Ausfallsicheres und effizientes elektrisches **An**triebssystem für **Ro**botertax**i**s

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

# Partnerspezifischer Schlussbericht Georgii Kobold

| | |
|---|---|
| Verbundprojekt | AnRox – Ausfallsicheres und effizientes elektrisches Antriebssystem für Robotertaxis – Teilvorhaben: Intelligente ausfallsichere Antriebe |
| Förderkennzeichen | 19A21004E |
| Projektlaufzeit | 01.04.2021 – 30.06.2024 |
| Datum | 25.03.2024 |
| Projekt Partner | Robert Bosch GmbH *(Konsortialleitung)*<br>Mercedes-Benz AG *(assoziierter Partner)*<br>Kromberg & Schubert Automotive GmbH & Co.KG<br>Siemens AG<br>Infineon Technologies AG<br>Georgii Kobold GmbH & Co. KG (KMU)<br>AixControl GmbH (KMU)<br>OPVengineering GmbH (KMU)<br>EDI GmbH (KMU)<br>Finepower GmbH (KMU)<br>smartCable GmbH (KMU)<br>IPG Automotive GmbH (*assoziierter Partner*)<br>Fraunhofer IISB<br>Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen<br>Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen<br>FG System- und Software-Engineering, TU Ilmenau<br>Thüringer Innovationszentrum Mobilität, TU Ilmenau |

## Aufgabenstellung

Das Verbundprojekt *„**Ausfallsicheres und effizientes elektrisches Antriebssystem für Robotertaxis (AnRox)**“* hatte zum Ziel die Erforschung und Validierung von ganzheitlich optimierten System- und Komponentenlösungen für ausfallsichere Antriebssysteme und Energiebordnetze für das automatisierte elektrische Fahren. Dabei sollten Mehrkosten für ausfallsichere Antriebssysteme und Energiebordnetze minimiert und/oder durch einen nachweisbaren Mehrwert für Endnutzer oder Betreiber kompensiert werden. Die im Rahmen des Projekts entwickelten Methoden, Simulationstools und Lösungen fokussierten auf den Anwendungsfall eines Robotertaxis, sind jedoch generell auf alle elektrisch angetriebenen Fahrzeuge übertragbar. Eine Übersicht über die grundsätzliche Vorgehensweise, adressierte Analyse der Anforderungen aus Betreiber und Nutzersicht sowie die technischen Themenfelder gibt Abbildung 1.

*Abbildung 1: Vorgehen und Lösungsweg im Förderprojekt AnRox*

Aus Anwender- und Betreibersicht ergeben sich neue Anforderungen an zukünftige (teil-)automatisierte Fahrzeuge. Diese umfassen beispielweise veränderte Fahrprofile und Komfortanforderungen. Der Transport gehbehinderter Verkehrsteilnehmer (siehe US-amerikanische ADA-Gesetzgebung) kann zu neuen Einbaubedingungen führen. Weiterhin steigen mit zunehmendem Automatisierungsgrad die Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanforderungen an den Antriebsstrang, von der Performanceprädiktion für kurzfristig anstehende Fahrmanöver bis hin zum zuverlässigen Abschluss der Fahrmission. Daraus ergeben sich erhöhte Effizienz-, Verfügbarkeits- und Lebensdaueranforderungen an das ausfallsichere Antriebssystem und das Energiebordnetz, deren iterative Analyse und entsprechende Ableitung der belastbaren Arbeitshypothesen, unter anderem basierend auf Nutzerbefragungen, für die Erforschung der technischen Lösungen einen wichtigen Teil des Verbundprojekts darstellte.

Hinsichtlich der technischen Umsetzung bieten elektrische Antriebssysteme gegenüber Verbrennungsmotoren neue Freiheitsgrade und Lösungsvarianten sowohl auf Komponenten- als auch Topologieebene. Mit KI-basierten Betriebs-, Fehlererkennungs- und Behandlungsstrategien sind die Beherrschung hochkomplexer Systeme und die maximale Ausbeutung von neuen Freiheitsgraden möglich. Prädiktive Diagnose-Ansätze in Verbindung mit der Beherrschung von verketteten Fehlern (Dependent Failures) sind wichtige Bausteine für ein aufwandsminimiertes

und ausfallsicheres Antriebssystem. Auf Antriebs- und Energiebordenetz-Topologieebene wurden verschiedene Varianten von Ein- und Mehrmaschinensystemen betrachtet und die Wechselwirkungen zu Lenkung, Bremse und Fahrwerk berücksichtigt. Die daraus resultierenden Erkenntnisse in Form vergleichender Bewertung und identifizierten Vor- und Nachteilen flossen direkt in neue Komponentenlösungen und Diagnoseansätze zur Steigerung der Betriebssicherheit ein. Abgesichert wurden die Ergebnisse anhand einer durchgängigen Validierungskette vom Komponentenprüfstand bis zum Fahrzeugdemonstrator und User Experience (UX) Studien am Fahrsimulator und Wizard-of-Oz-Fahrzeug.

Damit trägt das Verbundprojekt AnRox dazu bei, die Marktattraktivität des ausfallsicheren Antriebssystems inkl. des Energiebordnetzes sowie dessen leistungselektronischer Komponenten zu steigern und die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft für System- und Komponentenlösungen zukünftiger automatisierter Fahrzeuge zu sichern. [Quelle: partnerübergreifender Schlussbericht AnRoX]

## Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde und wissenschaftlicher technischer Stand

Das Förderprojekt AnRox adressierte den wichtigen und stark wachsenden Markt von (teil-)automatisierten Fahrzeugen mit Fokus auf intelligente zukunftsfähige Antriebslösungen und baute auf den bekannten Vorarbeiten auf. So wurde im Verbundprojekt AutoDrive bereits die Notwendigkeit von fehleroperablen Antriebssystemen für den sicheren Betrieb von (teil-)automatisierten Fahrzeugen nachgewiesen. Auch grundlegende Lösungsansätze wurden bereits in einigen Projekten adressiert, z.B. AutoDrive, 3F, ToSKa und HiBord. Die Neuheit und Schwerpunkte des vorliegenden Projektes AnRox sowie die Abgrenzung zu den Vorarbeiten werden anhand Abbildung 2 erklärt.

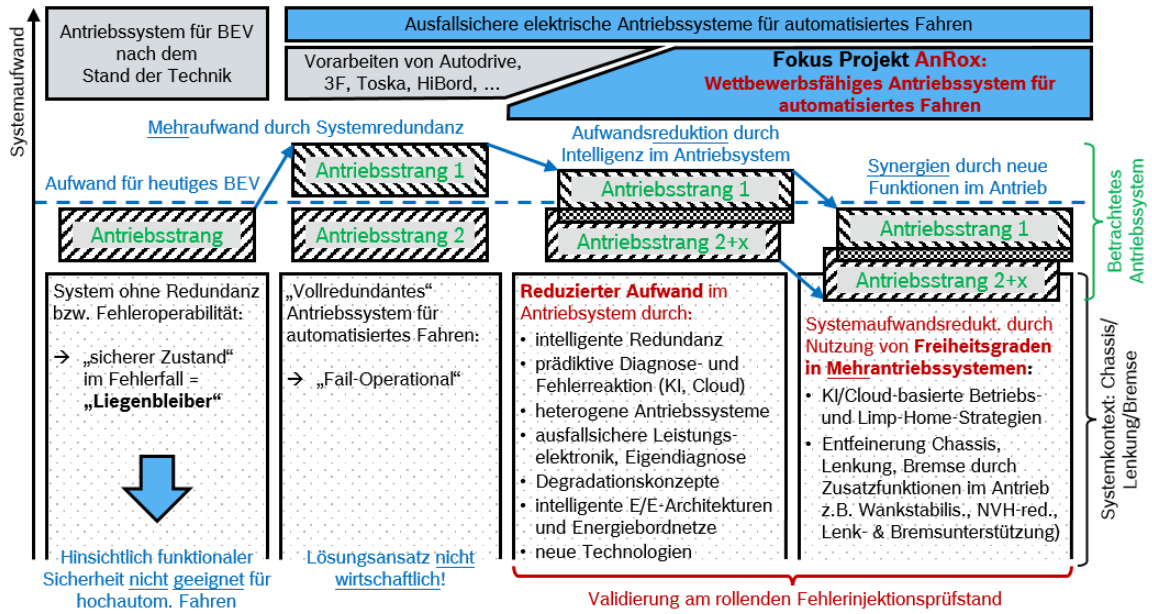



*Abbildung 2: Kern des Verbundprojektes AnRox inkl. Abgrenzung zu Vorarbeiten*

Heutige batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) verfügen über keinen fehleroperablen Antriebsstrang, sodass der Ausfall des Antriebssystems zum Liegenbleiben des Fahrzeugs im aktiven Verkehr führt. Eine Möglichkeit zur Realisierung eines ausfallsicheren elektrischen

Antriebssystems ist die Verwendung einer systemischen Redundanz, wie im z.B. im Projekt AutoDrive realisiert. Durch ein vollredundantes Antriebssystem können die erhöhten Anforderungen an die Verfügbarkeit des Fahrzeugs erfüllt werden, jedoch stehen diese Lösungen aufgrund eines deutlich erhöhten Material- und Zusatzaufwandes einem wirtschaftlichen Betrieb entgegen. Zur Minimierung von Mehrkosten für ausfallsichere Antriebssysteme und/oder zur Kompensation dieser Kosten durch einen nachweisbaren Mehrwert für Endnutzer oder Betreiber wurde in AnRox der Ansatz einer ganzheitlichen Optimierung der eng verknüpften Domänen Antriebssystem, Energiebordnetz (EBN) und Leistungselektronik unter konsequenter Einbeziehung der Wechselwirkung zu Lenkung, Bremse und Chassis verfolgt. Für den Projekterfolg war die domänenübergreifende Verzahnung der Partnerbeiträge mit einem breit gefächerten Kompetenzspektrum entscheidend.

Als Referenzarchitektur wurde eine dem Stand der Technik und Forschung entsprechende Topologie des Antriebssystems mit einem Zentralantrieb verwendet, wobei die Sicherheitsanforderungen des hoch- und vollautomatisierten Fahrens an die Brems- und Lenkfunktionalität durch Vollredundanz in den Teilsystemen erfüllt wurden. [Quelle: partnerübergreifender Schlussbericht AnRoX]

## Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundprojekt AnRox ist in vier Arbeitspakete gegliedert (Abbildung 3): (AP1) *Identifikation von Anforderungen an Antriebs-, Fahrwerksysteme und Energiebordnetze eines Robotertaxis*, (AP2) *Ausfallsichere und intelligente Antriebssysteme und Energiebordnetze*, (AP3) *Komponenten für ausfallsichere Antriebe und Energiebordnetze* sowie (AP4) *Validierung*. Zur Ableitung der Anforderungen an das Antriebs- und Fahrwerksystem sowie das Energiebordnetz eines Robotertaxis im AP1 wurden im ersten Schritt repräsentative Nutzungsprofile und Einsatzbereiche erforscht und identifiziert und damit der Anwendungsfall konkretisiert. Dabei wurden neben der Berücksichtigung des fehlerfreien Betriebs insbesondere auch die Anforderungen an den Fahrzeugbetrieb im Fehlerfall unter Berücksichtigung der Nutzerakzeptanz und der funktionalen Sicherheit abgeleitet. Die Ergebnisse wurden in Hinblick auf die Leistungs-, Verfügbarkeits- und Sicherheitsanforderungen in Form von gewichteten Kriterien (Anforderungen) für die Cluster „Antriebssysteme und Bordnetze“ sowie „Antriebs- und Bordnetzkomponenten“ zur Verfügung gestellt und in mehreren Iterationen über die Projektlaufzeit mit neuen Erkenntnissen aus dem Projekt verfeinert und nachgeschärft.

Zur Erarbeitung einer ganzheitlichen Vorzugslösung für ein ausfallsicheres Antriebssystem und Energiebordnetz im AP2 wurden mittels eines morphologischen Kastens verschiedene Topologien erarbeitet und bezüglich der (1) Ausfallsicherheit, (2) Energieeffizienz, (3) Attraktivität für den Endkunden sowie (4) Wirtschaftlichkeit optimiert und quantifiziert. Bei der Ausfallsicherheit wurde im Fehlerfall die Durchführung eines Fahrmanövers zum Erreichen des sicheren Zustandes (Stillstand) gefordert. Die Definition des erforderlichen Fahrmanövers war dabei Gegenstand der im Projekt durchzuführenden Anforderungsanalyse und setzte sich zusammen aus der Definition des im Fehlerfall noch zu erreichenden Fahrziels (bspw. ein Parkplatz) und der zulässigen Degradation der Fahrdynamik und Geschwindigkeit. Zur

Energieeffizienzsteigerung wurden intelligente Betriebsstrategien unter Ausnutzung der neuen Freiheitsgrade erarbeitet und deren Leistungsfähigkeit anhand des Energieverbrauchs quantifiziert. Die Attraktivität für den Endkunden wurde zum einen über die verbesserte Ausfallsicherheit des Robotertaxis gesteigert, sodass mögliches Liegenbleiben im aktiven Verkehr vermieden wird. Zum anderen wurde durch die optimale Ausnutzung der Wechselwirkungen zwischen den Domänen Antrieb, Bremse, Lenkung und Fahrwerk auch die Fahrdynamik sowie der Fahrkomfort und Fahrruhe verbessert. Entsprechende Modelle zu deren Quantifizierung werden mittels der im Projekt durchzuführenden Studie für User Experience (UX) erstellt, parametriert und bei der Optimierung des Antriebssystems berücksichtigt.

Ausgehend von den Anforderungen an ein ausfallsicheres Antriebssystem wurden im AP3 ein fehlertoleranter elektrischer Antrieb und Komponenten für ein fehlertolerantes Energiebordnetz entworfen, realisiert und an geeigneten Komponentenprüfständen mit Fehlerinjektion validiert. Für den Antrieb wurden inhärent fehlertolerante Topologien für die E-Maschine und die Leistungselektronik erarbeitet, bewertet und ausgewählt sowie ein notlauffähiges passives Thermomanagement entwickelt. Darüber hinaus wurden Condition-Monitoring-Verfahren für E-Antriebe erarbeitet. Zur Validierung der Fehlererkennung und -behandlung wurden modifizierten Prototypenmaschinen und Umrichtern am Prüfstand zur Laufzeit Fehler injiziert, um deren Wirksamkeit und Effektivität zu validieren. Für das Energiebordnetz wurde eine fehlertolerante Architektur mit den zugehörigen intelligenten Energieverteilknoten realisiert, die Fehler im Energiebordnetz erkennen und mittels Rekonfiguration der Energieflüsse im HV und NV Energiebordnetz behandeln. Dabei wurden die Anforderungen an Robustheit, Lebensdauer, Überlastfähigkeit usw. der zugrundeliegenden Halbleiter-Schalter berücksichtigt.

Zur Validierung der im Projekt erzielten Ergebnisse wurden im AP4 Prüfstände auf Komponenten- und Teilsystemebene mit der Möglichkeit zur Fehlerinjektion aufgebaut. Zusätzlich wurde zum Nachweis der Funktionalität auf Gesamtsystemebene eine flexible Fahrzeugvalidierungsplattform verwendet. Das Ziel war dabei Potenziale im Zusammenspiel der Domänen Antrieb, Bremse, Lenkung und Fahrwerk im Normal- und Fehlerfall sowie zugehöriger Betriebsstrategie zu evaluieren. Die Durchführung der UX Studien an einem Fahrsimulator und Bewertung der im Projekt erzielten Ergebnissen im Hinblick auf Fahrkomfort und Fahrruhe sowie an einem Wizard-of-Oz-Fahrzeug zur Validierung der Limp-Home-Manöver schließen die durchgehende Validierungskette über alle Systemebenen hinweg ab.

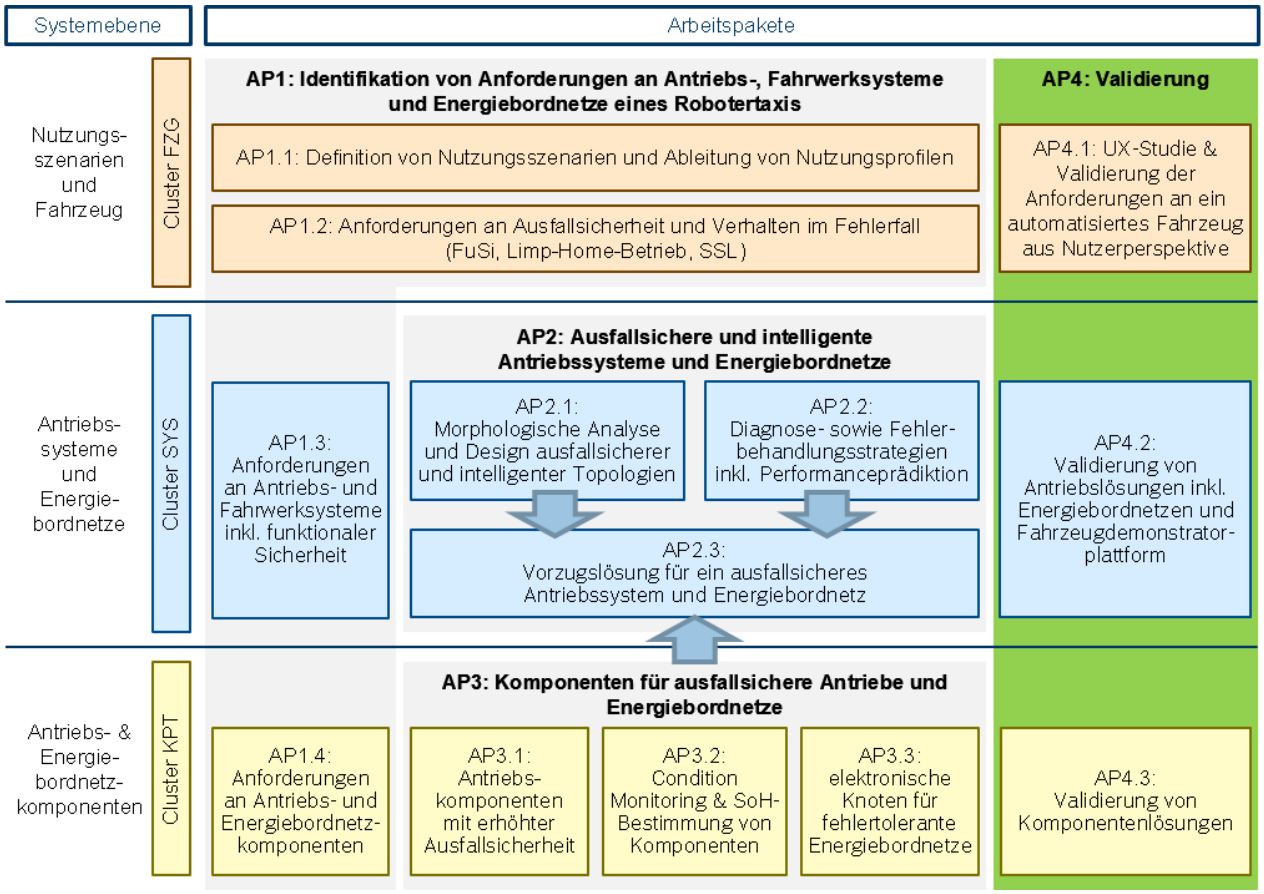



*Abbildung 3: Struktur der Arbeitspakete und Cluster*

Die Grobzeitplanung des Projektes AnRox ist in Abbildung 4 dargestellt.

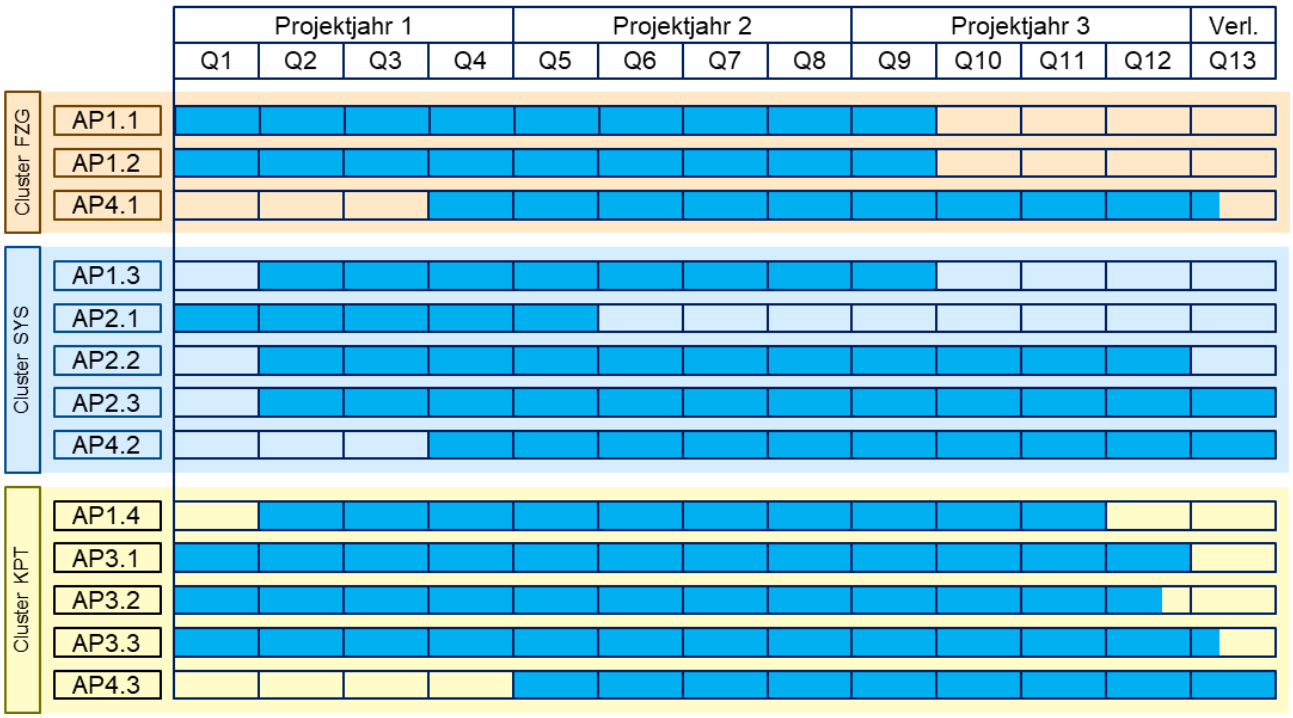



*Abbildung 4: Grobzeitplan AnRox*

Die Hauptmeilensteine des Projekts AnRox sind in der Abbildung 5 dargestellt. Um die Erkenntnisse aus dem Projekt in die Weiterentwicklung der Anforderungen auf Fahrzeugebene, System- und Komponentenebene einfließen zu lassen erfolgt bei den

Meilensteinen M1, M2 und M3 ein Split in drei Teile, bei den Meilensteinen M4 und M5 in zwei Teile.

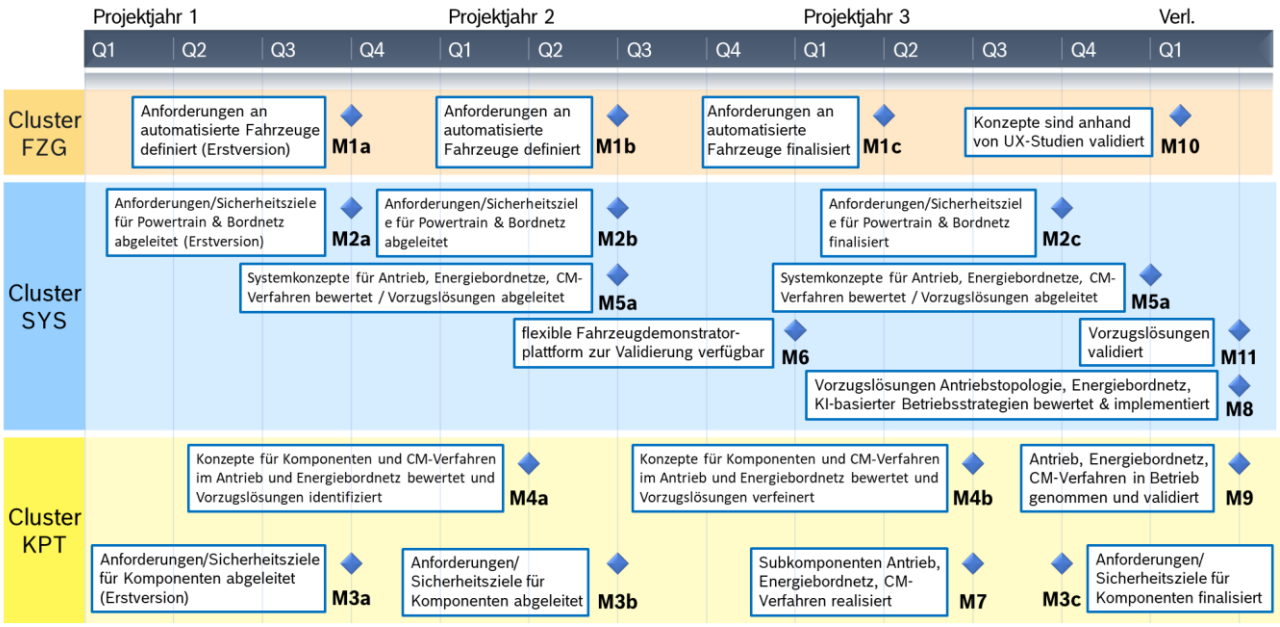



*Abbildung 5: Hauptmeilensteine im Projekt AnRox*

[Quelle: partnerübergreifender Schlussbericht AnRoX]

## Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Projektkonsortium war Georgii Kobold in vielen der Arbeitspaketen mit involviert. Durch die Herstellung der Prüflinge war Georgii Kobold Im Projektkonsortium in vielen Arbeitspaketen mit involviert. Eine enge Zusammenarbeit bestand insbesondere mit dem Fraunhofer IISB, Siemens und der RWTH Aachen im Bereich der Antriebsentwicklung.

## Darstellung der partnerspezifischen Ergebnisse

**Georgii Kobold** entwickelt, produziert und vertreibt Elektromotoren für die Automatisierungstechnik, die Lebensmitteltechnik und die Medizintechnik. Am Firmenstandort Horb am Neckar ist neben der Entwicklung von Elektromotoren die Produktion mit einer sehr hohen Fertigungstiefe. Angefangen vom Stanzen von Elektroblech, über das Aluminium Druckgießen, der Metallbearbeitung bis hin zum Wickeln der Statoren können alle Fertigungsschritte zur Herstellung eines Elektromotors in Horb am Neckar abgebildet werden. Die hohe Fertigungstiefe in Verbindung mit einer starken F&E Abteilung ermöglicht es Georgii Kobold kundenspezifische Elektromotoren & Getriebe in kurzer Zeit zu entwickeln und herzustellen.

Georgii Kobold verzeichnet in den letzten Jahren sehr starkes Wachstum in der Medizintechnik und in der Lebensmitteltechnologie. Georgii Kobold deckt den Bereich der Fertigung von Prototypen bis hin zu mittleren Serien bis zu 10.000 Stück pro Motor und Jahr ab.

*Abbildung 6: Anlage zur Lebensmittelverarbeitung. Georgii Kobold ist einer der führenden Anbieter in der Technologie der Hygienic Design Edelstahlantriebe.*

Abbildung 6 und 7 zeigen Anwendungsbeispiele für Elektromotoren bzw. Antriebstechnik von Georgii Kobold Produkten. In Abbildung 6 ist eine Anlage zur Lebensmittelverarbeitung zu erkennen. Die Anlage schneidet und portioniert z.B. Wurst oder Käse. Lebensmittelverarbeitende Anlagen werden meist aus Edelstahl gefertigt, da sie – auch mit aggressiven Chemikalien – gereinigt werden müssen. Auch die Antriebstechnik muss aus Edelstahl gefertigt werden und eine Dichtigkeit von IP96K aufweisen, da zumindest im Bereich der Lebensmittel auch die Antriebe mit aggressiven Chemikalien sowie mit Hochdruckreinigern gereinigt werden müssen.

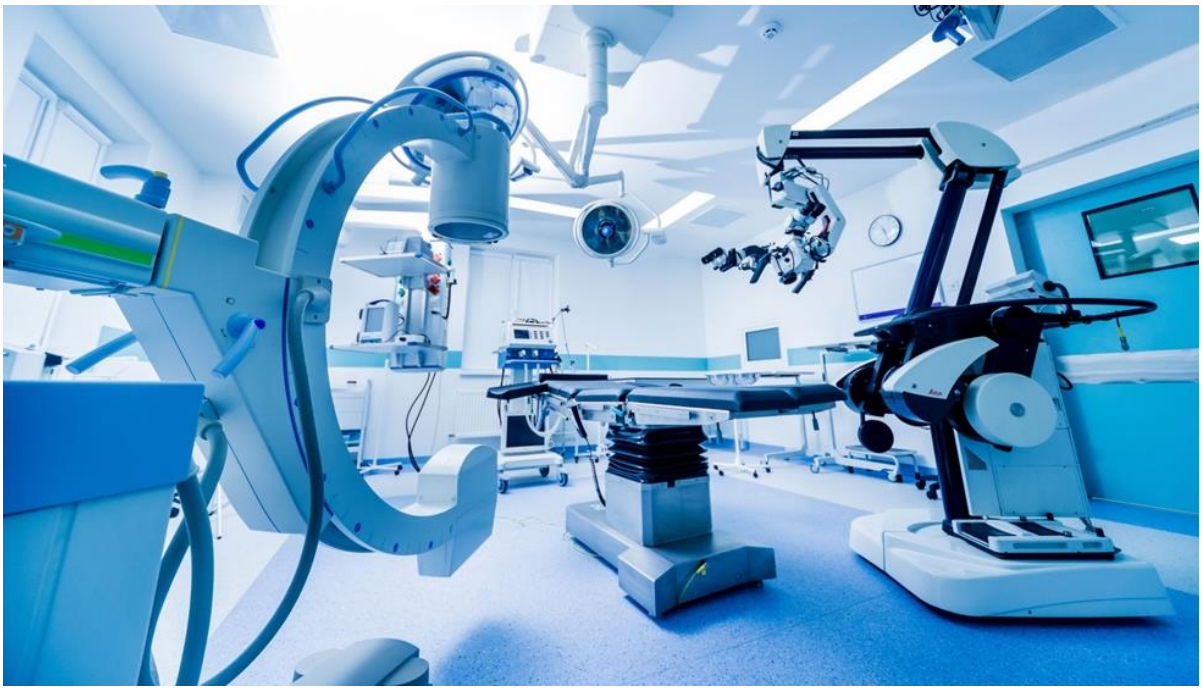


*Abbildung 7: Moderne Operationssäle sind mit den verschiedensten technischen Geräten ausgestattet. Georgii Kobold entwickelt, produziert und vertreibt Antriebstechnik für diese Medizintechnik Produkte.*

Abbildung 7 zeigt einen modernen Operationssaal. Heutzutage kommen Mediziner nicht mehr ohne komplexe Technologie aus, welche Sie bei den Operationen unterstützt. Georgii Kobold liefert beispielsweise Elektromotoren für C-Bögen und für Operationsmikroskope. Anforderungen an die Elektromotoren sind neben einer hohen Kraftdichte insbesondere auch zusätzliche Sicherheitsanforderungen. Technische Geräte, welche während einer Operation verwendet werden, und auf die der Operateur angewiesen ist, dürfen nicht ausfallen. Beispielsweise werden in diesen Motoren viele Komponenten redundant verbaut. Dies erhöht die Komplexität und die Kosten für die Motoren. Georgii Kobold entwickelt für diese Anwendungen auch ausfallsichere Elektromotoren.

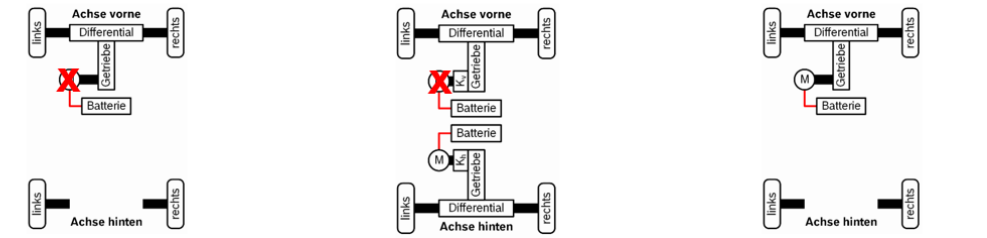
Im Forschungsvorhaben AnRoX werden ausfallsichere autonome Fahrzeuge untersucht. Unteranderem werden hierfür auch ausfallsichere Antriebe untersucht. Georgii Kobold ist als KMU kein Zulieferer für die Automobilindustrie – die Technologie von ausfallsicherer Antriebstechnik ist aber insbesondere für die Medizintechnik hochinteressant. Georgii Kobold hat daher im Rahmen des Forschungsvorhaben AnRoX ausfallsichere Elektromotoren untersucht.

**Untersuchung von verschiedenen Konzepten für ausfallsichere autonome Fahrzeuge**

In diesem Abschlussbericht soll insbesondere auf die Entwicklung von ausfallsicheren Antrieben eingegangen werden. Für ein größeres Bild des Forschungsprojektes AnRoX wird auf den partnerübergreifenden Schlussbericht verwiesen. Zur Untersuchung der Antriebe wurden verschiedene Topologien für Antriebe in einem autonomen Fahrzeug betrachtet.

In Abbildung 8 sind diese verschiedenen Topologie Konzepte dargestellt. Beispielsweise werden die Konzepte untersucht einen 3 Phasigen Elektromotor mit 100kW Leistung an der Vorderachse einzusetzen, oder an jeder Achse einen Motor mit ja 50kW Leistung. Für die Vermeidung von Redundanzen soll untersucht werden, inwiefern ein Elektromotor ausfallsicher ausgelegt werden kann. Ein wesentlicher Ausfallgrund von Elektromotoren ist der Ausfall der Wicklung. Durch den

Einsatz von mehrphasigen Systemen kann bei einem Ausfall der Wicklung eines der Phasensysteme abgeschaltet werden. In diesem Forschungsvorhaben werden gemeinsam mit den Partnern Strategien entwickelt, um im Fehlerfall noch möglichst viel Leistung aus den Antrieben zu erzielen. Erste Abschätzungen haben ergeben, dass bei einem 2*3 phasigen Motor noch 75% Antriebsmoment zur Verfügung stehen kann. Das Projekt AnRox soll Konzepte wie zum Beispiel den 2*3 phasigen Antrieb untersuchen und sowohl kostentechnisch als auch leistungstechnisch mit anderen Topologien vergleichen (z.B. 2 1*3 phasige Motoren)




**1x3 phasiger Motor**
Beispiel Kurzschluss Windung
Gehäuse:
Antriebsleistung 0%

**Zwei 1x3 phasiger Motor**
Beispiel Kurzschluss Windung
Gehäuse:
Antriebsleistung 50%

**2x3 phasiger Motor**
Beispiel Kurzschluss Windung
Gehäuse:
Antriebsleistung 75%

(Annahme: Motor muss bei Gehäuseschluss abgeschaltet werden, bei 2*3 phasig )

*Abbildung 8: Topologien Fahrzeug*

**Untersuchung von verschiedenen Topologien für ausfallsichere Antriebssysteme**

Es wurden zur Bewertung von Komponenten des Antriebs eine theoretische/konzeptuelle Untersuchung durchgeführt, welche Möglichkeiten bestehen, um einen Motor ausfallsicher zu betreiben beziehungsweise bei einem Fehlerfall in einem degradierten Betrieb zu betreiben. Einer der wichtigsten Fehler mit der größten Auswirkung auf den Fahrbetrieb ist ein Phasenschluss bzw. ein Körperschluss. Diese Fehler lassen sich bisher noch nicht sicher vorhersagen. Bei Eintritt dieser Fehler ist der Motor möglicherweise direkt funktionsunfähig, bzw. ein Weiterbetrieben ohne Maßnahmen würde zur Funktionsunfähigkeit führen. Für diesen Fehlerfall können im Motor verschiedene Maßnahmen wie mehrphasige Wicklungen genutzt werden. Eine erste Übersicht ist in Abbildung 9 dargestellt. Da der Umrichter im Gegensatz zum Motor die weit anfälligere Komponente ist und die Auswahl des Motorkonzepts an der Auswahl des Umrichterkonzeptes hängt, wurde in den Arbeitspaketen, welche die Komponenten konzeptualisieren zuerst der Umrichter betrachtet. Die Konzeptauswahl des Motors folgt anschließend.

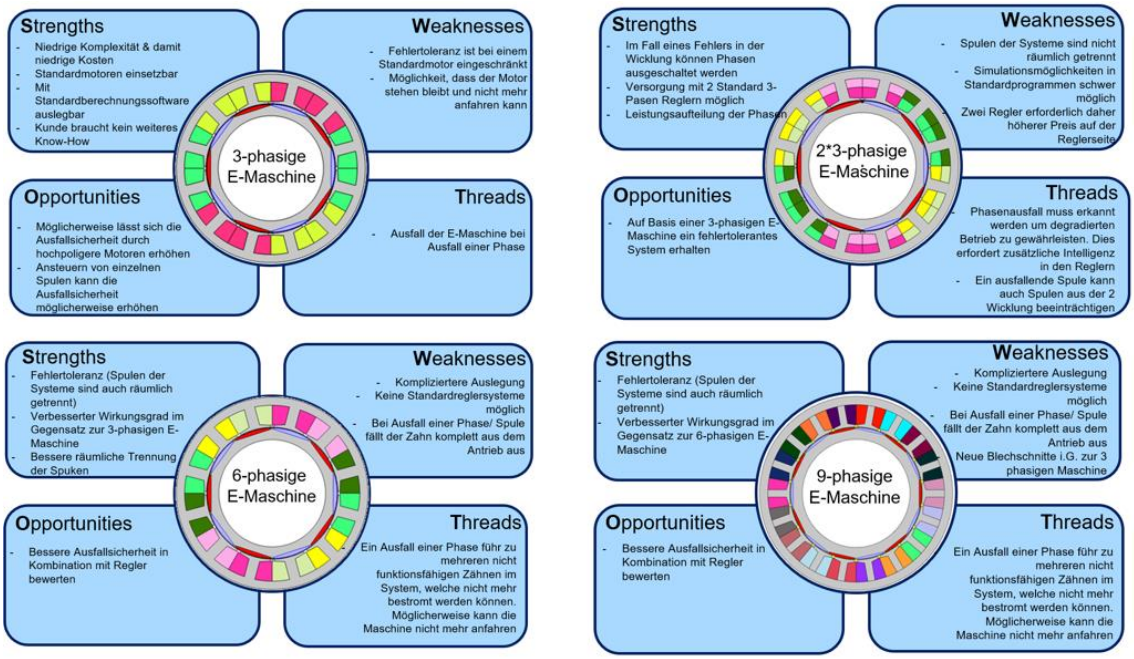



*Abbildung 9: Verschiedene Motorkonzepte mit Überlegungen zur Ausfallsicherheit.*

**Grundlagenuntersuchungen zur Bewertung der Antriebstechnologien**

Georgii Kobold hat in verschiedenen Arbeitsgruppen mitgewirkt, um die verschiedenen Konzepte zu bewerten. Dabei wurden sämtliche zu erwartende Fehler untersucht und mögliche Auswirkungen auf den Fahrbetrieb bewertet. In diesem Partnerspezifischen Abschlussbericht soll auf die Ausfallsicherheit und die Kosten von Elektromotoren eingegangen werden.

Damit verschiedene Fehler bewertet werden können muss die Ausfallwahrscheinlichkeit der einzelnen Komponenten bestimmt werden. Georgii Kobold hat anhand einer Literaturrecherche die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Elektromotoren bestimmt bzw. die Ausfallwahrscheinlichkeiten der einzelnen Komponenten der Elektromotoren bestimmt (siehe Abbildung 10 [Quelle: NSWC Handbook of Reliability]).

Die Fehlerrate ist in fpmh – failures per million hours – angegeben. Die 0,095 FPMH entsprechen einer FIT Rate von 95. Mit einer FIT Rate von 35 hat dabei die Motorkomponente Wicklung die höchste Fehlerquote vor der Fehlerquote der Lager. Im Forschungsvorhaben AnRox wurden im Teil Condition Monitoring verschiedene Verfahren entwickelt, um z.B. den Lagerzustand vorherzusagen. Dies kann durch Vibrationsmessungen geschehen, oder auch durch Temperaturmessungen bzw. Temperaturmodellen. Die Vorhersage eines Ausfalls der Wicklung ist jedoch schwer vorherzusagen. Ein Wicklungsschluss entsteht spontan. Mit 34 FIT ist damit die Wicklung der Teil eines Elektromotors, welcher durch eine Redundanz, bzw. andere technische Verfahren, abgefangen werden muss.

$$\lambda_{Motor} = \lambda_{Wicklung} + \lambda_{Lager,AS} + \lambda_{Lager,\,BS} + \lambda_{Welle} + \lambda_{Gehäuse}$$

$$= 0{,}095\ FPMH$$

**$\lambda_{Wicklung}$ = 0,034** Fehlerrate der elektrischen Windung
$\lambda_{Wicklung} = \lambda_{Wicklung,basis} * C_T * C_V * C_{alt}$
mit
$\lambda_{Wicklung,basis} = 1.0 * 10\text{^}6 / L_l$
$L_l$=Lebensdauer der Motorwicklung
$C_T$=Temperatur Korrekturfaktor
$C_V$=Spannungskorrekturfaktor
$C_{alt}$=Höhenkorrekturfaktor

**$\lambda_{Welle}$ = 0,01** Fehlerrate der Lager
$\lambda_{Welle} = \lambda_{SH,B} * C_f * C_T * C_{DY} * C_{SC}$
$\lambda_{SH,B} = 10\text{^}6/N$ mit N=Anzahl Zyklen bis Ermüdung

**$\lambda_{Lager}$ = 0,025** Fehlerrate der Lager
$\lambda_{Lager} = \lambda_{Lager,basis} * C_V * C_{CW} * C_t * C_{SF}$
$\lambda_{Lager,basis} = 2 * 10\text{^}5 / L_{10,h}$ mit $L_{10,h} = 10\text{^}6/(60*n) * (L_S/L_A)\text{^}3$
$C_V$=Faktor Schmiermittel
$C_{CW}$=Faktor Wasser Verschmutzung
$C_t$=Faktor Umgebungstemperatur
$C_{SF}$=Faktor Service Bedingungen

**$\lambda_{Gehäuse}$ = 0,001**
Literaturwert

*Abbildung 10: Ausfallwahrscheinlichkeiten Elektromotor*

Neben der Untersuchung der Ausfallgründe eines Elektromotors und der FIT Raten der einzelnen Fehler, müssen die verschiedenen Konzepte auch bzgl. ihrer Kosten miteinander verglichen werden (siehe Abbildung 11). Die Kosten für einen Motor mit 100kW Leistung in Konzept 1 wurde der Quelle [EETT Roadmap] entnommen und als angemessen bewertet. Die weiteren Konzepte wurden aus dieser Kostenstruktur abgeleitet. Hierfür wurde angenommen, dass ein Motor mit 50kW 50% der Aktivteillänge eines 100kW Motors aufweist. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass eine Verdoppelung der Antriebe im Fahrzeug eine Kostensteigerung von 60% mit sich bringt. Nicht berücksichtigt ist hierbei weitere Kosten im Fahrzeug für die Integration der Antriebe. Konzept 3 zeigt einen 2*3 phasigen Antrieb. Bei diesem Konzept entstehen motorseitig nur geringe Mehrkosten. Kostentechnisch wäre ein Konzept mit einem Ausfallsicheren Antrieb wünschenswert. Im Projekt AnRoX wurde von den Partnern untersucht, welche Vorteile dieses Konzept auf die gesamte Fahrzeugarchitektur hat, und welche Leistungen im Fehlerfall erzeugt werden können. Für mehr Information wird hier auf den partnerübergreifenden Schlussbericht verwiesen.

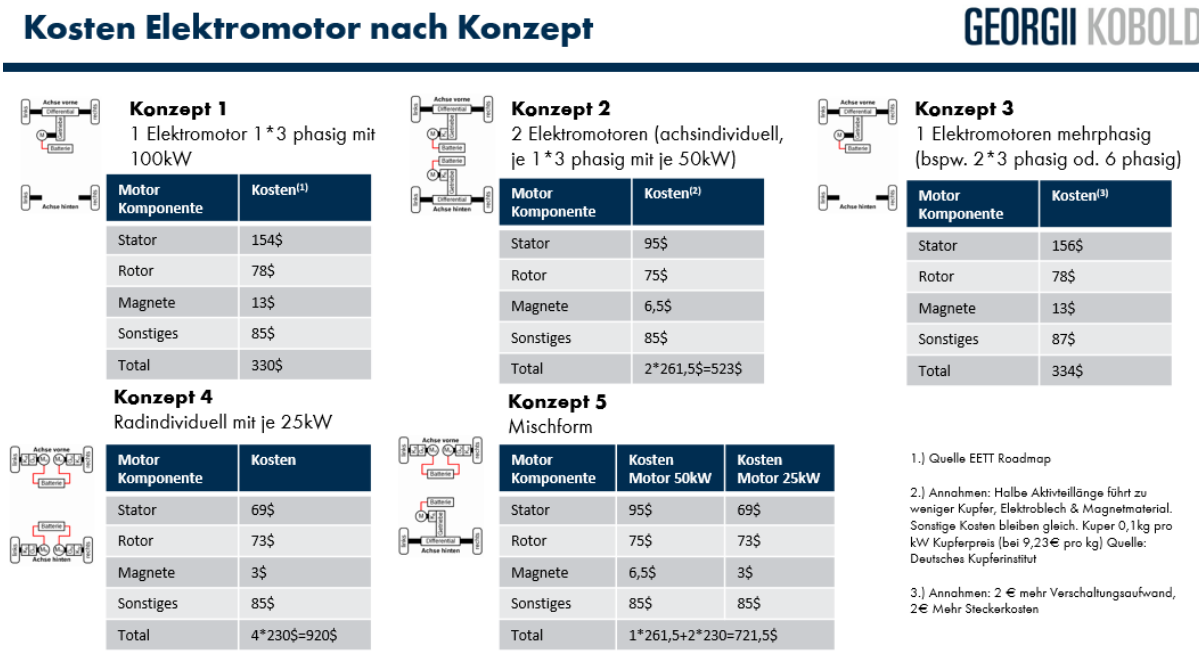



*Abbildung 11: Kostenstruktur Elektromotor und Abschätzung der Kosten der verschiedenen Topologien.*

**Aufsetzen einer Simulationsumgebung zur Simulation von mehrphasigen Antriebssystemen**

Aufgabe von Georgii Kobold im Projekt AnRoX war neben der Mitarbeit in den Arbeitspaketen zur Grundlagenentwicklung im Konsortium die Auslegung und die Herstellung der Testmuster. Verschiedene Konsortialpartner haben gemeinsam mit Georgii Kobold die Motoren definiert, mit denen Fehlerkompensationsstrategien untersucht werden sollten.

Da das bisher verwendete Simulationsprogramm zur Auslegung von Elektromotoren keine Möglichkeit für mehrphasige Elektromotoren aufweist, bzw. nicht ausreichend Möglichkeiten zur Untersuchung von Fehlerzuständen wie z.B. einem Wicklungsschluss aufweist, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes eine Simulation zur Auslegung der mehrphasigen Antriebe auf Basis einer FEM-Simulation erstellt.

Hierfür wurde eine iterative Finite Elemente Berechnung, mit der auch kleinere Geometriedetails sehr genau berechnet werden können mit einer SPICE Simulation, mit der der elektrische Schaltkreis simuliert werden kann, iterativ gekoppelt (siehe Abbildung 12).

Hierdurch können Fehlerzustände in den Wicklungen, wie zum Beispiel der Kurzschluss von zwei Windungen, simuliert werden inklusive der Auswirkungen auf den restlichen elektrischen Schaltkreis. Durch die Koppelung mit der Finite Elemente Methoden Berechnung können die Auswirkungen der Fehler auf das Ausgangsdrehmoment des Motors berechnet werden. Mit Hilfe der Simulation sollen Fehlerzustände berechnet werden können. Aber auch die eigentliche Auslegung des Elektromotors wird durch die gekoppelte FEM Simulation möglich gemacht.

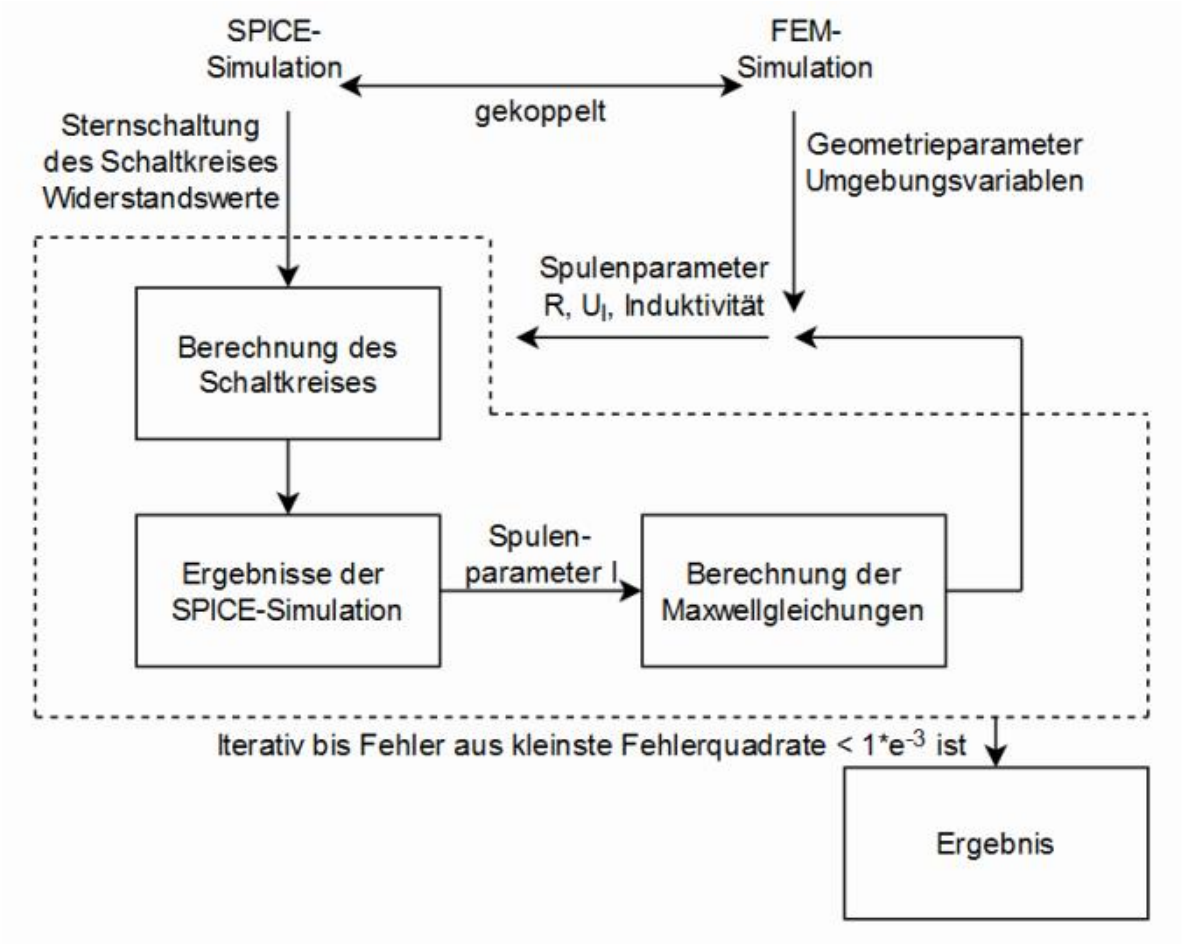


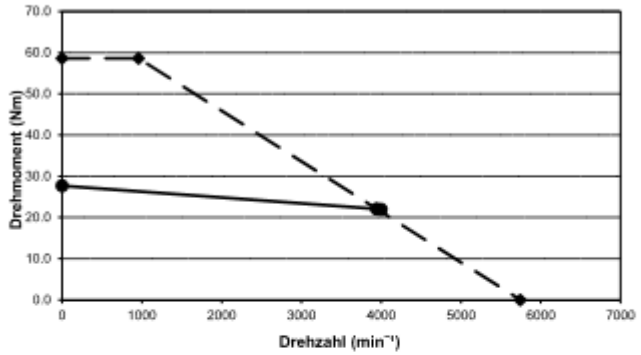

*Abbildung 12: Schema FEM Simulation Elektromotor.*

## Auslegung Elektromotor mit Fehlerinjektionsmöglichkeiten

Mit Hilfe der in diesem Projekt aufgebauten gekoppelten SPICE-FEM Simulation wurden verschiedene Testmotoren entwickelt und aufgebaut. Mit diesen Testmotoren wurden die im Projekt AnRoX entwickelten Verfahren zur Fehlerkompensation getestet. Da die Motoren leistungstechnisch wesentlich kleiner als normale Traktionsmotoren sind konnten die Tests auch auf kleineren Prüfständen durchgeführt werden. Die Ergebnisse müssen allerdings auf Traktionsmaschinen für Elektrofahrzeuge adaptiert werden. Dieser Abschnitt beschreibt die Auslegung der ersten Prüfmuster zur Untersuchung der Fehler in der Wicklung. Hierfür sollte ein Prüfling entwickelt werden, welcher die Möglichkeit aufweist, verschiedene Fehlerzustände, wie z.B. einen Phasenschluss oder eine Körperschluss, in die Wicklung zu applizieren. Hierfür sollten die Windungen im Stator aufgetrennt werden und nach außen geführt werden. Ausgelegt wurde ein Elektromotor mit 2x3 Phasen. Die beiden Phasensystem sind 30° zueinander versetzt. Der Motor weist eine Nenndrehzahl von 4000rpm auf und hat – ungekühlt – eine Leistung von ca. 10kw. Da der Motor einen gemeinsam mit Projektpartnern entwickelten Kühlkörper erhält steigt die Leistung auf ca. 20kW an. Abbildung 13 zeigt die weiteren technischen Daten des Prüflings.

GEORGII KOBOLD

**KSY 568.40 D-400 6-phasig**
**Permanentmagnet-Synchron-Motor**




**Technische Daten:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Bemessungsspannung, $U_N$ (V) | 400 | | |
| Bemessungsdrehzahl, $n_N$ (min⁻¹) | 4000 | Polzahl | 6 |
| Bemessungsleistung, $P_N$ (kW) | 9.21 | Ständerwiderstand, $R_{UV}$ (Ω)* | 1.69 |
| Bemessungsdrehmoment, $M_N$ (Nm) | 22.0 | Ständerinduktivität, $L_{UV}$ (mH) | 14.55 |
| Bemessungsstrom, $I_N$ (A) | 8.75 | Elektr. Zeitkonstante, $T_e$ (ms) | 8.61 |
| | | | |
| Bemessungsdrehmomentkonstante, $K_{TN}$ (Nm/Aeff) | 2.51 | | |
| Spannungskonstante, $K_e$ (V/1000 min⁻¹) | 69.64 | Max. Zulässige Spannung Uzk (V) | 680 |
| | | | |
| Stillstandsmoment, $M_0$ (Nm) ** | 27.7 | Schutzart | IP65 |
| Stillstandsstrom, $I_0$ (A) ** | 11.37 | Betriebsart | S1 |
| Stillstandsdrehmomentkonstante, $K_{T0}$ (Nm/A) | 2.43 | Isolationsklasse | F |
| | | | |
| Spitzenmoment, $M_{max}$ (Nm) *** | 58.6 | Rotorträgheitsmoment, $J_R$ (kg·cm²) | 0 |
| Spitzenstrom, $I_{max}$ (A) *** | 30.61 | Gewicht, m (kg) | 0 |
| Spitzendrehmomentkonstante, KT max (Nm/Aeff) | 1.91 | Thermische Konstante $T_{therm}$ (min)**** | 0 |
| | | | |

* Werte bei 20°C
** Werte bei 200 min⁻¹
*** Kurzzeitbetrieb max. 3 Sekunden
**** geschätzter Wert

AO;17.01.2023

*Abbildung 13: Datenblatt Prüfling*

Abbildung 14-16 zeigen den Aufbau des Stators. Für die 2*3 Phasen wurde ein 36 nutiger Blechschnitt mit einer Zweischichtwicklung gewählt. Das erste Phasensystem wurde jochnah eingelegt, das zweite Phasensystem wurde Luftspaltnah in den Stator eingelegt. Die einzelnen Phasen bestehen aus 6 Spulen a 15 Windungen. Abbildung 15 zeigt die verschiedenen Punkte der Wicklungen, welche nach außen geführt werden. Neben den Phaseneingängen UVW und XYZ wurden die beiden Sternpunkte nach außen geführt. Die Abgriffe in den einzelnen Spulen wurde jeweils in der ersten Spule einer Phase nach außen geführt. Insgesamt können mit der Struktur 24 Abgriffe auf die Phasensysteme ermöglicht werden, und so sämtliche Fehler, wie zum Beispiel ein Phasenschluss, injiziert werden. Abbildung 16 zeigt das Wickelschema des Stators. Damit die vielen Ausgänge um den Umfang des Stators verteilt sind, wurden die Startpunkte der einzelnen Phasen um den Umfang verteilt. Dies ermöglicht ein einfacheres Einlegen der komplexen Spulen.

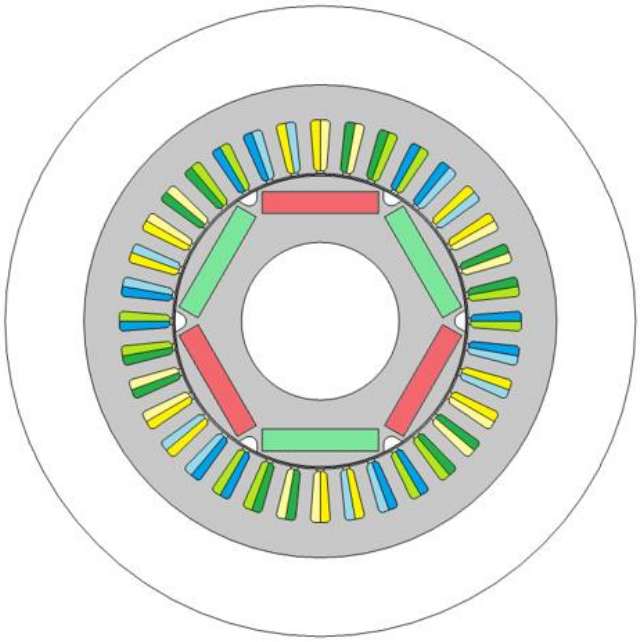
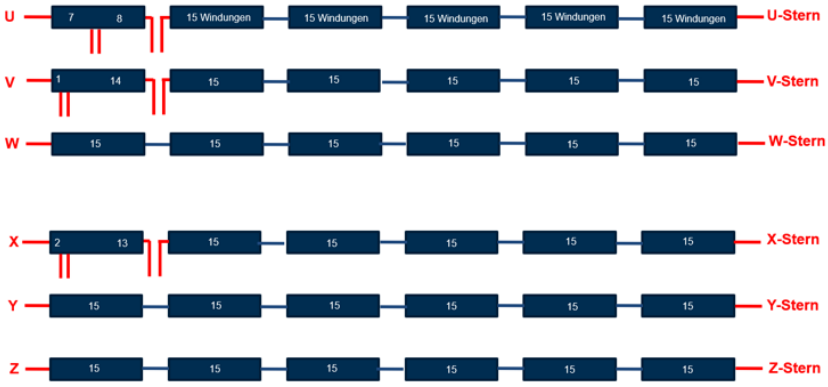



*Abbildung 14: Blechschnitt und Phasenverteilung Prüfling.*




Mögliche KS-Szenarien für Ns = 15:
1, 2, 7, 8, 13, 14, 15

| Anzahl der herausgeführten Leiter: | |
|---|---|
| Phaseneingang | 6 |
| Phasenausgang | 6 |
| KS-Abgriffe | 12 |
| Gesamt | 24 |

*Abbildung 15: Schema der aufgetrennten und herausgeführten Phasen zur Fehlerinjektion.*

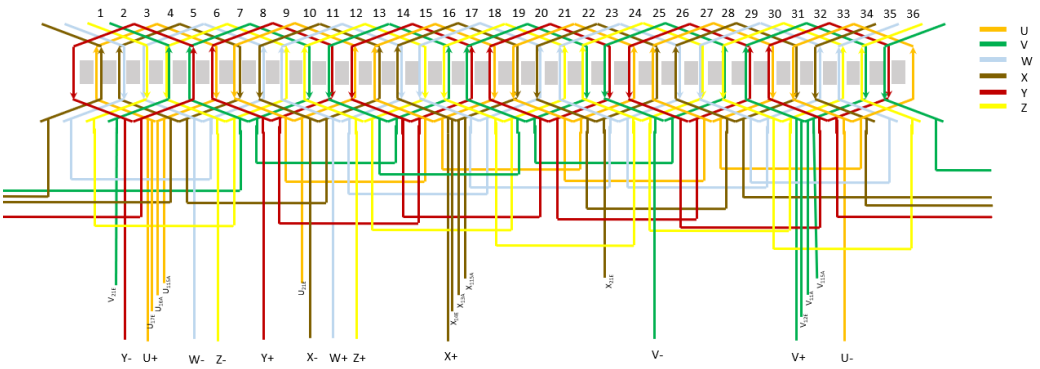



*Abbildung 16: Wickelschema Prüfling*

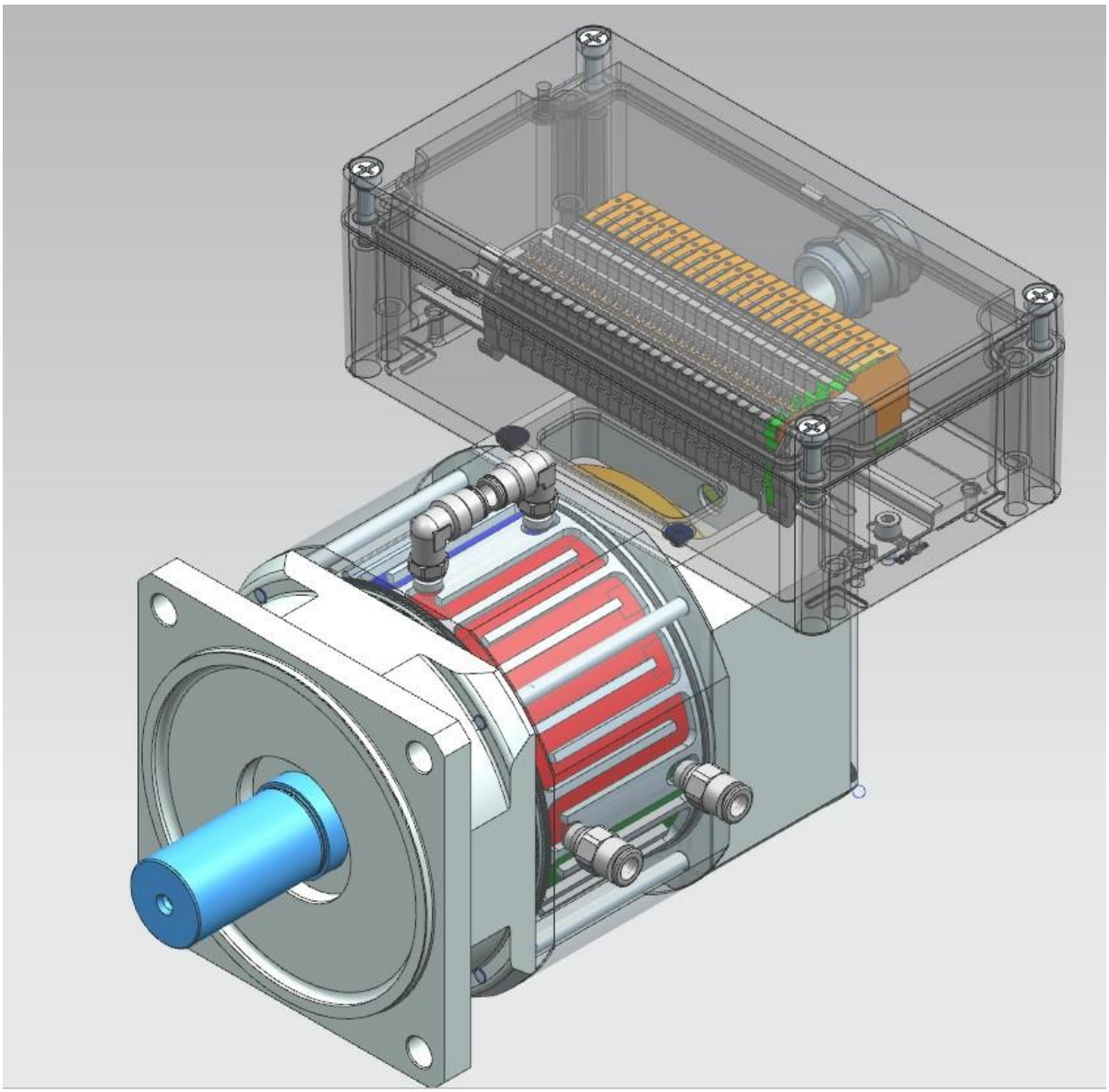


*Abbildung 17: Design / Konstruktion des Prüflings. Basis des Prüflings ist ein KSY 368. Durch die Komplexe Spulengeometrie und den Kühlkörper musste jedoch nahezu jedes Bauteil angepasst werden.*

## Aufbau des Prüflings zur Fehlerinjektion

Folgende Abbildungen zeigen den Aufbau des Prüflings.

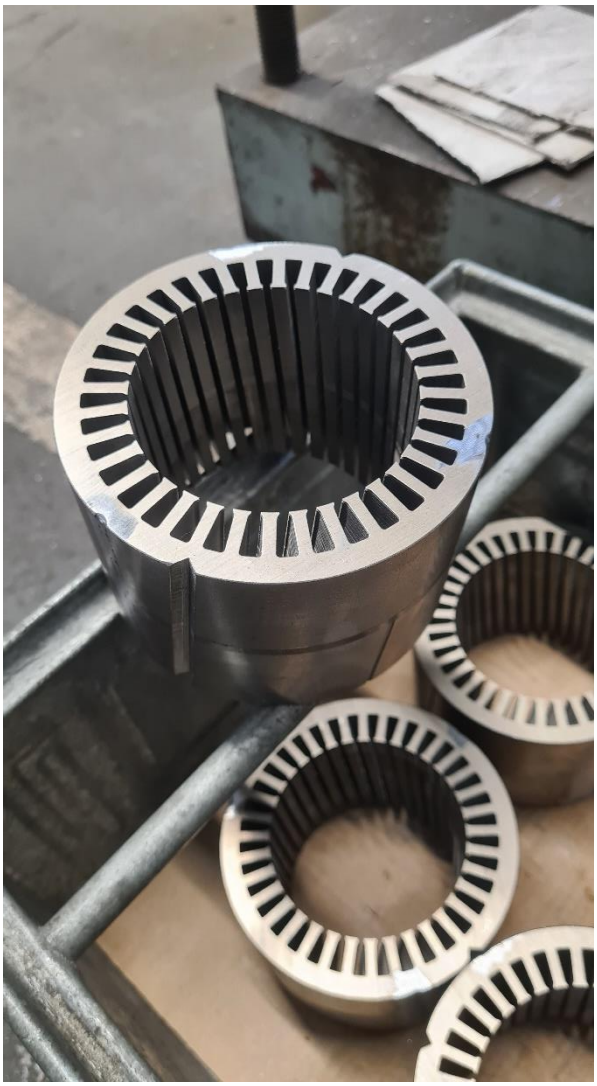


*Abbildung 18: geschweißte Statorbleche. Im ersten Schritt wurden die Statorbleche gestanzt und verschweißt. Es wurde ein 36 nutiger Schnitt mit einer verteilten handeingelegten Wicklung gewählt. Durch die Wahl eines handeingelegten Schnittes ist das herausführen der einzelnen Drähte der Spulenabgriffe wesentlich leichter zu realisieren, als mit automatisierten Wickeltechnologien.*

*Abbildung 19: Stator Nuten isoliert. Zur Isolation der Stator Nuten wurde Isolationspapier mit der Temperaturklasse H verwendet. Bei den Untersuchungen zur Fehlerinjektion werden lokal sehr hohe Ströme erwartet. Durch die Temperaturklasse H soll der Motor widerstandsfähiger gegenüber diesen hohen Strömen werden.*

*Abbildung 20: Einpressen der Rotoren in Aluminiumhülse und anschließendes Fräsen der Geometrie für die Kühlkanäle (Design Projektpartner). Bei der Kühlgeometrie wurde gemeinsam mit einem Projektpartner mittel Fluidik Simulationen eine Kühlgeometrie mit einem besonders geringen Druckabfall realisiert. Auch die Ausfallsicherheit wurde dabei in Betracht genommen. Durch die gewählte Freeflow Geometrie kann ein Verstopfen der Kanäle vermieden werden.*

*Abbildung 21: Rotor mit Blechen und Magneten. Als Rotorgeometrie wurden vergrabene Magnete verwendet, damit der Motor durch eine I/Q Regelung im Feldschwäche Betrieb gefahren werden kann.*

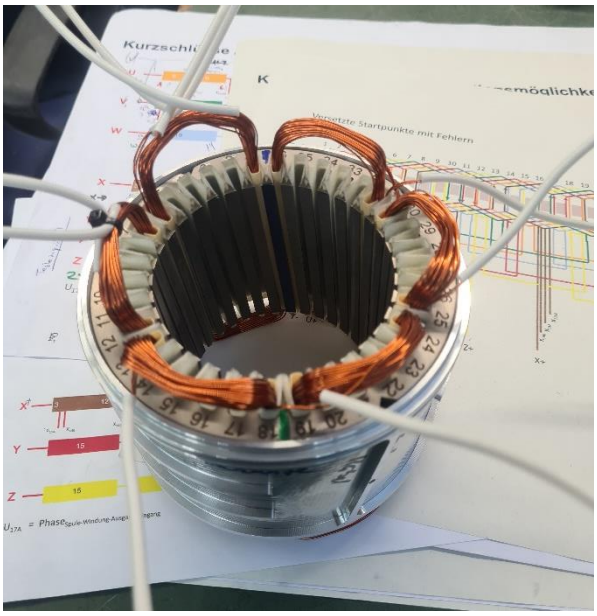


*Abbildung 22: Einlegen erster Phase (U). Das Phasensystem UVW wird zuerst eingelegt und liegt damit Jochnah. Das Phasensystem XYZ wird anschließend eingelegt und liegt damit Luftspalt nah.*

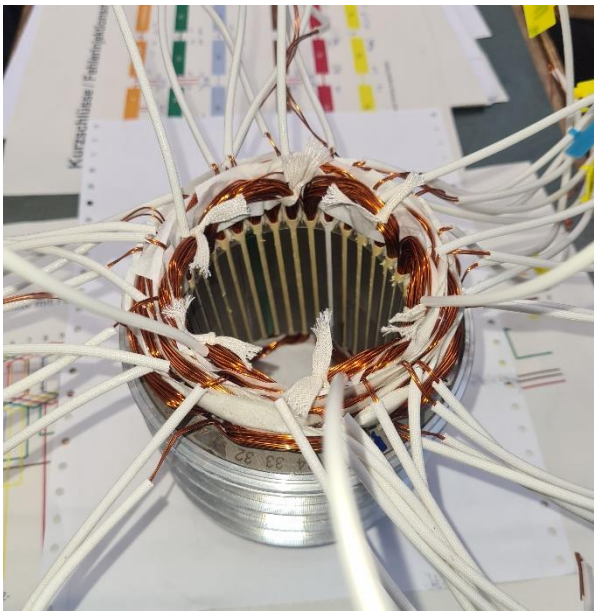


*Abbildung 23: Alle Phasen (U,V,W, X,Y,Z) eingelegt. An dem Stator sind die 24 Abgänge für die Fehlerisolation zu erkennen. Weiterhinzu erkennen sind die Ausgänge, welche im nächsten Schritt noch verschaltet werden müssen.*

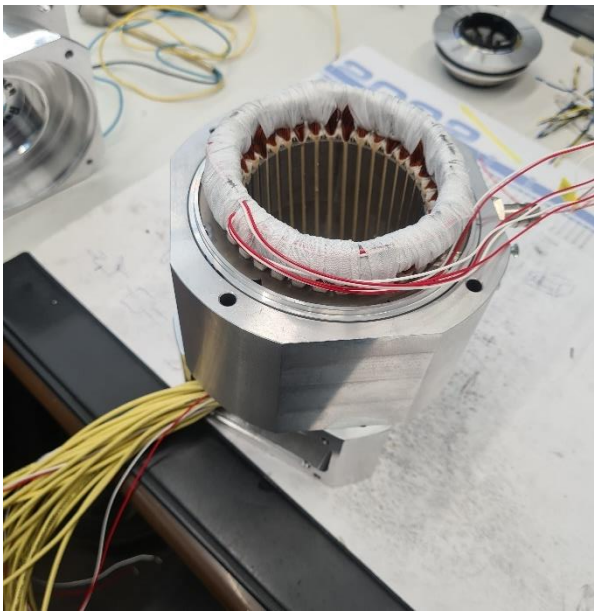


*Abbildung 24: Phasen verschaltet und bandagiert. Auf der B-Seite des Motors werden sämtliche 24 Phasenausgänge nach außen geführt. Zusätzlich werden auf der A- und der B- Seite noch bis zu 24 Temperatursensoren nach außen geführt. Die Temperatursensoren sollen die Temperaturverteilung in den einzelnen Phasen zeigen.*

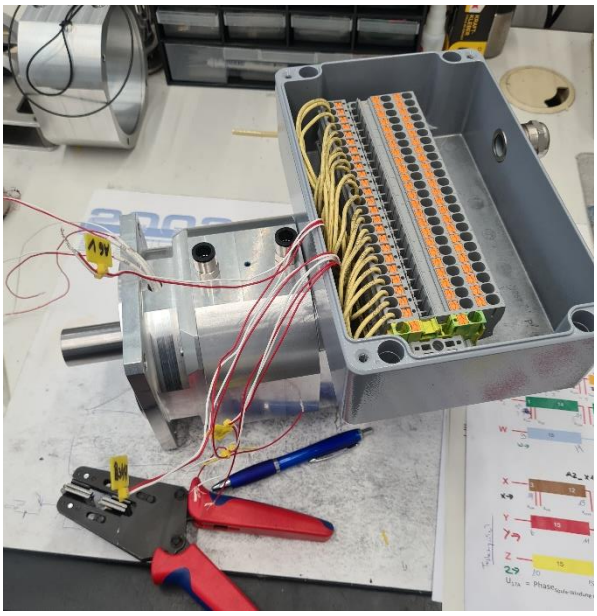


*Abbildung 25: Motor fertig aufgebaut inklusive Anschlusskasten. Im Anschlusskasten können die Projektpartner die Schaltmodule unterbringen zur Injektion der verschiedenen Fehler.*

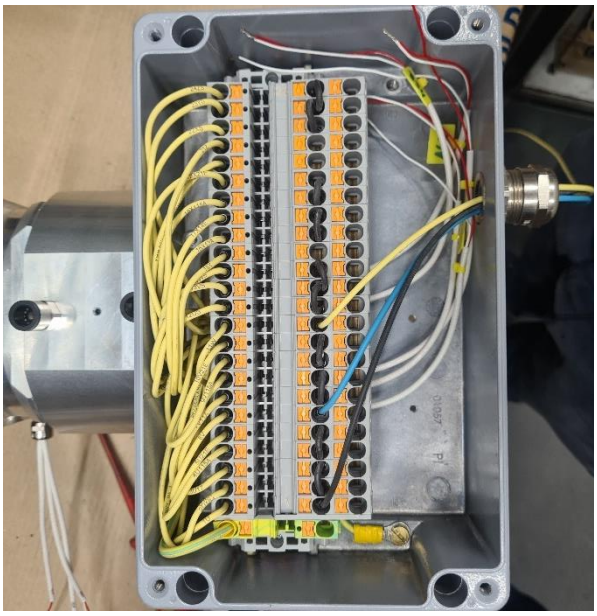


*Abbildung 26: Anschlusskasten mit Verschalteten Phasen. Ausgeliefert wird der Motor in einem betriebsbereit verschalteten Zustand.*

## Fehlerinjektion und Temperatureffekte

Projektpartner haben verschiedene Fehler und Fehlerkompensationsmechanismen an den Prüflingen untersucht. Ein Fehlerkompensationsmechanismus ist der aktive Kurzschluss AKS. Hierbei wird bei voller Drehzahl ein Phasensystem in einen Kurzschluss versetzt, indem die Phasenausgänge miteinander verschaltet werden. Hierbei können sehr hohe Ströme in dem kurzgeschlossenen Phasensystem induziert werden. Erste Versuche mit einem AKS in beiden Phasensystemen waren erfolgreich. Wurde jedoch nur ein Phasensystem in einen AKS gesetzt kamen zusätzlich zu den induzierten Strömen aus den Magneten noch weitere induzierte Ströme aus dem zweiten Phasensystem hinzu. Dies führte zu einem Überlasten des Luftspaltnahen Phasensystems, welches in AKS geschaltet wurde. Der Stator wurde zerstört. Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen den verbrannten Stator. Das Phasensystem, welches nicht in AKS geschaltet wurde, hat keinen Schaden genommen.

*Abbildung 27: Wicklung nach sehr starker Überlast im AKS Fall.*

*Abbildung 28: Wicklung nach sehr starker Überlast im AKS FAll.*

Der Motor konnte in der Konstruktion nicht die Fehlerkompensationsmethoden ausführen, welche von den Projektpartnern durchgeführt werden. Es wurden bei Georgii Kobold sowie bei den Projektpartnern Simulationen durchgeführt, welche Maßnahmen den Motor Kurzschluss fest werden lässt, bzw. die Dauer in der der Motor im AKS betrieben werden kann wesentlich erhöht. Die in diesem Projekt entwickelten gekoppelten Spice-FEM Simulationen zeigen für die Konstruktion mit vergrabenen Magneten (siehe Abbildung 31) einen Stromverlauf im AKS-Fall mit Strömen bis zu 140 A. Bei einem Nennstrom von 12A kann der Motor diesen hohen Strömen nicht standhalten.

Es wurden verschiedene Material und Geometrie Optionen getestet, um die AKS-Ströme zu reduzieren. Abbildung 30 zeigt das Resultat mit vergrabenen V-förmigen Magneten. Abbildung 32 zeigt den Stromverlauf bei AKS. Durch die V-förmig vergrabenen Magnete kann der Strom im AKS fall mehr als halbiert werden. Durch diese Maßnahme ist der Motor zumindest so lange Kurzschlussfest, dass die entsprechenden Tests zur Validierung der Kompensationsmechanismen durchgeführt werden können. Abbildung 33 zeigt die angepassten Rotoren.

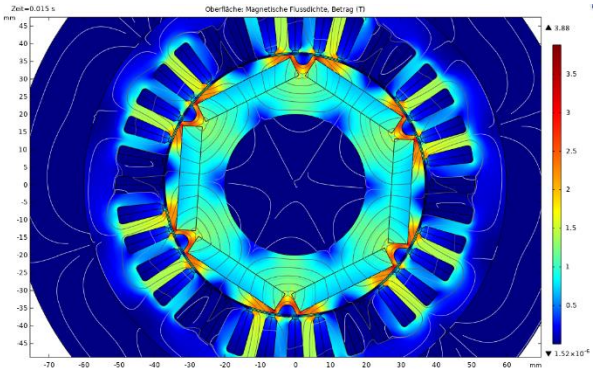


*Abbildung 29: FEM Simulation Motor mit vergrabenen Magneten*

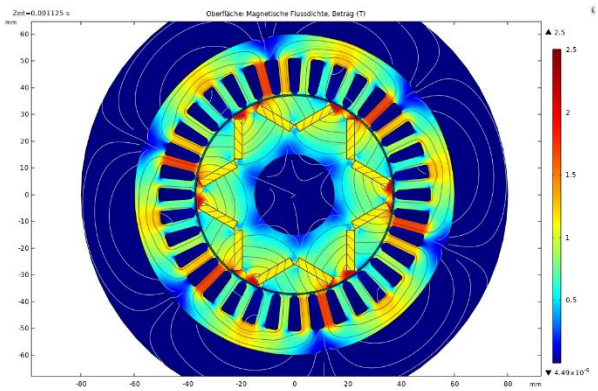


*Abbildung 30: FEM Simulation Motor mit vergrabenen V-Magneten*

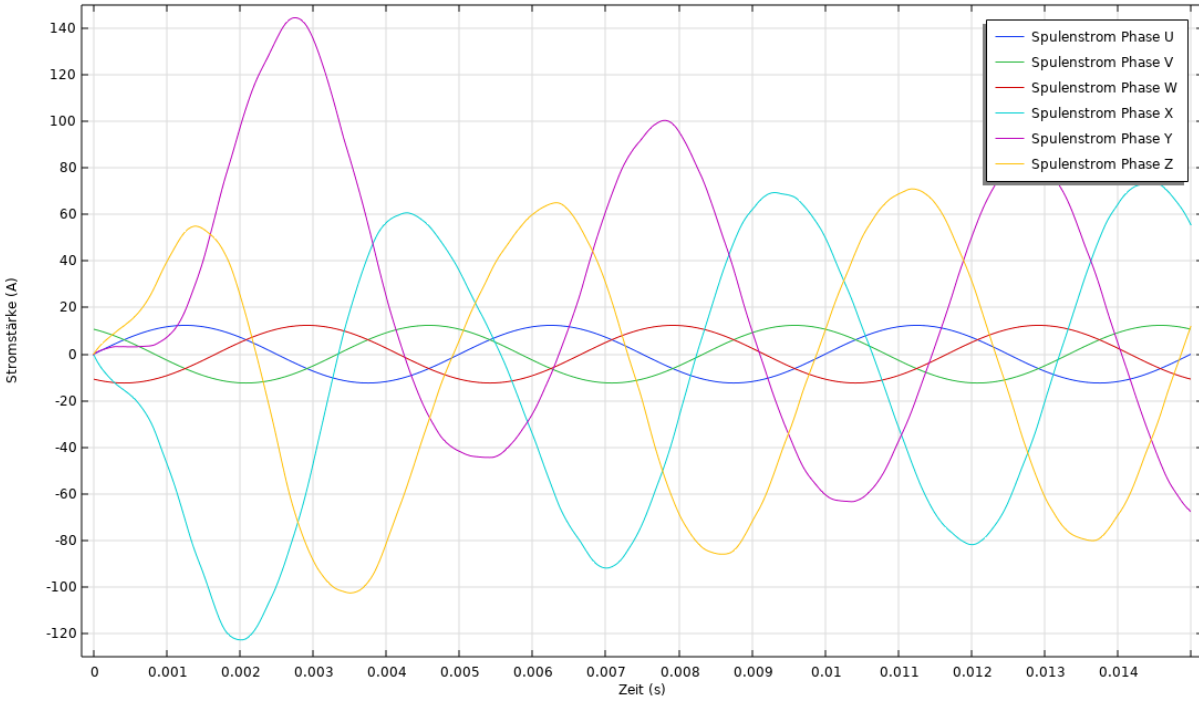



*Abbildung 31: Verlauf Strom über Zeit im Fall, dass ein Phasensystem in AKS geschaltet wird bei Motor mit vergrabenen Magneten.*

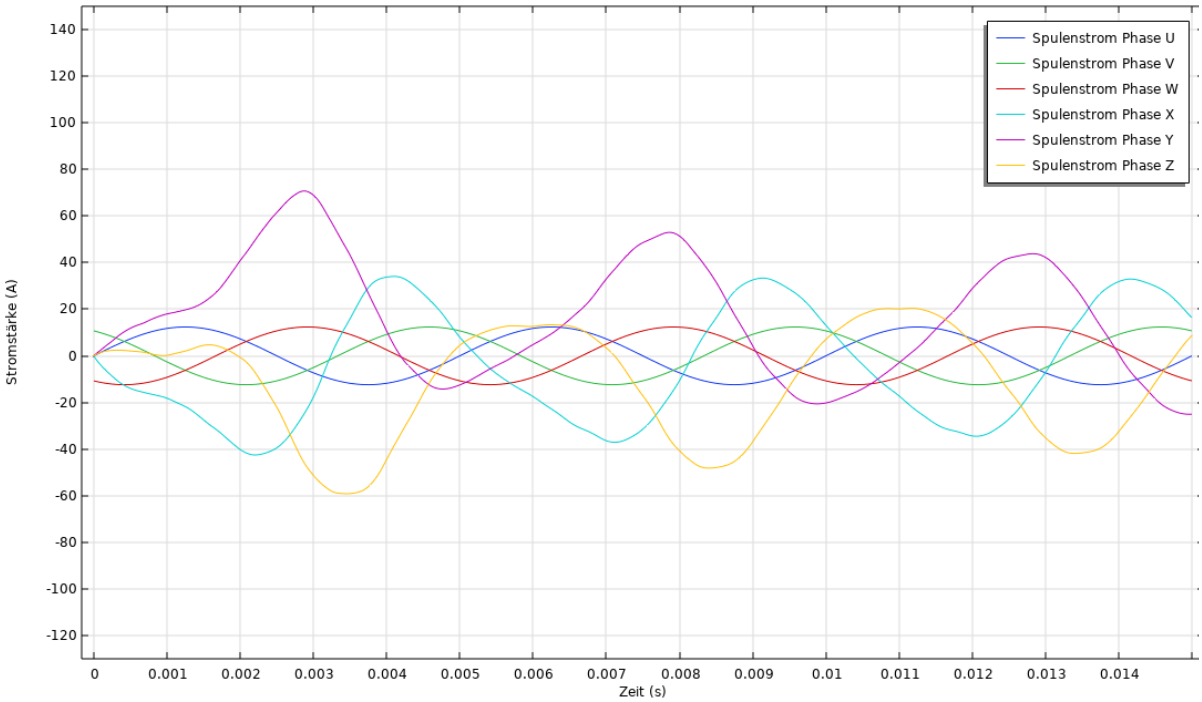



Abbildung 32: Verlauf Strom über Zeit im Fall, dass ein Phasensystem in AKS geschaltet wird bei Motor mit vergrabenen V-Magneten

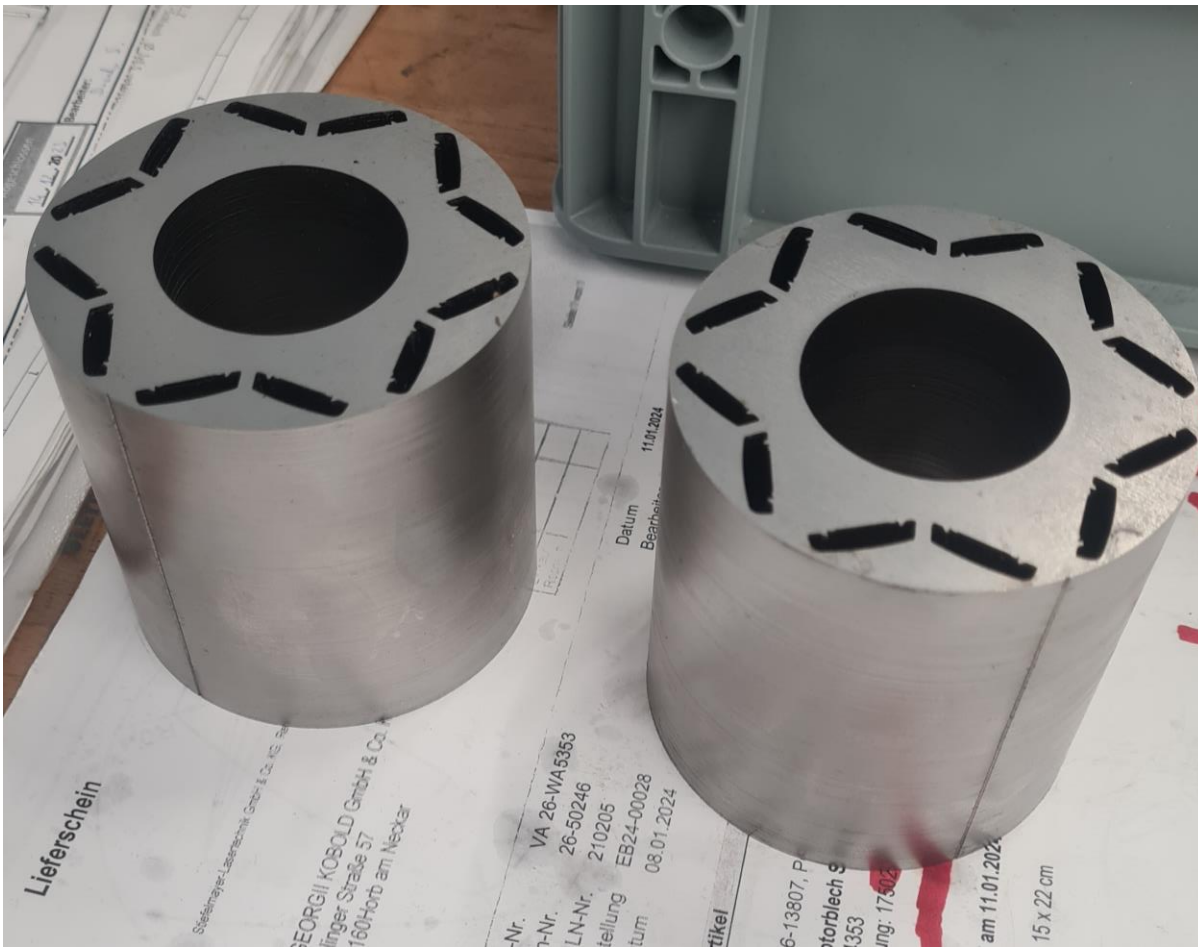


*Abbildung 33: Neue AKS feste Rotorgeometrie*

## Prüfling Condition Monitoring

Ziel der Arbeitspakete bzgl. Condition Monitoring ist das frühzeitige Entdecken von Fehlern, damit mit einer Fehlerstrategie reagiert werden kann, bevor der Fehler überhaupt merkbare Auswirkungen zeigt. Hierfür sollte ein Demonstrator aufgebaut werden. Bei einem Projektpartner sollten die Auswirkungen einer Demagnetisierung der Magnete getestet werden. Der Prüfling soll zur Validierung von Algorithmen zur Magnettemperaturschätzungen dienen. Hierfür har Georgii Kobold den Prüfling entworfen und gebaut. Als Grundlage für den Motor haben sich die Projektpartner auf eine 3 phasig verschalteten Motor mit Möglichkeiten zur Fehlerinjektion verständigt. Der Motor ist dem aus dem parallellaufendem Arbeitspaket zur Validierung der Fehlerkompensationsmechanismen sehr ähnlich. Er unterscheidet sich in der wesentlich größeren Anzahl an Temperatursensoren (bis zu 24) und der weiteren Implementierung von Temperatursensoren an den Magneten des Rotors. Zum Auslesen der Temperatursensoren am Rotor werden die Anschlussdrähte durch eine Hohlwelle nach außen geführt und können dort mit einem Telemetrie System ausgelesen werden. Durch die Konstruktion mit einem B-seitigen herausführen der Drähte benötigt der Motor einen Hohlwellengeber.

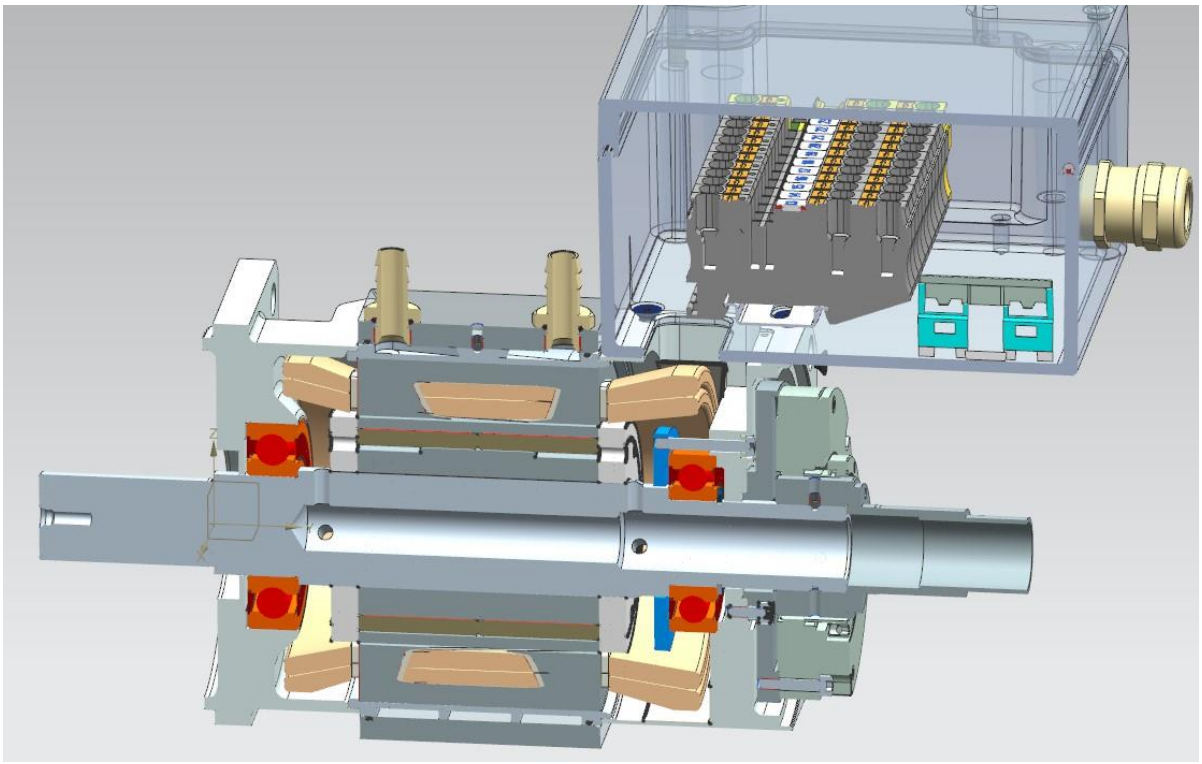


*Abbildung 34: Konstruktion des Condition Monitoring Motors zur Magnettemperaturschätzung.*

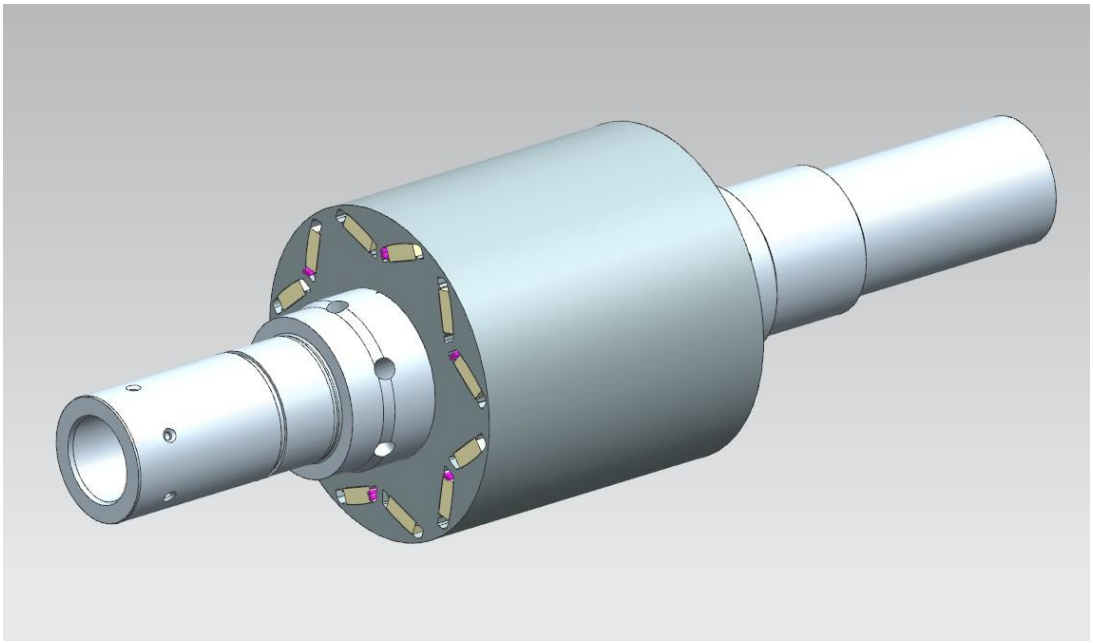


*Abbildung 35: Rotor des Condition Monitoring Prüflings. Lila eingezeichnet sind die Positionen der Temperatursensoren zur Temperaturmessung an den Magneten.*

Im folgenden sind einige Bilder zum Aufbau des Prüflings gezeigt:

*Abbildung 36: Stator gewickelt mit 3 Phasen und intergierten 24 Typ K Temperatursensoren.*

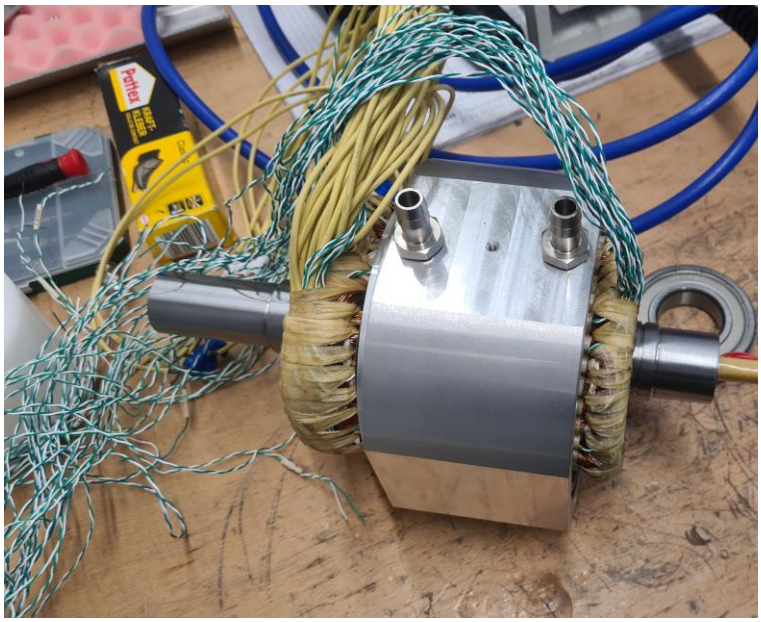


*Abbildung 37: Stator verschaltet und geträufelt inklusive Welle mit Temperatursensoren*

*Abbildung 38: An den Magneten wurden Temperatursensoren angeklebt. Hierdurch können die Algorithmen zur Magnettemperaturschätzung in verschiedenen Betriebszuständen des Motors validiert werden.*

*Abbildung 39: Rotor mit Magnettaschen in V-Form.*

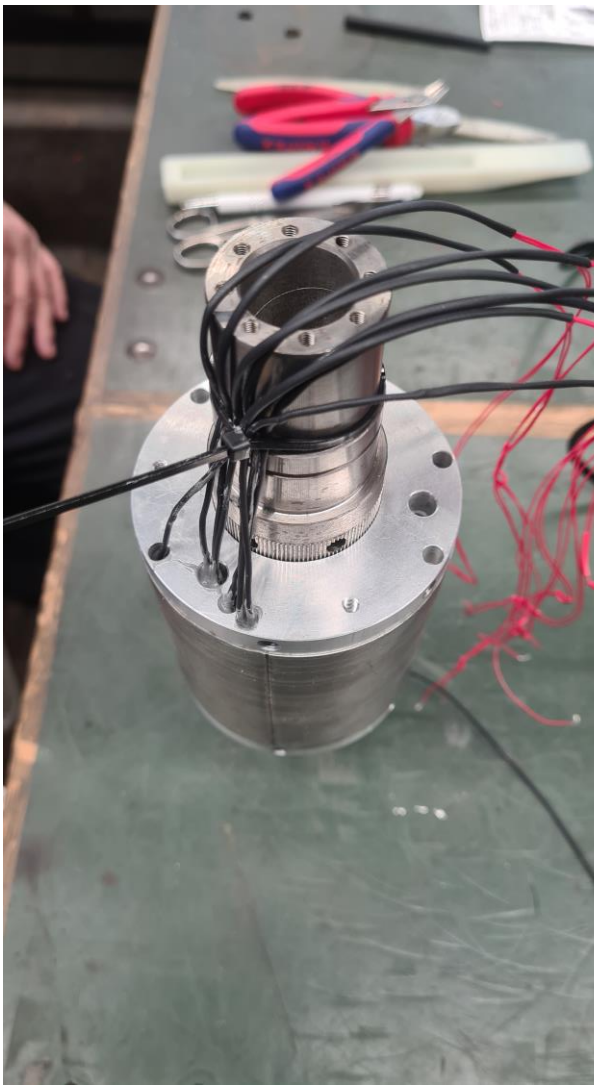


*Abbildung 40: Rotor mit herausgeführten neun Temperatursensoren zur Messung der Magnettemperatur.*

*Abbildung 41: Die Temperatursensoren werden durch die Hohlwelle Bseitig aus dem Motor geführt, und können dort an ein Telemetriesystem angeschlossen werden.*

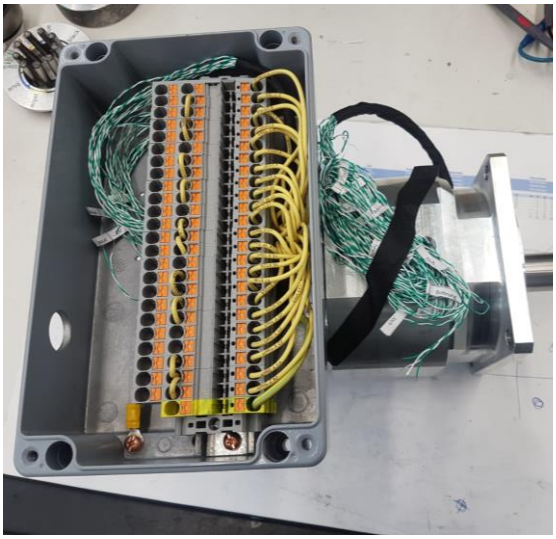


*Abbildung 42: Schaltbox zur Ansteuerung des Motors.*

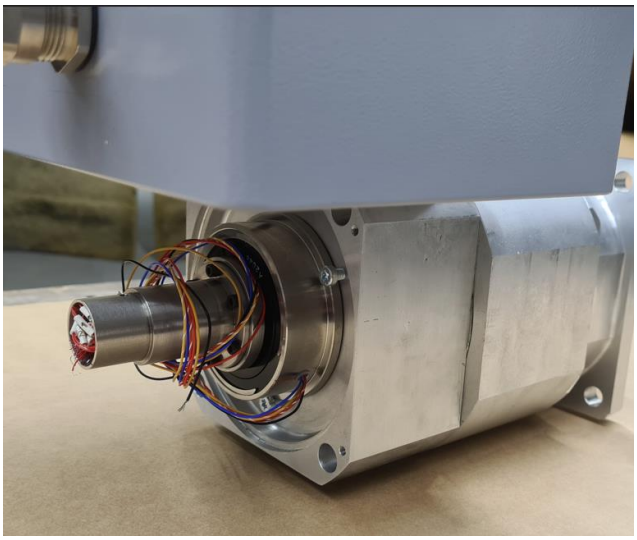


*Abbildung 43: B-Seite des Motors mit herausgeführten Temperatursensoren.*

## Condition Monitoring für die Lebensmittelindustrie

Georgii Kobold hat einen weiteren Condition Monitoring Prüfling aufgebaut. Wie Eingangs in diesem Bericht erwähnt, fertigt Georgii Kobold keine Motoren für die Automobilindustrie. Branchen in die Georgii Kobold Motoren verkauft sind z.B. in der Lebensmittelindustrie und in der Medizintechnik. Methoden zur Fehlerfrüherkennung lassen sich nicht nur im Automobilbau einsetzen, sondern sind auch in andere Branchen übertragbar. Zur besseren Verwertbarkeit der Forschungsergebnisse hat Georgii Kobold einen weiteren Condition Monitoring Prüfling in einem Edelstahlgehäuse im Hygienic Design aufgebaut. Viele Kunden in der Industrie stehen dem Senden der Daten in eine Extra Datencloud skeptisch gegenüber. Georgii Kobold hat sich daher entschieden, die Daten über ein Hyperface - DSL Kabel an den Motorcontroller und damit an die Steuerung zu senden. Übertragen werden Vibrationsdaten der Vibrationssensoren sowie Temperaturdaten und Feuchtigkeitsmessungen. Folgende Abbildungen zeigen den Prüfling.

*Abbildung 44: Hygienic Design Edelstahlmotor mit Predictive Maintenance Funktion.*

*Abbildung 45: Sensorsystem mit integrierten Platinen zum Condition Monitoring des Motors. Die Sensordaten werden über das Hyperface-DSL Kabel direkt an die Steuerung gesendet.*

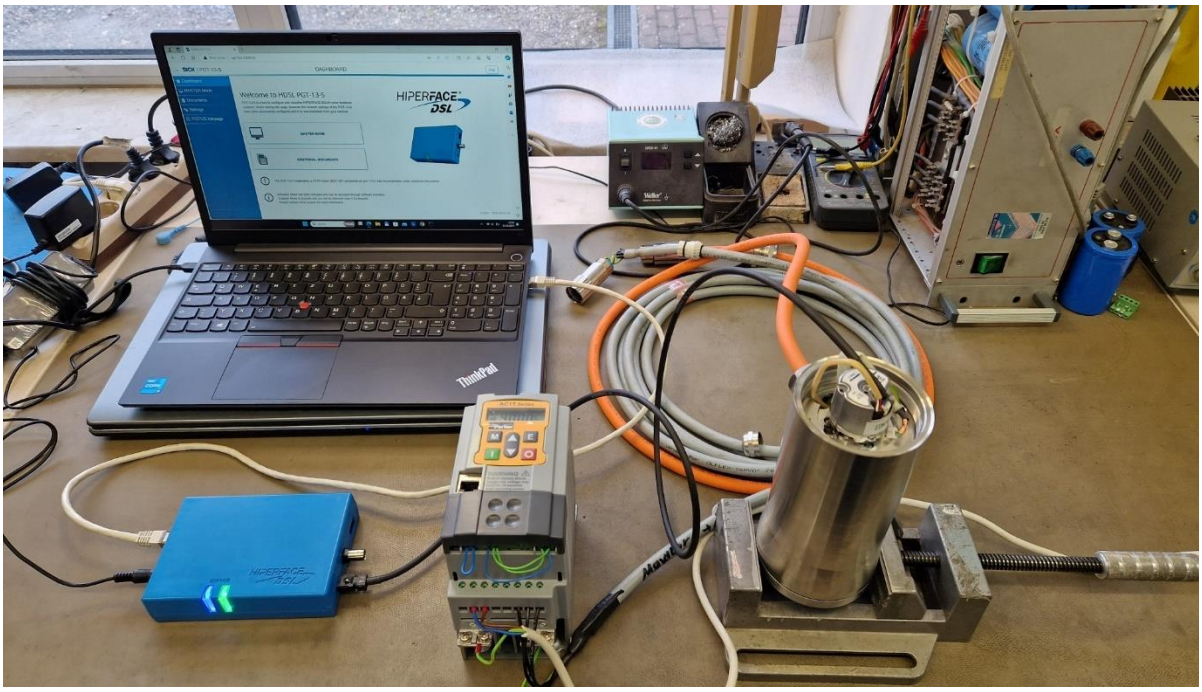



*Abbildung 46: Prüfaufbau Hygienic Design Condition Monitoring Prüfling.*

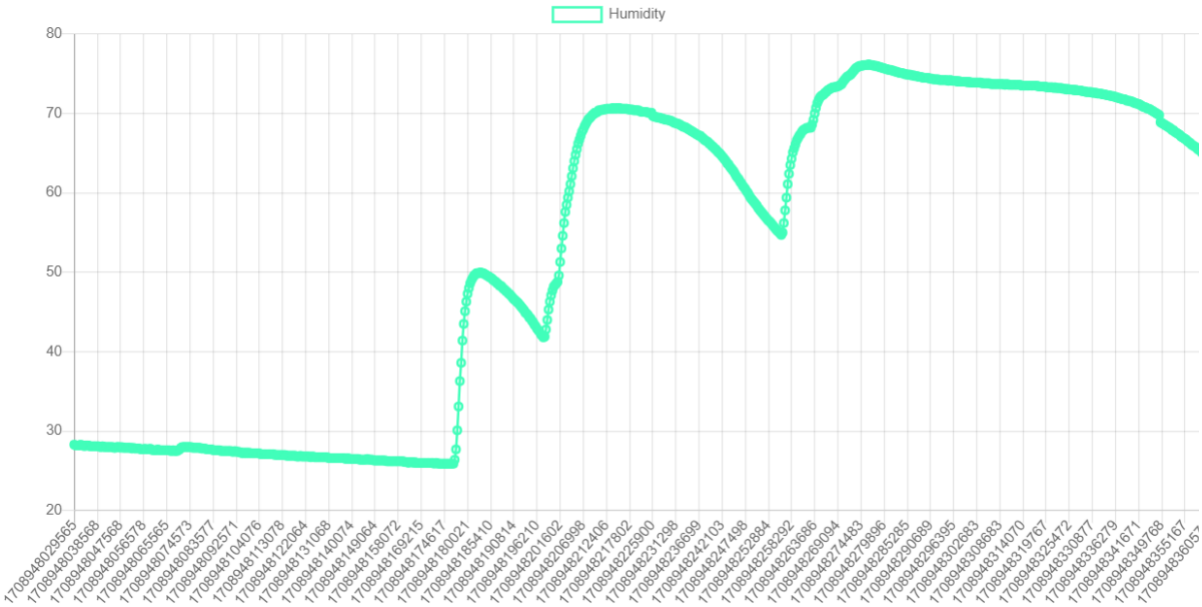



*Abbildung 47: Messung von verschiedenen Luftfeuchtigkeitswerten am Sensor.*

Abbildung 47 zeigt eine Messung der Luftfeuchtigkeit mit dem Condition Monitoring System. Die Luftfeuchtigkeit reagiert sehr schnell und empfindlich. Eine Ausfallursache für Edelstahlmotoren im Hygienic Design sind verschlissene Dichtungen. Die Motoren werden regelmäßig mit aggressiven Chemikalien und mit dem Hochdruckreiniger gereinigt. Dies kann, z.B. wenn die Dichtungen beim Reinigen beschädigt werden, zu Undichtigkeiten im Motor führen. Durch das integrierte Condition Monitoring System können Undichtigkeiten frühzeitig entdeckt werden und ein Austausch des Motors bzw. ein Austausch der Dichtung veranlasst werden. Das entwickelte Condition Monitoring System hat bei Georgii Kobold einen TRL von 7-8 erreicht. Es ist damit für kundenspezifische Applikationen einsetzbar.

Georgii Kobold hat das Condition Monitoring System für Edelstahlmotoren im Hygienic Design in sein Produktangebot aufgenommen und ist damit einer der ersten Anbieter von Condition Monitoring Systemen im Food&Beverage Bereich.

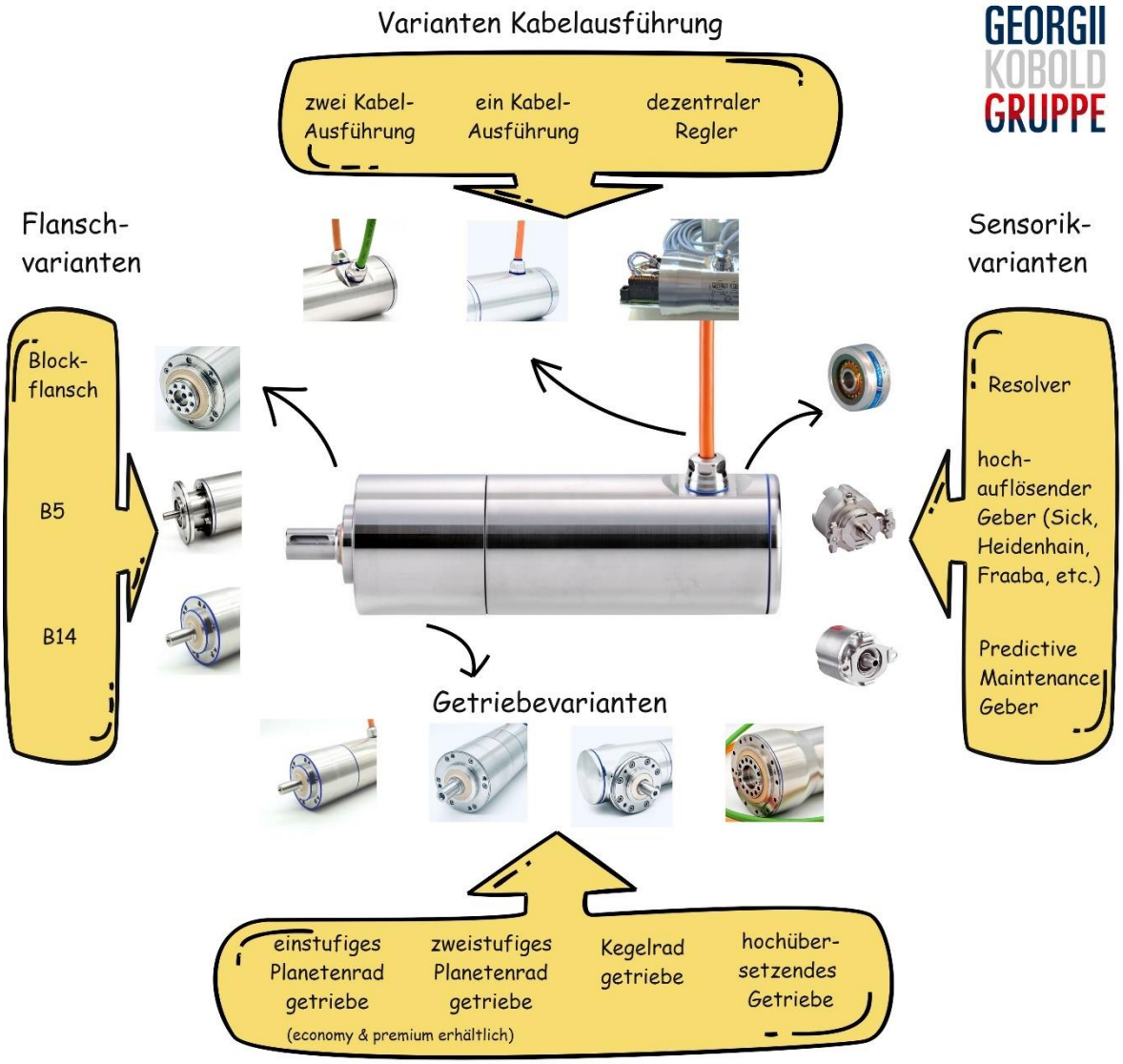



*Abbildung 48: Varianten Getriebe und Motoren Food& Beverage von Georgii Kobold. Die Condition Monitoring Lösungen wurden von Georgii Kobold mit ins Produktprogramm aufgenommen.*

# Berichtsblatt

| | |
|---|---|
| **1. ISBN oder ISSN**<br>tbd | **2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)**<br>Schlussbericht |
| **3. Titel**<br>AnRox- TEilvorhaben: Intelligente ausfallsichere Antriebe AnRox - Sub-project: Intelligent fail-safe electric motors | |
| **4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]**<br>Stefan Vonderschmidt | **5. Abschlussdatum des Vorhabens**<br>30.06.2024 |
| | **6. Veröffentlichungsdatum** |
| | **7. Form der Publikation**<br>Sonstiges |
| **8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)**<br>GEORGII KOBOLD GmbH & Co. KG | **9. Ber.-Nr. Durchführende Institution** |
| | **10. Förderkennzeichen**<br>19A21004E |
| | **11. Seitenzahl** |
| **12. Fördernde Institution (Name, Adresse)**<br>BMWK | **13. Literaturangaben** |
| | **14. Tabellen** |
| | **15. Abbildungen** |
| **16. DOI (Digital Object Identifier)** | |
| **17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)** | |
| **18. Kurzfassung**<br>Im Verbungprojekt AnRox wird die Ausfallsicherheit in autonim fahrenden Fahrzeugen untersucht. Im Teilvorhaben Intelligente ausfallsichere Elektromotoren werden die Prüflinge für das Projekt AnRox entwickelt und gefertigt. Es werden mehrphasige Elektromotoren auf ihre Ausfallwahrscheinlichkeit untersucht. Es wird untersucht wie Condition Monitoring die Ausfallwahrscheinlichkeit von Elektromotren reduzieren kann. | |
| **19. Schlagwörter**<br>Elektromotor, Predictive Maintenance, Condition Monitoring, mehrphasige Elektromotoren | |
| **20. Verlag** | **21. Preis** |

**Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2511440-12**

# Document control sheet

| | |
|---|---|
| **1. ISBN or ISSN**<br>tbd | **2. type of document (e.g. report, publication)**<br>Veröffentlichung (Publikation) |
| **3. title**<br>AnRox- TEilvorhaben: Intelligente ausfallsichere Antriebe AnRox - Sub-project: Intelligent fail-safe electric motors | |
| **4. author(s) (family name, first name(s))**<br>Stefan Vonderschmidt | **5. end of project**<br>30.06.2024 |
| | **6. publication date** |
| | **7. form of publication**<br>Document Control Sheet |
| **8. performing organization(s) name, address**<br>GEORGII KOBOLD GmbH & Co. KG | **9. orginators report no.** |
| | **10. reference no.**<br>19A21004E |
| | **11. no. of pages** |
| **12. sponsering agency (name, address)**<br>BMWK | **13. no. of references** |
| | **14. no. of tables** |
| | **15. no. of figures** |
| **16. DOI (Digital Object Identifier)** | |
| **17. presented at (title, place, date)** | |
| **18. abstract**<br>The AnRox joint project is investigating fail-safety in autonomous vehicles. In the sub-project Intelligent fail-safe electric motors, the test specimens for the AnRox project are being developed and manufactured. The probability of failure of multiphase electric motors is being investigated. It is being investigated how condition monitoring can reduce the probability of failure of electric motors. | |
| **19. keywords**<br>Electric motor, predictive maintenance, condition monitoring, multiphase electric motors | |
| **20. publisher** | **21. price** |

**Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2512668-7**