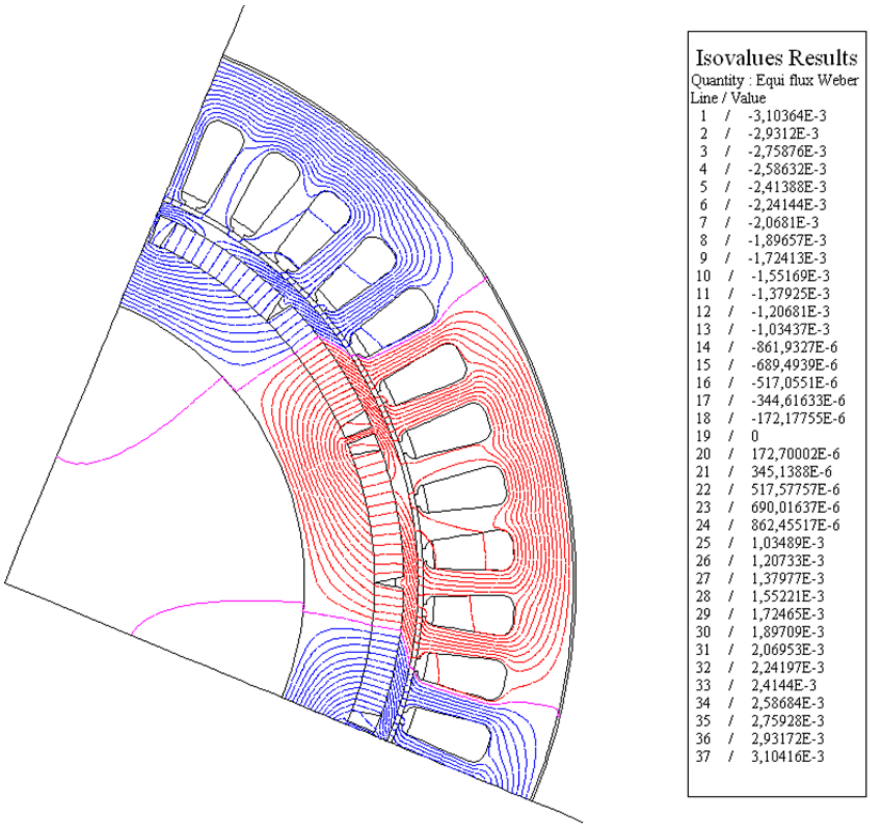


Abbildung 8: Feldverläufe in der Elektrischen Maschine (Finite Elemente Simulation)

Anhand der Feldverläufe und Geometrie kann die E-Maschine in magnetische Widerstände zerlegt werden (Abbildung 9). Es ist davon auszugehen, dass in jedem Widerstand ein homogener Feldverlauf herrscht.

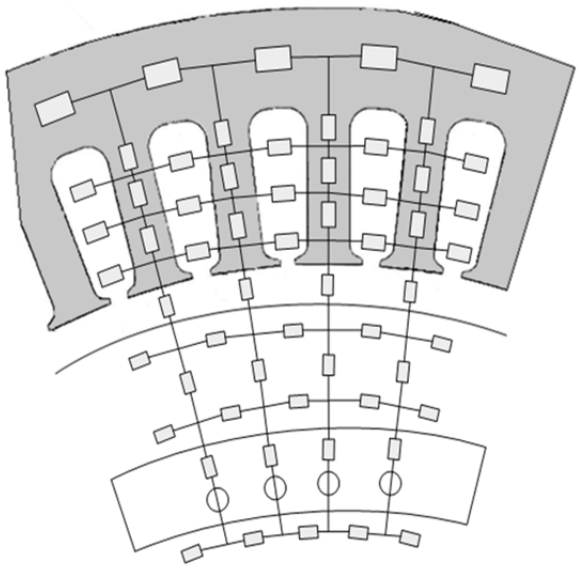


Abbildung 9: Zerlegung der Maschine in magnetische Widerstände

Magnetisches Netzwerk

Zur Bestimmung der magnetischen Flussverteilung in der elektrischen Maschine wird die Flussverteilung als ein großes magnetisches Netzwerk dargestellt und berechnet (Abbildung 10).

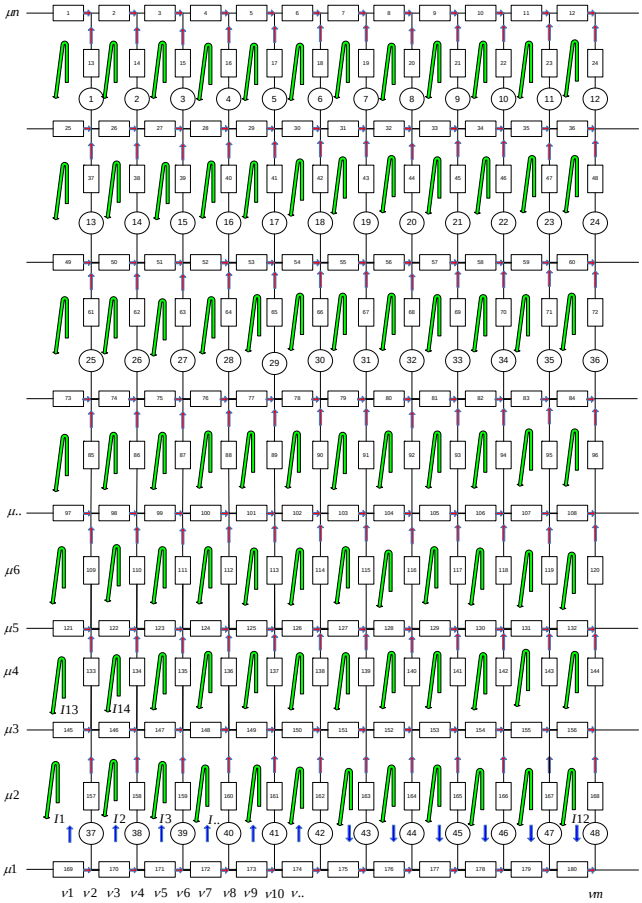


Abbildung 10: Das magnetische Ersatznetzwerk für die elektrische Maschine

Das Netzwerk kann nur numerisch durch Verwendung von Iterationsverfahren gelöst werden.

4.4 Nutzungsanforderungen festlegen

Aus den Ergebnissen der Nutzungskontextanalyse sowie einer Literaturrecherche in anerkannten Normen, Guidelines und De-facto-Standards im automobilen Kontext [9, 13, 14, 16 - 19, 21] wurden Anforderungen an die prädiktive Diagnose in Fahrzeugen abgeleitet. Nach Rupp (2007) entspricht eine Anforderung einer „Aussage über eine Eigenschaft oder Leistung eines Produktes, eines Prozesses oder der am Prozess beteiligten Personen.“ [29]. Der Begriff Produkt schließt hierbei das System, Software, Hardware und z. B. auch Handbücher usw. ein. Ziel ist die Schaffung einer Basis für die Gestaltung und Evaluation des geplanten Produkts zur Befriedigung der Nutzerbedürfnisse.

Die entstandene Anforderungsspezifikation ist unterteilt in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen. Funktionale Anforderungen betreffen jene Aspekte, die mit der Funktionalität des geplanten Systems zusammenhängen [27]. Sie beinhalten primäre und sekundäre

Nutzeranforderungen gemäß den zuvor erhobenen Personas. Nicht-funktionale Anforderungen umfassen sämtliche geforderten Rahmenbedingungen, hier Qualitätsanforderungen, technische Anforderungen und ergonomische Anforderungen. Tabelle 4 zeigt Anforderungen beispielhaft.

Gruppe	Untergruppe	Anforderung
Funktional	Primäre Nutzeranforderungen	Die Anzeige einer Betriebsstörung umfasst den Fehlerort, die Fehlerursache, den Schweregrad des Fehlers und die Dringlichkeit dessen Behebung.
Nicht-funktional	Ergonomische Anforderungen	Warnhinweise sind angemessen, dürfen den Fahrer nicht erschrecken und keine Überreaktionen provozieren.

Tabelle 4: Beispiel von Anforderungen einer prädiktiven Diagnose

5 Experimentelle Aufbauten

5.1 Auslaufversuch

Zur Bestimmung der magnetischen und mechanischen Verluste in der E-Maschine, ist ein Auslaufversuch durchgeführt worden. Dazu wurde die E-Maschine auf eine definierte Drehzahl gebracht und anschließend durch ein Schütz, welches zwischen Leistungselektronik und E-Maschine geschaltet wurde, abgekoppelt. Den Versuchsaufbau zeigt Abbildung 11. Durch die Abkopplung hatten die elektrischen Verluste keinen Einfluss mehr auf die Messung. Die E-Maschine wurde lediglich durch die noch vorhandenen magnetischen und mechanischen Verluste bis zum Stillstand abgebremst. Während des Versuchs wurde die Drehzahl des integrierten Drehzahlsensors mitgeloggt und die drei Phasenspannungen mittels eines hochpräzisen Messsystems, welches in Abschnitt 5.2.1 genauer beschrieben wird, gemessen. Der Auslaufversuch könnte u. a. in der EOL-Prüfung eingesetzt werden, da es mit Hilfe des Messaufbaus möglich ist, Magnetisierungsfehler zu erkennen.

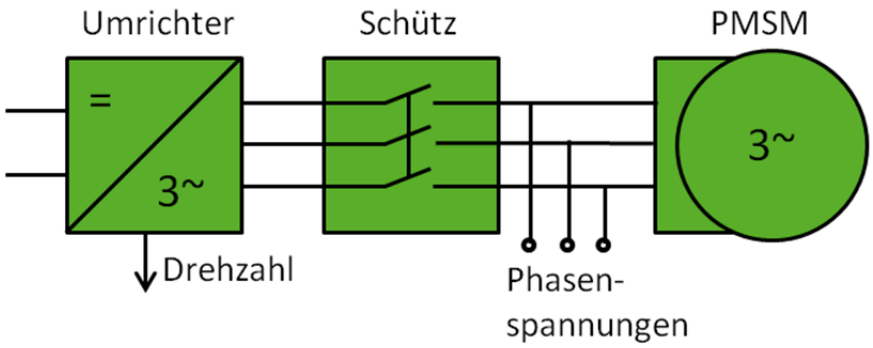


Abbildung 11: Schema experimenteller Aufbau

5.2 3-E-Prüfstand

Im Rahmen des Projekts wurde an der Universität Kassel ein 3-E-Maschinenprüfstand aufgebaut. Abbildung 12 zeigt die schematische Darstellung des Prüfstands mit den 3-E-Maschinen.

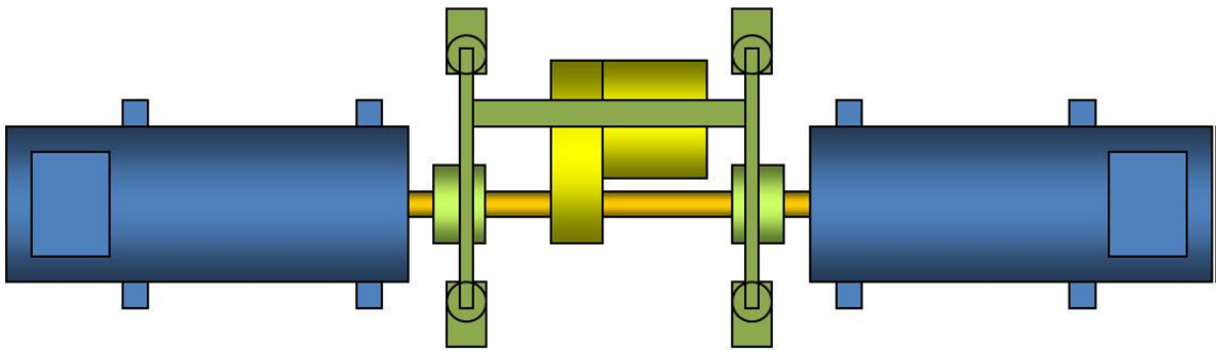


Abbildung 12: Schematische Darstellung eines 3-E-Maschinenprüfstands

Die in blau dargestellten Maschinen stellen die Lastmaschinen bzw., real betrachtet, die Antriebswiderstände der Räder dar. Bei der in Gelb dargestellten E-Maschine handelt es sich um einen Prüflingsantrieb, an dem die Diagnosemethoden entwickelt und validiert werden. Die wichtigsten Kenndaten des 3-E-Prüfstands werden in Tabelle 5 dargestellt.

Trägheitsmoment	< 1 kgm^2
Nenndrehmoment (S1)	1150 Nm bei 2000 rpm
Max. Drehmoment	< 1400 Nm
Max. Drehzahl	4000 rpm
Leistung Fahrzeugenergiesystem	150 kW

Tabelle 5: Leistungskennwerte des 3E-Prüfstands

In den folgenden Abschnitten werden u. a. das Messsystem und die dafür entwickelte IT-Struktur dargestellt. Die Prüflingsmaschinen werden in Kapitel 5.4.2 genauer beschrieben.

5.2.1 Messsystem

Bei einem 3-E-Maschinenprüfstand fallen sehr große Messdatenmengen an. Zuerst wurde eine Zusammenstellung der notwendigen Messgrößen erarbeitet. Diese beinhaltet Analogwerte wie Drehmoment (2x), Drehzahl (2x) und Ströme (5x). Des Weiteren werden die Phasenspannungen sowohl analog als auch digital gemessen. Eine Übersicht über die Abtastraten, Auflösung und die daraus entstehenden Datenmengen wird in Tabelle 6 dargestellt.

Signal	**Messgröße**	**Kanäle**	**bit**	**Samples/s/Ch**
Strom AC	Strom/Spannung	3	16	1250000
Strom DC	Strom/Spannung	2	16	1250000
Spannung AC	Spannung	3	16	1250000
Spannung DC	Spannung	1	16	1250000
Drehzahl	Spannung	2	16	1250000
Drehmoment	Spannung	2	16	1250000
Temperatur	NTC thermistor und PT100	12	24	1
Akustik	IEPE	16	24	200000

Tabelle 6: Übersicht der resultierenden Datenmengen

Neben dieser allgemeinen Prüfstandsmesstechnik werden spezielle Daten wie Temperaturen, Beschleunigungen und Luftschalldruck aufgenommen. Ein besonderes Merkmal des Messsystems ist die durchgängige zeitsynchrone Datenerfassung, die in Abschnitt 5.2.2 genauer beschrieben wird.

5.2.2 IT Struktur

Die IT-Struktur des Messsystems wird in Abbildung 13 dargestellt. Die Messdaten fallen auf dem Messsystem an. Von dort sollen sie über Ethernet auf Auswertesysteme übertragen werden. Auf diese Art ist das Speichern, Verwalten und Organisieren der Daten vom Messsystem entkoppelt und auch die Module zur Auswertung sind untereinander unabhängig. Schon für kurze Messungen wird ein großer und schneller Datenspeicher benötigt, welcher für den PC preisgünstig und flexibel verfügbar ist. Ebenso ist auf einem PC die benötigte Rechenleistung kostengünstig vorhanden, daher können die Messdaten dort online vorverarbeitet und visualisiert werden. Die Werkzeuge zur Auswertung müssen die Daten in einer für sie geeigneten Form zur Verfügung gestellt bekommen, daher werden die Daten in einer einheitlichen und leicht veränderlichen Form auf dem PC abgespeichert.

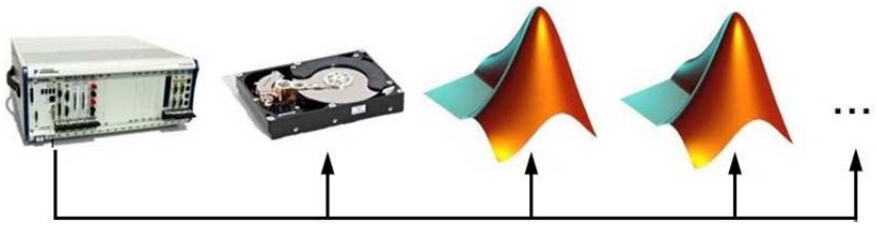


Abbildung 13: IT-Struktur

5.2.3 Messdurchführung

Für die einzelnen Fehler ist es notwendig, die passenden Zeitpunkte zu kennen, in denen sich die Fehler erkennen lassen. Dazu wurden vier Standard-Fahrprofile ausgewählt, die für alle fehlerhaften Maschinen verwendet werden. Hierbei handelt es sich um die bekannten Verbrauchszyklen NEFZ und FTP 75 und zwei Bergpässe. Der US-Fahrzyklus FTP 75 (Federal Test Procedure) (Abbildung 14) ist für den Test von Fehlerdetektionsalgorithmen besonders geeignet, weil er, im Gegensatz zum synthetischen NEFZ (Abbildung 15), einer typischen Autofahrt entsprechen soll. Der FTP 75 besteht aus drei Phasen. Er beginnt mit einer Kaltstartphase in der schon nach vier Minuten die maximale Geschwindigkeit von über 90 km/h angefahren wird. Von Sekunde 505 - 1369 wird innerstädtisch gefahren. Die letzte Phase ist eine Wiederholung der ersten Phase, jedoch mit einem durch die ersten beiden Phasen erwärmten Antrieb. Diese spezielle Eigenschaft ermöglicht durch einen Vergleich der Fehlerdetektionsergebnisse der Ersten und Letzen Phase eine Aussage zur Temperatursensitivität der Algorithmen.

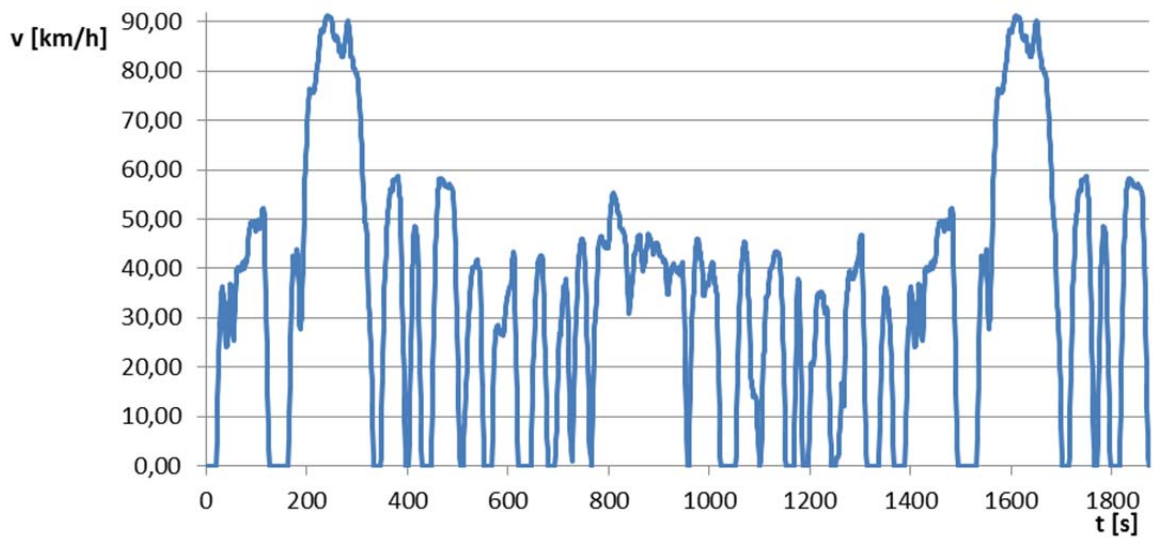


Abbildung 14: FPT 75 [1]

Des Weiteren war es notwendig, einzelne Sondermessungen durchzuführen. So ist es für thermische Messungen notwendig, die Maschine bzw. einzelne Bauteile bis zum maximalen Wert zu erwärmen. Bei schwingungstechnischen Untersuchungen ist es hingegen notwendig, eine veränderliche Drehzahl z. B. in Form einer Drehzahlrampe zu verwenden, um die drehzahlbedingten Schwingungen von anderen Effekten trennen zu können.

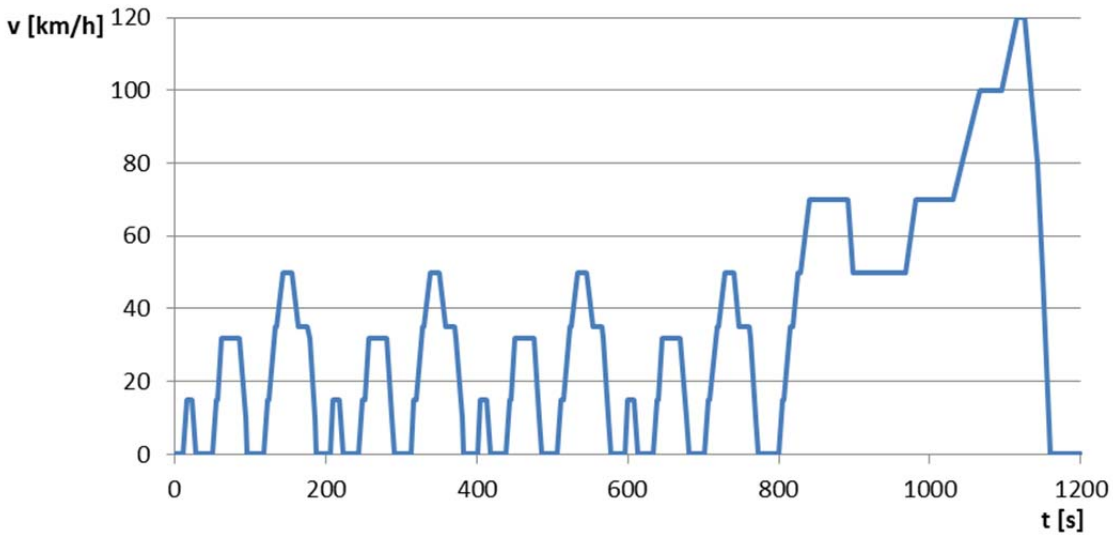


Abbildung 15: Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) [1]

Das Mess- bzw. Automatisierungssystem ermöglicht es dem Benutzer, komplette Testsequenzen in Form einer CSV[4]-Datei abzufahren. Hierbei können Werte wie Drehzahl, Drehmoment, Batteriespannung, usw. über der Zeit automatisch gesetzt werden. Der große Vorteil dieser Softwarefunktion besteht in der Wiederholbarkeit einzelner Messungen.

[4] CSV - Comma-Separated Values

5.3 Rollenprüfstand

5.3.1 Fahrsimulator

Zur Validierung der Diagnoseverfahren an Bord des Fahrzeugs bei verschiedenen Fahrzuständen und Fahrprofilen wurde ein Fahrsimulator bei der Firma Krebs & Aulich GmbH aufgebaut. Dazu wurde bei einem VW Fahrzeug der eigentliche Verbrennungsmotor durch einen VW E-Antrieb und einer Leistungselektronik ersetzt (Abbildung 16). Die benötigte Batterie wurde unter der Rücksitzbank und unterhalb des Kofferraums, wo sonst das Reserverad platziert ist, eingebaut. Dieses Fahrzeug wurde als Fahrsimulator auf einem an der Universität Kassel aufgebauten Rollenprüfstand betrieben. Die Kenndaten des Rollenprüfstands beinhaltet Tabelle 7.

Leistung der Wirbelstrombremse	260 kW
Maximale Prüfgeschwindigkeit	260 km/h
Maximale Radleistung (statisch)	260 kW
Maximale Radleistung (dynamisch)	520 kW
Maximale Zugkraft	6kN

Tabelle 7: Leistungsdaten Rollenprüfstand

Für die Fehlererkennung wird das in Abschnitt 5.2.1 beschriebene Rapid-Prototyping-System in das Fahrzeug eingebaut.

Abbildung 16: Umbau Fahrsimulator

Der im Fahrsimulator eingesetzte E-Antrieb ohne Fehler wird für die Validierung der Diagnoseverfahren durch E-Antriebe mit eingebauten Fehlern ersetzt. Dazu hat die Universität Kassel zusammen mit der Volkswagen AG die in Abschnitt 5.4.2 beschriebenen Fehlermaschinen aufgebaut, die sowohl auf dem Prüfstand getestet, als auch im Fahrsimulator verwendet werden.

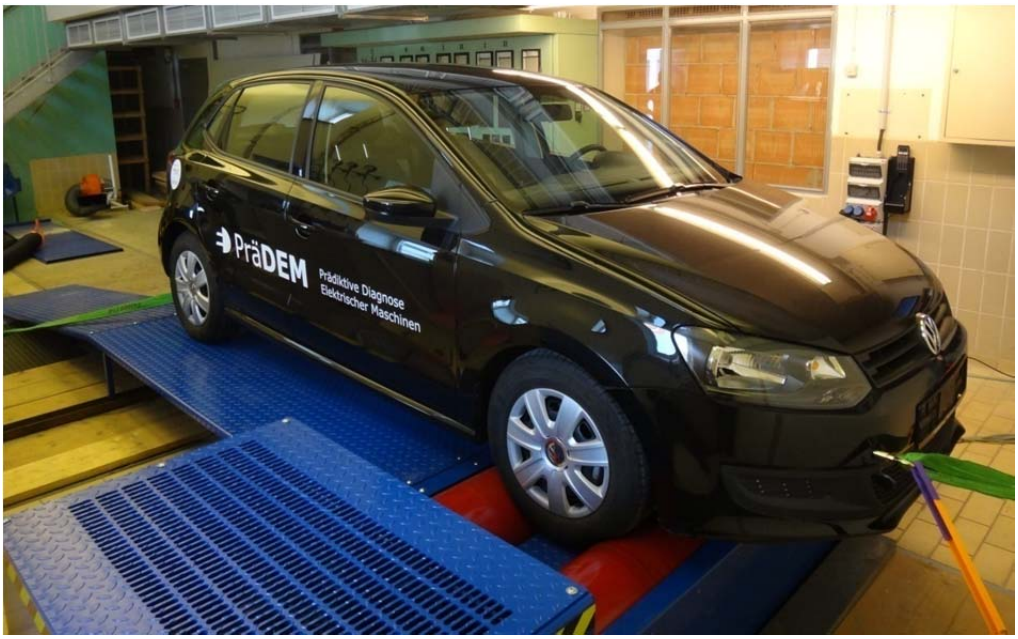


Abbildung 17: Fahrsimulator bestehend aus Fahrzeug und Rollenprüfstand

5.3.2 Messsysteme

Zur Validation der Algorithmen unter realitätsnahen Bedingungen, war der vorherige Test mit einem Prototypensystem erforderlich. Mit dem Prototypensystem konnten die Algorithmen sowohl auf Funktionalität als auch auf Echtzeitfähigkeit hin überprüft werden. Angesichts einer auf Matlab basierenden Entwicklungsplattform, wurde das Prototypensytem dSPACE MicroAutoBox II (Abbildung 18) eingesetzt. Der Vorteil bestand darin, dass aus dem Modell ein C-Code kompiliert wurde, wodurch die Algorithmen aus Matlab/Simulink direkt verwendet werden konnten. Weiterhin war die dSPACE MicroAutoBox II direkt für den Einsatz im Fahrzeug entwickelt worden und konnte daher über die 12 Volt-Versorgung des Fahrzeugs betrieben werden.

Abbildung 18: dSPACE MicroAutoBox II

Für die Verwendung der MicroAutobox II, mussten zunächst einige Arbeitsschritte durchgeführt werden:

- Kommunikation mit dem Display, um die von der TU Ilmenau entwickelten Visualisierungselemente darstellen zu können
- Detektion einfacher Messgrößenänderungen, um die Funktionsweise der mitgelieferten Entwicklungsbausteine zu überprüfen

Zunächst war es wichtig, die Kommunikation mit dem Display umzusetzen, da eine gemeinsame Schnittstelle mit der TU Ilmenau gefunden werden musste. Dazu war das Senden und Empfangen von Daten notwendig. Zu diesem Zweck wurde eine serielle Schnittstelle eingesetzt, welche die Funktionalität der Kommunikation am geringsten beeinflusste. Der Vorteil der seriellen Schnittstelle war, dass diese an jedem Computer ausgelesen werden konnte. Es ließen sich ohne weiteres Fehlercodes in Form von Strings und Bitfolgen versenden. Das Auslesen der Schnittstelle konnte durch einfache Programmiersprachen wie VisualBasic umgesetzt werden.

Neben dem Prototypensystem wird ein Datenlogger von der Fa. IMC eingesetzt (Abbildung 19). Dieser soll sowohl die Messdaten, als auch die Diagnoseaussagen aufnehmen, damit die Ergebnisse anschließend dokumentiert werden können.

Für den Vergleich von Messungen mit Prüfstandsdaten, wurde ein Datenlogger mit ähnlicher Kanalkonfiguration zusammengestellt. Auf diese Weise ließen sich die wichtigen Messgrößen wie Strom, Spannung, Temperatur und Beschleunigungen aufzeichnen.

Abbildung 19: Datenlogger zum Einsatz im Fahrzeug

5.4 Prüflinge

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die Prüflinge, die im Rahmen dieses Projekts untersucht wurden. Diese beinhalten Sensorsysteme, Fehlermaschinen und Temperaturmaschinen.

5.4.1 Sensorsysteme

Für die Schwingungsmessung bestand das Ziel darin, einen Lowcost-Sensor zu verwenden, um Fehler wie z. B. Lagerfehler oder eine Unwucht zu detektieren. Zu diesem Zweck wurde zur Messung ein

handelsüblicher Klopfsensor (Abbildung 20) neben kostenintensiven Beschleunigungssensoren an der E-Maschine angebracht. In diesem Zusammenhang wurde ein Vergleich der Sensoren durchgeführt, um zu ermitteln, inwiefern die kostengünstigen Klopfsensoren die relevanten Schwingungen detektieren können. Hierfür musste zunächst untersucht werden, welche Frequenzen für die Fehlerdetektion relevant sind. Dies wird in Kapitel 6.2.1 beschrieben.

Abbildung 20: Handelsüblicher und günstiger Klopfsensor

Des Weiteren wurden verschiedene Ankopplungsarten wie z. B. Kleben oder Verschrauben genauer untersucht. Zur Verbesserung der Signalqualität, wurde zudem ein Ladungsverstärker mit einem rauscharmen Operationsverstärker entwickelt und aufgebaut.

Als zweites Sensorsystem wurde mit Hilfe eines Einpunkt-Laservibrometers und eines XYZ-Tisches ein Flächenscanner entwickelt, der es ermöglicht, eine Fläche zu scannen und anschließend das Bild der Oberflächenschwingung zu visualisieren.

5.4.2 Fehlermaschinen

Für die Diagnose von Fehlern war es erforderlich, Fehler realitätsnah abzubilden bzw. zu erzeugen. Dazu wurden sogenannte „Fehlermaschinen“ - also gezielt präparierte Maschinen - aufgebaut. Ein Auszug der durchgeführten Arbeiten zeigt die Tabelle 8.

Fehlerart	**Fehler, die nachgebildet werden können**
Elektrische Fehler	Leiterbruch, Phasenschluss, Hauptschluss
Mechanische Fehler	Rotorunwucht, Lagerfehler

Tabelle 8: Auszug: Überblick Fehlermaschinen

An dieser Stelle sei ein Extrakt der aufgebauten Fehlermaschinen näher erörtert.

Zur Simulation elektrischer Fehler wurden Leitungen aus einer Maschine herausgeführt. Hierdurch wurde die Möglichkeit geschaffen, einzelne Windungen aufzutrennen und somit Leiterbrüche zu

simulieren. Außerdem können unterschiedlichste Kurzschlüsse zwischen verschiedenen Phasen als auch zwischen Phase und Masse nachgebildet werden.

Abgesehen davon lassen sich mit Hilfe gezielt beschädigter Lager mechanische Fehler abbilden. Dazu wurden Lager von der Firma Krebs & Aulich GmbH so bearbeitet, dass sie beispielsweise Fehler in Form eines beschädigten Außenrings, eines beschädigten Innenrings (Abbildung 21) oder beschädigter Kugeln aufweisen. Ein weiterer mechanischer Fehler lässt sich u. a. durch einen präparierten Rotor darstellen.

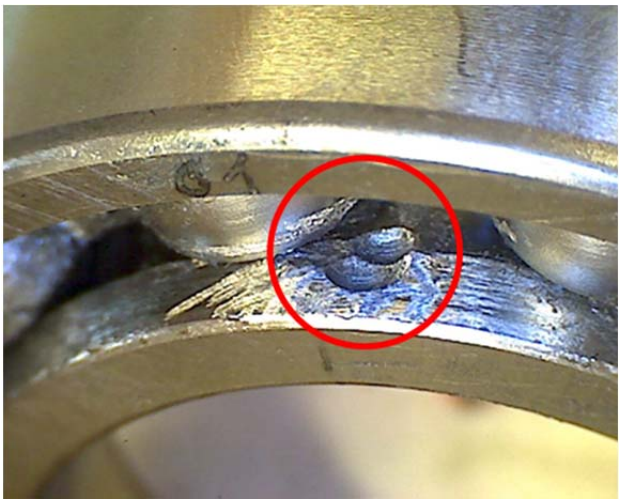


Abbildung 21: Lager mit manipuliertem Innenring

5.4.3 Temperaturmaschinen

Im Projektzeitraum wurden mehrere E-Maschinen aufgebaut, die mit Temperatursensoren ausgestattet wurden. Diese E-Maschinen dienen der Ermittlung von Temperaturen an bestimmten Stellen und geben Aufschluss über die Temperaturverteilung innerhalb der E-Maschine. Für die Lebensdauer einer E-Maschine spielt die Temperatur eine bedeutende Rolle, da die Maschinenkomponenten nur bis zu einer bestimmten Temperatur ausgelegt sind und bei höheren Temperaturen Schaden nehmen können. Zur genauen Ermittlung der Temperaturen wurden Sensoren im Stator oder im Rotor bzw. in beiden Komponenten eingebaut. Weiterhin ist es möglich, mithilfe der Temperaturmessmaschinen für die E-Maschine entwickelte Temperaturmodelle abzugleichen und zu verbessern. Durch solche Temperaturmodelle könnte zukünftig auf den Einsatz von Temperatursensoren verzichtet werden, vorausgesetzt das Modell ist exakt und es sind alle möglichen Temperaturverteilungen bei den verschiedensten Betriebspunkten in der E-Maschine bekannt. Im Projektzeitraum wurden daher die unterschiedlichsten Prüfstandsversuche mit Temperaturmessmaschinen durchgeführt, um die Temperaturen zu ermitteln und die Temperatur-modelle abzugleichen.

5.5 Entwerfen von Gestaltungslösungen

Auf Basis der erhobenen Nutzungsanforderungen wurden Gestaltungslösungen entworfen und in Prototypen überführt. Ein Prototyp ist eine konkrete Repräsentation eines Teils oder eines ganzen interaktiven Systems, die eine Idee oder eine Problemstellung offenlegt [3]. Die entstandenen Prototypen dienten zum einen als Grundlage für die sich anschließende Evaluation und zum anderen zur Schaffung einer Kommunikations- und Entscheidungsgrundlage innerhalb des Projekts.

Gestaltungslösungen wurden im Projekt iterativ nach dem Bottom-up-Ansatz entworfen, beginnend auf Konzeptebene, überführt in einfache nicht-funktionale Papierprototypen bis hin zu digitalen, funktionalen Prototypen.

5.5.1 Konzeption

Die Gestaltung lässt sich unterteilen in Interaktionsdesign und visuelles Design. Interaktionsdesign definiert die übergeordnete Struktur des Bildschirmaufbaus und die Anordnung funktionaler Elemente sowie den Fluss, das Verhalten und die Organisation des Produkts. Das visuelle Design definiert die Bild- und Formsprache, die für die Darstellung von Daten, Konzepten und Funktionen verwendet werden [5].

Ein erstes Gestaltungskonzept wurde aus Empfehlungen internationaler Standards und Guidelines zur Gestaltung von Anzeigen und Bedienelemente in Fahrzeugen [13, 15, 17, 19 - 21] sowie dem Volkswagen Corporate Design abgeleitet und in Gestaltungsparameter überführt (Tabelle 9).

Als Grundlage für die inhaltliche Gestaltung konkreter Diagnosemeldungen wurde in einer projektinternen Expertenrunde eine Fehlermatrix erstellt. Ausgangspunkt war eine technische Fehlertabelle in Form eines Lastenhefts mit projektrelevanten, prädiktiv detektierbaren Fehlerbildern. Diese Fehlerbilder wurden nach zuvor evaluierten Schemata beschrieben, bewertet, klassifiziert und priorisiert. In der Summe entstanden 24 konkrete Diagnosemeldungen für acht betrachtete Fehlerbilder.

Sinneskanal	Gestaltungsparameter	Ausprägung
Visuell	Sensorischer Modus	Position
		Zeichengröße
	Organisation	Struktur
		Priorisierung
	Codierung	Symbol, Icon
		Text, Signalworte
		Farbe
		Blinken und Bewegung
Akustisch	Sensorischer Modus	Frequenz
		Lautstärke
	Organisation	Priorisierung
		Unterscheidbarkeit
	Codierung	Signalart
		Zeitliche Charakteristika

Tabelle 9: Übersicht Gestaltungsparameter

5.5.2 Prototyping

Das Designkonzept der prädiktiven Diagnosemeldungen wurde zunächst in einfache Papierprototypen überführt (Abbildung 22), um unterschiedliche Gestaltungslösungen schnell und einfach gegeneinander abwägen zu können. Fokussiert wurde die Anzeige im Kombiinstrument am Rand des primären Blickfeldes des Fahrers, da sich dieses für fahr- und sicherheitsrelevante Informationen empfiehlt.

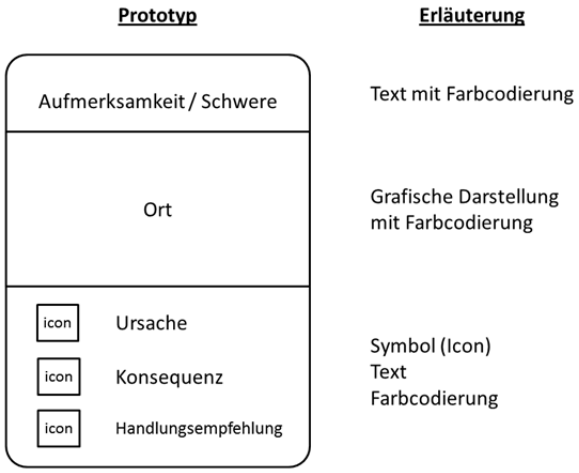


Abbildung 22: Abstrakter Papierprototyp

Mit Anwendung der identifizierten Gestaltungsparameter und Erweiterung um konkrete Meldungsinhalte entstanden aus den Papierprototypen erste Mock-ups, einfache nicht-funktionale digitale Prototypen, mit denen erste Nutzertests durchgeführt wurden (Abbildung 23).

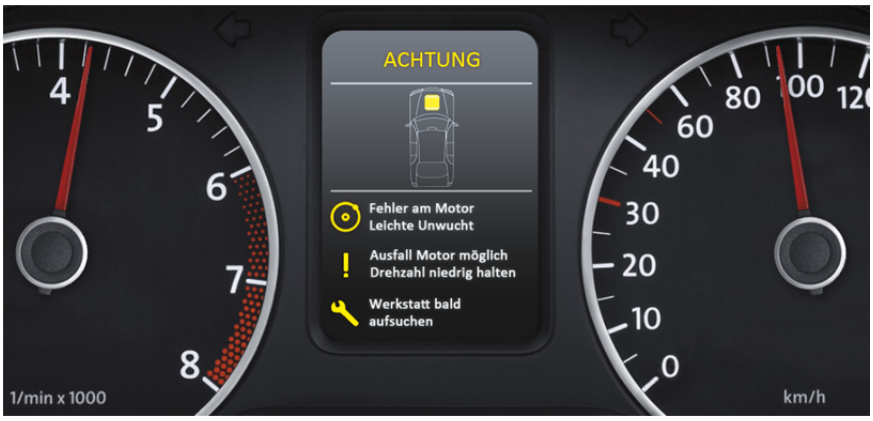


Abbildung 23: Mock-up einer prädiktiven Diagnosemeldung

Im nächsten Schritt wurden die Mock-ups in funktionale high-fidelity Prototypen überführt und um interaktive Elemente sowie Touchfunktionalität ergänzt (Abbildung 24). Aufgrund technischer Einschränkung im verfügbaren Testfahrzeug musste von der Anzeige im Kombiinstrument auf die alleinige Anzeige im CID der Mittelkonsole ausgewichen werden, was aufgrund der modularen Gestaltung der Diagnosemeldungen problemlos möglich war.

Abbildung 24: Funktionaler high-fidelity Prototyp

6 Messungen und Auswertung

6.1 Charakterisierung, Modellparametrierung und -validierung

In das entwickelte Temperaturmodell fließen die Eingangsgrößen Drehzahl, Drehmoment, Umgebungstemperatur und Anfangstemperatur der Bauteile ein. Zur Parametrierung und Validierung des Modells, wurde die Temperatur bei Messungen mit der Temperatur im Modell verglichen. Die theoretisch bestimmten Wärmewiderstände und Wärmekapazitäten wurden angepasst, damit sich der gemessene Temperaturverlauf einstellte [40].

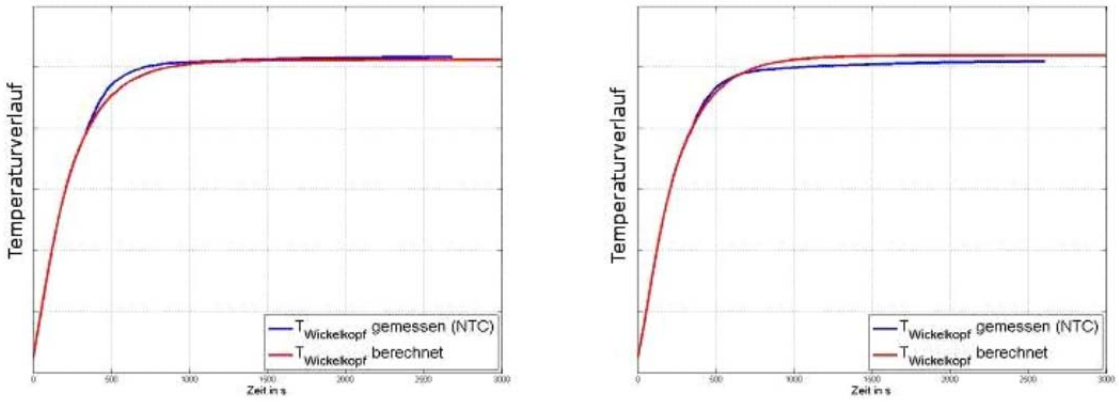


Abbildung 25: Exemplarisch: zwei abgeglichene Arbeitspunkte (rot = Simulation, blau = Messung)

Der Abgleich der FEM-Modalanalyse wurde mit Hilfe eines Hochlaufs durchgeführt. Dieser ist in Abbildung 26 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass bei etwa 5300 Hz eine starke Überhöhung der Amplitude auftritt, welche der daneben dargestellten Eigenform entspricht.

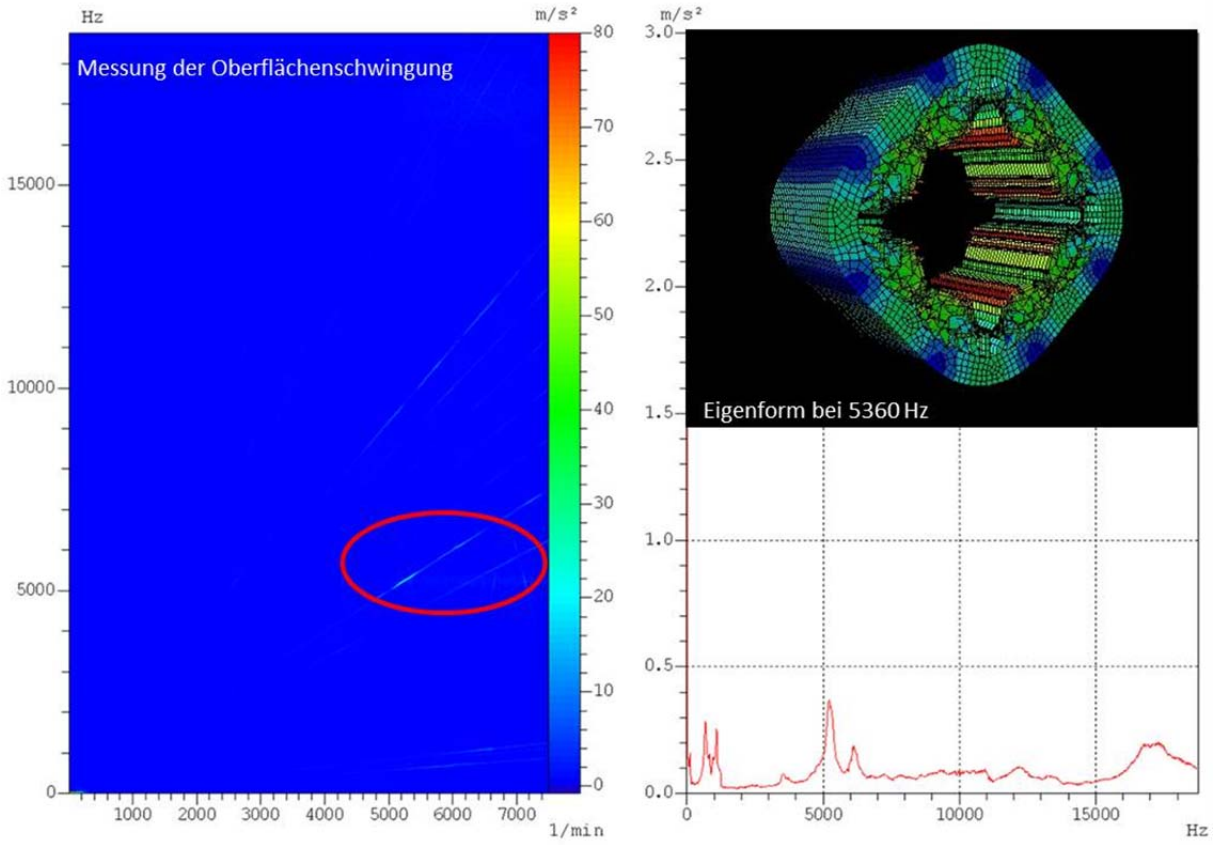


Abbildung 26: Vergleich zwischen der Simulation und Messung

6.2 Fehlerdetektion

6.2.1 Vorgehensweise

6.2.1.1 Lagerfehler

Im Folgenden werden die Prinzipien einzelner Fehler genauer beschrieben. Lagerfehler lassen sich meist eindeutig an einem Frequenzspektrum erkennen. Durch die Kinematik des Lagers lassen sich die Frequenzen, die den Fehler beschreiben, zuvor berechnen. Im Allgemeinen können drei verschiedene Fehler auftreten, die das Lager zerstören bzw. die Verluste in diesem deutlich erhöhen. Die Frequenzen für einen Schaden am Außenring f_A, einen Schaden am Innenring f_I und ein Schaden an einer Kugel f_B ergeben sich zu

$$f_A = \frac{n}{2} \bullet f_r \left(1 - \frac{d_b}{d_m}\right)$$

$$f_I = \frac{n}{2} \bullet f_r \left(1 + \frac{d_b}{d_m}\right)$$

$$f_B = \frac{n}{2} \bullet f_r \left(1 - \left(\frac{d_b}{d_m}\right)^2\right)$$

Wobei n der Anzahl der Kugeln, f_r der Drehfrequenz, d_b dem Kugeldurchmesser und d_m dem mittleren Durchmesser entsprechen.

6.2.1.2 Magnetische Fehler

Teilmagnetisierte Magnete bewirken eine verminderte Leistung des Motors, da das magnetische Feld abgeschwächt ist. Dadurch werden bei einem stromfreien Auslaufversuch schwächere Spannungen induziert. Weiterhin sind die Verluste im Stator geringer, wodurch der Auslauf des Motors länger dauert.

6.2.1.3 Elektrische Fehler

Neben den zuvor beschriebenen Fehlern ist es außerdem möglich, dass elektrische Fehler in der Maschine auftreten. Diese können gebrochene Leiter in der Wicklung der Maschine sein oder ein Kurzschluss zwischen Phase und Masse.

Gebrochene Leiter in der Wicklung erhöhen den elektrischen Widerstand der Wicklung und können dadurch auch detektiert werden. Der Masseschluss verändert das RC-Verhalten der DC-Spannung.

6.2.2 Algorithmen

6.2.2.1 Lagerfehler

Um die Lagerfehler zu diagnostizieren, wurde ein Kugellager mit einem bearbeiteten Innenring in der Maschine verbaut. Dieses Lager wurde bereits in Abbildung 21 gezeigt. Abbildung 27 zeigt den Vergleich zwischen einer Gutmaschine und einer Maschine mit zerstörtem Innenring. Der Marker zeigt die Frequenz, die bei der entsprechenden Drehzahl auf Grund des zerstörten Lagers auftritt. In dem oberen Diagramm hingegen tritt diese Frequenz nicht auf, sodass darauf geschlossen werden kann, dass das Lager in Ordnung ist.

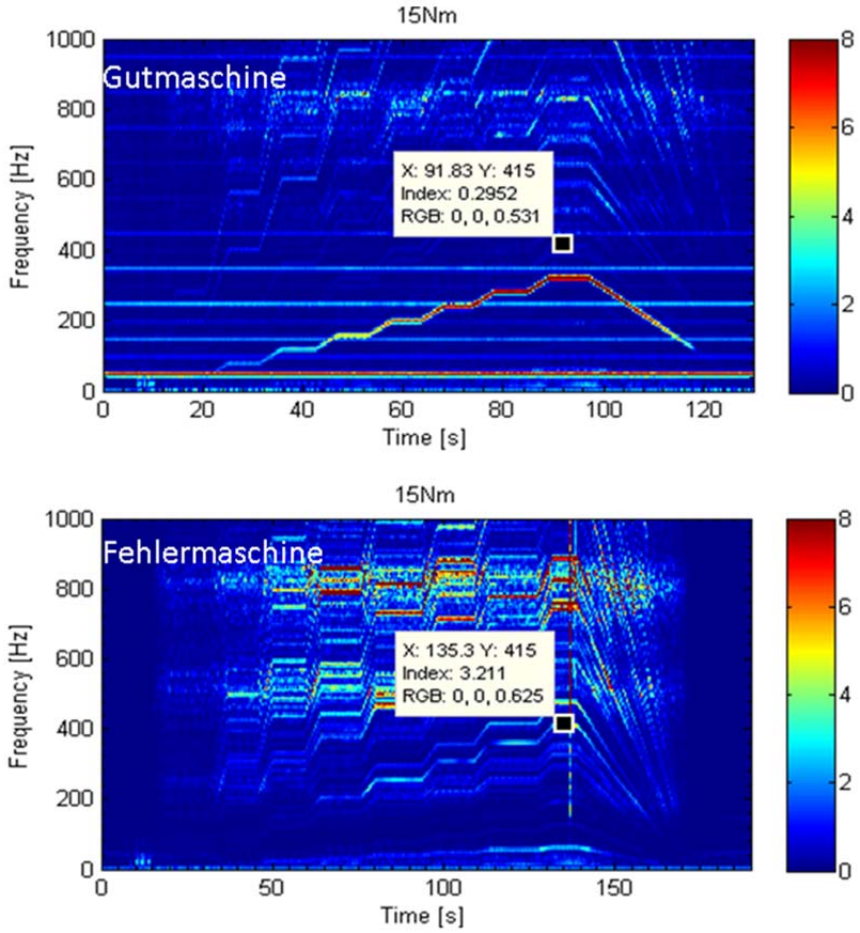


Abbildung 27: Campbell-Diagramm: oben "Gutmaschine", unten Innenring manipuliert

6.2.2.2 Magnetische Fehler

Mit Hilfe des Auslaufversuchs konnten die Verluste in der permanentmagneterregten Synchronmaschine bestimmt und aufgeteilt werden. In einem stromfreien Fall entstehen in der Maschine Hysterese-, Wirbelstrom-, Lager- und Luftreibungsverluste. Diese konnten durch eine Funktion zweiten Grades beschrieben werden, siehe Formel (1). Ist die Trägheit Θ der Maschine bekannt, können mit Hilfe der Drehzahlfunktion, Formel (2), die Parameter a_1 und a_2 bestimmt und dadurch die Verluste aufgeteilt werden (Abbildung 28) [41].

$$P_{loss} = \left(P_{hys} + P_{bg}\right) + \left(P_{ec} + P_{air}\right) = a_1\omega_{mech} + a_2\omega_{mech}^2$$
$$= -\mathbf{M}\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{mech}} = -\boldsymbol{\Theta}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathbf{mech}}\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{mech}} \qquad (1)$$

$$\mathbf{0} = \frac{\mathbf{a_1}}{\boldsymbol{\Theta}} + \frac{\mathbf{a_2}}{\boldsymbol{\Theta}}\boldsymbol{\omega}_{\boldsymbol{mech}} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{\boldsymbol{mech}}$$
$$\rightarrow \boldsymbol{\omega} = \mathbf{b_1}\mathbf{e}^{-\mathbf{a_2}\mathbf{t}/\boldsymbol{\Theta}} - \frac{\mathbf{a_1}}{\mathbf{a_2}} \qquad (2)$$

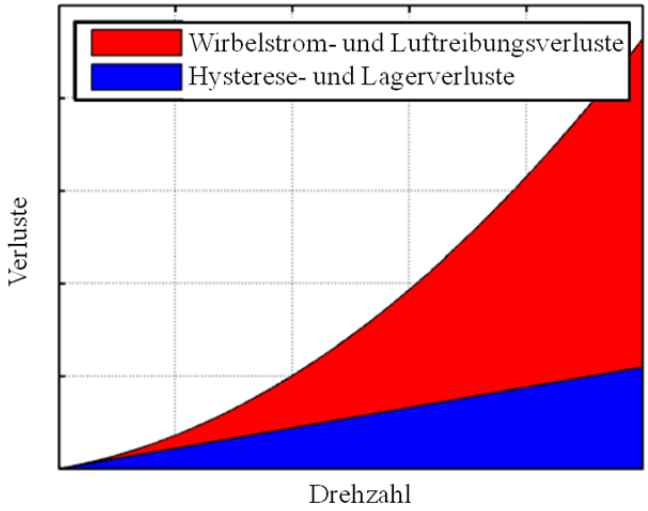


Abbildung 28: Aufteilung der berechneten Verluste

Die erhöhten Verluste wiesen auf einen Fehler hin, der in einem weiteren Test genauer bestimmt werden musste.

Für die Aufteilung der Verluste wurde die exakte Drehzahl benötigt, welche sich aus den Phasenspannungen ableiten ließ, da deren Frequenz (Abbildung 29) eine Funktion der Drehzahl war (3). Dieser Algorithmus konnte zudem als Funktionstest für den Drehzahlsensor genutzt werden, da er einen Vergleich von berechneter und gemessener Drehzahl ermöglichte.

$$\mathbf{f_{el}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T_{el}}} \quad , \quad \mathbf{f_{mech}} = \frac{\mathbf{f_{el}}}{\mathbf{p}} \quad , \quad \boldsymbol{\omega}_{\mathbf{mech}} = \mathbf{2} \cdot \boldsymbol{\pi} \cdot \mathbf{f_{mech}} \qquad (3)$$

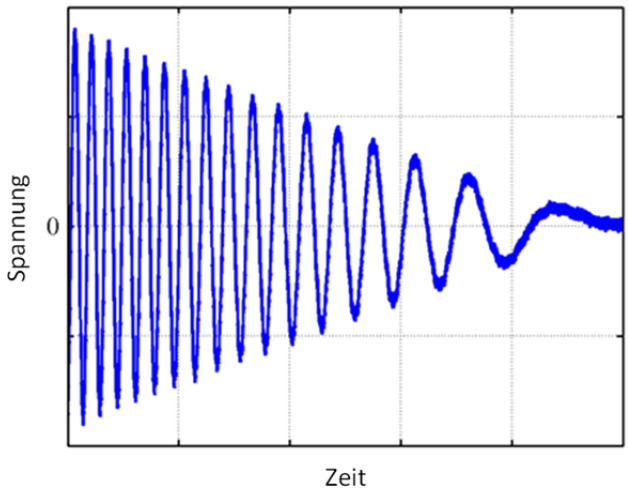


Abbildung 29: Spannungsverlauf am Ende des Auslaufversuchs

Die Drehzahl wurde während einer Periode der Phasenspannung als konstant angenommen. Daher konnte die Flussdichte in den Zähnen berechnet werden (Abbildung 30). Abweichungen von den

Normwerten können dabei auf Fehler im magnetischen Kreis z. B. fehlende oder teilmagnetisierte Magnete hinweisen.

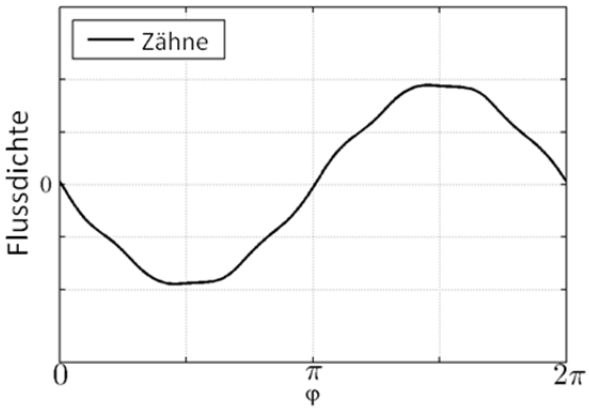


Abbildung 30: Flussdichte in den Statorzähnen

6.2.2.3 Elektrische Fehler

Mit dem Ziel, einen Leiterbruch - also eine Erhöhung der Spulenimpedanz - zu detektieren, kann die elektrische Maschine im Kurzschluss betrieben und dabei Veränderungen in den Phasenströmen festgestellt werden. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode besteht darin, dass keine zusätzliche Sensorik notwendig ist. Die Ergebnisse für zehn aufgetrennte parallele Drähte sind in Abbildung 31 dargestellt.

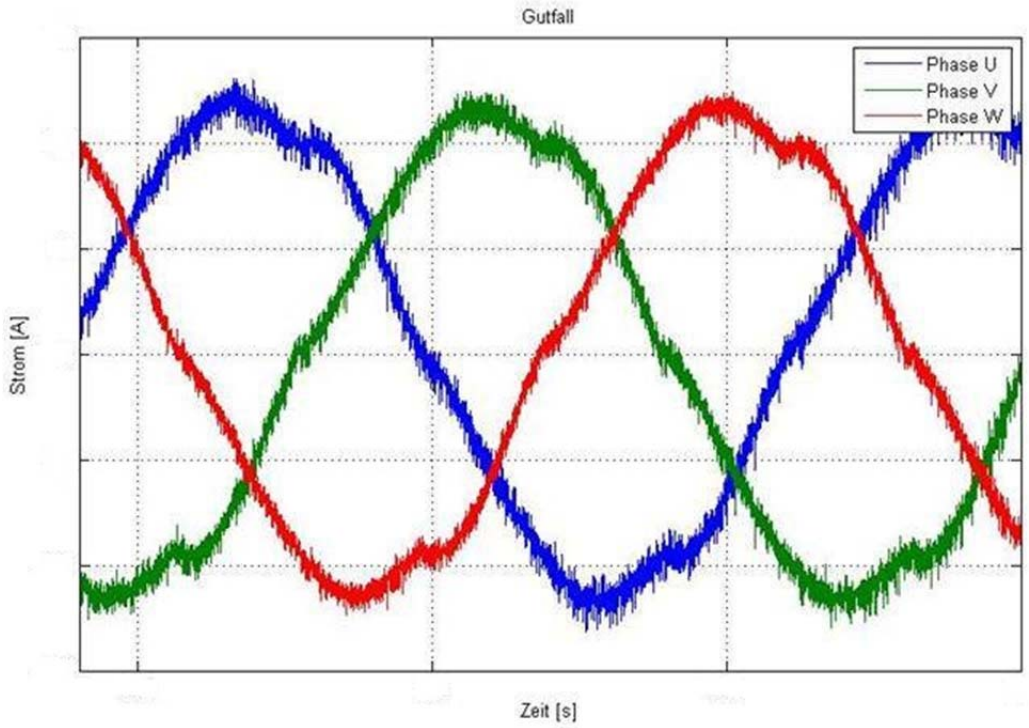


Abbildung 31: Messergebnisse einer Gutmaschine im Kurzschluss-Betrieb

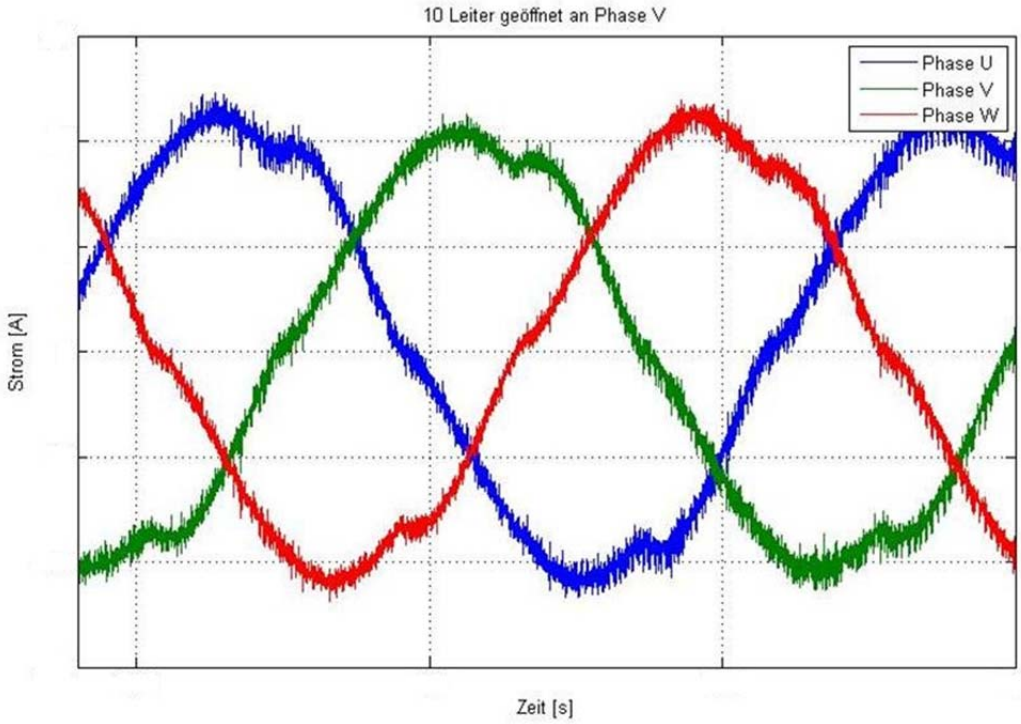


Abbildung 32: Messergebnisse einer fehlerbehafteten Maschine im Kurzschluss-Betrieb

Abbildung 32 zeigt im Vergleich zu Abbildung 31, dass die Ströme in allen Phasen betragsmäßig geringere Amplituden aufweisen. Auffällig dabei ist der Strom der Phase V, in der zehn Leiter aufgetrennt wurden. Hier ist ein Unterschied von etwa 8 % erkennbar. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der Fehler so geringfügig ist, dass die Maschine weiterhin nach außen „normal“ funktionieren würde. Allerdings ist aufgrund des erhöhten Widerstandes mit höheren thermischen Verlusten und langfristig mit beschleunigter Degradierung zu rechnen.

Zur Nachbildung eines Kurzschlusses zwischen Phase und Gehäuse, wurde ein veränderlicher Widerstand zwischen Phasenleitung und Gehäuse geschaltet. Bei Masseschlüssen unterscheidet man zwischen „harten“ bzw. „satten“ Kurzschlüssen, die niederohmig sind und von der Schutzbeschaltung schnell erkannt und isoliert werden und „weichen“ Kurzschlüssen, die relativ hochohmig sind und zu geringfügigen Stromerhöhungen führen und somit in der Regel von der Schutzbeschaltung nicht erkannt werden können. Letztere wurden hier nachgebildet und deren Erkennung untersucht. Abbildung 33 zeigt ein Prinzipbild des Versuchs.

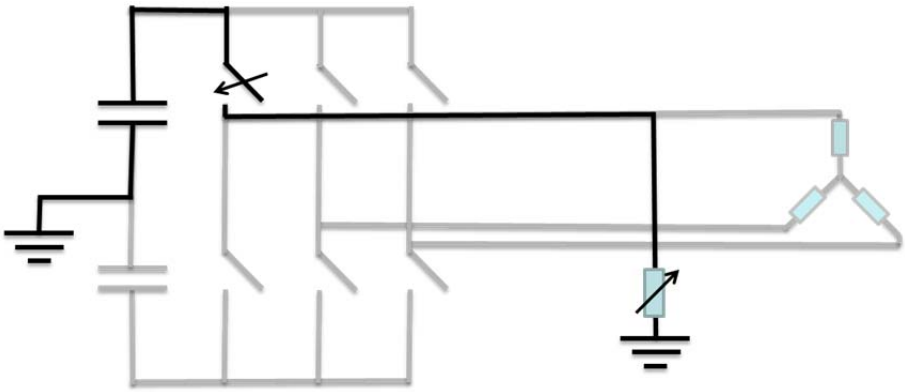


Abbildung 33: Prinzipbild - Kurzschluss zwischen Phase und Gehäuse

Der eingestellte Masseschlusswiderstand bildet zusammen mit der Kapazität im Spannungszwischenkreis des Wechselrichters ein RC-Glied. Dessen Zeitkonstante kann durch eine Signalanalyse der DC-Spannung am Plus- oder Minus-Pol detektiert werden. Im Anschluss kann daraus der Masseschlusswiderstand identifiziert werden. Bei Unterschreitung eines Schwellwertes besteht dann die Möglichkeit der Aktivierung einer Fehleranzeige. Die Ergebnisse dieses Versuchs werden in Abbildung 32 dargestellt.

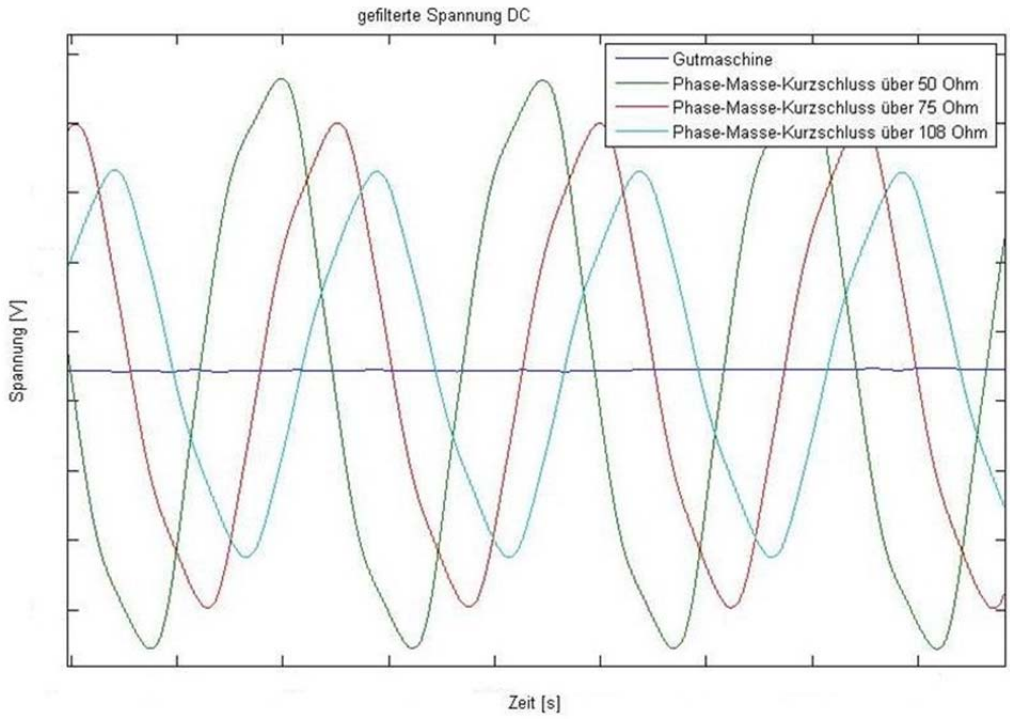


Abbildung 34: Strommessung bei unterschiedlichen hochohmigen Kurzschlüssen

6.2.3 Prototypische Umsetzung

Die Diagnosemethoden zur Erkennung eines Leiterbruchs oder eines Phase-Masse-Kurzschlusses sind echtzeitfähig und können direkt online eingesetzt werden. Damit die Funktionen auf dem Rapid-

Prototyping-System funktionieren, wird lediglich ein C-Code aus den Matlab/Simulink-Modellen generiert.

Dieses Rapid-Prototyping-System dient neben der Fehlererkennung auch als Schnittstelle zwischen der Fehlererkennung und der Anzeige auf dem Display, die von der TU Ilmenau entwickelt wurde. Die Funktionsweise der Box wird in folgende Schritte gegliedert:

- Algorithmus läuft auf der Autobox und gibt aus, ob ein Fehler besteht
- Dieser Wert wird über die serielle Schnittstelle gesendet
- Ein weiterer PC empfängt die Daten über die serielle Schnittstelle und zeigt den entsprechenden Fehler auf dem Display an

6.2.4 Produktionsprozess

Ursachen für Maschinenausfälle sind nicht nur auf Bauteildefekte während des Betriebs zurückzuführen, sondern können schon vor der ersten Inbetriebnahme vorhanden sein. Daher sind die Fehlerquellen u. a. auch im Fertigungsprozess zu suchen. Zur Vermeidung solcher Fehler werden während des Produktionsprozesses verschiedene Prüfungen vor und nach bestimmten Fertigungsschritten durchgeführt. Beispielsweise werden die Bleche für die Stator- und Rotorfertigung genauestens vermessen, um Geometriefehler ausschließen zu können. Weiterhin finden mehrere verschiedene elektrische Prüfungen statt, wie z. B. die Kapazitäts-, Induktivitäts- oder Teilentladungsmessung. Letztere wird im individuellen Abschlussbericht der Volkswagen AG genauer beschrieben. Des Weiteren wurden die erkannten Fertigungsfehler in einer Datenbasis festgehalten, um zum einen die Fehler zu sichern und zum andern den Produktionsmitarbeitern ein Nachschlagewerk zur Fehlererkennung bieten zu können.

6.2.5 Prüfstand EOL

Nach Fertigung der E-Maschinenantriebe werden diese zur Abnahmeprüfung auf einem 3-E-Prüfstand montiert. Die dort durchgeführte EOL-Prüfung testet den Antrieb auf seine Leistungsfähigkeit und auf mögliche Fehler. Da es sich hierbei um Antriebe handelt, ist der Einfluss des Getriebes auf die E-Maschine ebenfalls überprüfbar. Die EOL-Prüfung besteht derzeit aus mehreren verschiedenen Messungen, wie z. B. der Bestimmung von:

- motorischen und generatorischen Kennlinien bei verschiedenen Betriebspunkten
- Luft- und Körperschall

Die E-Maschine wird auf ihre Spezifikation getestet, wobei definierte Betriebspunkte (Drehzahl und Drehmoment) angefahren werden. Mithilfe der Messergebnisse ist es beispielsweise möglich, die

Wirkungsgrade des Antriebs zu ermitteln und weiterhin die Effizienz des Kühlsystems zu überprüfen. Den Auszug einer Kennlinienmessung zeigt Abbildung 35.

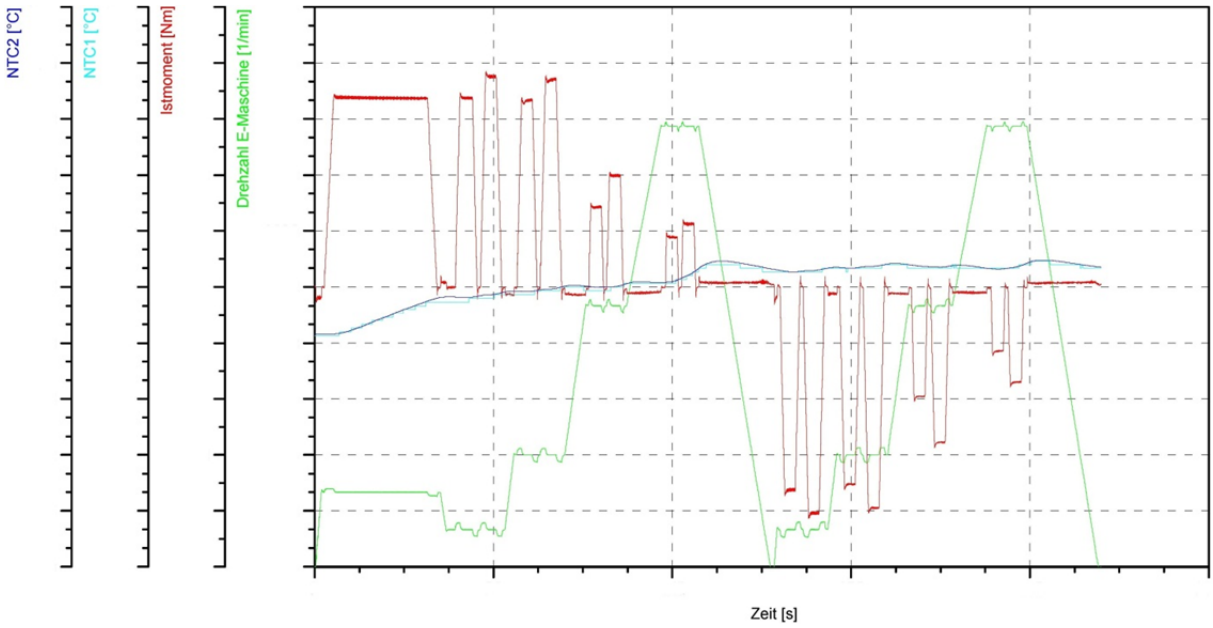


Abbildung 35: Kennlinienmessung der EOL-Abnahme

Nach der Kennlinienmessung wird eine Luft- und Körperschallmessung (Abbildung 36) zur Überprüfung auf akustische Auffälligkeiten durchgeführt. Dazu wurde ein Lastprofil verwendet, welches die akustisch interessanten Betriebspunkte hervorhebt. Gemessen wurde mittels eines empfindlichen Mikrofons sowie zwei Beschleunigungssensoren, die an E-Maschine und Getriebe platziert wurden. Die Aufzeichnung und Auswertung übernahm ein spezielles Geräuschanalyse-System, welches einen Vergleich zu den schon getesteten Antrieben liefert.

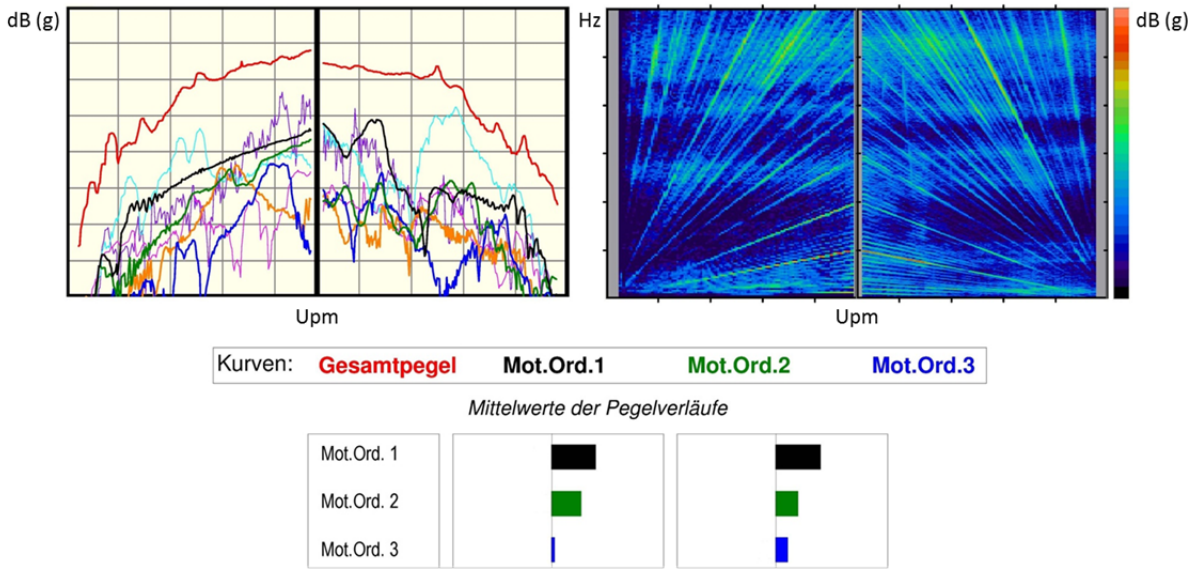


Abbildung 36: Pegelverläufe der E-Maschine

6.3 Versuchsreihen zur Absicherung

6.3.1 Dauerläufe

Die effektive Erprobung der Lebensdauer von elektrischen Maschinen kann nicht nur durch den kostspieligen Einsatz von Testfahrzeugen überprüft werden, sondern auch durch den Einsatz von Prüflingen auf kostengünstigeren und hochmodernen Dauerlaufprüfständen. Damit die Messergebnisse von Testfahrzeugen und Prüfständen miteinander vergleichbar sind, müssen identische Fahrprofile als Grundlage vorliegen. Für einige Arten von Dauerläufen gilt als Vorlage für das Prüfstandsfahrprofil ein einmalig aufgezeichneter Fahrzyklus einer realen Testfahrt. Dieses Lastprofil setzt sich aus Stadtverkehr, Autobahnfahrt und Landstraße zusammen. Dauerläufe, die diesen Zyklus nicht zugrunde legen, besitzen ein eigens auf die Anforderung abgestimmtes Fahrprofil. Die folgende Auflistung stellt einen Auszug aus verschiedenen Arten von Dauerläufen dar, die von der Volkswagen AG durchgeführt wurden.

- Kurzdauerlauf
- Temperaturwechseldauerlauf
- Hochtemperaturdauerlauf
- Antriebsdauerlauf

Während jedes Dauerlaufs wurden kontinuierlich verschiedene Messgrößen wie z. B. Drehzahl, Drehmoment, Phasenströme etc. erfasst, um die Wirkungsgrade der Prüflinge zu jeder Zeit bestimmen zu können. Im Weiteren werden die einzelnen Dauerläufe vorgestellt und beschrieben. Genauere Erkenntnisse aus den Messungen werden im individuellen Abschlussbericht vorgestellt. Nachdem die Dauerläufer ihre vorgeschriebene Laufleistung erreicht haben, wurden die Prüflinge elektrisch und mechanisch vermessen und anschließend zerlegt, um die Bauteile auf Verschleiß oder Beschädigungen zu untersuchen.

Kurzdauerlauf

Es wurde ein Kurzdauerlauf durchgeführt, um eine mögliche Änderung des Wirkungsgrads über eine definierte Laufleistung feststellen zu können. Dazu absolvierte der Prüfling eine relativ kurze Distanz von ca. 15.000 km. Nach jeweils 1.000 km wurden zuvor definierte Betriebspunkte angefahren, um diese als Vergleichswerte zur Wirkungsgraduntersuchung heranziehen zu können. Das Anforderungsprofil entsprach hierbei dem zuvor beschriebenen Fahrzyklus.

Temperaturwechseldauerlauf

Neben dem Dauerlauftest bei konstanter Temperatur wurde ein Dauerlauf bei einem spezifizierten Temperaturwechsel durchgeführt. Dieser diente dazu, die Leistungsfähigkeit von E-Maschine und Getriebe bei verschärften Umweltbedingungen und einer erhöhten Laufleistung abzusichern. Als Vorgabe diente ein extra dafür entwickelter Temperaturzyklus. Während der Zyklen wurden die Wirkungsgrade ermittelt. Durch die Temperaturwechsel erfährt der Prüfling eine vorzeitige Alterung, diese könnte sich ebenfalls auf die Leistungsfähigkeit des Antriebs auswirken.

Hochtemperaturdauerlauf

Ein weiterer durchgeführter Dauerlauf war der Hochtemperaturdauerlauf, bei dem die Alterung des Prüflings künstlich beschleunigt wurde. Hierzu wurde der Prüfling bei einer dauerhaft erhöhten Umgebungstemperatur betrieben. Da die Alterung nach den Gleichungen von Arrhenius erfolgte, konnte die reale Laufleistung ermittelt werden. Neben der Alterungsuntersuchung konnte bei erhöhter Temperatur gezielt das Kühlkonzept geprüft und untersucht werden. Wie schon bei den anderen Dauerlaufprüfungen wurde der Antrieb nach Beendigung vermessen und auf Schäden bzw. Verschleiß überprüft.

Antriebsdauerlauf

Der Antriebsdauerlauf beschreibt einen Lebensdauertest über eine sehr große Distanz. Als Prüfling diente ein kompletter Antrieb bestehend aus E-Maschine und Getriebe. Untersucht wurden die E-Maschinen-Komponenten hinsichtlich der Alterung und damit die möglichen Ausfallmechanismen sowie die Einwirkungen des Getriebes auf die E-Maschine.

6.3.2 Analyse von defekten E-Maschinen

Während des Projektzeitraums wurden E-Maschinen untersucht, bei denen es während des Betriebs zu Fehlern bzw. Beschädigungen kam. Die Informationen, die aus Rückläufern bzw. beschädigten Maschinen gewonnen wurden, lieferten wichtige Erkenntnisse zur Entwicklung von Fehlererkennungsalgorithmen und gaben Informationen über die Möglichkeiten zur Behebung der Fehlerursachen. Zur Schadensbegrenzung wurde die E-Maschine bei einem auftretenden Fehler direkt gestoppt. Dadurch vergrößerte sich die Chance, die Fehlerursache zu finden. Nachfolgend werden beispielhaft drei schadhafte E-Maschinen samt Fehlern vorgestellt.

Akustisch auffällige E-Maschine

Eine E-Maschine wurde während des Betriebs akustisch auffällig und zur genaueren Untersuchung des Körperschalls mit einem Beschleunigungssensor bestückt. Der Körperschall wurde während des Prüflaufs mit einem mobilen Frontend aufgezeichnet. Für eine genauere Untersuchung ist die E-Maschine von der Leistungselektronik abgekoppelt worden, um keine Einflüsse seitens der

Leistungselektronik zu erhalten. Die E-Maschine wurde anschließend mithilfe der verbundenen Lastmaschine angetrieben und auf einer niedrigen Drehzahl gehalten. Der aufgezeichnete Körperschallverlauf wird in Abbildung 37 dargestellt.

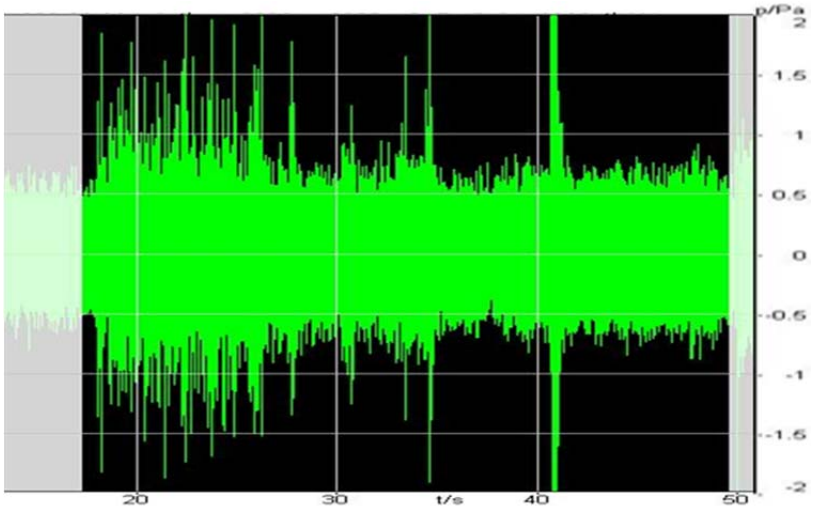


Abbildung 37: Körperschallverlauf über die Zeit

Die Messung des Drehmoments wies ein deutlich erhöhtes Schleppmoment auf, woraufhin die E-Maschine gestoppt wurde. Die anschließende Zerlegung der E-Maschine brachte zerstörte Lager und verschmorte Wicklungen - verursacht durch einen internen Kurzschluss - zum Vorschein. Die Abbildung 38 zeigt das zerstörte Lager.

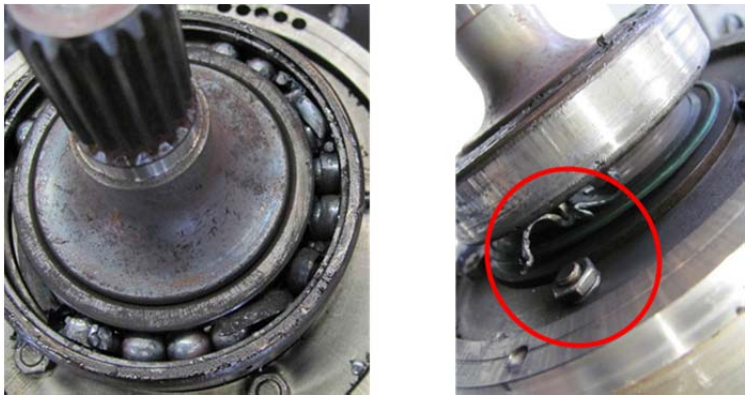


Abbildung 38: Lagerschaden mit zerstörtem Lagerkäfig

Auf der Rückseite des Lagers ragte ein Teil des Lagerkäfigs heraus. Andere Teile des Käfigs sind gebrochen und aus dem Lager herausgeschleudert worden. Diese Teile beschädigten die Isolation der Wicklungen, wodurch es zu einem Kurzschluss kam. Durch den hohen Zerstörungsgrad konnte die Fehlerursache des Lagerschadens nicht eindeutig ermittelt werden.

Untersuchung eines Kurzschluss in einer E-Maschine

Eine Temperaturmessmaschine erlitt während eines Prüfstandsversuchs einen Kurzschluss, der die Zerstörung der E-Maschine zur Folge hatte. Die nachfolgende Untersuchung zeigte ein Loch im Rotor (Abbildung 39).

Abbildung 39: Loch in der Außenwand der Wuchtscheibe

Die E-Maschine war mit Temperatursensoren im Stator sowie im Rotor ausgestattet. Die naheliegende Erklärung für den Fehler ist, dass sich der Kleber eines vergrabenen Temperatursensors unter der Wuchtscheibe des Rotors gelöst hatte. Hierdurch schabte der Sensor durch die Fliehkraft an der Außenwand der Wuchtscheibe. Diese war aufgrund des benötigten Raums für den Sensor abgetragen worden, wodurch sie erheblich geschwächt wurde. Der Temperatursensor durchschlug die dünne Seitenwand und zerriss während der Rotordrehung die Isolation an der Wicklung, wodurch der Kurzschluss entstand.

Fehlersuche an einer E-Maschine

Zur Überprüfung der geforderten Spezifikationen (Drehzahl und Drehmoment) werden die E-Maschinen nach der Fertigung auf einem Abnahmeprüfstand getestet. Bei der hier untersuchten E-Maschine wurde die Dauerkennlinie nicht erreicht, da die Leistungselektronik aufgrund von Temperaturproblemen innerhalb der E-Maschine in die Leistungsbegrenzung (Derating) ging. Die Suche des Fehlers erfolgte systematisch, d.h. an der E-Maschine wurden zunächst die Wicklungswiderstände und die Temperatursensoren vermessen. Anschließend wurden die Messprotokolle der verwendeten Komponenten überprüft, woraus sich jedoch kein Fehler ableiten ließ. Auch die Kontrolle der Fertigungsparameter sowie des Prüfstandsaufbaus brachten keinen Erfolg. Erst der Einsatz einer Wärmebildkamera konnte den Fehler ermitteln (Abbildung 40).

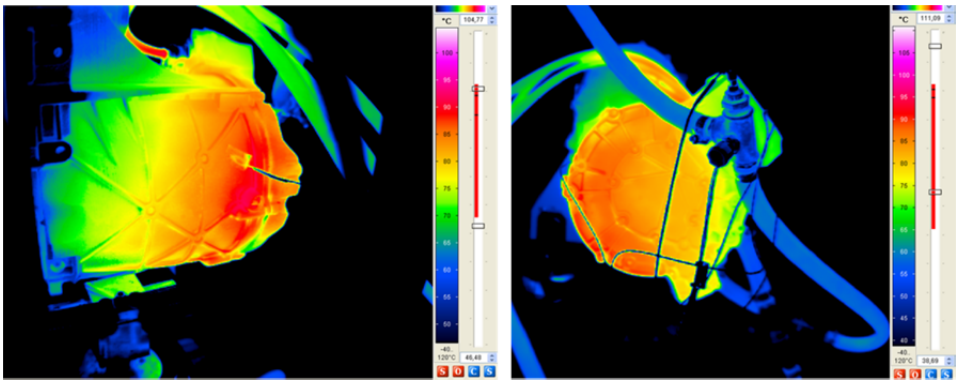


Abbildung 40: Wärmebilder E-Maschine

Die Wärmebilder zeigten eine ungleiche Temperaturverteilung der E-Maschine, was auf einen Fehler im Kühlsystem schließen lässt, da das Wärmebild relativ homogen aussehen sollte. Bei Kontrolle der Kühlmitteleintrittstemperatur und der Durchflussmenge konnten keine Auffälligkeiten entdeckt werden. Allerdings wies die Kühlmittelaustrittstemperatur gemäß den Wärmebildaufnahmen eine deutlich zu niedrige Temperatur auf, was auf einen Defekt des Kühlmantels hinwies. Nach Demontage des Kühlmantels wurde festgestellt, dass die Kühlstruktur einen Fertigungsfehler hatte, sodass ein Teil der E-Maschine nicht gekühlt wurde und diese darauf hin zu warm wurde.

6.3.3 Thermische Auswertung EOL

Standardmäßig sind die betrachteten Maschinen mit zwei Temperatursensoren am Wickelkopf, einer der thermisch kritischsten Stellen in der E-Maschine, ausgestattet. Neben der ursprünglichen Funktion, der Erkennung einer Übertemperatur, erlaubt die Auswertung der Sensorsignale folgende Diagnosen:

- Detektion von Sensorfehler durch Vergleich und Arbitrierung
- Detektion von Sensorfehler über das dynamische Verhalten
- Detektion von Abweichungen im End of Line (EOL) Test
- Beschleunigte Diagnose im EOL, Verkürzung der Prozess-Messzeiten

6.3.3.1 Detektion Sensorfehler durch Vergleich und Arbitrierung

Die einfachste Detektion von Sensorfehlern war der Vergleich der Signale beider Temperatursensoren. Zu diesem Zweck wurden die Daten von 50 im erweiterten EOL-Test gemessenen E-Maschinen analysiert, um die Abweichung der Sensorsignale zu bestimmen und daraus eine statistische Verteilung zu ermitteln. Mit Hilfe der Verteilung konnte so eine Abweichung bestimmt werden, welche signifikant für einen Fehler war. Die Verteilung der Signaldifferenz im S1-Test zeigt Abbildung 41 und die Standardabweichung über der gemessenen Temperatur (Mittelwert) wird in Abbildung 42 dargestellt. Damit ergibt sich für die Detektion eines Sensorfehlers im einfachsten Fall eine Schwelle für das Differenzsignal von z. B. +/-3σ(T) (also maximal +/-6°K).

Darüber hinaus lassen sich für eine noch genauere Analyse die individuellen, im EOL erfassten Daten nutzen.

Durch Signal- und Korrelationsanalyse konnte ferner abgeleitet werden, dass die betrachteten Abweichungen nicht durch Rauschen oder streuende Sensoreigenschaften verursacht werden, sondern durch die unterschiedliche räumliche Positionierung der Sensoren. Damit ist eine hohe Wiederholbarkeit gegeben, so dass für die oben diskutierte Abweichung von +/-3σ andere Querempfindlichkeiten als Ursachen ausgeschlossen werden können.

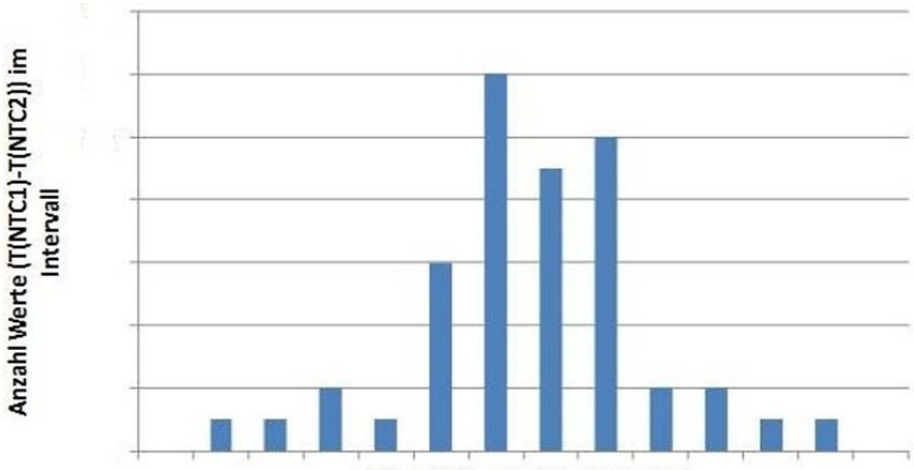


Abbildung 41: Verteilung Differenz der Sensorsignale, S1 Test, 1700s

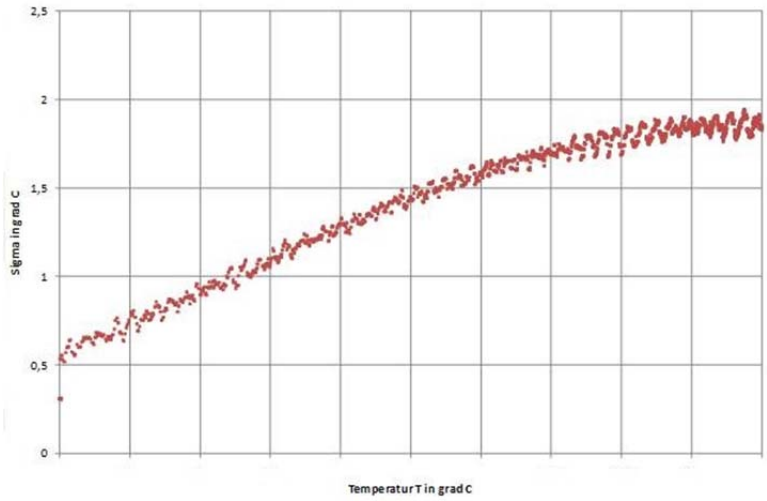


Abbildung 42: Standardabweichung der Differenz der Sensorsignale über Temperatur

6.3.3.2 Dynamisches Verhalten

Durch die Analyse der 50 Temperaturzeitkurven des S1-Tests konnte gezeigt werden, dass diese exzellent mit einem Netz von nur zwei Wärmekapazitäten und zwei Wärmeleitwerten beschrieben werden können (Abbildung 43). Damit ergaben sich für jede Maschine zwei charakteristische Zeitkonstanten und zwei Temperaturamplituden. Diese erlauben folgende Diagnosen:

- Detektion von Sensorfehlern: Die maximale zeitliche Änderung der Temperatur ist physikalisch begrenzt und hängt vom Arbeitspunkt der Maschine und der aktuellen Temperatur ab. Eine schnellere Änderung ist damit eindeutig ein Fehler. Zeigt nur einer der beiden Sensoren dieses Verhalten, ist von einem Sensorfehler auszugehen, zeigen es beide, so handelt es sich um ein thermisches Problem der Maschine.
- Detektion von thermischen Veränderungen der Maschine durch Vergleich der erneut gemessenen Zeitkonstanten und Wärmeleitwerte (Werkstatt) mit den ursprünglichen EOL Werten.

Rückschlüsse auf die Stabilität des Fertigungsprozesses

Hochinteressant, aber aus Zeitgründen noch nicht untersucht, ist die Möglichkeit, das Modell für die Erkennung einer virtuellen Verlustleistung zu nutzen und diese in Relation zur bekannten elektrischen Leistung zu betrachten.

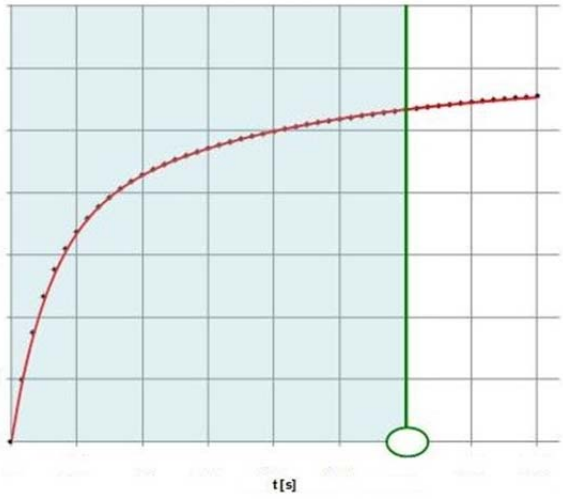


Abbildung 43: Wickelkopftemperatur über Zeit bei max. Belastung, Fit Model (siehe Text)

6.3.3.3 Beschleunigte Diagnose

Für den EOL S1-Test war es wichtig, den thermischen Worst-Case zu erfassen, d.h. die nach langer maximaler Belastung zu erwartende Wickelkopftemperatur. Da dies in endlicher Zeit sicher zu erfolgen hat, war eine entsprechende robuste Prognose notwendig.

Das unter 6.3.3.2 vorgestellte Modell erwies sich dafür zunächst als nicht geeignet, jedoch konnte durch eine erweiterte Variante, in welcher a-priori-Wissen aus den bisherigen Messungen und eine empirische Korrelation genutzt wurde, eine sehr robuste Prognose durchgeführt werden. Abbildung 44 zeigt wieder die gemessene Temperatur über der Zeit. Die durchgezogene Linie stellt die Prognose dar, die nur auf den Daten der ersten Minuten Messzeit beruht. Die Messwerte zum Ende der Messung ließen sich mit einer Standardabweichung von 0,5 K voraussagen und erlaubten hierdurch eine Reduzierung der Prüfdauer.

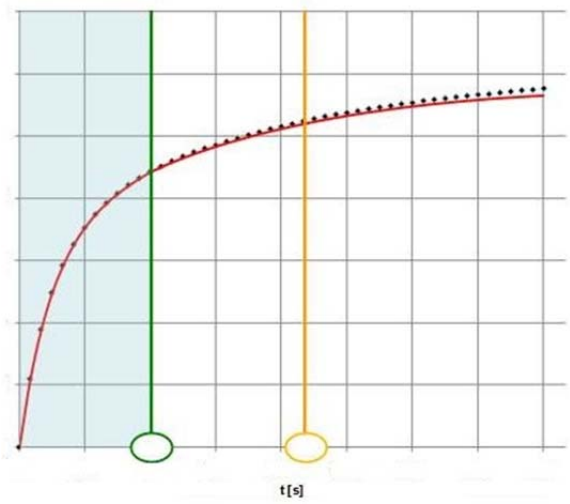


Abbildung 44: Prognose der Wickelkopftemperatur nach kurzer Messzeit

6.4 Evaluieren von Gestaltungslösungen

Evaluation ist ein integraler Bestandteil der menschzentrierten Gestaltung, um Gestaltungslösungen mit typischen Nutzern als auch Experten zu bewerten und zu optimieren [27]. Solch eine Bewertung erlaubt das Testen vorläufiger Gestaltungslösungen in realistischen Szenarien, um diese basierend auf Rückmeldungen von Nutzern zu verbessern [22]. Evaluationen können in jedem Stadium der Produktentwicklung vorgenommen werden, am besten wird früh im Entwicklungsprozess begonnen und kontinuierlich weiter getestet.

6.4.1 Empirische Evaluation

Eine empirische Evaluation ist ideal, um reale Benutzungsprobleme durch „echte“ Nutzer aufzudecken und eventuelle Akzeptanzprobleme zu ermitteln [30]. Im Projekt PräDEM wurden hierfür 15 leitfadengesteuerte individuelle User Experience Tests von je einer Stunde Dauer durchgeführt, um die User Experience der Gestaltungslösungen während der Interaktion zu messen. User Experience (UX) ist nach ISO-Norm definiert als „Wahrnehmungen und Reaktionen einer Person, die aus der tatsächlichen und/oder der erwarteten Benutzung eines Produkts, eines Systems oder einer Dienstleistung resultieren.“ [22]. Die Evaluation zielte auf die Identifizierung und Messung der Einflussfaktoren von User Experience im gegebenen Kontext, um Stärken und Schwächen der Prototypen zu erkennen, die Befriedigung von Nutzerbedürfnissen zu erheben und anschließend Indikatoren für die Produktoptimierung abzuleiten. Hierfür wurde ein übergeordnetes User Experience Modell adaptiert und im Kontext der prädiktiven Diagnose operationalisiert (Abbildung 45).

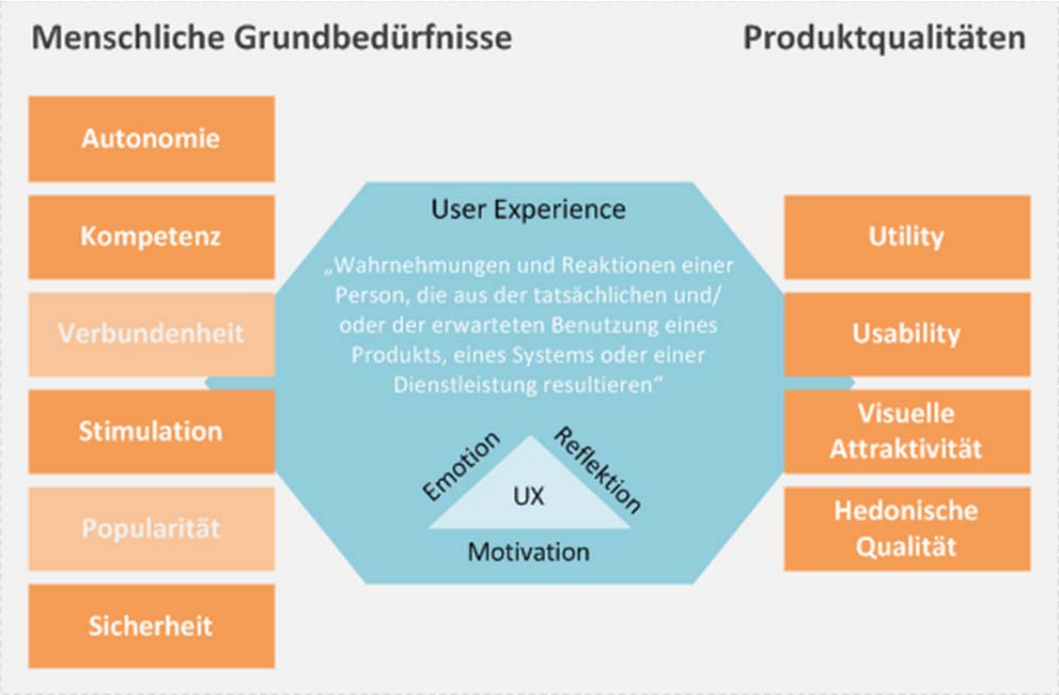


Abbildung 45: Einflussfaktoren von User Experience für die prädiktive Diagnose in Elektrofahrzeugen [11, 31]

Testumgebung war die flexible audiovisuelle Stereo-Projektionseinrichtung (FASP) des Kompetenzzentrums Virtuelle Realität der TU Ilmenau[5]. Die Probanden, die der eingangs definierten primären Persona „Daniela" entsprachen, nahmen Platz in einer flexiblen und individuell verstellbaren Sitzkiste zur Fahrt durch eine virtuelle Szene (Abbildung 46). Ein zusätzlich montierter 7-Zoll Touchscreen-Monitor wurde für die visuelle und akustische Anzeige der prototypischen Gestaltungslösungen verwendet. Den Probanden wurde ein Szenario im Sinne der vorab definierten Umgebung vorgegeben, damit sie sich besser in die reale Situation versetzen konnten. Eine Vorbefragung diente der Erhebung von Erwartungen und Bedürfnissen an die prädiktive Diagnose. Während der Fahrt wurden die prototypischen Diagnosemeldungen eingestreut, auf die die Probanden natürlich und spontan reagieren sollten. Die Reaktionen wurden von der Testleitung aufgenommen und die Probanden zusätzlich zu ihrer Handlung befragt. Ein abschließender Fragebogen mit Interview erhob die Befriedigung der eingangs abgesteckten Erwartungen und Bedürfnisse.

[5] http://www.tu-ilmenau.de/kvr/

Abbildung 46: User Experience Testaufbau

Nach Ablauf der Tests lag umfangreiches Datenmaterial zur Erfassung, Verdichtung und Analyse vor. Quantitative Daten wurden kategorisiert, zusammengefasst und visualisiert. Qualitative Daten wurden interpretiert, kategorisiert, ausgezählt und über alle Probanden verdichtet. Die Analyse der Daten brachte Stärken und Schwächen der Prototypen sowie Aussagen über die tatsächliche Bedürfnisbefriedigung hervor. Für die insgesamt 14 identifizierten Schwachstellen wurden Optimierungsempfehlungen abgeleitet und nach ihrer Schwere gewichtet, um die Reihenfolge ihrer Behebung priorisieren zu können (Tabelle 10). Die Gewichtung erfolgte mittels einer dreistufigen Skala, die User Experience Probleme von hoher, mittlerer und geringer Priorität nach {Nielsen 1993 #93} ausweist. Die generierten Optimierungsempfehlungen flossen in die nächste Iterationsstufe des Entwurfs von Gestaltungslösungen ein.

Schwachstelle	UX-Faktoren	Empfehlung	Priorität
Konkrete Meldungsursache teilweise unklar	Usability, Stimulation, Kompetenz	Anbieten von Zusatzinformationen zur konkreten Fehlerursache	3
Hohe mentale Beanspruchung	Usability, Sicherheit	Anordnung der Meldungsinhalte aufgabenangemessen gestalten, z. B. Handlungsempfehlungen an erster Stelle platzieren	3

Tabelle 10: Beispielhafte Empfehlungen zur Verbesserung der User Experience

6.4.2 Analytische Evaluation

Bei der analytischen Evaluation kommen Experten zum Einsatz, die eine Mensch-Maschine-Schnittstelle anhand definierter Kriterien auf deren Einhaltung hin überprüfen. Die Experten

schlüpfen dabei in die Rolle echter Nutzer, mit dem Vorteil, dass sie ihre Erfahrungen und ihr Wissen in die Evaluation einbringen können. [32]

Im Projekt PräDEM wurde hierfür eine heuristische Evaluation durchgeführt, bei der eine Gruppe von Experten anhand definierter Usability-Prinzipien, den sogenannten Heuristiken, die Mensch-Maschine-Schnittstelle der prädiktiven Diagnose begutachteten und bewerteten. Als Heuristiken kamen die Produktqualitäten bzw. deren Operationalisierungen, die im Rahmen der empirischen Evaluation identifiziert wurden, zum Einsatz. Vier Experten aus den Domänen Interface-Design und Usability dokumentierten Verstöße zunächst in selbständiger Einzelarbeit. Alle aufgedeckten Verstöße wurden anschließend zusammengetragen, verdichtet und in einer abschließenden Gruppensitzung nach ihrer Schwere gewichtet sowie Lösungsvorschläge erarbeitet (Tabelle 11). Am Ende verblieben 27 Verstöße, deren generierte Optimierungsempfehlungen in die nächste Iterationsstufe einflossen.

Fundort	Beschreibung	Auswirkung	Heuristik	Schwere-grad	Empfehlung
C3: SOS-Information	Es steht auf dieser Seite nicht der Anrufpartner zur Telefonnummer. Daniela weiß nicht, dass es die Nummer der VW-Service-Zentrale ist.	Daniela ist überrascht, weil sie den ADAC erwartet hätte.	Voll-ständigkeit	4	Kontaktpartner angeben, z. B. "VW-Notruf-Zentrale" oder "VW Service Zentrale", ggf. "VW Service" in erste Zeile integrieren
A1, A2: Überschrift	Die Überschrift „Information“ ist zu allgemein gehalten.	keine Auswirkung	Selbster-klärungs-fähigkeit	2	konkreter formulieren, z. B. "Überprüfung"

Tabelle 11: Beispiele aufgedeckter Verstöße gegen Heuristiken

7 Zusammenfassung

Der Zuverlässigkeit elektrischer Maschinen kommt beim Einsatz im Fahrzeug eine entscheidende Bedeutung zu. Eine unerwartet verminderte Leistungsfähigkeit bis hin zu einem völligen Ausfall in sicherheitskritischen Fahrsituationen ist mit erheblichen Unfallrisiken verbunden. Neben einer hohen Qualität der elektrischen Maschine ergibt sich damit die Notwendigkeit, durch eine prädiktive Diagnose ihrer Funktion kritische Fahrsituationen zu vermeiden und dafür zu sorgen, dass rechtzeitige Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

Das Verbundprojekt PräDEM wurde mit einer frühen Studien- und Analysephase eingeleitet, während dieser wurden mit Hilfe von Literaturrecherche, Fehlerbaumanalyse und FMEA mögliche Fehlerarten, deren Entstehungsmechanismen, Schwere und Diagnosemöglichkeiten systematisch katalogisiert. Anschließend konnten zur Diagnose elektrischer Maschinen Analysemethoden und Messverfahren entwickelt und erprobt werden. Sie dienen sowohl im EOL-Test als auch im Echtzeitbetrieb für die Onboard-Diagnose. Unterschiedliche potentielle Fehler wurden analysiert und in Versuchsaggregate injiziert. Darauf basierend wurden Diagnosealgorithmen zu deren Erkennung abgeleitet und erfolgreich auf dem Prüfstand und im Fahrzeug validiert.

Das Spektrum der dabei untersuchten Fehler reicht vom Windungsschluss über unzureichende Kühlung bis hin zu Lagerschäden. Dazu wurden abhängig von der Fehlerart Fehlermodelle erstellt, Messmethoden angepasst, Sensoren appliziert und neue Algorithmen entwickelt. Die Arbeiten konnten bis zum Prototypenstadium vorangetrieben werden, ohne dabei die Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Nutzer außer Acht zu lassen.

Das Ziel einer ergonomisch hochwertigen Mensch-Maschine-Schnittstelle, die den Bedürfnissen und Anforderungen der eingangs identifizierten Rollen entspricht, wurde durch die frühzeitige Einbeziehung potentieller Nutzer der prädiktiven Diagnose in den Entwicklungsprozess erreicht. Auf Basis einer detaillierten Nutzungskontextanalyse konnten Nutzungsanforderungen festgelegt und Gestaltungslösungen erarbeitet werden. Die Evaluation der Gestaltungslösungen brachte wesentliche Optimierungsempfehlungen zu Tage, die in die weitere Produktentwicklung einflossen und somit einen wertvollen Beitrag zur Erreichung des Projektziels leisteten.

8 Literaturverzeichnis

[1] Abel, H.-B.; Blume, H.-J.; 2007. Cockpit-Instrumentierung. In *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, H.-H. Braess & U. Seiffert, Eds. ATZ/MTZ-Fachbuch. Vieweg, Wiesbaden, 682 - 685.

[2] ADAC e.V.; 2010. *Sind eine Million Elektroautos bis 2020 realistisch?* http://www.adac.de/infotestrat/adac-im-einsatz/motorwelt/e-mobilitaet.aspx?ComponentId=32253&SourcePageId=5928. Accessed 3 February 2011.

[3] Arnowitz, J., Arent, M., Berger, N.; 2007. *Effective prototyping for software makers*. The Morgan Kaufmann series in interactive technologies. Morgan Kaufmann / Elsevier, Amsterdam.

[4] Bubb, H.; 2003. Fahrerassistenz primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit? In *Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Anforderungen, Anwendungen, Aspekte für Mensch-Maschine-Systeme; Tagung Braunschweig, 2. und 3. Juni 2003*. VDI-Berichte 1768. VDI-Verlag, Düsseldorf, 25 - 44.

[5] Cooper, A., Reimann, R., Cronin, D.; 2007. *About face 3. The essentials of interaction design*. Wiley, Indianapolis, Ind.

[6] Courage, C., Redish, J., Wixon, D.; 2008. Task Analysis. In *The human-computer interaction handbook Fundamentals, evolving technologies, and emerging applications*, A. Sears & J. A. Jacko, Eds. Human factors & ergonomics. Erlbaum, New York, 927 - 947.

[7] Donges, E.; 2009. Fahrerverhaltensmodelle. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort; mit 45 Tabellen*, H. Winner, S. Hakuli & G. Wolf, Eds. PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch. Vieweg + Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 15 - 23.

[8] Eck, F.; Stark, S.; 2009. *Kostenentwicklung und Klimaschutz - Die (all)tägliche Mobilität des Bürgers. Eine Repräsentativbefragung von infas im Auftrag des Deutschen Verkehrsforums*. http://www.verkehrsforum.de/fileadmin/dvf/pdf_downloads/reden/Studien/Umfragen/Thesen_und_Auswertung_Infas_Mobilitaet_und_Klimaschutz_endgueltig.pdf.Accessed 7 October 2010.

[9] ESoP.; 2006. *Commission Recommendation of 22 December 2006 on safe and efficient in-vehicle information and communication systems: Update of the European Statement of Principles on human machine interface*. http://www.esafetysupport.org/download/working_groups/hmi_esop221206_en.pdf. Accessed 30 June 2011.

[10] Falke, S.; Krömker, H.; 2011. Predictive diagnosis of electric motors in automotive drives (PräDEM) - A user-centered design approach. In *Innovation in Mechanical Engineering - Shaping*

the Future: Proceedings of 56. International Scientific Colloquium (IWK 2011), Ilmenau, 12.-16. September 2011.

[11] Falke, S.; Schulze, K.; Krömker, H.; 2011. Designing for User Experience in Automotive Warning Systems. In *Proceedings of the International Workshop on User Experience in Cars at 13th IFIP TC13 Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT 2011), Lissabon, 05.-09. September 2011*, 41 - 44.

[12] Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO); 2010. *Strukturstudie BWe mobil*. *Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität*. http://www.iao.fraunhofer.de/images/studien/strukturstudie-bwe-mobil.pdf. Accessed 8 September 2010.

[13] Green, P., Levison, W., Paelke, G., Serafin, C.; 1993. *Suggested Human Factors Design Guidelines for Driver Information Systems*. Technical Report UMTRI-93-21. http://www.umich.edu/~driving/guidelines/UMTRI_Guidelines.pdf. Accessed 21 February 2011.

[14] ISO; 2002. *Straßenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen - Grundsätze und Prüfverfahren des Dialogmanagements*. Beuth Verlag, Berlin, 15005.

[15] ISO; 2004. *Road vehicles - Symbols for controls, indicators and tell-tales*. ISO, Geneva, 2575.

[16] ISO; 2004. *Road vehicles - Ergonomic aspects of transport information and control systems (TICS) - Procedures for determining priority of on-board messages presented to drivers,* 16951.

[17] ISO; 2005. *Road vehicles - Ergonomic aspects of in-vehicle presentation for transport information and control systems - Warning systems*. ISO, 16352.

[18] ISO; 2006. *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*. Beuth Verlag, Berlin, 9241 - 110.

[19] ISO; 2007. *Straßenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen - Anforderungen und Konformitätsverfahren für die Ausgabe auditiver Informationen im Fahrzeug*. Beuth Verlag, Berlin, 15006.

[20] ISO; 2008. *Graphische Symbole auf Einrichtungen - Index und Übersicht*. Beuth Verlag, Berlin, 7000.

[21] ISO; 2009. *Straßenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen - Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug*. Beuth Verlag, Berlin, 15008.

[22] ISO; 2011. *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2010)*. Beuth Verlag, Berlin, 9241 - 210.

[23] Knoll, P.; 2009. Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme. In *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. *Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort; mit 45 Tabellen*, H.

Winner, S. Hakuli & G. Wolf, Eds. PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch. Vieweg + Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 330 - 342.

[24] Mobil in Deutschland e.V.; 2010. *Große Verkehrsumfrage 2010*. Online-Befragung zu Themen aus dem Bereich Verkehr und Mobilität, 26 Fragen, 2019 Teilnehmer. http://www.mobil.org/_umfragen/grosse_verkehrsumfrage_2010. Accessed 3 February 2011.

[25] Nielsen, J.; 1993. *Usability engineering*. Academic Press, Boston.

[26] PricewaterhouseCoopers AG. 2010. *Elektromobilität*. *Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand*. Befragung von 503 potenziellen Nutzern von Elektrofahrzeugen (aktive Autofahrer im Alter zwischen 18 und 70 Jahren). http://www.iao.fraunhofer.de/images/downloads/elektromobilitaet.pdf. Accessed 8 September 2010.

[27] Richter, M.; Flückiger, M. D.; 2010. *Usability Engineering kompakt*. *Benutzbare Software gezielt entwickeln*. IT kompakt. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Neckar.

[28] Röse, K.; 2003. Task-Analyse. In *Usability praktisch umsetzen*. *Handbuch für Software, Web, Mobile Devices und andere interaktive Produkte ; [Website mit Linklisten und nützlichen Ergänzungen]*, S. Heinsenand P. Vogt, Eds. Hanser, München, 97-114.

[29] Rupp, C.; 2007. *Requirements-Engineering und -Management*. *Professionelle, iterative Anforderungsanalyse für die Praxis*. Hanser, München.

[30] Sarodnick, F.; Brau, H.; 2006. *Methoden der Usability Evaluation*. *Wissenschaftliche Grundlagen und praktische Anwendung*. Huber. Huber, Bern.

[31] Schulze, K.; Krömker, H.; 2010. A framework to measure user experience of interactive online products. In *Proceedings of the 7th International Conference on Methods and Techniques in Behavioral Research.(digital edition) ; Measuring Behavior '10, Eindhoven, Netherlands, August 24 - 27, 2010*, E. Barakova, B. de Ruyter & A. Spink, Eds. ACM; ACM Digital Library, New York, NY, New York, NY, 261 - 264.

[32] Schweibenz, W.; Thissen, F.; 2003. *Qualität im Web*. *Benutzerfreundliche Webseiten durch Usability Evaluation*. X.media.press. Springer, Berlin.

[33] Technische Universität Chemnitz.; 2010. *Elektroautos bestehen Großstadt-Test*. http://www.tu-chemnitz.de/tu/presse/2010/02.15-10.12.html. Accessed 3 February 2011.

[34] TECHNOMAR GMBH; 2010. *Wie gut sind Autohandel und Werkstätten auf E-Mobilität vorbereitet? Umfrage unter Autohäusern und Werkstätten in Deutschland zur AMI 2010*. http://www.tuev-sued.de/uploads/images/12707912590136464801 18/4_TUV_SUD_AMI2010_Auswertung%20E-Auto-Werkstaettenenumfrage%202010.pdf. Accessed 24 August 2010.

[35] Timpe, K.-P.; 2001. Fahrzeugführung: Anmerkungen zum Thema. In *Kraftfahrzeugführung*. *[Gedenkband für Prof. Dr. Hans-Peter Willumeit]*, T. Jürgensohn, K.-P. Timpe & H.-P. Willumeit, Eds. Springer, Berlin, 9 - 27. 2001

[36] TÜV Rheinland AG; 2010. *TÜV Rheinland startet Langzeittest mit Elektroauto*. http://www.tuv.com/de/deutschland/ueber_uns/presse/meldungen/newspdfde_10462.jsp. Accessed 3 February 2011.

[37] TÜV Rheinland AG; 2010. *TÜV Rheinland-Studie: Deutsche warten auf Elektro-Golf - Breite Akzeptanz für Elektroautos in Deutschland*. http://www.tuv.com/de/deutschland/ueber_uns/presse/meldungen/newspdfde_20424.jsp. Accessed 3 February 2011.

[38] Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE); 2010. *Getankt wird zu Hause - 64 Prozent der Bundesbürger wollen Elektroauto kaufen*. http://www.vde.de/de/Verband/Pressecenter/Pressemeldungen/Fach-und-Wirtschaftspresse/Documents/2010/10-74_E-Mobility_Verbraucher.pdf. Accessed 3 February 2011.

[39] Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE); 2010. *VDE-Studie sieht für Elektroautos noch Hürden bis zum Massenmarkt*. http://www.vde.com/de/fg/ETG/Arbeitsgebiete/Q6/Documents/VDE-Studie-Presse-lang.pdf. Accessed 3 February 2011.

[40] Draeger, F.; Brabetz, L.; Flach, A.; Huppert, M.; 2011. *PräDEM - Prädiktive Diagnose von elektrischen Maschinen in Fahrzeugantrieben*. Braunschweiger Symposium: Hybrid- und Elektroautos, Feb. 2011

[41] Flach, A.; Draeger, F. Ayeb, M.; Brabetz, L.; 2011. „A New Approach to Diagnostics for Permanent-Magnet Motors in Automotive Powertrain Systems", 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives, September 5-8, 2011