

BACHELORARBEIT

Betrachtung der Einsatztauglichkeit eines voll- elektrischen Notarzteinsetzungsfahrzeuges (NEF) nach Hamburger Anforderungen

vorgelegt am 29. September 2023

Nils Petersen



Studiengang Hazard Control/Gefahrenabwehr

1. Gutachter: Prof. Dr. Karsten Loer (HAW Hamburg)
2. Gutachter: Dipl.- Ing. Jörn Demtröder (Feuerwehr Hamburg)

in Zusammenarbeit mit
der Feuerwehr Hamburg

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Fachbereich Life Sciences

Ulmenliet 20

21033 Hamburg

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Ich habe keine anderen als die im Literatur- bzw. Quellenverzeichnis angegebenen Hilfsmittel benutzt und mich keiner darüberhinausgehender Internetquellen bedient. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Ich habe die Arbeit zuvor nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht. Die eingereichte schriftliche Fassung entspricht jener auf dem beiliegenden elektronischen Speichermedium.



Ort, Datum, Unterschrift

Hinweise

In dieser Arbeit wurde aus Gründen der besseren Lesbarkeit auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Bezeichnungen gelten gleichwohl für alle Geschlechter.

Der Bachelorarbeit liegt ein Datenträger bei. Auf diesem befinden sich die ausgewerteten Daten sowie der Ausdruck der Internetquellen.

Kurzfassung

Die Feuerwehr Hamburg ermittelte im Rahmen der Markterkundung im Zeitraum vom 06.06.2023-04.08.2023 die Tauglichkeit eines vollelektrisch angetriebenen Notarzteinsetzungsfahrzeuges (e-NEF). Das Fahrzeug basiert auf einem Mercedes Benz e-Vito, welcher durch die Firma Wietmarscher Ambulanz- und Sonderfahrzeug GmbH ausgebaut wurde. Während dieser Zeit musste das Fahrzeug auf Grund technischer Defekte zwei Mal außer Dienst gehen. Effektiv lief es 31 Tage im aktiven Einsatzdienst. In diesem Zeitraum wurden rund 6.100 km bei ca. 280 auswertbaren Einsätzen gefahren. Ziel des Testbetriebes war, Prozesse, die bei der Umstellung des Antriebes auftauchen könnten, zu identifizieren, einzuordnen und zu bewerten. Zudem sollte durch den Betrieb im alltäglichen Einsatzgeschehen festgestellt werden, ob der alternative Antrieb eine Wechselwirkung auf die Leistungserbringung der Notfallrettung der Stadt Hamburg hat. Dem Testbetrieb folgt nun eine Risikoanalyse. Die Ausgangsfrage: „Resultiert aufgrund des Antriebswechsels ein höheres Risiko bei einem vollelektrischen Notarzteinsetzungsfahrzeug in Bezug auf das bisherige, durch Diesel angetriebene, System?“ stand dabei im Fokus. Durch eine Analyse der Fehlermöglichkeiten wurden die Prozesse Fahrzeugbetrieb und Einsatzverhalten, Wahrnehmung im Straßenverkehr, Entnahme der Ausrüstung, Einsatzlogistik, Notfallbetrieb, Tank-/Ladevorgang und Wartung ermittelt. Eine Umfrage mit n=22 Teilnehmern unterstützte bei der Identifizierung kritischer Prozesse. Nach Anwendung der Risikovermeidungsmaßnahmen wurde die Forschungsfrage anhand der Basisereignisse und den erhobenen Daten beantwortet. Antriebsbedingt geht vom e-NEF kein erhöhtes Risiko im Einsatzbetrieb aus. Ein Extremereignis, wie ein langanhaltender und flächendeckender Stromausfall, wurde nicht betrachtet. Ladetests ergaben, dass die Erhöhung des State of Charge (SoC) nahezu linear im 11 kW-Wechselstromladen ist. Die Steigerung des SoC im Gleichstrom-Schnellladebereich (110 kW) ist abhängig vom Start-SoC. Sollte das e-NEF einen kritischen SoC von 30 % erreichen, kann es durch eine Schnellladung innerhalb von 25 min die prognostizierte Reichweite von ca. 114 auf 304 km erhöhen. Der kritische SoC des Testbetriebes wurde mit 30 % als ausreichend bewertet.

Abstract

As part of the market investigation, the Hamburg Fire Brigade determined the suitability of a fully electrically driven emergency response vehicle (e-NEF) in the period from 06.06.2023-04.08.2023. The vehicle is based on a Mercedes Benz e-Vito, which was equipped by the company Wietmarscher Ambulanz- und Sonderfahrzeug GmbH. During this time, the vehicle had to be taken out of service twice due to technical defects. In fact, it was in active service for 31 days. During this period, the vehicle travelled about 6,100 km on about 280 evaluable missions. The aim of the test operation was to identify, classify and evaluate processes that could occur during the conversion of the drive. In addition, the operation in daily operations was to determine whether the alternative drive has a negative influence on the service provision of the emergency rescue service of the city of Hamburg. The test operation is now followed by a risk analysis. The initial question: "Does the change in drive system result in a higher risk with an all-electric emergency ambulance in relation to the previous diesel-powered system? A fault network analysis was used to determine the processes of vehicle operation and operational behaviour, perception in road traffic, removal of equipment, operational logistics, emergency operation, refuelling/charging and maintenance. A survey with n=22 participants supported the identification of critical processes. After applying the risk avoidance measures, the research question was answered based on the basic events and the collected data. Due to the drive system, the e-NEF does not pose an increased risk during operation. An extreme event such as a long-lasting, widespread power failure was not considered. Charging tests showed that the increase in the State of Charge (SoC) is almost linear in 11 kW AC charging. The increase of the SoC in the DC fast charging range (110 kW) depends on the start SoC. Should the e-NEF reach a critical SoC of 30 %, it can increase the predicted range from approx. 114 to 304 km by fast charging within 25 min. The critical SoC of the test operation was assessed as sufficient at 30 %.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Versicherung.....	II
Hinweise	II
Kurzfassung.....	III
Abstract	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis.....	IX
1. Einleitung.....	1
2. Struktur der Feuerwehr.....	2
2.1 Strukturorganisation der Feuerwehr Hamburg.....	3
2.2 Klimaziele.....	5
2.2.1 Klimaziele Stadt Hamburg	7
2.2.2 Vorbildfunktion der öffentlichen Hand.....	7
2.3 NEF-System.....	8
2.4 Flottenentscheid.....	9
2.5 Fahrzeugaufbau	10
2.6 Ausstattung	13
2.7 Ladevorgang	14
3. Methodik.....	15
3.1 Beschreibung Testbetrieb.....	15
3.1.1 Unterschiede der Fahrzeuge	17
3.2 Gewichtsbilanz.....	18
3.3 Ökobilanz	19
3.4 Erhebung der Fahrdaten	19
3.5 Beschreibung Ladetests.....	20
3.6 Fragebogen.....	22

3.6.1 Einfluss/Zuverlässigkeit Reichweite.....	23
3.6.2 Ladevorgang.....	23
3.6.3 Allgemeine Wahrnehmung und Einschätzung	24
3.6.4 Unterschiede zum Diesel-NEF	24
3.6.5 Demografische Daten.....	24
3.7 Risikoanalyse.....	25
4. Ergebnisse.....	27
4.1 Testbetrieb.....	27
4.2 Gewichtsbilanz.....	28
4.3 Ökobilanz	31
4.4 Fahrdaten.....	32
4.5 Fragebogen.....	33
4.6 Risikoanalyse	36
4.6.1 Prozessbeschreibung Lade-/Tankvorgang des Fahrzeugs.....	36
4.6.2 Prozessbeschreibung Fahrzeugbetrieb	37
4.6.3 Prozessbeschreibung Wartungsprozesse	39
4.6.4 Prozessbeschreibung Einsatzlogistik	39
4.6.5 FMEA	40
4.6.6 Fahrzeugbetrieb und Einsatzverhalten	42
4.6.7 Wahrnehmung im Straßenverkehr und Entnahme der Ausrüstung	43
4.6.8 Einsatzlogistik.....	44
4.6.9 Notfallbetrieb	45
4.6.10 Tank-/Ladevorgang.....	46
4.6.11 Wartungsprozesse	47
4.7 Ladetests	49
5. Diskussion	56
6. Ausblick	62
7. Schlussfolgerungen / Fazit	64

8. Danksagung	65
9. Literaturverzeichnis.....	66
10. Anlagen.....	72
10.1 Liste Arztbesetzte Rettungsmittel Hamburg [3]	72
10.2 Trendlinie Treibhausgasemissionen KSG [6]	73
10.3 Infografik Verkehr [8].....	74
10.4 Bilder NEF.....	75
10.5 Blockschaltbild e-NEF [28].....	79
10.6 Beladeliste E-NEF [58].....	80
10.7 Karte Einsatzgebiet 14-NEF-A [27]	81
10.8 Ausschnitt Fahrtenbuch.....	82
10.9 Einsatzprotokoll e-NEF	83
10.10 Fragebogen.....	84
10.11 Darstellung Funktionsnetz	87
10.12 FMEA-Tabelle.....	88
10.13 AC Ladetest V2	89
10.14 DC Ladetest 6-100 %.....	90
10.15 DC Ladetest 30-100 %.....	91

Abkürzungsverzeichnis

AC	alternating current (Wechselstrom)
AK.....	Asklepios Klinik
BOS.....	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
DC	direct current (Gleichstrom)
ELW	Einsatzleitwagen
ELW-BDI.....	Einsatzleitwagen B-Dienst
FEU	Feuer
FMEA.....	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FuRw	Feuer- und Rettungswache
HiOrg	Hilfsorganisationen
HLF	Hamburger Löschfahrzeug
KSG.....	Bundes-Klimaschutzgesetz
LFP	Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren
Navi	Navigationsgerät
NEF	Notarzteinsatzfahrzeug
NotSan.....	Notfallsanitäter
PD	Darstellung der Prozessschritte mit ihren Unterfunktionen
RF.....	Risikoindex
RTW	Rettungstransportwagen
SoH	State of Health
UBA.....	Umweltbundesamt
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gewichtsmessung beladenes e-NEF	29
Tabelle 2: Gewichtsmessung unbeladenes e-NEF	29
Tabelle 3: Gewichtsmessung beladenes Diesel NEF	30
Tabelle 4: Gewichtsmessung unbeladenes Diesel NEF	31
Tabelle 5: Gegenüberstellung Gewichtsdiﬀerenz der NEF	31
Tabelle 6: Einstufung in Kategorien der Eintrittswahrscheinlichkeit der FMEA	40
Tabelle 7: Einstufung in Kategorien der Schadensschwere der FMEA	41
Tabelle 8: Einstufung in Kategorien der Detektierbarkeit der FMEA	42
Tabelle 9: Auszug FMEA mit Fokus auf Fahrzeugantrieb und Einsatzverhalten	43
Tabelle 10: Auszug FMEA mit Fokus auf Wahrnehmung im Straßenverkehr und Entnahme der Ausrüstung.....	44
Tabelle 11: Auszug FMEA mit Fokus auf Einsatzlogistik.....	45
Tabelle 12: Auszug FMEA mit Fokus auf Notfallbetrieb	46
Tabelle 13: Auszug FMEA mit Fokus auf Tank-/Ladevorgang.....	47
Tabelle 14: Auszug FMEA mit Fokus auf Wartungsprozesse.....	48
Tabelle 15: möglicher Reichweitengewinn bei Schnellladung.....	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung und Zielerreichung der Treibhausgasemissionen in Deutschland [6].....	5
Abbildung 2: Übersicht Kompetenzen im Rettungsdienst (selbsterstellt).....	8
Abbildung 3: Bild des e-NEF [19].....	10
Abbildung 4: e-NEF Transparent mit Fokus auf HV-Batterie [20].....	10
Abbildung 5: Elektromotor und HV-Batterie Quelle [20].....	11
Abbildung 6: installierte Wallbox an NEF-Station.....	14
Abbildung 7: diverse Kabel zur Ladung des e-NEF	14
Abbildung 8: planerisches Einsatzgebiet 14-NEF-A [27]	16
Abbildung 9: Defa- und Typ2- Stecker laden das e-NEF	17
Abbildung 10: e-NEF auf Fahrzeugwaage.....	18
Abbildung 11: Ansichten zur Überwachung des Ladevorganges	21
Abbildung 12: Diesel-NEF neben NEF-Station am AK Altona.....	27
Abbildung 13: Unfallschaden e-NEF.....	28
Abbildung 14: Prozess- und Funktionsnetz Basisereignisse	40
Abbildung 15: Ausschnitt Kameraaufnahme zur Überwachung des Ladetests.....	49
Abbildung 16: Grafische Darstellung des Ladetests AC 11 kW V2.....	50
Abbildung 17: Grafische Darstellung des Ladetests DC 110 kW 6-100.....	51
Abbildung 18: Grafische Darstellung des Ladetests DC 110 kW 30-100.....	52

1. Einleitung

Die Bedrohung durch den Klimawandel und die Dringlichkeit, die negativen Auswirkungen menschlichen Handelns auf die Umwelt zu minimieren, erfordern eine Neujustierung traditioneller Denkmuster und Praktiken. Der wachsende Fokus auf Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit begründet einen Paradigmenwechsel in verschiedenen Bereichen der Gesellschaft. Institutionen der Gefahrenabwehr werden tagtäglich mit Herausforderungen konfrontiert. Was für den normalen Bürger ein einmaliger Ausnahmezustand ist, stellt für Feuerwehr, Polizei und Rettungsdienst eine gewohnte Arbeitsumgebung dar. Arbeitsmittel der Gefahrenabwehr sind teils hoch technologisiert und spezialisiert, um im Ernstfall dem Bürger zuverlässig und leistungsfähig helfen zu können. Die von der Bundesregierung formulierten Ziele zur Eindämmung des Klimawandels setzen eine Vorbildfunktion öffentlicher Institutionen voraus. Die speziellen Anforderungen von Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) betreffen überwiegend eine Nische in Bezug auf die globale Entwicklung und Forschung von Technologien. Gerade deshalb ist es wichtig, die für den Hauptverbraucher entwickelten Innovationen mit den Anforderungen der BOS in Einklang zu bringen.

Die vorliegende Risikoanalyse legt den Fokus auf den Wechsel des Fahrzeugantriebs im spezifischen Kontext eines Notarzteinsetzfahrzeuges des Rettungsdienstes. Diese Verschiebung im Antriebskonzept stellt nicht nur einen technologischen Wandel dar, sondern reflektiert auch den Anspruch, emissionsärmere Alternativen zu etablieren. Das Gesundheitswesen als solches ist auf eine stabile und nachhaltige präklinische Versorgung angewiesen. Vor diesem Hintergrund ist es von essenzieller Bedeutung, dass Rettungsdienste ihre Einsatzfahrzeuge mit Blick auf Ausfallsicherheit, Betriebskosten und Effizienz überdenken. Diese Risikoanalyse soll die potenziellen Risiken und Herausforderungen des Wechsels der Antriebsart im Rettungsdienst qualitativ beleuchten. Ziel ist es, ein umfassendes Verständnis für die Folgen dieser Entscheidung zu erlangen und klare Einsichten in die damit verbundenen Chancen und Risiken zu gewinnen. Ein Testbetrieb, bei dem das vollelektrische das konventionelle Fahrzeug im regulären Einsatzbetrieb ersetzt, dient als Datengrundlage für die methodische Auswertung. Es werden auf die Fehlermöglichkeits-Einflussanalyse, Fragebogen und Latetests zurückgegriffen. Dabei werden nicht nur die potenziellen Risiken in den Fokus

gerückt, sondern auch Strategien zur Risikominderung und zur nachhaltigen Gestaltung des Antriebswechsels diskutiert.

Das Ziel dieser Risikobetrachtung besteht darin, das antriebsbedingte Risiko eines vollelektrischen Notarzteinsatzfahrzeugs (NEF) im Vergleich zu einem konventionell durch einen Dieselmotor angetriebenen NEF zu analysieren und zu bewerten. Hierbei sollen potenzielle Gefahren und Risiken im Zusammenhang mit dem Elektroantrieb identifiziert, quantifiziert und mit den Risiken eines herkömmlichen Dieselantriebs verglichen werden. Die Untersuchung basiert auf dem Testbetrieb eines Mercedes Benz e-Vitos, welcher innerhalb von 31 Tagen anstelle eines konventionell angetriebenen NEF im Einsatz der Hamburger Notfallrettung war. Die Risikobetrachtung zielt darauf ab, ein umfassendes Verständnis der Vor- und Nachteile beider Antriebsarten zu gewinnen und Empfehlungen für die sichere Integration von einem e-NEF im Hamburger Rettungsdienst abzuleiten.

2. Struktur der Feuerwehr

Die Sicherheitsarchitektur Deutschlands lässt sich in die innere und äußere Sicherheit unterteilen. Für die äußere Sicherheit ist die Bundeswehr zuständig. Die innere Sicherheit wird durch Organe der polizeilichen und nicht polizeilichen Gefahrenabwehr gewährleistet. Zu den Einheiten der nicht polizeilichen Gefahrenabwehr gehört auch die Feuerwehr. Der im Artikel 2 des Grundgesetzes verankerte Sicherstellungsauftrag „auf Leben und körperliche Unversehrtheit“ wird durch die Kompetenzen der Länder konkretisiert [1 Art. 2]. Die Struktur der Feuerwehren richtet sich nicht nach Bundesgesetzen, sondern liegt in der Zuständigkeit der einzelnen Bundesländer. Es gibt länderspezifische Unterschiede in Ausstattung, Ausführung und Ausrichtung. Die gesetzliche Grundlage für die Existenz und Ausführung der Hamburger Feuerwehr bildet das Hamburger Feuerwehrgesetz.

In § 3 sind die Aufgaben der Feuerwehr definiert [2]:

- „a) die Abwehr von Brand- oder Explosionsgefahren für die Allgemeinheit, den einzelnen oder erhebliche Sachwerte,
- b) die Bekämpfung von Schadenfeuer,
- c) der Rettungsdienst,

- d) die technische Hilfeleistung in Not-, Unglücks- und Katastrophenfällen,
- e) die Information der Bevölkerung zur Verhütung und Begrenzung von Bränden und Unglücksfällen sowie die Anleitung zur Selbsthilfe im Schadensfall und
- f) der Betrieb einer ständig besetzten integrierten Feuerwehr- und Rettungsleitstelle zur einheitlichen Einsatzlenkung bei der Wahrnehmung der Aufgaben nach den Buchstaben a bis d.“

Nach § 3 (1) des Hamburger Feuerwehrgesetzes gehört demnach, neben den schon vom Namen ableitbaren Aufgaben der Brandbekämpfung und der technischen Hilfeleistung, „der Rettungsdienst“. Im Hamburger Rettungsdienstgesetz sind die Anforderungen insbesondere an die Fahrzeuge konkretisiert. „Für die Notfallrettung sind im bodengebundenen Rettungsdienst [...] Notarzt-Einsatzfahrzeuge [...] einzusetzen.“ [2]. Entscheidungen zu den Basisfahrzeugen eines NEFs liegen demnach bei der Stadt Hamburg. Um eine gleichbleibende Qualität der Notfallrettung in Deutschland zu gewährleisten, wird durch eine besondere Norm eine Mindestausstattung vorgegeben. Der genaue Aufbau eines NEFs kann variieren. Die Anforderungen an ein Notarzt-Einsatzfahrzeug sind in der DIN 75079 aufgeführt.

2.1 Strukturorganisation der Feuerwehr Hamburg

Die Feuerwehr Hamburg ist auf einer Fläche von 755 km² für die Sicherheit von rund 1,86 Mio. Einwohnern zuständig. Dies wird durch die ca. 3.500 Mitarbeitenden der Berufsfeuerwehr und ca. 3.800 Mitglieder der Freiwilligen Feuerwehr sichergestellt. Das Personal der Berufsfeuerwehren verteilt sich auf 17 Feuer- und Rettungswachen (FuRw), einer Technik- und Umweltschutzwache und vier Notarzt-Stützpunkten. In Hamburg gibt es 16 bodengebundene, arztbesetzte Rettungsmittel. Diese werden durch zwei Rettungshelikopter ergänzt. Die Dienstzeit-Modelle einiger Fahrzeuge variieren dabei (10.1 Liste Arztbesetzte Rettungsmittel Hamburg) [3].

Die Standorte der Berufsfeuerwehr werden durch 86 weitere der Freiwilligen Feuerwehr ergänzt, von denen in ländlich geprägten Bereichen spezielle Erstversorgungswehren den Rettungsdienst unterstützen. Der Rettungsdienst wird regelhaft durch die Hilfsorganisationen (HiOrg), Deutsches Rotes Kreuz, Arbeiter Samariter Bund, Johanniter-Unfall-Hilfe und Malteser Hilfsdienst als externe Leistungserbringer im Rahmen des Submissionsmodells an mehreren Standorten unterstützt. Darüber hinaus ist auch

die Bundeswehr im Rahmen der zivil-militärischen Zusammenarbeit in den Rettungsdienst der Stadt Hamburg eingebunden. Bisher im Rahmen des Konzessionsmodells eingebundene andere private Organisationen wirken bis Ende 2023 mit. Im Jahr 2022 wurden in der Rettungsleitstelle der Feuerwehr Hamburg (integrierte Leitstelle für Feuerwehr, Rettungsdienst und Katastrophenschutz) insgesamt 507.911 Notrufgespräche geführt, welche zu 316.275 Einsätzen führten. Davon beliefen sich 278.261 Einsätze allein auf den Rettungsdienst. Allgemein ist eine steigende Tendenz von 12,8 % mehr in Bezug auf das Vorjahr 2021 zu verzeichnen [4].

Das Amt der Feuerwehr ist in Hamburg der Behörde für Inneres und Sport unterstellt. Die Feuerwehr ist klassisch, hierarchisch organisiert. Kommissarisch wird sie aktuell durch Branddirektor Jörg Sauermann geleitet (September 2023). Als Kernprozess steht der Einsatzdienst im Mittelpunkt. Alle anderen Bereiche der Feuerwehr dienen dem Zweck, den Einsatzdienst uneingeschränkt zu ermöglichen und sind in sechs Abteilungen (F01 bis F06) gegliedert. Die Zentralkommando Einsatzdienst gliedert sich in drei regionale Direktionsbereiche, die Abteilungen sind in Anlehnung eines Einsatzstabes hinsichtlich spezifischer Aufgabenbereiche organisiert. Sie gliedern sich in mehrere Referate und Sachgebiete [4]. Für die Bewertung der Einsatztauglichkeit eines vollelektrischen Notarzteinsetzfahrzeuges sind Überschneidungen der Zuständigkeiten folgender Abteilungen festzustellen. Bedarfsträger sind im Allgemeinen die Einsatzkräfte, welche durch die Zentralkommando vertreten werden. Das einsatztaktische Konzept wird durch die Abteilung F02 vorgegeben. Für die technische Beschaffung, Markterkundung und das Projektmanagement ist das Referat F032 innerhalb der Abteilung Technik und Logistik (F03) zuständig; hier gliedern sich die Aufgaben in zwei Sachgebiete: Für Fahrzeuge und medizinische Geräte im Rettungsdienst ist das Sachgebiet F0321 verantwortlich und für die Thematik Elektromobilität und alternative Antriebe das Sachgebiet F0326. Aufgrund von Anpassungen der Modellpalette seitens Mercedes Benz wird das bisher für NEF genutzte Modell des Sprinters (314 KA CDI) in Zukunft nicht mehr der Feuerwehr als Basisfahrzeug zur Verfügung stehen [5]. Daher wurde eine Markterkundung zu möglichen Alternativen begonnen. Nach erfolgreich durchgeführten Testbetrieb im August 2021 mit einem vollelektrischen Rettungstransportwagen entschloss sich die Feuerwehr Hamburg den elektrischen Antrieb für ein Notarzteinsetzfahrzeug zu testen. Für die Sachgebiete F0321 und F0326 stellt sich im

Rahmen dieser Erkundung die primäre Forschungsfrage, die diese Ausarbeitung nachfolgend betrachtet:

Resultiert aufgrund des Antriebswechsels ein höheres Risiko bei einem voll-elektrischen Notarzteinsatzfahrzeug in Bezug auf das bisherige, durch Diesel angetriebene, System?

2.2 Klimaziele

Um die nationalen und europäischen Klimaschutzziele zu erfüllen, trat die aktuelle Anpassung des Klimaschutzgesetzes (KSG) am 31.08.2021 in Kraft. Der Beschluss des Bundestages führte zu einer Verschärfung der Zielvorgaben für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen, die Deutschland zum Jahr 2045 in die Klimaneutralität führen sollen. Diese Ziele sind in sechs Sektoren unterteilt: Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft. Das Gesetz implementiert ein Monitoring-System, um die jährlichen Emissionen bis 2045 zu überwachen. Dabei ist eine Senkung der CO₂-Trendlinie bis 2030 erforderlich, um das Zwischenziel von 65 % Reduzierung im Vergleich zum Jahr 1990 zu erreichen (10.2 Trendlinie Treibhausgasemissionen KSG).

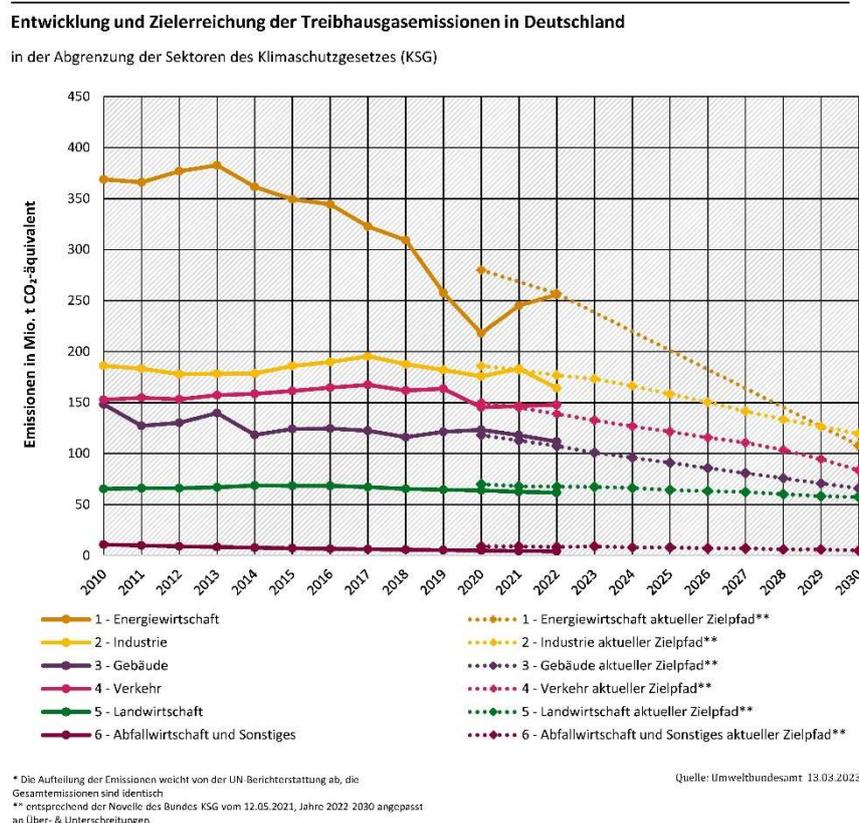


Abbildung 1: Entwicklung und Zielerreichung der Treibhausgasemissionen in Deutschland [6]

Die dem Gesetz zugrunde liegende Vision des Gesetzes strebt Treibhausgasneutralität bis 2045 an, gefolgt von negativen Emissionen nach 2050 [7]. Ein Beschluss des Bundesverfassungsgerichts (29.04.2021) betont die Notwendigkeit der Vorbeugung gegenüber zukünftigen Einschränkungen der Freiheitsgrundrechte nachfolgender Generationen aufgrund des Klimawandels. Dies soll die Summe der Senkung aller durch die Sektoren verursachten Treibhausgasemissionen sicherstellen. Der Anteil des Verkehrs in den Gesamtemissionen ist im Zeitraum von 1990 bis 2021 um 6,4 % gestiegen. Dies ist laut Umweltbundesamt (UBA) mit einem zunehmenden Absatz von Diesel, wachsendem Straßengüter- und Individualverkehr begründet [8]. Ziel des KSG bis 2030 ist eine Senkung des verkehrsbedingten Anteils an Gesamtemissionen um auf 19 % [6]. Dies würde einem Wert von 84 Mio. t an CO₂-Äquivalenten entsprechen.

Das CO₂-Äquivalent ist eine Maßeinheit, die verschiedene Treibhausgase anhand ihrer Fähigkeit, die globale Erwärmung zu begünstigen, vergleichbar macht. Jedem Gas wird ein Faktor zugeordnet, der als "relatives Treibhausgaspotenzial" oder "Versauerungspotenzial" bezeichnet wird. Dieser Faktor bezieht sich auf Referenzsubstanzen wie Kohlenstoffdioxid (CO₂) oder Schwefeldioxid (SO₂). Das Treibhausgaspotenzial gibt an, wie viel CO₂ in einem Zeitraum von 100 Jahren die gleiche Wirkung auf den Treibhauseffekt entfalten würde wie das betrachtete Gas. Durch Multiplizieren der Emissionsmengen der verschiedenen Gase mit ihren jeweiligen Äquivalenz-Faktoren können die Effekte der Gase miteinander verglichen werden. Auf diese Weise kann die Gesamtmenge der Treibhausgase als "CO₂-Äquivalent" angegeben werden [9 S. 20]. 2024 sollen die neuen Minderungsziele der Sektoren für den Zeitraum von 2031-2040 festgelegt werden [7]. Es ist davon auszugehen, dass der avisierte Anteil der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen aufgrund der gegenwärtigen Mobilitätswende noch weiter sinken wird. Das Umweltbundesamt führte eine Berechnung mit dem Tool TREMOD Version 6.42 durch. TREMOD steht für "Treibhausgas-Emissionsmodell". Es handelt sich um ein Modellierungssystem, das verwendet wird, um die Emissionen von Treibhausgasen aus verschiedenen Quellen zu erfassen, zu analysieren und zu prognostizieren. Das Modell berücksichtigt eine breite Palette von Einflussfaktoren, darunter Antriebstechnologien, Brennstoffverbrauch, Energieeffizienz, Aktivitätsniveau und andere relevante Parameter [8]. Diesel-Autos trugen laut dieser Berechnung durch ihre hohen Realemissionen zur Überschreitung der Grenzwerte für den Ausstoß von Stickstoffoxiden bei. Die Überschreitung der Grenzwerte von Autos mit einem Dieselmotor

ist in TREMOD mit 67 % angegeben. Als Vergleich überschreiten „andere Autos“ die Grenzwerte mit einem Wert von 2,7 % (10.3 Infografik Verkehr).

2.2.1 Klimaziele Stadt Hamburg

Der Hamburger Senat hat sich durch die Fortschreibung des Hamburger Klimaplanes vorgenommen, „die CO₂- Emissionen Hamburgs bis 2030 gegenüber dem Basisjahr 1990 um 55 Prozent und bis 2050 um mindestens 95 Prozent zu reduzieren.“ [10]. Stufenweise soll durch verschiedene Maßnahmen eine Reduzierung erlangt werden. Bei der Maßnahme M-06-07 wird das Ziel der „Steigerung des Anteils elektrisch betriebener Pkw im Fuhrpark der Feuerwehr“ formuliert [10 S. 9]. Einsatzfahrzeuge sind davon jedoch ausgenommen. Die Gründe dafür sind vielfältig. Hauptsächlich existieren bisher nur wenige wirtschaftliche Lösungen, welche die Anforderungen an die Einsatzfahrzeuge der Feuerwehr vollständig abbilden.

2.2.2 Vorbildfunktion der öffentlichen Hand

Im Sinne des in § 13 des im KSG formulierten Berücksichtigungsgebots ist die Innenbehörde als Träger des Rettungsdienstes der Stadt Hamburg dazu verpflichtet, die formulierten Ziele des Bundes hinsichtlich der Reduzierung von Treibhausgasemissionen zu unterstützen [11 § 13]. Die an das feuerwehrinterne Referat der technischen Beschaffung übertragene Aufgabe begründete erste Markterkundungen und Überprüfungen hinsichtlich der Einsatztauglichkeit von emissionsfreundlicheren Einsatzfahrzeugen.

Neben der Vorbildfunktion im Sinne der o. g. Klimaziele, überzeugen Elektroautos durch ihre direkte Beschleunigung, die Reduzierung der Lautstärke, dem Fehlen von Abgasemissionen während der Fahrt sowie im Kontext der Feuerwehr, dem Entfallen von Tankstopps. Zudem ist die Leistung eines Elektromotors nicht abhängig von seinem Betriebspunkt. Während des Einsatzes kann es vorkommen, dass der Dieselmotor kalt gestartet und im Anschluss die maximale Leistung abgefordert wird. Dieses Fahrverhalten sorgt dafür, dass Teile des Fahrzeuges schneller als bei einer schonenden Fahrweise verschleifen [12, 13].

2.3 NEF-System

Der Einsatzzweck des NEF ergibt sich aus der Kombination des das Fahrzeug besetzenden Personals und den Einsatzmitteln (=medizinische Ausrüstung). In Deutschland werden die medizinischen Kompetenzen des Personals in der Notfallrettung in drei Funktionen eingeteilt werden. Rettungssanitäter (RettSan), Notfallsanitäter (NotSan) und Notarzt (NA).

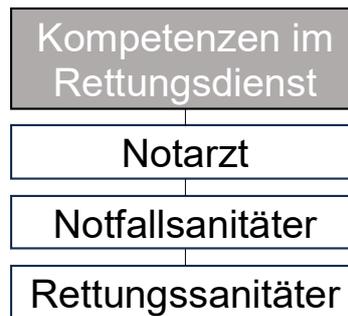


Abbildung 2: Übersicht Kompetenzen im Rettungsdienst (selbsterstellt)

Die genauen Vorgaben unterscheiden sich in Abhängigkeit des jeweiligen Bundeslandes. In Hamburg finden folgende Regelungen Anwendung: Ein NEF muss mit einem NotSan und NA besetzt sein.

Für einen Rettungstransportwagen (RTW) gilt mindestens RettSan als Fahrer und NotSan als Patientenbetreuer [14, 15 S. 31]. Der Rettungssanitäter ist durch eine verhältnismäßig kurze Ausbildung, welche in der Regel 520 Stunden dauert, die Funktion mit der geringsten medizinischen Kompetenz. Vor der Einführung des Notfallsanitäters wurde die zweite, nicht ärztliche Qualifikation, im Rettungsdienst durch den Rettungsassistenten wahrgenommen. Das Berufsbild des Rettungsassistenten wurde mit der Einführung des Notfallsanitäters abgelöst (2014 [16]).

Den Notfallsanitäter kennzeichnet eine dreijährige Berufsausbildung. Er besitzt ausführliche Kenntnis und Kompetenz über die Anwendung „heilkundlicher Maßnahmen invasiver oder medikamentöser Art“ und darf bzw. muss diese auch „eigenverantwortlich durchführen“ [15 S. 27 ff., 16 §2]. Der Notarzt besitzt die höchste medizinische Kompetenz in der Notfallrettung. Er zeichnet sich durch ein abgeschlossenes Studium der Medizin aus und verfügt über hoch spezialisiertes Wissen der Notfallmedizin. Erfordert ein Notfall die medizinische Unterstützung eines Arztes an der Einsatzstelle, wird nach dem Rendezvous-Prinzip ein NEF dem Einsatz zugeordnet. An der

Einsatzstelle treffen sich die Teams des NEF und des RTW. Das NEF bringt unterstützendes Material, insbesondere spezielle Notfallmedikamente (Betäubungsmittel), und medizinisch höher qualifizierteres Personal in Form des Arztes an die Einsatzstelle.

2.4 Flottenentscheid

Um eine möglichst gleiche Arbeitsplatzumgebung für die Einsatzkräfte zu schaffen, wird seitens der Feuerwehr Hamburg versucht, möglichst wenig Varianz in der Fahrzeugbeladung innerhalb eines Fahrzeugtyps zu gewährleisten. Die Ähnlichkeit hilft nicht nur dem Personal des Einsatzdienstes, welches unter Stressbedingungen genau wissen muss, wo sich jedes Behandlungsmittel befindet und dabei hoch konzentriert arbeitet. Auch das Personal der Werkstätten zieht Vorteile bzw. Synergieeffekte: Fehlerauslesung, Ersatzteilbevorratung, frühzeitiges Erkennen von Serienfehlern, vereinfachte Schulung von Werkstattmitarbeitenden, ermöglicht mehrere Rückfallstufen bei der Reservefahrzeugvorhaltung aus der Gleichheit der Fahrzeugtypen. Außerdem kann durch das Multi-Use-Konzept (im Folgenden beschrieben) ein wirtschaftlicheres System der Fahrzeuge gewährleistet werden.

Rückt die Feuerwehr Hamburg zu einem Einsatz aus, wird je nach Meldebild eine bedarfsgerechte Auswahl der alarmierten Einheiten getroffen. Zum Alarmstichwort „Feuer (FEU)“, rückt in der Regel eine Hamburger Löschgruppe aus. Diese besteht aus sechs Einsatzkräften auf dem Hamburger Löschfahrzeug (HLF), zwei Einsatzkräften auf der Drehleiter sowie ggf. zwei Einsatzkräften auf dem Zugführer Einsatzleitwagen (ELW). Diese Einheit wird i. d. R. von einem Löschfahrzeug der Freiwilligen Feuerwehr zu einem kompletten Löschzug ergänzt. Bei dem Einsatz von zwei Löschzügen oder bestimmten Alarmstichworten (z. B. „Feuer mit Menschenleben in Gefahr“ oder „Verkehrsunfall mit eingeklemmter Person“) wird ein Einsatzführungsdienst, der sogenannte „B-Dienst“, mit einem ELW-BDI zu den alarmierten Kräften ergänzt [17].

Die Basisfahrzeuge der NEF, Zugführer-ELW und ELW-BDI sind bis auf einzelne Ausnahmen alle vom Typ Mercedes Sprinter 314 KA CDI mit kurzem Radstand. Sie unterscheiden sich nur im Ausbau, welcher in entnehmbaren Modulen gestaltet ist. Die Vereinheitlichung der Fahrzeugtypen, hat, neben den bereits erwähnten Vorteilen für die Besatzung, insbesondere aus Sicht des Flottenmanagements den Hintergrund, die sich deutlich unterscheidenden Kilometer-Laufzeiten der Fahrzeuge innerhalb der

Flotte zu kompensieren. Ein ELW fährt weniger Einsätze als ein NEF. Hat ein NEF die Laufleistung von zwei Jahren oder 150.000–170.000 km bei den neuen NEF erreicht, werden die Basisfahrzeuge und der Ausbau getauscht [18]. Ein NEF mit mehr Laufleistung fährt dann als ELW. Ein zuvor als NEF genutztes Fahrzeug mit einer hohen Laufleistung wird nach der Rotation als ELW eingesetzt. Ein ursprüngliches ELW-Basisfahrzeug, mit wenig Laufleistung, fährt dann als NEF. So gleichen sich die Unterschiede in der Laufleistung im Zeitraum der planmäßigen Nutzungsdauer aus.

2.5 Fahrzeugaufbau

Das Fahrzeug wurde auf Basis eines Mercedes-Benz e-Vito Tourer Pro 129 / Lang durch die Firma Wietmarscher Ambulanz- und Sonderfahrzeug GmbH (WAS) ausgebaut und für den Testzeitraum der Feuerwehr Hamburg zur Verfügung gestellt.



Abbildung 3: Bild des e-NEF [19]

Das Basisfahrzeug wird von einem Elektromotor mit 150 kW (204 PS) maximaler Leistung angetrieben. Dabei wird durch ein Ein-Gang-Getriebe ein Drehmoment von 365 Nm aufgebracht und eine Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h erreicht [19].

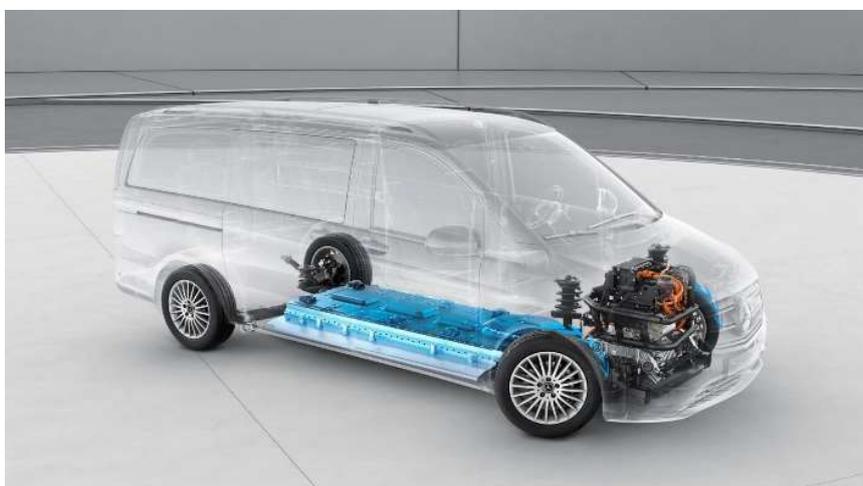


Abbildung 4: e-NEF Transparent mit Fokus auf HV-Batterie [20]

Der Elektromotor des e-Vito ist im vorderen Bereich des Fahrzeuges verbaut. Die Lithium-Ionen-Fahrzeugbatterie, auch Hochvoltbatterie (HV) genannt, ist zwischen den beiden Achsen im unteren Bereich des Fahrzeuges verbaut [20].



Abbildung 5: Elektromotor und HV-Batterie Quelle [20]

Dadurch wird der Schwerpunkt auf die untere Mitte des Fahrzeuges verlagert. Dies ermöglicht ein stabiles Fahrverhalten. Die Batteriekapazität beträgt 100 kWh, wovon jedoch nur 90 kWh nutzbar sind. Im Prinzip werden dadurch die Lebensdauer der Batterie verlängert und Reichweitenschwankungen vermieden. Der Elektromotor wird durch die in der HV-Batterie gespeicherte Energie angetrieben. Anders als bei Verbrennungsmotoren, steht direkt bei Anlegen des Stroms bzw. Betätigen des Gaspedals, das volle Drehmoment zur Verfügung [21 S. 281].

Die von Mercedes angegebene Reichweite beträgt nach WLTP EAER 347 km und innerorts 467 km. Daraus ergibt sich ein kombinierter Stromverbrauch von 28,7 kWh pro 100 km. Das WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) Verfahren ist ein standardisiertes Testverfahren zur Messung von Kraftstoffverbrauch, CO₂-Emissionen und Schadstoffemissionen bei Kraftfahrzeugen. Dieses Verfahren ermöglicht durch die standardisierte Fahrweise einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen [22].

Das Fahrzeug verfügt über fünf Rekuperationsstufen. Unterbricht der Fahrer die Betätigung des Gaspedals während der Fahrt, greift die jeweilige Rekuperationsstufe in das Fahrverhalten ein. Die Rekuperationsstufen „D+“ und „Auto“ sorgen dafür, dass, ähnlich wie bei einem Tempomaten, die Fahrgeschwindigkeit nahezu konstant gehalten wird. Mercedes limitiert die Verzögerung in der Stufe „D+“ auf maximal -0,5 m/s. Der Modus „Auto“ wurde von WAS als untauglich für Einsatzfahren eingestuft. Bei diesem

Modus wird die Stärke der Rekuperation durch einen ECO-Assistenten geregelt. Zudem wird in diesem Modus radarunterstützt auf die Verkehrssituation reagiert und dementsprechend die Stärke der Rekuperation gewählt [23]. Während der Einsatzfahrt kann es durch andere Verkehrsteilnehmer dazu kommen, dass diese unberechenbar auf die Anwesenheit des Einsatzfahrzeuges reagieren. Eine auf Basis eines normalen Fahrprofils beruhende Rekuperations-Berechnung ist daher kontraindiziert. Bei den Modi „-“ und „- -“ wird unter Energierückgewinnung die Fahrgeschwindigkeit gesenkt. Die maximale Verzögerung wird von Mercedes mit $-1,5 \text{ m/s}$ angegeben. Dies entspricht einer Reduzierung von 5 km/h . Ab einer im Tacho angezeigten Geschwindigkeit von 20 km/h werden bei Stufe „- -“ die Bremslichter des Fahrzeuges eingeschaltet. Der Radstand des Fahrzeugs beträgt 3.200 mm , welcher zu einer stabilen und komfortablen Fahrt beiträgt. Mit geöffneter Heckklappe ist das e-NEF 2.219 mm hoch.

Im Unterschied zum e-NEF wurden die übrigen NEF mit konventionellem Antrieb von der Firma C. MIESEN GmbH & Co. KG ausgebaut. Außerdem sind alle Fahrzeuge desselben Typs mit einem Navigationsgerät (Navi) von Typ Garmin $\text{dēzl}^{\text{TM}} 770$ ausgestattet. Da dieses Navi der Feuerwehr Hamburg in Zukunft ebenfalls nicht mehr zur Verfügung stehen wird, wurde der Testbetrieb des e-NEF gleichzeitig genutzt, um die Markterkundung im Bereich der Navigationsgeräte zu erweitern. So wurde ein Navi der Firma SELECTRIC Nachrichten-Systeme GmbH getestet. Dieses Modell verfügt über eine andere Routenführung und bietet weitere Funktionen, welche jedoch keinen Einfluss auf die Forschungsfrage haben.

Ursprünglich wurde das Testfahrzeug von WAS als ELW konzipiert. So ergeben sich im Vergleich zu einer von vornherein geplanten Nutzung als NEF diverse Unterschiede im Allgemeinen und zu den in Hamburg genutzten Standard-NEF im Besonderen. Diesbezüglich soll an dieser Stelle nicht auf Details eingegangen werden. Herausgestellt werden muss jedoch, dass nicht alle Verbrauchsmaterialien des Standardfahrzeuges Platz auf dem e-NEF gefunden haben ($10.6 \text{ Beladeliste E-NEF [58]}$). Dieser Umstand warf die Fragestellung auf, ob der bisherige Hamburger NEF-Ausbau gewichtstechnisch im e-NEF untergebracht werden könnte. Diese Fragestellung wird im weiteren Verlauf durch eine Gewichtsbilanz beantwortet. Außerdem verfügt das e-NEF zusätzlich zur HV-Batterie eine 12 V Zusatz-Batterie, welche die Ladung der medizinischen Geräte sicherstellt. Die Aufbauherstellerrichtlinien des e-Vitos untersagten dem

Fahrzeugausbauer WAS, die Ladung der Medizingeräte im Stand aus der HV-Batterie sicherzustellen (10.5 Blockschaltbild e-NEF/10.5 Blockschaltbild e-NEF).

2.6 Ausstattung

Die notfallmedizinische Ausstattung des NEF ist hauptsächlich mobil gestaltet. Im Gegensatz zu einem RTW werden in einem NEF keine medizinischen Maßnahmen am Patienten durchgeführt, denn es dient im Wesentlichen nur der Zuführung des ärztlichen Personals und einer ergänzenden medizinischen Ausstattung. Ein RTW hingegen ist primär darauf ausgelegt, eine erweiterte notfallmedizinische Behandlung sowie die Transportfähigkeit eines Patienten herzustellen bzw. durchzuführen [24 S. 9]. Die medizinische Ausrüstung im RTW konzentriert sich hauptsächlich auf die notfallmedizinische Grundversorgung und Abdeckung alltäglicher, weniger kritischer Notfallbilder. Die Ausstattung des NEF kennzeichnet sich vor allem durch die auf eher komplexere Erkrankungsbilder fokussierte Ausstattung [25 S. 9 f.]. Die häufig genutzten Materialien sind möglichst einfach entnehmbar in mehreren Rucksäcken aufgeteilt. Um eine schnelle Entnahme zu gewährleisten, sind die Rucksäcke sowie weitere medizinische Geräte im Innenraum des Fahrzeugs verlastet. An der Einsatzstelle angekommen, kann das Personal dann die seitlichen Schiebetüren öffnen und eine schnelle Entnahme gewährleisten. Im Innenraum befinden sich neben dem Sitz für eine dritte (z. B. hospitierende) Person, ein Kühlfach und ein Tresor für Medikamente, ein Drucker für das DIVI-Notfalleinsatzprotokoll (dient der juristisch korrekten Dokumentation des Notfalleinsatzes), ein Feuerlöscher und Feuerwehr-Schutzhelme. Im hinteren Bereich des e-NEF befindet sich der Schubladen-Modulausbau. In diesem sind weitere Materialien verladen, die bei geöffneter Heckklappe entnommen werden können.

Das im Vergleich zum Standardfahrzeug reduzierte Platzangebot des e-NEF und das veränderte Ausbaukonzept hatte zur Folge, dass die Einsatzmittel an anderen Stellen Platz finden mussten. Diverse Verbrauchsmaterialien fanden keinen Platz auf dem e-NEF. Dies hatte zur Folge, dass sich die Besatzung des e-NEF nach der Verwendung dieser an den Materialien des RTW bedienen musste. Spezielle Verbrauchsmaterialien, welche nicht auf den RTW verladen sind, wurden am NEF-Stützpunkt aufgefüllt.

2.7 Ladevorgang

Das e-NEF hat zwei Möglichkeiten zur Ladung der Antriebsbatterie. Zum einen kann sie über Wechselstrom (AC = alternating current) und zum anderen über Gleichstrom (DC = direct current) geladen werden. Im AC-Bereich ist eine maximale Ladeleistung von 11 kW möglich. Eine Ladung von 0 bis 100 % soll dabei laut WAS weniger als 10 h dauern [19]. Im DC-Bereich ist es möglich, das Fahrzeug mit bis zu 110 kW zu laden. Innerhalb von 40 min kann die Fahrzeugbatterie von 10 auf 80 % geladen werden. Im DC-Bereich fließt der Strom direkt in die HV-Batterie. Im AC-Bereich hingegen muss die Wechselspannung noch gleichgerichtet werden. Die sich meist im Fahrzeug befindlichen Gleichrichter limitieren somit den zur Ladung genutzten Gleichstrom. Eine AC-Ladung kann auf simpelster Ebene schon durch die Verwendung einer Haushalts-Schutzkontakt-Steckdose erfolgen. Je nach Adapter und Steckertyp ist im AC-Bereich, bei der Verwendung von dreiphasigem Wechselstrom, eine Ladung mit 11 bzw. 22 kW möglich. Der Gleichrichter des e-Vitos limitiert die AC-Ladung der HV-Batterie auf 11 kW. Bei der DC-Ladung spricht man daher auch von Schnellladen [21].



Abbildung 6: installierte Wallbox an NEF-Station

Im Testbetrieb des e-NEFs wurden der Besatzung mehrere Möglichkeiten der Ladung gegeben. In der Fahrzeugremise am NEF-Stützpunkt, der Asklepios Klinik (AK) Altona, wurde eine Wallbox vom Typ „Webasto Pure“ an die dreiphasige CEE 16 A Steckdose der bereits vorhandenen Ladeeinrichtung des Diesel-NEF angeschlossen. An jeder Phase der Steckdose liegen $230\text{ V} \cdot 16\text{ A} = 3.680\text{ W}$ an. Die dreiphasige Steckdose ermöglicht somit eine Ladeleistung von $3.680\text{ W} \cdot 3 = 11.040\text{ W}$.



Abbildung 7: diverse Kabel zur Ladung des e-NEF

Die Wallbox verfügt auf der anderen Seite über einen Typ 2 Steckeranschluss. Der e-Vito ermöglicht eine Ladung über einen Typ 2 oder CCS-Stecker. Ein CCS-Stecker kommt bei Schnellladesäulen (DC) zum Einsatz. Damit die permanente Ladung des e-NEF gewährleistet ist, wurde neben einem Typ 2 auf Typ 2 Kabel für zivile AC-Ladesäulen auch ein sog. „Juice Booster 2“ mitgeführt.

Dieser Adapter ermöglicht eine Ladung an verschiedensten AC-Steckdosen. Die Ladevorrichtung befindet sich beim e-NEF vorne links an der Stoßstange. Nach dem Anstecken des Ladesteckers im e-NEF ist eine akustische Verriegelung wahrzunehmen. Im Anschluss signalisiert ein leuchtendes Symbol den Status der Ladung. Eine entsprechende Legende ist im „Tankdeckel“ angebracht. Durch einen Druck auf den Knopf mit dem Steckersymbol löst sich die Verriegelung und der Ladestecker kann entnommen werden.

Der Fahrzeughersteller Mercedes gibt an, dass sich der SoC der HV-Batterie zwischen 30 % und 80 % bewegen sollte. Hierbei wird ein maximaler SoC von 80 % empfohlen, um die Langlebigkeit der Batterie nicht zu gefährden. Der aktuelle Zustand der Batterie, in Bezug auf die volle Ausgangskapazität, wird auch als State of Health bezeichnet (SoH). Die Ladung ist von der Netzspannung, Stromstärke und der Art des Netzanschlusses sowie der Umgebungstemperatur abhängig [26].

3. Methodik

3.1 Beschreibung Testbetrieb

Das Notarzteeinsatzfahrzeug mit dem Funkrufnamen „14-NEF-A“ ist an der Asklepios Klinik Altona in der Paul-Ehrlich-Straße stationiert. Auf dem Gelände des Klinikums gibt es ein eigenes Gebäude für die Unterbringung des NEF. Dieses besteht aus einer Fahrzeugremise und mehreren Aufenthaltsräumen. Die Besatzung des NEF besteht in jedem Fall aus einem Notfallsanitäter (NotSan) sowie dem Notarzt. In einigen Fällen unterstützt eine hospitiierende Person das NEF-Besatzungs-Duo. Der NotSan ist der Fahrer des NEF. Dieser ist Mitglied in einer der drei Wachabteilungen der FuRW F14 in Hamburg Osdorf. Der Notarzt wird von den Asklepios Kliniken gestellt. Die Dienstschichten teilen sich in 07:00 Uhr–19:00 Uhr und 19:00 Uhr–07:00 Uhr auf. Einsatzbedingt können die Ablösezeiten der Besatzung variieren, wenn die vorherige Besatzung zum Zeitpunkt des Schichtwechsels noch im Einsatz ist.

Das Einsatzgebiet erstreckt sich über Altona und die umliegenden Stadtteile. Dieses Gebiet wurde bewusst ausgewählt, um möglichst repräsentative Daten von Einsatzfahrten eines Hamburger NEFs zu ermitteln. Neben der urbanen Umgebung fährt das 14-NEF-A auch auf Grund der örtlichen Nähe teilweise über die Bundesautobahn. Im südlichen Teil Hamburgs ist planerisch nur ein NEF stationiert. Sollte sich dieses bereits auf einem Einsatz befinden und sich ein weiterer Notfall in diesem Gebiet ereignen, ist häufig das 14-NEF-A durch die gute Anbindung an die Autobahn das schnellste, arztbesetzte Rettungsmittel. Planerisch erstreckt sich das Gebiet über folgende Fläche (rot umrahmt):

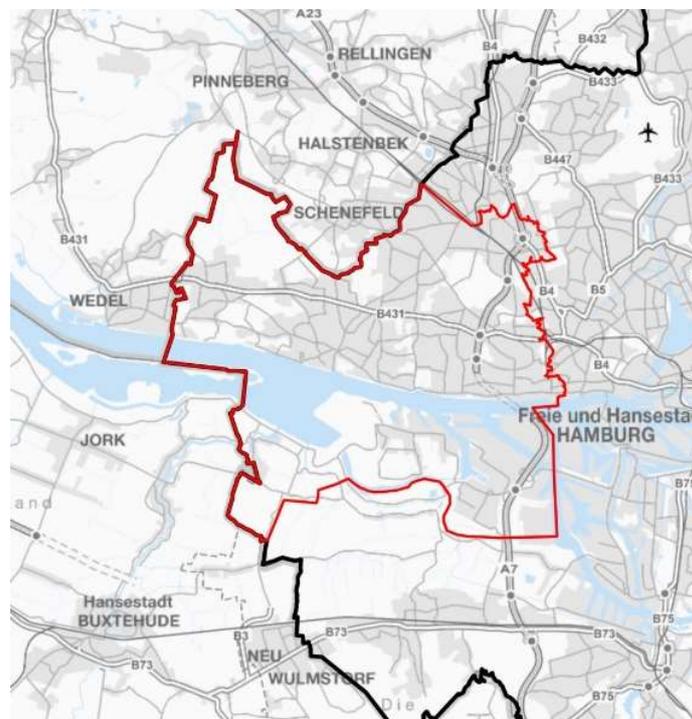


Abbildung 8: planerisches Einsatzgebiet 14-NEF-A [27]

Durch die georeferenzierte Alarmierung kommt es jedoch häufig vor, dass das 14-NEF-A im realen Einsatzgeschehen sein planerisches Einsatzgebiet verlässt. Teilweise fährt das NEF-Team bis an bzw. hinter die Stadtgrenze Hamburgs. Zusammenfassend zeichnet sich das reale Einsatzgebiet des 14-NEF-A durch verschiedenste strukturelle Anforderungen an das Fahrprofil aus.

Der Testzeitraum war ursprünglich für einen Zeitraum von vier Wochen geplant. Er begann am 06.06.2023 und sollte zunächst bis zum 04.07.2023 laufen. In diesem Zeitraum sollte das e-NEF regulär, wie das konventionell angetriebene NEF, am täglichen Einsatzgeschehen teilnehmen. Als Ansprechperson wurde ein NEF-Koordinator der

FuRW 14 benannt, der in Zusammenarbeit mit dem Referat F032 und dem Unterzeichner den Testbetrieb eng begleitete. Vor Inbetriebnahme des Fahrzeugs im aktiven Einsatzdienst erfolgte seitens der Abteilungen Digitalisierung und Informationstechnik (F06) die Ausrüstung mit den ortsspezifischen Digitalfunkgeräten und dem Einsatz-Tablett als Informationssystem. Die komplette medizinische Beladung des Standardfahrzeuges wurde (mit einigen wenigen Ausnahmen) auf dem e-NEF verladen (10.6 Beladeliste E-NEF).

Für die verschiedenen Wachabteilungen erfolgte eine allgemeine Einweisung in das Fahrzeug und durch Selectric eine spezielle Einweisung in das neue Navigationssystem. Bei der Fahrzeugeinweisung wurde explizit auf die Besonderheiten des elektrischen Antriebes eingegangen. Anders als beim Diesel-NEF muss vor Fahrtantritt neben dem Ladeanschluss der Zusatzgeräte der Ladestecker der Fahrzeugbatterie entfernt werden. Dies ist notwendig, da die Aufbaurichtlinien von Mercedes keinen Zugriff auf die Fahrzeugbatterie zulassen [28]. Zudem wurden die Rekuperationsstufen erläutert. Damit die Ladung der Fahrzeugbatterie an vielen Standorten sichergestellt werden konnte, führte das e-NEF eine Reihe von Adaptern mit.

3.1.1 Unterschiede der Fahrzeuge

Im Unterschied zu dem Standardfahrzeug hat das e-NEF keine zweite Schiebetür. Das e-NEF besitzt nur auf der Beifahrerseite eine Schiebetür. Der Ausbau des Innenraums im e-NEF ist nicht für die Verladung von Einsatzmaterialien konzipiert. Dies hatte zur Folge, dass fast die komplette Beladung des NEF im Schranksystem hinter der Heckklappe Platz finden musste. Damit eine Ladung der medizinischen Geräte (Defibrillator, Beatmungsgerät, elektrische Absaugpumpe, Spritzenpumpen, etc.) des Diesel-NEF



Abbildung 9: Defa- und Typ2- Stecker laden das e-NEF

gewährleistet ist, wird beim Abstellen des Fahrzeuges die Ladeerhaltung an das Fahrzeug angesteckt. Die Ladung der HV-Batterie des e-NEF wird in der Remise über den Typ 2 Stecker sichergestellt. Die Ladung der 12 V Zusatzbatterie des NEF-Ausbaus wird durch einen zusätzlichen sog. Defa-Stecker ermöglicht.

Das Diesel-NEF verfügt über eine automatische Feststellbremse. Diese stellt sich nach Schalten des Automatikgetriebes in Stellung P fest. Sobald das Fahrzeug im D-Gang anrollen würde, löst sie sich automatisch. Die Feststellbremse des e-NEFs muss manuell durch das Drücken eines Fußpedals aktiviert werden. Analog dazu wird sie durch ein manuelles Entriegeln wieder gelöst.

3.2 Gewichtsbilanz

Der e-Vito hat ein zulässiges Gesamtgewicht von 3.500 kg, ein Leergewicht von 2.890 kg (mit Ausbau), demnach resultiert eine Gesamtzuladung von 610 kg. WAS betont, dass selbst mit einer personellen Zuladung von 225 kg (drei Personen à 75 kg [25 S. 13]) weitere 385 kg Gewichtsreserve für die Ausstattung des NEFs verbleiben. Um einen ungefähren Überblick über das Gewicht der Ausstattung des NEFs in Hamburg zu gewinnen, wurde das beladene e-NEF gewogen. Hierbei kamen zwei Radlastwaagen vom Typ RWA 8.1.0 E der Firma HKM Messtechnik zum Einsatz.



Abbildung 10: e-NEF auf Fahrzeugwaage

Diese Waagen sind geeicht nach DIN EN 45501 in der Genauigkeitsklasse „III“ (Grobwaagen). Im Bereich 501 kg bis 2.000 kg wird eine Genauigkeit von ± 10 kg angegeben. Diese Abweichung der Genauigkeit ist für den Zweck der Messung ausreichend.

3.3 Ökobilanz

Die Reduzierung von Abgasemissionen steht bei der Verwendung von motoremissionslosen Elektroautos im Vordergrund. Die Zieldefinition, Dieselasgasemissionen zu reduzieren, wurde einleitend erwähnt. Um einen ungefähren Überblick über die potenzielle Einsparung von Co₂-Äquivalenten zu erhalten, soll eine stark vereinfachte Ökobilanz angefertigt werden. Beim Tanken eines Einsatzfahrzeuges der Feuerwehr Hamburg wird neben der Menge des getankten Kraftstoffs auch der Kilometerstand des Fahrzeuges übermittelt. Anhand dieser Daten lässt sich relativ genau der Verbrauch des Fahrzeuges berechnen. Die Daten aus dem Zeitraum einer Berechnungsperiode sollen im Anschluss mit einem Faktor versehen werden. Im Ergebnis können hiernach die sich aus dem Kraftstoff freiwerdenden CO₂-Emissionen bestimmt werden. Allerdings werden hierbei die Phasen der Batterieproduktion sowie dem notwendigen Recyclingprozess für das Elektrofahrzeug in dieser Ausarbeitung nicht berücksichtigt, da dies den Rahmen der Bachelorarbeit überschreiten würde.

3.4 Erhebung der Fahrdaten

Die allgemeinen Fahrdaten von Fahrzeugen der Feuerwehr werden bisher noch manuell in einem Fahrtenbuch dokumentiert. Für jedes Fahrzeug steht ein eigenes Fahrtenbuch zur Verfügung. Mitarbeitende der Feuerwehr, welche das Fahrzeug genutzt haben, sind dazu angewiesen, ihre Fahrt im Fahrtenbuch handschriftlich einzutragen. Es werden neben dem Datum die Fahrtzeit, das Fahrtziel, der Zweck der Fahrt, der Name des Fahrers und die gefahrenen Kilometer dokumentiert (10.8 Ausschnitt Fahrtenbuch). Zusätzlich zu den ohnehin im Fahrtenbuch erhobenen Daten, wurde für den Testbetrieb vom Unterzeichner ein weiterer Erfassungsbogen erstellt. Das Einsatzprotokoll erfasste ebenfalls Datum und Uhrzeit der Einsätze (10.9 Einsatzprotokoll e-NEF). Bei der Auswertung kann diese (gedoppelte) Information als Abgleich der Daten zur genauen Identifizierung eines Einsatzes dienen. Im Einsatzprotokoll wurden neben der aktuellen Außentemperatur (in Grad Celsius) die Ladezustände (State of Charge in %) und die prognostizierten Reichweiten in km abgefragt. Die beiden Werte sollten jeweils beim Ausrücken sowie bei der Ankunft am Ladepunkt angegeben werden. Unter Umständen kann es dazu kommen, dass ein NEF nach einem Einsatz nicht direkt zum Stützpunkt zurückkehren kann; häufig kommt es bereits auf der Rückfahrt eines abgeschlossenen Einsatzes zu einer Alarmierung. Um diese Fälle im Prozess der Auswertung besser einschätzen zu können, wurde ebenfalls im Erfassungsbogen abgefragt,

ob und wie lange eine Ladung zwischen den Einsätzen stattgefunden hat. Die Kombination aus den Daten des Fahrtenbuches und dem Einsatzprotokoll bilden die Datengrundlage für die weitere Betrachtung.

3.5 Beschreibung Ladetests

Um die Angaben des Herstellers hinsichtlich der Ladezeiten zu verifizieren, wurden im Rahmen des Testbetriebes Ladetests durchgeführt. Mercedes gibt die Ladezeit des verwendeten e-Vito Modells im Gleichstrombereich für eine Ladung des SoC (State of Charge) im Bereich 10-80 % mit 40 min an. Im Wechselstrombereich soll der Akku einen SoC von 0-100 % in weniger als 10 h erreichen [19]. Die durch Mercedes zur Verfügung gestellten (graphischen) Ladekurven lieferten nicht die notwendige Genauigkeit. Ziel der Auswertung der Ladekurven ist es, eine Prognose über den zeitlichen Verlauf des SoC in Abhängigkeit der Ladedauer treffen zu können. Die Ladung lässt sich in drei Größen darstellen [21 S. 295 ff.]. Die Ladeleistung in kW wird sowohl im Kombiinstrument des Fahrzeuges sowie an der Ladesäule angezeigt. Berechnet wird die elektrische (Lade-) Leistung aus dem Produkt der anliegenden Spannung in Volt [V] und dem fließenden Strom in Ampere [A]. Die geladene Energie wird an der Ladesäule in kWh dargestellt. Der sich aus der geladenen Energie und der Akkugröße ergebende SoC wird in % angegeben und im Kombiinstrument des Fahrzeuges angezeigt. Vereinfacht berechnet er sich aus folgender Formel [29 S. 1845]:

$$SoC = 1 - \frac{\int I \cdot dt}{C_{max}}$$

Dabei stellt I den Strom dar und C_{max} die maximale Kapazität des gesamten HV-Batteriezellen-Verbundes. Die geladene Differenz des SoC entspricht je nach Prognose einer anderen realen Reichweite. Die im Testbetrieb unter realen Bedingungen gefahrenen Kilometer sollen im Mittel als Anhaltspunkt für eine Gewichtung der geladenen SoC-Differenz dienen.

Die unterschiedlichen Ladeströme, welche je nach Lade-Art (AC oder DC) variieren, erzeugen eigene Ladekurven. In der Remise der NEF-Station am Klinikum wurde die Ladung der HV-Batterie durch eine 11 kW Ladung sichergestellt. Folgende Fragestellung ergab sich:

Wie lange müsste das e-NEF laden, um einen bestimmten SoC zu erreichen?

Um diese Fragestellung beantworten zu können, ist es notwendig, über den kompletten Verlauf der Ladung (0–100 %) die Ladeleistung, die Zeit und den SoC zu messen. Es würde sich zeigen, ob das Batterie-Management-System des e-Vitos die Ladeleistung drosselt, um z. B. die Lebensdauer des Akkus zu verlängern [29 S. 1841].

Durch eine Bildschirmaufnahme der Wallbox-Schnittstellen-App während des kompletten Ladevorganges sollte eine genaue Überwachung der Ladeleistung sichergestellt werden. Dazu wurde das Kombiinstrument des e-NEF gefilmt. Somit wurde die Ladeleistung im Cockpit und der SoC in Kombination der Ladezeit beobachtet.



Abbildung 11: Ansichten zur Überwachung des Ladevorganges

Im Nachgang sollten die Videoaufnahmen ausgewertet und anhand der Daten ein zeitlicher Verlauf der Zustandsgrößen generiert werden. Dieses Vorgehen wurde zwei Mal wiederholt. Dadurch sollten etwaige sonstige Einflüsse, wie Schwankungen der Temperatur, ausgeglichen werden.

Zu Beginn des Testbetriebes des e-NEFs gab es bei den Einsatzkräften Unsicherheiten bezüglich der mit einer Akkuladung zu fahrender Strecke. Mitarbeitende argumentierten, dass häufige Folgeeinsätze und kurze Standzeiten an der NEF-Station dazu führen könnten, dass das e-NEF nicht ausreichend laden kann. Die Möglichkeit, an einer zivilen DC-Schnellladesäule innerhalb kürzester Zeit deutlich mehr Energie laden zu können, würde eine Außerdienststellung verhindern. Dies könnte die kurzen Standzeiten kompensieren.

Das Durchführen von DC-Ladetests würde in diesem Bereich belastbare Daten erzeugen und das Potenzial dieser Variante vergleichbar machen. Die Ladetests sollten an

DC-Schnellladesäulen durchgeführt werden, welche eine deutlich höhere Maximalleistung zur Verfügung stellen. Der e-Vito lässt eine maximale DC-Ladung von 110 kW zu [19]. Hintergrund der Überdimensionierung ist derselbe wie bei der AC-Ladung. Die Auswertung sollte analog zu den AC-Ladetests per Aufzeichnung der im Cockpit angezeigten Werte folgen. Besonders interessant war die Frage, wie schnell der kritische SoC durch eine Schnellladung überwunden werden kann.

3.6 Fragebogen

Neben der Erhebung der Fahrzeugdaten wurde den Besatzungen ein gesonderter Fragebogen zur Verfügung gestellt (10.10 Fragebogen). Die Einbeziehung der tatsächlich mit dem Fahrzeug arbeitenden Besatzungen stand dabei im Vordergrund. Die im Fragebogen erfassten Daten dienen zur Unterstützung der Risikoermittlung. Der Fragebogen umfasst insgesamt zwei Seiten: Zunächst wurde ein einführender Text formuliert, der die Teilnehmer über den Testbetrieb informiert und einige Informationen, wie z. B. den nur für den Testbetrieb improvisierten Ausbau oder die Motivation des Probebetriebes, erwähnt. Eine möglichst breit formulierte Erhebung sollte sicherstellen, dass unterschiedlichste Bereiche des Betriebes bei der Risikobetrachtung berücksichtigt werden. Allgemein folgte der Fragebogen einem Wechsel von Fragen und unterschiedlichen Antwortmöglichkeiten. Freitextfelder gaben den Teilnehmern ergänzend die Möglichkeit, eigene Gedanken zum Testbetrieb zu mitzuteilen und sollten aktivierend wirken. Die Mischung aus der Erhebung objektiv betrachteter Daten und der Ermittlung der subjektiven Wahrnehmung wurde bewusst gewählt. Es sollte so eine sorgfältigere Bearbeitung aufgrund des erhöhten Maßes an Selbstidentifizierung der beteiligten Einsatzkräfte sichergestellt werden [30].

Die Fragestellung, ob ein vollelektrisches NEF die in Hamburg gestellten Anforderungen für diesen Fahrzeugtyp erfüllt, sollte hauptsächlich aufgrund der Fahrdaten bewertet werden. Die im Fragebogen angegebenen Daten sollten bei der Risikobewertung und Einschätzung unterstützen. Dabei ist zu betonen, dass die Bewertung des Wechsels der Antriebstechnologie im Vordergrund stand. Die im Fragebogen erfassten Daten sind daher als Zusatz zu sehen. Die Bewertung des hauptsächlichsten Risikos erfolgt auf Grund der in Kapitel 3.4 Erhebung der Fahrdaten beschriebenen Untersuchung.

3.6.1 Einfluss/Zuverlässigkeit Reichweite

Die Reichweitenprognose des e-Vitos errechnet aufgrund der letzten Fahrdaten unter Einbeziehung des aktuellen SoC die potenziell noch zu fahrende Strecke. Das Berechnungsintervall wurde bei Beginn des Tests zurückgesetzt, sodass nur die durch die Feuerwehr Hamburg gefahrene Strecke in die Berechnung der Prognose eingeht. Neben der Erhebung der angezeigten Reichweite, welche nur bei Beginn der Fahrt eingetragen werden sollte, zielte die erste Frage auf die subjektive Bewertung der Reichweitenprognose ab. Neben der Antwortmöglichkeit, ob die Reichweitenprognose zuverlässig sei oder nicht, stand die Angabe des genutzten Bereiches der Reichweitenprognose zur Beantwortung. Das Fahrprofil eines Einsatzfahrzeuges unterscheidet sich teilweise stark von dem eines zivilen Fahrzeuges. Unter der Nutzung von sogenannten Wegerechten (gem. § 38 StVO unter Verwendung von Blaulicht und akustischen Signalton) wechseln sich spontane, kräftige Beschleunigungen und Bremsvorgänge ab. Diese werden durch eine eher gemäßigte Fahrweise bei den Rückfahrten ohne Wegerechte nach dem Einsatz ergänzt. Die darauffolgenden Fragen sollten eine Einschätzung über den Einfluss und die Nutzung der Rekuperation geben. Es wurde die Anzahl der genutzten Rekuperationsstufen abgefragt. Die Betrachtung dieser Daten sollte dazu dienen, eine Einschätzung über das System der nicht für Einsatzfahrten optimierten Reichweitenprognose zu geben.

3.6.2 Ladevorgang

Ein maßgeblicher Unterschied im Vergleich der beiden Antriebstechnologien ist der Tank- bzw. Ladevorgang. Zunächst sollten die Teilnehmer beantworten, an welchen Standorten sie geladen hatten. Im Anschluss folgte die Abfrage der subjektiven Gesamtbewertung des Ladevorganges. Es wurden die Beispiele „intuitiv“, „kompliziert“, „effizient“ und „benutzerfreundlich“ genannt; die Frage bot jedoch auch die Angabe einer Freitext-Antwort. Die Vorgabe der Beispiele sollte sicherstellen, dass diese Frage in jedem Fall beantwortet wird, um Optimierungspotenzial in diesem Bereich zu erkennen. Im Anschluss folgten Fragen, die Probleme beim Ladevorgang identifizieren sollten. Besonders in Hinblick auf das Verfahren beim Erreichen des kritischen SoC war zu ermitteln, ob eine externe/zivile (Schnell-) Ladesäule benutzt wurde.

3.6.3 Allgemeine Wahrnehmung und Einschätzung

Im vergangenen Testbetrieb des e-RTWs wurde gemeldet, dass die allgemeine Geräuschkulisse durch den fehlenden Verbrennungsmotor verbessert wurde. Da dies einen relevanten Einfluss auf das Stressempfinden während der Einsatzfahrt hat, wurde ermittelt, ob Unterschiede in der Kommunikation bei der Einsatzfahrt bemerkbar sind [31]. Die darauffolgenden Fragen ermittelten Unsicherheiten, Erwartungen und die Bewertung des Platzbedarfs. Die Antwortmöglichkeit wurde in sechs Unterteilungen vorgegeben. Die gegensätzlichen Ausprägungen „sehr“ und „gar nicht“ wurden in sechs Abstufungen gewählt. Eine gerade Anzahl der Abstufungen gewährleistet eine Entscheidung hin zu einer Tendenz.

3.6.4 Unterschiede zum Diesel-NEF

Es wurde erfragt, ob das e-NEF aufgrund eines zu geringen Ladezustandes während des Betriebs außer Dienst gehen musste. Außerdem wurden Unterschiede zum konventionellen NEF hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit im Straßenverkehr, des Fahrverhaltens und der Sitzhöhe ermittelt. Diese Einschätzung der Teilnehmer dient als wertvolle Grundlage für die Einschätzung, des durch den Wechsel des Fahrzeugtyps veränderten möglichen Risikos im Straßenverkehr. Auch potenzielle Auswirkungen auf das Parken im Einsatz sowie die Wahrnehmbarkeit der elektronischen Signaltonanlage ohne das Pressluft betriebene Einsatzhorn wurden ermittelt. Die Befragung diente dazu, Einblicke in die Praxistauglichkeit des e-NEF zu erhalten und mögliche Veränderungen, im Vergleich zum konventionellen NEF, zu identifizieren.

3.6.5 Demografische Daten

Zum Schluss wurden persönliche Fragestellungen an die Teilnehmenden gestellt. Diese hatten den Hintergrund, die Offenheit der Mitarbeiter gegenüber dem Testbetrieb besser einschätzen zu können. Die Frage „Welche Vorteile sehen Sie in der Verwendung von Elektrofahrzeugen im Rettungsdienst? Nennen Sie die Wichtigsten“ diente zur Ermittlung weiterer Risiken. Zudem wurde die Möglichkeit gegeben, Wünsche für ein zukünftiges NEF zu äußern.

3.7 Risikoanalyse

Die Risikoanalyse identifiziert qualitativ auftretenden Parameter hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit, ihrer Detektierbarkeit sowie dem beim Ereignisseintritt resultierenden Schadensausmaß. Daraus abgeleitet ergibt sich ein Gesamtrisiko. Methodisch wird hierfür auf die Darstellung von Prozessschritten mit ihren Unterfunktionen (PD) und die Fehler-Möglichkeit/Einfluss-Analyse (FMEA) zurückgegriffen. Im Anschluss wird das Risiko ausgehend von einem NEF mit konventionellem Antrieb mit dem elektrisch angetriebenen NEF verglichen. Auch der Wechsel des Fahrzeugtyps wird berücksichtigt. Es werden durch die PD ermittelten Prozesse miteinander verglichen. Dabei wird nicht explizit auf die einzelnen Komponenten der Fahrzeuge eingegangen. Die bereits durch die Hersteller durchgeführten Vorbetrachtungen definieren einen Akzeptanzzustand bei der zivilen, normalen Nutzung. Im Fokus dieser Betrachtung steht der Vergleich des Risikos, welches bei der Nutzung als Notarzteinsatzfahrzeug entsteht.

Im ersten Schritt dient die PD dazu, mögliche Störfallereignisse bei der Umstellung auf ein vollelektrisches Notarzteinsatzfahrzeug zu identifizieren. Zunächst werden Basisereignisse ermittelt. Vorauszusehen ist, dass diverse Ereignisse spezifisch nur auf eines der beiden Systeme zurückzuführen sind. Einige Ereignisse werden unbeeinflusst vom Wechsel des Antriebes und nur auf den Wechsel des Fahrzeugmodells zurückzuführen sein. Eine Gegenüberstellung der Prozesse soll qualitativ Unterschiede und Gemeinsamkeiten herausstellen. Diese Prozesse bzw. Ereignisse werden strukturiert in einer logischen Analyse der Fehlermöglichkeiten dargestellt. Anhand von Ursache-Wirkungs-Beziehungen ergeben sich mögliche Abhängigkeiten und Kombinationen aus Bedingungen, die zu einem Ausfall führen könnten.

Der zweite Schritt dient dazu, die identifizierten Fehlerzustände aus der PD in Kombination mit der ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeit und dessen Auswirkung zu bewerten. Jeder identifizierte Fehlerzustand wird einzeln betrachtet. Für jeden Fehlerzustand werden Eintrittswahrscheinlichkeit, Auswirkung und Detektierbarkeit auf einer numerischen Skala dargestellt. Diese Bewertungen werden miteinander kombiniert, um den Risikoindex (RF) für jeden Fehlerzustand zu berechnen. Die Fehlerzustände werden nach ihrem Risikoindex sortiert, um die kritischen Fehler zu identifizieren. Für diese werden präventive oder korrektive Maßnahmen entwickelt, um die

Eintrittswahrscheinlichkeit zu verringern, die Auswirkungen zu minimieren oder die Detektierbarkeit zu erhöhen. Die Akzeptanzkriterien gehen dabei vom bereits zugelassenen System, dem Diesel-NEF, aus.

Die Kombination von PD und FMEA ermöglicht eine systematische Identifizierung, Bewertung und Priorisierung von Risiken und Fehlern in komplexen Prozessen oder Systemen. Dies ermöglicht es, proaktiv Maßnahmen zu ergreifen, um mögliche Probleme zu verhindern oder abzumildern und somit die Zuverlässigkeit und Sicherheit von Prozessen zu verbessern [32–34].

4. Ergebnisse

4.1 Testbetrieb

Nach der bereits beschriebenen Einweisung in die Besonderheiten des e-NEFs und der Übertragung der Beladung ging das e-NEF am 08.06.23 um ca. 11:30 in Dienst. Nur wenige Sekunden nach der Freimeldung folgte die erste Alarmierung. Während das e-NEF samt Besatzung den Einsatz anfuhr, wurde das Diesel-NEF durch andere Mitarbeiter zur NEF-Station am AK-Altona verbracht. Es wurde damit gerechnet, dass im Rahmen des Testbetriebes ein kritischer SoC von 30 % erreicht wird und das e-NEF dann außer Dienst gehen muss. Damit das Fahrzeug nur so kurz wie möglich nicht einsetzbar war, sollte die Besatzung bei Erreichen des kritischen SoC zur NEF-Station zurückkehren, die Beladung wieder auf das Diesel-NEF tauschen und wieder in Dienst gehen. Hierzu wurde das Diesel-NEF provisorisch neben der Fahrzeugremise platziert.



Abbildung 12: Diesel-NEF neben NEF-Station am AK Altona

Beim ersten Einrücken in die NEF-Station wurde die Wallbox installiert. Diese stellt die 11 kW AC-Ladung in der Remise sicher. Die Ladung der 12 V Zusatzbatterie wird durch den Defa-Stecker ermöglicht.

In den ersten Tagen zeichnete sich ab, dass ein Erreichen des kritischen SoC unwahrscheinlich ist. Die Ladeerhaltung des Diesel-NEFs konnte durch die Steckdosenbelegung des e-NEFs nun nicht mehr sichergestellt werden. Dies hatte zur Folge, dass das Diesel-NEF an der nahegelegenen Feuer- und Rettungswache in Othmarschen platziert wurde.

Am 14.06.23 um 02:58 ereignete sich während einer Fahrt ohne Sonder- und Wegerechte bei einem Spurwechsel eine Kollision mit einem zivilen Pkw. Der Fahrer des e-NEFs gab an, durch die getönten Scheiben beim Schulterblick den Unfallgegner übersehen zu haben. Es kam zu einem Schaden an beiden Fahrzeugen. Personen wurden nicht verletzt. Infolgedessen musste das e-NEF außer Dienst gehen. Die Besatzung tauschte die Beladung und setzte ihren Dienst auf dem Diesel-NEF fort.



Abbildung 13: Unfallschaden e-NEF

Die Beschädigungen am Einsatzfahrzeug mussten von einer Fachwerkstatt behoben werden. Das e-NEF ging zur Wiederaufbereitung und Reparatur zurück zur Firma WAS.

Am 07.07.23 konnte das e-NEF gegen Abend wieder in Dienst genommen werden. Es fuhr ohne weitere Komplikationen bis zum 17.07.23 im regulären Einsatzbetrieb. Am Morgen des 17. stellte die Besatzung des NEF fest, dass sich ein Steinschlag im Sichtfeld der Windschutzscheibe befand. Da sich dieser im Laufe der nächsten Einsätze bereits vergrößerte, wurde entschieden, das Fahrzeug erneut außer Dienst zu nehmen. Nachdem eine neue Scheibe eingebaut wurde, ging das e-NEF am 20.07. bis zum Ende des Testbetriebes am 04.08.23 in Dienst. Effektiv unterstützte das e-NEF also an 31 Tagen die Hamburger Notfallrettung. Ein avisierter Testzeitraum von vier Wochen wurde demnach eingehalten.

4.2 Gewichtsbilanz

Es wurde sichergestellt, dass die Waagen auf einem ebenerdigen Boden auf gleicher Höhe positioniert sind. Es folgte eine Kalibrierung des Null-Gewichts. Nun wurde das

beladene Fahrzeug mit beiden Reifen der Vorderachse auf je eine Waage gefahren. Der Fahrer stieg aus. Nach dreimaliger Wiederholung der Messung wurde im gleichen Verfahren das Gewicht der Hinterachse gemessen. Folgende Werte wurden ermittelt:

Tabelle 1: Gewichtsmessung beladenes e-NEF

Gewichtsmessung beladenes e-NEF					
Position der Waage	Gewicht Messung 1 [kg]	Gewicht Messung 2 [kg]	Gewicht Messung 3 [kg]	Mittelwert [kg]	Modus [kg]
Vorne links	750	750	750	750	750
Vorne rechts	770	760	770	767	770
Hinten links	730	730	730	730	730
Hinten rechts	790	790	780	787	790
Summe	3.040	3.030	3.030	3.033	3.040

Es handelt sich bei der Messung um verhältnisskalierte Daten. Die Messungen bestehen je aus drei Einzeldaten, welche wenig streuen und keine extremen Ausreißer aufweisen. In dieser Messung ist die Bestimmung des arithmetischen Mittels ausreichend. Der Ansatz, die Achslasten zu summieren, kam zum Ergebnis, dass das beladene e-NEF im Mittel ein Gewicht von 3.033 kg hat.

Die normativen Vorgaben an ein NEF sind in der DIN 75079 formuliert. Als Planungsgröße wird das Gewicht eines Besatzungsmitgliedes mit 75 kg bemessen. Die Besatzung eines NEFs in Hamburg besteht aus dem Fahrer, dem Beifahrer sowie ggf. einer hospitierenden Person als Mitfahrer. Werden die 3·75 kg zum beladenen e-NEF dazu addiert, ergibt sich ein Wert von 3.258 kg. Bei der zulässigen Gesamtmasse von 3.500 kg resultiert somit eine Gewichtsreserve von 242 kg.

Um zu ermitteln, wie viel die Ausrüstung des Hamburger NEF wiegt, wurde eine weitere Messung im gleichen Verfahren durchgeführt. Von WAS angegeben ist das e-NEF mit einem Gewicht von 2.890 kg. Um diesen Wert und die Messmethode zu verifizieren, wurde das e-NEF mit dem leeren Ausbau gewogen. Hierbei ergaben sich folgende Werte:

Tabelle 2: Gewichtsmessung unbeladenes e-NEF

Gewichtsmessung unbeladenes e-NEF					
Position der Waage	Gewicht Messung 1 [kg]	Gewicht Messung 2 [kg]	Gewicht Messung 3 [kg]	Mittelwert [kg]	Modus [kg]
Vorne links	690	690	680	687	690
Vorne rechts	760	760	770	763	760
Hinten links	690	690	690	690	690
Hinten rechts	740	740	750	743	740
Summe	2.880	2.880	2.890	2.883	2.880

Abweichungen vom Modalwert, dem am häufigsten vorkommenden Wert, könnten z. B. auftretende Windlasten sein, welche das Fahrzeug in eine Richtung geneigt haben. In Summe ergibt der arithmetische Mittelwert der Einzelmessungen eine

Gesamtmasse von 2.883 kg. Dies ist eine Abweichung in Höhe von sieben kg zum erwarteten Wert 2.890 kg. Die Messtoleranz der Waagen ist eine mögliche Ursache dafür.

Um diese Messung zu verifizieren, wurde ebenfalls das Diesel-NEF gewogen. Der Tankinhalt betrug ca. $\frac{3}{4}$. Da sich der Tankinhalt während der Messung nicht nennenswert verändert und nur die Differenz zwischen dem beladenen und dem unbeladenen Fahrzeug gemessen wurde, ist dieser zu vernachlässigen. Es ergaben sich folgende Messungen:

Tabelle 3: Gewichtsmessung beladenes Diesel NEF

Gewichtsmessung beladenes Diesel NEF					
Position der Waage	Gewicht Messung 1 [kg]	Gewicht Messung 2 [kg]	Gewicht Messung 3 [kg]	Mittelwert [kg]	Modus [kg]
Vorne links	730	730	710	723	730
Vorne rechts	720	720	720	720	720
Hinten links	780	780	780	780	780
Hinten rechts	820	820	820	820	820
Summe	3.050	3.050	3.030	3.043	3.050

Bei der dritten Messung ließ sich vorne links eine Abweichung vom Modalwert in Höhe von 20 kg messen. Zur Einschätzung der Validität wird angenommen, dass der Modalwert der Erwartungswert ist. Demnach berechnet sich der prozentuale Fehler wie folgt [35 S. 310]:

$$\left| \frac{710 \text{ kg} - 730 \text{ kg}}{730 \text{ kg}} \right| \cdot 100 = 2,74 \%$$

Diese Abweichung in Höhe von 2,74 % ist bei der geforderten Genauigkeit zu vernachlässigen. In Summe ergab sich im Mittel ein Gewicht für das beladene Diesel-NEF in Höhe von 3.043 kg.

Auf dem e-NEF befanden sich keine außerhalb der Rucksäcke gelagerten Verbrauchsmaterialien. Im Diesel-NEF sind im hinteren Schubladen-System diverse medizinische Verbrauchsmaterialien verlastet. Die Gewichtsmessung für das unbeladene Diesel-NEF wurde ohne Berücksichtigung der Verbrauchsmaterialien durchgeführt. Diese wurden zur Messung des unbeladenen Diesel-NEF nicht entfernt. Somit wird sichergestellt, dass nur die auch im e-NEF berücksichtigte Beladung gemessen wird.

Bei der Messung des unbeladenen Diesel-NEF ergaben sich folgende Werte:

Tabelle 4: Gewichtsmessung unbeladenes Diesel NEF

Gewichtsmessung unbeladenes Diesel NEF					
Position der Waage	Gewicht Messung 1 [kg]	Gewicht Messung 2 [kg]	Gewicht Messung 3 [kg]	Mittelwert [kg]	Modus [kg]
Vorne links	670	680	670	673	670
Vorne rechts	710	710	720	713	710
Hinten links	740	740	740	740	740
Hinten rechts	770	770	770	770	770
Summe	2.890	2.900	2.900	2.897	2.890

Im Mittel wurde eine Achslast in Höhe von 2.897 kg gemessen.

Tabelle 5: Gegenüberstellung Gewichtsdivergenz der NEF

Gewichtsdifferenz Diesel NEF		Gewichtsdifferenz e-NEF	
Betrachtete Messung	Summe Mittelwert [kg]	Betrachtete Messung	Summe Mittelwert [kg]
beladenes Diesel NEF	3.043	beladenes e-NEF	3.033
unbeladenes Diesel NEF	2.897	unbeladenes e-NEF	2.883
Differenz	147	Differenz	150

Die Betrachtung der Gewichtsdivergenzen zwischen den beladenen und unbeladenen Fahrzeugen ergibt beim e-NEF einen Wert von 150 kg, beim Diesel-NEF einen Wert von 147 kg. Aufgrund dieser Betrachtung kann davon ausgegangen werden, dass der Hamburger Ausbau eines NEFs exklusive der divers gelagerten Verbrauchsmaterialien ca. 148,5 kg \pm 10 kg wiegt.

4.3 Ökobilanz

Das Fahrzeug des 14-NEF-A ging Anfang des Jahres 2022 in Dienst. Daher liegen die Tankdaten erst ab dem 01.03.2022 zur Verfügung. Um im späteren Verlauf eine differenzierte Aussage anfertigen zu können, wurden die Tankvorgänge innerhalb eines Jahres betrachtet (bis zum 01.03.2023). Insgesamt wurden bei den 155 Vorgängen innerhalb dieses Zeitraums 7.086,82 Liter Diesel getankt. Mercedes gibt die kombinierten CO₂-Emissionen des Diesel-NEF mit 285 g/km an [36]. Bei einer Fahrtstrecke von 65.438 km würde dieses einer Gesamtemission von 18.649.830 g entsprechen [37]. Ob die Einführung eines elektrischen NEF tatsächlich in Summe zu weniger Treibhausgasemissionen führt, ist noch genauer zu klären. Bei der vollständigen Ökobilanzierung sind die Produktion, die Wartung und die Entsorgung mit zu berücksichtigen. Mercedes garantiert, dass die HV-Batterie bis zu einer Fahrleistung von 160.000 km oder einer Fahrzeugnutzung von acht Jahren die Kapazität der Batterie nicht unter 180 Ah sinkt. Bei der Nennspannung von 400 V ergibt dies eine Kapazität von 72 kWh (ca. 72 %). Außerdem sollte für ein vollkommen emissionsloses Fahren der bereitgestellte Strom auch aus erneuerbaren Energien stammen.

4.4 Fahrdaten

Zur Beschreibung der Fahrdaten ist es notwendig, die Lagemaße Modus, Median und Mittelwert voneinander abzugrenzen. Der arithmetische Mittelwert errechnet sich aus der Summe der Einzelwerte, geteilt durch die Anzahl der Einzelwerte. Er ist anfällig für Ausreißer, kann bei kleinen Datensätzen aber einen Überblick über den Durchschnitt geben. Der Modus, auch Modalwert genannt, beschreibt das Merkmal der Datenreihe mit der größten Häufigkeit (Gewichtsbilanz). Der Zentralwert (Median) beschreibt den Wert, der bei einer der Größe nach geordneten Datenreihe genau in der Mitte liegt. Demnach sind 50 % der Werte größer und 50 % der Werte kleiner als der Zentralwert. Bei gerader Anzahl der Werte entspricht der Zentralwert dem Mittelwert der beiden Werte. Modal- und Zentralwert sind robuster gegenüber Ausreißern [38]. Bei der Auswertung der Fahrdaten ist damit zu rechnen, dass durch menschliche Faktoren einzelne Einträge z. B. vergessen wurden. Damit diese Nullwerte nicht die Auswertung manipulieren, ist es notwendig, von der Verwendung des arithmetischen Mittelwertes abzuweichen.

Der gesamte Testzeitraum erstreckt sich vom 08.06.23 bis zum 04.08.23. In der ersten Phase wurden 1.120 km, in der zweiten 2.017 km und in der dritten Phase 2.996 km im Einsatzgeschehen gefahren. In Summe kamen dabei also 6.133 km zustande. In der weiteren Auswertung werden die drei Phasen als gesamter Testzeitraum beschrieben. Datensätze, bei denen Werte unvollständig sind, werden in der Auswertung nicht berücksichtigt. Es standen von 394 Einsätzen insgesamt 279 vollständige Datensätze zur Verfügung (70,81 %). Die Extremwerte des SoC wurden ausreichend dokumentiert und können zur Auswertung verwendet werden. Die Auswertung stützt sich auf die durch das „Einsatzprotokoll e-NEF“ und das Fahrtenbuch erhobenen Daten. Die Datensätze wurden anhand von Datum und Uhrzeit zusammengefügt. Bei 26 Einsätzen wurde beim Einrücken derselbe SoC wie beim Ausrücken dokumentiert. Kurze Fahrstrecken und die Verwendung der Rekuperationsstufen können eine Begründung dafür sein. Der geringste SoC beim Ausrücken des e-NEF wurde mit 63 % dokumentiert. Bei diesem Einsatz wurde eine Restreichweite von 244 km prognostiziert. Nach 13 km Fahrt erreichte das e-NEF mit einem SoC von 60 % den Stützpunkt. Eine Reichweite von 234 km wurde beim Abstellen des Fahrzeuges protokolliert. Die Temperatur bei Einsatzbeginn betrug laut Cockpit des e-NEF 16 °C. Der geringste Ladezustand während des Testzeitraumes ergab sich nach einer 14 km langen Fahrt. Gestartet ist das

e-NEF mit 65 % bei prognostizierten 232 km und eingerückt ist es mit einem SoC von 59 % bei einer Restreichweite von 211 km. Die Temperatur betrug bei diesem Einsatz 13 °C. Die längste Fahrtstrecke ohne Ladung kam nach vier Folgeeinsätzen zustande. Das e-NEF startete mit einem SoC von 100 % und erreichte nach 67 km Fahrtstrecke die Remise der NEF-Station mit 84 %. Es resultierte eine prognostizierte Reichweite von 295 km. Der längste Einsatz dauerte 3 h und 2 min. Bei diesem Einsatz wurde nach einem Start SoC von 100 % und einer Fahrtstrecke von 10 km die NEF-Station mit einem End SoC von 97 % erreicht. Die Temperatur bei diesem Einsatz wurde mit 22,5 °C notiert.

In 65 % der 279 auswertbaren Einsätze betrug der SoC des e-NEF einen Wert zwischen 90 und 100 %. Bei 24 % der Einsätze bewegte sich der SoC zwischen 80 und 89 %. Im Bereich von 70-79 % bewegte sich der SoC in 6 % der Einsätze. Einen SoC im Bereich von 60 bis 69 % erreichte das e-NEF in 5 % der Einsätze. Bei einem Einsatz wurde der niedrigste SoC von 59 % erreicht.

Die Temperaturen während des Testzeitraumes wurden im Bereich von 12 °C bis 31 °C gemessen. Der Zentralwert der Temperatur beträgt 18,5 °C.

Jeder fünfte Einsatz im Rahmen des Testbetriebes war ein Folgeeinsatz, bei dem kein Zwischenladen stattfand. Im Durchschnitt (Median) kann die Fahrtstrecke eines Einsatzes mit 15 km angegeben werden. Die mittlere Einsatzzeit (Median) ergab sich mit 47 min. Die mittlere Standzeit (Median) zwischen zwei Einsätzen beträgt im Schnitt 27 min. Der arithmetische Mittelwert der Standzeit beträgt 59 min. Durch die bereits erwähnte Differenzierung ist die Verwendung des Zentralwertes robuster.

Während des Testzeitraumes wurde der kritische SoC (>30 %) nicht erreicht.

4.5 Fragebogen

Es wurden 25 Fragebögen von den Teilnehmern ausgefüllt. Eine Person füllte zwei Bögen, eine andere Person drei Bögen aus. Demnach gab es 22 Teilnehmer. Von diesen gaben vier Personen an, dass sie als Arzt die Position des Beifahrers einnahmen. Die 18 restlichen Personen gaben an, die Qualifikation Notfallsanitäter oder Rettungsassistent zu erfüllen. Die Auswertung des Fahrtenbuches ergab, dass 23

unterschiedliche Mitarbeiter während des Testbetriebes das e-NEF gefahren sind. Dies entspricht einer Gesamtheit von 78,26 %.

Zehn Teilnehmende gaben an, die Rekuperationsstufe „-“ genutzt zu haben. Bei den Modi „-“ und „- -“ wird unter Energierückgewinnung die Fahrgeschwindigkeit gesenkt. Bei zehn weiteren Bögen wurde die Stufe „--“ dokumentiert. Drei Mal gaben die Teilnehmer an, die Stufe „++“ verwendet zu haben. Die Bemerkung „-- auf Alarmfahrt zu doll“ lässt vermuten, dass durch die Verwendung der maximalen Rekuperation ein Risiko entstehen könnte, es aber toleriert wurde. Sieben Teilnehmer gaben an, dauerhaft die Stufe „-“ verwendet zu haben. Drei Mal wurde angegeben, dass die Stufe „--“ immer bzw. in 95 % der Fahrt Anwendung fand.

Die Ergebnisse des Fragebogens zeigten, dass fast ausschließlich die Ladung durch die Wallbox der Remise der NEF-Station des AK-Altona genutzt wurde. Durch die mitgebrachten Adapter konnte die Ladung an der Wache F14 sichergestellt werden. Dies wurde nur in einzelnen Fällen genutzt. Die Antworten „benutzerfreundlich, unkompliziert, unproblematisch, intuitiv, gut, effizient und einfach“ bewerten den Ladevorgang positiv. Zusammengefasst wurde diese Rückmeldung in 19 Fragebögen gegeben. Einmal wurde der Ladevorgang neutral bewertet. Vier Teilnehmer bewerteten den zweiten Stecker (Defa) negativ. Dennoch wurde in nur einem Bogen angegeben, dass sich dadurch eine Verzögerung im Einsatzablauf ergab.

Auf 23 Bögen wurde dokumentiert, dass sich durch den Antriebswechsel kein einsatztaktischer Nachteil ergab. Ein Teilnehmer bemerkte, dass sich jedoch aus der Beschleunigung ein Nachteil ergibt. Das veränderte, für die Fahrer ungewohnte Beschleunigungsprofil, kann ein Risiko für eine sichere Fahrt sein.

Kein Teilnehmer dokumentierte, dass es zu Problemen während des Ladevorganges gekommen ist. In Hinblick auf die Verfügbarkeit der Ladesäulen gaben die Teilnehmer folgende Vorschläge: Schnellladesäule, Mutterwache, alle Notaufnahmen, alle FuRw und Tunnel Nord. Als Mutterwache wird umgangssprachlich die Wache bezeichnet, der das NEF feuerwehrseitig zugeordnet ist. Im Fall des Probetriebes war dies die FuRw Osdorf. Eine flächendeckende Ladeinfrastruktur der Feuerwehr könnte eine situationsunabhängige Ladung des e-NEF sicherstellen und eine SoC-begründete

Außerdienststellung verhindern. Ein noch zu klärendes Thema in Bezug auf die Installation von Ladesäulen an den zentralen Notaufnahmen ist die Klärung der Kostenabrechnung. Die Kliniken werden teilweise von verschiedenen Unternehmen geführt und besitzen unterschiedliche Stromtarife. Daher kann hier eine pauschale Lösung nur bedingt angewendet werden.

Auf die Fragestellung, ob Unterschiede bei der Kommunikation auf der Einsatzfahrt bemerkbar waren, wurde von 14 Teilnehmern mit nein geantwortet. Neun Personen gaben an, dass durch das Wegfallen des Verbrennungsmotors weniger Fahrgeräusche zu vernehmen waren. Eine Reduzierung von Lärm auf der Einsatzfahrt vermindert potenziell auch den Stresspegel der Besatzung bzw. des Fahrers und das damit verbundene Risiko eines Unfalls [31].

Vor dem Test auftretende Unsicherheiten, z. B. in Bezug auf die Reichweite oder die Bedienung des elektrischen Fahrzeuges, haben sich bei keinem Teilnehmer bestätigt. Allgemein wird das e-NEF als sehr bedienerfreundlich eingeschätzt (Stufe 2 von „sehr“). Die Teilnehmenden waren insgesamt, bis auf eine Person, mit dem e-NEF sehr zufrieden. Zu betonen ist an dieser Stelle, dass es sich nicht um die Bewertung des provisorischen Aufbaus handelte. Den Teilnehmern des Fragebogens war klar, dass der Ausbau des Testbetriebes nicht der finale (neue) Hamburger Ausbaustandard eines NEFs sein würde.

Die Bewertung des Platzbedarfes war ausgeglichen. Das geringere Platzangebot im Vergleich zum Sprinter wurde wahrgenommen, aber teilweise als ausreichend bewertet. Die leise Fahrweise, die direkte Beschleunigung und das veränderte Platzangebot waren die drei am häufigsten genannten Unterschiede zum konventionell angetriebenen NEF.

Das e-NEF musste zu keinem Zeitpunkt des Testbetriebes aufgrund des veränderten Antriebes außer Dienst gehen. Diese Antwort wurde in jedem Fragebogen gegeben und hilft ebenfalls bei der Einschätzung des Antriebs-Wechsel bezogenen Risikos.

Der Bedeutung der Emissionsreduzierung von Einsatzfahrzeugen des Rettungsdienstes wurde im Schnitt (Modus Stufe 2 von „sehr“) eher wichtig eingeschätzt. Im Bereich

der Akzeptanz der Mitarbeitenden ist dies eine wichtige Erkenntnis. Die von den Teilnehmenden genannten Herausforderungen werden in der Risikoanalyse bearbeitet.

Am häufigsten wurde das noch nicht definierte Verfahren einer Rückfallstufe bei einem Stromausfall genannt. Alle Teilnehmer könnten sich grundsätzlich vorstellen, ein e-NEF in Hamburg einzusetzen. Vereinzelt wurde gewünscht, dass in Zukunft mehr Farbvariation in der Beklebung zu einer besseren Wahrnehmung in Straßenverkehr führen könnte. Die Teilnehmenden gaben ebenfalls alle an, dass eine Veränderung der Wahrnehmbarkeit aufgrund des fehlenden Pressluft-Einsatzhorns bemerkbar ist.

4.6 Risikoanalyse

4.6.1 Prozessbeschreibung Lade-/Tankvorgang des Fahrzeugs

Sobald das Diesel-NEF einen Tankinhalt von unter der Hälfte erreicht, ist die Besatzung dazu angehalten, bei der nächsten Gelegenheit einen Tankvorgang durchzuführen. Der Tankvorgang beginnt mit der Suche einer Tankstelle. Die Feuerwehr Hamburg hat den euroShell-Konzern als Rahmenvertragspartner für Kraftstoffe. Fahrzeuge der Feuerwehr Hamburg können an jeder Tankstelle der Kette tanken. Hat die Besatzung eine Tankstelle gefunden, muss sie an eine freie Zapfsäule fahren. Im Anschluss werden die Abdeckung sowie der Tankdeckel geöffnet. Der Zapfhahn muss aus der Säule entnommen und in den Tankfüllstutzen gesteckt werden. Danach beginnt der eigentliche Füllvorgang. Nachdem der Tank gefüllt wurde, muss die Zapfpistole wieder entnommen und zurück in die Halterung gesteckt werden. Tankdeckel und -klappe werden geschlossen. Anschließend wird der Bezahlschalter aufgesucht und mittels Tankkarte gezahlt. Beim Bezahlen wird der aktuelle Kilometerstand des Fahrzeuges durchgegeben und seitens Shell dokumentiert. Nachdem der Fahrer wieder eingestiegen ist, gilt der Tankvorgang als beendet.

Ein Ladevorgang in der Remise besteht aus dem Öffnen und Lösen der Steckerabdeckung. Anschließend wird das Typ 2-Steckerkabel in die Steckdose des e-NEFs eingeführt. Nach wenigen Sekunden verriegelt sich das Kabel und es wird durch eine leuchtende Anzeige der Ladestatus signalisiert. Während des Testbetriebes war es notwendig, den Defa-Stecker zur Ladeerhaltung der Medizingeräte anzuschließen. Eine Diode signalisiert die korrekte Ladung. Zur Beendigung des Ladevorganges muss nach dem Ziehen des Defa-Steckers der Typ 2-Stecker am e-NEF entriegelt werden.

Dazu wird ein Knopf in der Ladebuchse gedrückt. Akustisch ist ein Entriegeln wahrnehmbar und die Stecker können entnommen und wieder an die Seite gehängt werden. Nachdem die Klappen wieder geschlossen wurden, ist der Ladevorgang beendet.

4.6.2 Prozessbeschreibung Fahrzeugbetrieb

Die Fahrt des Diesel-NEF beginnt mit dem Aufschließen des Fahrzeuges. Nachdem die Besatzung die Türen geöffnet und sich auf ihre Plätze begeben hat, schnallen sich alle Mitglieder an. Der Fahrer betätigt die Zündung des Fahrzeuges und startet den Motor. Dadurch löst sich automatisch der Stecker der Ladeerhaltung. Im Anschluss wird das Tor der Remise durch eine Fernbedienung geöffnet. Nach dem Einlegen des D-Ganges löst sich bei Betätigung des Gaspedals automatisch die Feststellbremse. Zur Aktivierung der Sondersignalanlage ist es notwendig, dass entweder der Fahrer oder der Beifahrer, eine mittig über dem Radio angeordnete, Taste für Blaulicht und Einsatzhorn betätigt. Das Bedienfeld befindet sich im Sichtfeld des Fahrers und des Beifahrers. Bei aktivem Blaulicht kann der Fahrer durch einen Fußtaster die akustische Warneinrichtung aktivieren. Dies ermöglicht, dass der Fahrer dauerhaft beide Hände am Lenkrad halten kann und bei Bedarf das Einsatzhorn aktiviert. Am Einsatzort angekommen, bleiben die optischen Warneinrichtungen aktiviert. Der Fahrer übermittelt der Leitstelle durch ein Tastfeld auf dem Navi, dass er am Einsatzort angekommen ist, legt den P-Gang ein und schaltet durch Entnahme des Zündschlüssels den Motor aus. Im Anschluss steigen die Mitglieder der Besatzung aus und öffnen die seitlichen Schiebetüren. Je nach Bedarf wird die Ausrüstung entnommen und die genaue Einsatzstelle aufgesucht. Im Verlauf des Einsatzes kann es dazu kommen, dass der Notarzt den Transport des Patienten im RTW begleitet. In diesem Fall fährt die restliche Besatzung des NEFs dem RTW in der Regel hinterher bis zur Notaufnahme. Nach der Patientenübergabe wird das NEF wieder einsatzbereit gemacht und begibt sich auf die Rückfahrt. Bei Erreichen des Zielortes (z. B. Fahrzeugremise an NEF-Station) folgt wieder eine Mitteilung an die Leitstelle und ein analoges Vorgehen beim Aussteigen. Die Abgase des Diesel-NEF werden direkt am Auspuff des Fahrzeuges durch eine mitlaufende Absauganlage in der Remise abgesaugt. Die Ladung der Medizingeräte wird beim Diesel-NEF durch das Anstecken eines Ladesteckers sichergestellt.

Die Fahrt des e-NEFs beginnt ebenfalls mit dem Aufschließen des Fahrzeuges. Jedoch müssen beim e-NEF zwei Stecker entfernt werden. Nach dem Einsteigen folgt

wie beim Diesel-NEF der Start des Fahrzeuges. Im rechten Tacho bewegt sich die Nadel von der Position „OFF“ auf „0“. Der Elektromotor ist aktiviert und ist bereit für das Betätigen des Gaspedals. Die Feststellbremse muss mechanisch vor Beginn der Fahrt gelöst werden. Hierzu zieht der Fahrer links unter dem Lenkrad einen Hebel. Das Bedienfeld der Sondersignalanlage befindet sich in der Mittelkonsole zwischen Fahrer und Beifahrer. Es ist nicht im automatischen Sichtfeld der Besatzung. Auch im e-NEF ist ein Fußtaster mit gleicher Funktion verbaut. Bei Betätigen der Hupe mit aktiviertem Blaulicht erklingt eine Tonfolge der akustischen Signalanlage. Das e-NEF verfügt nicht über ein Pressluft-Einsatzhorn. Der Fahrer hat die Möglichkeit, während der Fahrt durch die Schaltwippen des Lenkrads die gewünschte Rekuperationsstufe zu aktivieren. In der höchsten Stufe verzögert das e-NEF merkbar. Ab einer Geschwindigkeit von 20 km/h wird automatisch bei aktivierter Rekuperation das Bremslicht aktiviert. Der Prozess beim Eintreffen am Einsatzort unterscheidet sich im Grunde nicht zum Vorgehen beim Diesel-NEF. Der Fahrer muss zur Aktivierung der Feststellbremse ein Fußpedal drücken. Im Anschluss darauf wird der Zündschlüssel wieder entnommen und die Nadel des rechten Tachos bewegt sich in die „OFF“ Position. Danach steigen die Besatzungsmitglieder aus. Die Geräte und Rucksäcke sind bei dem e-Vito nur durch das Öffnen der Heckklappe erreichbar. Wenig Equipment befindet sich im Fahrgastraum (siehe 10.4 Bilder NEF). Wird dieses am Einsatzort benötigt, ist ein Öffnen der seitlichen Schiebetür notwendig. Das weitere Vorgehen unterscheidet sich nicht von dem des Diesel-NEF.

Die Reichweitenprognosen des Diesel-NEFs und des e-NEFs basieren auf dem zuvor gefahrenen Profil. Das System verrechnet bei beiden Fahrzeugen den durchschnittlichen Verbrauch des Energievorrates mit dem noch zur Verfügung stehenden.

Das Diesel-NEF ist in an der unteren Fahrzeughälfte der Farbe RAL 3026 (leuchtrot) flächig beklebt. Die obere Hälfte ist weiß belassen. Das Fahrzeug verfügt über eine umlaufende gelbe Konturmarkierung aus reflektierenden Rechtecken (sogenannten Gaps) an den Fahrzeugseiten und dem Heck. Es wird nicht weiter konkret auf die Sondersignaleinrichtungen (Blaulicht-/ Warnsystem) eingegangen, da dieses unabhängig vom Antriebswechsel ist.

Dem gegenüber ist das e-NEF ist komplett weiß lackiert und besitzt nur einige wenige feuerrot folierte Akzente.

Die Sitzhöhe des Fahrers ist beim Diesel-NEF niedriger als die des e-NEFs. Dies hat eine Veränderung der Wahrnehmung im Straßenverkehr zur Folge [39 S. 71 ff.]. Sowohl der Fahrer des NEFs als auch die anderen Verkehrsteilnehmer werden anders wahrgenommen. Dies bestätigen alle Teilnehmer des Fragebogens.

Die Heckklappe ist 2.059 mm hoch [40]. Der deutsche Bürger ist durchschnittlich 1.800 mm groß [41]. Bei der Einweisung fiel auf, dass durch die Bauart der Heckklappe ein höheres Verletzungsrisiko (Kopfanstoßen) ausgeht.

4.6.3 Prozessbeschreibung Wartungsprozesse

Die Wartung und Reparatur der Einsatzfahrzeuge der Feuerwehr Hamburg findet, bis auf wenige Ausnahmen, am Standort F03 – Technik und Logistik in der Großmannstraße 10 in Hamburg Rothenburgsort durch die eigenen Kfz-Werkstätten statt. Das Personal der Werkstätten für Kleinfahrzeuge besteht größtenteils aus Kfz-Mechatronikern. Durch die Besonderheit des Hochvolt-Systems des e-Vitos müssten die Mitarbeitenden der Werkstatt, bei einer Implementierung in die Flotte, besonders geschult werden. Zudem müsste zusätzliche Ausstattung zur Reparatur von Elektrofahrzeugen angeschafft werden [42].

4.6.4 Prozessbeschreibung Einsatzlogistik

Die Alarmierung eines NEFs erfolgt georeferenziert. Das Einsatzleitsystem der Feuerwehr Hamburg ordnet einem Einsatz automatisch das nächstgelegene Rettungsmittel zu [27]. Relevant für die betrachtende Risikoanalyse des Antriebs-Wechsels ist die Disposition bei einem kritischen SoC. Das Diesel-NEF tankt mit ausreichender Reserve, sodass eine Disposition bei niedrigem Tankinhalt sehr unwahrscheinlich ist. Sollte das e-NEF mehrere Folgeeinsätze oder nur ganz geringe Ladezeiten erreichen, sollte eine entsprechende Kommunikation zur Einsatzleitstelle frühzeitig vorhanden sein, dass zunächst ein Aufladen erforderlich ist, bevor weitere Einsätze übernommen werden können.

Die Abhängigkeiten der Basisereignisse können wie folgt dargestellt werden. Die komplette Grafik befindet sich unter Punkt 10.11 Darstellung :

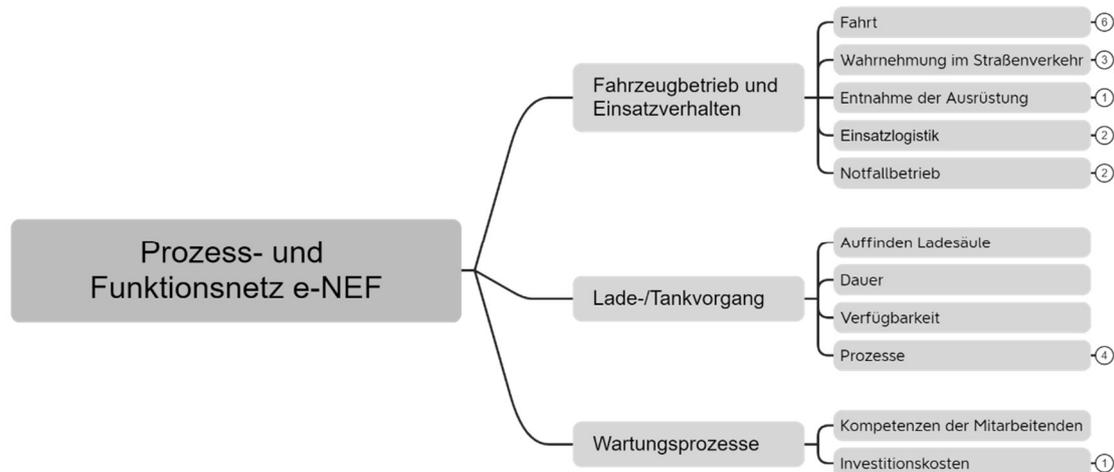


Abbildung 14: Prozess- und Funktionsnetz Basisereignisse

4.6.5 FMEA

Zur Quantifizierung wurden den drei Parametern der Häufigkeit, der Schadensschwere und der Detektierbarkeit Indizes zugewiesen. Die Bewertung bezieht sich auf ein Fahrzeug, welches von mehreren Mitarbeitern gefahren wird.

Die Häufigkeit eines Ereigniseintritts wird in folgenden fünf Stufen beschrieben:

Tabelle 6: Einstufung in Kategorien der Eintrittswahrscheinlichkeit der FMEA

Häufigkeit			
Index	Begriff	Bewertung	quantitativ
5	häufig	kann regelmäßig auftreten	> ein Mal in der Woche
4	gelegentlich	zu erwarten, dass es mehrfach auftritt	> fünf Mal im Jahr
3	selten	zu erwarten, dass es einmal auftritt	ein bis zwei Mal im Jahr
2	sehr selten	nicht zu erwarten, aber nicht auszuschließen	ein Mal in fünf Jahren
1	äußert selten	nicht zu erwarten	ein Mal in 10 Jahren

In der Stufe 5 wird damit gerechnet, dass ein Ereignis mehr als einmal in der Woche eintritt. Die Stufe 1 beschreibt den unwahrscheinlichsten Eintrittsfall einmal in 10 Jahren. Die gewählte Abstufung gewährleistet eine Berücksichtigung von alltäglich vorkommenden Fehlern, welche z. B. durch die wechselnde Fahrzeugbesetzung begründet sind. Zudem ist eine theoretische Bewertung innerhalb der Fahrzeugflotte durch den höchsten Zeitraum sichergestellt. Wird davon ausgegangen, dass ein Fahrzeug zwei Jahre im Einsatz ist, kann bei fünf Fahrzeugen eine generalisierte Aussage über den Eintritt eines Fehlers innerhalb von zehn Jahren getroffen werden.

Bei der Kategorisierung der Schadensschwere wird davon ausgegangen, dass das NEF an der Einsatzstelle durch Material und Personal eine Zustandsverbesserung bzw. einen gleichbleibenden Zustand des Patienten verursacht. Diese Einstufung der Schadensschwere ermöglicht es, das Risiko in Bezug auf die möglichen Auswirkungen der Patientenversorgung klar zu bewerten und angemessene Maßnahmen zur Risikominderung zu treffen. Je höher der Index, desto schwerwiegender können die Folgen sein. Die Abstufungen sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 7: Einstufung in Kategorien der Schadensschwere der FMEA

Schadensschwere		
Index	Begriff	Erklärung
5	schwerwiegend	Schwerverletzte und / oder Tote
4	bedeutend	erheblichen Auswirkungen auf die Patientenversorgung, einschließlich einer Verschlechterung des Gesundheitszustands des Patienten
3	moderat	mäßigen Auswirkungen auf die Patientenversorgung
2	sehr gering	Auswirkungen auf die Patientenversorgung sind immer noch begrenzt
1	unbedeutend	im Falle einer Verzögerung hat dies wahrscheinlich keine schwerwiegenden Auswirkungen auf die Patientenversorgung

Im Falle der Stufe 1 hat das Stöfallereignis einen unbedeutenden Einfluss auf die Patientenversorgung. Ereignisse der maximalen Stufe 5 haben schwerwiegende Konsequenzen in der Versorgung bis hin zum Tod des Patienten. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass die Skalierung möglichst am selben Beispiel stattfindet, sodass vergleichend ein Ranking möglich ist. Jedoch ist nicht unbedingt das Stöfallereignis direkt mit einem Schaden gekoppelt. Nur weil das Fahrzeug nicht einsatzbereit ist, verschlechtert sich nicht automatisch der Patientenzustand. Jedoch wird davon ausgegangen, dass das verzögerte Eintreffen einen Einfluss im Allgemeinen hat.

Die Detektierbarkeit gibt an, wie schnell ein Stöfallereignis als solches erkannt wird. Sie bezieht sich auf die Fähigkeit, ein potenzielles Risiko oder einen Fehler frühzeitig zu erkennen oder zu entdecken, bevor er zu einem tatsächlichen Schaden oder einem Problem führt. Die Detektierbarkeit ist ein wichtiger Parameter, der dazu beiträgt, die Wirksamkeit von Kontrollmaßnahmen und Sicherheitsvorkehrungen zu bewerten.

Tabelle 8: Einstufung in Kategorien der Detektierbarkeit der FMEA

Detektierbarkeit		
Index	Begriff	Erklärung
5	sehr schlecht detektierbar	Probleme sind praktisch nicht erkennbar, bis sie zu schwerwiegenden Verzögerungen oder Schäden führen
4	schlecht detektierbar	Probleme sind schwer zu erkennen, da es keine klaren Anzeichen oder Warnungen gibt, bis es zu Störeignis kommt
3	moderat detektierbar	Probleme werden möglicherweise nicht sofort erkannt und erfordern eine sorgfältige Überwachung der Prozesse und Schulung des Personal
2	gut detektierbar	Probleme können erkannt werden, bevor sie schwerwiegend werden, erfordern jedoch eine gewisse Aufmerksamkeit und Überwachung
1	sehr gut detektierbar	Probleme werden sofort erkannt und können leicht behoben werden, bevor sie sich auf die Patientenversorgung auswirken

Während der Anfertigung der FMEA, wurde festgestellt, dass sich die Detektierbarkeit zwischen den beiden Systemen kaum unterscheidet. Eine gleiche Detektierbarkeit bietet keine Aussagekraft im Vergleich der Antriebe. Es wurde sich dennoch dazu entschieden, zur besseren Einordnung denselben Faktor für beide Systeme zu verwenden.

4.6.6 Fahrzeugbetrieb und Einsatzverhalten

Die Zuverlässigkeit der Reichweitenprognose ist ausschlaggebend dafür, vor Fahrtantritt die zu erwartende Strecke einschätzen zu können. Wird ein NEF z. B. zur überörtlichen Unterstützung außerhalb Hamburgs alarmiert, kann die Reichweitenprognose dabei helfen, die Fahrtstrecke einzuschätzen. Der Eintritt dieses Ereignisses wurde als selten einschätzt. Das Schadensausmaß ist entsprechend als bedeutend eingestuft, da ungenaue Reichweitenprognosen zu erheblichen Unannehmlichkeiten führen können, insbesondere wenn Fahrer aufgrund falscher Informationen riskieren, ohne ausreichend geladene Batterien oder Tankinhalt zu fahren. Eine regelmäßige Anpassung des Berechnungsintervalls kann dabei helfen, die Prognose genauer anhand der zuletzt gefahrenen Daten zu bestimmen.

Der Verzögerungsvorgang kann entweder zu stark oder zu schwach durchgeführt werden. Beide Male ist eine erhöhte Unfallgefahr die Folge. Die durch die Rekuperationsstufen eingeleiteten Verzögerungen, sobald der Fuß vom Gas geht, stellen ein erhöhtes Risiko da. Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist in diesem Fall beim e-NEF höher als die beim Diesel-NEF. Das Schadensausmaß wird als gering eingestuft, da nur die Anwesenheit der Gefahr keinen Einfluss auf die Behandlung des Patienten hat.

Die durch den Elektromotor begründete direkte Beschleunigung kann zu einem Kontrollverlust, zu einem erhöhten Energieverbrauch sowie daraus resultierend zu einer erhöhten Unfallgefahr führen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer zu starken Beschleunigung ist beim e-NEF erhöht, das resultierende Risiko ebenfalls. Durch regelmäßige Fahrsicherheitstrainings kann die Häufigkeit und die Detektierbarkeit jedoch in jedem der Fälle auf den Akzeptanzbereich reduziert werden. Das antriebsbedingte Risiko aus diesem Teilprozess für das Diesel-NEF ist niedriger als beim e-NEF. Nach Anwendung der Vermeidungsmaßnahmen resultiert ein Risiko von $RF_D=16$ beim Diesel und $RF_E=19$ beim e-NEF. Das Risiko, welches sich aus dem Wechsel des Fahrzeugmodells ergibt, ist vor Anwendung der Maßnahmen bei beiden Systemen $RF=24$ und nach bei beiden NEF $RF=16$.

Tabelle 9: Auszug FMEA mit Fokus auf Fahrzeugantrieb und Einsatzverhalten

Abhängig vom Fahrzeugantrieb			FMEA-Tabelle NEF Hamburg		Bewertung Ausgangszustand							Bewertung nach Anwendung von Maßnahmen							
Abhängig vom Fahrzeugtyp, nicht Antrieb					Häufigkeit Diesel-NEF	Häufigkeit e-NEF	Schadensausmaß Diesel-NEF	Schadensausmaß e-NEF	Detektierbarkeit e-NEF	Risikofaktor Diesel-NEF	Risikofaktor e-NEF	Risiko-Kontrolloption / Vermeidungsmaßnahmen	Häufigkeit Diesel-NEF	Häufigkeit e-NEF	Schadensausmaß Diesel-NEF	Schadensausmaß e-NEF	Detektierbarkeit e-NEF	korrigierter Risikofaktor Diesel-NEF	korrigierter Risikofaktor e-NEF
1	Fahrzeugbetrieb und Einsatzverhalten																		
1.1	Reichweitenprognose	Reichweitenprognose unzuverlässig	Restreichweite nicht ausreichend, Zielort wird nicht erreicht	Berechnungsintervall falsch definiert	3	3	4	4	2	24	24	Berechnungsintervall wöchentlich zurücksetzen	2	2	4	4	2	16	16
1.2	Bremsvorgang	zu stark	Unfallgefahr	nachfolgender Verkehr verschätzt Bremsvorgang	3	5	1	1	2	6	10	Fahrsicherheitstraining	2	3	1	1	1	2	3
		zu schwach	Unfallgefahr	Verschätzung im Bremsvorgang	3	3	1	1	2	6	6	Fahrsicherheitstraining	2	2	1	1	1	2	2
1.3	Beschleunigung	zu stark / zu schwach	Kontrollverlust	Fahrer	3	5	2	2	2	12	20	Fahrsicherheitstraining	2	3	2	2	1	4	6
			Unfallgefahr	Verschätzung des Fahrers	3	3	2	2	2	12	12	Fahrsicherheitstraining	2	2	2	2	1	4	4
			hoher Kraftstoff-/Energieverbrauch	Betriebspunkt des Motors nicht korrekt	5	5	1	1	1	5	5	Fahrsicherheitstraining	4	4	1	1	1	4	4

4.6.7 Wahrnehmung im Straßenverkehr und Entnahme der Ausrüstung

Die Wahrnehmung im Straßenverkehr ist ausschließlich abhängig vom Fahrzeugtyp. Eine verringerte Sitzhöhe hat beim e-NEF eine erhöhte Unfallgefahr zur Folge, da die Besatzung eine schlechtere Übersicht über den Straßenverkehr hat. Ebenfalls tragen die Farbe des e-NEF-Testfahrzeuges sowie die Sondersignalanlage dazu bei, dass das Diesel-NEF bzw. der Sprinter besser im Straßenverkehr wahrgenommen werden. Eine Anpassung an die bisherigen Standards der Feuerwehr Hamburg würde eine Anpassung in den Kontrollbereich zur Folge haben. Es resultiert nach Anwendung der

Maßnahmen, aufgrund des veränderten Fahrzeugtyps, ein leicht erhöhtes Risiko des e-NEF ($RF_D=6$ & $RF_E=8$)).

Die Entnahme der Ausrüstung ist ebenfalls unabhängig vom Antrieb. Der reduzierte Platzbedarf und die provisorische Anordnung der Einsatzmittel haben zur Folge, dass das Risiko einer Verzögerung in der Einsatzbereitschaft beim e-NEF erhöht ist. Auch in diesem Fall ist ein bedarfsgerechter Ausbau sowie die Schulung der Mitarbeiter eine Möglichkeit, dieses Risiko auf den Akzeptanzzustand zu senken. Durch die konkrete Entwicklung eines bedarfsangepassten Ausbaus könnten die Mitarbeitenden die verzögernden Faktoren identifizieren und die Detektierbarkeit verbessern.

Tabelle 10: Auszug FMEA mit Fokus auf Wahrnehmung im Straßenverkehr und Entnahme der Ausrüstung

Abhängig vom Fahrzeugantrieb		FMEA-Tabelle NEF Hamburg	Bewertung Ausgangszustand	Bewertung nach Anwendung von Maßnahmen															
Abhängig vom Fahrzeugtyp, nicht Antrieb				Häufigkeit Diesel-NEF	Häufigkeit e-NEF	Schadensausmaß Diesel-NEF	Schadensausmaß e-NEF	Detektierbarkeit e-NEF	Risikofaktor Diesel-NEF	Risikofaktor e-NEF	Risiko-Kontrolloption / Vermeidungsmaßnahmen	Häufigkeit Diesel-NEF	Häufigkeit e-NEF	Schadensausmaß Diesel-NEF	Schadensausmaß e-NEF	Detektierbarkeit e-NEF	korrigierter Risikofaktor Diesel-NEF	korrigierter Risikofaktor e-NEF	
2	Wahrnehmung im Straßenverkehr																		
2.1	Sitzposition	andere Verkehrsteilnehmer werden schlecht wahrgenommen	Unfallgefahr	Verschätzung des Fahrers	4	5	2	2	1	8	10	Fahrsicherheits-training	3	4	2	2	1	6	8
2.2	Farbe	Einsatzfahrzeug wird schlecht von anderen Verkehrsteilnehmern wahrgenommen	Unfallgefahr durch nichtwahrnehmen des Einsatzfahrzeuges	Verkehrsteilnehmer nehmen Einsatzfahrzeug nicht als solches wahr	4	5	2	2	1	8	10	Fahrzeugarbe verändern	3	3	2	2	1	6	6
2.3	Sondersignalanlage				4	5	2	2	1	8	10	Sondersignalanlage verändern	3	3	2	2	1	6	6
3	Entnahme der Ausrüstung																		
3.1	Entnahme der Ausrüstung	komplizierte Entnahme der Ausrüstung	Verzögerung der Einsatzbereitschaft	Platzierung der Ausrüstung nicht an Einsatzverlauf angepasst	3	4	3	3	3	27	36	Überarbeitung des Ausbaus, Schulung Mitarbeiter	3	3	3	3	2	18	18

4.6.8 Einsatzlogistik

Die Wahrscheinlichkeit, dass das NEF einem Einsatz zugeordnet wird und zu dem Zeitpunkt einen kritischen Zustand der Batterie oder des Tankinhaltes hat, ist aufgrund der Tankgröße beim Diesel-NEF geringer. In Summe kann das Diesel-NEF bis zum Erreichen des halbvollen Tankzustandes, bei dem die Besatzung zur Auffüllung des Kraftstoffvorrates angewiesen ist, mehr Reichweite erzielen. Das e-NEF hingegen hat planmäßig keine Tankstopps. Durch eine Übermittlung des SoC an das Einsatzleitsystem könnte ein Eintritt dieses Ereignisses verhindert werden. Nach Anwendung der

Maßnahmen resultieren in diesem Bereich Risikofaktoren von $RF_D=3$ sowie $RF_E=3$. Das Ausmaß des Schadens bleibt unbeeinflusst.

Das e-NEF besitzt durch die fehlenden Motorgeräusche eine deutlich geringere Wahrscheinlichkeit in der Störung der Kommunikation während der Einsatzfahrt. Eine Verringerung der Motordrehzahl des Diesel-NEF könnte eine mögliche Lösung sein. Die Detektierbarkeit dieser beiden Ereignisse ist als sehr gut eingestuft. In diesem Fall ist der Gesamtrisikofaktor $RF_D=8$ höher als der $RF_E=2$. Der höhere Wert ist mit der hohen bzw. beim e-NEF sehr niedrigen Eintrittswahrscheinlichkeit zu begründen.

Tabelle 11: Auszug FMEA mit Fokus auf Einsatzlogistik

Abhängig vom Fahrzeugantrieb		FMEA-Tabelle NEF Hamburg			Bewertung Ausgangszustand						Bewertung nach Anwendung von Maßnahmen								
Abhängig vom Fahrzeugtyp, nicht Antrieb					Häufigkeit Diesel-NEF	Häufigkeit e-NEF	Schadensausmaß Diesel-NEF	Schadensausmaß e-NEF	Detektierbarkeit e-NEF	Risikofaktor Diesel-NEF	Risikofaktor e-NEF	Risiko-Kontrolloption / Vermeidungsmaßnahmen	Häufigkeit Diesel-NEF	Häufigkeit e-NEF	Schadensausmaß Diesel-NEF	Schadensausmaß e-NEF	Detektierbarkeit e-NEF	korrigierter Risikofaktor Diesel-NEF	korrigierter Risikofaktor e-NEF
4	Einsatzlogistik																		
4.1	Disposition bei Tank-/Ladezustand zu stand X	Einsatz wird trotz niedrigem Tankzustand zugewiesen	Restreichweite nicht ausreichend, Zielort wird nicht erreicht	Tankinhalt zu gering	1	2	3	3	1	3	6	Übermittlung des Tank-/Ladezustandes an Einsatzleitsystem	1	1	3	3	1	3	3
4.2	Kommunikation mit Leitstelle	Fahrgeräusche zu laut	Kommunikation auf Grund von Fahrgeräuschen gestört	Motorgeräusche	5	1	2	2	1	10	2	Verringerung der Motordrehzahl bei Diesel-NEF	4	1	2	2	1	8	2

4.6.9 Notfallbetrieb

Im Notfallbetrieb werden in dieser Risikoanalyse zwei Ereignisse betrachtet. Einerseits ein Stromausfall, andererseits eine Durchfahrt durch Wasser. Hamburg ist durch die geografische Lage ein potenzielles Sturmflut-Gebiet [43]. Die Wahrscheinlichkeit einer Wasserdurchfahrt in Höhe X ist im Ansatz gleich, die Auswirkung ebenfalls. Durch die Auswahl eines geeigneten Fahrzeugmodells kann das Risiko im Ursprung gemindert werden. Alternativrouten und Fahrsicherheitstraining können bei bestehenden Systemen Anwendung finden sowie die Detektierbarkeit verbessern. Der Stromausfall als Ereignis hat für das Diesel-NEF als Konsequenz, dass die Zusatzbatterie nicht geladen werden kann. Nach langer Zeit wird die Ladung der Medizingeräte nicht mehr sichergestellt sein und im schlimmsten Fall würden diese keine Funktion mehr haben. Beim e-NEF würde ein Stromausfall hauptsächlich Auswirkungen in der Fahrzeugbatterie haben. Die Ladung der Medizingeräte wird durch die, im Verhältnis der 12 V

Zusatzbatterie, sehr große HV-Batterie sichergestellt. Im schlimmsten Fall könnte das e-NEF keine weiteren Einsätze mehr anfahren. Der Energieversorger Hamburg rechnet im Durchschnitt mit einer 51,3 min langen Unterbrechung alle 5,4 Jahre. Vorbeugend wäre es ausreichend früh, den Ladevorgang einzuleiten und somit einen Ausfall der Stromversorgung zu puffern [44]. Nach Anwendung der Verhinderungsmaßnahmen resultiert ein leicht erhöhtes Risiko beim Diesel-NEF, da die Ladung der Medizingeräte durch die HV-Batterie des e-NEFs gepuffert wird.

Tabelle 12: Auszug FMEA mit Fokus auf Notfallbetrieb

Abhängig vom Fahrzeugantrieb		FMEA-Tabelle NEF Hamburg		Bewertung Ausgangszustand								Bewertung nach Anwendung von Maßnahmen							
Abhängig vom Fahrzeugtyp, nicht Antrieb				Häufigkeit Diesel-NEF	Häufigkeit e-NEF	Schadensausmaß Diesel-NEF	Schadensausmaß e-NEF	Detektiertbarkeit e-NEF	Risikofaktor Diesel-NEF	Risikofaktor e-NEF	Risiko-Kontrolloption / Vermeidungsmaßnahmen	Häufigkeit Diesel-NEF	Häufigkeit e-NEF	Schadensausmaß Diesel-NEF	Schadensausmaß e-NEF	Detektiertbarkeit e-NEF	korrigierter Risikofaktor Diesel-NEF	korrigierter Risikofaktor e-NEF	
5	Notfallbetrieb																		
5.1	Durchfahrt von Wasser in Höhe X	um Einsatzort zu erreichen ist Wasserdurchfahrt der Höhe X notwendig	Fahrzeug defekt, Zielort wird nicht erreicht	Wasser dringt in Motorraum	2	2	2	2	3	12	12	Fahrsicherheitstraining, Alternativroute nehmen	2	2	2	2	2	8	8
5.2	Ladung Zusatzbatterie/Medizingeräte	Stromausfall < 1h	Medizingeräte werden nicht geladen	Ladezustand Zusatzbatterie zu gering	3	2	1	1	1	3	2	Notstromversorgung	3	2	1	1	1	3	2
5.3	Ladung Zusatzbatterie/Medizingeräte	Stromausfall > 1h	Medizingeräte werden nicht geladen, nicht mehr Einsatzbereit	Ladezustand Zusatzbatterie zu gering	2	1	3	3	1	6	3	Notstromversorgung	2	1	2	2	1	4	2

4.6.10 Tank-/Ladevorgang

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Besatzung des NEFs in ihrer Nähe keine freie Tankstelle findet, wurde als selten eingestuft. Da das e-NEF in der Fahrzeugremise und durch die Adapter an jeder Stelle laden kann, wo Strom verfügbar ist, ist die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Fehlereignisses geringer. Die Tankpausen fallen für das e-NEF komplett weg, dadurch ist die Häufigkeit einer Tankunterbrechung auch sehr viel niedriger als beim Diesel-NEF. Während einer Tankunterbrechung wäre das NEF theoretisch für mehrere Minuten nicht einsatzbereit. Je nach Notfallbild kann eine Abwesenheit von Personal und Material zu mäßigen Auswirkungen auf die Patientenversorgung führen, da in diesem Fall ein weiter entferntes NEF anrücken müsste. Das sich aus diesem Prozess ergebene antriebsbedingte Risiko des Diesel-NEFs ist höher als das des e-NEFs.

Tabelle 13: Auszug FMEA mit Fokus auf Tank-/Ladevorgang

Abhängig vom Fahrzeugantrieb			FMEA-Tabelle NEF Hamburg		Bewertung Ausgangszustand						Bewertung nach Anwendung von Maßnahmen													
Abhängig vom Fahrzeugtyp, nicht Antrieb					Häufigkeit Diesel-NEF	Häufigkeit e-NEF	Schadensausmaß Diesel-NEF	Schadensausmaß e-NEF	Detektiertbarkeit e-NEF	Risikofaktor Diesel-NEF	Risikofaktor e-NEF	Risiko-Kontrolloption / Vermeidungsmaßnahmen	Häufigkeit Diesel-NEF	Häufigkeit e-NEF	Schadensausmaß Diesel-NEF	Schadensausmaß e-NEF	Detektiertbarkeit e-NEF	korrigierter Risikofaktor Diesel-NEF	korrigierter Risikofaktor e-NEF					
Nr.	Prozess / System	Fehlermöglichkeit (was wäre, wenn..)	potentielle Fehlerfolge	potentielle Fehlerursache																				
6	Tank-/Ladevorgang																							
6.1	Tank-/Ladezustand	Tankstelle/Ladesäule wird nicht aufgefunden	Tank/Fahrzeugatterie kann nicht aufgefüllt/-laden werden	Tankstelle/Ladesäule nicht in ausreichender Nähe vorhanden	3	2	1	1	2	6	4	Tank-/Ladevorgang ausreichend früh einleiten						2	2	1	1	2	4	4
6.2		Tankvorgang begründet Außerdienststellung und dauert X min	Fahrzeug für X min außer Dienst	Dienstvorschrift gibt vor außer Dienst zu gehen zum Tanken/Laden	5	2	3	3	1	15	6	Tank-/Ladevorgang ausreichend früh einleiten						4	2	3	3	1	12	6
6.3		Zapf-/Ladesäule ist nicht verfügbar	Tank kann nicht aufgefüllt werden	Alle Zapfsäulen der Tankstelle durch andere Kunden belegt	3	1	2	2	1	6	2	Tank-/Ladevorgang ausreichend früh einleiten						3	1	2	2	1	6	2

In den vergangenen Jahren bekam das Thema der Brandgefahr von Elektroautos mehr Aufmerksamkeit. Der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. empfiehlt präventiv die Risiken eines Fahrzeugbrandes in einer Garage zu minimieren. Dies kann über den organisatorischen, baulichen und anlagentechnischen Brandschutz realisiert werden [45]. Eine Untersuchung des Deutschen Bundestages ergab 2022: „Hinsichtlich der Brandwahrscheinlichkeit gibt es auch in der Fachliteratur bisher keine Anhaltspunkte dafür, dass elektrisch angetriebene Fahrzeuge häufiger betroffen wären.“ [46 S. 4]. Daher wurde die Betrachtung dieses Risikos in dieser Ausarbeitung ausgelassen.

4.6.11 Wartungsprozesse

Die Außerdienststellung eines Einsatzfahrzeuges wegen eines technischen Fehlers oder einer geplanten Wartung wird bei der Feuerwehr Hamburg durch die Vorhaltung von Reservefahrzeugen kompensiert. Bei der Betrachtung dieser Prozesse werden diese nicht berücksichtigt. Die durch die bereits beschriebenen Unterschiede in der Fahrzeugreparatur gerade in Bezug auf das HV-System begründen eine Kompetenzerweiterung der Mitarbeitenden der Kfz-Werkstätten der Feuerwehr Hamburg. Alternativ muss das Einsatzfahrzeug zu einer spezialisierten Fachwerkstatt verbracht werden. Dieses hätte jedoch eine noch längere Außerdienststellung zur Folge. Die Folge der Abwesenheit des Fahrzeuges hätte theoretisch eine bedeutende Auswirkung der Patientenversorgung. Betrachtet wird hierbei ein und dasselbe Fahrzeug. Die

Feuerwehr Hamburg besitzt zur Kompensation solcher Szenarien technische Reserven.

Elektroautos haben einen geringeren Durchsatz an Verschleißteilen [47 S. 38 f.]. Dies hat weniger wiederkehrende Kosten zur Folge. Eine Qualitätssteigerung der Bauteile könnte eine Vermeidungsmaßnahme sein. Der Risikofaktor beider Systeme ist aufgrund der schlechten Detektierbarkeit recht hoch.

Tabelle 14: Auszug FMEA mit Fokus auf Wartungsprozesse

Abhängig vom Fahrzeugantrieb		FMEA-Tabelle NEF Hamburg				Bewertung Ausgangszustand						Bewertung nach Anwendung von Maßnahmen							
Abhängig vom Fahrzeugtyp, nicht Antrieb																			
Nr.	Prozess / System	Fehlermöglichkeit (was wäre, wenn..)	potentielle Fehlerfolge	potentielle Fehlerursache	Häufigkeit Diesel-NEF	Häufigkeit e-NEF	Schadensausmaß Diesel-NEF	Schadensausmaß e-NEF	Detektierbarkeit e-NEF	Risikofaktor Diesel-NEF	Risikofaktor e-NEF	Risiko-Kontrolloption / Vermeidungsmaßnahmen	Häufigkeit Diesel-NEF	Häufigkeit e-NEF	Schadensausmaß Diesel-NEF	Schadensausmaß e-NEF	Detektierbarkeit e-NEF	korrigierter Risikofaktor Diesel-NEF	korrigierter Risikofaktor e-NEF
7	Wartungsprozesse																		
7.1	Wartungsprozesse	Mitarbeiter verfügen nicht über ausreichende Kompetenz für Reperatur	Fahrzeug muss in Fremdwerkstatt repariert werden, lange Außerdienststellung	Besonderheiten des Fahrzeugs begründen Sonderkompetenz	2	3	4	4	2	16	24	Mitarbeiterschulung der Werkstätten	2	2	4	4	2	16	16
7.2		hoher Durchsatz an Verschleißteilen	Wiederkehrende Kosten	hohe Fahrzeugnutzung	3	2	4	4	4	48	32	Qualität der Verschleißteile erhöhen	2	2	4	4	4	32	32

Zu bemerken ist, dass bei mehreren Basisereignissen in Summe ein niedrigeres Risiko von e-NEF ausgeht. Die Frage, ob durch den Antriebswechsel des Einsatzfahrzeuges ein höheres Risiko zu verzeichnen ist, kann unter Berücksichtigung der betrachteten Basisereignisse beantwortet werden: Durch Anpassungsmaßnahmen an das bisherige System (Verbesserung der Signalwirkung durch die Beklebung, Optimierung der Geräteentnahme durch Anpassung des Ausbaus, ...) kann das e-NEF die aus dem Wechsel des Fahrzeugmodells entstehenden Risiken senken. Hauptsächlich unterscheiden sich beide Fahrzeuge in der mit einer Tankfüllung bzw. Akkuladung möglichen zu fahrenden Strecke. Außerdem unterscheidet sich die Dauer des Tank-/Ladevorganges. Ein konventioneller Tankvorgang dauert in der Regel nur wenige Minuten. Die permanente Ladung in der Fahrzeugremise macht einen separaten Tankstopp des e-NEFs jedoch theoretisch überflüssig. Der Betrieb als Einsatzfahrzeug stellt gerade in diesem Bereich besondere Herausforderungen an die Systeme. Um eine Abschätzung darüber treffen zu können, wurden diverse Ladetests durchgeführt. Die komplette FMEA-Tabelle befindet sich unter Punkt 10.12 FMEA-Tabelle.

4.7 Ladetests

Außerhalb des Einsatzbetriebes wurde der Akku des e-NEF bis zu einem SoC von 5 % entleert. Dabei fiel auf, dass die Motorleistung ab einem SoC von 5 % auf nur etwa ein Viertel des Maximalwertes gedrosselt wird. Falls die Ladung an der Wallbox nicht funktionieren sollte, resultierte demnach eine Restreichweite zum Aufsuchen einer anderen Lademöglichkeit. Der 11 kW AC-Ladetest fand an einer Wallbox vom Typ „Easee Home“ statt. Diese Wallbox ermöglicht eine Ladung im Bereich von 1,4 bis 22 kW [48]. Das Lademanagement des e-Vitos begrenzt eine AC-Ladung auf 11 kW. Durch die zur Verfügung gestellte höhere elektrische Leistung wird sichergestellt, dass das e-NEF in jedem Fall mit der maximalen Ladeleistung lädt. Die aktuelle Ladeleistung wird phasengenau in Echtzeit in der Easee-App dargestellt.

Die AC-Ladetests wurden an der beschriebenen Wallbox durchgeführt. Zunächst wurde die Aufnahme des Cockpits durch eine Kamera gestartet. Diese nahm folgende Sicht auf:



Abbildung 15: Ausschnitt Kameraaufnahme zur Überwachung des Ladetests

Die ausreichende Ladung der Videokamera selbst wurde dadurch sichergestellt, indem das Display des Cockpits eingeschaltet blieb. Die Außentemperatur bewegte sich zwischen 16,5 und 14 °C. Im Anschluss wurde durch das Typ 2 Stecker-Kabel die Ladung des e-NEF begonnen. Der Stecker verriegelte und die leuchtende Anzeige signalisierte eine Ladung. Die Anzeige der Ladeleistung im Cockpit veränderte sich innerhalb von wenigen Sekunden bis zu einem Wert von 11 kW. Nachdem das e-NEF die Ladung beendete, wurden die Kabel entriegelt und abgezogen. Danach wurde der Akku des Fahrzeuges wieder entladen und derselbe Vorgang ein weiteres Mal wiederholt. Im Anschluss wurden die Videoaufnahmen ausgewertet. In folgender Abbildung sind die Ladeleistung und der SoC in Abhängigkeit der Zeit dargestellt.

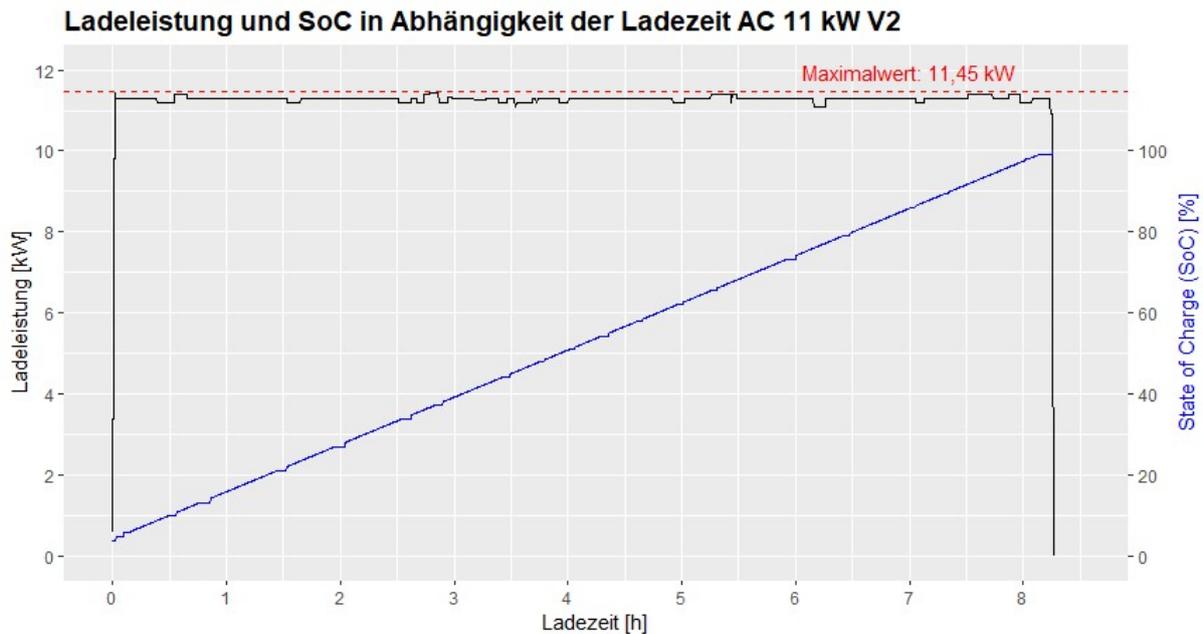


Abbildung 16: Grafische Darstellung des Ladetests AC 11 kW V2

Die Ladeleistung erreichte nach 13 Sekunden den erwarteten Wert von 11 kW. In der Spitze wurde im ersten Test durch die Wallbox eine Gesamtleistung von 11,42 kW zur Verfügung gestellt. Im zweiten Test 11,45 kW. Die Messungen scheinen plausibel zu sein, da der Hersteller eine maximale Ladeleistung von 11 kW im AC-Bereich angibt. Durch die Bereitstellung von potenziell mehr Leistung lässt sich verifizieren, dass das e-NEF trotzdem mit maximal ca. 11 kW lädt. Im Graphen der Ladeleistung sind Schwankungen zu beobachten. Diese bewegen sich zwischen 11,2 kW (bei V2) und dem Maximalwert der Messung. Schwankungen im Netz könnten eine Ursache dafür sein. Da die angegebene Grenze von 11 kW nicht unterschritten wird, sind diese zu vernachlässigen. Auffällig ist, dass der SoC sich nahezu linear entwickelt. Typisch für eine Ladekurve eines Li-Ionen-Akkus ist ein Abfall der Ladeleistung, einhergehend mit der Änderungsrate des SoC, ab ca. 80 % [49]. Die Änderungsraten des SoC sind bis auf einzelne Fälle über den zeitlichen Verlauf der kompletten Ladung nahezu gleich. Für den Zweck der Beantwortung der Frage, wie lange das e-NEF laden müsste, um einen gewissen SoC zu erreichen, ist dieses Erkenntnis von großer Bedeutung. Anhand der Ladekurven kann, fast auf die Minute genau, die zu erwartende Zunahme des SoC vorausgesagt werden.

Im Rahmen des Testbetriebes wurde aufgrund technischer Voraussetzungen nur die provisorische 11 kW AC-Wallbox in der Remise installiert. Um die Notwendigkeit einer DC-Schnellladesäule zu ermitteln, wurden Ladetests an zwei unterschiedlichen DC-Schnellladesäulen durchgeführt. Im ersten Test wurde der Ladevorgang mit einem SoC von 5 % gestartet. Die Ladetests wurden an unterschiedlichen Standorten durchgeführt: an einer 320 kW Ladesäule an der Lüne Heide 2b in 21339 Lüneburg und an einer 300 kW Ladesäule Auf den Blöcken 1 in 21337 Lüneburg. Die Dokumentation wurde identisch zu den AC-Ladetests sichergestellt. Es ergab sich folgende Ladekurve:

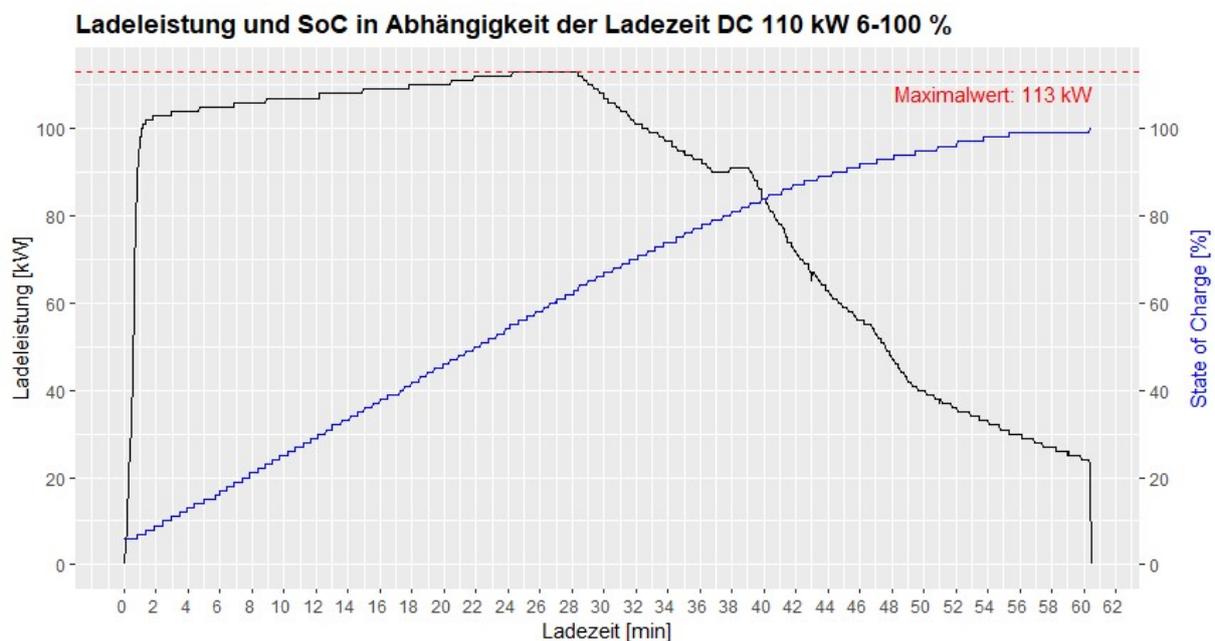


Abbildung 17: Grafische Darstellung des Ladetests DC 110 kW 6-100

Dargestellt sind die Ladeleistung in kW und der SoC in % in Abhängigkeit zur Ladezeit in Minuten. Der Graph der Ladeleistung steigt innerhalb der ersten 1,5 min auf 102 kW an. Nach weiteren 25 min wird die maximale Ladeleistung dieser Messung von 113 kW erreicht. Diese wird nur knapp zwei Minuten gehalten. Zu diesem Zeitpunkt hat das e-NEF bereits einen SoC von 62 % erreicht. Die Ladeleistung sinkt bis auf 90 kW ab. Interessant ist, dass sich der SoC zu dem Zeitpunkt bei 80 %, befindet. Nach einer kurzen Erhöhung der Ladeleistung auf 91 kW sinkt die Ladeleistung von dort an kontinuierlich bis auf 20 kW ab. Nach Erreichen des SoC von 100 % sinkt sie auf 0 kW. Die Messung des zweiten Versuches ergibt ähnliche besondere Punkte. Zu Beginn erhöht sich die Ladeleistung rapide, erreicht den Maximalwert (114 kW) bei ca. 60 % SoC und sinkt von dort bis zum Erreichen des SoC von ca. 80 % auf knapp 90 kW ab. Anschließend sinkt die Ladeleistung mit gleichzeitiger Steigerung des SoC. Die zweite

Hälfte des SoC darstellenden Graphen gleicht der In-Funktion mit der asymptotischen Annäherung von 100 %. Ein ähnliches Ladeverhalten beschreiben Tomaszewska et al. bei der Darstellung verschiedener Lithium-Ionen Schnellladeprotokollen [50]. Das CC-CV Protokoll lädt konstant bis zu einem Grenzwert. Im Anschluss sinkt der Ladestrom bei konstanter Spannung. Eine Reduzierung des Ladestroms begründet die Reduzierung der Ladeleistung. Die Grundlage für die weitere Betrachtung, für die Beschreibung und Vorhersage, bildet das ermittelte Verfahren [51].

Um das Ladeverhalten bei Erreichen des kritischen SoC von 30 % bewerten zu können, wurde ein weiterer Test durchgeführt. Dieser Test fand an der 320 kW DC-Ladesäule statt.

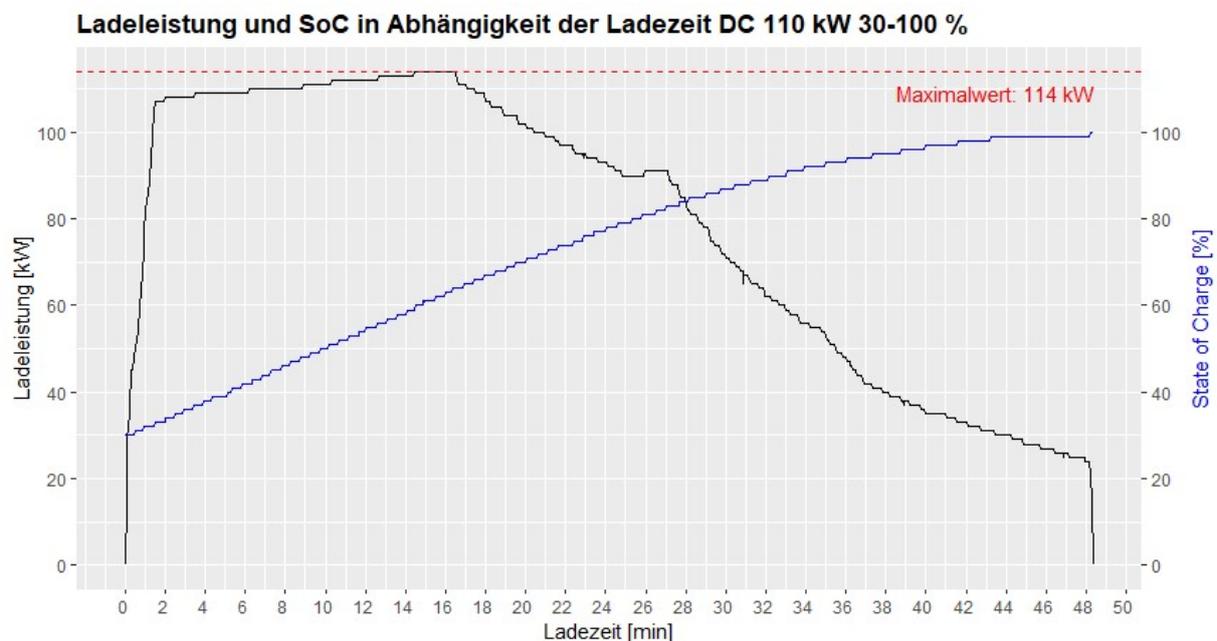


Abbildung 18: Grafische Darstellung des Ladetests DC 110 kW 30-100

Zu erkennen ist, dass die Ladekurve ähnlich zu den beiden voran beschriebenen Messungen ist. Nach ca. 1,5 min wurde eine Ladeleistung von 105 kW dokumentiert. Bereits nach 13 weiten Minuten wurde ein SoC von 60 % und die höchste Ladeleistung von 114 kW erreicht. Ab diesem Zeitpunkt entwickeln sich SoC und Ladeleistung fast identisch zu den vorherigen Messungen. Die Leistung sinkt bei kontinuierlicher Steigung des SoC. Bei 80 % ist ein steilerer Abfall der Ladeleistung zu bemerken. Besonders interessant an dieser Messung ist die Erkenntnis, dass das Erreichen der maximalen Ladeleistung deutlich früher stattfindet, wenn der SoC mit einem höheren Wert startet. Der weitere Verlauf der Ladung ähnelt sich jedoch sehr. Innerhalb von 25 min kann das e-NEF seinen initialen SoC von 30 % auf 80 % erhöhen.

Anfangs wurde erwähnt, dass die Reichweitenprognose anhängig von der vorher gefahrenen Fahrweise ist. Damit die SoC-Änderungen in einem Reichweitenkontext betrachtet werden können, dienen die erhobenen Fahrdaten als Grundlage für eine Prognose. Je mehr Reichweitenprognosen bei einem bestimmten SoC vorhanden sind, desto repräsentativer und reliabler ist die Vorhersage. Am häufigsten wurde im Test ein SoC von 90-100 % dokumentiert. Die kritischen Bereiche wurden nicht erreicht. Eine nachträgliche Modellierung des kritischen Bereiches ist nicht möglich. Hierfür hätte das e-NEF unter realen Bedingungen, wie z. B. die Fahrt mit Inanspruchnahme von Sonder- und Wegerechten, bis zu einem SoC von 30 % entladen werden müssen. Für die Ladetests war eine einfache Reduzierung des SoC ausreichend. Wird allerdings die Reichweitenprognose zu einem bestimmten SoC betrachtet, ist das vorherige Fahrprofil einflussgebend. Dieses reale Fahrprofil konnte im Rahmen dieses Testbetriebes nicht nachträglich modelliert werden. Um dennoch einen ungefähren Überblick über die resultierende Reichweite zu erlangen, können die Aufnahmen aus den Ladetests verwendet werden. Es ist zu berücksichtigen, dass die Ladetests nach dem eigentlichen Testbetrieb unter realen Einsatzbedingungen durchgeführt wurden. Damit der SoC schnell einen geringen Wert erreicht, wurde versucht, auf einer langen Strecke (Autobahn) möglichst dauerhaft die maximale Motorleistung abzurufen. Dies entspricht offensichtlich nicht dem Fahrprofil auf Einsatzfahrt. Während des DC-Ladevorganges wurde eine Reichweitenprognose von 62 km bei einem SoC von 30 % im Cockpit angezeigt.

Zur Einschätzung dieses Wertes, unter Berücksichtigung der Fahrweise, dient der SoC bei 100 %. Während der Ladetests berechnete der e-Vito bei einem SoC von 100 % eine Restreichweite von 211 km. Im Schnitt (arithmetischer Mittelwert) wurde während des Testbetriebes unter realen Einsatzbedingungen bei einem SoC von 100 % ein Wert von 389 km dokumentiert. Wird angenommen, dass sich die Prognosen im Verhältnis miteinander vergleichen lassen, ergibt sich folgender Faktor:

$$\frac{389 \text{ km}}{211 \text{ km}} = 1,84$$

Eine Multiplikation mit der Restreichweite bei 30 % ergibt einen Wert von:

$$62 \text{ km} \cdot 1,84 = 144 \text{ km}$$

Der Faktor 1,84 erweist sich als eine gute Näherung. Mit einer mittleren Abweichung (Median) von +5 km stellt er einen realistischen Zusammenhang aus der

Reichweitenprognose der Ladetests und der Prognose während der realen Einsatzbedingungen dar.

Die mittlere Fahrstrecke (Median) lag bei 15 km, die längste bei 67 km. Zu berücksichtigen ist, dass dieses der Wert für die Hin- und Rückfahrt ist. Im Schnitt wurde demnach im Testzeitraum der Einsatzort nach 7,5 km erreicht. Die elektrische Versorgung der Medizingeräte des e-NEF sind im Verhältnis zum 150 kW starken Antriebsmotor zu vernachlässigen. Auch der Betrieb der Klimaanlage ist bei einer durchschnittlichen Fahrt verhältnismäßig gering [26]. Daher ist die Berechnung der Prognose fast ausschließlich auf die vorherige Fahrweise zurückzuführen. In Bereichen, in denen wenig Daten zur Reichweitenprognose vorhanden sind, muss davon ausgegangen werden, dass diese nicht vollständig repräsentativ sind. Sie dienen jedoch als Anhaltspunkt und reichen zur weiteren Betrachtung aus. Die Reichweitenprognose hatte während des gesamten Testbetriebes im Schnitt (Median) eine Differenz zur tatsächlich gefahrenen Strecke von -2 km.

Die prognostizierte Reichweite bei einem SoC von 60 % wurde in zwei Fällen dokumentiert. Im ersten Fall mit 234 und im zweiten Fall mit 239 km. Der arithmetische Mittelwert ergibt demnach eine Reichweite von 236,5 km. Wie bereits erwähnt, erreichte das e-NEF während des Testzeitraumes in 78 % der Einsätze einen Ladepunkt ohne eine weitere Alarmierung auf der Rückfahrt. Die Standzeit wurde im Schnitt (Median) mit 27 min festgehalten.

Bei einer Ladung im AC-Bereich ist davon auszugehen, dass sich der SoC innerhalb von 5 min um 1 %-Punkt erhöht. Der Zentralwert der Standzeit beträgt 27 min, der arithmetische Mittelwert 59 min. Unter Berücksichtigung der beschriebenen Bedingungen kann das e-NEF innerhalb von 25 min seinen SoC um 5 %-Punkte erhöhen. Im Schnitt (Median) wurden während des Testbetriebes 4 % zwischen den Einsätzen verbraucht. Die dokumentierten Daten verifizieren diese Modellierung.

Sollte der kritische SoC von 30 % erreicht sein, kann durch eine DC-Schnellladung innerhalb von ca. 15 min eine Änderung auf 60 % erwartet werden. Ein SoC von 60 % würde unter Berücksichtigung der beschriebenen Bedingungen eine prognostizierte Reichweite von 236,5 km ergeben. Wird davon ausgegangen, dass bei einem

durchschnittlichen Einsatz eine Strecke von 15 km gefahren wird, wären noch 15 weitere Einsätze möglich. Die nicht lineare Änderung des SoC bei einer DC-Schnellladung hat zur Folge, dass eine Prognose des SoC abhängig vom Startwert ist. Die bisherige Strategie, das e-NEF bei Erreichen des kritischen SoC außer Dienst zu nehmen, um dann die Beladung auf ein Diesel-NEF umzuladen, würde nach Erfahrungswerten der Besatzungen ca. 30 min dauern. Daher ergibt sich die Fragestellung, welche Änderung des SoC bei einer 30-minütigen Schnellladung an z. B. einer zivilen Schnellladesäule zu erwarten ist. Die Erkenntnisse aus den Ladetests ergeben, dass bei einer 110 kW Schnellladung und dem Start-SoC von 30 % folgende zu erwarten sind:

Tabelle 15: möglicher Reichweitengewinn bei Schnellladung

Ladezeit [min]	SoC [%]	Reichweitenprognose [km]	Methode
0	30	144	Ladetest · Faktor 1,84
10	50	195	Ladetest · Faktor 1,84
15	60	236	Median Fahrdaten
20	70	270	Ladetest · Faktor 1,84
25	80	304	Median Fahrdaten
30	87	316	Median Fahrdaten

5. Diskussion

Im Rahmen der Markterkundung wurde seitens der Feuerwehr Hamburg ein vollelektrisches Notarzteinsatzfahrzeug getestet. Hauptziel dieser Arbeit war es, in erster Linie durch die Auswertung des Testbetriebes zu ermitteln, welche Bedarfe sich generell an ein Hamburger NEF ergeben. Angestoßen wurde diese Entscheidung durch die politisch formulierten Klimaziele. Einsatzfahrzeuge der Feuerwehr sind zwar zunächst nicht von den primären Einschränkungen in Bezug auf die Emissionsreduzierung betroffen. Der Hamburger Klimaplan sieht jedoch in Zukunft eine Mobilitätswende insbesondere durch eine signifikante Erhöhung der Anzahl elektrisch betriebener Pkw der Feuerwehr vor [10 S. 169]. Durch den Betrieb im alltäglichen Einsatzgeschehen sollten realistische Daten erhoben werden. Innerhalb des 31 Tage umfassenden Testzeitraumes wurden insgesamt 393 Einsätze dokumentiert. Vollständig auswertbare Daten waren jedoch nur in 279 Fällen vorhanden. An diesem Punkt der Untersuchung stellt sich die Frage: Wie repräsentativ sind die Einsatzzahlen im Testzeitraum? Der Zentralwert der Alarmierungen des 14-NEF-A von Januar 2018 bis Mai 2023 beträgt 386. Der maximale Wert wurde im Dezember 2022 erreicht (499 Alarmierungen). Der minimale Wert wurde im Februar 2021 erreicht (320 Alarmierungen) [52]. Beim Vergleich des Zentralwertes der letzten Jahre sowie dem Wert der erhobenen Daten ist keine große Differenz zu verzeichnen. Es kann angenommen werden, dass der Testzeitraum in Hinblick auf die Einsatzzahlen als repräsentativ einzuschätzen ist. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass die Corona-Pandemie Auswirkungen auf das Lebensverhalten der Bürger hatte und die Alarmierungszahlen im Zeitraum von Juni 2020 bis März 2023 beeinflusst sein könnten [53].

Gleichwohl sollten die sich aus dem Antriebswechsel ergebenden Risiken in Bezug auf die Auswirkungen auf die Notfallrettung identifiziert und bewertet werden. Die Betrachtung der durch den Antriebswechsel entstehenden Risiken wurde anhand von mehreren Prozessen, nicht an Systemkomponenten, vorgenommen. Anregungen aus der Beantwortung der Umfrage flossen mit in die PD unterstützte Prozessermittlung. Durch den Wechsel des Fahrzeugmodells und einem nicht auf die Anforderungen der Feuerwehr Hamburg zugeschnittenen Ausbau, wurde differenziert in der Betrachtung zwischen den Risiken, welche sich allein aus dem Wechsel des Antriebes und dem Wechsel des Fahrzeugmodells ergeben. Diese wurden zur Aufbereitung in eine FMEA-Tabelle überführt.

Gewöhnungsbedürftig für die Fahrer des e-NEFs war vor allem die direkte Beschleunigung und die starke Verzögerung während der Rekuperation. Durch Fahrsicherheitstraining und eine detailliertere Einweisung der Fahrer kann das dadurch entstehende Unfallrisiko gemindert werden. Zu berücksichtigen ist, wie sich die Rekuperation bei Glätte verhält. Die beiden Systeme können einzeln als sicher betrachtet werden. Das Diesel-NEF hat sich über die letzten Jahre in der Hamburger Notfallrettung bereits bewiesen. Spannend war jedoch, die Tauglichkeit eines vollelektrischen Einsatzfahrzeuges zu testen: An welchen Punkten stößt das System an seine Grenzen? Im Kontext der Elektromobilität ist nicht nur der reine Antrieb ausschlaggebend für eine Systementscheid zur Fahrzeugbeschaffung. Auch die Berücksichtigung der infrastrukturellen Gegebenheiten ist notwendig, um eine gesamtheitliche Betrachtung vornehmen zu können.

Gerade in Bezug auf den Testzeitraum, welcher sich effektiv innerhalb von vier Wochen bewegte, ist die Prognose der Eintrittswahrscheinlichkeit nur bedingt mit Daten belegbar. Die Schadensschwere ist im Kontext eines Einsatzfahrzeuges ebenfalls nicht eindeutig einzuschätzen. Sollte das 14-NEF-A z. B. wegen eines technischen Defektes außer Dienst gehen müssen, würde nach entsprechender Kommunikation an die Leitstelle, ein anderes arztbesetztes Rettungsmittel disponiert werden. Nur weil das Fahrzeug außer Dienst geht, tritt nicht automatisch ein Schaden beim Patienten ein. Die Wahrscheinlichkeit, dass das NEF an der Einsatzstelle dringend benötigt wird und die Abwesenheit des notärztlichen Personals sowie medizinischen Materials zu keiner Zustandsverbesserung führt, lässt sich schwer abschätzen, geschweige denn pauschal kategorisieren.

Der Vergleich der Prozess-Risikofaktoren ergab ein minimal erhöhtes Risiko bei dem Diesel-NEF. Das Diesel-NEF gilt als Referenz-/Akzeptanzsystem. Es stellt sich die Frage, wie ist dieses Ergebnis zu interpretieren ist? Das e-NEF kann durch die permanente Ladung eine unterbrechungsfreiere Notfallrettung gewährleisten. Wird nur der Testzeitraum betrachtet und kein extremes Szenario, bei dem länger der Strom ausfällt, geht allein vom Antrieb des e-NEFs, kein stark erhöhtes Risiko aus. Die Ergebnisse aus dem Testbetrieb zeigten, dass zu keinem Zeitpunkt des Testbetriebes nur annähernd der kritische SoC von 30 %, bei dem immer noch eine Reichweite von ca. 144 km Strecke erreicht werden könnte, erreicht wurde. Die 144 km wurden als

Näherung durch den Faktor zwischen der realen und der Ladetestprognose berechnet. Um die HV-Batterie möglichst schnell zu entleeren, wurde für den Ladetest möglichst dauerhaft die maximale Leistung des Motors gefordert. Dies begründet eine Abweichung von der Prognose, welche im Einsatz unter realen Bedingungen gefahren wurde. Selbst wenn das e-NEF die Fahrt mit einem SoC von 100 % starten würde, hätte es bei dauerhaft maximaler Motorlast bei einem SoC von 30 % immer noch eine Restreichweite von 62 km. Verrechnet mit dem Faktor, entspricht dies unter realen Bedingungen, einer Reichweite von 144 km. Rechnerisch weist der Faktor eine geringe Abweichung von -2 km ab. In weiterführenden Tests unter realen Bedingungen könnte diese Prognose bestätigt oder falsifiziert werden.

Im Verlauf der Ausarbeitung entwickelte sich eine Tendenz, an welchen Faktoren die kompromisslose Einführung des vollelektrischen Antriebes scheitern könnte. Daraus ergab sich, dass der größte antriebsbedingte Unterschied in der Reichweite und der Zeit der Wiederherstellung dieser ist. Das Diesel-NEF kann in kürzerer Zeit mehr Reichweite gewinnen als das e-NEF. Damit verbunden kam die Frage auf, wie lange ein e-NEF laden müsste, um einen gewissen SoC, verbunden mit der resultierenden Reichweite, zu erlangen. Um die weiteren Fragestellungen zu beantworten, wurden Ladetests an einer AC-Wallbox sowie an DC-Schnellladesäulen durchgeführt. Wichtig ist zu erwähnen, dass die Aussagen über die Ladetests, Momentaufnahmen sind. Bei steigender Nutzung des Fahrzeuges verändert sich der SoH (minimal). Die Daten sind demnach nur bedingt reliabel einzustufen.

Das Diesel-NEF soll bei einem Tankzustand von knapp unter der Hälfte des Tankvolumens, bei nächster Gelegenheit, eine Füllung des Tanks durchführen. Diese Vorgabe führte zu der Frage: Ab welchem Wert soll das e-NEF außer Dienst gehen bzw. keinen weiten Einsatz mehr übernehmen? Zur Beantwortung dieser Frage kommt es auf mehrere Faktoren an: Die einsatztaktischen Maßnahmen werden von der Abteilung F02 der Feuerwehr Hamburg vorgegeben. In dieser Ausarbeitung kann lediglich die Datengrundlage für diese Entscheidung geliefert werden. Bei dieser Entscheidung sollte die Zeit, bei der es zu einem gewissen SoC kommen würde, berücksichtigt werden. Wird angenommen, dass die Besatzung des Fahrzeugs einen kritischen SoC von 30 % feststellt, ergeben sich zwei Möglichkeiten: Entweder fährt die Besatzung zum Standort des Diesel-NEF (als Ausfallreserve vorgehalten) und lädt die Beladung um, oder sie

fährt an eine Ladesäule, um das e-NEF aufzuladen. Je nach Standort des „leeren“ e-NEF variiert die Fahrzeit zum Reserve-NEF. Die Beladung umzuladen, dauert in jedem Fall mindestens 20-30 min. Die Besatzung des e-NEFs könnte jedoch eine Schnellladesäule aufsuchen und innerhalb von 25 min einen SoC von ca. 80 % erreichen. Dies würde einer realen Reichweite von 304 km entsprechen. Wird angenommen, dass der Tankinhalt des Diesel-NEFs voll ist (71 l), ergibt sich, bei dem maximal durchschnittlichen Verbrauch von 12,7 l pro 100 km, eine maximale Reichweite von rund 560 km. Die Reichweite bei einem SoC von 70 % entspricht in etwa 55 % der Maximalreichweite des Diesel-NEF. Die permanente Ladung über eine 11 kW Wallbox hätte, in der gleichen Zeit, eine Änderung des SoC auf ca. 35 % bewirkt.

Somit ergibt sich: sollte das e-NEF einen kritischen SoC von 30 % erreichen, ist die Ladung an einer DC-Schnellladesäule vorzuziehen. Ob ein Wechsel des Fahrzeuges oder eine Schnellladung vorzuziehen ist, ist schwierig zu beurteilen und obliegt der strategischen Entscheidung der Abteilung F02. Die Betrachtung des Regelfalls ergab, dass die durch die Einsatzfahrten umgesetzte Energie schneller wieder in das Fahrzeug geladen werden kann, ohne überhaupt in die Nähe des kritischen SoC zu gelangen. Interessant in diesem Kontext wäre, wie sich die Entladung der Fahrzeugbatterie bei Extremtemperaturen verhält. Außerdem sollte der Faktor von potenziell steigenden Einsatzzahlen betrachtet werden. Wichtig ist in dieser Betrachtung auch die Berücksichtigung des sich entwickelnden State of Health der HV-Batterie. Basierend auf den erhobenen Fahrdaten und den durchgeführten Messungen, würde der Verfasser der Arbeit eine Schnellladung dem Fahrzeugwechsel vorziehen. Eventuell ist die Grenze des kritischen SoC anzuheben, sodass die eingeleitete Ladung mit dem „Verfahren bei einem halbvollen Tank“ vergleichbar ist.

Zur vollständigen Vergleichbarkeit der Systeme würde die Betrachtung der Kosten zählen. Aufgrund der weltmarktbedingten Schwankungen und der unkonkreten Angaben zum Ausbau, kann an dieser Stelle keine verlässliche Aussage getroffen werden. Die Kosten des tatsächlichen Fahrzeugausbaus nach der Hamburger Konfiguration variieren stetig. Ein Vergleich zweier unterschiedlichen Fahrzeugmodelle ist, in Bezug auf den veränderten Antrieb nicht zielführend. Die Berücksichtigung von eventuell anfallenden höheren Anschaffungskosten und der Vergleich von Verschleißteilen und

Wartungsprozessen im tatsächlichen Betrieb, wird jedoch in zukünftigen Betrachtungen empfohlen.

Die Nutzung der Systeme als Einsatzfahrzeug bringt neue Fragestellungen mit sich, die bei einer privaten Nutzung nicht auftreten. Was ist, wenn der Strom über mehrere Stunden ausfällt? Der hilfeersuchende Bürger meldet sich beispielsweise im Notfall bei der Feuerwehr. Wenn die Feuerwehr aber keine Möglichkeit hat, ihre Einsatzmittel und ihr Personal an die Einsatzstelle zu bringen, ergeben sich ganz neue Herausforderungen. Dies sind neue Herausforderungen, die unter Berücksichtigung des Klimawandels ergänzend betrachtet werden müssen. Man könnte argumentieren, dass Polizei, Feuerwehr und andere BOS von Regelungen zur Emissionsbeschränkung ausgeschlossen werden sollten. Die Einsatzfahrzeuge der Feuerwehr basieren jedoch auf den Fahrgestellen der großen Automobilhersteller. Wenn diese keine Verbrennungsmotoren mehr herstellen, weil die Nachfrage der zivilen Bevölkerung, politisch motiviert, nicht mehr existiert, müssen im Vorfeld Lösungen geschaffen werden. Neben dem alltäglichen Einsatzgeschehen spielt der Aspekt der Katastrophenversorgung eine bedeutende Rolle. Die Notfallrettung muss auch bei z. B. einem langanhaltenden, flächendeckenden Stromausfall gewährleistet sein. Durch einen Antriebswechsel darf kein Nachteil bei der Sicherstellung der Leistungserbringung im Rettungsdienst entstehen. Die Betrachtung eines Katastrophenszenarios ist im Kontext der vorbeugenden Maßnahmen notwendig. In dieser Ausarbeitung wurde, aus Gründen des bereits erreichten Umfangs, auf eine Modellierung eines potenziellen Katastrophenszenarios verzichtet.

Nicht jeder Einsatz bzw. jede Fahrt während des Testbetriebs wurde korrekt dokumentiert. Die Auswertung stützt sich nur auf die auswertbaren Daten. Die Extremwerte des SoC oder der Streckenlänge wurden jedoch korrekt dokumentiert. Für diese Betrachtung, ob ein Hamburger NEF auf einem vollelektrischen Basisfahrzeug realisierbar ist, ist die vorliegende Datengrundlage insgesamt jedoch ausreichend. Aus diesem Grund wurde auf eine erweiterte Fehlerrechnung im Bereich der Auswertungen verzichtet. Für eine weitergehende, genauere und differenziertere Betrachtung, wird die Erhebung der Daten jedoch durch ein automatisches System, wie einen Datenlogger, empfohlen.

Auch das Entwickeln einer Lösungsstrategie bei Stromausfällen gehört zu einem ganzheitlichen Konzept der Einführung bzw. Ausweitung der Elektromobilität im Einsatzdienst der Feuerwehr bzw. des Rettungsdienstes. Diese Arbeit bildet den Grundstein für eine weitere Betrachtung eines vollelektrischen NEF in der Hamburger Notfallrettung. Aufbauend auf den Erkenntnissen wird empfohlen, ein Verfahren bei einem langanhaltenden, flächendeckenden Stromausfall zu entwickeln. Außerdem sollte die tatsächliche Ökobilanz des Fahrzeuges nicht außer Acht geraten. Es könnte anhand des konkreten Modells beantwortet werden, ab welchem Zeitpunkt das Fahrzeug tatsächlich klimaneutral wird. Untersuchungen zeigen, dass bei der Produktion von Elektroautos und deren Batterien deutlich mehr Energie als bei der Herstellung konventionell angetriebener Pkw benötigt wird. Unter Annahme der Erweiterung von erneuerbaren Energien werden jedoch, über die gesamte Lebensdauer eines elektrischen Pkw, ca. 15 bis 30 % weniger Treibhausgasemissionen als bei ihren vergleichbaren, konventionell angetriebenen, Modellen frei [54]. Bei einer jährlichen Fahrleistung von ca. 65.000 km (03.2022-03.2023) würde die HV-Batterie nach Herstellerangaben innerhalb von ca. 2,5 Jahren, im Worst-Case, nur noch rund 72 % der ursprünglichen Kapazität besitzen. Die permanente Ladung im nicht optimalen Bereich (max. 80 %), wird sicher dazu führen, dass sich der SoH deutlich schneller ins Negative entwickelt. In Bezug auf diese Erkenntnis ist zu prüfen, ob ein Recycling oder ein Tauschen der Batterie eine Alternative zu Reichweiteneinbußen darstellen. Ggf. können flotteninterne Rotationen, wie bisher bei der Feuerwehr Hamburg praktiziert, diese Defizite kompensieren.

6. Ausblick

Nachdem die Forschungsfrage, ob ein Hamburger NEF im betrachteten Gebiet auf einem vollelektrischen Basisfahrzeug überhaupt realisiert werden kann, beantwortet wurde, folgt nun ein Ausblick. Die vorangegangene Betrachtung dient als Grundlage für die Bedarfsermittlung an ein Hamburger NEF. Aufbauend auf dieser kann sie in weiteren Arbeiten, z. B. in Bezug auf die Betrachtung eines anderen Basisfahrzeuges oder die Modellierung eines Extremszenarios, vertieft und erweitert werden. Dies könnte dazu beitragen, effizientere und nachhaltigere Lösungen für den Rettungsdienst in der Stadt Hamburg zu entwickeln und somit die Sicherheit und Versorgung der Bürger weiter zu verbessern.

Interessant wäre insbesondere die Untersuchung eines Szenarios, bei dem der konventionelle Antrieb dem elektrischen überlegen ist. Daraus folgend die entsprechenden Strategien zur notwendigen Infrastruktur. Bereits jetzt existieren diesbezüglich erste Überlegungen in bei der Feuerwehr Hamburg zu diesem Thema. Die Beschaffung von zwei vollelektrisch angetriebenen Rettungswagen sowie einem hybrid-HLF ist bereits angestoßen. Diese Fahrzeuge werden mit einem erweiterten Datenlogger ausgestattet, sodass eine differenzierte Auswertung möglich sein wird. Jedes dieser Fahrzeuge bringt eigene Anforderungen an das Fahrprofil, den taktischen Einsatzwert, die Ladeinfrastruktur sowie das Verfahren im Einsatzbetrieb mit sich. Das hybrid-HLF kompensiert durch den verbauten Verbrennungsmotor als Reichweitenverlängerer die durch eine entladene HV-Batterie hervorgerufenen Nachteile. Die vollelektrischen Fahrzeuge hingegen, sind, analog zum vorgestellten e-NEF, auf eine Ladung angewiesen. Es stellt sich an dieser Stelle die Frage, wie der Strom für die Einsatzfahrzeuge permanent vorgehalten werden kann.

Bei der bedarfsbegründeten Ausstattungsplanung werden zunächst Schutzziele definiert, die auf modellierten Ereignissen basieren. Anschließend erfolgt die Ermittlung der technischen Ausstattung, die zur Erreichung dieser Schutzziele erforderlich ist. Die Feuer- und Rettungswachen in Hamburg besitzen eine Notstromversorgung mit Bevorratung des notwendigen Kraftstoffes, nicht jedoch die nur als Rettungswache genutzten Standorte. Auch in Krankenhäusern wird für den Fall eines Stromausfalls ein entsprechendes Konzept zur Notstromversorgung vorgehalten [55]. Es ist noch zu prüfen, ob die vorhandene Infrastruktur eine zusätzliche Ladung der Einsatzfahrzeuge

sicherstellen kann. Die infrastrukturellen Voraussetzungen der Standorte variieren ohnehin stark. Daher ist die Untersuchung der potenziellen Standorte für Elektrofahrzeuge sinnvoll. Sollte entschieden werden, eine Schnellladesäule zu installieren, kann es sein, dass dieses an der Infrastruktur des Straßenzuges scheitert. In diesem Fall müsste eine alternative Lösung Anwendung finden. Möglicherweise kann bei dieser Betrachtung die Verwendung der zivilen Ladeinfrastruktur in Betracht gezogen werden.

Die Möglichkeit von Speichersystemen, welche sich langsam aufladen, eine bestimmte Energiemenge speichern und diese dann mit hoher Ladeleistung wieder abgeben können, vereint mehrere Vorteile. Zum einen kann der bisherige Netzanschluss weiterhin verwendet werden. Andererseits ist eine Ladung im Falle eines Stromausfalls teils sichergestellt. Während das Fahrzeug im Einsatz ist, kann der Speicher mit geringer Leistung durch das Notstromaggregat des Standortes geladen werden. Solarsysteme auf dem Dach des Standortes könnten dieses ergänzen. Aufgrund des geringen Bedarfs ist es eher unwahrscheinlich, dass diese Systeme innerhalb kürzester Zeit flächendeckend beschafft und verbaut werden. Daher ist eine taktische Verteilung von wenigen Systemen von Vorteil. Es könnte ein notstromversorgter Ladestandort mit Pufferspeicher für elektrische Einsatzfahrzeuge pro Direktionsbereich der Feuerwehr Hamburg errichtet werden, der mehrere Wachbezirke versorgt. Im Falle eines länger anhaltenden Stromausfalls, könnten die Einsatzfahrzeuge dann diese strategisch ausgewählten Standorte anfahren und die Ladung derselben wäre sichergestellt. Sicher überschneiden sich hierbei auch die Interessen mit der Polizei Hamburg, welche aktuell ebenfalls die Elektrifizierung der Streifenwagen durchführt [56].

Ebenfalls interessant in diesem Bereich wäre, zu untersuchen, wie sich andere Akkutechnologien, z. B. Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren (LFP), in Bezug auf den SoH verhalten. Eine deutlich höhere Energiedichte und eine generell längere Lebensdauer kennzeichnet diese Technologie [57]. Eine umfassendere Ökobilanzierung sollte die Schritte der Produktion und Entsorgung des Fahrzeuges insbesondere der HV-Batterie berücksichtigen. Anhand dieser kann abschließend der umwelttechnische Wert ermittelt werden. Sicher werden in Zukunft auch andere Fahrzeugmodelle auf dem Markt erscheinen. Es ist zu prüfen, ob sich diese, durch verschiedenste Optimierungen bzw. den technologischen Fortschritt, vielleicht sogar besser eignen als der

vorgestellte e-Vito. Möglicherweise wird es in Zukunft möglich sein, das bisherige e-Vito Modell mit 22 kW zu laden. Dies würde die AC-Ladung sicherlich beschleunigen.

7. Schlussfolgerungen / Fazit

Die Betrachtung im Bereich der antriebsrelevanten Basisereignisse führt in Summe zu keinem erhöhten Risiko des e-NEFs. Die Beurteilung erfolgte anhand der innerhalb des Testbetriebes erhobenen Daten. Ein Unterschied der Risikofaktoren beider Fahrzeuge ist im Wesentlichen auf den Wechsel des Fahrzeugmodells zurückzuführen. Durch die Anpassung an einen bedarfsgerechten Ausbau sowie an die bisherigen Standards der Sondersignalanlage bzw. Erkennbarkeit des Einsatzfahrzeuges insgesamt, kann auch dieses Risiko bis auf den Akzeptanzzustand minimiert werden. Das größte Risiko ergibt sich daraus, dass das e-NEF eine geringere maximale Reichweite als das Diesel-NEF besitzt. Eine permanente Ladung des e-NEFs führt jedoch dazu, dass die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens eines kritischen Ladezustandes geringer als beim Diesel-NEF ist. Es wird empfohlen, ein e-NEF über einen längeren Zeitraum zu testen, um eine differenzierte Datengrundlage zu erzeugen. Des Weiteren ist es sinnvoll, ein umfassendes Konzept zum Eintritt eines flächendeckenden Stromausfalls anzufertigen. Zusammenfassend kann die Forschungsfrage, ob ein vollelektrisches NEF in der Hamburger Notfallrettung zu einem erhöhten Risiko führt, unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen, näherungsweise mit „nein“ beantwortet werden.

Abschließend möchte ich betonen, dass diese Bachelorarbeit ein erster Schritt zur umfassenden Analyse und Entwicklung eines innovativen Konzepts für ein Hamburger Notarzteeinsatzfahrzeug auf vollelektrischer Basis ist. Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse und Empfehlungen bilden eine solide Grundlage für zukünftige Forschung und Praxisanwendungen im Bereich der Rettungsdienste und Elektromobilität.

8. Danksagung

Es war mir eine besondere Freude und Herausforderung, an diesem Projekt zu arbeiten, und ich hoffe, dass meine Arbeit dazu beitragen wird, die Diskussion über nachhaltige und effiziente Lösungen im Rettungswesen voranzutreiben.

Ich bedanke mich bei allen Personen und Institutionen, die mich während meiner Forschungsarbeit unterstützt haben – insbesondere bei den Betreuern meiner Arbeit, Herrn Prof. Dr. Karsten Loer und Herrn Branddirektor Jörn Demtröder. Herr Prof. Dr. Loer begleitete mich seit dem ersten Semester meines Studiums, welches zur Corona-Zeit begann. In den verschiedensten Modulen lernte ich bei ihm ingenieurtechnische Grundlagen sowie fachspezifische Inhalte der Gefahrenabwehr. Seine Vorlesungen zeichneten sich durch die praxisnahe und sympathische Vortragsweise aus. Durch das Absolvieren meines Praxissemesters in der Abteilung F032 der Feuerwehr Hamburg kam ich in den Kontakt mit Herrn Demtröder. Bereits im Vorstellungsgespräch teilten wir dasselbe Interesse des vielfältigen Themas der Gestaltung alternativer Antriebe von Einsatzfahrzeugen. Durchweg wurde ich durch ihn und sein Team unterstützt und mir viele verschlossene Türen geöffnet.

Ihre Unterstützung und Ermutigung haben maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen – herzlichen Dank dafür!

Ein besonderer Dank gilt meinem Vater, Volker Petersen. Er legte mir schon in meiner Kindheit die Faszination für die Feuerwehr in die Wiege. Auf meinem bisherigen Lebensweg gab er mir Halt, motivierte und begleitete mich kontinuierlich. Auch während des Studiums stand er mir jederzeit unterstützend zur Seite. Danke Papa!

9. Literaturverzeichnis

1. Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland: GG; 1949 [Stand: 01.09.23]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/gg/BJNR000010949.html>.
2. Feuerwehrgesetz; 1986. Verfügbar unter: https://www.lexsoft.de/cgi-bin/lexsoft/justizportal_nrw.cgi?xid=170326,1.
3. Fabian Haedge, Feuerwehr Hamburg, zuständig für Rettungsdienst HIORG. Persönliche Mitteilung: Arztbesetzte Rettungsmittel in Hamburg [E-Mail]; 17.08.23.
4. Feuerwehr Hamburg Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, Hrsg. Jahresbericht 2022; 05.2023 [Stand: 10.09.23]. Verfügbar unter: <https://www.hamburg.de/content-blob/17122340/8057ea8d42029446e07c67fc789880b8/data/jahresbericht-2022.pdf>.
5. Holger Tiedemann, Mercedes-Benz, zuständig für Verkauf Behörden- & Sonderfahrzeuge. Persönliche Mitteilung: Mercedes Umstrukturierung Baureihe [Telefonisch]; 17.08.23.
6. Umweltbundesamt. Bildquelle Entwicklung Treibhausgasemissionen [Stand: 17.09.23]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/bilder/thg-entwicklung_2022_ksg-sektoren_wide.jpg.
7. Bundesregierung Deutschland. Klimaschutzgesetz: Generationenvertrag für das Klima [Stand: 10.09.23]. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/bregde/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>.
8. Umweltbundesamt. Verkehr belastet Luft und Klima - Minderungsziele der Bundesregierung [Stand: 17.09.23]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#verkehr-belastet-luft-und-klimaminderungsziele-der-bundesregierung>.
9. Dr. Thomas Lauf, Michael Memmler, Sven Schneider. Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger: Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2020. CLIMATE CHANGE 2021; (71/2021) [Stand: 12.09.23]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger-2020>.
10. Hamburgische Bürgerschaft, Hrsg. Zweite Fortschreibung des Hamburger Klimaplan: Drucksache 22/12774; 2023 [Stand: 10.09.23]. Verfügbar unter:

<https://www.hamburg.de/content-blob/17316156/81785d14d09a5942af1d6c0fccf59c9e/data/d-zweite-fortschreibung-hamburger-klimaplan.pdf>.

11. Bundes-Klimaschutzgesetz: KSG; 2019 [Stand: 02.09.23]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html#BJNR251310019BJNG000100000>.
12. Reif K, Hrsg. Grundlagen Fahrzeug- und Motorentechnik im Überblick. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2016.
13. Grieshaber H, Raatz T. Grundlagen des Dieselmotors. In: Reif K, Hrsg. Grundlagen Fahrzeug- und Motorentechnik im Überblick. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2016. S. 5–22.
14. Hamburgisches Rettungsdienstgesetz: HmbRDG; 2019 [Stand: 12.09.23]. Verfügbar unter: https://www.lexsoft.de/cgi-bin/lexsoft/justizportal_nrw.cgi?xid=9483108,1.
15. Flake F, Fromm A, Lentz D, Lorenz B, Sambale T, Stötefalke A. Rettungssanitäter heute. 5. Auflage. München: Elsevier; 2022.
16. Gesetz über den Beruf der Notfallsanitäterin und des Notfallsanitäters: Notfallsanitätergesetz - NotSanG; 2013 [Stand: 20.09.23]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/notsang/BJNR134810013.html>.
17. Feuerwehr Hamburg. Interne Dienstanweisung: DA02-1 Einsatzordnung. Hamburg: Feuerwehr Hamburg.
18. Thomas Last, Feuerwehr Hamburg, zuständig für Instandhaltungssteuerung / Klein-FZ. Persönliche Mitteilung: Laufleistung ELW und NEF [mündlich]; 19.08.23.
19. Wietmarscher Ambulanz- und Sonderfahrzeug GmbH, Hrsg. Nachhaltigkeit im Rettungsdienst: Das WAS 100-E Notarzteinsetzfahrzeug. Verfügbar unter: https://www.was-vehicles.com/fileadmin/user_upload/Dokumente/Produktdatenblaetter/WAS_100_E-NEF_DE.pdf.
20. Mercedes-Benz. eVito Tourer Bildquelle; 01.09.23. Verfügbar unter: <https://www.mercedes-benz.lu/vans/de/vito/e-vito-tourer>.

21. Stan C. Automobile der Zukunft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2021.
22. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. Informationen zu aktuellen Abgas-tests [Stand: 01.09.23]. Verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/Shared-Docs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/informationen-zu-wltp-tests.html>.
23. Mercedes-Benz. Rekuperative Verzögerung manuell einstellen [Stand: 28.08.23]. Verfügbar unter: <https://www.mercedes-benz.de/passengercars/services/manuals.html/eqv-van-2021-05-e447-mbux/rekuperatives-bremssystem/rekuperative-verzogerung-manuell-einstellen>.
24. Beuth. DIN EN 1789:2020-12, Rettungsdienstfahrzeuge und deren Ausrüstung_ - Krankenkraftwagen; Deutsche Fassung EN_1789:2020. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
25. Beuth. DIN 75079:2009-11, Notarzt-Einsatzfahrzeuge (NEF)_ - Begriffe, Anforderungen, Prüfung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
26. Mercedes-Benz, Hrsg. EQV VAN 2020 Dezember Betriebsanleitung [Stand: 21.09.23]. Verfügbar unter: <https://www.mercedes-benz.at/passengercars/owners-manuals/de-at/pdf/mercedes-eqv-van-2020-dezember-e447-mbux-betriebsanleitung-01.pdf>.
27. Rüdiger Remm, Feuerwehr Hamburg, zuständig für Bedarfsplanung Rettungsdienst. Persönliche Mitteilung: Alarmierungen Feuerwehr Hamburg [Telefonisch]; 15.09.23.
28. Christoph Stegemann, Firma WAS, zuständig für Marktentwicklung und Betreuung e-NEF. Blockschaltbild e-NEF [E-Mail]; 06.06.23.
29. Xing Y, Ma EWM, Tsui KL, Pecht M. Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles. *Energies* 2011; 4(11):1840–57. doi: 10.3390/en4111840.
30. Kallus KW. Erstellung von Fragebogen. 2., aktualisierte und überarbeitete Auflage. Stuttgart: Ulmer; 2016. (UTB; Bd. 4465).
31. Stephan Bockting. Verkehrsunfallanalyse bei der Nutzung von Sonder- und Wegerechten gemäß StVO: Konzeptionelle Vorschläge zur Verbesserung der Aus- und Fortbildung. Hamburg; 09.2007. Verfügbar unter: <https://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2013/20886/>.

32. Werdich M. FMEA - Einführung und Moderation. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag; 2012.
33. Bertsche B, Dazer M. Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2022.
34. Hering E, Schloske A. Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2019.
35. Lothar Papula. Mathematische Formelsammlung: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2017.
36. Holger Tiedemann, Mercedes-Benz, zuständig für Verkauf Behörden- & Sonderfahrzeuge. Persönliche Mitteilung: Infoangebot NEF Sprinter [E-Mail]; 17.08.23.
37. Sönke Quelle, Feuerwehr Hamburg, zuständig für Technische Qualitätssicherung. Persönliche Mitteilung Fahrdaten [E-Mail]; 17.08.23.
38. Prof. Dr. Marc Schütte. Skript Vorlesung Statistik 03: Deskriptive Statistik. Online; 2020.
39. Mandel R. Komfortmodell und Untersuchung zum Einfluss der Innenraumgeometrie auf die Wahrnehmung und Wirkung von Fahrzeugeigenschaften. Stuttgart: Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design; 2019. (Bericht / Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart Nr. 678).
40. Holger Tiedemann, Mercedes-Benz, zuständig für Verkauf Behörden- & Sonderfahrzeuge. Persönliche Mitteilung: Infoangebot Vito WAS [E-Mail]; 17.08.23.
41. Statistisches Bundesamt, Hrsg. Durchschnittliche Körpergröße; 28.09.23. Verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=abruf-tabelle&levelindex=1&levelid=1693247604016&auswahloperation=abruf-tabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&code=12211-9018&auswahltext=&werteabruf=starten&wertauswahl=2290&wertauswahl=2291&wertauswahl=2288#abreadcrumb>.
42. Berufsgenossenschaft Holz und Metall. DGUV Information 209-093: Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen. Mainz. Verfügbar unter: https://www.bghm.de/fileadmin/user_upload/Arbeitsschuetzer/Gesetze_Vorschriften/Informationen/209-093.pdf.

43. Behörde für Inneres und Sport Hamburg. Sturmflut: Wenn das Wasser bereits steigt; 21.09.23. Verfügbar unter: <https://www.hamburg.de/innenbehoerde/sturmflut/10375472/hochwasser-sturmflut-akut/>.
44. Stromnetz Hamburg. Netz- und Versorgungsqualität [Stand: 21.09.23]. Verfügbar unter: <https://www.stromnetz-hamburg.de/ueber-uns/aufgaben/verteilungsnetzbetreiber/netz-und-versorgungsqualitaet>.
45. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., Hrsg. Elektrofahrzeuge in geschlossenen Garagen: Sicherheitshinweise für die Wohnungswirtschaft; 12.2020 01 [Stand: 26.09.23]. Verfügbar unter: https://www.vdik.de/wp-content/uploads/2020/12/Elektrofahrzeuge-in-geschlossenen-Garagen_GDV.pdf.
46. Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag, Hrsg. Verhalten von Elektroautos im Brandfall; 22.02.22 [Stand: 21.09.23]. Verfügbar unter: <https://www.bundestag.de/resource/blob/891136/55c913be8b0207bcd76e911a66287f00/WD-8-002-22-pdf-data.pdf>.
47. Fayziyev PR. ORGANIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR MAINTENANCE AND REPAIR OF ELECTRIC VEHICLES. *ijasr* 2022; 02(03):37–41 [Stand: 12.09.23]. Verfügbar unter: <https://sciencebring.com/index.php/ijasr/article/view/34/29>.
48. Easee AS. Datenblatt Easee Home Wallbox [Stand: 06.09.23]. Verfügbar unter: https://besserladen.de/wp-content/uploads/2020/09/Easee_Home_Wallbox_Datenblatt.pdf.
49. Andreas Schuster CL. Ladeverhalten mobiler Li-Ionen-Speicher in der Elektromobilität. Berlin; 2009. (IRES (International Renewable Energy Storage Conference)) [Stand: 01.09.23]. Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/20.500.12708/71248>.
50. Tomaszewska A, Chu Z, Feng X, O’Kane S, Liu X, Chen J et al. Lithium-ion battery fast charging: A review. *eTransportation* 2019; 1:100011. doi: 10.1016/j.etran.2019.100011.
51. Zhang SS. Identifying rate limitation and a guide to design of fast-charging Li-ion battery. *InfoMat* 2020; 2(5):942–9. doi: 10.1002/inf2.12058.

52. Felix Brinker, Feuerwehr Hamburg, zuständig für Strategie und Zentrales Controlling BS / AGBF-Schutzziel / TH /CBRN / FF. Einsatz-Statistik/Auswertung [E-Mail]; 19.09.23.
53. Bundesgesundheitsministerium. Chronik zum Coronavirus SARS-CoV-2 | Maßnahmen: Was geschah wann? [Stand: 22.09.23]. Verfügbar unter: <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/coronavirus/chronik-coronavirus.html>.
54. Thielmann A, Wietschel M, Funke SÁ, Grimm A, Hettesheimer T, Langkau S et al. Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. doi: 10.24406/publica-fhg-300062.
55. VDE. DIN VDE 0100-710, Errichten von Niederspannungsanlagen. Berlin: Beuth Verlag GmbH. (11.140; 91.140.50).
56. Polizei Hamburg. Polizei Hamburg setzt Ausbau der E-Mobilität weiter fort: Übergabe des ersten vollelektrischen Funkstreifenwagens sowie von weiteren Elektrofahrzeugen in den Polizeivollzug [Stand: 24.09.23]. Verfügbar unter: <https://www.polizei.hamburg/uebergabe-von-elektrofahrzeugen-in-den-polizeivollzug-558118>.
57. Petit M, Prada E, Sauvant-Moynot V. Development of an empirical aging model for Li-ion batteries and application to assess the impact of Vehicle-to-Grid strategies on battery lifetime. Applied Energy 2016; 172:398–407. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.03.119.
58. Volker Jens, Feuerwehr Hamburg, zuständig für Koordination NEF 14. Persönliche Mitteilung: Beladeliste e-NEF [E-Mail]; 11.09.23.

10. Anlagen

10.1 Liste Arztbesetzte Rettungsmittel Hamburg [3]

Arztbesetzte Rettungsmittel in der Freien und Hansestadt Hamburg

Kennzeichnung	Typ	Organisation	Standort	Dienstzeit	VZÄ	Sonstiges
23-NAW-A	NAW	Bundeswehr	Bundeswehr Krankenhaus	24/7	1	
33-NEF-A	NEF	Bundeswehr	FuRW Veddel F33	24/7	1	
23-NAW-B	NAW	Bundeswehr	Bundeswehr Krankenhaus	taktische Reserve		Einsatz für RTH bei technisch oder wetterbedingtem Ausfall
23-ITW-A	ITW	Bundeswehr	Bundeswehr Krankenhaus	Doppelfunktion	0,36	Werktags (Mo-Fr) 7-19 Uhr festbesetzt, in der anderen Zeit in DF mit 23-NAWA
23-ITW-B	ITW	Bundeswehr	Bundeswehr Krankenhaus	taktische Reserve		
13-NEF-A	NEF	Feuerwehr	FuRW Rotherbaum F13	24/7	1	
13-NEF-B	NEF	Feuerwehr	FuRW Rotherbaum F14	taktische Reserve		
14-NEF-A	NEF	Feuerwehr	RW Otterseen	24/7	1	AK Altona Pers. F14
14-ITW-A	ITW	ASB	ASB Rettungsweiche Osdorf	12/7, 9-20 Uhr	0,46	Das notärztliche Personal wird durch das Asklepios Klinikum Harburg gestellt
15-NEF-A	NEF	Feuerwehr	RW Niendorf	12/7, 7-19 Uhr	0,5	FuRW Finkenwerder F 35
15-NEF-B	NEF	DRK	RW Eidelstedt	12/7, 9-21 Uhr	0,5	ZKN, Reichshafstr. 72
16-NEF-A	NEF	JUH	RW Heidberg	12/7, 8-20 Uhr	0,5	AK Heidberg, Tangstedter Landstr. 400
21-NEF-A	NEF	Feuerwehr	FuRW Wandsbek F21	24/7	1	
21-NEF-B	NEF	Feuerwehr	FuRW Wandsbek F21	taktische Reserve		
22-NEF-A	NEF	Feuerwehr	RW St. Georg	24/7	1	AK St. Georg F22
23-NEF-A	NEF	Feuerwehr	RW Barmbek-Nord	24/7	1	AK Barmbek, Pers. F23
24-ITW-A	ITW	Malteser	RW Steishoop	12/7, 8-20 Uhr	0,5	
24-NEF-A	NEF	Feuerwehr	FuRW Sasel F24	24/7	1	
25-NEF-A	NEF	Feuerwehr	RW Rothenberg	24/7	1	BUK Rothenberg, Pers. F25
36-NEF-A	NEF	Feuerwehr	RW Heimfeld	24/7	1	AK Harburg, Pers. F36
05-NEF-A	NEF	Feuerwehr	F05-EFS-NotSan	taktische Reserve		
25-RTH Christoph Hamna	RTH	AIDAC	BGU KH Rothenberg	So.aufgang bis -untergang	0,5	
23-RTH Christoph 29	RTH	Bundeswehr	Bundeswehr Krankenhaus	So.aufgang bis -untergang	0,5	

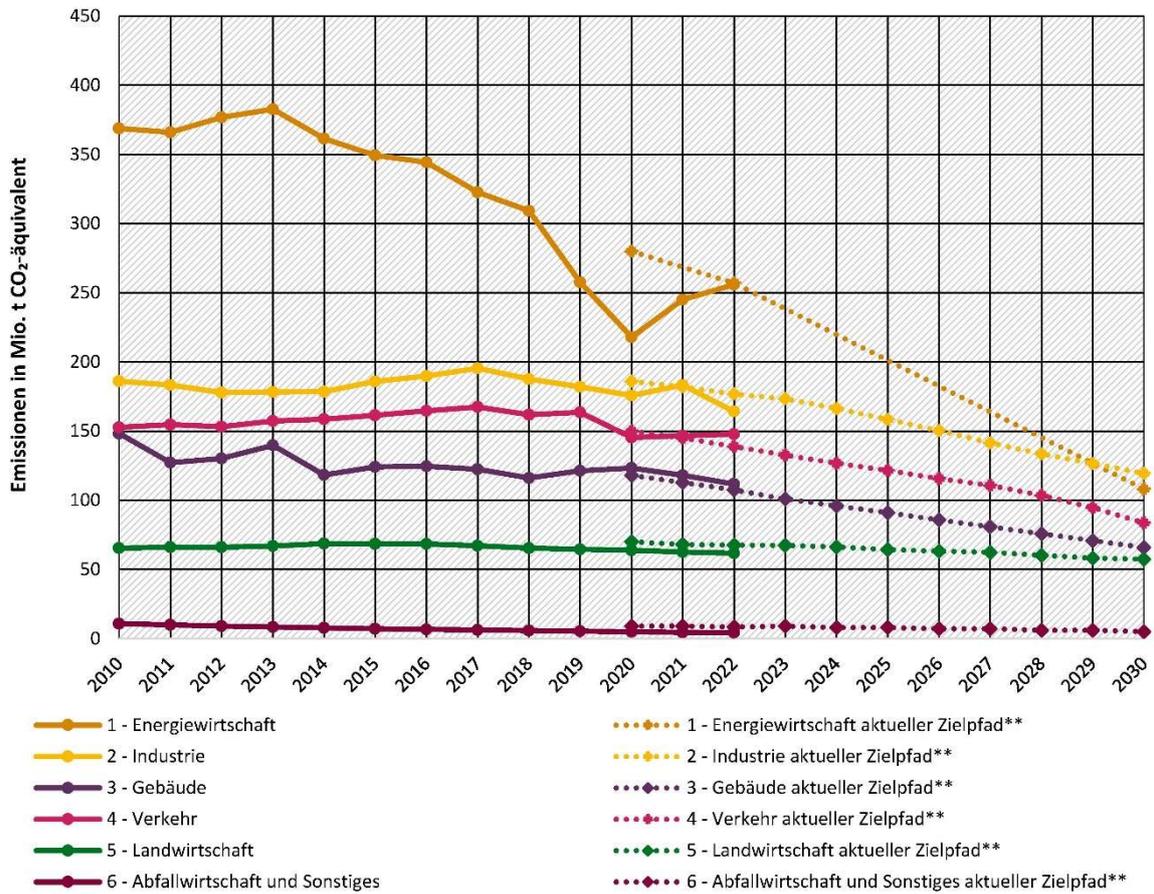
Stand: 01.06.2023

13,82 Summe VZÄ
23 Summe Ressourcen

10.2 Trendlinie Treibhausgasemissionen KSG [6]

Entwicklung und Zielerreichung der Treibhausgasemissionen in Deutschland

in der Abgrenzung der Sektoren des Klimaschutzgesetzes (KSG)



* Die Aufteilung der Emissionen weicht von der UN-Berichterstattung ab, die Gesamtemissionen sind identisch
 ** entsprechend der Novelle des Bundes-KSG vom 12.05.2021, Jahre 2022-2030 angepasst an Über- & Unterschreitungen

Quelle: Umweltbundesamt 13.03.2023

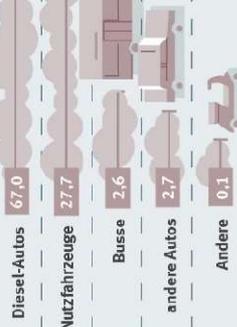
10.3 Infografik Verkehr [8]

Umwelt und Verkehr

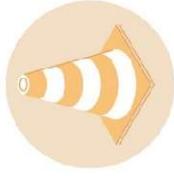
Mobilität und Erreichbarkeit sind zentrale Voraussetzungen für gesellschaftliche Teilhabe, wirtschaftlichen Austausch, Beschäftigung und Wohlstand. Zugleich hat der Verkehr Auswirkungen auf Klima, Umwelt und Gesundheit.

Anteil verschiedener Verkehrsmittel am NO₂-Ausstoß im Straßenverkehr

Besonders Diesel-Autos mit ihren hohen Real-Emissionen tragen weiter in zur Überschreitung der Grenzwerte für den NO₂-Ausstoß bei (TREMOD 6.4.2, 12/2022, 2021 in Prozent):



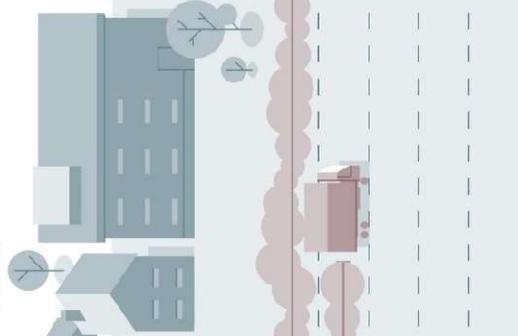
13,2% der Bevölkerung waren im Jahr 2017 von Schallpegeln über 50 dB(A) aus dem Verkehr betroffen.



8,0 Hektar Fläche wurden 2021 täglich neu für Verkehrs-zwecke in Anspruch genommen.

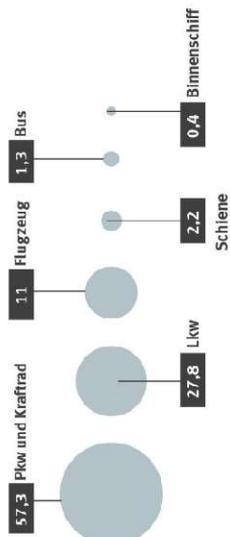


111.420 Tonnen Mikroartikel aus Kunststoff gelangen durch Reifenabrieb alleine in Deutschland pro Jahr in die Umwelt.



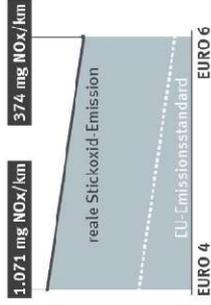
Anteil einzelner Verkehrsmittel am Energieverbrauch im Verkehr

Der Verkehr benötigt in Deutschland über 27,14% des gesamten Endenergieverbrauchs (2021, in Prozent):



Stickoxid-Emissionen

Stickoxid-Emissionen in mg NO_x/km von Diesel-Pkw im Vergleich zum EU-Emissionsstandard für 2021.



Trends des Verkehrs

Anteil des Umweltverbundes* an der Verkehrsleistung 2020 (in Prozent):



Entwicklung des Kraftfahrzeugbestandes zwischen 2010 und 2022 (in Prozent):



Starke Verschiebung im Kraftstoffverbrauch des Pkw-Verkehrs von 1995 - 2021 (in Prozent):



*Rsvverkehr, Fußgänger, ÖV

Quelle: www.umweltbundesamt.de; www.bndfci.bund.de

10.4 Bilder NEF

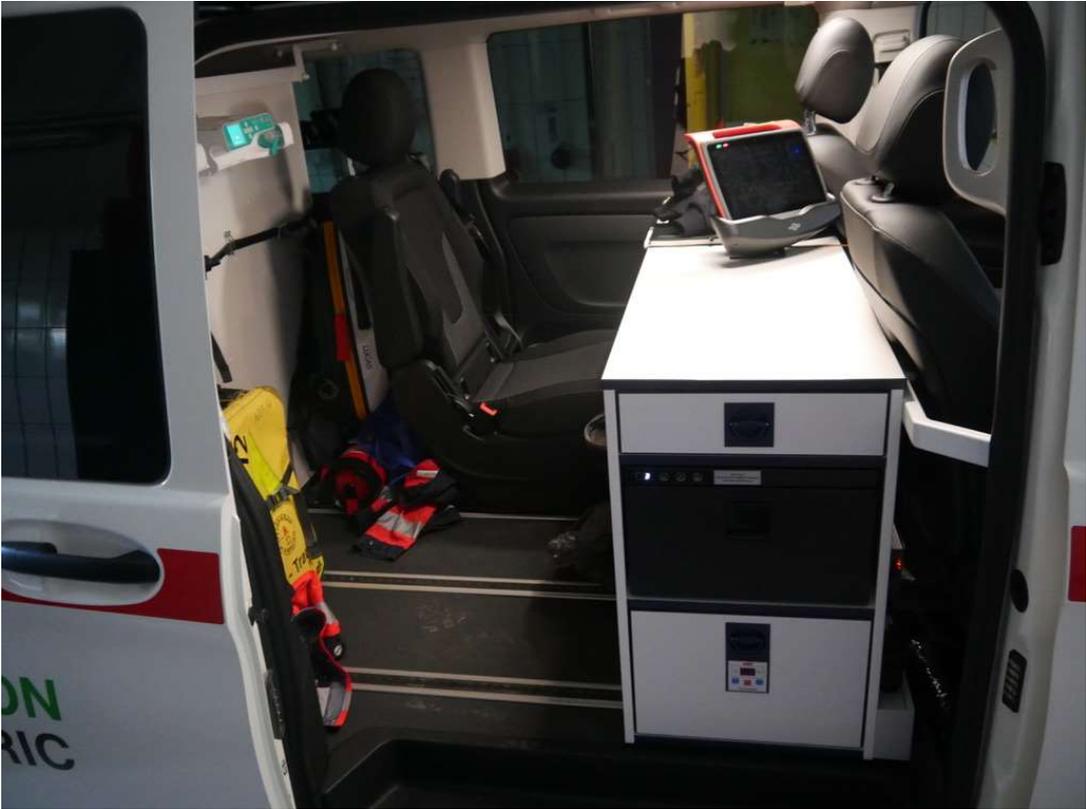
Beide NEF vor der FuRw F14:



Beladenes e-NEF Heckklappe:



Innenraum des e-NEF:



Fahrerraum des e-NEF:



Heckwarneinrichtung des e-NEF:



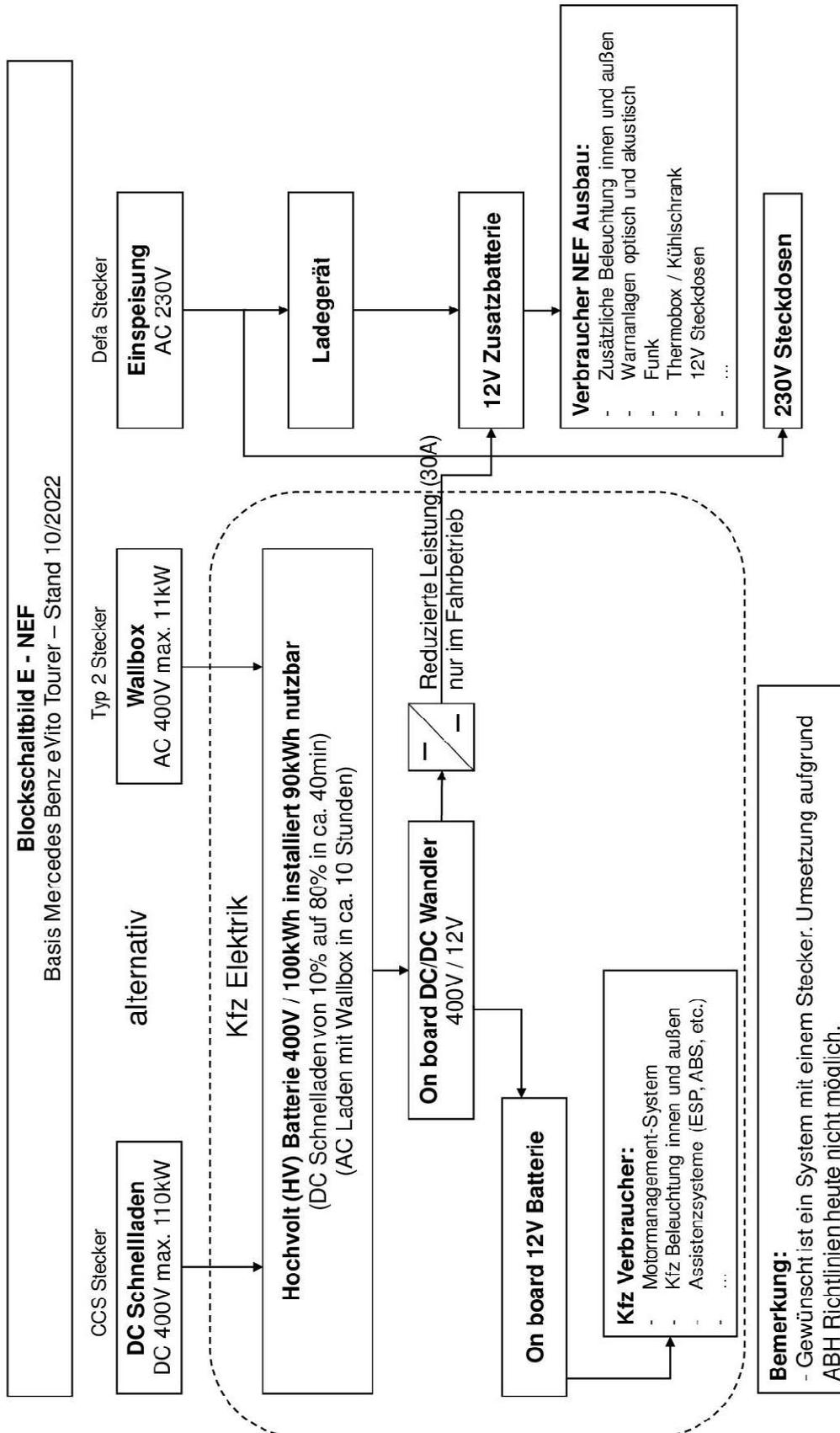
Innenraum des Diesel-NEF:



Beladenes Diesel-NEF Heckklappe:



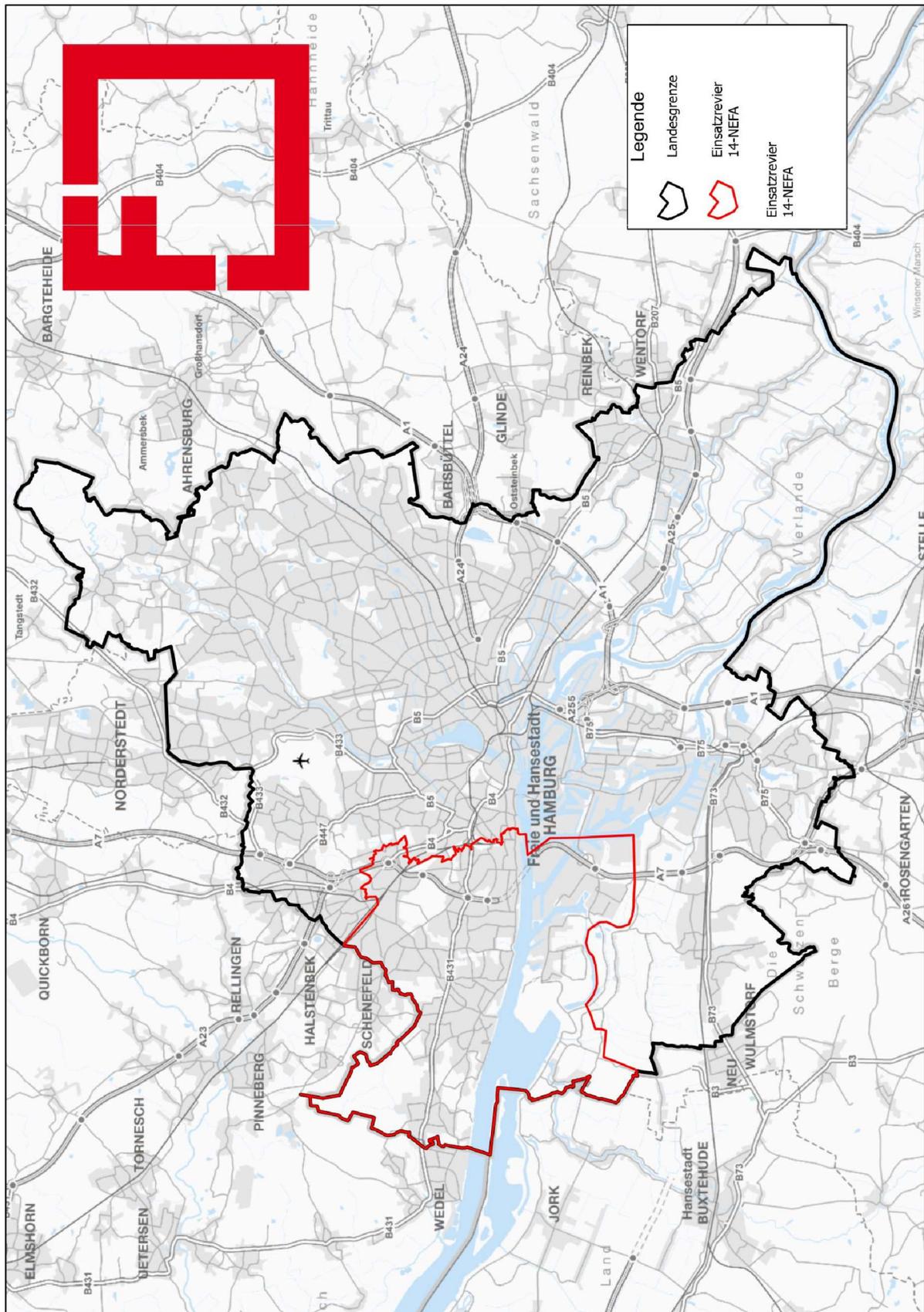
10.5 Blockschaltbild e-NEF [28]



10.6 Beladeliste E-NEF [58]

<u>Pos.</u>	<u>Artikel</u>	<u>Anzahl</u>	<u>Bemerkungen</u>	<u>Umgepackt</u>
1	Rucksack NA	1		
2	Rucksack NotSan	1		
3	Trauma-Rucksack	1		
4	Sauerstoff-Tasche	1		
5	Masimo Pulsoxymeter	1		
6	Transportbox art. RR-Messung	1		
7	Transportbox Tox- Koffer	1		
8	Infektions-Schutzanzüge + Zubehör	3		
9	FERNO XT-Board	1		
10	Inhalt Kühlschranks	Div.		
11	BTM im Tresor	1 Satz		
12	NIDA-Tablet	1		
13	Ersatzakku NIDA-Tablett	1		
14	Funkgeräte HRT	2	1x hinter AccuVac	
15	Helme	3		
16	B-Schlüssel	1	Am Schlüsselbund	
17	Tor-Taster	1	Armaturenbrett	
18	Dreikant	1		
19	NEF-Kennzeichnung	1	Windschutzscheibe	
20				
21				
22				
23				
24				
25				
26				
27				

10.7 Karte Einsatzgebiet 14-NEF-A [27]



10.8 Ausschnitt Fahrtenbuch

Monat: Tag	Fahrzeit		Name des Fahrers Dienststelle	Fahrestrecke/Reiseziel	Zweck der Fahrt, Innessen/Ladung aufgesuchter Person / aufgesuchter Geschäftspartner	km-Stand		Gefahrene km			Bemerkungen (z.B. Defekte)	Unterschrift des Fahrers
	von	bis				Fahrt-Beginn	Fahrt-Ende	diensl.	privat	W / Dienst		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
10.6.	01:45	01:56					10854					
10.6.	02:57	03:55					10958	4				
10.6.	6:46	7:23					10862	16				
10.6.	8:45	9:12					10878	16				
10	9:29	10:59					10894	20				
10	10:59	12:05					10924	60				
10	12:49	13:08					10927	7				
10	13:11	13:42					10922	5				
10	14:00	14:16					10940	8				
10	14:46	15:05					10940	4				
10	15:10	15:22					10944	11				
10	15:32	16:22					10955	13				
10	17:20	18:05					10968					
							Übertrag:					

8

9

Fragebogen Testbetrieb e-NEF



Liebe Kolleginnen und Kollegen,

ab dem 06.06. wird für einen Zeitraum von vier Wochen ein Testbetrieb für das ausschließlich elektrisch angetriebene NEF stattfinden. Während des Testbetriebs soll das e-NEF auf die Alltagstauglichkeit geprüft und ganz grundsätzlich Erfahrungen zu Vor- und Nachteilen des Fahrzeugs gesammelt werden.

Ab dem nächsten Jahr werden keine MB-Sprinter-Fahrgestelle wie bisher produziert. Daher möchten wir ebenfalls die Eignung des MB-Vito-Fahrgestells für die Hamburger Anforderungen testen. Die aktuelle Anordnung der Beladung des e-NEF ist nur für den Testbetrieb! Ein separater Workshop zur Konzeptionierung der neuen NEF-Beladung wird angeboten.

Wir bitten Euch, an der Auswertung des Testbetriebes teilzunehmen und die Erfahrungen und Einschätzungen mit uns zu teilen, damit wir basierend auf diesen ein optimal abgestimmtes Einsatzmittel zur Verfügung stellen können.

Jeder Fahrer/Mitfahrer darf nach Ende der Schicht an der Auswertung teilnehmen! Gerne mehrmals

bitte wenden

Fragebogen e-NEF | Ich beantworte hiermit meinen __. Bogen



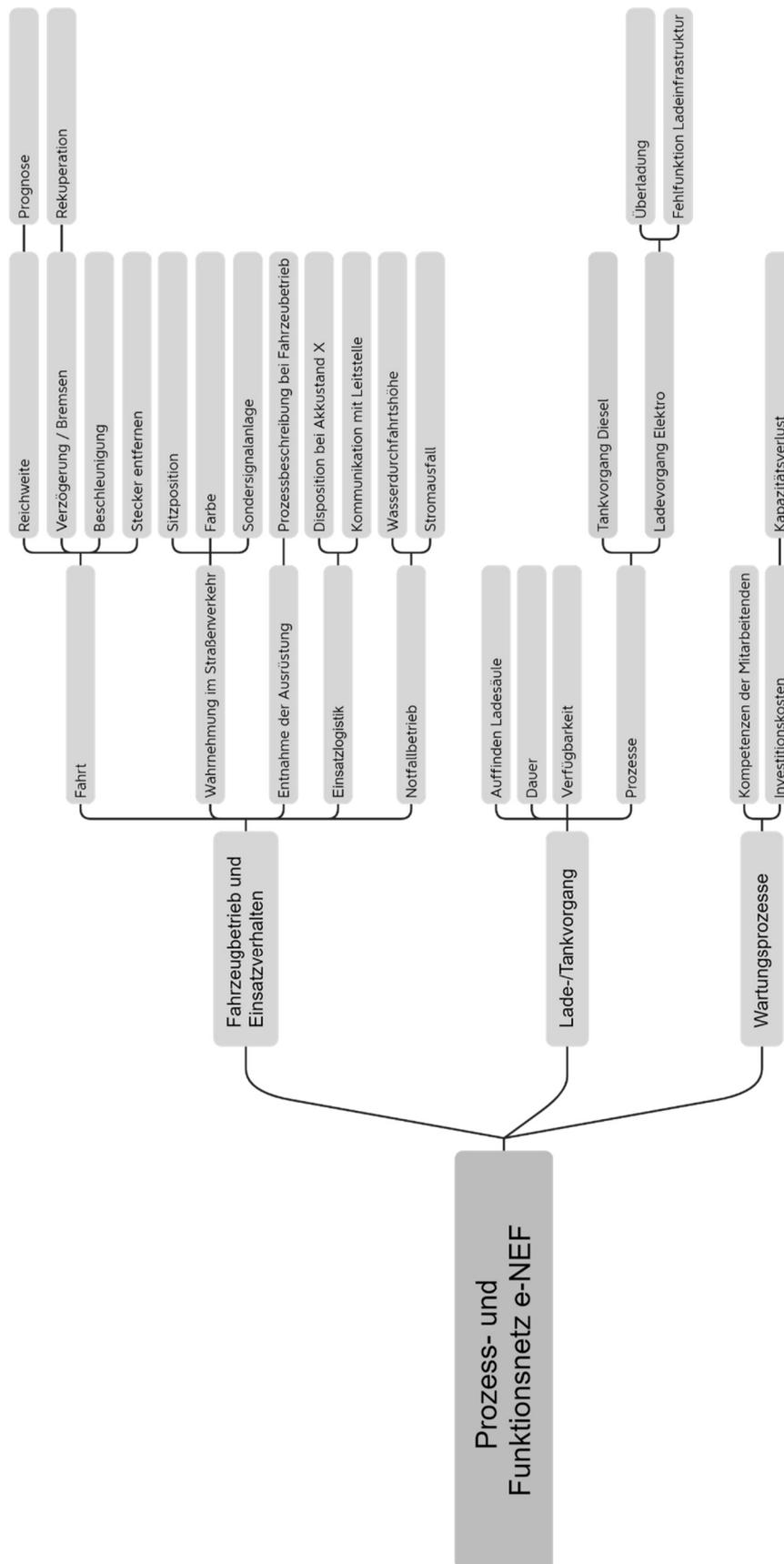
Die Teilnahme an der Umfrage erfolgt auf freiwilliger Basis, und die bereitgestellten Informationen werden anonymisiert und vertraulich behandelt. Die Ergebnisse dienen lediglich der Forschung und sollen keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit erheben.

Ansprechpartner Fragebogen: F0326/P Nils Petersen 0173 2512403

Ist die Reichweitenprognose zuverlässig?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein
In welchen Bereichen wurde die Reichweitenprognose genutzt?	____% - ____%	
Wurde die Rekuperationsfunktion genutzt? (Schaltwippen)	<input type="checkbox"/> -- <input type="checkbox"/> - <input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> + <input type="checkbox"/> ++	<input type="checkbox"/> Nein
Wie oft wurde die Rekuperationsfunktion genutzt?	-- : - : 0 : + : ++ :	
An welchen Standorten wurde geladen? Wie viel % oder km wurden dabei geladen?	<input type="checkbox"/> Wache: <input type="checkbox"/> zivile Ladesäule: <input type="checkbox"/> externes Krankenhaus: <input type="checkbox"/> Andere:	
Wie bewerten Sie den Ladevorgang generell? (z.B. intuitiv/kompliziert/effizient/benutzerfreundlich)	_____	
Gab es ein Problem beim Ladevorgang?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein
Wurden diese Probleme selbstständig behoben	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein
Haben Sie einen Vorschlag für einen weiteren Ladestandort? Wenn ja, welchen?	<input type="checkbox"/> Ja: _____	<input type="checkbox"/> Nein
Wie einfach wurde die externe Ladestation gefunden?	<input type="checkbox"/> externe Ladestation wurde nicht genutzt <input type="checkbox"/> einfach ○ ○ ○ ○ ○ ○ kompliziert	
Gibt es Unterschiede in der Kommunikation bei der Einsatzfahrt?	<input type="checkbox"/> Ja: _____	<input type="checkbox"/> Nein
Gab es Unsicherheiten vor Beginn des Tests?	<input type="checkbox"/> Ja: _____	<input type="checkbox"/> Nein
Haben sich diese Unsicherheiten bestätigt?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein
Welche Erwartungen hatten Sie an das Fahrzeug?	_____	
Sind Stör-/Fehlermeldungen aufgetreten?	<input type="checkbox"/> Ja: _____	<input type="checkbox"/> Nein
Wie oft sind Stör-/Fehlermeldungen aufgetreten?	_____	
Wie bedienerfreundlich ist das Fahrzeug?	sehr ○ ○ ○ ○ ○ ○ garnicht	
Wie zufrieden sind Sie mit dem e-NEF gewesen?	sehr ○ ○ ○ ○ ○ ○ garnicht	
War durch den Antriebswechsel ein einsatztaktischer Nachteil bemerkbar?	<input type="checkbox"/> Ja: _____	<input type="checkbox"/> Nein
Gab es durch das e-NEF Verzögerungen im Einsatzablauf?	<input type="checkbox"/> Ja: _____	<input type="checkbox"/> Nein
Wie bewerten Sie den Platzbedarf im Vergleich zum bisherigen Fahrzeug?	_____	

Musste das e-NEF während des Betriebes aufgrund des veränderten Antriebes oder einem zu geringen Ladezustand außer Dienst gehen? Wenn ja, warum?	<input type="checkbox"/> Ja:	<input type="checkbox"/> Nein
Welche Unterschiede zum konventionellen NEF waren für Sie am auffälligsten?		
Wie wichtig schätzen Sie die Reduzierung von Emissionen und die Nachhaltigkeit im Rettungsdienst ein?	sehr ○○○○○○ garnicht	
Welche Vorteile sehen Sie in der Verwendung von Elektrofahrzeugen im Rettungsdienst? Nennen Sie die Wichtigsten.		
Welche Herausforderungen sehen Sie bei der Verwendung von Elektrofahrzeugen im Rettungsdienst? Nennen Sie die Wichtigsten.		
Welche Funktion haben Sie während der Schicht wahrgenommen?	<input type="checkbox"/> NotSan/RA <input type="checkbox"/> NA <input type="checkbox"/> Hospitation <input type="checkbox"/> Andere: _____	
Seit wann sind Sie im Rettungsdienst beschäftigt?		
Wollten Sie auf dem e-NEF eingesetzt werden?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein
Haben Sie aufgrund des e-NEF einen Dienst übernommen? Wenn ja, war dies ein zusätzlicher Dienst?	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Nein
Könnten Sie sich vorstellen e-NEF in Hamburg einzusetzen? Begründung (Stichwort)	<input type="checkbox"/> Ja:	<input type="checkbox"/> Nein:
Was würden Sie sich für zukünftige NEF wünschen?		
Wie bewerten Sie den Wechsel des Fahrzeugtyps von Sprinter zu Vito?	gut ○○○○○○ schlecht	
Ist eine Veränderung des Fahrzeuges beim Parken im Einsatz z. B. in zweiter Reihe bemerkbar?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein
Ist eine Veränderung der Wahrnehmbarkeit bei der Benutzung der Sondersignalanlage (kein Pressluft mehr) bei Einsatzfahrt bemerkbar?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein
Sind Änderungen im Fahrverhalten bemerkbar?	<input type="checkbox"/> Federung und Dämpfung <input type="checkbox"/> Beschleunigung <input type="checkbox"/> Bremsleistung <input type="checkbox"/> Lenkung und Handling <input type="checkbox"/> Sitzposition und Komfort <input type="checkbox"/> Assistenzsysteme	<input type="checkbox"/> Nein
Wird der Platzbedarf der Ausrüstung im neuen Fahrzeugtyp gerecht?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein
Haben Sie das Gefühl, aufgrund der veränderten Sitzhöhe, anders im Straßenverkehr wahrgenommen zu werden?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein

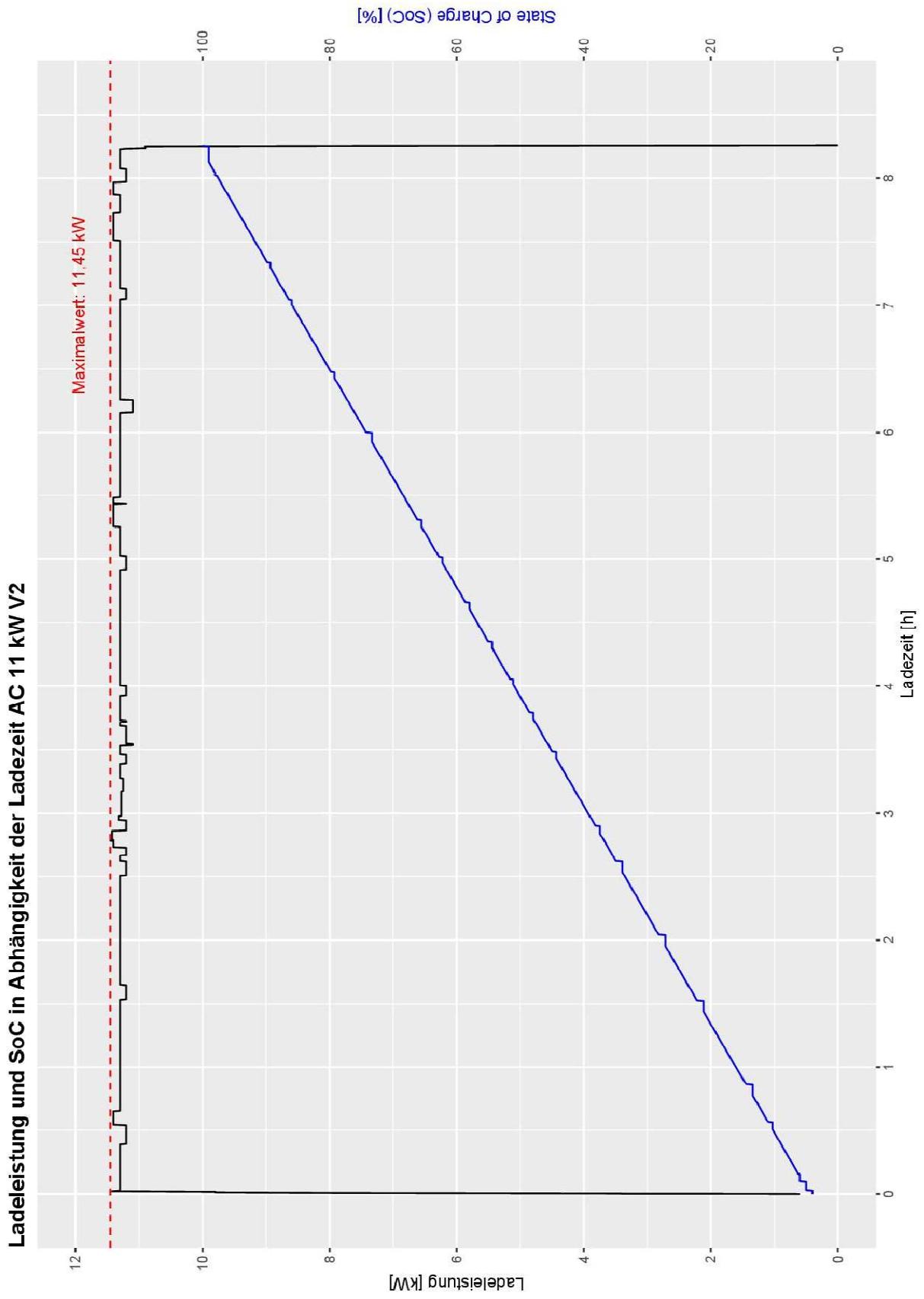
10.11 Darstellung Funktionsnetz



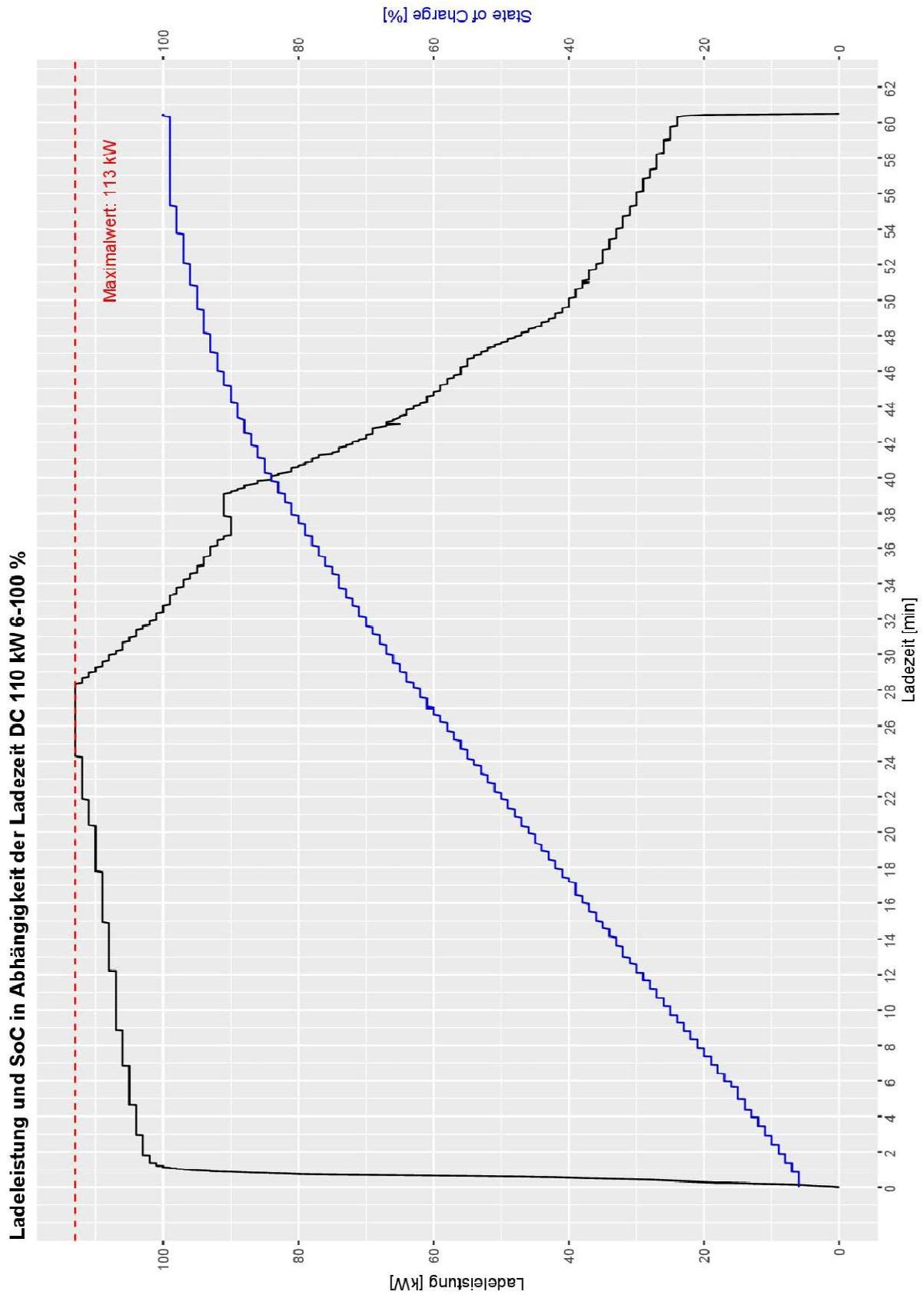
10.12 FMEA-Tabelle

Abhängig vom Fahrzeugantrieb		FMEA-Tabelle NEF Hamburg		Bewertung Ausgangszustand								Bewertung nach Anwendung von Maßnahmen					Bemerkungen			
Abhängig vom Fahrzeugtyp, nicht Antrieb		potentielle Fehlerfolge	potentielle Fehlerursache	Häufigkeit Diesel-NEF	Häufigkeit e-NEF	Schadensausmaß Diesel-NEF	Schadensausmaß e-NEF	Dekleierbarkeit e-NEF	Risikofaktor Diesel-NEF	Risikofaktor e-NEF	Risiko-Kontrolloption / Vermeidungsmaßnahmen	Häufigkeit Diesel-NEF	Häufigkeit e-NEF	Schadensausmaß Diesel-NEF	Schadensausmaß e-NEF	Dekleierbarkeit e-NEF		korrigierter Risikofaktor Diesel-NEF	korrigierter Risikofaktor e-NEF	
Nr.	Prozess / System																Fehlermöglichkeit (was wäre, wenn...)			
1 Fahrzeugbetrieb und Einsatzverhalten																				
1.1	Reichweitenprognose	Reichweitenprognose unzuverlässig	Restreichweite nicht ausreichend, Zielort wird nicht erreicht	Berechnungsintervall falsch definiert	3	3	4	4	2	24	24	Berechnungsintervall wöchentlich zurücksetzen	2	2	4	4	2	16	16	Bei überörtlichem Einsatz relevant
1.2	Bremsvorgang	zu stark	Unfallgefahr	nachfolgender Verkehr überschätzt Bremsvorgang	3	5	1	1	2	6	10	Fahrer-sicherheits-training	2	3	1	1	1	2	3	Rekuperation bei e-NEF ausschlaggebend
			zu schwach	Unfallgefahr	Verschätzung im Bremsvorgang	3	3	1	1	2	6	6	Fahrer-sicherheits-training	2	2	1	1	1	2	2
1.3	Beschleunigung	zu stark / zu schwach	Kontrollverlust	Fahrer	3	5	2	2	2	12	20	Fahrer-sicherheits-training	2	3	2	2	1	4	6	Feedback aus Fragebogen
			Unfallgefahr	Verschätzung des Fahrers	3	3	2	2	2	12	12	Fahrer-sicherheits-training	2	2	2	2	1	4	4	Feedback aus Fragebogen
			hoher Kraftstoff-/Energieverbrauch	Betriebspunkt des Motors nicht korrekt	5	5	1	1	1	5	5	Fahrer-sicherheits-training	4	4	1	1	1	4	4	Feedback aus Fragebogen
2 Wahrnehmung im Straßenverkehr																				
2.1	Sitzposition	andere Verkehrsteilnehmer werden schlecht wahrgenommen	Unfallgefahr	Verschätzung des Fahrers	4	5	2	2	1	8	10	Fahrer-sicherheits-training	3	4	2	2	1	6	8	Modellbedingt
2.2	Farbe	Einsatzfahrzeug wird schlechter wahrgenommen	Unfallgefahr durch nichtwahrnehmen des Einsatzfahrzeuges	Verkehrsteilnehmer nehmen Einsatzfahrzeug nicht als solches wahr	4	5	2	2	1	8	10	Fahrer-sicherheits-training	3	3	2	2	1	6	6	Feedback aus Fragebogen
2.3	Sondersignalanlage	Verkehrsteilnehmern wahrgenommen			4	5	2	2	1	8	10	Sondersignal-anlage verändern	3	3	2	2	1	6	6	Feedback aus Fragebogen
3 Entnahme der Ausrüstung																				
3.1	Entnahme der Ausrüstung	komplizierte Entnahme der Ausrüstung	Verzögerung der Einsatzbereitschaft	Platzierung der Ausrüstung nicht an Einsatzverlauf angepasst	3	4	3	3	3	27	36	Überarbeitung des Ausbaus, Schulung Mitarbeiter	3	3	3	3	2	18	18	Provisorischer Ausbau bei e-NEF
4 Einsatzlogistik																				
4.1	Disposition bei Tank-/Ladezustand X	Einsatz wird trotz niedrigem Tankzustand zugewiesen	Restreichweite nicht ausreichend, Zielort wird nicht erreicht	Tankinhalt zu gering	1	2	3	3	1	3	6	Übermittlung des Tank-/Ladezustandes an Einsatzleitsystem	1	1	3	3	1	3	3	IT-Schnittstelle benötigt
4.2	Kommunikation mit Leitstelle	Fahrergeräusche zu laut	Kommunikation auf Grund von Fahrergeräuschen gestört	Motorgeräusche	5	1	2	2	1	10	2	Verringerung der Motordrehzahl bei Diesel-NEF	4	1	2	2	1	8	2	Feedback aus Fragebogen
5 Notfallbetrieb																				
5.1	Durchfahrt von Wasser in Höhe X	um Einsatzort zu erreichen ist Wasserdurchfahrt der Höhe X notwendig	Fahrzeug defekt, Zielort wird nicht erreicht	Wasser dringt in Motorraum	2	2	2	2	3	12	12	Fahrer-sicherheits-training, Alternativroute nehmen	2	2	2	2	2	8	8	Relevant zu Sturmflut-Saison
5.2	Ladung Zusatzbatterie/Me-dizingeräte	Stromausfall < 1h	Medizingeräte werden nicht geladen	Ladezustand Zusatzbatterie zu gering	3	2	1	1	1	3	2	Notstrom-versorgung	3	2	1	1	1	3	2	Konzept Stromausfall notwendig
5.3		Stromausfall > 1h	Medizingeräte werden nicht geladen, nicht mehr Einsatzbereit	Ladezustand Zusatzbatterie zu gering	2	1	3	3	1	6	3	Notstrom-versorgung	2	1	2	2	1	4	2	Konzept Stromausfall notwendig
6 Tank-/Ladevorgang																				
6.1		Tankstelle/Ladesäule wird nicht aufgefunden	Tank/Fahrzeugatterie kann nicht aufgefüllt/laden werden	Tankstelle/Ladesäule nicht in ausreichender Nähe vorhanden	3	2	1	1	2	6	4	Tank-/Ladevorgang ausreichend früh einleiten	2	2	1	1	2	4	4	Maßgeblicher Unterschied der Risikofaktoren, gesonderte Betrachtung notwendig
6.2		Tankvorgang begründet Außerdienststellung und dauert X min	Fahrzeug für X min außer Dienst	Dienstvorschrift gibt vor außer Dienst zu gehen zum Tanken/Laden	5	2	3	3	1	15	6	Tank-/Ladevorgang ausreichend früh einleiten	4	2	3	3	1	12	6	
6.3		Zapf-/Ladesäule ist nicht verfügbar	Tank kann nicht aufgefüllt werden	Alle Zapfsäulen der Tankstelle durch andere Kunden belegt	3	1	2	2	1	6	2	Tank-/Ladevorgang ausreichend früh einleiten	3	1	2	2	1	6	2	
7 Wartungsprozesse																				
7.1	Wartungsprozesse	Mitarbeiter verfügen nicht über ausreichende Kompetenz für Reparatur	Fahrzeug muss in Fremdwerkstatt repariert werden, lange Außerdienststellung	Besonderheiten des Fahrzeugs begründen Sonderkompetenz	2	3	4	4	2	16	24	Mitarbeiter-schulung der Werkstätten	2	2	4	4	2	16	16	Ganzheitliches Konzept empfohlen
7.2		hoher Durchsatz an Verschleißteilen	Wiederkehrende Kosten	hohe Fahrzeugnutzung	3	2	4	4	4	48	32	Qualität der Verschleißteile erhöhen	2	2	4	4	4	32	32	Ganzheitliches Konzept empfohlen

10.13 AC Ladetest V2



10.14 DC Ladetest 6-100 %



10.15 DC Ladetest 30-100 %

