

Diss. ETH No. 23058

Scalable and Personalized Energy Efficiency Services with Smart Meter Data

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Christian Beckel

Dipl.-Inf., Eberhard Karls University, Tübingen
born on 25 April 1983
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Friedemann Mattern, examiner
Prof. Dr. Karl Aberer, co-examiner
Prof. Dr. Silvia Santini, co-examiner
Prof. Dr. Thorsten Staake, co-examiner

2016

Abstract

Information and communication technology plays an important role in addressing the world's energy problem. Networked digital electricity meters (so-called smart meters), for instance, can provide households with real-time information on their electricity consumption and thus help them to conserve energy. Initial expectations on the saving potential of this technology were too optimistic, however. In fact, recent pilot studies conducted under realistic assumptions have shown that savings induced by plain electricity consumption feedback are often significantly lower than many have originally expected.

In this dissertation, we take smart metering to a new level as we explore a data analysis-driven approach to personalize energy efficiency services that may be offered at large scale. An example for such a service is automated energy consulting, which consists in automatically providing energy saving recommendations to households by taking into account their appliance stock and usage profiles. In addition, we provide the foundation for an electricity bill that is tailored to the household as it shows the contribution of individual appliances to the overall bill or compares a household's consumption with other households that have similar characteristics. Behavioral trials indicate that such consumption feedback is potentially more successful in motivating households to reduce their electricity consumption than plain consumption feedback or generic energy saving recommendations.

One contribution of this thesis is the design, development, and evaluation of a system that automatically estimates characteristics of a household (like its socio-economic status, dwelling properties, and appliance stock) from the household's electricity consumption data. We evaluate our approach on real world smart meter data collected from more than 4000 households over a period of 1.5 years. Our analysis shows that inferring household characteristics is feasible, as our method achieves an accuracy of more than 70% over all households for many of the characteristics and even exceeds 80% for some of the characteristics. For utilities, the system creates valuable customer insights

that—without having to perform costly and cumbersome surveys—help to run energy efficiency campaigns more efficiently by targeting each household with the adequate service (e.g., offering energy consulting for retired people and a smart heating system, which automatically controls the thermostat based on occupancy, for employed people). Furthermore, these insights can be used to realize automated peer group comparisons on the electricity bill or in an online portal.

Providing automated, household-specific energy saving recommendations requires more detailed information about a household than its high-level characteristics. In particular, it is important to know when individual appliances are running and how much they consume. To avoid measuring each appliance individually through a complex sensing infrastructure, we investigate inferring this information from the overall electricity consumption measured by a smart meter. To explore this concept (non-intrusive load monitoring, NILM), we developed an evaluation framework and analyzed the performance of several state-of-the-art NILM algorithms. To this end, we collected electricity consumption data in six Swiss households over a period of eight months and made it publicly available. Along with fine-grained smart meter data (collected at 1 Hz), our data set contains ground truth measurements of 47 selected appliances and each of the household’s occupancy state. Our analysis shows that—through the enhancement of an existing NILM algorithm—it is possible to achieve recognition rates of more than 90% for some typical appliances. This is sufficient for energy consulting scenarios; its practical use is limited, however, since a training period is required.

Ultimately, deploying smart meters comes with a cost that—for some of the households—can be higher than the achievable savings given today’s energy prices. Maximizing societal benefits thus requires a well-managed interplay between (1) regulators, which define rules for smart meter deployments and set penalties if saving targets are not reached, (2) utilities, which develop and run energy efficiency campaigns, and (3) households, which should invest in energy saving solutions or adapt their lifestyle in order to use energy more efficiently. This thesis copes with this challenge as it shows how to utilize Internet of Things technologies and machine learning methods to enable personalized energy efficiency services that scale to thousands or even millions of households. We develop methods, build open source evaluation frameworks, and collect and analyze real world consumption data in order to better understand residential electricity consumption and improve the effect (and thus the value) of smart meter deployments and feedback mechanisms.

Kurzfassung

Informations- und Kommunikationstechnik kann einen substantiellen Beitrag zur Lösung unseres Energieproblems leisten. Intelligente Stromzähler (Smart Meter) können beispielsweise Privathaushalte zeitnah über ihren Stromverbrauch informieren und die Bewohner somit beim Stromsparen unterstützen. Pilotstudien, die in den letzten Jahren unter realistischen Bedingungen durchgeführt wurden, haben allerdings gezeigt, dass die Einsparungen, die durch einfaches Verbrauchsfeedback erzielt werden, um einiges geringer sind als von vielen erwartet.

In der vorliegenden Dissertation gehen wir über einfaches Verbrauchsfeedback hinaus und erforschen Ansätze zur Analyse von Smart-Meter-Daten mit dem Ziel, personalisierte Energieeffizienzdienstleistungen in grossem Umfang zu ermöglichen. Ein Beispiel für eine solche Dienstleistung ist eine Energieberatung, die automatisch Energiesparempfehlungen auf Basis der im Haushalt verfügbaren Haushaltsgeräte und deren Nutzung erstellt. Darüber hinaus legen wir die Grundlagen für eine auf den Haushalt zugeschnittene Stromrechnung, die den Beitrag einzelner Geräte zum Gesamtstromverbrauch darstellt oder den Stromverbrauch des Haushalts mit dem ähnlicher Haushalte vergleicht. Verhaltensstudien deuten darauf hin, dass sich durch solch personalisiertes Feedback höhere Einsparungen erzielen lassen als durch generische Energiespartipps oder durch Verbrauchsfeedback, das aus blossen Zahlen besteht. Die Erzeugung dieser Art von Feedback erfordert jedoch Kenntnisse über den Haushalt wie beispielsweise die Zahl der Bewohner, Zahl und Art der Geräte sowie deren Nutzung. Diese Informationen liegen Anbietern von Energieeffizienzdienstleistungen in der Regel nicht vor beziehungsweise sind nur in Form von kostenintensiven Umfragen oder durch zusätzliche Messinfrastruktur erzielbar.

Einer der Beiträge dieser Dissertation besteht im Entwurf, der Entwicklung und der Bewertung eines Systems, das Charakteristiken eines Haushalts (z.B. den sozioökonomischen Status der Bewohner, Gebäudeeigenschaften oder die Zahl der Geräte) aus dessen Stromverbrauch schätzt. Wir evaluieren unseren Ansatz zur automatischen Haushaltsklassifizierung mit Hilfe von Stromverbrauchsdaten aus über 4000 Haushalten, die über einen Zeitraum von anderthalb Jahren erfasst wurden. Unsere Analyse zeigt, dass eine automatische Haushaltsklassifizierung möglich ist, da wir mit unserer Methode eine Genauigkeit von 70% für die meisten Haushaltseigenschaften und über 80% für manche Haushaltseigenschaften erzielen. Das System ermöglicht Energieversorgern, nützliche Kundeninformationen zu ermitteln, ohne aufwändige Umfragen durchzuführen. Diese können daher Energiesparkampagnen effizient gestalten, indem sie jeden Haushalt mit der für ihn am

besten geeigneten Dienstleistung ansprechen (z.B. für Rentner eine persönliche Energieberatung und für Berufstätige die Installation einer intelligenten Heizungssteuerung, welche die Temperatur automatisch auf Basis der An- und Abwesenheit der Bewohner regelt). Des Weiteren kann dieses Kundenwissen genutzt werden, um einen automatischen zielgruppenspezifischen Vergleich auf der Stromrechnung oder in einem Online-Portal anzubieten.

Die automatische Erzeugung personalisierter Energiesparempfehlungen erfordert detailliertere Informationen als die durch die Haushaltsklassifizierung ermittelbaren Charakteristiken. Es ist hierzu wichtig zu wissen, wann einzelne Geräte in Betrieb sind und wie viel Strom sie benötigen. Im Rahmen dieser Dissertation untersuchen wir den Ansatz, diese Informationen ebenfalls aus dem Gesamtstromverbrauch abzuleiten. Zur Bewertung dieses Konzepts (non-intrusive load monitoring, NILM) entwickelten wir ein Evaluationsframework und ermittelten die Genauigkeit mehrerer NILM-Verfahren. Für unsere Analyse erhoben wir Stromverbrauchsdaten aus sechs Schweizer Haushalten über einen Zeitraum von acht Monaten. Zusätzlich zu den hochauflösenden Messungen des Gesamtstromverbrauchs der Haushalte (mit einer Frequenz von 1 Hz) umfasst unser Datensatz auch Ground-Truth-Messungen von 47 ausgewählten Haushaltsgeräten sowie Informationen über die An- und Abwesenheit der Bewohner. Unsere Analyse zeigt, dass es mit Hilfe eines von uns erweiterten NILM-Verfahrens möglich ist, den Stromverbrauch und die Schaltzeitpunkte einiger typischer Geräte mit über 90% Genauigkeit zu schätzen. Dies ist ausreichend für eine automatisierte Energieberatung; allerdings ist der praktische Einsatz durch das erforderliche Training des Systems begrenzt.

Einbau und Betrieb von Smart Metern verursachen Kosten, die bei manchen Haushalten höher sind als die monetären Einsparungen, die (bei gegenwärtigen Strompreisen) durch die Verbrauchsreduktion erzielt werden. Die Maximierung des gesellschaftlichen Nutzens erfordert daher ein Zusammenspiel mehrerer Akteure, und zwar (1) der Regulatoren, die Vorschriften für den Smart-Meter-Ausbau erlassen und Bussen für Energieversorger festlegen können, falls Effizienzziele nicht eingehalten werden, (2) der Energieversorger, die Energieeffizienzprogramme entwickeln und umsetzen, sowie (3) der Haushalte, die in Energieeffizienzlösungen investieren oder ihren Lebensstil anpassen sollen, um Strom möglichst effizient zu nutzen. Die vorliegende Dissertation geht diese Herausforderung an, indem sie aufzeigt, wie unter Verwendung von Internet-der-Dinge-Technologien und Methoden aus dem maschinellen Lernen personalisierte Energieeffizienzdienstleistungen entwickelt werden können, die kostengünstig auf Tausende oder Millionen Haushalte skalieren. Hierzu entwickeln wir Methoden, Open-Source-Frameworks, sammeln Stromverbrauchsdaten und analysieren diese, um den Stromverbrauch von Haushalten besser zu verstehen und den Effekt (und damit den Wert) des Smart-Meter-Ausbaus und des Verbrauchsfeedbacks für die Gesellschaft zu erhöhen.