

**Eine kundennutzenfokussierte techno-ökonomische Analyse  
der dynamischen Wechselwirkungen zwischen  
Elektrofahrzeug, Photovoltaikanlage, Heimspeicherbatterie und Elektrizitätsnetz  
mit System Dynamics**

Dissertation

zur  
Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieur

der  
Fakultät für Maschinenbau  
der Ruhr-Universität Bochum

von  
**Daniel Kurt Jandt**  
aus Ahlen (Westf.)

Bochum 2016

Dissertation eingereicht am: 14. November 2016

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Dezember 2016

Erste Referentin: Prof. Dr.-Ing. K. Laurischkat

Zweiter Referent: Prof. Dr.-Ing. H. Meier

Schriftenreihe der Juniorprofessur Product-Service Systems

Herausgeberin  
Prof. Dr.-Ing. Katja Laurischkat

Band 2/2017

**Daniel Jandt**

**Eine kundennutzenfokussierte techno-ökonomische  
Analyse der dynamischen Wechselwirkungen  
zwischen Elektrofahrzeug, Photovoltaikanlage,  
Heimspeicherbatterie und Elektrizitätsnetz  
mit System Dynamics**

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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.: Bochum, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5088-2

ISSN 2511-5707

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)

## Liste der Veröffentlichungen

- [1] Laurischkat, Katja; Jandt, Daniel (accepted extended abstract): Techno-economic analysis of sustainable mobility and energy solutions composed of electric vehicles, photovoltaic systems and battery storages. In: *Journal of Cleaner Production*.
- [2] Laurischkat, Katja; Jandt, Daniel; Viertelhausen, Arne (2016): Dienstleistungsorientierte Geschäftsmodelle für die Elektromobilität. In: Thomas, O.; Nüttgens, M.; Fellmann, M. (Hrsg.): *Smart Service Engineering – Konzepte und Anwendungsszenarien für die digitale Transformation*. Springer Gabler Verlag, S. 258–281. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-16262-7\\_12](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-16262-7_12)
- [3] Laurischkat, Katja; Jandt, Daniel (2016): Business Model Prototyping for Electric Mobility and Solar Power Solutions. In: *Procedia CIRP* 48, S. 307–312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.026>
- [4] Laurischkat, Katja; Viertelhausen, Arne; Jandt, Daniel (2016): Business Models for Electric Mobility. In: *Procedia CIRP* 47, S. 483–488. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.042>
- [5] Jandt, Daniel; Laurischkat, Katja (2016): Understanding the interplay between exploration and exploitation in the data-driven servitization of manufacturing firms. In: *Proceedings of the 34th International Conference of the System Dynamics Society*, Delft, NL.
- [6] Laurischkat, Katja; Viertelhausen, Arne; Jandt, Daniel (2015): Geschäftsmodelle für die Elektromobilität. Ein dienstleistungsorientierter Ansatz für die multifunktionale Nutzung von Elektrofahrzeugen. In: *wt Werkstattstechnik online* 105 (7/8), S. 549–554.



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Juniorprofessur Product-Service Systems der Ruhr-Universität Bochum.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Katja Laurischkat für die wissenschaftliche Förderung und die große Freiheit, die sie mir bei der Erstellung meiner Dissertation eingeräumt hat. Ich danke ihr sehr für das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing Horst Meier, dem langjährigen Leiter des Lehrstuhls für Produktionssysteme, danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit und die freundliche Übernahme des Koreferates.

Besonderer Dank gilt meinem Kollegen Herrn Dr.-Ing. Arne Viertelhausen für die freundschaftliche Zusammenarbeit. Zudem möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Mario Boßlau für die stets hilfreichen Diskussionen im Bereich System Dynamics bedanken.

Mein Dank gilt zudem meinen studentischen Hilfskräften Marta Kaus und Joanna Sanders für die geleistete Arbeit und ihre stetige Unterstützung.

Ich möchte mich ebenfalls bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Produktionssysteme für das angenehme Arbeitsklima bedanken.

Mein größter Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden für ihren sehr starken Rückhalt.

Ahlen, im Januar 2017

Daniel Jandt





## Kurzzusammenfassung

Aufgrund der technologischen Synergien zwischen Elektrofahrzeugen, Photovoltaikanlagen, Heimspeicherbatterien und dem Elektrizitätsnetz verschmelzen die Automobil- und die Energieindustrie zunehmend miteinander. Für Unternehmen besteht zum einen bei der Entwicklung von Mobilitäts- und Energielösungen die Herausforderung, die eigene Wettbewerbsfähigkeit gegenüber komplexen Konkurrenzangeboten sicherzustellen. Zum anderen besteht beim Vertrieb derartiger Lösungen die Schwierigkeit, geeignete Zielkunden zu identifizieren und den realisierbaren Kundennutzen zu kommunizieren.

Um eine Transparenz der dynamischen Wechselwirkungen der Technologien und der hieraus resultierenden Potenziale zur Stiftung eines ökonomischen Kundennutzens zu schaffen, wurde eine techno-ökonomische Analyse auf Basis von System Dynamics durchgeführt. Das in dieser Arbeit entwickelte systemdynamische Modell umfasst kundenspezifische Mobilitätsprofile, Haushaltslastprofile und Photovoltaikeinspeiseprofile in viertelstündiger Auflösung. Zudem wurden geschwindigkeitsabhängige Verbräuche von Elektro- und Verbrennungsfahrzeugen sowie verschiedene Photovoltaikanlagenleistungen und Heimspeicherkapazitäten berücksichtigt. Die Modellvalidität wurde anhand vertrauensbildender Tests sichergestellt. Hierbei ist vor allem der Abgleich der Simulationsergebnisse mit Literaturwerten des Autarkiegrades und der Eigenverbrauchsquote zu nennen, welcher nur geringfügige Abweichungen gezeigt hat. Schließlich wurden zwei ökonomische Szenarien erstellt, um die Wirtschaftlichkeit der Lösungen für unterschiedliche Strom-, Kraftstoff-, Heimspeicher- und Fahrzeugkosten zu bewerten.

Auf Basis der Simulationsstudien konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden: Erstens werden Elektrofahrzeuge zunächst für jene Kunden wirtschaftlich attraktiv sein, die selten auf der Autobahn fahren und eine Photovoltaikanlage besitzen. Für Pendler, die ihr Fahrzeug nicht am Arbeitsplatz laden können, wird selbst bei steigenden Kraftstoffpreisen das Verbrennungsfahrzeug das wirtschaftlichere Fortbewegungsmittel bleiben. Dies liegt zum einen an dem Fahrstromverbrauch von Elektrofahrzeugen, der stark von der Geschwindigkeit abhängig ist, und zum anderen an dem photovoltaischen Fahrstromanteil. Somit ist die Langstreckentauglichkeit von Elektrofahrzeugen auch zukünftig aus rein ökonomischer Sicht und unabhängig von dem Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur kritisch zu bewerten. Zweitens wirken sich Elektrofahrzeuge maßgeblich auf die kostenoptimalen technischen Spezifikationen von Photovoltaikanlagen und Heimspeicherbatterien aus. Dies sollte bereits heute bei der Auslegung neuer Systeme berücksichtigt werden, auch wenn die Nutzung eines Elektrofahrzeugs erst in Zukunft erfolgt. Drittens können Elektrofahrzeuge zum einen die Einspeisespitzen von Photovoltaikanlagen deutlich reduzieren und zum anderen die Bezugsspitzen zur Ladung des Fahrzeugs in für den Netzbetreiber unkritische Zeiten verschieben. Diese positiven Effekte begründen sich darin, dass die Kapazität der Traktionsbatterie bereits heute deutlich größer ist, als sie zur Erfüllung der alltäglichen Mobilitätsbedürfnisse eines Großteils der Bevölkerung sein müsste. Durch eine Heimspeicherbatterie kann die Netzverträglichkeit zusätzlich gesteigert werden.

Die Arbeit grenzt sich vom bestehenden Schrifttum ab, indem sie konsequent eine Kundensicht einnimmt und die ökonomischen Potenziale der technologischen Synergien quantifiziert.

**Schlagwörter: Elektromobilität, Erneuerbare Energien, Diffusion von Technologien**



## Abstract

The technological synergies between electric vehicles, photovoltaic systems, battery storages and the power grid are the cause for the merging of the automotive and the energy industry. On the one hand, the design of mobility and energy solutions poses a challenge to companies which want to ensure their competitiveness with regard to complex competing offers. On the other hand, those companies are faced with the challenge of identifying the target customers and communicating the realizable customer value.

In order to provide transparency of both the dynamic technology interactions and the resulting potential for creating economic customer value, a techno-economic analysis based on System Dynamics has been conducted. The simulation model developed in this thesis comprises customer specific mobility profiles, load profiles of households and photovoltaic generation profiles in quarter-hourly resolution. Moreover, speed-dependent vehicle consumption data, various photovoltaic system performances and battery storage capacities are regarded. The model validity is ensured by confidence-building tests. At this point it should be emphasized that the comparison of the simulation results with literature values for the degree of self-sufficiency and the own consumption rate has revealed only minor deviations. Also, two distinctive economic scenarios are created, enabling a profitability calculation of the technical solutions under consideration of varying electricity, fuel, battery storage and vehicle costs.

The conduct of the simulation studies results in three main conclusions. First, electric vehicles will initially be economically attractive for customers who rarely use highways and own a photovoltaic system. In contrast, commuters who are not able to charge their electric vehicle at work will be economically impelled to continue using internal combustion engine vehicles even if fuel costs increase. The reasons are the traction current consumption, which strongly depends on the speed, and the share of the photovoltaic traction current. Therefore, the long distance capability of electric vehicles has to be discussed critically in the future – not only because of the expansion of the public charging infrastructure, but also for economic reasons. Second, electric mobility has significant impacts on the cost-optimized technical specifications of photovoltaic systems and battery storages. This should already be taken into account today, even though an electric vehicle will only be purchased in the future. Third, electric vehicles are able to mitigate the peaks of grid feed-in, which are caused by solar power generation, and to shift the peaks of grid purchase to periods which are favoured by the grid operator. This possibility is based on the fact that the capacity of the traction battery is already much larger than it needs to be for fulfilling the everyday mobility needs of the major part of the population. Battery storages can strengthen those positive effects.

This thesis differs from the existing literature by taking a customer perspective on the afore-mentioned factors and by quantifying the economic potentials resulting from the technological synergies.

**Key words: electric mobility, renewable energies, diffusion of technologies**



# Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung .....	1
1.1.	Ausgangssituation .....	1
1.2.	Problemstellung.....	2
1.3.	Forschungsziel.....	3
1.4.	Aufbau der Arbeit.....	4
2.	Techno-ökonomische Grundlagen.....	6
2.1.	Diffusion der Technologien im Massenmarkt.....	7
2.1.1.	Mobilitäts- und Energiebedürfnisse in Deutschland .....	7
2.1.2.	Adaptionsfaktoren nach ROGERS .....	8
2.1.3.	Zielkunden integrierter Mobilitäts- und Energielösungen .....	9
2.2.	Elektrofahrzeuge und Heimladestationen .....	11
2.2.1.	Techno-ökonomische Grundlagen .....	12
2.2.2.	Staatliche Förderung .....	16
2.2.3.	Technologische Trends .....	16
2.2.4.	Marktdiffusion.....	16
2.3.	Photovoltaikanlagen.....	17
2.3.1.	Techno-ökonomische Grundlagen .....	18
2.3.2.	Staatliche Förderung .....	19
2.3.3.	Technologische Trends .....	19
2.3.4.	Marktdiffusion.....	20
2.4.	Heimspeicher.....	21
2.4.1.	Techno-ökonomische Grundlagen .....	22
2.4.2.	Staatliche Förderung .....	24
2.4.3.	Technologische Trends .....	25

2.4.4.	Marktdiffusion.....	25
2.5.	Netzintegration .....	26
2.5.1.	Der deutsche Energiemarkt .....	27
2.5.2.	Terminmarkt und Spotmarkt .....	29
2.5.3.	Regelleistungsmarkt .....	30
2.5.4.	Integrationspotenziale im Stromsektor.....	31
2.6.	Technologische Synergien .....	34
2.7.	Energiemanagement .....	35
2.7.1.	Energiemanagement des Elektrofahrzeugs .....	36
2.7.2.	Energiemanagement der Photovoltaikanlage .....	37
2.7.3.	Energiemanagement des Heimspeichers .....	37
2.8.	Zwischenfazit .....	38
3.	Geschäftsmodelle und System Dynamics .....	39
3.1.	Geschäftsmodelle .....	40
3.1.1.	Geschäftsmodelle für Product-Service Systems.....	40
3.1.2.	Total Cost of Ownership .....	41
3.1.3.	Kapitalwertmethode .....	42
3.1.4.	Bestehende Geschäftsmodelle für Mobilität und Energie .....	46
3.2.	System Dynamics.....	47
3.2.1.	Grundprinzip von System Dynamics .....	47
3.2.2.	Anwendung und Stärken von System Dynamics .....	48
3.2.3.	System Dynamics und Kybernetik.....	49
3.2.4.	Elemente von System Dynamics-Modellen .....	50
3.2.5.	Struktur und Verhalten .....	51
3.2.6.	Beispiel eines System Dynamics-Modells .....	52

3.2.7.	Erstellung von System Dynamics-Modellen.....	54
3.2.8.	Validierungstests .....	56
3.3.	Zwischenfazit .....	58
4.	Anforderungen an die techno-ökonomische Analyse.....	59
4.1.	Techno-ökonomische Anforderungen.....	59
4.2.	Diffusionstheoretische Anforderungen .....	60
4.3.	Zwischenfazit Kapitel 4 .....	60
5.	Stand der Forschung und Konkretisierung der Zielstellung .....	61
5.1.	Überblick bestehender Ansätze .....	61
5.1.1.	Gesamtbetriebskostenrechnung von Elektrofahrzeugen nach Wu et al. 2015 ....	62
5.1.2.	Gesamtbetriebskostenrechnung von Elektrofahrzeugen nach Hagman et al. 2016	62
5.1.3.	Kapitalwertbestimmung von Photovoltaikanlagen und Heimspeichern nach Hoppmann et al 2014.....	63
5.1.4.	Kapitalwertbestimmung von Photovoltaikanlagen und Heimspeichern nach Cucchiella et al. 2016 .....	63
5.1.5.	Rentabilitätsberechnung von Photovoltaikanlagen und Heimspeichern nach Truong et al. 2016.....	63
5.1.6.	Netzintegration von Elektrofahrzeugen nach Metz und Doetsch 2012 .....	64
5.1.7.	Netzintegration von Elektrofahrzeugen nach Schuller et al. 2015 .....	64
5.1.8.	Netzintegration von Heimspeichern nach VDE 2015 .....	64
5.1.9.	Energiemanagement von Elektrofahrzeugen und Photovoltaikanlagen nach Mierau et al. 2014.....	65
5.1.10.	Energiemanagement von Elektrofahrzeugen und Photovoltaikanlagen nach van der Kam und van Sark 2015 .....	65
5.1.11.	Preisbasiertes Energiemanagement von Elektrofahrzeugen nach Flath und Gottwalt 2016 .....	65
5.1.12.	Geschäftsmodelle zur Netzintegration von Elektrofahrzeugen nach IWES 2014/66	66

5.1.13. Geschäftsmodelle für Photovoltaikanlagen nach Strupeit und Palm 2016.....	66
5.2. Bewertung bestehender Ansätze .....	67
5.3. Schlussfolgerung und Konkretisierung der Zielstellung .....	70
6. Modellierung des techno-ökonomischen Systems .....	71
6.1. Betrachtungsraum von Mobilitäts- und Energielösungen .....	72
6.2. Übersicht der generischen Systemstruktur .....	73
6.3. Systemelemente.....	76
6.3.1. Traktionsbatterie.....	76
6.3.2. Antriebsstrang .....	76
6.3.3. Photovoltaikanlage .....	77
6.3.4. Heimspeicher.....	77
6.3.5. Elektrizitätsnetz.....	77
6.3.6. Haushaltsverbraucher .....	77
6.3.7. Verbrennungsfahrzeug .....	77
6.4. Energieflüsse .....	78
6.4.1. Bilanzierung der Energieflüsse .....	78
6.4.2. Energiemanagement .....	79
6.5. Invariante Eingangsgrößen.....	80
6.6. Technische Kennwerte .....	81
6.6.1. Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad .....	81
6.6.2. Photovoltaischer Fahrstrom.....	81
6.6.3. Zyklische Lebensdauer des Heimspeichers.....	82
6.6.4. Einspeise- und Bezugsspitzen .....	83
6.6.5. Potenzial zur Bereitstellung negativer Regelleistung.....	85
6.7. Ökonomisches System .....	87



6.7.1.	Total Cost of Ownership für Mobilität und Energie .....	87
6.7.2.	Ökonomische Parameter .....	88
6.7.3.	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Lösungstypen .....	89
6.7.4.	Zielkosten des Heimspeichers .....	90
6.8.	Bestands-Flussgrößen-Darstellung zentraler Modellbestandteile .....	91
6.9.	Zwischenfazit .....	93
7.	Simulation des techno-ökonomischen Systems.....	94
7.1.	Parametrisierung des Simulationsmodells.....	95
7.1.1.	Das Fahrprofil .....	95
7.1.2.	Das Haushaltslastprofil .....	96
7.1.3.	Das Photovoltaikprofil .....	97
7.1.4.	Elektrofahrzeug, Heimpladestation und Verbrennungsfahrzeug.....	98
7.1.5.	Photovoltaikanlage und Heimspeicher .....	99
7.1.6.	Festlegung des Energiemanagements.....	100
7.1.7.	Zusammenfassung des Betrachtungsraums der Simulation .....	102
7.1.8.	Szenarien der ökonomischen Kenngrößen .....	104
7.2.	Betrachtung der technischen Kennwerte.....	106
7.2.1.	Durchschnittlicher Verbrauch der Fahrzeuge.....	106
7.2.2.	Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad .....	107
7.2.3.	Photovoltaischer Fahrstrom.....	109
7.2.4.	Einspeisespitzen .....	110
7.2.5.	Bezugsspitzen .....	111
7.2.6.	Potenzial zur Bereitstellung negativer Regelleistung.....	112
7.2.7.	Zyklische Lebensdauer des Heimspeichers.....	113
7.3.	Betrachtung der ökonomischen Kennwerte .....	114

7.3.1.	Energiekosten je 100 km nach Fahrprofilen.....	114
7.3.2.	Zielkosten für den Heimspeicher .....	115
7.3.3.	Vergleich unterschiedlicher Lösungen für Mobilität und Energie.....	116
7.3.4.	Exemplarische Detailbetrachtung für ein Kundensegment .....	119
7.4.	Bewertung der Modellgüte.....	121
7.4.1.	Test der dimensional Konsistenz.....	121
7.4.2.	Modellgrenzetest .....	122
7.4.3.	Parametertest .....	123
7.4.4.	Sensitivitätstest, Generalisierungstest und Extrembedingungstest.....	123
7.4.5.	Verhaltensvorhersagetest .....	124
7.4.6.	Verhaltensreproduktionstest.....	125
7.4.7.	Wirkungstest.....	125
7.5.	Zwischenfazit .....	126
8.	Zusammenfassung und Ausblick.....	127
8.1.	Zusammenfassung.....	127
8.1.1.	Betrachtungsraum der techno-ökonomischen Analyse .....	127
8.1.2.	Ergebnisse der Simulationsstudien.....	127
8.1.3.	Evaluation unter diffusionstheoretischen Gesichtspunkten.....	128
8.2.	Ausblick .....	129
8.2.1.	Dynamische Preissetzung zur Erhöhung der Netzdienlichkeit .....	129
8.2.2.	Auswirkung der technologischen Synergien auf die Marktdiffusion.....	129
8.2.3.	Bewertung von Lösungen mit Plug-in Hybridfahrzeugen.....	129
8.2.4.	Nutzen einer Parametrisierung mit historischen Kundendaten .....	130
8.2.5.	Entwicklung einer Benutzeroberfläche für eine Onlineanwendung.....	130
8.2.6.	Vergleichsportal für Mobilitäts- und Energielösungen .....	130

Verwendete Abkürzungen.....	131
Abbildungsverzeichnis.....	132
Tabellenverzeichnis.....	135
9. Anhang.....	138
9.1. Größen des Simulationsmodells.....	138
9.2. Parametrisierung des Simulationsmodells.....	140
9.2.1. Die Fahrprofile.....	140
9.2.2. Standardlastprofil für Haushalte.....	142
9.2.3. Standardlastprofil für Photovoltaik.....	146
9.2.4. Energiemanagement.....	150
9.3. Ergebnisse der Simulationsläufe.....	152
9.3.1. Abgleich der Simulationsergebnisse mit Literaturdaten.....	152
9.3.2. Rohdaten der Simulationsläufe.....	152
Literaturverzeichnis.....	163
Lebenslauf.....	187