Hochschule Magdeburg • Stendal

Fachbereich Ingenieurwissenschaften
und Industriedesign

Fraunhofer IFF

Institut für Elektrotechnik

Bachelorarbeit

Entwicklung eines Auslegungsmodells für Zusatzspeicher in medizinischen Einsatzfahrzeugen

am 19.05.2021 vorgelegte Bachelorarbeit
von Felix Merkel

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. P. Komarnicki
Zweitprüfer: Dr.-Ing. S. Balischewski

Betreuer: Dr.-Ing. S. Balischewski

Bachelorarbeit

von Herrn Felix Merkel

Thema: Entwicklung eines Auslegungsmodells für Zusatzspeicher in medizinischen Einsatzfahrzeugen

Aufgabenstellung:

Im Zuge der Dekarbonisierung des Verkehrs wird sich überwiegend auf den Individualverkehr fokussiert. Jedoch werden für eine ganzheitliche Abkehr von Verbrennungsmotoren auch Lösungen für Sonderfahrzeuge und Transportmittel des Katastrophenschutzes und Rettungswesens benötigt. Die besondere Herausforderungen bei der Elektrifizierung dieser Fahrzeuggruppen besteht in der Versorgung des jeweiligen Zusatzaufbaus, welcher nicht mehr aus dem Traktionssystem versorgt warden darf.
Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll daher ein Modell geschaffen warden, mit dessen Hilfe die Auslegung eines zusätzlichen Energiespeichers für medizinische Sonderfahrzeuge ermöglicht wird. Dabei müssen zunächst die energetische Struktur des Zusatzaufbaus sowie die Funktionsweise der Zusatzgeräte abgebildet werden. zu diesem Zweck sind Lastprofile für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen zu synthetisieren. im Anschluss daran sind unterschiedliche Simulationsszenarien zu definieren, mit deren Hilfe das Modell auf Plausibilität geprüft warden kann und eine erste Auslegung ermöglicht wird. Die Arbeiten sind abschließend zu dokumentieren und die Ergebnisse zu bewerten.

Die Arbeit umfasst die folgenden Arbeitsschritte:

- Literaturrecherche
- Kategorisierung von Fahrzeugtypen und Verbrauchergruppen
- Entwicklung eines geeigneten Simulationsmodells für die Auslegung des Zusatzspeichers
- Test des Modells anhand selbst erstellter Szenarien
- Documentation der Ergebnisse

Magdeburg,	11.03.2021
Ausgabedatum:	11.03.2021
Abgabedatum:	19.05.2021
Betreuer:	Dr.-Ing. S. Balischewski
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. P. Komarnicki

Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

19. Mai 2021

……..

Datum Unterschrift

I Abstract

The present scientific paper deals fundamentally with the desgin of a model for an additional storage unit, which shall guarantee the supply of the whole additional equipment of a medical emergency vehicle. In this context, the individual vehicle types of the medical rescue service are explained, as well as the integration of the additional storage unit into the conventional network of an electrically operated vehicle. The medical equipment is based on the DIN EN 1789 [1], which defines the basic equipment of ambulances according to German standards. Furthermore, an overview of the various energy storage technologies is given, according to which the common vehicle storage systems are compared. Following the theoretical basics, the model for the storage design is presented. The simulation environment is explained in more detail, as well as the explanation of the model structure and the entry of the simulation parameters. The simulation of the scenarios follows the model presentation. A total of 9 simulations are carried out in which different vehicle types are compared on the base of different influencing factors. The results of the simulations are then presented and special features highlighted. In the discussion that follows, the results are critically assessed, comparisons are shown and further calculations are made. The scientific work is rounded off by a summary with an outlook.

II Kurzreferat

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit befasst sich grundlegend mit der Auslegung eines Modells für einen Zusatzspeicher, welcher die Versorgung der gesamten zusätzlichen Ausstattung eines medizinischen Einsatzfahrzeuges gewährleisten soll. In diesem Rahmen werden die einzelnen Fahrzeugtypen des medizinischen Rettungsdienstes erläutert, sowie die Integration des Zusatzspeichers in das konventionelle Bordnetz eines elektrisch betriebenen Fahrzeuges. Als Basis für die Definierung der medizinischen Ausstattung steht die DIN EN 1789 [1], welche die Grundausstattung von Krankenkraftwagen nach deutscher Norm festlegt. Des Weiteren wird ein Überblick zu den verschiedenen Energiespeichertechnologien gegeben, auf die eine Gegenüberstellung der gängigen Fahrzeugspeicher erfolgt. Im Anschluss an die Theoretischen Grundlagen erfolgt die Vorstellung des Modells für die Speicherauslegung. Dabei wird die Simulationsumgebung näher erläutert, sowie die Erklärung des Modellaufbaus und das Einpflegen der Simulationsparameter. Auf die Modellvorstellung folgt die Simulation der Szenarien. Es werden insgesamt 9 Simulationen durchgeführt, bei dem verschiedene Fahrzeugtypen auf Basis unterschiedlicher Einflussfaktoren gegenübergestellt werden. Anschließend werden die Ergebnisse der Simulationen dargelegt und Besonderheiten hervorgehoben. In der darauffolgenden Diskussion werden die Ergebnisse kritisch bewertet, Vergleiche gezogen und weiterführende Berechnungen angestellt. Die wissenschaftliche Arbeit wird durch eine Zusammenfassung mit einem Ausblick abgeschlossen.

III Inhaltsverzeichnis

I Abstract I
II Kurzreferat II
III Inhaltsverzeichnis III
IV Abbildungsverzeichnis V
V Tabellenverzeichnis VI
VI Symbolverzeichnis VII
VII Abkürzungsverzeichnis VIII

1 Einleitung 1
1.1 Motivation und Ziel 2
1.2 Aufbau der Arbeit 2

2 Theoretische Grundlagen 3
2.1 Klassifizierung von Sonderfahrzeugen 3
2.2 Kategorisierung von Krankenkraftwagen 4
2.3 Bordnetzstruktur und CAN-Bus 7
2.4 Ausrüstung und medizinische Geräte 9
2.5 Histografische Einteilung der Ausstattung 14
2.6 Energiespeichertechnologien im Überblick 17
2.7 Energiespeicher in Kraftfahrzeugen 21
2.7.1 Blei-Säure-Akku 21
2.7.2 Lithium-Ionen-Akku 23
2.7.3 Redox-Flow-Batterie 24
2.7.4 Brennstoffzelle 25
2.7.5 Vergleich Batterie und Brennstoffzelle 27

3 Modellvorstellung für die Speicherauslegung 28
3.1 Simulationsumgebung 28
3.2 Erklärung des Modellaufbaus 29
3.3 Einpflegen der Simulationsparameter 32
3.4 Programmablaufplan 33
3.5 Simulation der Szenarien 34
3.5.1 Randbedingungen 34
3.5.2 Durchführung 35
3.5.3 Simulationsszenarien 37
3.5.3.1 Simulationsvariante RTW Fahrtvariante 1 37
3.5.3.2 Simulationsvariante RTW Fahrtvariante 2 39
3.5.3.3 Simulationsvariante KTW 40

4 Ergebnisse der Simulation 41
4.1 Simulationsvariante RTW Fahrtvariante 1 41
4.2 Simulationsvariante RTW Fahrtvariante 2 44
4.3 Simulationsvariante KTW 46

5 Diskussion der Ergebnisse 50
5.1 Simulationsvariante RTW Fahrtvariante 1 50
5.2 Simulationsvariante RTW Fahrtvariante 2 52
5.3 Simulationsvariante KTW 53

6 Zusammenfassung und Ausblick 55

7 Literaturverzeichnis 57
A Tabellen 64
B CD-ROM Verzeichnis 67

IV Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Weltweite Elektroauto-Neuzulassungen 2010 bis 2020, [3] 1
Abbildung 2.1 Krankentransportwagen des Bayerischen Roten Kreuzes, [11] 5
Abbildung 2.2 Notfallkrankenwagen der Malteser Hilfsorganisation, [13] 5
Abbildung 2.3 E-Rettungswagen des Deutschen Roten Kreuzes, [15] 6
Abbildung 2.4 Bordnetzstruktur mit eingebundenem Zusatzspeicher, [20] 7
Abbildung 2.5 Einteilung der Gesamtleistung der Ausstattung nach Notwendigkeit 15
Abbildung 2.6 Speichernutzung der Technologien im Überblick, [29] 18
Abbildung 2.7 Aufbau eines Blei-Säure-Akkumulators, [34] 22
Abbildung 2.8 Lithium-Ionen-Batterie Z.E 50 eines Renault ZOE, [37] 23
Abbildung 2.9 Aufbau und Funktionsweise einer Redox-Flow-Batterie, [39] 24
Abbildung 2.10 Aufbau und Funktionsweise einer Brennstoffzelle, [43] 26
Abbildung 3.1 Struktur der Berechnungen in Simulink 31
Abbildung 4.1 Programmablaufplan des Auslegungsmodells 33
Abbildung 4.1 Leistungsverlauf RTW Fahrtvariante 1 42
Abbildung 4.2 Energiebedarf RTW Fahrtvariante 1 43
Abbildung 4.3 Leistungsverlauf RTW Fahrtvariante 2 44
Abbildung 4.4 Energiebedarf RTW Fahrtvariante 2 45
Abbildung 4.6 Energiebedarf KTW 48

V Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Kategorisierung von Krankenkraftwagen	4
Tabelle 2.2	wesentliche elektrische Ausrüstung laut DIN EN 1789	10
Tabelle 2.3	zusätzliche elektrische Ausrüstung	10
Tabelle 2.4	Beleuchtung des Patientenraumes	12
Tabelle 2.5	Ausstattung und medizinische Geräte - Leistungsangaben	14
Tabelle 2.6	Energiespeichertechnologien im Überblick	17
Tabelle 2.7	Eigenschaften und Anwendung der Energiespeichertechnologien	19
Tabelle 2.8	Vergleich von Batterien und Brennstoffzelle im Kraftfahrzeug	27
Tabelle 3.1	Legende für die einzelnen Simulationsvarianten	35
Tabelle 4.1	Übersicht der wichtigsten Simulationsergebnisse	49
Tabelle 5.1	Übersicht der Rechenergebnisse	54
Tabelle A.1	Hilfmittel zum Patiententransport	64
Tabelle A.2	Ausrüstung zur Unterstützung der Atmung	64
Tabelle A.3	Ausrüstung zur Diagnostik	65
Tabelle A.4	Ausrüstung zur Infusion	65
Tabelle A.5	Ausrüstung zur Behandlung lebensbedrohlicher Situtationen	65
Tabelle A.6	Kommunikationsausstattung	66

VI Symbolverzeichnis

P	Leistung
E	Energie
m	Anstieg
x	Gerätezustand
t	Zeitschrittdauer
s	kumulierte Summe
y	Wert von $E_{ges}(t)$
M	Speichermasse

Griechische Symbole

ρ	Energiedichte

Indizes

Z	Zustand
i	alle möglichen Teilnehmer eines Systems
t	Zeitschritt
max	Maximum
Flag	Flag
Gerät	Gerät
Subsystem	Subsystem
ges	Gesamt

VII Abkürzungsverzeichnis

SGV	Sammlung der Gesetz- und Verordnungsblätter
NRW	Nordrhein-Westfalen
DC	Gleichstrom (direct current)
AC	Wechselstrom (alternating current)
HV	Hochspannung (high voltage)
KTW	Krankentransportwagen
RTW	Rettungswagen
NKTW	Notfallkrankenwagen
BRK	Bayerisches Rotes Kreuz
SMES	Supraleitender Magnetischer Energiespeicher
NMC	Nickel, Mangan, Cobalt
SI	Internationales Einheitensystem (système international d'unités)
SOC	Ladezustand (state of charge)
CD-ROM	Compact Disk – Read Only Memory
URL	Universal Resource Locator

1 Einleitung

Mit der Energiewende wurde die Nutzung und der Ausbau regenerativer Energiequellen maßgeblich vorangetrieben. Es wurden Ziele gesetzt, nach denen seit 2008 bis 2020 die Nutzung herkömmlicher Energiequellen um 20 Prozent gesenkt werden sollte. Bis 2050 wird eine Reduzierung auf die Hälfte im Vergleich zu 2008 angestrebt [2]. Dadurch erfolgt zunehmend der Ausstieg aus der konventionellen Energiegewinnung sowie die Förderung regenerativer Energieträger. Im Sinne des Klimaschutzes wird der Umstieg von Verbrennermotoren auf elektrische Motoren zur Reduktion der CO_2 - Emissionen in der Autoindustrie angestrebt. Hierzu zählen auch medizinische Einsatzfahrzeuge, unter denen Krankenkraftwagen auf einen elektischen Antrieb umgerüstet werden sollen.

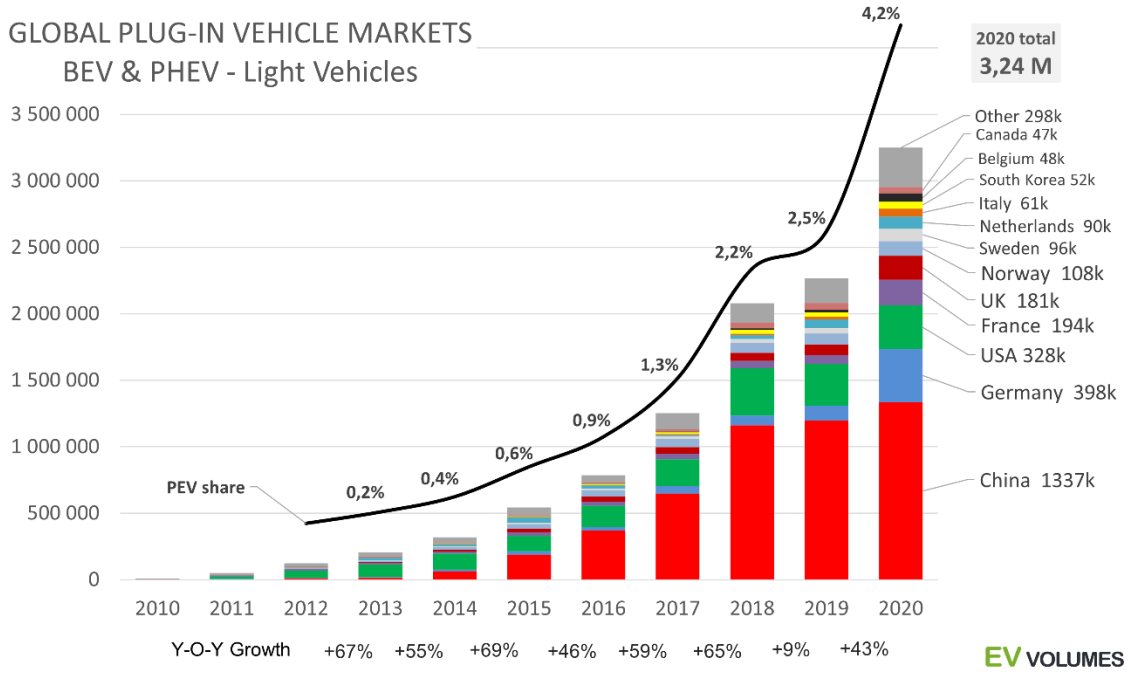

Abbildung 1.1 Weltweite Elektroauto-Neuzulassungen 2010 bis 2020, **Fehler! Textmarke nicht definiert.**[3]

Die Abbildung 1.1 zeigt den weltweiten Zuwachs an Elektroauto-Neuzulassungen von 2010 bis 2020. Dabei erfuhr Deutschland von 2019 bis 2020 innerhalb eines Jahres einen Anstieg von über 200 Prozent auf knapp unter 400.000 Elektrofahrzeuge und liegt damit im weltweiten Ranking direkt hinter China [3]. Und der Trend des Kurvenverlaufes tendiert weiterhin zu einem Anstieg der E-Mobilität. Das Ziel dabei liegt in einer

klimaneutralen und umweltfreundlichen Infrastruktur. Allerdings gilt es ebenso die entsprechenden Speicherlösungen zu finden. Mit diesem Thema befasst sich diese wissenschaftliche Arbeit, in der ein Modell für den Zusatzspeicher zur Versorgung der zusätzlichen Ausstattung von medizinischen Einsatzfahrzeugen ausgelegt wird.

1.1 Motivation und Ziel

Die Motivation der wissenschaftlichen Arbeit liegt darin, die konventionelle Versorgung der zusätzlichen Ausstattung von medizinischen Einsatzfahrzeugen durch einen separaten, von der Traktionsbatterie unabhängigen Zusatzspeicher zu ersetzen.
Als Ziel wird dabei die Entwicklung eines Modells gesetzt, nach dem die Auslegung des Zusatzspeichers erfolgt. Als Orientierung wird der gesamte Leistungs- und Energiebedarf für die einzelnen Simulationszenarien ermittelt, welche die Ansprüche an die Belastung und das Kapazitätsvermögen des Zusatzspeichers darstellen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Zuerst werden in Kapitel 2 die Theoretischen Grundlagen dargelegt. Hierbei werden die verschiedenen Fahrzeutypen näher erläutert, das Bordnetz vorgestellt sowie die medizinische Ausstattung der Einsatzfahrzeuge tabellarisch benannt. Abschließend werden in Kapitel 2 die Energiespeichertechnologien vorgestellt und auf die gängigen Energiespeicher in Kraftfahrzeugen näher eingegangen. In Kapitel 3 erfolgt die Modellvorstellung für die Speicherauslegung. Dazu wird zuerst die Simulationsumgebung vorgestellt, anschließend der Modellaufbau erklärt und das Einpflegen der Simulationsparameter näher beschrieben. Danach wird auf die Randbedingungen und die Durchführung eingegangen, an die sich die Darstellung der verschiedenen Simualtionsszenarien anschließt. Mit Kapitel 4 werden die Ergebnisse der einzelnen Simualtionsvarianten veranschaulicht und grafisch analysiert. Das Kapitel 5 beinhaltet die Diskussion der Ergebnisse mit dem Fokus auf der Auslegung des Zusatzspeichers nach den verschiedenen Simulationsszenarien. Als Abschluss wird in Kapitel 6 die wissenschaftliche Arbeit zusammengefasst und ein kurzer Ausblick gegeben.

2 Theoretische Grundlagen

Die Theoretischen Grundlagen stellen die Basis einer wissenschaftlichen Arbeit dar. Mithilfe dieser können bei der späteren Auswertung Rückschlüsse gezogen werden und Ergebnisse sowie Empfehlungen auf deren Grundlage getroffen werden.

2.1 Klassifizierung von Sonderfahrzeugen

Ein Sonderfahrzeug stellt entsprechend der Gesamtresolution der Vereinten Nationen über Fahrzeugtechnik im Straßenverkehr ein „Straßenfahrzeug für besondere Zwecke außer zur Beförderung von Personen oder Gütern“ dar [4]. Zu der Kategorie der Sonderfahrzeuge zählen beispielsweise Feuerwehrwagen, Kranwagen, selbstfahrende Straßenwalzen oder Abschleppwagen [4]. Für Sonderfahrzeuge sind entsprechende Sonderkennzeichnungen – und ausstattungen vorgesehen. Dies äußert sich beispielsweise in zusätzlichen Beleuchtungsanlagen, einheitlichen Fahrzeugkennfarben für die Zuordnung in den jeweiligen Bereich der Zuständigkeit des Fahrzeuges, rot-weiß reflektierenden Warnmarkierungen zur Erhöhung der Sicherheit bei schlechten Witterungsverhältnissen oder Signalhörnern zum Einsatz an Gefahrenstellen innerhalb und außerhalb des Stadtverkehrs [5].
Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Begriff Sonderfahrzeug auch bei Krankenwagen angewendet. Allerdings zählen diese laut der Gesamtresolution der Vereinten Nationen über Fahrzeugtechnik im Straßenverkehr zu den Personenkraftwagen. Unter Personenkraftwagen fallen „Kraftfahrzeuge, außer Kleinkrafträdern und Motorrädern, die für die Personenbeförderung vorgesehen sind und bis zu neun Personen (einschließlich Fahrer) Sitzplätze bieten.“ [4]. Hierzu gehören neben Krankenwagen auch Taxis, Mietwagen oder Wohnmobile [4].
Obwohl Krankenwagen, wie auch Polizei- und Feuerwehrautos, nicht zu den Sonderfahrzeugen zählen, werden diese im Bereich des Sonderfahrzeugbaus um- bzw. ausgerüstet. Die vom Werk aus standardisierten Fahrzeuge werden entsprechend ihres Einsatzzweckes mit dem benötigten Equipment ausgestattet und an die Einsatzumgebung angepasst. Dazu wird das Einsatzfahrzeug mit zusätzlicher Außenbeleuchtung bestückt, die Karosserie mit splitterfreiem Aluminium verstärkt, es werden zusätzliche Außenaufkleber für die Erkennung angebracht und der Innenraum wird mit der nötigen elektrischen und mobiliaren Ausstattung versorgt [6]. Diese Umbauten sind mitunter durch ein weltweit anerkanntes Qualtitätsmanagementsystem nach DIN EN ISO 9100:2015 zertifiziert [7].

2.2 Kategorisierung von Krankenkraftwagen

Krankenkraftwagen gehören zu den bodengebundenen Rettungsmitteln und bezeichnen laut Sammlung der Gesetz- und Verordnungsblätter 2, Nordrhein-Westfalen, Bestand 215 §3 (Fn 6) Fahrzeuge, die für die Notfallrettung oder den Krankentransport besonders eingerichtet und nach dem Fahrzeugschein als Krankenkraftwagen anerkannt sind [8].
In der folgenden Tabelle 2.1 wird die Kategorisierung von Krankenkraftwagen übersichtlich dargestellt.

Tabelle 2.1 Kategorisierung von Krankenkraftwagen

Bezeichnung	Abkürzung	Kurzbeschreibung
Krankentransportwagen	KTW	Transport von Nicht-Notfallpatienten
Notfallkrankenwagen	NKTW	Qualifizierter Krankentransport mit Notfallausstattung
Rettungswagen	RTW	Transport/Rettung/Überwachung von Notfallpatienten
Notarztwagen	NAF	Rettungswagen mit Notarzt in Begleitung
Norarzt-Einsatzfahrzeug	NAEF	Transport des Notarztes (ausschließlich)
Intensivtransportwagen	ITW	Transport zur Verlegung von Intensivpatienten
Behindertentransportwagen	BTW	Transport von Patienten mit Behinderungen
Baby-Notarztwagen	BNAW	Transport/Rettung von Neu- und Frühgeborenen

Vgl. [9]

Entsprechend der DIN EN 1789 [1] werden Krankenkraftwagen in vier grundlegende Typen eingeteilt [10].
Ein Typ A_1 (s. Abb. 2.1) bezeichnet einen Krankentransportwagen, welcher für den Transport eines einzelnen Patienten vorgesehen ist. Es handelt sich hierbei um Transporte mit nicht-notfallmedizinischer Erstversorgung [10]. Da der Typ A_1 nur geringfügig ausgestattet und nur für den Transport einer Person vorgesehen ist, kommt dieser Typ relativ selten zum Einsatz.
Der Typ A_2 (s. Abb. 2.1) unterscheidet sich von dem Typ A_1 darin, dass auch mehrere Patienten auf Krankentragen oder -sesseln transportiert werden können [11]. Aufgrund von logistischen Umständen wird dieser Typ der Krankentransportwagen häufiger genutzt. Übliche Einsatzanlässe sind beispielsweise Einweisungs-, Heim- oder Ambulanzfahrten [11].

Abbildung 2.1 Krankentransportwagen des Bayerischen Roten Kreuzes, [11]

Als Typ B (s. Abb. 2.2) wird der Notfallkrankenwagen bezeichnet, welcher den überwachten Transport von zwei liegenden oder einem liegenden und einem sitzenden Patienten umfasst. Zu den Aufgaben zählen die medizinische Erstversorgung von Verletzten und akut Erkrankten sowie der weiträumige medizinische Patiententransport im Katastrophenschutzfall [12]. Die Ausstattung eines Notfallkrankenwagens gestaltet sich umfangreicher als die des Krankentransportwagens.

Abbildung 2.2 Notfallkrankenwagen der Malteser Hilfsorganisation, [13]

Schließlich wird der Rettungswagen dem Typ C zugeordnet. Rettungswagen kommen schwerpunktmäßig bei Notfall- und Notarzteinsätzen, aber auch im Rahmen von zeitkritischen Krankentransporten zum Einsatz [14]. Während des Transportes wird der Patient erweitert versorgt, behandelt und überwacht. Wenn sich an Bord eines Rettungswagens zusätzlich ein Notarzt befindet, wird dieser automatisch zu einem Notarztwagen. Als Sonderausführungen werden sowohl „Schwerlast-Rettungswagen“ (S-RTW) für den Transport besonders schwerer Patienten, als auch „Intensiv-Rettungswagen“ (I-RTW) für den Transport von Intensivpatienten eingesetzt [14]. Von allen Typen der Krankenkraftwagen besitzt der Rettungswagen die umfangreichste Ausstattung.

Abbildung 2.3 E-Rettungswagen des Deutschen Roten Kreuzes, [15]

Auf der Abbildung 2.3 wird einer der ersten elektrisch angetriebenen Rettungwagen gezeigt. Dieser wurde im Juni 2020 auf Borkum getestet und erzielte eine Reichweite von bis zu 150 Kilometern [15].
Als Grundlage für die Entwicklung des E-RTW’s dient der elektrifizierte Crafter, welcher seit September 2018 auf dem Markt erwerblich ist. Dieser kann Reichweiten bis über 170 Kilometern erzielen und unter Idealbedingungen bereits nach 45 Minuten auf 80 % geladen werden [[16]; [17]]. In Form eines Pilotprojektes des Deutschen Roten Kreuzes sollten Erfahrungen im Bereich Konstruktion und Einsatz eines E-RTW’s im Rettungsdienst gesammelt werden. Für die elektrische Energieversorgung wurden mehrere Batteriepakete im Heck des Crafters eingebaut, wobei die zulässige Gesamtmasse von 3,5 Tonnen nicht überschritten werden durfte. Zur Absicherung wurde ein konventioneller Einsatzwagen als Ersatzfahrzeug bereitgestellt [15]. Vergleichbare Projekte gab es bei den Feuerwehren Hannover [18] und Ochtrup [19].

2.3 Bordnetzstruktur und CAN-Bus

Das Bordnetz bildet die energetische Verbindung von Energiequellen, Steuersystemen und Verbrauchern, die der Versorgung des Antriebes und sämtlicher weiterer Fahrzeugkomponenten dienen. Die Abbildung 2.4 zeigt die Bordnetzstruktur eines konventionellen Elektrofahrzeuges, in das ein Zusatzsystem enstprechend der Ausstattung von medizinischen Einsatzfahrzeugen eingebunden wurde.

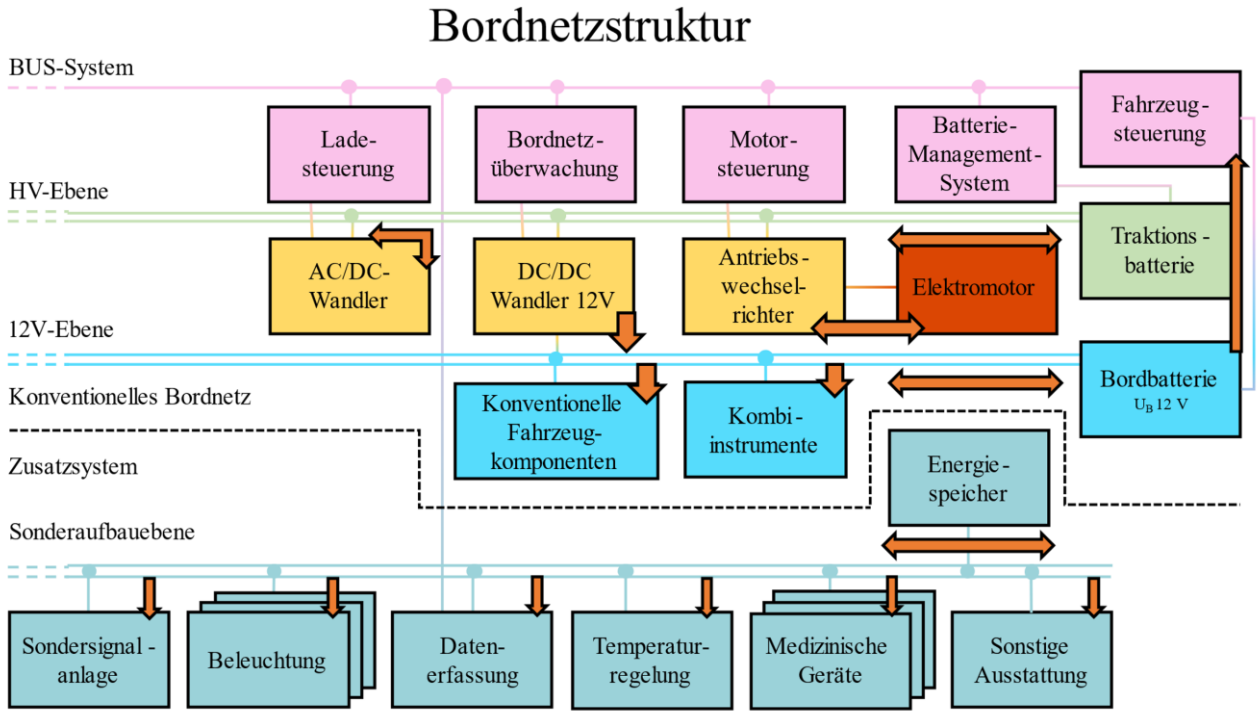

Abbildung 2.4 Bordnetzstruktur mit eingebundenem Zusatzspeicher, [20]

Das konventionelle Bordnetz wird in ein BUS-System und zwei Spannungsebenen, einer 12V- und einer Hochspannungsebene, eingeteilt. Die Traktionsbatterie versorgt neben dem Antriebswechselrichter des Elektromotors die DC/DC- und AC/DC-Wandler. Dabei werden die Komponenten der Hochspannungsebene von den zugehörigen Komponenten des BUS-Systems gesteuert und überwacht. Eine Einspeisung der 12V-Ebene erfolgt über die Bordbatterie, welche neben den Kombiinstrumenten und den übrigen konventionellen Fahrzeugkomponenten, wie das Radio oder die Beleuchtungsanlage, auch die Fahrzeugsteuerung versorgt. Die Energieflussrichtung wird in der Abbildung 2.4 jeweils durch orangene Pfeile gekennzeichnet. Neben dem konventionellen Bordnetz existiert das Zusatzsystem, welches durch den zusätzlichen Energiespeicher gespeist wird. Dieses ist eindeutig von dem konventionellen Bordnetz getrennt. Es besteht lediglich eine Kommunikationsverbindung zwischen BUS-System und Zusatzsystem, aber keine

weiteren energetischen Verbindungen. Somit werden die Komponenten des Zusatzsystemes autark durch den Zusatzspeicher versorgt. Hierzu zählt die gesamte zusätzliche Ausstattung von medizinischen Einsatzfahrzeugen, auf die in dem darauffolgenden Kapitel näher eingegangen wird. Anhand der dargestellten Blockschaltbilder der Komponenten des Zusatzsystems werden Gerätegruppen hervorgehoben, die eine deutlich höhere Anzahl an Geräten[1] aufweisen.

Die klassische Versorgungsspannung eines Bordnetzes beträgt 12V. Durch die Entwicklung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen werden die Ansprüche an die Versorgung der Bordnetzkomponenten immer höher. Somit sollen 48V-Bordnetze die 12V-Bordnetze als kombinierte Bordnetze ergänzen. Über die 48V-Versorgungsspannung können leistungsstarke Komponenten besser versorgt werden. Der Querschnitt der Leitungen wird kleiner und somit reduziert sich das Gewicht der Leitungen [21].

Für eine einfache, schnelle und einwandfrei funktionierende Bedienung sämtlicher Schaltelemente im Fahrerhaus des Einsatzwagens werden häufig Module und Tastaturen der CAN-Bus Technologie verwendet, um die komplexen Ansprüche der Bordnetzkomponenten eines Krankenkraftwagens erfüllen zu können [22]. Der CAN-Bus steht für Contoller Area Network-Bus und zählt zu den Feldbussen. Er wurde erstmalig 1991 in einem Kraftfahrzeug serienmäßig verwendet. Seitdem hat er sich nicht nur im Kfz-Bereich standardmäßig etabliert, sondern ist auch in der Automatisierungstechnik vorzufinden [23].

Im Sinne der Anwendung wird der CAN-Bus grob in die Bereiche Komfort und Antriebsstrang eingeteilt. Da hier unterschiedliche Anforderungen für die Übertragungsgeschwindigkeit von Daten oder auch die störfreie Übertragung gestellt werden, wurden unterschiedliche CAN-Bus Varianten festgelegt, um ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis schaffen zu können. Die Varianten lauten Highspeed- und Lowspeed-CAN-Bus [23].

[1] Bei der Bezeichnung „Geräte“ o.ä. werden im folgenden ausschließlich sämtliche Anlagen bezeichnet, die zusätzlich zur Grundausstattung des Transporters eingebaut wurden. Es wird dabei niemals die Gesamtheit aller elektronischen Komponenten eines medizinischen Einsatzfahrzeuges betrachtet.

2.4 Ausrüstung und medizinische Geräte

Neben der Einteilung von Krankenkraftwagen in die verschiedenen Typen wird in der DIN EN 1789 [1] ebenfalls deren elektrische Ausstattung festgelegt.
Demnach muss ein Krankentransportwagen über eine professionelle Grundausrüstung verfügen, welche der Ersten Hilfe und den Pflegemaßnahmen für den Patienten dienen. Die Ausrüstung eines Notfallkrankenwagens muss die Erstversorgung und Überwachung des Patienten nach dem derzeitigen Stand des Rettungsdientes abdecken können. Ein Rettungswagen muss zusätzlich für die erweiterte Behandlung und Überwachung des Patienten nach dem derzeitigen Stand der präklinischen Notfallmedizin ausgestattet sein [1].
Entsprechend der Norm wird eine zusätzliche Kühlung bzw. Heizung des Patientenraumes vorrausgesetzt. Ebenfalls muss für eine entsprechende Entlüftung über einen Deckenlüfter gesorgt werden. Während des Transportes oder der Fahrt sind jegliche beweglichen Teil oder Geräte manuell oder elektronisch zu befestigen, um mögliche Gefahrenquellen zu unterbinden. Des Weiteren muss die Innenbeleuchtung des Patientenraumes den Normen der DIN EN 1789 entsprechen [1].
Die Tabellen A.1 bis A.6 im Anhang A stellen eine detaillierte Auflistung für die Ausstattung der verschiedenen Typen von Krankenkraftwagen dar. Grundsätzlich ist für die meisten Ausrüstungsgegenstände eine feste Menge vorgesehen. Eine Position wird mit „X“ markiert, wenn hier aufgrund der regionalen Erfordernisse mengenmäßig abgewichen werden kann [1].
Unter den Tabellen der DIN EN 1789 [1] wurden lediglich jene betrachtet, welche für die Bearbeitung des Themas relevant sind und die modellbezogenen Geräte vollständig oder teilweise enthalten. Die Tabellen wurden ebenfalls inhaltlich auf die wesentlichen Aussagen reduziert. Somit wurden beispielsweise die Immobilisierungs- oder Medikamentenausrüstung tabellarisch nicht erwähnt, obwohl diese laut DIN EN 1789 [1] Bestandteil der Grundausstattung von Krankenkraftwagen sind. Die Tabellen zeigen ausschließlich die vorgegebene Mindestausstattung der unterschiedlichen Krankenkraftwagen. Die Fahrzeugtypen können individuell um die benötigte Ausrüstung erweitert ausgestattet werden.
Für die bessere Übersicht wurden in der Tabelle 2.2 die wesentlichen, für die Auslegung des Zusatzspeichers erforderlichen Geräte der Tabellen A.1 bis A.6 zusammenfassend aufgeführt, welche laut DIN EN 1789 [1] zur Grundausstattung gehören.

Tabelle 2.2 wesentliche elektrische Ausrüstung laut DIN EN 1789

Nr.	Gerät	Norm	Krankenkraftwagentyp			
			A_1	**A_2**	**B**	**C**
1	Funk	-	1	1	1	1
2	Handsprechfunk	-	-	-	1	1
3	Ladehalterung	-	1	1	1	1
4	Defibrillator	EN 60601-2-4:2011	1	1	1	1
5	Beatmungsgerät	EN 794-3:1998+A2:2009	-	-	-	1
6	Spritzenpumpe	-	-	-	-	1
7	Absaugpumpe	EN ISO 10079-2:2014	-	-	1	1
8	Vakuumkompressor	-	-	-	X	X
9	Kältefach	-	-	-	X	X

Vgl. [[1]], DIN EN 1789

In der Tabelle 2.3, werden alle zusätzlichen elektrischen Geräte aufgelistet, welche laut DIN EN 1789 [1] tabellarisch nicht erwähnt werden, jedoch der Grundausstattung zugehörig sowie für die Betrachtung des Modells relevant sind und in die spätere Auslegung des Zusatzspeichers mit einbezogen werden.

Tabelle 2.3 zusätzliche elektrische Ausrüstung

Nr.	Gerät	Norm	Krankenkraftwagentyp			
			A_1	**A_2**	**B**	**C**
1	Blaulicht	-	1	1	1	1
2	Tonanlage	-	1	1	1	1
3	Frontblitzer	-	-	-	1	1
4	Heckblitzer	-	-	-	1	1
5	Powerblitz	-	-	-	1	1
6	Deckenlüfter	-	1	1	1	1
7	Zusätzlicher Wärmetauscher	-	-	-	-	1
8	Heizung	-	1	1	1	1
9	Klimaanlage	-	1	1	1	1
10	Standheizung	-	1	1	1	1
11	Wechselrichter	-	1	1	1	1
12	Elektrische Trittstufe	-	1	1	1	1
13	Dashcam	-	1	1	1	1
14	Rückfahrkamera mit Rüchfahrwarnung	-	1	1	1	1
15	Car_PC	-	1	1	1	1
16	Ambutronic	-	1	1	1	1
17	Patientendatenerfassung	-	1	1	1	1
18	Innenbeleuchtung	-	1	1	1	1
19	Arbeitsscheinwerfer	-	-	-	1	1
20	Handlampe	-	1	1	1	1

Nr.	Gerät	Norm	Krankenkraftwagentyp			
			A_1	A_2	B	C
21	Leseleuchte	-	1	1	1	1
22	Suchscheinwerfer	-	-	-	1	1
23	Arbeitsleuchte	-	-	-	-	1
24	Staufachbeleuchtung	-	1	1	1	1
25	Schiebetürbeleuchtung	-	1	1	1	1
26	Inkubatorsteckdose	-	-	-	1	1
27	Vakuumpumpe	-	-	-	1	1
28	Wärmefach	-	-	-	X	X
29	Elekrische Bodenhalterung	-	1	1	1	1
30	Lift	-	1	1	1	1
31	Elektrischer Schwebetisch	-	-	-	1	1

Vgl. [[1]; [24] [25]], DIN EN 1789, Ambulanz Mobile GmbH

Die zusätzlichen Geräte in der Tabelle 2.3 gehen aus dem Kapitel 4 „Anforderungen“ der DIN EN 1789 [1] sowie den bereitgestellten Daten der Ambulanz Mobile GmbH [[24][25]] hervor.

Darin wird festgelegt, dass ein Krankenkraftwagen über ein optisches und akustisches Warnsystem verfügen muss, da diese in Notfalleinsätzen dem Schutz von Personen und Fahrzeugen im Straßenverkehr dienen und ein Vorankommen durch den Verkehr begünstigen. Es wird empfohlen, das optische Warnsystem bei den Krankenkraftwagentypen B und C um zusätzliche Warnleuchten vorne, an den Seiten des Fahrzeuges (vordere und hintere Ecken) und hinten für eine bessere Sichtbarkeit und zur Erhöhung der Verkehrssicherheit bei starkem Verkehr zu erweitern. Das akustische Warnsystem muss das optische Warnsystem aktivieren und darf unter keinen Umständen ohne das optische Warnsystem in Betrieb sein [1].

Ein Krankenkraftwagen muss ebenfalls ein optisches, als Sensor oder Kamera, und ein akustisches Rückfahrsystem besitzen. Dieses System muss von der Fahrerposition sowohl aktivierbar als auch deaktivierbar sein [1].

Der Patientenraum eines Krankenkraftwagen des Typs B und C muss zusätzlich eine Außenbeleuchtung mit mindestens 5 lx bereitstellen, welche den Umgebungsbereich des Patientenraums ausleuchtet. Als Orientierung zur Messung der Beleuchtung gilt das Bodenniveau [1].

Des Weiteren wird ein Lüftungssystem vorausgesetzt, welches beispielsweise in Form eines Deckenlüfters mindestens den 20fachen Luftaustausch je Stunde bei einem stehenden Krankenkraftwagen erreicht. Etwaige Stauräume, welche sich unter Druck befindliche Gase enthalten, müssen aus Sicherheitsgründen ebenso belüftet sein [1].

Für die Regulierung der Temperatur im Patientenraum ist ein Heiz- und Kühlsystem vorgesehen. Das Heizsystem im Patientenraum wird zusätzlich zur standardmäßigen Heizung im Fahrerraum für alle Krankenkraftwagentypen eingbaut, wobei der Typ C um

einen Wärmetauscher aufgestockt wird. Bei einer Außen- und Innentemperatur von 5 °C muss innerhalb von höchstens 15 min eine Raumtemperatur von 22 °C erreicht worden sein, auch ohne ein unterstützendes Lüftungssystem, mit einer Toleranz von +/- 5 °C. Die Überwachung erfolgt dabei über einstellbare Thermostate oder ein elektronisches Kontrollsystem [1].
Das Kühlsystem muss bei einer Innentemperatur von 32 °C ein Herabsenken der Temperatur im Patientenraum auf 27 °C innerhalb von 15 min und auf 25 °C innerhalb von 30 min gewährleisten. Beide Systeme müssen unabhängig vom System des Fahrerraumes steuerbar sein [1].
Die Vorgaben zur Auslegung der Innenbeleuchtung werden in der Tabelle 2.4 aufgezeigt. Dabei soll die Farbtemperatur des Lichts die des „Tageslichtes“ oder des „natürlichen Farbabgleiches“ annehmen, um veränderte Farbwiedergaben von Haut und Organen zu vermeiden. Üblicherweise wird die Farbtemperatur im Bereich von 3.800 K bis 4.300 K gewählt, wobei in den Krankenkraftwagen des Typs C eine zusätzliche Beleuchtung von mindestens 1.650 lx installiert sein muss [1].

Tabelle 2.4 Beleuchtung des Patientenraumes

		Krankenkraftwagentyp			
		A_1	**A_2**	**B**	**C**
Patienten (Aufgaben)-Bereich	mindestens	200 lx	200 lx	500 lx[a]	500 lx[a,c]
Unmittelbarer Umgebungsbereich	mindestens	50 lx	50 lx	300 lx[a]	300 lx[a]
Farbtemperatur		≥ 3 500 K ≤ 5 000 K[b]	≥ 3 500 K ≤ 5 000 K[b]	≥ 3 500 K ≤ 5 000 K[b]	≥ 3 500 K ≤ 5 000 K[b]
Ra (Farbdarstellung)	mindestens	80	80	90	90

[a] Zusätzlich muss eine Vorrichtung zur Verringerung der Beleuchtungsstärke auf 150 lx vorhanden sein.

[b] Empfohlen werden Farbtemperaturen zwischen 3 800 K und 4 300 K als optimaler Bereich.

[c] Mit zusätzlichen 1 650 lx für den Behandlungsbereich.

Vgl. [1], Tabelle 8

Bei Einwirkung einer Beschleunigung oder Verzögerung von 10 *g* durch beispielsweise einen Unfall in jegliche horizontale Himmelsrichtung muss gewährleistet sein, dass kein Objekt oder Gerät seinen Standort verlassen kann, indem es entsprechend manuell oder elektronisch fixiert wird. Selbiges gilt für Personen im Patientenraum, um diese vor einer Verletzungsgefahr zu schützen. Nach derartigen Einwirkungen dürfen weder scharfe Kanten vorhanden sein, noch darf die Krankentrage und alle an ihr befestigten Gegenstände eine Verlagerung von mehr als 150 mm vollzogen haben [1].
Die in den Tabellen 2.2 und 2.3 aufgeführten Geräte bilden die Grundlage für die Modellauslegung zur Ermittlung des Leistungs- und Kapazitätsbedarfs eines Zusatzspeichers, dessen Aufgabe die energetische Versorgung der gesamten zusätzlichen elektrischen und medizinischen Ausrüstung eines Krankenkraftwagens sein soll.
Anhand der Tabellen wird deutlich, dass die Ausstattung der Krankenkraftwagentypen A_1 und A_2 die minimale Ausstattung an Ausrüstung und medizinischen Geräten besitzen. Der Typ B hingegen besitzt eine erweiterte Ausstattung für die Erstversorgung des Patienten und der Typ C eine Vollausstattung für die präklinische Behandlung.

2.5 Histografische Einteilung der Ausstattung

Die elektrische Leistung gibt per Definition „an, wie viel elektrische Arbeit der elektrische Strom in jeder Sekunde verrichtet bzw. wie viel elektrische Energie in andere Energieformen umgewandelt wird“ [26].
Demnach nimmt jedes stromgeführte Gerät, welches elektrische Arbeit verrichtet, eine elektrische Leistung auf. Dies gilt somit für jedes Teil der Ausstattung oder medizinische Gerät eines Krankenkraftwagens, welches sich in Betrieb befindet. In der Tabelle 2.5 sind die einzelnen Geräte mit ihren zugehörigen Leistungswerten aufgeschlüsselt, welche in den Tabellen A.1 bis A.6 im Anhang A, einschließlich Tabelle 2.3 in vorherigen Kapitel vorzufinden sind. Da die einzelnen Geräte jeweils einen unterschiedlichen Strombedarf besitzen, nehmen sie auch entsprechend unterschiedliche Leistungen auf, wie in der Tabelle 2.5 dargestellt.

Tabelle 2.5 Ausstattung und medizinische Geräte - Leistungsangaben

Nr.	Gerät	Leistung
1	Blaulicht	24 W
2	Tonanlage	42 W
3	Frontblitz	5 W
4	Powerblitz	18 W
5	Heckblitzer	13 W
6	Deckenlüfter	15 W
7	Standheizung	40 W
8	Wärmetauscher	165 W
9	Klimaanlage	1 440 W
10	Heizung	3 000 W
11	Wechselrichter	700 W
12	Trittstufe	132 W
13	Dashcam	6 W
14	Rückfahrkamera	15 W
15	Rückfahrwarnung	2 W
16	Car_PC	48 W
17	Patientendatenerfassung	60 W
18	Funk	6 W
19	Handsprechfunk	28 W
20	Ambutronic	24 W
21	Ladehalterung	3 W
22	Beleuchtung	17 W
23	Arbeitsscheinwerfer	71 W
24	Handlampe	12 W
25	Leseleuchte	3 W
26	Suchscheinwerfer	70 W

Nr.	Gerät	Leistung
27	Arbeitsleuchte	36 W
28	Staufachbeleuchtung	9 W
29	Schiebetür	8 W
30	Inkubatorsteckdose	120 W
31	Vakuumpumpe	42 W
32	Defibrillator	108 W
33	Beatmungsgerät	24 W
34	Spritzenpumpe	24 W
35	Absaugpumpe	45 W
36	Vakuumkompressor	9 W
37	Wärmefach	30 W
38	Kältefach	36 W
39	Bodenhalterung	24 W
40	Schwebetisch	600 W
41	Lift	40 W

Vgl. [[24] [25]], Ambulanz Mobile GmbH

Unter den Geräten gibt es jene, die einen geringen Leistungsbedarf besitzen, wie beispielsweise Leseleuchte oder Suchscheinwerfer mit Leistungen von 2 bis 71 W. Einen mäßigen Leistungsbezug weisen Geräte wie der Defibrillator oder der Wärmetauscher ab 108 bis 165 W auf. Die höchsten Leistungaufnahmen werden von Geräten wie dem Schwebetisch oder der Heizung im Patientenraum ab 600 bis 3.000 W erzielt. In der Abbildung 2.5 erfolgt eine Übersicht mit der Einteilung der Gesamtleistung nach Leistungswerten aus der Tabelle 2.5.

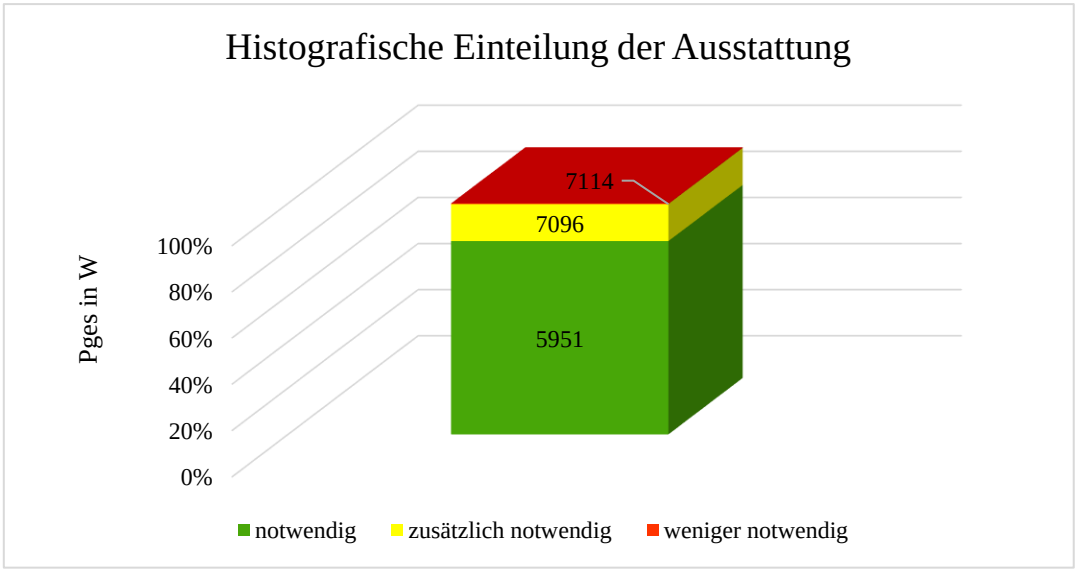

Abbildung 2.5 Einteilung der Gesamtleistung der Ausstattung nach Notwendigkeit

Die Einteilung des Kurvenverlaufs richtet sich nach der Ausstattung eines Krankenkraftwagens des Typs C, da dieser die umfangreichste Ausstattung besitzt und somit eine maximale Auslastung visualisiert werden kann. Es wird das Worst-Case-Szenario betrachtet, d.h., dass sich alle Geräte gleichzeitig in Betrieb befinden. Anhand dessen kann davon ausgegangen werden, dass die momentane Leistungsaufnahme aller zusätzlichen Geräte die Gesamtleistung von 7.114 W nicht überschreiten wird. Da die großen Verbraucher Heizung und Klimaanlage vom Sinn her nie gleichzeitig betrieben werden, sind voraussichtlich niedrigere, maximale Momentanleistungsaufnahmen zu erwarten. Die Abbildung 2.5 zeigt somit die resultierende Gesamtleistung der Ausstattung, gemessen an der Notwendigkeit der einzelnen Geräte für den Notfalleinsatz. Unter dem Aspekt *notwendig* wurden sämtliche Geräte eingestuft, die laut DIN EN 1789 [1] zur Grundausstattung für einen Einsatzwagen des Typ C zählen. Als *zusätzlich notwendig* gelten jene Geräte, die laut DIN EN 1789 [1] nicht zur Grundausstattung für einen Einsatzwagen des Typ C zählen, allerdings in den Ausrüstungstabelle der Ambulanz Mobile GmbH [[24] [25]] aufgezählt und für die Notfallrettung ebenso wichtig sind. Die übrigen Geräte wurden als für den Notfalleinsatz *weniger notwendig* kategorisiert, da sie nicht unmittelbar zu den lebenserhaltenden Maßnahmen beitragen.
Für die bessere Übersicht wurden die einzelnen Aspekte farblich markiert. Somit erhielt *notwendig* eine grüne Farbmarkierung, *zusätzlich notwendig* wurde mit gelb und *weniger notwendig* mit rot gekennzeichnet. Die farbliche Kennzeichnung ist ebenfalls in der Tabelle 2.5 vorzufinden.
Demzufolge beträgt der Leistungsbedarf bei einem Worst-Case-Szenario für die Grundausstattung eine Gesamtleistung von 5.951 W, mit zusätzlicher Ausstattung eine Gesamtleistung von 7.096 W und bei der Gesamtausstattung eine Gesamtleistung von 7.114 W.

2.6 Energiespeichertechnologien im Überblick

Laut Definition ist

> *„Ein Energiespeicher … eine energietechnische Anlage zur Speicherung von Energie in Form von innerer, potentieller oder kinetischer Energie. Ein Energiespeicher umfasst die drei Prozesse Einspeichern (Laden), Speichern (Halten) und Ausspeichern (Entladen) in einem Zyklus. Diese werden physikalisch in Form von Energiewandlern (Ein- und Ausspeichern), einer Speichereinheit (Halten) und Hilfsaggregaten realisiert, weshalb die gesamte Anlage auch als Energiespeichersystem bezeichnet wird.“*
>
> (Sterner & Stadler, 2017)

Übeträgt man diese Definition beispielsweise auf einen Batteriespeicher, so bilden die Speichereinheit die Batteriezellen bzw. Batteriepacks, den Energiewandler die Leistungselektronik zum Ein- und Ausspeichern der Energie und ein Batteriemanagementsystem als Hilfsaggregat [27]. Die verschiedenen Möglichkeiten der Energiespeicherung werden nach fünf Technologien in der Tabelle 2.6 kategorisiert.

Tabelle 2.6 Energiespeichertechnologien im Überblick

Bezeichnung	**Beispiele**	**Kurzbeschreibung**
Elektrisch	Superkondensatoren	Elektrische Energie im elektrischen Feld
	SMES	Elektrische Energie im magnetischen Feld
Chemisch	Power-to-Gas-Anlagen	Umwandlung in Gas
	Power-to-Liquid-Anlagen	Umwandlung in Kraftstoff
	Power-to-Chemicals-Anlagen	Umwandlung in Chemieprodukte
Elektrochemisch	Klassische Batteriespeicher	Elektrochemische Energie in der Elektrode
	Redox-, Hybrid-Flow-Batteriespeicher	Elektrochemische Energie im Elektrolyt
Mechanisch	Pumpspeicher	Potentielle Energie des Wassers
	Druckluftspeicher	Kinetische Energie des Gasdrucks
	Schwungradspeicher	Kinetische Energie der rotierenden Masse
Thermisch	Sensible Wärmespeicher	Thermische Energie in Teilchenbewegung
	Latentspeicher	Enthalpie thermodynamischer Zustandsänderungen
	Thermochemische Speicher	Wärmespeicherung durch endotherme Reaktion

Vgl. [28] [29]

Mit Blick auf die Tabelle 2.6 wird deutlich, dass nicht nur elektrische, sondern auch mechanische, chemische oder thermische Energie in einem zugehörigen Energiespeicher gespeichert werden kann. Dabei unterscheiden sich die einzelnen Energiespeichertechnologien in mehreren Eigenschaften, so beispielsweise auch in der Ausspeicherdauer und Speicherkapazität, wie es in der Abbildung 2.6 dargestellt wird.

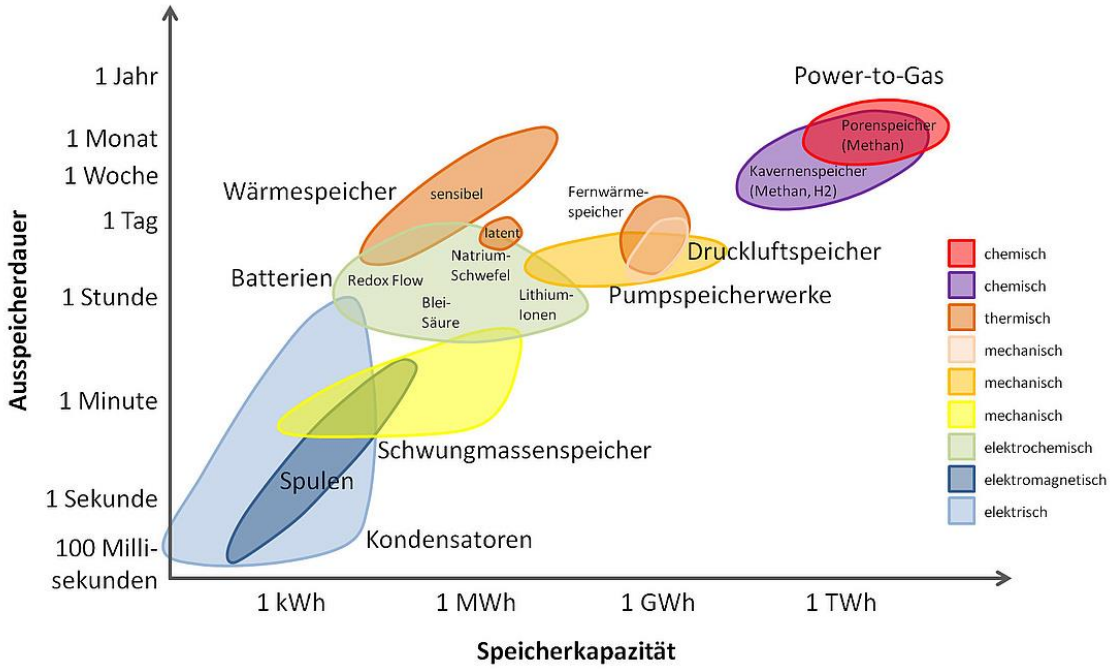

Abbildung 2.6 Speichernutzung der Technologien im Überblick, [29]

Aus der Abbildung 2.6 wird ein nahezu proportionales Verhalten ersichtlich, nach dem eine geringe Speicherkapazität mit einer geringen Ausspeicherdauer und eine hohe Speicherkapazität mit einer hohen Ausspeicherdauer hervorgehen.
Die Ausspeicherdauer gibt an, für welchen Zeitraum ein Speicher die in ihm gespeicherte Energiemenge liefern kann [29]. Ein SMES oder ein Superkondensator liefert in einem kurzem Zeitraum von wenigen Millisekunden bis mehreren Minuten eine Energiemenge bis in den höheren kWh-Bereich, wohingegen Kavernen- oder Porenspeicher Energiemengen im TWh-Bereich über Monate bis Jahre Ausspeichern können [29]. Allerdings sind Kavernen- und Porenspeicher im Gegensatz zu einem Superkondensatoren standortabhängig, da ein Kavernenspeicher bei der Salzgewinnung im Solprozess und ein Porenspeicher bei Erdöl- oder Erdgasgewinnung mit der Ausförderung der Poren zwischen den Gesteinsschichten entsteht und somit standorttechnisch unflexibel sind [30].

Aufgrund der Vielzahl an Unterschieden zwischen den einzelnen Energiespeichertechnologien erfolgt in der Tabelle 2.7 eine Gegenüberstellung der Eigenschaften und Anwendungen der jeweiligen Technologie.

Tabelle 2.7 Eigenschaften und Anwendung der Energiespeichertechnologien

Bezeichnung	**Wirkungs-grad**	**Kurz-/Mittel-/Langzeitspeicher**	**Besonderheiten/ Nachteile**	**Anwendung**
Elektrisch	90 bis 95 %	Kurzzeitspeicher	SMES: Kühlung erforderlich (-200°C),	Netzstabilisierung, Lastkompensation
	98 bis 100 %	Kurzzeitspeicher	Kondensator: sehr hohe Selbstentladung	Netzfilter, E-Mobilität
Chemisch	60 bis 85 %	Langzeitspeicher	Power-to-Gas: Speicherung ohne zeitliche Begrenzung	Wärmeenergie, Chemieprozesse, E-Mobilität,
	bis 60 %	Langzeitspeicher	Power-to-Liquid: Speicherung der Energie in Flüssigkeit	Elektroenergie
Elektro-chemisch	80 bis 90 %	Kurz-/Mittelzeitspeicher	Blei-Säure-Akku: hohe Selbstentladung	E-Mobilität, Inselnetze
	über 95 %	Kurz-/Mittelzeitspeicher	Lithium-Ionen-Akku: geringe Selbstentladung, hohe Energiespeicherdichte	Spannungs-stabilisierung, Notebooks, Smartphones
	70 bis 80 %	Mittel-/Langzeitspeicher	Redox-Flow-Batterie: keine Selbstentladung, sehr hohe Leistungskosten durch die Membranen	Netzstromspeicher
Mechanisch	70 bis 80 %	Langzeitspeicher	Pumpspeicher-kraftwerk: standortgebunden/ begrenztes Potential	Ausgleich zwischen Grund- und Spitzenlast
	80 bis 90 %	Kurzzeitspeicher	Schwungradspeicher: Hohe Selbstentladung	Frequenzhaltung im Netz
Thermisch	35 bis 70%	Kurz- oder Langzeitspeicher	Sensibler Wärme- und Kältespeicher: einfach, robust, kostengünstig	Wärmeenergie, Prozessenergie
	35 bis 70%	Kurz- oder Langzeitspeicher	Latentwärmespeicher: wesentlich kompakter als Sensible Speicher	Temperatur-stabiliserung
	35 bis 70%	Kurz- oder Langzeitspeicher	Thermochemische Speicherung: kaum Wärmeverluste	Sorptionsspeicher, saisonaler Speicher

Vgl. [[27]; [28]; [29]; [32]]

Bei Betrachtung der Tabelle 2.7 fällt auf, dass sich die Energiespeichertechnologien bereits in den Wirkungsgraden deutlich unterscheiden. So erzielen chemische Speicher Wirkungsgrade von 60 bis 85 %, wohingegen elektrische Speicher Wirkungsgrade von weit über 90 % erreichen können. Allerdings gehen mit den unterschiedlichen Technologien auch ihre Nachteile einher. So benötigt beispielsweise die SMES eine ständige Kühlung auf eine Temperatur von -200°C, Superkondensatoren und einige Batterietypen leiden an steten, hohen Selbstentladungsverlusten und Energiespeicher wie Kavernenspeicher oder Pumpspeicherkraftwerke sind standortgebunden. Des Weiteren eignen sich elektrische Speicher eher zur Speicherung der Energie für kurze Zeiträume, wohingegen chemische Speicher als Langzeitspeicher die gespeicherte Energie über Jahre bis Jahrzehnte halten können.
Aus diesen Anforderungen gehen die jeweiligen Anwendungsgebiete hervor, für die die ensprechenden Energiespeichertechnologien ihren Nutzen finden, ob zur Netzstabilisierung, Lastkompensation, in der E-Mobilität oder für die Wärmeenergie.
Entsprechend der Eigenschaften der unterschiedlichen Energiespeichertechnologien resultiert demzufolge die Aussage, dass es nicht den *einen* Energiespeicher gibt, sondern *mehrere* Techonologien, die die einzelnen Anwendungsgebiete abdecken [31].

2.7 Energiespeicher in Kraftfahrzeugen

Bei der Wahl eines geeigneten Energiespeichers für ein Kraftfahrzeug können mit Blick auf die Tabelle 2.7 bereits einige der Energiespeichertechnologien ausgeschlossen werden. Der Zusatzspeicher sollte eine hohe Energiedichte aufweisen, damit die Masse des Speichers klein gehalten werden kann. Außerdem ist der Energispeicher an das Fahrzeug gebunden, sollte ein möglichst kleines Volumen besitzen und transportabel in den Patientenraum integriert werden können. Damit entfallen bereits mechanische und thermische Speicher, da diese meist große Massen besitzen, viel Volumen einnehmen und standortgebunden sind, wodurch die Verwendung in einem Kraftfahrzeug praktisch unmöglich wird. Als elektrischer Speicher würde ein Superkondensator zwar die grundlegenden Anforderungen erfüllen, jedoch ist er als Kurzzeitspeicher mit einer sehr hohen Selbstentladung für den Einsatz in elektrisch betriebenen Krankenkraftwagen als Zusatzspeicher nicht geeignet.
Somit wird der Fokus auf die chemischen und elektrochemischen Speichertechnologien gelegt. Im Folgenden werden als elektrochemische Speicher der Blei-Säure-Akku[2], der Lithium-Ionen-Akku und die Redox-Flow-Batterie sowie als chemischer Speicher die Brennstoffzelle näher beleuchtet.

2.7.1 Blei-Säure-Akku

Der Blei-Säure-Akku besitzt im aufgeladenen Zustand eine positiv geladene Anode, bestehend aus Bleioxid (PbO_2), sowie eine negativ geladene Kathode aus fein verteiltem, porösem Blei (Bleischwamm). Zur Vermeidung von Kurzschlüssen wird zwischen den Elektroden ein Separator gelegt, meist aus perforiertem, gewelltem PVC oder Polyäthylen. Als Elektrolyt dient dabei 37-prozentige Schwefelsäure (H_2SO_4) [33].
Die Abbildung 2.7 zeigt grob den Aufbau eines Blei-Säure-Akkumulators, eher bekannt als die gängige Fahrzeugbatterie, welche heutzutage in den meisten Fahrzeugen des Straßenverkehrs als Starterbatterie eingebaut wird.

[2] In der Literatur wird häufig mit dem Begriff „Batterie“ und „Akku“ jeweils dasselbe gemeint. Eine Batterie ist irreversibel entladbar, ein Akkumulator wiederaufladbar. Eine Fahrzeugbatterie ist demnach technisch ein Fahrzeugakkumulator. In dieser Arbeit wird sich, sofern nicht anders erwähnt, bei dem Begriff „Batterie“ auf den wiederaufladbaren Akkumulator bezogen.

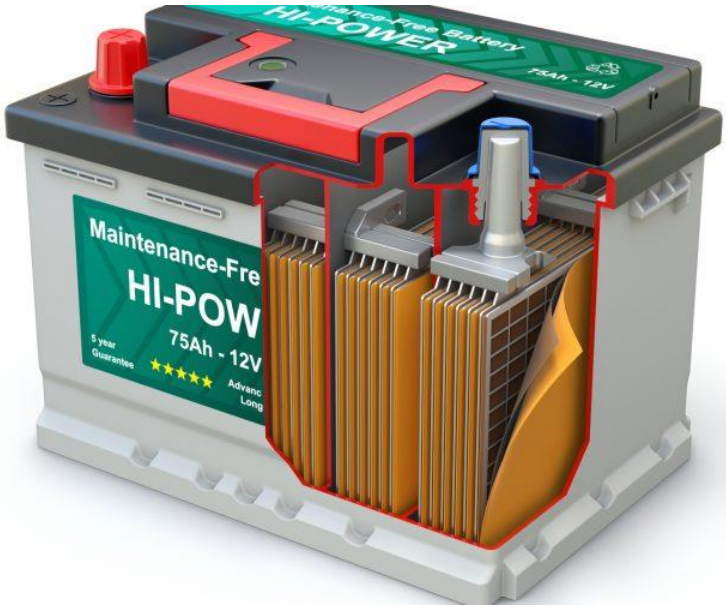

Abbildung 2.7 Aufbau eines Blei-Säure-Akkumulators, [34]

Bei dem Vorgang des Energiebezuges duch die Entladung des Blei-Säure-Akkumulators werden die Materialien beider Elektroden durch chemische Reaktion umgewandelt, sodass die Pole im entladenen Zustand beidseitig aus Bleisulfat ($PbSO_4$) bestehen. Als Nebenprodukt der chemischen Reaktion entsteht Wasser (H_2O), welches die Schwefelsäure bei der Entladung sukzessive verdünnt. So kann anhand der Konzentration der Schwefelsäure im Elektrolyt eine Aussage über den Ladezustand des Blei-Säure-Akkus getroffen werden. Beim Ladevorgang laufen die chemischen Reaktionen in umgekehrten Reihenfolge ab und die Konzentration der Schwefelsäure steigt soweit bis der Ausgangszustand vor dem Entladen wieder erreicht wurde [33]. Zu den Vorteilen von Blei-Säure-Akkumulatoren zählen das kurzzeitige Beherrschen hoher Stromstärken, eine einfache Kontrolle des Ladezustandes sowie die vergleichsweise günstigen Anschaffungskosten. Nachteilig hingegen sind die hohe Selbstentladung, eine große Masse und eine hohes Volumen aufgrund der geringen Energiedichte sowie die giftigen Bestandteile in den Zellen, weshalb die Verwendung in geschlossenen Räumen stehts mit Vorsichtsmaßnahmen und einer guten Belüftung durchgeführt werden sollte [35].

2.7.2 Lithium-Ionen-Akku

Eine Lithium-Ionen Zelle besteht aus einer negativ geladenen Grafit-Elektrode und einer positiv geladenen Lithium-Metalloxyd-Elektrode, bei der der Anteil an Nickel, Mangan und Kobalt des Metalloxyds variabel sein kann. Nicht nur für kleinere Elektrogeräte wie Smartphones oder Notebooks sind diese NMC-Materialien aufgrund ihrer hohen Energiedichte erste Wahl, sondern auch in der E-Mobilität hat der Lithium-Ionen-Akku mit dem Einsatz als Traktionsbatterie in Elektrofahrzeugen einen hohen Stellwert eingenommen. Die Zusammensetzung mehrerer Lithium-Ionen-Zellen bilden den Akku, wobei deren Eigenschaften abhängig von Hersteller und Güteklasse variieren können.
Als Elektrolyt dient ein wasserfreies Lösungsmittel, da Lithium heftig mit Wasser reagiert. Allerdings kann sich dieser brennbare Elektrolyt unter Umständen entzünden, wodurch es in der Vergangenheit bereits zu kleineren Bränden und Explosionen kam. Zur Vermeidung von Kurzschlüssen werden die Elektroden durch einen Separator getrennt, welcher jedoch die Lithium-Ionen als Ladungsträger durchlässt [36].
Die Abbildung 2.8 zeigt die Traktionsbatterie eines Renault ZOE, wie sie gängigerweise in diesem Fahrzeugtyp integriert wird.

Abbildung 2.8 Lithium-Ionen-Batterie Z.E 50 eines Renault ZOE, [37]

Der Lithium-Ionen-Akku wird über das I/U-Ladeverfahren geladen, bei dem zuerst mit einem Konstantstrom und anschließend mit einer Konstantspannung geladen wird. Die Lithium-Ionen wandern durch den Separator in das Grafit und Sammeln sich zwischen den Molekülebenen. Beim Entladen wandern die Lithium-Ionen wiederum durch den Separator zurück zur Lithium-Metalloxyd-Elektrode. Da der Energiefluss hauptsächlich durch die Wanderung der Lithium-Ionen bestimmt wird, trägt der Akku auch den Namen entsprechend der Ladungsträger [36]. Als Vorteile besitzen Lithium-Ionen-Akkus neben

dem Beherrschen großer Stromstärken eine hohe Energiedichte, ein geringe Selbstentladung und es sind Zwischenladungen möglich. Die Nachteile äußern sich in der Temperaturempfindlichkeit (mögliche Tiefenentladung unter 5°C und über 35 °C), einer umweltschädlichen Gewinnung der Rohsotffmaterialien und darin, dass es bislang kein etabliertes Recyclingverfahren gibt [38].

2.7.3 Redox-Flow-Batterie

Die Redox-Flow-Batterie besitzt ein elektrochemisches Speichermedium, welches bei Raumtemperatur in flüssiger Form vorhanden ist. Hierbei wird das Speichermaterial, im Gegensatz zu den herkömmlichen Batterien, außerhalb der Zelle in Elektrolyttanks gelagert, wodurch die gespeicherte Energiemenge unabhängig von der Zellengröße nach Bedarf vergrößert oder verkleinert werden kann. Dies erlaubt die räumliche Entkopplung von Lade- und Entladeprozessen. Die Zelle im Zentrum des Aufbaus besteht aus zwei Kammern mit je einer Elektrode, wobei die Kammern über eine halbdurchlässige Membran als Separator voneinander getrennt sind [39].
Die Abbildung 2.9 zeigt den schematischen Aufbau einer solchen Redox-Flow-Batterie und deren Funktionsweise.

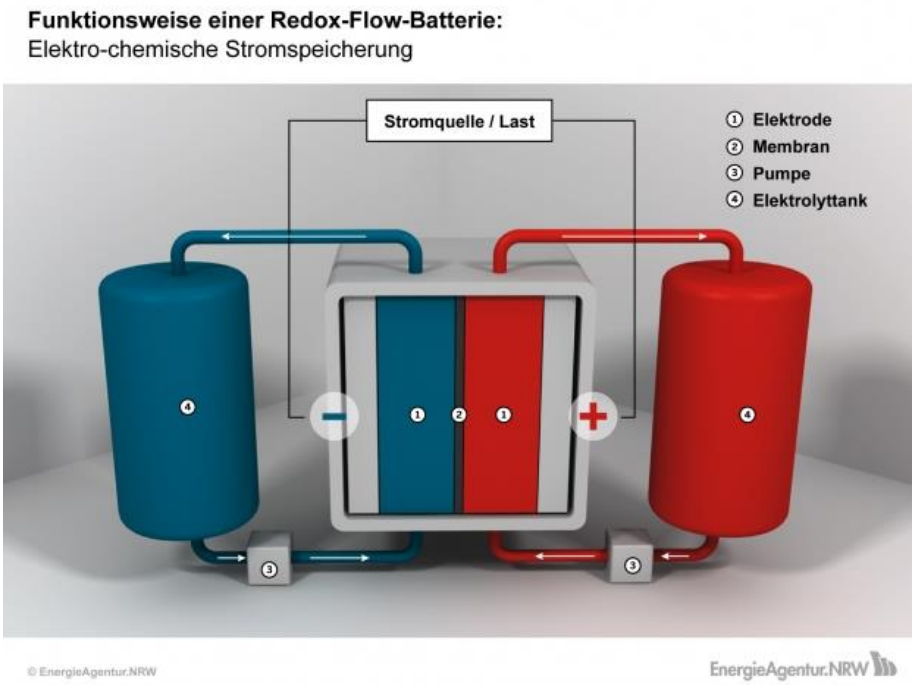

Abbildung 2.9 Aufbau und Funktionsweise einer Redox-Flow-Batterie, [39]

Bei der Ladung oder Entladung über der Zelle werden die Elektrolyte aus den jeweiligen Tanks mittels Pumpen in die Kammern geleitet. Aufgrund der chemischen Reaktion zwischen den Elektrolyten wandern die Ionen der im Elektrolyt enthaltenen Salze durch die halbdurchlässige Membran während der Elektrolytendurchströmung. Über dieses Verfahren werden die Ionen unter den Flüssigkeiten ausgetauscht und geben je nachdem Energie ab oder nehmen Energie auf. Durch die Speicherung der Elektrolyte in separaten Tanks findet im Ruhezustand keine Selbstentladung statt [39].
Obwohl es bislang offiziell kein Redox-Flow-Batterien betriebenes Fahrzeug im Straßenverkehr gibt, wurden bereits erste Testversuche gestartet. So konnte ein Fahrzeug mit einer Redox-Flow-Batterie ausgestattet werden, welches bei 70 kWH Kapazität eine Reichweite von 350 bis 400 km erzielte. Durch Austausch der energieerschöpften mit geladenen Elektrolyten kann die Aufladung der Batterie in wenigen Minuten abgeschlossen werden. Allerdings muss das Fahrzeug mit 250 Liter großen Tanks bestückt werden, welche zum Gewicht und Reichweitenverlust beitragen. Eine preisliche Kategorisierung für Fahrzeug und Elektrolyte fand bislang nicht statt [40]. Die Vorteile von Redox-Flow-Batterien zeigen sich einerseits in der unabhängigen Skalierbarkeit von Leistung und Kapazität, andererseits in der höheren Sicherheit durch brennfreie und explosionssichere Materialien sowie in der soliden Recyclingfähigkeit mit einer Rückgewinnung der Aktivsubstanzen. Zu den Nachteilen zählt die geringe Energiedichte, aus der hohe Massen resultieren, sodass eher die stationäre als die mobile Variante eine Verwendung findet. Weiterhin gilt Vandium als häufig verwendetes Schwermetall einer Redox-Flow-Batterie für umweltschädlich und kostenintensiv. Schließlich handelt es sich bei der Redox-Flow-Batterie um eine bislang noch eher unerforschte Technologie, sodass noch keine konkreten Aussagen über den Alterungsprozess getroffen werden können [41].

2.7.4 Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle besteht wie jede Batterie aus zwei entgegengesetzt gepolten Elektroden. Zwischen den Elektroden befindet sich ein Elektrolyt, welches in fester, flüssiger oder gelartiger Form als halbdurchlässige Membran für den Ionentransport zwischen den Elektroden zuständig ist [42].
Anhand der Abbildung 2.10 wird die Funktionsweise und der Aufbau einer Brennstoffzelle deutlich.

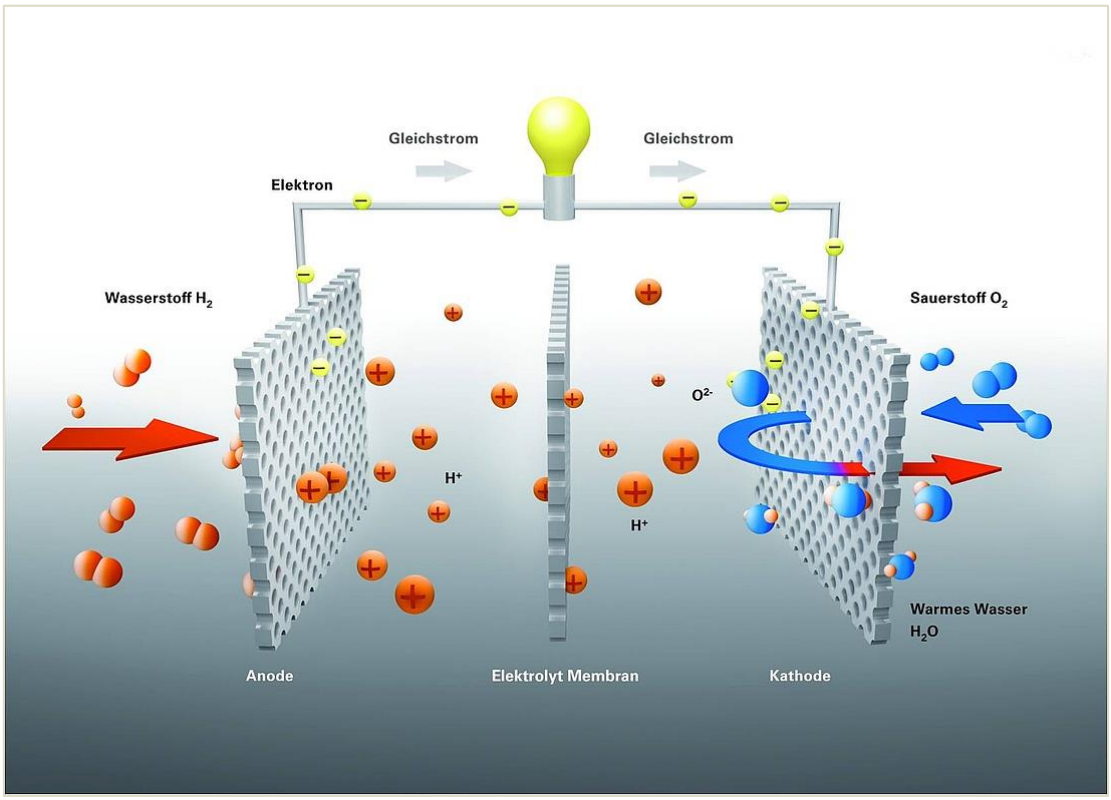

Abbildung 2.10 Aufbau und Funktionsweise einer Brennstoffzelle, [43]

Für die Energieerzeugung wird Wasserstoff auf seitens der Anode und Sauerstoff seitens der Kathode hinzugeführt. Über das Elektrolyt wandern die Ionen des Wasserstoffs zum Sauerstoff und gehen mit ihm eine elektrochemische Reaktion ein. Dabei entsteht elektrische Energie als Strom und Wärmeenergie im Wasser als Nebenprodukt elektrochemischen Reaktion. Man spricht auch von einer *kalten Verbrennung*, da hierbei die Wärmeenergie nicht als Verlust an die Umgebung abegegeben wird, sondern in gespeicherter Form weiter genutzt werden kann. Bei der Verwendung von ökologischem Wasserstoff, welcher nicht aus Erdgas erzeugt wurde, kann die Brennstoffzelle als klimafreundlich und schadstofffrei angesehen werden.
Heutzutage werden Brennstoffzellen bereits in Fahrzeugen der Hersteller Honda, Hyundai, Mercedes-Benz, Renault und Toyota eingebaut, welche Reichweiten von 500 bis 750 km mit Ladezeiten ähnlich der Betankung konventioneller Fahrzeuge erreichen können [42]. Wesentliche Vor- und Nachteile von Brennstoffzellen werden den Batterietechnologien im nächsten Kapitel gegenübergestellt.

2.7.5 Vergleich Batterie und Brennstoffzelle

Nach M. Fröba [31] „gibt es nicht den einen Energiespeicher der Zukunft“. Das gilt auch für die Einsatz von Energiespeichern in Fahrzeugen. Batterien besitzen hohe Wirkungsgrade, können allerdings hohe Strommenge nicht abdecken und sind in ihrer Kapazität begrenzt. Die Beschaffung der Rohstoffe gestaltet sich ebenfalls als schwierig. Für Brennstoffzellen hingegen muss lediglich Wasserstoff auf Wasser gewonnen werden, bestenfalls unter klimafreundlichen Bedingungen, damit auch die Brennstoffzelle klimaneutral bleibt. Die Technologie an sich hingegen stellt einen sehr kostenintensive und umständlichen Prozess dar [31].
Die Tabelle 2.8 dient zur Veranschaulichung der Gegenüberstellung von herkömmlichen Batterien und Brennstoffzellen für den Einsatz in Kraftfahrzeugen.

Tabelle 2.8 Vergleich von Batterien und Brennstoffzelle im Kraftfahrzeug

Elektrochemischer Speicher	**Vorteile**	**Nachteile**
Elektroautos mit Batterie	- Verschiedene PWK-Typen auf dem Markt - Infrastruktur wird massiv ausgebaut - Betanken geht auch zu Hause - Hohe Wirkungsgrad, d.h. der investierte Strom wird recht gut verwertet	- Geringe Reichweiten, besonders bei Bewegung hoher Gewichte - lange Ladezeiten, Schnellladung verringert Wirkungsgrad und die Lebensdauer der Batterie - Rohstoffgewinnung mitunter aus Afrika und Südamerika unter teilweise menschenverachtenden Arbeitsbedingungen
Personenkraftwagen mit Brennstoffzelle	- Größere Reichweiten (auch für Fahrzeuge mit hohem Gewicht wie LKW, Züge und Schiffe) - Benötigter Rohstoff: Wasser, Nebenprodukt lediglich Wasser - Schneller Betankungsvorgang	- In Deutschland bisher kaum Infrastruktur - Wasserstoff muss vorher erst erzeugt werden - Edelmetalle sind zurzeit noch als Katalysatoren notwendig - Wasserstoffspeicherung unter sehr hohen Druck, Kühlung notwendig - geringerer Wirkungsgrad - kann aus Erdöl/Erdgas hergestellt werden → Treibhausgase

Vgl. [33]

Somit kommt es nach Fröba [31] auf den Einsatzzweck des Energiespeichers an. Ein batteriebetriebenes Elektroauto eignet sich für Pendler und Fahrten mit kurzen Reichweiten. Brennstoffzellenautos hingegen eignen sich eher für Schwerlasttransporte mit hohen Reichweiten. Aus ökologischer Sicht ist dabei zu beachten, dass auch die Herstellung der Energiespeicher klimaneutral bleibt und nicht nur deren Nutzung.

3 Modellvorstellung für die Speicherauslegung

Für die Verarbeitung und Auswertung der Simulationsparameter muss eine geeignete Simulationsumgebung gewählt werden. Auf deren Basis werden die Parameter in einem Simulationsprogramm so verknüpft, dass Simulationsszenarien geschaffen werden, die die Einflüsse unter realitätsnahen Bedingungen wiederspiegeln, aus denen die Simulationsergebnisse resultieren. Eine geeignete Simualtionssoftware legt den Grundstein für ein stimmiges Simulationsprogramm mit einer anschaulichen Visualisierung der Ergebnisse.

3.1 Simulationsumgebung

Das Modell für die Auslegung des Zusatzspeichers zur Versorgung der Ausstattung des Einsatzfahrzeuges wurde mit der Software MATLAB Version R2020b realisiert. MATLAB dient der Lösung mathematischer Problemstellungen, wobei die numerischen Ergebnisse grafisch in Plots visualisiert werden können. Die Berechnungen basieren auf der Grundlage von Matrizen, welche die Verrechnung von Skalaren, Vektoren und Matrizen miteinander ermöglicht. Die Simulationsumgebung besitzt ein *Command Window*, in dem sämtliche Befehle eingetragen und ausgeführt werden können. Dabei orientiert sich die Programmiersprache an der üblichen C-Programmierung. So können beispielsweise Variablen definiert, Simualtionsparameter geladen oder Ergebnisse über Plots visualisiert werden. Sämtliche definierte Variablen oder ermittelten Ergebnisse werden im *Workspace* hinterlegt und zwischengespeichert, solange diese nicht überschrieben werden. Zur Festlegung eines Quellcodes und Hinterlegung der Programmierbefehle kann ein Skript generiert werden, welches mit dem *RUN*-Befehl jegliche Befehle chronologisch abarbeitet und ausführt. Da MATLAB objektorientiert arbeitet, besteht mit dem Zusatzprodukt Simulink die Möglichkeit, Prozessabläufe und mathematische Berechnungen durch Verknüpfung logischer Bausteine darzustellen und zu simulieren. Für den Modellaufbau und die Berechnung der Ergebnisse wurde Simulink als Option von MATLAB verwendet. Bei fehlerhafter Programmierung erkennt MATLAB die Fehlerstelle und hinterlegt diese sichtbar für den Anwender.

3.2 Erklärung des Modellaufbaus

Simulink arbeitet auf der Basis der Verknüpfung von logischen Blöcken, welche in einer Bibliothek hinterlegt sind. Die Blöcke besitzen Standardwerte- oder einstellung, welche in einem gegebenem Maße parametriert werden können. Über direkte Zuweisung einzelner Blöcke kann der *Workspace* mit den logischen Blöcken verknüpft werden, sodass eine direkte Integration der Variablen aus dem MATLAB Programm erfolgt. Die Verbindung der Blöcke findet über ein von dem Anwender erzeugtes Pfeilsystem statt, wobei die Simulationsrichtung immer ausgehend von einer oder mehreren Quellen hin zu einer oder mehreren Senken weist.
Um zu verhindern, dass bestimmte Geräte nicht widersprüchlich gleichzeitig in Betrieb sind, wurden diese gegeneinander im Programm verriegelt. Dies trifft auf den Einsatz des Signalhorns und den Zusatzblitzer ohne Verwendung des Blaulichts, sowie die gleichzeitige Benutzung beider Klimatisierungseinheiten zur Temperaturregelung zu.
Für die einzelnen Geräte wurde je ein Block angelegt, dem ein im Workspace hinterlegter Simulationsparameter zugeordnet ist. Die jeweiligen Blöcke wurden mit einem zusätzlichen Block durch Multplikation verknüpft, welcher als Fahrt- oder Betriebsflag gekennzeichnet den aktuellen Zustand eine Gerätes repräsentieren soll. So wird die Leistungskurve eines Gerätes $P_{\text{Gerät,Z}}(t)$ unter Berücksichtigung des Gerätezustandes x_{Flag} und der Bemessungsleistung $P_{\text{Gerät}}$ nach Formel (3.1) ermittelt:

$$P_{Gerät,Z}(t) = P_{Gerät} \cdot x_{Flag}(t) \tag{3.1}$$

Als Index Z wird hierbei die Berücksichtigung des Zustandes symbolisiert. Die Bemessungsleistung eines Gerätes $P_{\text{Gerät}}$ wird aus dem Workspace als Leistungswert in Form der SI-Einheit Watt in die Simulation integriert. Der Gerätezustand x_{Flag} liegt in Form einer Matrix vor, sodass jeder Zustand einem Zeitschritt direkt zugeordnet wird und den Verlauf des Gerätzustandes für die einzelnen Zeitschritte abbildet. Zur Ermittlung der Leistungskurve $P_{\text{Subsystem}}(t)$ einer Gerätegruppe, welche als Subsystem in Simulink zusammengefasst wird, erfolgt die Aufsummierung nach Formel (3.2):

$$P_{Subsystem}(t) = \sum P_{Gerät,Z,i}(t) \tag{3.2}$$

Der Index *i* bezeichnet hierbei die Gesamtheit aller in einer Gerätegruppe befindlichen Geräte derselben Ausrüstungskategorie. Sämtliche Subsysteme werden in dem Subsystem *Berechnung Leistungsbedarf* aufsummiert und anschließend über einen Divisionsblock um den Faktor 1000 auf Kilo für die Ermittlung des Leistungsbedarfs in Kilowatt umgerechnet. Die resultierende Gesamtleistungskurve $P_{ges}(t)$ wird mithilfe von Formel (3.3) ermittelt:

$$P_{ges}(t) = \frac{\sum P_{Subsystem,i}(t)}{1000} \tag{3.3}$$

Das Ergebnis der Ermittlung des Leistungsbedarfs wird an den Workspace ausgegeben. Zur Überprüfung und Vorab-Visualisierung wurde eine Scope-Block beigefügt, welcher den Leistungsverlauf nach erfolgreicher Simulation visualisiert.
Der ermittelte Leistungsbedarfsverlauf wird für die weitere mathematische Berechnung mit dem Subsystem *Berechnung Kapazitaetsbedarf* verknüpft. Hierfür wird das Ergebnis mit einer Zeitschrittdauer *t* verrechnet. Da im Gegensatz zu den Leistungswerten die Zeitschritte simulationsbedingt nicht in der SI-Einheit Sekunden, sondern in Minuten-Schritten in die Simulation eingehen, wird über einen Divisionsblock die Zeit um den Faktor 60 von Minuten auf Stunden umgerechnet. Die Formel (3.4) hierfür lautet:

$$E_{ges}(t) = \frac{P_{ges}(t) \cdot t}{60} \tag{3.4}$$

Das Ergebnis der *Berechnung Kapazitaetsbedarf* stellt den Verlauf des Energiebedarfs $E_{ges}(t)$ über der Zeitschrittdauer *t* für die entsprechenden Zeitpunkte dar und liegt in der Einheit Kilowattstunden vor. Die Angabe in Kilowattstunden oder auch Amperestunden ist eine gängige Auszeichnung der Hersteller für den Kapazitäts- oder Energiegehalt eines Energiepeichers. Daher wurde die Einheit Kilowattstunden für die Ausgabe der Berechnung gewählt.
Um den Verlauf des zunehmenden Energiebedarfs über den Simulationszeitraum darzustellen, werden die einzelnen Werte von $E_{ges}(t)$ als kumulierte Summe nach Formel (3.5) aufgerechnet:

$$s_t = s_{t-1} + y_t \tag{3.5}$$

Als *s* wird die jeweilige Summe bezeichnet, der Index *i* beschreibt den Zeitschritt und *y* den Wert von $E_{ges}(t)$ beim Zeitschritt *t*. Die ermittelten Verläufe von $P_{ges}(t)$ und s_i werden geplottet und als m.file gespeichert.

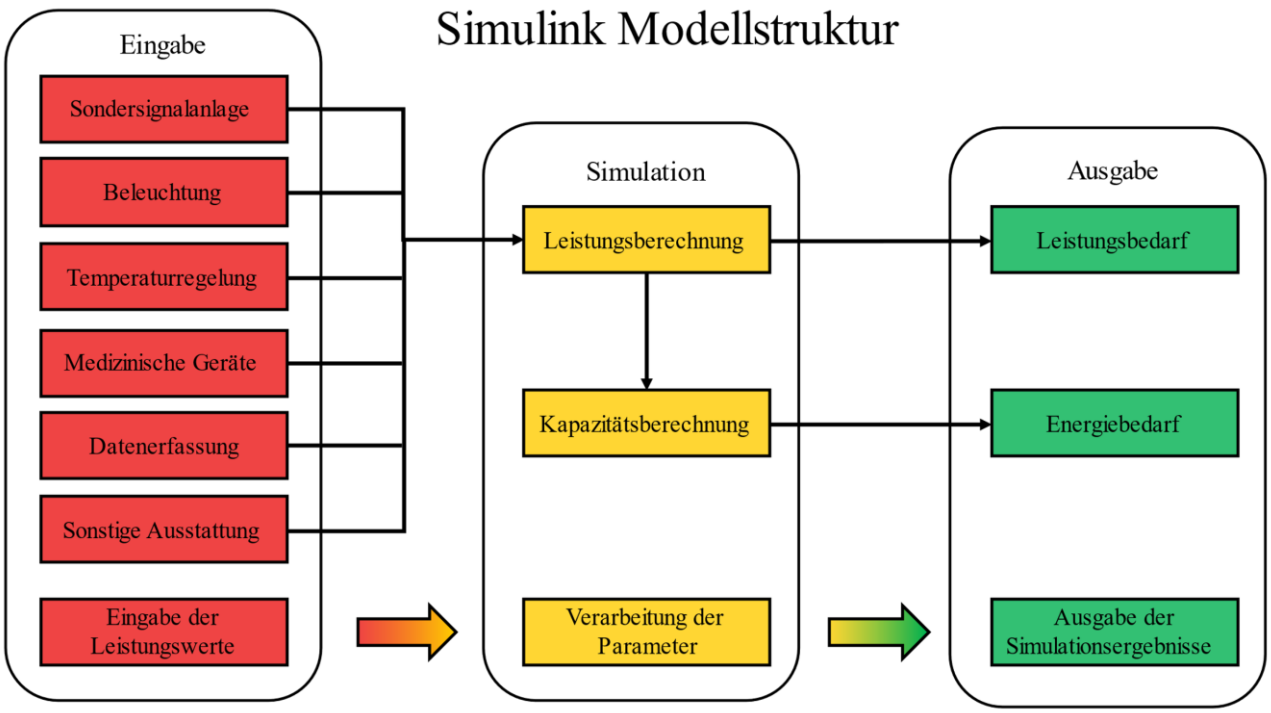

Abbildung 3.1 Struktur der Berechnungen in Simulink

Die Abbildung 3.1 soll zur Veranschaulichung der Abläufe im Simulink-Modell dienen. Zuerst erfolgt die Eingabe, bei der die Leistungswerte der einzelnen Geräte erfasst werden. Die Geräte sind in Gerätegruppen unterteilt, in denen die Leistungswerte zusammengefasst und als Summe aller Geräte an die Simulation weitergegeben werden. In der anschließenden Simulation werden die Parameter über die Leistungs- und Kapazitätsberechnung verarbeitet. Dabei werden ebenfalls die SI-Einheiten beachtet und die Werte gegebenfalls in andere Einheiten umgerechnet. Grundsätzlicher Bestandteil des Simulationsabschnittes sind die in den Formeln erwähnten Berechnungen. Bei der Ausgabe werden die Simulationsergebnisse der Berechnungen für den Leistungs- und Energiebedarf ausgegeben. Anhand dieser Werte können Kurvenverläufe erstellt und Simulationsergebnisse ausgewertet werden

3.3 Einpflegen der Simulationsparameter

Die Simulationsparameter werden der Excel-Tabelle einer Excel-Datei entnommen. Über den Befehl *xlsread('Dateinname.xls','Tabellenreiter','Tabellenspalte')* kann direkt auf den gewünschten Wert oder die Wertespalte zugegriffen werden. Somit kann der Anwender über die Excel-Tabelle direkt die Simulationsparameter eingeben oder verändern, wobei die Simulation automatisch die Parameter einliest sowie die Ergebnisse ermittelt und darstellt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Veränderung der Simulationsparameter lediglich in der Excel-Datei erfolgt, welche im Quellcode des Skripts hinterlegt wurde. Für diese Simulation werden die Simulationsparameter aus der Excel-Datei *Leistungsmodell.xlsx* bezogen. Hier sind sämtliche Leistungswerte der einzelnen Geräte in der SI-Einheit Watt hinterlegt.
Die Excel-Datei *Flagmodell.xlsx* hingegen beschreibt den Zustand, den die jeweiligen Geräte für einen bestimmten Zeitschritt annehmen. Durch diesen Ansatz kann eine gerätescharfe Einsatzvorgabe realisiert und umgesetzt werden. Die Übergabe der Parameter erfolgt zudem im gängigen und leicht zu bearbeitenden xslx-Format, wodurch die Weiterverwendbarkeit des Modells gesteigert wird. Damit Simulink die Simulationsverläufe darstellen kann, muss die Zeitschrittlänge in Form eines Spaltenvektors als Zeitreferenz zu den Flagvektoren in die Simulation eingebunden werden. Der Spaltenvektor für die Zeitschritte ist in der Excel-Datei *Leistungsmodell.xlsx* hinterlegt, das Zusammenfügen der Vektoren zu einer Matrix erfolgt im Skript.
Des Weiteren sind in *Leistungsmodell.xlsx* die Zeitschrittdauer und die Reserve hinterlegt, welche bei Bedarf ebenfalls geändert werden können.

3.4 Programmablaufplan

Um den Ablauf des Simulationsprogrammes besser nachvollziehen zu können, wurde ein Programmablaufplan erstellt. Die Abbildung 3.2 stellt den Verlauf der Simulationsschritte für das Auslegungsmodell chronologisch dar.

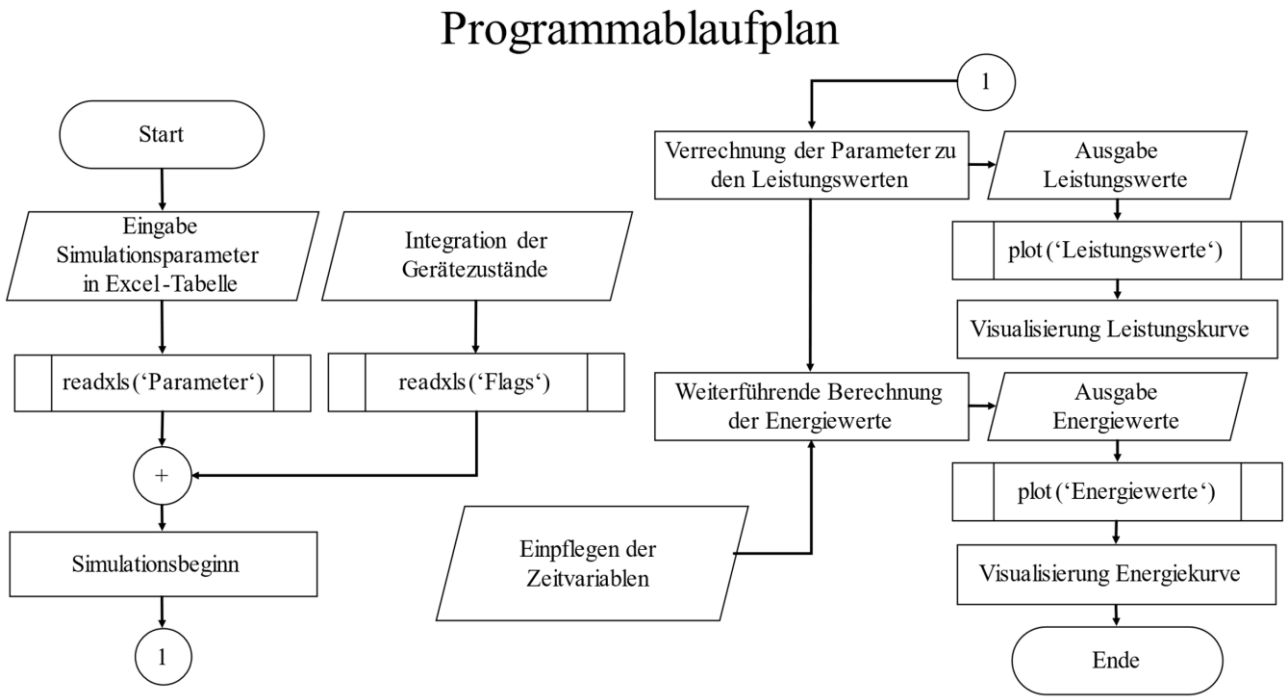

Abbildung 4.1 Programmablaufplan des Auslegungsmodells

Das Programm beginnt mit der Eingabe der Simulationsparameter des Anwenders in die entsprechende Excel-Tabelle. Parallel dazu werden ebenfalls die Gerätezustände in die Excel-Tabelle integriert. Über die Funktion *readxls* werden die gewählten Parameter und Flags in die Simulation eingelesen und miteinander verknüpft. Danach beginnt die eigentliche Simulation. Die verknüpften Simulationsparameter werden zu den Leistungswerten verrechnet, welche anschließend von dem Programm an den *workspace* ausgegeben werden. Mit der Funktion *plot* wird schließlich der Leistungverlauf dargstellt. Ausgehend von der Verrechnung der Parameter zu den Leistungswerten werden die Ergebnisse weiterführend in die Berechnung der Energiewerte einbezogen. Dazu werden die entsprechenden Zeitvariablen eingepflegt. Wie schon bei der Leistungsberechnung werden die Ergebnisse zur Ermittlung der Energie an den *workspace* ausgegeben und der Verlauf der Energie über die *plot*-Funktion visualisiert. Damit endet der Ablauf einer Simulation.

3.5 Simulation der Szenarien

Die Simulation umfasst neun Szenarien, von denen sechs auf einen Rettungswagen und drei auf einen Krankentransportwagen bezogen sind. Die Szenarien des Rettungswagens unterteilen sich in zwei unterschiedlichen Fahrtvarianten, bei denen jeweils zusätzlich der Einfluss unterschiedlicher Temperaturen zu bestimmten Jahreszeiten für eine Einsatzfahrt untersucht wird. Bei dem Krankentransportwagen werden ebenfalls die Temperatureinflüsse variiert, allerdings für den Zeitraum eines gesamten Einsatztages.

3.5.1 Randbedingungen

Bei der Untersuchung der Simulationsszenarien wurden mehrere Randbedingungen festgelegt. Zum einen wurden von den unter Kapitel 2.2 erwähnten Kategorien der Krankenkraftwagen lediglich der KTW und der RTW in den Simulationen betrachtet, da diese Krankenkraftwagentypen aufgrund ihrer verschiedenen Einsatzanforderungen für den Simulationszweck am besten geeignet sind und eine Simulation jedes Fahrzeugtyps den Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit sprengen würde. Zum anderen treten deutliche Unterschiede im Fahrverhalten von KTW und RTW auf, sodass aufgrund der verschiedenen Fahrprofile eine Validierung der Simulationsszenarien möglich wird, welche entscheidend für die Auslegung eines Zusatzspeichers entsprechend der Krankenkraftwagentypen ist. Somit wurde sich bei der Auslegung des Zusatzspeichers an diesen Fahrzeugtypen orientiert. Da der NKTW ein ähnliches Fahrverhalten wie der RTW besitzt, jedoch geringfügiger ausgestattet ist, wurde auf eine Simulation mit einem NKTW verzichtet, um mit dem RTW die maximale Auslastung des Energiespeichers für eine Einsatzfahrt zu untersuchen. Die simulierten Einsatzfahrten von KTW und RTW entsprechen keinen realen Szenarien, da für die Untersuchung keine echten Fahrtdaten der Einsatzwagen oder Aktivitätsdaten der Geräte vorlagen. Somit ist der subjektive Anteil bei der Gestaltung der Simulationsabläufe wie beispielsweise das Setzen von Betriebs- und Fahrtflags unvermeidbar. Anhand der Vorstellung des Ablaufes eines Einsatzes, mit der Fahrt zum Einsatzort, der Erstversorgung des Patienten vor Ort und dem Transport des Patienten zum Zielort, sollen die Simulationsszenarien danach ausgelegt und der entstehende subjektive Fehler möglichst klein gehalten werden. Die Anzahl der zu untersuchenden Geräte liegt bei 41 Stück nach Angaben der Ambulanz Mobile GmbH [[24][25]]. Welche Ausstattung für den entsprechenden Krankenkraftwagentypen während der Simulation entscheidend ist, richtet sich nach der DIN EN 1789 [1].

3.5.2 Durchführung

In den Simulationen werden mehrere Faktoren variiert, um deren unterschiedliche Einflüsse auf die Auslastung des Energiespeichers untersuchen zu können. Die Simulationsvarianten mit variierenden Einflussfaktoren wurde in der Word-Datei *Simulationsvarianten Legende.docx* hinterlegt und ist auf dem digitalen Datenträger vorzufinden. Die Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht zu den einzelnen Faktoren der Simulationsszenarien.

Tabelle 3.1 Legende für die einzelnen Simulationsvarianten

Krankenkraftwagentyp	Fahrtvariante	Simulationsvariante	Jahreszeit
RTW	1	1	Sommer
		2	Übergangszeit
		3	Winter
	2	4	Sommer
		5	Übergangszeit
		6	Winter
KTW	1	7	Sommer
		8	Übergangszeit
		9	Winter

Vgl. [9]

Laut dieser Legende wurden für den RTW zwei verschiedene Fahrtvarianten einer Einsatzfahrt und für den KTW ein Einsatztag jeweils bei Nacht gewählt, welche zu unterschiedlichen Jahreszeiten stattfinden sollen. Die verschiedenen Jahreszeiten wurden als Sommer, Winter und Übergangszeit festgelegt, wobei für den Sommer eine Temperatur von über 32 °C, für den Winter eine Temperatur von unter 5 °C und für die Übergangszeit Temperaturen von 17 bis 27 °C angenommen werden. Zur Festlegung der Temperaturbereiche wurde sich nach den Vorgaben für die Klimatisierung von Einsatzfahrzeugen entsprechend der DIN EN 1789 [1] gerichtet, um eine Temperaturabhängigkeit zu überprüfen. Die abweichenden Fahrtvarianten sollen Aufschluss darüber geben, ob der Ablauf der Einsatzfahrt einen Einfluss auf die Auslastung des Energiespeichers nimmt. Einige Einflussfaktoren wurden allerdings konstant gehalten, damit ausgehend vom Worst-Case-Szenario die Beanspruchung des Energiespeichers größtmöglich ausfällt, um eine genauere Dimensionierung für hohe Auslastungen zu ermöglichen. Demzufolge wird davon ausgegangen, dass die Einsatzfahrten grundsätzlich bei Nacht stattfinden, sodass die gesamte Beleuchtung vordergründig zum Einsatz kommt. Außerdem wird der Patientenstatus so angenommen, dass alle Geräte der Ausstattung des jeweiligen Krankenkraftwagentyps zum Einsatz

kommen können, um ein möglichst durchschnittliches Verhalten zu gewährleisten. Die grundsätzlichen Abläufe der Einsätze in Bezug auf Aktion und zeitlichem Werdegang wurde ebenfalls unverändert gelassen, damit bei der Gegenüberstellung der Simulationen Gemeinsamkeiten und Unterschiede besser hervorgehoben werden können. Im Simulationsprogramm wurden die Simulationsparameter Zeitschrittdauer und Reserve als variabel angegeben, für die Simulationen hingegen behalten diese standardmäßig den Wert 1. Es wird davon ausgegangen, dass eine Einsatzfahrt mit dem Stillstand am Ausgangsort ohne Patienten beginnt und dort auch wieder ohne Patienten endet. Im Rahmen der Recherche zu den Einsatzzeiten eines RTW's wurde nach dem Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen [44] eine mittlere Hilfefrist von 8,4 Minuten bei Anfahrten mit Sonderrechten ermittelt. Als mittlere Einsatzzeit eines RTW's wurden 52 Minuten für Fahrten mit Sonderrechten angegeben. Für einen KTW ergab sich laut einem Urteil vom 10.06.2008 [45] eine durchschnittliche Einsatzdauer von 49,11 Minuten bei täglich 11,67 Einsätzen mit einer Gesamteinssatzzeit von 9 Stunden und 34 Minuten. Bei den Simulationen wurde sich an diesen Zeitwerten orientiert.

3.5.3 Simulationsszenarien

Die Beschreibung der Simulationsvarianten ermöglicht ein besseres Verständnis für den Ablauf der Simulationsszenarien. Anhand dessen können später Rückschlüsse auf die Ergebnisse gezogen werden, um besondere Ereignisse oder Auffälligkeiten hervorzuheben und anhand dessen Schlussfolgerungen für die Auslegung des Zusatzspeichers ableiten zu können. Ebenso kann dadurch das Modell für die Auslegung des Zusatzspeichers validiert werden.

3.5.3.1 Simulationsvariante RTW Fahrtvariante 1

Die Simulationen beginnen mit dem Stillstand des RTW's bei Nacht. Demnach befinden sich zum Anfang der Simulationen alle Geräte außer Betrieb. Innerhalb einer Minute befinden sich die Rettungskräfte an Bord und fahren zum Einsatzort los. Der RTW benötigt 14 Minuten, um den Einsatzort zu erreichen. Die Sondersignalanlage ist für den Zeitraum der Anfahrt durchgängig an. Mit Beginn der Fahrt wird die Temperaturregelung eingeschaltet und bleibt für die Dauer des Einsatzes aktiv. So erfolgt für die Simulation im Sommer eine kontinuierliche Kühlung, im Winter eine regelmäßige Beheizung und in der Übergangszeit keine Temperturregelung. Da sich kein Patient im Patientenraum befindet, sind weder die Beleuchtung noch die medizinischen Geräte in Betrieb. Während der Fahrt kommt es gelegentlich zum Funkverkehr mit der Zentrale. Die Ambutronic als zentrale Steuereinheit zur Verteilung, Steuerung und Absicherung der einzelnen Stromkreise befindet sich während der Fahrtzeiten im Dauerbetrieb, sowie die von der Fahrtsituation abhängigen Fahrassisstenzgeräte.
Nach der Ankunft am Einsatzort vergeht eine Minute für die Entnahme der Erste-Hilfe-Ausrüstung, wobei die Beleuchtung geringfügig zum Einsatz kommt. Es folgt eine 14-minütige Erstversorgung des Patientens vor Ort, während dessen keine zusätzlichen Geräte eingeschaltet sind.
Die darauffolgenden sechs Minuten wird der Patient in den Patientenraum eingeladen und weiter versorgt. Hierfür ist das Einschalten sämtlicher Innen- und Außenbeleuchtung notwendig. Ab diesem Zeitpunkt erfolgt die kontinuierliche Datenerfassung des Patientens, wobei zusätzlich ein Wechselrichter zur Versorgung externer Geräte, die u.a. dem Patienten gehören und mit Strom versorgt werden müssen, zum Einsatz kommt. Zum Einladen des Patientens wird ein elektrischer Lift oder eine elektrische Trittstufe zur Einstiegserleichterung verwendet.

Die erforderlichen medizinischen Geräte werden nach Bedarf zugeschaltet. Da der Patientenstatus für die Simulation als kritisch angenommen wird, kommen besonders die medizinischen Geräte häufiger zum Einsatz.
Anschließend wird der Patient zur medizinischen Einrichtung überführt. Da sich diese am Ausgangsort befindet, benötigt der RTW wie bei der Anfahrt 14 Minuten. Nun sind wieder die Sondersignale für die Dauer der Fahrt aktiv. Während der Überführung wird der Patient mit den erforderlichen medizinischen Geräten weiter versorgt. Es finden wenige Funksprüche statt und die Beleuchtung reduziert sich auf den Patientenraum. Auch der Defibrillator wird einige Male verwendet.
Nach der Ankunft des RTW's an der medizinischen Einrichtung wird der Patient innerhalb einer Minute entladen. Die Innen- und Außenbeleuchtung ist aktiv und neben den übrigen erforderlichen medizinischen Geräten kommen die Ausstiegsassisstenten erneut zum Einsatz. Der Patient wird an die medizinische Einrichtung übergeben.
Schließlich erreicht der Einsatzwagen nach 52 Minuten Einsatzzeit seinen Ausgangsort und wird abgestellt, sodass alle Geräte außer Betrieb sind.

3.5.3.2 Simulationsvariante RTW Fahrtvariante 2

Zu Beginn dieser Simulationsvariante gelten dieselben Startbedingungen für die Simulationen der Fahrtvariante 2 wie die der Fahrtvariante 1. Das Einsatzverhalten der Geräte wurde insofern aus den ersten Simulationen adaptiert, dass lediglich durch das abweichende Fahrtmuster die Simulationsabläufe im Vergleich zur Fahrtvariante 1 variieren.
Die Anfahrt zum Einsatzort fällt diesmal deutlich kürzer aus. Bereits nach acht Minuten erreicht der RTW mit Sonderrechten sein Einsatzziel. Allerdings nimmt die Erstversorgung des Patientes vor Ort mit 26 Minuten einen deutlich größen Zeitraum in Anspruch.
Innerhalb von sechs Minuten wird der Patient in den RTW eingeladen und weiterversorgt. Die Überführung zur medizinischen Einrichtung gestalten sich ebenso kurz wie die Anfahrt zum Einsatzort. Somit enden die Simulationen ebenfalls nach 52 Minuten Einsatzzeit des RTW's. Aus den kürzeren Fahrtzeiten des Einsatzfahrzeuges resultieren kürzere Zeiträume, in denen die medizinischen Geräte sowie Innen- und Außenbeleuchtung aktiv sind. Lediglich der Patientenstatus, die Temperaturregelung und die Fahrt bei Nacht sind für beide Simulationsvarianten gleich.
Im Vergleich zur Fahrtvariante 1 hat sich die Fahrtzeit in etwa halbiert, dafür der Zeitraum der Versorgung des Patienten beinahe verdoppelt. Mit der Fahrtvariante 2 soll der Einfluss des Fahrtablaufes auf die Auslastung des Energiespeichers untersucht werden. Dafür werden die Einsatzmuster der Geräte in beiden Simulationsvarianten gleich gehalten, um eine einfachere Gegenüberstellung der Ergebnisse anhand der unterschiedlichen Fahrtmuster zu ermöglichen.

3.5.3.3 Simulationsvariante KTW

Am Anfang der Simulationen befindet sich das Einsatzfahrzeug, wie schon bei den Simulationen davor, im Stillstand bei Nacht, wobei alle Geräte ausgeschaltet sind. Innerhalb einer Minute haben die Krankenhelfer den KTW bestiegen und beginnen die Anfahrt zum Einsatzort.
Der KTW benötigt für die Fahrt zum Einsatzort acht Minuten. Mit Beginn der Fahrt setzt auch die Temperaturregelung ein, je nach dem ob es sich um Sommer, Winter oder die Übergangszeit handelt. Mit Ausnahme von gelegentlichem Funkverkehr und dem Einsatz der Fahrassisstenz werden keine weiteren Geräte genutzt. Nach der Anknuft am Einsatzort erfolgen für zehn Minuten die Erstversorgung und Kontaktaufnahme mit dem Patienten 1. Anschließend wird der Patient 1 über die elektrische Einstiegshilfe in den KTW eingeladen und weiter umsorgt. Mit dem Einladen des Patientens 1 wird die Innenbeleuchtung im Patientenraum für die Dauer des Aufenthaltes von Patient 1 im KTW eingeschaltet. Die Krankenhelfer erfassen die Patientendaten durch Nutzung der elektrischen Geräte der Datenerfassung. Da sich der Zustand des Patienten nicht schlagartig ändert, kommen während des Krankentransports keine weiteren medizinischen Geräte zum Einsatz. Nach fünf-minütigem Einladen wird der Patient 1 für die Dauer von 25 Minuten zum Zielort transportiert. Während des Transportes sind außer der Innenbeleuchtung, den Fahrtassisstenten, der Patientendatenerfassung und seltener der Funkanlage keine weiteren Geräte in Betrieb. Schließlich wird der Patient 1 innerhalb von einer Minute am Zielort abgesetzt. Es folgt die Anfahrt zum nächsten Patienten 2, währenddessen lediglich die Funkanlage und die Temperaturregelung aktiv sind.
Innerhalb der Gesamtdauer des Einsatztages von 540 Minuten werden elf Patienten von dem KTW eingeladen und zum entsprechenden Zielort transportiert. Der grundlegende Ablauf der Krankentransporte bleibt dabei für jeden Patienten gleich, da die Simulation nicht auf der Basis von realen Fahrtdaten beruht und eine willkürliche Veränderung der Transportchronologie mit variierenden Zeitabläufen nicht zielführend ist. Vielmehr wurde eher in Betracht gezogen, dass sich der Zustand des Patienten schlagartig ändern kann oder dass dieser medizinische Geräte aus dem eigenem Besitz für den Transport benötigt. Demnach benötigen die Patienten 3, 6 und 9 den Einsatz des Wechselrichters für ihre eigenen medizinisch-elektrischen Geräte, wie beispielsweise tragbare Heimbeatmung- oder Blutdruckmessgeräte. Im Falle der Patienten 3 und 7 werden akute Szenarien untersucht, bei denen der Defibrillator mehrmals während des Krankentransports zum Einsatz kommt. Für den akuten Fall wird ebenfalls die Sondersignalanlage in ihrem zugelassen Rahmen eingesetzt. Schließlich befindet sich der KTW wieder am Ausgangsort. Alle Geräte befinden sich im ausgeschaltetem Zustand wie zu Beginn der Simulationen.

4 Ergebnisse der Simulation

Nach der Erläuterung der Simulationsszenarien erfolgt die Beschreibung der Kurvenverläufe für die Simulationsvarianten eines RTW's und eines KTW's. Es werden die einzelnen Verläufe von Leistung und Energie hinsichtlich ihrer Darstellung näher erläutert. Dabei werden die Ergebnisse gegenübergestellt und Vergleiche gezogen. Es werden Besonderheiten hervorgehoben und zusätzliche Berechnungen erbracht, welche in die anschließende Diskussion der Ergebnisse einfließen. Eine genaue Deutung und Auswertung der Ergebnisse und Berechnungen erfolgt in der anschließenden Diskussion in Kapitel 5. Alle wichtigen Ergebnisse der Simulationsvarianten werden im letzten Unterkapitel in einer Tabelle zusammenfassend dargestellt

4.1 Simulationsvariante RTW Fahrtvariante 1

Bei der Betrachtung von Abbildung 4.1 erkennt man den Verlauf des momentanen Leistungsbedarfes[3] eines RTW's innerhalb eines Zeitraumes von 0 bis 52 Minuten. Dabei entsprechen die Kurven den Jahreszeiten, welche als Sommer in rot, Winter in blau und die Übergangszeit in orange gekennzeichnet sind. Es werden nahezu periodische Anstiege in den Kurvenverläufen von Winter und Sommer für die Fahrtvariante 1 des RTW's dargestellt. Die Übergangszeit sticht durch einen relativ flachen Kurvenverlauf mit selten Leistungsspitzen heraus. Zu Beginn und Ende der Kurvenverläufe beträgt die Leistung jeweils 0 kW. Ebenso nähern sich die Kurvenverläufe in wiederkehrenden Abständen der Zeitachse, wie beispielsweise von Minute 8 bis 10 oder Minute 23 bis 25. Besonders auffällig sind die Spitzenwerte bei Minute 16, da diese im Gegensatz zu den vorherigen und darauffolgenden Spitzenniveaus um gut 0,5 kW höher ausfallen. Ebenfalls auffällig ist, dass bei der Übergangszeit bis zur Minute 29 kaum Leistungsspitzen zu verzeichnen sind, mit Ausnahme von denen bei Minute 16 und 20.

[3] Sämtliche Energie- und Leistungswerte beziehen sich im Kapitel 4 auf die zusätzliche Ausstattung von medizinischen Einsatzfahrzeugen, für die die Modellauslegung erfolgte.

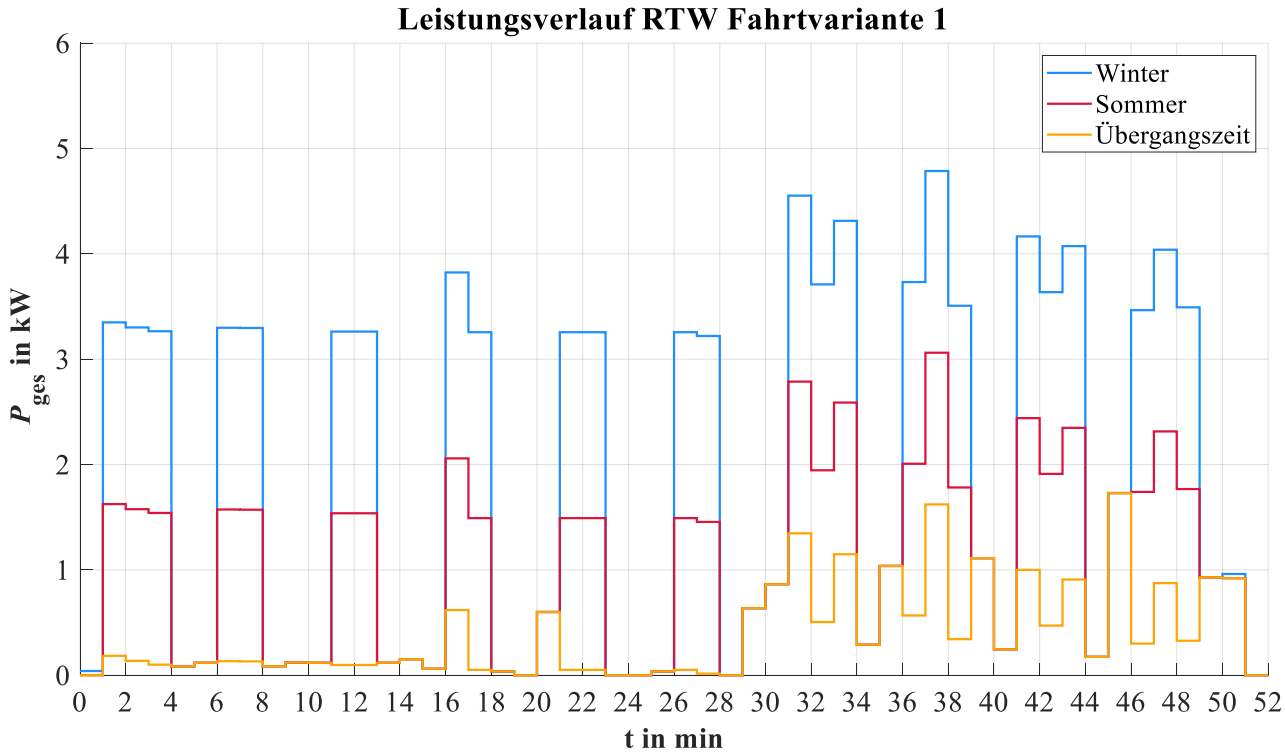

Abbildung 4.1 Leistungsverlauf RTW Fahrtvariante 1

Ab Minute 29 erreichen die Leistungswerte ein höheres Niveau, wobei die Kurvenverläufe um durchschnittlich ca. 1 kW steigen und ab Minute 51 auf 0 kW fallen. Die Verläufe werden unregelmäßiger, sodass mehrere Leistungsspitzen in kürzeren Zeiträumen zu verzeichnen sind, bei denen die Leistung um ihre Maximalwerte schwankt. Die höchsten Leistungswerte werden zur Minute 37 erreicht und betragen im Winter 4,79 kW, im Sommer 3,06 kW und in der Übergangszeit während der 45. Minute 1,73 kW. Mit Blick auf die Kurvenverläufe der Jahreszeiten lässt sich feststellen, das im Winter die größte Gesamtleistung bezogen wird. Im Sommer wird in etwa die Hälfte der Gesamtleistung in Bezug auf den Winter benötigt. Obwohl bei der Übergangszeit bis Minute 29 nur ein geringfügiger Leistungsbedarf zu verzeichnen ist, steigen die Leistungswerte ab der 29. Minute auf ca. ein Viertel der Werte des Winters. Über den Zeitraum der Kurvenverläufe kann in jedem Zeitschritt der Anstieg berechnet und so der maximale Anstieg des jeweiligen Verlaufes ermittelt werden. Nach Formel (4.1) können die Anstiege *m* für die jeweilige Zeitabschnitte von einer Minute berechnet werden:

$$m = \frac{\Delta P_{ges}}{\Delta t} \tag{4.1}$$

Es ergeben sich maximale Leistungsanstiege m_{max} bei Minute 41 von 3,92 kW/min für den Winter, 2,19 kW/min für den Sommer und in der 45. Minute 1,55 kW/min für die Übergangszeit.

Die Abbildung 4.2 zeigt den Gesamtenergiebedarf eines RTW's für die Fahrtvariante 1 über einem Zeitraum von 0 bis 52 Minuten. Es sind drei farbige Kurvenverläufe, blau für den Winter, rot für den Sommer und orange für die Übergangszeit, zu erkennen. Die Kurvenverläufe steigen mit fortschreitender Zeit sukzessive an, wobei der Anstieg wechselweise stark oder schwach ausfällt. Dennoch stellt sich eine erkennbare Linearität in den Energieverläufen ein. Ab der Minute 29 steigen alle Kurven steiler an als zuvor. Nach 52 Minuten erreichen die Kurvenverläufe ihre Maxima. Diese liegen im Winter bei 1,67 kWh, im Sommer bei 0,94 kWh und in der Übergangszeit bei 0,34 kWh. Somit liegt nach Ablauf von 52 Minuten der Energiebedarf im Winter um 1,33 kWh und im Sommer um 0,6 kWh höher als bei der Übergangszeit. Für den Winter wird demnach die meiste Energie benötigt. Bezugnehmend auf den Energieverbrauch im Winter wird im Sommer etwa halb so viel Enerrgie verrbraucht und während der Übergangszeit ungefähr ein Viertel.

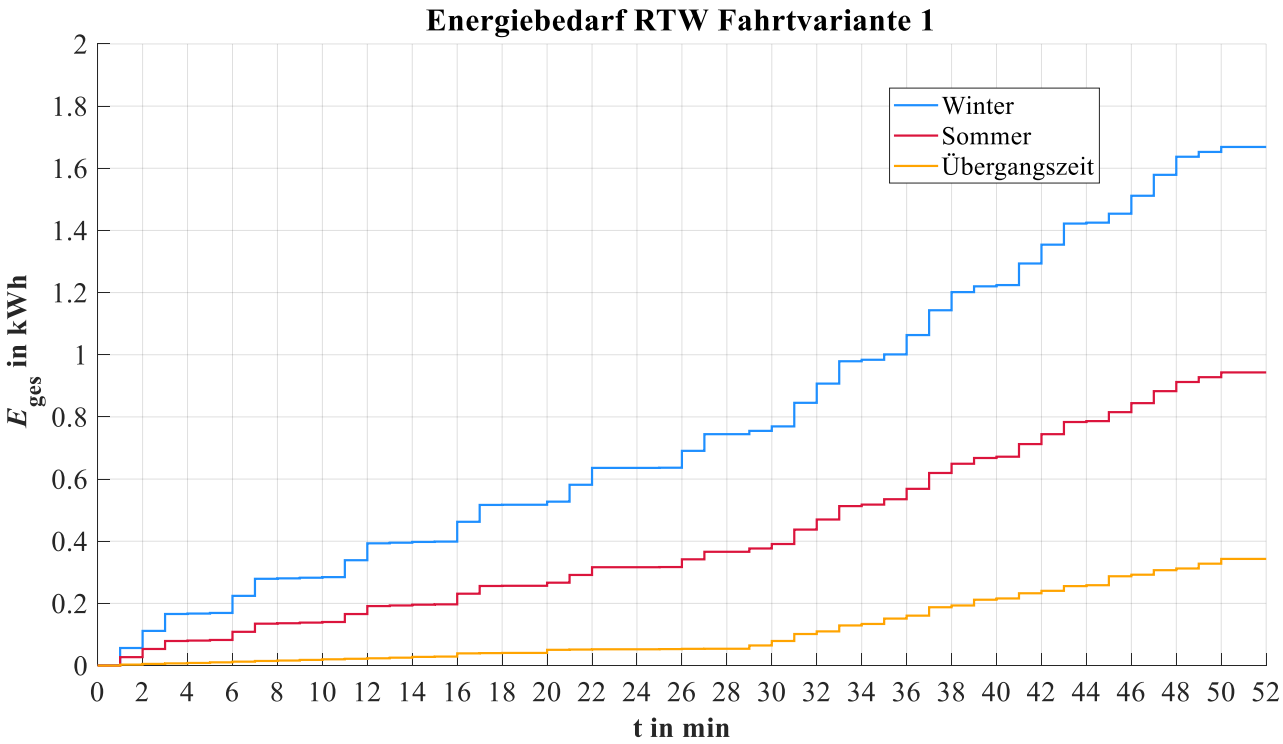

Abbildung 4.2 Energiebedarf RTW Fahrtvariante 1

Sämtliche Rechnungen und Ergebnisse sind auf der CD-ROM unter der Excel-Datei *BA Plots.xslx* vorzufinden.

4.2 Simulationsvariante RTW Fahrtvariante 2

In der Abbildung 4.3 werden die Kurvenverläufe für die Leistungen der Fahrtvariante 2 angezeigt. Wie schon bei der Fahrtvariante 1 werden in dem Diagramm die Jahreszeiten für die Dauer von 52 Minuten farblich unterschieden. Ähnlich der Fahrtvariante 1 lässt sich ein periodisches Verhalten in den Anstiegen der Leistungsverläufe erkennen. Im Gegensatz zur Fahrvariante 1 fällt der zeitliche Bereich, in dem die Leistung ein höheres Niveau annimmt, bei der Fahrtvariante 2 kürzer aus. Ebenso scheinen alle Kurvenverläufe von Minute 28 bis 30 dieselben Leistungsspitzen anzunehmen.

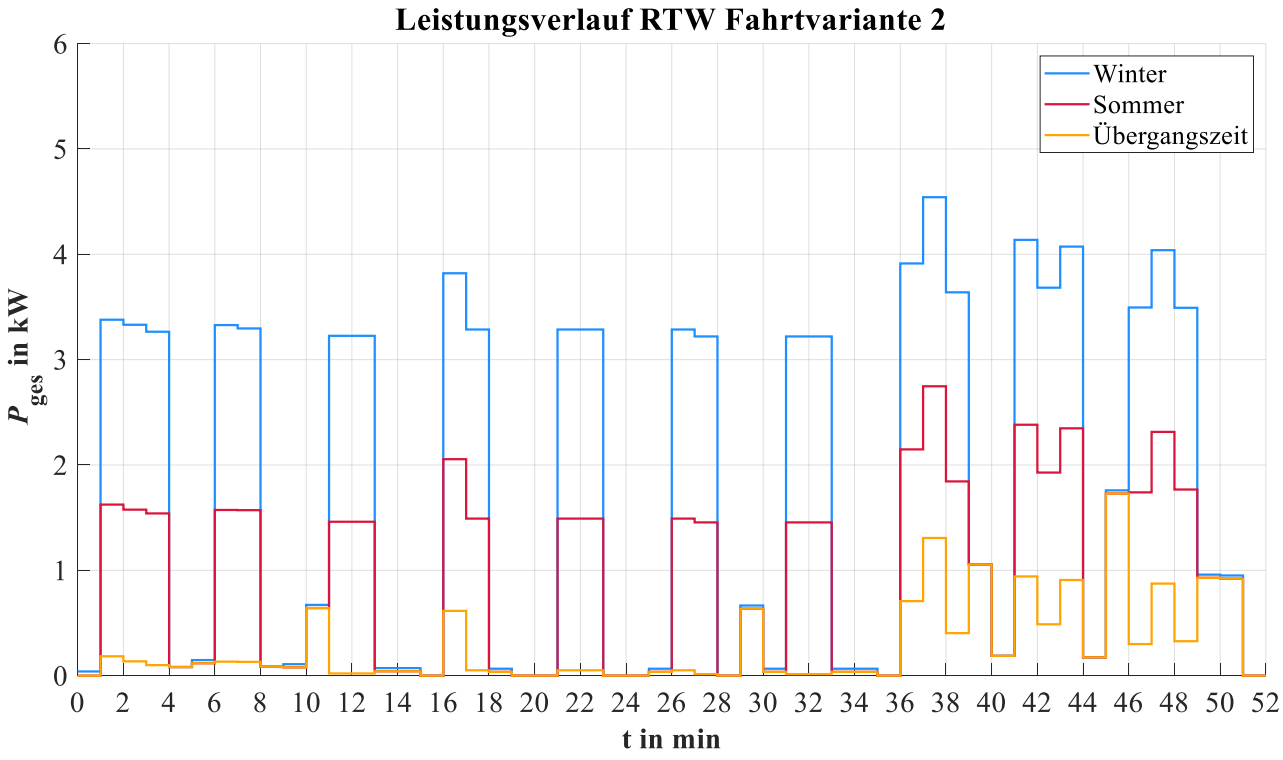

Abbildung 4.3 Leistungsverlauf RTW Fahrtvariante 2

Wiederum gemeinsam haben die Fahrtvarianten 1 und 2 den Beginn und das Ende der Verläufe bei 0 kW, sowie das häufiger vorkommende Sinken der Leistung auf fast 0 kW über den gesamten Zeitraum. Die Leistungsspitzen bei Minute16 stechen erneut hervor, allerdings ist bei der Übergangszeit die zweite Leistungsspitze nun die erste bei Minute 10 anstatt bei 20. Zur Minute 29 sind in diesem Falle die Leistungsanstiege aller Kurvenverläufe gleich. Ab der Minute 35 ist ähnlich der Fahrtvariante 1 eine Steigung des Leistungsniveaus um ebenfalls ca. 1 kW zu erkennen.
Die höchsten Leistungswerte fallen im Vergleich zur Fahrtvariante 1 etwas geringer aus und betragen bei Minute 37 im Winter 4,54 kW und im Sommer 2,75 KW. In der

Übergangszeit während der 45. Minute bleibt die höchste Leistungsspitze bei 1,73 kW gleich. Die Verteilung der Größenverhältnisse zwischen den Jahreszeiten gleichen der Fahrtvariante 1 und die Leistungskurve im Winter nimmt ebenfalls die höchsten Werte an. Anhand der Formel (4.1) ergeben sich für den Winter 3,94 kW/min, für den Sommer 2,19 kW/min und für die Übergangszeit 1,55 kW/min als maximale Anstiege der Leistungen.

Wie schon in der Abbildung 4.2 dargestellt, zeigt die Abbildung 4.4 ebenfalls die Kurvenverläufe bezüglich des Energiebedarfs eines RTW's, allerdings für Fahrtvariante 2. Die farbliche Zurordnung ist gleich geblieben und die Kurvenverläufe ähneln stark denen aus der Fahrtvariante 1, wobei steilere Kurvenanstiege erst ab Minute 35 zu verzeichnen sind. Die erreichten Maxima nach 52 Minuten liegen leicht unter den Werten von Fahrtvariante 1 und betragen im Winter 1,53 kWh, im Sommer 0,82 kWh und in der Übergangszeit 0,25 kWh. Es ergeben sich Differenzen von 1,28 kWh zwischen Winter und Übergangszeit und 0,57 kWh zwischen Sommer und Übergangszeit.

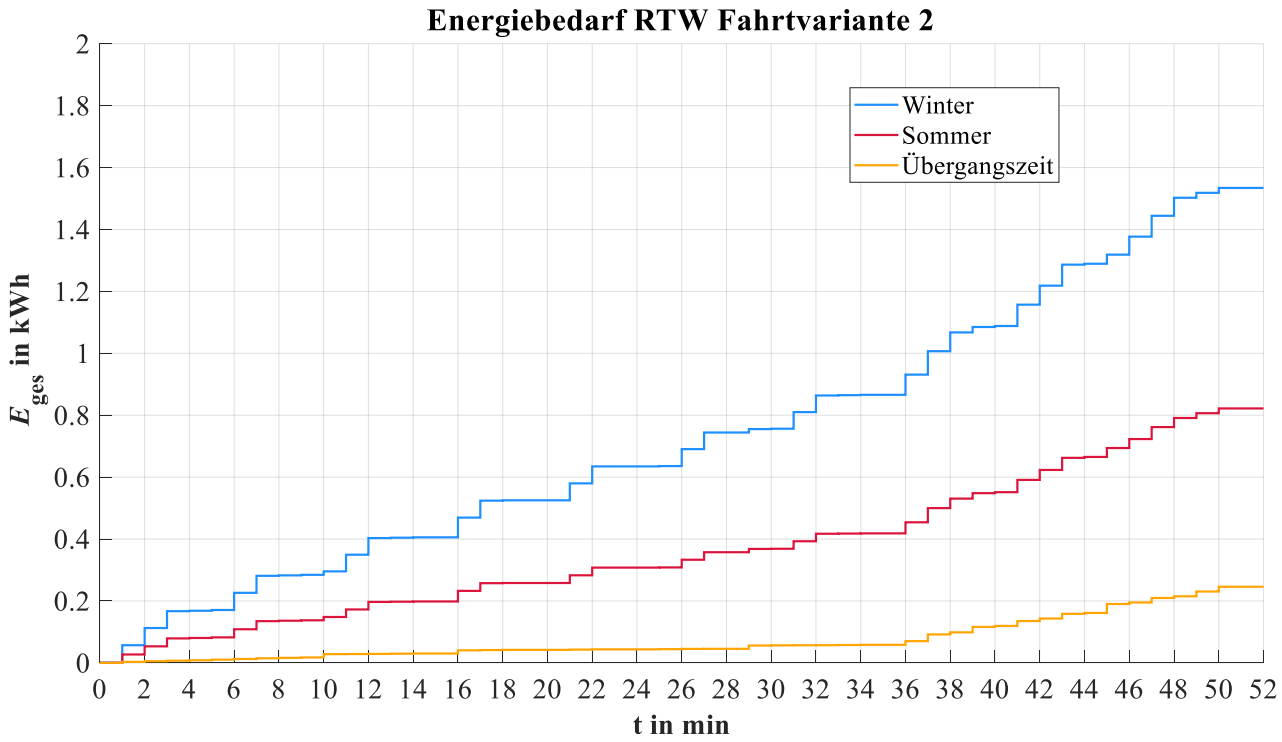

Abbildung 4.4 Energiebedarf RTW Fahrtvariante 2

Das Resultat des unterschiedlichen Energiebedarfs bei Fahrtvariante 2 ähnelt dabei stark dem Resultat aus Fahrtvariante 1. Sämtliche Rechnungen und Ergebnisse sind auf der CD-ROM unter der Excel-Datei *BA Plots.xslx* vorzufinden.

4.3 Simulationsvariante KTW

Aufgrund der Auflösung des Einsatztages eines KTW's in Minutenschritten musste der Kurvenverlauf der Gesamtleistung für die übersichtlichere Darstellung in der Abbildungen 4.5 in zwei Diagramme aufgeteilt werden. Gemäß der vorherigen Leistungsverläufe sind die Jahreszeiten Winter, Sommer und Übergangszeit für diese Simulationsvariante mit denselben Farben blau, rot und orange markiert wurden. Über die gesamten Kurvenverläufe kann festgestellt werden, dass einerseits der rote und blaue Kurvenverlauf ein starke Periodizität aufweisen, anderseits die orangene Kurve selten nennenswerte Leistungsanstiege zu verzeichnen hat. Besonders auffällig sind drei markante Abschnitte, in denen sich das Leistungniveau um etwas weniger als 1 kW erhöht. Diese Abschnitte stellen gleichzeitig die Momente der größten Leistungsumsätze der orangen Kurve dar. Das Auftreten dieser Leistungsanstiege findet in den Zeiträumen von Minute 118 bis 148, 266 bis 296 und 411 bis 441 statt, jeweils für 30 Minuten. Dabei ist auffällig, dass zwischen den Leistungsspitzen Zeiträume von ungefähr 2 Minuten auftreten, bei denen alle Kurvenverläufe scheinbar die gleichen Leistungswerte annehmen. Neben diesen Abschnitte gibt es zum einen kleinere Spitzenwerte über dem periodischen Leistungshöchstniveau, wie beispielsweise zur 21., 36. oder auch 166. Minute, zum anderen Zeitabschnitte von wenigen Minuten, in denen die Leistungen aller Kurven die gleichen Werte annehmen, wie bei Minute 18, 51 oder auch 266. In diesen Situationen treten ebenfalls neben den drei markanten großen Abschnitten die höchsten Leistungumsätze der orangen Kurve auf.
Die höchsten Leistungswerte werden zur Minute 132 erreicht und betragen im Winter 3,93 kW, im Sommer 2,37 kW und in der Übergangszeit 0,93 kW. Wie schon bei den vorherigen Simulationsvarianten werden im Winter die höchsten Leistungsumsätze erreicht, danach folgt der Sommer und der geringste Leistungsbeitrag fällt in der Übergangszeit an. Über die Formel (4.1) resultieren als maximale Anstiege der Leistungen für den Winter 3,82 kW, für den Sommer 2,26 kW und für die Übergangszeit 0,82 kW.

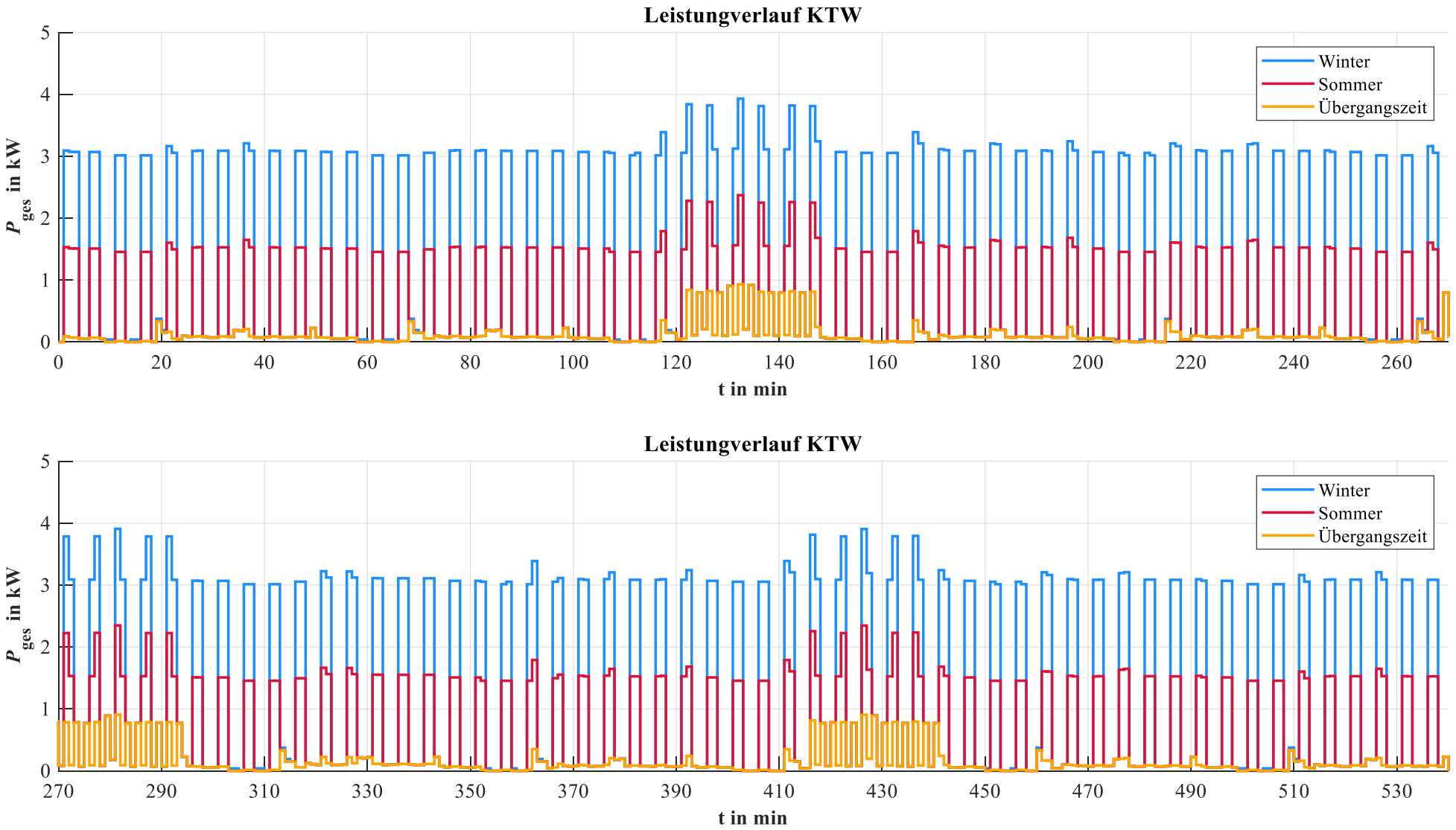

Abbildung 4.5 Leistungsverlauf KTW von 0 bis 270 min und 271 bis 540 min

Die Abbildung 4.6 zeigt den Energiebedarf eines KTW's und deren Kurvenverläufe während der unterschiedlichen Jahreszeiten. Im Vergleich zur Abbildung 4.5 wurde eine geringere zeitliche Auflösung gewählt, sodass eindeutig eine starke Linearität in den jeweiligen Energieverläufen zu erkennen ist. Innerhalb der Darstellung des Energieverlaufes über dem vollständigen Einsatzzeitraum von 540 Minuten werden besonders im orangenen Kurvenverlauf die drei markanten Abschnitte aus den Leistungsverläufen deutlich, welche sich als zwischenzeitlich leicht erhöhte Anstiege bemerkbar machen. Wie schon in den Abbildungen zuvor überwiegt der Energieumsatz im Winter deutlich denen im Sommer und der Übergangszeit. Als Endwerte des Energiebedarfs nach 540 Minuten Einsatzzeit stellen sich im Winter 12,1 kWh, im Sommer 6,41 kWh und in der Übergangszeit 1,2 kWh ein. Somit wird im Winter ungefähr doppelt so viel Energie wie im Sommer und fast 12-mal so viel wie in der Übergangszeit benötigt.

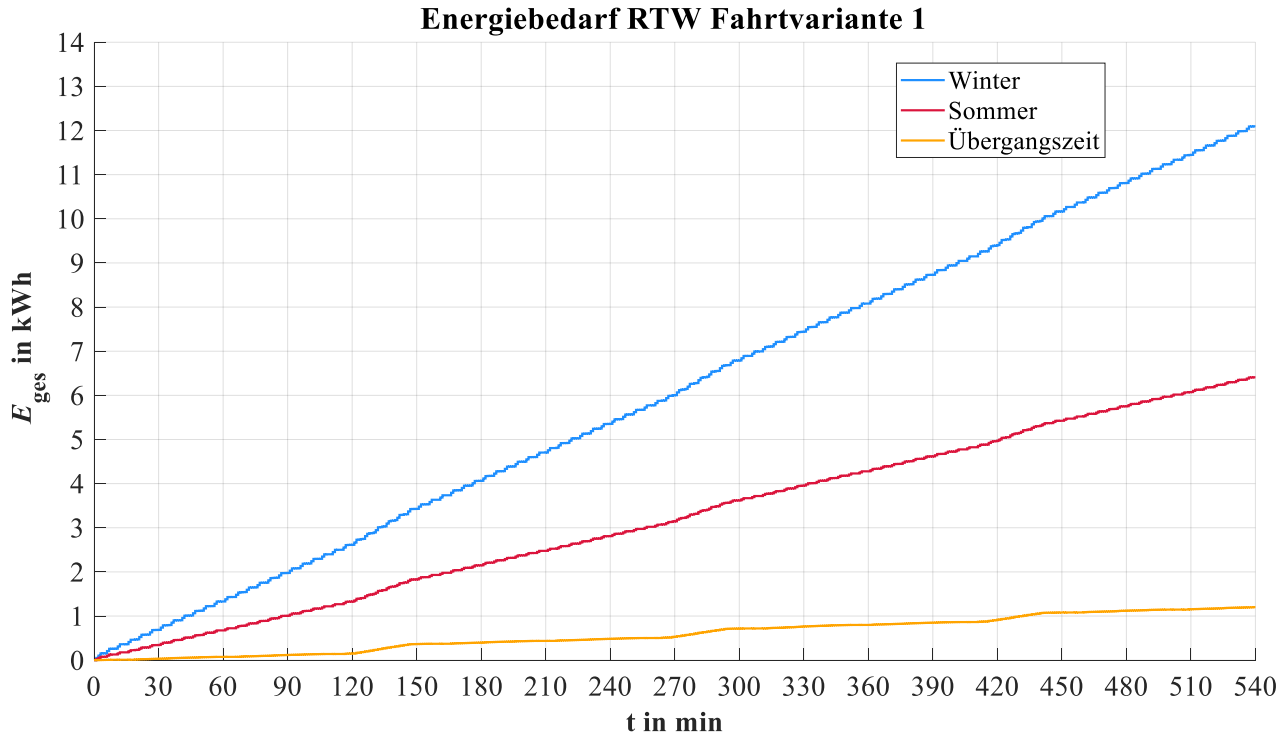

Abbildung 4.6 Energiebedarf KTW

Die Tabelle 4.1 soll einen Überblick über die wichtigsten Simulationsergebnisse aller Simulationsvarianten geben.

Tabelle 4.1 Übersicht der wichtigsten Simulationsergebnisse

Krankenkraft-wagentyp	Fahrt-variante	Jahreszeit	$P_{ges,max}$ in kW	m_{max} in kW/min	$E_{ges,max}$ in kWh
RTW	1	Sommer	3,06	2,19	0,94
		Übergangszeit	1,73	1,55	0,34
		Winter	4,79	3,92	1,67
	2	Sommer	2,75	2,19	0,82
		Übergangszeit	1,73	1,55	0,25
		Winter	4,54	3,94	1,53
KTW	1	Sommer	2,37	2,26	6,41
		Übergangszeit	0,93	0,82	1,2
		Winter	3,93	3,82	12,1

Vgl. BA Plots.xslx

Anhand der Tabelle wird deutlich, dass, in Bezug auf die maximale Gesamtleistung, den maximalen Anstieg und den Gesamtenergiebedarf, bei der Gegenüberstellung der Fahrtvarianten des RTW's während Fahrtvariante 1 leicht höhere Werte erzielt werden als bei der Fahrtvariante 2. Im Vergleich aller Werte bezogen auf die Jahreszeiten weist der Winter stets die höchsten Werte auf. Die Werte in der Übergangszeit sind am niedrigsten.
Beim KTW liegen die maximale Gesamtleistung und der maximale Anstieg niedriger als beim RTW, allerdings können RTW und KTW nicht miteinander verglichen werden, da beide Krankenkraftwagentypen eine unterschiedliche Ausstattung besitzen und auch die Einsatzzeiten stark voneinander abweichen. So wird beim KTW im Sommer und Winter ein deutlich höherer Gesamtenergiebedarf ermittelt als beim RTW.

5 Diskussion der Ergebnisse

Die Diskussion der Ergebnisse soll die Simulationsergebnisse reflektieren. Auf deren Basis können Rückschlüsse auf den Zusatzspeicher gezogen und zusätzliche Betrachtungen angesprochen werden, die in weiteren Überlegungen zur Auslegung des Energiespeichers resultieren sollen. In den folgenden Kapiteln erfolgt ebenfalls die explizite Deutung und Auswertung der Kurvenverläufe und ihrer Besonderheiten. Die Tabelle 5.1 am Ende des Kapitels fasst die wesentliche Rechenergebnisse zusammen.

5.1 Simulationsvariante RTW Fahrtvariante 1

Bereits in der Simulationsvariante 1 des RTW's konnte in dem Leistungsverlauf eine Periodizität der Anstiege erkannt werden. Da die Geräte der Temperaturregelung die größte Leistungaufnahme besitzen und in dem Simulationsablauf einen periodischen Betrieb annehmen, wird dies auf den Verlauf der Leistung übertragen. Somit wird unschwer erkennbar, dass die Temperaturregelung den größten Einfluss auf den Leistungsverlauf nimmt und diesen hauptsächlich definiert. Aufgrund dessen, dass die Energie und die Leistung eng miteinander verbunden sind, wirken sich die Leistungsanstiege direkt auf den Energiebedarf aus. Aus den periodischen Leistungsverläufen resultiert daher der lineare Anstieg des Energiebedarfs. Somit werden im Winter die höchsten Leistungsumsätze erzielt, da in dieser Jahreszeit allein die Heizung mit 3 kW als größter Verbraucher im Vergleich zu den anderen Jahreszeiten den Leistungsbedarf maßgeblich prägt und folglich auch der Energiebedarf einer Einsatzfahrt im Winter am größten wird. Während der Übergangszeit ist für den Simulationsfall keine Temperaturregelung erforderlich, mit Ausnahme der Belüftung des Patientenraumes, sodass während der Anfahrt lediglich die Sondersignalanlage einen Leistungsbedarf stellt. So kommt es innerhalb dieses Zeitraumes zu Momenten, in denen die Temperaturregelung der anderen Jahreszeiten inaktiv wird und alle Kurven dieselben Werte annehmen.
Zur Minute 16 konnte eine leichte Erhöhung des Spitzenniveaus in allen Kurvenverläufen festgestellt werden. Als Grund dafür ist der Betrieb des Schwebetisches zu nennen, welcher mit 600 W zu den größeren Verbrauchern zählt. Besonders in der orangenen Kurve wird der Einsatz des Schwebetisches deutlich, wie auch beispielsweise zu Minute 20. Die höchsten Spitzenwerte werden im Winter und Sommer zur selben Zeit erreicht, in der Übergangszeit jedoch erst später. Das ist dadurch zu begründen, dass zu den beiden Zeiten der Schwebetisch aktiv war, jedoch erst zu jenem späteren Zeitpunkt, in

Kombination mit anderen Geräten, den Spitzenwert für die Übergangszeit erzielte. Die Kurvenverläufe werden somit maßgeblich durch die größeren Verbraucher wie den Schwebetisch und die Heizung oder die Klimaanlage geprägt. Ebenfalls auffällig war der signifikante Leistungsanstieg ab der Minute 29. Ab diesem Zeitpunkt befand sich der Patient an Board, sämtliche Beleuchtungsanlagen wurden eingeschaltet sowie die benötigten medizinischen Geräte. Die Summe der aktiven Geräte beeinflusste merklich die Kurvenverläufe, nicht nur bei der Leistung, sondern auch bei dem Energiebedarf. Bei Betrachtung der orangenen Kurve konnte aufgrund der Temperaturunabhängigkeit der Einfluss der medizinischen Geräte direkt nachvollzogen werden. Somit kann als einen weiteren Einflussfaktor für den Leistungsumsatz und den Energiebedarf der Patient genannt werden, dessen Anwesenheit auf Basis des akuten Zustandes den Einsatz der erforderlichen Geräte beeinflusst.
Als höchsten Energiebedarf wurde für die Einsatzfahrt im Winter rund 1,7 kWh ermittelt. Basierend auf rund vier Einsätzen pro Einsatztag eines RTW's (120 Einsatzfahrten bei 32 RTW's) [46] würde unter der Annahme von gleichbleibenden Simulationsszenarien im Winter ein Tagesenergiebedarf von ca. 6,8 kWh anfallen. Als Energiedichten ρ wurden für einen Blei-Säure-Akku 30 bis 40 Wh/kg [47], bei einem Lithium-Ionen-Akku 120 bis 180 Wh/kg [47], lediglich 19 bis 38 Wh/Liter für eine Vanadium-Redox-Flow-Batterie [48] und 100 bis 1.000 Wh/kg bei einer Brennstoffzelle [49] angenommen. Somit können die theoretischen Massen M der Energiespeicher nach Formel (5.1) berechnet werden:

$$M = \frac{E_{ges}}{\rho} \tag{5.1}$$

Es ergeben sich zusätzliche Massen von 170 bis 226,7 kg für einen Blei-Säure-Akku, 37,8 bis 56,7 kg für einen Lithium-Ionen-Akku, 178,9 bis 357,9 Liter für eine Vandium-Redox-Flow-Batterie und 6,8 bis 68 kg bei einer Brennstoffzelle. Diese Massen basieren lediglich auf den Energiedichten der Speicher unter Ausschluss etwaiger zusätzlicher Bauteile des gesamten Speichers, welche zur zusätzlichen Masse beitragen können. Da ein Rettungswagen grundsätzlich die zulässige Gesamtmasse von 3,5 Tonnen übersteigt, wird der Besitz des C1-Führerscheins empfohlen, da durch diese Berechtigung Fahrzeuge bis 7,5 Tonnen Gesamtmasse geführt werden dürfen [50]. Ein hinzukommendes Gewicht durch einen Zusatzspeicher sollte die Grenze von 7,5 Tonnen mit Betrachtung der ermittelten theoretischen Zusatzmassen schwer erreichen oder überschreiten dürfen. Schließlich sollte noch der Leistungsgradient beachtet werden. Ein Leistungsgradient, oder auch Leistungsänderungsgeschwindigkeit, ist eine speicherabhängige Eigenschaft, die angibt, mit welcher Geschwindigkeit ein Speicher eine bestimmte Menge Energie bereitstellen kann [51]. Anhand des zuvor ermittelten maximalen Anstieges im Winter wird für diese Simulationsvariante ein Leistungsgradient von 3,92 kW/min vorausgesetzt.

5.2 Simulationsvariante RTW Fahrtvariante 2

Wie schon bei der ersten Simulationsvariante bestimmt auch in der zweiten die Temperaturregelung die Periodizität der Anstiege in den Kurvenverläufe. Die Kurven ähneln sich nicht nur in den periodischen Leistungsverläufen von Sommer und Winter, sondern auch in den linearen Anstiegen des Energiebedarfes. Trotz der gleichen Simulationszeiten wurde in der Fahrtvariante 2 ein geringerer Gesamtenergiebedarf ermittelt. Der Grund dafür liegt darin, dass die Anfahrt zum Einsatzort und der Transport des Patienten kürzer ausgefallen sind, als in der Simulationsvariante zuvor. Die Behandlung vor Ort hingegen dauerte deutlich länger an. Aus einer kürzeren Anfahrt und Transportzeit resultierten geringere Zeiträume, in denen die Sondersignalanlage und die benötigten medizinischen Geräte in Betrieb waren. Dies wirkte sich direkt auf den Energiebedarf des Einsatzfahrzeuges aus. Hingegen gleich geblieben sind die höchsten Leistungsumsätze im Winter aufgrund der Heizung, sowie die seltenen Momente an Leistungsumsätzen während der Übergangszeit vor dem Patiententransport.
In den Minuten 10 und 16 wird der Betrieb des Schwebetisches ebenfalls durch kleinere Leistungsspitzen deutlich, besonders zu Minute 29, bei der aufgrund des Einsatzes des Schwebetisches alle Kurven dieselben Leistungsanstiege zu verzeichnen haben. Da sich der Patient erst nach 35 Minuten Einsatzzeit an Board befindet, treten die höchsten Leistungsspitzen erst später ein als in dem Simulationsszenario zuvor. Dennoch sind die Zeitpunkte der höchsten Spitzenwerte im Sommer und Winter gleich. Einige Minuten später erfolgt der Spitzenwert der Übergangszeit. In dem Zeitraum des Patiententransportes fand, wie bereits zuvor beschrieben, der höchste Leistungsumsatz statt. Aus dem Simulationsszenario geht hervor, dass neben der Temperaturregelung, den medizinischen Geräten und der Anwesenheit des Patienten auch der Ablauf des Einsatzes den Energieverbrauch bestimmt, da kürzere Transporte kürzere Versorgungszeiträume für den Zusatzspeicher bedeuten.
Als höchsten Energiebedarf wurde für die Einsatzfahrt im Winter rund 1,5 kWh ermittelt. Unter der Annahme von vier Einsätzen pro Tag [46] ergibt sich ein Tagesenergiebedarf von 6 kWh, vergleichsweise etwas niedriger als in der Fahrtvariante zuvor. Auf Basis der Energiedichten der Energiespeicher [47][48][49] sind leicht geringere zusätzliche Massen aufgrund der geringfügig kleineren Tagesenergiemenge zu erwarten, welche kaum mit der zulässigen Gesamtmasse eines Rettungswagens kollidieren sollten [50]. Da in den Jahreszeiten Sommer und Übergangszeit ein geringerer Gesamtenergiebedarf erzielt wird, werden die Massen für die Energiespeicher folglich geringer ausfallen. Der Leistungsgradient der Simulationsvariante 2 beläuft sich laut der vorherigen Berechnungen auf 3,94 kW/min.

5.3 Simulationsvariante KTW

Von allen Simulationsvarianten fielen die Leistungskurven beim KTW mit der höchsten Periodizität der Anstiege aus. Da der Umfang der medizinischen Ausstattung eines KTW's gegenüber einem RTW deutlich geringer ist, trägt hauptsächlich die Temperaturregelung zum Leistungsumsatz bei. Mit Ausnahme von drei markanten Abschnitten werden in gleichen Abständen durchschnittlich gleiche Leistungsanstiege generiert, wobei kleinere Leistungsspitzen aus der höheren Aktivität der Gesamtheit der medizinischen Ausstattung resultieren. Während der drei Abschnitte mit einem höheren Leistungsniveau kam für den Zeitraum des Patiententransports jeweils ein Wechselrichter zum Einsatz, um die privaten medizinischen Geräte des Patienten zu versorgen. Da wie schon zuvor erwähnt die Temperaturregelung hauptsächlich im Sommer und Winter den Leistungsverlauf prägt, diese aber während der Übergangszeit nicht erforderlich ist, wird der Kurvenverlauf in dieser Jahreszeit hauptsächlich durch den Einsatz der übrigen Ausstattung geformt. Dies spiegelt sich auch in den Verläufen des Energiebedarfes wieder. Das linear steigende Verhalten wird lediglich durch die Momente, in denen die drei Patienten bei Einsatz des Wechselrichters transportiert werden, gestört. In akuten Situtation führte der Einsatz der Sondersignalanlage zu leichten Erhöhungen der Leistungskurve. Daraus folgt, das bei der Simulationsvariante KTW neben der Temperaturregelung besonders die Änderung des Patientenstatus den Leistungsverlauf maßgeblich beeinflussen kann.

Der höchste tägliche Energiebedarf wurde im Winter erzielt und beträgt ungefähr 12 kWh. Anhand der Energiedichten resultieren nach Formel (5.1) folgende Speichermassen für das Winterszenario: 300 bis 400 kg für den Blei-Säure-Akku, 66,7 bis 100 kg bei einem Lithium-Ionen-Akku, 315,8 bis 631,6 Liter für eine Vanadium-Redox-Flow Batterie und 12 bis 120 kg für eine Brennstoffzelle. Da ein KTW deutlich geringfügiger als ein RTW ausgestattet ist, wird in der Regel die zulässige Gesamtmasse von 3,5 Tonnen [52] nicht überschritten. Bei der Auswahl des gewünschten Energiespeichers sollte dabei die zusätzliche Masse beachtet werden, damit es zu keiner Überschreitung der 3,5 Tonnen kommt. Aufgrund der vorherigen Berechnungen wird für die Simulationsvariante des KTW ein Leistungsgradient von 3,82 kW/min vorausgesetzt. Im Vergleich fällt für den KTW pro Tag ein höherer Energiebedarf an als beim RTW, sodass auch mit größeren Energiespeichern gerechnet werden muss.

Tabelle 5.1 Übersicht der Rechenergebnisse

Simulations-variante	Leistungs-gradient in kW/min	E_{ges} in kWh	Speichertyp	ρ in Wh/kg in Wh/Liter	M in kg
1	3,92	6,8	Blei-Säure	30 bis 40	170 bis 226,7
			Lithium-Ionen	120 bis 180	38,8 bis 56,7
			Vanadium-Redox-Flow	19 bis 38	178,9 bis 357,9
			Brennstoffzelle	100 bis 1.000	6,8 bis 68
2	3,94	6	Blei-Säure	30 bis 40	150 bis 200
			Lithium-Ionen	120 bis 180	33,3 bis 50
			Vanadium-Redox-Flow	19 bis 38	157,9 bis 315,8
			Brennstoffzelle	100 bis 1.000	6 bis 60
3	3,82	12	Blei-Säure	30 bis 40	300 bis 400
			Lithium-Ionen	120 bis 180	66,7 bis 100
			Vanadium-Redox-Flow	19 bis 38	315,8 bis 631,6
			Brennstoffzelle	100 bis 1.000	12 bis 120

Vgl. Berechnungen: Ergebnisse Simulationen, Diskussion der Ergebnisse

Die Tabelle 5.2 zeigt eine Übersicht der Rechenergebnisse des 5. Kapitels. In allen Simulationsvarianten werden in etwa die gleichen Leistungsgradienten von rund 4 kW/min vorausgesetzt. Für jede Simulationsvariante wurde der Gesamtenergiebedarf eines Einsatztages im Winter als Orientierung für die Kapazitätsauslegung des Zusatzspeichers angegeben. Der KTW besitzt ungefähr einen doppelt so hohen Energiebedarf wie der RTW. Anhand des Energiebedarfes könne auf Basis der spezifischen Energiedichten der Speichertypen die jeweiligen theoretischen Massen ermittel werden. Es resultieren die höchsten Massen für die Vanadium-Redox-Flow-Batterie und die geringsten für die Brennstoffzelle.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit war es, ein Modell zu entwickeln, nach dem ein von der Traktionsbatterie unabhängiger Zusatzspeicher zur Versorgung der zusätzlichen Ausstattung eines medizinischen Einsatzfahrzeuges ausgelegt werden kann. Es wurde ein Simulationsmodell erstellt, durch das über die exemplarische Durchführung der Simulation zeitbasierte Kurvenverläufe für den Gesamtleistungs- und Energiebedarf eines Rettungswagens sowie eines Krankentransportwagens generiert wurden. Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse basiert auf den subjektiven Festlegungen des Durchführenden, da für den Simulationszweck keine realen Ablaufschemen verwendet wurden. Anhand der erstellten Simulationskonstruktes sollte ein Gefühl für die Einschätzung des Energieverbrauchs der Ausstattung eines elektrischen Krankenkraftwagens entwickelt werden. Dahingehend wurden bewusst gleiche Abläufe in den jeweiligen Simulationsvarianten gewählt, um Vergleiche besser ziehen und Besonderheiten hervorheben zu können. Als simulationsübergreifendes Ergebnis wurde ermittelt, dass die Auslegung des Energiespeichers hauptsächlich auf den Faktoren Patientenstatus, dessen Anwesenheit, den Fahrverlauf und die Temperaturverhältnisse entsprechend der Jahreszeit beruhen und die Leistung- und Energieverläufe maßgeblich beeinflussten. In der Diskussion wurde überwiegend das Winterszenario betrachtet, da in diesem Fall jeweils der größte Energiebedarf resultierte und sich bei der Auswahl und Festlegung des Speichers sowie seiner Kapazität an den höchsten Energiemengen als Richtwerte orientiert werden muss.

Als Zusatzspeicher zur Versorgung der medizinischen Ausstattung sind der Blei-Säure Akku und die Vanadium-Redox-Flow-Batterie aufgrund ihrer hohen Massen eher ungeeignet. Die Brennstoffzelle besitzt zwar die höchste Energiedichte, jedoch überwiegen die Nachteile gegenüber des Lithium-Ionen-Akkus im direkten Vergleich, sodass ein Lithium-Ionen-Akku eher als Zusatzspeicher zu empfehlen ist. Bei der Betrachtung der starken Leistungsschwankungen zwischen den verschiedenen Jahreszeiten sollte die Entscheidung getroffen werden, ob die Batterie entsprechend den Winterergebnissen dimensioniert, oder aber mehrere Fahrzeuge mit unterschiedlichen, den Jahreszeiten angepassten Speichern ausgestattet werden sollten. In jedem Fall sollte zwischen den einzelnen Fahrzeugtypen differenziert werden, da die Einsatzabläufe untereinander nicht vergleichbar sind. Somit benötigt jeder Fahrzeugtyp einen eigens dimensionierten Zusatzspeicher, um eine Über- bzw. Unterdimensionierung zu vermeiden. Des Weiteren sollte eine mögliche Sicherheitsreserve des Zusatzspeichers in Betracht gezogen werden. Beispielsweise könnte ein Notstromaggregat auf Basis einer Brennstoffzelle in Extremfällen, bei den die Simulationsergebnisse aufgrund überhöhter Einsatzanforderungen überschritten werden, die Lasten abfangen. Aufgrund der kleineren

Ausführung der Brennstoffzelle als Notstromaggregat überwiegen die Vorteile der hohen Energiedichte und der Nichtnutzung fossiler Brennstoffe den Nachteilen.
Die wissenschaftliche Arbeit bietet ebenfalls Ausbaupotential bei der Betrachtung anderen Fahrzeugtypen, die in der Kategorisierung von Krankenkraftwagen erwähnt wurden. Ebenso sollte sich mit geeigneten Ladetechniken unter dem Aspekt des Ladezustandes (SOC - State of Charge) befasst werden, abhängig von der Auswahl des Speichertypes des Zusatzspeichers. Schließlich sollte sich noch mit der mit der logistischen Anforderung auseinandergesetzt werden, wie und wo der zukünftige Zusatzspeicher in dem Patientenraum integriert werden soll.

7 Literaturverzeichnis

[1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „Rettungsdienstfahrzeuge und deren Ausrüstung - Krankenkraftwagen; Deutsche Fassung EN 1789:2020-12 “, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2020, p. 25-27, 40.

[2] Bundeszentrale für politische Bildung: „Energiewende“, [Online],
URL:
https://www.bpb.de/nachschlagen/lexika/lexikon-der-wirtschaft/159947/energiewende
[Zugriff am 12.05.2021].

[3] ev-volumes.com: „Global Plug-in Vehicle Sales Reached over 3,2 Million in 2020“, [Online],
URL:
https://www.ev-volumes.com/
[Zugriff am 12.05.2021].

[4] Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union : „Glossar für die Verkehrsstatistik“, [Online],
URL:
https://ec.europa.eu/eurostat/documents/portlet_file_entry/3859598/KS-GQ-19-004-DE-N.pdf/d5af3d7b-f3ed-4cac-b231-1a90d99e08e3
[Zugriff am 13.03.2021].

[5] Das Verkehrslexikon : „Sonderrechte - Einsatzfahrzeuge - Rettungsfahrzeuge - Wegerechtsfahrzeuge“, [Online],
URL:
https://verkehrslexikon.de/ModuleB/SonderRechte.php
[Zugriff am 13.03.2021].

[6] GSF Sonderfahrzeugbau GmbH : „Rettungswagen RTW“, [Online],
URL:
https://www.gute-sonder-fahrzeuge.de/ambulanz/rettungswagen-rtw/
[Zugriff am 13.03.2021].

[7] GSF Sonderfahrzeugbau GmbH : „Zertifiziert nach DIN EN ISO 9100:2015“, [Online],
URL:
https://www.gute-sonder-fahrzeuge.de/gsf/qualitat/
[Zugriff am 13.03.2021].

[8] Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen : „Geltende Gesetze und Verordnungen (SGV. NRW.) mit Stand 1.3.2021“, [Online],
URL:
https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_bes_detail?sg=0&menu=0&bes_id=4300&anw_nr=2&aufgehoben=N&det_id=344706
[Zugriff am 13.03.2021].

[9] Wikipedia : „Krankenkraftwagen“, [Online],
URL:
https://de.wikipedia.org/wiki/Krankenkraftwagen
[Zugriff am 13.03.2021].

[10] Feuerwehr Lernbar : „Krankenkraftwagen“, [Online],
URL:
https://www.feuerwehr-lernbar.bayern/lexikon/k/krankenkraftwagen/
[Zugriff am 13.03.2021].

[11] Bayerisches Rotes Kreuz: „Krankentransportwagen für Bayern“, [Online],
URL:
https://www.rettungsdienst.brk.de/abteilung/beschaffung/krankentransportwagen-ktw.html
[Zugriff am 13.03.2021].

[12] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katatstrophenhilfe: „Notfallkrankenwagen Typ B“, [Online],
URL:
https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Plakate/Plakat_KTW-A3.pdf?__blob=publicationFile
[Zugriff am 13.03.2021].

[13] Malteser Hilfsorganisation: „Neuer Notfall-Krankenwagen für den Katastrophenschutz in Neumünster“, [Online],
URL:
https://www.malteser-im-norden.de/news-listenansicht/news-detailansicht/news/beispiel-titel566.html?utm_source=https://www.google.com/
[Zugriff am 13.03.2021].

[14] Bayerisches Rotes Kreuz: „Rettungswagen für Bayern“, [Online],
URL:
https://www.rettungsdienst.brk.de/abteilung/beschaffung/rettungswagen-rtw.html
[Zugriff am 13.03.2021].

[15] Süddeutsche Zeitung: „Rettungsdienst unter Strom“, [Online],
URL:
https://www.sueddeutsche.de/auto/elektromobilitaet-rettungsdienst-unter-strom-1.4936312
[Zugriff am 13.03.2021].

[16] ADAC: „VW e-Crafter: Leise und sauber auf der letzten Meile“, [Online],
URL:
https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/vw-e-crafter/
[Zugriff am 13.03.2021].

[17] auto motor sport: „VW senkt den Preis des Elektro-Transporters“, [Online],
URL:
https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/fahrbericht-marktstart-preis-vw-e-crafter-2018-elektro-transporter/
[Zugriff am 13.03.2021].

[18] auto motor sport: „Prototyp im Großstadteinsatz“, [Online],
URL:
https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/rettungswagen-elektroantrieb-hannover/
[Zugriff am 13.03.2021].

[19] Feuerwehr Ochtrup: „E-Mobilität in der Nofallversorgung?! - Testphase an der Rettungswache Ochtrup“, [Online],
URL:
https://www.feuerwehr-ochtrup.de/e-mobilitaet-in-der-notfallversorgung-testphase-an-der-rettungswache-ochtrup/
[Zugriff am 13.03.2021].

[20] Skript Hochschule-Magdeburg-Stendal: „Bordnetzstruktur - Aufbau, Struktur und Energiefluss“, E-Mobility Bordnetze, ELENA, 2020

[21] DATACOM Buchverlag GmbH: „48-V-Bordnetz“, [Online],
URL:
https://www.itwissen.info/48-V-Bordnetz-48-V-on-board-power.html
[Zugriff am 13.03.2021].

[22] Miunske GmbH: „CAN-Systeme von Miunske im Rettungseinsatz“, [Online],
URL:
https://developer.miunske.com/de/referenzen/can-systeme-von-miunske-im-rettungseinsatz
[Zugriff am 13.03.2021].

[23] Reif, K. : „Batterien, Bordnetze und Vernetzung“, K. Reif, Springer Link, 2010, p. 10-11, 134-135.

[24] Ambulanz Mobile GmbH, „Energiebilanz Elektrofahrzeug“, 2014.
[25] Ambulanz Mobile GmbH, „Entwicklung Energiebilanz“, 2020.
[26] Duden Learnattack GmbH: „Elektrische Leistung“, [Online],
URL:
https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/elektrische-leistung
[Zugriff am 13.03.2021].
[27] Sterner, M.; Stadler, I. : „Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration“,
2. Auflage, Berlin, Springer-Verlag, 2017, p. 26, p. 195-228, p. 229-326,
p. 327-493, p. 495-577, p. 579-618.
[28] VDI Verlag GmbH: „Technologien des Energiespeicherns - ein Überblick“,
[Online],
URL:
https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/technologien-des-
energiespeicherns-ein-ueberblick/
[Zugriff am 31.03.2021].
[29] Greenhouse Media GmbH: „Energiespeicher - Technologien im Überblick“,
[Online],
URL:
https://www.energie-experten.org/erneuerbare-
energien/oekostrom/energiespeicher
[Zugriff am 31.03.2021].
[30] BVEG: „Speicher im Untergrund“, [Online],
URL:
https://www.bveg.de/Erdgas/Erdgasspeicher/Speicher-im-Untergrund
[Zugriff am 13.04.2021].
[31] Uni Hamburg Newsroom: „Wir müssen bald mehr Energie speichern als je zuvor“,
[Online],
URL:
https://www.uni-hamburg.de/newsroom/im-fokus/2019/1121-
elektromobilitaet.html
[Zugriff am 13.04.2021].
[32] Skript Hochschule Magdeburg-Stendal, 6. Semester Bachelor ET, 2020.
[33] IDG Business Media GmbH: „USV-Know-How: Akkus für unterbrechungsfreie
Stromversorgung“, [Online],
URL:
https://www.tecchannel.de/a/usv-know-how-akkus-fuer-unterbrechungsfreie-
stromversorgungen,1772944,2
[Zugriff am 14.04.2021].

[34] MATSCH&PISTE Media UG: „Blei-Säure, AGM-Batterie und Co. - Wie die Autobatterie funktioniert“, [Online],
URL:
https://matsch-und-piste.de/blei-saeure-agm-und-co-wie-die-autobatterie-funktioniert/
[Zugriff am 14.04.2021].

[35] Viessmann Climate Solutions Berlin GmbH: „Der Bleiakku speichert Photovoltaik-Strom“, [Online],
URL:
https://heizung.de/solartechnik/wissen/der-bleiakku-speichert-photovoltaik-strom/
[Zugriff am 14.04.2021].

[36] Elektronik-Kompendium.de: „Lithium-Ionen-Akkus“, [Online],
URL:
https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0810281.htm
[Zugriff am 14.04.2021].

[37] Groupe Renault: „Elektroauto: Wie funktioniert die Lithium-Ionen-Batterie“, [Online],
URL:
https://easyelectriclife.groupe.renault.com/de/ausblick/technologie/elektroauto-wie-funktioniert-die-lithium-ionen-batterie/
[Zugriff am 14.04.2021].

[38] Jungheinrich PROFISHOP AG & Co. KG: „Lithium-Ionen-Akkus – leistungsstarke Energiespeicher“, [Online],
URL:
https://www.jh-profishop.de/profi-guide/lithium-ionen-akkus/
[Zugriff am 14.04.2021].

[39] EnergieAgentur.NRW GmbH: „Funktionsweise einer Redox-Flow-Batterie: Elektro-chemische Stromspeicherung“, [Online],
URL:
https://www.energieagentur.nrw/mediathek/Grafik/funktionsweise_einer_redox-flow-batterie_elektro-chemische_stromspeicherung
[Zugriff am 16.04.2021].

[40] VDI Verlag GmbH: „Elektroautos mit Redox-Flow-Batterie können wirklich fahren“, [Online],
URL:
https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/fahrzeugbau/elektroautos-redox-flow-batterie-koennen-wirklich-fahren/
[Zugriff am 16.04.2021].

[41] Cleanthinking.de: „Redox-Flow-Batterie: Vorteile und Nachteile unterschiedlicher Flüssigbatterien“, [Online],
URL:
https://www.cleanthinking.de/redox-flow-batterie-vorteile-und-nachteile-von-fluessigbatterien-2/
[Zugriff am 16.04.2021].

[42] co2online gemeinnützige Beratungsgesellschaft mbH: „Was sind Brennstoffzellen - und wie funktionieren sie“, [Online],
URL:
https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/brennstoffzellen-heizung/was-sind-brennstoffzellen/
[Zugriff am 16.04.2021].

[43] Greenhouse Media GmbH: „Ratgeber Brennstoffzelle: Kraft-Wärme-Kopplung und Verkehr“, [Online],
URL:
https://www.energie-experten.org/heizung/brennstoffzelle
[Zugriff am 16.04.2021].

[44] Bundesanstalt für Straßenwesen: „Leistungen des Rettungsdienstes 2012/13“, [Online],
URL:
https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Publikationen/Berichte/unterreihe-m/2015-2014/m260.html
[Zugriff am 24.04.2021].

[45] openJur gUG: „Urteil vom 10.06.2008 - 13 A 1779/06, Absatz 21“ [Online],
URL:
https://openjur.de/u/129652.html
[Zugriff am 24.04.2021].

[46] Grundschule Jerstedt: „Wie oft fährt ein Rettungswagen raus?“ [Online],
URL:
http://grundschule-jerstedt.de/2018/11/15/wie-oft-faehrt-ein-rettungswagen-raus/
[Zugriff am 02.05.2021].

[47] PATONA International S.L.U.: „Akkuvergleich: Die Energiedichte verschiedener Akkutypen“ [Online],
URL:
https://pts-trading.de/blog/batteries/akkuvergleich-die-energiedichte-verschiedener-akkutypen
[Zugriff am 02.05.2021].

[48] Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V. (KLiB): „Vanadium-Redox-Flow-Batterie“ [Online],
URL:
https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/vanadium-redox-flow-batterie/
[Zugriff am 02.05.2021].

[49] DATACOM Buchverlag GmbH: „Energiedichte“ [Online],
URL:
https://www.itwissen.info/Energiedichte-energy-density.html
[Zugriff am 02.05.2021].

[50] Fahrschule Anja Sulk: „Vorteile des Besitzes des C1-Führerscheins für Fahrer von Rettungswagen“ [Online],
URL:
http://www.fahren-anja.de/news/30-vorteile-des-besitzes-des-c1-fuehrerscheins-fuer-fahrer-von-rettungswagen.html
[Zugriff am 02.05.2021].

[51] RP Photonics Consulting GmbH: „Leistungsänderungsgeschwindigkeit“ [Online],
URL:
https://www.energie-lexikon.info/leistungsaenderungsgeschwindigkeit.html
[Zugriff am 02.05.2021].

[52] Berufsfeuerwehr Stadt Osnabrück: „Vier Wagen für den Rettungsdienst“ [Online],
URL:
https://www.osnabrueck.de/feuerwehr/fahrzeuge/rettungswagen/
[Zugriff am 03.05.2021].

A Tabellen

Tabelle A.1 Hilfmittel zum Patiententransport

Nr.	Gerät	Norm	Krankenkraftwagentyp			
			A_1	A_2	B	C
1	Haupttrage/Fahrgestell	EN 1865-1:2010+A1:2015 oder EN 1865-2:2010+A1:2015	1	1	1	1
2	Schaufeltrage	EN 1865-1:2010+A1:2015	-	-	1	1
3	Vakuum-Matratze	EN 1865-1:2010+A1:2015	-	-	1	1
4	Gerät zur Beförderung eines sitzenden Patienten [a]	EN 1865-1:2010+A1:2015 und EN 1865-4:2012	1	1	1	X
5	Tragetuch oder Tragematratze	EN 1865-1:2010+A1:2015	1	1	1	1
6	Langes Wirbelsäulenbrett mit Kopfimmobilisierung und Sicherungsgurten	EN 1865-1:2010+A1:2015	-	-	X	X
7	Energetisch betriebener Treppentragestuhl [b]	-	X	X	X	X

[a] Sofern nicht die Haupttrage die Funktion dieser Geräte erfüllt.

[b] Alternative für Nr. 4.

Vgl. [1], Tabelle 9

Tabelle A.2 Ausrüstung zur Unterstützung der Atmung

Nr.	Gerät	Norm	Krankenkraftwagentyp			
			A_1	A_2	B	C
1	Stationäre Sauerstoffanlage[a], mindestens 2 000 l	prEN ISO 9170-1:2017	X	X	1	1
	Schnellkupplung	prEN ISO 9170-1:2017	-	-	1	1
2	Stationäre Sauerstoffanlage[b], mindestens 400 l	prEN ISO 9170-1:2017	1	1	1	1
	Schnellkupplung	prEN ISO 9170-1:2017	-	-	1	1
3	Beatmungsbeutel	-	X	X	1	1
4	Mund-zu-Mund-Beatmungshilfe	-	X	X	-	-
5	Fest installierte oder tragbare Absauganlage mit einem Unterdruck von mind. -65 kPa	EN 60601-1:2006+A12013 EN ISO 10079-1:2015+A1:2019 EN ISO 10079-3:2014	X	X	1	1
6	Manuelles tragbares Absauggerät	EN ISO 10079-2:2014	-	-	1	1
7	Demandventil	-	-	-	X	X

[a] In Krankenkraftwagen des Typs A_1 und A_2 ist eine geringere Kapazität von 1 000 l zulässig.

[b] In Krankenkraftwagen des Typs A_1 und A_2 ist eine geringere Kapazität von 200 l zulässig.

Vgl. [1], Tabelle 11

Tabelle A.3 Ausrüstung zur Diagnostik

Nr.	Gerät	Norm	Krankenkraftwagentyp			
			A_1	A_2	B	C
1	Manuelles Blutdruckmessgerät	-	-	-	1	1
2	Automatisches Blutdruckmessgerät	-	-	-	1	1
3	Pulsoximeter[a]	EN ISO 80601-2-61:2019	X	X	1	1
4	Stethoskop	-	-	-	1	1
5	Thermometer	EN 121470-1:2000+A1:2009	-	-	1	1
6	Blutzuckermessgerät	-	-	-	1	1
7	Diagnostik-Leuchte	-	-	-	1	1
8	12-Kanal-EKG[a]	-	-	-	X	1

[a] Wenn gewünscht, können zwei oder mehrere dieser Funktionen in einem Gerät kombiniert werden.

Vgl. [1], Tabelle 12

Tabelle A.4 Ausrüstung zur Infusion

Nr.	Gerät	Norm	Krankenkraftwagentyp			
			A_1	A_2	B	C
1	Infusionslösung, Liter	-	-	-	2	2
2	Zubehör für die Verabreichung von Injektionen und Infusionen	-	-	-	2	2
3	Infusionssystem	-	-	-	1	1
4	Infusionshalterung	-	1	1	2	2
5	Ausrüstung zur Druckinfusion	-	-	-	1	1
6	Kühlvorrichtung (Kühlbehältnis) für Infusionslösungen oder Medikamente	-	-	-	X	X

Vgl. [1], Tabelle 14

Tabelle A.5 Ausrüstung zur Behandlung lebensbedrohlicher Situtationen

Nr.	Gerät[a]	Norm	Krankenkraftwagentyp			
			A_1	A_2	B	C
1	Defibrillator mit Aufzeichnung des Herzrhythmus des Patienten	EN 60601-2-4:2011	1	1	1	1
2	EKG-Überwachungsgerät	EN 60601-2-27:2014	-	-	1	1
3	Externer Herzschrittmacher	EN 60601-2-4:2011	-	-	X	X
4	Tragbare Einheit zur Sicherung der Atmung	-	-	-	1	-
5	Erweiterte tragbare Wiederbelebungseinheit	-	-	-	-	1
6	Gerät zur Vernebelung von Medikament	EN 13544-1:2019	-	-	1	1
7	Thoraxdrainage-Ausrüstung	-	-	-	-	1
8	Volumenbezogene Spritzen-Infusionspumpe	-	-	-	-	1

Nr.	Gerät[a]	Norm	Krankenkraftwagentyp			
			A_1	A_2	B	C
9	Intraossärer Zugang	-	-	-	-	1
10	Notfall- und Transportbeatmungsgerät	EN 794-3:1998+A2:2009	-	-	-	1
11	Regulierbares oder festeingestelltes PEEP-Ventil	-	-	-	-	1
12	Kapnometer oder Kapnographie	EN ISO 80601-2-55:2018	-	-	X	1
13	Kardiovision	-	-	-	X	1
14	Tragbares Gerät für nicht-invasive CPAP-Anwendungen mit Druckanzeige	-	-	-	X	1
15	Thoraxkompressionsgerät	-	-	-	X	X

[a] Wenn gewünscht, können zwei oder mehrere dieser Funktionen in einem Gerät kombiniert werden.

Vgl. [1], Tabelle 15

Tabelle A.6 Kommunikationsausstattung

Nr.	Gerät	Norm	Krankenkraftwagentyp			
			A_1	A_2	B	C
1	Funksprechgerät	-	1	1	1	1
2	Handfunksprechgerät	-	-	-	1	1
3	Zugang zum öffentlich Telefonnetz	-	-	-	1	1
4	Tragbares Personenrufgerät	-	-	-	1	1
5	Gegensprechanlage zwischen Fahrer- und Patientenraum	-	1	1	1	1

Vgl. [1], Tabelle 19

B CD-ROM Verzeichnis

- Ergebnisse MATLAB Simulationen
- Excel-Tabellen Ambulanz Mobile GmbH
- Excel-Tabellen Simulationen
- MATLAB-Plots
- BA Plots
- Bachelorarbeit Felix Merkel
- Flagmodell
- Leistungmodell
- Modellauslegung_Bachelorarbeit
- Script_Modellauslegung
- Simulationsvarianten Legende