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

Abschlussbericht

Technische Universität Ilmenau

Fachgebiet System- und Software-Engineering

Zuwendungsempfänger	Technische Universität Ilmenau Fachgebiet System- und Software-Engineering
Förderkennzeichen	19A21004M
Vorhabensbezeichnung	AnRox – Ausfallsicheres und effizientes elektrisches Antriebssystem für Robotertaxis Teilvorhaben: Bewertungsmethodik Zuverlässigkeit
Laufzeit des Vorhabens	01.04.2021 – 31.06.2024
Leiter des Teilvorhabens mit Telefon, Fax und E-Mail	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Armin Zimmermann Tel.: +49 3677 69 4420 Fax: +49 3677 69 1285 armin.zimmermann@tu-ilmenau.de
Datum	10.12.2024

© Copyright 2024 Technische Universität Ilmenau - Fachgebiet System- und Software-Engineering

Projektkoordination

Dr. Kirill Gorelik
Robert Bosch GmbH
Postfach 10 60 50
70049 Stuttgart
Telefon: +49 711 811-21135, Fax: +49 711 811-0
kirill.gorelik@de.bosch.com

Teilvorhabensleitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Armin Zimmermann
Technische Universität Ilmenau
Fachgebiet System- und Software-Engineering
Postfach 100 565
Telefon: +49 3677 69 4420, Fax: +49 3677 69 1285
armin.zimmermann@tu-ilmenau.de

Autor:innen

Sascha Schmidt, +49 3677 69 4421, sascha.schmidt@tu-ilmenau.de
Armin Zimmermann, +49 3677 69 4420, armin.zimmermann@tu-ilmenau.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **3**
Abbildungsverzeichnis **4**
Abkürzungsverzeichnis **5**
1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse **6**
1.1 AP1: Identifikation von Anforderungen an Antriebs-, Fahrwerkssysteme und Energiebordnetze eines Robotertaxis 6
1.2 AP2: Ausfallsichere und intelligente Antriebssysteme und Energiebordnetze 7
1.2.1 AP2.1: Morphologische Analyse und Design ausfallsicherer und intelligenter Topologien 7
1.3 AP4 – Validierung 18
AP4.2.3: Validierung der Vorzugslösungen inkl. zugehöriger Betriebsstrategie 18
1.4 Andere wesentliche Ereignisse 20
1.4.1 Veranstaltungen und Workshops 20
1.4.2 Fachvorträge und Veröffentlichungen 21
1.4.3 Ereignisse, die den Fortgang des Projekts beeinflussen 22
2 Vergleich des Vorhabenstands mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit-, und Kostenplanung **22**
3 Aussichten auf das Erreichen der Ziele des Vorhabens **24**
4 FE-Ergebnisse Dritter, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind **24**
5 Änderungen der Zielsetzung **24**
6 Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans **24**
6.1 Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen 25
6.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten 25
6.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten 25
6.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit 25
Anhang A: Zeitplanung des Vorhabens **26**
Literaturverzeichnis **27**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Petri-Netz-Beispielmodell mit Betriebsstrategie, Fahrzyklus und Komponentenausfall8
Abbildung 2: Erweitertes SPN bestehend aus Lastmodell, Betreiberstrategie, Fahr- und Reparaturzyklus, Ausfällen und generischem Komponenten-Ausfallmodell.....9
Abbildung 3: Abbildung der Wirkung von degradierten Teilsystemen auf das Gesamtsystem Fahrzeug.....11
Abbildung 4 Ausfallmodell eines Teilbordnetzes der Zentral-Energiebordnetzarchitektur.....14
Abbildung 5 Ausfallmodel eines HV-Kanals der Zentral-Energiebordnetzarchitektur.....15
Abbildung 6 Hierarchisch verschachtelte Module einer Fahrzeugvariante.....15
Abbildung 7 Integriertes Systemmodell der beschriebenen Fahrzeugvariante.....16
Abbildung 8 Ausfallmodell des Fahrzeuges basierend auf Kombinatorik der Subsystemzustände 17

Abkürzungsverzeichnis

SPN	Stochastisches Petri Netz
SSE	Fachgebiet System- und Software-Engineering

1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und andere wesentliche Ereignisse

Dieser Abschlussbericht ist eine Fortschreibung des letzten Zwischenberichts und ergänzt die Ergebnisse des Zeitraums von Januar 2024 bis zum Projektende. Im finalen Berichtszeitraum wurde die Methodik in Arbeitspaket 2.3.6 finalisiert (siehe Seite 7) und zur Validierung an einem Beispielsystem (siehe Seite 18) angewendet. Auf die Herausforderungen die Seitens SSE den Projektfortschritt beeinflusst haben und die Notwendigkeit einer kostenneutralen Projektverlängerung zur Erreichung der Ziele geht Abschnitt 2 näher ein.

1.1 AP1: Identifikation von Anforderungen an Antriebs-, Fahrwerkssysteme und Energiebordnetze eines Robotertaxis

AP1.2.2: Ableitung der Anforderungen an Verfügbarkeit und degradierten Betrieb

In Zusammenarbeit mit den beteiligten Projektpartnern wurde in regelmäßigen Arbeitsgruppenmeetings eine gemeinsame Terminologie sowie ein Verständnis darüber etabliert, welche Verfügbarkeitsanforderungen unter Einbezug der Fahrzeugzustände (Normalbetrieb, degradierter Betrieb und Fehlerhaft) existieren. Außerdem fanden Gespräche mit dem Partner EDI bezüglich der Leistungsfähigkeit des Dynamic Risk Management Algorithmus statt. In den Gesprächen wurden erste Ideen zur Bewertung der KI mit Hilfe der vom Fachgebiet SSE zu entwickelnden stochastischen Petri-Netz-Modelle entwickelt. Die vorhergesagten Risikowahrscheinlichkeiten des DRM-Algorithmus können als Parameter in das Simulationsmodell derart einfließen, dass ein optimiertes Fahrprofil durch Simulation abgeleitet werden kann. Parameter, welche als mathematische Leistungsmaße in den zu entwickelnden Modellen definiert werden, wurden gemeinsam mit den Projektpartnern identifiziert und beim Konsortialtreffen am 30.11.2021 präsentiert.

Im Projektzeitraum Q4 und Q5 fanden weiterhin Termine zur Abstimmung mit den Projektpartner statt. Die verschiedenen Betriebsarten und (verfeinerten) Betriebszustände des Fahrzeuges wurden in einem weiteren Petri-Netz Modell abstrakt beschrieben. Die Modellparameter (stochastische Dauern und Wahrscheinlichkeiten) wurden zur Überprüfung der Machbarkeit in Kooperation mit den beteiligten Projektpartnern abgestimmt. Zur Berechnung der Fahrzeugverfügbarkeit, unter Betrachtung der dynamischen Auswirkungen von Störfällen, wurden die mathematischen Leistungsmaße verfeinert und erweitert. Die Erkenntnisse sowie das methodische Vorgehen flossen in eine Veröffentlichung [1], welche bei der PSAM16 Konferenz angenommen und vorgestellt wurde.

Im Projektzeitraum Q6 und Q7 wurden die Arbeiten weiter begleitet und Gespräche zur Abstimmung geführt. Die im Verlauf gewonnen Erkenntnisse und das gewachsene Systemverständnis floss in Form verschiedener Modellkomponenten (und deren Anpassung) in die bisherigen Modelle ein. Die Ergebnisse aus dem Arbeitspaket wurden im Rahmen des Konsortialtreffens (November 22‘) von den Projektpartnern präsentiert. Der Anteil seitens SSE wurde in den Vortrag zu AP2.3.6 integriert.

1.2 AP2: Ausfallsichere und intelligente Antriebssysteme und Energiebordnetze

1.2.1 AP2.1: Morphologische Analyse und Design ausfallsicherer und intelligenter Topologien

AP2.1.1: Definition der Bewertungskriterien sowie des morphologischen Kastens für Antriebssysteme

Die regelmäßig stattgefundenen Arbeitsgruppen-Termine der beteiligten Projektpartner wurden begleitet. Die Erfahrungen des Fachgebiets aus vorherigen Architektur-Optimierungs-Projekten in Bezug auf die Beschreibung von Architekturvarianten und Definition von Bewertungskriterien wurden eingebracht. Petri-Netze wurden als passende Modellart für Komponentenmodule festgelegt, um daraus abstrakte Systemmodelle der Fahrzeugvarianten zusammenzusetzen. Der morphologische Kasten dient dabei als Basis zur Modellierung der Komponenten. Aufbau (Struktur, Prozess) und Kenngrößen wie Ausfallraten, Reparaturdauern wurden mit den einzelnen Experten für Antrieb und Energiebordnetz in den Arbeitsgruppen ermittelt. Die Vollständigkeit und Passfähigkeit der strukturellen Elemente und Schnittstellen wurde in regelmäßigen Gesprächen mit den Partnern sichergestellt. Ergänzend dazu wurden mathematische Leistungsmaße definiert. Diese ermöglichen die simulative Berechnung der identifizierten Bewertungsgrößen.

Im Projektzeitraum Q4 und Q5 wurde weiterhin in regelmäßigen Arbeitsgruppen-Terminen an den Elementen und Aufbau des morphologischen Kastens mitgewirkt, um die Passfähigkeit der Schnittstellen und Abbildbarkeit der Baukasten-Elemente sicherzustellen. Die benötigten Inputs in Form von Ausfallraten und Übergangswahrscheinlichkeiten der Fehler- und Betriebszustände wurden benannt. Exemplarisch wurde ein generisches Komponenten-Ausfallmodell erstellt um das Vorgehen sowie den Fokus der Modellierung und Analyse durch SSE aufzuzeigen. In einer Veröffentlichung [1] wurde die Methodik zur Bewertung von verschiedenen Architekturvarianten (Redundanz vs. keine Redundanz) hinsichtlich Zuverlässigkeit und eines Kosten-Nutzen Tradeoffs präsentiert.

Im Projektzeitraum Q6 und Q7 wurde die Arbeit der Projektpartner am morphologischen Kasten weiter begleitet. Damit wurde das Systemverständnis weiter ausgebaut. Um die Modellierbarkeit mittels Petri-Netzen zu gewährleisten, wurden erste Modellvarianten mit Hilfe des morphologischen Kastens (zwischenstand) systematisch, manuell zusammengestellt. Damit wurden Vorarbeiten für die spätere, automatisierte Systemkomposition, geleistet und erste Lösungsansätze zur Beschreibung mittels domänenspezifischer Sprachen (DSL) in Verbindung mit Object Constraint Languages (OCL). Die Ergebnisse aus dem Arbeitspaket wurden im Rahmen des Konsortialtreffens (November 22‘) von den Projektpartnern präsentiert. Der Anteil seitens SSE wurde in den Vortrag zu AP2.3.6 integriert.

Im Projektzeitraum Q8 und Q9 wurde weiterhin konzeptionell an der automatisierten Systemkomposition gearbeitet bei der die modularen Systemkomponenten (Petri-Netz Modelle) durch geeignete (Petri-Netz-)Stellen und Aktivierungsfunktionen synchronisiert werden müssen.

Aufgrund der in Abschnitt 1.4.3 genannten personellen Herausforderungen wurde der Fokus auf die Finalisierung der Methodik zur Zuverlässigkeitsbewertung und deren Validierung gelegt. Die Vorar-

beiten zur automatisierten Generierung von Systemmodellen wurden niedriger priorisiert. Diese werden jedoch mittelfristig als Forschungsfrage in studentischen Arbeiten und Dissertationen verwertet und weiter vorangetrieben.

AP2.1.2: Definition der Bewertungskriterien sowie des morphologischen Kastens für Energiebordnetze

Siehe AP2.1.1; Entsprechend für Energiebordnetz.

AP2.2.2: Diagnose- sowie Fehlerbehandlungsstrategien inkl. Performanceprädiktion für Antriebssysteme

Die Arbeiten und Arbeitsgruppentermine der beteiligten Projektpartner wurden begleitet, um die Vollständigkeit und Übertragbarkeit der Fehlerbehandlungsstrategien in stochastische Verhaltensmodelle abzusichern. Das Fachgebiet SSE setzt stochastische Petri Netze (SPN) als geeignete Modellart ein. Die Vorteile gegenüber konventionellen Fehlerbäumen sowie entsprechender vom Fachgebiet entwickelter Softwaretools sowie die Grenzen dieser Modellart wurden den Projektpartnern präsentiert. Vorarbeiten zur Modellierung mit Petri-Netzen und deren Simulationen finden sich in [12]. Beispielmodelle wurden entwickelt und im Konsortium vorgestellt (Beispiel siehe Abbildung 1).

Im Projektzeitraum Q4 und Q5 wurden die ersten Beispielmodelle weiterentwickelt (s.a. Abbildung 2) und an die iterativ identifizierten Anforderungen im Projekt angepasst. Die korrekte Wahl der Modellart wurde überprüft und Fortschritte hinsichtlich der Abbildbarkeit flossen in eine Veröffentlichung [7] ein. Eine Herausforderung stellt die Bewertung von KI-Modulen dar. Hierzu fanden regelmäßig Besprechungen mit den verantwortlichen Personen im Projekt statt, um sowohl das Vorgehen sowie die Möglichkeiten und Zuständigkeiten der Partner abzustimmen.

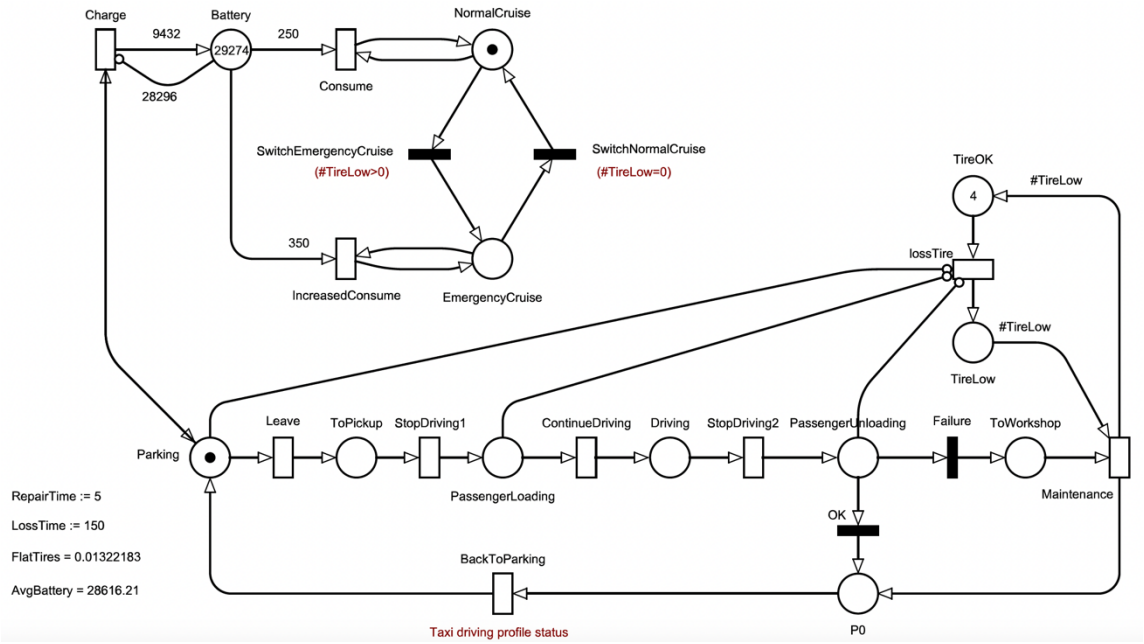


Abbildung 1: Petri-Netz-Beispielmodell mit Betriebsstrategie, Fahrzyklus und Komponentenausfall

Im Projektzeitraum Q6 und Q7 wurde der Austausch zur Bewertung von KI-Modulen im Kontext intelligenter Derating Strategien ausgebaut. Die Herausforderungen zur Modellierung der KI-Module konnten nicht gänzlich überwunden werden. Der Effekt beim Einsatz dieser Verfahren kann jedoch durch eine mikroskopische Simulation seitens der Projektpartner ermittelt werden. Somit lassen sich einerseits Messdaten für eine konventionelle Auslegung ohne künstliche Intelligenz generieren als auch für Auslegungen mit künstlicher Intelligenz. Das Fachgebiet SSE fokussierte sich auf die makroskopische Gesamtsystemebene und vergleicht Varianten hinsichtlich der definierten Bewertungskriterien unter Verwendung der Ergebnisse der mikroskopischen Simulation als aggregierte Parameter in den stochastischen Petri-Netzen.

Im Projektzeitraum Q8 und Q9 wurden die Überlegungen, Ergebnisse und Herausforderungen zur Bewertung von KI-Modulen in das Arbeitspaket AP 2.3.6 übernommen und dort weiter behandelt.

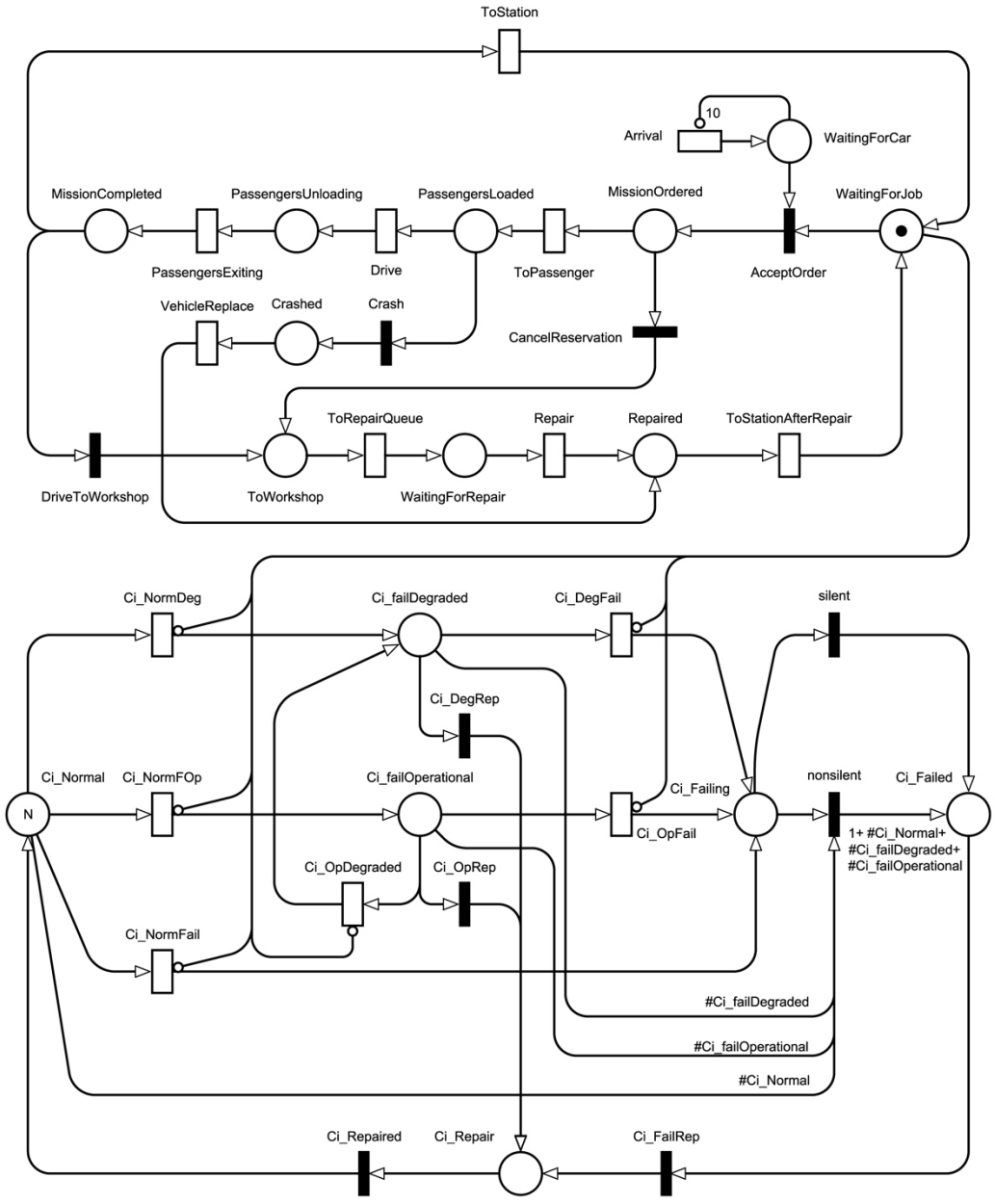


Abbildung 2: Erweitertes SPN bestehend aus Lastmodell, Betreiberstrategie, Fahr- und Reparaturzyklus, Ausfällen und generischem Komponenten-Ausfallmodell

AP2.3.3: Betriebsstrategien zur Steuerung von Antriebs-, Brems- und Lenksystemen auch unter Einsatz von KI-Methoden

Die Arbeitsinhalte des Arbeitspakets wurden in den übergreifenden Arbeitsgruppen und Regelterminen zur Zuverlässigkeitsbewertung bearbeitet. Petri-Netz-Modelle mit Modulen zur Verhaltensbeschreibung und Auswirkung von KI-Modulen wurden im Rahmen der Arbeit an AP 2.3.6 sowie AP 2.2.2 entwickelt.

AP2.3.6: Methodik zur Bewertung der Zuverlässigkeit, KI-basierter Betriebsstrategien und Diagnoseverfahren

In dem Berichtszeitraum Q1 bis Q7 fanden maßgeblich Vorarbeiten in den Arbeitspaketen (2.1.1, 2.2.1, 2.2.2) mit Schnittstellen zu AP 2.3.6 statt. Dazu gehören die Erarbeitung des morphologischen Kastens, der Betriebsstrategien, der Diagnoseverfahren und der Identifikation verschiedener Systemvarianten aus der Perspektive der Modellierbarkeit als stochastisches Systemmodell seitens SSE.

Im Projektzeitraum Q8 und Q9 wurde der Fokus auf die Bewertung und Integration der von den Projektpartnern entwickelten KI-Verfahren gelegt. Seitens SSE werden für den Variantenvergleich auf Gesamtsystemebene aggregierte Zuverlässigkeitsparameter in Form von Fehlerraten oder eines Restfehlers der KI in die Petri-Netz Modelle übernommen. Die Zuverlässigkeit der mikroskopisch vorbewerteten KI-Module sowie das abstrahierte Verhalten in Form von bspw. Steuer- und Regelentscheidungen fließt damit in die Gesamtbewertung ein. Simulativ lassen sich aus dem dynamischen Verhalten der Module und deren Wechselwirkung Aussagen zur möglichen Verbesserung gegenüber einem konventionellen Regel- und Steueralgorithmus schließen. Mit den definierten mathematischer Leistungsmaßen und der von SSE weiterentwickelten Simulationsumgebung TimeNET [13] können die Effekte effizient berechnet werden.

Die Zuverlässigkeit des Fahrzeuges wird bestimmt durch das Ausfallverhalten seiner Teilsysteme und deren kombinatorischer Auswirkung. Deutlich schwieriger als in der Projektplanung vermutet gestaltete sich die Bestimmung der Menge der (Teil-)Ausfälle innerhalb des modularen Baukastens, ihrer komplexen Abhängigkeiten sowie die Abschätzung ihrer Größe. Da diese aber Eingangsdaten der entwickelten Modelle sind, gestaltet sich die Ableitung genauerer Ergebnisse der Bewertung schwierig (siehe auch Abschnitt 2). Die Entwicklung der Methodik konnte auch mit, von den Experten angenommenen Werten geschehen. Die Art der Abhängigkeiten der ausfallenden Teilmodule und ihrer Spezifikation gestaltete sich zunächst herausfordernd aber konnte letztlich in zahlreichen Besprechungen innerhalb des Konsortiums geklärt werden. Es wurde eine Abstraktion der (Teil-)Systemzustände in Degradationsgrade vereinbart, sowie eine Abbildung der Wirkung von degradierten Teilsystemen auf das Gesamtsystem Fahrzeug (vergleiche Abbildung 3).

Teilsystem A	Teilsystem B		System
normal	normal		normal
normal	fail-silent		fail-deg
normal	fail-safe		fail-deg
normal	fail-deg		fail-deg
normal	fail-op		fail-op
normal	failed		fail-deg
...	...		...
failed	failed		failed

mapping

(ASIL Dekomposition durch bspw. Redundanzen, Synergien, usw.)

Abbildung 3: Abbildung der Wirkung von degradierten Teilsystemen auf das Gesamtsystem Fahrzeug

Die entstehenden Ausfälle/Degradationen werden mit der Methodik als Zustände eines zeitkontinuierlichen stochastischen Automaten mit aggregiert berechneten Übergangsraten (Ausfallraten) zwischen den Degradationszuständen abgebildet (siehe Abbildung 4). Somit werden wie geplant auch Einzel- und Mehrfachfehler in der Methode betrachtet, was in der klassischen Zuverlässigkeitsbewertung selten geschieht aber im modernen Systementwurf immer wichtiger wird.

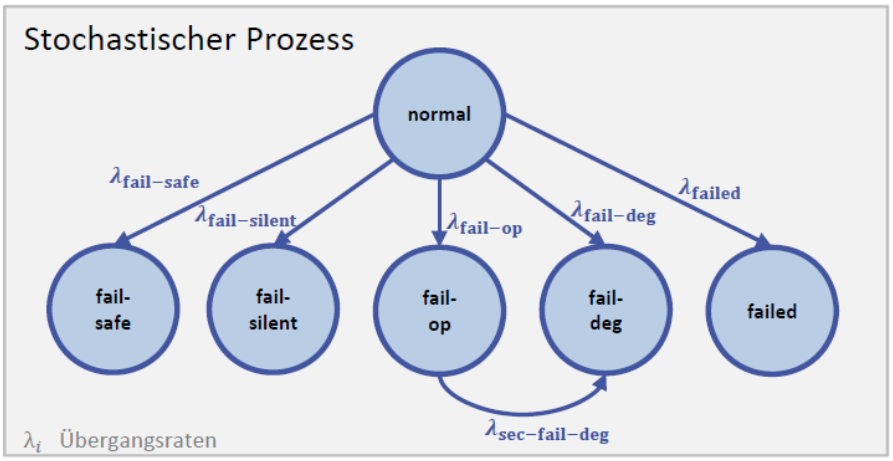


Abbildung 4: Abbildung der Wirkung von degradierten Teilsystemen auf das Gesamtsystem Fahrzeug

Mit der vom SSE gewählten Modellart stochastischer Petri-Netze, konnten die dokumentierten Ausfallparameter auf Teilsystemebene für die lokalen Ausfallmodelle benutzt und die Modulübergreifenden Effekte und Abhängigkeiten modelliert werden. Das ist ein grundsätzlicher Vorteil in der Abbildung dynamischer Vorgänge im Vergleich z.B. zu Fehlerbäumen und konventioneller Fehlerbaumanalyse. Abbildung 5 zeigt beispielhaft zwei Grundelemente statischer und dynamischer Modelle. Auch die Modellierung von Überdeckungsfaktoren bei Fehlerdiagnose und -reaktion, die einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben können, wird so möglich.

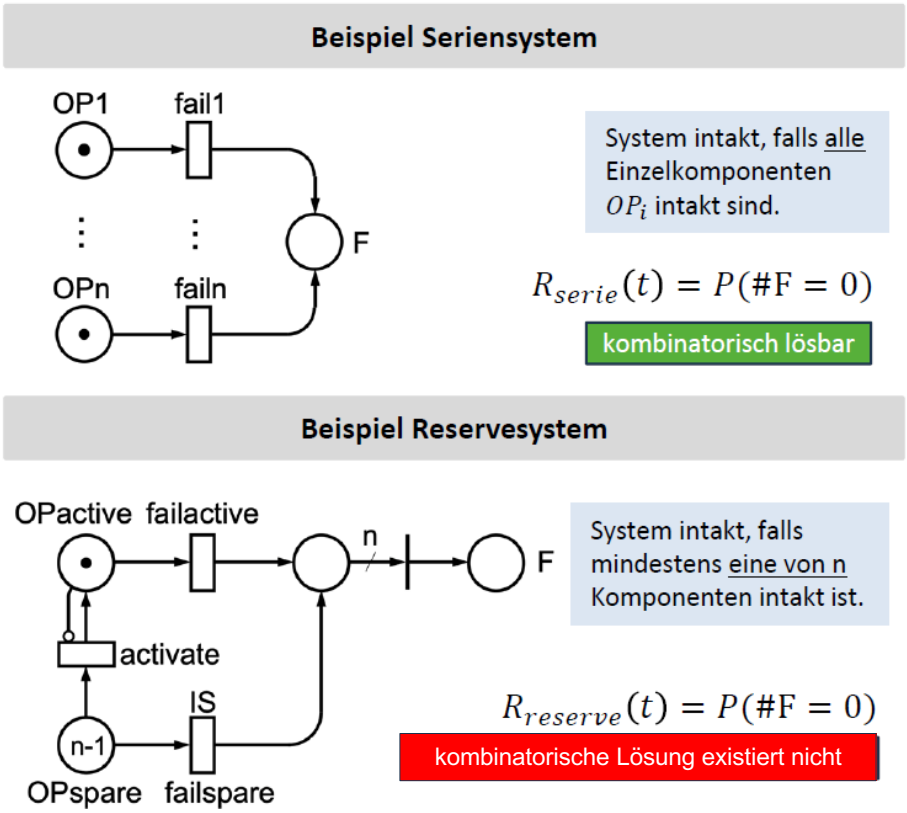


Abbildung 5: Modellgrundelemente für einfache und dynamische Fehler

Nach aktuellem Stand der Technik und Forschung stellt das Quantifizieren von KI-Zuverlässigkeit ein zwar häufig adressiertes, aber nur schwer zu beherrschendes Gebiet dar. Projekte wie „KI Absicherung / Safe AI for Automated Driving“ haben jüngst verschiedene Formen von künstlicher Intelligenz im Kontext autonomer Fahrzeuge untersucht und Methoden zur Absicherung entwickelt. Die beschriebenen Metriken und Methoden helfen dabei, die entwickelten KI-Methoden generell hinsichtlich ihrer Vorhersagegüte mikroskopisch zu bewerten, um damit die definierten Sicherheitsziele nachzuweisen. Die Herausforderung hierbei liegt in der Rechenzeit, welche notwendig ist, um hinreichend viele stochastische Fahrszenarien zu erzeugen und mit ihnen simulativ die relevanten „Corner Cases“ aufzudecken, die zu einem definierten Fehlverhalten der KI-Methode führen.

Von SSE wurden nach Diskussionen und Abstimmung mit den Projektpartnern Teilmodelle entwickelt, die einen geeigneten Abstraktionsgrad von KI-Methoden in Petri-Netzen zeigen. Sie bilden den Einfluss und die Auswirkungen auf das Gesamtsystem ab, ohne den KI-Algorithmus als solches detailliert zu modellieren – und damit die Möglichkeit einer effizienten Simulation zu verhindern. Abbildung zeigt ein Petri-Netz Modell mit Steuerbefehlen, einfachem Cruise Control Verhalten und KI-Steuerentscheidungen basierend auf Geschwindigkeit und Temperatur.

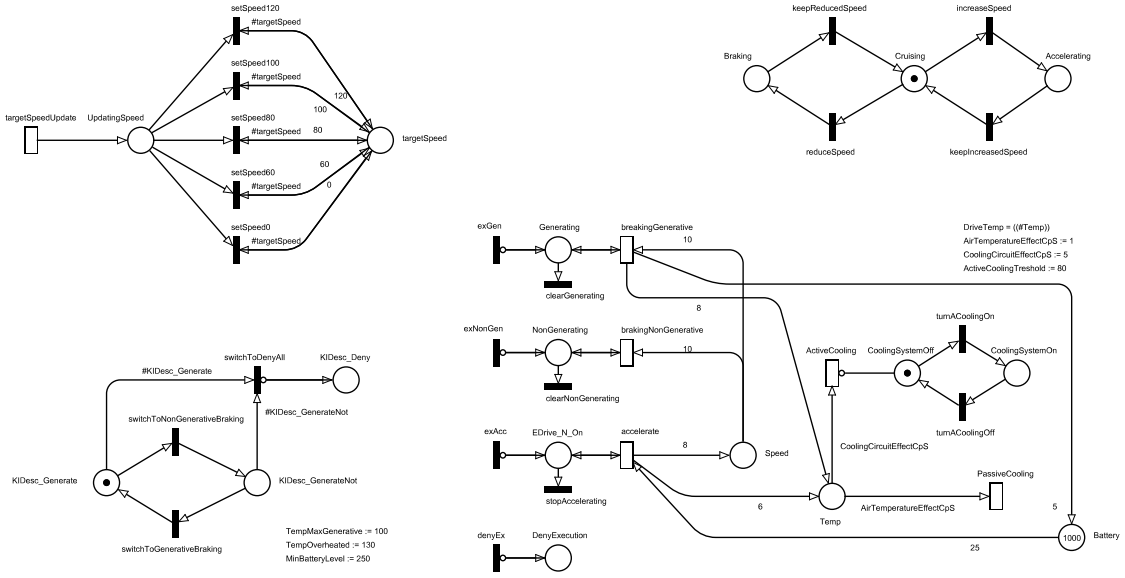


Abbildung 6: Petri Netz Modell mit exemplarischen Lastanforderungen und Verhalten von Geschwindigkeit, Temperatur und Batteriestand mit abstrahierter KI-Steuerung

Mit der von SSE mitgebrachten Expertise im Bereich der Rare-Event Simulation [15] wurde neben der Modellierung von Systemvarianten mit den Projektpartnern daran gearbeitet, Methoden zur Beschleunigung der Simulation zu entwickeln. Eine Adaption des Multi-Trajectory Simulationsalgorithmus [14] zur gezielten Untersuchung der „Corner Cases“ und effizienteren Quantifizierung und Aggregation der benötigten KI-Zuverlässigkeitsparameter wurde konzeptionell erarbeitet. Die durchgeführte Literaturanalyse sowie erste Versuche und Diskussionen erwies sich als vielversprechende Forschungsfrage. Die Vorarbeiten werden mittelfristig in studentischen Arbeiten verwertet und bei Erfolg langfristig in Veröffentlichungen fließen. Im Ergebnis für AnRox ist es noch ein offenes Forschungsthema, wie genau die Zuverlässigkeit von KI-Algorithmen gemessen und quantifiziert werden sollte. Projektpartner Bosch und SSE kooperieren zu diesem Thema, das sich aus dem Projektkontext ergeben hat. Es besteht die Hoffnung, dass das vermutlich notwendige modellbasierte aufwändige Testen mit Simulation für derartige hoch sicherheitskritische Anwendungen mit ihren extremen Sicherheitsanforderungen durch die Anpassung von Methoden der Simulation seltener Ereignisse (ein Forschungsthema von SSE [15]) implementiert und beschleunigt werden kann. Dazu liefen bereits Abstimmungen mit Bosch, die ebenfalls bei positiven Ergebnissen über die Thematik von AnRox hinaus in zukünftigen Veröffentlichungen und Projekten verwertet werden kann.

In der abschließenden Phase des Projektes wurde die Methodik weiter verfeinert, um die holistische Bewertung der Systemvarianten sicherzustellen. Die iterativ gewonnenen Erkenntnisse und Entscheidungen aus den Arbeitsgruppen (AG Energiebordnetze, AG Antriebssysteme, AG Zuverlässigkeitsbewertung) wurden in den von SSE modellierten Petri-Netz-Modulen des modularen Systembaukastens umgesetzt. Zur Validierung der Methode (vgl. 1.3) wurden ausgewählte Fahrzeugvarianten aus Modulen des Baukastens vereint und quantitativ bewertet. Das methodische Vorgehen wird im Folgenden anhand einer Systemvariante beschrieben.

Der morphologische Kasten für Antriebssysteme und Energiebordnetze stellt die Basis der Petri-Netz-Module dar. In ihm ist das mit den Partnern gesammelte, interne Degradationsverhalten der Teilsysteme (bspw. Teilwicklungssystem, Antriebswelle, Teilbordnetz, Trennelement, HV-Versorgung) entsprechend ihrer Betriebsstrategie (bspw. Derating) anhand von Fehlerfällen und deren Auftretenshäufigkeiten tabellarisch beschrieben. Aus dieser umfangreichen statischen Beschreibung für einzelne Fehlerfälle modellierte SSE kompakte, stochastische Verhaltensmodelle mit aggregierten Ausfallraten und Zustandsübergängen. Abbildung 4 zeigt das Petri-Netz-Modul eines Teilbordnetzes der Zentral-Energiebordnetzarchitektur.

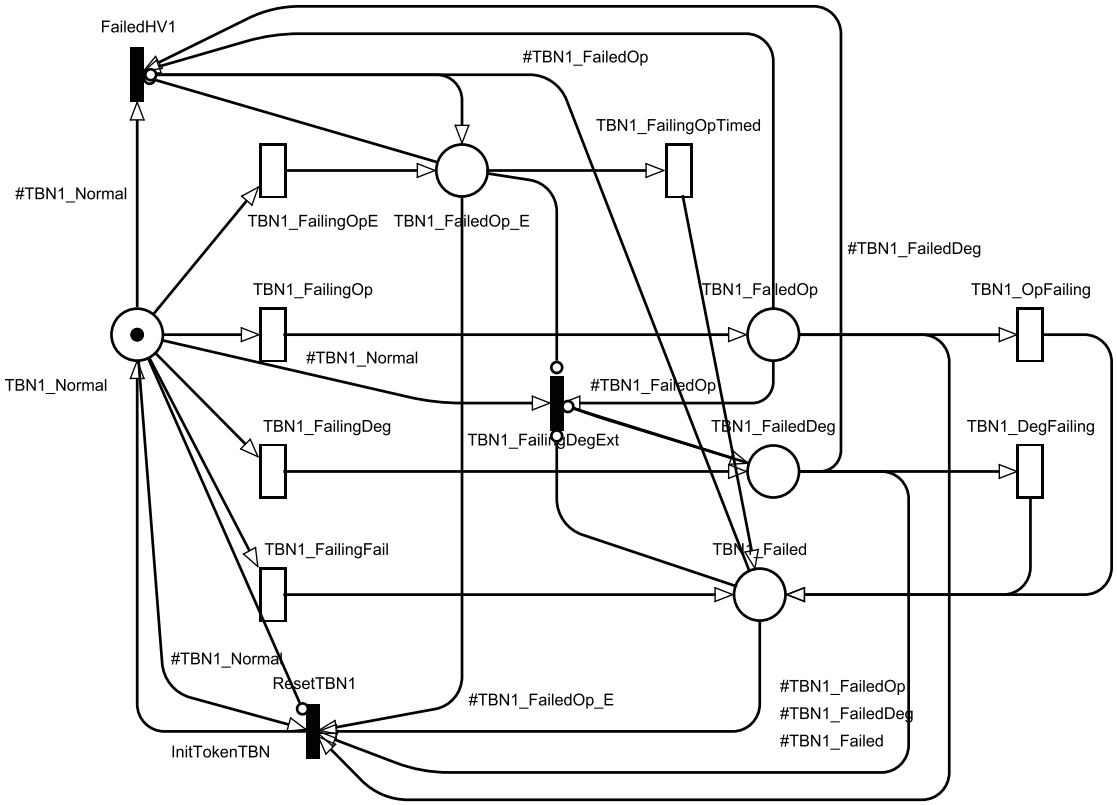


Abbildung 4 Ausfallmodell eines Teilbordnetzes der Zentral-Energiebordnetzarchitektur

Initial befindet sich das Modul in dessen normalen, fehlerfreien Zustand *TBN1_Normal.* Das Auftreten von internen Fehlern wird durch die Transitionen *TBN1_FailingOpE, TBN1_FailingOp, TBN1_FailingDeg, TBN1_FailingFail, TBN1_OpFailing, TBN1_DegFailing, TBN1_FailingOpTimed* modelliert. Diese Transitionen schalten mit exponentiell verteilten *Delays.* Das Delay entspricht der Reziproken der aggregierten Failure In Time (FIT) Werte für die identifizierten Fehlerfälle. Die Transitionen *FailedHV1, TBN1_FailingDegExt* und *ResetTBN1* modellieren nicht-zeitbehaftete Zustandsübergänge. Dies können einerseits auf Wahrscheinlichkeiten basierende Entscheidungen sein (Fehlerdiagnose erfolgreich, Fehlerdiagnose nicht erfolgreich) oder durch Guards abbildbare, dependant Failures. Guards sind boolesche Ausdrücke, die zusätzlich zur allgemeinen Schaltregel in Petri-Netzen ausgewertet werden. Die Transition *FailedHV1* in Abbildung 4 enthält den Guard

(*HV1_Failed=1)* und modelliert den sofortigen Ausfall des Teilbordnetzes infolge des Ausfalls der Hochvoltversorgung in Abbildung 5.

Entsprechend dieses Beispiels können sämtliche Module einer Systemvariante miteinander verschaltet werden, um die komplexen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der jeweiligen ASIL-Dekomposition, über Modulgrenzen und Systemebenen (Komponente, Teilsystem, Fahrzeug) hinweg zu modellieren.

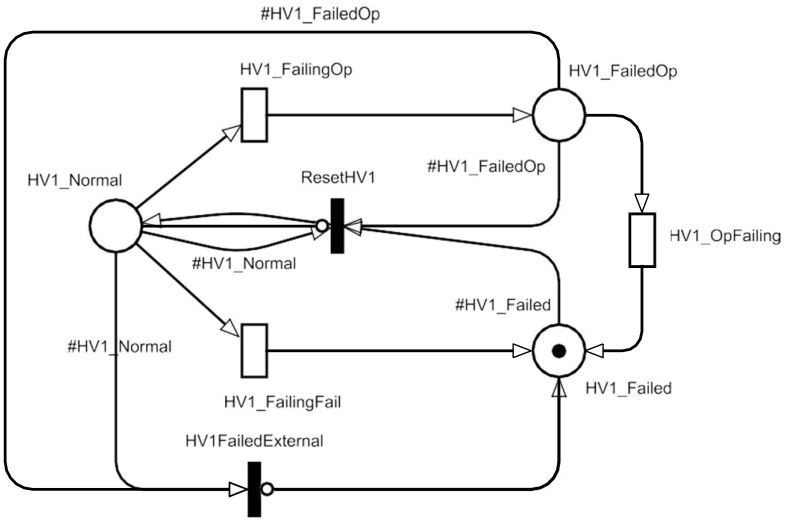


Abbildung 5 Ausfallmodel eines HV-Kanals der Zentral-Energiebordnetzarchitektur

Eine schematische Darstellung der hierarchischen Beziehungen innerhalb einer Fahrzeugvariante zeigt Abbildung 6. Ein Antrieb enthält Teilwicklungssysteme (TWS) und eine Welle, ein Antriebssystem enthält Antriebe. Für das Energiebordnetz gilt äquivalent: Ein Energiebordnetz besteht aus Hochvoltkanälen (HV), Teilbordnetzen (TBN), Trennelementen (TE) und Energiebordnetzfunktionen (FKT). Weiter besteht ein Fahrzeug aus einem Energiebordnetz sowie einem Antriebsystem.

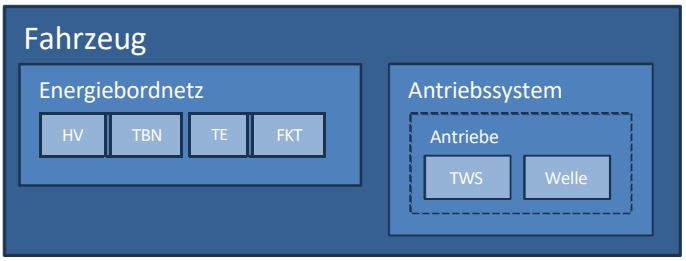


Abbildung 6 Hierarchisch verschachtelte Module einer Fahrzeugvariante

Ein konkretes Exemplar einer Fahrzeugvariante entspricht dem Systemmodell, welches durch Auswahl und Integration der modellierten Petri-Netz-Module sowie Abbildung der kombinatorischen Wechselwirkungen entsteht. Durch Integration der Module zu einem Systemmodell kann das Ver-

halten des Fahrzeuges ganzheitlich simuliert werden. Die Abbildbarkeit und Analyse der Wechselwirkungen, Abhängigkeiten und Auswirkungen mehrerer Fehlerzustände in einem dynamischen System ist ein maßgeblicher Vorteil stochastischer Verhaltensmodelle gegenüber der konventionellen Fehlerbaumanalyse (FTA). In Abbildung 7 ist das vollständige Systemmodell der Fahrzeugvariante (Energiebordnetz: Zentral-Architektur, Antrieb: Achsindividuell 2xPSM + 2xLevel B6) in der von SSE entwickelten Software TimeNET (Version 4.4) dargestellt. Erweiterungen zur Modellierung der Petri-Netz-Module, als auch Funktionalität zu deren Integration in Systemmodelle fanden in der Projektlaufzeit statt.

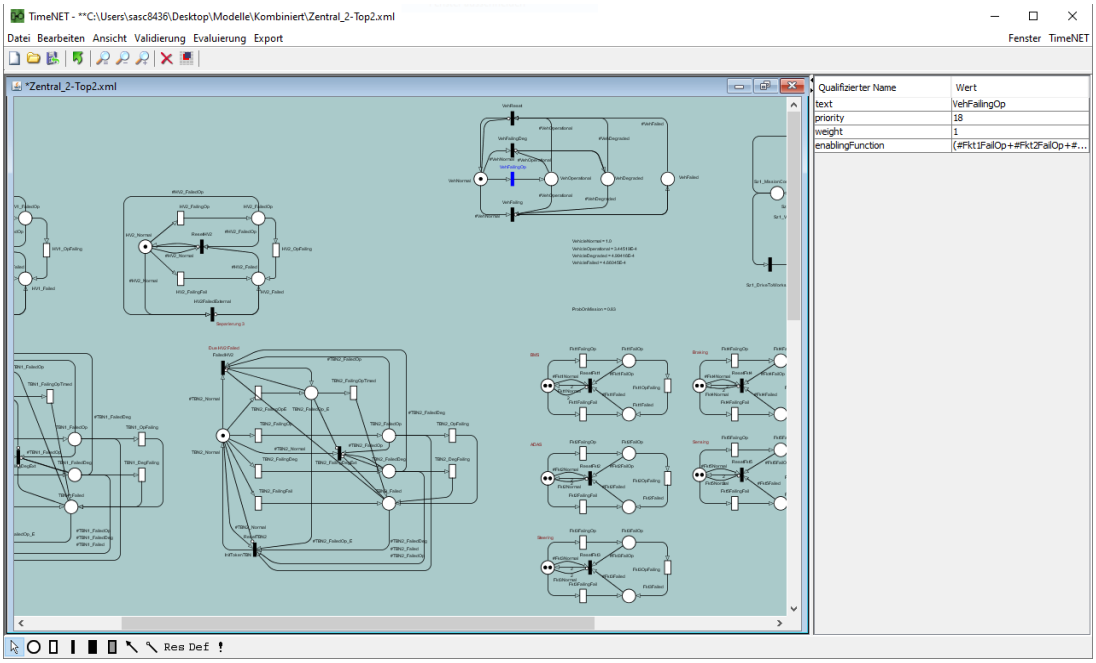


Abbildung 7 Integriertes Systemmodell der beschriebenen Fahrzeugvariante

Die Erstellung von Systemmodellen der Fahrzeugvarianten aus dem Modulbaukasten stellt den Abstraktions- und Modellierungsanteil des Systementwurfs dar. Für die Bewertung der Varianten auf Gesamtsystemebene wird jede Variante in ein angenommenes Fahrszenario eingebettet. Das Fahrszenario modelliert den Betrieb des Fahrzeuges als stochastischen Prozess bei dem Passagiere einsteigen, befördert werden und wieder aussteigen sowie Leerfahrten, Standzeiten und Reparaturroutinen beim Auftreten von Ausfällen. Mit der Modellierung dieses Lastmodells und der vereinfachten Betreiberstrategie kann die Zuverlässigkeit des Fahrzeuges im Betrieb berechnet werden. Dies ermöglicht die Quantifizierung, des Anteils an Fehleroperabilität bis zur Verletzung des Sicherheitsziels. Das in Abbildung 8 dargestellte Petri-Netz modelliert die drei übergreifenden Fahrzeugzustände Normal, Safe und Fail. Das Fahrzeug befindet sich in dem fehlerfreien Zustand, wenn *VehNormal* eine Markierung aufweist. Entsprechend bedeuten die Markierungen von *VehOperational* und *VehDegraded* den sicheren Betrieb im Fehlerfall sowie die Markierung von *VehFailed* das Verletzen des Sicherheitsziels während einer Fahrt. Die Übergänge zwischen den Zuständen werden durch komplexe Guards an den nicht-zeitbehafteten Transitionen realisiert. Sie werten die von

innen nach außen propagierten, internen Degradationszustände der Teilsysteme entsprechend ihrer kombinatorischen Semantik auf Fahrzeugebene aus.

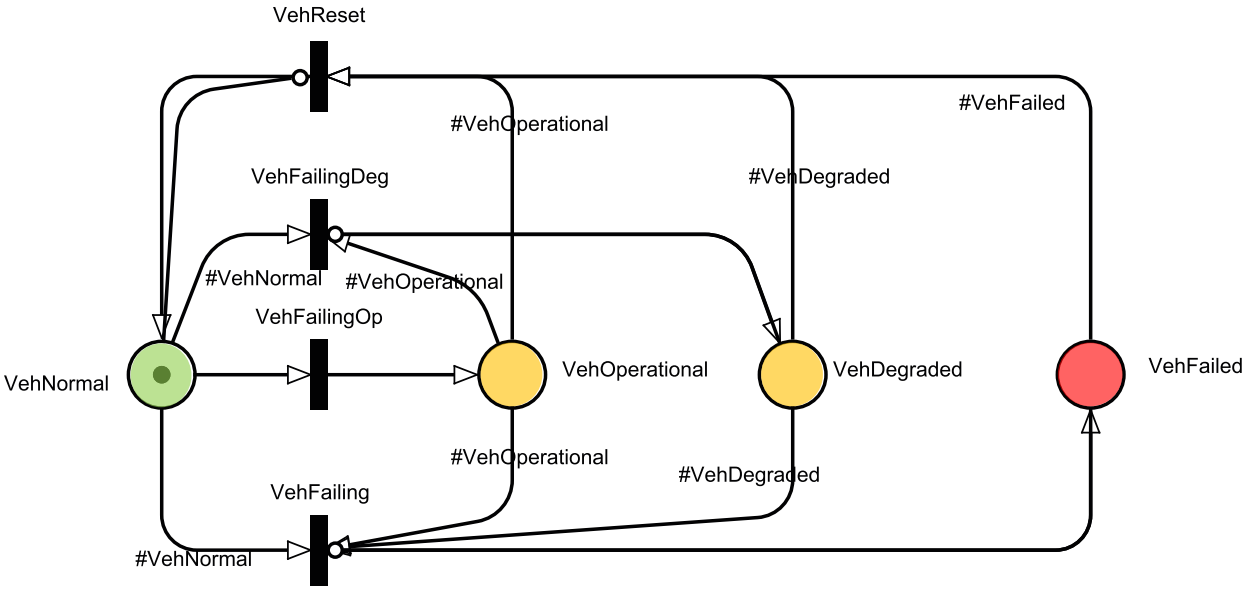


Abbildung 8 Ausfallmodell des Fahrzeuges basierend auf Kombinatorik der Subsystemzustände

Neben dem in TimeNET entwickelten graphischen Modelleditor implementiert das Werkzeug sowohl numerische als auch simulative Verfahren zur Bewertung von stochastischen Petri-Netzen. Diese Verfahren simulieren effizient das modellierte, dynamische Systemverhalten. Mit dem Konzept der Leistungsmaße kann TimeNET, die nur dynamisch zu berechnenden Systemparameter ermitteln, welche die Zuverlässigkeit einer Fahrzeugvariante im Betrieb bestimmen. Leistungsmaße sind mathematische Ausdrücke nach denen die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten in Systemzuständen berechnet werden. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit im degradierten aber noch sicheren Fahrzeugzustand „safe“ wird durch das folgende Leistungsmaß abgebildet.

$$P(safe) = (\#VehOperational + \#VehDegraded) = 1$$

Es beschreibt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit dafür, dass sich das Fahrzeug in seiner Betriebszeit entweder im aggregierten Zustand *operational* oder *degraded* befindet. Zusammen mit der Aufenthaltswahrscheinlichkeit im *normal*-Zustand gewährleistet die Variante den sicheren Betrieb entsprechend des funktionalen Sicherheitsziels. Verletzt wird das Sicherheitsziel, sofern im Betrieb ein Fehler auftritt, der auf Gesamtsystemebene in einem Zustandswechsel zu *VehFailed* resultiert. Mit diesen drei Parametern können die identifizierten Systemvarianten quantitativ miteinander verglichen werden. Anhand von Beispielvarianten werden die Ergebnisse in Kapitel 1.3 vorgestellt.

Die im Arbeitspaket 2.3.6 verfolgten Ziele wurden durch vorgestellte Methodik zur Zuverlässigkeitsbewertung maßgeblich erreicht. Prototypische Testframeworks und Erweiterungen des Funktionsumfanges von TimeNET wurden durch studentische, wissenschaftliche Hilfskräfte während der Projektlaufzeit unterstützt. Das modulare Konzept lässt sich vom Fahrzeugkontext in AnRox auf techni-

sche Systeme Generalisieren und kann im Systementwurf eingesetzt werden. Das Projekt verdeutlicht die Relevanz von dynamischen Verhaltensmodellen und Analyseverfahren im modernen Systementwurf. Die Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen als auch die Betrachtung von Mehrfachfehlern haben einen relevanten Einfluss auf den Grad an Fehleroperabilität aber können mit konventionellem Verfahren nur bedingt quantifiziert werden. Dies erfordert eine komplexere Sichtweise beim Entwurfsprozess und die Abkehr von konventioneller Fehlerbaumanalyse und Einzelfehlerbetrachtung. Um die Komposition von Modulen zu Systemmodellen eleganter zu gestalten und somit auch die Akzeptanz der Methode zu stärken, verfolgt SSE zukünftig die Entwicklung einer Beschreibungssprache zur automatischen Generierung von gültigen Systemvarianten.

1.3 AP4 – Validierung

Im Projektzeitraum Q4 bis Q6 fanden erste Gespräche und Vorbereitungen zur Eigenvalidierung mit den Projektpartnern statt. Mit den Projektpartnern wurden regelmäßige Abstimmungstermine angesetzt. Im Projektzeitraum Q8 und Q9 fanden Koordinationsgespräche und Abstimmungen mit den Projektpartnern zur Validierung statt. Im Berichtszeitraum Q10 und Q11 wurde besprochen, welche Demonstration und Ergebnisse zum Projektende zur Validierung zur Verfügung stehen sollen. Für den SSE-Projektteil betrifft das die Gesamtbewertung des Fahrzeugs. Diese lässt sich naturgemäß leider nicht mit einem realen Aufbau vergleichen, aber es können einzelne Fälle simuliert und durch Experten-Analyse auf ihre Tragfähigkeit untersucht werden. Abschnitt AP 4.2.3. beschreibt zur Validierung die konkrete Anwendung der in AP 2.3.6 entstandenen Methodik zur Zuverlässigkeitsbewertung.

AP4.2.3: Validierung der Vorzugslösungen inkl. zugehöriger Betriebsstrategie

Die erarbeitete Methodik zur Zuverlässigkeitsbewertung von fehlertoleranten Antriebssystemen wurde zur Validierung auf ein Beispielsystem angewendet. In den vorgelagerten Arbeitspaketen entstanden im Arbeitscluster für Antriebsysteme Topologievarianten, die in ihrer Auslegung sowie der eingesetzten Redundanzen unterschiedlich auf die Fehleroperabilität des Gesamtsystems einwirken. Gleiches fand im Arbeitscluster für Energiebordnetze statt bei denen die fehleroperable Bereitstellung der sicherheitsrelevanten Fahrzeugfunktionen von der Bordnetzarchitektur bestimmt wird. Das abstrahierte Ausfallverhalten für identifizierte Fehlerfälle von Antriebsystem und Energiebordnetz wurde von den Projektpartnern in Degradationsmatrizen dokumentiert und mit Ausfallraten (FIT) aus Literatur und zu erwartenden Annahmen bedatet.

Entsprechend der Degradationsmatrizen konnte das dokumentierte Ausfallverhalten samt Fehlerdiagnose- und Fehlerreaktion der Teilsysteme (Teilwicklungssystem, Antriebswelle, Teilbordnetz, HV-Komponente, Trennelemente, Energiebordnetzfunktion) in dem Softwarewerkzeug TimeNET als stochastische Petri-Netz-Module modelliert werden. Diese Petri-Netz Modelle bilden den entstandenen modularen Systembaukasten.

Als Beispielsysteme wurden die Module für die *Zentralarchitektur* des Energiebordnetzes mit der Antriebstopolgie *2x PSM + 2x 2-Level B6* für die vier Fahrzeugtopologien Zentralantrieb, achsindivi-

dueller Antrieb, radindividueller Antrieb auf der Hinterachse sowie radindividueller Antrieb auf Vorder- und Hinterachse entsprechend der ASIL-Dekomposition der Fahrzeugvarianten kombiniert. Die dynamischen Wechselwirkungen der Teilsysteme durch dependant Failures, der Einfluss von Mehrfachfehlern sowie intelligenten Strategien zur Fehlerkompensation (Redundanz, Fehlerdiagnose- und Reaktion) konnten in TimeNET durch zustandsabhängige Schaltregeln (Guards) abgebildet werden.

Gegenüber der konventionellen Zuverlässigkeitsbewertung mit statischen Fehlerbäumen kann mit Petri-Netzen das hochdynamische Systemverhalten im Betrieb analysiert werden. Dazu wurden die Fahrzeugvarianten in ein angenommenes Betriebsszenario eingebettet. Das Betriebsszenario simuliert das Warten auf eine Mission, den Transport von Passagieren sowie eine einfache Wartungsroutine abhängig vom aggregierten Zustand des Fahrzeuges ab. Die Abbildung des aggregierten Fahrzeugzustandes auf Systemebene in die Zustände *Normal, Safe und Failed* konnte durch die kombinatorische Wirkung der Degradationszustände in den Teilsystemen von Energiebordnetz und Antriebsystem erreicht werden.

Die Bewertung der erstellten Systemmodelle fand durch die Auswertung von mathematischen Leistungsmaßen durch die in TimeNET implementierten Simulationsverfahren statt. Für jede Fahrzeugvariante konnten simulativ die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten in den aggregierten Fahrzeugzuständen bestimmt und die Zuverlässigkeit quantifiziert werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten in den Zuständen Normal und Safe entsprechen dem sicheren Betrieb unter Erfüllung aller Sicherheitsziele. Der Wert für Zustand *Failed* repräsentiert eine Verletzung der Sicherheitsziele und damit auch des sicheren Betriebs des Fahrzeuges. Im Vergleich der Varianten wird ersichtlich, dass die Fahrzeugtopologie mit Zentralantrieb die geringste Zuverlässigkeit aufweist. Dies kann durch den Single Point of Failure eines einzelnen Antriebs begründet werden. Für die Topologien Achsindividuell und Radindividuell Hinterachse sind die Werte identisch und durch die gleich wirkenden, eingesetzten Redundanzen zu erklären. Diese Fahrzeugtopologien sind unter den untersuchten Varianten aufgrund ihrer geringen Verletzung des sicheren Betriebs vorzuziehen. Die Ergebnisse der radindividuellen Fahrzeugtopologie auf Vorder- und Hinterachse schneiden leicht schlechter ab. Jedoch zeigen die Werte den Gewinn an Zuverlässigkeit durch Fehleroperabilität indem zwar häufiger Fehler auftreten, diese jedoch nicht den sicheren Betrieb verhindern.

Fahrzeugtopologie	**Normal**	**Safe**	**Failed**
Zentralantrieb	0,9495	0,0446	0,0059
Achsindividuell	0,9496	0,0467	0,0036
Radindividuell Hinterachse	0,9496	0,0467	0,0036
Radindividuell Vorder- und Hinterachse	0,9423	0,0531	0,0046

Tabelle 2 Ergebnisse der Bewertung auf Gesamtsystemebene für Bordnetz Zentralarchitektur und 2x PSM + 2x 2-Level B6 Antriebstopologie

Maßgeblich für den Aufwand der Methode ist die Erlangung des Systemverständnisses, um dessen Verhalten korrekt abbilden zu können. Dieses entsteht naturgemäß iterativ im Systementwurf und erfordert somit auch ein iteratives Vorgehen bei dessen Modellierung. Während das Ausfallverhalten von Teilsystemen als Petri-Netz-Module leicht in TimeNET abbildbar ist, erfordert deren Kombination und Verschaltung zu Gesamtsystemvarianten verhältnismäßig viel Aufwand. Dieser Aufwand kann durch die Beschreibung gültiger Varianten mit einer Domain Specific Language (DSL) und einem Modellgenerator verringert werden. Dies konnte in AnRox nicht umgesetzt werden.

Die Eigenvalidierung der Methode samt ihrer Umsetzung mit TimeNET zeigen den Nutzen in der Zuverlässigkeitsbewertung von fehlertoleranten Antriebssystemen auf Gesamtsystemebene. Es wurde erreicht, das komplexe, dynamische Systemverhalten abzubilden und durch die simulative Bewertung eine Vorhersage günstiger Vorzugstopologien zu treffen.

1.4 Andere wesentliche Ereignisse

1.4.1 Veranstaltungen und Workshops

Mit Beteiligung des gesamten Konsortiums wurden die folgenden Veranstaltungen und Workshops durchgeführt:

29.-30. April 2021	Kick-Off des Gesamtvorhabens (online)
29.-30. November 2021	Konsortialtreffen inkl. Workshops zu projektübergreifenden Fragestellungen (online)
04.-05. Mai 2022	Konsortialtreffen (online)
23.-24. November 2022	Konsortialtreffen – Fraunhofer IISB Erlangen
03.-04. Mai 2023	Konsortialtreffen (hybrid), Teilnahme online
08.-09. November 2023	Konsortialtreffen (hybrid) – RWTH Aachen, Präsenzteilnahme
24.-25. Juni 2024	Abschlusstreffen – Robert Bosch GmbH Renningen, Präsenzteilnahme

Zur Abstimmung der Projektarbeit und für die gemeinsame Erarbeitung partnerübergreifender Fragestellungen fanden unter Beteiligung des Fachgebietes SSE regelmäßige Telefonkonferenzen und Online-Workshops u.a. zu den folgenden Themenbereichen statt:

- Arbeitsgruppe „Antriebssysteme und Antriebe“ – zweiwöchentlich
- Konsolidierung von Ergebnissen
- Schnittstellen zum Dynamic Risk Manager
- Clusterübergreifende Anforderungen
- Steuerkreismeetings

- Gemeinsame Unteraufträge

Im Berichtzeitraum Q4-Q5 kamen hinzu:

- Arbeitsgruppe „Bewertung von KI-Modulen“ – monatlich

Im Berichtzeitraum Q8-Q9 kamen hinzu:

- Arbeitsgruppe „Zuverlässigkeitsbewertung“ – zweiwöchentlich + Fokustermine

1.4.2 Fachvorträge und Veröffentlichungen

Direkt aus Projektergebnissen erfolgten die folgenden Veröffentlichungen und Vorträge:

[1] A. Zimmermann, S. Schmidt, “Model-Based Reliability Engineering of Automotive Drivetrain Architectures with Multi-Trajectory Simulation” in 16th Probabilistic Safety Assessment & Management Conference, Honolulu, Hawaii, 30th June 2022

Fachvorträge intern:

[2] Sascha Schmidt: *Model-Based Reliability Design for Autonomous Vehicles*. Vortrag auf dem Doktoranden-Workshop SSE am 7. Oktober 2021.

[3] Sascha Schmidt: *Model-Based Reliability Design for Autonomous Vehicles*. Vortrag auf dem Doktoranden-Workshop SSE am 14. April 2022.

[4] Sascha Schmidt: *Model-Based Reliability Design for Autonomous Vehicles*. Vortrag auf dem Doktoranden-Workshop SSE am 11. November 2022.

[5] Sascha Schmidt: *Model-Based Reliability Design for Autonomous Vehicles*. Vortrag auf dem Doktoranden-Workshop SSE am 30. März 2023.

Inhaltlich in Zusammenhang mit dem Projekt standen folgende Veröffentlichungen und Vorträge des Fachgebiets:

[6] Christian Ebner, Kirill Gorelik, and Armin Zimmermann: Automated Design Exploration and Dynamic Safety Analysis for Optimization of Mechatronic Systems in Safety-Critical Automotive Applications. in IEEE Systems Journal, Volume 17, Issue 4, Pages 5357-5368, December 2023.

[7] F. Bedini, T. Jungebloud, R. Maschotta, and A. Zimmermann: An Analysis and Simulation Framework for Systems with Classification Components. In 12th International Conference on Model-Based Software and Systems Engineering (Modelsward 2024), Rome, Italy, Feb 2024.

[8] Armin Zimmermann: Reliability Design of Complex Systems - Modeling and Efficient Simulation (Tutorial). IEEE Int. Conf. on Recent Advances in Systems Science and Engineering (RASSE 2023), Kerala, India, November 2023.

[9] Christian Ebner, Kirill Gorelik and Armin Zimmermann: *Model-Based Design Space Exploration for Fail-Operational Mechatronic Systems*. 7th IEEE Int. Symposium on Systems Engineering (ISSE 2021), Wien / virtual, September 2021.

[10] Christian Ebner, Kirill Gorelik and Armin Zimmermann: *Automated Dynamic Safety Evaluation of Generic Fail-Operational Mechatronic Systems*. 6th European Conf. of the Prognostics and Health Management Society (phme21), June 2021.

[11] Ralph Maschotta, Maximilian Hammer, Mehreen Khan and Armin Zimmermann: *Model-Driven Aspect-Specific Systems Engineering in the Automotive Domain*. IEEE Int. Conf. on Recent Advances in Systems Science and Engineering (RASSE 2021), December 2021.

1.4.3 Ereignisse, die den Fortgang des Projekts beeinflussen

1.4.3.1 Ausschreibung gemeinsamer Unteraufträge

Die Ausschreibung und Vergabe der gemeinsamen Unteraufträge für die Erarbeitung einer Methodik zur Risikobewertung für Funktionen in automatisierten Fahrzeugen sowie die Durchführung einer Gefahrenanalyse und Risikobewertung zeigte mehr Abstimmungserfordernis als zunächst erwartet, insbesondere hinsichtlich der Berücksichtigung der unterschiedlichen Vergabeverfahren der Konsortialpartner. Hierdurch bedingt wird erfolgt die Auftragserteilung an den Unterauftragnehmer um einige Monate verzögert erst in 01/2022.

Durch die sich hieraus in AP1 ergebenden Verzögerungen der geplanten Ergebnisse, insbesondere des Reports zur Gefahrenanalyse und Risikobeurteilung, machten es unmittelbar in AP2 und mittelbar in AP3 erforderlich, zunächst mit plausibel erscheinenden Annahmen („Best Guesses“) über die zu erwartenden Ergebnisse zu arbeiten. Die Arbeiten in AP 2 und 3 wurden so verzögert (siehe Abschnitt 2).

1.4.3.2 Reise- und Kontaktbeschränkungen

Wegen der Corona-Pandemie und den dadurch bestandenen Reise- und Kontaktbeschränkungen waren keine Workshops in Präsenz möglich. Durch Telefon- und Webkonferenzen und den Einsatz von Online-Kollaborationstools konnten persönliche Treffen weitgehend ersetzt werden. Konsortialtreffen wurden zu Beginn des Projektes virtuell abgehalten und konnten nach Ende der Pandemie wieder persönlich vor Ort abgehalten werden.

1.4.3.3 Interne Herausforderungen des Fachgebietes

In der finalen Projektphase fiel der dafür eingestellte Mitarbeiter am Fachgebiet SSE von Ende 2023 bis April 2024 krankheitsbedingt aus und konnte während der Widereingliederung nicht Vollzeit in AnRox arbeiten. Dies machten die Projektverlängerung sowie die spontane Einarbeitung eines projektfremden Mitarbeiters des Fachgebietes für die wichtigsten Aufgaben notwendig.

2 Vergleich des Vorhabenstands mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit-, und Kostenplanung

Die ursprüngliche Zeitplanung des Vorhabens ist in Tabelle 1 zu finden. Leider traten im Verlauf des Projektes Hindernisse auf, die die Bearbeitung verzögern und eine Laufzeitverlängerung erforderten.

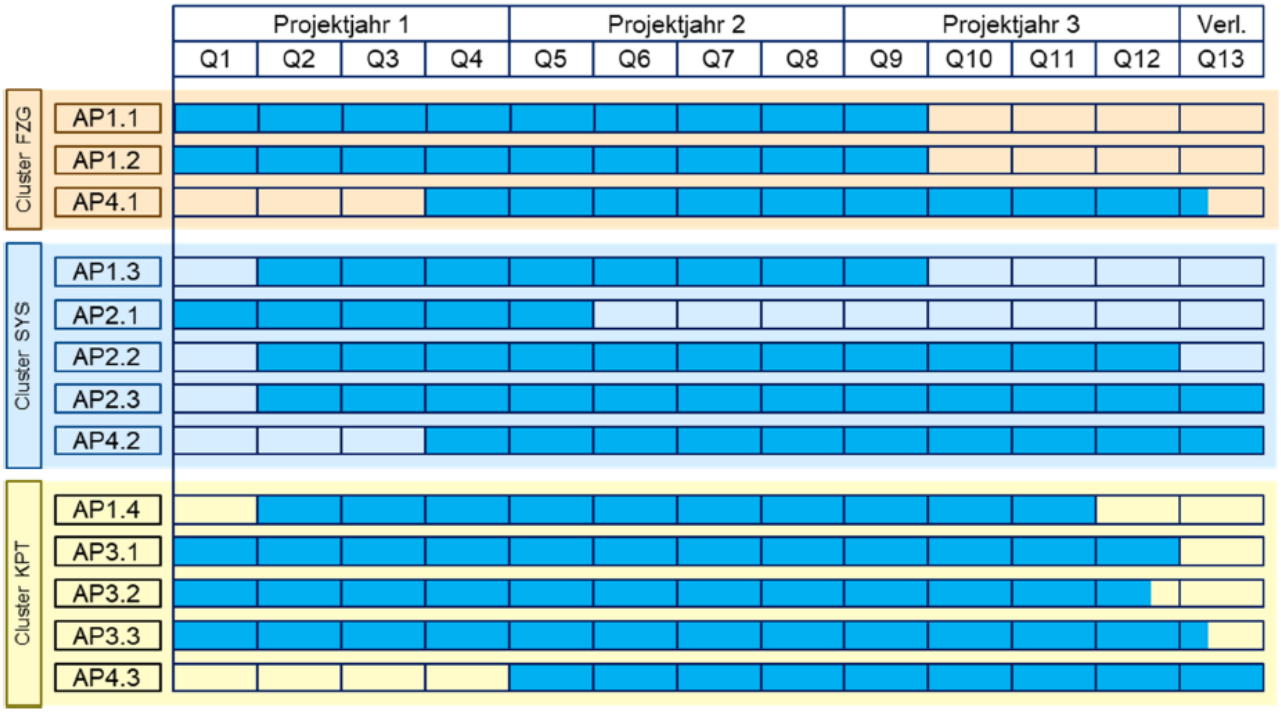
Im Bereich der Modellierung und Bewertung der Antriebsarchitekturen hat die Beschaffung der Ausfalldaten von Bauteilen sowie das Bereitstellen einer Dokumentation aller Ausfallarten und ihrer Zusammenhänge wie oben geschildert länger als in der Planung vorhergesehen gedauert. Ein Grund ist die Betrachtung von Zusammenhängen über mehrere Systemebenen hinweg. Diese war für die ganzheitliche Betrachtung im Projekt wichtig und aus Systementwurfs-Sicht ein qualitativer Projektbeitrag, der aber sonst nur selten durchgängig durchgeführt wird und für die Projektpartner daher Zusatzaufwand bedeutete.

Als Gegenmaßnahme wurden zusätzliche regelmäßige Abstimmungen mit den betroffenen Partnern abgehalten. Wie sich herausstellte, ist selbst die Einteilung in einer üblichen FMEA-Tabelle den komplexen hierarchischen Zusammenhängen der Projektlösung nicht angemessen. Daher sind zum jetzigen Zeitpunkt zwar die grundsätzlichen Konzepte und Vorgehensweisen für M8.6 klar (also die Methodik), aber noch keine Umsetzung an realen Projektdaten in einem Softwarewerkzeug vorgenommen worden. Das in den Diskussionen entstandene bessere Verständnis der beteiligten Projektpartner ist ein Nebenergebnis des Projekts.

Die Hauptarbeit von SSE war für AP2.3.6 geplant, das zum Ziel eine vollständige Methodik und Softwarewerkzeug zur Modellierung und Bewertung fehlertoleranter Antriebssysteme unter Nutzung von KI-Betriebsstrategien sowie Betrachtung von Dependent Failures hat. Die konzeptionellen Grundlagen dafür wurden entsprechend der Planung entwickelt, aber aufgrund der verzögert bereitgestellten und unvollständigen Eingangsdaten zu Fehlerfällen konnte die Methodik auch erst verspätet technisch realisiert werden, was die Anwendung und Validierung der Modelle und Methodik verzögerte.

In der finalen Phase ist leider der im Projekt eingestellte Mitarbeiter bei SSE zum Jahreswechsel 2023/2024 für vier Monate krankheitsbedingt ausgefallen. In dieser Zeit wurde ein bis dahin Projektfremder Mitarbeiter für die wichtigsten Aufgaben im Projekt eingearbeitet. Zusammen mit der genehmigten Projektverlängerung konnte der Ausfall weitgehend kompensiert werden. Der Fokus wurde darauf gelegt zum Projektende Ergebnisse zum Vergleich der Varianten zu erhalten und die Methode zu Validieren. Um dies zu erreichen, musste die automatisierte Generierung der Systemmodelle niedriger priorisiert werden und wurde nicht vollständig abgeschlossen. Mittelfristig werden die Vorarbeiten nach dem Projektende weiter in studentischen Arbeiten und Dissertationen verwertet.

Der aktualisierte Zeitplan nach Verlängerung des Projektes ist in der folgenden Tabelle dargestellt.



3 Aussichten auf das Erreichen der Ziele des Vorhabens

Die Hauptziele des Vorhabens, in Form der in AP 2.3.6 entwickelten Methodik zur Zuverlässigkeitsbewertung wurden erreicht. Aufgrund der zuvor beschriebenen internen personellen Herausforderungen und Verzögerung benötigter Zwischenergebnisse bleiben jedoch Anteile offen, die nicht vollumfänglich umgesetzt werden konnten. Dazu zählt die automatisierte Generierung von Systemmodellen aus dem Modulbaukasten und deren Implementierung in TimeNET. Das Fehlen des Generators ist lediglich für die Skalierbarkeit zur Analyse vieler verschiedener Varianten relevant. Das methodische Vorgehen zur Bewertung von Fahrzeugvarianten ist dadurch nicht beeinträchtigt. Der im Projekt finanzierte Doktorand wird auch nach dem Projektende weiter an seiner Promotion die im Projekt erzielten Ergebnisse weiterentwickeln und wissenschaftlich abschließen.

4 FE-Ergebnisse Dritter, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind

Es sind keine Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, die an dieser Stelle hervorzuheben wären.

5 Änderungen der Zielsetzung

Eine Änderung der Zielsetzung war nach unserer Ansicht nicht notwendig.

6 Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans

Der mit dem Projektantrag eingereichte Verwertungsplan ist unverändert gültig.

6.1 Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen

Im Berichtszeitraum wurden keine Erfindungen/Schutzrechte angemeldet.

6.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten haben sich seit Projektbeginn nicht verändert.

6.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Die wissenschaftlichen Erfolgsaussichten haben sich seit Projektbeginn nicht verändert.

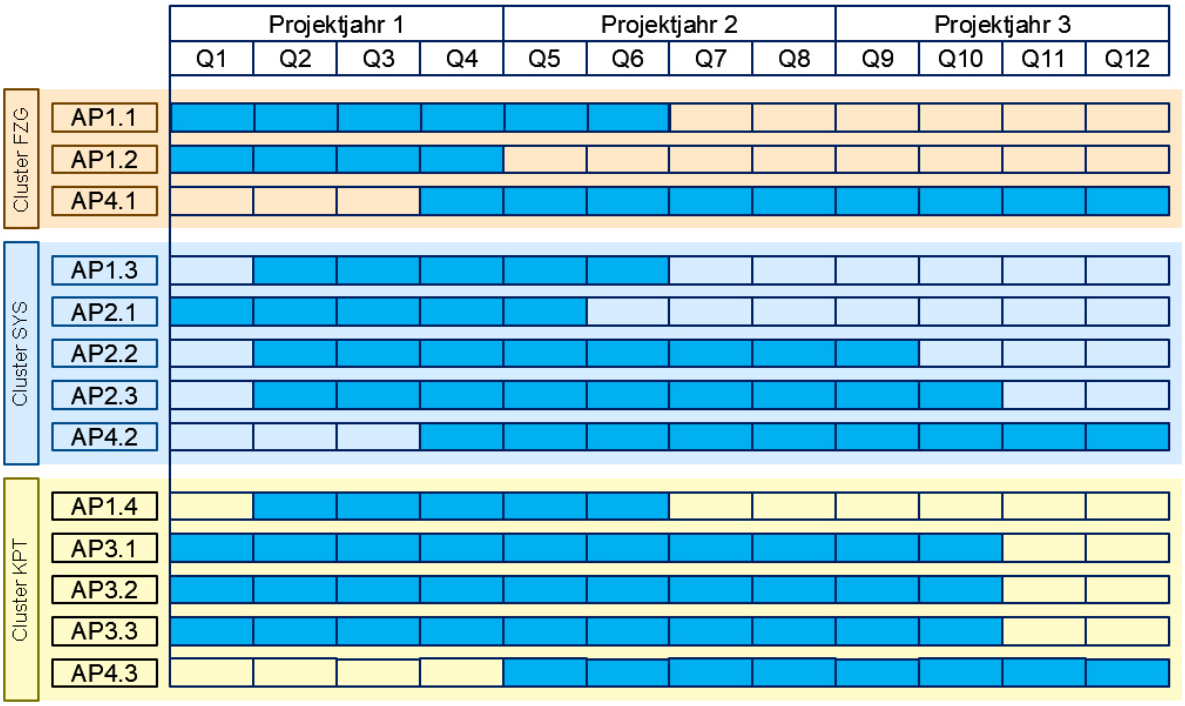
6.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit haben sich seit Projektbeginn nicht verändert.

Anhang A: Zeitplanung des Vorhabens

In Tabelle 1 ist die ursprüngliche Zeitplanung des Vorhabens dargestellt.

Tabelle 1: Ursprüngliche Zeitplanung des Vorhabens



Das Fachgebiet SSE ist an den folgenden TAP beteiligt:

AP1.2 Anforderungen an Antriebs-, Fahrwerkssysteme und Energiebordnetze

AP2.1 Morphologische Analyse und Design ausfallsicherer und intelligenter Topologien

AP2.2 Diagnose- sowie Fehlerbehandlungsstrategien inkl. Performanceprädiktion

AP2.3 Vorzugslösung für ein ausfallsicheres Antriebs- und Bordnetzsystem

AP4.2 Validierung der Vorzugslösungen inkl. zugehöriger Betriebsstrategie

Literaturverzeichnis

[12] A. Zimmermann, T. Dietrich, P. Maciel, und A. Hildebrandt, „Model-based dynamic reliability engineering for hybrid electric vehicle design“, in 2017 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon), Montreal, QC, Canada, Apr. 2017, S. 1–8.

[13] A. Zimmermann, „Modelling and Performance Evaluation with TimeNET 4.4“, in Quantitative Evaluation of Systems, Bd. 10503, N. Bertrand und L. Bortolussi, Hrsg. Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 300–303.

[14] Zimmermann, A., Hotz, T., Lavista, A.C. (2017). A Hybrid Multi-trajectory Simulation Algorithm for the Performance Evaluation of Stochastic Petri Nets. In: Bertrand, N., Bortolussi, L. (eds) Quantitative Evaluation of Systems. QEST 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10503. Springer, Cham.

[15] Armin Zimmermann, Andrés Canabal Lavista and Ricardo J. Rodríguez: Some Notes on Rare-Event Simulation Challenges. 11th Int. Conf. on Performance Evaluation Methodologies and Tools (Valuetools 2017), December 5–7, Venice, Italy.