

Arthur Beitler

Erhöhung der Reichweite von Elektrofahrzeugen durch eine bewusste Energieoptimierung mittels Thermomanagement und Fahrerbeeinflussung

disserta

Verlag

Beitler, Arthur: Erhöhung der Reichweite von Elektrofahrzeugen durch eine bewusste Energieoptimierung mittels Thermomanagement und Fahrerbeeinflussung. Hamburg, disserta Verlag, 2016

Buch-ISBN: 978-3-95935-216-1

PDF-eBook-ISBN: 978-3-95935-217-8

Druck/Herstellung: disserta Verlag, Hamburg, 2016

Covermotiv: © Uladzimir Bakunovich – Fotolia.com

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden und die Diplomica Verlag GmbH, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Alle Rechte vorbehalten

© disserta Verlag, Imprint der Diplomica Verlag GmbH
Hermannstal 119k, 22119 Hamburg
<http://www.disserta-verlag.de>, Hamburg 2016
Printed in Germany

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich besonders für die Unterstützung und die Betreuung dieses Werkes bei Dipl.-Ing. Thomas Behrmann, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), und bei Dipl.-Ing. Robert Kuhfuss, Projektleiter für elektrische Antriebe beim Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen, bedanken.

Für die Gutachtung und Bewertung meines Werkes bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Gerald Ströbel, Institutsleiter des BIMAQ, und bei Prof. Dr.-Ing. Matthias Busse, Institutsleiter des Institutsteils Formgebung und Funktionswerkstoffe des Fraunhofer IFAM.

Für die freundliche Bereitstellung des Versuchsfahrzeugs sowie die fachinformativen Gespräche bedanke ich mich bei Dipl.-Kfm. Markus Spiekermann, Markus Funke, Carlos Freund und der Move About GmbH in Bremen sowie ihren Mitarbeitern.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie und meiner Ehefrau, die mich während der Bearbeitungszeit dieses Werkes herzlich und moralisch unterstützen.

Kurzfassung

Erste Elektrofahrzeuge konnten sich am Automobilmarkt etablieren. Um den Kunden mit Elektrofahrzeugen zu sensibilisieren, sollten neben der Sicherheit die Zuverlässigkeit, die Reichweite und der Komfort von Elektrofahrzeugen sichergestellt werden. Gegenwärtig kann ein Zielkonflikt zwischen einer möglichst hohen Reichweite und möglichst geringen Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen identifiziert werden, da eine Erhöhung der Batteriekapazität zumeist mit einem Anstieg der Kosten verbunden ist.

Ziel dieses Buches ist es, intelligente Maßnahmen mittels Thermomanagement und Fahrerbeeinflussung aufzuzeigen, mit denen der Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs gezielt beeinflusst werden kann, um eine möglichst effiziente Energienutzung der Traktionsbatterie in Elektrofahrzeugen zu erreichen. Eine Minderung des Energieverbrauchs kann eine Verringerung der benötigten Batteriekapazität bei gleichbleibender Reichweite erlauben, wodurch Kostensenkungen bei Elektrofahrzeugen ermöglicht werden könnten.

In diesem Buch wird eine für die Versuchsdurchführung jeweils praktikable Maßnahme zum Thermomanagement und zur Fahrerbeeinflussung ausgewählt. Eine Auswertung von aufgezeichneten Fahrtdaten erlaubt eine Darstellung der Energieverbräuche des Elektrofahrzeugs sowie der aufgezeichneten Fahrstile des Fahrers während der Versuchsdurchführung.

Über Vergleichsfahrten sollen somit Aussagen zur eingesparten Energiemenge beim Fahren auf einer definierten Teststrecke jeweils für eine durchgeführte Maßnahme dargestellt werden. Hieraus sollen besonders in Bezug für Carsharing-Systeme, aber auch für den privaten Besitzer eines Elektrofahrzeugs, Empfehlungen für Maßnahmen zur bewussten Energieoptimierung abgeleitet werden.

Schlagwörter:

Elektrofahrzeug, Thermomanagement, Fahrerbeeinflussung, Reichweite, Eco-Driving, Energieoptimierung, Carsharing.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
Inhaltsverzeichnis	5
Bildverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Einleitung und Zielsetzung	11
2 Stand der Technik und der Wissenschaft.....	13
2.1 Elektrofahrzeug	13
2.1.1 Batteriebetriebenes elektrisches Fahrzeug (BEV)	13
2.1.2 Grundlagen und Stand der Technik	13
2.1.3 Energieverbrauch und Reichweite	17
2.1.4 Batteriekapazität und -kosten.....	20
2.2 Thermomanagement bei BEV	21
2.2.1 Technische Ansätze zum Thermomanagement	21
2.2.2 Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums.....	25
2.3 Fahrerbeeinflussung	30
2.3.1 Beeinflussbarkeit des Fahrers	30
2.3.2 Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine.....	32
2.3.3 Fahrstil	34
2.3.4 Eco-Driving	36
2.4 Szenarien der Fahrzeugnutzung	38
2.4.1 Szenario des klassischen Fahrzeugbesitzers	39
2.4.2 Szenario des BEV bei einem konventionellen Carsharing	39
3 Versuchskonzeption.....	41
3.1 Fahrzeug und Teststrecke.....	41
3.1.1 Fahrzeug.....	41
3.1.2 Teststrecke	42
3.2 Erfassung von Fahrtdaten.....	43
3.2.1 Geschwindigkeit	44
3.2.2 Fahrstrecke.....	45
3.2.3 Beschleunigung.....	46

3.2.4	Leistung der Traktionsbatterie	46
3.2.5	Energieverbrauch der Traktionsbatterie	46
3.2.6	Verifizierung von Fahrtdaten mittels Nissan CARWINGS.....	47
3.3	Bewertung und Auswahl von Versuchsmaßnahmen.....	48
3.3.1	Maßnahmen zum Thermomanagement	48
3.3.2	Maßnahmen zur Fahrerbeeinflussung.....	49
3.4	Planung von Versuchsreihen.....	50
4	Auswertung.....	53
4.1	Energiekurven der elektrischen Verbraucher im Fahrzeuginnenraum.....	53
4.1.1	Heizung und Klimaanlage	53
4.1.2	Lüfter und Heckscheibenentfrostung.....	56
4.2	Energieverbrauch des BEV in Abhängigkeit von der momentanen Geschwindigkeit.....	58
4.3	Einfahrphase für Fahrten auf der Teststrecke	62
4.4	Fahrstile beim Fahren auf der Teststrecke	66
4.4.1	Aggressiver Fahrstil.....	67
4.4.2	Eco-Fahrstil.....	68
4.4.3	Vergleich zwischen aggressivem Fahrstil und Eco-Fahrstil.....	68
4.5	Energieverbrauch des BEV beim Fahren auf der Teststrecke.....	70
4.6	Vorklimatisierung des BEV	73
4.6.1	Fahrzeugheizung.....	74
4.6.2	Fahrzeugklimaanlage	78
4.7	Unterstütztes Eco-Driving beim Fahren auf der Teststrecke	80
5	Diskussion	93
5.1	Thermomanagement.....	94
5.2	Fahrerbeeinflussung	97
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	103
	Literaturverzeichnis	106

Bildverzeichnis

Bild 1:	Schematische Darstellung möglicher Designvariationen bei BEV	14
Bild 2:	Schematischer Vergleich der Energiespeicher bei EV und bei konventionellen Fahrzeugen.....	17
Bild 3:	Vergleich der Masseverteilung im BEV gegenüber dem konventionellen Fahrzeug	18
Bild 4:	Schematische Darstellung technischer Ansätze zum energieeffizienten Thermomanagement	22
Bild 5:	Temperaturfeld des menschlichen Körpers ohne Bekleidung nach längerem Aufenthalt in kalter (A; 20 °C) und warmer (B; 35 °C) Umgebung.	26
Bild 6:	Schematische Darstellung einer zonenweisen Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums.....	27
Bild 7:	Beispiele innovativer Ansätze zum körpernahen Klimatisieren	28
Bild 8:	Schematische Darstellung körpernaher Klimatisierung mittels integrierter Infrarotflächenheizern	29
Bild 9:	Schematische Darstellung einer Variante zur Fahrerinformation mittels Head-Up-Display.....	33
Bild 10:	BEV Nissan Leaf.....	41
Bild 11:	Ausgewählte Fahrstrecke zur Versuchsdurchführung.....	43
Bild 12:	Verifizierung von aufgezeichneten Fahrtdaten mittels Nissan CARWINGS ..	47
Bild 13:	Gegenüberstellung des Leistungsverlaufs von der elektrischen Heizung und der Klimaanlage bei Volllast während 10 Minuten Aufnahmezeit	54
Bild 14:	Gegenüberstellung des Energieverbrauchs von der elektrischen Heizung und der Klimaanlage bei Volllast während 10 Minuten Aufnahmezeit	55
Bild 15:	Leistungsverlauf der Lüftung mit eingeschalteter Heckscheibenentfrostung bei Volllast während 10 Minuten Aufnahmezeit.....	57
Bild 16:	Gegenüberstellung der momentanen Batterieleistung und des momentanen Energieverbrauchs zur Fahrzeuggeschwindigkeit von 0 bis 140 km/h während beider Fahrzeiten	59
Bild 17:	Gegenüberstellung der gemittelten Fahrtdaten beider aufgezeichneter Fahrten mit den Geschwindigkeitsbereichen 0 bis 70 km/h (Fahrt 1) und 70 bis 140 km/h (Fahrt 2)	60
Bild 18:	Geschwindigkeitsverlauf eines neuen Fahrers über 10 Runden Teststrecke...	62
Bild 19:	Abweichungen der mittleren Batterieleistung sowie des Verbrauchs pro Runde zum jeweiligen Gesamtmittelwert über 10 Runden Teststrecke eines neuen Fahrers.....	64
Bild 20:	Abweichungen der mittleren Geschwindigkeit pro Runde sowie der Rundenzeit zum jeweiligen Gesamtmittelwert über 10 Runden Teststrecke eines neuen Fahrers	65
Bild 21:	Geschwindigkeitsverlauf über 5 Runden Teststrecke mit aggressivem Fahrstil.....	67

Bild 22:	Geschwindigkeitsverlauf über 5 Runden Teststrecke mit Eco-Fahrstil	68
Bild 23:	Gegenüberstellung der durchschnittlichen Kennwerte beider Fahrstile gemittelt pro Runde	69
Bild 24:	Gegenüberstellung der verbrauchten Energiemengen der Fahrten jeweils mit und ohne eingeschaltete elektrische Verbraucher über 5 Runden Teststrecke	71
Bild 25:	Vergleich beider Fahrten jeweils mit und ohne eingeschaltete elektrische Verbraucher	72
Bild 26:	Gegenüberstellung des Leistungsverlaufs der elektrischen Heizung jeweils mit und ohne Vorklimatisierung während 20 Minuten Aufnahmezeit.....	74
Bild 27:	Gegenüberstellung des Energieverbrauchs der elektrischen Heizung jeweils mit und ohne Vorklimatisierung während 20 Minuten Aufnahmezeit.....	76
Bild 28:	Vergleich der verbrauchten Energiemengen durch die elektrische Heizung jeweils mit und ohne Vorklimatisierung nach 5, 10 und 20 Minuten Aufnahmezeit	77
Bild 29:	Gegenüberstellung des Leistungsverlaufs der elektrischen Klimaanlage jeweils mit und ohne Vorklimatisierung während 20 Minuten Aufnahmezeit	78
Bild 30:	Gegenüberstellung des Energieverbrauchs der elektrischen Klimaanlage jeweils mit und ohne Vorklimatisierung während 20 Minuten Aufnahmezeit	79
Bild 31:	Vergleich der verbrauchten Energiemengen durch die elektrische Klimaanlage jeweils mit und ohne Vorklimatisierung nach 5, 10 und 20 Minuten Aufnahmezeit.....	80
Bild 32:	Überblick des Sichtbereichs des Fahrers über die Informationsanzeigen im Nissan Leaf.....	81
Bild 33:	Digitale Eco-Driving-Anzeige mit wachsenden Tannenbäumen beim Nissan Leaf.....	82
Bild 34:	Digitaler Balken zur Leistungsanzeige mit Kreisen beim Nissan Leaf.....	83
Bild 35:	Digitaler Balken zum momentanen Energieverbrauch mit der Anzeige zum durchschnittlichen Energieverbrauch pro 100 km beim Nissan Leaf	84
Bild 36:	Display mit Energieinformation beim Nissan Leaf.....	84
Bild 37:	Überblick des Sichtbereichs des Fahrers über die Informationsanzeigen und ein Tablet zum Betrachten der Apps im Nissan Leaf.....	85
Bild 38:	Zwei verwendete Beschleunigungsmesser-Apps zur Eco-Driving-Unterstützung während der Testfahrt	86
Bild 39:	Gegenüberstellung der App-Anzeige und der verbrauchten Energiemenge einer jeweiligen Runde während der Testfahrt.....	87
Bild 40:	Gegenüberstellung der Rundenzeit und der mittleren Rundengeschwindigkeit während der Testfahrt	88
Bild 41:	Gegenüberstellung des gemittelten Durchdrückens des Gaspedals und der mittleren Batterieleistung einer jeweiligen Runde während der Testfahrt.....	89
Bild 42:	Gegenüberstellung der Fahrtdaten jeweils gemittelt über die ersten 5 Runden und über die letzten 5 Runden der Testfahrt	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Experimentelle Ermittlung des Geschwindigkeitsquotienten.....	45
Tabelle 2:	Maßnahmenbewertung zum Thermomanagement.....	48
Tabelle 3:	Maßnahmenbewertung zur Fahrerbeeinflussung.....	49

Abkürzungsverzeichnis

BIMAQ	Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft
BMS	Batterie-Management-System
BEV	Batteriebetriebenes Elektrofahrzeug, Englisch: Battery Electric Vehicle
CAN-Bus	Englisch: Controller Area Network - Binary Unit System
E-Motor	Elektromotor
E-Pkw	Elektro-Personenkraftwagen
EV	Elektrofahrzeug, Englisch: Electric Vehicle
GPS	Globales Positionsbestimmungssystem, Englisch: Global Positioning System
HMI	Schnittstelle Mensch und Maschine, Englisch: Human Machine Interface
IFAM	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
Pkw	Personenkraftwagen
USB	Universal Serial Bus

1 Einleitung und Zielsetzung

Im Zuge des globalen Ziels einer stetigen CO₂-Reduzierung zur Schonung der Umwelt und der Entwicklung einer konsequenten Nachhaltigkeit erleben elektrifizierte Fahrzeuge zurzeit eine Renaissance [Bul2013]. Durch den technischen Fortschritt werden Elektrofahrzeuge und ihre technischen Komponenten ständig weiter entwickelt, um in die nächste Stufe einer nachhaltigen Mobilität übergehen zu können [Dol2013]. Die deutsche Automobilindustrie prognostiziert einen starken Anstieg ihrer Produktion von Elektrofahrzeugen und liegt mit ihrer Modellvielfalt an Elektrofahrzeugen im internationalen Vergleich aktuell im vorderen Bereich [McK2014, Rot2014].

Erste gewerbliche Flottenverbände von Elektrofahrzeugen können bereits identifiziert werden [Aut2013-3M, Aut2013-BS, NPE2013, Rot2014]. Im Automobilbereich wird an leistungsfähigeren Batterien sowie an effizienteren Fahrzeugkomponenten geforscht, um die Reichweite von Elektrofahrzeugen zu erhöhen [Bra2012OVE, Hra2011, Spa2014]. Nach dem heutigen Stand der Technik nimmt die Traktionsbatterie einen hohen Kosten- und Masseanteil beim Elektrofahrzeug ein und sollte deshalb sehr effizient genutzt werden [VDA2011B].

Bedingt durch die im Vergleich zum konventionellen Antrieb wesentlich geringere Abwärme des Antriebsstrangs bei Elektrofahrzeugen fehlt ein Großteil dieser Abwärme zum Beheizen des Fahrzeuginnenraums und wird daher notwendigerweise durch elektrische Heizsysteme, welche über die Fahrzeugbatterie versorgt werden, kompensiert [Kla2011, Weh2011]. Ein hoher thermischer Fahrkomfort und eine hohe Reichweite des Fahrzeugs können somit zu einem Zielkonflikt führen, da die Anforderungen an Energieeffizienz einerseits und die Komfortansprüche des Fahrers andererseits weiter ansteigen können.

Das beim heutigen Stand der Technik konventionelle elektrische Heizen sowie Kühlen des Fahrzeuginnenraums kann die Reichweite eines Elektrofahrzeugs bei besonders ungünstigen Bedingungen um Größenordnungen von bis zu 50 % erheblich verringern [Cha2012, Lan2011]. In Literatur und Wissenschaft wurden bisher wenige Ansätze zu intelligenten Lösungen zur Reichweitenerhöhung mittels eines gezielten Thermomanagements diskutiert [Ack2013, Cha2012, Fle2014, Har2011, Wir2013].

Durch gezielte thermische Isolationen der Fahrzeugzelle konnten bereits Energieeinsparungen im Sinne des Thermomanagements untersucht werden [Jen2012, Wir2013]. Ein optimiertes Klimaanlage-System, welches selektiv die besetzten Sitzplätze im Fahrzeuginnenraum eines Elektrofahrzeugs beheizt, konnte ebenfalls bei Testzyklen im Vergleich zu herkömmlichen Systemen eine Energieeinsparung um 20 % und eine Reich-

weitererhöhung um 9 % bewirken [Cha2012]. Durch eine Kombination von Flächenheizungen im Fahrzeuginnenraum und einer Kältemittel/Wasser-Wärmepumpe zur Nutzung der Abwärme von wesentlichen Komponenten eines Elektrofahrzeugs wie der Batterie, wurde experimentell eine Reichweiterhöhung durch eine gezielte energieeffiziente Klimatisierung erreicht [Ack2013]. Daher könnten intelligente Maßnahmen zum Thermomanagement wertvolle Potenziale einer Energieoptimierung und Reichweiterhöhung insbesondere bei Elektrofahrzeugen aufzeigen.

Die Beeinflussung des Fahrstils beim Fahrer kann als ein weiteres Potenzial der Energieoptimierung identifiziert werden. Besonders bei Elektrofahrzeugen wirkt sich der Fahrstil des Fahrers direkt auf den Energieverbrauch des Fahrzeugs aus und kann bei aggressivem Fahrstil im Vergleich zu einem energiesparsamen Fahrstil die Fahrkosten für den Fahrer um über 30 % erhöhen [Bin2012].

In der Literatur können Versuchsdurchführungen zur Beeinflussung des Fahrstils mittels technisch günstig implementierbaren Smartphone-Apps identifiziert werden. Der Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs konnte bei realen Versuchsfahrten unter Einsatz einer Fahrstil-App um 20 bis 30 % gesenkt werden [Cor2013]. Fahrer konnten ihre persönlichen Eco-Driving-Punkte bei weiteren Versuchsfahrten durchschnittlich um 16,8 % erhöhen und dadurch ihren energieeffizienten Fahrstil verbessern [Fra2013].

Folglich könnten Maßnahmen bezüglich des Thermomanagements und der Fahrerbeeinflussung intelligente Lösungen ermöglichen, mit denen der Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs gezielt beeinflusst werden kann, um eine möglichst effiziente Energienutzung der Traktionsbatterie in Elektrofahrzeugen zu erzielen. Eine Minderung des Energieverbrauchs könnte eine Verringerung der benötigten Batteriekapazität bei gleichbleibender Reichweite erlauben, wodurch Kostensenkungen bei Elektrofahrzeugen erzielt werden könnten.

In diesem Buch wird für die Versuchsdurchführung jeweils eine praktikable Maßnahme zum Thermomanagement und zur Fahrerbeeinflussung ausgewählt. Eine Auswertung von aufgezeichneten Fahrtdaten erlaubt eine Darstellung der Energieverbräuche des Elektrofahrzeugs sowie der aufgezeichneten Fahrstile des Fahrers während der Versuchsdurchführung.

Über Vergleichsfahrten sollen hierdurch Aussagen zur eingesparten Energiemenge beim Fahren auf einer definierten Teststrecke jeweils für eine durchgeführte Maßnahme dargestellt werden. Hieraus sollen insbesondere in Bezug auf Carsharing-Systeme, aber auch für private Besitzer eines Elektrofahrzeugs, Empfehlungen für Maßnahmen zur bewussten Energieoptimierung abgeleitet werden.