

Fakultät II - Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften

Oldenburger Schriften zur Wirtschaftsinformatik
Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jorge Marx Gómez

Agnetha Flore

**Reifegradmodell für Smart Grids:
Bewertung der Migrationspfade
anhand von zwei Fallstudien**



**Reifegradmodell für Smart Grids: Bewertung der Migrationspfade anhand von
zwei Fallstudien**

Von der Fakultät/den Fakultäten* für Mathematik und Naturwissenschaften/Fakultät für
Medizin und Gesundheitswissenschaften/Fakultät für Informatik, Wirtschafts- und
Rechtswissenschaften* der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg zur Erlangung des
Grades und Titels einer/eines*

Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation

von Frau Agnetha Flore

geboren am 14. November 1977 in Oldenburg

Gutachter Prof. Dr.-Ing. Jorge Marx Gómez

Weiterer Gutachter

Prof. Dr. Frank Teuteberg

Tag der Disputation: 03. November 2020

Oldenburger Schriften zur Wirtschaftsinformatik

Band 29

Agnetha Flore

**Reifegradmodell für Smart Grids: Bewertung der
Migrationspfade anhand von zwei Fallstudien**

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Oldenburg, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7749-0

ISSN 1863-8627

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich Energie im OFFIS (Institut für Informatik). In dieser Zeit habe ich an zwei Forschungsprojekten gearbeitet, in denen wesentliche Artefakte der Arbeit entwickelt und beispielhaft erprobt werden konnten.

Während dieser Zeit wurde ich von vielen Menschen auf vielfältige Weise unterstützt. Diesen Menschen sei an dieser Stelle gedankt, auch wenn nicht alle namentlich erwähnt werden können.

Als erstes möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jorge Marx Gómez der Universität Oldenburg bedanken, der mir als externe Doktorandin die Möglichkeit bot, an der Universität Oldenburg zu promovieren und mich mit großem Sachverstand über die Zeit meiner Anfertigung der Dissertation betreut und unterstützt hat. Ebenso möchte ich meinem Zweitprüfer Prof. Dr. Frank Teuteberg der Universität Osnabrück danken, für die wertvollen Hinweise und die Übernahme des Zweitgutachtens. Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Prüfungskommissionsvorsitzenden Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff sowie dem Prüfungskommissionsmitglied Dr. Christian Schönberg bedanken.

Auch bedanken möchte ich mich bei OFFIS, für die Gewährung von Freiräumen für die Promotion, meinem Bereichsleiter Dr.-Ing. Jürgen Meister, meinem Gruppenleiter Dr.-Ing. Mathias Uslar und besonders auch den Kollegen aus meiner Gruppe SEA und dem PhD-Assembly für zahlreiche inhaltliche und methodische Diskussionen, für die Reviews, für Feedbacks bei Probevorträgen, für die Unterstützung bei einigen Anwendungen und ganz allgemein für die angenehme Arbeitsatmosphäre.

Ein weiterer Dank geht an die externen Projektpartner aus Wissenschaft und Industrie für zahlreiche Diskussionen, Feedbacks, Experteninterviews und der Teilnahme an Umfragen. Sowie an meine Ansprechpartner bei der BOC-Group für ihre Unterstützung.

Meiner Familie danke ich für die immerwährende Unterstützung über den gesamten Zeitraum der Dissertation. Besonders meinem Mann Michael, meinen Kindern Vanessa, Christopher und Bennett sowie meinen Eltern. Sie alle haben an mich und meinen Erfolg geglaubt. Danke!

Einen letzten Dank für das Korrekturlesen geht an meine Schwester Claudia und meine Tante Martina.

Agnetha Flore

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Inhaltsverzeichnis	ii
Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme	v
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	x
Zusammenfassung	xi
Abstract.....	xii
1 Einführung	1
1.1 Ausgangslage und Problemstellung.....	1
1.2 Offene Punkte bisheriger Lösungen	5
1.3 Ziel und Lösungsansatz	8
1.4 Forschungsdesign	11
1.5 Aufbau der Arbeit	15
2 Reifegradmodelle.....	16
2.1 Definition	16
2.1.1 Top-down-Design vs. Bottom-up-Design von Reifegradmodellen	18
2.1.1.1 Top-down-Design von Reifegradmodellen	18
2.1.1.2 Bottom-up-Design von Reifegradmodellen	18
2.1.2 Der Einsatz des Rasch-Modells im Kontext von Reifegradmodellen.....	18
2.2 Überblick allgemeine Reifegradmodelle	21
2.3 Überblick Reifegradmodelle für das Smart Grid.....	27
2.4 Literaturrecherche zu Smart Grid Reifegradmodellen mit Migrationspfaden.....	34
2.5 Zwischenfazit.....	38
3 Maturity Model and Migration Paths for Smart Grids (3MPSG).....	39
3.1 Vorgehensweise	39
3.2 Dimensionen	40
3.3 Erstellung eines Fragenkatalogs	41
3.3.1 Entwicklungsprozess.....	41
3.3.1.1 Formulierung von Items	42
3.3.1.2 Pretest	42
3.3.1.3 Statistische Validierung.....	43
3.4 Bestimmung der Reifegrade	43
3.5 Zwischenfazit.....	44
4 Migrationspfade	45
4.1 Definition	45
4.2 Vorgehensweise.....	45
4.2.1 Entwicklung von Schlüsselfaktoren	47
4.2.2 Entwicklung von Extremalprojektion	48
4.2.3 Entwicklung von Rohszenarien.....	48
4.2.4 Entwicklung von Zielszenarien	48

4.2.5	Entwicklung von Dimensionen	48
4.2.6	Entwicklung von Reifegraden	49
4.2.7	Analyse	49
4.2.8	Entwicklung der Komplexitätsmatrix	50
4.2.9	Entwicklung der Roadmap	53
4.2.10	Kritikalität	53
4.3	Zwischenfazit	54
5	Kosten-Nutzen-Aufstellung	55
5.1	Übersicht Kosten	55
5.1.1	CAPEX-Kosten	56
5.1.2	OPEX-Kosten	60
5.2	Übersicht Nutzen	61
5.3	Kostenhochrechnung für die Migrationspfade	62
5.4	Zwischenfazit	62
6	Handhabbarkeit des Modells in der Praxis	63
6.1	Kosten-Komplexität-Überlegungen	63
6.2	Kosten für die Einführung des Modells im Unternehmen	64
6.3	Umgang mit der Komplexität	65
6.3.1	Selbstadaption	65
6.3.2	Werkzeug- und Softwareunterstützung	67
6.3.3	Nutzwertanalyse zur Softwareauswahl	69
6.3.4	Praxislösung	72
6.4	Zwischenfazit	74
7	Evaluation	78
7.1	Definition	78
7.2	Vorgehensweise	78
7.2.1	Methoden aus der Literatur	78
7.2.2	Methodenauswahl für die Dissertation	81
7.3	Evaluationsmethode: Fallstudie	82
7.3.1	Research Design der Fallstudie	82
7.3.2	Auswahlprozess der Fallstudie	83
7.4	Fallstudie 1	84
7.4.1	Beschreibung	84
7.4.2	Anwendung Reifegradmodell	85
7.4.3	Anwendung Migrationspfade	88
7.4.3.1	Schlüsselfaktoren	88
7.4.3.2	Extremalprojektion	89
7.4.3.3	Rohszenarien	92
7.4.3.4	Zielszenarien	92
7.4.3.5	Dimensionen	93
7.4.3.6	Reifegrade	95
7.4.3.7	Analyse	95
7.4.3.8	Komplexitätsmatrix	116
7.4.3.9	Roadmap	132
7.4.3.10	Kritikalität	133

7.4.4 Anwendung Kosten-Nutzen-Aufstellung.....	139
7.5 Fallstudie 2.....	144
7.5.1 Beschreibung.....	144
7.5.2 Anwendung Reifegradmodell.....	144
7.5.3 Anwendung Migrationspfade.....	147
7.5.3.1 Schlüsselfaktoren.....	148
7.5.3.2 Extremalprojektion.....	148
7.5.3.3 Rohszenarien.....	148
7.5.3.4 Zielszenarien.....	149
7.5.3.5 Dimensionen.....	150
7.5.3.6 Reifegrade.....	152
7.5.3.7 Analyse.....	152
7.5.3.8 Komplexitätsmatrix.....	177
7.5.3.9 Roadmap.....	194
7.5.3.10 Kritikalität.....	195
7.5.4 Anwendung Kosten-Nutzen-Aufstellung.....	202
7.6 Zwischenfazit.....	207
8 Schlussbetrachtung.....	212
8.1 Zusammenfassung und Bewertung.....	212
8.2 Vergleich der zwei Ausbauvarianten.....	213
8.3 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf.....	216
Anhang.....	218
Glossar.....	447
Literaturverzeichnis.....	464

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

3MPSG	Maturity Model and Migration Paths for Smart Grids
AAL	Ambient Assisted Living
ACATECH	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
AGB	Allgemeine Geschäftsbedingungen
AMI	Advanced Metering Infrastructure
AMM	Advanced Metering Management
AMS	Area Management System
API	Application Programming Interface
BCM	Business Continuity Management
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BDSG	Bundesdatenschutzgesetz
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMA	Biomasseanlage
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BPMM	Business Process Maturity Model
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
CMMI	Capability Maturity Model Integration
CPU	Central Processing Unit
dena	Deutsche Energie-Agentur
DER	Distributed Energy Resource/ Dezentrale Energie Ressource
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Distribution Management System
DR	Demand Response
DS	Design Science
DSM	Demand Side Management

DSO	Distribution System Operator
DSR	Design Science Research
EAM	Enterprise Architecture Management
EDEN	Erfolgreich, durchgängig, effizient und nachhaltig
EDM	Energiedatenmanagement
EDSO	European Distribution System Operators (for Smart Grids)
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
eHZ	elektronische Haushaltszähler
ELM	Erzeugungsleitwarte
EMS	Energiemanagementsystem
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EPSMM	Electric Power Sustainability Maturity Model
ES-C2M2	Electricity Subsector Cybersecurity Capability Maturity Model
EU	Europäische Union
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
FuE	Forschung und Entwicklung
GMAP	Grid Monitoring- und Analyseplattform
GPS	Global Positioning System
ICT	Information and Communication Technology
IEC	International Electrotechnical Commission
IED	Intelligent Electronic Device
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie

iMSys	intelligentes Messsystem
IP	Internetprotokoll
IS	Information Systems
ISMS	Information Security Management System
ISO	International Standardisation Organisation
IT	Informationstechnologie
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	kleinere und mittlere Unternehmen
KPI	Key Performance Indicator
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LTE	Long Term Evolution
NIST	National Institute of Standards and Technology
OT	Operation Technology
PEMM	Process and Enterprise Maturity Model
PLC	Power Line Communication
PV	Photovoltaik
RE	Requirements Engineering
RM	Referenzmodell
RTU	Remote Terminal Unit
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SGAM	Smart Grid Architecture Model
SG IMM	Smart Grid Interoperability Model
SGMM	Smart Grid Maturity Model
SMGW	Smart Meter Gateway
SMS	Short Message Service
SOA	service-orientierte Architekturen

SPICE	Software Process Improvement and Capability dEtermination
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	Structured Query Language
T-Box	Terminological box
TC	Technical Committee
TCP	Transmission Control Protocol
TSO	Transmission System Operator
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
VK	Virtuelles Kraftwerk
VNB	Verteilnetzbetreiber
WAMS	Wide Area Measurement System
WEA	Windenergieanlage
WLAN	Wireless Local Area Network
WWW	World Wide Web
XML	Extensible Markup Language

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Forschungsrahmen der Arbeit (in Anlehnung an Hevner et. al (2004))....	14
Abbildung 2: Schematisches Prinzip des Rasch-Algorithmus	19
Abbildung 3: Rahmen für die Literaturrecherche (Baker, 2000)	34
Abbildung 4: Konzeptmappe von Reifegradmodell in Verbindung mit Migrationspfaden	35
Abbildung 5: Literatursuchprozess.....	36
Abbildung 6: Vorgehensmodell Entwicklung von Reifegradmodellen (Quelle: eigene Darstellung)	39
Abbildung 7: Vorgehensmodell zur Entwicklung von Migrationspfaden (Quelle: eigene Darstellung)	46
Abbildung 8: Modell der Systemebenen (Quelle: European Electricity Grid Initiative and Implementation Plan).....	49
Abbildung 9: Generelles Beispiel eines Migrationspfads (Quelle: eigene Darstellung).50	
Abbildung 10: Grafische Darstellung mit ADONIS der BOC-Group	77
Abbildung 11: Darstellung der Einflüsse auf Ebene der Entwicklungsschritte	129
Abbildung 12: Darstellung der Einflüsse auf Ebene der Dimensionen.....	130
Abbildung 13: Sankey-Diagramm Gesamt	131
Abbildung 14: Roadmap Fallstudie 1	132
Abbildung 15: Roadmap Zielszenario 1 (Quelle: eigene Darstellung)	134
Abbildung 16: Roadmap Zielszenario 2 (Quelle: eigene Darstellung)	135
Abbildung 17: Kritischer Pfad Zielszenario 3 (Quelle: eigene Darstellung)	137
Abbildung 18: Kritischer Pfad Zielszenario 3 mit Entwicklungsgeschwindigkeit der Technologien (Quelle: eigene Darstellung).....	137
Abbildung 19: Roadmap Zielszenario 3 (Quelle: eigene Darstellung)	138
Abbildung 20: Darstellung der Einflüsse auf Ebene der Entwicklungsschritte	191
Abbildung 21 : Darstellung der Einflüsse auf Ebene der Dimensionen.....	193
Abbildung 22: Sankey-Diagramm Gesamt	194
Abbildung 23: Roadmap Fallstudie 2 am Beispiel Modellnetz S1	194
Abbildung 24: Roadmap Zielszenario 1 (Quelle: eigene Darstellung)	197
Abbildung 25: Roadmap Zielszenario 2 (Quelle: eigene Darstellung)	198
Abbildung 26: Kritischer Pfad Zielszenario 3 (Quelle: eigene Darstellung)	200
Abbildung 27: Kritischer Pfad Zielszenario 3 mit Entwicklungsgeschwindigkeit der Technologien (Quelle: eigene Darstellung).....	200
Abbildung 28: Roadmap für Zielszenario 3 (Quelle: eigene Darstellung).....	201
Abbildung 29: Vergleich der Kostenhochrechnung der zwei Fallstudien.....	209

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Forschungsfragen der Dissertation	8
Tabelle 2: Berechnungen der Messwerte, IRF und Schätzungen	20
Tabelle 3: Querschnittsthemen des SG IMM	30
Tabelle 4: Interoperabilitätskategorien des SG IMM	31
Tabelle 5 : Taxonomie einer Literaturrecherche	35
Tabelle 6: Datenbanken für Literatursuche	36
Tabelle 7: Checkliste zum Abgleich der Eingangskriterien	37
Tabelle 8: Übersicht Dimensionen gemäß Literaturrecherche	40
Tabelle 9: Entwicklungsprozess nach Strobl	42
Tabelle 10: Übersicht Kapitalkosten für Speicher	57
Tabelle 11: Übersicht Kapitalkosten für Quellen	57
Tabelle 12: Übersicht Kapitalkosten für Senken	58
Tabelle 13: Übersicht Kapitalkosten für Zubehörkomponenten	60
Tabelle 14: Nutzwertanalyse für Softwareauswahl	71
Tabelle 15: Bewertungsschema der Nutzwertanalyse	72
Tabelle 16: Rahmenwerk für die Wahl einer DSR-Evaluationsmethode	79
Tabelle 17: Artefakttypen	79
Tabelle 18: Evaluationsmethoden	80
Tabelle 19: Verteilung von Evaluationsmethoden je Artefakttyp	81
Tabelle 20: Auswahl Dimensionen nach Anforderungserhebung aus den vier Themenfeldern	87
Tabelle 21: Gesamtübersicht aller Technologien und Komponenten	97
Tabelle 22: Übersicht der Zielzustände je Dimension je Zielszenario	104
Tabelle 23: Komplexitätsmatrix	126
Tabelle 24: Rang der Dimensionen in Bezug auf die Stärke der Abhängigkeit	127
Tabelle 25: Gewichtete Einflüsse aller Vorgänge (Algorithmus-Ergebnis)	128
Tabelle 26: Farbdarstellung je Dimension	130
Tabelle 27: Kostenhochrechnung Fallstudie 1	143
Tabelle 28: Auswahl Dimensionen nach Anforderungserhebung aus den vier Themenfeldern	146
Tabelle 29: Gesamtübersicht aller Technologien und Komponenten	155
Tabelle 30: Übersicht der Zielzustände je Dimension je Zielszenario	158
Tabelle 31: Komplexitätsmatrix	188
Tabelle 32: Rang der Dimensionen in Bezug auf die Stärke der Abhängigkeit	189
Tabelle 33: Gewichtete Einflüsse aller Vorgänge (Algorithmus-Ergebnis)	190
Tabelle 34: Farbdarstellung je Dimension	192
Tabelle 35: Übersicht Dimensionen mit Nummerierung	196
Tabelle 36: Kostenhochrechnung Fallstudie 2	206
Tabelle 37: Erkenntnisse aus den Fallstudien	207
Tabelle 38: Unterschiede der Fallstudien	211

Zusammenfassung

Das Thema Energiewende und insbesondere erneuerbare Energien (EE) haben in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Erneuerbare Energien sind einer der entscheidenden Faktoren für die Erreichung der Energieziele der Bundesregierung.

Durch die knapper werdenden Ressourcen ist bereits seit Jahren ein Trend zu erneuerbaren Energien spürbar. Sowohl im landwirtschaftlichen Sektor als auch inzwischen im privaten Sektor mit Windenergieanlagen, Biogasanlagen, Solaranlagen und PV-Anlagen. Durch die Politik wurde der Erwerb von erneuerbaren Energien bereits seit Jahren finanziell unterstützt und gefördert, sodass die erneuerbaren Energien starken Einzug in private Haushalte, aber auch in der Landwirtschaft und mittelständischen Projektierern, gefunden haben.

Die bisher zentral gesteuerte Netzinfrastruktur sollte dazu befähigt werden, immer mehr Energie von dezentralen Einspeisern aufnehmen zu können. Hinzu kommt noch das Problem, dass viele der erneuerbaren Energien immer nur punktuell und schubweise einspeisen können, aber der Strombedarf der Kunden davon abweicht. Die Stromnachfrage weicht also stark vom Stromangebot durch erneuerbare Energien ab.

Hier gilt es für die Energieversorger, ein stets stabiles und zuverlässiges Netz mit immer gleichbleibender Spannung den Endnutzern zur Verfügung zu stellen, um mit den neuen Gegebenheiten arbeiten zu können (vgl. Future Energy Grid: acatech STUDIE), (Appelrath, Mayer, & Rohjans, 2012).

Zu diesem Zweck soll das Stromnetz modernisiert und durch Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) intelligent gemacht werden. Ein intelligentes Stromnetz – oder auch *Smart Grid* genannt – liegt vor, wenn innerhalb des Netzes ein Informationsaustausch erfolgt, mit dessen Hilfe die Stromerzeugung, der Verbrauch und die Speicherung dynamisch gesteuert werden können.

In dieser Arbeit wird ein Modell für die Bewertung von Reifegraden im Smart Grid vorgestellt, mit dem besonderen Augenmerk auf der Ausarbeitung von Entwicklungsstufen, die von den Energieversorgern umgesetzt werden können, um ein intelligenteres Netz zu schaffen. Ebenso findet eine monetäre Bewertung dieser Stufen statt.

In einem letzten Schritt werden der Kosten-Nutzen-Vergleich, sowie die Nachhaltigkeit der einzelnen Schritte und Möglichkeiten betrachtet. Für diesen Zweck wird die Erprobung neuer Soft- und Hardware für modernste Informations- und Kommunikationsmethoden anhand zweier Fallstudien erarbeitet. Für diese Fallstudien werden die Entwicklungsstufen definiert, bewertet und einer kritischen Würdigung unterzogen.

Abstract

The topic of the energy system transformation and in particular renewable energies have become increasingly important in recent years. Renewable energies are one of the decisive factors for achieving the Federal Government's energy targets.

Due to dwindling resources, a trend towards renewable energies has been noticeable for years. Both in the agricultural sector and now in the private sector with wind energy plants, biogas plants, solar plants and PV plants. Politicians and banks have been providing enormous financial support and encouragement for the purchase of renewable energies for years, so that it has found its way into private households, agriculture and wind farms.

The previously centrally controlled network infrastructure must be able to cope with the fact that it has to plan more and more feeders, i.e. decentralized feeders. Added to this is the problem that many renewable energy sources can only feed in at certain points and in stages, but the customers' electricity requirements are not suitable.

It is important for the energy suppliers to provide an always stable and reliable network with always constant voltage to the end users, but to be able to deal with the new conditions (Appelrath et al., 2012).

To this end, the electricity grid should be modernized and made intelligent through information and communication technology.

This contribution presents a model for the evaluation of maturity levels in the Smart Grid with particular attention to the elaboration of development stages that energy suppliers have to go to create a smarter grid, as well as a monetary evaluation of these stages.

In a final step, the cost-benefit comparison and the sustainability of the individual steps and possibilities are to be considered.

For this purpose, the testing of new hardware and software for new information and communication methods is carried out using two case studies from real existing projects. These case studies are also used to define, evaluate and critically assess the development stages.