

# eMeter: Stromverbrauchsfeedback auf Basis eines Pervasive Energy Monitoring Systems

Markus Weiss

Institut für Pervasive Computing  
Bits to Energy Lab  
ETH Zürich

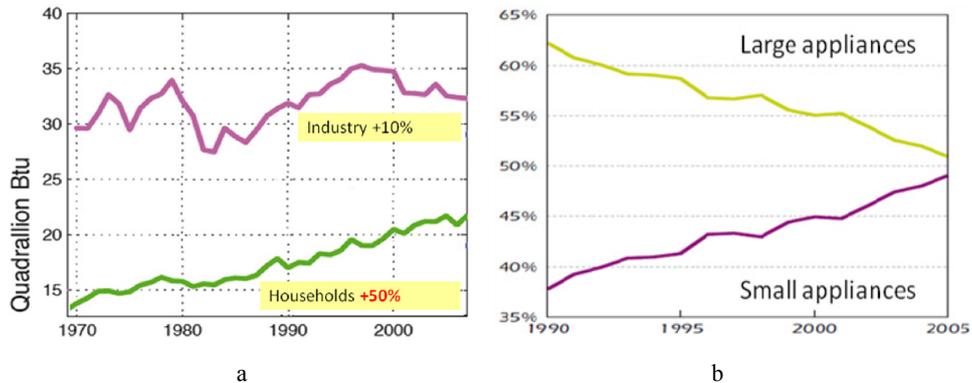
**Abstract:** Möglichkeiten Energie zu sparen bestehen zwar, werden aber nur von kleinen Teilen der Bevölkerung wahrgenommen. Oft liegt dies an der mangelnden Transparenz des Stromverbrauchs. Die vorliegende Arbeit thematisiert die Herausforderungen moderner Energiemonitoring-Systeme und stellt ein entwickeltes System vor, welches auf der Kombination eines Smart Meters mit einem Benutzerinterface auf dem Mobiltelefon basiert. Das System erlaubt die schnelle Einbindung neuer Funktionen und Services sowie die Konzeption verschiedener Darstellungsformen und dient so als Plattform, um das Leistungsspektrum zukünftiger portabler Stromfeedbacksysteme zu erforschen.

## 1 Einleitung

Während der Energieverbrauch im Industriesektor in den letzten 40 Jahren relativ konstant geblieben ist, steigt der Verbrauch im Heim- und Gewerbebereich kontinuierlich an (Abb. 1a). Ungefähr ein Drittel der insgesamt erzeugten Energie wird heute bereits von privaten Haushalten verbraucht [1, 2]. Verantwortlich dafür ist unter anderem die wachsende Anzahl elektrischer Geräte. Betrachtet man die großen elektrischen Verbraucher im Haushalt, wie z.B. Kühlschrank, Gefriertruhe, Waschmaschine und Geschirrspüler, konnte deren Effizienz zwar gesteigert werden, jedoch nahm parallel im Zeitraum von 1990 bis 2005 der Stromverbrauch kleinerer elektrischer Geräte – vor allem aus dem Bereich der Unterhaltungselektronik – um 57% zu (Abb. 1b) [3].

Darüber hinaus hängt der Energieverbrauch besonders im Haushaltsbereich entscheidend vom menschlichen Verhalten sowie den privaten Lebensgewohnheiten ab. Der individuelle Fahrstil, die eingestellte Temperatur der Heizung oder die Verwendungsart elektrischer Geräte sind nur einige Beispiele. Im Bezug auf den Stromverbrauch haben Studien gezeigt, dass dieser bei Haushalten mit gleicher Charakteristik (d.h. gleicher Größe, gleicher Ausstattung und gleicher Anzahl wohnhafter Personen) um mehr als das Doppelte variieren kann [4]. Grundsätzlich besteht also Einsparpotential. Den Menschen, die gewillt sind Energie zu sparen, fehlt es jedoch häufig an der notwendigen, einfach zugänglichen Information, die es ermöglicht, ihren Willen auch in die Tat umzusetzen [5].

So erhält ein Großteil der Haushalte heute meist nur eine jährliche oder monatliche Rechnung vom Energieversorgungsunternehmen. Desweiteren existieren zwar kommerzielle Produkte, die den Energieverbrauch einzelner Haushaltsgeräte oder den des ganzen Haushalts visualisieren.



**Abbildung 1.** Vergleich der Entwicklung des Energieverbrauchs des Industrie- mit dem Haushaltssektor am Beispiel der USA (a) [1]. Anteil großer und kleiner Haushaltsgeräte am Gesamtstromverbrauch (b) [3].

Diese liefern jedoch oft ein zu technisches Feedback, bestehend aus reinen Zahlen und physikalischen Einheiten [6]. Diese Art der Informationsdarstellung wird von wenig technikaffinen Menschen oft nicht verstanden. Zusätzlich haben heute erhältliche Energiemonitore häufig eine hohe Nutzungsbarriere, z.B. weil sie direkt am Stromzähler oder im Sicherungskasten installiert werden müssen oder es nicht schaffen, das Interesse des Benutzers über einen längeren Zeitraum zu wecken und zu erhalten. So zeigt eine Studie in Großbritannien, dass bei 50% der teilnehmenden Haushalte leere Batterien der verteilten Energiemonitore nicht erneuert wurden [7]. Trotz bestehender Einsparmöglichkeiten und existierender technischer Feedback-Lösungen, bleibt folglich der Stromverbrauch zu großen Teilen intransparent und Einsparpotentiale oftmals ungenutzt.

Bisherige Arbeiten im Bereich Feedback zum Ressourcenverbrauch haben gezeigt, dass zeitnahe und kontinuierliche Verbrauchsinformationen notwendige Voraussetzungen zum Energiesparen und zu einer Veränderung des Benutzerverhaltens sind [8]. Mit dem in diese Arbeit vorgestellten System, welches auf einem intelligenten Stromzähler (Smart Meter) und einem in dieser Arbeit vorgestelltem Benutzerinterface auf einem Mobiltelefon basiert, versuchen wir die Probleme existierender Energiemonitore zu adressieren und gleichzeitig die wichtigsten in der Literatur bekannten Feedback-Aspekte umzusetzen [9]. Die neue Zählertechnologie verfügt über eine Kommunikationsschnittstelle, über die der aktuelle Verbrauch mit hoher zeitlicher Auflösung an das Benutzerinterface kommuniziert wird. Dies ermöglicht dem Bewohner, seinen Stromverbrauch in Echtzeit zu verfolgen, sowie die in der Vergangenheit verursachten Kosten zu analysieren. Eine eingebaute Messfunktion gestattet es, den Verbrauch einzelner Geräte direkt zu messen und die größten Energieverbraucher und Ineffizienzen im Haushalt zu identifizieren. Diese Interaktivität soll zu größeren Lerneffekten sowie zu einer häufigeren Verwendung der Applikation führen. Da der Einbau des intelligenten Zählers künftig verpflichtend ist, wird mit dem vorgestellten System vielen Bewohnern eine komfortable Möglichkeit geboten, Energie zu sparen und Kosten zu kontrollieren – ganz ohne zusätzliche Hardware und mit hoher Flexibilität bei der Entwicklung von neuen Zusatzdienstleistungen.

Der vorliegende Beitrag beschreibt ein prototypisch entwickeltes System, welches als Grundlage zur Adressierung offener Forschungsfragen im Bereich Energieüberwachungssysteme dient. Im Folgenden wird in Kapitel 2 zuerst auf existierende Feedback-Systeme zum Stromverbrauch, sowie deren Abgrenzung gegenüber dem hier vorgestellten System eingegangen. Kapitel 3 beschreibt die zu Grunde liegende Architektur, sowie die Funktionsweise und Kommunikation der einzelnen verwendeten Komponenten. Kapitel 4 erklärt die Funktionalität des Benutzerinterfaces, welches als Mobilfunkapplikation implementiert ist. Erste Ergebnisse bezüglich der Validierung des Benutzerinterfaces zur Verwendung als portablen Energiemonitors, sowie ein Ausblick auf zukünftig zu adressierende Forschungsfragen bilden in Kapitel 5 den Abschluss dieser Arbeit.

## 2 Feedback-Systeme zum Stromverbrauch

Es existiert eine Reihe von Systemen, die Feedback über den Stromverbrauch bereitstellen. Diese können allgemein in zwei Bereiche eingeteilt werden: Systeme, die Feedback über den Stromverbrauch des gesamten Haushalts liefern, und solche, die Feedback auf Geräteebegeben.

Der erste Bereich umfasst verschiedene erwerbbaare Produkte, die es zum Ziel haben, den Benutzer über seinen Gesamtstromverbrauch zu informieren. Einige viel versprechende Beispiele sind Wattson [10], Power Cost Monitor [11], Onzo [12] oder TED-1000 [13]. Sie bestehen aus einem Sensor zum Erfassen des Stromverbrauchs und einem zentralen (manchmal portablen) Display, das nach der Installation den aktuellen Stromverbrauch visualisiert. Zusätzlich zur Anzeige des aktuellen Gesamtverbrauchs informieren viele Systeme über Verbrauchsäquivalente wie beispielsweise CO<sub>2</sub>, historische Verbräuche oder den akkumulierten Verbrauch über ein festgelegtes Zeitintervall. Wissenschaftliche Arbeiten, z.B. von Peterson et al. [14], bauen auf selbstentwickelten Sensoren auf, die im Sicherungskasten installiert werden. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Produkten, schlagen die Autoren ein Benutzerinterface auf einem Mobiltelefon vor und fokussieren in ihrer Arbeit auf erste Designansätze. Details über die zugrunde liegende Infrastruktur werden jedoch nicht angegeben. Yun [15] stellt in seiner Arbeit ein ähnliches System vor, welches auf einem Sensor-Clip im Sicherungskasten als Datenquelle basiert und so in Echtzeit kontinuierlich Auskunft über den Gesamtenergieverbrauch auf einem minimalistisch gehaltenem Nutzerinterface gibt. Grundsätzlich sind die meisten Produkte dieser Kategorie für den Endanwender kompliziert zu installieren. Oft bedarf es einer Modifizierung der Verkabelung am Hauptanschluss des Hauses oder im Sicherungskasten. Ersteres ist in vielen Haushalten für den Benutzer nicht oder nur schwer zugänglich. Zudem erfordert der Anschluss solcher Systeme technisches Wissen, was viele Benutzer von der Installation noch weiter abschreckt. Ein anderer Nachteil von Systemen dieses Bereichs ist die Beschränkung des Feedbacks auf den Gesamtverbrauch des Haushalts. Der Verbrauch einzelner Geräte kann mit ihnen nicht ermittelt werden. Daher beschäftigen sich seit längeren verschiedene wissenschaftliche Ansätze mit Methoden, die es erlauben, den Verbrauch einzelner Geräte aus der Gesamtlast zu ermitteln [16]. Das Ziel solcher Systeme ist, mit minimalem Installationsaufwand und niedriger Nutzungsbarriere trotzdem detailliertes Feedback über den Verbrauch einzelner Haushaltsgeräte geben zu können. Um festzustellen, welche Geräte gerade im Haus verwendet werden, messen manche Systeme einfach die Differenz der Wirkleistung in der Gesamtlastkurve von einem Messzeitpunkt zum Darauffolgenden [17, 18]. Andere fortgeschrittenere Ansätze basieren auf Mustererkennungsverfahren oder der Analyse von Gerätesignaturen mit hoher

zeitlicher Auflösung und zusätzlichen physikalischen Größen wie Schein-, Blind- und Verzerrungsblindleistung [19]. Für die Aufschlüsselung und Zuordnung der Verbräuche benötigen die Systeme entweder a priori Wissen über die einzelnen im Haushalt verwendeten Geräte und ihre charakteristischen physikalischen Eigenschaften oder eine komplexe Kalibrierung in einer vom Benutzer durchgeführten Trainingsphase. Jedoch ist auf der einen Seite das benötigte Vorwissen (die Signaturen aller elektrischen Verbraucher) in einer kurzlebigen Welt mit täglich neuen Geräten schwer zu erlangen und aufrechtzuerhalten, auf der anderen Seite ist die Trainingsphase für den Benutzer diffizil und führt zu einer hohen Nutzungsbarriere.

In der zweiten Kategorie lassen sich Lösungen zusammenfassen, die Auskunft über den spezifischen Verbrauch einzelner Geräte geben. Hierbei handelt es sich meist um intelligente Zwischenstecker (z.B. Kill-a-Watt [20] oder Click [21]), die zwischen dem eigentlichen Verbraucher und der Steckdose in der Wand platziert werden müssen, um den Verbrauch zu messen. Viele besitzen zusätzlich zur Anzeige am Gerät selbst eine Kommunikationsschnittstelle, die es erlaubt, den Verbrauch drahtlos an ein Benutzerinterface zu kommunizieren. So können sich Benutzer beispielsweise direkt mit dem Handy verbinden und den aktuellen Verbrauch der angeschlossenen Geräte ermitteln [22]. Dies stellt auch gleichzeitig die größte Einschränkung solcher Systeme dar. Die Wissenschaft beschäftigt sich daher damit, Wege zu finden, die es erlauben, mehrere solcher intelligenten Zwischenstecker in einem Mesh-Netzwerk zu verbinden und dem Benutzer so auf einfache Art und Weise eine größere Funktionalität bereitzustellen. Die Autoren von [23] entwickelten hierfür eine Gateway-Software, die es ermöglicht mehrere solcher intelligenter Zwischenstecker direkt über das Internet anzusteuern. Zusätzlich ermöglicht dieser Ansatz dem Benutzer z.B. den Verbrauch mehrerer Steckdosen gleichzeitig anzuzeigen oder eine bestimmte Steckdose von der Ferne an oder aus zu schalten. Jahn et al. [24] verwenden ein ähnliches Konzept, welches auf der Hydra-Middleware basiert, die neben der Integration auch noch zusätzliche Funktionalität in deren entwickelten „Energy-Aware Smart Home“ zur Verfügung stellt. Desweiteren entwickelten Jiang et al. [25] und Paradiso [26] netzwerkfähige Stromsensoren mit dem Ziel, ein einfaches Stromüberwachungssystem für den Endbenutzer zur Verfügung zu stellen. Björkskog et al. [27] konzeptionelle Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines spielerischen Nutzerinterfaces für wenig technikaffine Benutzer. Basierend auf einem 3D-Karussell erhalten Nutzer dabei spezifische Informationen zum Verbrauch einzelner Geräte im Haus. Kim et al. [28] entwickelten ein verteiltes System welches aus einem zentralen Stromsensor und mehreren im Haushalt verteilten Kontextsensoren arbeitet. Dabei zeichnet der Stromsensor die Gesamtlast des jeweiligen Haushalts auf. Kontextsensoren helfen dann Rückschlüsse auf die Ein- und Ausschaltvorgänge und die Art des verwendeten Geräts zu machen. In einer vordefinierten Menge von wenigen Geräten erreicht das System eine Genauigkeit von 90%. Allerdings hängt die Erkennungsrate stark von der richtigen Platzierung der Kontextsensoren und der vom Nutzer zu Beginn durchgeführten Kalibration des Systems ab.

Derzeit werden in verschiedenen Modellprojekten Services unter zu Hilfenahme der vorgestellten Technologien entwickelt, die den Energieverbrauch auf unterschiedlichen stationären und mobilen Geräten transparent machen. Im deutschen Raum sind hier exemplarisch die beiden folgenden Projekte zu nennen. Der BEMI [29] zielt darauf ab, den Stromverbrauch eines Haushalts mit tageszeitabhängigen Strompreisen zu optimieren. Das Stromverbrauchsradar [30] verwendet einen digitalen Stromzähler dessen Stromverbrauch auf einer Webseite im Internet dargestellt wird. Es wertet dabei sekundengenau die gemessenen Daten aus, erstellt Hochrechnungen und erlaubt Anwendern so ihren Stromverbrauch jederzeit zu überprüfen.

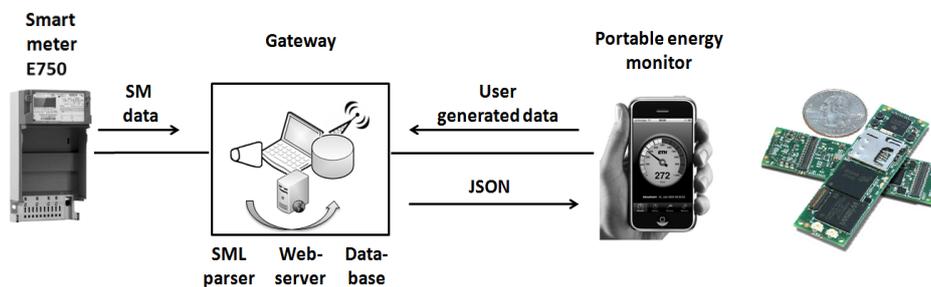
Im Unterschied zu den oben beschriebenen Systemen – ein genauer Vergleich der Vor- und Nachteile ist in [31] zu finden – setzt der hier vorgestellte Ansatz auf eine niedrige Nutzungsbarriere. Durch die Kombination von Mobiltelefon und Smart Meter Technologie, die in den nächsten Jahren in weiten Teilen Europas und der USA verpflichtend eingeführt wird, sowie die Umsetzung der wichtigsten in der Literatur bekannten Feedback-Features trägt der hier vorgestellte Ansatz dem Rechnung. Gleichzeitig verbindet das System die Lücke zwischen den beiden vorgestellten Kategorien indem es sowohl Feedback über den Gesamtstromverbrauch eines Haushalts, als auch den einzelner Geräte ermöglicht. Bei der Konzeption wurde besonderes Augenmerk auf die Möglichkeit der schnellen Einbindung neuer Funktionalitäten sowie verschiedener Darstellungsformen gelegt. Das System dient dadurch als Forschungsplattform, um das Leistungsspektrum zukünftiger portabler Stromfeedbacksysteme zu erforschen.

### 3 Architektur

Die Architektur des entwickelten Systems besteht aus drei Komponenten (Abb. 2): einem Smart Meter und der daran angeschlossen Gesamtlast aller elektrischen Verbraucher des Haushaltes, dem Gateway, das für die Datenverwaltung sowie die Bereitstellung aller Funktionalität verantwortlich ist und dem Benutzerinterface auf einem Mobiltelefon.

Die erste Komponente, das Smart Meter von Landis + Gyr, misst den aktuellen Stromverbrauch aller drei Phasen des Haushalts. Im Gegensatz zu den bis heute eingesetzten Stromzählern besitzt es eine Kommunikationsschnittstelle. Diese ermöglicht neben der Fernablesung des Verbrauchs, auch zukünftige durch das Smart Grid entstehende Services (z.B. Demand / Response). Um Feedback in Echtzeit zu ermöglichen, werden die aktuellen Verbrauchswerte über die Kommunikationsschnittstelle des Smart Meters einmal pro Sekunde vom Gateway angefragt. Zusätzlich zu den Standardgrößen (Strom, Spannung und Wirkleistung) pro Phase, erlaubt das Smart Meter auch spezielle Anfragen für zusätzliche physikalische Größen wie Phasenwinkel, Scheinleistung, Blindleistung und Verzerrungsblindleistung.

Die zweite Komponente, das Gateway, ist ein Software-Modul, welches auf der einen Seite mit dem Smart Meter verbunden ist und auf der anderen Anfragen des Benutzerinterfaces verwaltet. Es besteht aus einem Parser, einer Datenbank und einem kleinen, leichtgewichtigen Webserver, dem EnergyServer. Der Parser ist in C++ geschrieben. Er fragt sekundlich die aktuellen erweiterten Verbrauchsdaten des Haushalts vom Smart Meter ab und speichert diese anschließend in



**Abbildung 2.** Überblick über die Architektur, bestehend aus einem Smart Meter, dem Gateway und dem portablen Energiemonitor auf dem Mobiltelefon (links); Gateway-Hardware (rechts).

**Tabelle 1.** Überblick über ausgewählte API-Funktionen

Component	Keyword	Action
gateway Control	status	shows the status of the gateway components
	restart	restarts the gateway
resource Control	*	lists all smart meters
	new	creates a new resource
measurement Control	kWh?timespan	kWh per timespan
	measurements?c/*	c last/all measurements
	measurements?d/m/y/avg	measurements of the day/month/year/average
powerPedia	tip?c	get all saving tips of category c

```

{
  "smartMeter":
  {
    "id": "1",
    "name": "Landis+Gyr",
    "createdOn": 1248102873
  },
  "measurements":
  [
    {"id": "2448537", "date": 1251202209, "watts": 91},
    {"id": "2448536", "date": 1251202208, "watts": 91},
    {"id": "2448535", "date": 1251202207, "watts": 90},
    {"id": "2448534", "date": 1251202206, "watts": 91},
    {"id": "2448533", "date": 1251202205, "watts": 90}
  ]
}

```

**Abbildung 3.** JSON-Antwort auf die GET-Anfrage des Benutzerinterfaces

einer SQL-Datenbank. Der EnergyServer basiert auf dem PHP-RECESS-Framework<sup>1</sup> und stellt über eine Web-basierte REST-API [32] Zugang zu den Messwerten in der Datenbank zur Verfügung. Dies hat den Vorteil, dass der Smart Meter sowie alle Funktionalität über das Gateway direkt in das Internet integriert sind und einfach über URLs angesprochen werden können. Im Gegensatz zu proprietären Protokollen oder geschlossenen Standards ermöglicht es die einfache Erweiterung des Systems, wie z.B. die Anbindung von Benutzerinterfaces. So fragt das Benutzerinterface z.B. einfach den aktuellen Verbrauch der letzten 5 Sekunden über den GET-Aufruf folgender URL ab: `http://[serverAddress]/emeter/energyServer/smartMeter/1/measurements?c=5` (Abb. 3). Als Antwort empfängt es das Resultat vom Gateway in Form einer JSON-Nachricht. Mittels der übrigen HTTP-Verben (PUT, POST und DELETE) können nach dem gleichen Prinzip Ressourcen neu angelegt, modifiziert oder gelöscht werden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über ausgewählte Funktionen der REST-API. Um Benutzern Feedback zur Verfügung zu stellen, das über reine Verbrauchsdaten hinausgeht, verfügt der EnergyServer über ein Modul, welches eine eigenentwickelte Community-Plattform, die PowerPedia [33], in das System integriert. Sie ermöglicht den Austausch allgemeiner und geräteklassenspezifischer Energiespartipps zwischen den Nutzern. Zusätzlich stellt sie Informationen über die effizientesten Geräte jeder Geräteklasse zur Verfügung. Die dazu benötigten Informationen werden automatisch im Hintergrund von den Webseiten verschiedener Verbraucherschutzorganisationen und Konsumentenvereinigungen heruntergeladen und monatlich aktualisiert, um immer auf dem aktuellen Stand zu bleiben. Damit sich ein Benutzerinterface mit dem Smart Meter verbinden kann, sendet der EnergyServer ein Token (Hash der MAC-Adresse des Smart Meters) per Multicast. Empfängt das Benutzerinterface dieses Token, ist es automatisch mit dem Smart Meter verbunden. Die erste Version des Gateways wurde auf einem Asus Netbook implementiert, welches per Ethernet mit dem Smart Meter verbunden ist und die Anfragen des Benutzerinterfaces über WLAN beantwortet. Mittlerweile läuft das Gateway auf einem Embedded Device, dem Overo Gumstix (Abb. 2). Dieser basiert auf einem Chip mit einer Prozessorgeschwindigkeit von 600MHz, 256MB DDR RAM und einem 256MB NAND Flash. Zusätzlich verfügt er über ein Bluetooth/WLAN Kommunikationsmodul und einen microSD-Karten Steckplatz, der Platz für den Speicher der Datenbank bietet.

<sup>1</sup> [www.recessframework.org](http://www.recessframework.org)

Die dritte Komponente, das Benutzerinterface, verwendet die vom Gateway bereitgestellte Funktionalität, um die in der Datenbank gespeicherten Messerwerte abzufragen und die Verbrauchsdaten in Echtzeit zu visualisieren. Wir haben beispielhaft ein Benutzerinterface für die beiden wichtigsten Smart-Phone Plattformen, iPhone OS und Google Android, entwickelt. Um die benötigten Daten zu erhalten, ruft das Benutzerinterface die entsprechende URL auf und konvertiert die daraus resultierende JSON-Antwort des Gateways. Nach dem gleichen Prinzip ist es möglich Daten an das Gateway zu übermitteln und so benutzerspezifische Inhalte, z.B. Haushaltscharakteristika (Anzahl Bewohner, Haushaltsgröße, etc.) in der Datenbank zu speichern oder durchgeführte Messungen auf der PowerPedia anderen zur Verfügung zu stellen.

## 4 Benutzerinterface

Das Benutzerinterface auf dem Mobiltelefon besteht aus fünf Hauptansichten – aktueller Verbrauch, historischer Verbrauch, Geräteinventar, Messfunktion und Energiespartipps. Zusätzlich setzt die Applikation, die wichtigsten in der Literatur bekannten Feedback-Features um [9, 34, 35]. Im Folgenden werden diese kurz genauer erläutert, bevor wir auf die Beschreibung der einzelnen Ansichten im Detail eingehen:

- Niedrige Nutzungsbarriere: Feedback sollte möglichst einfach zugänglich sein und keine komplexe Installation benötigen. Das System baut auf einer Smart Meter Infrastruktur auf, welche in vielen Ländern in Zukunft verpflichtend ist. Dadurch benötigt der Benutzer lediglich eine Applikation, welche er bequem aus dem Internet beziehen und auf dem Mobiltelefon installieren kann.
- Starke Integration in den Alltag: Es ist notwendig das Feedback in den Alltag einzubinden, um zu eine nachhaltige Verhaltensänderung zu erzielen. Mobiltelefone sind heute weitläufig in den Alltag integriert und können beispielsweise über Push-Nachrichten den Energieverbrauch wieder ins Gedächtnis rufen, nachdem das erste Interesse und der Neuigkeitseffekt nachlassen.
- Zeitnahe Informationsbereitstellung: Um das spontane Interesse des Benutzers erfüllen zu können, sollte Feedback möglichst häufig, in Echtzeit und verfügbar wenn benötigt sein. Dabei führt kontinuierliches Feedback zu den größten Spareffekten [36].
- Aufschlüsselung des Gesamtverbrauchs: Für den Benutzer ist es wichtig zu erkennen, wie sich der Gesamtverbrauch auf einzelne Geräte oder Aktionen verteilt. Nur so ist es ihm möglich, die richtigen Schlussfolgerungen zu ziehen, die nötigen Maßnahmen zu erkennen und sein Verhalten zu ändern. Unser System stellt daher sowohl Informationen zum Gesamtstromverbrauch als auch – mit Hilfe einer einfachen Messfunktion – Informationen zum Verbrauch einzelner an- oder ausschaltbarer Geräte bereit.

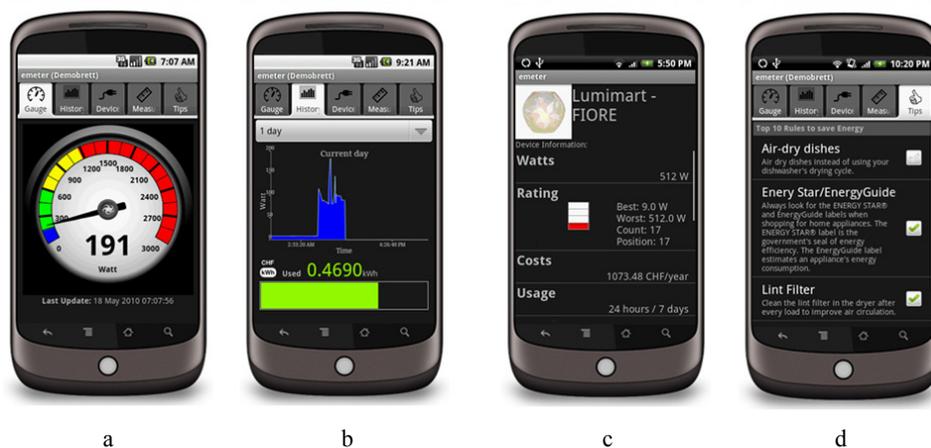
Die Gesamtverbrauchsansicht (Abb. 4a) zeigt den aktuellen Gesamtverbrauch des Haushalts auf einem Tacho an. Der Farbhintergrund des Tachos wird automatisch adaptiert und erlaubt dem Benutzer, seinen aktuellen Verbrauch mit seinem historischen Verbrauch zu vergleichen. Grün bedeutet dabei einen für den eigenen Haushalt niedrigen, gelb einen normalen und rot einen hohen Verbrauch. Der blaue Bereich visualisiert die Grundlast des Haushalts. Er wird

automatisch mit Hilfe eines Algorithmus nachts automatisch ermittelt. Für den Benutzer bietet er die einfache Möglichkeit auf einem Blick zu erkennen, ob alle Geräte ausgeschaltet sind.

Die Ansicht für den historischen Verbrauch (Abb. 4b) visualisiert die vergangenen Verbräuche in einem Liniendiagramm sowie den akkumulierten Verbrauch in einem Säulendiagramm, beides für verschiedene vordefinierte Zeiträume (z.B. Stunde, Tag, Woche, etc.). Zusätzlich bietet die Ansicht die Möglichkeit, den Verbrauch mit dem eines Haushalts gleicher Charakteristik zu vergleichen. Dies soll dem Anwender helfen, seinen Verbrauch besser einzuordnen. Die dafür benötigten Angaben, wie Zahl der Bewohner, Gas- oder Elektroherd, usw., werden beim ersten Start der Applikation vom Benutzer erfragt. Basierend auf der letzten Rechnung und dem historischen Verbrauch zeigt der untere Balken eine Hochrechnung des Budgets aufs Jahr an.

Die Messansicht ermöglicht dem Benutzer den Verbrauch einzelner an- / ausschaltbarer Geräte im Haus interaktiv zu bestimmen (Abb. 5). Nach drücken des Startbuttons wartet der Messalgorithmus [33] darauf, dass der Benutzer das zu messende Gerät ein- oder ausschaltet. Nach kurzer Zeit erscheint dann das Messergebnis auf dem Display. Um den Verbrauch zu ermitteln, betrachtet der Algorithmus die Unterschiede in der Wirkleistung in jeder Phase einzeln, sowie, falls nötig, zusätzlich Schein- und Blindleistung. Dies ermöglicht die Phase des zu messenden Geräts zu erkennen bzw., falls mehrere Phasen aktiv sind, eine Fehlermeldung anzuzeigen und die Messung zu wiederholen. Durch einen Vergleich der beiden Messvorgänge identifiziert der Algorithmus nach der wiederholten Messung die richtige Phase und danach den Verbrauch.

Das Geräteinventar (Abb. 4c) zeigt eine Liste der gespeicherten Geräte. Nach dem Messvorgang kann der Benutzer die Messung personalisieren, d.h. ein Bild des Geräts aufnehmen, den Ort oder die typische Nutzungsdauer des Geräts eintragen (auf deren Basis dann die verursachten Kosten hochgerechnet werden) und die Messung anschließend im Geräteinventar speichern. Um den Vorgang für den Benutzer zu vereinfachen, werden verschiedene Gerätekategorien im Hintergrund automatisch vom EnergyServer geladen und dem Nutzer per Autovervollständigung vorgeschlagen. Nach dem Speichern hat der Benutzer die Möglichkeit, seine Messung auf



**Abbildung 4.** Benutzerinterface (Android-Version): Aktueller Gesamtverbrauch (a), historischer Verbrauch (b), Geräteinventar (c), Energiespartipps und Push-Nachrichten (d).



**Abbildung 5.** Messansicht (iPhone-Version). Ein Drücken des Startknopfs initialisiert die Messfunktion. Durch anschließendes Ein- / Ausschalten des Geräts wird der Verbrauch ermittelt. Danach kann die Messung zusammen mit weiteren Details im Geräteinventar gespeichert werden.

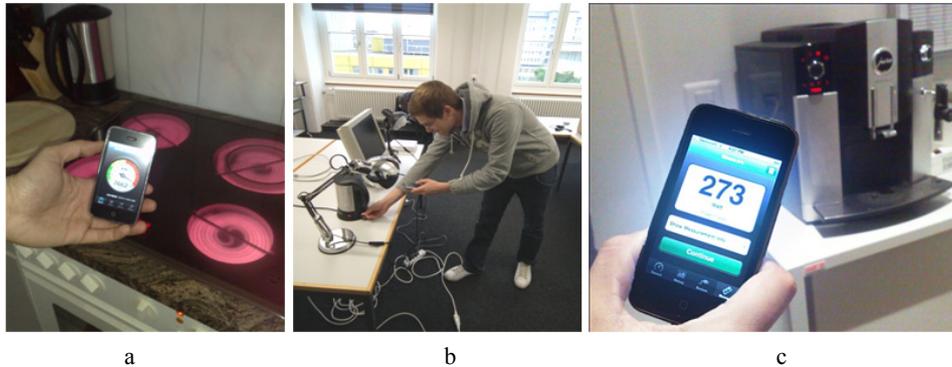
der Community-Plattform PowerPedia zu veröffentlichen. Er erhält dadurch Feedback über die Effizienz des Gerätes, sowie spezifische Energiespartipps von verschiedenen Verbraucherschutzseiten. Das Effizienzrating basiert dabei auf allen Einträgen der PowerPedia und soll dem Benutzer helfen, den Verbrauch eines Gerätes besser einschätzen zu können, indem er direktes Feedback über den Verbrauch anderer Geräte der gleichen Kategorie erhält.

Die Tippansicht (Abb. 4d) enthält sowohl allgemeine als auch auf gemessene Geräte bezogene Energiespartipps, die dem Nutzer handlungsleitendes Feedback geben sollen. Die Tipps werden automatisch über den EnergyServer von der PowerPedia abgerufen und können wie bei einer Checkliste abgehakt werden. Dies ermöglicht es auch, den Prozentsatz der Nutzer anzuzeigen, die diesen Tipp bereits angewendet haben.

## 5 Status quo, erste Ergebnisse und Ausblick

Die vorgestellte Infrastruktur veranschaulicht, wie Pervasive Computing Technologien genutzt werden können, um ein benutzerfreundliches und einfach zu installierendes System zu entwickeln, welches gleichzeitig stark in den Alltag integriert ist. Sie dient gleichzeitig als Grundlage, um offene Forschungsfragen im Bereich Energieüberwachungssysteme zu adressieren. Auf der einen Seite bietet es die Möglichkeit, einfach und schnell neue Visualisierungskonzepte und Funktionalitäten zu entwickeln und diese auf ihr Verständnis und ihre Bedeutung für den Benutzer zu evaluieren. Auf der anderen Seite ist das System die Basis zur Entwicklung eines Algorithmus der aus der Gesamtlastkurve automatisch die Verbräuche einzelner Haushaltsgeräte ermittelt. Im Folgenden gehen wir kurz auf den aktuellen Status quo, erste Ergebnisse in beiden Bereichen, sowie einen Ausblick über zukünftige Forschungsaspekte ein.

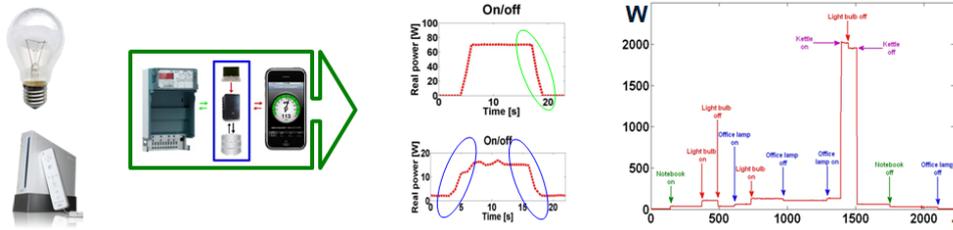
*Status quo.* Die Entwicklung hinsichtlich der Architektur ist abgeschlossen [37]. Eine erste prototypische Implementierung des Systems läuft seit über einem Jahr zuverlässig in einer Laborumgebung. Zusätzlich zu den beiden in dieser Arbeit vorgestellten Benutzerinterfaces auf dem Mobiltelefon wurde auch ein Web-Nutzerinterface und ein Nutzerinterface auf einem digitalen Bilderrahmen konzipiert und implementiert. Zurzeit ist das System in vier Haushalten installiert (Abb. 6a), um über die vorhandenen Labordaten hinaus reale Messdaten zu erhalten.



**Abbildung 6.** Benutzer der Applikation im „Real-World Deployment“ (a). Teilnehmer der Benutzerstudie beim Messen des Stromverbrauchs verschiedener Haushaltsgeräte (b und c).

*Validierung der Architektur und des Benutzerinterfaces.* Die zugrundeliegende REST-Infrastruktur ermöglicht Entwicklern relativ schnell und einfach unterschiedliche Benutzerinterfaces zu implementieren. Wir nutzen diesen Fakt, um verschiedene Feedback-Aspekte eines portablen Energiemonitors zu untersuchen. In einer Benutzerstudie mit 25 Teilnehmern (Abb. 6b, c) wurde so, neben der Evaluation des Benutzerinterfaces im Bezug auf Benutzbarkeit, Erlernbarkeit, Verständlichkeit, Nutzungsabsicht, und der Genauigkeit der Messfunktion, auch untersucht welche Funktionen Benutzer des Systems am wichtigsten einschätzen [38]. Die Studie zeigt, dass die Teilnehmer die Applikation insgesamt positiv bewerten, mit der Messfunktion eine Genauigkeit von  $\pm 5\%$  erzielen und dass handlungsleitende Funktionen, die das Wissen über den Stromverbrauch vergrößern (z.B. Übersicht über die größten Stromverbräucher) besser abschneiden, als solche, die aggregierte Informationen präsentieren (z.B. Verbrauch der letzten Monate). Soziale Komponenten, wie etwa der Vergleich mit Freunden oder die Möglichkeit, Freunden seine Geräte zu zeigen, spielen heute noch keine wichtige Rolle.

*Algorithmus zur Geräteerkennung.* Auf Basis der entwickelten Infrastruktur untersuchen wir die Möglichkeit, einen Algorithmus zu entwickeln, der automatisch die Verbräuche einzelner Geräte innerhalb der Lastkurve erkennt und so neue Services wie beispielsweise Micro-Energy-Contracting oder Cross-Selling-Angebote ermöglicht und gleichzeitig dem Benutzer spezifischeres Feedback gibt und mögliche Einsparmaßnahmen aufzeigt (Abb. 7). Der Algorithmus verwendet die Messwerte des Smart Meter und analysiert dabei neben der Wirkleistung auch Schein- und Blindleistung als zusätzliche Parameter bei einer Messfrequenz von 1 Hz. Nach dem ersten Schritt, der Normalisierung zum Ausgleich der Spannungsschwankungen, wird die Lastkurve in zwei weiteren Schritten in Kanten und Leistungsniveaus eingeteilt und anschließend die Differenzen zwischen aufeinanderfolgenden Niveaus gebildet. Die so gebildeten Deltas werden dann in einer ersten Version mit den vom Benutzer durchgeführten Messungen, die der Algorithmus als Wissen aufnimmt, in einem abschließenden Schritt verglichen. Zusätzlich versucht der Algorithmus nicht messbare Geräte – also Geräte die sich nicht von Hand ein oder ausschalten lassen, wie z.B. Boiler, Gefriertruhe oder Kühlschrank – automatisch ohne Vorwissen zu identifizieren. Erste Tests des Algorithmus in einer Laborumgebung mit 10 Geräten erzielten vielversprechende Erkennungsraten von  $\sim 91\%$ . Allerdings unterliegt der Ansatz mo-



**Abbildung 7.** Geräteerkennung: Mit Hilfe der Messfunktion lassen sich Signaturen verschiedener Verbraucher mitschneiden die später in der Lastkurve automatisch wieder erkannt werden.

mentan der Einschränkung auf Geräte mit stationären Zuständen. Zudem können keine Verbraucher erkannt werden die eine Leistungsaufnahme kleiner 10W besitzen.

*Ausblick.* Trotz der anfänglichen Einschränkungen, zeigen die ersten Ergebnisse das Potential des entwickelten Algorithmus und bestärken uns, diesen mit Stromdaten von Haushalten weiter zu entwickeln. So könnten Cluster-Verfahren helfen, die im Haushalt verwendeten Geräte automatisch zu klassifizieren, diese selbständig dem Benutzer vorzuschlagen und so die momentan notwendige Interaktion auf ein Minimum zu reduzieren. Die Erweiterung des Algorithmus auf Geräte mit variablen Lasten stellt einen weiteren interessanten Forschungsaspekt dar. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass nicht notwendigerweise eine hundertprozentige Erkennungsrate aller Geräte eines Haushalts erforderlich ist. Schon mit geringeren Erkennungsraten können bereits zahlreiche Features und Services umgesetzt werden.

Neben der Untersuchung, welcher Nutzertyp welche Feedbackart und -funktion wertschätzt, liegt ein weiterer Forschungsschwerpunkt darauf, herauszufinden, welche Mechanismen und Konzepte (z.B. automatisierte Alarmmeldungen, Gewinnspiele, Bonuspunkte, Cross-Selling Angebote, usw.) nötig sind, um das Interesse des Benutzers über einen längeren Zeitraum aufrecht zu erhalten. Dies ist vor dem Hintergrund dieses Systems von doppelter Bedeutung. Einerseits werden heute fast täglich neue Applikationen auf einem Smart Phone installiert, aber nur die wenigsten werden häufig verwendet, die meisten geraten schnell wieder in Vergessenheit. Andererseits ist gerade die Verwendung über einen längerfristigen Zeitraum Voraussetzung für eine nachhaltige Verhaltensänderung, die letztendlich zu Energieeinsparungen führt.

## Literaturverzeichnis

- [1] Energy Information Administration (EIA) USA. [www.eia.doe.gov/aer](http://www.eia.doe.gov/aer).
- [2] European Environment Agency (EEA). [www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/final-electricity-consumption-by-sector-eu-27-1](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/final-electricity-consumption-by-sector-eu-27-1).
- [3] International Energy Agency (IEA) 2008. Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency - Key Insights IEA.
- [4] Parker, D., Hoak, D., Cummings, J. Pilot Evaluation of Energy Savings from Residential Energy Demand Feedback Devices. FSEC, Rpt: FSEC-CR-1742-08, 2008.
- [5] Chetty, M., Tian, D., Grinter, R. Getting to green: understanding resource consumption in the home. Proc. UbiComp, 2008.
- [6] Loock, C., Staake, T., Fleisch, E. Kundenportale in der Energiebranche: Bestandsaufnahme und Entwicklungspotenziale. Zeitschrift für Energiewirtschaft, 2009, 3:268–269.
- [7] van Rensburg, L. Energy demand research project: Review of progress for period 04/2008–08/2008. TR Ofgem, 2009.

- [8] Petersen, J.E., V. Shunturov, K. Janda, G. Platt, K. Weinberger. Dormitory residents reduce electricity consumption when exposed to real-time visual feedback and incentives. *IJSHE* 8(1)2007, 16-33.
- [9] Froehlich, J. Promoting Energy Efficient Behaviors in the Home through Feedback: The Role of Human-Computer Interaction. *Proc. HCIC Workshop 2009*.
- [10] DIY Kyoto. [www.diykyoto.com](http://www.diykyoto.com), 2010.
- [11] Blue Line Innovations Inc. [www.bluelineinnovations.com](http://www.bluelineinnovations.com), 2010.
- [12] Onzo Ltd. [www.onzo.co.uk](http://www.onzo.co.uk), 2010.
- [13] Energy Inc. [www.theenergydetective.com](http://www.theenergydetective.com), 2010.
- [14] Petersen, D., Steele, J., Wilkerson, J. WattBot: a residential electricity monitoring and feedback system. *Proc. CHI, 2009*.
- [15] Yun, T.J. Investigating the Impact of a Minimalist In-Home Energy Consumption Display. *Proc CHI, 2009*
- [16] Matthews, H.S. et al. Automatically Disaggregating the Total Electrical Load in Residential Buildings: a Profile of the Required Solution. *Proc. Intelligent Computing in Engineering*, 381–389, Plymouth, UK, 2008.
- [17] Arvola, A., Uutela, A., Anttila, U. Billing feedback as a means of encouraging conservation of electricity in households: a field experiment in Helsinki. In: *Energy and the consumer. Final report on the research program 1990-1992*, 46–60, Ministry of Trade and Industry, Finland, 1994.
- [18] Prudenzi, A.. A neuron nets based procedure for identifying domestic appliances pattern-of-use from energy recordings at meter panel. *Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, USA, 2002*, 2:941–946.
- [19] Lam, H., Fung, G., Lee, W. A Novel Method to Construct Taxonomy Electrical Appliances Based on Load Signatures. *IEEE Trans. Consumer Electronics*, 2007, 53(2):653–660.
- [20] P3 International. <http://tinyurl.com/436sw>, 2010.
- [21] EWZ. <http://www.ewz.ch>, 2010.
- [22] Energy Optimizers Ltd. <http://tiny.cc/nzc7j>, 2010.
- [23] Weiss, M., Guinard, D. Increasing Energy Awareness Through Web-enabled Power Outlets. *Proc. MUM 2010*.
- [24] Jahn, M., Jentsch, M., Prause, C.R., Pramudianto, F., Al-Akkad, A., Reiners, R. The Energy Aware Smart Home, *Future Information Technology*, vol., no., pp.1-8, 21-23 May 2010.
- [25] Jiang, X., Dawson-Haggerty S, Dutta P, Culler D. Design and implementation of a high-fidelity AC metering network. *Proc. ACM IPSN/SPOTS, 2009*.
- [26] Paradiso, J.A. Some Novel Applications for Wireless Inertial Sensors. *Proc. NSTI Nanotech, 2006*.
- [27] Björkskog, C., Jacucci, G., Lorentin, B., Gamberini, L. 2009. Mobile implementation of a web 3D carousel with touch input. *Proc. MobileHCI 09*.
- [28] Kim, Y., Schmid, T., Charbiwala, Z., Srivastava, M. ViridiScope: Design and Implementation of a Fine Grained Power Monitoring System for Homes. *Proc. Ubicomp09*.
- [29] Bendel, C., Nestle, D., Ringelstein, J. BEMI–Energiemanagement–Interface zur dezentralen Stromeinspeisung in Niederspannungsnetze. 3. VWEW-Fachtagung "Photovoltaik und Netzintegration", Germany, 2006:
- [30] ENBW, [www.enbw.com/content/de/privatkunden/produkte/strom/enbw\\_isz/stromradar](http://www.enbw.com/content/de/privatkunden/produkte/strom/enbw_isz/stromradar).
- [31] Mattem, F., Staake, T. Weiss, M. ICT for Green – How Computers Can Help Us to Conserve Energy. *Proc. e-Energy, 2010*.
- [32] Fielding, R., Taylor, R. Principled Design of the Modern Web Architecture. *ACM Trans. Internet Technology*, 2002, 2(2):115–150.
- [33] Weiss, M., Merkle, A., Staake, T. Towards a Powerpedia – A collaborative energy encyclopedia. *Adj. Proc. Ubicomp 2010*.
- [34] Fischer, C. Feedback on household electricity consumption: a tool for saving energy? *Energy Efficiency*, 2008, 1(1):79–104.
- [35] Abrahamse, W., Steg, L., Vlek, C., Rothengatter, T. A review of intervention studies aimed at household energy conservation. *J. of Environmental Psychology* 25 (2005), 273–291.
- [36] Van Raaij, W.F. and Verhallen, T.M.M. A behavioral model of residential energy use. *J. of Economic Psychology* 3(1) 1983, 39–63.
- [37] Weiss, M., Graml, T., Staake, T., Mattem, F., Fleisch, E.: Handy feedback: Connecting smart meters with mobile phones. *Proc. MUM 2009*.
- [38] Weiss, M., Look, C., Staake, T., Mattem, F., Fleisch, E. Evaluating Mobile Phones as Energy Feedback Devices. *Proc. Mobiculous 2010*.