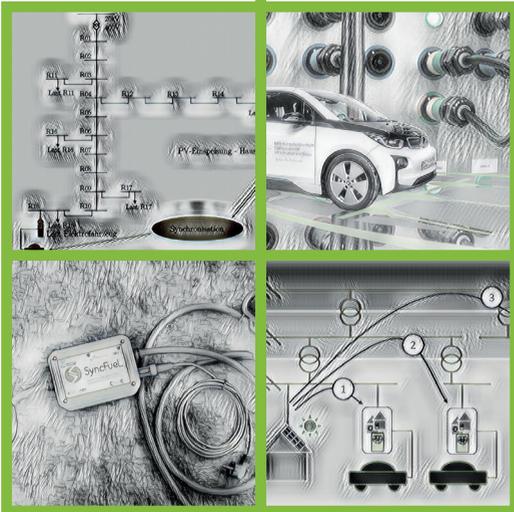


Jonas Maasmann

# Die Virtuelle Direktleitung für den Entfernten Eigenverbrauch durch Elektrofahrzeuge

Band 9



# Die Virtuelle Direktleitung für den Entfernten Eigenverbrauch durch Elektrofahrzeuge

Bei der  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der  
Technischen Universität Dortmund  
eingereichte

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jonas Maasmann  
aus Dülmen

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz  
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld  
Tag der mündlichen Prüfung: 8. Januar 2019



Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen,  
Energieeffizienz und Energiewirtschaft

herausgegeben von:  
Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz und  
Prof. Dr.-Ing. Johanna Myrzik

Band 9

**Jonas Maasmann**

**Die Virtuelle Direktleitung für den Entfernten  
Eigenverbrauch durch Elektrofahrzeuge**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag  
Aachen 2019

**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.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6537-4

ISSN 2567-2908

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Diese Arbeit entstand begleitend zu meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie<sup>3</sup>) an der Technischen Universität Dortmund. Hier erlebte ich eine ausgesprochen offene, freie und kommunikative Atmosphäre, welche kreatives und zielführendes Arbeiten ermöglichte. Besonderen Dank gilt vor allem Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz zum einen für die Betreuung dieser Arbeit aber auch vor allem für das große Vertrauen, welches Christian stets in mich und meine Arbeit gesetzt hat, so dass ich mich frei und eigenverantwortlich mit Inhalten der Energieforschung, sowie deren Lösungen beschäftigen konnte.

Auch meinen engsten Kollegen und Kolleginnen in der Forschergruppe Smart Grid Technology Lab und E-Mobility möchte ich ebenfalls für die sehr gute Zusammenarbeit danken. Außerdem danke ich allen Projektpartnern und Studenten, welche ich als Hilfskräfte oder Abschlussarbeiter betreuen durfte, für die inhaltlich sehr interessanten gemeinsamen Forschungsarbeiten.

Ferner danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Schlussendlich danke ich meinen Freunden und meiner Familie für den großen Rückhalt und die Ermutigungen, welche ich beim Projekt Dissertation von dieser Stelle erhalten habe sowie für die tatkräftige Unterstützung bei der Schlussredaktion.

Dortmund, im Januar 2019

„Dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält.“

Johann Wolfgang von Goethe (1749 - 1832)



# Kurzfassung

Elektrofahrzeuge werden in Zukunft einen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen leisten. Die Herausforderung besteht unter anderem darin, die Elektrofahrzeuge mit klimaneutraler Energie aus dem Stromnetz zu laden. Die Arbeit untersucht den Forschungsansatz der Virtuellen Direktleitung für den Entfernten Eigenverbrauch. Bei diesem Ansatz wird mit einer Leistungssynchronisation ein virtueller Leitungskanal durch das Verteilnetz generiert, welcher Erneuerbare Energien von der Erzeugung zu dem Verbrauch transportiert. Die Leistungssynchronisation erfolgt bei dem Entfernten Eigenverbrauch durch die Nutzung des Flexibilitätpotentials beim Laden von Elektrofahrzeugen.

In dieser Arbeit werden zuerst die relevanten Grundlagen hergeleitet, woraufhin der Forschungsansatz der Virtuellen Direktleitung für unterschiedliche Anwendungsfälle definiert wird. Im Anschluss wird ein Konzept für den Anwendungsfall Entfernter Eigenverbrauch abgeleitet und analysiert. Anhand dieser Beispielanwendungsfälle zeigt eine Simulation die lokalen und globalen Auswirkungen der Virtuellen Direktleitung auf die Stromnetze und es werden die dynamischen Randbedingungen abgeleitet. Abschließend wird die technische Umsetzbarkeit des hergeleiteten Konzepts anhand eines prototypischen Aufbaus in einem Labor- und Feldversuch vorgeführt.

Zusammenfassend werden die Ergebnisse hinsichtlich der Eignung der Virtuellen Direktleitung für den Entfernten Eigenverbrauchs bewertet, Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Virtuellen Direktleitung in einem möglichen regulatorischem Rahmen abgeleitet und ein Ausblick auf andere Anwendungsfälle der Virtuellen Direktleitung gegeben.

# Abstract

In the future, electric vehicles will make a contribution to reducing greenhouse gas emissions. The challenge is to charge electric vehicles with climate-neutral energy from the power grid. This thesis presents the Virtual-Direct-Link for remote self-consumption. In this approach, a virtual link is defined for the distribution network using synchronisation of power, transporting renewable energies from generation to consumption. In the case of Remote-Self-Consumption, the synchronisation of generated and consumed power is carried out by exploiting the flexibility potential when charging electric vehicles.

In this thesis, the relevant basics are specified first, whereupon the research approach of the Virtual Direct Link for different application cases is defined. Subsequently, a concept for the application case Remote-Self-Consumption is defined and analysed. Based on this example application, a simulation shows the local and global effects of the Virtual-Direct-Link on the power grids and derives the dynamic boundary conditions. Finally, the technical feasibility of the deduced concept is demonstrated through a laboratory experiment and a field test using a prototype system. In summary, the results are evaluated considering the suitability of the Virtual-Direct-Link for Remote-Self-Consumption, recommendations for the implementation of the Virtual-Direct-Link are identified in a possible regulatory framework and an outlook on other applications of the Virtual-Direct-Link is given.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Ziele und Struktur . . . . .	4
1.3	Abgrenzung . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Grundlagen zur Netzintegration von Elektrofahrzeugen</b>	<b>9</b>
2.1	Relevante Grundlagen für das Laden von Elektrofahrzeugen	9
2.1.1	Vergleich der Antriebskonzepte von Elektrofahrzeugen	9
2.1.2	Grundlagen zu Batteriespeichern für Elektrofahrzeuge	11
2.1.3	Herleitung des Ladeverhalten von Lithiumbatterien	14
2.1.4	Darstellung des Flexibilisierungspotential von Batteriespeichern . . . . .	17
2.2	Grundlagen zu Elektrofahrzeugen im Verteilnetz . . . . .	18
2.2.1	Beschreibung des netzdienlichen Ladens und Systemdienstleistungen . . . . .	22
2.2.2	Einordnung von Elektrofahrzeugen als Teil komplexer Energiesysteme . . . . .	24
2.2.3	Darstellung des Einspeiseverhaltens von Erneuerbare-Energien-Anlagen . . . . .	29
2.3	Grundlagen zu Ladeinfrastruktur, Informations- und Kommunikationstechnik . . . . .	34
2.3.1	Ableitung der Anforderungen an die Ladeinfrastruktur	34
2.3.2	Übersicht über die Kommunikationsgrundlagen für Ladeinfrastruktur . . . . .	38
2.3.3	Überblick über die Informationssicherheit in der Elektromobilität . . . . .	41
2.3.4	Alternative Kommunikationsverfahren im Verteilnetz	43
2.4	Grundlagen zu den energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Elektromobilität . . . . .	47
2.4.1	Auflistung der Gesetze und Verordnungen . . . . .	47
2.4.2	Darstellung der relevanten Marktrolle . . . . .	50
2.4.3	Übersicht über Abrechnungskonzepte . . . . .	50

<b>3</b>	<b>Definition der Virtuellen Direktleitung</b>	<b>53</b>
3.1	Anwendungsfall Entfernter Eigenverbrauch . . . . .	54
3.2	Beschreibung weiterer Anwendungsfälle . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Konzeptionierung und Analyse des Gesamtsystems Entfernter Eigenverbrauch über die Virtuelle Direktleitung</b>	<b>59</b>
4.1	Energiewirtschaftliche Prozessbeschreibung des Entfernten Eigenverbrauchs . . . . .	61
4.1.1	Aufstellen eines Marktrollenmodells . . . . .	62
4.1.2	Herleitung der Prozesse und Marktkommunikationen	64
4.1.3	Einordnung in den gesetzlichen Rahmen . . . . .	66
4.1.4	Anpassung von verursachergerechten Entgelten für den Entfernten Eigenverbrauch . . . . .	67
4.2	Eichrechtliche Einordnung des Entfernten Eigenverbrauchs	70
4.3	Konzeptionierung eines Lademanagements für den Entfernten Eigenverbrauch . . . . .	73
4.3.1	Spannungsregelung als Teil eines Lademanagements	74
4.3.2	Engpassmanagement als Teil eines Lademanagements	77
4.3.3	Benutzer- und marktorientierte Laderegelung als Teil eines Lademanagements . . . . .	79
4.3.4	Die Virtuelle Direktleitung als Teil eines Lademanagements . . . . .	84
4.4	Elektrotechnische Anforderungen an den Entfernten Eigenverbrauch . . . . .	86
4.4.1	Elektrotechnische Analyse der Einspeiseseite . . . . .	86
4.4.2	Elektrotechnische Analyse der Ausspeiseseite . . . . .	87
4.5	Kommunikationstechnische Anforderungen an den Entfernten Eigenverbrauch . . . . .	88
4.5.1	Kommunikationstechnische Analyse der Einspeiseseite	88
4.5.2	Kommunikationstechnische Analyse der Ausspeiseseite	90
4.5.3	Analyse der Back-End-Funktionen . . . . .	90

<b>5</b>	<b>Auswirkungen der Virtuellen Direktleitung auf das Verteilnetz</b>	<b>93</b>
5.1	Analyse der globalen Auswirkungen und Lastgangskennlinien	94
5.1.1	Ermittlung des Mobilitätsverhaltens anhand von Mobilitätsdaten . . . . .	95
5.1.2	Referenzladeprofile für ungesteuertes Laden . . . . .	98
5.1.3	Ladeprofile für synchronisiertes Laden . . . . .	99
5.1.4	Bewertung der globalen Auswirkungen von Virtuellen Direktleitungen . . . . .	104
5.2	Analyse der lokalen Auswirkungen auf das Verteilnetz . . .	106
5.2.1	Anforderungen an die Netzanalysen und Simulationsszenarien . . . . .	106
5.2.2	Auswirkungen auf die Leistungsflüsse und Spannungen	112
5.2.3	Dynamische Modellierung des Gesamtsystems . . .	117
5.2.4	Bewertung des dynamischen Verhaltens von Virtuellen Direktleitungen . . . . .	123
<b>6</b>	<b>Validierung im Smart-Grid-Technology-Lab und Feldtest</b>	<b>129</b>
6.1	Prototypischer Aufbau des Gesamtsystems . . . . .	130
6.1.1	Abbildung der Einspeiseseite über das intelligente Messsystem . . . . .	131
6.1.2	Abbildung der Ausspeiseseite über einen SyncMeter	131
6.1.3	Kommunikation und Back-End-System für den prototypischen Aufbau . . . . .	135
6.2	Systemtests im Smart-Grid-Technology-Lab . . . . .	136
6.2.1	Versuchsaufbau End-to-End-Test . . . . .	137
6.2.2	Versuchsaufbau zur Netzdurchleitung . . . . .	141
6.3	Feldtest des Gesamtsystems Entfernter Eigenverbrauch . .	144
6.4	Bewertung der realen Systeme . . . . .	148
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>149</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	149
7.2	Handlungsempfehlungen und Ausblick . . . . .	151
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>155</b>

Abkürzungs- und Formelverzeichnis	171
Abbildungsverzeichnis	179
Tabellenverzeichnis	183
A Anhang	i
B Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis	xi