
Digitale Spielmethoden zur Verbesserung des energieeffizienten Verhaltens in privaten Haushalten

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von Christian Schwöbel aus Mannheim

Tag der Einreichung: 23.07.2015, Tag der Prüfung: 17.06.2015

Darmstadt – D 17

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel
2. Gutachten: Prof. Dr. rer. medic. Josef Wiemeyer



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Bau- und Umweltingenieur-
wissenschaften
Institut für Numerische Methoden und
Informatik im Bauwesen

Digitale Spielmethoden zur Verbesserung des energieeffizienten Verhaltens in privaten Haushalten
Dissertation

Genehmigte Dissertation von Christian Schwöbel aus Mannheim

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel
2. Gutachten: Prof. Dr. rer. medic. Josef Wiemeyer

Tag der Einreichung: 23.07.2015

Tag der Prüfung: 17.06.2015

Darmstadt – D 17

Berichte des Instituts für Numerische Methoden
und Informatik im Bauwesen

Band 1/2015

Christian Schwöbel

**Digitale Spielmethoden zur
Verbesserung des energieeffizienten
Verhaltens in privaten Haushalten**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3866-8

ISSN 1860-9430

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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



Meiner Familie





Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen der Technischen Universität Darmstadt.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing Uwe Rüppel für die Möglichkeit zur Promotion, seine fachliche und moralische Unterstützung und für die Übernahme des Hauptreferats. Herrn Prof. Dr. rer. medic. Josef Wiemeyer danke ich für die die Übernahme des Korreferats und für die interessanten Anregungen aus Sicht der Psychologie.

Ganz besonders möchte ich mich bei Dr. Armin Wagenknecht und Dr. Kristian Schatz für die Betreuung meiner Studien- und Diplomarbeit bedanken. Durch ihre gute Betreuung wurde mein Interesse am wissenschaftlichen Arbeiten geweckt und meine Entscheidung getroffen, die Promotion in Angriff zu nehmen.

Weiterer besonderer Dank gilt den Studierenden, deren Arbeiten ich betreuen durfte und meinen Kollegen am Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen für die gute Zusammenarbeit, die lockere Arbeitsatmosphäre und die fachlichen Diskussionen. Insbesondere danke ich Pascal Wiese, Daniel Simon, Robert Irmeler, Anna Wagner, Barbara Kohane, Susanne Rohmig, Philipa Petkova, Michael Kreger, Puyan Zadeh, Uwe Zwinger, Steffen Franz, Christian Leifgen und Manuel Kitzlinger.

Meiner Familie danke ich für den Rückhalt, die moralische Unterstützung und auch für die fachlichen Diskussionen über mein Dissertationsthema.

Christian Schwöbel



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzung und Ansatz	3
1.3. Aufbau der Arbeit	5
2. Energieversorgungsnetze und Bilanzierung von Energieverbräuchen	7
2.1. Grundlegende Begriffe	7
2.2. Gesetzliche Rahmenbedingungen im liberalisierten Markt	10
2.3. Netztopologie und Verteilungsinfrastruktur der Stromnetze	11
2.4. Steuerung und Betrieb der Netze	12
2.4.1. Lastprofilverfahren	14
2.5. Stromhandel und -beschaffung	15
2.6. Erdgasverteilnetze	15
2.6.1. Druckebenen der Erdgasnetze	16
2.6.2. Lastprofilverfahren bei Gas-Belieferung	17
2.7. Erdgashandel	18
2.8. Energieversorgungsnetze im Wandel zum Smart Grid	19
2.8.1. Bedeutung der Energiewende für den Netzausbau	19
2.8.2. Wirtschaftliche Herausforderungen	19
2.8.3. Smart Grid als Zukunftsmodell der Energieversorgungsnetze	20
2.8.4. Smart Market	21
2.8.5. Bedeutung der Smart Metering Technik für Smart Grid und Smart Market	21
2.9. Fazit	22
3. Erfassung von Energieverbrauchsdaten mit Smart Metering Techniken	23
3.1. Einleitung	23
3.2. Rechtliche Rahmenbedingungen	24
3.3. Arten von Zählern elektrischer Energie	25
3.3.1. Bestimmung der Leistung und der elektrischen Energie	25
3.3.2. Konventionelle Zähler	26
3.3.3. Moderne Messsysteme / Intelligente Zähler	27
3.3.4. Intelligente Messsysteme	27

3.4. Gaszähler	28
3.5. Technische Richtlinien für die künftige Integration intelligenter Messsysteme in das Smart Grid	28
3.5.1. Architektur des intelligenten Netzes	29
3.5.2. Smart Meter Gateway	30
3.5.3. Kommunikation zwischen Smart Meter Gateway und den Teilnetzen	30
3.5.4. Variable Tarife als Anreizmechanismen	32
3.6. Marktgängige Lösungen für Zähler zur automatisierten Datenerfassung	33
3.6.1. Kommunikationsschnittstellen zur lokalen Erfassung der Messdaten	33
3.6.2. Selbstgebauter Zähler nach volkszaehler.org	36
3.7. Erfassung des Verbrauchs einzelner Geräte	36
3.7.1. Intrusive Appliance Load Monitoring	36
3.7.2. Non-Intrusive Appliance Load Monitoring	37
3.8. Ergebnisse vergangener Smart Metering Studien bezüglich der Einflussnahme auf das Verbrauchsverhalten	37
3.8.1. Modellstadt Mannheim	38
3.8.2. Web2Energy	39
3.8.3. BECA Projekt	39
3.8.4. ISSDA - Gas / Electricity Customer Behaviour Trial	40
3.9. Fazit	43
4. Energieverbrauch und Optimierungspotenziale in privaten Haushalten	45
4.1. Verteilung des Energieverbrauchs in Haushalten	45
4.2. Maßnahmen zur Energieeinsparung und Lastverschiebung	47
4.2.1. Investive Maßnahmen	48
4.2.2. Maßnahmen durch Änderung des Nutzerverhaltens	50
4.3. Lastverschiebungspotenziale	52
4.3.1. Bedingungen für Lastverschiebung	53
4.3.2. Bestimmung des spezifischen Lastverschiebungspotenzials eines Haushalts	55
4.4. Fazit	56
5. Einflüsse auf das Energieverbrauchsverhalten in Haushalten und Methoden zur Intervention	57
5.1. Kategorisierung möglicher Einflussgrößen auf energiebewusstes Handeln	57
5.1.1. Wissensspezifische Komponenten	58
5.1.2. Ökonomische Komponenten auf Haushaltsebene	58
5.1.3. Technische Komponenten	58
5.1.4. Politische Komponenten	59

5.1.5. Psychologische Komponenten	59
5.2. Einflüsse auf die Umsetzung und Aneignung von energiesparendem Verhalten . . .	62
5.2.1. Einfluss moralischer Verpflichtung zu energieeffizientem Verhalten	62
5.2.2. Einfluss von Wissen auf Absicht und Handlung	63
5.2.3. Kenntnis über den eigenen Energieverbrauch	63
5.2.4. Rebound-Effekt	64
5.2.5. Einfluss der Kosten auf das energiesparende Verhalten	65
5.2.6. Einfluss der Gewohnheit auf energieeffiziente Handlungen	66
5.2.7. Zusammenfassende Identifikation der Kernprobleme	66
5.3. Interventionsformen zur Beeinflussung des Nutzerverhaltens	67
5.3.1. Einsatz von Interventionstechniken	70
5.3.2. Umsetzung von Interventionstechniken im Rahmen von Kampagnen zur Verbesserung des energieeffizienten Verhaltens	72
5.4. Fazit	73
6. Grundlagen zu digitalen Spielmethoden mit fachlichen Lernzielen	75
6.1. Begriffsdefinition Spiel	75
6.2. Elemente digitaler Spiele	76
6.3. Spielmechaniken	78
6.3.1. Avatar	78
6.3.2. Regeln	78
6.3.3. Spielziele, Levels, Challenges und Quests	79
6.3.4. Scoring und Achievements	80
6.3.5. Ranglisten	80
6.3.6. Feedback	80
6.4. Kategorien digitaler Spiele	81
6.5. Zweckgebundene digitale Spiele	83
6.5.1. Gamification	83
6.5.2. Serious Game	84
6.5.3. Persuasive Technology und Persuasive Games	85
6.5.4. Abgrenzung der Begriffe für diese Arbeit	86
6.6. Player Experience	87
6.7. Mechaniken digitaler Spiele als Techniken zur Intervention	89
6.7.1. Besondere Charakteristiken von digitalen Spielen als Kommunikations- und Informationsmedium	89
6.7.2. Techniken digitaler Spiele zur Erfüllung eines sekundären Zwecks	90
6.7.3. Einsatz von Interventionstechniken in verschiedenen Spielkategorien	93

6.8. Entwurfsprinzipien für zweckgebundene digitale Spiele	95
6.8.1. Grundlegende Prinzipien	95
6.9. Evaluation einer Spielstudie	95
6.9.1. Evaluation mit Hilfe von Fragebögen	96
6.9.2. Festlegung der Teilnehmerbasis	97
6.9.3. Untersuchung der Player Experience während der Entwicklungs- und Spiel- phase	98
6.9.4. Evaluation nach der Spielstudie	99
6.10. Fazit	99

7. Prozessmodell zur Entwicklung eines digitalen Spiels zur Steigerung der Energieeffizienz 101

7.1. Analyse technischer Randbedingungen	101
7.2. Problem- und Zieldefinition	101
7.3. Entwicklung des Spiel- und Interventionskonzepts	103
7.4. Entwurf der Systemarchitektur	103
7.5. Entwicklung eines Regelsystems	104
7.6. Entwicklung und Umsetzung des Spiels	104
7.7. Fazit	105

8. Konzept für ein digitales Spiel zur Steigerung der Energieeffizienz in privaten Haushalten 107

8.1. Analyse bisheriger Umsetzungen systemintegrierter Smart Metering Spiele	108
8.2. Zieldefinition eines systemintegrierten Spiels	110
8.3. Entwicklung des Spiel- und Interventionskonzepts	111
8.3.1. Bestimmung der Spielkategorie	112
8.3.2. Ergebnisse der qualitativen Analyse	115
8.3.3. Konzept für einen Gamification-Ansatz mit begleitendem Quiz	117
8.3.4. Interventionskonzept mit Gamification-Ansatz	117
8.3.5. Anforderungen an die Datenerhebung	119
8.3.6. Fazit	120
8.4. Entwurf der Systemarchitektur	120
8.4.1. Entwurf des lokalen Messdatenservers auf Basis eines Einplatinencomputers	121
8.4.2. Mögliche Einschränkungen zur Installation der lokalen Datenerfassung . . .	122
8.4.3. Datenübermittlung von Messdatenserver zu Gameserver	123
8.4.4. Konzept für Logging wichtiger Spielinteraktionen und eines Sofort- Feedback-Systems	123
8.5. Darstellung der Software-Komponenten	124

8.6. Fazit	125
9. Entwicklung eines Regel- und Scoringystems	127
9.1. Datenerfassung in der Benchmark-Phase	127
9.2. Fundamentale Größen zur Bewertung des elektrischen Energieverbrauchs	128
9.3. Fundamentale Größen zur Bewertung des Verbrauchs thermischer Energie	135
9.4. Regeln zur Bewertung von Verbrauchscharakteristiken	139
9.4.1. Prozentuale Reduktion der Lastparameter	140
9.4.2. Reduktion des Heizgasverbrauchs im Vergleich zum Vorjahresverbrauch	141
9.5. Möglichkeiten des Energieverbrauchsvergleichs mehrerer Haushalte	142
9.5.1. Vergleich der prozentualen Reduktion der Lastparameter	142
9.5.2. Vergleich des Gesamtverbrauchs zu charakteristischen Durchschnittswerten	143
9.5.3. Lastverlagerung durch dynamisches Nutzerverhalten	145
9.5.4. Temperaturbereinigter und flächennormierter Heizgasverbrauch	146
9.6. Mögliche Skalierungsfaktoren für das Scoring-System	147
9.7. Detektierung von Abwesenheitstagen	147
9.8. Zusammenfassende Übersicht	149
9.8.1. Anforderung an die Eingangsdaten	150
9.8.2. Übersicht über alle Regeln und deren Einsatzzweck	150
10. Relationales Datenmodell zur Abbildung der Haushaltscharakteristiken	153
10.1. Weitere optionale Angaben zu Nutzer- und Haushaltscharakteristiken	153
10.1.1. Zusätzliche Haushaltscharakteristiken und Gebäudeparameter	153
10.1.2. Nutzung von Geräten und Ausstattung	154
10.2. Relationales Datenmodell zur Verwaltung haushaltsbezogener Daten	154
11. Validierung des Regelsystems mit Daten einer Smart Metering Studie	157
11.1. Allgemeines zur Datenbasis	157
11.2. Vorverarbeitung und Datenhaltung in Datenbank	158
11.2.1. Fehlerbereinigung der Smart Metering Daten	158
11.3. Datenvorauswahl zur Validierung der Metriken	160
11.4. Validierung des Scoring-Systems für elektrische Energie	161
11.4.1. Validierung des Gesamtverbrauchsvergleichs zu charakteristischen Durchschnittswerten	161
11.4.2. Validierung des Vergleichs der prozentualen Reduktion der Lastparameter und des Bonus für dauerhafte Einsparungen	162
11.4.3. Lastverschiebungs-Challenge	165
11.4.4. Validierung der thermischen Bewertungsmetriken	166

11.5.Fazit	166
12. SMiG: Entwurf eines Gamification-Ansatzes zur Verbesserung energieeffizienten Verhaltens in privaten Haushalten	167
12.1 Entwurf der Managerspielkomponente: Kamelrennen	167
12.1.1 Grundkonzept des Kamelrennens	168
12.1.2 Berechnung der Charakterwerte	169
12.2 Überblick über die Spielkomponenten	172
12.3 Chronologischer Ablauf des Spiels	173
12.4 Teilnehmerakquise, Anmeldung und Installation	174
12.5 Onboarding-Phase	176
12.5.1 Einführung in die Statistiken zum Gesamtverbrauch elektrischer Energie . .	176
12.5.2 Nutzung der Quizkomponente und der Energiespartipps	178
12.5.3 Einführung in die Statistiken zum Gesamtverbrauch für Gas	180
12.5.4 Einführung in Grundlast- und Spitzenlaststatistiken für Elektrizität	182
12.6 Testphase / Spielphase	184
12.6.1 Einführung in den Wettkampf	185
12.6.2 Wöchentliche / monatliche Challenges	185
12.6.3 Übersichtsseite	186
12.6.4 Kamelrennen	187
12.6.5 Begleitendes Feedback	188
12.7 Fazit	188
13. Entwurf einer Spielstudie zur Evaluation des Interventionserfolgs des SMiG	189
13.1 Ablauf der SMiG-Studie	189
13.2 Komponenten der Evaluation	189
13.3 Benchmark-Phase und einleitender Fragebogen	191
13.4 Einteilung in Test- und Kontrollgruppe	191
13.5 Untersuchung der Änderung des Verbrauchsverhaltens durch Analyse der Smart Metering Daten	192
13.6 Bewertung des Scoring Systems	192
13.7 Evaluation der Verhaltensänderung nach der Studie	192
13.8 Fazit	193
14. Zusammenfassung und Ausblick	195
14.1 Zusammenfassung	195
14.2 Ausblick auf weitere Verbesserungen und ein erweitertes Spielkonzept	197
14.2.1 Verbesserung des SMiG-Konzepts	197

14.2.2.Ausblick auf ein erweitertes Spielkonzept	198
14.3.Abschließendes Fazit	199
A. Anhang	221
A.1. Einsparpotenziale investiver und verhaltensgesteuerter Maßnahmen	221
A.2. Vergleichswerte des Stromspiegels	226
A.3. Einleitender Fragebogen	227
A.3.1. Haushaltsfragen allgemein	227
A.3.2. Haushaltsfragen für Gas-Studie	228
A.3.3. Umweltbewusstsein	228
A.3.4. Alltagshandlungen - elektrische Energie	230
A.3.5. Alltagshandlungen - Heizung und Warmwasser	231
A.4. Abschließender Fragebogen	232
A.4.1. Verhaltensänderung und Änderung der Einstellung zu energieeffizientem Verhalten	232
A.4.2. Bewertung der Spielelemente	233
A.5. Beispielrechnungen	235