

SEMA – ERKENNTNISSE AUS DEM BETRIEB EINES SOCIAL ENERGY MANAGEMENT SYSTEM

Stephan ENGEL^{1,2}, Dr. David NESTLE², Elias DÖRRE^{1,2}, Jan von APPEN²

¹ Universität Kassel, Fachbereich Elektrotechnik/Informatik, Fachgebiet Integrierte Energiesysteme, Wilhelmshöher Allee 73, 34121 Kassel

² Fraunhofer IEE (vormals IWES), Geschäftsbereich Energiesystemtechnik, Abteilung Energiemanagement und Energieeffizienz, Königstor 59, 34119 Kassel

Kurzfassung: Zwei Hauptziele der Energiewende sind die Umstellung der Energieversorgung auf Erneuerbare Energien (EE) und die Senkung des Wärmebedarfs von Wohngebäuden. Um diese Ziele erreichen zu können, müssen zum einen volatile Erneuerbare Energien besser genutzt werden und zum anderen muss der Wärmebedarf von Wohngebäuden gesenkt werden. Hierzu hat das Fraunhofer IEE (vormals Fraunhofer IWES) ein Konzept entwickelt und 2016/17 im Rahmen eines Feldtests erprobt, das gezielt Spiel-Design-Elemente in einem Energiebezug-Kontext einsetzt, um hierdurch die Verbraucher_innen von Energie zu motivieren, ihren elektrischen Verbrauch mit der Energieerzeugung aus EE zu harmonisieren und ihren Wärmebedarf zu senken.

Die Auswertung der während des Feldtests erhobenen Messdaten zeigt, dass durch das gezielte Setzen intrinsischer Anreize der Strombezug der Verbraucher_innen in Zeiten mit hoher Einspeisung aus EE hinein verlagert wird. Weiterhin ergibt die Auswertung, dass durch die Kombination von automatischer Heizungssteuerung und spielerischem Wettbewerb Energieeinsparungen im Wärmebezug realisiert werden können.

Keywords: Energieeffizienz, Energiemanagement, Lastverschiebung, Energieeinsparung, Community, Anreizkonzept, Nutzerakzeptanz, intrinsische Motivation, Erneuerbare Energien

1 Einleitung

Zwei Kernelemente der Energiewende sind die Umstellung der Energieversorgung auf Erneuerbare Energien (EE) und die Senkung des Wärmebedarfs von Wohngebäuden. [1, 2]

Eine große Herausforderung bei der Umstellung der Energieversorgung auf EE besteht in der Volatilität der Energieerzeugung mit Sonne und Wind. Elektrische Energie lässt sich bisher nur begrenzt speichern und meist ist dieses mit entsprechenden Speicher-Verlusten verbunden. Es ist daher anzustreben, die Erzeugung und den Verbrauch möglichst gut in Einklang zu bringen.

Der Wärmebedarf von Wohngebäuden lässt sich in erster Linie durch bauliche Maßnahmen wie Wärmedämmung oder Modernisierung der Heizungsanlage senken. Darüber hinaus lässt sich der Wärmebedarf aber auch durch eine entsprechende Änderung des Heiz- und Lüftungsverhaltens der Verbraucher_innen senken. Damit die Verbraucher_innen ihr bisheriges Verbrauchsverhalten ändern, muss allerdings ein entsprechender Anreiz zur Verhaltensänderung gegeben sein.

Aktuell existieren auf dem Markt im Bereich der kundenorientierten Energie-Plattformen neben lastfokussierten Dienstleistungen, die lediglich Vergleichswerte des Energieverbrauchs bereitstellen [3, 4], vor allem erzeugerfokussierte Dienstleistungen [5–7]. Darüber hinaus gibt es noch datenbasierte Energiedienstleistungen, wie einfache Energiemanagement-Lösungen [2, 8]. Allerdings fokussiert keine der genannten Lösungen eine Verhaltensänderung der Verbraucher_innen.

Während aus der Forschung schon zahlreiche Erkenntnisse zur Umsetzung von nutzer- und netzdienlichen Energiemanagement-Lösungen bekannt sind [9, 10], werden diese aktuell nicht als Marktlösungen implementiert. Darüber hinaus setzen bisherige Ansätze, Verbraucher_innen in ihrem Verhalten sowohl hinsichtlich Menge als auch Zeitpunkt des Verbrauchs zu beeinflussen, meist auf monetäre Anreize, also extrinsische Motivation. Zudem konnte bisher nicht eindeutig belegt werden, ob die externen Anreize der Tarife ausreichen, um das gewünschte Verhalten auf Dauer zu stabilisieren [11, 12].

Zwar immer wieder gefordert [2], bisher jedoch wenig entwickelt und untersucht wurden Anreizsysteme, bei denen weniger die extrinsische als vielmehr die intrinsische Motivation im Vordergrund steht. Ein entsprechender Ansatz, der sich hierzu Elementen aus dem Spiel-Design bedient, heißt Gamification [13, 14]. Gamification meint die „Anreicherung von Produkten, Dienstleistungen und Informationssystemen mit Spiel-Elementen, um die Motivation, die Produktivität und die Verhaltensweisen von Verbraucher_innen positiv zu beeinflussen“ [15]. Ziel von Gamification ist „eine Erhöhung der intrinsischen Nutzungsmotivation“ [15] bezüglich einer definierten Kernleistung, in diesem Anwendungsfall Lastverschiebung und Energieeffizienz.

Mit *sema* – *Social Energy Management* entwickelt das Fraunhofer IEE ein Konzept [16] und evaluiert dieses zusammen mit der Universität Kassel, das gezielt Spiel-Design-Elemente in einem Nicht-Spiel-Kontext [15, 17] einsetzt, um hierdurch die Verbraucher_innen von Energie dahingehend anzureizen, ihren elektrischen Verbrauch mit der Energieerzeugung aus EE zu harmonisieren und ihren Wärmebedarf durch „richtiges“ Heizen und Lüften zu senken.

Dieser Beitrag legt den Fokus auf die Auswertung des Feldtests, in dem das *sema*-Konzept 2016/17 in der Praxis erprobt wurde. Dazu führt der Beitrag zu Anfang das Anreizsystem von *sema* ein und beschreibt, welche Anreize gesetzt werden, um das Verhalten der Teilnehmer_innen hinsichtlich einer Flexibilisierung der Energienachfrage sowie eine Verbesserung der Energieeffizienz zu beeinflussen. Abschnitt 3 des Beitrags beschreibt die Durchführung des Feldtests. Neben Zeitraum und Teilnehmerkreis des Feldtests erläutert der Abschnitt die *sema*-Plattform und die für den Feldtest eingesetzte technische Ausstattung der am Feldtest teilnehmenden Haushalte. In Abschnitt 4 wird die Auswertung des Feldtests beschrieben. Der erste Teil des Abschnitts untersucht die Anpassung des Strombezugs an die Erzeugung aus EE. Dazu wird evaluiert, ob es einen erkennbaren Zusammenhang zwischen der Anreizsetzung und dem Strombezug der Teilnehmer_innen gibt. Teil zwei des Abschnitts untersucht die Auswirkungen der automatisierten programmierbaren Heizungssteuerung auf den Heizenergieverbrauch der Teilnehmer_innen. Hierfür wird abgeschätzt, welche Energieeinsparungen durch die Kombination von automatischer Heizungssteuerung und spielerischem Wettbewerb erzielt werden können. Im fünften und letzten Abschnitt erfolgt die Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse.

2 Anreizsystem

sema kombiniert gezielt ein spielorientiertes Anreizkonzept (Gamification) [17] mit einer Social Community, um hierdurch eine stärkere Flexibilisierung der Energienachfrage sowie eine Verbesserung der Energieeffizienz zu erreichen. Die Verbraucher_innen von Energie erhalten mittels Punkten einen Anreiz, ihren Energieverbrauch an die Erzeugung aus EE anzupassen sowie Energie effizient einzusetzen. Gleichzeitig erhalten die Verbraucher_innen durch ihren Punktestand ein individuelles Feedback. Über Rankings können sich die Verbraucher_innen vergleichen und werden so zu einem möglichst optimalen Verhalten motiviert. Darüber hinaus bietet *sema* den Verbraucher_innen eine Community, wodurch ein zusätzlicher Anreiz geschaffen wird. Auf diese Weise soll einem schnellen Gewöhnungseffekt vorgebeugt werden und die Motivation der Verbraucher_innen, ihr Verbrauchsverhalten auch über einen längeren Zeitraum entsprechend anzupassen, soll hierdurch aufrechterhalten werden.

Bei dem verwendeten Anreizsystem wird die Annahme zugrunde gelegt, dass eine Verstärkung der intrinsischen Nutzungsmotivation (vgl. Abschnitt 1) auch zu einer Verstärkung der Anreizwirkung führt. Aus diesem Grund kombiniert das Anreizsystem in *sema* die Belohnung durch das Sammeln von Punkten mit je einem dynamischen Level für Strom und Wärme, der die Anreizwirkung dadurch zusätzlich verstärkt, dass der/die Verbraucher_in abhängig von der Höhe des Levels eine in Stufen variierende Menge an Punkte gutgeschrieben bekommt. Die Systematik der Punkte- und Levelberechnung für Strom und Wärme wird in den beiden folgenden Abschnitten beschrieben.

Die Verbraucher_innen können Punkte dafür sammeln, einen möglichst hohen Anteil ihres täglichen Strombezugs in die Tagesintervalle mit der höchsten Erzeugung aus EE in Deutschland zu verlagern. Die Höhe der Erzeugung aus EE wird den Verbraucher_innen in Form des o. g. Levels dargestellt, der im Folgenden als *semaLevel* bezeichnet wird. Der *semaLevel* für Strom kann dabei, je nach Anteil der EE an der Energieerzeugung in Deutschland, einen Wert zwischen 0 (keine Einspeisung) und 10 (sehr hohe Einspeisung) annehmen. Je höher die Erzeugung aus EE, desto höher der *semaLevel* für Strom. Wird Strom zu Zeiten mit hohem *semaLevel* bezogen, dann werden den Verbraucher_innen dafür mehr Punkte gutgeschrieben, als wenn der Bezug derselben Energiemenge zu Zeiten mit geringerem *semaLevel* erfolgt. Der Algorithmus, mit dem die Punkte berechnet werden, wertet dazu am Ende des Tages den Lastgang der Verbraucher_innen aus und vergleicht den zeitlichen Verlauf des Strombezugs mit dem zeitlichen Verlauf des *semaLevel*. Im Wärmebereich können die Verbraucher_innen Punkte für eine Absenkung der Raum-Solltemperatur erhalten, wenn ein Raum nicht genutzt wurde. Damit wurde energieeffizientes Verhalten belohnt. Wie viele Punkte die Verbraucher_innen für das Absenken der Raum-Solltemperatur bekamen, hing von dem *semaLevel* für Wärme ab. Der *semaLevel* für Wärme konnte, abhängig von der Außentemperatur, einen Wert zwischen 0 (sehr warm) und 10 (sehr kalt) annehmen. Je niedriger die Außentemperatur desto höher der *semaLevel* für Wärme.

Die persönlichen Punktestände geben den Verbraucher_innen ein individuelles, ihre Verhaltensänderung betreffendes Feedback. Darüber hinaus haben die Verbraucher_innen die Möglichkeit sich innerhalb der Community mit den anderen Verbraucher_innen in Highscores zu vergleichen. Zusätzlich zu dem persönlichen, unmittelbaren Feedback, welches der Punktestand den Verbraucher_innen bietet, wird so ein weiterer Anreiz geschaffen [14, 15].

3 Feldtest

Neben Zeitraum und Teilnehmerkreis des Feldtests werden in diesem Abschnitt die sema-Plattform und die Ausstattung der Haushalte beschrieben.

3.1 Zeitraum und Teilnehmerkreis

Der Feldtest fand im Zeitraum 01.12.2016 bis 31.05.2017 statt und war in die drei Phasen

- Rollout (01.12.2016 - 31.01.2017),
- Kennenlernen (01.02.2017 - 14.03.2017) und
- Level und Punkte (15.03.2017 bis 31.05.2017) gegliedert.

Teilnehmer_innen des Feldtests waren 29 Haushalte. Insgesamt nahmen an dem Feldtest 60 Personen im Alter von 18 Jahren und älter an dem Feldtest aktiv teil (88 Personen inkl. Kinder/Jugendliche unter 18 Jahren).

3.2 sema-Plattform

Das bei dem Feldtest verwendete *sema*-Testsystem basiert auf dem ebenfalls am Fraunhofer IEE entwickelten quelloffenen, modularen Softwareframework für Energiemanagement und Gebäudeautomatisierung *OGEMA* [18]. Zentrales Element in jedem Haushalt ist die *semaBox*, ein lokales *OGEMA*-Gateway, mit dem sich die Teilnehmer_innen ihren Energieverbrauch sowie die Temperatur und die Feuchtigkeit in einzelnen Räumen anzeigen lassen können. Über die *semaBox* können die Teilnehmer_innen auch die gewünschte Raumtemperatur entweder manuell einstellen oder per zuvor eingestellter Heizkurve automatisch regeln lassen. Darüber hinaus informiert die *semaBox* die Teilnehmer_innen über ihren Punktestand, ihre Platzierung und den *semaLevel*. Mit *semaMobil*, einer Android-App, stehen den Teilnehmer_innen die Basisfunktionen der *semaBox* auch von unterwegs auf dem Smartphone zur Verfügung. Die *semaSite* ist die Online-Community von *sema*. Hier können sich die Teilnehmer_innen von *sema* miteinander austauschen, sich vernetzen, Fragen stellen und sich in Rankings vergleichen. Der *semaServer* dient der Administration und Wartung der *sema*-Plattform.

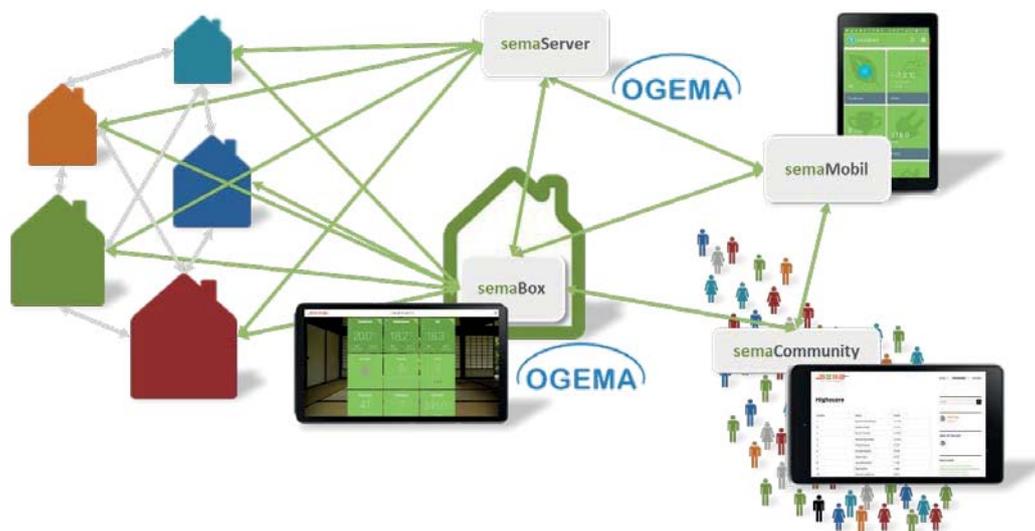


Abbildung 3.1: sema-Plattform

3.3 Ausstattung der Haushalte

Für den Feldtest wurden die teilnehmenden Haushalte mit einer *semaBox*, Funk-Heizungsthermostaten sowie Sensoren zur Erfassung der Anwesenheit, des Zustands der Fensteröffnung und der Raumtemperatur sowie Raumfeuchtigkeit ausgestattet. In 17 Haushalten wurde darüber hinaus ein Gerät zur Messung der elektrischen Leistung installiert, sodass hier zusätzlich der elektrische Lastgang des Haushalts erfasst werden konnte.

4 Auswertung des sema-Feldtests

4.1 Überprüfung des Anreizsystems zur Anpassung des Strombezugs an die Erzeugung aus EE

Der folgende Abschnitt beschreibt eine Untersuchung zu der Frage, ob das Anreizsystem zu einer belegbaren Verschiebung des Strombezugs beitragen konnte.

4.1.1 Modellansatz und Methodik

Um Einflüsse von Mess- und Installationsfehlern auf die Auswertung zu verringern, wurden die Leistungsdaten der 17 Haushalte mit Lastgangmessung in einem ersten Schritt zunächst plausibilisiert und bereinigt¹. Anschließend wurden die Leistungsdaten dem *semaLevel* für Strom gegenübergestellt. Bei den verwendeten Leistungsdaten handelt es sich um Minutenmittelwerte, die am Haus-/Wohnungsanschluss gemessen werden. Da das Ziel in der Verschiebung des Energiebezugs besteht, wurden die Leistungswerte (W/min) in Energie (kWh) umgerechnet. Die zeitliche Auflösung der Daten wurde auf einen Wert pro Stunde reduziert, indem die kWh -Werte pro Minute zu kWh -Werten pro Stunde aufsummiert wurden und aus den *semaLeveln* ein Stundenmittelwert berechnet wurde. Dadurch wurden auch kurzfristige Einflüsse verringert.

4.1.2 Kombinierte Darstellung von Durchschnittsverbrauch, semaLevel Strom und Anwesenheit

In Abbildung 4.1 ist das durchschnittliche Verbrauchsprofil aller Teilnehmer_innen (grüne Balken) sowie die Durchschnittswerte der *semaLevel* (orange Linie) und Anwesenheit² (grau gestrichelte Linie) über den Tagesverlauf während des Auswertzeitraums dargestellt.

Wie bereits in Abschnitt 3 erwähnt, war der Feldtest in drei Phasen gegliedert. Für die folgende Auswertung werden die Daten der Phase 3 – „Level und Punkte“ – vom 15. März 2017 bis zum 31. Mai 2017 gewählt, da in diesem Zeitraum die *semaLevel* bei den Teilnehmer_innen angezeigt wurden und sie in diesem Zeitraum Punkte sammeln konnten.

In der Abbildung ist gut zu erkennen, dass Anwesenheit bzw. Energiebezug gegenläufig zum Mittelwert aller angezeigten *semaLevel* für Strom ist. Oft hatte der Level, dessen Verlauf der Einspeisung aus EE entspricht und damit tagsüber insbesondere durch die PV-Einspeisung

¹ Plausibler Datenbereich: 0-30 kW; aufgrund nicht-plausibler Werte wurden 5 der 17 Testhaushalte nicht mit einbezogen.

² Registriert durch Anwesenheitssensoren, die in den Häusern/Wohnungen der Teilnehmer_innen aufgestellt wurden (vgl. Abschnitt 3.3).

geprägt ist, sein Maximum in den späten Vormittagsstunden bis frühen Nachmittagsstunden. In dieser Zeit waren jedoch die meisten der Teilnehmer_innen nicht zu Hause, sodass auch der Energiebezug in der Zeit geringer als in den Morgen- und Abendstunden war.

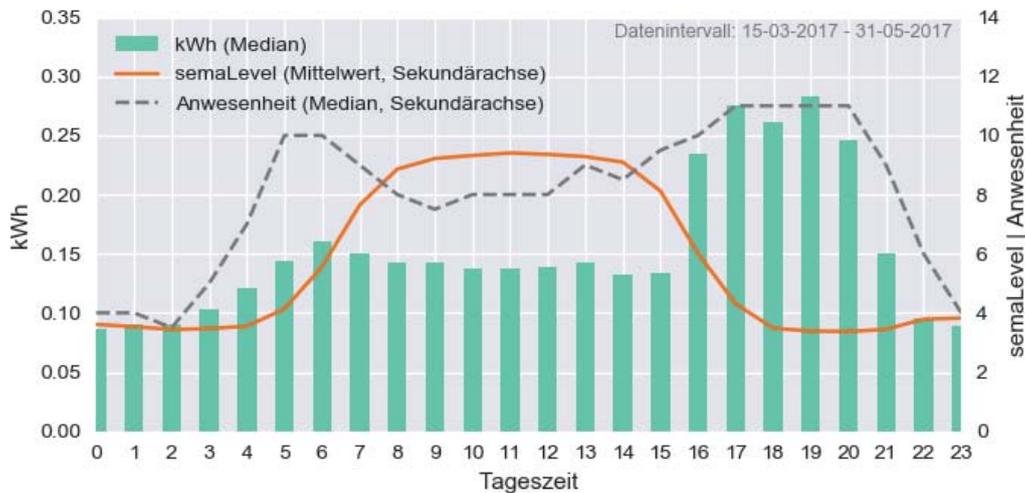


Abbildung 4.1: Verbrauchsprofil aller Teilnehmer_innen (Median der stündlichen kWh), sowie auf der Sekundärachse der Mittelwert der semaLevel und die Anwesenheit der Teilnehmer_innen zur betreffenden Stunde (Median)

4.1.3 Vergleich des Energiebezugs bei hohem und niedrigem semaLevel

Der folgende Ansatz vergleicht den Energiebezug zur selben Stunde eines Tages mit hohem semaLevel mit den Energiemengen, die zur selben Stunde bei niedrigem semaLevel bezogen wurden. Dafür wird pro Stunde des Tages und semaBox aus allen Energiewerten bei einem Level ≤ 6 und aus allen Energiewerten bei einem Level > 6 der jeweilige Median gebildet. Diese beiden Werte pro Stunde und pro semaBox werden miteinander verglichen, indem die Differenz gebildet wird:

$$kWh(i)_{semaBox(j),Level>6} - kWh(i)_{semaBox(j),Level\leq 6} = Indikator(i)_{semaBox(j),kWh} \quad (1)$$

mit $i = \text{Stunde des Tages } (0 - 23), j = \text{Nr. der semaBox}$

Ist das Ergebnis der Gleichung (1) ein positiver kWh-Wert, dann wurde im Mittel mehr Energie zur selben Stunde eines Tages bezogen, wenn die Level Werte > 6 betragen (Abbildung 4.2, farbige Balken).

Die Differenzbildung pro semaBox hat zugleich eine normierende Wirkung: Lastunterschiede, beispielsweise in der Grundlast, fallen dadurch weg.

Anschließend wird der Median aller stündlichen Indikatoren der semaBoxen gebildet, so dass ein Median pro Stunde für alle Teilnehmer_innen entsteht (Abbildung 4.2, grüner Verlauf).

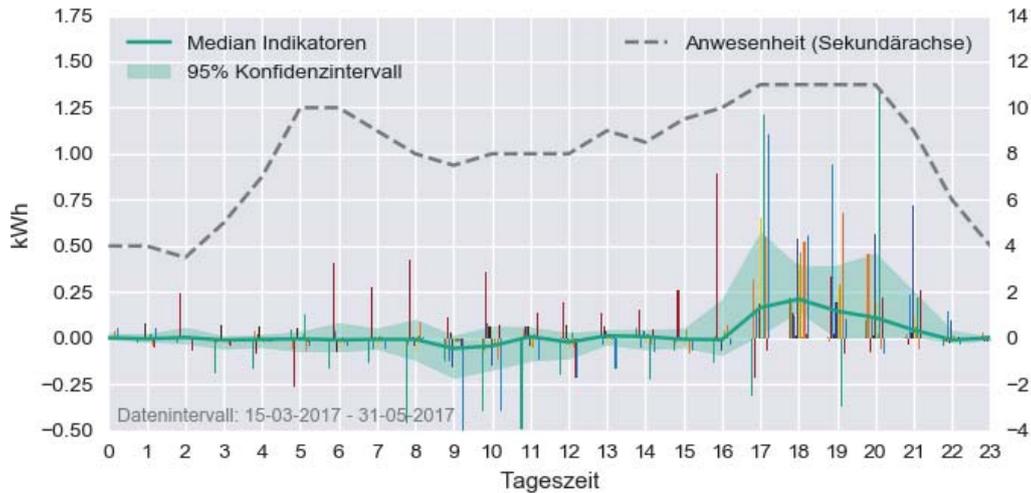


Abbildung 4.2: Der Median der Indikatoren zur selben Stunde (grüner Verlauf) deutet eine Verhaltensanpassung in den Abendstunden an. Der halbtransparente, grüne Bereich stellt das Vertrauensintervall der Indikatoren dar. Die Anwesenheit der Teilnehmer_innen zur betreffenden Stunde ist grau gestrichelt dargestellt. Die farbigen Balken, die entweder in eine positive oder negative Richtung zeigen, deuten die Indikatoren der einzelnen semaBoxen pro Stunde an.

4.1.4 Bewertung des Anreizsystems hinsichtlich der erreichten Anpassung des Strombezugs

Bei der Betrachtung des Medians der Indikatoren aller Teilnehmer_innen über den Tag (Abbildung 4.2) fällt auf, dass in der Zeit von 0 - 15 Uhr kaum eine Anpassung stattfand. Das Konfidenzintervall umspannt während dieser Zeit im Mittel den Bereich von - 0,08 bis + 0,05. Die geringe Anpassung ist plausibel, da in dieser Zeit die meisten Teilnehmer_innen entweder schliefen oder bei der Arbeit waren. Zwischen 16 und 19 Uhr zeigt der Verlauf dagegen, dass mehr Energie zu Zeiten mit hohem *semaLevel* bezogen wurde als zu Zeiten mit einem geringen Level. Auch das Vertrauensintervall, das um den Median gelegt wurde, bestätigt zu diesen Zeiten einen signifikanten Anstieg. Im Vergleich mit dem durchschnittlichen Lastprofil aller Teilnehmer_innen (vgl. kWh in Abbildung 4.1) ist eine Verlagerung von ca. 0,24 kWh um 18 Uhr beachtlich. Wie in Abschnitt 3.4 dargestellt, wurde der *semaLevel* für Strom an die tatsächliche Stromerzeugung aus EE geknüpft. Dies bedingt, dass der Level in den Abendstunden (meist) deutlich geringer als tagsüber ist. Hieraus resultiert, dass die verschiedenen Stufen des Levels nicht gleichmäßig über die Stunden des Tages verteilt sind (vgl. Abbildung 4.1, grauer gestrichelter Verlauf) und daher auch weniger Vergleichswerte bei höheren Levels zur Verfügung stehen, wodurch einzelne Ereignisse einen stärkeren Einfluss auf das Ergebnis ausüben können. Es kann also abschließend festgestellt werden, dass durch das gezielte Setzen intrinsischer Anreize wie Feedback und Wettbewerb zwar eine Verlagerung des Strombezugs der Teilnehmer_innen erreicht werden konnte, eine stärkere Verlagerung des Strombezugs insbesondere in der Mittagszeit jedoch anzustreben ist. Um dieses zu erreichen, kann es zielführend sein, das Anreizsystem noch einmal anzupassen oder auch ein völlig anderes Anreizsystem zu entwickeln.

4.2 Auswirkung der automatisierten programmierbaren Heizungssteuerung auf den Heizenergieverbrauch

Die folgenden Auswertungen zielen auf die Abschätzung der durch die Kombination von automatischer Heizungssteuerung und spielerischem Wettbewerb erzielten Energieeinsparung.

4.2.1 Modell und Methodik

Das Modell zur Abschätzung der erzielten Energieeinsparung folgt dem Konzept des Tagesmitteltemperaturverfahrens nach VDI 3807-1 [19]. Basierend auf diesem Verfahren wurde in der Literatur bereits das Konzept von Heizgradtagen beschrieben, die die Tagesmittelwerte der Außentemperatur sowie die Heizgrenztemperatur des Gebäudes berücksichtigen. In Anlehnung an [20] gilt basierend auf der VDI 3807-1:

$$G_{HG} = \sum_{n=1}^z (t_{HG} - t_{a,n}) \quad (2)$$

Der Wert G_{HG} wird mit den Tagesmittel-Außentemperaturen $t_{a,n}$ für jeden Tag n innerhalb einer Heizperiode berechnet, wobei nur die Tagesmittel-Außentemperaturen unterhalb der Heizgrenztemperatur t_{HG} des Gebäudes verwendet werden und z die Zahl der Heiztage bezogen auf die Heizgrenztemperatur des Gebäudes darstellt. Zur Temperaturbereinigung wird dann zusätzlich der entsprechende Referenzwert G_{HGm} für das langjährige Mittel benötigt (siehe unten). Der bereinigte Jahresenergieverbrauch berechnet sich dann aus dem realen Energieverbrauch Q_{VgH} bezogen auf den Zeitraum, für den G_{HG} berechnet wurde, wie folgt nach VDI 3807-1 (Außentemperaturbereinigung):

$$Q_{VH} = Q_{VgH} \cdot \frac{G_{HGm}}{G_{HG}} \quad (3)$$

Um die Energieeinsparung über dieses Modell abschätzen zu können, wird neben dem tatsächlich durchgeführten und gemessenen Feldtest (Realfall) ein fiktionaler Referenzfall eingeführt. Die Einsparung ergibt sich dann aus dem Vergleich dieser beiden Fälle. Der Referenzfall geht davon aus, dass ohne *sema*-Wettbewerb und ohne ein Heizungsmanagement höchstens einmal täglich eine manuelle Regelung der Heizung stattgefunden hätte (ggf. neben einer zusätzlich vorhandenen zentralen Nachtabsenkung im Gebäude). Des Weiteren werden im Referenzfall die Räume während des Tages permanent auf einer „Komforttemperatur“ für diesen Tag gehalten, die die Teilnehmer_innen bei Raumnutzung als angenehm empfinden. Die Energieeinsparung durch das Heizungsmanagement bewirkt eine Absenkung der rechnerischen Heizgrenztemperatur t_{HG} . Das Modell wird so erweitert, dass der Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch für den Referenzfall und dem Energieverbrauch für den Realfall entsprechend dem Zusammenhang zwischen gemessenem und bereinigtem Energieverbrauch angesetzt wird:

$$Q_{VHref} = Q_{VHreal} \cdot \frac{G_{HGref}}{G_{HGreal}} \quad (4)$$

Die relative Energieeinsparung ergibt sich dann zu:

$$r_{eff} = \frac{Q_{VHref} - Q_{VHreal}}{Q_{VHref}} = 1 - \frac{Q_{VHreal}}{Q_{VHref}} = 1 - \frac{G_{HGbase}}{G_{HGreal}} \quad (5)$$

Die Heizgradtagszahlen $G_{HG_{base}}$ und $G_{HG_{real}}$ werden auf Basis der Tagesmittel-Außentemperaturen berechnet. Da die Auswertung auch möglichst allgemeingültig sein soll, wird auf Temperaturdaten, die sich auf das langjährige Mittel beziehen, zurückgegriffen. Diese werden aus den Testreferenzjahren (TRY) des Deutschen Wetterdienstes [21] berechnet, die vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung BBSR zur Verfügung gestellt werden [22].

Das im Folgenden verwendete Modell geht davon aus, dass die Heizgrenztemperatur für das Tagesmittel um den gleichen Wert ΔT_{Raum} sinkt, um den die Tages-Raummitteltemperatur im Realfall gegenüber dem Referenzfall sinkt. Damit gilt:

$$\Delta T_{Raum} = T_{Raum,Referenz}(T_{Komfort}, Nachtabsenkung) - \overline{T_{Raum}} \quad (6)$$

$$r_{eff} = 1 - \frac{G(HG_{base})}{G(HG_{real})} = 1 - \frac{G(HG_{real} + \Delta T_{Raum})}{G(HG_{real})} \quad (7)$$

4.2.2 Berechnung der Komfort-Temperatur sowie der mittleren Temperaturabsenkung im Realfall gegenüber dem Referenzfall

Die Komfort-Temperatur soll die „Wohlfühl-Temperatur“ in dem jeweiligen Raum sein in Abgrenzung zur Absenk-Temperatur. Die Komforttemperatur wird aus den gemessenen Raum-Isttemperaturen geschätzt, indem aus den Raumtemperaturen jeden Tages nur das obere 10 %-Perzentil gemittelt wird. Eine Untersuchung mit einer abweichenden Wahl des Perzentils im Bereich des oberen 5 % - 15 %-Perzentils ergibt nur eine geringe Sensitivität für die Wahl der Perzentil-Größe. Für die Kurzfassung des vorliegenden Beitrags wurde alternativ eine Berechnung auf Basis der Raum-Solltemperaturen durchgeführt. Da allerdings für die realen Einsparungen die Ist-Temperaturen entscheidend sind, werden diese im Folgenden als Grundlage der Berechnung verwendet.

Für die Tages-Raummitteltemperatur des Referenzfalls muss neben der Komforttemperatur ggf. auch eine Nachtabsenkung berücksichtigt werden, was aber nicht in allen Gebäuden realisiert ist. Nach der DIN V 18599-10 wird eine Nachtabsenkung täglich für das Intervall von 23:00 bis 6:00 Uhr angesetzt, wenn diese in einem Gebäude aktiviert ist [23]. Bei Berücksichtigung der Nachtabsenkung werden im Referenzfall für diesen Zeitraum die real gemessenen Temperaturen angesetzt, ansonsten durchgehend die Komforttemperatur. Abbildung 4.3 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Raumtemperatur-Tagesmittelwerte für den Real- und die beiden Referenzfälle.

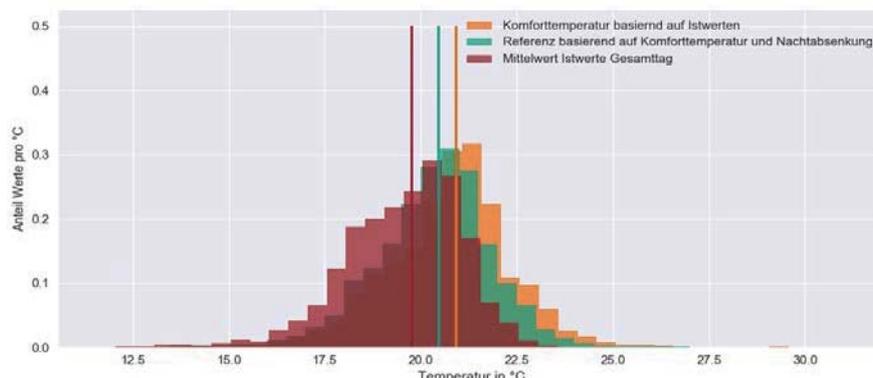


Abbildung 4.3: Häufigkeitsverteilung der Temperatur-Mittelwerte, die zur Berechnung der erzielten mittleren Absenkung verwendet werden. Die senkrechten Linien kennzeichnen jeweils den Median.

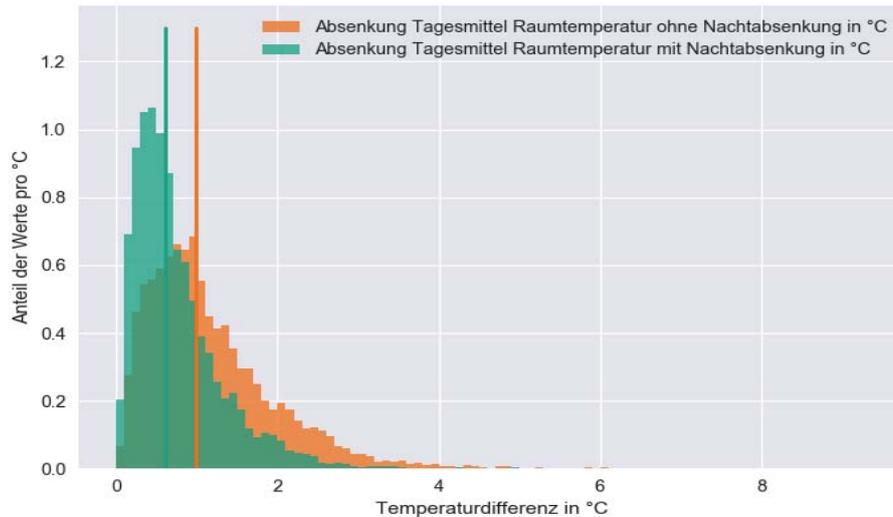


Abbildung 4.4: Häufigkeitsverteilung der Absenkung der Tages-Raummitteltemperatur mit und ohne Berücksichtigung einer Nachtabsenkung. Die senkrechten Linien zeigen den Median an.

Es ist zu erkennen, dass die Tages-Raummitteltemperaturen sowohl für den Realfall als auch für die Referenzfälle eine plausible Verteilung aufweisen. Die erzielte mittlere Absenkung der Raumtemperatur liegt bei ca. + 1,19 °C bzw. + 0,77 °C bei einer Nachtabsenkung im Referenzfall. Das 95 %-Konfidenzintervall für den Mittelwert der beträgt + 1,16 °C bis + 1,21 °C bzw. + 0,75 °C bis + 0,78 °C. Es konnte also eine statistisch signifikante Absenkung erzielt werden.

4.2.3 Korrelation mit dem Anreiz des sema-Wettbewerbs

Der sema-Wettbewerb hatte vor allem das Ziel dazu anzureizen, die Raum-Solltemperatur dann hoch zu setzen, wenn Personen im Raum anwesend sind und diese herunterzusetzen, wenn sich niemand im Raum aufhält. Abbildung 4.5 zeigt die Differenz der Raum-Solltemperaturen sowie auch der Isttemperaturen im Vergleich während der Zeiten eines Tages mit gemessener Anwesenheit und Zeiten ohne Anwesenheit.

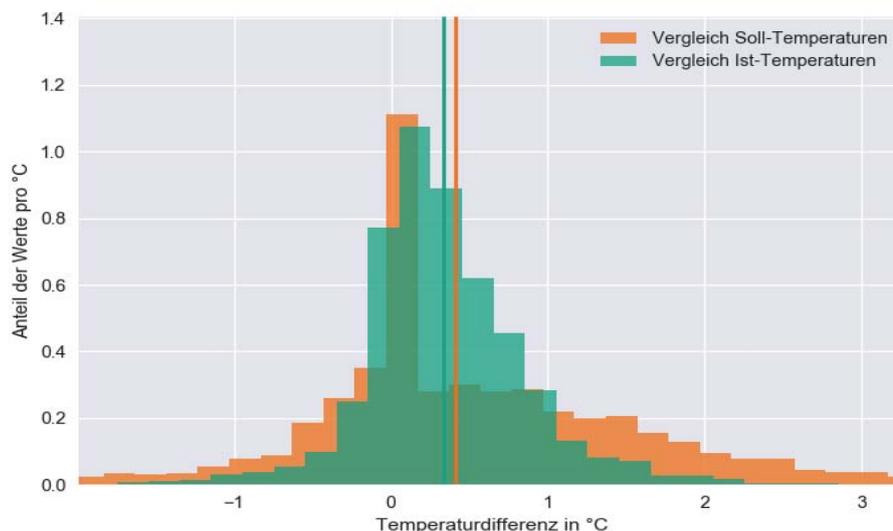


Abbildung 4.5: Häufigkeitsverteilung der Differenz der mittleren Raumtemperatur bei Anwesenheit einer Person im Raum gegenüber dem Mittelwert bei Nichtnutzung. Die senkrechten Linien zeigen die Mittelwerte an.

Hier werden die Mittelwerte betrachtet, da der Median relativ stark durch die Nullwerte bestimmt wird. Der Mittelwert der dargestellten Werte beträgt + 0,41 °C (Median: + 0,20 °C) für die Sollwerte und + 0,33 °C (Median + 0,27 °C) für die Ist-Werte. Das 95 %-Konfidenzintervall für den Mittelwert der Isttemperaturdifferenz beträgt + 0,31 bis + 0,35. Es ist also eine leichte, aber statistisch signifikante Temperaturabsenkung bei Abwesenheit zu erkennen, die allerdings deutlich unter der Differenz zwischen Komfort-/Referenztemperatur und erzielter Raum-Mitteltemperatur von 0,8 - 1,2 °C liegen. Das deutet daraufhin, dass bezüglich der Auslegung der Heizungssteuerung (z. B. hinsichtlich des Einsatzes selbstlernender bzw. modellprädiktiver Algorithmen zur Anwesenheitsvorhersage) noch erhebliches Weiterentwicklungspotenzial besteht.

4.2.4 Abschätzung der relativen Einsparungen

Für die Abschätzung der Heizgrenztemperaturen standen keine realen Energieverbrauchswerte, sondern lediglich die Ventilstellungen der Heizkörperthermostate zur Verfügung. Zur Abschätzung wird davon ausgegangen, dass der Energieumsatz am Heizkörper im Mittel proportional zur Ventilstellung ist und sich somit der tägliche Energieumsatz über die Integration der Ventilstellung über die Zeit ermitteln lässt. Dieses Verfahren ist noch mit Unsicherheiten behaftet und wird hier zur ersten Einschätzung der realisierten Einsparungen verwendet. Durch die Einbeziehung von Messungen des Brennstoffverbrauchs soll dies in Zukunft erheblich verbessert werden.

Die Heizgrenztemperaturen wurden dann mittels linearer Regression des Energieverbrauchs über die real gemessene Außentemperatur im Feldtest entsprechend des Verfahrens der VDI 3807 geschätzt. Dies ergibt Werte für die Heizgrenztemperatur im Bereich von 7,8 - 11,6 °C mit einem Median von 10,0 °C, Auffällig ist, dass diese Werte deutlich unter den Werten liegen, die in der Auslegung üblicher Weise verwendet werden. Teilweise ist dies dadurch zu erklären, dass die Literaturwerte für Fälle ohne Heizungssteuerung gelten und für den hier gemessenen Realfall wie vorher erläutert eine Absenkung parallel zur Raum-Mitteltemperatur um 0,8 - 1,2 °C zu erwarten ist. Es ist auch denkbar, dass der Wettbewerb ein effizienteres Lüftungsverhalten angereizt hat, wodurch die Heizgrenztemperatur stärker abgesenkt worden sein könnte als rein über die Änderung der Raumtemperatur zu erwarten. Der Sachverhalt erfordert jedoch weitere Untersuchungen in der Zukunft. Auf Grund dieser Unsicherheiten werden im Folgenden für verschiedene Wertekombinationen die geschätzten realisierten Einsparungen angegeben:

Beschreibung	ΔT_{Raum}	$T_{HG,Referenz}$	Einsparung
<i>Untere Grenze unter Einbeziehung Literaturdaten</i>	0,8 °C	15,0 °C	8,9 %
<i>Untere Grenze aus berechneten Daten</i>	0,8 °C	12,3 °C	10,3 %
<i>Mittleres Szenario</i>	1,0 °C	12,0 °C	13,0 %
<i>Ohne Nachtabsenkung</i>	1,2 °C	12,2 °C	15,3 %
<i>Gebäude mit hohem Absenkpotezial</i>	2,0 °C	13,0 °C	23,8 %

Tabelle 4.1: Geschätzte realisierte Energieeinsparungen

Die Auswertung zeigt, dass die realen erzielten Absenkungen deutlich unter den Absenkungen der Solltemperaturen liegen, die Räume also häufig nicht auf die eingestellten Absenkttemperaturen auskühlten. Der Grund hierfür wird im Wärmefluss von beheizten in unbeheizte Räume vermutet. Für weitere Messungen ist es daher anzustreben, jeden Raum eines Gebäudes mit

Sensoren auszustatten, um Wärmeflüsse von beheizten in unbeheizte Räume erfassen zu können. Weiterhin kann auf Grund der niedrigen Heizgrenztemperatur und des vermutlich ähnlichen Sozialen Milieus [24, 25] der Teilnehmer_innen angenommen werden, dass es sich bei den Teilnehmer_innen des Feldtests um eine Nutzergruppe handelt, die ohnehin eher effizient heizt. Für eine weiterführende Auswertung sollten daher sowohl Teilnehmer_innen unterschiedlicher Milieus [25], als auch Gebäude mit einem höheren spezifischen Wärmebedarf betrachtet werden. Letztendlich unterliegt die Berechnung der Einsparung gewissen Unsicherheiten. Um diese Unsicherheiten zu minimieren, ist daher in einem Folgefeldtest der Abgleich mit realen Daten zu Brennstoffverbrauch anzustreben.

5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Ziel des *sema*-Feldtests war es, den gezielten Einsatz von Spiel-Design-Elementen in einem Energiemanagement- und Energieeffizienz-Kontext zu evaluieren. Hierbei wurden intrinsische Anreize so gesetzt, dass sie die Teilnehmer_innen des Feldtests motivieren sollten, ihren elektrischen Verbrauch mit der Energieerzeugung aus EE zu harmonisieren und ihren Wärmebedarf durch effizienteres Heizen und Lüften zu senken.

In Abschnitt 4.1 wurde daher untersucht, ob das Anreizsystem zu einer belegbaren Verschiebung des Strombezugs beitragen konnte. Die Ergebnisse zur Auswertung des Strombezugs lassen vermuten, dass eine intrinsisch motivierte Anpassung des Strombezugs an die Erzeugung aus EE stattgefunden hat. Es hat sich jedoch gezeigt, dass diese Anpassung nur in Zeiten stattfinden konnte, in denen die Teilnehmer_innen zu Hause waren. Diese Zeiten decken sich allerdings erwartungsgemäß weniger mit den Zeiten, zu denen die Einspeisung aus EE hoch ist. Hieraus kann die Forderung nach einem höheren Grad der Digitalisierung [2] abgeleitet werden. Zwar können bereits allein durch die Visualisierung des Energieverbrauchs oder das Aussprechen von Handlungsempfehlungen Potenziale zur Anpassung des Verbrauchsverhaltens gehoben werden, jedoch kann eine Automatisierung der Steuerung diese Potenziale weiter steigern, insbesondere in den Zeiten, in denen die Teilnehmer_innen nicht zu Hause sind.

Abschnitt 4.2 hat die Auswirkung der Heizungssteuerung auf den Energieverbrauch untersucht. Dazu wurde die Energieeinsparung abgeschätzt, die sich durch die Kombination von automatischer Heizungssteuerung und spielerischem Wettbewerb erzielen lassen. Unter Berücksichtigung der bereits angesprochenen Unsicherheiten in der Auswertung auf Grund von bisher nicht erfassten Wärmeflüssen von beheizten in unbeheizte Räume, der niedrigen Heizgrenztemperatur und des angenommenen Sozialen Milieus hat die Auswertung Potenziale der Energieeinsparung durch die Kombination von automatischer Heizungssteuerung und spielerischem Wettbewerb deutlich gemacht. Diese Potenziale können wie bereits angesprochen durch die Visualisierung des Energieverbrauchs oder Handlungsempfehlungen an die Teilnehmer_innen noch vergrößert werden.

Zusammenfassend hat die Auswertung des Feldtests bezüglich der Wirkung des *sema*-Anreizsystems zwei wesentliche Ergebnisse geliefert:

- Basierend auf den Ergebnissen der Auswertung des Strombezugs in Abhängigkeit vom *semaLevel* für Strom kann davon ausgegangen werden, dass durch das gezielte Setzen intrinsischer Anreize wie Feedback und Wettbewerb eine Verlagerung des Strombezugs der Teilnehmer_innen von bis zu 50 % erreicht werden konnte.

- Die Abschätzung der durch die Kombination von automatischer Heizungssteuerung und spielerischem Wettbewerb erzielten Energieeinsparung zeigt, dass auch bei einem bereits überdurchschnittlich effizienten Heizverhalten noch Einsparungen in der Größenordnung 10 - 15 % realisiert werden konnten.

Die Ergebnisse des Feldtests stützen somit die Aussagen der *dena-ANALYSE – Digitalisierung als Enabler für die Steigerung der Energieeffizienz* [2] zu smarten automatisierten Dienstleistungen, die empfiehlt, zum einen das Verbrauchsverhalten und die Bedürfnisse der Nutzer bei ihren Empfehlungen und Steuerungen flexibel zu berücksichtigen und zum anderen den Nutzer mittels intrinsischer Motivation aktiv einzubinden.

Der nächste Schritt bei der Weiterentwicklung von *sema* sollte daher die Erhöhung des Automatisierungsgrads unter Berücksichtigung der individuellen Anforderungen der Nutzer sein. Voraussetzung hierfür ist eine stärkere intrinsisch motivierte Involvement des Nutzers, um so die Voraussetzung für die gewünschte Verhaltensanpassung zu schaffen.

Förderhinweis

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben C/sells [26] wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie auf Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03SIN125 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literaturverzeichnis

- [1] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, *Energiewende: Fragen und Antworten*. [Online] Available: https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Fragen-Antworten/1_Allgemeines/1_warum/_node.html. Accessed on: Jan. 25 2018.
- [2] P. Richard and L. Vogel, "Digitalisierung als Enabler für die Steigerung der Energieeffizienz: Eine Analyse digitaler Energiedienstleistungen sowie Handlungsempfehlungen zur verstärkten Nutzung ihrer Potenziale," Berlin, 2017. [Online] Available: https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9228_dena-Analyse_Digitalisierung_Enabler_Steigerung_Energieeffizienz.pdf. Accessed on: Dec. 14 2017.
- [3] Opower, Inc., "Opower Energy Social App: Engaging consumers via the world's largest energy-related social network," [Online] Available: http://opower.com/uploads/files/US_DataSheet_Social.pdf. Accessed on: Feb. 07 2014.
- [4] Oracle Corporation, *Oracle Utilities Opower Customer Service Interface: Turn Your CSRs Into Energy Advisors*. [Online] Available: <https://www.oracle.com/industries/utilities/products/opower-customer-service-interface-cloud-service/index.html>. Accessed on: Nov. 02 2017.
- [5] sonnen GmbH, *sonnenCommunity – die weltweit größte Plattform für Strom-Sharing*. [Online] Available: <https://www.sonnenbatterie.de/de/sonnenstrom/sonnencommunity>.
- [6] SMA Solar Technology AG, *Sunny Places: Ihr Community-Portal für Solaranlagen*. [Online] Available: <https://www.sma.de/produkte/monitoring-control/sunny-places.html>. Accessed on: Jan. 25 2018.
- [7] easyOptimize GmbH, *shineConnect: shineConnect ist unsere Produktpalette für Photovoltaik und KWK-Anlagenbesitzer*. [Online] Available: <https://www.shinepowered.com/>. Accessed on: Jan. 25 2018.
- [8] innogy SE, *Intelligente Haussteuerung – auch für unterwegs*. [Online] Available: <https://www.innogy.com/web/cms/de/3105000/fuer-zuhause/bequem-und-sicher-leben-mit-smarthome/>. Accessed on: Nov. 02 2017.

- [9] M. Klobasa, *Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten*. Zürich, Techn. Hochsch., Diss., 2007, 2007.
- [10] B. Becker *et al.*, "Decentralized Energy-Management to Control Smart-Home Architectures," (English), Springer, Berlin, https://www.ida.ing.tu-bs.de/uploads/media/Energy_Management_SmartHomes.pdf, 2010.
- [11] R. C. Battalio, J. H. Kagel, R. C. Winkler, and R. A. Winett, "Residential Electricity Demand: An Experimental Study," *The Review of Economics and Statistics*, vol. 61, no. 2, p. 180, 1979.
- [12] W.F. van Raaij and T. M.M. Verhallen, "A behavioral model of residential energy use," *Journal of Economic Psychology*, vol. 3, no. 1, pp. 39–63, 1983.
- [13] S. Deterding, "Gamification: designing for motivation," *interactions*, vol. 19, no. 4, pp. 14–17, 2012.
- [14] J. McGonigal, *Reality is broken: Why games make us better and how they can change the world*. London: Vintage, 2012.
- [15] I. Blohm and J. M. Leimeister, "Gamification: Gestaltung IT-basierter Zusatzdienstleistungen zur Motivationsunterstützung und Verhaltensänderung," *Wirtschaftsinf*, 2013.
- [16] Stephan Engel, "sema - Social Energy Management," in *Energie für unser Europa: 14. Symposium Energieinnovation, 10.-12. Februar 2016, TU Graz, Österreich*, U. Bachhiesl, Ed., Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2016.
- [17] S. Deterding, M. Sicart, L. Nacke, K. O'Hara, and D. Dixon, "Gamification. using game-design elements in non-gaming contexts," in *the 2011 annual conference extended abstracts*, Vancouver, BC, Canada, p. 2425.
- [18] Fraunhofer IEE, *OGEMA: open energy management*. [Online] Available: www.ogema.org. Accessed on: 23.01.2018 15.06.2015.
- [19] VDI, *Verbrauchskennwerte für Gebäude: Characteristic consumption values for buildings : Grundlagen ; Fundamentals*, 2013rd ed. Berlin: Beuth, 2013.
- [20] Wikimedia Foundation Inc., *Gradtagzahl*. [Online] Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gradtagzahl>. Accessed on: Jan. 24 2018.
- [21] Deutscher Wetterdienst, *Testreferenzjahre: TRY*. [Online] Available: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html>. Accessed on: Jan. 24 2018.
- [22] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), *Ortsgenaue Testreferenzjahre (TRY) von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse*. [Online] Available: <http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/5EnergieKlima-Bauen/2013/testreferenzjahre/01-start.html?nn=436654¬First=true&docId=1595620>. Accessed on: Jan. 24 2018.
- [23] *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*, DIN V 18599-10, 2007.
- [24] Wikimedia Foundation Inc., *Soziales Milieu*. [Online] Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Soziales_Milieu#Sinus-/Sigma-Milieus. Accessed on: Jan. 26 2018.
- [25] Wikimedia Foundation Inc., *Sinus-Milieus*. [Online] Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sinus-Milieus>. Accessed on: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sinus-Milieus>.
- [26] Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V., *C/sells*. [Online] Available: <http://www.csells.net/de/>. Accessed on: Nov. 16 2017.