

Ubiquitous Computing Technologies for Residential Energy Conservation

Doctoral Thesis

Author(s):

Weiss, Markus

Publication date:

2012

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007139591>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diss. ETH Nr. 20253

Ubiquitous Computing Technologies for Residential Energy Conservation

A dissertation submitted to
ETH Zurich

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
Markus Weiss

Diplom-Informatiker, Julius-Maximilians University Würzburg
born May 08, 1981, citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Friedemann Mattern, examiner
Prof. Dr. Elgar Fleisch, co-examiner
Prof. Dr. Hans Gellersen, co-examiner

2012

Abstract

Residential electricity consumption is continuously increasing and accounts now for about one third of the total electrical energy produced in Europe and the U.S. How much residential electricity is used depends primarily on the operated household appliances and the behavior of the residents. One major difficulty for individuals who are interested in saving energy in their household is the lack of information about their electricity consumption. Feedback on energy usage is typically only provided by a monthly (if not yearly) utility bill and thus remains rather vague and opaque to most residents. As a result, most individuals could reduce their electricity consumption, but few know how much they consume and even fewer know how much energy they consume for a particular purpose (e.g., lighting). And even those who do have a fair understanding of their consumption patterns rarely receive guidance about the changes that will have the biggest impact on their electricity bill.

Through recent technological advances in terms of cost, size, and computing power, Information and Communication Technology can help in many ways to address the challenge of making residential electricity consumption visible to individuals. Embedding computing and communication devices in everyday objects, as advocated by Ubiquitous Computing, can help to communicate the consumption, but also the most energy-efficient usage of a particular smart appliance. Smart meters that enable capturing fine-grained electricity consumption information at high frequency are currently replacing traditional electricity meters. Smartphones have become ubiquitous, powerful computing platforms that allow visualizing energy consumption on the spot without the need for external wall displays. By digitally enhancing physical devices that populate homes, Ubiquitous Computing is offering new possibilities to address the problem of residential energy conservation.

Applying Ubiquitous Computing technologies for residential energy conservation raises research questions about the most suitable overall system design of energy feedback solutions and the most appropriate modality of communicating the consumption and guidance information to the consumer. This thesis addresses these research questions by examining how Ubiquitous Computing can help provide effective feedback that goes beyond

mere consumption values and is at the same time integrated into daily life. Following a user-centric approach that combines the use of smartphones and smart meters, we tackle some of the open challenges in residential energy conservation. The contributions of this thesis are threefold.

First, we design, develop, and evaluate an electricity sensing and feedback infrastructure that seamlessly integrates into the residential environment. It addresses the technical requirements that have been identified in previous research to enable users to better understand their energy consumption (i.e., integration into daily life, real-time information provisioning, low usage barrier, and fine-grained consumption information). At the same time, the infrastructure serves as an easily extendible framework that can be used by other researchers (e.g., to develop and test visualization concepts, to realize further automated energy savings, or to design behavioral science experiments). To demonstrate the feasibility of our approach, we implemented a prototype of the infrastructure and deployed and evaluated it in a laboratory setting as well as in four households in Switzerland. The architecture supports the interaction capabilities of mobile phones together with the integration of smart electricity meters and is used as the base for most other work done in the context of this thesis.

Second, we evaluate the potential of mobile phones to serve as portable electricity feedback monitors in two different experimental settings: a user study as well as a real-world deployment. In the user study, we analyze the perceived value of various feedback functionalities and identify which type of feedback is meaningful to users. Moreover, we evaluate the general usability, accuracy, and intention of use of such an electricity feedback application. The real-world deployment aims at characterizing different user types and providing qualitative results gathered through the use of the application. It shows that to foster long-term application of the system motivational concepts are required that engage users once their initial curiosity is satisfied. Overall, the results confirm the suitability of mobile phones as an energy feedback interface and provide insights for the design of future energy conservation applications. They outline that a clear and easy to explain use case scenario is key and that knowledge-increasing functionalities as well as those functionalities from which monetary savings can be directly implied are perceived as most important. To address technophobe users, action-guiding feedback that goes beyond displaying aggregated information in mere numbers is required.

Third, we develop, implement, and evaluate an algorithm that disaggregates the overall energy consumption to the consumption of individual devices. It enables users to link consumption with behavior and provides the base for automated energy recommendation systems. Compared to other load disaggregation approaches, our algorithm does not require additional hardware nor complex, time-intensive calibration conducted by do-

main experts. Moreover, our approach is able to easily take new appliances into account where other systems require recalibration. With a simple yet powerful feature provided by the user interface on the mobile phone, users can incrementally integrate additional appliances into the disaggregation process. This is particularly important in a fast changing home environment. We evaluated the performance of our system in a laboratory test study with eight simultaneously running devices, achieving recognition rates of almost 90%.

Kurzfassung

Der Stromverbrauch privater Haushalte wächst kontinuierlich und macht heute bereits rund ein Drittel der gesamten elektrischen Energieproduktion in Europa und den USA aus. Die Strommenge, die ein Haushalt verbraucht, hängt in erster Linie von den betriebenen Geräten und von der Art und Weise, wie Bewohner diese Haushaltsgeräte verwenden, ab. Das Hauptproblem für Personen, die daran interessiert sind, in ihrem Haushalt Energie zu sparen, ist die fehlende Information über den individuellen Stromverbrauch. Die Rechnungsstellung mit zugehöriger Darstellung des Verbrauchs erfolgt heute höchstens monatlich (oft sogar nur jährlich) und lässt damit viele Haushalte über ihren Stromverbrauch lange im Unklaren. Grundsätzlich könnten viele Bewohner ihren Verbrauch reduzieren, allerdings wissen nur die wenigsten, wie viel und anteilmäßig für welchen Verwendungszweck sie Strom nutzen. Selbst diejenigen, die bereits ein gewisses Grundverständnis bezüglich ihres Verbrauchs besitzen, bekommen nur selten ausreichend Hilfe und Unterstützung, um konkrete Einsparpotentiale zu erkennen und auszunutzen.

Die jüngsten Fortschritte im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie können diese Informationslücke im Haushalt schließen und die Bevölkerung bezüglich Energieverbrauch und Einsparmöglichkeiten sensibilisieren. Durch die Integration von Rechen- und Kommunikationsfähigkeiten in Alltagsgegenstände, wie es das Ubiquitous Computing propagiert, kann der Stromverbrauch erst erfasst und anschließend die Verbrauchsinformation, gemeinsam mit Hinweisen zur energieeffizienteren Verwendung eines Geräts, an den Benutzer kommuniziert werden. Intelligente Stromzähler (Smart Meter) können den Stromverbrauch in hoher zeitlicher Auflösung messen und ersetzen derzeit klassische Stromzähler flächendeckend. Mobiltelefone stellen heute allgegenwärtige, leistungsstarke Rechenplattformen dar, die den Energieverbrauch direkt darstellen können, so dass nicht auf zusätzliche Hardware, wie beispielsweise Wandbildschirme, zurück gegriffen werden muss. Durch die digitale Anreicherung von Alltagsgegenständen mit Rechenleistung und Kommunikationsmodulen bietet das Ubiquitous Computing eine neue Möglichkeit, das Problem des Energiesparens im Privathaushalt in Angriff zu nehmen.

Der Einsatz von Ubiquitous-Computing-Technologien mit dem Ziel, das Energiesparen in Privathaushalten zu vereinfachen, wirft aber auch einige Forschungsfragen auf, etwa, welche Architektur für Systeme, die Feedback zum Energieverbrauch liefern, am besten geeignet ist oder welche Art und Weise der Informationsdarstellung für den Benutzer am verständlichsten ist. Die vorliegende Dissertation befasst sich mit diesen Forschungsfragen, indem sie untersucht, wie Ubiquitous Computing helfen kann, effektives Feedback, das über die Darstellung der reinen Verbrauchsinformation hinausgeht, bereitzustellen und dieses dabei gleichzeitig im Alltag des Benutzers zu integrieren. Durch eine benutzerorientierte Herangehensweise, die den Gebrauch von intelligenten Stromzählern mit Mobiltelefonen verbindet, nimmt die Arbeit diese Herausforderungen an und liefert dazu die drei nachfolgend beschriebenen Hauptbeiträge.

In einem ersten Teil der Dissertation wird eine Infrastruktur, die Feedback über Stromverbrauch liefert und nahtlos in das Haushaltsumfeld integriert ist, auf Basis von Ubiquitous-Computing-Komponenten entworfen, entwickelt und evaluiert. Die Infrastruktur setzt dabei die aus der Literatur bekannten technischen Anforderungen im Bereich des Verbrauchsfeedbacks (wie Integration in den Tagesablauf, Bereitstellung möglichst feingranularer Verbrauchsinformation in Echtzeit und mit niedriger Nutzungsbarriere) um und ermöglicht es Benutzern, so ihren Stromverbrauch besser zu verstehen. Gleichzeitig stellt die Infrastruktur ein leicht erweiterbares Framework dar, das anderen Wissenschaftlern die Möglichkeit bietet, eigene Visualisierungskonzepte zu testen oder Verhaltensexperimente durchzuführen. Um die Umsetzbarkeit unseres Ansatzes zu demonstrieren, wurde ein Prototyp der Infrastruktur implementiert, in einer Laborstudie sowie in vier Haushalten installiert und anschließend evaluiert. Die Architektur setzt dabei auf die Interaktionsmöglichkeiten von Mobiltelefonen und die Integration von Smart Metern und dient damit als Basis für einen Großteil der weiteren Arbeit.

Im zweiten Teil der Arbeit wird das Potential des Mobiltelefons als mögliche Benutzerschnittstelle eines Systems, welches Feedback zum Stromverbrauch liefert, evaluiert. Zunächst wird in einer Benutzerstudie der wahrgenommene Wert unterschiedlicher Feedback-Funktionen untersucht und es wird analysiert, welche Art von Feedback für Nutzer relevant ist. Des Weiteren werden die allgemeine Benutzbarkeit und Genauigkeit sowie die Nutzungsabsicht der entwickelten Benutzerschnittstelle untersucht. Durch den Einsatz des Systems in einer Langzeitstudie in vier schweizer Haushalten charakterisieren wir unterschiedliche Benutzertypen und zeigen, dass weiterführende Konzepte aus dem Gebiet der Verhaltensforschung notwendig sind, um eine dauerhafte Verwendung des Feedback-Systems, die über die Phase der ersten Neugier hinausgeht, zu garantieren. Insgesamt bestätigen die Resultate die Eignung des Mobiltelefons als Benutzerinterface für Feedback zum Energieverbrauch und liefern wichtige Einblicke für den

Aufbau zukünftiger Energiesparapplikationen. Sie zeigen, dass ein klarer und einleuchtender Anwendungszweck entscheidend für deren Verwendung ist und dass Funktionen, welche das Wissen seitens der Benutzer erhöhen, gemeinsam mit Funktionen, von denen sich direkte monetäre Einsparungen ableiten lassen, als am wichtigsten eingeschätzt werden. Um auch weniger technisch versierte Anwender anzusprechen, ist es wichtig, Funktionen zu integrieren, welche über die Visualisierung der reinen Verbrauchsinformation hinausgehen und direkt handlungsleitende Maßnahmen bereitstellen.

Schließlich wird im dritten Teil der Arbeit eine Methode vorgestellt, welche es ermöglicht, den gemessenen Gesamtstromverbrauch eines Haushalts auf Geräteebene herunterzubrechen. Dies erlaubt es Benutzern, den Stromverbrauch einzelnen Geräten oder Handlungen direkt zuzuordnen und kann gleichzeitig als Basis für ein System dienen, welches automatisch Energiepartipps ableitet und Einsparmöglichkeiten aufzeigt. Im Vergleich zu anderen Disaggregationsverfahren benötigt unser System keine zusätzlichen Systemkomponenten oder zeitintensive Kalibrierung durch Fachexperten. Die für die Disaggregation notwendige und sonst oft komplexe Aufzeichnung von Gerätesignaturen erfolgt im Hintergrund mit Hilfe von Ubiquitous-Computing-Technologien unter Einbezug des Benutzers. Dadurch ist es mit dem implementierten Verfahren möglich, auch Geräte zu erkennen, welche erst zu einem späteren Zeitpunkt nach der Systeminstallation im Haushalt verwendet werden. Dies ist besonders in einem sich ständig verändernden Umfeld wie dem Privathaushalt von großer Bedeutung. Eine Evaluation in einem Labortest mit bis zu acht gleichzeitig betriebenen Haushaltsgeräten bestätigt mit einer für viele Zwecke ausreichenden Erkennungsrate von fast 90% die Umsetzbarkeit des von uns entwickelten Ansatzes.