

**Einfluss des Akkus auf den Servicegrad von automatischen stationsbasierten
Pedelec-Vermietsystemen**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Alexander Bedrunka

aus Hannover

genehmigt von der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften

der Technischen Universität Clausthal,

Tag der mündlichen Prüfung

29.10.2019

Dekan

Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernd Lehmann

Vorsitzender der Promotionskommission

Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernd Lehmann

Betreuer

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Lars-Oliver Gusig

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei Prof. Dr. Hans-Peter Beck und Prof. Dr. Lars-Oliver Gusig für die Betreuung und die fachliche Unterstützung während der gesamten Promotion bedanken. Vielen Dank an die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme der Technischen Universität Clausthal, insbesondere an die Arbeitsgruppe Elektrische Energiespeichersysteme unter Leitung von Herrn Dr. Ralf Benger, und an den gesamten Kollegenkreis des Instituts für Konstruktionstechnik, Mechatronik und Elektromobilität der Hochschule Hannover für den fachlichen Austausch und die hilfreichen Gedankenanstöße.

Besonderer Dank gilt vor allem meinen Eltern, Peter und Getrud Bedrunka, und meiner Schwägerin Friederike Kraft, die mir in dieser Zeit immer wieder tatkräftig zur Seite standen und mich auch in schweren Zeiten zum Weitermachen ermutigt haben. Gleiches gilt natürlich auch für meinen Bruder, Sebastian Bedrunka, dem ich aufgrund seiner mentalen und lektorischen Unterstützung an dieser Stelle separat danken möchte.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen Freunden und Kollegen, Stefan Udema, Nils Wilcken, Fabian Hundertmark, Dimitri Bitner, Iris Sikorski und Henrik Rüscher, die mir beim Korrekturlesen tatkräftig zur Verfügung standen. Vielen Dank an Thiemo Schunder, der mich bei der Durchführung der Versuche unterstützt hat und danke an alle weiteren Freunde sowie Kolleginnen und Kollegen der Hochschule Hannover, die nicht namentlich aufgeführt sind, die aber in irgendeiner Art und Weise daran mitgewirkt haben, dass ich diese Worte hier schreiben darf.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	XI
Kurzfassung	XII
Abstract	XIV
1 Einleitung und Aufbau der Arbeit	1
1.1 Problemstellung und die daraus resultierende Forschungsfrage	2
1.2 Methodische Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit.....	3
2 Pedelecs in Vermietsystemen und die Auswirkungen auf den Servicegrad	5
2.1 Pedelecs als spezielle Form des Elektrofahrrades	5
2.2 Unterschiedliche Betriebstypen von Pedelec-Vermietsystemen	7
2.2.1 Aufbau & Funktionsweise von Pedelec-Vermietsystemen.....	8
2.2.2 Ladekonzepte in automatischen Pedelec-Vermietsystemen.....	10
2.2.3 Nationale und internationale Vermietsysteme	12
3 Servicegrad in automatischen stationsbasierten Pedelec-Vermietsystemen ...	15
3.1 Definition des Servicegrades für automatische stationsbasierte Pedelec- Vermietsysteme	16
3.2 Modellrelevante Einflussfaktoren auf den Servicegrad.....	18
4 Lade- und Alterungsverhalten von Lithium-Ionen-Akkus	23
4.1 Einflüsse auf den Alterungsprozess von Lithium-Ionen-Akkus.....	23
4.2 Vergleich vorhandener Ladeverfahren	26
4.3 Festlegung von Grenzwerten für das Schnellladen des betrachteten Akkus.....	28
5 Entwicklung eines Modells zur Berechnung des Servicegrades für automatische stationsbasierte Pedelec-Vermietsysteme.....	32
5.1 Entwicklung der Wirkungsstruktur für das Modell	32

5.2	Funktionale Zusammenhänge zwischen den abgeleiteten Einflussfaktoren.....	38
5.3	Quantifizierung modellrelevanter Einflussgrößen.....	41
5.3.1	Ermittlung der Häufigkeitsverteilung von Kundenanfragen über einen Zeitraum von 24 Stunden	43
5.3.2	Ermittlung der Häufigkeitsverteilung für die Dauer eines Mietvorgangs.....	45
5.3.3	Ermittlung der Häufigkeitsverteilung für die durchschnittliche Akkuleistung pro Mietvorgang	47
5.3.4	Verwendete Ladekurve für den Ladevorgang des Pedelec-Akkus ..	49
6	Überführung des Modells in eine Simulationsumgebung	51
6.1	Beschreibung der Algorithmen der einzelnen Unterprogramme.....	51
6.2	Validierung und Plausibilitätskontrolle für das entwickelte Modell	55
6.2.1	Bestimmung des Gültigkeitsbereiches	56
6.2.2	Plausibilitätskontrolle mittels Sensitivitätsanalyse	58
6.3	Berechnung des Konfidenzintervalls.....	65
7	Servicegradbetrachtung für das definierte Pedelec-Vermietsystem.....	68
7.1	Festlegung des minimal notwendigen SOC zur Freigabe der Pedelecs	68
7.2	Servicegrad für ein Pedelec-Vermietsystem mit einem maximalen Ladestrom	71
7.3	Servicegrad für ein Pedelec-Vermietsystem mit 0 A Ladestrom	75
7.4	Servicegrad für ein Pedelec-Vermietsystem mit 4 A Ladestrom	76
8	Experimentelle Bestimmung des maximalen Ladestroms und der Entladekapazität	83
8.1	Spezifikationen des <i>PowerPack 400</i> und der verwendeten Zellen.....	83
8.2	Versuchsaufbau und -durchführung	85
8.3	Beschreibung der Versuchsergebnisse	89

8.3.1	Ergebnisse des Ladeversuchs mit 4 A Ladestrom.....	89
8.3.2	Ergebnisse des Ladeversuchs mit 6 A Ladestrom.....	90
8.3.3	Ergebnisse des Ladeversuchs mit 6,4 A Ladestrom.....	90
8.3.4	Ergebnisse der Entladeversuche	91
8.4	Auswertung der Versuchsergebnisse	92
8.5	Ergänzung der Untersuchungen um eine Ladekurve mit 1 C Laderate.....	98
9	Einfluss der ermittelten Ladekurven auf den Servicegrad im Pedelec- Vermietsystem	100
9.1	Minimal notwendiger SOC in Abhängigkeit vom Ladestrom.....	100
9.2	Servicegradvergleich mit 6,4 A Ladestrom	102
9.3	Servicegradvergleich mit 11,4 A Ladestrom	104
9.4	Einordnung der verwendeten Ladeströme	106
9.5	Notwendigkeit des Schnellladens im Pedelec-Vermietsystem.....	109
9.6	Entwicklung des Verbesserungspotentials durch höhere Laderaten im Hinblick auf den Servicegrad bei modifizierten Modellgrößen	111
9.6.1	Optimaler Energieinhalt in Abhängigkeit von der Anzahl der Pedelecs und der Anzahl potentieller Kunden	112
9.6.2	Auswirkungen unterschiedlicher Mietdauern und Akkuleistungen auf den Servicegrad.....	114
9.7	Auswirkungen von niedrigen Temperaturen und Alterungseffekten auf den Servicegrad	117
10	Zusammenfassung & Ausblick	119
10.1	Zusammenfassung und Diskussion.....	119
10.2	Fazit und Ausblick.....	122
	Literaturverzeichnis	124
	Formelzeichen und Abkürzungen	134
	Anhang.....	137

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Verkaufszahlenentwicklung von Elektrofahrrädern in Deutschland von 2012 bis 2017	1
Abbildung 2.1: Aufbau des Pedelecs Winora B270.C 28" (Modell 2015)	6
Abbildung 2.2: Übersicht möglicher Betriebskonzepte von PVS	9
Abbildung 2.3: Pedelec-Ladestation im automatischen Vermietsystem „BiciMad“	13
Abbildung 3.1: Gründe ehemaliger Kunden des Vermietsystems <i>Capital Bikeshare</i> , die dazu geführt haben, den Service nicht mehr in Anspruch zu nehmen	15
Abbildung 3.2: Einfluss der mittleren Temperatur auf die Anzahl der täglichen Mietvorgänge pro Fahrrad für das FVS <i>B-Cycle</i> (Denver) im Zeitraum 2015 - 2017	20
Abbildung 4.1: Entwicklung der Kapazität in Abhängigkeit von der Zeit bei einer Spannung von 4,2 V und Lagertemperaturen von 0 °C, 10 °C, 20 °C und 30 °C aus dem Modell.....	24
Abbildung 4.2: Kapazitätsverlust bei verschiedenen Laderaten in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl für eine 18650 Akkuzelle aus LiCoO ₂ mit einer Nennkapazität von 2,4 Ah bei 25 °C.....	25
Abbildung 4.3: Strom- und Spannungsverlauf beim Ladevorgang der Akkuzelle Panasonic NCR18650F nach dem CCCV-Ladeverfahren	27
Abbildung 5.1: Prinzipdarstellung des beschriebenen Modells mit den Ursachen für unzufriedene Kunden	34
Abbildung 5.2: Wirkungsstruktur des entwickelten Modells.....	38

Abbildung 5.3: Häufigkeitsverteilung für den Zeitpunkt einer Anfrage t_{Anfrage} über einen Betrachtungszeitraum von 24 h (oben); Wahrscheinlichkeitsdichte der bimodalen Verteilung und den beiden einzelnen Normalverteilungen ($\mu_{A,1} = 9,11$ h; $\sigma_{A,1}^2 = 3,85$ h ² ; $\mu_{A,2} = 17,18$ h; $\sigma_{A,2}^2 = 8,85$ h ²) für das Vermietsystem <i>Citi Bike</i> im Jahr 2017 (unten)	43
Abbildung 5.4: Wahrscheinlichkeitsdichte der bimodalen Verteilung für den Anfragezeitpunkt t_{Anfrage} für die Vermietsysteme <i>Citi Bike</i> , <i>Indego</i> und <i>Capital BikeShare</i> im Jahr 2017	44
Abbildung 5.5: Häufigkeitsverteilung der Mietdauer und die dazugehörige Wahrscheinlichkeitsdichte der Gamma-Verteilung für das Vermietsystem <i>Citi Bike</i> im Jahr 2017	46
Abbildung 5.6: Wahrscheinlichkeitsdichte der Gamma-Verteilung für die Dauer eines Mietvorgangs für die Vermietsysteme <i>Citi Bike</i> , <i>Indego</i> und <i>Capital BikeShare</i> im Jahr 2017	47
Abbildung 5.7: Häufigkeitsverteilung der ermittelten durchschnittlichen Akkuleistung der insgesamt 615 Fahrten in Hannover und die dazugehörige Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung ($\mu_P = 123,92$ W; $\sigma_P^2 = 37,21$ W ²)	48
Abbildung 5.8: Aufteilung der Unterstützungsstufen für die Fahrten in Hannover.....	49
Abbildung 5.9: Verlauf des <i>SOC</i> für das <i>PowerPack 400</i> mit einer Kapazität von 11,4 Ah beim CCCV-Verfahren mit $I_{\text{Lade}} = 4$ A	50
Abbildung 6.1: Programmablaufplan für das Simulationsmodell zur Servicegradberechnung	52
Abbildung 6.2: Programmablaufplan für das Unterprogramm „Ladevorgang“	53
Abbildung 6.3: Programmablaufplan für das Unterprogramm „Mietvorgang“	54
Abbildung 6.4: Programmablaufplan für das Unterprogramm „Kundenanfrage“	55

Abbildung 6.5: Servicegrad SG_{ges} in Abhängigkeit von der Anzahl potentieller Kunden K_{pot} für 37.293 Szenarien aus dem Vermietsystem <i>Citi Bike</i> zur Festlegung des Gültigkeitsbereichs des Modells	57
Abbildung 6.6: Häufigkeitsverteilung und die Verteilungsfunktion für die Anzahl der täglichen Mietvorgänge pro Station für das Vermietsystem <i>Citi Bike</i> im Jahr 2017	57
Abbildung 6.7: Durchschnittliche Akkuleistung pro Fahrt über die Fahrdauer von 615 aufgezeichneten Fahrten im Vermietsystem der Hochschule Hannover	59
Abbildung 6.8: SG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{Pedelec} = 4$, $E_{Akku} = 370$ Wh, $t_{miet} = 15$ min, $\bar{P}_{Akku} = 125$ W und unterschiedlichen Verteilungen für $t_{Anfrage}$	61
Abbildung 6.9: SG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{Pedelec} = 4$, $E_{Akku} = 370$ Wh, $\bar{P}_{Akku} = 125$ W, $t_{miet} = 5$ min, 15 min & 25 min (oben); SG_{ges} in Abhängigkeit von t_{miet} für $n_{Pedelec} = 4$, $\bar{P}_{Akku} = 125$ W und $K_{pot} = 100$, 200 & 300	62
Abbildung 6.10: SG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{Pedelec} = 4$, $E_{Akku} = 370$ Wh, $t_{miet} = 15$ min, $\bar{P}_{Akku} = 75$ W, 125 W & 175 W; Servicegrad in Abhängigkeit von der Akkuleistung für $n_{Pedelec} = 4$, $\bar{P}_{Akku} = 125$ W und $K_{pot} = 100$, 200 & 300	63
Abbildung 6.11: SG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{Pedelec} = 4$, $E_{Akku} = 370$ Wh, $t_{miet} = 15$ min, $\bar{P}_{Akku} = 75$ W, 125 W & 175 W; Servicegrad in Abhängigkeit von der Akkuleistung für $n_{Pedelec} = 4$, $\bar{P}_{Akku} = 125$ W und $K_{pot} = 100$, 200 & 300	64
Abbildung 6.12: Verlauf des Servicegrades und des dazugehörigen 95 % - Konfidenzintervalls in Abhängigkeit von der Anzahl der Simulationsläufe für $n_{Pedelec} = 4$ $K_{pot} = 80$ (oben); Verlauf der absoluten Breite des 95 % - Konfidenzintervalls e und der Varianz S^2 in Abhängigkeit von der Anzahl der Simulationsläufe (unten)	67

Abbildung 7.1: SG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{Pedelec} = 2$ bei unterschiedlichen SOC_{min}	69
Abbildung 7.2: Häufigkeit von $K_{unzufrieden}$ und den Ursachen in Abhängigkeit von SOC_{min} für $n_{Pedelec} = 2$ und $K_{pot} = 100$	70
Abbildung 7.3: Durchschnittlicher Servicegrad von $K_{pot} = 0$ bis $K_{pot} = 250$ in Abhängigkeit von SOC_{min} für $n_{Pedelec} = 2$ (oben); lokales Maximum der Regressionfunktion für SOC_{min} in Abhängigkeit von $n_{Pedelec}$ (unten)	71
Abbildung 7.4: SG_{ges} über K_{pot} für verschiedene $n_{Pedelec}$ bei $I_{Lade} \rightarrow \infty$	72
Abbildung 7.5: η_P über \dot{K}_{pot} für $n_{Pedelec} = 1$ und $n_{Pedelec} = 2$ (oben) - $\Delta\eta_P$ zu $n_{Pedelec} = 1$ über $n_{Pedelec}$ für $\dot{K}_{pot} = 11$ (unten)	73
Abbildung 7.6: $\bar{t}_{Anfrage}$ bei $\dot{K}_{pot} = 11$ in Abhängigkeit von $n_{Pedelec}$ (links) - $\Delta\bar{t}_{Anfrage}$ pro Pedelec bei $\dot{K}_{pot} = 11$ (rechts)	74
Abbildung 7.7: SG_{ges} , SG_{Akku} und $SG_{Pedelec}$ in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{Pedelec} = 4$..	75
Abbildung 7.8: η_P über K_{pot} für verschiedene $n_{Pedelec}$ und $I_{Lade} = 0$ A	76
Abbildung 7.9: SG_{ges} über K_{pot} für $n_{Pedelec} = 4$ mit und ohne Ladestation, sowie ΔSG_{ges} zwischen den beiden Verläufen (oben) - SG_{ges} , $SG_{Pedelec}$ und SG_{Akku} (Akku & Pedelec) in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{Pedelec} = 4$ (unten)	77
Abbildung 7.10: Unzufriedene Kunden für $n_{Pedelec} = 4$ bei $K_{pot} = 100$ (oben) bzw. $K_{pot} = 200$ (unten) aufgeteilt in $K_{Pedelec}$ und K_{Akku} über einen Betrachtungszeitraum von 24 h.....	78
Abbildung 7.11: ΔSG_{ges} zwischen $SG_{ges}(I_{Lade} = 4$ A) im Vergleich zu $SG_{ges}(I_{Lade} \rightarrow \infty)$ in Abhängigkeit von $n_{Pedelec}$ und K_{pot}	79
Abbildung 7.12: SG_{ges} über K_{pot} für eine Lade- und eine Wechselakkustation.....	81
Abbildung 8.1: Ersatzschaltbild für den Ladeversuch	86
Abbildung 8.2: Temperaturverteilung der Außenschale des Akkupacks beim Laden mit $I_{Lade} = 4$ A.....	88

Abbildung 8.3: U_{Akku} und I_{Lade} (oben) und T_{Akku} (unten) über der Zeit für den Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$	89
Abbildung 8.4: U_{Akku} und I_{Lade} (oben) und T_{Akku} (unten) über der Zeit für den Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 6 \text{ A}$	90
Abbildung 8.5: U_{Akku} und I_{Lade} (oben) und T_{Akku} (unten) über der Zeit für den Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$	91
Abbildung 8.6: I_{Akku} und U_{Akku} über der Zeit für den Entladevorgang des <i>PowerPacks</i> nach dem Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$	92
Abbildung 8.7: E_{Lade} (oben) und $T_{\text{Akku,max}}$ (unten) in Abhängigkeit von I_{Lade}	95
Abbildung 8.8: Verlauf des SOC beim Ladevorgang mit unterschiedlichen I_{Lade}	96
Abbildung 8.9: Ladezeit- und SOC-Aufteilung in der CC- und CV-Phase für unterschiedliche I_{Lade}	97
Abbildung 8.10: Übertragener Verlauf von U_{Akku} und I_{Lade} (oben) und des SOC (unten) im CCCV-Verfahren mit $I_{\text{Lade}} = 11,4 \text{ A}$	98
Abbildung 9.1: Lokales Maximum der Regressionfunktion für SOC_{min} in Abhängigkeit von n_{Pedelec} für verschiedene Ladeströme	100
Abbildung 9.2: Häufigkeit von $K_{\text{unzufrieden}}$ und den Ursachen in Abhängigkeit von SOC_{min} für $n_{\text{Pedelec}} = 2$, $K_{\text{pot}} = 100$ und $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ (oben); Häufigkeit von $K_{\text{unzufrieden}}$ und den Ursache in Abhängigkeit von SOC_{min} für $n_{\text{Pedelec}} = 2$, $K_{\text{pot}} = 100$ und $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$ (unten)	101
Abbildung 9.3: SG_{ges} für $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ und $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$ und das daraus resultierende ΔSG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{\text{Pedelec}} = 4$	102
Abbildung 9.4: Vergleich von SG_{Akku} und SG_{Pedelec} für $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ und $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$ und die daraus resultierende Differenz in Abhängigkeit von K_{pot}	103
Abbildung 9.5: Differenz der Effizienz zwischen $\eta_{\text{P}}(I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A})$ und $\eta_{\text{P}}(I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A})$ in Abhängigkeit von \dot{K}_{pot} und n_{Pedelec}	104
Abbildung 9.6: SG_{ges} für $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ und $I_{\text{Lade}} = 11,4 \text{ A}$ und das daraus resultierende ΔSG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{\text{Pedelec}} = 4$	105

Abbildung 9.7: Differenz der η_P zwischen $\eta_P(I_{Lade} = 6,4 \text{ A})$ und $\eta_P(I_{Lade} = 11,4 \text{ A})$ in Abhängigkeit von \dot{K}_{pot} und $n_{Pedelec}$	106
Abbildung 9.8: Servicegradverlauf in Abhängigkeit von K_{pot} für verschiedene Ladeströme bei $n_{Pedelec} = 4$	107
Abbildung 9.9: ΔSG_{ges} für verschiedene Ladeströme im Vergleich zu SG_{ges} ($I_{Lade} = 4 \text{ A}$) in Abhängigkeit von $n_{Pedelec}$ und K_{pot}	108
Abbildung 9.10: $K_{unzufrieden}$ für $n_{Pedelec} = 4$ und $K_{pot} = 200$ aufgeteilt in $K_{Pedelec}$ und K_{Akku} über einen Betrachtungszeitraum von 24 h für unterschiedliche I_{lade}	109
Abbildung 9.11: $K_{unzufrieden}$ für $n_{Pedelec} = 4$ und $K_{pot} = 200$ aufgeteilt in $K_{Pedelec}$ und K_{Akku} über einen Betrachtungszeitraum von 24 h für I_{lade}	111
Abbildung 9.12: Optimum für E_{Akku} für $\Delta SG_{ges} \leq 5 \%$ zu SG_{ges} ($I_{Lade} \rightarrow \infty$) in Abhängigkeit von $n_{Pedelec}$ und K_{pot} bei unterschiedlichen Laderaten .	113
Abbildung 9.13: Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung der durchschnittlichen Akkuleistung mit $\mu_P = 124 \text{ W}, 130 \text{ W}, 150 \text{ W}$ und 175 W und $\sigma^2 = 37,21 \text{ W}^2$ (oben); Wahrscheinlichkeitsdichte der Gamma-Verteilung für die Mietdauer mit $\bar{t}_{miet} = 10 \text{ min}, 14 \text{ min}, 20 \text{ min}$ und 25 min (unten).....	114
Abbildung 9.14: Servicegradunterschied zwischen SG_{ges} ($I_{Lade} = 6,4 \text{ A}$) und SG_{ges} ($I_{Lade} = 4 \text{ A}$) in Abhängigkeit von $n_{Pedelec}$ und K_{pot} für unterschiedliche Erwartungswerte bei der Normalverteilung für die durchschnittliche Akkuleistung pro Fahrt.....	115
Abbildung 9.15: Servicegradunterschied zwischen SG_{ges} ($I_{Lade} = 6,4 \text{ A}$) und SG_{ges} ($I_{Lade} = 4 \text{ A}$) in Abhängigkeit von $n_{Pedelec}$ und K_{pot} für verschiedene durchschnittliche Mietdauern.....	116
Abbildung 9.16: SG_{ges} in Abhängigkeit von $n_{Pedelec}$ für $E_{Akku} = 296 \text{ Wh} \& 370 \text{ Wh}$, $\mu_P = 124 \text{ W}$ und $K_{pot} = 100$ (oben); Verhältnis von $n_{Pedelec,neu}$ zu $n_{Pedelec}$ in Abhängigkeit von K_{pot} für $\mu_P = 124 \text{ W} \& 200 \text{ W}$ und $n_{Pedelec} = 4$ (unten).....	118

Abbildung C.1: I_{Akku} und U_{Akku} über der Zeit für den Entladevorgang des
PowerPacks nach dem Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 6 \text{ A}$ 141

Abbildung C.2: I_{Akku} und U_{Akku} über der Zeit für den Entladevorgang des
PowerPacks nach dem Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 6,4$ 142

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Unterstützungsstufen des Antriebssystems <i>Active Line</i> mit zugehörigen Unterstützungsfaktoren	7
Tabelle 3.1: Endogene und exogene Faktoren in automatischen Vermietsystemen	19
Tabelle 3.2: Einteilung der Einflussfaktoren auf die Akkuleistung in die Kategorien des mehrdimensionalen Parameterraumes	21
Tabelle 5.1: Aus dem Wortmodell abgeleitete Modellgrößen	36
Tabelle 5.2: Überblick der in der Untersuchung berücksichtigten FVS.....	42
Tabelle 7.1: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile potentieller Maßnahmen zur Steigerung des Servicegrades	80
Tabelle 8.1: Gegenüberstellung der Spezifikationen für das <i>PowerPack 400</i> und der im <i>PowerPack</i> verwendeten Zelle	84
Tabelle 8.2: Übersicht der durchzuführenden Ladeversuche	87
Tabelle 8.3: Übersicht der Messfehler zu den jeweiligen Messgrößen.....	93
Tabelle 8.4: Ergebnisse der Entladevorgänge	96
Tabelle B.1: Parameter der Regressionsfunktion für den durchschnittlichen Servicegrad in Abhängigkeit von SOC_{min} und dem zugehörigen Maximum für $I_{Lade} = 4$ A und verschiedenen $n_{Pedelec}$	139
Tabelle B.2: Parameter der Regressionsfunktion für den durchschnittlichen Servicegrad in Abhängigkeit von SOC_{min} und dem zugehörigen Maximum für $I_{Lade} = 6,4$ A und verschiedenen $n_{Pedelec}$	139
Tabelle B.3: Parameter der Regressionsfunktion für den durchschnittlichen Servicegrad in Abhängigkeit von SOC_{min} und dem zugehörigen Maximum für $I_{Lade} = 11,4$ A und verschiedenen $n_{Pedelec}$	140

Kurzfassung

Pedelecs sind in den letzten Jahren zu einem wichtigen Baustein der deutschen Elektromobilitätswende geworden. Durch den Einsatz von Pedelecs in automatischen stationsbasierten Vermietsystemen im urbanen Raum ist eine Verkehrsalternative gegeben, die den Autoverkehr in Städten entlasten kann. Die Kundenzufriedenheit solcher Vermietsysteme wird über den Servicegrad bewertet und bildet das Verhältnis von zufriedenen Kunden zur Anzahl potentieller Kunden ab. Der Servicegrad kann dabei von verschiedenen exogenen und endogenen Faktoren beeinflusst werden. Die Untersuchung beschäftigt sich mit der Frage, ob es sich bei dem Akku um einen weiteren Einflussfaktor handelt.

Um die Auswirkungen auf den Servicegrad durch den Akku zu analysieren, werden zunächst mögliche Betriebs- und Ladekonzepte von Pedelec-Vermietsystemen dargestellt. Darauf aufbauend wird ein automatisches stationsbasiertes Pedelec-Vermietsystem definiert, welches in der nachfolgenden Untersuchung betrachtet wird. In diesem Zusammenhang wird der Servicegrad speziell für Pedelec-Vermietsysteme definiert und für die Untersuchung relevante Einflussfaktoren identifiziert. Über eine Modellentwicklung werden Rahmenbedingungen des betrachteten Vermietsystems festgelegt und die Beziehungen der identifizierten Einflussfaktoren untereinander visuell und anhand von Formeln dargestellt. Anschließend wird das Modell in eine Simulationsumgebung überführt, um den Servicegrad in verschiedenen Szenarien zu bewerten. Modellrelevante Eingangsgrößen werden hierbei auf Basis von vorhandenen Daten aus bestehenden Vermietsystemen und analysierten Fahrdaten quantifiziert und in das Modell integriert. Das Ladeverhalten bei verschiedenen Ladeströmen des in der Untersuchung betrachteten Akkus wird experimentell bestimmt und über den Verlauf des State of Charge ebenfalls modelliert. Hierdurch wird der Einfluss einer Schnelllademöglichkeit auf den Servicegrad analysiert.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass der Akku des Pedelecs einen weiteren Faktor darstellt, der zusätzlich für unzufriedene Kunden verantwortlich sein und den Servicegrad von automatischen stationsbasierten Pedelec-Vermietsystemen reduzieren kann. Insbesondere bei hochfrequentierten Stationen wird der Servicegrad durch den Einfluss des Akkus reduziert. Die Auswirkungen können durch die Erhöhung des Energieinhaltes des Akkus, die Anpassung des minimal notwendigen State of Charge sowie die Steigerung des Ladestroms minimiert werden. Das Verbesserungspotential dieser Maßnahmen

steigt mit Zunahme der Mietdauer und der durchschnittlichen Akkuleistung. Langfristig betrachtet ist insbesondere für hochfrequentierte Stationen die Anschaffung von zusätzlichen Pedelecs einer Erhöhung des Ladestroms vorzuziehen, da die Steigerung des Servicegrades durch diese Maßnahme höher ausfällt.

Abstract

During the last years, pedelecs became more and more important for the era of electromobility. The use of pedelecs in automated sharing systems in urban areas provides an alternative to the regular means of transport, in order to ensure traffic relieves in the cities. Within these sharing systems, the service rate describes the level of customer satisfaction. This parameter represents the ratio of satisfied customers to the total amount of customers and is influenced by different exogenous and endogenous factors.

As a first step in analyzing the impact of the battery on the service rate, common operating and loading concepts for pedelec sharing systems are displayed within the scope of the current state of technology. The definition of the system as well as the definition of the service rate are examined in the further course of the work. Regarding this, the focus is on the identification of potential influencing factors.

The development of a model leads to more framework conditions for the system. Furthermore, the relation between the identified factors is visualized and mathematically displayed. A transfer of the model into a simulation environment allows for the determination of the behavior of the service rate in different scenarios. The data analysis of real sharing systems and recorded trips results in the quantification of the models exogenous factors. Afterwards, these results are integrated into the simulation model. The performance and evaluation of experiments regarding battery charging determine the charging behavior with different currents. Subsequently, the SOC-profile is embedded into the simulation model. An evaluation shows the influence of fast charging on the service rate.

The results of the examination indicate that the battery of the pedelec is a potential factor causing unsatisfied customers. Therefore, it can reduce the service rate in automatic station-based pedelec sharing systems. Especially at highly frequented stations, the influence of the battery reduces the level of service. By increasing the energy content of the battery, adapting the minimal required state of charge and raising the charging current, the effect can be reduced. The improvement potential of these actions increases with a longer term of lease and a higher average battery power. In a longer-term perspective, the purchase of additional pedelecs is preferable to the increase of charging current due to a larger improvement of the service level, especially for highly frequented stations.

1 Einleitung und Aufbau der Arbeit

Einen sichtbaren Baustein zur Elektromobilitätswende in Deutschland stellen aktuell Elektrofahrräder, also Fahrräder, die mit einem zusätzlichen Elektromotor ausgestattet sind, dar. Dies spiegelt sich in den Absatzzahlen in Abbildung 1.1 wieder, die von 380.000 in 2012 auf 720.000 in 2017 angestiegen sind [1].

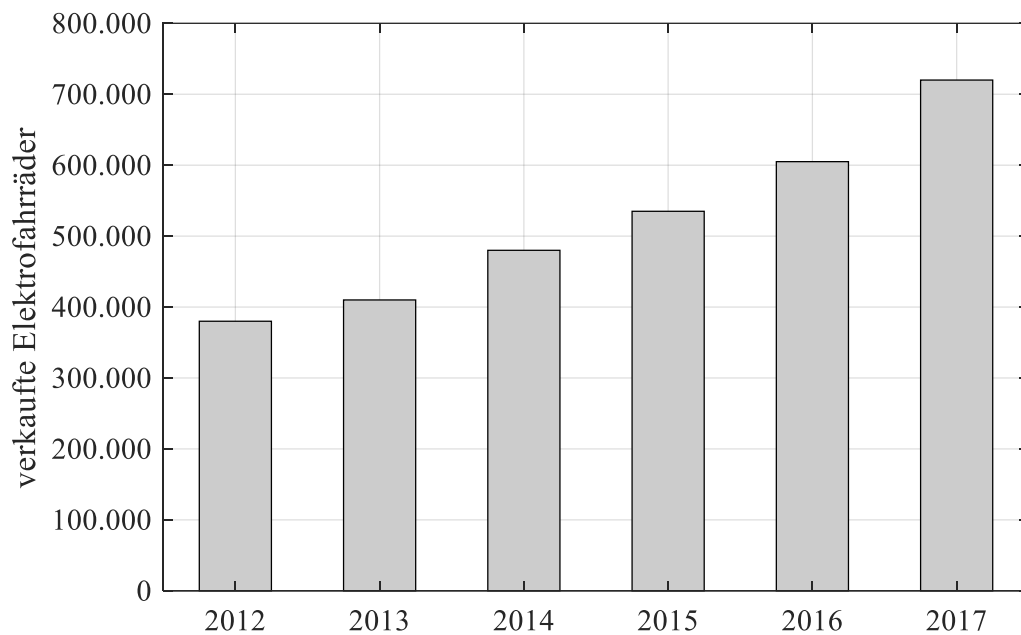


Abbildung 1.1: Verkaufszahlenentwicklung von Elektrofahrrädern in Deutschland von 2012 bis 2017 [1]

Eine besondere Form des Elektrofahrrades ist das Pedelec, bei dem die Motorunterstützung beim Treten in die Pedale erfolgt und mit zunehmender Geschwindigkeit progressiv verringert wird, bis sie bei 25 km/h abschaltet [2]. Neben dem Privatgebrauch sind Pedelecs für Verמיetsysteme geeignet. Zu den Vorteilen von konventionellen Fahrradvermietet-systemen (Entlastung des Verkehrs, Stauvermeidung, Reduktion von CO₂-Emissionen etc.) kommt hinzu, dass sich Strecken selbst bei Gegenwind oder Steigungen ohne große Anstrengung zurücklegen lassen.

1.1 Problemstellung und die daraus resultierende Forschungsfrage

Damit Fahrrad- bzw. Pedelec-Vermietsysteme eine Alternative zu anderen Transportmöglichkeiten darstellen können, muss ein gewisser Grad an Zuverlässigkeit gewährleistet sein. Denn die Zuverlässigkeit ist direkt mit der Zufriedenheit der Kunden verbunden, die wiederum über die Nutzungshäufigkeit und somit über den Erfolg bzw. Misserfolg des Vermietsystems entscheidet. Ein wichtiger Kennwert, mit dem Vermietsysteme im Hinblick auf ihre Zuverlässigkeit und ihren Service bewertet werden können, ist der Servicegrad. Hierbei wird die Anzahl der Kunden, die den Service des Vermietsystems in Anspruch nehmen, ins Verhältnis zu der Gesamtanzahl potentieller Kunden gesetzt. Zum Service gehört bspw., dass für jeden Kunden ein Pedelec zur Verfügung steht. Kunden, die eine leere Station vorfinden, reduzieren demnach den Servicegrad. Im Vergleich zu Fahrradvermietensystemen (FVS) kommt beim Einsatz von Pedelecs in Vermietsystemen mit dem Akku ein weiterer Faktor hinzu, der den Servicegrad reduzieren kann. Hierbei kann es vorkommen, dass ein potentieller Kunde zwar ein Pedelec an der Station vorfindet, der Akku des Pedelecs jedoch nicht ausreichend geladen ist und das Pedelec nicht zur Verfügung steht. Der Zeitraum, in dem das Pedelec aufgrund des Akkus nicht zur Verfügung steht, wird wiederum vom Ladekonzept bestimmt. Im Rahmen der Arbeit wird deshalb der Einfluss des Akkus genauer untersucht. Daraus ergibt sich folgende Forschungsfrage:

Welchen Einfluss hat der Pedelec-Akku auf den Servicegrad eines stationsbasierten automatischen Pedelec-Vermietsystems?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage werden Teilfragen abgeleitet, die zu einer strukturierten Vorgehensweise im Rahmen der Untersuchung und zur Modellentwicklung beitragen:

- **Wie lässt sich der Servicegrad für automatische stationsbasierte Pedelec-Vermietsysteme (PVS) definieren und berechnen?**
- **Von welchen exogenen und endogenen Faktoren hängt der Servicegrad ab?**

Anhand des Modells wird der Servicegrad in verschiedenen Szenarien betrachtet. Hierbei werden Möglichkeiten dargestellt, den Servicegrad zu steigern. Der Fokus liegt dabei auf der Erhöhung des Ladestroms. Zusätzlich ist zu klären, ob die Pedelecs erst zur Vermietung freigegeben werden, wenn der Akku einen definierten State of Charge (SOC) überschritten hat. Zusammengefasst werden folgende Hypothesen innerhalb der Untersuchung überprüft:

1. Für den Betrieb muss ein minimal notwendiger SOC bestimmt werden, ab dem die Pedelecs für die Vermietung freigegeben werden.
2. Durch den Pedelec-Akku wird der Servicegrad signifikant reduziert.
3. Eine Erhöhung des Ladestroms steigert den Servicegrad des Pedelec-Vermietsystems.

Die Untersuchung liefert einen neuen wissenschaftlichen Beitrag zu folgenden Punkten:

- Definition des Servicegrades für automatische stationsbasierte PVS unter Berücksichtigung des Pedelec-Akkus
- Ermittlung und Modellierung des Servicegrades in automatischen stationsbasierten PVS auf Basis ausgewerteter Vermietsystem- und Fahrdaten
- Berechnung des Einflusses eines erhöhten Ladestroms auf den Servicegrad in automatischen stationsbasierten PVS
- Bestimmung des optimalen minimal notwendigen SOC zur Freigabe der Pedelecs

1.2 Methodische Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden für die Untersuchung notwendige und wichtige Grundbegriffe erklärt und definiert. Hierzu gehören die Funktionsweise und der Aufbau von Pedelecs und PVS. Es wird auf die Vielfalt von PVS im Hinblick auf das Lade- und Betriebskonzept eingegangen. Darauf aufbauend wird das im Rahmen der Arbeit betrachtete Systemkonzept definiert und Abgrenzungen zu den restlichen Systemarten festgelegt. Unter Berücksichtigung vorhandener Publikationen zum Thema Servicegrad – sowohl für FVS als auch für PVS – wird der Begriff für die vorliegende Untersuchung in Kapitel 3 genauer definiert.

Einen Fokus der Arbeit stellen der Einfluss des Pedelec-Akkus auf den Servicegrad sowie das Ladeverhalten des Akkus dar. Daher wird in Kapitel 4 auf die für die Untersuchung relevante Eigenschaften des Akkus eingegangen. Aktuell werden Pedelec-Akkus aus Lithium-Ionen verwendet. Daher werden zum einen das Alterungsverhalten dieser Akkutypen beschrieben und zum anderen das Ladeverhalten untersucht. Mit den identifizierten Charakteristika werden mögliche Grenzwerte in Bezug auf das Laden mit einem erhöhten Ladestrom für den zu untersuchenden Pedelec-Akku definiert.

Für die Berechnung des Servicegrades in verschiedenen Szenarien wird ein Simulationsmodell entwickelt. In Kapitel 5 findet durch die Festlegung der Wirkungsstruktur des Modells zunächst eine Eingrenzung des zu betrachtenden PVS statt. Potentielle Einflussfaktoren werden identifiziert und funktionale Zusammenhänge festgelegt. Exogene Einflussfaktoren (u. a. Zeitpunkt und Dauer eines Mietvorgangs), die für PVS von Bedeutung sind, werden anhand von realen Daten analysiert und quantifiziert. In Kapitel 6 erfolgt die Überführung des Modells in eine Simulationsumgebung. Damit verknüpft sind die Validierung und Verifizierung sowie die Bestimmung der Modellgrenzen.

Mit Hilfe des entwickelten Simulationsmodells erfolgt in Kapitel 7 eine Servicegradbetrachtung des im vorangegangenen Kapitel definierten PVS. Dadurch werden Rückschlüsse über den Einfluss des Akkus auf den Servicegrad gezogen. Vordergründig sind hierbei zunächst Erkenntnisse zum Servicegrad in Abhängigkeit von der Anzahl der vorhandenen Pedelecs, aber auch von der Anzahl der potentiellen Kunden. Darüber hinaus sollen verschiedene Ladekonzepte betrachtet werden.

Über Ladeversuche mit unterschiedlichen Ladeströmen wird in Kapitel 8 das Ladeverhalten des Pedelec-Akkus untersucht. Ziel ist es, den maximal möglichen Ladestrom innerhalb der in Kapitel 4 definierten Grenzwerte und dem damit verbundenen Ladeverlauf sowie möglichen Zeitersparnisse zu ermitteln.

Um die Servicegradabhängigkeit vom Ladestrom zu identifizieren werden in Kapitel 9 die Ladeverläufe in das Simulationsmodell integriert. Über die Simulationsergebnisse wird abschließend festgelegt, in welchem Zeitraum ein erhöhter Ladestrom empfehlenswert ist.

2 Pedelecs in Vermietsystemen und die Auswirkungen auf den Servicegrad

Im folgenden Kapitel werden die grundlegenden Begriffe der Arbeit erklärt, um den Betrachtungsrahmen für das zu untersuchende PVS eindeutig festlegen zu können. Dies umfasst sowohl die Darstellung verschiedener Betriebsmöglichkeiten als auch die Definition des Servicegrades auf Basis von vorhandenen Publikationen.

2.1 Pedelecs als spezielle Form des Elektrofahrrades

Bei Elektrofahrrädern wird zwischen zwei verschiedenen Typen unterschieden [2]. Als E-Bike (engl. electronic bike) werden alle Elektrofahrräder bezeichnet, die es dem Fahrer ermöglichen, ausschließlich mit Motorunterstützung zu fahren. Ein zusätzliches Moment kann aufgebracht werden, ist für die Unterstützung allerdings nicht notwendig. Da E-Bikes gesetzlich wie Leicht-Mofas behandelt werden, schaltet die Motorunterstützung bei 20 km/h ab. Darüber hinaus sind für den Gebrauch von E-Bikes eine Fahrerlaubnis sowie ein Versicherungskennzeichen notwendig. Der Begriff Pedelec (**P**edal **E**lectric **C**ycle) umfasst alle Elektrofahrräder, bei denen der Elektromotor ausschließlich beim Treten des Fahrers bis zu einer Geschwindigkeit von 25 km/h unterstützt (hybride Fahrweise) [2]. Eine besondere Variante des Pedelecs ist das S-Pedelec (schnelles Pedelec). Hierbei kann einerseits, wie bei einem E-Bike, bis 20 km/h entweder ausschließlich mit Motorunterstützung gefahren werden, ohne selbst ein Moment aufzubringen. Andererseits ist eine hybride Fahrweise mit einer Geschwindigkeit von bis zu 45 km/h möglich. Dafür ist das S-Pedelec im Gegensatz zum normalen Pedelec versicherungspflichtig [3].

Ein Pedelec ist, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, neben den mechanischen Komponenten eines konventionellen Fahrrades zusätzlich mit elektrischen und elektronischen Komponenten ausgestattet. Ein Elektromotor sorgt für die Unterstützung beim Fahren. Der Motor kann als Nabenmotor in die Radnabe des Vorder- bzw. Hinterrades eingebaut werden, um den Fahrer indirekt über einen Radantrieb zu unterstützen [4]. Alternativ kann der Motor als Mittelmotoreinheit verbaut werden. In diesem Fall liegt das Moment des Mo-

tors an der Kette des Pedelecs an und kann das Moment des Fahrers dadurch direkt verstärken. Die Energie für den Motor wird von einem Akku bereitgestellt, der entweder am Rahmen oder am Gepäckträger des Pedelecs angebracht ist. Wegen der hohen Energiedichte werden für moderne Pedelec-Modelle in der Regel Lithium-Ionen-Akkus verwendet [5]. Den Unterstützungsgrad kann der Fahrer über einen Bediencomputer einstellen. In Abhängigkeit von Geschwindigkeit, Tretfrequenz sowie Drehmoment des Fahrers wird die Intensität der Unterstützung geregelt. Zusätzlich kann das Pedelec wie ein konventionelles Fahrrad, also ohne Unterstützung, verwendet werden.

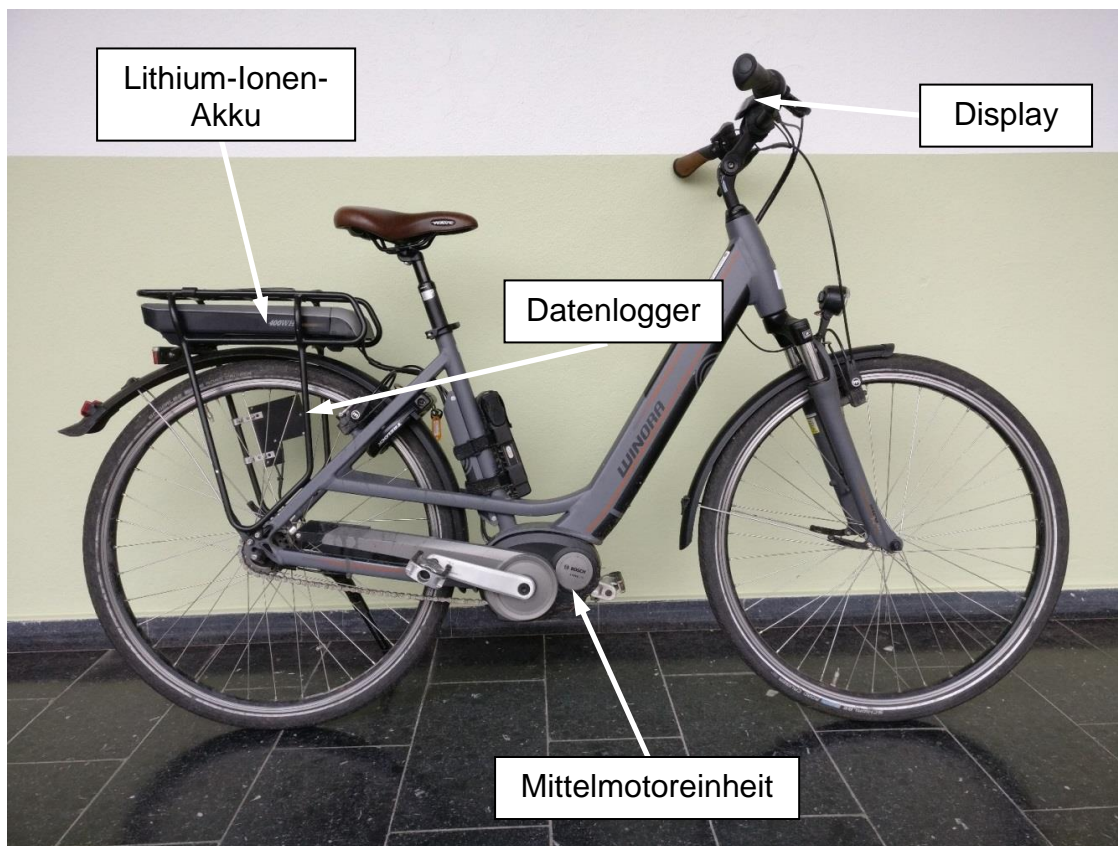


Abbildung 2.1: Aufbau des Pedelecs Winora B270.C 28" (Modell 2015)

Die in dieser Arbeit betrachteten Pedelecs sind ausschließlich mit dem E-Bike-Antriebssystem *Active Line* der *Robert Bosch GmbH* ausgestattet. Daher liegt der Fokus der Untersuchung ausschließlich auf diesem Antriebssystem. Es handelt sich dabei um eine Mittelmotoreinheit für Pedelecs, die über einen Lithium-Ionen-Akku, *PowerPack* genannt, versorgt wird. Die *PowerPacks* sind in drei verschiedenen Varianten (300, 400 und 500) erhältlich, die sich in ihrem Energieinhalt unterscheiden. Für den Mittelmotor stehen die

in Tabelle 2.1 aufgeführten Unterstützungsstufen zur Verfügung, über die der Unterstützungsfaktor eingestellt wird. Ein Unterstützungsfaktor von 250 % bedeutet, dass das Moment des Motors zweieinhalbmal so groß ist wie das des Fahrers.

Tabelle 2.1: Unterstützungsstufen des Antriebssystems *Active Line* mit zugehörigen Unterstützungsfaktoren [6]

Unterstützungsstufe	Eco	Tour	Sport	Turbo
Unterstützungsfaktor	40 %	100 %	150 %	250 %

Zusätzlich sind die betrachteten Pedelecs mit einem Datenlogger ausgestattet. Der Datenlogger wurde von den Unternehmen *Keymile* und *Inside M2M* in Kooperation mit der *Hochschule Hannover* im Projekt *eRad in Freizeit und Tourismus* entwickelt und ist speziell für das Antriebssystem *Active Line* ausgelegt. Die Kommunikation innerhalb des Antriebssystems erfolgt über einen CAN-Bus (Control Area Network), ein serielles von der *Robert Bosch GmbH* entwickeltes Bussystem [7]. Der Datenlogger wird an den CAN-Bus angeschlossen und kann so die Fahrdaten auslesen. Weitere Sensoren wurden in den Datenlogger eingebaut, sodass folgende Daten aufgezeichnet werden können:

- Drehmoment
- Tretfrequenz
- Geschwindigkeit
- Fahrmodus
- Unterstützungsgrad
- gefahrene Strecke
- Akkuspannung
- Umgebungstemperatur
- Neigungswinkel
- Steigungswinkel
- Akkustrom
- GPS-Daten

2.2 Unterschiedliche Betriebstypen von Pedelec-Vermietsystemen

Nach heutigem Stand lässt sich die Entwicklung von FVS in vier Generationen einteilen. Das erste nennenswerte FVS der ersten Generation startete in den 1960er Jahren in Amsterdam (Niederlande) [8]. Charakteristisch für das Vermietsystem waren weiße Fahrräder, die innerhalb der ganzen Stadt frei zugänglich für die Bevölkerung aufgestellt wurden. Die Fahrräder konnten ohne Anmeldung kostenlos genutzt werden. Da keine Möglichkeit bestand, die Fahrräder anzuschließen, verschwanden über die Zeit immer mehr Fahrräder, wodurch das Vermietsystem scheiterte [9]. In der zweiten Generation wurden

die Vermietsysteme um Stationen erweitert [10]. Ein Beispiel war Bycyklen in Kopenhagen, das 1995 startete. Die Fahrräder wurden für den Betrieb extra aus nicht standardisierten Bauteilen angefertigt, um Diebstählen entgegenzuwirken [11]. Zusätzlich wurden die Fahrräder an der Station angeschlossen und über einen Münzpfand (Einkaufswagenprinzip) freigegeben. Die Nutzungsdauer war weiterhin unbegrenzt. Durch das geringe Pfand beim Mieten sowie der vorhandenen Anonymität der Kunden wurden Diebstähle nur bedingt reduziert [12]. Die Abschaffung der Anonymität erfolgte in der dritten Generation ab 1996 [13]. Kunden mussten sich bei der Registrierung identifizieren. Die Einführung von Magnetstreifenkarten vereinfachte den Mietvorgang erheblich. Eine nicht durchgeführte Rückgabe wurde mit Sanktionen belegt, die einem Vielfachen der Nutzungsgebühr entsprachen. Darüber hinaus war die Nutzung der Fahrräder nicht mehr dauerhaft, sondern nur für ein definiertes Zeitintervall (in der Regel die ersten 30 Minuten) kostenlos. In der vierten Generation kam die Optimierung der Fahrradumverteilung zwischen den einzelnen Stationen hinzu (Redistribution). Die Schlösser an den Stationen und Fahrrädern wurden verbessert und die Stationen mit einer besseren Technologie ausgestattet (u. a. Solarpanel, Touchscreen). Einige Betreiber verzichteten mittlerweile komplett auf Stationen, sodass die Kunden das Fahrrad an einem beliebigen öffentlichen Ort abstellen können. Zusätzlich kann der Mietvorgang sowohl bei stationsgebundenen als auch bei stationslosen Vermietsystemen über eine Applikation auf dem Smartphone durchgeführt werden. Mit der neuen Generation werden zudem nicht mehr exklusiv Fahrräder, sondern auch Pedelecs zur Vermietung eingesetzt [11].

2.2.1 Aufbau & Funktionsweise von Pedelec-Vermietsystemen

Ähnlich wie konventionelle FVS können PVS sowohl manuell als auch automatisch betrieben werden [11]. Die verschiedenen Betriebsweisen sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Bei einem manuellen Betrieb werden die Mietvorgänge, also die Ausgabe und die Annahme der Pedelecs, vom Personal durchgeführt. Durch die personalintensive Vermietung sind die Personalkosten vor allem bei wenigen Mietvorgängen pro Tag unverhältnismäßig hoch. Eine Möglichkeit, dem entgegenzuwirken, ist die Kooperation mit lokalen Geschäften, bei denen die vorhandenen Mitarbeiter zusätzlich zu ihrer Hauptbeschäftigung

tigung die Vermietung der Pedelecs übernehmen [14]. Da in der Nacht weniger Mietvorgänge stattfinden ist eine 24-Stunden-Verfügbarkeit wegen der Personalkosten aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll. Ein Vorteil des manuellen Betriebs ist die direkte Betreuung durch das vorhandene Personal, das dem Kunden eine kurze persönliche Einführung in die Funktionsweise des Pedelecs geben kann. Ein manuelles Vermietsystem eignet sich vorwiegend an Orten, an denen täglich mit wenigen Mietvorgängen zu rechnen ist oder die Pedelecs für einen längeren Zeitraum vermietet werden (bspw. touristische Gebiete).

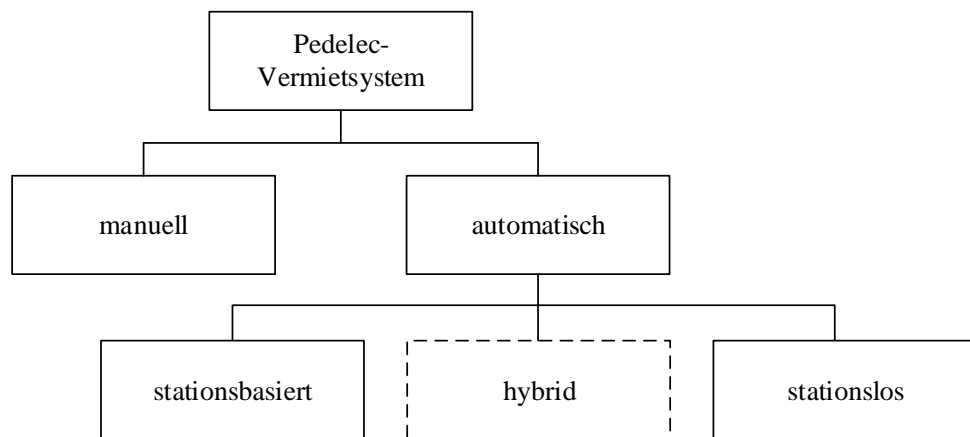


Abbildung 2.2: Übersicht möglicher Betriebskonzepte von PVS

Im Gegensatz zum manuellen Betrieb ist für automatische Vermietsysteme kein Personal für die Mietvorgänge notwendig. Bei automatischen PVS wird zwischen stationsbasierten und stationslosen (auch „free floating“ genannt) Betriebskonzepten unterschieden. Ein stationsbasiertes PVS besteht aus einer Flotte von Pedelecs, die an festinstallierten Stationen gemietet und zurückgegeben werden können [15]. Die Pedelecs werden dabei in elektronisch gesteuerten Abstellplätzen gesichert. Beim Mietvorgang hat die Station die Aufgabe, den Kunden zu identifizieren und ihm Zugang zu den Pedelecs zu gewähren.

Bei der Rückgabe muss das Pedelec erkannt werden, um eine einwandfreie Abrechnung für den Kunden zu gewährleisten. Zusätzlich sind die Stationen mit der Zentrale des Betreibers verbunden, um in Echtzeit die Anzahl der Pedelecs an den jeweiligen Stationen abrufen zu können. Bei hochfrequentierten Stationen können sich viele Pedelecs an einem Ort befinden, sodass von der Zentrale eine Redistribution eingeleitet werden muss. Gleichzeitig besitzen die Stationen insgesamt mehr Stellplätze als Pedelecs vorhanden sind, damit eine reibungslose Rückgabe ermöglicht werden kann. Für Vermietsysteme in

europäischen Großstädten werden im Durchschnitt 1,7 Abstellplätze pro Fahrrad vorgesehen [16]. Neben dem Schutz vor Diebstählen und Wettereinflüssen sollen die Terminals eine Möglichkeit für die Kunden bieten, Feedback über Fahrten zu geben oder Mängel an den Pedelecs zu melden. Dadurch sollen diese schnellstmöglich behoben werden können. Diese Variante ist zwar weniger personalintensiv, verursacht jedoch aufgrund der zusätzlichen Technik insgesamt höhere Anschaffungskosten. Die hohen Anschaffungskosten fallen bei automatischen stationslosen Vermietsystemen weg, da die Pedelecs in einem vom Betreiber definierten Bereich abgestellt und gemietet werden können. Der Kunde kann ein Pedelec mieten, indem ein QR-Code am Pedelec über das Smartphone eingescannt wird. Über einen GPS-Sender kann der Betreiber jederzeit erfassen, wo sich die Pedelecs befinden und ggfs. Redistributionsvorgänge einleiten [17]. Für den Kunden hat das Betriebskonzept den Vorteil, dass das Pedelec an keinem festen Ort zurückgegeben werden muss, sodass die Fahrt direkt am Zielort oder in unmittelbarer Nähe beendet werden kann. Der Betreiber erhöht durch die stationslose Variante das Risiko von Vandalismus und Diebstählen, da die Pedelecs lediglich ab-, aber nicht zwangsläufig angeschlossen werden. Bei stationslosen PVS kommt für den Betreiber das Finden einer Alternative für den Ladevorgang hinzu. Eine gängige Lösung besteht aktuell darin, die Akkus am Pedelec bei Bedarf vom Personal austauschen zu lassen. Darüber hinaus ist der Betrieb als Hybridsystem, also eine Mischung zwischen stationsbasiertem und stationslosem Vermietsystem, möglich. Dabei werden an den hochfrequentierten Stellen des Einzugsgebietes Ladestationen aufgebaut. Die Kunden haben weiterhin die Möglichkeit, Pedelecs an einem beliebigen Ort abzustellen, bezahlen für ihre Fahrt jedoch weniger, wenn das Pedelec an eine Station zurückgebracht wird. Eine 24-Stunden-Verfügbarkeit lässt sich bei automatischen Vermietsystemen problemlos realisieren [18], allerdings muss für die Kundenbetreuung ein Kundenservice eingerichtet werden. Automatische Vermietsysteme sind dort praktikabel, wo Pedelecs täglich mit einer hohen Frequenz für einen kurzen Zeitraum vermietet werden (bspw. urbaner Raum für den Alltagsgebrauch) [19].

2.2.2 Ladekonzepte in automatischen Pedelec-Vermietsystemen

Automatische PVS können mit verschiedenen Ladekonzepten betrieben werden. Unter dem Ladekonzept ist die Art und Weise zu verstehen, mit der der Akku des Pedelecs im

PVS geladen und somit eine Einsetzbarkeit der Pedelecs für den Betrieb wiederhergestellt wird. Die verschiedenen Aspekte der unterschiedlichen Konzepte werden im Folgenden kurz dargestellt.

Ladestation / Wechselakkus

Der Ladevorgang kann insbesondere bei stationsbasierten PVS automatisch ausgelöst werden, sobald das Pedelec mit der Station verbunden ist. Weder für den Betreiber noch für den Kunden entsteht ein zusätzlicher Aufwand, um den Ladevorgang zu initiieren. Eine schnellere Einsetzbarkeit wird erzielt, indem die Ladestation mit einer Wechselakkustation ersetzt wird. Der leere Akku kann bei Bedarf mit einem vollständig geladenen Akku ausgetauscht werden. Das Verhältnis von zusätzlichen Akkus zu vorhandenen Pedelecs ist abhängig von der Auslastung des PVS. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass zusätzliche Akkus zusätzliche Anschaffungskosten bedeuten. Eine andere Variante des Wechselakkukonzeptes ist der Austausch der Akkus durch das Personal. In automatischen PVS kommt diese Variante überwiegend bei stationslosen Vermietsystemen vor, da in diesen keine Stationen vorhanden sind. Die Akkus werden an einem zentralen Ort aufgeladen und bei Bedarf vom Personal ausgetauscht. Alternativ können bei stationslosen PVS Privathaushalte hinzugezogen werden, die ihren Anschluss zum Laden der Pedelec-Akkus zur Verfügung stellen und dafür entsprechend entlohnt werden.

Normalladen / Schnellladen

Eine weitere Möglichkeit, die Pedelecs schneller für den Betrieb zur Verfügung zu stellen, ist die Erhöhung des Ladestroms. Festdefinierte Grenzwerte für das Normal- bzw. Schnellladen sind bei Pedelecs aktuell nicht festgelegt. Für das *PowerPack* (Nennspannung 36 V) sind herstellerseitig drei verschiedene Ladegeräte vorhanden, die sich im Ladestrom unterscheiden:

- Compact Charger – max. 2 A
- Standard Charger – max. 4 A
- Fast Charger – max. 6 A

Der Ladestrom ist davon abhängig, welche Akkuzellen für den Akku verwendet wurden. Mit steigendem Ladestrom nehmen die Wärmeentwicklung und der Alterungsprozess im Akku zu. Aufgrund der kompakten Bauweise der Akkus ist in der Regel kein Kühlsystem

zur Reduktion der Wärmeentwicklung vorhanden. In Kapitel 4.3 wird das Thema Schnellladen von Akkus vertieft.

Konduktiv / Induktiv

Das konduktive (kabelgebundene) Laden ist das gängigste Verfahren bei automatischen PVS. Die Pedelecs werden entweder speziell für den vorgesehenen Stationstypen konstruiert oder nachträglich so modifiziert, dass der Ladevorgang unmittelbar nach der Rückgabe des Pedelecs ausgelöst wird. Der Kunde muss das Pedelec nicht separat über ein Ladekabel mit der Station verbinden. Kommerzielle PVS mit induktiven Ladestationen sind zurzeit noch nicht vorhanden. In 2012 wurde an der Hochschule Hannover in Kooperation mit IAV ein Prototyp eines induktiven Ladeständers aufgebaut [20]. Im Oktober 2016 wurde an der Technischen Universität Delft (Niederlande) die erste solarbetriebene Induktivladestation für Elektrofahrräder in Betrieb genommen [21]. Die Ladestation ist mit einem Energiespeicher von 10 kWh ausgestattet. Für den Ladevorgang müssen die Pedelecs präpariert werden. In diesem Fall wird das Pedelec mit einem Doppelständer und einer kleinen Spule ausgestattet. Der Ladevorgang erfolgt durch Induktion nach dem Abstellen des Pedelecs auf einer dafür vorgesehenen Stelle an der Station.

2.2.3 Nationale und internationale Vermietsysteme

Im Rahmen des Projektes aus dem Schaufenster Elektromobilität – *eRad in Freizeit und Tourismus* (Laufzeit: 01.06.2013 – 30.06.2016) – entstand in der Stadt Hannover das manuelle Pedelec-Vermietsystem *PedsBlitz* [22]. Das Vermietsystem besteht aus 70 Pedelecs, die sich auf neun Stationen (u.a. auch an der Hochschule Hannover) verteilen (Stand: November 2018).

Europaweit werden zurzeit wenige automatische Vermietsysteme betrieben, die ausschließlich Pedelecs einsetzen. Das größte PVS wurde im Juni 2014 in Madrid unter dem Namen *BiciMad* eröffnet [23]. Abbildung 2.3 zeigt eine Ladestation mit eingesetzten Pedelecs. Es umfasst 2.028 Pedelecs an 165 Stationen (Stand: November 2018) und ist sowohl ganztägig als auch ganzjährig verfügbar. Laut Betreiber reicht ein vollgeladener Akku für eine Reichweite von 70 km. In Kopenhagen wurden Ende 2013 die Fahrräder des Vermietsystems *Bycyklen* gegen 1.860 Pedelecs an 104 Stationen (Stand: Juli 2018)

ausgetauscht. Die Unterstützung erfolgt, anders als in Deutschland, bis zu einer maximalen Geschwindigkeit von 22 km/h. Jedes Pedelec ist mit einem Tablet ausgestattet, das über den Pedelec-Akku betrieben wird: Der Betreiber gibt für die Pedelecs eine Reichweite von 25 km an. In Deutschland sind noch keine PVS vorhanden, die mit den Größen von Madrid oder Kopenhagen vergleichbar sind. In Rostock wurde im Juni 2014 das PVS *elros* mit 27 Pedelecs und 5 Stationen aufgebaut. Der Akku der Pedelecs hat einen Energieinhalt von 480 Wh und liefert laut Betreiber eine durchschnittliche Reichweite von 50 km. Nachdem mit *eCall a Bike* der *DB Rent GmbH* bereits ein PVS in die Stadt Aachen integriert wurde (3 Stationen und 15 Pedelecs), soll es in Zukunft durch das PVS *Velocity* abgelöst werden. Die Vision von *Velocity* sind 1.000 Pedelecs verteilt auf 100 Stationen [24], um es vor allem den Studierenden der *RHTW Aachen* zu ermöglichen, einzelne Standorte schnell zu erreichen. Bis Juli 2018 wurden 24 der geplanten 100 Stationen in Betrieb genommen.



Abbildung 2.3: Pedelec-Ladestation im automatischen Vermietsystem „BiciMad“ [25]

Die *DB Rent GmbH* hat in Stuttgart unter dem gleichen Namen wie in Aachen ein solches Hybridsystem seit Oktober 2011 in Betrieb [26]. Dabei wurden die Pedelecs nachträglich in das bestehende FVS integriert. An insgesamt 45 Stationen wurden Lademöglichkeiten nachgerüstet, um die 100 Pedelecs während des Betriebs aufzuladen. Nach einem ähnlichen Prinzip wurde im Vermietsystem *Bicing* in Barcelona vorgegangen. Das automatische FVS mit 6.000 Fahrrädern und 420 Stationen startete im Dezember 2014 mit einer

Testphase [27], in der Pedelecs neben den Fahrrädern angeboten wurden. Aufgrund des Erfolges wurde im Februar 2015 eine zweite Testphase gestartet, in der weitere 300 Pedelecs und 46 Stationen in das Vermietsystem integriert wurden. Anders als in Stuttgart sind diese Stationen ausschließlich für Pedelecs vorgesehen.

Für automatische stationslose FVS existieren zahlreiche Beispiele. Für die Implementierung der Fahrräder ist eine intensive Absprache zwischen dem Betreiber und den Verantwortlichen der Stadt notwendig. Ein aktuelles Negativbeispiel zeigt anhand des Betreibers OBike. Dieser hat 2017 in München angefangen, 6.800 seiner Fahrräder in der Stadt zu verteilen [28]. Fehlende Absprachen mit der Stadt und unsachgemäßes Abstellen der Fahrräder führten zur Verärgerung bei der Bevölkerung und zu erhöhtem Vandalismus. Mit Frankfurt, Berlin und Hannover kamen drei weitere Städten hinzu, in denen insgesamt 30.000 Fahrräder aufgestellt wurden. 2018 hat die Mutterfirma von OBike Insolvenz angemeldet. In der Folge blieben viele der Fahrräder in den Städten ohne eine Möglichkeit der Nutzung stehen. Die Erstattung der bei der Anmeldung fälligen Kautionsverpflichtung verlief nicht problemlos, wodurch sich das Vertrauen der Kunden für ähnliche Vermietsysteme senken könnte [29].

Automatische stationslose PVS befinden sich zurzeit noch in der Testphase. Mitte Mai 2018 startete der Betreiber *Social Bicycles* in Sacramento mit 300 Pedelecs und erweiterte die Anzahl im Laufe des Jahres auf insgesamt 900 Pedelecs. Darüber hinaus werden weitere dieser PVS in Washington D.C. und San Francisco betrieben. Die Akkus werden zwecks Ladung hauptsächlich vom Personal ausgetauscht [30, 31]. Zusätzlich sind vereinzelt Stationen geplant, an denen Kunden die Pedelecs zurückgeben können und dafür weniger für den Mietvorgang zahlen müssen.

Da sich automatische stationslose PVS noch in der Testphase befinden und die Umsetzung der Lademöglichkeit sowie die Akzeptanz der Bevölkerung abzuwarten sind, konzentrieren sich die nachfolgenden Betrachtungen auf automatisch stationsbasierte PVS.

3 Servicegrad in automatischen stationsbasierten Pedelec-Vermiet-systemen

Ein Ziel des Betreibers eines automatischen Vermietsystems ist es, einen hohen Grad an Kundenzufriedenheit sicherzustellen, um Vertrauen aufzubauen und dadurch eine regelmäßige Nutzung durch die Kundschaft zu gewährleisten [32]. Je mehr Kunden das Vermietsystem nutzen, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass potentielle Kunden eine leere Station vorfinden und dadurch keinen Mietvorgang durchführen können. Wird eine leere Station häufiger vorgefunden, hört der Kunde irgendwann auf, ein Pedelec zu mieten. Der Betreiber des FVS *Capital Bikeshare* hat 2016 eine Umfrage bei aktiven und ehemaligen Nutzern durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.1 aufgeführt. Von den ehemaligen Nutzern haben 18 % angegeben, dass sie aufgehört haben das Vermietsystem zu nutzen, weil keine Fahrräder verfügbar waren, wenn sie eines gebraucht haben.

**Warum sind Sie kein Kunde mehr von *Capital BikeShare*?
(n = 544, Mehrfachantworten möglich)**

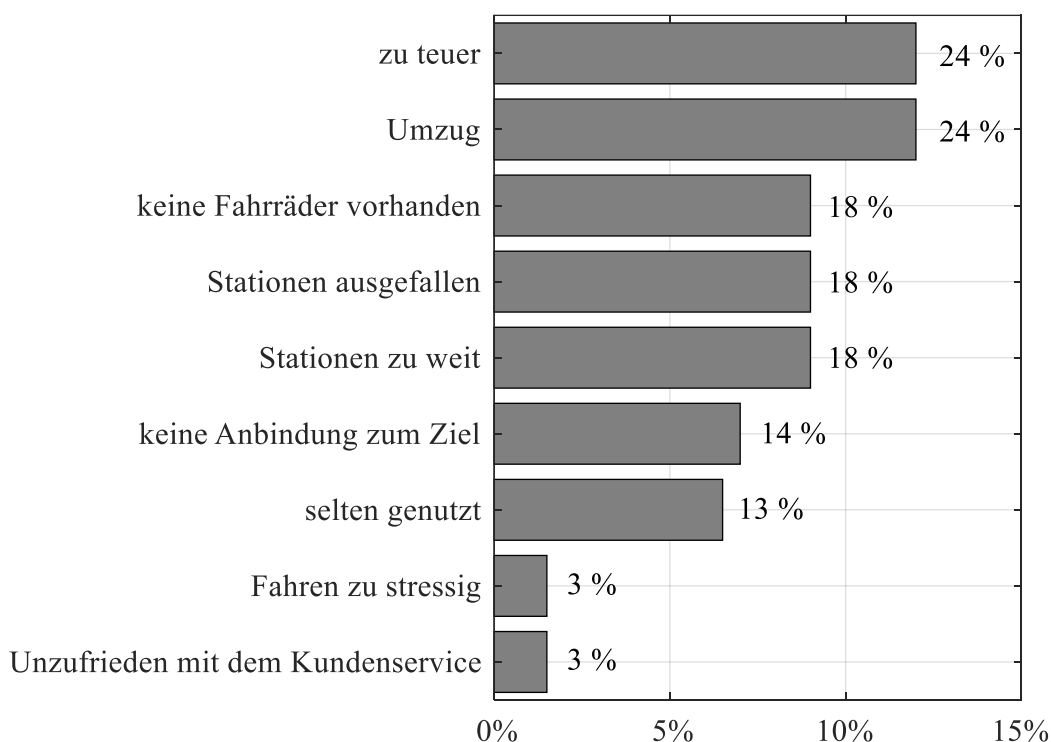


Abbildung 3.1: Gründe ehemaliger Kunden des Vermietsystems *Capital Bikeshare*, die dazu geführt haben, den Service nicht mehr in Anspruch zu nehmen nach [33]

Darüber hinaus können Kunden bei der Rückgabe eine volle Station vorfinden, an der das Pedelec nicht abgestellt werden kann. In der Folge muss der Kunde entweder zu einer anderen Station fahren oder warten, bis ein Stellplatz an der eigentlichen Zielstation frei wird. Diese Unannehmlichkeit führt bei Kunden auf Dauer dazu, dass das Vermietsystem nicht weiter genutzt wird. Mit dem Kennwert „Servicegrad“ können Vermietsysteme in dieser Hinsicht bewertet werden.

3.1 Definition des Servicegrades für automatische stationsbasierte Pedelec-Vermietsysteme

In der Literatur sind zwei verschiedene Ansätze zur Definition des Servicegrads (auch Servicelevel) zu finden: der Simulationsansatz und der Betreiberansatz. Beim Simulationsansatz in [34–37] ist der Servicegrad SG_{Sim} abhängig von der Anzahl potentiellen Kunden K_{pot} und der Anzahl der Kunden, die eine leere Station beim Mietvorgang oder eine volle Station bei der Rückgabe vorgefunden haben. Diese Kunden werden als unzufriedene Kunden $K_{unzufrieden}$ zusammengefasst:

$$SG_{Sim} = 1 - \frac{K_{unzufrieden}}{K_{pot}} \quad (3.1)$$

Die eigentliche Erfassung des Servicegrades ist allerdings problematisch. In der Regel bestehen zwei Möglichkeiten, ein Fahrrad bzw. Pedelec zu mieten. Entweder führt der Kunde den Mietvorgang direkt am Terminal der Station aus oder er reserviert sich ein Pedelec über eine App des Betreibers. Im ersten Fall kann es passieren, dass der Kunde mit der Intention, ein Pedelec zu mieten, eine Station aufsucht und an dieser Station keine Pedelecs vorhanden sind. Auch wenn keine direkte Anfrage beim Betreiber stattfindet, ist in diesem Fall ein potentieller Kunde möglicherweise zu einem unzufriedenen Kunden geworden. Ebenso kann der Kunde bei der Reservierung über die App feststellen, dass kein Pedelec an der Station in seiner Nähe verfügbar ist. Der Kunde schließt die App und es findet erneut keine direkte Anfrage statt. Aufgrund dieser Problematik sollte das Ziel des Betreibers sein, die Zeit, in der keine Pedelecs an einer Station zur Verfügung stehen bzw. in der eine Station voll ist, möglichst gering zu halten. Nur so kann das Risiko eines unzufriedenen Kunden minimiert werden. Diesen Betreiberansatz verfolgt [38] bei der

Definition des Servicegrades $SG_{\text{Betreiber}}$. Hierbei wird eine Station über einen definierten Zeitraum t_{ges} beobachtet. Das Verhältnis der Zeit, in der die Station für die Serviceleistung „Mieten“ bzw. „Rückgabe“ zur Verfügung steht (t_{Service}) zur gesamten Beobachtungsdauer wird als Servicegrad dargestellt:

$$SG_{\text{Betreiber}} = \frac{t_{\text{Service}}}{t_{\text{ges}}} \cdot 100 \% \quad (3.2)$$

Die erste Definition wird häufig bei der Simulation von Vermietsystemen verwendet [32, 34, 35, 37, 39], um detaillierte Aussagen zum Zeitpunkt des fehlenden Service treffen zu können. Mit der zweiten Definition hat der Betreiber eines Vermietsystems einen Kennwert, der überwacht und entsprechend gesteuert werden kann, da keine Informationen zu potentiellen Kunden notwendig sind. Diese Definition kommt auch bei der Bewertung von anderen stationsbasierten Vermietsystemen, wie bspw. beim Carsharing, zum Einsatz [40].

Zur Steigerung des Servicegrades können verschiedene Maßnahmen getroffen werden. Ein Großteil der Untersuchungen bezieht sich auf automatische stationsbasierte FVS. Da die gleichen Probleme in PVS vorhanden sind, lassen sich diese Untersuchungen mit Anpassungen übertragen. Einige Ansätze beziehen sich auf die Optimierung der Redistributionsvorgänge, also der Umverteilung der Fahrräder von volle auf leere Stationen. Unterschiede gibt es in den Ansätzen dieser Optimierungen. In [34, 41] werden finanzielle Anreize für den Kunden vorgeschlagen, wenn dieser das Fahrrad an einer leereren Station abstellt. Eine Vorhersage des Bedarfs an der jeweiligen Station auf Basis von Auswertungen vergangener Betriebstage wird in [32] durchgeführt. Darüber hinaus können für die Redistributionsvorgänge die Routen der Fahrzeuge, die die Fahrräder von einer Station zur nächsten bringen, optimiert werden [35, 37, 38, 42]. Unabhängig von der Definition des Servicegrades kommt bei automatischen stationsbasierten PVS mit dem Pedelec-Akku ein weiterer Faktor hinzu, der einen Einfluss auf den Servicegrad haben kann. Bei einer Anfrage kann es vorkommen, dass der Kunde ein Pedelec an der Station vorfindet, bei dem der Akku nicht ausreichend aufgeladen ist. Aufgrund eines zu niedrigen SOC steht das Pedelec nicht zur Verfügung und ein Mietvorgang kann nicht durchgeführt werden. Wie hoch der minimale SOC bzw. der minimale Energiegehalt sein muss, ist vom Betreiber selbst festzulegen. In [43] liegt der minimale Energiegehalt bei 180 Wh

bzw. einem SOC von 75 %. Wird der minimale Energiegehalt, ab dem ein Pedelec für einen Mietvorgang zur Verfügung steht, zu gering gewählt, kann es vorkommen, dass der Akku während der Fahrt keine Energie mehr für die Unterstützung liefern kann. Der Kunde kann zwar ohne Unterstützung weiterfahren. Dies entspricht jedoch nicht dem Service, den ein PVS anbieten sollte und wirkt sich deshalb in der nachfolgenden Betrachtung ebenfalls negativ auf den Servicegrad aus. Um die Zeit, in der das Pedelec nicht zur Verfügung steht, zu verringern, ist ein entsprechendes Ladekonzept notwendig, durch das der Akku zwischen den Mietvorgängen aufgeladen werden kann. Darüber hinaus lässt sich über die Erhöhung des Energieinhaltes eine längere Einsatzzeit der Pedelecs erreichen. Einen fixen Wert für den minimal notwendigen Energiegehalt lässt sich nicht pauschal für alle Vermietsysteme bestimmen, da dieser Wert von der Akkuleistung und von der Nutzungshäufigkeit durch die Kunden bestimmt wird.

3.2 Modellrelevante Einflussfaktoren auf den Servicegrad

Die Nutzungshäufigkeit ist wiederum von Faktoren abhängig, die nur teilweise vom Betreiber beeinflusst werden können. Hierbei handelt es sich sowohl um endogene als auch exogene Einflussfaktoren. Zu den endogenen Einflussfaktoren eines PVS gehören bspw. die Art des Pedelecs oder der Station sowie die Registrierungs- und Nutzungsgebühr. Exogene Faktoren sind von dem jeweiligen Einsatzgebiet des Vermietsystems abhängig und können nicht oder nur im geringen Maße verändert werden. Beispiele aus Tabelle 3.1 sind die Stadtgröße, das Klima oder die Infrastruktur. Insbesondere die exogenen Faktoren sind verantwortlich für die Anzahl potentieller Kunden.

Tabelle 3.1: Endogene und exogene Faktoren in automatischen Vermietsystemen nach [16]

Endogene Faktoren	Exogene Faktoren
Technische Systemgestaltung	Stadtgröße
Hardware und Technologie	Klima
Systemdesign	Mobilitätsverhalten
Organisatorische Systemgestaltung	Bevölkerungsdichte
Betreiber	Demographische Faktoren
Verträge	Ökonomische Faktoren
Kosten und Finanzierung	Geographische Faktoren (z. B. Topographie)
	Infrastruktur
	Finanzielle Situation
	Politik

Anhand der Gegenüberstellung der Nutzungshäufigkeit und der Temperatur soll der Einfluss eines exogenen Faktors veranschaulicht werden. Dazu wird eine Auswertung der Vermietsystemdaten des FVS *B-Cycle* in Denver (Colorado) durchgeführt. Die Auswertung erfolgt über ein Regressionsmodell, bei dem die Anzahl an täglichen Mietvorgängen pro Fahrrad als Regressand und die mittlere Temperatur in °C als Regressor festgelegt werden. Das Ergebnis der Auswertung zeigt, dass mit zunehmender mittlerer Temperatur die Anzahl der täglichen Mietvorgänge pro Fahrrad steigt. Aus Abbildung 3.2 wird ersichtlich, dass der Verlauf ab einer Temperatur von 20 °C abflacht und bei 23 °C wieder leicht fällt. Das bedeutet, dass eine obere Temperaturgrenze existiert, ab der die Kunden den Service nicht mehr in Anspruch nehmen wollen. Bei niedrigen Temperaturen geht die Anzahl der täglichen Mietvorgänge pro Fahrrad deutlich zurück. Der Betreiber kann diese Information dazu nutzen, um bspw. abzuwägen, ob sich der Betrieb in den kälteren Monaten aus wirtschaftlicher Sicht lohnt.

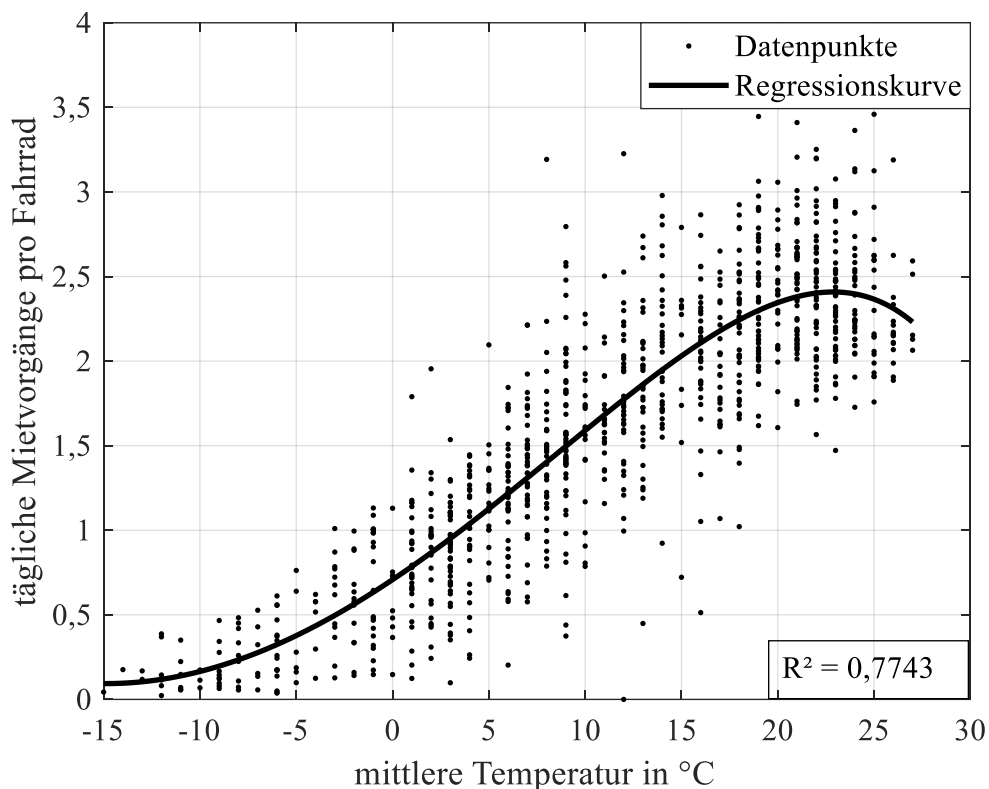


Abbildung 3.2: Einfluss der mittleren Temperatur auf die Anzahl der täglichen Mietvorgänge pro Fahrrad für das FVS *B-Cycle* (Denver) im Zeitraum 2015 - 2017

Die (durchschnittliche) Akkuleistung, die während der Fahrt aufgebracht wird, wird durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst [2, 44–46]. In [47, 48] werden die Faktoren im Rahmen eines mehrdimensionalen Parameterraumes wie in Tabelle 3.2 in die Kategorien „Fahrer“, „Fahrumgebung“ und „Pedelec“ analog zum 3F-Parameterraum der Technischen Universität Braunschweig [49] unterteilt. Bei der Wahl des Pedelecs können diese Information wichtig für den Betreiber werden. Bei einer Fahrumgebung mit starkem Wind (Küstengebiete) oder vielen Steigungen (Gebirge) wird mehr Leistung durch den Akku abgegeben, wodurch eine geringere Strecke mit einer Akkuladung zurückgelegt werden kann. Durch die Berücksichtigung der unterschiedlichen Faktoren resultiert im PVS ein Energiebedarf pro Pedelec. Aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren kann dieser Wert variieren. [15] berechnet bspw. einen Energiebedarf von 480 Wh, während in der Untersuchung von [50] 960 Wh notwendig sind.

Tabelle 3.2: Einteilung der Einflussfaktoren auf die Akkuleistung in die Kategorien des mehrdimensionalen Parameterraumes nach[48]

Fahrer	Fahrumgebung	Pedelec
Geschwindigkeitsprofil	Höhenprofil	Gewicht
Gewicht	Fahrbahn	Stirnfläche
Stirnfläche	Wind	Mechanischer Wirkungsgrad
Fahrposition	Temperatur	Elektrischer Wirkungsgrad
Motorunterstützungslevel		Akkutyp
Trittfrequenz		Reifen- und Felgenreöße
		Motor (Typ und Position)
		Dynamo- und Schaltungstyp

Abhängig vom Energiebedarf muss der Akku des Pedelecs so ausgelegt werden, dass möglichst viele Mietvorgänge durchgeführt werden können. Der Energiebedarf entspricht dabei dem maximal notwendigen Energieinhalt des Akkus. Da zwischen den Mietvorgängen Zeit für einen Ladevorgang ist, kann der Energieinhalt des Akkus reduziert werden. Wie stark die Reduzierung ausfällt, hängt wiederum vom Ladekonzept ab.

Für die nachfolgende Betrachtung wird der Simulationsansatz für die Definition des Servicegrades für ein stationsbasiertes automatisches PVS in Anlehnung an Gl. (3.1) verwendet und erweitert. Dadurch können detailliertere Aussagen zu den Ursachen der Servicegradverluste durchgeführt werden. Zur Berechnung wird der Servicegrad SG_{ges} über die Anzahl der zufriedenen Kunden $K_{\text{zufrieden}}$ berechnet:

$$SG_{\text{ges}} = 1 - \frac{K_{\text{unzufrieden}}}{K_{\text{pot}}} = \frac{K_{\text{zufrieden}}}{K_{\text{pot}}} \quad (3.3)$$

Zufriedene Kunden sind in diesem Zusammenhang die Kunden, die einen Mietvorgang erfolgreich durchführen konnten. Auch wenn dies nicht zwangsläufig zu einer vollkommenen Kundenzufriedenheit führt, wird die Bezeichnung im weiteren Verlauf der Untersuchung verwendet. Die Anzahl der zufriedenen Kunden ist zum einen abhängig von der Anzahl der Kunden, die eine leere Station beim Mietvorgang (K_{Pedelec}) oder eine volle Station bei der Rückgabe ($K_{\text{Station, voll}}$) vorfinden. Zum anderen müssen die Kunden, die

aufgrund eines nicht ausreichend geladenen Akkus keinen Mietvorgang durchführen können (K_{Akku}) sowie diejenigen, die bei der Rückgabe mit einem leeren Akku ankommen ($K_{\text{Rückgabe}}$), berücksichtigt werden:

$$K_{\text{zufrieden}} = K_{\text{pot}} - K_{\text{Pedelec}} - K_{\text{Station,voll}} - K_{\text{Akku}} - K_{\text{Rückgabe}} \quad (3.4)$$

Bisherige Arbeiten zum Thema Servicegrad in Vermietsystemen beziehen sich hauptsächlich auf automatische stationsbasierte FVS. Der Einfluss des Pedelec-Akkus auf den Servicegrad wurde in vorhandenen Veröffentlichungen nur oberflächlich thematisiert [15, 50]. Hierbei wurde der Energieverbrauch für eine Fahrt lediglich grob geschätzt. Im Rahmen dieser Untersuchung soll die Thematik weiter vertieft werden. Die zur Ermittlung des Servicegrades notwendigen Einflussfaktoren werden anhand von Datenanalysen quantifiziert. Die Untersuchung liefert dadurch einen neuen wissenschaftlichen Beitrag zu folgenden Punkten:

- Ermittlung des Servicegrades in automatischen stationsbasierten PVS auf Basis von realen Fahr- und Vermietsystemdaten
- Darstellung des Einflusses eines erhöhten Ladestroms auf den Servicegrad in automatischen stationsbasierten PVS

4 Lade- und Alterungsverhalten von Lithium-Ionen-Akkus

Da Pedelecs nach aktuellem Stand der Technik überwiegend mit Lithium-Ionen-Akkus ausgestattet sind, wird im Rahmen der Untersuchung der Fokus auf diese Akku-Typen gelegt. Für die spätere Betrachtung eines PVS und die Berechnung des Servicegrades ist das Ladeverhalten des Akkus entscheidend. Hierzu werden im Folgenden unterschiedliche Ladeverfahren dargestellt, mit denen der Ladevorgang durchgeführt werden kann. Eine Erhöhung des Ladestroms führt bei Lithium-Ionen-Akkus zu einem beschleunigten Alterungsprozess. In diesem Zusammenhang werden in diesem Kapitel potentielle Einflüsse auf den Alterungsprozess beschrieben und darauf aufbauend Grenzwerte für das Schnellladen des betrachteten Akkus definiert.

4.1 Einflüsse auf den Alterungsprozess von Lithium-Ionen-Akkus

Die Alterung von Lithium-Ionen-Zellen führt in Abhängigkeit von der Nutzungshäufigkeit und der Zeit zur Verschlechterung ihrer Eigenschaften [51]. Bei dem Alterungsprozess wird zwischen zyklischer und kalendarischer Alterung unterschieden [5]. Als kalendarische Alterung wird der Alterungsprozess bei Nichtnutzung des Akkus bezeichnet. Dieser Prozess kann sich mit der zyklischen Alterung überlagern [52]. Bei der kalendarischen Alterung können sich durch chemische Reaktionen Schichten auf der Grenzfläche zwischen Elektrolyt und Elektrode bilden [53]. Dabei wird Lithium eingebunden, wodurch die Kapazität sinkt [54–56]. Gleichzeitig steigt mit zunehmender Schichtdicke die Impedanz in der Zelle [57]. Der Ladezustand [54] und die Lagertemperatur [54, 58, 59] haben Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit der chemischen Prozesse. Da die chemischen Reaktionen bei hohen Temperaturen schneller ablaufen, erfolgt die kalendarische Alterung bei niedrigen Lagertemperaturen verlangsamt [52, 54, 60, 61]. Nach dem Modell von [61] ergibt sich, wie in Abbildung 4.1 gezeigt, für eine Rundzelle 18650 aus Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid nach 500 Tagen bei einer Lagertemperatur von 0 °C bzw. 30 °C und jeweils einem SOC von 100 % eine Differenz im Kapazitätsverlust von ca. 8 %. Bei zu niedrigen Temperaturen (≤ -25 °C) besteht hingegen die Gefahr, dass das Elektrolyt in der Akkuzelle einfriert und irreversible Schäden entstehen [62]. In Be-

zug auf den Ladezustand beschleunigt ein vollaufgeladener Akku den kalendarischen Alterungsprozess am stärksten [54]. Mit abnehmendem SOC nimmt die Alterung demnach ab. Dennoch sollte ein Akku nicht bei einem SOC = 0 %, also nah an der Entladeschlussspannung, gelagert werden. Durch die Selbstentladung, die bei Lithium-Ionen-Akkus auftritt, kann es zur Unterschreitung der kritischen Spannungsgrenzen kommen, wodurch es zu irreversiblen Schäden beim Akku kommen kann [63]. Der relative Kapazitätsverlust bei der kalendarischen Alterung ist unabhängig von der absoluten Kapazität der Zelle [64]. Für die kalendarische Alterung sind in der Literatur Modelle für Lithium-Ionen-Akkus zu finden [61, 65, 66].

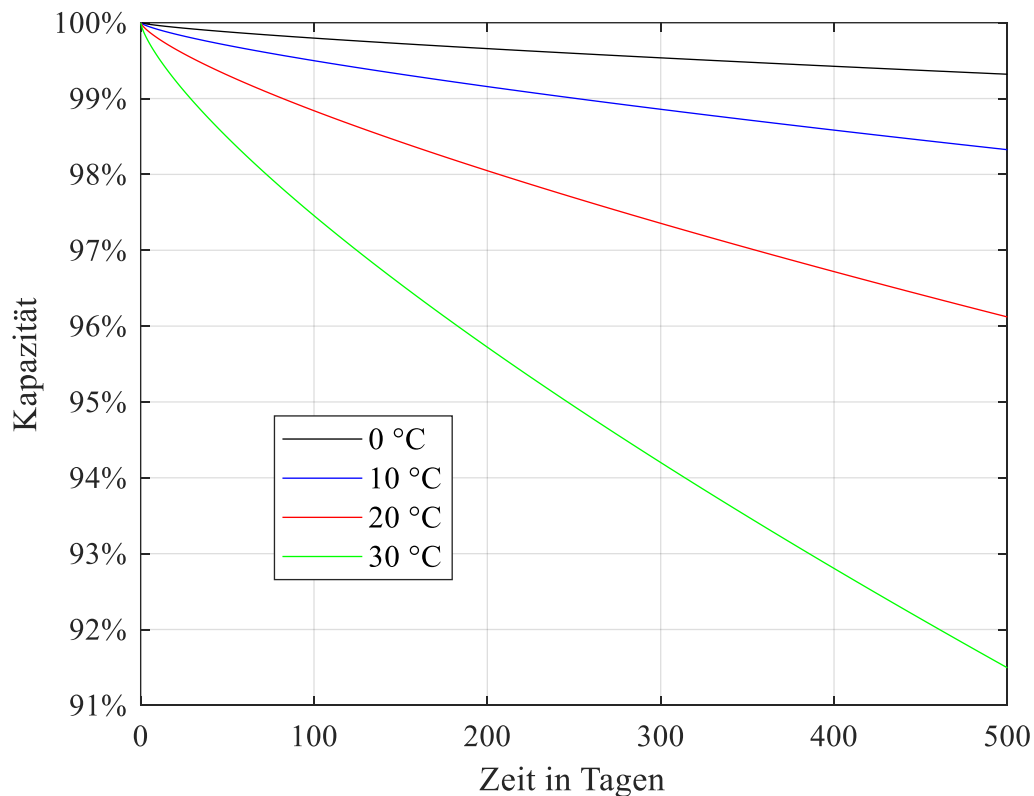


Abbildung 4.1: Entwicklung der Kapazität in Abhängigkeit von der Zeit bei einer Spannung von 4,2 V und Lagertemperaturen von 0 °C, 10 °C, 20 °C und 30 °C aus dem Modell nach [61]

Zyklische Alterung entsteht durch die Nutzung des Akkus und ist sowohl abhängig vom Lade- und Entladestrom [67, 68] als auch von einer potentiellen Überladung [60, 69] und der Entladetiefe. Die Entladetiefe stellt hierbei den prozentualen Anteil der Nennkapazität dar, der dem Akku entnommen wurde. Abbildung 4.2 zeigt den Einfluss der Laderate auf

den Kapazitätsverlust durch die zyklische Alterung für eine Zelle aus Lithium-Ionen-Kobalt-Oxid. Bis zu einer Laderate von 1 C liegt der Kapazitätsverlust nach ca. 900 Zyklen zwischen 15 % und 21 %. Höhere Laderaten reduzieren die Zyklenanzahl für einen vergleichbaren Kapazitätsverlust um ein Drittel bei 1,2 C bzw. zwei Drittel bei 1,5 C. Folgende Vorgänge können in der Zelle für die zyklische Alterung verantwortlich sein:

- Abbau des Anoden- und Kathodenmaterials [70–72]
- die Verschlechterung der Eigenschaften der Elektroden-Elektrolyt Fläche [73, 74]
- der Zerfall des Elektrolyts [75, 76]
- Bildung eines Oberflächenfilms auf den Elektroden [77]
- Anstieg des Innenwiderstandes [78]

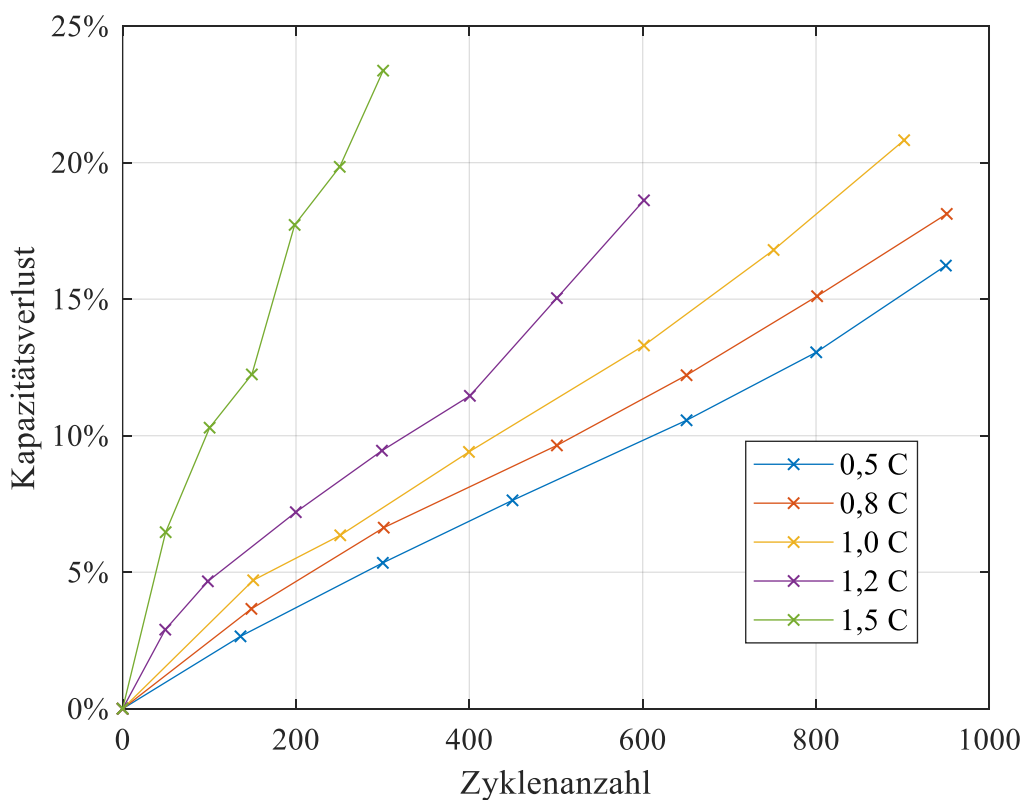


Abbildung 4.2: Kapazitätsverlust bei verschiedenen Laderaten in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl für eine 18650 Akkuzelle aus LiCoO₂ mit einer Nennkapazität von 2,4 Ah bei 25 °C nach [79]

4.2 Vergleich vorhandener Ladeverfahren

Zum Laden des Akkus können verschiedene Verfahren angewendet werden, die sich auf die Lebensdauer und die Leistungsfähigkeit des Akkus auswirken können [80]. Beim Konstantstrom-Verfahren (CC-Verfahren) wird der Ladestrom über die gesamte Dauer des Ladevorgangs konstant gehalten. Hierbei besteht die Gefahr der Überhitzung des Akkus durch Überladung. Daher wird bei diesem Verfahren mit vergleichsweise kleinen Laderaten ($C/10$) geladen [62]. Das Pulsladeverfahren stellt eine abgewandelte Form des Konstantstrom-Verfahrens dar. Hierbei wird mit Pulsen von konstantem Strom geladen. Zwischen den Pulsen herrscht eine Ruhephase, in der die Spannung unter die Ladeschlussspannung fallen kann. Erst dann wird der Akku mit dem nächsten Puls weitergeladen [81]. Für das Pulsladeverfahren ist eine komplexe Hardwarekonfiguration notwendig, die den Strom, die Spannung und die Temperatur während des Ladevorgangs erfasst. Diese Komplexität führt zu höheren Kosten im Vergleich zum regulären CC-Verfahren [82].

Beim Konstantspannungs-Verfahren (CV-Verfahren) wird die Ladespannung über die Ladedauer konstant gehalten. Aufgrund der kleiner werdenden Spannungsdifferenz zwischen Akku und Ladegerät nimmt der Ladestrom über die Zeit ab [53]. Wegen der fehlenden Ladestrombegrenzung können CV-Verfahren den Alterungsprozess bei Lithium-Ionen-Akkus beschleunigen.

Das Constant Current Constant Voltage Ladeverfahren (CCCV) verbindet das Konstantstrom- mit dem Konstantspannungs-Verfahren [83]. Der Vorgang ist dabei in zwei Phasen eingeteilt. In der ersten Phase wird der Ladestrom wie in Abbildung 4.3 konstant gehalten. Die Ladespannung nimmt bis zum Erreichen der Ladeschlussspannung zu. Die Definition einer Ladeschlussspannung ist notwendig, um den Akku vor der Überladung und somit vor beschleunigten Alterungsprozessen, irreversiblen Schäden und thermischem Durchgehen zu schützen. In der zweiten Phase wird die Spannung konstant gehalten und der Ladestrom nimmt mit der Zeit ab, bis ein festdefinierter Minimalstrom, der Ladeschlussstrom, erreicht wird [84].

Das CCCV-Verfahren ist aufgrund der simplen Implementierung das gängigste Verfahren zum Laden [85] von Pedelec-Akkus. Bis zu einer Kapazität von 70-80 % wird der Akku mit einem konstanten Strom aufgeladen (CC-Phase). Die restlichen 20-30 % der

Kapazität erfolgt der Ladevorgang analog zum CV-Verfahren, sodass sich der Ladestrom mit zunehmender Spannung reduziert. Mit kleineren Ladeströmen in der CC-Phase erhöhen sich die Ladeeffektivität, die Lebensdauer und die Ladezeit [86]. Durch den abnehmenden Ladestrom dient die CV-Phase für die Zelle als Erholung [87].

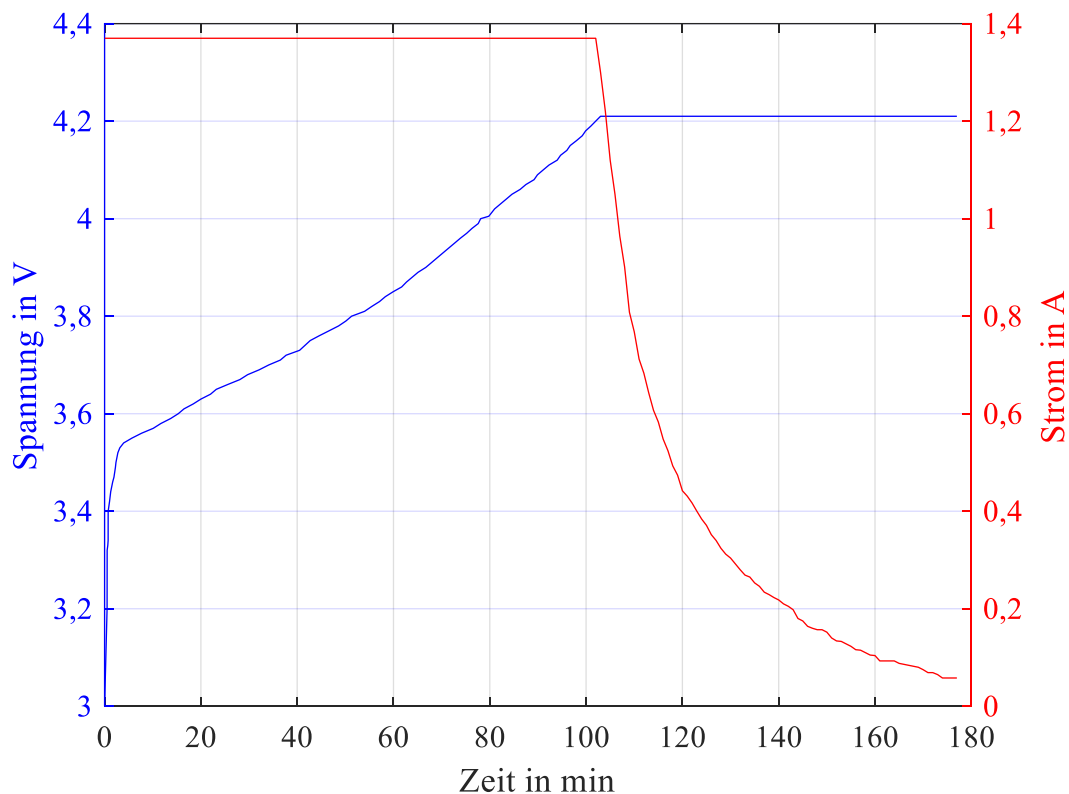


Abbildung 4.3: Strom- und Spannungsverlauf beim Ladevorgang der Akkuzelle Panasonic NCR18650F nach dem CCCV-Ladeverfahren nach [88]

Darüber hinaus existieren zahlreiche Veröffentlichungen, in denen das CCCV-Verfahren in modifizierter Form beschrieben wird, um entweder die Alterung zu verlangsamen oder die Ladezeit zu verkürzen.

- Constant Current Pulse Charging (CC-PC) [89]: Hierbei wird die CV-Phase durch das Pulsladeverfahren ersetzt. Der Ladestrom wird während der Impulse konstant gehalten. Der nächste Impuls wird ausgelöst, sobald die Spannung unter einen definierten Wert fällt, wobei eine Mindestpausenzeit von $t_{\text{Pause,min}}$ eingehalten werden muss. Die Dauer der Pause zwischen den Impulsen nimmt mit steigender

Kapazität zu, da mehr Zeit benötigt wird, um die Ladeschlussspannung zu unterschreiten. Als Endkriterium wird eine Pausenzeit von $t_{\text{Pause,max}}$ definiert.

- Multi-Stage Constant Current Constant Voltage (MCC-CV) [90]: Die CC-Phase wird in bis zu vier Abschnitte unterteilt, in denen der Ladestrom stufenweise reduziert wird, bis die Ladeschlussspannung erreicht ist.
- Multi-Stage Constant Current (MSCC) [91]: Ähnlich wie beim MCC-CV-Verfahren erfolgen mehrere Abstufungen des Ladestroms. Allerdings werden diese nicht in der CC-, sondern in der CV-Phase durchgeführt.

Da für die Untersuchung in dieser Arbeit die zurzeit am Markt vorhandenen Akkupacks relevant sind und diese mit dem klassischen CCCV-Verfahren geladen werden, werden die restlichen Verfahren nicht weiter betrachtet.

4.3 Festlegung von Grenzwerten für das Schnellladen des betrachteten Akkus

In der Automobilbranche wird nach der Richtlinie 2014/94/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe [92] zwischen einem Normalladepunkt und einem Schnellladepunkt unterschieden. Die Leistungsgrenze zwischen den beiden Varianten liegt bei 22 kW. Das bedeutet, dass jeder Ladepunkt mit einer Ladeleistung von höchstens 22 kW als Normalladepunkt und alle anderen als Schnellladepunkt bezeichnet werden. In diesem Fall ist die Grenze für das Schnellladen unabhängig von der Kapazität des Akkus. Sie bezieht sich lediglich auf die Leistung des Ladepunktes. Im Pedelec-Bereich existiert keine einheitliche Definition für das Schnellladen. Um den Begriff des Schnellladens für die nachfolgende Untersuchung definieren zu können, müssen die Folgen des Schnellladens und die damit verbundenen Grenzwerte, bei denen sie auftreten, identifiziert werden. Darüber hinaus sollen Voraussetzungen dargestellt werden, die das Schnellladen bspw. in der Automobilindustrie ermöglichen, um im Anschluss zu prüfen, inwieweit diese Voraussetzungen in der Praxis im Pedelec-Bereich vorhanden sind.

Mit zunehmendem Ladestrom erhöht sich die Wärmeentwicklung in der Akkuzelle. Ursache hierfür ist der Innenwiderstand der Akkuzelle, der sich u. a. aus den Widerständen des Elektrolyts, der Anode und der Kathode zusammensetzt [93]. Darüber hinaus kommt es beim Laden durch den Entropiewechsel des Anoden- und Kathodenmaterials zu einer

exothermen Reaktion [94], wodurch ebenfalls Energie in Form von Wärme abgegeben wird. Ein weiterer Effekt, der aus dem ansteigenden Ladestrom und der damit verbundenen Temperaturerhöhung resultiert, ist die Zunahme der zyklischen Alterung der Akkuzelle [67, 95, 96]. Für eine längere Lebensdauer sowie eine sichere Nutzung soll ein Temperaturbereich von 50-55 °C nicht überschritten werden [97, 98]. Ansonsten besteht die Gefahr des thermischen Durchgehens (Thermal Runaway), bei dem es zur unkontrollierten exothermischen Reaktion zwischen dem Elektrolyt, der Anode und der Kathode kommt [94, 99, 100]. Dadurch erhöht sich in der Zelle die Temperatur, was wiederum zu einer erhöhten Reaktionsgeschwindigkeit führt. Im schlimmsten Fall kommt es zum Brand oder zur Explosion des Akkus. Für das Laden mit hohen Strömen ist demnach ein geeignetes Thermomanagement erforderlich. Dadurch können nicht nur die Lade- und Entladeeffektivität gesteigert, sondern auch die zyklische Lebensdauer erhöht werden [68]. Eine Möglichkeit der Akkutemperierung besteht in der Integration eines Kühlsystems. Hierbei können die Zellen neben der Kühlung mittels Luftstrom mit Kühlflüssigkeit bzw. Kühlplatten oder Latentwärmespeichern gekühlt werden [101]. Kühlsysteme für Pedelec-Akkus sind aktuell auf dem Markt nicht vorhanden. Gründe hierfür sind neben den zusätzlichen Kosten und der erforderlichen kompakten Bauweise die aktuell noch fehlende Notwendigkeit. Insbesondere für die private Nutzung reicht ein vollgeladener Akku für den täglichen Bedarf aus, sodass es ausreichend ist, den Akku nachts über einen längeren Zeitraum mit einem niedrigen Ladestrom zu laden.

Zur Überwachung der Akkuzellen und zum Schutz vor Schäden wird ein Batteriemanagementsystem (BMS) eingesetzt. Das BMS stellt sicher, dass der Betrieb in geeigneten Spannungs- und Temperaturbereichen stattfindet und so die Lebensdauer maximiert wird [102, 103]. Dazu wird beim Laden bspw. die Spannung der Akkuzellen überwacht. Da einige Zellen aufgrund von unterschiedlichen Restladungen die Maximalspannung früher erreichen, kann es zum Stopp des Ladevorgangs oder aber zur Überspannung der Zellen kommen. In der Folge entsteht durch die unvollständig aufgeladenen Zellen ein Kapazitätsverlust im Akkupack. Das BMS führt daher einen Ladungsausgleich zwischen den Zellen durch. Der Ladungsausgleich kann passiv durch die Umwandlung der überschüssigen Energien in Wärme an vorhandenen Widerständen oder aktiv durch einen Ladungsausgleich über den Transport von Ladungen mittels DC-DC-Wandler erfolgen [5].

Neben einem Leistungsmodul zum Laden des Akkus beinhaltet das BMS u. a. eine integrierte Schutzschaltung (Protection Integrated Circuit), die mit dem Akku in Reihe geschaltet ist, um diesen im Falle eines Betriebs außerhalb des sicheren Arbeitsbereiches abschalten zu können. Folgende Punkte werden von der Schutzschaltung überwacht [104]:

- Überspannung
- Tiefenentladung
- zu hoher Ladestrom / zu hoher Entladestrom
- Lastkurzschluss

Im Rahmen der Untersuchung soll der Einfluss von verschiedenen Ladeströmen auf den Servicegrad eines automatischen PVS analysiert werden. In diesem Zusammenhang wird im weiteren Verlauf der Begriff „Schnellladen“ verwendet, der in Bezug auf den zu untersuchenden Akku definiert werden muss. Die Festlegung der Grenze zwischen Standardladen und Schnellladen kann unabhängig von den Akkuspezifikationen mit einem festen Wert für die Ladeleistung bzw. den Ladestrom erfolgen oder in Abhängigkeit von den Akkuspezifikationen über eine feste Laderate durchgeführt werden. Da mit dem *PowerPack 400* nur ein Akkumodell betrachtet wird, macht es in diesem Fall keinen Unterschied, welcher Ansatz verfolgt wird. Für das *PowerPack* existieren herstellerseitig drei verschiedene Ladegeräte mit unterschiedlichen Ladeströmen:

- *Compact Charger* – max. 2 A (0,18 C)
- *Standard Charger* – max. 4 A (0,36 C)
- *Fast Charger* – max. 6 A (0,55 C)

Für die verwendeten Zellen wird ein Standardladestrom von 0,5 C angegeben (Kapitel 8.1). Die Abgrenzung zwischen Standard- und Schnellladen wird daher bei 0,5 C festgelegt. Ladevorgänge mit einer Laderate $> 0,5$ C werden als Schnellladen bezeichnet. Im späteren Verlauf werden Ladeversuche durchgeführt, um die Zeitersparnis bei verschiedenen Laderaten zu ermitteln. Da eine aktive Kühlung der Pedelec-Akkus derzeit nicht vorhanden ist, wird eine maximale Laderate festgelegt, mit der die Versuchsreihen eingegrenzt werden. Auch wenn eine Ermittlung der zyklischen Alterung im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgesehen ist, soll mit der Festsetzung einer maximalen Laderate berücksichtigt werden, dass die Alterung nicht überproportional mit der Erhöhung der Laderate

zunimmt. Das Alterungsverhalten ist grundsätzlich abhängig von der chemischen Zusammensetzung der Zelle [89]. Für Pedelec-Akkus werden zum größten Teil Zellen aus Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid verwendet, da diese eine hohe Energiedichte und – im Vergleich zu Lithium-Kobalt-Oxid – eine höhere Lebensdauer aufweisen [105]. Darüber hinaus liegen bereits verschiedene Untersuchungen zur Abhängigkeit der zyklischen Alterung von der Laderate vor. In [89] wird das End-of-Life-Kriterium (80 % Restkapazität) mit einer Laderate von 0,8 C nach 1.000 Zyklen erreicht. Die Erhöhung der Laderate auf 2,4 C und 4 C hat zur Folge, dass die Zyklenanzahl auf 800 bzw. 600 Zyklen sinkt. [79] setzt die Grenze der kritischen Laderate bei 1 C fest. Bis zu dieser Laderate sind die Unterschiede in der Alterung vernachlässigbar. Bei hohen Laderaten treten zusätzliche Alterungseffekte auf, die die Lebensdauer signifikant verkürzen [79, 86]. Für die spätere Versuchsdurchführung mit dem *PowerPack 400* wird daher eine maximale Laderate von 1 C festgesetzt.

5 Entwicklung eines Modells zur Berechnung des Servicegrades für automatische stationsbasierte Pedelec-Vermietsysteme

Um Aussagen über den Servicegrad eines automatischen stationsbasierten PVS treffen zu können, wird dieses in einem Modell nachgebildet. Hierfür ist die Entwicklung einer Wirkungsstruktur notwendig. Die Wirkungsstruktur stellt die vorhandenen Einflussfaktoren auf den Servicegrad in Beziehung zueinander. Vor der Formulierung einer Wirkungsstruktur müssen zunächst die vorhandene Problemstellung eindeutig definiert und darauf aufbauend die resultierenden Systemgrenzen festgelegt werden. Im Rahmen eines Systemkonzeptes werden Vorgänge im Modell formuliert, aus denen die Wirkungsstruktur abgeleitet wird. Die dabei identifizierten Modellvariablen, -parameter und Einflussgrößen werden benannt und die Beziehung untereinander visualisiert. Um im späteren Verlauf Berechnungen mit dem Modell durchführen zu können, werden die aufgestellten Beziehungen mathematisch beschrieben. Anschließend müssen exogene Einflussfaktoren quantifiziert werden.

5.1 Entwicklung der Wirkungsstruktur für das Modell

Die Entwicklung des Modellkonzeptes und der Wirkungsstruktur orientiert sich an der methodischen Vorgehensweise nach [106]. Die Abfolge der Entwicklung umfasst dabei folgende Punkte:

- a. Definition der Problemstellung und des Modellzwecks
- b. Systemabgrenzung und Definition der Systemgrenzen
- c. Systemkonzept und Wortmodell
- d. Entwicklung der Wirkungsstruktur

a. Definition der Problemstellung und des Modellzwecks

In stationsbasierten automatischen PVS sind Stationen unterschiedlich ausgelastet, da an zentralen Knotenpunkten (z. B. an Bahnhöfen) mehr Pedelecs vermietet werden als in städtischen Randgebieten. Wie viele potentielle Kunden an einer Station pro Tag bedient werden können, hängt u. a. von der Anzahl der Pedelecs an der Station ab. Bei vielen

zeitgleichen Anfragen an einer Station kann es daher vorkommen, dass alle Pedelecs, die an der Station stehen, vermietet sind. In der Folge können Kunden nicht mehr bedient werden. Ein weiterer Faktor, der dazu führt, dass Mietvorgänge nicht durchgeführt werden, ist der SOC des Akkus. Hierbei besteht die Möglichkeit, dass Pedelecs an der Station vorzufinden sind, deren Akku nicht ausreichend geladen ist. Da die Pedelecs für einen Mietvorgang nicht zur Verfügung stehen, werden die Anfragen potentieller Kunden abgelehnt, was wiederum einen negativen Einfluss auf den Servicegrad hat (vgl. Gl.(3.1) & (3.4)).

Anhand des Modells soll eine Station in einem automatischen PVS mit Hilfe von vermietungsspezifischen Größen im Hinblick auf den Servicegrad qualitativ analysiert und bewertet werden. Für die Untersuchungen wird das System in verschiedenen Szenarien simuliert. Dabei werden die Anzahl potentieller Kunden, das Ladekonzept und die Anzahl der Pedelecs an der Station variiert. Bei jedem potentiellen Kunden kann es zu einer fehlenden Serviceleistung seitens des Systems kommen, was wiederum zur Unzufriedenheit führt und den Servicegrad reduziert. Im Modell wird jeder dieser fehlenden Serviceleistungen einer Ursache wie in Abbildung 5.1 zugeordnet:

1. Wenn ein potentieller Kunde an die Station kommt und keine Pedelecs vorfindet, wird dies der Ursache „Pedelec“ zugeordnet. Die Anzahl der Kunden, die dies betrifft, wird als K_{Pedelec} definiert.
2. Wenn ein potentieller Kunde an die Station kommt und Pedelecs vorfindet, die nicht ausreichend geladen sind, wird dies der Ursache „Akku“ zugeordnet. Die Anzahl der Kunden, die dies betrifft, wird als K_{Akku} definiert.
3. Wenn ein potentieller Kunde ein Pedelec mietet und der Akku während des Mietvorgangs keine Energie mehr für die Unterstützung bereitstellen kann, wird dies der Ursache „Rückgabe“ zugeordnet. Die Anzahl der Kunden, die dies betrifft, wird als $K_{\text{Rückgabe}}$ definiert.
4. Sofern der Kunde mit keiner fehlenden Serviceleistung konfrontiert wird, wird dieser innerhalb des Modells als zufriedener Kunde $K_{\text{zufrieden}}$ gewertet.

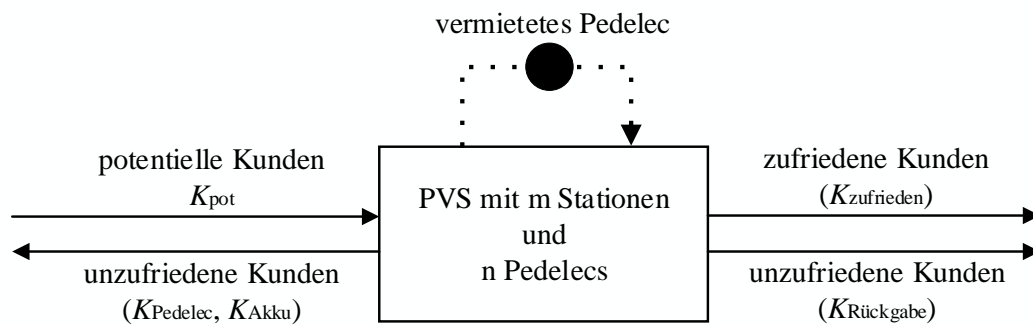


Abbildung 5.1: Prinzipdarstellung des beschriebenen Modells mit den Ursachen für unzufriedene Kunden

b. Systemabgrenzung und Definition der Systemgrenzen

Ein PVS setzt sich in der Regel aus mehreren Stationen zusammen. Die Pedelecs, die an einer Station vermietet werden, können an einer beliebigen Station im Gesamtsystem, sofern dort ein Stellplatz frei ist, zurückgegeben werden. Dadurch sammeln sich zu Stoßzeiten an bestimmten Stationen viele Pedelecs. Durch den Betreiber können Umverteilungen durchgeführt werden, bei denen die Pedelecs von den vollen Stationen auf die leeren Stationen verteilt werden (Redistribution). Innerhalb des Modells wird der Servicegrad für ein PVS mit genau einer Station betrachtet werden. Da die Pedelecs, die an der Station gemietet werden, wieder an der Station zurückgegeben werden, fällt die Notwendigkeit der Redistribution durch den Betreiber weg. Ferner hat eine volle Station keine negativen Auswirkungen auf den Servicegrad, da maximal die Pedelecs an der Station stehen können, die zum Startzeitpunkt $t = 0$ vorhanden sind. Entsprechend der Definition der zufriedenen Kunden in Gl. (3.4) fällt der Anteil der unzufriedenen Kunden, die eine volle Station bei der Rückgabe vorfinden, weg. Durch die Betrachtung einer Station im Modell lassen sich zunächst grundlegende Tendenzen des Einflusses auf den Servicegrad durch den Akku identifizieren, die sich auf ein PVS mit mehreren Stationen übertragen lassen. Die Auswirkungen dieser Annahme auf den Gültigkeitsbereich des Modells werden im Rahmen einer Validierung in Kapitel 6.2.1 überprüft. Zusätzliche Störungen im PVS, wie Stationsausfälle oder Wartungsarbeiten an den Pedelecs, werden im Modell nicht berücksichtigt. Diese können zwar Auswirkungen auf den Servicegrad haben, beeinflussen die unterschiedlichen Ladekonzepte allerdings in gleicher Weise.

c. Systemkonzept und Wortmodell

Der Betrachtungszeitraum innerhalb des Modells wird auf 24 Stunden festgesetzt. Da in der Nacht mit deutlich weniger Anfragen zu rechnen ist, können die Pedelec-Akkus in diesem Zeitraum geladen werden. Eine Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit vom Anfragezeitpunkt ist in Kapitel 5.3.1 zu finden. Eine Betrachtung über 24 Stunden hinaus bringt demnach keine zusätzlichen Erkenntnisse im Hinblick auf den Servicegrad des PVS. Die Station ist mit einer festgelegten Anzahl an Pedelecs n_{Pedelec} ausgestattet. Jedes Pedelec hat einen Akku mit einem Energieinhalt E_{Akku} . Potentielle Kunden K_{pot} kommen zu einem zufälligen Zeitpunkt t_{Anfrage} an die Station. Die Anzahl der zum Zeitpunkt t durchgeführten Mietvorgänge wird mit K_{miet} definiert. Jedem Kunden wird eine Zeit t_{miet} zugewiesen, die angibt, wie lange ein Pedelec gemietet wird und somit nicht mehr zur Verfügung steht. Darüber hinaus wird jedem Kunden eine durchschnittliche Leistung \bar{P}_{Akku} zugeordnet, mit der die verbrauchte Energie während des Mietvorgangs berechnet werden kann. Hierbei reduziert sich die im Akku gespeicherte Energie E_{ist} . Sofern die Anzahl der an der Station verfügbaren Pedelecs $n_{\text{Pedelec,verf}}$ größer als 0 ist und eines dieser Pedelecs ausreichend geladen ist, kann die Anfrage durchgeführt werden. Andernfalls gilt die Anfrage als erfolglos und der Kunde wird K_{Pedelec} zugeordnet. Falls ausschließlich Pedelecs an der Station stehen, deren Akkus nicht ausreichend geladen sind, gilt die Anfrage ebenfalls als erfolglos. Diese Kunden werden K_{Akku} zugeordnet. Pedelecs, die nicht vermietet sind und deren Akkus einen SOC $< 100\%$ haben, werden gemäß der hinterlegten Ladekurve mit einer Ladeleistung P_{Lade} geladen. Die Ladekurve ist in Kapitel 5.3.4 dargestellt. Die Zeit zwischen der Rückgabe eines Pedelecs und einem weiteren Mietvorgang wird als t_{Lade} definiert. Der Ladevorgang erfolgt, sobald das Pedelec zurückgegeben worden ist. Akkus von vermieteten Pedelecs verlieren während des Mietvorgangs in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Akkuleistung Energie. Innerhalb des Modells ist es möglich, dass die vorhandene Akku-Energie und somit der SOC während des Mietvorgangs negativ wird. Pedelecs, bei denen der Akku bei der Rückgabe einen SOC $< 0\%$ aufweist, werden als mangelnder Service eingestuft, sodass der Kunde $K_{\text{Rückgabe}}$ zugeordnet wird. Nach der Zuordnung wird der SOC in diesen Fällen wieder auf 0% gesetzt. Nach Ablauf der 24 Stunden werden anhand der unzufriedenen Kunden bzw. der zufriedenen Kunden $K_{\text{zufrieden}}$ jeweils ein Teilservicegrad SG_{Akku} und ein Teilservicegrad $SG_{\text{Pe-}}$

5 Entwicklung eines Modells zur Berechnung des Servicegrades für automatische stationsbasierte Pedelec-Vermietsysteme

delec und der daraus resultierende Servicegrad SG_{ges} berechnet. $K_{Rückgabe}$ wird im Teilservicegrad SG_{Akku} berücksichtigt. Aus dem Wortmodell ergeben sich die in Tabelle 5.1 aufgelisteten Modellgrößen.

Tabelle 5.1: Aus dem Wortmodell abgeleitete Modellgrößen

Formelzeichen	Beschreibung
E_{Akku}	Energieinhalt des Akkus
E_{ist}	gespeicherte Energie im Akku
K_{Akku}	unzufriedene Kunden durch unzureichend geladene Akkus
K_{miet}	Kunden, die ein Pedelec gemietet haben
$K_{Pedelec}$	unzufriedene Kunden durch fehlende Pedelecs
K_{pot}	potentielle Kunden
$K_{Rückgabe}$	unzufriedene Kunden durch einen leeren Akku bei der Rückgabe
$K_{zufrieden}$	zufriedene Kunden
$n_{Pedelec,verf}$	Verfügbare Pedelecs
$n_{Pedelec}$	Pedelecs pro Station
\bar{P}_{Akku}	durchschnittliche Akkuleistung während der Fahrt
P_{Lade}	Ladeleistung
SG_{ges}	Servicegrad
SG_{Akku}	Teilservicegrad Akku
$SG_{Pedelec}$	Teilservicegrad Pedelec
SOC	State of Charge
t_{Lade}	Ladedauer
t_{miet}	Mietdauer

d. Entwicklung der Wirkungsstruktur

Für einen Großteil der aus dem Wortmodell abgeleiteten Modellgrößen lassen sich Wechselwirkungen ermitteln. In Abbildung 5.2 werden die Zusammenhänge anhand einer Wirkungsstruktur gesondert dargestellt. Bei den Wirkungsbeziehungen werden nur direkte Wirkungen berücksichtigt. Darüber hinaus wird jede Wirkungsbeziehung als isoliert be-

trachtet. Zur Entwicklung einer Wirkungsstruktur werden zunächst die Wirkungsbeziehungen zwischen verschiedenen Einflussgrößen definiert. Dies beinhaltet nicht nur die Identifizierung der direkten Beziehungen zwischen den Einflussgrößen, sondern auch die damit verbundenen Auswirkungen durch die Änderung einer Einflussgröße.

Servicegrad SG_{ges}

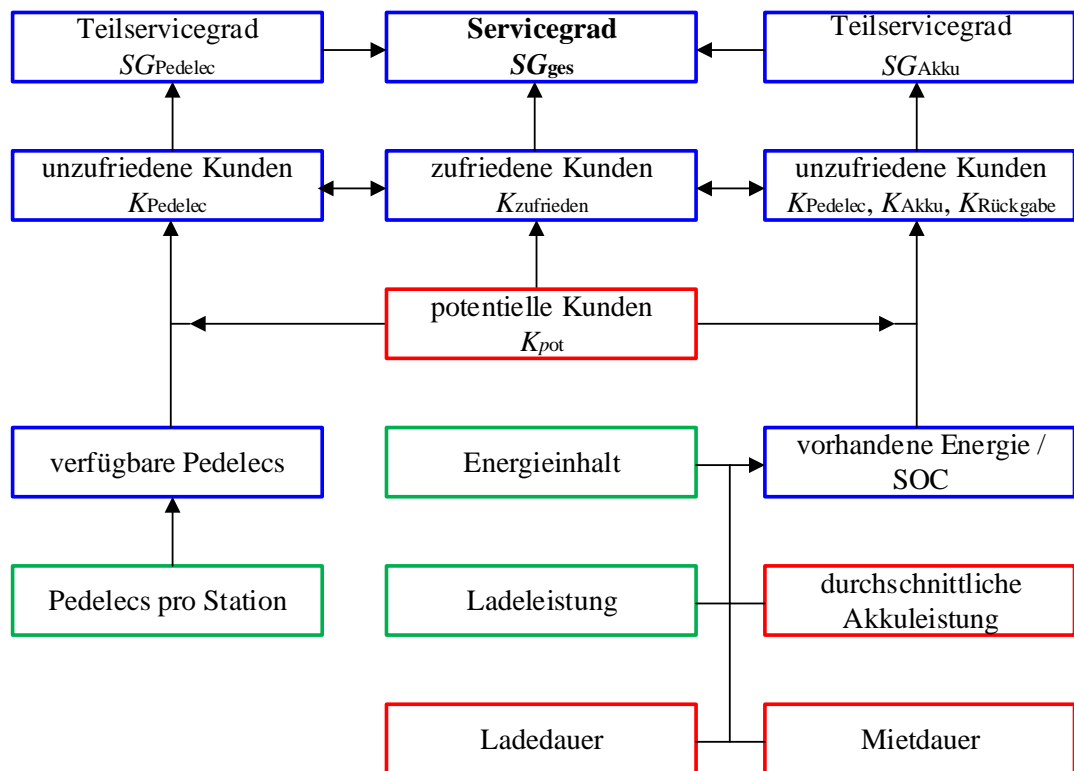
- Wenn die Teilservicegrade steigen, steigt der Servicegrad.
- Wenn die Anzahl der zufriedenen Kunden steigt, steigt der Servicegrad des PVS.

Teilservicegrad $SG_{Pedelec}$

- Wenn mehr Pedelecs im PVS vorhanden sind, ist die Anzahl der verfügbaren Pedelecs über den Betrachtungszeitraum höher.
- Wenn mehr Pedelecs zur Verfügung stehen, gibt es weniger unzufriedene Kunden $K_{Pedelec}$.
- Wenn die Anzahl unzufriedener Kunden $K_{Pedelec}$ sinkt, steigt der Teilservicegrad $SG_{Pedelec}$.

Teilservicegrad SG_{Akku}

- Wenn die durchschnittliche Akkuleistung für einen Mietvorgang steigt, ist die vorhandene Energie im Akku am Ende des Mietvorgangs niedriger.
- Wenn die Dauer des Mietvorgangs steigt, ist die vorhandene Energie im Akku am Ende des Mietvorgangs niedriger.
- Wenn die Ladeleistung zunimmt, steigt die vorhandene Energie im Akku.
- Wenn die Ladedauer zunimmt, steigt die vorhandene Energie im Akku.
- Wenn der Energieinhalt des Akkus höher ist, steigt die durchschnittliche vorhandene Energie im Akku.
- Wenn mehr Energie im Akku gespeichert ist, reduziert sich die Anzahl unzufriedener Kunden K_{Akku} und $K_{Rückgabe}$.
- Wenn die Anzahl unzufriedener Kunden K_{Akku} oder $K_{Rückgabe}$ sinkt, steigt der Teilservicegrad SG_{Akku} .



Legende exogene Eingangsgröße endogene Eingangsgröße Modellvariable

Abbildung 5.2: Wirkungsstruktur des entwickelten Modells

5.2 Funktionale Zusammenhänge zwischen den abgeleiteten Einflussfaktoren

Anhand der Wirkungsstruktur wird der funktionale Zusammenhang der in Tabelle 5.1 aufgeführten Einflussfaktoren dargestellt. Die Ermittlung der funktionalen Beziehungen orientiert sich an der entwickelten Wirkungsstruktur beginnend mit dem Servicegrad SG_{ges} . Der Servicegrad SG_{ges} lässt sich aus dem Verhältnis der zufriedenen Kunden $K_{zufrieden}$ zu den potentiellen Kunden K_{pot} berechnen:

$$SG_{ges} = \frac{K_{zufrieden}}{K_{pot}} \quad (5.1)$$

Da Kunden bei der Rückgabe im vorliegenden Modell zu keinem Zeitpunkt eine volle Station vorfinden, wird Gl. (3.4) zur Berechnung der zufriedenen Kunden entsprechend angepasst:

$$K_{\text{zufrieden}} = K_{\text{pot}} - K_{\text{Pedelec}} - K_{\text{Akku}} - K_{\text{Rückgabe}} \quad (5.2)$$

Durch Einsetzen von Gl. (5.2) in Gl. (5.1) ergibt sich für den Servicegrad:

$$SG_{\text{ges}} = 1 - \frac{K_{\text{Pedelec}} + K_{\text{Akku}} + K_{\text{Rückgabe}}}{K_{\text{pot}}} \quad (5.3)$$

Die Teilservicegrade SG_{Pedelec} und SG_{Akku} lassen sich analog zum Servicegrad berechnen:

$$SG_{\text{Pedelec}} = 1 - \frac{K_{\text{Pedelec}}}{K_{\text{pot}}} \quad (5.4)$$

$$SG_{\text{Akku}} = 1 - \frac{K_{\text{Akku}} + K_{\text{Rückgabe}}}{K_{\text{pot}}} \quad (5.5)$$

Durch Substitution der beiden Terme in Gl. (5.3) lässt sich der Servicegrad anhand der beiden Teilservicegrade berechnen:

$$SG_{\text{ges}} = SG_{\text{Pedelec}} + SG_{\text{Akku}} - 1 \quad (5.6)$$

Für jeden potentiellen Kunden $K_{\text{pot},i}$ wird vor dem Mietvorgang überprüft, ob ausreichend Pedelecs vorhanden sind und ob der jeweilige Akku ausreichend geladen ist. Zu jedem potentiellen Kunden $K_{\text{pot},i}$ existieren die Eigenschaften $K_{\text{zufrieden},i}$, $K_{\text{Pedelec},i}$, $K_{\text{Akku},i}$ und $K_{\text{Rückgabe},i}$, denen vor Ankunft des Kunden an der Station jeweils der Wert 0 zugeordnet wird. Bei jeder Kundenanfrage wird in Abhängigkeit von den verfügbaren Pedelecs und deren SOC entschieden, ob eine Anfrage durchgeführt oder abgelehnt wird. Für die Eigenschaft $K_{\text{Pedelec},i}$ folgt daraus:

$$K_{\text{Pedelec},i} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } n_{\text{Pedelec,verf}} > 0 \\ 1 & \text{wenn } n_{\text{Pedelec,verf}} = 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

$K_{\text{Pedelec},i} = 0$ führt nicht automatisch zu einem Mietvorgang. Es bedeutet nur, dass bei der Anfrage mindestens ein Pedelec an der Station verfügbar ist. Eine weitere Überprüfung wird daher im Hinblick auf die gespeicherte Energie im Akku und den daraus resultierenden SOC gemacht. Sofern der SOC größer ist als die minimale Vorgabe SOC_{\min} , findet ein Mietvorgang statt:

$$K_{\text{Akku},i} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } n_{\text{Pedelec,verf}} > 0 \text{ und } SOC \geq SOC_{\min} \\ 1 & \text{wenn } n_{\text{Pedelec,verf}} > 0 \text{ und } SOC < SOC_{\min} \end{cases} \quad (5.8)$$

Bei der Rückgabe des Pedelecs wird der SOC überprüft. Wie bereits erwähnt, kann der SOC im Modell negative Werte annehmen, um den abgeschlossenen Mietvorgang zu beurteilen.

$$K_{\text{Rückgabe},i} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } SOC \geq 0 \\ 1 & \text{wenn } SOC < 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

Der Wert für die Zufriedenheit des Kunden $K_{\text{zufrieden},i}$ ist direkt an den Wert von $K_{\text{Rückgabe},i}$ geknüpft. Das bedeutet, wenn $K_{\text{Rückgabe},i} = 0$, dann ist $K_{\text{zufrieden},i} = 1$ und umgekehrt.

Für die Gesamtanzahl unzufriedener Kunden K_{Pedelec} ergibt sich:

$$K_{\text{Pedelec}} = \sum_{i=1}^{K_{\text{pot}}} K_{\text{Pedelec},i} \quad (5.10)$$

Analog dazu lassen sich alle anderen Werte für K_{Akku} , $K_{\text{Rückgabe}}$ und $K_{\text{zufrieden}}$ berechnen. Die Anzahl der an der Station vorhandenen Pedelecs zum Zeitpunkt t lässt sich über die Gesamtanzahl n_{Pedelec} und die Anzahl der aktiven Mietvorgänge K_{miet} zum Zeitpunkt t berechnen:

$$n_{\text{Pedelec,verf}}(t) = n_{\text{Pedelec}} - K_{\text{miet}}(t) \quad (5.11)$$

Die zum Zeitpunkt t aktiven Mietvorgänge K_{miet} können wiederum über die Differenz aus potentiellen Kunden und der Summe aus zufriedenen und unzufriedenen Kunden ermittelt werden:

$$K_{\text{miet}}(t) = K_{\text{pot}}(t) - \sum_{i=1}^{K_{\text{pot}}(t)} (K_{\text{Pedelec},i} + K_{\text{Akku},i} + K_{\text{Rückgabe},i} + K_{\text{zufrieden},i}) \quad (5.12)$$

Bei der Berechnung der im Akku gespeicherten Energie müssen jedes Pedelec j und die mit dem Pedelec durchgeführte Anzahl an Mietvorgängen k sowie die dazugehörigen Ladevorgänge einzeln betrachtet werden:

$$E_{\text{ist},j} = E_{\text{Akku}} - \sum_{k=1}^n t_{\text{miet},k} \cdot \bar{P}_{\text{Akku},k} - t_{\text{Lade},k} \cdot P_{\text{Lade},k} \quad (5.13)$$

Aufgrund der begrenzten Akkukapazität gilt für Gl. (5.13) die Bedingung, dass zu jedem Zeitpunkt $E_{\text{ist}} \leq E_{\text{Akku}}$ sein muss. Der SOC lässt sich über das Verhältnis von gespeicherter Energie zum Energieinhalt ermitteln.

$$SOC(t) = \frac{E_{\text{ist}}}{E_{\text{Akku}}} \quad (5.14)$$

5.3 Quantifizierung modellrelevanter Einflussgrößen

Im Rahmen der Untersuchung wird der Servicegrad in Abhängigkeit von der Anzahl der potentiellen Kunden und der Anzahl der Pedelecs pro Station ermittelt. Der Energieinhalt der Pedelec-Akkus wird auf 370 Wh festgelegt. Die Ermittlung dieses Wertes ist in Kapitel 8 zu finden. Alle anderen Eingangsgrößen werden anhand von Datenauswertungen realer Vermietsysteme bzw. aufgezeichneter Fahrten quantifiziert. Dabei handelt es sich um folgende Größen:

- 1) Zeitpunkt einer Kundenanfrage: Da Kunden das PVS nicht zu jeder Zeit gleich häufig nutzen, muss die Häufigkeitsverteilung über den Betrachtungszeitraum ermittelt werden. Die Anzahl der Anfragen und somit der potentiellen Kunden wird im Rahmen des Modells variiert.
- 2) Mietdauer: Die Mietdauer ist die Zeit, in der ein Pedelec nicht zur Verfügung steht. Die Zeit zwischen zwei Mietvorgängen wird – sofern ein Bedarf vorhanden ist – als Ladezeit genutzt.

- 3) Durchschnittliche Akkuleistung: Über den gesamten Mietvorgang wird die Unterstützung des Pedelecs unterschiedlich intensiv genutzt. Dementsprechend ist die Leistung über den gesamten Vorgang nicht konstant. Für das Modell sind die Zeitpunkte der Leistungsspitzen nicht relevant, sondern nur der Energiebedarf über den gesamten Mietzeitraum. Somit kann mit einer durchschnittlichen Akkuleistung gerechnet werden.
- 4) Ladeleistung: Die Ladeleistung ist abhängig von dem verwendeten Akku und dem vorgegebenen Ladestrom. Im Rahmen der Untersuchung wird ausschließlich das *PowerPack 400* von *Bosch* betrachtet. Das Ladeverhalten muss entsprechend analysiert werden.

Die ersten drei Eingangsgrößen sind stochastisch verteilt. Hierfür werden die zugehörigen Dichtefunktionen ermittelt. Für den Zeitpunkt der Anfrage und für die Mietdauer werden die Datenbanken der in

Tabelle 5.2 aufgeführten automatischen stationsbasierten FVS als Grundlage verwendet, da für diese Vermietsysteme eine umfangreiche und detaillierte Datenbasis existiert, die zum Zeitpunkt der Untersuchung für entsprechende PVS noch nicht vorliegt. Innerhalb der FVS wird jedem Fahrrad eine Identifikationsnummer zugeordnet. Zu jedem Fahrrad werden außerdem die Startstation, die Endstation sowie der Start- und Endzeitpunkt des Mietvorgangs aufgezeichnet, sodass der Zeitpunkt der Anfrage und die Mietdauer für jeden Mietvorgang bestimmt werden können.

Tabelle 5.2: Überblick der in der Untersuchung berücksichtigten FVS

Name	Ort	Startjahr	Systemgröße (Fahrräder/Stationen)	Quelle Datenbank
<i>Citi Bike</i>	<i>New York City</i>	2013	12.000/750 [107]	[108]
<i>Indego</i>	<i>Philadelphia</i>	2015	1.500/130 [109]	[110]
<i>Capital Bikeshare</i>	<i>Washington D.C.</i>	2014	4.300/500 [111]	[112]

Die Verteilung der durchschnittlichen Akkuleistung erfolgt über die Auswertung von Fahrdaten, die mit Pedelecs der Hochschule Hannover über einen Zeitraum von zehn Monaten aufgenommen wurden. Für die Simulation der Ladeleistung werden die Strom- und Spannungsverläufe beim Ladevorgang des *PowerPack 400* aufgezeichnet und das Ladeverhalten analysiert.

5.3.1 Ermittlung der Häufigkeitsverteilung von Kundenanfragen über einen Zeitraum von 24 Stunden

Die Problematik bei der Ermittlung des Servicegrades ist die Erfassung aller potentieller Kunden. Entsprechend ist die Häufigkeitsverteilung für den Anfragezeitpunkt schwer zu bestimmen. Aus diesem Grund wird für den weiteren Verlauf die Annahme getroffen, dass sich die Häufigkeitsverteilung für den Zeitpunkt einer Kundenanfrage t_{Anfrage} analog zur Häufigkeitsverteilung für einen Mietvorgang verhält. Demnach ist t_{Anfrage} abhängig von der Tageszeit. Durch bestimmte Faktoren bzw. Nutzergruppen (z. B. Berufspendler, Tourismus) kommt es zu Stoßzeiten, in denen die Wahrscheinlichkeit für eine Anfrage steigt. Abbildung 5.3 (oben) zeigt die durchschnittliche Häufigkeitsverteilung für den Startzeitpunkt eines Mietvorgangs im Vermietsystem *Citi Bike* für das Jahr 2017.

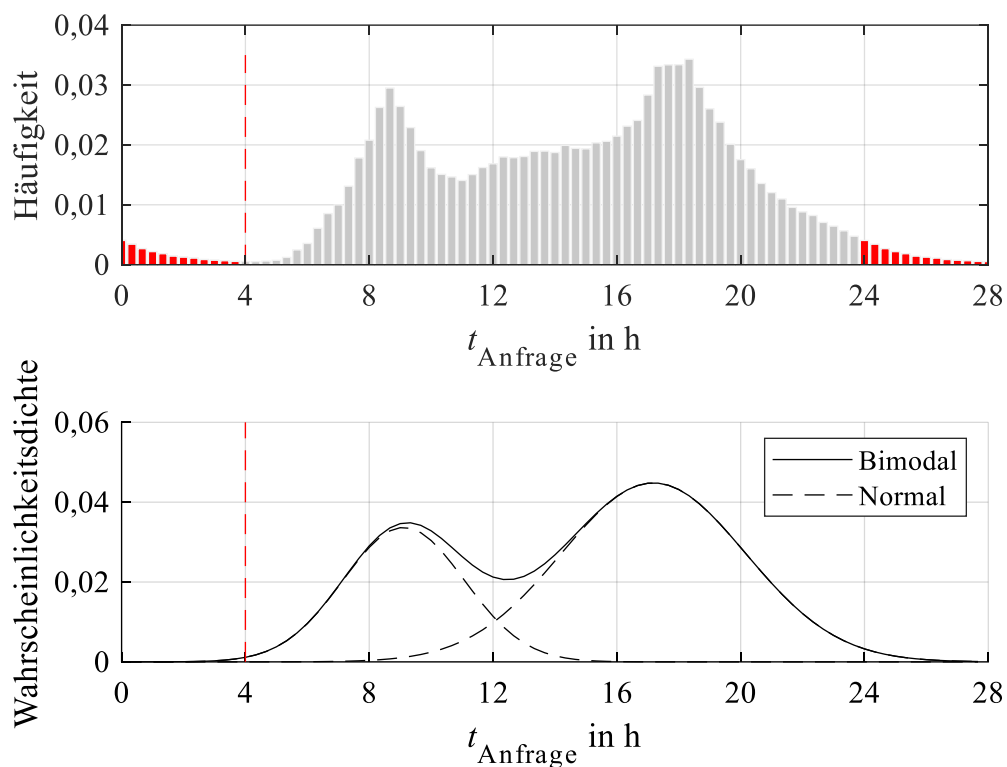


Abbildung 5.3: Häufigkeitsverteilung für den Zeitpunkt einer Anfrage t_{Anfrage} über einen Betrachtungszeitraum von 24 h (oben); Wahrscheinlichkeitsdichte der bimodalen Verteilung und den beiden einzelnen Normalverteilungen ($\mu_{A,1} = 9,11$ h; $\sigma_{A,1}^2 = 3,85$ h²; $\mu_{A,2} = 17,18$ h; $\sigma_{A,2}^2 = 8,85$ h²) für das Vermietsystem *Citi Bike* im Jahr 2017 (unten) auf Basis von [108]

Es bilden sich zwei charakteristische Zeiträume (8,33 h – 9,33 h & 17 h – 18,67 h) ab, in denen die Anzahl der Mietvorgänge ansteigt. In den Nachtstunden (22 h – 24 h & 0 h – 6 h) wird eine vergleichsweise geringe Anzahl an Mietvorgängen durchgeführt.

Der Zeitpunkt einer Anfrage über einen Zeitraum von 24 h betrachtet ist bimodal verteilt. Das bedeutet, dass sich die Verteilung aus zwei einzelnen überlagerten Normalverteilungen zusammensetzt, aus denen die zwei lokalen Maxima resultieren. Zur Ermittlung der Dichtefunktion für die Bimodalverteilung muss ein Betrachtungsstartpunkt festgelegt werden, da dieser über einen Zeitraum von 24 h nicht zwangsläufig bei $t_{\text{Anfrage}} = 0$ h liegt. Der Startpunkt wird auf das Minimum der Häufigkeitsverteilung festgelegt, welches, wie in Abbildung 5.3 (unten) zu erkennen ist, bei $t_{\text{Anfrage}} = 4$ h liegt. Dadurch verschiebt sich der Endpunkt der Betrachtung auf $t_{\text{Anfrage}} = 28$ h. Die Auswertung stellt eine durchschnittliche Verteilung über das Jahr 2017 und über alle sieben Wochentage dar. Insbesondere wenn eine Nutzung überwiegend von Berufspendlern stattfindet, kann sich eine andere Verteilung am Wochenende bzw. an arbeitsfreien Tagen ergeben. In Abbildung 5.4 ist die Auswertung weiterer Vermietsysteme aus Philadelphia und Washington D.C. dargestellt.

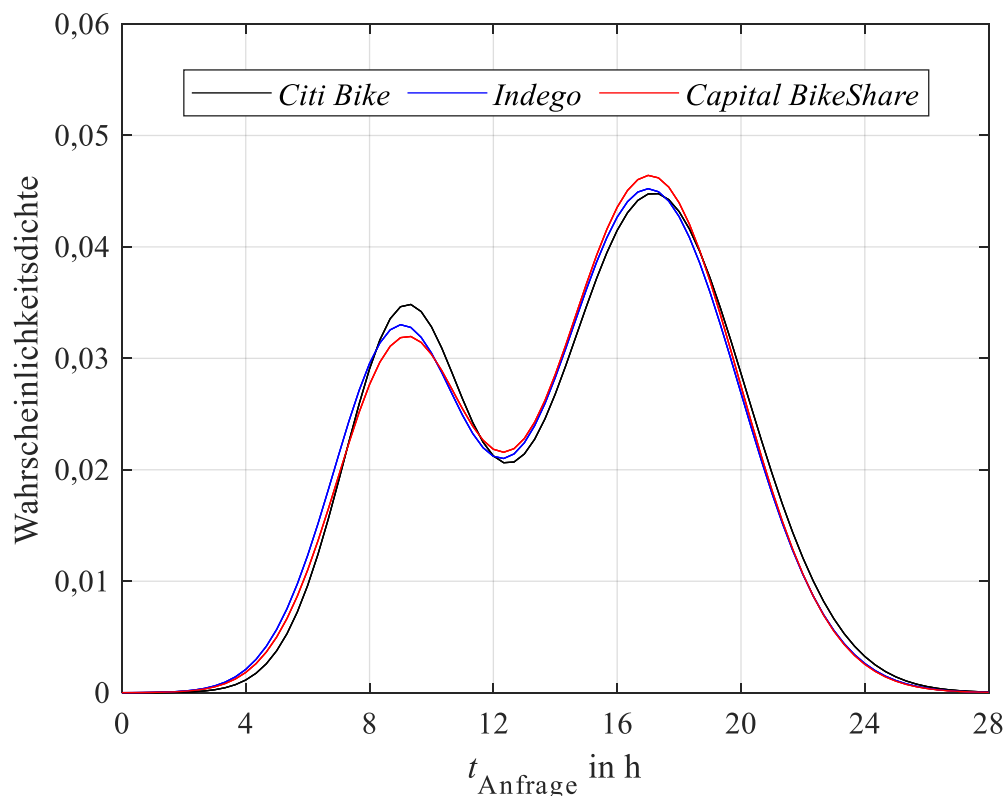


Abbildung 5.4: Wahrscheinlichkeitsdichte der bimodalen Verteilung für den Anfragezeitpunkt t_{Anfrage} für die Vermietsysteme *Citi Bike*, *Indego* und *Capital BikeShare* im Jahr 2017 auf Basis von [108, 110, 112]

Die Wahrscheinlichkeitsdichten zeigen minimale Abweichungen zu dem bimodalen Verhalten des vorangegangenen Vermietsystems.

Unter der Annahme, dass sich der Zeitpunkt des Mobilitätsbedarfs bei der Nutzung von Fahrrädern und Pedelecs nicht unterscheidet, können die ermittelten Dichtefunktionen in das Modell integriert werden. Anhand einer Sensitivitätsanalyse in Kapitel 6.2.2 werden die Auswirkungen der Verläufe auf den Servicegrad untersucht.

5.3.2 Ermittlung der Häufigkeitsverteilung für die Dauer eines Mietvorgangs

Da für große PVS keine umfangreichen Daten zur Verfügung stehen, wurde für die Ermittlung der stochastischen Verteilung auf Daten aus dem FVS *Citi Bike* zurückgegriffen. Aufgrund der elektrischen Unterstützung ist die Durchschnittsgeschwindigkeit mit einem Pedelec größer als mit einem Fahrrad. Fährt ein Berufspendler sowohl mit dem Fahrrad als auch mit dem Pedelec die gleiche Route, benötigt er mit dem Pedelec weniger Zeit, wodurch die Dauer der Mietvorgänge insgesamt geringer wäre. Allerdings ist das Fahren mit dem Pedelec aufgrund der elektrischen Unterstützung weniger anstrengend, sodass bspw. Touristen längere Strecken zurücklegen können und das Pedelec somit im Vergleich zum Fahrrad länger gemietet wird. Es besteht daher die Möglichkeit, dass eine Häufigkeitsverteilung in FVS auch in PVS vorkommen kann. Es wird die Annahme getroffen, dass sich die Mietdauer in PVS ähnlich verhält wie in FVS.

Die Mietdauer setzt sich in diesem Fall aus dem aufgezeichneten Startzeitpunkt des Mietvorganges und dem Rückgabezeitpunkt zusammen. Die Zeit zwischen zwei Mietvorgängen wird innerhalb des Modells als Ladezeit betrachtet. Die durchschnittliche Mietdauer liegt bei der Häufigkeitsverteilung bei 14,43 Minuten und das Maximum bei sechs Minuten (~6,86 %). Die Häufigkeit fällt nach dem Maximum mit zunehmender Mietdauer ab. Abbildung 5.5 zeigt, dass über 92 % der Fahrten in weniger als einer halben Stunde und 99,62 % in weniger als 60 Minuten durchgeführt werden.

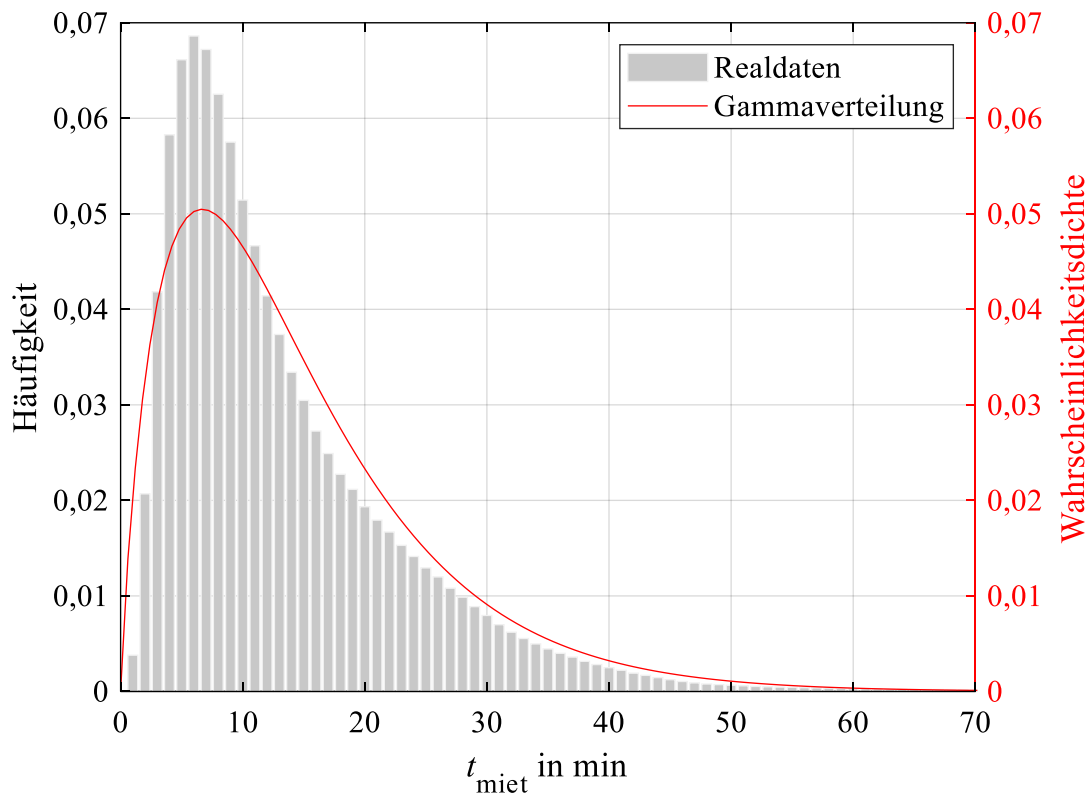


Abbildung 5.5: Häufigkeitsverteilung der Mietdauer und die dazugehörige Wahrscheinlichkeitsdichte der Gamma-Verteilung für das Vermietsystem *Citi Bike* im Jahr 2017 ($\alpha = 1,8611$; $\beta = 7,7580$) auf Basis von [108]

Bei der stochastischen Verteilung der Mietdauer handelt es sich um eine Gamma-Verteilung mit der Dichtefunktion:

$$f(t_{\text{miet}}|\alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} t_{\text{miet}}^{\alpha-1} e^{-\frac{t_{\text{miet}}}{\beta}} & t_{\text{miet}} > 0 \\ 0 & t_{\text{miet}} \leq 0 \end{cases} \quad (5.15)$$

α & β ... Reelle Parameter ($b>0$ und $p>0$)
 $\Gamma(\alpha)$... Funktionswert der Gammafunktion

In Abbildung 5.6 ist die Auswertung weiterer Vermietsysteme dargestellt. Die Wahrscheinlichkeitsdichte zeigt ein ähnliches Verhalten wie im vorangegangenen Vermietsystem. Allerdings unterscheiden sich das Maximum der jeweiligen Gamma-Verteilung (*Indego*: 6 min; *Capital BikeShare*: 3,6 min) und die durchschnittliche Mietdauer (*Indego*: 15,93 min; *Capital BikeShare*: 19,22 min) von dem vorangegangenen FVS. In Kapitel 6.2.2

wird daher anhand einer Sensitivitätsanalyse überprüft, welchen Einfluss eine Änderung der durchschnittlichen Mietdauer auf den Servicegrad hat.

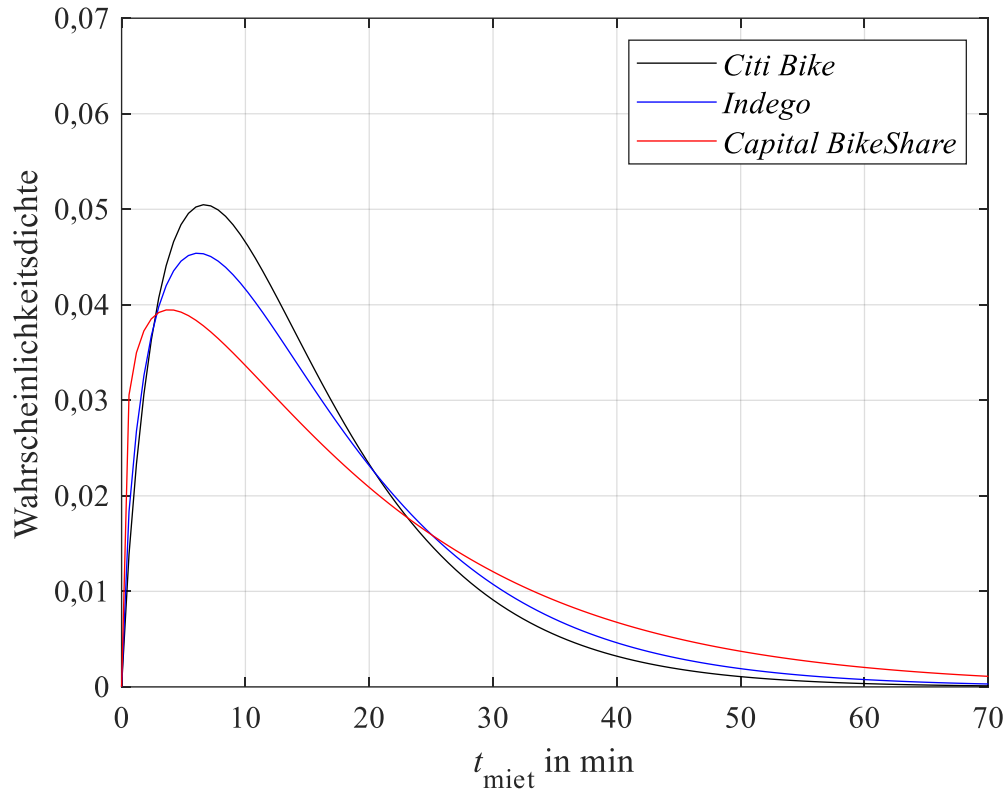


Abbildung 5.6: Wahrscheinlichkeitsdichte der Gamma-Verteilung für die Dauer eines Mietvorgangs für die Vermietsysteme *Citi Bike*, *Indego* und *Capital BikeShare* im Jahr 2017 auf Basis von [108, 110, 112]

5.3.3 Ermittlung der Häufigkeitsverteilung für die durchschnittliche Akkuleistung pro Mietvorgang

Im Rahmen des Projektes *eRad in Freizeit und Tourismus* wurde an der Hochschule Hannover ein Datenlogger für Pedelecs entwickelt, der fahrrelevante Daten aufzeichnen kann. Zur Ermittlung der durchschnittlichen Akkuleistung werden die Daten der Fahrten ausgewertet, die in der Stadt Hannover durchgeführt wurden. Die Akkuleistung ergibt sich aus der Akkuspannung U_{Akku} und dem Akkustrom I_{Akku} , die über den Datenlogger aufgezeichnet wurden. Dadurch lässt sich zu jedem Zeitpunkt der Fahrt t die Akkuleistung berechnen:

$$P_{\text{Akku}}(t) = U(t)_{\text{Akku}} \cdot I(t)_{\text{Akku}} \quad (5.16)$$

Darauf aufbauend kann die durchschnittliche Leistung bestimmt werden:

$$\bar{P}_{\text{Akku}} = \frac{1}{t_{\text{Fahrt}}} \int_0^{t_{\text{Fahrt}}} P(t) dt \quad (5.17)$$

Im Zeitraum vom 01.09.2015 bis zum 30.06.2016 wurde die durchschnittliche Akkuleistung von 615 Fahrten ermittelt. Die Normalverteilung der durchschnittlichen Akkuleistung pro Fahrt ist in Abbildung 5.7 gezeigt.

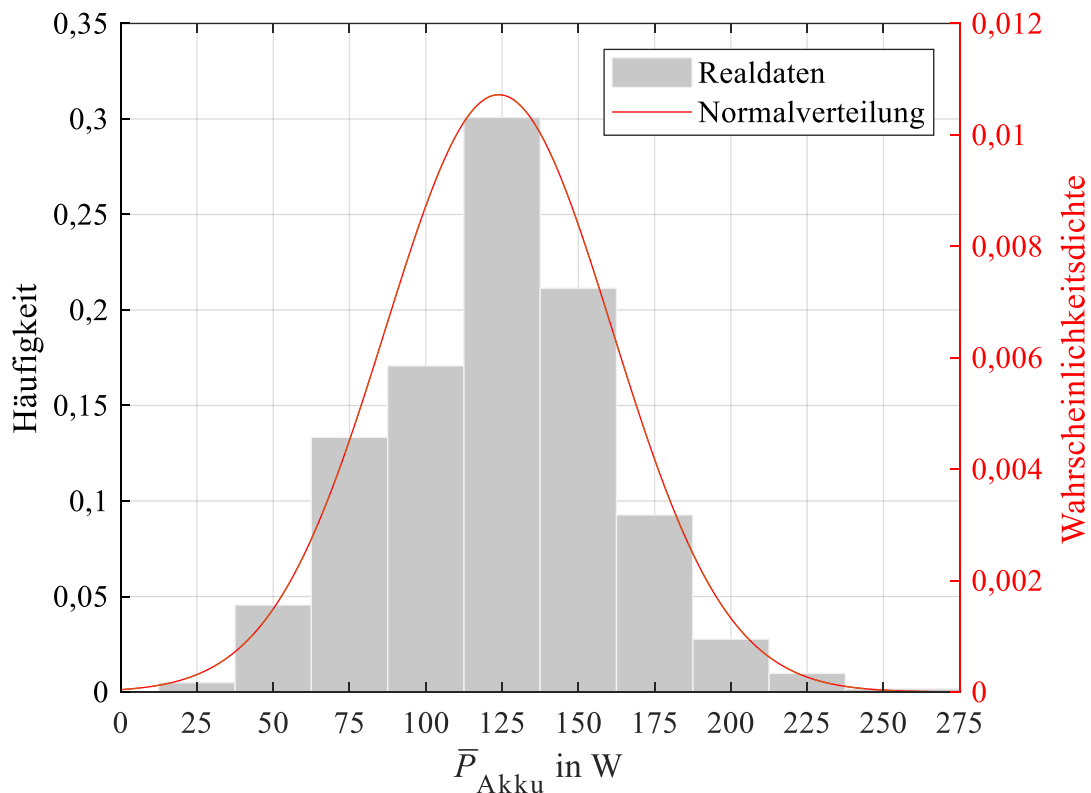


Abbildung 5.7: Häufigkeitsverteilung der ermittelten durchschnittlichen Akkuleistung der insgesamt 615 Fahrten in Hannover und die dazugehörige Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung ($\mu_P = 123,92$ W; $\sigma_P^2 = 37,21$ W²)

Die Bandbreite für die ausgewerteten Fahrten reicht von 22 W bis ca. 275 W. Der Erwartungswert liegt bei $\mu_P = 123,92$ W. Einen wesentlichen Einflussfaktor für den großen Wertebereich der durchschnittlichen Akkuleistung stellt die gewählte Unterstützungsstufe während der Fahrt dar. Die mit einem Datenlogger ausgestatteten Pedelecs sind alle mit einem Antriebssystem der Firma Bosch ausgestattet. Dieses verfügt über fünf verschiedene Unterstützungsstufen, die sich jeweils im Unterstützungsgrad unterscheiden

(Turbo 250 % - Sport 150 %, Tour 100 %, Eco 40 %, Off 0 %). Je höher der Unterstützungsgrad, desto höher ist die Akkuleistung. Bei den ausgewerteten Fahrten wurde, wie in Abbildung 5.8 gezeigt, überwiegend die höchste Unterstützungsstufe gewählt. Weitere Faktoren, die Einfluss auf die durchschnittliche Akkuleistung haben, können bspw. das Fahrergewicht oder der Wirkungsgrad (mechanisch und elektrisch) des Pedelecs sein. Eine Faktorenaufzählung ist Tabelle 3.2 zu entnehmen.

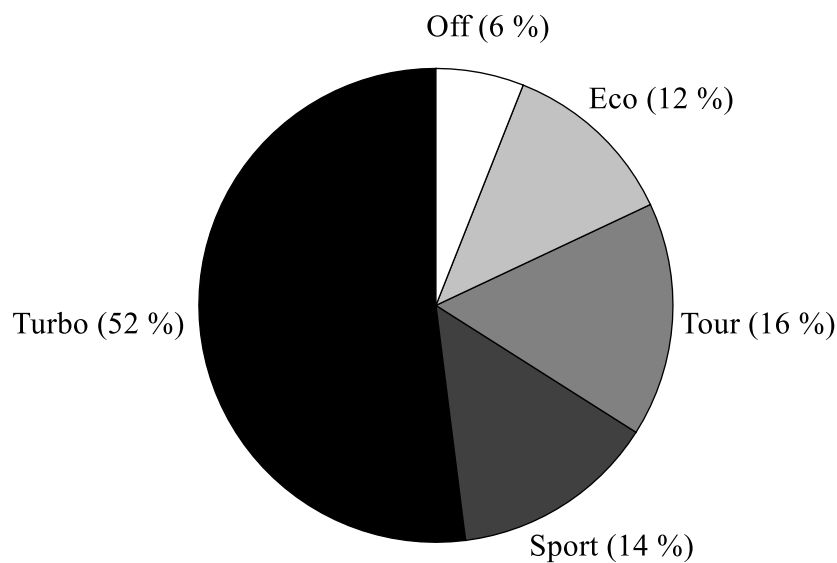


Abbildung 5.8: Aufteilung der Unterstützungsstufen für die Fahrten in Hannover

5.3.4 Verwendete Ladekurve für den Ladevorgang des Pedelec-Akkus

In der Zeit zwischen zwei Mietvorgängen findet im Modell ein Ladevorgang statt. Die in dem Akku eingespeiste Energie pro Zeiteinheit wird anhand der in Abbildung 5.9 hinterlegten Ladekurve ermittelt. Der Ladeversuch zur Ermittlung der Ladekurve ist in Kapitel 8 beschrieben. Die Berücksichtigung weiterer Ladeströme erfolgt in Kapitel 9. Für die Ist-Analyse wird zunächst die Ladekurve für das *PowerPack 400* mit $I_{Lade} = 4 \text{ A}$ implementiert. Der Ladevorgang findet im CCCV-Verfahren statt, da dieses in den am Markt vorhandenen Ladegeräten hinterlegt ist. Andere Verfahren werden in diesem Zusammenhang nicht untersucht.

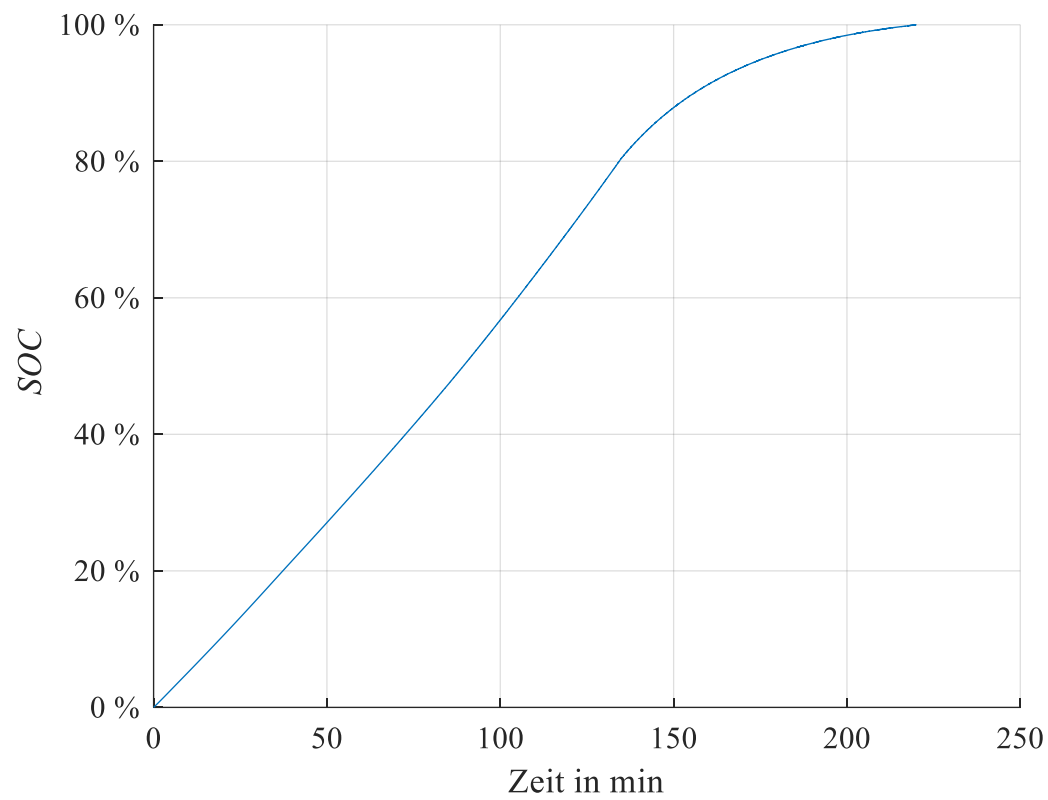


Abbildung 5.9: Verlauf des *SOC* für das *PowerPack 400* mit einer Kapazität von 11,4 Ah beim CCCV-Verfahren mit $I_{Lade} = 4$ A

6 Überführung des Modells in eine Simulationsumgebung

Das beschriebene Modell wird in die Simulationsumgebung *Matlab* überführt. Hierfür werden zunächst die Algorithmen der Unterprogramme entwickelt. Anschließend wird das Modell validiert und Mittels einer Sensitivitätsanalyse auf Plausibilität überprüft. Darauf folgt die Festlegung der Simulationsdurchläufe in Abhängigkeit von der Breite des Konfidenzintervalls.

6.1 Beschreibung der Algorithmen der einzelnen Unterprogramme

Als Simulationsparameter werden die Anzahl der potentiellen Kunden und der Pedelecs pro Station festgelegt. Die Simulation erfolgt mit festen Zeitinkrementen von je einer Minute. Folglich startet die Simulation mit $t_{\text{Start}} = 0$ min und endend mit $t_{\text{Ende}} = 1.440$ min ($\cong 24$ h). Mit Beginn der Simulation wird jedem potentiellen Kunden ein Zeitpunkt zwischen 0 min und 1.440 min zugeordnet. Dieser Zeitpunkt gibt an, wann der Kunde an die Station kommt, um ein Pedelec zu mieten. Die Wahrscheinlichkeit hierfür basiert auf der ermittelten bimodalen Verteilung in Kapitel 5.3.1. Darüber hinaus wird jedem potentiellen Kunden in Abhängigkeit von der Gamma-Verteilung in Kapitel 5.3.2 eine Mietdauer und in Abhängigkeit von der Normalverteilung in Kapitel 5.3.3 eine durchschnittliche Akkuleistung zugewiesen. In Abbildung 6.1 sind die drei Unterprogramme dargestellt, aus denen sich der Hauptteil der Simulation zusammensetzt. Diese werden für jeden der 1.441 Zeitinkremente durchgeführt. Der Pseudocode für die drei Unterprogramme befinden sich in Anhang A. Die Simulation endet, sobald die Schleife bei $t = 1.440$ min das letzte Mal durchlaufen wurde. Auf Basis von K_{pot} , K_{Akku} , K_{Pedelec} und $K_{\text{Rückgabe}}$ werden SG_{Pedelec} und SG_{Akku} sowie SG_{ges} anhand der Gl. (5.4) - (5.6) berechnet.

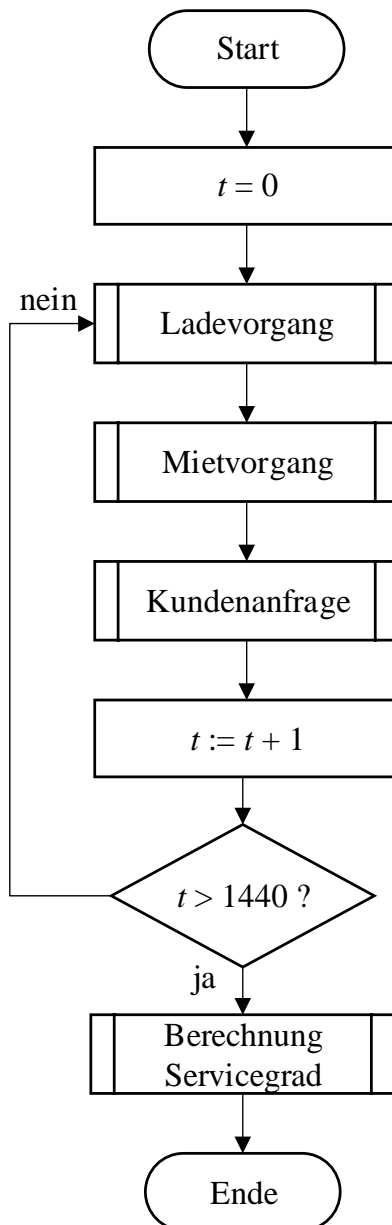


Abbildung 6.1: Programmablaufplan für das Simulationsmodell zur Servicegradberechnung

Für den Ladevorgang, dessen Programmablauf in Abbildung 6.2 dargestellt ist, wird der SOC aller verfügbaren Pedelecs überprüft. Bei Pedelecs mit einem $SOC < 100\%$ findet ein Ladevorgang nach der hinterlegten Ladekennlinie statt. Pedelecs mit vollgeladenem Akku werden übersprungen. Das Unterprogramm endet, wenn alle verfügbaren Pedelecs überprüft worden sind.

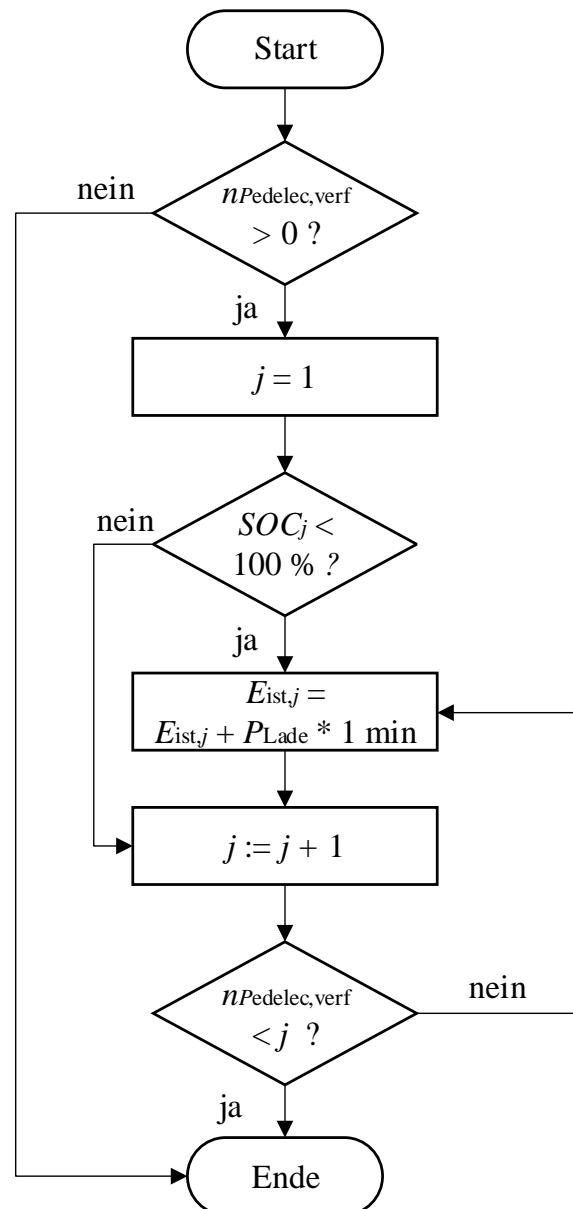


Abbildung 6.2: Programmablaufplan für das Unterprogramm „Ladevorgang“

Bei dem in Abbildung 6.3 dargestellte Unterprogramm „Mietvorgang“ wird bei den Akkus der vermieteten Pedelecs die Energie und somit der SOC in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Akkuleistung $\bar{P}_{\text{Akkü}}$ reduziert. Anschließend wird die verbleibende Mietdauer um eine Minute reduziert. Sofern die Mietdauer den Wert null erreicht, ist der Mietvorgang beendet und die Anzahl der verfügbaren Pedelecs wird um eins erhöht. Sofern der SOC des Pedelec-Akkus bei der Rückgabe kleiner als 0 % ist, wird $K_{\text{Rückgabe}}$ um eins erhöht und der SOC auf 0 % gesetzt. Das Unterprogramm endet, wenn die Schleife für alle vermieteten Pedelecs durchlaufen wurde.

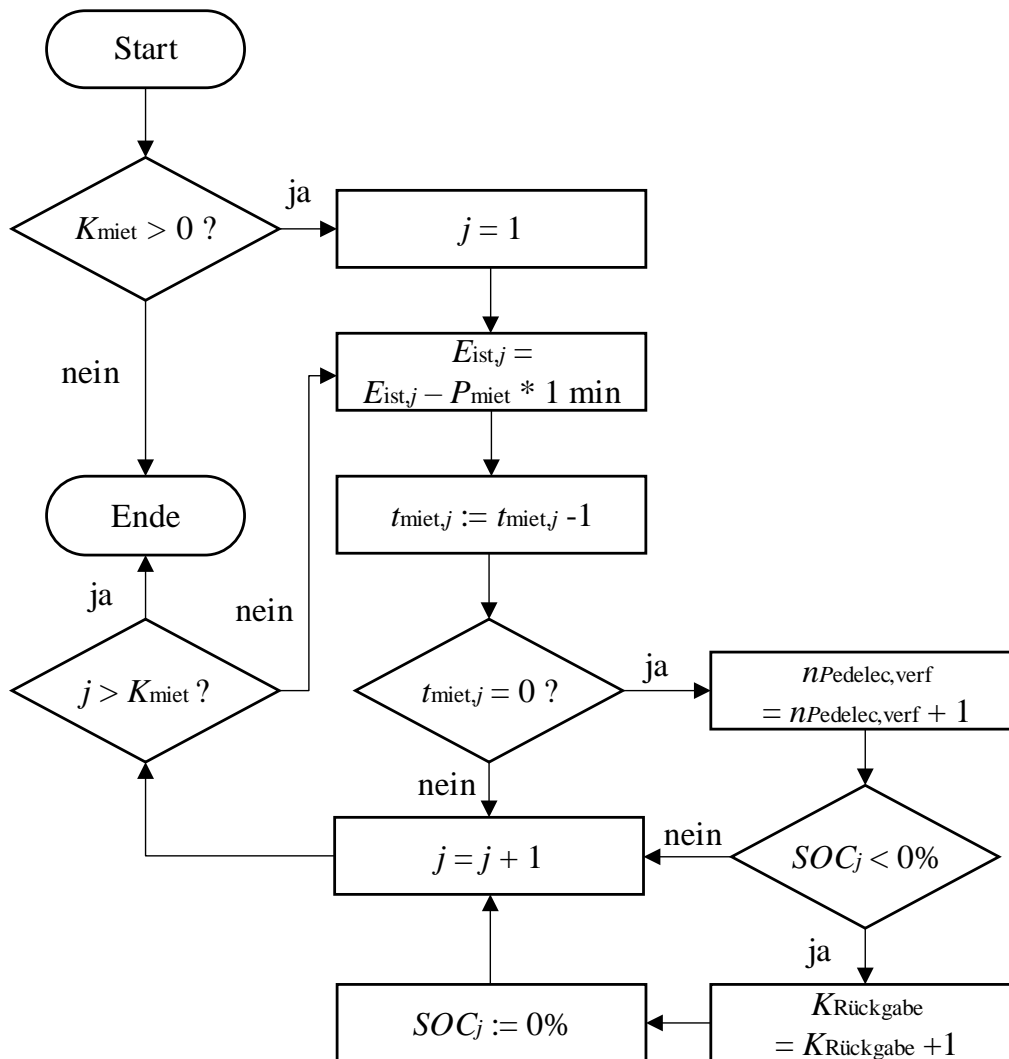


Abbildung 6.3: Programmablaufplan für das Unterprogramm „Mietvorgang“

In Abbildung 6.4 ist der Programmablauf für das Unterprogramm „Kundenanfrage“ dargestellt. Bei einer Anfrage durch einen potentiellen Kunden wird zunächst überprüft, ob Pedelecs an der Station verfügbar sind. Ist kein Pedelec vorhanden, kann die Anfrage nicht durchgeführt werden, sodass K_{Pedelec} um eins erhöht wird. Für die zur Verfügung stehenden Pedelecs muss der SOC größer sein als SOC_{min} , damit die Anfrage durchgeführt werden kann. Bei einem positiven Ergebnis der Überprüfung wird die Anzahl der verfügbaren Pedelecs um eins reduziert. Ansonsten wird $K_{\text{Akkü}}$ um eins erhöht.

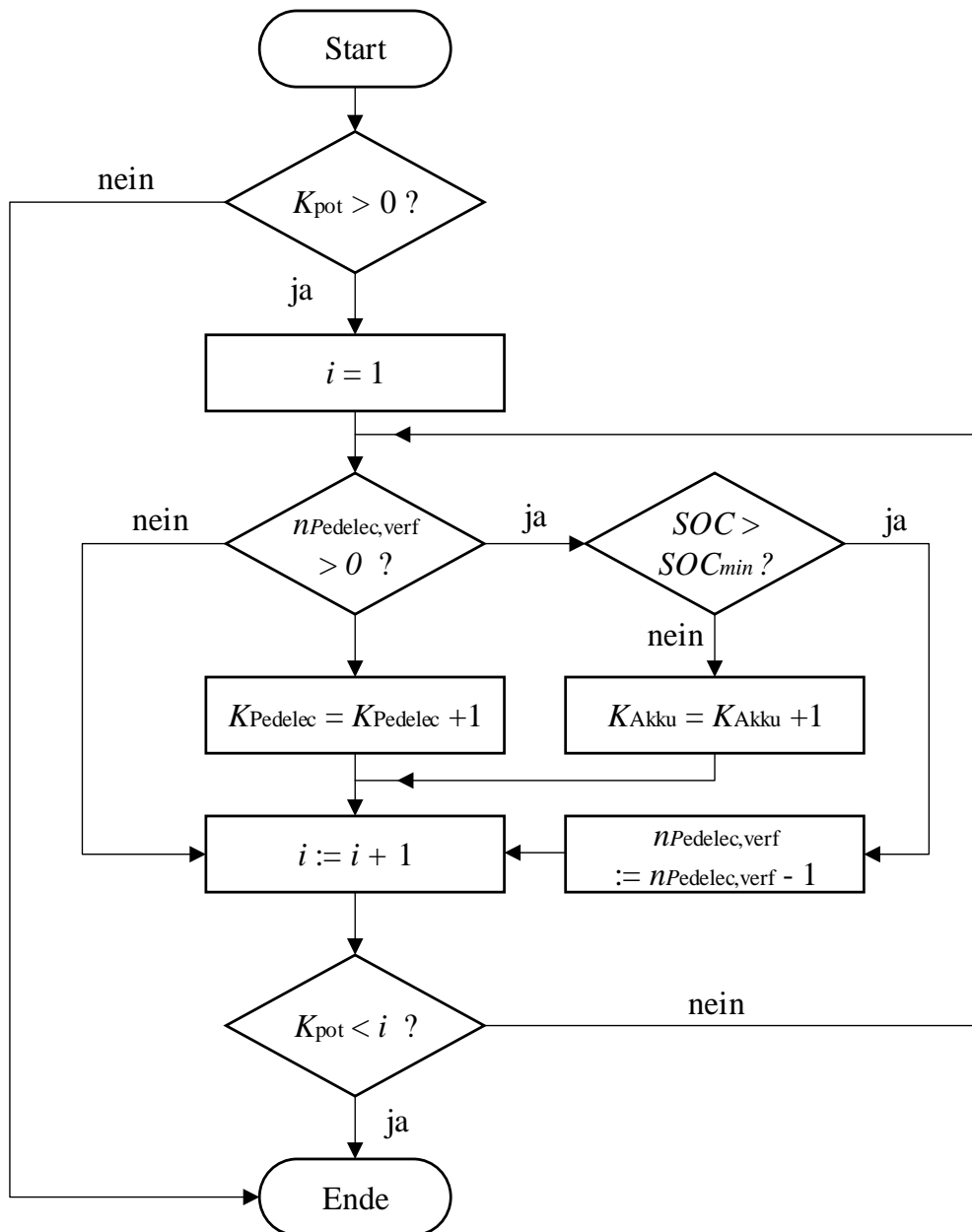


Abbildung 6.4: Programmablaufplan für das Unterprogramm „Kundenanfrage“

6.2 Validierung und Plausibilitätskontrolle für das entwickelte Modell

Das entwickelte Modell setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Der erste Teil basiert auf den ausgewerteten Realdaten des Vermietsystems *Citi Bike* in New York City und bildet ein automatisches stationsbasiertes FVS ab. Der zweite Teil erweitert das Modell um \bar{P}_{Akku} , P_{Lade} , E_{Akku} und den SOC und somit um den Anteil, der für die Simulation eines automatischen stationsbasierten PVS notwendig ist. Da die Erfassung des Servicegrades

sowohl für FVS als auch für PVS, wie in Kapitel 3 erklärt, nur bedingt möglich ist, kann eine Validierung des Modells lediglich für einzelne Abschnitte des Modells erfolgen. Hierzu wird im Folgenden der Gültigkeitsbereich bestimmt, in dem das Modell angewendet werden kann. Darüber hinaus wird zusätzlich überprüft, ob das Modell realistisch auf Veränderungen der vorhandenen Parameter reagiert und somit plausible ist.

6.2.1 Bestimmung des Gültigkeitsbereiches

Für das Modell wird exakt eine Station eines Vermietsystems betrachtet. Eine Vorgabe dabei ist, dass Pedelecs, die vermietet werden, wieder an dieselbe Station zurückgebracht werden. Im realen Betrieb besteht jedoch die Möglichkeit, dass Pedelecs an anderen Stationen abgestellt werden können. Sobald sich keine Pedelecs mehr an einer Station befinden, können durch den Betreiber Redistributionsvorgänge ausgelöst werden. Diese werden im Modell nicht berücksichtigt. Durch die Validierung des Modellanteils des FVS wird überprüft, ob die fehlenden Redistributionsvorgänge den Gültigkeitsbereich des Modells einschränken. Für die Validierung werden Daten aus dem FVS *Citi Bike* verwendet [108]. Anhand der Daten besteht die Möglichkeit, die Mietvorgänge und Rückgaben, die an einer Station an einem Tag durchgeführt wurden, zu betrachten. Anhand dieser Informationen werden Szenarien abgeleitet, die im Modell simuliert werden. Als Ergebnis ist in der Simulation ein Servicegrad von 100 % gefordert, da die Szenarien bereits erfolgreich in der Realität durchgeführt wurden. Zur Überprüfung der Gültigkeit wurden 37.293 Szenarien mit einer Bandbreite von 1 bis 813 täglichen Mietvorgängen pro Station ausgewertet. Aus Abbildung 6.5 ist ersichtlich, dass der Servicegrad das erste Mal bei 427 Mietvorgängen nicht mehr mit einem Servicegrad von 100 % übereinstimmt. Der Gültigkeitsbereich liegt demnach unterhalb dieser Grenze, da die getroffenen Annahmen zu einem Servicegrad ungleich 100 % führen. Die Anwendbarkeit des Modells wird auf max. 400 potentielle Kunden pro Station beschränkt. Um die maximale Grenze von 400 potentiellen Kunden einordnen zu können, wird die Häufigkeitsverteilung für die täglichen Mietvorgänge pro Station im Vermietsystem *Citi Bike* anhand der Daten aus 2017 ausgewertet [108]. Für die Auswertung wurden die Mietvorgänge pro Tag für alle vorhandenen Stationen einzeln ermittelt. Das Ergebnis der Auswertung in Abbildung 6.6 zeigt, dass die Häufigkeit mit steigender Anzahl der täglichen Mietvorgänge abnimmt.

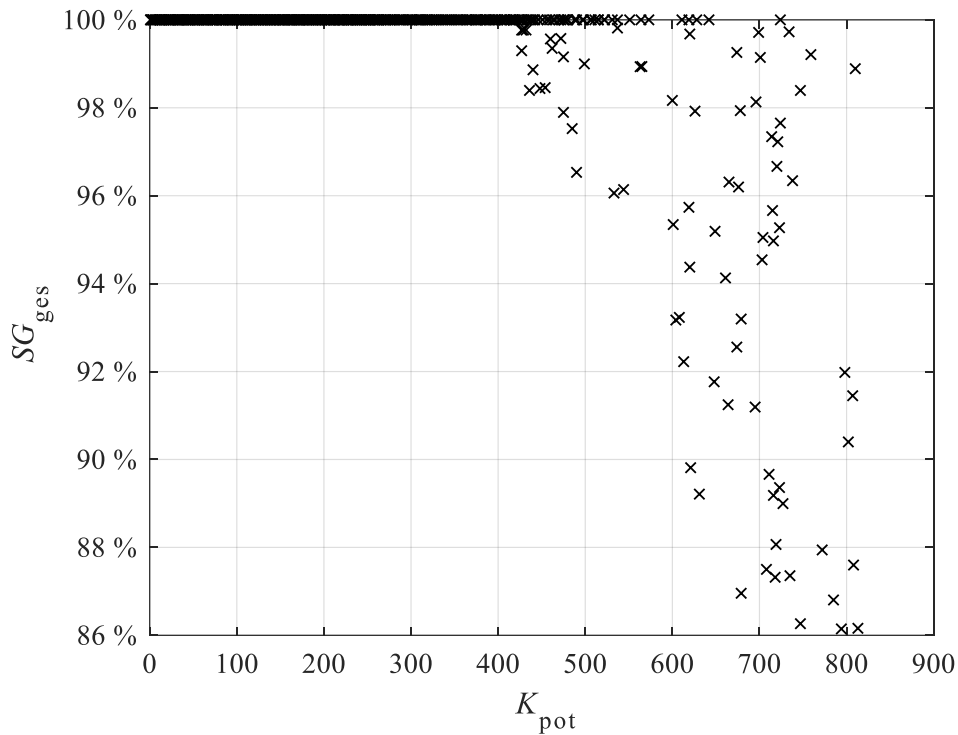


Abbildung 6.5: Servicegrad SG_{ges} in Abhängigkeit von der Anzahl potentieller Kunden K_{pot} für 37.293 Szenarien aus dem Vermietsystem *Citi Bike* zur Festlegung des Gültigkeitsbereichs des Modells auf Basis von [108]

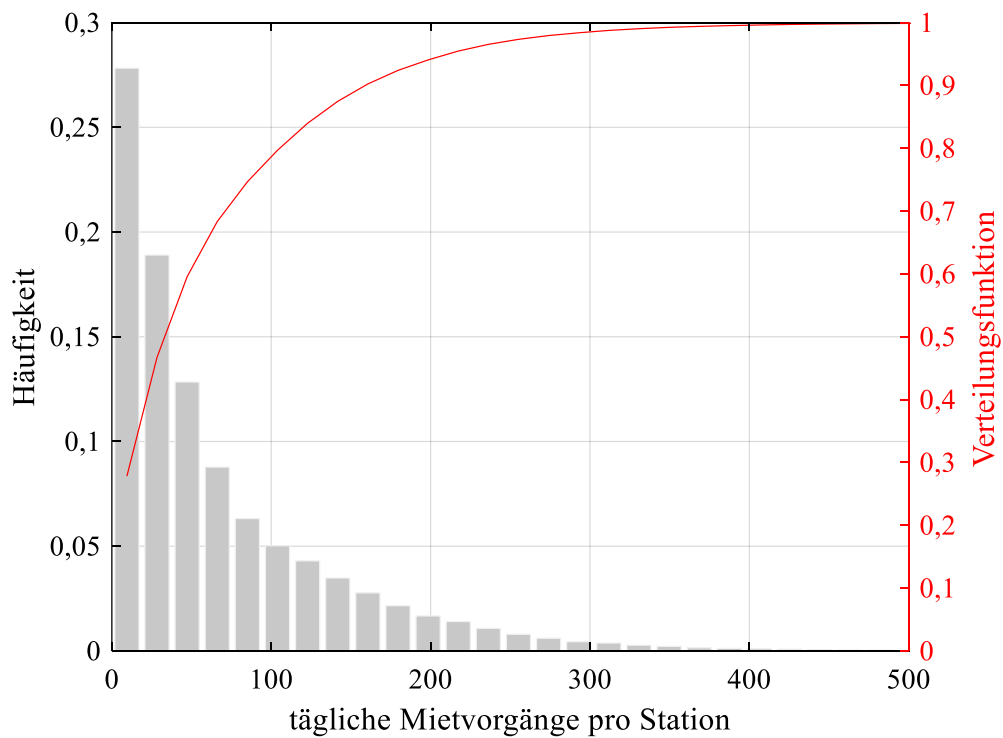


Abbildung 6.6: Häufigkeitsverteilung und die Verteilungsfunktion für die Anzahl der täglichen Mietvorgänge pro Station für das Vermietsystem *Citi Bike* im Jahr 2017 auf Basis von [108]

In 99,64 % aller Fälle wird die Grenze von 400 täglichen Mietvorgängen nicht überschritten. Die dadurch erreichte Genauigkeit ist für die nachfolgende Betrachtung ausreichend.

6.2.2 Plausibilitätskontrolle mittels Sensitivitätsanalyse

Damit das Modell plausibel ist, muss es realistisch auf Veränderungen verschiedener Parameter reagieren. Zur Untersuchung des Veränderungsverhaltens wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Hierbei soll gleichzeitig identifiziert werden, welche Faktoren einen besonders großen Einfluss auf den Servicegrad haben und welche den Servicegrad nur in einem geringen Maße bzw. gar nicht verändern und somit innerhalb der Simulation konstant gehalten werden können. Unterschieden wird zwischen der lokalen und globalen Sensitivitätsanalyse. Bei einer lokalen Sensitivitätsanalyse wird nur eine Eingangsgröße gleichzeitig variiert, um ihren Einfluss auf den Ausgangswert zu ermitteln. Hierfür darf keine signifikante Korrelation zwischen den Eingangsgrößen vorliegen, da ansonsten die Auswirkungen auf den Ausgangswert nicht eindeutig der Änderung der Eingangsgrößen zugeordnet werden können [113]. Für den Fall einer signifikanten Korrelation zwischen den Eingangsgrößen muss eine globale Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, bei der der Einfluss verschiedene Kombinationen der Eingangsgrößen auf die Ausgangsgröße untersucht wird.

Die Sensitivitätsanalyse wird für \bar{P}_{Akku} , t_{miet} , t_{Anfrage} und E_{Akku} durchgeführt. Für die Entscheidung zwischen einer globalen und einer lokalen Sensitivitätsanalyse wird die Korrelation zwischen den Faktoren untersucht. Dies ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da sich das Modell aus zwei unabhängigen Teilen zusammensetzt. Daher liegt bspw. keine Zuordnung von der durchschnittlichen Akkuleistung und dem Zeitpunkt einer Anfrage vor. Es kann also nicht ermittelt werden, ob Kunden, die morgens ein Pedelec mieten, mehr oder weniger Leistung benötigen als Kunden, die abends ein Pedelec mieten. Aus dem gleichen Grund kann die Korrelation zwischen der durchschnittlichen Akkuleistung und der Mietdauer nicht ermittelt werden. Allerdings wurde bei den ausgewerteten Fahrten in Hannover, die die Basis für die durchschnittliche Akkuleistung bilden, ebenfalls die Dauer der Fahrt t_{Fahrt} bestimmt, sodass eine Korrelationsanalyse zwischen diesen beiden Faktoren durchgeführt wird.

Korrelation zwischen der durchschnittlichen Akkuleistung pro Fahrt und der Fahrtdauer

Die Korrelation zwischen der durchschnittlichen Akkuleistung pro Fahrt und der Fahrtdauer wird über die aufgezeichneten Daten aus dem Vermietsystem der Hochschule Hannover ermittelt. Abbildung 6.7 zeigt das entsprechende Wertepaar zu jeder der 615 Fahrten. Eine Korrelation zwischen den beiden Faktoren ist im Hinblick auf das Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,0625$ nicht signifikant. Es liegt kein gegenseitiger Einfluss der beiden Faktoren vor.

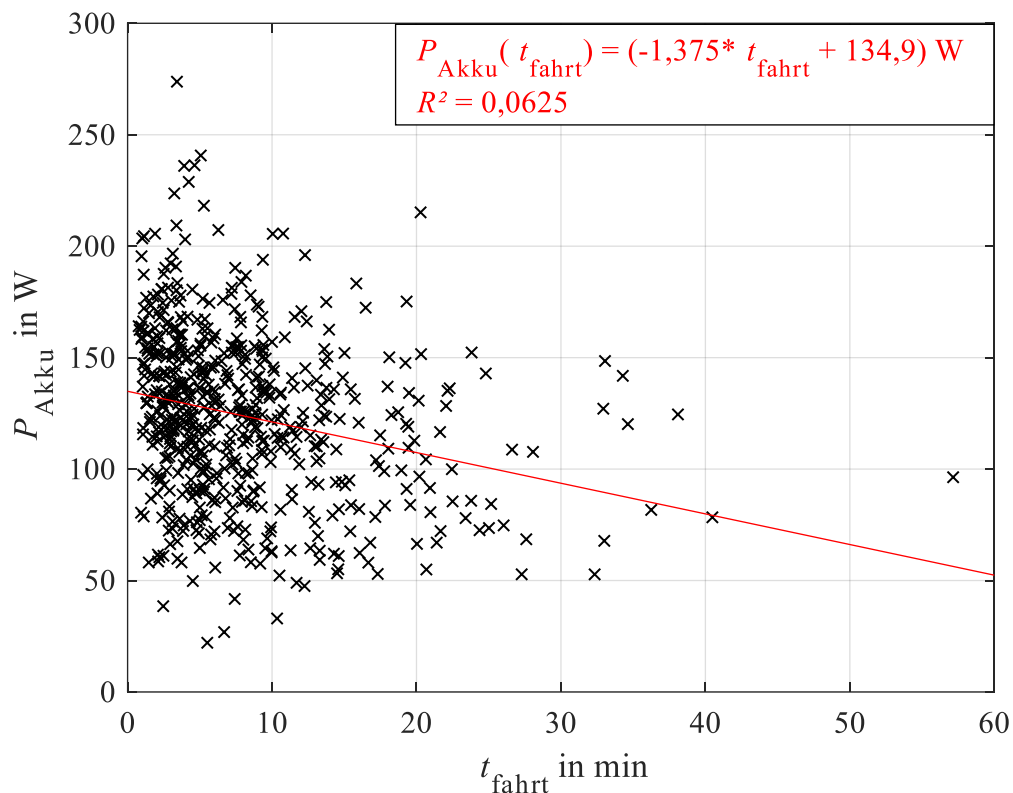


Abbildung 6.7: Durchschnittliche Akkuleistung pro Fahrt über die Fahrtdauer von 615 aufgezeichneten Fahrten im Vermietsystem der Hochschule Hannover

Korrelation zwischen der Mietdauer und dem Anfragezeitpunkt

Für die Korrelation zwischen der Mietdauer und dem Anfragezeitpunkt werden die Daten aus dem FVS *Citi Bike* analysiert. Bei einer Stichprobengröße $N = 16.360.488$ Mietvorgänge liegt ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 3,81 \cdot 10^{-4}$ und somit keine signifikante Korrelation zwischen den beiden Faktoren vor. Vielmehr ist die Kombination der beiden Größen zufällig, wobei mehr als 99 % der Mietvorgänge, wie bereits im vorangegangenen

Abschnitt analysiert wurden, unterhalb von 60 Minuten liegen. Aufgrund der Ergebnisse der Korrelationsanalysen ist keine globale Sensitivitätsanalyse notwendig. Die Parameter werden über eine lokale Sensitivitätsanalyse untersucht.

Sensitivitätsanalyse des Anfragezeitpunktes

Für den Einfluss des Anfragezeitpunktes t_{Anfrage} auf den Servicegrad wird die Simulation mit den ermittelten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der drei Vermietsysteme *Citi Bike*, *Indego* und *Capital Bikeshare* durchgeführt, die in Kapitel 5.3.1 dargestellt sind. Für die restlichen Parameter werden folgende Werte gewählt und jeweils konstant gehalten:

- Fahrräder pro Station $n_{\text{Pedelec}} = 4$
- Energieinhalt des Akkus $E_{\text{Akku}} = 370 \text{ Wh}$
- Dauer eines Mietvorgangs $t_{\text{miet}} = 15 \text{ min}$
- Durchschnittliche Akkuleistung pro Fahr $\bar{P}_{\text{Akku}} = 125 \text{ W}$

Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse in Abbildung 6.8 zeigt einen großteilig übereinstimmenden Verlauf des Servicegrades für alle drei Szenarien.

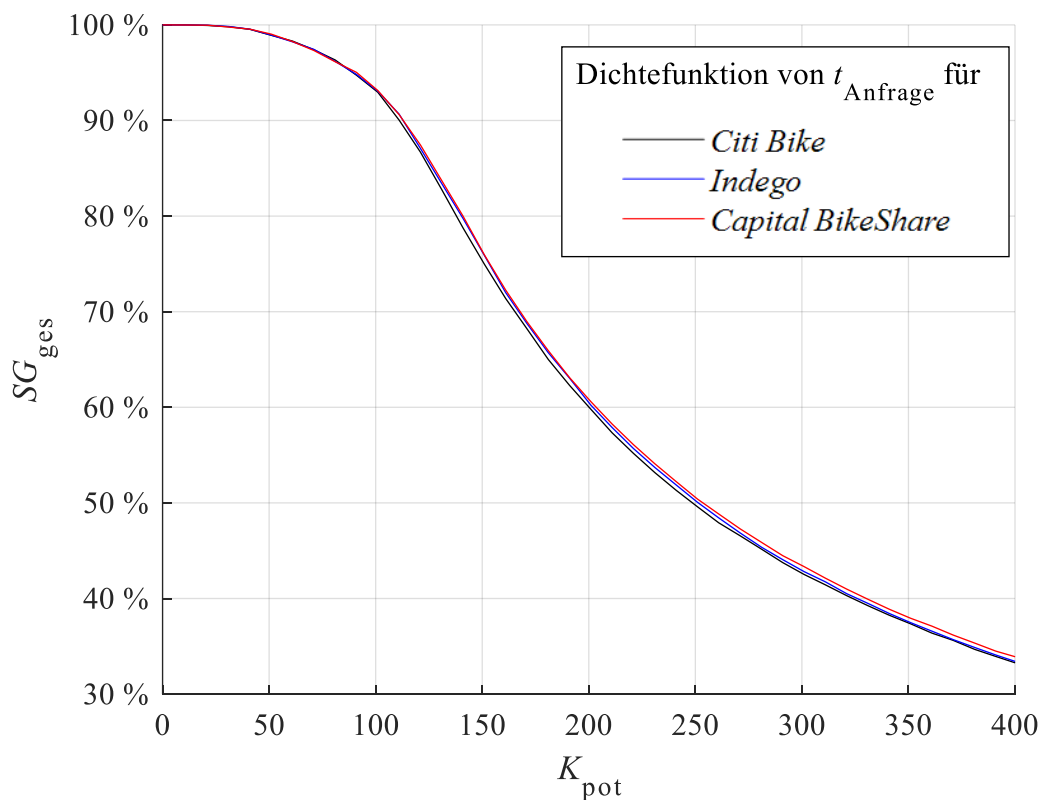


Abbildung 6.8: SG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{\text{Pedelec}} = 4$, $E_{\text{Akku}} = 370 \text{ Wh}$, $t_{\text{miet}} = 15 \text{ min}$, $\bar{P}_{\text{Akku}} = 125 \text{ W}$ und unterschiedlichen Verteilungen für t_{Anfrage} auf Basis von [108, 110, 112]

Die Abweichungen zwischen den Verteilungen haben demnach keinen signifikanten Einfluss auf den Servicegrad. Aus diesem Grund wird für die weitere Betrachtung die Dichtefunktion der Bimodalverteilung des FVS *Citi Bike*, wie in Abbildung 5.3 dargestellt, im Modell verwendet.

Sensitivitätsanalyse der Mietdauer

Für die Sensitivitätsanalyse der Mietdauer werden für die Parameter folgende Werte eingestellt:

- Durchschnittliche Akkuleistung pro Fahrt $\bar{P}_{\text{Akku}} = 125 \text{ W}$
- Fahrräder pro Station $n_{\text{Pedelec}} = 4$
- Energieinhalt des Akkus $E_{\text{Akku}} = 370 \text{ Wh}$

In der oberen Hälfte der Abbildung 6.9 ist beispielhaft der Verlauf des Servicegrades in Abhängigkeit von K_{pot} für $t_{\text{miet}} = 5 \text{ min}$, 15 min & 25 min dargestellt. Der Servicegrad nimmt mit steigender Anzahl an potentiellen Kunden ab. Bis $K_{\text{pot}} < 25$ sind die Verläufe für die gegebenen Parameter identisch. Darüber hinaus nimmt der Abstand zwischen den Verläufen zu, da die Verfügbarkeit der Pedelegs abnimmt. Bei $K_{\text{pot}} = 100$ liegt zwischen den beiden Servicegraden für eine Mietdauer von 5 min und 25 min ein Delta von 31,22 % vor. Für $K_{\text{pot}} = 300$ liegt das Delta bei 66,87 %. Einerseits erhöht sich mit steigender Mietdauer die Zeit, in der die Station leer ist. Andererseits erhöht sich der Energieverbrauch pro Mietvorgang während sich gleichzeitig die Ladezeit verkürzt. Dadurch stehen Pedelegs häufiger nicht zur Verfügung, weil sie geladen werden müssen. In Kapitel 7 wird detaillierter auf diese Ursachen eingegangen. Da die Mietdauer einen signifikanten Einfluss auf den Servicegrad hat, wird für die Simulation die ermittelte Gamma-Verteilung aus dem Vermietsystem *Citi Bike* verwendet.

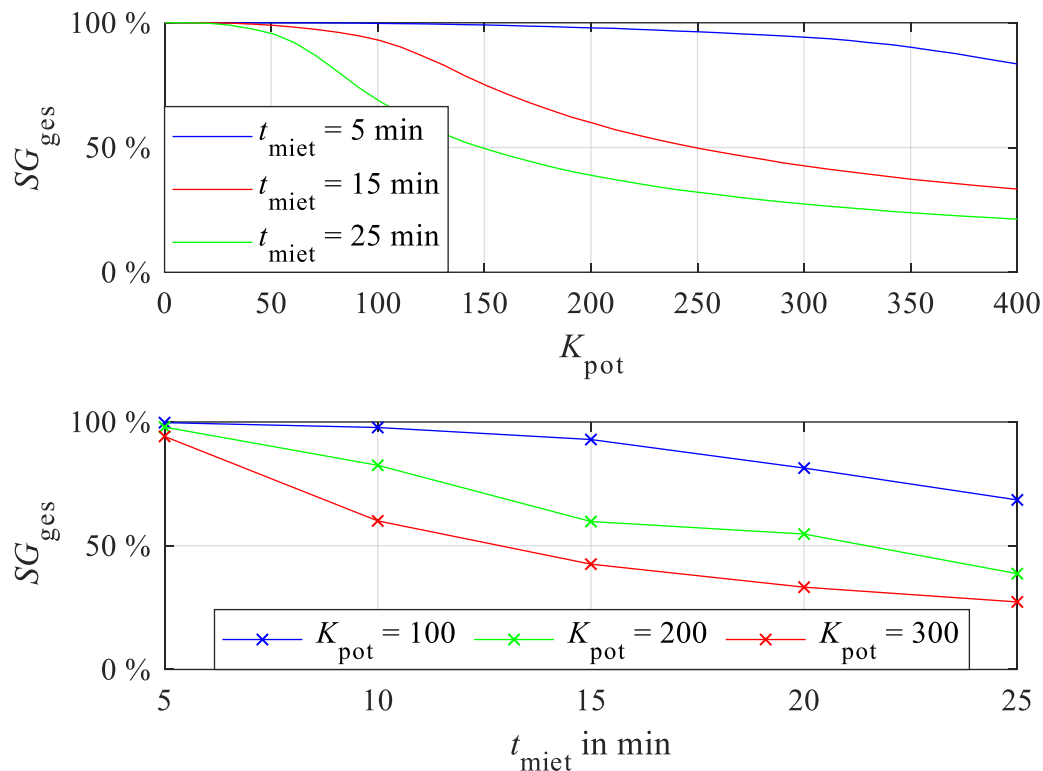


Abbildung 6.9: SG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{Pedelec} = 4$, $E_{Akku} = 370$ Wh, $\bar{P}_{Akku} = 125$ W, $t_{miet} = 5$ min, 15 min & 25 min (oben); SG_{ges} in Abhängigkeit von t_{miet} für $n_{Pedelec} = 4$, $\bar{P}_{Akku} = 125$ W und $K_{pot} = 100, 200$ & 300

Sensitivitätsanalyse der durchschnittlichen Akkuleistung

Für die Sensitivitätsanalyse der durchschnittlichen Akkuleistung werden für die Parameter folgende Werte eingestellt:

- Dauer eines Mietvorgangs $t_{miet} = 15$ min
- Fahrräder pro Station $n_{Pedelec} = 4$
- Energieinhalt des Akkus $E_{Akku} = 370$ Wh

In der oberen Hälfte von Abbildung 6.10 ist der Einfluss der durchschnittlichen Akkuleistung pro Fahrt auf den Servicegrad beispielhaft für $\bar{P}_{Akku} = 75$ W, 125 W und 175 W dargestellt. Dieser ist analog zum Einfluss der Mietdauer für eine geringe Anzahl potentieller Kunden nicht vorhanden. Mit mehr potentiellen Kunden steigt jedoch das Delta zwischen den drei gewählten Leistungswerten. Bei $K_{pot} = 100$ liegt das Delta zwischen den Servicegraden für 75 W und 175 W bei 5,94 %. Bei $K_{pot} = 300$ liegt das Delta bereits bei 13,75 %. Anders als bei der Mietdauer ist die Ursache für das Delta in diesem Fall

ausschließlich auf die niedrigere Verfügbarkeit durch zu ladende Pedelec-Akkus zurückzuführen. Die durchschnittliche Akkuleistung wird in der Simulation wegen des signifikanten Einflusses nicht konstant gehalten, sondern in Abhängigkeit von der ermittelten Normalverteilung variiert.

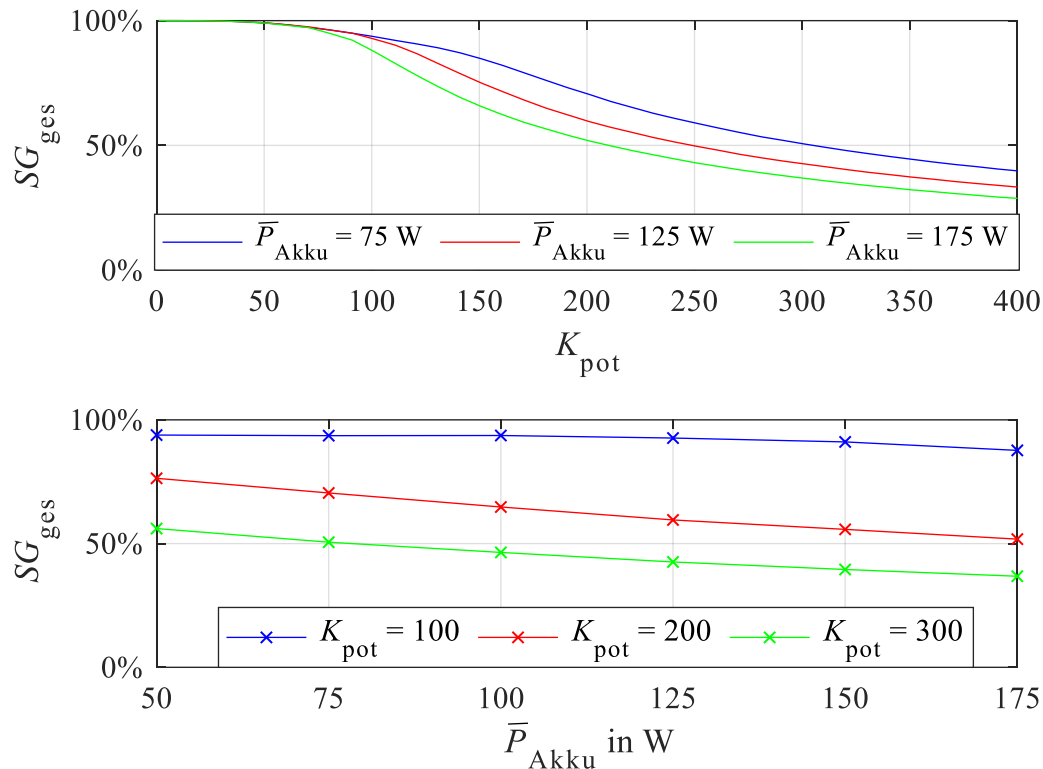


Abbildung 6.10: SG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{Pedelec} = 4$, $E_{Akk} = 370$ Wh, $t_{miet} = 15$ min, $\bar{P}_{Akk} = 75$ W, 125 W & 175 W; Servicegrad in Abhängigkeit von der Akkuleistung für $n_{Pedelec} = 4$, $\bar{P}_{Akk} = 125$ W und $K_{pot} = 100, 200$ & 300

Sensitivitätsanalyse des Energieinhaltes

Für die Sensitivitätsanalyse des Energieinhaltes werden für die Parameter folgende Werte eingestellt:

- Fahrräder pro Station $n_{Pedelec} = 4$
- Dauer eines Mietvorgangs $t_{miet} = 15$ min
- Durchschnittliche Akkuleistung pro Fahrt $\bar{P}_{Akk} = 125$ W

In der oberen Hälfte von Abbildung 6.11 ist der Verlauf des Servicegrades beispielhaft für verschiedene E_{Akku} in Abhängigkeit von K_{pot} dargestellt. Der Verlauf weist ein ähnliches Verhalten wie bei der Sensitivitätsanalyse der durchschnittlichen Akkuleistung auf. Allerdings nimmt der Abstand zwischen den jeweiligen Verläufen mit steigendem K_{pot} ab. Bei $K_{\text{pot}} = 100$ liegt das Delta zwischen den Servicegraden für 200 Wh und 500 Wh bei 22,52 %. Bei $K_{\text{pot}} = 300$ reduziert sich das Delta auf 18,82 %. Wie in der unteren Hälfte von Abbildung 6.11 dargestellt, verhält sich der Servicegrad mit steigendem Energieinhalt degressiv. Da immer mehr Kunden eine leere Station anstatt eines Pedelecs, dessen Akku geladen werden muss, vorfinden, nimmt die Zunahme des Servicegrades durch die Erhöhung des Energieinhaltes ab. In Kapitel 9.7 wird detaillierter auf den Einfluss des Energieinhaltes auf den Servicegrad eingegangen. In den restlichen Untersuchungen wird der Energieinhalt nach dem in Kapitel 8 ermittelten Wert konstant gehalten, da zunächst eine Art von Akku im Fokus stehen soll.

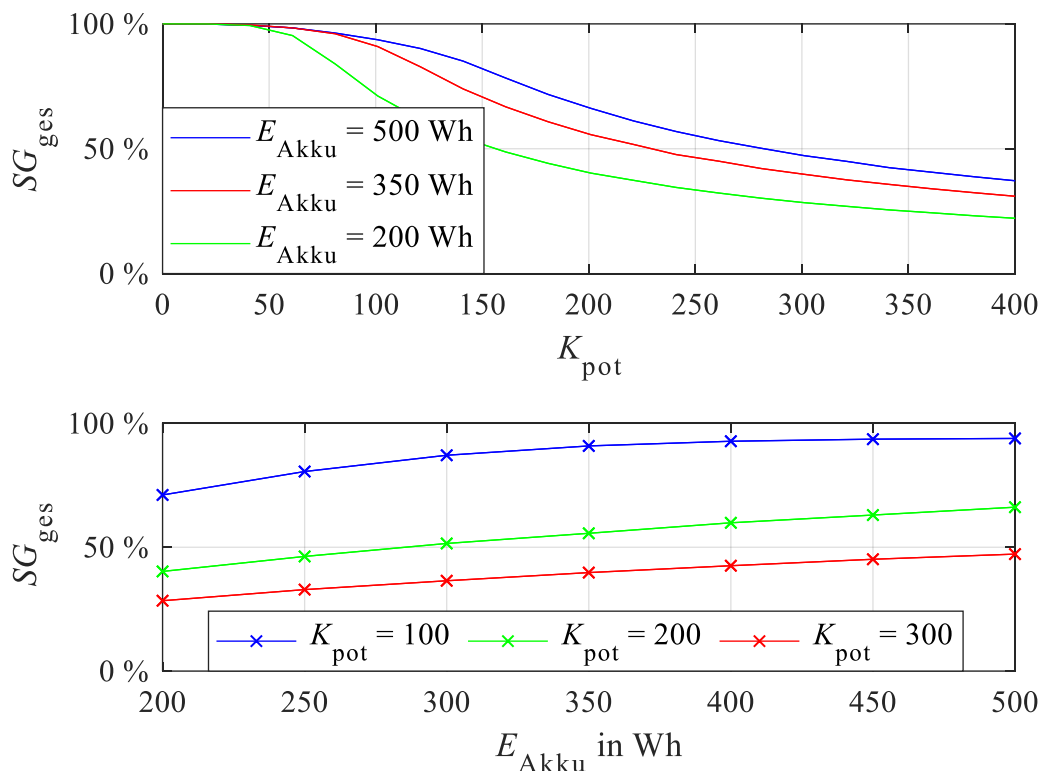


Abbildung 6.11: SG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{\text{Pedelec}} = 4$, $E_{\text{Akku}} = 370$ Wh, $t_{\text{miet}} = 15$ min, $\bar{P}_{\text{Akku}} = 75$ W, 125 W & 175 W; Servicegrad in Abhängigkeit von der Akkuleistung für $n_{\text{Pedelec}} = 4$, $\bar{P}_{\text{Akku}} = 125$ W und $K_{\text{pot}} = 100, 200$ & 300

Anhand der Sensitivitätsanalyse wird gezeigt, welche Auswirkungen die Änderungen einzelner Faktoren auf den Servicegrad haben und wie die Faktoren im Modell berücksichtigt werden. Darüber hinaus zeigt die Analyse ebenfalls, dass das Modell realistisch auf Veränderungen der jeweiligen Größen reagiert. Die Steigerung der Mietdauer hat tendenziell einen größeren Einfluss auf den Servicegrad, da beide Teilservicegrade beeinflusst werden. Mit steigender Anzahl an Kunden werden mehr Kunden abgelehnt, da keine Pedelecs an der Station zur Verfügung stehen. Sowohl die Reduzierung des Energieinhaltes als auch die Erhöhung der durchschnittlichen Akkuleistung haben mit steigendem K_{pot} , relativ betrachtet, einen geringeren Einfluss, wodurch die Verläufe näher beieinanderliegen. Im Hinblick auf die Ergebnisse verhält sich das Modell demnach plausibel.

6.3 Berechnung des Konfidenzintervalls

Aufgrund der stochastischen Einflussgrößen t_{Anfrage} , t_{miet} und \bar{P}_{Akku} liefert das Modell stochastische Ausgabegrößen. Es handelt sich demnach um ein stochastisches Simulationsmodell, dessen Ergebnisse als Schätzer gedeutet werden muss. Charakteristisch für ein stochastisches Modell ist, dass das Ergebnis – in diesem Fall der Servicegrad – bei jedem Durchlaufen variieren kann. Daher sind für die verschiedenen zu untersuchenden Szenarien bzw. Kombinationen von Parametern mehrere Simulationsläufe notwendig. Die Voraussetzung ist, neben der stochastischen Unabhängigkeit der einzelnen Durchläufe, die Durchführung mit gleichen Anfangs- und Endbedingungen. Da die Einflussgrößen nach jedem Lauf stochastisch neu generiert werden und jede Simulation nach exakt 1.441 Schritten endet, sind beide Voraussetzungen im Modell erfüllt. Durch die Ergebnisse der einzelnen Simulationsläufe i für den Servicegrad SG_{ges} lässt sich das arithmetische Mittel bestimmen. Da der wahre Wert für den Servicegrad unbekannt ist, handelt es sich dabei um einen Schätzwert (Punktschätzung). Der Schätzer für den Erwartungswert des Servicegrades wird über das arithmetische Mittel bestimmt:

$$SG_{\text{ges}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SG_{\text{ges},i} \quad (6.1)$$

Mit zunehmender Anzahl der Simulationsläufe N wird der Schätzer für den Erwartungswert genauer. Für die Schätzfunktion der Varianz wird die korrigierte Stichprobenvarianz verwendet:

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (SG_{ges,i} - SG_{ges})^2 \quad (6.2)$$

Zusätzlich zum Erwartungswert und zur Stichprobenvarianz wird eine Intervallschätzung durchgeführt. Dabei wird ein Konfidenzintervall festgelegt, das den unbekanntem wahren Wert mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit beinhaltet. Ein Konfidenzniveau von 95 % wird in der Regel angewendet [114] und ist in diesem Fall ebenfalls Voraussetzung. Es besagt, dass das Konfidenzintervall den unbekanntem Wert in ca. 95 % aller Fälle erfasst und ihn in 5 % aller Fälle nicht abdeckt. Die Intervallgrenzen lassen sich über

$$C = \left[SG_{ges} - t_{N-1;1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{S^2}{N}}; SG_{ges} + t_{N-1;1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{S^2}{N}} \right] \quad (6.3)$$

berechnen. Dabei ist $t_{N-1;1-\frac{\alpha}{2}}$ das $(1-\alpha/2)$ – Quantil der t-Verteilung mit $(N-1)$ Freiheitsgraden. Über das Konfidenzintervall wird der Stichprobenumfang, also die Mindestanzahl an Simulationsläufen, bestimmt. Als Zielkriterium wird eine relative Breite des Konfidenzintervalls von 1 % oder weniger in Bezug auf den Schätzer des Erwartungswertes festgelegt.

In Abbildung 6.12 ist der Verlauf des Servicegrades inklusive des Konfidenzintervalls in Abhängigkeit von der Anzahl der Durchläufe für $n_{pedelec} = 4$ und $K_{pot} = 80$ zu sehen. Mit zunehmender Anzahl an Simulationsläufen N verkleinert sich das Konfidenzintervall. Die geforderte relative Breite des Intervalls wird nach 200 Simulationsläufen erreicht. Der notwendige Stichprobenumfang lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$N \geq \frac{t^2 \cdot S^2}{e^2} \quad (6.4)$$

Das Quantil der Studentschen t-Verteilung t und die Breite des Konfidenzintervalls e sind im Modell durch die Festlegung des Konfidenzniveaus konstant. Durch die Änderung der Eingangsgrößen verändert sich SG_{ges} und somit die Varianz S^2 , sodass der Stichprobenumfang in Abhängigkeit von der Parameterkombination unterschiedlich groß ist. Innerhalb der Simulation wird die relative Breite des Konfidenzintervalls nach jedem Durchlauf überprüft. Sobald eine relative Breite von $\leq 1\%$ erreicht wird, ist kein weiterer Durchlauf mehr notwendig.

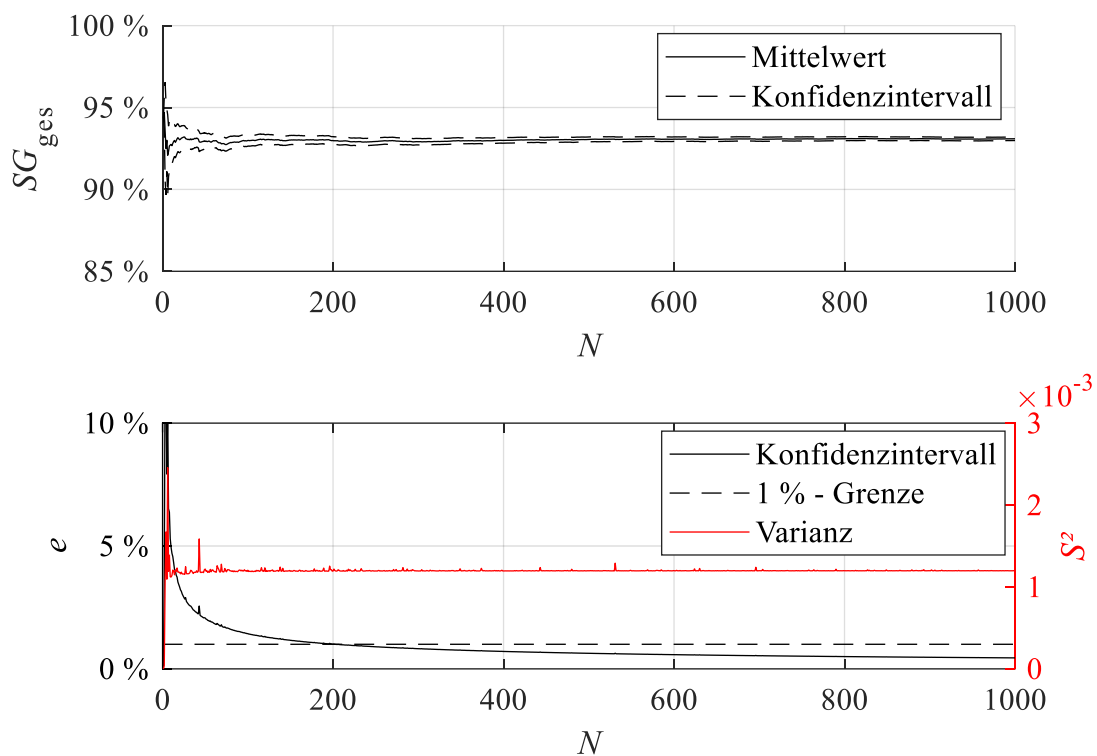


Abbildung 6.12: Verlauf des Servicegrades und des dazugehörigen 95 % - Konfidenzintervalls in Abhängigkeit von der Anzahl der Simulationsläufe für $n_{\text{pedelec}} = 4$ $K_{\text{pot}} = 80$ (oben); Verlauf der absoluten Breite des 95 % - Konfidenzintervalls e und der Varianz S^2 in Abhängigkeit von der Anzahl der Simulationsläufe (unten)

7 Servicegradbetrachtung für das definierte Pedelec-Vermietsystem

Anhand des Modells wird das beschriebene PVS in verschiedenen Szenarien definiert. Ziel ist es, die Notwendigkeit einer Lademöglichkeit während des Betriebs zu untersuchen und den Einfluss des Akkus auf den Servicegrad eines PVS im Allgemeinen und im Vergleich zu FVS darzustellen. Für die Simulation, auf der die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse basieren, werden K_{pot} und n_{Pedelec} variiert. Aus den vorangegangenen Datenanalysen in Kapitel 5.3 werden für die exogenen Einflussfaktoren in den nachfolgenden Simulationen folgende Verteilungen hinterlegt:

- t_{Anfrage} – Dichtefunktion der bimodalen Verteilung für das FVS *Citi Bike*
- t_{miet} – Dichtefunktion der Gamma-Verteilung für das FVS *Citi Bike*
- \bar{P}_{Akk} – Dichtefunktion der Normalverteilung für die an der Hochschule Hannover ausgewerteten Fahrten

7.1 Festlegung des minimal notwendigen SOC zur Freigabe der Pedelecs

Ein wichtiger Richtwert, der innerhalb des Modells festgelegt werden muss, ist der minimal notwendige SOC (SOC_{min}), ab dem ein Pedelec wieder für Mietvorgänge zur Verfügung steht. Hierbei gilt es, das Optimum zu finden, bei dem möglichst viele potentielle Kunden bedient werden können. Für die Bestimmung des SOC_{min} wird der Einfluss von n_{Pedelec} und von K_{pot} untersucht. Der Einfluss des Ladestroms wird in Kapitel 9.1 betrachtet. Abbildung 7.1 zeigt den Verlauf von SG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für verschiedene SOC_{min} für $n_{\text{Pedelec}} = 2$. Insbesondere für die beiden Randwerte 0 % und 100 % fällt der Servicegrad mit steigender Anzahl an potentiellen Kunden. Die restlichen Verläufe sind für dieses Szenario ähnlich. Wird SOC_{min} zu hoch gewählt, verlängert sich aufgrund des Ladevorgangs die Zeit, in der das Pedelec nicht zur Verfügung steht.

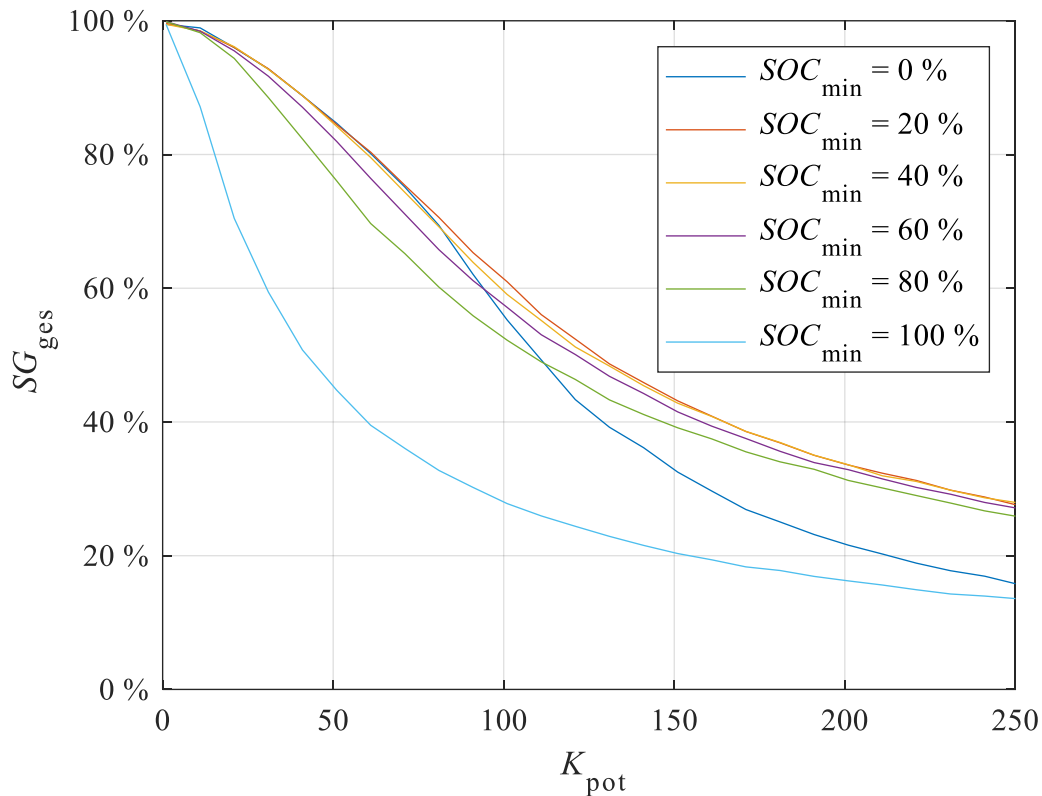


Abbildung 7.1: SG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{Pedelec} = 2$ bei unterschiedlichen SOC_{min}

In Abbildung 7.2 ist zu sehen, dass die Häufigkeit für K_{Akku} mit steigendem SOC_{min} zunimmt. Je höher SOC_{min} gewählt wird, desto länger beträgt die Zeit, in der die Pedelecs wegen des Ladevorgangs nicht zur Verfügung stehen. In der Folge finden mehr potentielle Kunden ein Pedelec an der Station vor, dessen Akku nicht ausreichend geladen ist. Wird der SOC zu niedrig gewählt, können zwar mehrere potentielle Kunden bedient werden. Allerdings steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der Akku während der Fahrt keine Energie für die Unterstützung mehr zur Verfügung stellen kann, sodass der Servicegrad aufgrund unzufriedener Kunden $K_{Rückgabe}$ sinkt.

Für den optimalen SOC_{min} bei einer vorgegebenen Anzahl $n_{Pedelec}$ wird der Wert ermittelt, der durchgehend, also sowohl bei wenigen als auch bei vielen potentiellen Kunden, einen möglichst hohen Servicegrad gewährleisten kann. Dazu wird der Servicegrad für $K_{pot} = 0 \dots 250$ für unterschiedliche SOC_{min} und verschiedene $n_{Pedelec}$ berechnet. Für $n_{Pedelec} = 2$ ist das Ergebnis oben in Abbildung 7.3 dargestellt. Als Regressionsfunktion wird ein Polynom mit dem Grad $l = 4$ gewählt, da Polynome mit dem Grad $l < 4$ das lokale Maximum

nicht adäquat erfassen. Die Parameterwerte sowie das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion R^2 für unterschiedliche n_{Pedelec} sind im Anhang in Tabelle B.1 zu finden.

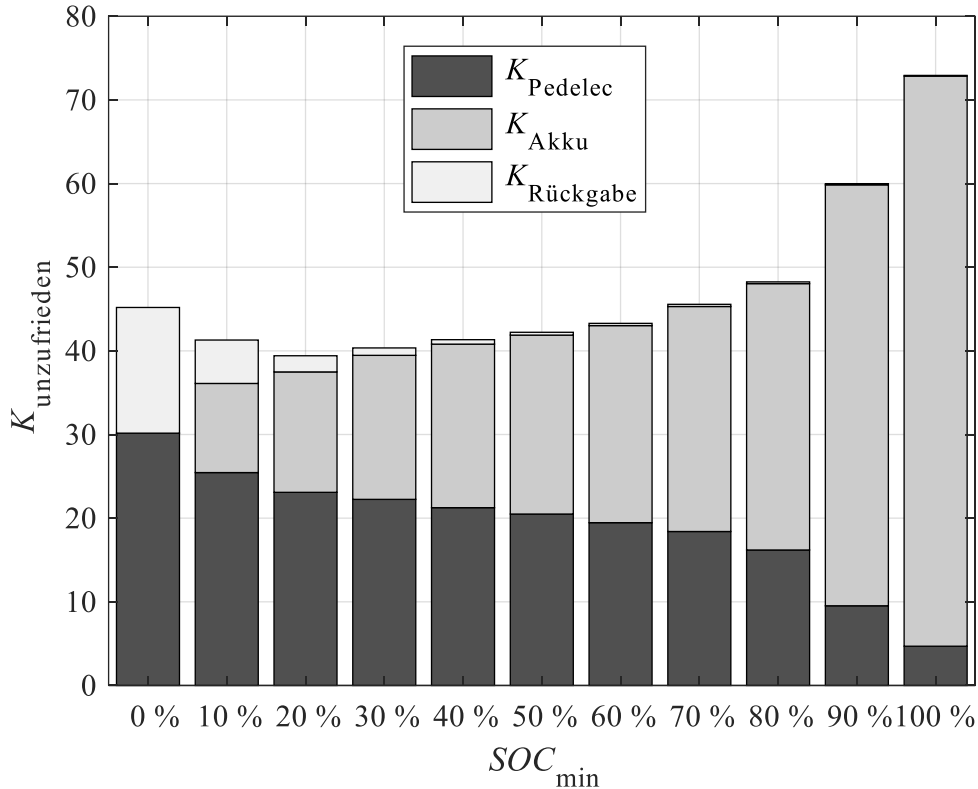


Abbildung 7.2: Häufigkeit von $K_{\text{unzufrieden}}$ und den Ursachen in Abhängigkeit von SOC_{\min} für $n_{\text{Pedelec}} = 2$ und $K_{\text{pot}} = 100$

Anhand der Regressionsfunktion wird das lokale Maximum für den durchschnittlichen Servicegrad im Bereich 0 % bis 100 % ermittelt. Der Verlauf vom Maximum für SOC_{\min} in Abhängigkeit von n_{Pedelec} ist unten in Abbildung 7.3 dargestellt. Mit zunehmender Anzahl an Pedelecs nimmt das Optimum für SOC_{\min} ab. Für $n_{\text{Pedelec}} = 8$ liegt das Maximum für SOC_{\min} bei 10,61 %, während bei $n_{\text{Pedelec}} = 2$ das Maximum bei 24,19 % liegt. Ausschlaggebend hierfür ist die höhere Gesamtenergie, die durch die Anzahl an Pedelecs zu Beginn der Simulation vorhanden ist.

Im Simulationsmodell wird SOC_{\min} in Abhängigkeit von n_{Pedelec} festgelegt. Da der Anteil der Kunden, bei denen der Akku während des Mietvorgangs keine Energie mehr zur Verfügung stellt, im Vergleich zu K_{Akku} und K_{Pedelec} gering ist, wird der Anteil $K_{\text{Rückgabe}}$ im weiteren Verlauf in K_{Akku} berücksichtigt.

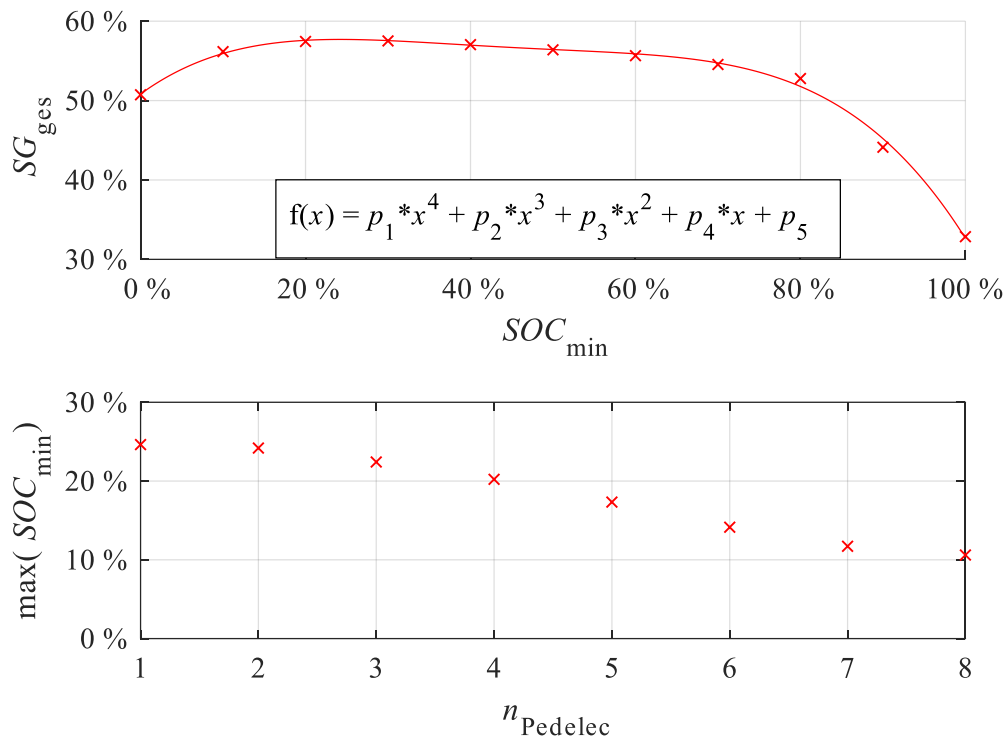


Abbildung 7.3: Durchschnittlicher Servicegrad von $K_{pot} = 0$ bis $K_{pot} = 250$ in Abhängigkeit von SOC_{min} für $n_{Pedelec} = 2$ (oben); lokales Maximum der Regressionfunktion für SOC_{min} in Abhängigkeit von $n_{Pedelec}$ (unten)

7.2 Servicegrad für ein Pedelec-Vermietsystem mit einem maximalen Ladestrom

Im ersten Schritt wird der Einfluss des Akkus auf den Servicegrad nicht berücksichtigt. Dazu wird ein unendlich großer Ladestrom angenommen ($I_{Lade} \rightarrow \infty$). Da der Akku nach der Rückgabe des Pedelecs dadurch sofort wieder vollständig geladen wird, steht das Pedelec ohne Verzögerung wieder zur Verfügung. Das Szenario lässt sich vom Verhalten mit einem FVS gleichsetzen. Der Servicegrad wird lediglich negativ beeinflusst, wenn zum Zeitpunkt einer Anfrage durch einen potentiellen Kunden kein Pedelec an der Station vorhanden ist. Das Ergebnis der Simulation in Abbildung 7.4 zeigt, dass der Servicegrad mit steigender Anzahl an potentiellen Kunden abnimmt.

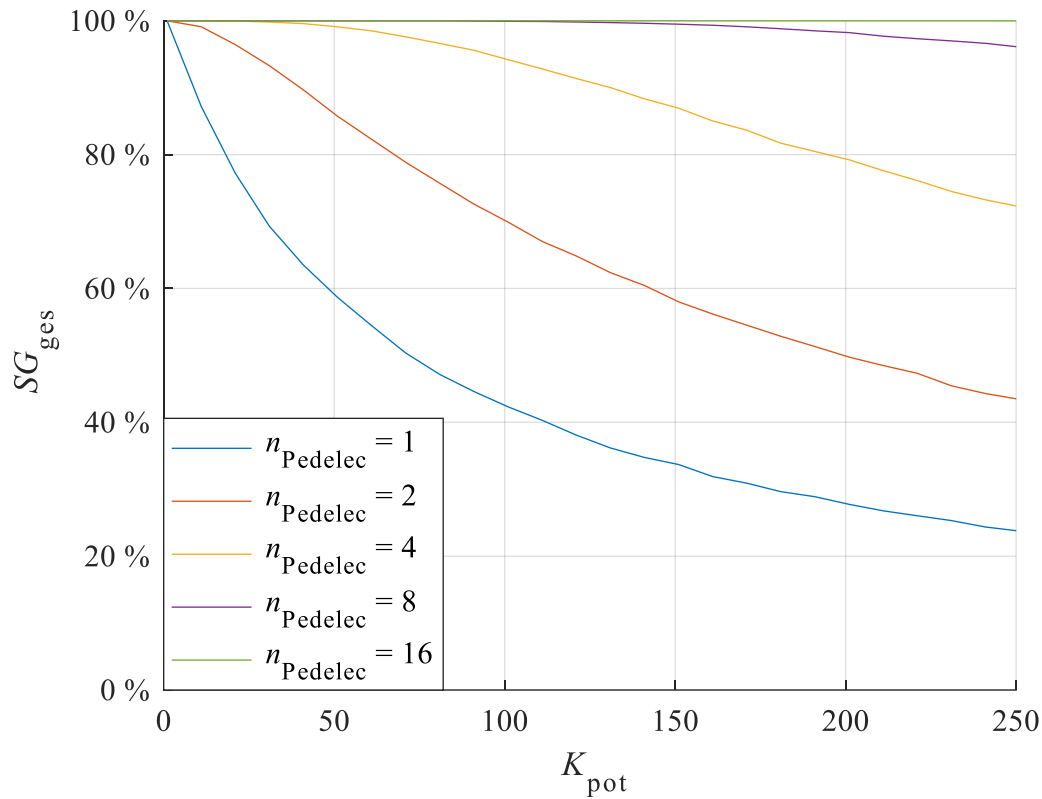


Abbildung 7.4: SG_{ges} über K_{pot} für verschiedene n_{Pedelec} bei $I_{\text{Lade}} \rightarrow \infty$

Je weniger Pedelecs zum Startzeitpunkt an der Station stehen, desto schneller fällt der Servicegrad ab. Eine Möglichkeit, den Servicegrad zu erhöhen, besteht in der Erhöhung von n_{Pedelec} . Anhand der Simulation wird deutlich, dass SG_{ges} mit $n_{\text{Pedelec}} = 1$ bzw. $n_{\text{Pedelec}} = 2$ bereits bei $K_{\text{pot}} = 10$ unter 99 % fällt. Es ist plausibel, dass in diesem Szenario mehr potentielle Kunden mit steigendem n_{Pedelec} bedient werden können. Durch die Erhöhung von n_{Pedelec} nimmt die Effizienz der Pedelecs zu. Das bedeutet, dass bei $K_{\text{pot}} = 20$ und $n_{\text{Pedelec}} = 2$ mehr Anfragen durchgeführt werden können als bei $K_{\text{pot}} = 10$ und $n_{\text{Pedelec}} = 1$, obwohl gleichviele potentielle Kunden auf ein Pedelec verteilt werden. Die Anzahl der potentiellen Kunden wird im weiteren Verlauf folgendermaßen definiert:

$$\dot{K}_{\text{pot}} = \frac{K_{\text{pot}}}{n_{\text{Pedelec}}} \quad (7.1)$$

Dementsprechend stellt die Effizienz den durchschnittlichen Servicegrad bezogen auf ein Pedelec dar. Die Effizienz lässt sich analog zum Servicegrad anhand der Simulation bestimmen. Hierbei gilt:

$$\eta_P(\dot{K}_{\text{pot}}) = SG_{\text{ges}}(K_{\text{pot}}, n_{\text{Pedelec}}) \quad (7.2)$$

In Abbildung 7.5 (oben) ist η_P in Abhängigkeit von \dot{K}_{pot} für $n_{\text{Pedelec}} = 1$ und $n_{\text{Pedelec}} = 2$ dargestellt. $\eta_P(n_{\text{Pedelec}} = 2)$ ist durchgehend größer oder gleich $\eta_P(n_{\text{Pedelec}} = 1)$, obwohl für jedes Pedelec die gleiche Anzahl an potentiellen Kunden anfällt. Bei $\dot{K}_{\text{pot}} = 15$ ist $\eta_P(n_{\text{Pedelec}} = 2)$ um 13,78 % höher als $\eta_P(n_{\text{Pedelec}} = 1)$. Die Zunahme von η_P verhält sich jedoch nicht linear zu der Zunahme von n_{Pedelec} . Abbildung 7.5 (unten) zeigt beispielhaft die Änderung von η_P in Bezug auf $n_{\text{Pedelec}} = 1$ für $\dot{K}_{\text{pot}} = 11$. Der Verlauf weist mit zunehmendem n_{Pedelec} ein degressives Verhalten auf. Die maximale Differenz, also der Abstand zwischen $\eta_P(n_{\text{Pedelec}} = 1)$ und $\eta_P = 100 \%$, liegt in diesem Fall bei 13,12 %. Während sich η_P bei der Erhöhung von $n_{\text{Pedelec}} = 1$ auf $n_{\text{Pedelec}} = 2$ um 9,06 % verbessert, fällt die Steigerung von η_P bei bspw. $n_{\text{Pedelec}} = 7$ auf $n_{\text{Pedelec}} = 8$ mit 0,03 % marginal aus.

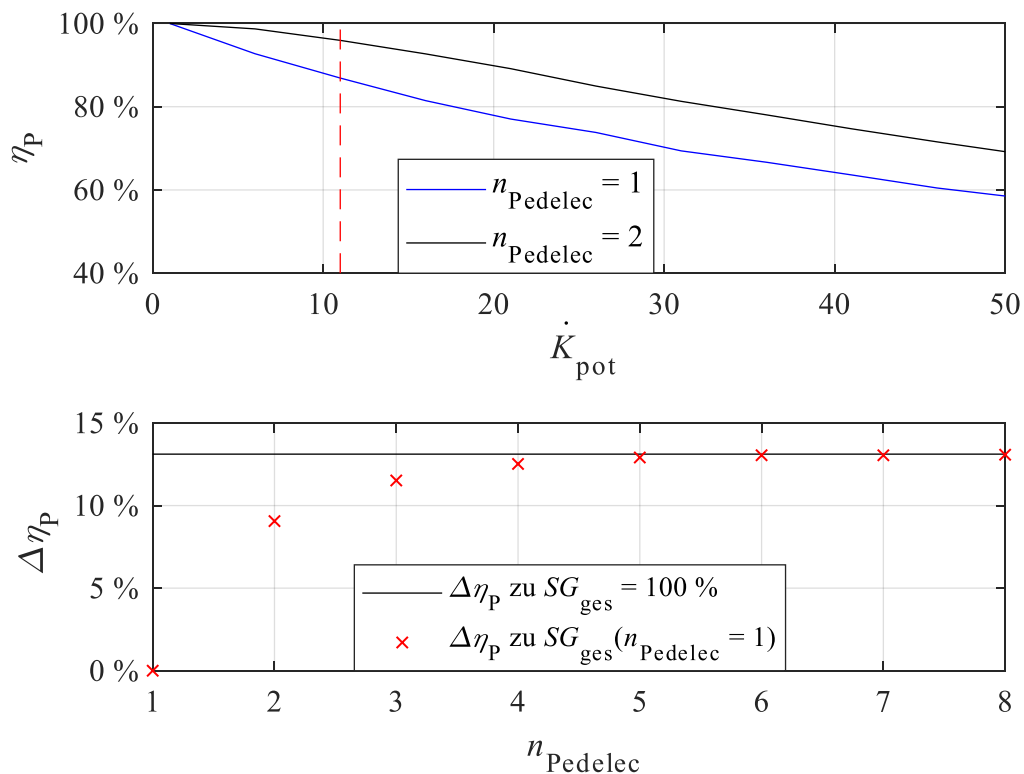


Abbildung 7.5: η_P über \dot{K}_{pot} für $n_{\text{Pedelec}} = 1$ und $n_{\text{Pedelec}} = 2$ (oben) - $\Delta\eta_P$ zu $n_{\text{Pedelec}} = 1$ über n_{Pedelec} für $\dot{K}_{\text{pot}} = 11$ (unten)

Das Verhältnis von Aufwand (die Erhöhung von n_{Pedelec} um eins) zum Ertrag (Steigerung von η_p um 0,03 %) ist in diesem Fall gering. Hauptursache für das Verhalten ist die durchschnittliche Zeit zwischen zwei potentiellen Kunden $\Delta \bar{t}_{\text{Anfrage}}$, die zwar mit steigendem K_{pot} abnimmt, sich allerdings nicht linear verhält. Bei $K_{\text{pot}} = 11$ beträgt die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Kunden ca. 85 min, bei $K_{\text{pot}} = 22$ ca. 48 min (Abbildung 7.6 – linke Achse). Im Durchschnitt wird ein Pedelec für 12 min vermietet. Je mehr Kunden vorhanden sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass vereinzelt weniger Zeit zwischen den Mietvorgängen liegt, wodurch wiederum Kunden nicht bedient werden können. Bei $K_{\text{pot}} = 22$ ist die Zeit mit 48 min zwar geringer als bei $K_{\text{pot}} = 11$ mit 85 min. Da aber zwei Pedelecs im Einsatz sind, erhöht sich $\Delta \bar{t}_{\text{Anfrage}}$ pro Pedelec auf das Doppelte, nämlich 96 min. Dies entspricht einer Steigerung von 12,94 %. Der Effekt nimmt analog zur vorangegangenen Betrachtung mit zunehmender Pedelec-Anzahl ab. Von $n_{\text{Pedelec}} = 7$ auf $n_{\text{Pedelec}} = 8$ erhöht sich $\Delta \bar{t}_{\text{Anfrage}}$ pro Pedelec von 115,02 min auf 116,67 min somit um lediglich 1,43 %.

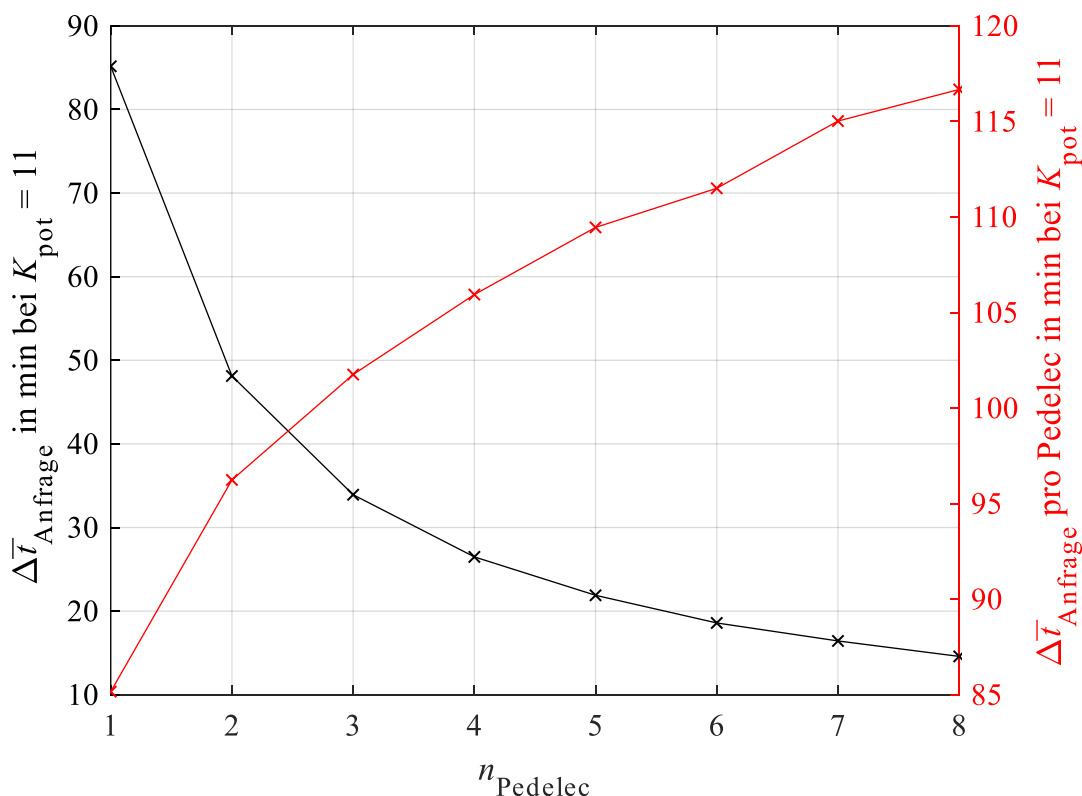


Abbildung 7.6: \bar{t}_{Anfrage} bei $K_{\text{pot}} = 11$ in Abhängigkeit von n_{Pedelec} (links) – $\Delta \bar{t}_{\text{Anfrage}}$ pro Pedelec bei $K_{\text{pot}} = 11$ (rechts)

7.3 Servicegrad für ein Pedelec-Vermietsystem mit 0 A Ladestrom

Im vorangegangenen Szenario wurde für I_{Lade} ein unendlich großer Wert angenommen, sodass potentielle Kunden ausschließlich abgelehnt werden konnten, wenn keine Pedelecs an der Station stehen. In diesem Szenario wird der Ladestrom auf $I_{Lade} = 0$ A gesetzt. Es existiert also keine Lademöglichkeit zwischen den Mietvorgängen. Demnach können potentielle Kunden unzufrieden werden, wenn der SOC zum Zeitpunkt der Anfrage jedes an der Station verfügbaren Pedelecs kleiner SOC_{min} ist oder der Akku während der Fahrt keine Energie mehr zur Verfügung stellen kann. Folglich bestehen drei Ursachen, durch die SG_{ges} reduziert werden kann. Ohne eine Möglichkeit, den Akku zwischen den Mietvorgängen zu laden bzw. auszutauschen, stehen die Pedelecs nach einigen Mietvorgängen aufgrund des zu geringen SOC nicht mehr zu Verfügung. SG_{ges} wird in diesem Szenario maßgeblich von SG_{Akku} bestimmt (Abbildung 7.7). Bei $n_{Pedelec} = 4$ bricht SG_{ges} durch die Steigerung von $K_{pot} = 30$ auf $K_{pot} = 40$ um fast 40 % ein. Anschließend flacht SG_{ges} immer weiter ab, da mit den gegebenen Bedingungen im Durchschnitt nicht mehr als 24 Mietvorgänge durchgeführt werden können.

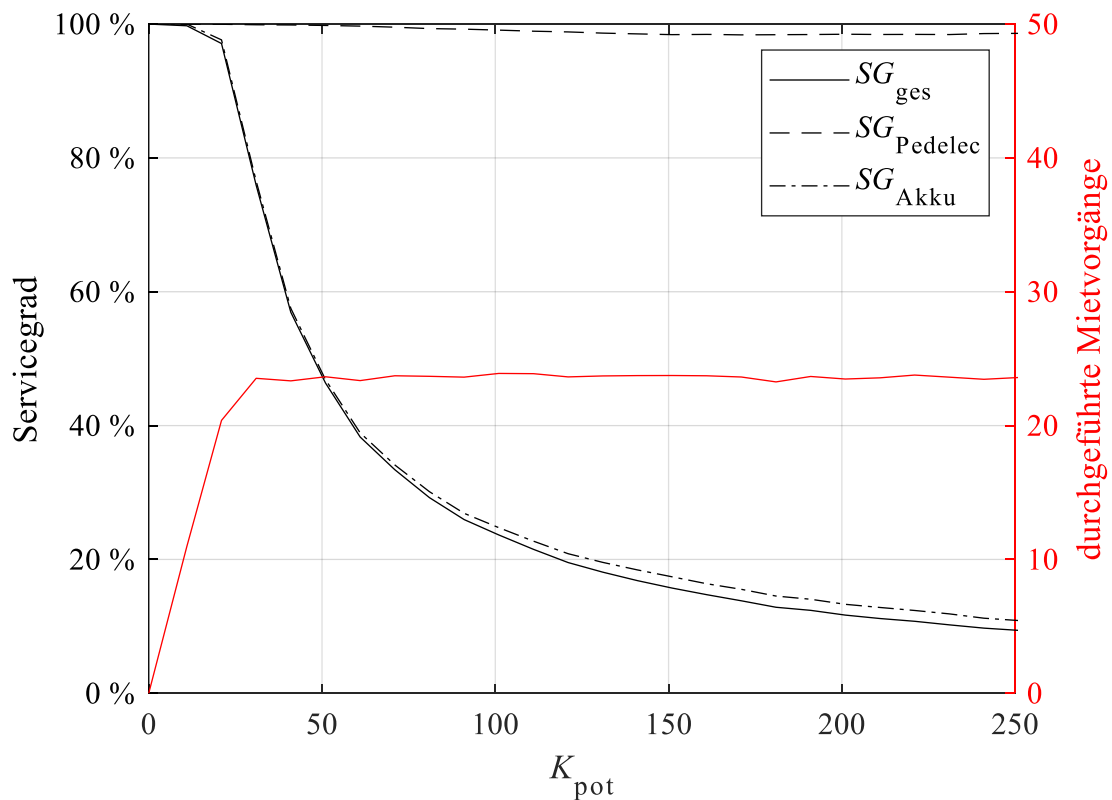


Abbildung 7.7: SG_{ges} , SG_{Akku} und $SG_{Pedelec}$ in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{Pedelec} = 4$

Anders als im vorangegangenen Szenario ist der Effekt der Effizienzsteigerung durch die Erhöhung der Pedelecazahl bei $\dot{K}_{\text{pot}} < 10$ vorhanden und dies nur in abgeschwächter Form. Für $\dot{K}_{\text{pot}} > 10$ ist eine Steigerung von η_P unabhängig von n_{Pedelec} nicht mehr möglich (Abbildung 7.8). Die maximale Anzahl potentieller Kunden, die mit einem Pedelec innerhalb des Betrachtungszeitraumes bedient werden kann, ist demnach ohne Lademöglichkeit deutlich begrenzt.

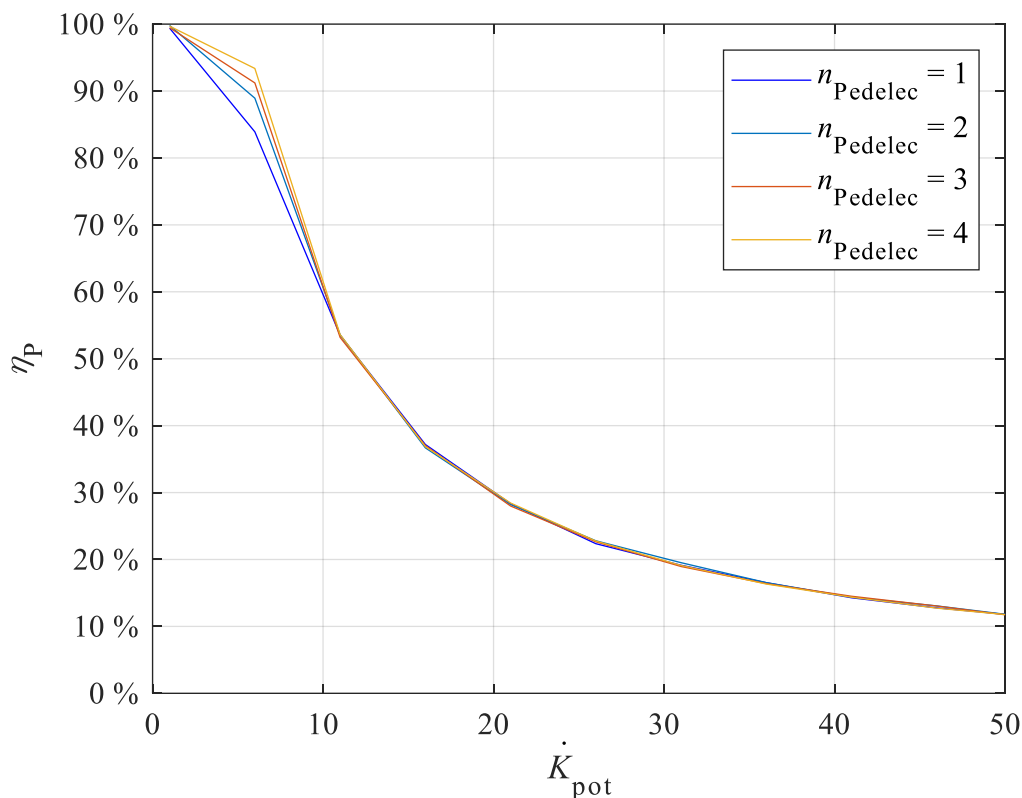


Abbildung 7.8: η_P über K_{pot} für verschiedene n_{Pedelec} und $I_{\text{Lade}} = 0 \text{ A}$

7.4 Servicegrad für ein Pedelec-Vermietsystem mit 4 A Ladestrom

Um dem stark fallenden Servicegrad entgegenzuwirken, ist das Laden des Akkus über den Tag zwingend erforderlich. Dies kann durch Ladestationen geschehen, aber auch durch den Wechsel des Akkus durch das Personal bzw. den Kunden. Durch die Integration einer Lademöglichkeit in ein Vermietsystem – in diesem Fall eine Ladestation – können Pedelec-Akkus über SOC_{min} hinaus wieder aufgeladen und somit über den Tag erneut zur Verfügung gestellt werden. Der Vergleich zwischen einem PVS mit und einem PVS ohne Lademöglichkeit zeigt für $n_{\text{Pedelec}} = 4$ eine Steigerung von SG_{ges} um stellenweise fast

70 % (Abbildung 7.9). Bis $K_{\text{pot}} = 100$ nimmt ΔSG_{ges} in diesem Fall drastisch zu, da zwischen den Mietvorgängen ausreichend Zeit vorhanden ist, um die Akkus zu laden. Über diese Kundengrenze hinaus nimmt die theoretisch mögliche Ladezeit immer weiter ab. In der Folge werden vermehrt Anfragen abgelehnt, weil die Pedelecs aufgrund unzureichend geladener Akkus nicht zur Verfügung stehen. Während SG_{Pedelec} ab $K_{\text{pot}} = 150$ weitestgehend konstant bleibt, nimmt SG_{Akku} immer weiter ab.

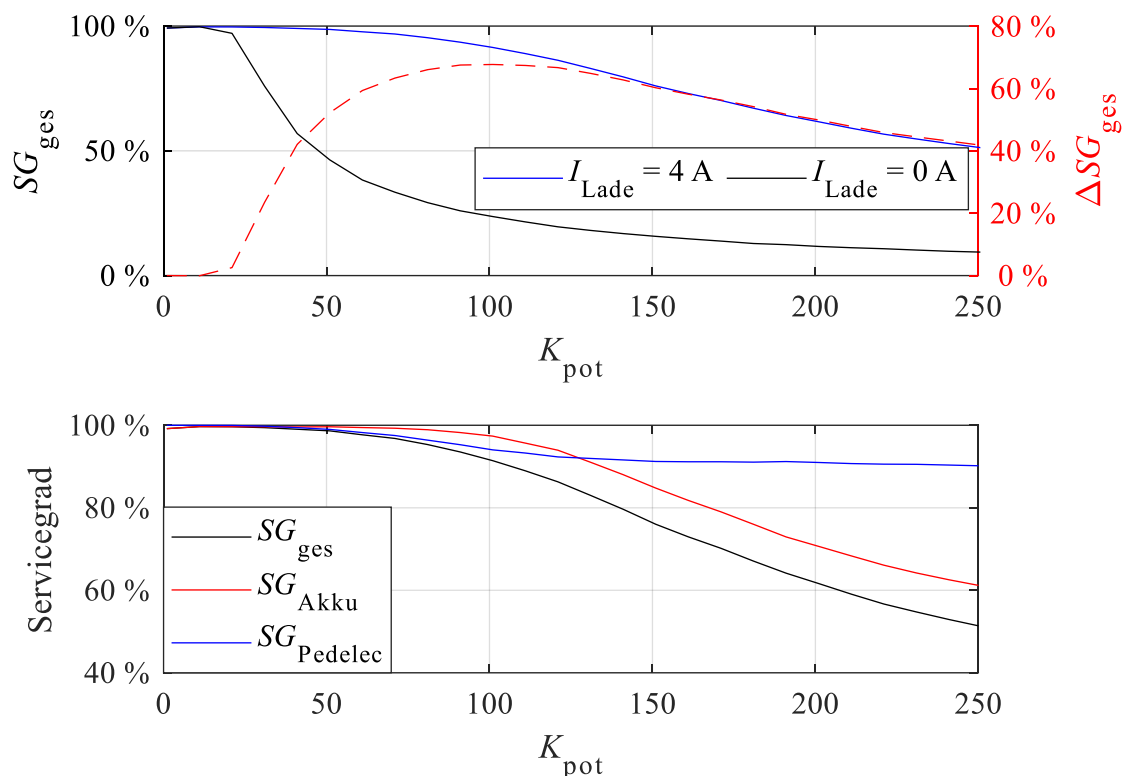


Abbildung 7.9: SG_{ges} über K_{pot} für $n_{\text{Pedelec}} = 4$ mit und ohne Ladestation, sowie ΔSG_{ges} zwischen den beiden Verläufen (oben) - SG_{ges} , SG_{Pedelec} und SG_{Akku} (Akku & Pedelec) in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{\text{Pedelec}} = 4$ (unten)

Anhand des Modells lässt sich der Zeitpunkt eines unzufriedenen Kunden und dessen Ursache über den Betrachtungszeitraum analysieren. Bei $n_{\text{Pedelec}} = 4$ und $K_{\text{pot}} = 100$ ist $SG_{\text{ges}} = 92,46 \%$. Der Service wird über den Betrachtungszeitraum bei durchschnittlich 7,5 Kunden nicht vollständig gewährleistet. Ein Großteil der unzufriedenen Kunden lässt sich auf fehlende Pedelecs zu den Stoßzeiten zurückführen (Abbildung 7.10). Im Gegensatz dazu erfahren bei $n_{\text{Pedelec}} = 4$ und $K_{\text{pot}} = 200$ mit $SG_{\text{ges}} = 61,64 \%$ 76,6 Kunden im Durchschnitt keinen zufriedenstellenden Service. Während K_{Pedelec} abgesehen vom ersten

Anfragepeak ($t_{\text{Anfrage}} = 9 \text{ h}$) verhältnismäßig ähnlich verläuft, nimmt die Anzahl von Servicegradeinbußen aufgrund des Akkus nach dem ersten Anfragepeak deutlich zu. Beim zweiten Anfragepeak ($t_{\text{Anfrage}} = 18 \text{ h}$) werden im Durchschnitt 14 Anfragen abgelehnt. Zum Ende des Betrachtungszeitraumes reduziert sich die Anzahl aufgrund sinkender Nachfrage.

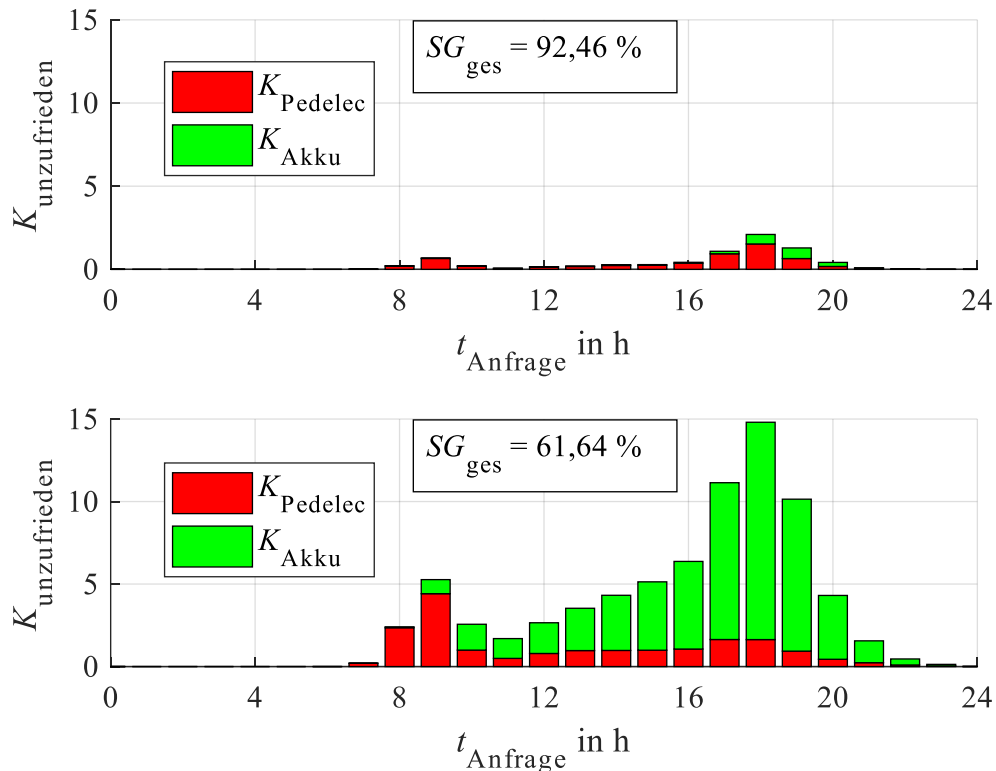


Abbildung 7.10: Unzufriedene Kunden für $n_{\text{Pedelec}} = 4$ bei $K_{\text{pot}} = 100$ (oben) bzw. $K_{\text{pot}} = 200$ (unten) aufgeteilt in K_{Pedelec} und K_{Akku} über einen Betrachtungszeitraum von 24 h

Um zu beantworten, wie sich SG_{ges} eines PVS im Vergleich zu einem FVS ändert, wird der SG_{ges} mit $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ mit $I_{\text{Lade}} \rightarrow \infty$ gegenübergestellt. Abbildung 7.11 zeigt die Differenz ΔSG_{ges} zwischen $SG_{\text{ges}}(I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A})$ und $SG_{\text{ges}}(I_{\text{Lade}} \rightarrow \infty)$ in Abhängigkeit von n_{Pedelec} und K_{pot} . Insbesondere bei wenigen Pedelecs pro Station und vielen potentiellen Kunden ist der Unterschied zwischen dem PVS und FVS deutlich. Mit steigender Anzahl an Pedelecs nimmt die Differenz zwischen den Servicegraden ab. Unterhalb von $K_{\text{pot}} = 50$ ist der Unterschied im Servicegrad minimal. Die Erhöhung des Ladestroms kann im Hinblick auf den Servicegrad für den betroffenen Bereich relevant sein, da hier das größte Potential für eine Steigerung vorliegt.

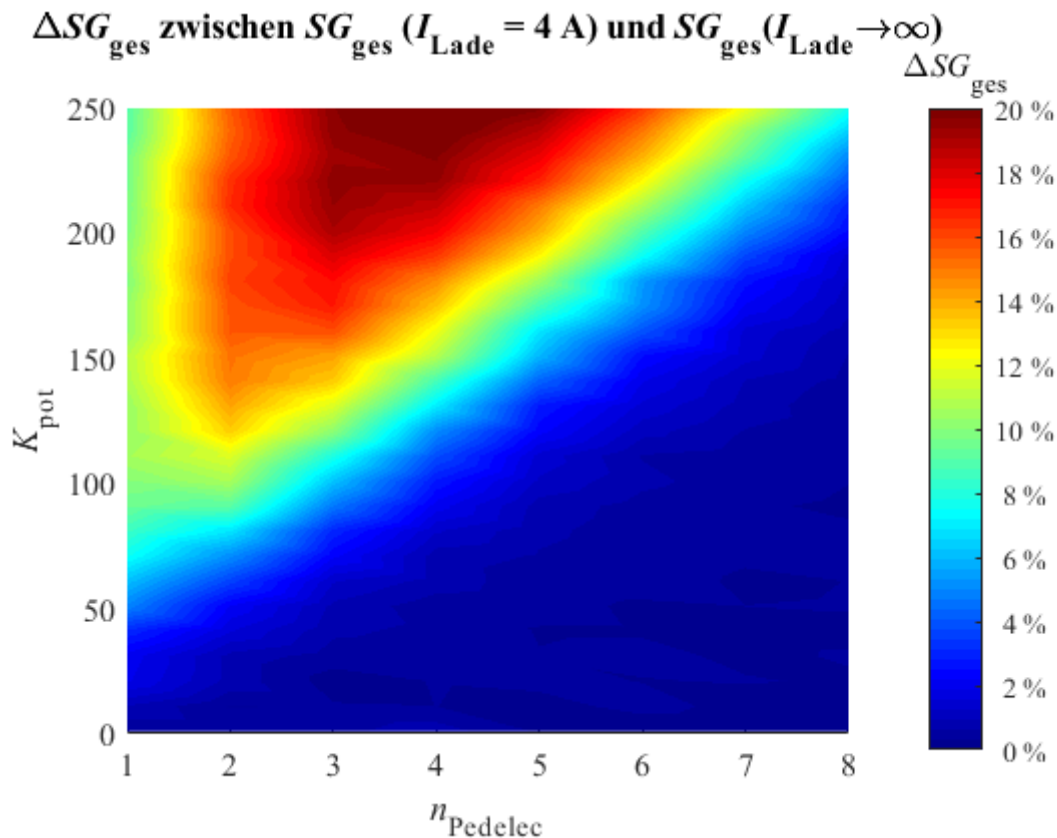


Abbildung 7.11: ΔSG_{ges} zwischen $SG_{\text{ges}}(I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A})$ im Vergleich zu $SG_{\text{ges}}(I_{\text{Lade}} \rightarrow \infty)$ in Abhängigkeit von n_{Pedelec} und K_{pot}

Bei der Betrachtung der drei simulierten Szenarien mit $I_{\text{Lade}} = 0 \text{ A}$, $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ und $I_{\text{Lade}} \rightarrow \infty$ wird deutlich, dass der Servicegrad zwangsläufig mit zunehmender Anzahl an potentiellen Kunden sinken wird. Es existieren verschiedene Möglichkeiten, den Servicegrad zu erhöhen. Ein Überblick ist in Tabelle 7.1 zu finden. Mehr Pedelecs pro Station haben bspw. positive Auswirkungen auf beide Teilservicegrade. Zum einen können durch die zusätzlichen Pedelecs mehrere Mietvorgänge gleichzeitig durchgeführt werden, wodurch SG_{Pedelec} steigt. Zum anderen bringen die zusätzlichen Pedelecs zusätzliche Akkus in das PVS, sodass der Energiebedarf der gesamten Anfragen auf mehrere Akkus aufgeteilt und SOC_{min} schneller erreicht werden kann. In der Folge steigt SG_{Akk} ebenfalls an. Diese Variante ist durch die zusätzliche Anschaffung von Pedelecs mit entsprechenden Kosten verbunden. Darüber hinaus ist die Flexibilität an anfrageschwächeren Tagen nicht gegeben, sodass diese Pedelecs ggfs. unnötigerweise an der Station stehen. Dennoch bietet diese Option die größte Servicegradsteigerung, da beide Teilservicegrade entsprechend erhöht werden können. Alle anderen Möglichkeiten beeinflussen lediglich SG_{Akk} ,

sodass mit diesen Maßnahmen ein Servicegrad größer $SG_{ges}(I_{Lade} \rightarrow \infty)$ in keinem Fall erreicht werden kann.

Tabelle 7.1: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile potentieller Maßnahmen zur Steigerung des Servicegrades

Maßnahme	Vorteile	Nachteile
$n_{Pedelec}$ erhöhen	<ul style="list-style-type: none"> - SG_{Akku} kann gesteigert werden - $SG_{Pedelec}$ kann gesteigert werden 	<ul style="list-style-type: none"> - kostenintensiv
Implementierung eines Wechselakkusystems	<ul style="list-style-type: none"> - SG_{Akku} kann gesteigert werden 	<ul style="list-style-type: none"> - $SG_{Pedelec}$ kann nicht gesteigert werden - zusätzliche Kosten durch die Anschaffung weiterer Akkus
E_{Akku} erhöhen	<ul style="list-style-type: none"> - SG_{Akku} kann gesteigert werden 	<ul style="list-style-type: none"> - $SG_{Pedelec}$ kann nicht gesteigert werden - Erhöhung E_{Akku} muss für alle Pedelecs erfolgen \rightarrow zusätzliche Kosten
I_{Lade} erhöhen	<ul style="list-style-type: none"> - SG_{Akku} kann gesteigert werden - flexibel einsetzbar (an hochfrequentierten Stationen und Tagen) 	<ul style="list-style-type: none"> - $SG_{Pedelec}$ kann nicht gesteigert werden

Durch den Wechsel auf Wechselakkustationen werden an der Station zusätzliche Pedelec-Akkus zur Verfügung gestellt. Der Ladevorgang wird nicht direkt nach der Rückgabe des Pedelecs ausgelöst, sodass der Kunde den leeren Akku bei Bedarf gegen einen ausreichend aufgeladenen Akku austauschen muss. In Abhängigkeit von der Anzahl der Ersatzakkus nähert sich der Servicegradverlauf dem für $I_{Lade} \rightarrow \infty$. In Abbildung 7.12 ist der Servicegradverlauf für PVS mit einer Lade- und einer Wechselakkustation dargestellt. Sowohl für $n_{Pedelec} = 2$ als auch für $n_{Pedelec} = 4$ verläuft der Servicegrad mit dem Wechselakkusystem fast identisch mit dem Verlauf für $SG_{ges}(I_{Lade} \rightarrow \infty)$.

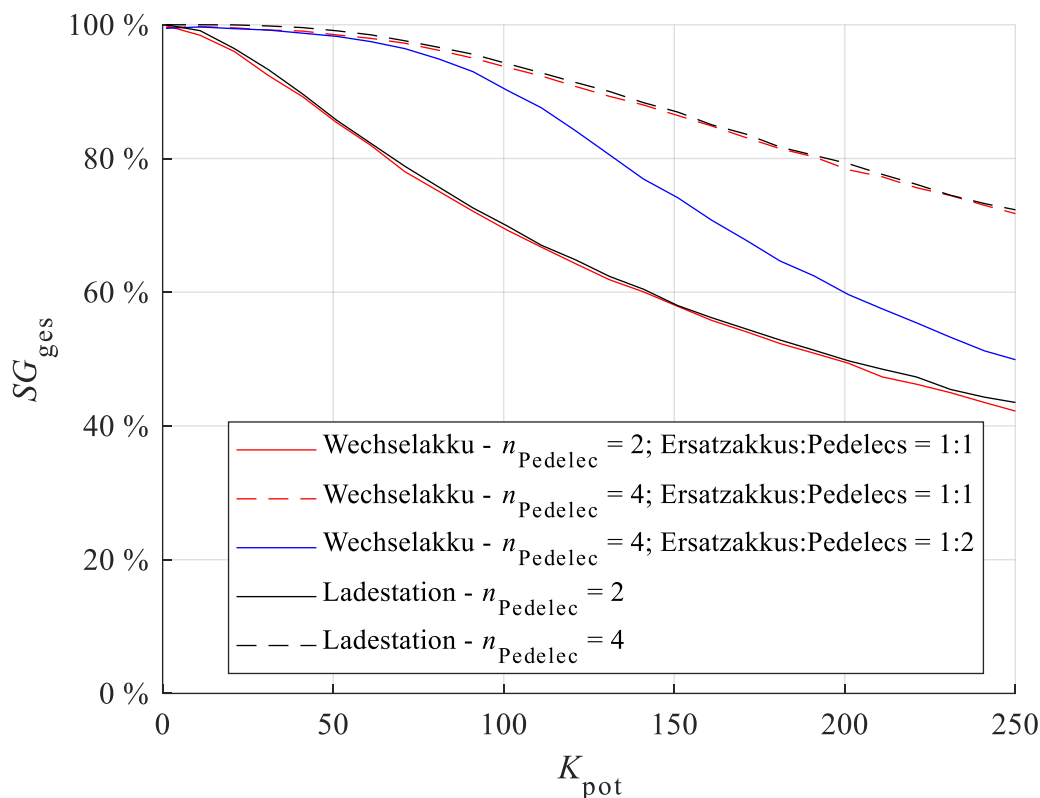


Abbildung 7.12: SG_{ges} über K_{pot} für eine Lade- und eine Wechselakkustation

Dies gilt allerdings nur bei einem Verhältnis „Ersatzakku zu Pedelecs“ von 1:1. Das bedeutet, dass bei $n_{Pedelec} = 4$ vier Ersatzakkus an der Station vorliegen. Sobald die Anzahl der Akkus reduziert und das Verhältnis bspw. auf 1:2 geändert wird, weichen die Verläufe voneinander ab. Stationsbasierte PVS mit einem Wechselakkusystem sind demnach dafür geeignet, das Servicegraddefizit zwischen PVS und FVS lückenlos auszugleichen. Entscheidend ist dabei das Verhältnis von vorhandenen Pedelecs zu Ersatzakkus, die parallel an der Station geladen werden. Werden zu wenig Ersatzakkus eingesetzt, ergeben sich negative Auswirkungen auf den Servicegrad. Insbesondere bei großen PVS steigt durch die zusätzlich notwendigen Akkus der finanzielle Aufwand.

Eine weitere Maßnahme ist der Einsatz von Akkus mit einem höheren Energieinhalt. Dadurch wird die Gesamtenergie, die am Anfang vorhanden ist, ähnlich wie bei den Wechselakkustationen, gesteigert. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass alle Pedelecs mit den höherenergetischen Akkus ausgestattet werden müssen, da eine Selektion im späteren Betrieb, insbesondere bei großen PVS mit mehr als 1.000 Pedelecs, sehr schwer

durchzuführen ist. Folglich werden unnötige Ressourcen eingebracht, die an einigen Stationen keinen Erfolg im Hinblick auf eine Servicegradsteigerung aufweisen. Als letzte Möglichkeit kann die Erhöhung des Ladestroms in Betracht gezogen werden. Hierfür müssen die Stationen in der Regel nicht umgebaut, sondern lediglich softwareseitig angepasst werden. Im Gegensatz zum Wechselakkusystem oder zu einem höheren Energieinhalt müssen nicht zusätzliche bzw. höherenergetische Akkus angeschafft werden. Die Steuerung des Ladestroms ermöglicht es, an nutzungsschwächeren Tagen mit wenig potentiellen Kunden den Ladestrom zu reduzieren, um den Akku zu schonen bzw. den Prozess der zyklischen Alterung zu verlangsamen (Kapitel 4.1).

Anhand eines Versuchs wird der maximale Ladestrom beim *PowerPack 400* identifiziert. Anschließend werden anhand der Simulation die Auswirkungen dieses Ladestroms auf den Servicegrad ermittelt. Durch die Erhöhung des Ladestroms wird sich der Servicegrad zwischen $SG_{\text{ges}}(I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A})$ und $SG_{\text{ges}}(I_{\text{Lade}} \rightarrow \infty)$ einordnen. Die Alterung des Akkus, die sich mit einem erhöhten Ladestrom beschleunigen kann, wird im Rahmen der Untersuchung nicht betrachtet, da eine genaue Bestimmung des Alterungsverhaltens über entsprechende Langzeitversuche erfolgen muss.

8 Experimentelle Bestimmung des maximalen Ladestroms und der Entladekapazität

Zur Untersuchung des Einflusses eines erhöhten Ladestroms auf den Servicegrad im PVS werden anhand des *PowerPacks 400* der maximale Ladestrom und das dazugehörige Ladeverhalten bestimmt. Nach jedem Ladeversuch muss die nutzbare Energie ermittelt werden, um einen möglichen Einfluss des Ladestroms zu bestätigen oder ausschließen zu können. Im Rahmen des Versuchs werden ebenfalls die Ladekurve und die Entladeenergie für den verwendeten Standardladestrom $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$, die in den vorangegangenen Simulationen bereits hinterlegt waren, ermittelt.

8.1 Spezifikationen des *PowerPack 400* und der verwendeten Zellen

Zur Vorbereitung auf den Versuch werden zunächst die Spezifikationen für das *PowerPack* sowie die verwendeten Zellen gegenübergestellt, um mögliche Grenzwerte hinsichtlich des Ladestroms und der Temperatur zu ermitteln. Bei dem verwendeten Akku handelt es sich, wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, um das *PowerPack 400* der *Robert Bosch GmbH*. Der Akku hat eine Nennspannung von 36 V und eine Nennkapazität von 11 Ah [115]. Daraus ergibt sich ein Energieinhalt von 396 Wh. Das *PowerPack* setzt sich aus 40 Akkuzellen zusammen, bei denen zehn Zellen in Reihe und vier dieser Reihen parallelgeschaltet werden. Bei den Zellen, die für das Akkupack verwendet werden, handelt es sich um Lithium-Ionen-Rundzellen des Typs 18650 der Firma *Samsung (INR18650-29E)*. Eine Einzelzelle besitzt eine Nennkapazität von 2.900 mAh bei einer Nennspannung von 3,62 V [116]. Der Ladevorgang für die Zelle findet laut Herstellerangaben nach dem CCCV-Verfahren statt. Dabei wird die Zelle mit einem konstanten Ladestrom bis zum Erreichen der Ladeschlussspannung (in diesem Fall 4,2 V) geladen. Anschließend wird bei konstanter Spannung der Strom soweit reduziert, bis der Ladeschlussstrom erreicht wird. Vom Hersteller sind als Standardladestrom für die Einzelzelle 1.375 mA ($\sim 0,47 \text{ C}$) und als Ladeschlussstrom 0,02 C ($\sim 58 \text{ mA}$) angegeben. Die Ladezeit beträgt dabei ca. 3 h. Der maximale Ladestrom liegt mit 2.750 mA bei etwa 0,95 C. Dieser ist praktisch zwar möglich, beeinflusst jedoch die Lebensdauer insofern, dass keine 500 Ladezyklen mehr gewährleistet werden können.

Vom Hersteller wurden u. a. zwei wichtige Tests im Hinblick auf den Ladevorgang und das Temperaturverhalten durchgeführt. Zum einen wurde eine Standardzelle mit 12 V und 2,75 A bei 25 °C für 2,5 h geladen, ohne dass die Zelle Feuer fing oder explodierte. Zum anderen wurde eine Standardzelle in der Klimakammer 60 Minuten mit einer Temperatursteigerung von 5 °C pro Minute aufgeheizt, bis 130 °C erreicht wurden. Zusätzlich ist im Datenblatt eine Vielzahl von Angaben vorgegeben, die bei der Versuchsdurchführung berücksichtigt werden:

- Der Ladestrom soll unter dem angegebenen maximalen Ladestrom (2,75 A) liegen.
- Die Ladetemperatur soll innerhalb des angegebenen Temperaturbereiches liegen (Betriebstemperatur beim Laden: 0 – 45 °C).
- Der Ladevorgang muss nach dem CCCV-Verfahren durchgeführt werden.
- Die Ladeschlussspannung der Zelle liegt bei 4,2 V (Ladeschlussstrom: 0,02C).

Tabelle 8.1: Gegenüberstellung der Spezifikationen für das *PowerPack 400* und der im *PowerPack* verwendeten Zelle

	<i>INR18650-29E</i>	<i>PowerPack 400</i>
Nennspannung	3,62 V	36 V
Nennkapazität	2.900 mAh	11.000 mAh
Ladezyklen	500 (80 % Restkapazität)	500 (80 % Restkapazität)
Lademethode	CCCV	CCCV
Ladetemperaturbereich	0 – 45 °C	0 – 40 °C
Standardladestrom (Ladezeit)	1.375 mA (3.0 h)	Abhängig vom Ladegerät: Compact – 2.000 mA (6,5 h) Standard – 4.000 mA (3,5 h) Fast – 6.000 mA (2,5 h)
Maximaler Ladestrom	2.750 mA	keine Angabe
Ladeschlussstrom	0,02 C	keine Angabe
Ladespannung	4,2 V ± 0,05 V	42,0 V
Entladeschlussspannung	2,50 V	keine Angabe

Mit dem Standardladegerät des *PowerPacks 400* wird der Akku in der CC-Phase mit 4 A geladen. Darüber hinaus existieren zwei weitere Varianten des Ladegerätes, mit denen der Akku entweder mit einem niedrigeren (2 A) oder höheren Strom (6 A) geladen werden kann. Angaben zum maximalen Ladestrom oder zur Ladeschlussspannung sind nicht vorhanden.

Ein Unterschied besteht, neben der Nennkapazität (beim *PowerPack* ist die Kapazität um 600 mAh niedriger), in der Obergrenze des Ladetemperaturbereichs. Diese liegt beim *PowerPack* mit 40 °C um 5 °C niedriger als bei der Einzelzelle. Aus der Anleitung des *PowerPacks* geht außerdem hervor, dass der Akku über ein Batteriemanagementsystem (BMS) verfügt. Dieses System schützt den Akku gegen Tiefenentladung, Überladung, Überhitzung und Kurzschluss.

8.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Für den Ladevorgang wird der Ladestrom I_{Lade} über eine steuerbare Stromquelle, wie in Abbildung 8.1 gezeigt, vorgegeben. Um den Ladevorgang ohne das Ladegerät vom Hersteller durchführen zu können, muss eine Spannung von 5 V am Akku zur Aktivierung des BMS angelegt werden. Für den Versuch wird der Akku mit verschiedenen Ladeströmen in der CC-Phase geladen. Als Ladegerät wird die Spannungsquelle LAB/SM 270 verwendet. Spannung und Strom werden über die Versuchsdauer mittels Multimetern, die mit einem PC verbunden sind, gemessen und aufgezeichnet. Über das Ladegerät kann das CCCV-Verfahren mit den dazugehörigen Parametern eingestellt werden. Während der Untersuchung befindet sich der Akku in einem Sicherheitsschrank, der für die Lagerung und den Betrieb von Akkus ausgelegt ist. Zur Temperaturüberwachung kommt, neben einem Temperatursensor am Gehäuse des Akkus, eine Wärmebildkamera zum Einsatz, die die Außentemperatur des Akkupacks überwacht. Während des Ladevorgangs wird die Außentemperatur des Akkus T_{Akku} aufgezeichnet und über die gesamte Dauer des Versuchs beobachtet. Beginnend mit 4 A wird der Ladestrom nach jedem Ladevorgang nach Tabelle 8.2 sukzessiv um 1 A bis maximal 10 A erhöht. Der Ladestrom wird nur gesteigert, wenn die Temperatur im vorangegangenen Ladevorgang den zulässigen Temperaturbereich (max. 40 °C) nicht verlassen hat.

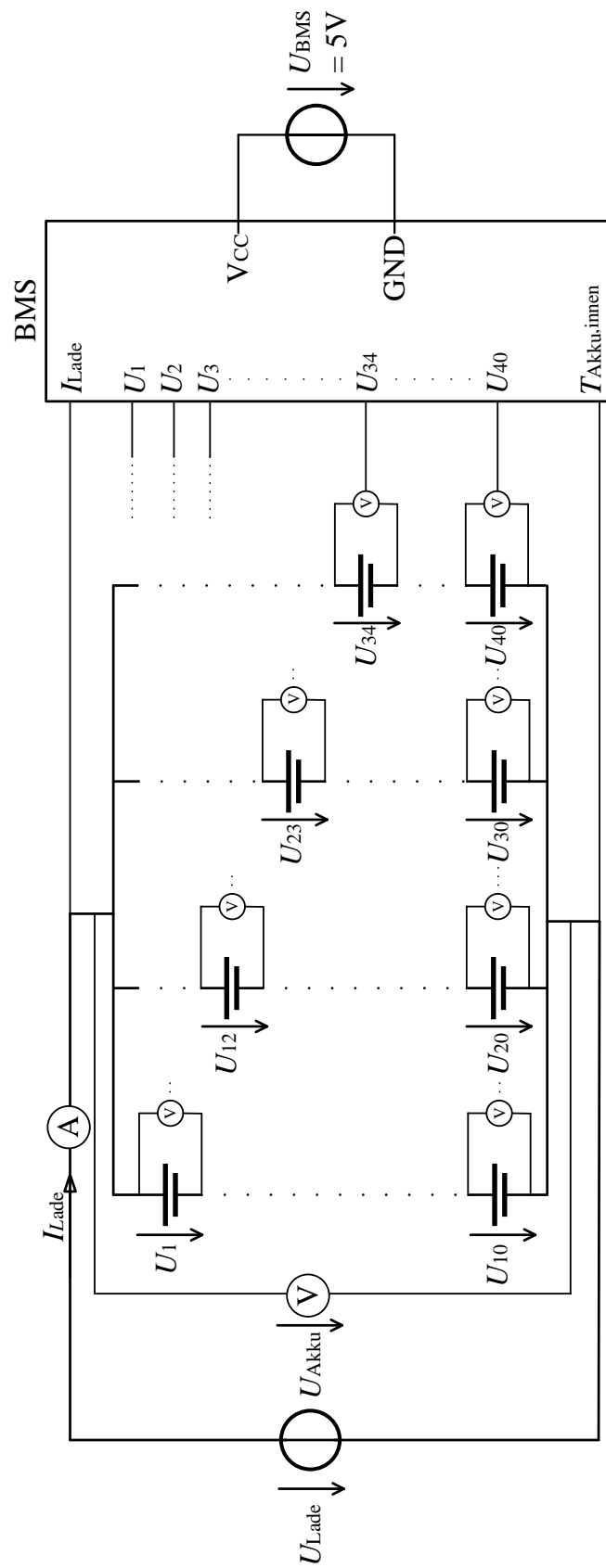


Abbildung 8.1: Ersatzschaltbild für den Ladeversuch

Tabelle 8.2: Übersicht der durchzuführenden Ladeversuche

Ladevorgang	Maximaler Ladestrom
1	4 A
2	6 A
3	7 A
4	8 A
5	9 A
6	10 A

Der Akku ist durch die „Electronic Cell Protection (ECP)“ des Herstellers gegen Tiefenentladung, Überladung, Überhitzung und Kurzschluss geschützt. Bei Gefährdung schaltet sich der Akku durch eine Schutzschaltung automatisch ab. Zusätzlich werden weitere Sicherheitsmaßnahmen getroffen. Ein akustisches Signal wird ausgelöst, sobald die Temperatur über 45 °C steigt. Der Ladevorgang wird sofort unterbrochen und der Versuch beendet. Der Schrank hat eigene Sicherheitsvorrichtungen. Bei einer Grenztemperatur von 50° C verschließen sich die Schranktüren automatisch. Bei einer Grenztemperatur von 70° C werden die Schranktüren vollständig abgeriegelt.

Zwischen den Ladevorgängen wird der Akku zur Bestimmung der Entladeenergie entladen. Hierzu ruht der Akku nach dem Ladevorgang für mindestens eine Stunde. Aufgrund der notwendigen Freischaltung des CAN-Busses kann ein Entladevorgang nur erfolgen, wenn der Akku mit der Motoreinheit verbunden ist. Am Institut für Konstruktionselemente, Mechatronik und Elektromobilität ist dafür ein Prüfstand für Pedelec-Motoren aufgebaut, an dem der Akku über den Betrieb des Motors entladen werden kann. Am Prüfstand können verschiedene Parameter eingestellt werden (u. a. Geschwindigkeit, Unterstützungsgrad). Anhand der Parameter wird ein Soll-Moment berechnet, das die Antriebseinheit aufbringen muss. Der Akkustrom und die Akkuspannung werden analog zum Datenlogger direkt vom CAN-Bus ausgelesen und aufgezeichnet. Da das eingestellte Soll-Drehmoment und somit die Leistung, die der Akku aufbringen muss, konstant sind, erhöht sich der Akkustrom mit der Zeit. Um den Akku mit durchschnittlich ca. 0,2 C zu entladen, wird ein Soll-Moment von 7,56 Nm vorgegeben.

Zur Ermittlung der Standardladekurve wird zunächst der Ladevorgang mit einem maximalen Ladestrom von 4 A durchgeführt. Über die Aufnahme der Wärmebildkamera in

Abbildung 8.2 ist ersichtlich, dass sich die Außenschale des Akkupacks während des Ladevorgangs zum größten Teil auf ca. 30 °C erwärmt. Stellenweise sind auf der Akkuunterseite einzelne Zellen zu erkennen. Anhand der Wärmebildkamera ist zu erkennen, dass die maximale Temperatur von den LEDs des Akkus, die den Ladestand anzeigen, ausgeht. Diese werden bei der späteren Betrachtung nicht berücksichtigt. Der gesamte Ladevorgang dauert insgesamt 220 min.

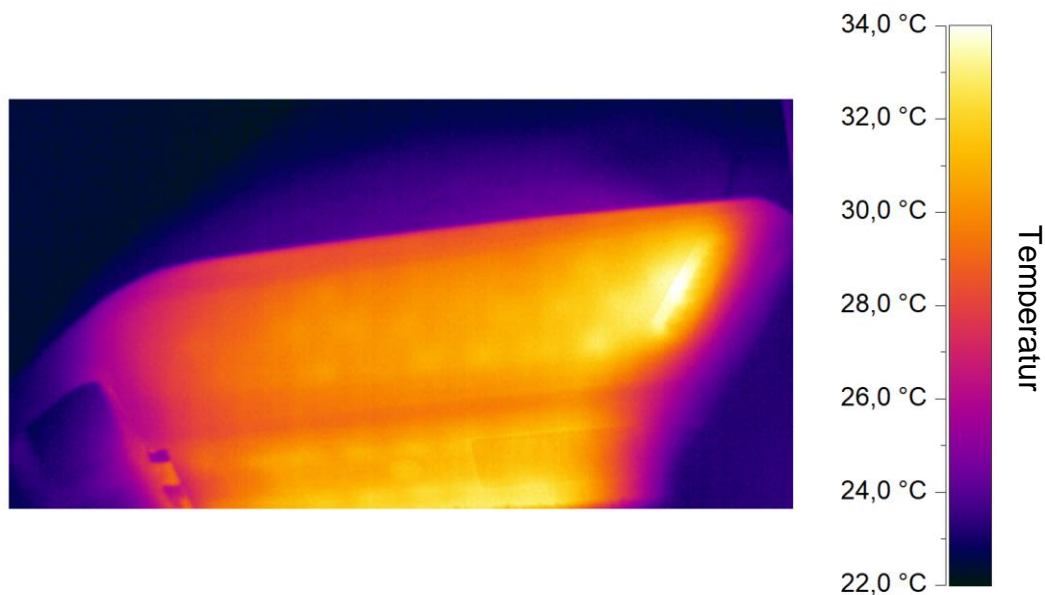


Abbildung 8.2: Temperaturverteilung der Außenschale des Akkupacks beim Laden mit $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$

Beim Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 6 \text{ A}$ ist der Ladevorgang nach 171 min beendet. Beim dritten Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 7 \text{ A}$ trennt die integrierte Schutzschaltung nach wenigen Sekunden den Akku von der Ladespannung. Durch die sukzessive Reduzierung des Ladestroms um 0,1 A findet ein durchgehender Ladevorgang bei $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$ statt. Eine Versuchsdurchführung nach dem geplanten Versuchsprotokoll in Tabelle 8.2 ist daher nicht möglich. Das Protokoll wird angepasst, sodass die dritte und letzte Messung mit $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$ durchgeführt wird.

8.3 Beschreibung der Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Lade- und Entladeversuche visualisiert und beschrieben.

8.3.1 Ergebnisse des Ladeversuchs mit 4 A Ladestrom

Der Ladevorgang dauert insgesamt 220 min. Nach 135 min findet der Übergang von der CC-Phase in die CV-Phase bei einer Spannung von 41,73 V statt. Die Dauer der CV-Phase beträgt 85 min. Der Ladevorgang endet bei einer Ladeschlussspannung von 42,04 V und einem Ladeschlussstrom von 0,36 A. Mit zunehmender Akkuspannung steigt die Außentemperatur des Akkus. Die maximale Temperatur von 29,6 °C wird nach 160,13 min gemessen. Zum Ende des Ladevorgangs beträgt die Temperatur 28,08 °C.

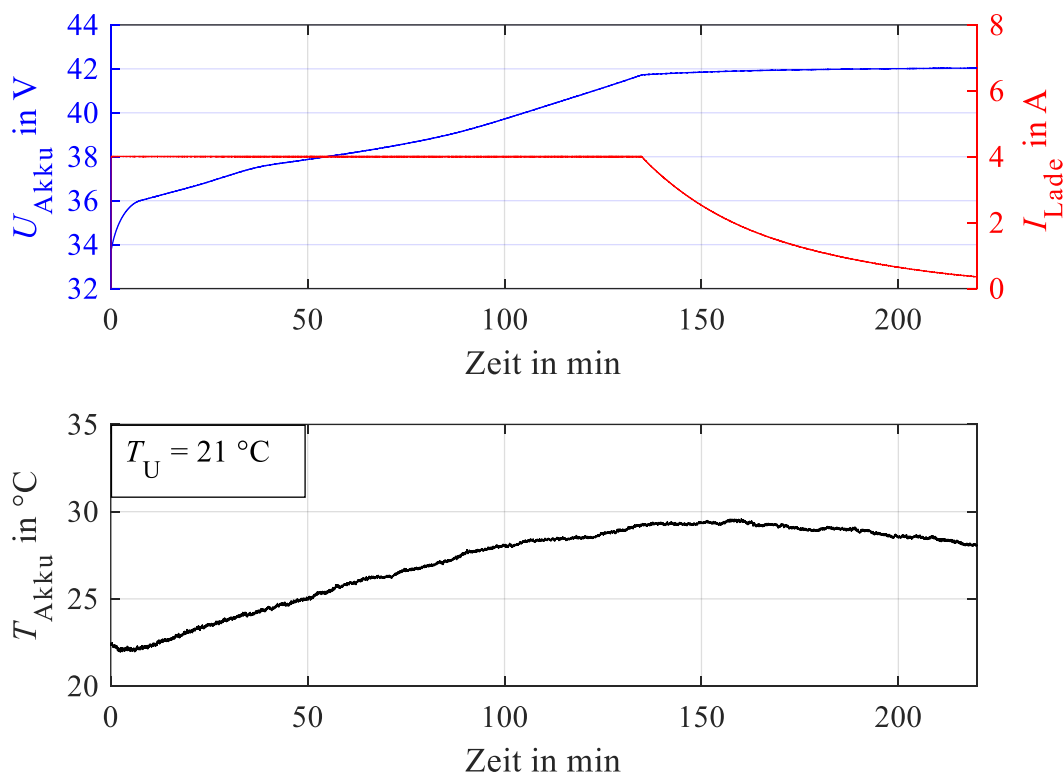


Abbildung 8.3: U_{Akku} und I_{Lade} (oben) und T_{Akku} (unten) über der Zeit für den Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 4\text{ A}$

8.3.2 Ergebnisse des Ladeversuchs mit 6 A Ladestrom

Der Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 6 \text{ A}$ benötigt ca. 173 min und ist 47 min schneller als der Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$. Der Übergang von der CC- in die CV-Phase findet nach 76,83 min bei einer Spannung von 41,5 V statt. Die CV-Phase endet nach 96,37 min bei einer Ladeschlussspannung von 42,02 V und einem Ladeschlussstrom von 0,35 A. Wie im vorangegangenen Versuch steigt die Außentemperatur des Akkus mit zunehmender Spannung. Die maximale Temperatur von 32,77 °C wird nach 98,77 min erreicht. Zum Ende des Ladevorganges sinkt die Temperatur auf 29,09 °C.

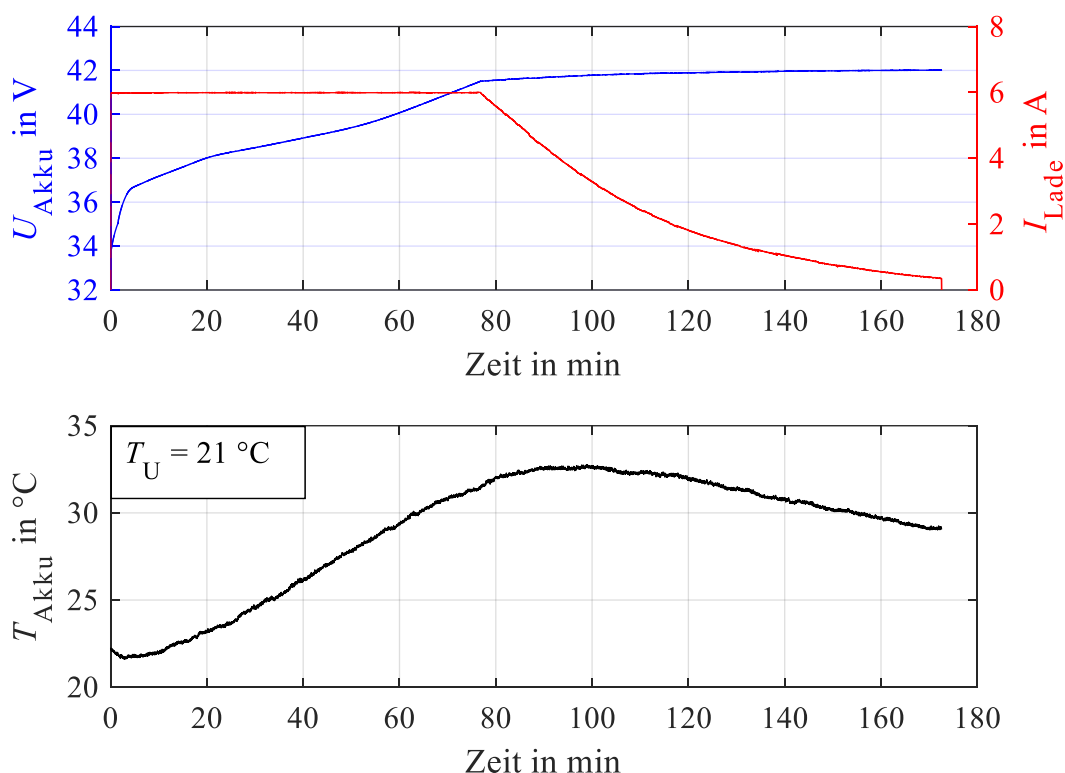


Abbildung 8.4: U_{Akku} und I_{Lade} (oben) und T_{Akku} (unten) über der Zeit für den Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 6 \text{ A}$

8.3.3 Ergebnisse des Ladeversuchs mit 6,4 A Ladestrom

Bei der letzten Messung dauert der gesamte Ladevorgang 162,35 min und benötigt somit annähernd 60 min weniger als der Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$. Nach 71,55 min startet die CV-Phase bei einer Spannung von 41,40 V. Die CV-Phase hält 92,70 min an. Der Ladevorgang endet bei einer Ladeschlussspannung von 42,00 V und einem Ladeschluss-

strom von 0,35 A. Analog zu den vorangegangenen Versuchen steigt die Außentemperatur des Akkus mit zunehmender Spannung. Die maximale Außentemperatur von 33,08 °C wird nach 94,02 min erreicht. Zum Ende des Ladevorgangs sinkt die Temperatur auf 30,98 °C.

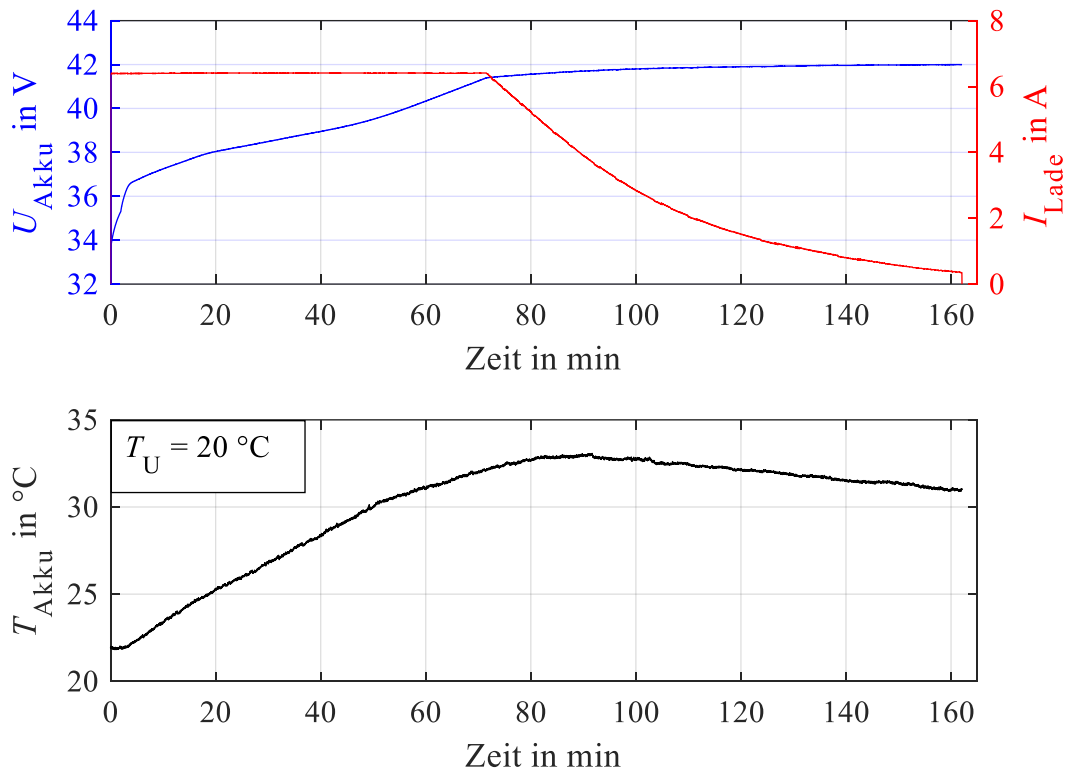


Abbildung 8.5: U_{Akku} und I_{Lade} (oben) und T_{Akku} (unten) über der Zeit für den Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 6,4\text{ A}$

8.3.4 Ergebnisse der Entladeversuche

Zur Bestimmung der Entladeenergie wird der Akku mit dem Prüfstand für Pedelec-Motoren verbunden. Der Strom- und Spannungsverlauf für den Entladevorgang nach dem Ladeversuch für $I_{\text{Lade}} = 4\text{ A}$ ist in Abbildung 8.6 dargestellt. Am Prüfstand wird eine realitätsnahe Fahrweise abgebildet. Da der Fahrer in der Realität das Moment an der Pedalkurbel nicht konstant, sondern sinusförmig aufbringt, unterstützt der Pedelec-Motor analog zum Fahrermoment. In der Folge schwankt der Strom um 0,2 A–0,3 A, woraus sich der abgebildete Stromverlauf ergibt.

Der Akku ist nach ca. 284 min bei einer Entladeschlussspannung von 31,74 V entladen. Der Akkustrom- und der Akkuspannungsverlauf für die anderen beiden Entladeversuche verlaufen analog zu dem beschriebenen Verlauf und sind im Anhang C dargestellt. Der Entladevorgang nach $I_{\text{Lade}} = 6 \text{ A}$ dauert ca. 280 min und endet bei einer Spannung von 31,74 V, der Entladevorgang nach $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$ dauert ca. 276 min und endet bei einer Spannung von 31,69 V.

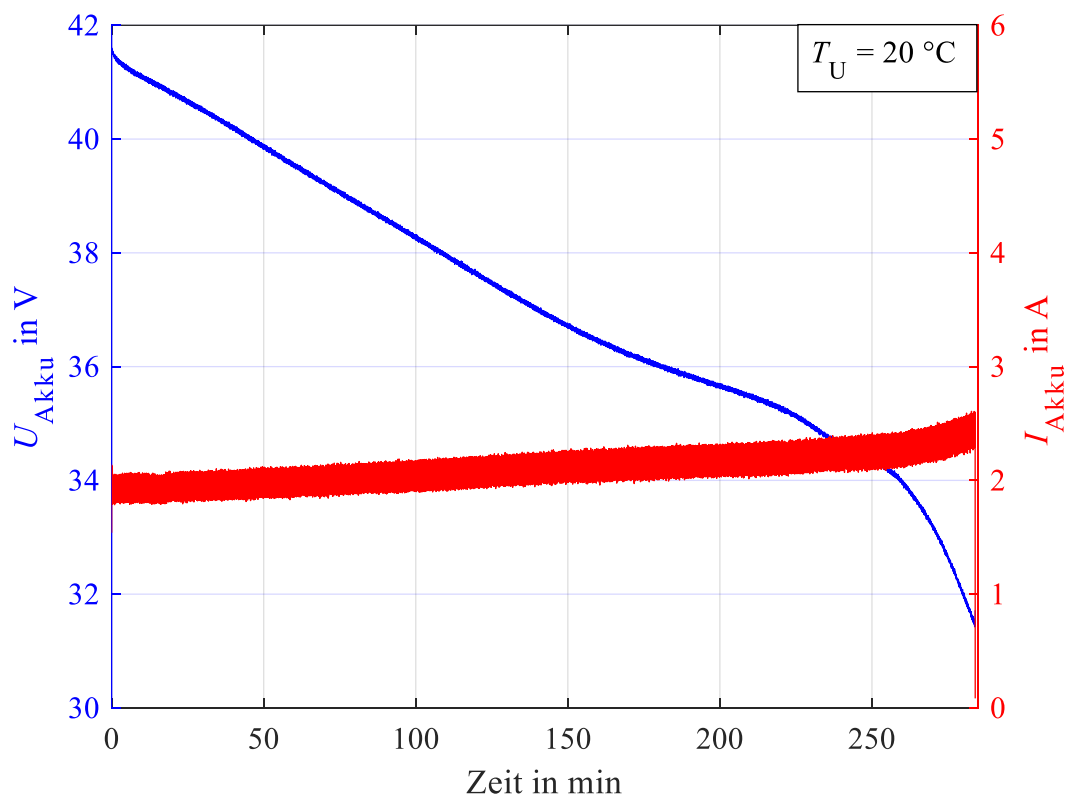


Abbildung 8.6: I_{Akku} und U_{Akku} über der Zeit für den Entladevorgang des *PowerPacks* nach dem Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$

8.4 Auswertung der Versuchsergebnisse

Für die Auswertung der Versuchsergebnisse wird zunächst die Fehlerbetrachtung der aufgenommenen Messwerte durchgeführt. In Tabelle 8.3 sind alle im Versuch verwendeten Messgeräte inklusive ihrer Messfehler aufgelistet.

Tabelle 8.3: Übersicht der Messfehler zu den jeweiligen Messgrößen

Messgröße	Gerät	Messfehler
Spannung	Präzisions-Tischmultimeter UNI-T UT803	$\pm(0,3\%+2 \text{ Digits})$ [117]
Strom		$\pm(1,2\%+3 \text{ Digits})$ [117]
Temperatur	Wärmebildkamera DIAS Pyroview 640L	$\pm 2 \%$ von °C – Wert [118]

Der Messfehler beim Präzisions-Tischmultimeter setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Die prozentuale Abweichung bezieht sich auf den gemessenen Wert, während der Digit-Wert von der Auflösung des Multimeters abhängig ist. Für den Ladeversuch wird der Messbereich für die Spannung auf 60,00 V eingestellt. Daraus ergibt sich durch die Auflösung des Multimeters ein Messfehler von $\pm 0,02 \text{ V}$ ($\cong 2 \text{ Digits}$) und insgesamt für den absoluten Messfehler der Spannung F_U :

$$F_U(U) = \pm(U_{\text{mess}} * 0,003 + 0,02 \text{ V}) \quad (8.1)$$

Der relative Messfehler für die Spannung f_U lässt sich wie folgt berechnen:

$$f_U(U_{\text{mess}}) = \pm \frac{F_U(U_{\text{mess}})}{U_{\text{mess}}} \quad (8.2)$$

Für $U_{\text{mess}} = 30 \text{ V}$ beträgt der absolute Messfehler $F_U(30 \text{ V}) = \pm 0,11 \text{ V}$ und der relative Messfehler $f_U(30 \text{ V}) = 0,37 \%$. Analog zu Gl. (8.1) und Gl. (8.2) lässt sich der absolute bzw. relative Messfehler für den gemessenen Ladestrom ermitteln. Für die Messungen des Stroms wird die Auflösung des Multimeters auf 10 A gestellt, sodass ein Messfehler von 1,2 % bezogen auf den Messwert und 0,03 A aufgrund der Auflösung (Digit-Wert) entsteht. Bei einem gemessenen Ladestrom von 5 A beträgt der absolute Messfehler $F_I(5 \text{ A}) = \pm 0,09 \text{ A}$ und der relative Messfehler $f_I(I = 5 \text{ A}) = 1,8 \%$.

Für den späteren Verlauf der Untersuchung ist das Ladeverhalten bei unterschiedlichen Ladeströmen entscheidend. Anhand des Strom- und Spannungsverlaufs lässt sich die Ladeenergie für die drei Versuche ermitteln:

$$E_{\text{Lade}}(t) = \int_0^t P_{\text{Lade}} dt = \int_0^t U_{\text{Akku}}(t) \cdot I_{\text{Lade}}(t) dt \quad (8.3)$$

Hierbei müssen die Fehler für den Strom und die Spannung mittels Fehlerfortpflanzung berücksichtigt werden. Mit der Formel für die Gauss'sche Fehlerfortpflanzung

$$F_E = \sqrt{\left(\frac{\partial E_{\text{Lade}}}{\partial U} \cdot F_U\right)^2 + \left(\frac{\partial E_{\text{Lade}}}{\partial I} \cdot F_I\right)^2} \quad (8.4)$$

kann die Berechnung des Fehlers für die Ladeenergie erfolgen. In Abhängigkeit vom Ladestrom ergeben sich dabei folgende Ergebnisse:

$$E_{\text{Lade}}(I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}) = 434,94 \text{ Wh} \pm 9,72 \text{ Wh} \quad (8.5)$$

$$E_{\text{Lade}}(I_{\text{Lade}} = 6 \text{ A}) = 440,14 \text{ Wh} \pm 10,21 \text{ Wh} \quad (8.6)$$

$$E_{\text{Lade}}(I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}) = 438,76 \text{ Wh} \pm 10,23 \text{ Wh} \quad (8.7)$$

Die Ladenergie in Abbildung 8.7 ist nahezu konstant und wird daher nicht von I_{Lade} beeinflusst. Die höhere Temperatur resultiert aus dem Stromwärmeverlust am Innenwiderstand der Akkuzellen, die mit steigendem Ladestrom zunimmt. Durch den Temperaturanstieg ist bei $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$ mit einem schnelleren Alterungsprozess zu rechnen. Eine genaue Bestimmung des Alterungsverhaltens lässt sich mit einem Alterungsversuch bzw. einem Zyklentest durchführen.

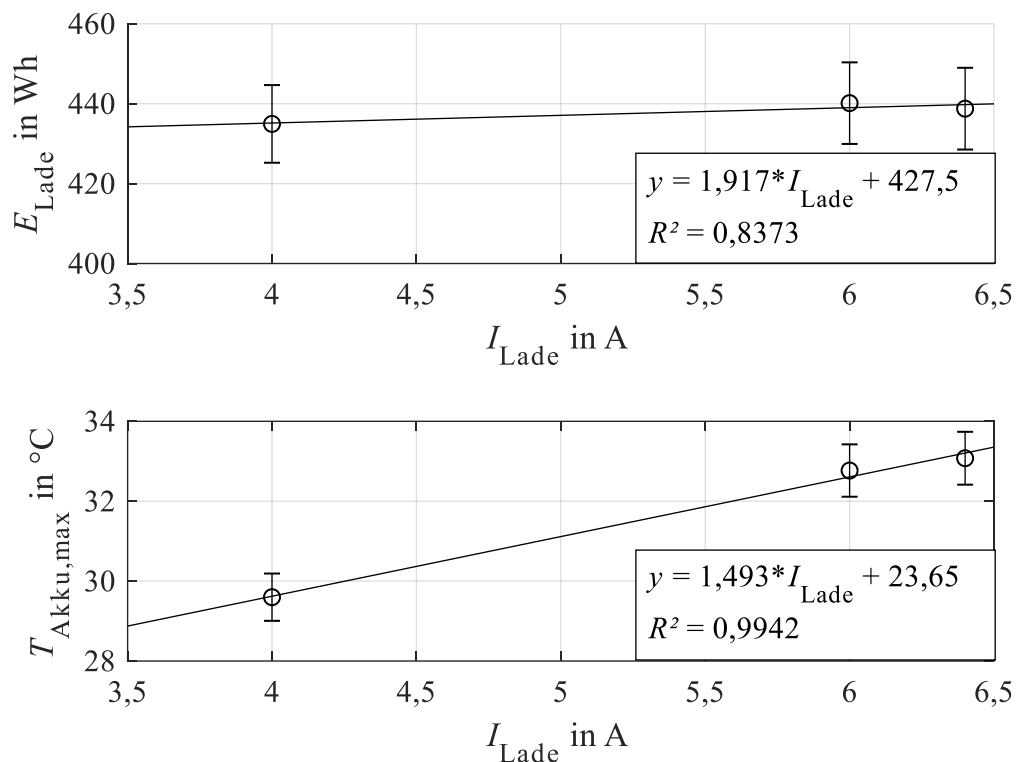


Abbildung 8.7: E_{Lade} (oben) und $T_{Akku,max}$ (unten) in Abhängigkeit von I_{Lade}

Allerdings entspricht die Ladeenergie nicht der nutzbaren Energie, da Energieverluste ebenfalls beim Ladevorgang auftreten. Aus diesem Grund wird die nutzbare Energie über die durchgeführten Entladevorgänge bestimmt. Das Ladeverhalten wird anhand der SOC-Verläufe in Abbildung 8.8 dargestellt, um dieses im Modell berücksichtigen zu können. Bei $I_{Lade} = 4$ A wird die CV-Phase nach 135 min bei einem SOC von 79,75 % erreicht. Für die restlichen 20,25 % werden weitere 85 min benötigt. Die Dauer der CC-Phase nimmt mit steigendem Ladestrom ab. Dies hängt zum einen direkt mit dem erhöhten Ladestrom zusammen, da die gleiche Energie in einer kürzeren Zeit aufgebracht werden kann.

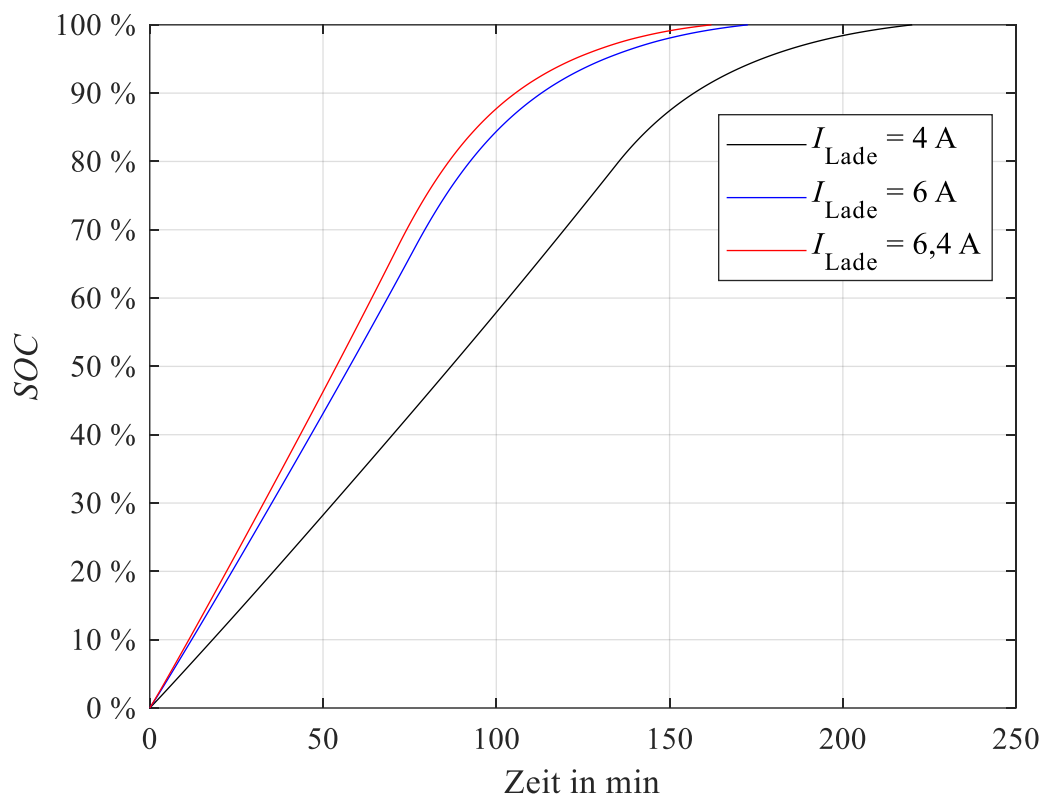


Abbildung 8.8: Verlauf des SOC beim Ladevorgang mit unterschiedlichen I_{Lade}

Beim Vergleich der drei Entladevorgänge sind nach Tabelle 8.4 keine signifikanten Abweichungen untereinander zu erkennen. Zwischen dem kürzesten und längsten Entladevorgang liegt eine Abweichung von 2,79 %.

Tabelle 8.4: Ergebnisse der Entladevorgänge

Entladen nach I_{Lade}	Entladedauer	Entladeschlussspannung	Entladeenergie
4 A	283,97 min	31,72 V	369,43 Wh
6 A	280,12 min	31,74 V	372,31 Wh
6,4 A	276,26 min	31,69 V	368,53 Wh

Die nutzbare Energie liegt im Durchschnitt bei 370,09 Wh und somit 7,48 % unter den vom Hersteller des *PowerPacks* angegebenen 400 Wh. Der Ladestrom hat keinen Einfluss auf die Entladeenergie. Laut Herstellerangaben der Einzelzellen liegt die Nennspannung bei 3,62 V und die Entladekapazität bei einer Entladerate von 0,2 C bei 2,75 Ah.

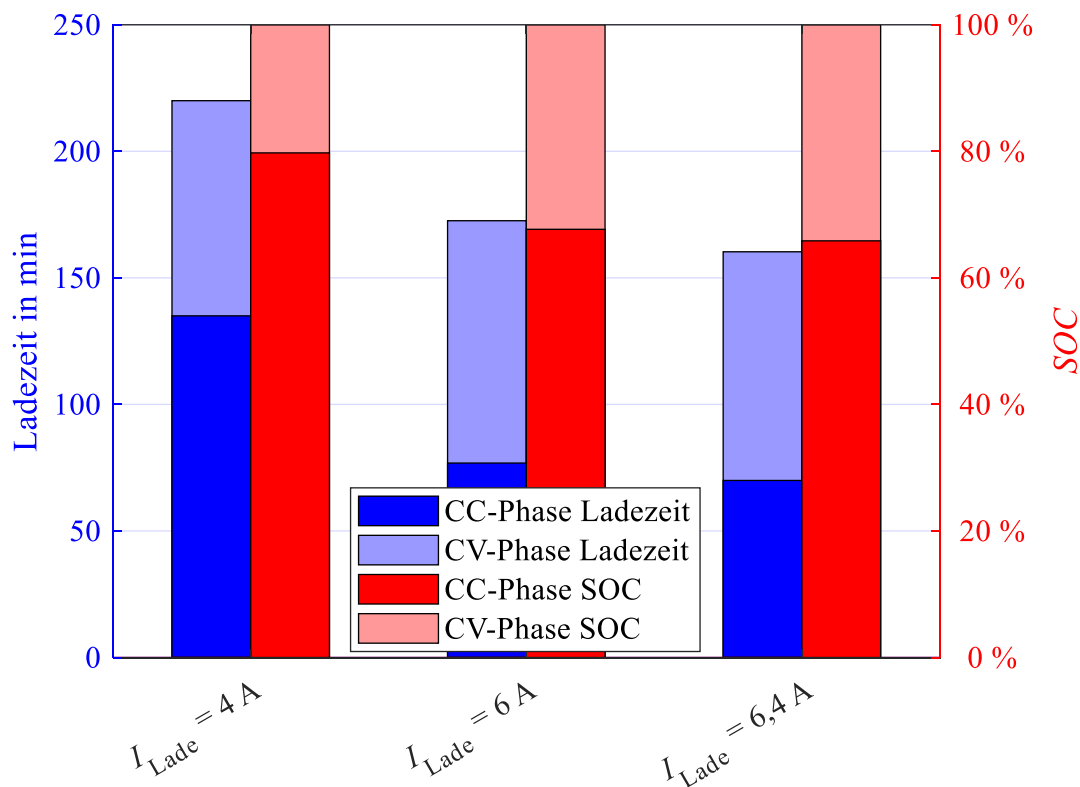


Abbildung 8.9: Ladezeit- und SOC-Aufteilung in der CC- und CV-Phase für unterschiedliche I_{Lade}

Übertragen auf die vier Reihen à zehn Zellen des *PowerPacks* ergeben sich demnach 398,2 Wh, was einer Abweichung von 7,06 % im Vergleich zu der gemessenen nutzbaren Energie entspricht. Die Werte sind nur bedingt vergleichbar, da der Entladevorgang des *PowerPacks* nicht wie die Zellen mit einer konstanten Laderate von 0,2 C erfolgt. Ausschlaggebend für die Abweichung ist die Entladeschlussspannung des *PowerPacks*, die bei den Versuchen im Durchschnitt bei 31,72 V lag. Bei den Zellen wird diese mit 2,5 V angegeben (25 V in Bezug auf das *PowerPack*).

Für die Simulation werden die aufgezeichneten Ladekurven als SOC in Abhängigkeit von der Zeit hinterlegt. Ein SOC von 100 % entspricht in der Simulation 370 Wh. Aufgrund von Alterungsprozessen (zyklisch und kalendarisch) reduziert sich der Energieinhalt des Akkus mit der Nutzungsdauer. Diese Reduzierung wird allerdings im weiteren Verlauf nicht betrachtet.

8.5 Ergänzung der Untersuchungen um eine Ladekurve mit 1 C Laderate

Mit $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$ liegt die maximal mögliche Laderate beim *PowerPack* bei 0,56 C. Im Vergleich zur Laderate von 0,35 C, die mit dem Standardladestrom von 4 A erreicht wird, liegt hier eine Steigerung von 60 % vor. In Kapitel 3.3 wird als maximale Laderate im Hinblick auf die Alterung 1 C festgelegt. Für die weitere Untersuchung sollen Auswirkungen einer solchen Laderate mit einbezogen werden. Für das vorhandene *PowerPack* ist dies wegen des vorhandenen BMS praktisch nicht möglich. Daher dient das Ladeverhalten mit 1 C lediglich als theoretische Vergleichsgröße. Der Verlauf des SOC für diese Laderate wird anhand der Ladekurve von einer mit der im *PowerPack* verwendeten vergleichbaren Zelle abgeschätzt [119]. Bei der betrachteten Zelle handelt es sich um eine 18650 Rundzelle der Firma LG Electronics (LG INR 18650 MG1) mit einer Nennkapazität von 2.850 mAh. Anhand des Strom- und Spannungsverlaufs der Zelle mit $I_{\text{Lade}} = 2,85 \text{ A}$ resultiert der dargestellte SOC-Verlauf in Abbildung 8.10.

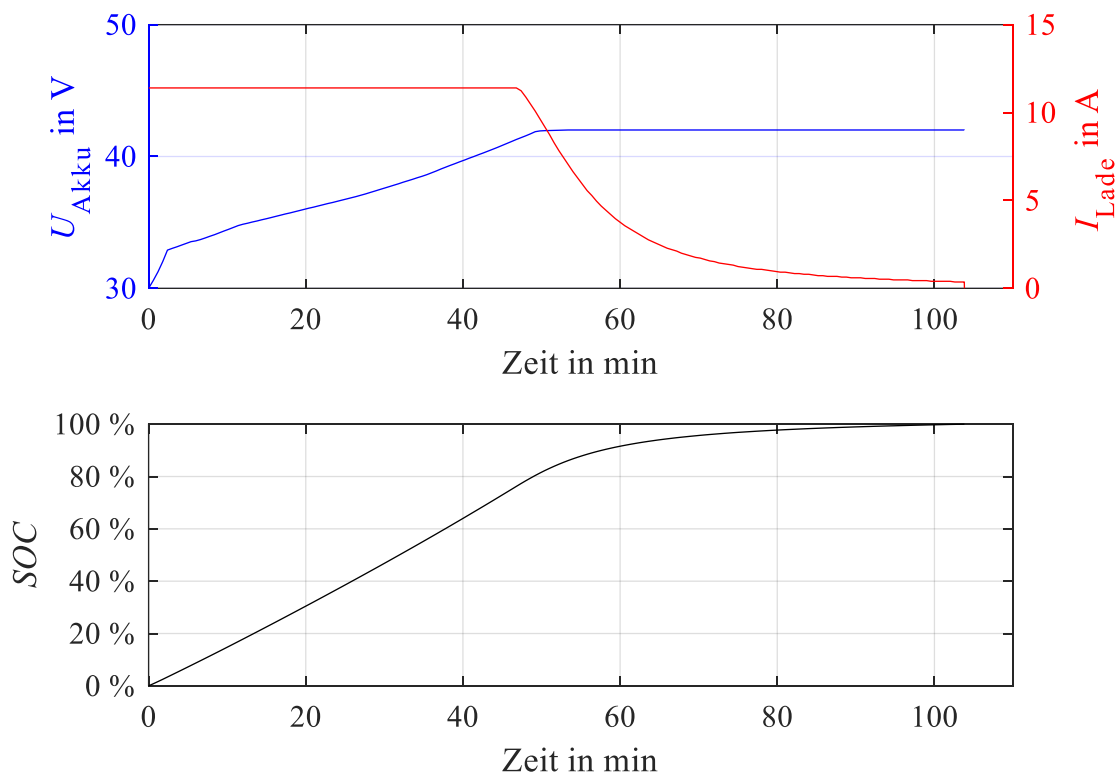


Abbildung 8.10: Übertragener Verlauf von U_{Akku} und I_{Lade} (oben) und des SOC (unten) im CCCV-Verfahren mit $I_{\text{Lade}} = 11,4 \text{ A}$ auf Basis von [119]

Mit einer Ladedauer von 103,2 min ist der Ladevorgang um ca. 60 min schneller als der Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 6,4$ A. Die CV-Phase beginnt nach 46,8 min bei $SOC = 76,23$ %. Der Verlauf des SOC wird in die Simulation übertragen. Durch die Übertragung des Ladeverhaltens auf den Akku beträgt $I_{\text{Lade}} = 11,4$ A. Da das Ladeverhalten von einer Zelle übertragen worden ist, wird an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass die Berücksichtigung dieser Ladekurve im weiteren Verlauf ausschließlich zur Abschätzung der Auswirkungen eines erhöhten Ladestroms auf den Servicegrad dient.

9 Einfluss der ermittelten Ladekurven auf den Servicegrad im Pedelec-Vermietsystem

Die erzielten Ergebnisse aus den Lade- und Entladeversuchen werden in das Simulationsmodell integriert, um den Einfluss eines Ladestroms > 4 A auf den Servicegrad zu untersuchen. Abschließend werden Schlussfolgerungen im Hinblick auf den Zeitpunkt und die Notwendigkeit eines erhöhten Ladestroms gezogen.

9.1 Minimal notwendiger SOC in Abhängigkeit vom Ladestrom

Bevor die Auswirkungen des erhöhten Ladestroms auf den Servicegrad untersucht werden, muss überprüft werden, ob SOC_{\min} für die jeweiligen Ladeströme angepasst werden muss. Dazu wird analog zu Kapitel 7.1 der durchschnittliche Servicegrad von $K_{\text{pot}} = 0 \dots 250$ für verschiedene SOC_{\min} berechnet. In Abbildung 9.1 ist das ermittelte Maximum für SOC_{\min} in Abhängigkeit von n_{Pedelec} dargestellt.

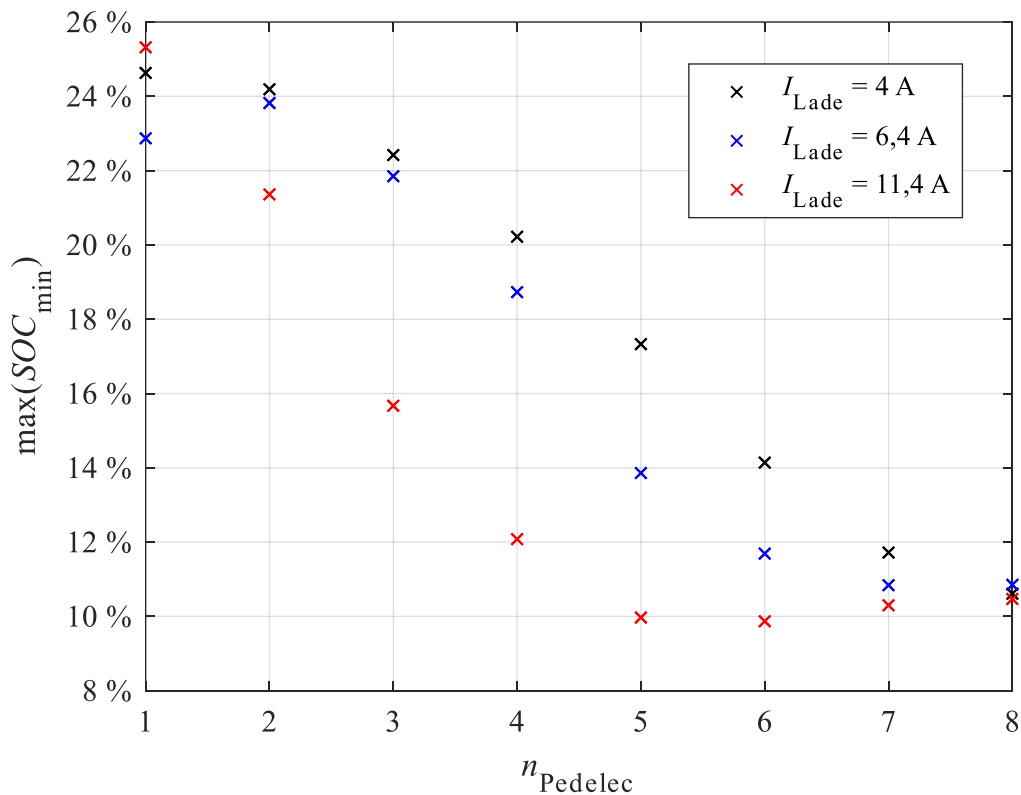


Abbildung 9.1: Lokales Maximum der Regressionfunktion für SOC_{\min} in Abhängigkeit von n_{Pedelec} für verschiedene Ladeströme

Die Parameterwerte sowie das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion R^2 für unterschiedliche n_{Pedelec} ist im Anhang in Tabelle B.1 - Tabelle B.3 zu finden. Wie bei $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ nimmt SOC_{min} durch die Erhöhung des Ladestroms mit steigender Anzahl der Pedelecs ab, da mehr Gesamtenergie zu Beginn der Betrachtung im System vorhanden ist. Zusätzlich bewirkt die Erhöhung des Ladestroms, dass SOC_{min} im Vergleich zu $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ bei gleichbleibendem n_{Pedelec} reduziert werden kann. In Abbildung 9.2 wird dazu die Häufigkeit von $K_{\text{unzufrieden}}$ für $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ und $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$ verglichen. Mit Zunahme des Ladestroms sinkt K_{Akku} während gleichzeitig K_{Pedelec} steigt. Da der Anteil, um den sich K_{Akku} reduziert größer ist als der Anteil, um den sich K_{Pedelec} erhöht, reduziert sich der Wert für das lokale Maximum von SOC_{min} .

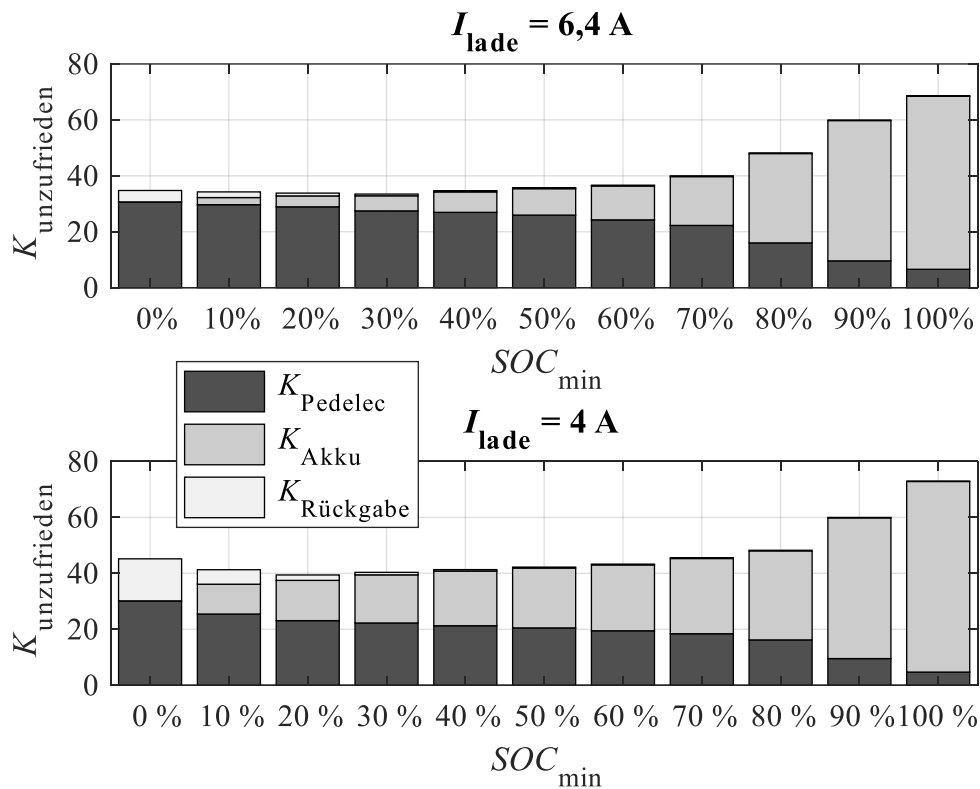


Abbildung 9.2: Häufigkeit von $K_{\text{unzufrieden}}$ und den Ursachen in Abhängigkeit von SOC_{min} für $n_{\text{Pedelec}} = 2$, $K_{\text{pot}} = 100$ und $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ (oben); Häufigkeit von $K_{\text{unzufrieden}}$ und den Ursache in Abhängigkeit von SOC_{min} für $n_{\text{Pedelec}} = 2$, $K_{\text{pot}} = 100$ und $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$ (unten)

9.2 Servicegradvergleich mit 6,4 A Ladestrom

Die ermittelte Ladekurve für den Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$ wird in die Simulation integriert, um die Auswirkungen auf SG_{ges} zu identifizieren. Für die Simulation werden K_{pot} und n_{Pedelec} variiert. Das Ergebnis der Simulation in Abbildung 9.3 für $n_{\text{Pedelec}} = 4$ zeigt, dass ein höherer Ladestrom in eine Steigerung des Servicegrades resultiert. Bis $K_{\text{pot}} = 100$ fällt die Steigerung mit ca. 0,5 % marginal aus, anschließend erhöht sie sich bei $K_{\text{pot}} = 250$ auf fast 20 %. Allerdings kann durch den erhöhten Ladestrom nicht verhindert werden, dass der Servicegrad mit steigender Anzahl der potentiellen Kunden abnimmt. Lediglich die Abnahmerate kann dadurch reduziert werden.

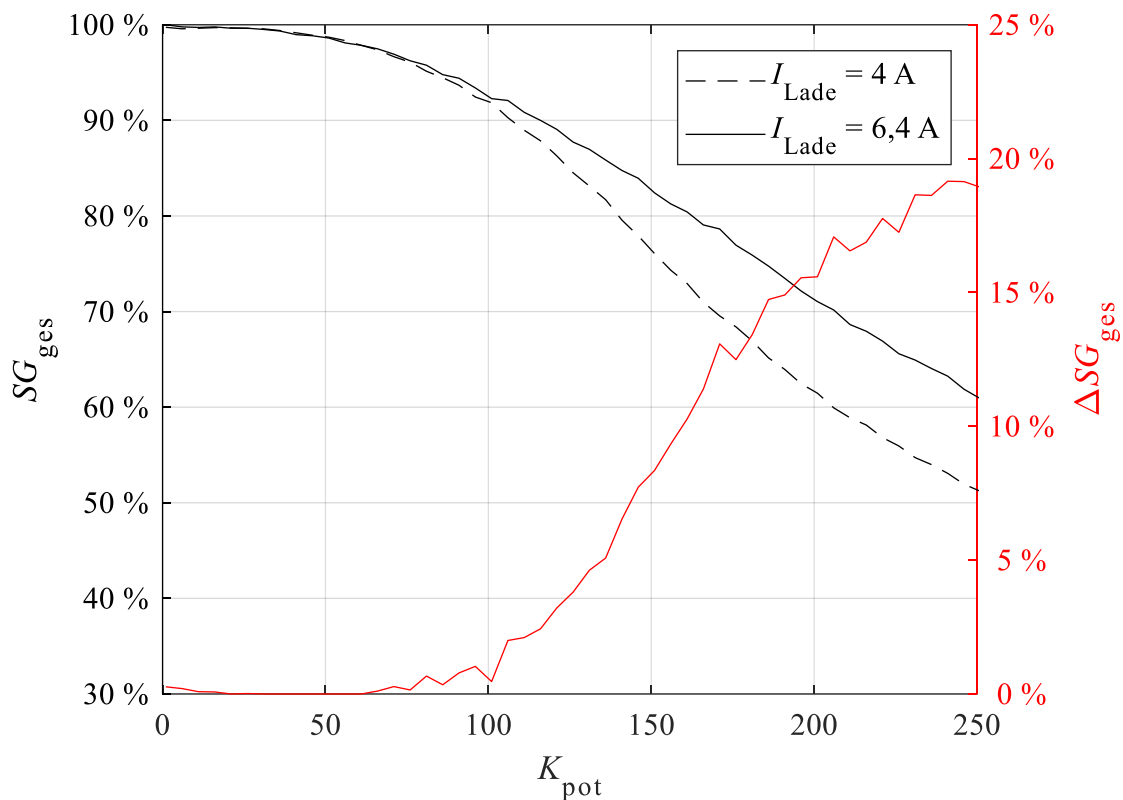


Abbildung 9.3: SG_{ges} für $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ und $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$ und das daraus resultierende ΔSG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{\text{Pedelec}} = 4$

Abbildung 9.4 zeigt die Steigerung der Teilservicegrade von $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$ im Vergleich zu $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$. Bei $K_{\text{pot}} = 200$ steigt SG_{Pedelec} um ca. 27 %. In der Folge werden mehr Kunden abgewiesen, weil keine Pedelecs an der Station vorhanden sind. SG_{Pedelec} sinkt in diesem Fall um bis zu 11 %, wodurch die Servicegradsteigerung von insgesamt 16 % entsteht.

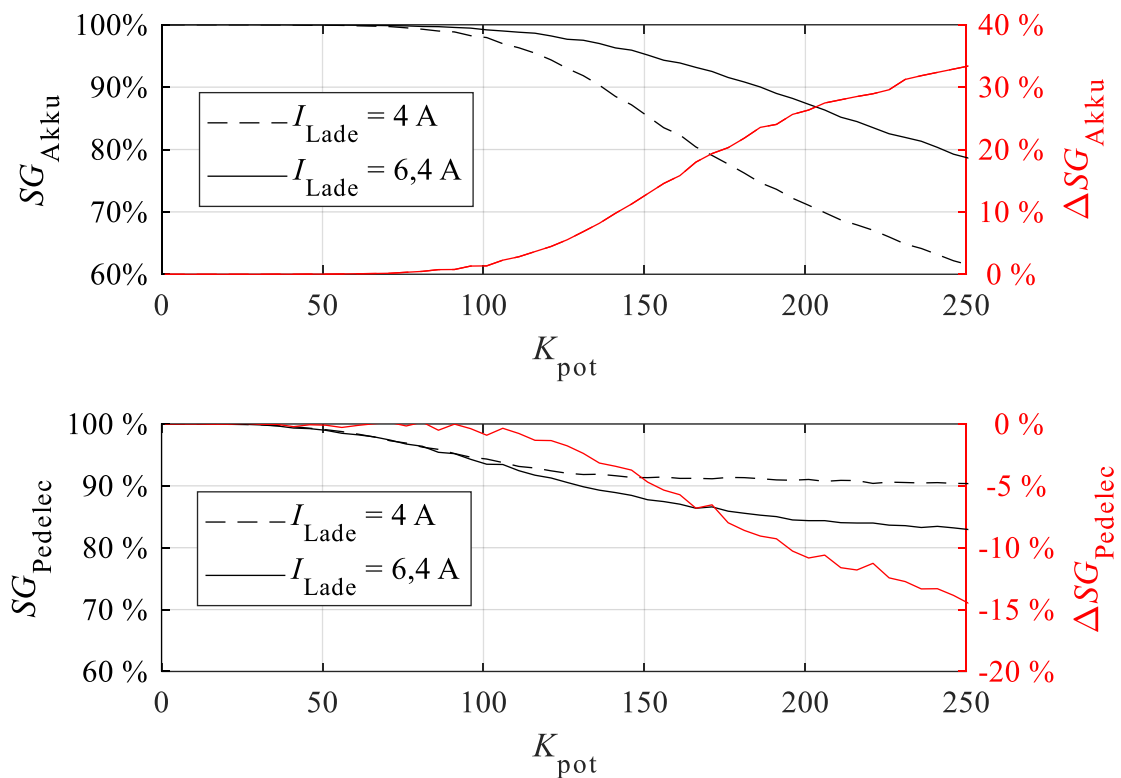


Abbildung 9.4: Vergleich von SG_{Akku} und SG_{Pedelec} für $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ und $I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$ und die daraus resultierende Differenz in Abhängigkeit von K_{pot}

In Abbildung 9.5 ist die resultierende Effizienzsteigerung durch die Änderung des Ladestroms I_{Lade} von 4 A auf 6,4 A resultiert gezeigt. Das bedeutet, dass mit jedem einzelnen Pedelec mehr Anfragen durchgeführt werden können. Während die Effizienzsteigerung in Kapitel 7.2 durch die Erhöhung von n_{Pedelec} erfolgte, ist sie in diesem Fall lediglich vom Ladestrom abhängig. Für eine geringe Anzahl potentieller Kunden pro Pedelec ist die Steigerung nicht signifikant, da in diesen Fällen mit $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ bereits ein $\eta_P > 99 \%$ erreicht wird. Der Zuwachs von η_P nimmt bis $\dot{K}_{\text{pot}} = 20$ mit steigendem n_{Pedelec} ab.

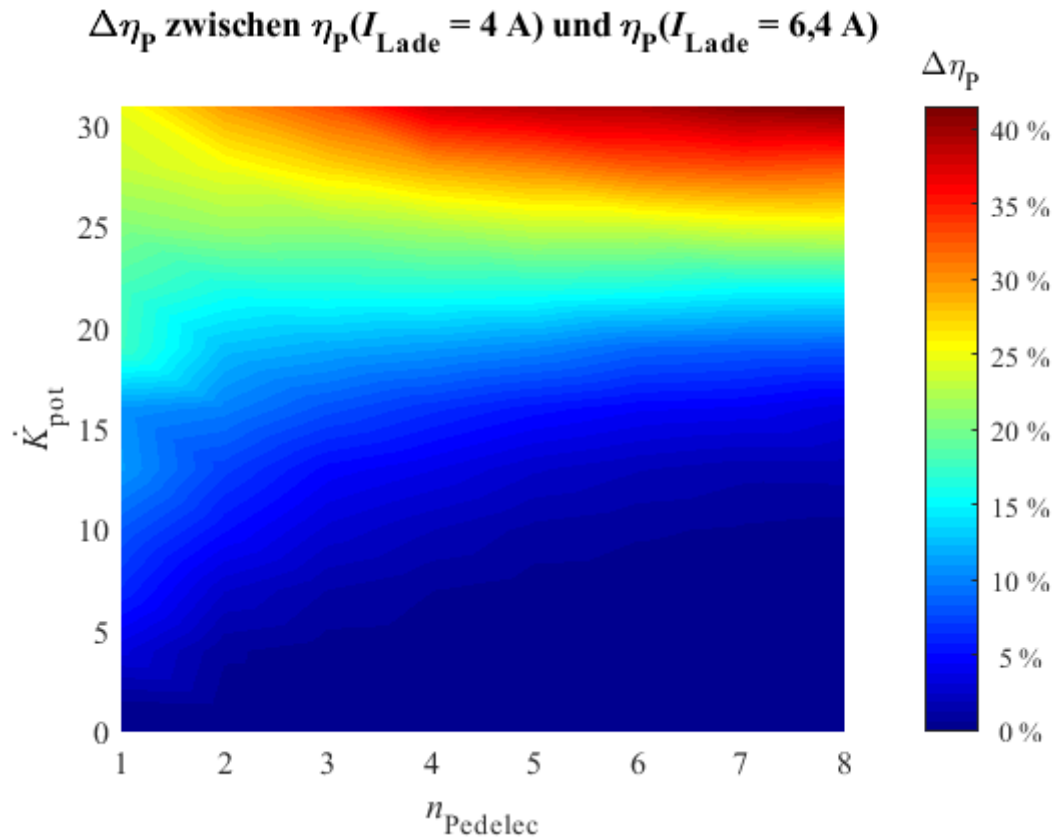


Abbildung 9.5: Differenz der Effizienz zwischen $\eta_p(I_{Lade} = 4 \text{ A})$ und $\eta_p(I_{Lade} = 6,4 \text{ A})$ in Abhängigkeit von \dot{K}_{pot} und $n_{Pedelec}$

Bei $\dot{K}_{pot} > 25$ nimmt die Effizienzsteigerung zu. Die Ursache hierfür ist der Verlauf der beiden Teilservicegrade. Während für wenig Anfragen $SG_{Pedelec}$ den Servicegrad bestimmt, steigt der Einfluss des SG_{Akk} mit zunehmenden Anfragen. In der Folge kann der Servicegrad für viele potentielle Kunden pro Pedelec mit der Erhöhung des Ladestroms gesteigert werden, wodurch die η_p zunimmt. Wie schon in Kapitel 7.2 erläutert, ist die Zeit zwischen den Mietvorgängen entscheidend für den Effekt der Effizienzsteigerung. Da die Zeit zwischen den Kundenanfragen bezogen auf ein Pedelec mit steigender Anzahl an Pedelecs pro Station zunimmt, steht noch mehr Ladezeit zur Verfügung, in der die Pedelecs den SOC_{min} erreichen können.

9.3 Servicegradvergleich mit 11,4 A Ladestrom

Obwohl der Ladevorgang mit 11,4 A aufgrund der integrierten Schutzschaltung im BMS des *PowerPacks 400* praktisch nicht möglich ist, werden in der Simulation dennoch die

Auswirkungen dieses Ladestroms überprüft. Dazu wird die Ladekurve aus dem Ladeversuch für die Einzelzelle auf das Akkupack übertragen und in das Simulationsmodell integriert.

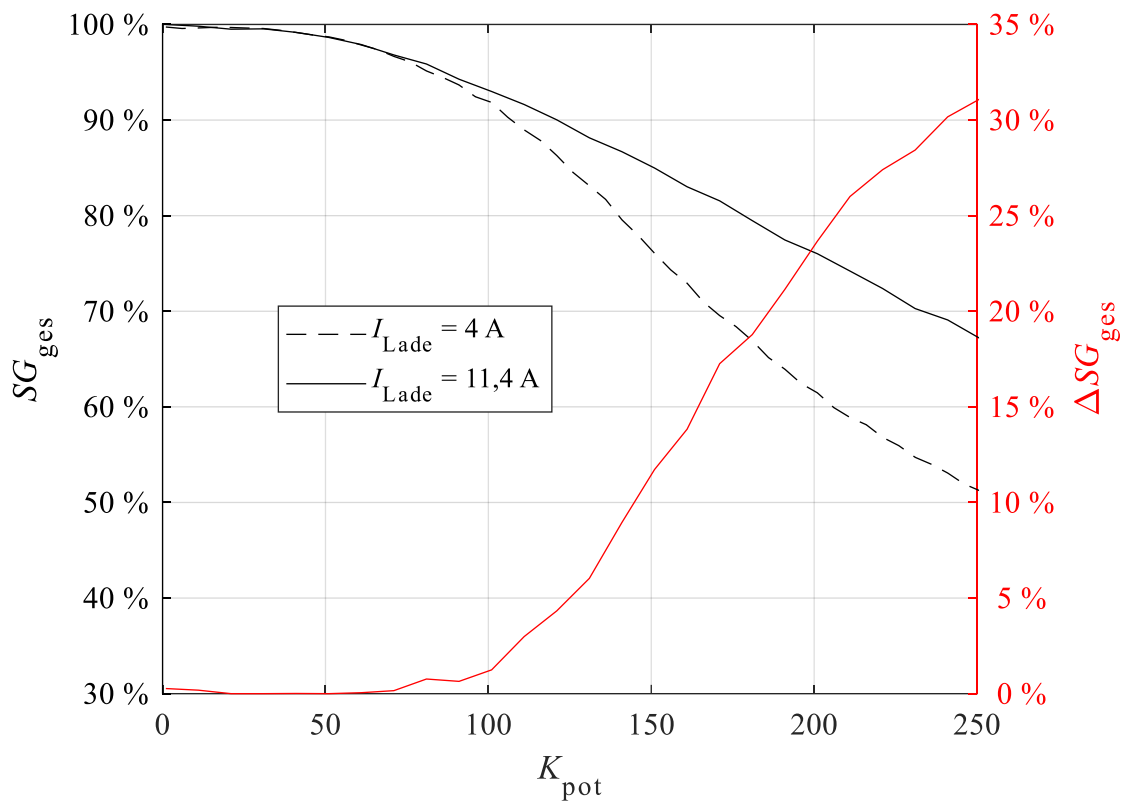


Abbildung 9.6: SG_{ges} für $I_{Lade} = 4\text{ A}$ und $I_{Lade} = 11,4\text{ A}$ und das daraus resultierende ΔSG_{ges} in Abhängigkeit von K_{pot} für $n_{Pedelec} = 4$

ΔSG_{ges} nimmt in Abbildung 9.6 bei $I_{Lade} = 6,4\text{ A}$ für $n_{Pedelec} = 4$ ab $K_{pot} > 100$ deutlich zu. Analog zum vorangegangenen Ladestrom ist die Steigerung von SG_{Akk} Hauptursache für den positiven Effekt. Da SG_{Akk} bei $K_{pot} = 250$ um fast 60 % steigt und gleichzeitig der $SG_{Pedelec}$ um fast 30 % abnimmt, erhöht sich SG_{ges} um mehr als 30 %. Im Hinblick auf η_P in Abbildung 9.7 hat eine weitere Erhöhung des Ladestroms I_{Lade} von 6,4 A auf 11,4 A in diesem Fall keine signifikanten Auswirkungen. Der maximale Zuwachs liegt für $n_{Pedelec} = 1$ und $K_{pot} = 31$ bei ca. 1,8 %. Zur Steigerung der Effizienz ist eine Erhöhung des Ladestroms auf 11,4 A daher nicht sinnvoll, da ein vergleichbares Ergebnis bereits mit einem Ladestrom von 6,4 A erzielt werden kann.

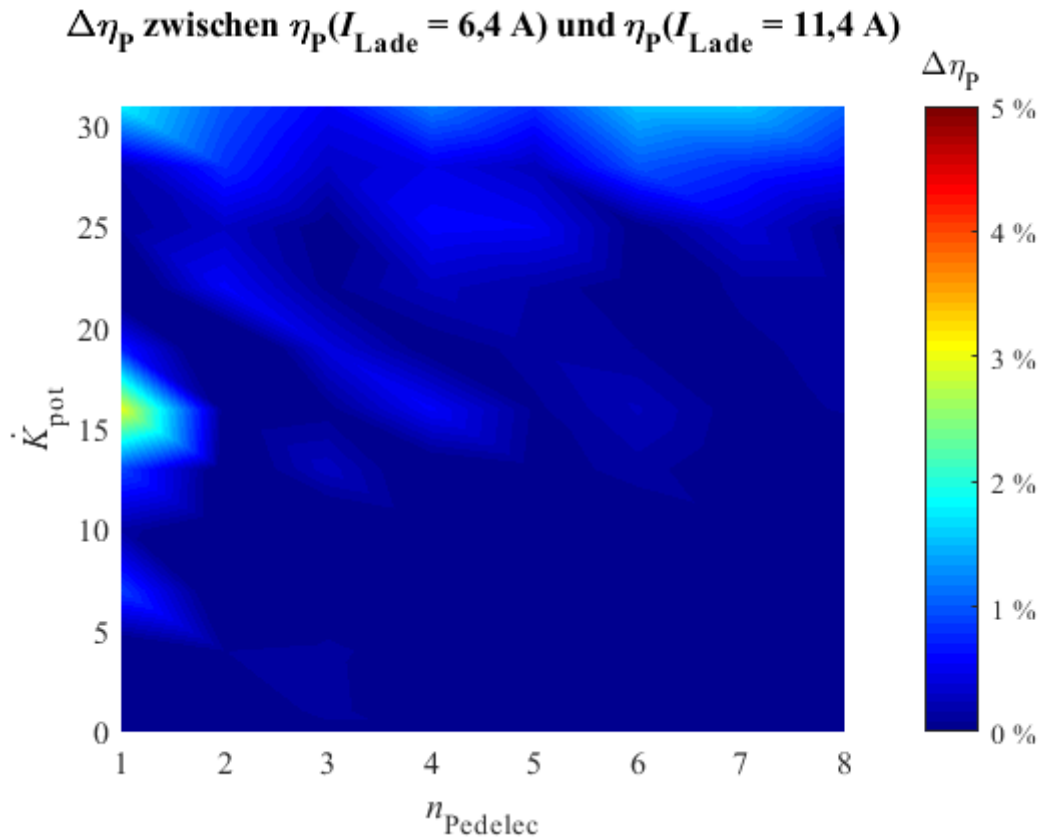


Abbildung 9.7: Differenz der η_P zwischen $\eta_P(I_{Lade} = 6,4 \text{ A})$ und $\eta_P(I_{Lade} = 11,4 \text{ A})$ in Abhängigkeit von \dot{K}_{pot} und n_{Pedelec}

9.4 Einordnung der verwendeten Ladeströme

Wie bereits in Kapitel 7.4 beschrieben, ist eine Erhöhung von SG_{ges} durch die Steigerung des Ladestroms über $SG_{\text{ges}}(I_{Lade} \rightarrow \infty)$ hinaus nicht möglich, da lediglich SG_{Akku} positiv beeinflusst werden kann. Eine Servicegradsteigerung darüber hinaus lässt sich ausschließlich durch die Erhöhung von n_{Pedelec} erzielen. Die Zunahme des Servicegrades für eine definierte Anzahl an Pedelecs und einen festen Wert an potentiellen Kunden verläuft mit zunehmendem Ladestrom degressiv. Das bedeutet, dass durch die Einführung einer Lademöglichkeit mit einem Ladestrom von 4 A bereits ein enormer Zuwachs von SG_{ges} erfolgt (Abbildung 7.9). Darüber hinaus steigt der Aufwand ($\hat{=}$ Erhöhung des Ladestroms), der für eine äquivalente Steigerung betrieben werden muss.

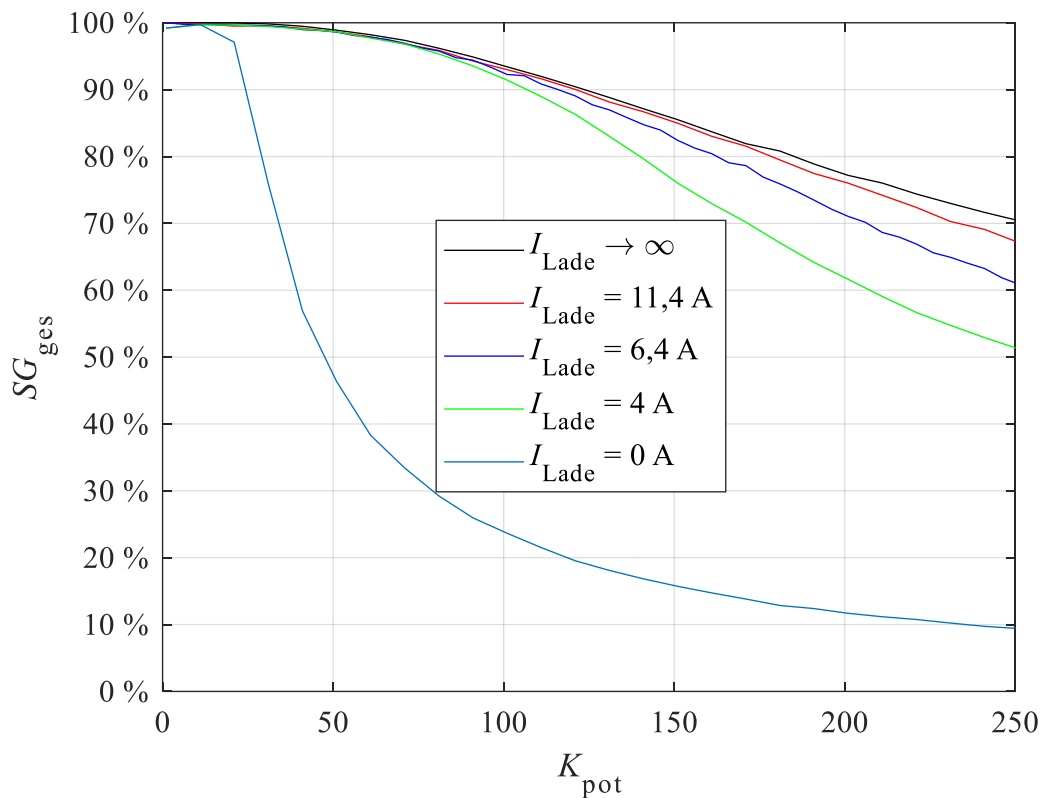


Abbildung 9.8: Servicegradverlauf in Abhängigkeit von K_{pot} für verschiedene Ladeströme bei $n_{\text{Pedelec}} = 4$

In Abbildung 9.9 ist ΔSG_{ges} für den jeweiligen Ladestrom in Bezug auf den $SG_{\text{ges}}(I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A})$ dargestellt. Hieraus wird deutlich, dass die Erhöhung des Ladestroms nur Auswirkungen auf einen bestimmten Bereich hat. Dieser Bereich beginnt für die drei Darstellungen bei $n_{\text{Pedelec}} = 1$ und $K_{\text{pot}} = 50$ und setzt sich linear bis $n_{\text{Pedelec}} = 8$ und $K_{\text{pot}} = 250$ fort. Unterhalb dieser Geraden ist die Servicegradsteigerung unabhängig vom Ladestrom mit maximal 2 % minimal. Darüber hinaus kann eine Servicegradsteigerung von über 10 % für alle drei Ladeströme im Bereich $n_{\text{Pedelec}} = 4$ und $K_{\text{pot}} > 200$ erzielt werden.

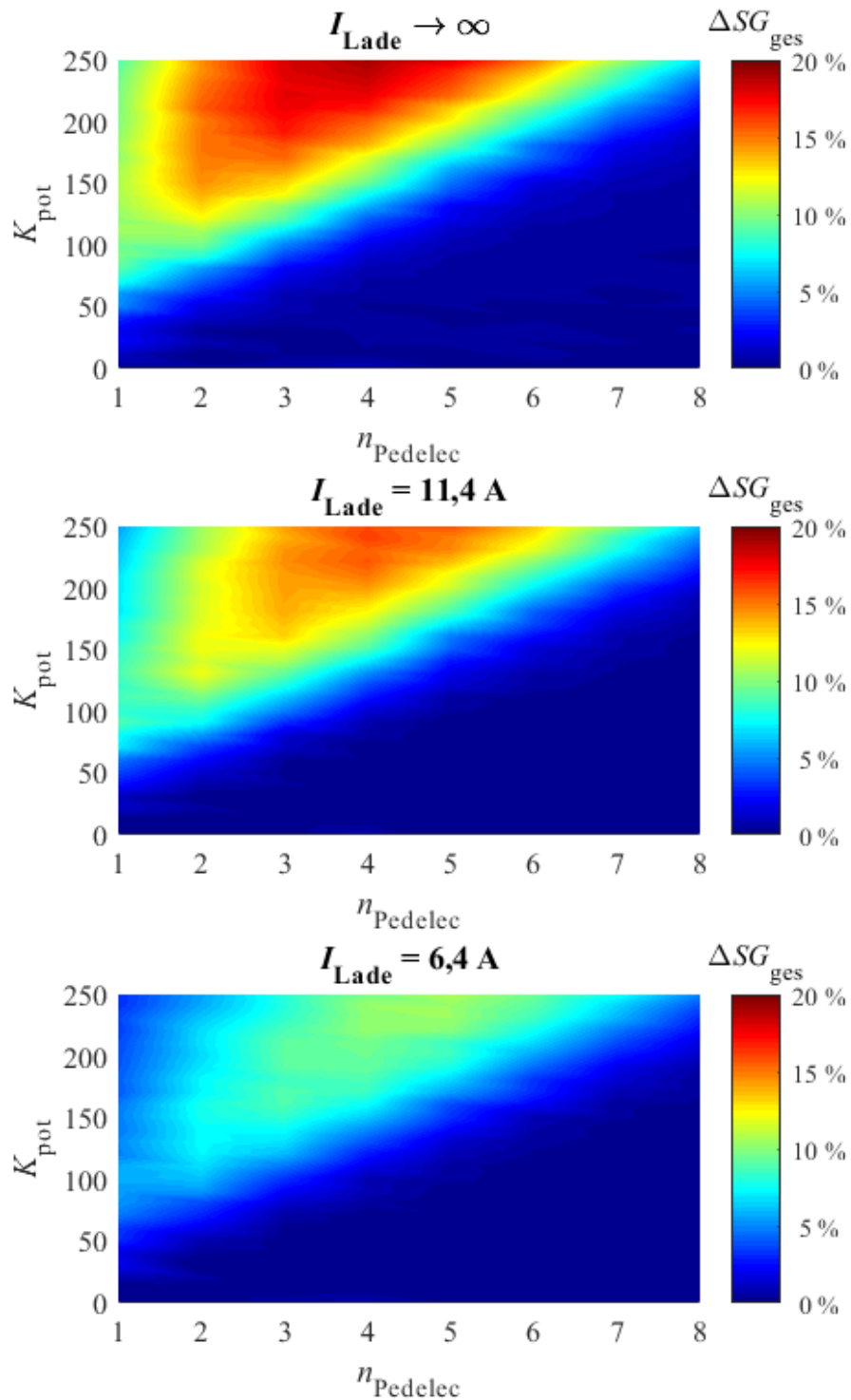


Abbildung 9.9: ΔSG_{ges} für verschiedene Ladeströme im Vergleich zu SG_{ges} ($I_{Lade} = 4 \text{ A}$) in Abhängigkeit von $n_{Pedelec}$ und K_{pot}

In Bezug auf die Untersuchung können anhand der Abbildung folgende Aussagen getroffen werden:

- Der betrachtete Akku beeinflusst den Servicegrad eines automatischen stationsbasierten PVS im Vergleich zu einem FVS ab $K_{\text{pot}} > 50$. Die Einflussgrenze von K_{pot} nimmt mit steigendem n_{Pedelec} zu.
- Im angegebenen Bereich kann durch die Erhöhung des Ladestroms eine Servicegradsteigerung im Vergleich zu $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ um fast 11 % ($I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A}$) bzw. um mehr als 16 % ($I_{\text{Lade}} = 11,4 \text{ A}$) erzielt werden.

9.5 Notwendigkeit des Schnellladens im Pedelec-Vermietsystem

Das Schnellladen des Akkus ist aufgrund der höheren Temperaturentwicklung immer mit einem schnelleren zyklischen Alterungsprozess verbunden. Daher stellt sich die Frage, ob Schnellladen zu jedem Zeitpunkt notwendig ist. In Abbildung 9.10 werden exemplarisch zwei Szenarien betrachtet. Im ersten Szenario werden $n_{\text{Pedelec}} = 4$ und $K_{\text{pot}} = 200$ betrachtet.

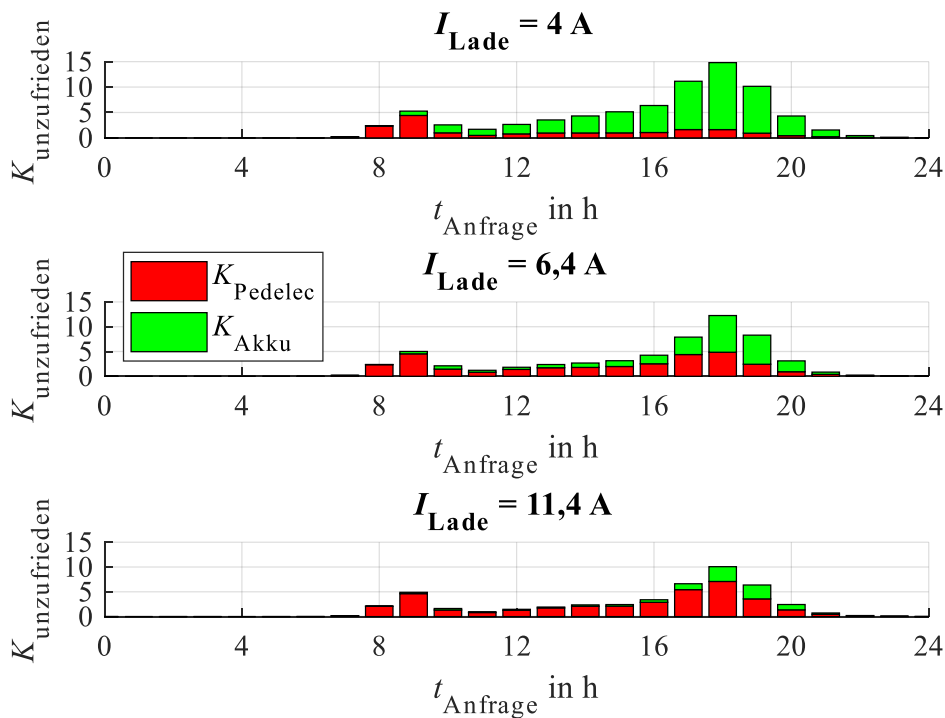


Abbildung 9.10: $K_{\text{unzufrieden}}$ für $n_{\text{Pedelec}} = 4$ und $K_{\text{pot}} = 200$ aufgeteilt in K_{Pedelec} und K_{Akku} über einen Betrachtungszeitraum von 24 h für unterschiedliche I_{Lade}

Mit $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ entstehen viele unzufriedenen Kunden zur zweiten Stoßzeit (17 h – 9 h), weil die Pedelec-Akkus nicht ausreichend geladen sind. Eine Erhöhung des Ladestroms auf 6,4 A reduziert die Anzahl der unzufriedenen Kunden, da die Pedelecs schneller zur Verfügung stehen. Gleichzeitig sind nicht ausreichend Pedelecs an der Station vorhanden, um alle Kunden in dem Zeitraum zu bedienen. Mit $I_{\text{Lade}} = 11,4 \text{ A}$ ergibt sich ein ähnliches Verhalten. Insgesamt stehen die Pedelecs wieder schneller zur Verfügung, sodass mehr Kunden bedient werden können. Gleichzeitig steigt jedoch die Anzahl unzufriedener Kunden, die aufgrund von fehlenden Pedelecs abgelehnt werden. Beim Vergleich der drei Verläufe wird deutlich, dass in den ersten sechs Stunden und in den letzten drei Stunden keine bzw. sehr wenige Kunden abgelehnt werden. Hauptursache hierfür ist, dass in diesem Zeitraum weniger potentielle Kunden die Station aufsuchen. Für die Notwendigkeit des Schnellladens bedeutet das, dass von $t_{\text{Anfrage}} = 22 \text{ h}$ bis $t_{\text{Anfrage}} = 6 \text{ h}$ $I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A}$ ausreichend ist.

Im zweiten Szenario in Abbildung 9.11 wird K_{pot} auf 50 reduziert. Bei der Betrachtung der Verläufe für die unzufriedenen Kunden über die Zeit ist kein signifikanter Unterschied zu erkennen. In allen drei Fällen liegt bereits $SG_{\text{ges}} > 98 \%$ vor, sodass ein sehr großer Teil der Kunden bedient wird. Eine Erhöhung des Ladestroms auf Kosten einer schnelleren Alterung ist in diesem Fall nicht empfehlenswert. Aus dem zweiten Szenario geht hervor, dass an Tagen, an denen vergleichsweise wenig potentielle Kunden vorhanden sind, ebenfalls auf Schnellladen verzichtet werden kann. Da die Anzahl der Anfragen u. a. von der mittleren Tagestemperatur abhängig ist, bietet das Schnellladen eine flexible Möglichkeit, den Servicegrad an stark genutzten Tagen nach oben zu korrigieren. An nutzungsschwächeren Tagen, wie bspw. im Winter, kann auf das Schnellladen verzichtet werden. Je nach Anspruch und finanziellen Möglichkeiten des Betreibers ist ein hoher Servicegrad anzustreben, da sich die Anzahl der potentiellen Kunden ansonsten auf lange Sicht reduzieren wird.

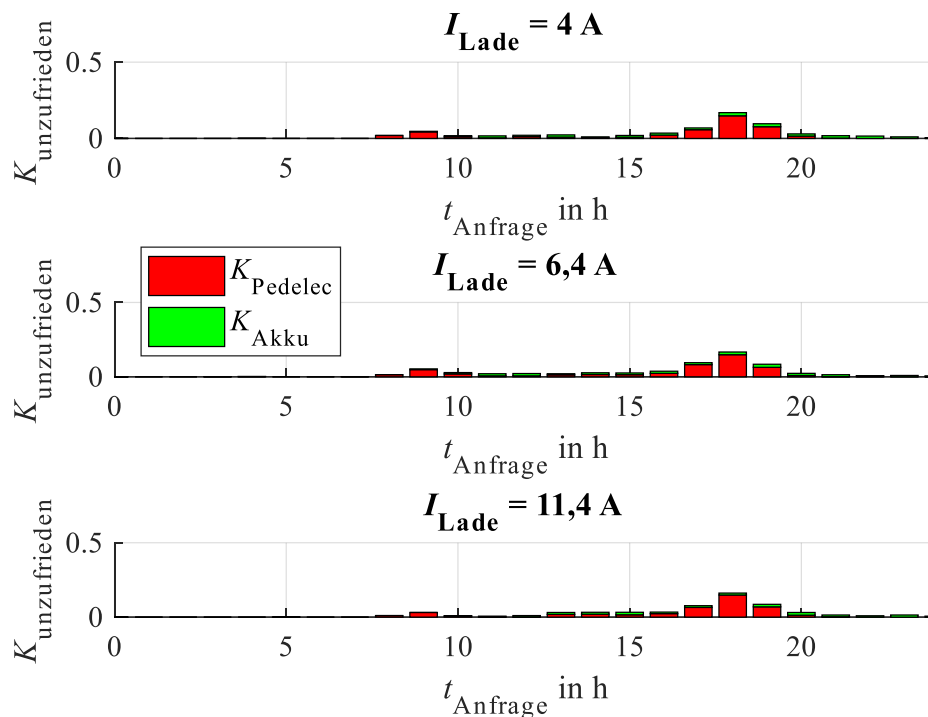


Abbildung 9.11: $K_{unzufrieden}$ für $n_{Pedelec} = 4$ und $K_{pot} = 200$ aufgeteilt in $K_{Pedelec}$ und K_{Akku} über einen Betrachtungszeitraum von 24 h für I_{lade}

9.6 Entwicklung des Verbesserungspotentials durch höhere Laderaten im Hinblick auf den Servicegrad bei modifizierten Modellgrößen

In den vorangegangenen Szenarien wurden die Anzahl der Pedelecs und die Anzahl potentieller Kunden innerhalb der Simulation als Variablen deklariert. Darüber hinaus wurde der Einfluss unterschiedlicher Laderaten analysiert. Alle weiteren Modellgrößen wurden entweder anhand von Datenauswertungen ermittelt oder festgelegt und nicht verändert. Das beinhaltet, neben der Normalverteilung für die durchschnittliche Akkuleistung pro Fahrt und der Gamma-Verteilung für die Mietdauer, auch den Energieinhalt des Akkus. Als abschließender Ausblick der Untersuchung wird daher ermittelt, welchen Einfluss eine Änderung dieser Größen auf das Verbesserungspotential einer höheren Laderate im Hinblick auf den Servicegrad hat.

9.6.1 Optimaler Energieinhalt in Abhängigkeit von der Anzahl der Pedelecs und der Anzahl potentieller Kunden

Innerhalb der Untersuchung wurde mit dem *PowerPack 400* ein Akku mit $E_{\text{Akku}} = 370$ Wh betrachtet. In Kapitel 7.4 wird die Erhöhung von E_{Akku} als Möglichkeit der Servicegradsteigerung erwähnt. Ein konkreter Wert wird dabei nicht genannt. Anhand der Simulation wird daher das Minimum für E_{Akku} in Abhängigkeit von der Anzahl der Pedelecs, der Anzahl der potentiellen Kunden sowie der Laderate bestimmt. Für die Simulation wird E_{Akku} variiert. Die Nennspannung liegt dabei weiterhin bei 36 V, sodass sich die Kapazität des Akkus ändert. Für das Ladeverhalten werden die in Kapitel 8 ermittelten Ladekurven mit den Laderaten 0,36 C, 0,56 C und 1 C hinterlegt. Als Zielkriterium wird das Minimum von E_{Akku} gesucht, dessen Servicegrad einen maximalen Abstand von ≤ 5 % zu $SG_{\text{ges}} (I_{\text{Lade}} \rightarrow \infty)$ aufweist.

In Abbildung 9.12 sind die Ergebnisse der Simulation für die drei Laderaten dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse für die verschiedenen Laderaten deckt die Skala für E_{Akku} den Bereich von 200 Wh bis 600 Wh ab. Bei 0,36 C sind 200 Wh bis $K_{\text{pot}} = 20$ unabhängig von der Anzahl der Pedelecs ausreichend. Durch die Steigerung von n_{Pedelec} nimmt dieser Grenzwert für K_{pot} zu. Mit $n_{\text{Pedelec}} = 8$ ist somit bei $K_{\text{pot}} = 100$ ein Energieinhalt von 200 Wh weiterhin ausreichend, um keine signifikanten Auswirkungen auf den Servicegrad durch den Akku zu erhalten. Bei hochfrequentierten Stationen ist bei 0,36 C für $n_{\text{Pedelec}} \leq 5$ ein Energieinhalt von mindestens 500 Wh, in einem Großteil des Bereichs sogar von mehr als 600 Wh erforderlich. Durch die Erhöhung der Laderate kann E_{Akku} insbesondere in diesem Bereich deutlich reduziert werden. Bei 0,56 C liegt der maximale Wert von E_{Akku} bei etwa 550 Wh, bei 1 C sogar fast ausschließlich bei 350 Wh. Das Verbesserungspotential in diesem Bereich ist nicht nur auf den höheren Energieinhalt zurückzuführen, sondern auch auf den Ladestrom. Da die Laderate variiert wird, steigt mit Zunahme von E_{Akku} auch die Kapazität und somit der Ladestrom. Dadurch kann im gleichen Zeitraum mehr Energie im Akku gespeichert werden.

Die Berechnung für den optimalen Wert von E_{Akku} bezieht sich in diesem Fall auf die Auswirkungen des Akkus auf den Servicegrad im Vergleich zu $SG_{\text{ges}} (I_{\text{Lade}} \rightarrow \infty)$. Das bedeutet, dass der Einfluss des Akkus auf den Servicegrad durch die Verwendung des berechneten Energieinhaltes auf ein Minimum reduziert wird.

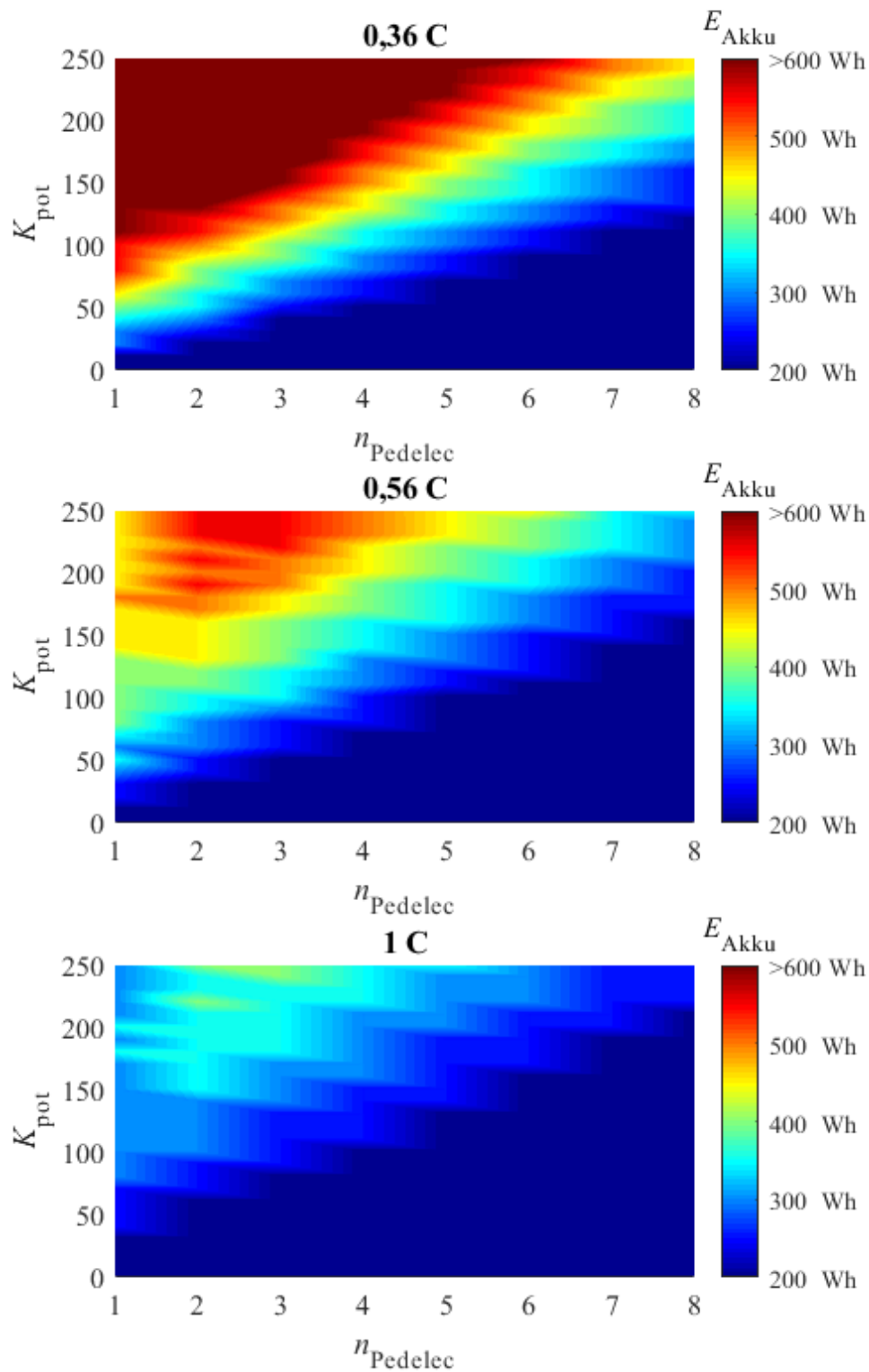


Abbildung 9.12: Optimum für E_{Akku} für $\Delta SG_{\text{ges}} \leq 5\%$ zu $SG_{\text{ges}} (I_{\text{Lade}} \rightarrow \infty)$ in Abhängigkeit von n_{Pedelec} und K_{pot} bei unterschiedlichen Laderaten

Die Berechnung gibt nicht an, wie hoch der tatsächliche Servicegrad ist. Wenn eine Empfehlung von 200 Wh bei $SG_{\text{ges}} = 70\%$ ausgesprochen wird, kann der Servicegrad lediglich durch die Steigerung von n_{Pedelec} , nicht aber durch die Erhöhung von E_{Akku} verbessert werden.

9.6.2 Auswirkungen unterschiedlicher Mietdauern und Akkuleistungen auf den Servicegrad

Für die Ermittlung des Servicegrades in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Akkuleistung wird der Erwartungswert aus der Normalverteilung in Kapitel 5.3.3 ($\mu_P \sim 124\text{ W}$) auf 130 W, 150 W und 175 W, wie in Abbildung 9.13 (oben) dargestellt, variiert. Die Standardabweichung wird aus der ermittelten Normalverteilung übernommen. Um den Einfluss der Mietdauer auf den Servicegrad zu berücksichtigen, wird die Gamma-Verteilung aus Kapitel 5.3.2, wie in Abbildung 9.13 (unten) dargestellt, angepasst.

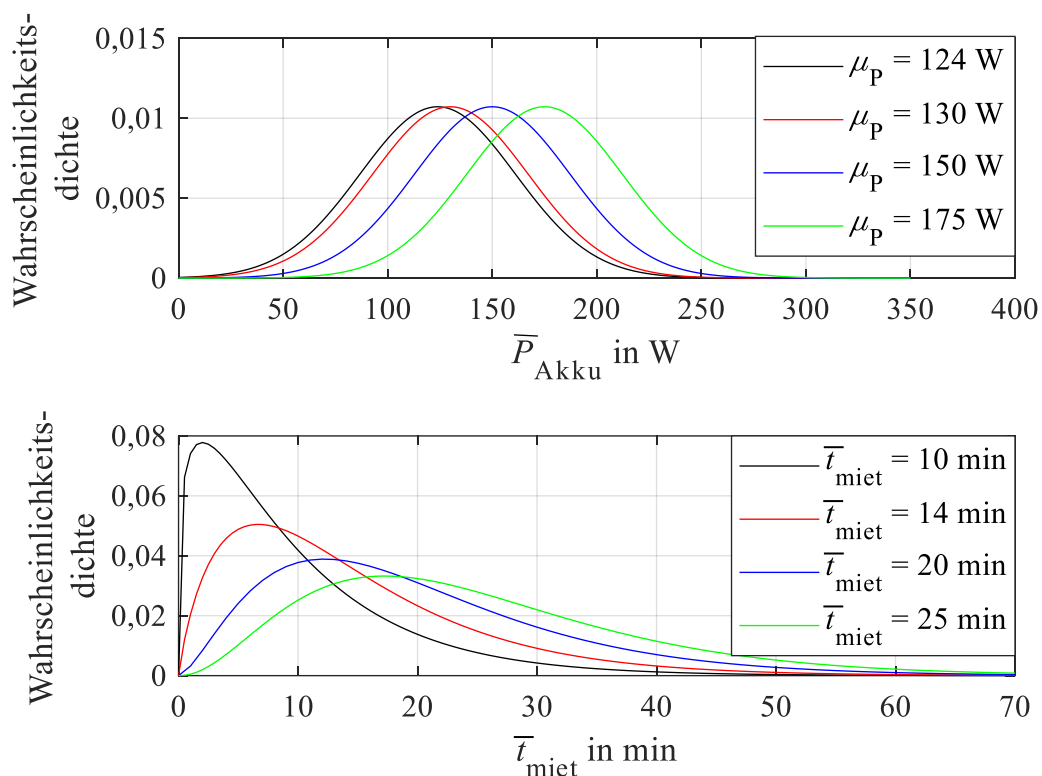


Abbildung 9.13: Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung der durchschnittlichen Akkuleistung mit $\mu_P = 124\text{ W}$, 130 W , 150 W und 175 W und $\sigma^2 = 37,21\text{ W}^2$ (oben); Wahrscheinlichkeitsdichte der Gamma-Verteilung für die Mietdauer mit $\bar{t}_{\text{miet}} = 10\text{ min}$, 14 min , 20 min und 25 min (unten)

Dadurch werden neben der in der vorangegangenen Untersuchung betrachteten durchschnittlichen Mietdauer von ca. 14 min ebenfalls durchschnittliche Mietdauern von 10 min, 20 min und 25 min berücksichtigt.

Um die Auswirkungen einer höheren durchschnittlichen Leistung und das damit verbundene Verbesserungspotential einer Ladestromerhöhung von 4 A auf 6,4 A zu visualisieren, wird in Abhängigkeit von den potentiellen Kunden und der Anzahl der Pedelecs die Fläche ermittelt, bei der ΔSG_{ges} zu $SG_{\text{ges}} (I_{\text{Lade}} \rightarrow \infty) \geq 9 \%$ ist. Das Ergebnis für die unterschiedlichen Erwartungswerte der Normalverteilung ist in Abbildung 9.14 dargestellt.

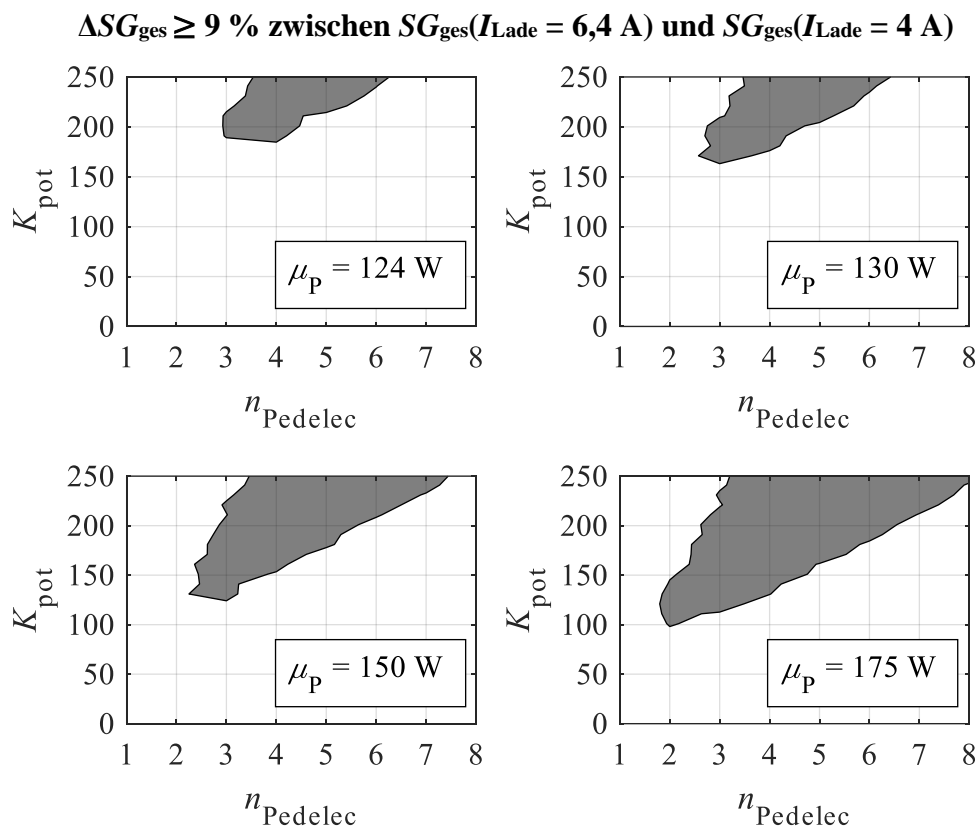


Abbildung 9.14: Servicegradunterschied zwischen $SG_{\text{ges}} (I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A})$ und $SG_{\text{ges}} (I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A})$ in Abhängigkeit von n_{Pedelec} und K_{pot} für unterschiedliche Erwartungswerte bei der Normalverteilung für die durchschnittliche Akkuleistung pro Fahrt

Es wird deutlich, dass die Fläche mit steigendem Erwartungswert größer wird. Das bedeutet, dass eine Steigerung des Ladestroms mit höherem Erwartungswert für die durchschnittliche Akkuleistung ein größeres Verbesserungspotential beim Servicegrad bietet. Durch die höhere durchschnittliche Akkuleistung wird mehr Energie pro Fahrt benötigt. Das führt zu einer generellen Reduzierung des Servicegrades sowohl bei 4 A als auch bei 6,4 A. Allerdings kann die Reduzierung bei 6,4 A stärker kompensiert werden, da SOC_{\min} durch die Ladestromerhöhung niedriger gewählt und mehr Energie aufgrund der höheren Ladeleistung im gleichen Zeitraum im Akku gespeichert werden kann.

Die Auswirkungen durch die Änderung der Mietdauer sind in Abbildung 9.15 dargestellt. Wie schon bei der durchschnittlichen Akkuleistung vergrößert sich die Fläche und somit auch das Verbesserungspotential bei einer Ladestromerhöhung von 4 A auf 6,4 A. Allerdings verschiebt sich das Potential in Richtung höherer Pedelec-Anzahl.

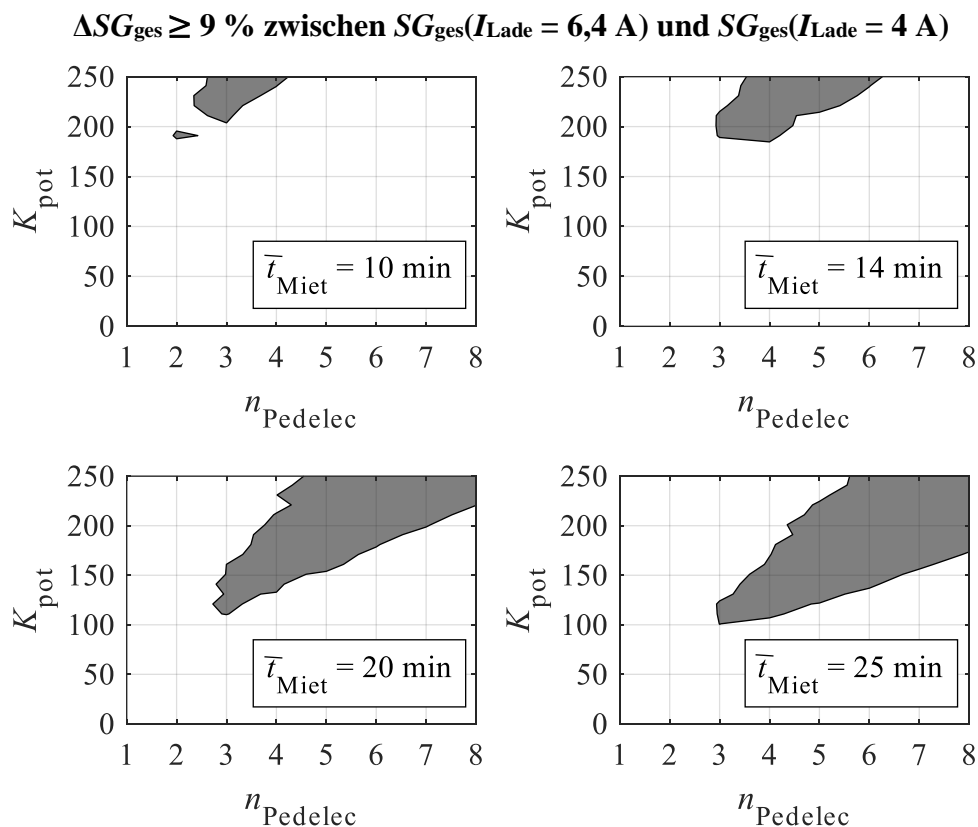


Abbildung 9.15: Servicegradunterschied zwischen $SG_{\text{ges}}(I_{\text{Lade}} = 6,4 \text{ A})$ und $SG_{\text{ges}}(I_{\text{Lade}} = 4 \text{ A})$ in Abhängigkeit von n_{Pedelec} und K_{pot} für verschiedene durchschnittliche Mietdauern

Durch die längere Mietdauer steigt die Wahrscheinlichkeit von leeren Stationen insbesondere bei kleinen Werten für n_{Pedelec} . Da dies den Teilservicegrad SG_{Pedelec} beeinflusst, hat ein höherer Ladestrom geringe Auswirkungen auf SG_{ges} . Bei einer durchschnittlichen Mietdauer von 25 min, $n_{\text{Pedelec}} = 5 \dots 8$ und $K_{\text{pot}} > 150$ hat eine Ladestromerhöhung einen signifikanteren Einfluss als bei 10 min. Durch die höhere Mietdauer wird, wie schon bei der höheren durchschnittlichen Akkuleistung, die notwendige Energie pro Fahrt gesteigert. Mit ausreichend Pedelecs an der Station reduziert sich die Wahrscheinlichkeit von leeren Station erneut, sodass für den Ladevorgang genug Zeit zur Verfügung steht und der Einfluss einer Ladestromerhöhung steigt.

9.7 Auswirkungen von niedrigen Temperaturen und Alterungseffekten auf den Servicegrad

In den vorangegangenen Betrachtungen wurde durchgehend ein Energieinhalt von 370 Wh betrachtet. Durch Temperatureinflüsse oder Alterungseffekte kann sich der Energieinhalt temporär oder auch dauerhaft reduzieren. Anhand der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 6.2.2 wurde gezeigt, dass ein niedrigerer Energieinhalt einen Einfluss auf den Servicegrad haben kann. In diesem Kapitel wird daher die Fragestellung untersucht, wie viele Pedelecs durch die Reduzierung von E_{Akku} zusätzlich notwendig sind, um einer potentiellen Servicegradreduzierung entgegenzuwirken. Für die Untersuchung wird der Energieinhalt um 20 % auf 296 Wh reduziert. Zusätzlich werden die Auswirkungen eines niedrigeren Energieinhaltes ebenfalls in einem Szenario mit einem höheren Erwartungswert für die durchschnittliche Akkuleistung ($\mu_P = 200$ W) ermittelt.

In Abbildung 9.16 sind die beiden Servicegradverläufe für SG_{ges} ($E_{\text{Akku}} = 300$ Wh) und SG_{ges} ($E_{\text{Akku}} = 400$ Wh) für $K_{\text{pot}} = 100$ dargestellt. Die Differenz zwischen den beiden Servicegraden bei $n_{\text{Pedelec}} = 4$ liegt bei 3,02 %. Um die Differenz mit einem niedrigeren Energieinhalt auszugleichen, müssen theoretisch 0,56 Pedelecs zusätzlich in das System implementiert werden. Die neue Anzahl an Pedelecs beträgt somit $n_{\text{Pedelec,neu}} = 4,56$, was einem zusätzlich Pedelec-Aufwand von 14 % entspricht. Diese 14 % finden sich ebenfalls in der unteren Hälfte von Abbildung 9.16 wieder. Hier ist das Verhältnis von $n_{\text{Pedelec,neu}}$ zu n_{Pedelec} dargestellt. Bei $K_{\text{pot}} = 100$ ergibt sich für den unteren Verlauf ein Verhältnis

von 1,14. Mit zunehmendem K_{pot} erhöht sich der Wert auf 1,2, was einem zusätzlichen Pedelec-Aufwand von 20 % entspricht.

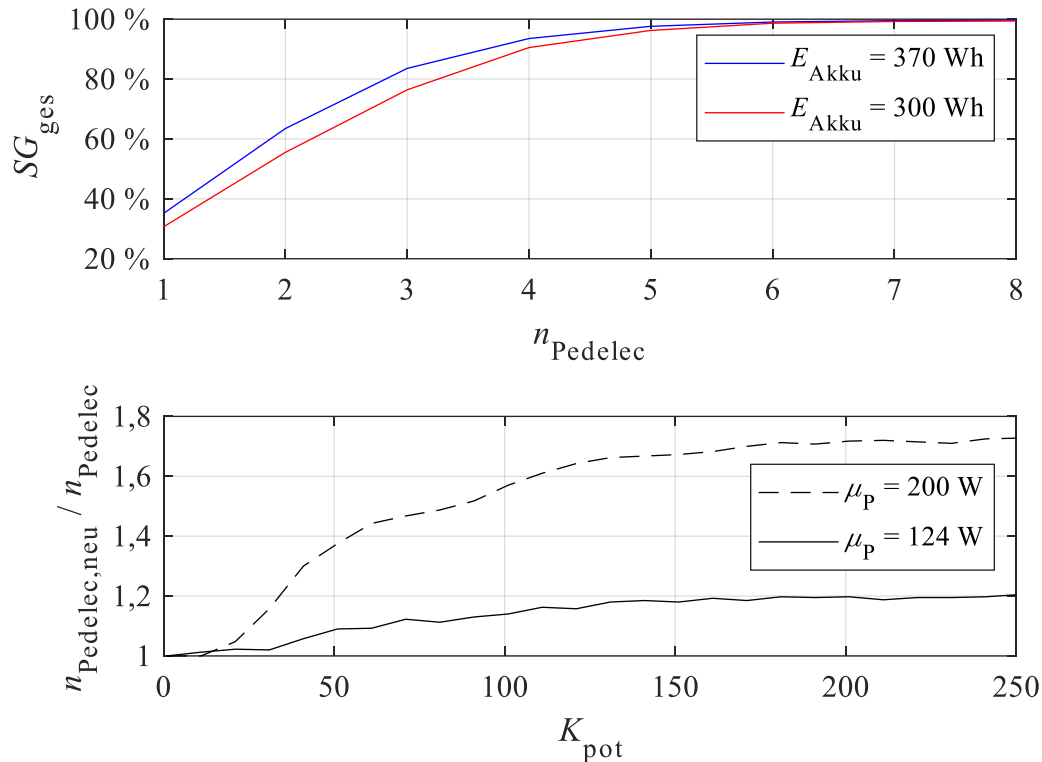


Abbildung 9.16: SG_{ges} in Abhängigkeit von n_{Pedelec} für $E_{\text{Akku}} = 296 \text{ Wh}$ & 370 Wh , $\mu_{\text{P}} = 124 \text{ W}$ und $K_{\text{pot}} = 100$ (oben); Verhältnis von $n_{\text{Pedelec,neu}}$ zu n_{Pedelec} in Abhängigkeit von K_{pot} für $\mu_{\text{P}} = 124 \text{ W}$ & 200 W und $n_{\text{Pedelec}} = 4$ (unten)

Bei einer höheren durchschnittlichen Akkuleistung pro Fahrt ist der Aufwand, der betrieben werden muss, um den Servicegrad bei einer Reduzierung des Energieinhaltes beizubehalten, signifikant höher. Der Aufwand nimmt ebenfalls mit steigendem K_{pot} zu, erhöht sich aber auf stellenweise über 70 %. Die Umgebungsfaktoren spielen demnach eine entscheidende Rolle für die Auswahl der technischen Ausstattung im PVS. Steigungen, die zu einer höheren durchschnittlichen Akkuleistung führen, aber auch niedrigere Temperaturen und Alterungseffekte, die wiederum E_{Akku} reduzieren, müssen bei der Wahl des Akkus berücksichtigt werden. In diesen Fällen müssen entsprechende Vorkehrungen getroffen werden (bspw. durch die Bereitstellung zusätzlicher Pedelecs), da es ansonsten zu drastischen Einbußen beim Servicegrad kommen kann.

10 Zusammenfassung & Ausblick

Abschließend werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und die getroffenen Annahmen diskutiert. Darauf aufbauend wird ein Ausblick zu der Thematik gegeben.

10.1 Zusammenfassung und Diskussion

Einen wichtigen Kennwert, um die Zuverlässigkeit eines Vermietsystems bewerten zu können, stellt der Servicegrad dar. Dieser wird sowohl von endogenen als auch von exogenen Faktoren beeinflusst. Zu den exogenen Faktoren zählen u. a. das Klima, die Bevölkerungsdichte, aber auch die Infrastruktur im Einsatzgebiet. Der Betreiber hat auf diese Faktoren einen geringen bis gar keinen Einfluss. Im Gegensatz dazu umfassen endogene Faktoren Möglichkeiten für den Betreiber, auf den Servicegrad einwirken zu können. Entscheidend hierfür sind bspw. die Anzahl der Pedelecs und Stationen im Vermietsystem, aber auch das vorhandene Preismodell. Auf Basis vorhandener Publikationen für automatische stationsbasierte Fahrradvermietsysteme (FVS) wurde eine Definition für den Servicegrad in Pedelec-Vermietsystemen (PVS) aufgestellt. Während der Servicegrad bei FVS durch eine leere Station bei einer Anfrage bzw. bei einer vollen Station bei der Rückgabe bestimmt wird, kommt beim PVS der Einfluss des Akkus hinzu. Zum einen können Pedelecs nicht vermietet werden, weil der minimal notwendige Ladezustand des Akkus (SOC_{\min}) nicht erreicht wird. Zum anderen besteht die Möglichkeit, dass vor der Rückgabe des Pedelecs ein Ladezustand von 0 % vorliegt. Beide Aspekte werden bei der Definition des Servicegrades berücksichtigt. Um die Ursachen der Servicegradverluste zuordnen zu können, wurden zwei Teilservicegrade definiert. Der Teil, der ebenfalls im FVS vorhanden ist, wird als Teilservicegrad SG_{Pedelec} bezeichnet. Alle Verluste, die auf den Akku zurückzuführen sind, werden im Teilservicegrad SG_{Akku} erfasst. In Bezug auf die Forschungsfrage „**Welchen Einfluss hat der Akku auf den Servicegrad eines stationsbasierten automatischen Pedelec-Vermietsystems?**“ stellt der Akku somit einen weiteren Faktor dar, der zusätzlich für unzufriedene Kunden verantwortlich sein und den Servicegrad von PVS reduzieren kann.

Für die Ermittlung des Servicegrades wurde ein Modell entwickelt und in eine Simulationsumgebung überführt. Im Modell wird ein PVS mit einer Station betrachtet. Die Anzahl der Pedelecs wird variiert. Die Reduzierung des Servicegrades durch volle Stationen bei

der Rückgabe des Pedelecs wird damit nicht betrachtet. Ebenso finden keine Redistributionsvorgänge im Modell statt. Aufgrund dieser Annahme liegt der Gültigkeitsbereich des Modells bei maximal 400 potentiellen Kunden. Da die Wahrscheinlichkeit für mehr als 400 potentielle Kunden pro Tag an einer Station bei ca. 0,5 % liegt, ist die erzielte Genauigkeit des Modells für die durchgeführte Untersuchung ausreichend hoch.

Eine weitere Variable innerhalb des entwickelten Modells ist die Anzahl der potentiellen Kunden. Die identifizierten Einflussfaktoren wirken hierbei auf Eigenschaften der Kunden, wie den Anfragezeitpunkt, die Mietdauer und die durchschnittliche Akkuleistung. Die ersten beiden Faktoren wurden anhand von Daten aus automatischen stationsbasierten FVS ermittelt. Bei der Integration der Dichtefunktion für den Zeitpunkt einer Anfrage wird die bimodale Dichtefunktion von einem FVS auf das PVS übertragen. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass sich der Zeitpunkt des Mobilitätsbedarfs bei der Nutzung von Fahrrädern und Pedelecs nicht signifikant unterscheidet und ein PVS mit der ermittelten Verteilung für den Anfragezeitpunkt realistisch ist. Im Hinblick auf die Dauer eines Mietvorgangs kann bei der Übertragung der Daten vom FVS auf das PVS einerseits mit einer durchschnittlich höheren Nutzungsdauer argumentiert werden, da prinzipiell längere Strecken mit Pedelecs zurückgelegt werden. Andererseits ist eine durchschnittlich niedrigere Nutzungsdauer möglich, da bspw. Berufspendler die gleiche Strecke in einer kürzeren Zeit zurücklegen können. Eine Übertragung der ermittelten Gamma-Verteilung von FVS auf PVS ist daher plausibel. Die durchschnittliche Akkuleistung für das Modell wurde anhand von Fahrdaten aus Hannover ermittelt. Da die Akkuleistung von Umgebungsfaktoren (bspw. Höhenprofil, Wind) abhängt, können sich für andere Einsatzgebiete unterschiedliche Häufigkeitsverteilungen ergeben. Die Übertragbarkeit des Modells auf unterschiedliche PVS ist aufgrund der Umgebungseinflüsse nur bedingt möglich. Bei der Anwendung des Modells auf andere PVS sollten die exogenen Parameter daher überprüft und ggfs. angepasst werden.

Ein Teil der Untersuchung stellte die Betrachtung unterschiedlicher Ladeströme dar. Hierfür wurde das *PowerPack 400* der *Robert Bosch GmbH* verwendet. Dieses wird standardmäßig mit einem Ladestrom von 4 A (0,36 C) geladen. Durch einen Ladeversuch wurde eine Ladestromgrenze von 6,4 A (0,56 C) für diesen Akku ermittelt. Bei Ladeströmen über diesem Wert verhindert das BMS aus Sicherheitsgründen das Laden des Akkus. Ergänzend dazu wurde das Ladeverhalten bei einem Ladestrom von 11,4 A abgeschätzt,

um den Einfluss der festgelegten maximalen Laderate von 1 C zu berücksichtigen. Durch die Erhöhung des Ladestroms steigt während des Ladevorgangs die Temperatur des Akkupacks. Demnach ist bei hohen Laderaten mit einem schnelleren Alterungsprozess der verwendeten Zellen zu rechnen. Durch die Alterung reduziert sich der Energieinhalt des Akkus im Laufe der Zeit, wodurch sich der Servicegrad reduzieren kann. Der Alterungsprozess der Akkus, der sich mit einem erhöhten Ladestrom beschleunigen kann, fließt nicht in die Betrachtung ein, da eine genaue Bestimmung des Alterungsverhaltens über entsprechende Langzeitversuche erfolgen muss.

Anhand des entwickelten Modells wurden die zu Beginn der Untersuchung aufgestellten Hypothesen analysiert.

- 1. Für den Betrieb muss ein minimal notwendiger SOC bestimmt werden, ab dem die Pedelecs für die Vermietung freigegeben werden.*

Hierzu wurde zunächst die Entwicklung des Servicegrades für verschiedene Szenarien in Abhängigkeit von SOC_{\min} betrachtet. Dieser Wert gibt an, ab welchem SOC die Pedelecs für einen Mietvorgang erneut zur Verfügung stehen. Aus der Betrachtung wird ersichtlich, dass sowohl in Abhängigkeit von der Anzahl der Pedelecs, als auch vom gewählten Ladestrom ein Wert für SOC_{\min} existiert, bei dem der Servicegrad maximiert werden kann. Die Hypothese, dass ein solcher Wert, ab dem die Pedelecs für die Vermietung freigegeben werden, bestimmt werden muss, wurde somit bestätigt.

- 2. Durch den Pedelec-Akku wird der Servicegrad signifikant reduziert.*

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass eine Reduzierung des Servicegrades insbesondere bei nutzungsstarken Stationen vorkommt. Bei weniger als 50 potentiellen Kunden ist der Einfluss des Akkus auf den Servicegrad unabhängig von der Anzahl der Pedelecs mit unter 3 % vergleichsweise gering. Hauptursache sind in diesem Zusammenhang Pedelecs, die aufgrund eines Ladezustandes unterhalb von SOC_{\min} nicht vermietet werden können. Szenarien, in denen der Ladezustand vor der Rückgabe 0 % erreicht, treten im Vergleich zu den anderen Ursachen seltener (<5 %) auf. Aus der Definition geht bereits hervor, dass der Pedelec-Akku eine Ursache für unzufriedene Kunden darstellt. Im Hinblick auf die Hypothese kann der Servicegrad demnach zwar durch den Pedelec-Akku reduziert werden, ein signifikanter Einfluss ist jedoch nicht in jedem Fall vorhanden.

3. Eine Erhöhung des Ladestroms steigert den Servicegrad des Pedelec-Vermietsystems.

Durch die Erhöhung des Ladestroms auf 6,4 A kann der Servicegrad im Vergleich zu 4 A Ladestrom stellenweise über 10 % gesteigert werden. Bei 11,4 A Ladestrom kann eine Steigerung um bis zu 15 % erreicht werden. Ähnlich wie bei der Erhöhung der Pedelec-Anzahl hat die Änderung des Ladestroms von 4 A auf 6,4 A eine Steigerung der Effizienz zur Folge. Der positive Effekt einer höheren Laderate kann in Abhängigkeit von den vorliegenden Gegebenheiten variieren. Eine höhere durchschnittliche Akkuleistung oder eine längere Mietdauer erhöhen das Verbesserungspotential. Der Energieinhalt kann mit einer höheren Laderate, insbesondere bei hochfrequentierten Stationen mit weniger als fünf Pedelecs, von 600 Wh auf stellenweise bis zu 400 Wh reduziert werden. Der höhere Ladestrom stellt auf kurzfristige Sicht eine flexible Möglichkeit dar, an nutzungstärkeren Tagen mehr potentielle Kunden zu bedienen und den Servicegrad zu steigern. Es existieren zwei Stoßzeiten, zu denen besonders viele Kunden ein Pedelec mieten wollen. Von 22 Uhr – 6 Uhr ist das Anfragenniveau gering, sodass in dem Bereich auf einen erhöhten Ladestrom verzichtet werden kann. Gleiches gilt für nutzungsschwächere Tage, wie bspw. in den Wintermonaten. Langfristig betrachtet ist für nutzungstarke Stationen die Anschaffung von zusätzlichen Pedelecs einer Erhöhung des Ladestroms vorzuziehen, da durch die Maßnahme beide Teilservicegrade gesteigert werden können.

10.2 Fazit und Ausblick

Der Akku ist beim Einsatz von Pedelecs in automatischen stationsbasierten Vermietsystemen eine Ursache für unzufriedene Kunden und kann somit für eine Reduzierung des Servicegrades insbesondere bei hochfrequentierten Stationen verantwortlich sein. Gegenmaßnahmen, wie bspw. die Erhöhung des Ladestroms, können dieser Reduzierung des Servicegrades entgegenwirken.

Die im Rahmen der Untersuchung erzielten Ergebnisse können als Teil einer ökonomischen Betrachtung verwendet werden. Hierfür ist zusätzlich die Ermittlung des Alterungsverhaltens des gewählten Akkupacks bei verschiedenen Laderaten notwendig. Darauf aufbauend muss die Frage geklärt werden, wie sich die Einnahmen aus den zusätzlichen Mietvorgängen bei einer höheren Laderate gegenüber den voraussichtlich zusätzlichen Kosten durch einen früheren Akkuwechsel verhalten.

Es ist zu erwarten, dass sich die Kosten vorhandener Lithium-Ionen-Akkus in Zukunft reduzieren werden. Zugleich wird die Energiedichte zukünftiger Batteriespeicher ansteigen und sich die Ladeleistung erhöhen. In der Folge verkürzt sich zum einen die Zeit, in der die Pedelecs aufgrund von Ladevorgängen nicht zur Verfügung stehen. Zum anderen reduziert sich die Wahrscheinlichkeit, dass der Akku während der Fahrt keine Energie mehr für die Unterstützung zur Verfügung stellt. Beide Aspekte können sich positiv auf den Servicegrad auswirken, sodass der Einfluss des Akkus mit der Zunahme des technischen Fortschrittes abnehmen wird.

Während große automatische PVS aktuell stationsbasiert betrieben werden, sind die Entwicklung und die Akzeptanz von stationslosen automatischen PVS abzuwarten. Dieses Betriebskonzept bietet eine höhere Flexibilität für den Kunden, da das Pedelec in unmittelbarer Nähe des Zielortes abgestellt werden kann. Allerdings existiert für den Ladevorgang der Pedelec-Akkus innerhalb dieser PVS noch keine Alternative zum manuellen Austausch durch das Personal.

Literaturverzeichnis

- [1] Zweirad-Industrie-Verband e. V.: Zahlen - Daten - Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland 2017. 13.03.2018. Berlin, 2018.
- [2] Gressmann, M.; Müller, E.; Retzbach, L.: Fachwissen E-Bike. Technik der Leicht-Elektrofahrzeuge, 2. Aufl.: Europa-Lehrmittel. Haan, Rheinland, 2015.
- [3] Müller, T.; Müller, E.: E-Bike-Technik. Funktion und Physik der Elektrofahrräder: Books on Demand. Norderstedt, 2011.
- [4] Karle, A.: Elektromobilität. Grundlagen und Praxis: Hanser. München, 2015.
- [5] Korthauer, R.: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien: Imprint: Springer Vieweg. Berlin, Heidelberg, 2013.
- [6] Robert Bosch GmbH: Active Line. Originalbetriebsanleitung, 0 276 001 SAI (2015.05) T / 214 WEU. Reutlingen, 2015.
- [7] Robert Bosch GmbH: CAN Specification. Version 2.0. Stuttgart, 1991.
- [8] Schuijbroek, J.; Hampshire, R.; van Hoes, W.-J.: Inventory Rebalancing and Vehicle Routing in Bike Sharing Systems. 2013.
- [9] DeMaio, P.: Bike-sharing: History, Impacts, Models of Provision, and Future. In: Journal of Public Transportation 12 (2009) 4, S. 41–56.
- [10] Shang Wang; Jiangman Zhang; Liang Liu; Zheng-yu Duan: Bike-Sharing-A new public transportation mode: State of the practice & prospects: 2010 IEEE International Conference on Emergency Management and Management Sciences (ICEMMS).
- [11] Midgley, P.: Bicycle-sharing Schemes. Enhancing Sustainable Mobility in Urban Areas. New York, 2011.
- [12] Shaheen, S.; Guzman, S.; Zhang, H.: Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2143 (2010), S. 159–167.
- [13] Wang, I.-L.; Wang, C.-W.: Analyzing Bike Repositioning Strategies Based on Simulations for Public Bike Sharing Systems. Simulating Bike Repositioning Strategies for Bike Sharing Systems: Advanced Applied Informatics (IIAIAI), 2013 IIAI International Conference on. [S.l.].

- [14] Gris Orange Consultant: Bike sharing guide: Transport Canada. Ottawa, Ontario, 2009.
- [15] Cherry, C.; Worley, S.; Jordan, D.: Electric Bike Sharing. System Requirements and Operational Concepts. Washington, District of Columbia, 2010.
- [16] Büttner, J.; Mlasowsky, H.: Optimising Bike Sharing in European Cities. A Handbook., 2011.
- [17] Pal, A.; Zhang, Y.: Free-floating bike sharing: Solving real-life large-scale static rebalancing problems. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies 80 (2017), S. 92–116.
- [18] Monheim, H.: Fahrradverleihsysteme in Deutschland. Relevanz, Potenziale und Zukunft öffentlicher Leihfahrräder: ksv-Verl. Köln, 2012.
- [19] Toole Design Group, LLC and Foursquare ITp: Philadelphia Bike Share Strategic Business Plan. Philadelphia, 2013.
- [20] Hepp, H.; Gusig, L.-O.; Kutzner, R.: Hochschule Hannover macht mit Strom mobil: VDI Technik und Leben. Technische Vereine in und um Hannover informieren, 2012.
- [21] Webredaction Communication: First solar-powered wireless charging station for electric bikes. Delft, 2016.
- [22] Goerzig-Swierzy, A.; Schwarzenberger, T.; Hepp, H.; Hölzel, S.; Gusig, L.-O.; Andres, S. F.: eRad in Freizeit und Tourismus: FuE-Programm "Schaufenster Elektromobilität" der Bundesregierung: Schaufenster: Unsere Pferdestärken werden elektrisch (Niedersachsen): gemeinsamer Abschlussbericht: Laufzeit des Vorhabens vom 01.05.2013 bis 30.06.2016: Landeshauptstadt Hannover (LHH).
- [23] Thompson, H.: Combining E-bikes And Bikeshares Is Urban Alchemy: A Winning Transit Solution For Cities. In: Forbes, 2018.
- [24] Aachener Nachrichten: E-Bikes zum Ausleihen: Alsdorf will Velocity-System einführen. In: Aachener Nachrichten, 2018.
- [25] Bermejo, N. T.: Bicimad: Rock & Ride with Madrid's Public Bike Rental System 2015, 2015.
- [26] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Innovative öffentliche Fahrradverleihsysteme. Modellprojekte am Start. Berlin, 2012.

- [27] Bicing: Información del sistema (2018). Barcelona. URL: <https://www.bicing.cat/es/informacion/informacion-del-sistema>.
- [28] Seydack, N.: Das Obike-Desaster. In: Süddeutsche Zeitung, 2018.
- [29] Klein, M.: Die große Pleite mit Obike. In: Hannoversche Allgemeine Zeitung, 2018.
- [30] Heining, A.: We tried all four of D.C.'s dockless bike-share systems. Here's our review. In: The Washington Post, 2017.
- [31] Marshall, A.: Electric bikes want to take on everyone - even Uber. In: Wired, 2018.
- [32] Alvarez-Valdes, R.; Belenguer, J. M.; Benavent, E.; Bermudez, J. D.; Muñoz, F.; Vercher, E.; Verdejo, F.: Optimizing the level of service quality of a bike-sharing system. In: Omega 62 (2016), S. 163–175.
- [33] LDA Consulting: 2016 Capital Bikeshare Member Survey Report. URL: https://d21x1h2maitm24.cloudfront.net/wdc/Capital-Bikeshare_2016MemberSurvey_Final-Report.pdf?mtime=20170303165531. Washington, DC. 2017.
- [34] Ruch, C.; Warrington, J.; Morari, M.: Rule-based price control for bike sharing systems: Control Conference (ECC), 2014 European. Date 24-27 June 2014. [Piscataway, New Jersey], 2014.
- [35] Schuijbroek, J.; Hampshire, R. C.; van Hoes, W.-J.: Inventory rebalancing and vehicle routing in bike sharing systems. In: European Journal of Operational Research 257 (2017) 3, S. 992–1004.
- [36] Lin, J.-R.; Yang, T.-H.: Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. In: Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 47 (2011) 2, S. 284–294.
- [37] Neumann-Saavedra, B. A.; Crainic, T. G.; Gendron, B.; Mattfeld, D.; Römer, M.: Service Network Design of Bike Sharing Systems with Resource Constraints. URL: <http://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2016-33.pdf>. Abrufdatum 05.10.2018. 2016.
- [38] Chiariotti, F.; Pielli, C.; Zanella, A.; Zorzi, M.: A Dynamic Approach to Rebalancing Bike-Sharing Systems. URL: www.mdpi.com/1424-8220/18/2/512/pdf. Abrufdatum 05.10.2018. Basel. 2018.

- [39] Fricker, C.; Gast, N.; Mohamed, H.: Mean field analysis for inhomogeneous bike sharing systems. URL: <https://hal.inria.fr/hal-01086055/document>. Abrufdatum 05.10.2018. Montreal, 2012.
- [40] Kek, A. G.H.; Cheu, R. L.; Meng, Q.; Fung, C. H.: A decision support system for vehicle relocation operations in carsharing systems. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 45 (2009) 1, S. 149–158.
- [41] Pfrommer, J.; Warrington, J.; Schildbach, G.; Morari, M.: Dynamic Vehicle Redistribution and Online Price Incentives in Shared Mobility Systems. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 15 (2014) 4, S. 1567–1578.
- [42] George, D. K.; Xia, C. H.: Fleet-sizing and service availability for a vehicle rental system via closed queueing networks. In: *European Journal of Operational Research* 211 (2011) 1, S. 198–207.
- [43] Ji, S.; Cherry, C. R.; Han, L. D.; Jordan, D. A.: Electric bike sharing. Simulation of user demand and system availability. In: *Journal of Cleaner Production* 85 (2014), S. 250–257.
- [44] Abagnale, C.; Cardone, M.; Iodice, P.; Strano, S.; Terzo, M.; Vorraro, G.: Power requirements and environmental impact of a pedelec. A case study based on real-life applications. In: *Environmental Impact Assessment Review* 53 (2015), S. 1–7.
- [45] Schramm, D.; Hiller, M.; Bardini, R.: *Vehicle Dynamics. Modeling and Simulation*: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer. Berlin, Heidelberg, 2014.
- [46] Wilson, D. G.; Papadopoulos, J.; Whitt, F. R.: *Bicycling science*, 3rd ed.: MIT Press. Cambridge, Massachusetts, 2004.
- [47] Bedrunka, A.; Gusig, L.-O.: Multidimensional Parameter Space for an Individual Prediction of the Range in the Field of Pedelects. In: *Wessex Institute of Technology (Hrsg.): Sustainable development*. Southampton, 2016.
- [48] Bedrunka, A.; Gusig, L.-O.: *Application of a Multidimensional Parameter Space for an Optimized Pedelec Dimensioning*. Galway, 2015.
- [49] Küçükay, F.; Kassel, T.; Eghtessad, M.; Kollmer, H.: *Requirement Engineering Using the 3D Method: SIAT 2011*, 2011.
- [50] *Alta Planning + Design: Electric Bicycle Share. Feasibility Study*. New York City, New York, 2015.

- [51] van Schalkwijk, W. A.; Scrosati, B.: *Advances in lithium-ion batteries*: Kluwer Academic/Plenum Publishers. New York, New York, 2002.
- [52] Broussely, M.; Biensan, P.; Bonhomme, F.; Blanchard, P.; Herreyre, S.; Nechev, K.; Staniewicz, R. J.: Main aging mechanisms in Li ion batteries. In: *Journal of Power Sources* 146 (2005) 1-2, S. 90–96.
- [53] Jiang, J.; Zhang, C.: *Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles*: John Wiley & Sons Inc. Singapore, 2015.
- [54] Keil, P.; Schuster, S. F.; Wilhelm, J.; Travi, J.; Hauser, A.; Karl, R. C.; Jossen, A.: Calendar Aging of Lithium-Ion Batteries. In: *Journal of The Electrochemical Society* 163 (2016) 9, A1872-A1880.
- [55] Lin, C.; Tang, A.; Mu, H.; Wang, W.; Wang, C.: Aging Mechanisms of Electrode Materials in Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles. In: *Journal of Chemistry* 2015 (2015) 4, S. 1–11.
- [56] Spotnitz, R.: Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries. In: *Journal of Power Sources* 113 (2003) 1, S. 72–80.
- [57] Tschöke, H.: *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Basiswissen*: Springer Vieweg. Wiesbaden, 2015.
- [58] Wang, J.; Liu, P.; Hicks-Garner, J.; Sherman, E.; Soukiazian, S.; Verbrugge, M.; Tataria, H.; Musser, J.; Finamore, P.: Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells. In: *Journal of Power Sources* 196 (2011) 8, S. 3942–3948.
- [59] Vetter, J.; Novák, P.; Wagner, M. R.; Veit, C.; Möller, K.-C.; Besenhard, J. O.; Winter, M.; Wohlfahrt-Mehrens, M.; Vogler, C.; Hammouche, A.: Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. In: *Journal of Power Sources* 147 (2005) 1–2, S. 269–281.
- [60] Jaguemont, J.; Boulon, L.; Venet, P.; Dube, Y.; Sari, A.: Lithium-Ion Battery Aging Experiments at Subzero Temperatures and Model Development for Capacity Fade Estimation. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 65 (2016) 6, S. 4328–4343.
- [61] Schmalstieg, J.; Käbitz, S.; Ecker, M.; Sauer, D. U.: From Accelerated Aging Tests to a Lifetime Prediction Model: Analyzing Lithium-Ion Batteries. *The 27th International Electric Vehicle Symposium & Exhibition*. 17.11. - 20.11.2013. Barcelona, 2013.

- [62] Wosnitza, F.: Energieeffizienz und Energiemanagement. Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten: Vieweg+Teubner Verlag. Wiesbaden, 2012.
- [63] Moseley, P. T.; Garche, J.; Adelman, P.: Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing: Elsevier. Amsterdam, Netherlands, 2015.
- [64] Scrosati, B.; Garche, J.; Tillmetz, W.: Advances in battery technologies for electric vehicles: Woodhead Publishing Series in Energy, 2015.
- [65] Prada, E.; Di Domenico, D.; Creff, Y.; Bernard, J.; Sauvant-Moynot, V.; Huet, F.: Physics-based modelling of LiFePO-graphite Li-ion batteries for power and capacity fade predictions: Application to calendar aging of PHEV and EV: 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2012.
- [66] Chung, K.-J.; Hsiao, C.-C.: Accelerated Degradation Assessment of 18650 Lithium-Ion Batteries: 2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), 2012.
- [67] Li, J.; Murphy, E.; Winnick, J.; Kohl, P.A.: Studies on the cycle life of commercial lithium ion batteries during rapid charge–discharge cycling. In: Journal of Power Sources 102 (2001) 1-2, S. 294–301.
- [68] Ye, Y.; Shi, Y.; Cai, N.; Lee, J.; He, X.: Electro-thermal modeling and experimental validation for lithium ion battery. In: Journal of Power Sources 199 (2012), S. 227–238.
- [69] Bhushan, B.: Applied Scanning Probe Methods XIII. Biomimetics and Industrial Applications: Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg, 2009.
- [70] Kostecki, R.; McLarnon, F.: Microprobe study of the effect of Li intercalation on the structure of graphite. In: Journal of Power Sources 119-121 (2003), S. 550–554.
- [71] Li, J.; Zhang, J.; Zhang, X.; Yang, C.; Xu, N.; Xia, B.: Study of the storage performance of a Li-ion cell at elevated temperature. In: Electrochimica Acta 55 (2010) 3, S. 927–934.
- [72] Yazami, R.; Ozawa, Y.; Gabrisch, H.; Fultz, B.: Mechanism of electrochemical performance decay in LiCoO₂ aged at high voltage. In: Electrochimica Acta 50 (2004) 2-3, S. 385–390.
- [73] Matsumura, Y.: Mechanism Leading to Irreversible Capacity Loss in Li Ion Rechargeable Batteries. In: Journal of The Electrochemical Society 142 (1995) 9, S. 2914.

- [74] Ning, G.; Popov, B. N.: Cycle Life Modeling of Lithium-Ion Batteries. In: Journal of The Electrochemical Society 151 (2004) 10, A1584.
- [75] Pistoia, G.; Antonini, A.; Rosati, R.; Zane, D.: Storage characteristics of cathodes for Li-ion batteries. In: Electrochimica Acta 41 (1996) 17, S. 2683–2689.
- [76] Aurbach, D.: A short review of failure mechanisms of lithium metal and lithiated graphite anodes in liquid electrolyte solutions. In: Solid State Ionics 148 (2002) 3–4, S. 405–416.
- [77] Murakami, M.; Yamashige, H.; Arai, H.; Uchimoto, Y.; Ogumi, Z.: Association of paramagnetic species with formation of LiF at the surface of LiCoO₂. In: Electrochimica Acta 78 (2012), S. 49–54.
- [78] Anseán, D.; Dubarry, M.; Devie, A.; Liaw, B. Y.; García, V. M.; Viera, J. C.; González, M.: Fast charging technique for high power LiFePO₄ batteries. A mechanistic analysis of aging. In: Journal of Power Sources 321 (2016), S. 201–209.
- [79] Gao, Y.; Jiang, J.; Zhang, C.; Zhang, W.; Ma, Z.; Jiang, Y.: Lithium-ion battery aging mechanisms and life model under different charging stresses. In: Journal of Power Sources 356 (2017), S. 103–114.
- [80] Zhang, S. S.: The effect of the charging protocol on the cycle life of a Li-ion battery. In: Journal of Power Sources 161 (2006) 2, S. 1385–1391.
- [81] Abousleiman, R.; Al-Refai, A.; Rawashdeh, O.: Charge Capacity Versus Charge Time in CC-CV and Pulse Charging of Li-Ion Batteries: SAE Technical Paper Series, 2013.
- [82] Yin, M.; Cho, J.; Park, D.: Pulse-Based Fast Battery IoT Charger Using Dynamic Frequency and Duty Control Techniques Based on Multi-Sensing of Polarization Curve. In: Energies 9 (2016) 3, S. 209.
- [83] Wilamowski, B. M.; Irwin, J. D. (Hrsg.): Power Electronics and Motor Drives, 2016.
- [84] Sterner, M.; Stadler, I. (Hrsg.): Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. Berlin, 2017.
- [85] Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin, Heidelberg, 2013.

- [86] Choi, S. S.; Lim, H. S.: Factors that affect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on LiCoO₂. In: *Journal of Power Sources* 111 (2002) 1, S. 130–136.
- [87] He, L.; Kim, E.; Shin, K. G.: *-Aware charging of lithium-ion battery cells. URL: http://dl.acm.org/ft_gateway.cfm?id=2984490&type=pdf. 2016.
- [88] Panasonic: NCR18650F Lithium Ion - Datenblatt, Version 13.11 R1, 2012.
- [89] Keil, P.; Jossen, A.: Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life—An experimental study with different 18650 high-power cells. In: *Journal of Energy Storage* 6 (2016), S. 125–141.
- [90] Abdel-Monem, M.; Trad, K.; Omar, N.; Hegazy, O.; van den Bossche, P.; van Mierlo, J.: Influence analysis of static and dynamic fast-charging current profiles on ageing performance of commercial lithium-ion batteries. In: *Energy* 120 (2017), S. 179–191.
- [91] Khan, A. B.; Pham, V.-L.; Nguyen, T.-T.; Choi, W.: Multistage constant-current charging method for Li-Ion batteries. In: *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, A.-P. (Hrsg.): ITEC 2016. 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific) : June 1-4, 2016, BEXCO, Busan, Korea. Piscataway, NJ, 2016.*
- [92] Europäische Union: Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0094>. Abrufdatum 22.11.2018. 2014.
- [93] Srinivasan, R.; Carson Baisden, A.; Carkhuff, B. G.; Butler, M. H.: The five modes of heat generation in a Li-ion cell under discharge. In: *Journal of Power Sources* 262 (2014), S. 93–103.
- [94] Wang, Q.; Ping, P.; Zhao, X.; Chu, G.; Sun, J.; Chen, C.: Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. In: *Journal of Power Sources* 208 (2012), S. 210–224.
- [95] Ramadass, P.; Haran, B.; White, R.; Popov, B. N.: Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures. In: *Journal of Power Sources* 112 (2002) 2, S. 606–613.

- [96] Somerville, L.; Bareño, J.; Trask, S.; Jennings, P.; McGordon, A.; Lyness, C.; Bloom, I.: The effect of charging rate on the graphite electrode of commercial lithium-ion cells: A post-mortem study. In: *Journal of Power Sources* 335 (2016), S. 189–196.
- [97] Pistoia, G.: *Lithium-ion batteries. Advances and applications*, First edition: Elsevier. Amsterdam, 2014.
- [98] Burke, A.: *Fast Charging (up to 6C) of Lithium-Ion Cells and Modules: Lithium-Ion Batteries*, 2014.
- [99] Deng, D.: Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. In: *Energy Science & Engineering* 3 (2015) 5, S. 385–418.
- [100] Feng, X.; Fang, M.; He, X.; Ouyang, M.; Lu, L.; Wang, H.; Zhang, M.: Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry. In: *Journal of Power Sources* 255 (2014), S. 294–301.
- [101] Peng, X.; Garg, A.; Zhang, J.; Shui, L.: Thermal management system design for batteries packs of electric vehicles. A survey: 2017 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT). 24-26 Oct. 2017. [Piscataway, NJ], [Piscataway, NJ], 2017.
- [102] Garche, J.; Dyer, C. K.; Moseley, P. T.; Ogumi, Z.; Rand, D.A.J.; Scrosati, B.: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*: Elsevier Science, 2013.
- [103] Dinçer, İ.; Hamut, H. S.: *Thermal management of electric vehicle battery systems*: John Wiley & Sons Inc. Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2017.
- [104] Weicker, P.: *A systems approach to lithium-ion battery management*: Artech House Publishers, 2013.
- [105] Muneer, T.; Kolhe, M.; Doyle, A.: *Electric Vehicles*: Elsevier Science. Saint Louis, 2017.
- [106] Bossel, H.: *Modellbildung und Simulation: Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme*: Vieweg+Teubner Verlag, 2013.
- [107] Citi Bike: NYC's Official Bike Sharing System. URL: <https://www.citibikenyc.com/>. Abrufdatum 28.01.2019. New York City. 2019.

- [108] Citi Bike: Citi Bike Monthly Operating Reports. URL: <https://www.citi-bikenyc.com/system-data/operating-reports>. Abrufdatum 22.11.2018. New York City, New York. 2018.
- [109] Indego: Philly's Bike Share. URL: <https://www.rideindego.com/>. Abrufdatum 28.01.2019. Philadelphia. 2019.
- [110] Indego: Trip Data. URL: <https://www.rideindego.com/about/data/>. Abrufdatum 22.11.2018. Philadelphia. 2018.
- [111] Capital Bikeshare: Metro DC's bikeshare service. URL: <https://www.capital-bikeshare.com/>. Abrufdatum 28.01.2019. Washington D.C. 2019.
- [112] Capital Bikeshare: System Data - Trip History Data. URL: <https://www.capital-bikeshare.com/system-data>. Abrufdatum 22.11.2018. Washington, DC. 2018.
- [113] Kausche, M.: Wirtschaftlichkeit schwimmender Offshore Windenergieanlagen: Wirtschaftlich-technische Untersuchungen und Kostensenkungspotenziale: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [114] Benesch, T.: Schlüsselkonzepte zur Statistik: die wichtigsten Methoden, Verteilungen, Tests anschaulich erklärt: Spektrum Akademischer Verlag, 2012.
- [115] Bosch eBike Systems: Der eBike Akku-Guide. Feel the Flow. URL: https://www.bosch-ebike.com/fileadmin/EBC/Service/Downloads/Akku_Guide/Akku_Guide_August_2019/Bosch-eBike-Battery-Guide-MY2019-DE.pdf?_=1535448291. Abrufdatum 11.10.2018. Reutlingen. 2018.
- [116] Samsung SDI Co., Ltd. Battery Business Division: Specification of Product for Lithium-ion Rechargeable Cell. Model: INR18650-29E. Korea. 2012.
- [117] UNI-T: Model UT803. Operating Manual. URL: https://www.pinsonne-elektronik.de/media/daten/Uni-T_UT803_Eng_Manual_PinSonne.pdf. Abrufdatum 29.09.2018. Kwun Tong Kowloon, Hong Kong. 2004.
- [118] DIAS Infrared System: PYROVIEW 640L. Hochauflösende Wärmebildkamera. URL: http://www.dias-infrared.de/pdf/pyroview640l_ger_mail.pdf. Abrufdatum 29.09.2018. Dresden. 2016.
- [119] LG Chem: Technical information of 18650 MG1 (2900mAh). URL: <https://de.slideshare.net/ssuserac8c5d/lg-mg1-2900m-ah>. Abrufdatum 02.11.2018. Seoul, Südkorea. 2012.

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

C	Intervallgrenze
e	Breite des Konfidenzintervalls
E_{Akku}	Energieinhalt des Akkus
E_{ist}	gespeicherte Energie im Akku
E_{Lade}	Ladeenergie
F_A	absoluter Messfehler (Strom)
f_A	relativer Messfehler (Strom)
F_E	absoluter Messfehler (Energie)
F_U	absoluter Messfehler (Spannung)
f_U	relativer Messfehler (Spannung)
i	Laufvariable für potentielle Kunden
I_{Akku}	Akkustrom
I_{Lade}	Ladestrom
j	Laufvariable für Pedelecs
k	Laufvariable für Mietvorgänge
K_{Akku}	unzufriedene Kunden durch unzureichend geladene Akkus
K_{miet}	Kunden, die ein Pedelec gemietet haben
K_{Pedelec}	unzufriedene Kunden durch fehlende Pedelecs
K_{pot}	potentielle Kunden
\dot{K}_{pot}	potentielle Kunden pro Pedelec
$K_{\text{Rückgabe}}$	unzufriedene Kunden durch einen leeren Akku bei der Rückgabe
$K_{\text{Station_voll}}$	unzufriedene Kunden durch volle Station bei der Rückgabe
$K_{\text{unzufrieden}}$	Gesamtanzahl der unzufriedenen Kunden
$K_{\text{zufrieden}}$	Zufriedene Kunden
l	Polynomgrad

N	Stichprobengröße / Simulationsläufe
n_{Pedelegs}	Pedelegs pro Station
$n_{\text{Pedelegs,neu}}$	neue Anzahl an Pedelegs zum Servicegraderhalt
$n_{\text{Pedelegs,verf}}$	verfügbare Pedelegs
p_1, p_2, \dots, p_i	Regressionsparameter
P_{Akku}	Akkuleistung
\bar{P}_{Akku}	durchschnittliche Akkuleistung
P_{Lade}	Ladeleistung
R^2	Bestimmtheitsmaß
S^2	Korrigierte Stichprobenvarianz
SG_{Akku}	Teilservicegrad Akku
$SG_{\text{Betreiber}}$	Servicegrad (Betreiberansatz)
SG_{ges}	Servicegrad
$\overline{SG}_{\text{ges}}$	durchschnittlicher Servicegrad
SG_{Pedelec}	Teilservicegrad Pedelec
SG_{Sim}	Servicegrad (Simulationsansatz)
SOC	State of Charge
SOC_{min}	minimal notwendiger SOC
t_{Anfrage}	Zeitpunkt einer Kundenanfrage
t_{Ende}	Simulationsende
t_{fahrt}	Fahrtdauer
t_{ges}	Beobachtungsdauer
t_{Lade}	Ladedauer
t_{miet}	Mietdauer
\bar{t}_{miet}	durchschnittliche Mietdauer
$t_{n-1, 1-\alpha/2}$	Quantil der t-Verteilung mit (N-1) Freiheitsgraden
$t_{\text{Pause,max}}$	Maximalpausenzeit
$t_{\text{Pause,min}}$	Mindestpausenzeit
t_{Service}	Zeit in der die Station für Service zur Verfügung steht
t_{Start}	Simulationsstart

T_{Akku}	Temperatur an der Außenschale des Akkus
$T_{\text{Akku,innen}}$	Temperatur im Akku
$T_{\text{Akku,max}}$	maximale Temperatur an der Außenschale des Akkus
T_U	Umgebungstemperatur
$U_1, U_2, \dots U_i$	Zellspannung
U_{Akku}	Akkuspannung
U_{BMS}	Spannung zur Aktivierung des BMS
U_{Lade}	Ladespannung
Γ	Funktionswert (Gamma-Verteilung)
η_P	Effizienz
α	Reeller Parameter (Gamma-Verteilung)
β	Reeller Parameter (Gamma-Verteilung)
$\Delta \bar{t}_{\text{Anfrage}}$	durchschnittliche Zeit zwischen zwei Anfragen
$\mu_{A,1} / \mu_{A,2}$	Erwartungswert der Normalverteilungen für den Anfragezeitpunkt
μ_P	Erwartungswert der Normalverteilung für die durchschnittliche Akkuleistung pro Fahrt
$\sigma_{A,1} / \sigma_{A,2}$	Varianz der Normalverteilungen für den Anfragezeitpunkt
σ_P	Varianz der Normalverteilung für die durchschnittliche Akkuleistung pro Fahrt

Abkürzungen

BMS	Batteriemanagementsystem
C	C-Rate / Entladerate
FVS	Fahrradvermietsystem
PVS	Pedelec-Vermietsystem
SOC	State of Charge

Anhang

Anhang A: Pseudocode für die Unterprogramme des Simulationsmodells	138
Anhang B: Parameterwerte und Bestimmtheitsmaß für die Regressionsfunktion zur Bestimmung des minimal notwendigen SOC.....	139
Anhang C: Spannungs- und Stromverläufe für den Entladevorgang des <i>PowerPacks</i>	141

Anhang A: Pseudocode für die Unterprogramme des Simulationsmodells

```

1 function Ladevorgang
2   Pedelec_matrix // Übersicht aller Pedelecs im Systems mit
3   for 1 to  $n_{\text{Pedelec}}$  // für die Gesamtanzahl  $n_{\text{Pedelec}}$  durchlaufen
4     if Pedelec steht an der Station & SOC kleiner 100 %
5       Energie im Akku wird nach hinterlegter Ladekurve erhöht
6     end
7   end
8 end

1 function Mietvorgang
2   Pedelec_matrix // Übersicht aller Pedelecs im Systems
3   for 1 to  $n_{\text{Pedelec}}$  // für die Gesamtanzahl  $n_{\text{Pedelec}}$  durchlaufen
4     if Pedelec vermietet
5       Energie im Akku in Abhängigkeit von  $\bar{P}_{\text{Akku}}$  reduzieren
6        $t_{\text{Miet}}$  um eine Minute reduzieren
7       if  $t_{\text{Miet}}$  gleich null
8         Pedelec als „an der Station vorhanden“ kennzeichnen
9         if Energie im Akku kleiner 0
10          Anzahl unzufriedener Kunde  $K_{\text{Rückgabe}}$  um 1 erhöhen
11          Energie im Akku auf 0 setzen
12        end
13      end
14    end
15  end
16 end

1 function Kundenanfrage
2   Pedelec_matrix // Übersicht aller Pedelecs im Systems
3    $K_{\text{pot}}(t_{\text{Anfrage}})$  // potentielle Kunden zum Zeitpunkt einer Anfrage
4   for i = 1 bis  $K_{\text{pot}}(t_{\text{Anfrage}})$ 
7     if kein Pedelec an der Station vorhanden
8       Anzahl unzufriedener Kunde  $K_{\text{Pedelec}}$  um eins erhöhen
9     elseif Pedelec verfügbar & SOC des Akkus kleiner  $SOC_{\text{min}}$ 
10      Anzahl unzufriedener Kunde  $K_{\text{Akku}}$  um eins erhöhen
11    else // ein Pedelec steht für den Mietvorgang zur Verfügung
12      Pedelec als nicht verfügbar kennzeichnen
13      Pedelec einen Wert für  $\bar{P}_{\text{Akku}}$  auf Basis der Dichtefunktion zuordnen
14      Pedelec einen Wert für  $t_{\text{Miet}}$  auf Basis der Dichtefunktion zuordnen
15    end
16  end
17 end

```

Anhang B: Parameterwerte und Bestimmtheitsmaß für die Regressionsfunktion zur Bestimmung des minimal notwendigen SOC

Tabelle B.1: Parameter der Regressionsfunktion für den durchschnittlichen Servicegrad in Abhängigkeit von SOC_{\min} und dem zugehörigen Maximum für $I_{Lade} = 4$ A und verschiedenen $n_{Pedelec}$

$n_{Pedelec}$	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	R^2	$\max(SOC_{\min})$
1	-1,762	3,214	-2,146	0,5775	0,3164	0,9948	24,63 %
2	-2,458	4,386	-2,865	0,7553	0,5083	0,9958	24,19 %
3	-2,716	4,716	-2,968	0,7421	0,6533	0,9965	22,42 %
4	-2,683	4,493	-2,689	0,6251	0,7662	0,9972	20,22 %
5	-2,542	4,099	-2,311	0,4846	0,8527	0,997	17,33 %
6	-2,369	3,692	-1,951	0,3571	0,9151	0,9971	14,14 %
7	-2,203	3,35	-1,675	0,2687	0,9555	0,9965	11,72 %
8	-2,122	3,22	-1,569	0,2344	0,9774	0,9954	10,61 %

Tabelle B.2: Parameter der Regressionsfunktion für den durchschnittlichen Servicegrad in Abhängigkeit von SOC_{\min} und dem zugehörigen Maximum für $I_{Lade} = 6,4$ A und verschiedenen $n_{Pedelec}$

$n_{Pedelec}$	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	R^2	$\max(SOC_{\min})$
1	-1,728	3,077	-1,99	0,5101	0,3603	0,9957	22,87 %
2	-1,938	3,277	-2,084	0,5398	0,5759	0,9977	23,82 %
3	-1,956	3,164	-1,921	0,4679	0,7273	0,9987	21,85 %
4	-1,765	2,659	-1,485	0,3228	0,8361	0,9998	18,73 %
5	-1,783	2,61	-1,329	0,237	0,9075	0,9991	13,86 %
6	-1,89	2,811	-1,388	0,2214	0,9491	0,997	11,69 %
7	-2,008	3,062	-1,498	0,2271	0,9715	0,9928	10,84 %
8	-2,116	3,33	-1,648	0,2508	0,9824	0,9836	10,85 %

Tabelle B.3: Parameter der Regressionsfunktion für den durchschnittlichen Servicegrad in Abhängigkeit von SOC_{\min} und dem zugehörigen Maximum für $I_{Lade} = 11,4$ A und verschiedenen $n_{Pedelec}$

$n_{Pedelec}$	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	R^2	$\max(SOC_{\min})$
1	-1,195	1,847	-1,069	0,2637	0,4021	0,9943	25,32 %
2	-1,595	2,364	-1,283	0,2867	0,6298	0,9933	21,36 %
3	-1,695	2,395	-1,175	0,2179	0,7792	0,994	15,67 %
4	-1,743	2,449	-1,145	0,1817	0,8726	0,995	12,08 %
5	-1,725	2,423	-1,087	0,1513	0,929	0,9959	9,97 %
6	-1,707	2,467	-1,123	0,1561	0,96	0,9961	9,87 %
7	-1,652	2,463	-1,149	0,1655	0,9763	0,9949	10,30 %
8	-1,562	2,392	-1,138	0,1668	0,9852	0,9911	10,47 %

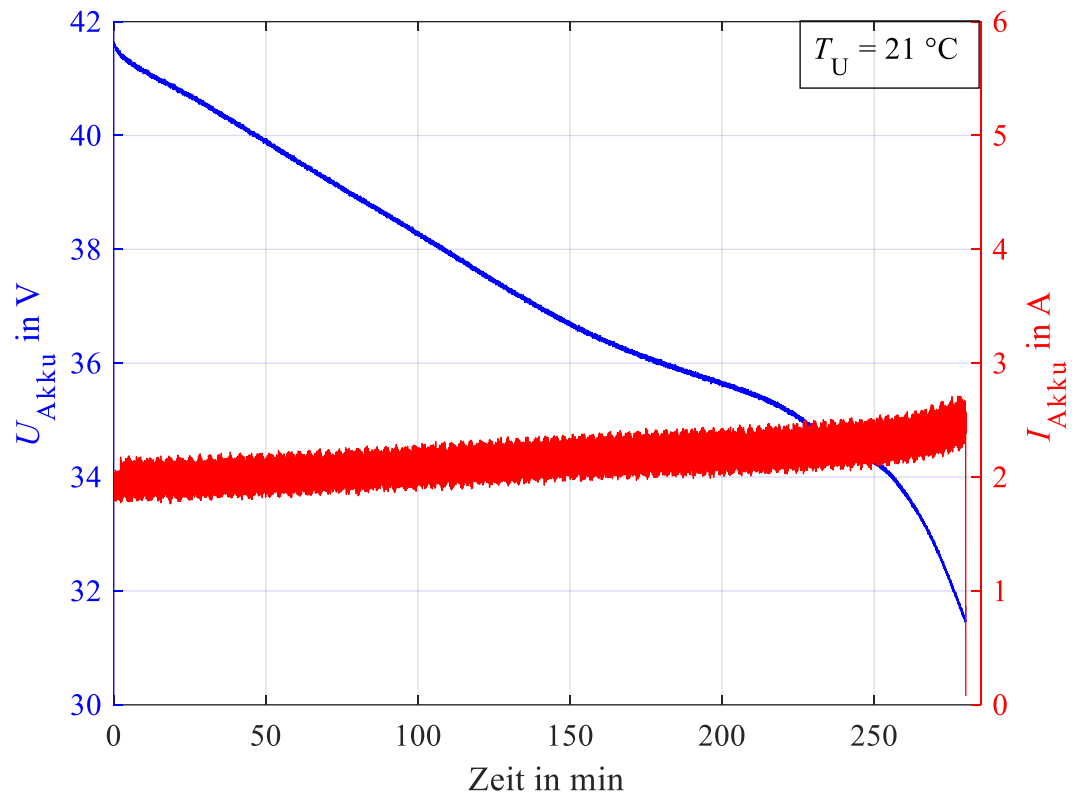
Anhang C: Spannungs- und Stromverläufe für den Entladevorgang des *PowerPacks*

Abbildung C.1: I_{Akku} und U_{Akku} über der Zeit für den Entladevorgang des *PowerPacks* nach dem Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 6\text{ A}$

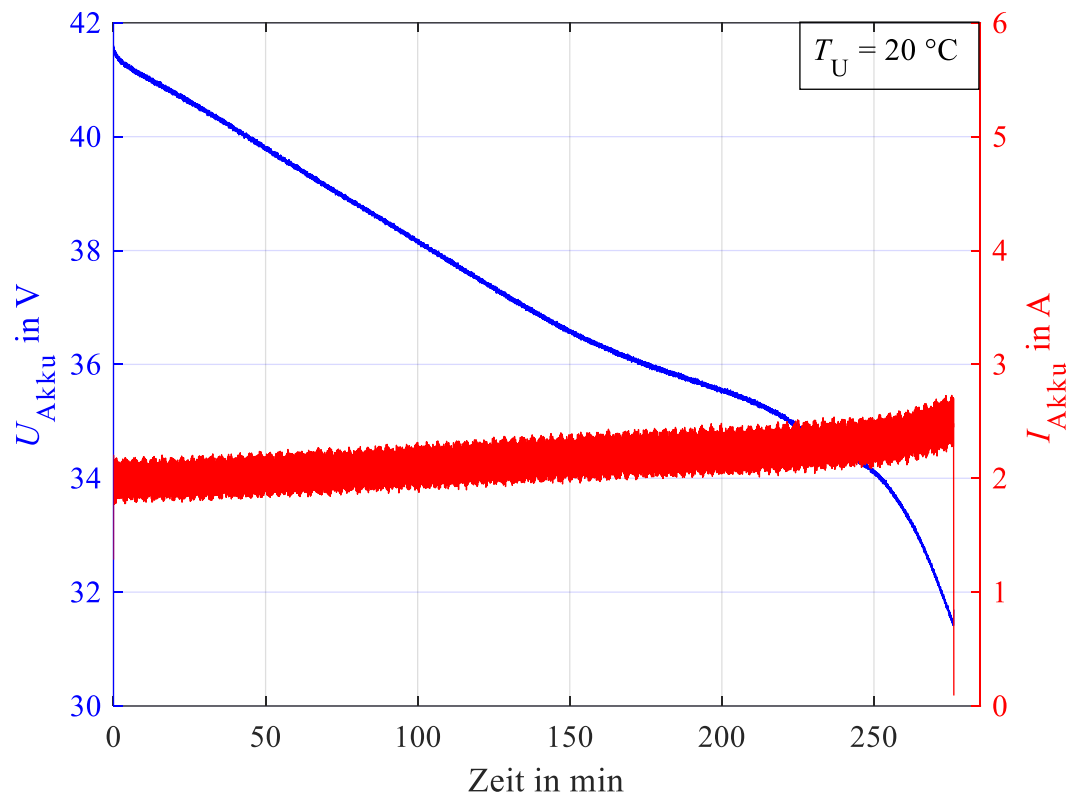


Abbildung C.2: I_{Akku} und U_{Akku} über der Zeit für den Entladevorgang des *PowerPacks* nach dem Ladevorgang mit $I_{\text{Lade}} = 6,4$