

## **Überwachung des Energieverbrauchs auf Geräteebene: verteilte und hybride Lösungen**

**Fabian Aggeler**

**Departement für Informatik, ETH Zurich**

**aggelerf@ethz.ch**

### **Zusammenfassung**

Feedback bezüglich dem eigenen Handeln ist wichtig, um dessen Auswirkungen abschätzen zu können. Bis heute sind den meisten Menschen Verbrauchsdaten von elektrischen Geräten nicht bekannt. Um Informationen über den Stromverbrauch einzelner Geräte zu erhalten gibt es verschiedene Vorschläge zur Implementierung von Feedback-Systemen. Diese lassen sich in drei Kategorien einteilen: zentralisierte, verteilte und hybride Systeme. Zusätzlich spielen dabei Faktoren wie die optimale Darstellung des Feedbacks und Möglichkeiten der längerfristigen Motivation der Benutzer eine grosse Rolle, damit die Verhaltensänderung schlussendlich zu Stromeinsparungen führen.

In dieser Ausarbeitung werden die drei verschiedenen Kategorien mit einander verglichen und ihre Vor- und Nachteile aufgezeigt. Zwei Arten von Systemen werden dabei im Detail betrachtet. Es handelt sich dabei um verteilte und hybride Systeme, für welche jeweils mindestens ein Beispiel vorgestellt wird.



# 1 Einführung

Forscher gehen davon aus, dass das Verhalten der Menschen unter anderem von ihrer subjektiven Einstellung abhängt [9]. Die Einstellung gegenüber etwas, wird zu einem grossen Teil durch unsere Intuition beeinflusst. Was aber wenn uns unsere Intuition täuscht? Denn genau falsche Intuition ist oftmals der Grund für den verschwenderischen Umgang der Gesellschaft mit Elektrizität.

Die Annahme, dass ein kleines Gerät weniger Energie verbraucht als ein grösseres erweist sich beispielsweise bei Strom oftmals als falsch. Bei vielen Geräten kann auch nicht festgestellt werden, ob und wie viel Strom sie noch verbrauchen, nachdem der Ausschalt-Knopf betätigt wurde (z.B. ein PC-Monitor). Als Beispiel kann auch ein normaler Toaster (durchschnittliche Leistung: 1000 Watt [4]) herangezogen werden. Für viele Leute ist nicht zu erkennen, dass der Toaster ca. sechs Mal so viel Energie konsumiert wie ein 60 Zoll Flachbildfernseher (170 Watt [4]). Dasselbe gilt für den Stand-by-Verbrauch: In einem Versuch der Universität Berkeley stellten die Autoren fest, dass ein von ihnen verwendeter 24 Zoll LCD Bildschirm nach dem Abdocken des Laptops weitere vier Stunden 68 Watt konsumiert, nur weil dieser auf dem Bildschirm das Logo des Herstellers und eine Warnung anzeigt.

Ein Weg, das Energiesparverhalten der Menschen zu verändern, ist das Aufzeigen des Verbrauchs bei alltäglichen Taten durch direkte Rückmeldungen. Denn genau diese Rückmeldungen erhöhen das Bewusstsein für den eigenen Energieverbrauch und können damit eine Veränderung der Einstellung einer Person gegenüber Energiesparen hervorrufen.

Im Folgenden werden vorhandene kommerzielle Produkte zur Überwachung des Stromverbrauchs vorgestellt und auf zwei ausgewählte Probleme allgemeiner Art von Feedback-Systemen eingegangen. Danach werden drei Kategorien von Feedback-Systemen eingeführt, welche dann mit einander verglichen werden. Es handelt sich dabei um zentralisierte, verteilte und hybride Systeme. Die verteilten und hybriden Systeme werden mit Hilfe von konkreten Implementationen genauer betrachtet.

## 2 Verwandte Themen

### 2.1 Kommerzielle Systeme

Seit ein paar Jahren gibt es Produkte auf dem Markt, welche darauf abzielen, den Stromverbrauch im Haushalt für die Bewohner transparenter zu machen. Viele Produkte, wie Wattson [8], Click [2], Kill-A-Watt [7], Cent-a-Meter [1] und EM-2500 [5] haben jedoch Schwächen in einem oder mehreren Bereichen. Wattson, Cent-a-Meter und EM-2500 messen zwar den Gesamtverbrauch, geben aber keine Informationen über den Verbrauch einzelner Geräte. Kill-a-Watt und Click geben genaues Feedback zu einzelnen Geräten, müssen aber “in-line“, das heisst zwischen Steckdose und Gerät, installiert werden. Diese Art von Messung führt zu einem Mehraufwand bei der Installation und ist in gewissen Fällen gar nicht möglich (z.B. bei Lampen und anderen Geräten, welche fest verdrahtet sind). Abgesehen davon gibt es viele subtile Probleme, die noch zu lösen sind. Beispielsweise die Repräsentation der Daten und die langfristige Motivation eines Benutzers, sich mit der Thematik auseinanderzusetzen. Eine detailliertere Übersicht der Vor- und Nachteile der vorher genannten Lösungen wurde an der ETH Zürich erstellt [15].

### 2.2 Datenrepräsentation

Eine geeignete Darstellung der Verbrauchswerte, die sich positiv auf das Energiesparverhalten der Menschen auswirkt, stellt eine grosse Herausforderung dar. Im schlechtesten Fall kann eine ungünstig gewählte Darstellung des Feedbacks zu einem erhöhten Stromverbrauch führen. Wenn Nutzern zum Beispiel gezeigt wird, dass sie besser als der Durchschnitt sind, hören viele auf zu Sparen, weil sie denken, dass sie sowieso schon gut sind. Viele Forschungsarbeiten konzentrieren sich deshalb nur auf diesen einen Aspekt. Eine Studie in Studentenwohnheimen des Oberlin College in Ohio, USA [16] konnte zum Beispiel ein grösseres Sparpotential bei einer feineren Auflösung (also mehr Daten pro Zeit und Verbraucher) der Daten feststellen. Dabei gab es aber auch eine Grenze der Verfeinerung, ab welcher sich der Stromverbrauch der Probanden nicht mehr reduzierte. Es konnte kein signifikanter Unterschied zwischen Studentengruppen, von welchen die einen Echtzeit-Verbrauchsdaten pro Stockwerk und die anderen Echtzeit-Verbrauchsdaten eines ganzen Wohnheims erhielten, ermittelt werden.

Auch die Wahl der Einheiten (z.B. kWh usw.) beeinflusst die Verständlichkeit und Wirkung des Feedbacks enorm. Geld als Einheit wird gut verstanden, kann aber auch dazu führen, dass der Verbraucher praktisch kein Sparpotential sieht und deshalb sein Verhalten nicht ändert oder sogar noch weniger darauf achtet.

### 2.3 Strategien zur langfristigen Motivation der Nutzer

Es wurde festgestellt, dass die meisten Arten von Feedback, auch wenn noch so ästhetisch und korrekt, schon nach einer kurzen Zeit an Effizienz verlieren (z.B. beim UbiGreen Projekt [10], einer Applikation für Mobiltelefone, welche den gesparten  $CO_2$ -Ausstoss beim Wechsel zu “grünen“ Transportmitteln wie Bus und Zug anzeigt). Es ist ein noch wenig erforschter Bereich, mit dem Ziel, das Interesse der Benutzer nach den ersten paar Wochen aufrecht zu erhalten oder falls schon abgeschwächt wieder zurückzugewinnen. Fröhlich et al. [10] schlagen dazu die Möglichkeit eines Real-Life Spieles<sup>1</sup> vor. Der Benutzer könnte aufgefordert werden, Geräte mit einem gewissen Verbrauch in seiner Wohnung zu finden. Für jedes gefundene Gerät erhält er Punkte und erscheint ab einer gewissen Anzahl in einer Rangliste.

---

<sup>1</sup>Definition laut Wikipedia: Leben eines Menschen ausserhalb seiner virtuellen Aktivitäten im Internet

Eine andere Möglichkeit wäre, den Nutzer mittels einer Push-Meldung<sup>2</sup> auf Geräte mit einer schlechten Energiebewertung aufmerksam zu machen, und ihn gleich über Angebote eines neueren und energiesparenderen Produktes zu informieren. Durch das Aufzeigen des Sparpotentials (am besten gemessen an den Kosten) könnte die Bereitschaft gesteigert werden, das Gerät gegen ein effizienteres auszuwechseln.

### **3 Überblick über Systeme zur Überwachung des Energieverbrauchs einzelner Geräte**

Lösungen, die den Stromverbrauch auf Geräteebene messen und visualisieren, können grundsätzlich in drei Gruppen eingeteilt werden. Diese Kategorisierung bezieht sich hauptsächlich auf die Verteilung und den Typ der installierten Sensoren zum Messen der Verbrauchsinformationen. Im Folgenden werden die drei verschiedenen Ansätze erläutert und anschliessend genauer bezüglich ihrer charakteristischen Vor- und Nachteile diskutiert.

#### **3.1 Zentralisierte Systeme**

Bei zentralisierten Systemen wird der Stromverbrauch an einer zentralen Stelle im Haus gemessen. In einer solchen Lösung wird nur ein einziger Messpunkt verwendet, der normalerweise am Elektrizitätsanschluss des Haushalts installiert wird, also beim Stromzähler oder im Sicherungskasten. Die Messung zeigt den vollständigen Verbrauch an (auch von festverdrahteten Verbrauchern), gibt jedoch ohne zusätzliche Intelligenz keinen direkten Aufschluss darüber, wie viel Strom ein Gerät verbraucht. Um den Stromverbrauch auf Geräteebene darstellen zu können, werden entweder Algorithmen benötigt, die Last-Signaturen<sup>3</sup> den Geräten zuordnen, oder es ist eine Benutzerinteraktion erforderlich. Der Stromverbrauch eines Geräts kann durch Ein- und Ausschalten errechnet werden, indem die Differenz vom vorher und nachher gemessenen Wert ermittelt wird. Verschiedene Details der zentralisierten Systeme wurden in [11] präsentiert.

#### **3.2 Verteilte Systeme**

Im Gegensatz zu den zentralisierten Systemen werden bei den verteilten Systemen mehrere Stromsensoren zum Messen des Verbrauchs verwendet. Sensoren müssen direkt in das Gerät integriert sein, oder sich “in-line“ mit diesem befinden. Es existieren sowohl kommerzielle Produkte, als auch gute Ansätze in der Forschung. Bei den kommerziellen Produkten handelt es sich hauptsächlich um intelligente Zwischenstecker. Die nachträgliche Installation an festverdrahteten Verbrauchern wie Lampen, oder auch Kühlschränken und Waschmaschinen gestaltet sich dabei schwierig. Es ist jedoch beim verteilten Ansatz nicht zwingend notwendig, alle Geräte mit einem Messknoten zu versehen, um den Verbrauch jedes einzelnen Geräts zu ermitteln. Die Verdrahtung in einem Haus oder einer Wohnung kann als Baum dargestellt werden, welcher normalerweise bei der Wurzel, das heisst beim Stromzähler beginnt und in den Blättern bei einem Gerät endet (siehe Abbildung 1).

Jiang et al. [13] zeigen, dass auf Grund der Additivität des Energieverbrauchs bei jeder Verästelung, die einen Messknoten enthält, nur noch  $n-1$  Geräte gemessen werden müssen. Dabei muss speziell auf die Synchroni-

---

<sup>2</sup>Meldung, die beim Benutzer ohne Anforderung auftaucht

<sup>3</sup>charakteristische Schwankungen in der Lastkurve

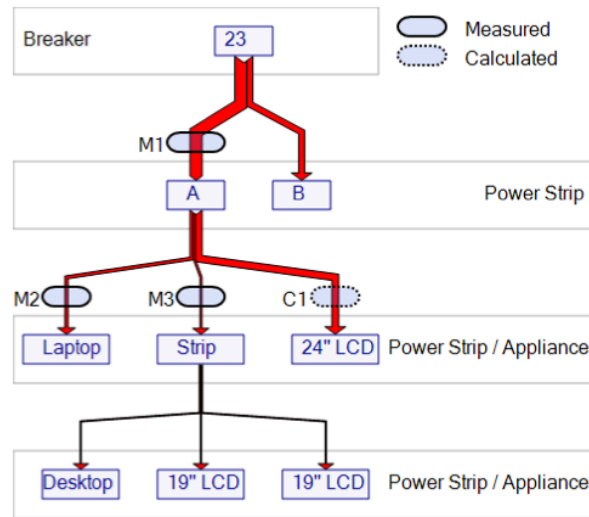


Abbildung 1: Ausschnitt aus möglichem Verbraucher-Baum [13]. Zu beachten: nicht alle Verbraucher werden gemessen.

sation der verschiedenen Messknoten geachtet werden, da alle Messungen zum gleichen Zeitpunkt geschehen müssen. Eine weitere Methode den Stromverbrauch individueller Geräte ohne Messpunkt zu ermitteln, welche aber an ihrem Elternteil (z.B. bei einer Mehrfachsteckdose) gemessen werden, wird "proportionaler Skalierungs-Schritt" [13] genannt. Dazu wird vorausgesetzt, dass die angeschlossenen Geräte und ihre Lastkurven bekannt sind (in Abbildung 1 sind dies zwei 19" LCD-Bildschirme und ein Desktop Computer). Die bekannten Lastkurven der angeschlossenen Geräte werden skaliert und addiert, bis sie zum gemessenen Wert der Mehrfachsteckdose passen.

### 3.3 Hybride Systeme

In hybriden Systemen wird ein Stromsensor an der zentralen elektrischen Hauptversorgung installiert. Zudem werden günstige indirekte Sensoren, die also nicht zwischen Steckdose und Gerät installiert werden müssen, an verschiedenen strategisch wichtigen Orten platziert, welche es erlauben den gemessenen Gesamtverbrauch vom Hauptsensor auf einzelne Geräte aufzuteilen. Diese zusätzlichen Sensoren messen dabei nicht den Stromverbrauch, sondern die verschiedenen Zustände von Geräten in ihrer Nachbarschaft. Ein Lichtsensor kann das Einschalten und Ausschalten einer Lampe feststellen, akustische Sensoren erkennen Kühlphasen des Kompressors eines Kühlschranks usw. Bei einer Platzierung am richtigen Ort können auch festverdrahtete Geräte ins Feedback integriert werden. Die Platzierung ist eine grosse Herausforderung für den Benutzer, falls die Installation nicht durch einen Fachmann erfolgt, denn indirekte Sensoren sind sehr anfällig auf äussere Einflüsse. Durch feine Kalibrierung der Sensoren kann das Rauschen der Umgebung jedoch minimiert werden.

### 3.4 Diskussion

Alle drei erwähnten Ansätze haben Vor- und Nachteile, weshalb auch keine in allen Fällen die optimale Lösung darstellt.

Characteristics	Single sensors	Multiple sensors	
		Direct in-line	Indirect
Installation	Hard	Medium	Hard
Cost	Low	High	High
Usage barrier	Low	High	High
Calibration	Hard	Easy	Hard
Device level accuracy	Low	High	Medium
Household level accuracy	High	Low	High

Abbildung 2: Aspekte der verschiedenen Überwachungsmethoden im Vergleich [15]

Die Installation bei zentralisierten Systemen gestaltet sich schwierig (siehe Abbildung 2), weil dazu ein Fachmann aufgeboden werden muss, und für kurze Zeit die Wohnung vom Stromnetz getrennt wird. Mit der zunehmenden Verbreitung von Smart-Metern in Europa wird der Aufwand in Zukunft aber kleiner. Da nur ein Sensor im ganzen Haushalt genügt, bleiben die Kosten der Installation, auch bei vielen Geräten, niedrig. Die Kalibrierung erfordert zusätzliches Wissen über die Art der Elektrizitätsinstallation des Stromzählers. Die Genauigkeit beim Messen von einzelnen Geräten, welche verteilte Systeme erreichen, weil sie den Verbrauch jedes einzelnen Geräts messen, kann von zentralisierten und hybriden Systemen nicht erreicht werden. Diese Genauigkeit kommt aber mit einem hohen Preis, da alle Geräte mit einem Sensor ausgestattet werden müssen. Die Installation der einzelnen Sensoren ist dafür einfacher, da kein Fachmann benötigt wird. Wenige Benutzer sind heute zudem bereit, das ganze Haus mit einer grossen Anzahl Sensoren auszurüsten. Das bedeutet aber, dass solche Systeme meistens nur einen kleinen Bereich des Gesamtverbrauchs abdecken.

Hybride Systeme messen den gesamten Stromverbrauch und je mehr indirekte Sensoren platziert werden, desto genauer können auch einzelne Geräte erfasst werden. Da sich aber die Kalibrierung als schwierig abzeichnet und das richtige Platzieren der Sensoren hohe Anforderungen an den Benutzer stellen (falls kein Fachmann engagiert wird), ist ein solches System nicht für jedermann tauglich. Das Problem der hohen Kosten ist im hybriden System zusätzlich vorhanden, es ist aber nicht gleich dominant, da nicht jedes einzelne Gerät mit einem Sensor ausgerüstet werden muss. Bei hybriden Systemen ist die Wartung der Sensoren aufwendig, da sie nicht am Stromnetz des Haushalts angeschlossen werden. Batterien einzelner Messknoten müssen somit nach einer gewissen Zeit ausgewechselt werden.

## 4 Konkrete Implementierungen verteilter und hybrider Systeme

In diesem Abschnitt werden nun konkrete Implementierungen von verteilten und hybriden Systemen genauer betrachtet. Es handelt sich bei den verteilten Systemen um ACme, ein Ansatz, welcher an der Universität Berkeley entwickelt wurde und um digitalSTROM, ein System, das von der gleichnamigen Organisation vorgestellt wurde [12, 3]. Als Beispiel für hybride Systeme wird eine an der Universität von Los Angeles

entwickelte Lösung, mit dem Namen ViridiScope, betrachtet [14].

## 4.1 ACme

Jiang et al. beschreiben den Entwurf und die Implementation einer verteilten Energieüberwachung namens ACme [12]. Das vorgeschlagene System besteht aus mehreren vernetzten ACme-Knoten und einer Applikationsschicht.

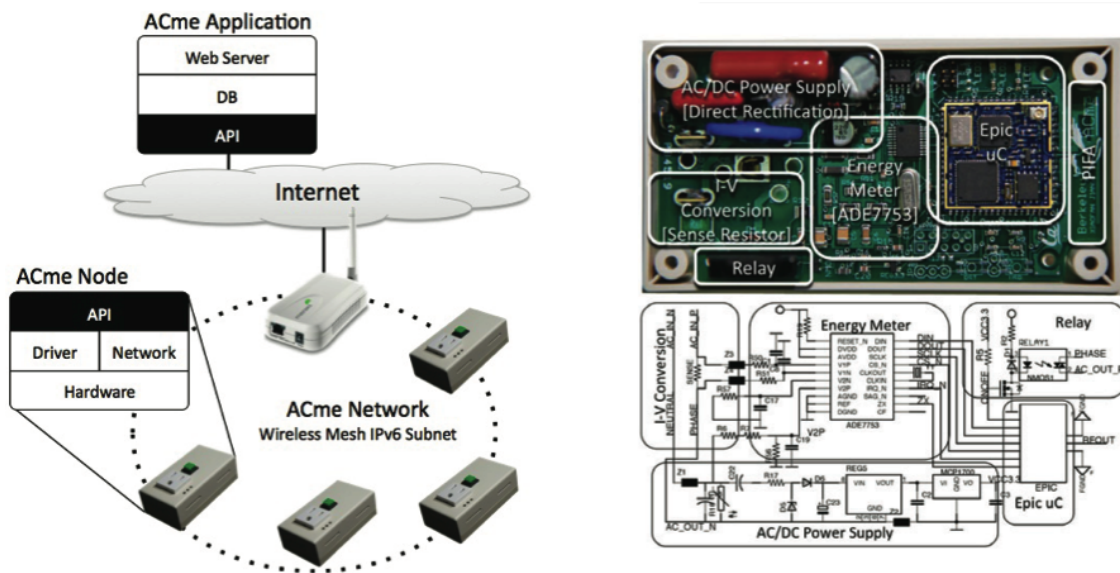


Abbildung 3: Schematische Darstellung und Bild vom Aufbau von ACme

### 4.1.1 Aufbau

Ein ACme-Knoten besteht hauptsächlich aus fünf Komponenten (siehe Abbildung 3), welche alle eine dedizierte Aufgabe erfüllen. Dabei wurden zwei mögliche Implementierungen betrachtet, die sich dadurch unterscheiden, wie der Stromverbrauch gemessen wird. Weil nicht alle Komponenten zum Messen des Stromverbrauchs eine gleich hohe Auflösung aufweisen, wurden zwei Varianten entwickelt, von welchen dann die mit den genaueren Messwerten aber teureren Bauteile verwendet wurde. Ein Epic core<sup>4</sup> mit TinyOS<sup>5</sup> als Betriebssystem übernimmt die Steuerung der ACme-Knoten. Zusätzlich wurde ein Halbleiterrelais eingebaut, welches beliebiges Ein- und Ausschalten des angeschlossenen Geräts zulässt.

Die Autoren verwenden zur Kommunikation ein IPv6 IEEE 802.15.4 [6] Mesh-Netzwerk. Das System ist so einfach erweiterbar und gut für die hohe Anzahl Sensoren in der nahen Zukunft gerüstet. Weil die Sensoren durch das Mesh-Netzwerk untereinander verbunden sind, erreicht der Zusammenschluss der Sensoren eine

<sup>4</sup>Mikrokontroller (TI MSP430F1600) mit integriertem Drahtlosmodul CC2420, an der Universität Berkeley entwickelt

<sup>5</sup>Open-Source-Betriebssystem für drahtlose embedded Geräte, welches ebenfalls an der Universität Berkeley von einem der Autoren entwickelt wurde



grössere Reichweite, als wenn alle Sensoren sich zu einem einzigen WLAN-Access-Point verbinden. ACme-Knoten können also auch an einem Ort installiert werden, wo die Signalstärke eines WLAN-Access-Points zu schwach ist, solange mindestens ein weiterer ACme-Knoten in Reichweite liegt. Jeder Sensor-Knoten agiert auch als IP-Router und leitet so Anfragen von Nachbarn weiter. Damit der Zusammenschluss von ACme-Knoten schlussendlich auch vom Internet zugänglich ist, wurde ein sogenannter *edge router* aufgesetzt, welcher gleichzeitig eine Verbindung zum Mesh-Netzwerk aufrecht erhält und durch ein LAN-Kabel am Internet angeschlossen ist. Zur Visualisierung der Daten dient eine Webapplikation mit Anbindung zu einer MySQL-Datenbank, welche auf einem dedizierten Server ausgeführt wird. Ein Python-Programm, welches im Hintergrund auf dem Server läuft, erhält jede Minute jeweils die aktuellen Verbrauchswerte der ACme-Knoten in der Form von UDP-Datagrammen. Die Applikationsschicht ist somit getrennt vom Mesh-Netzwerk der ACme-Knoten und kann von mehreren solchen Zusammenschlüssen von ACme-Knoten gleichzeitig verwendet werden.

#### 4.1.2 Praktische Herausforderungen

Das Installieren einzelner Sensoren wurde daraufhin optimiert, dass ein solcher ACme-Knoten nur noch eingesteckt werden muss. Dieser wurde mit einer fixen IP vorkonfiguriert, an welche im Sekundentakt die gemessenen Stromwerte übermittelt werden, sobald eine Verbindung mit einem Nachbar-Knoten hergestellt werden kann. Ein ACme-Knoten selbst weist sich selbst eine IPv6 Adresse mittels der IPv6-Autokonfiguration zu.

In der Versuchsinstallation wurden die Drahtlosmodule auf einen Kanal festgelegt, dessen Frequenz sich mit der normalen 802.11 Kommunikation überschneidet. Das System leidet deshalb bei hoher Benutzung des normalen WLAN-Netzwerks an einer hohen Packetverlustrate, was zu Lücken in der Datenaufzeichnung führt. Obwohl UDP-Datagramme nicht garantiert beim Empfänger ankommen, entschieden sich die Autoren dafür, weil so eine unnötige Überlastung des Netzwerks durch ACKs vermieden wird. Zudem wurden sämtliche sicherheitstechnische Aspekte vernachlässigt, es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass NAT, Firewalls und andere Filter-Mechanismen angewendet werden könnten.

## 4.2 digitalSTROM

Die Non-Profit Organisation digitalSTROM, welche 2007 an der ETH Zürich gegründet wurde, arbeitet an einem verteilten System, in welchem jedes Gerät einen Strommess-Chip erhält [3].

### 4.2.1 Aufbau

Damit die Installation möglichst einfach vonstatten geht, soll in Zukunft schon bei der Herstellung eines Gerätes ein solcher Chip eingebaut werden. Für jeden Stromkreis wird ein digitalSTROM-Meter (kurz dSM) installiert. Dieser kommuniziert über ein Protokoll, welches ähnlich wie die PLC-Kommunikation<sup>6</sup> funktioniert. Es wird also kein Drahtlosnetzwerk zur Steuerung der Sensoren benötigt. Über einen solcher digitalSTROM-Chip (dSID) können Geräte auch ferngesteuert, das heisst Ein- und Ausgeschaltet werden.

---

<sup>6</sup>Power-Line-Communcation: Übermittlung von Daten übers Stromnetz

## 4.2.2 Praktische Herausforderungen

Damit in jedem Gerät ein solcher Chip schon vorinstalliert wird, muss dieser genügend klein sein, und darf nur wenig kosten. Zur Zeit kostet der digitalSTROM-Chip ca. CHF 15.-, was eine Tischlampe erheblich verteuert.

Die patentierte Kommunikation, welche mittels einer Nullphasen-Modulation geschieht, wird bei vielen angeschlossenen Stromverbrauchern, erheblichen Störungen ausgesetzt, auch wenn sie in Demo-Wohnungen gut funktioniert.

## 4.3 ViridiScope

Ein an der Universität von Los Angeles entwickeltes System, von den Autoren ViridiScope [14] genannt, zeigt Vorteile und Herausforderungen eines hybriden Systems auf. Das entworfene System wurde dann in einem Zweipersonen-Haushalt getestet und die Genauigkeit in verschiedenen Szenarien ermittelt. Die grössten Abweichungen zwischen dem wirklichen und dem ermittelten Verbrauch betrug dabei stets weniger als 10 Prozent.

### 4.3.1 Aufbau

Zuerst wurde ein zentraler Sensor angebracht, der den gesamten Stromverbrauch der Wohnung misst. Danach platzierten die Autoren zahlreiche Umweltsensoren in der Nähe von Verbrauchern um den gemessenen Gesamtverbrauch auf einzelne Geräte aufteilen zu können. In dieser Test-Installation wurden drei Klassen von indirekten Sensoren, diese werden also nicht "in-line" mit dem Gerät installiert, verwendet: Magnet-, Akustik- und Lichtsensoren. Mit einem magnetischen Sensor in der Nähe eines Stromkabels kann der aktuelle Stromverbrauch gut abgeschätzt werden, da dieser ein von der Stromstärke abhängiges Magnetfeld erzeugt. Dass das Magnetfeld sich bei unterschiedlichem Stromverbrauch verändert, zeigt Abbildung 4.

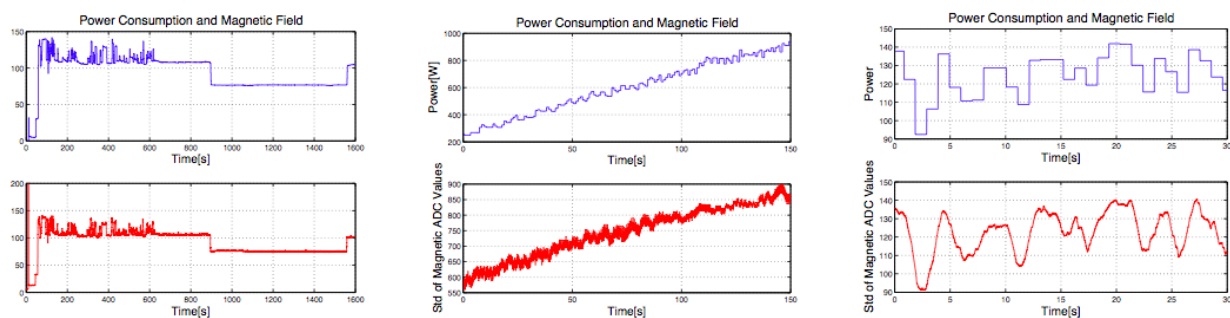


Abbildung 4: Die Korrelation zwischen der Standardabweichung des Magnetfeldes (unten) und der Stromaufnahme (oben) eines Geräts (Links: PC, Mitte: Heissluftpistole, Rechts: Massagestuhl) ist klar sichtbar. Quelle: [14]

Ein Lichtsensor kann im Unterschied zum Magnetsensor, welcher nur den Stromverbrauch durch Veränderungen im Magnetfeld feststellt, den internen Zustand eines Geräts feststellen. Die meistens Geräte besitzen

nur sehr wenige Zustände (Beispiel Lampe: An und Aus). Bei einem Kühlschrank hingegen kann der Zustand des Kompressors nicht vom Lichtsensor im Inneren des Kühlschranks abgeleitet werden. Für diesen Fall wird in ViridiScope ein Akustiksensoren eingesetzt. Auch bei ViridiScope besteht ein Sensor aus einem Mikrokontroller inklusive Drahtlosmodul, auf welchem ein TinyOS läuft.

#### 4.3.2 Praktische Herausforderungen

Die grösste Herausforderung an ViridiScope ist die Kalibrierung der Sensoren, wie es bei allen indirekten Systemen der Fall ist. Es ist schwer vorstellbar, dass die Kalibrierung durch den Benutzer vorgenommen wird. Deshalb entwickelten die Autoren eine automatisierte *in-situ*<sup>7</sup> Kalibrierung der Sensoren. Dafür wurde das zusätzliche Wissen des Gesamtstromverbrauchs verwendet. Für die automatische Kalibrierung wurde ein numerisches Optimierungsproblem aufgestellt, welches dann mit Hilfe von Software gelöst wird.

Da indirekte Sensoren sehr empfindlich auf Umgebungsrauschen reagieren, müssen die Sensoren so nah wie möglich an dem zu überwachenden Gerät installiert werden. Ein zusätzlicher Sensor in grösserer Distanz kann dieses Problem verringern, denn mit einem adaptiven Filter kann das störende Rauschen der Umgebung reduziert werden.

## 5 Schlussfolgerungen

Systeme zur Überwachung des Energieverbrauchs können helfen Energie zu sparen. Je detaillierter das Feedback und je zutreffender zur jeweiligen Zielgruppe die Datenrepräsentation gewählt wird, desto grösser sind die zu erwartenden Einsparungen. Dieses Feedback mit der Folge von Energieeinsparungen ist jedoch längerfristig nur erfolgreich wenn es ansprechend gestaltet, und mit entsprechenden Strategien zur Erhaltung der Motivation gekoppelt wird.

Die aktuellen Ansätze für die Ermittlung des Energieverbrauchs einzelner Geräte im Haushalt können in die drei vorgestellten Kategorien der zentralisierten, der verteilten und der hybriden Systeme eingeteilt werden. Zentralisierte Lösungen besitzen den Vorteil einer einfachen und vergleichsweise günstigen Installation, wo hingegen die Genauigkeit, beim Messen einzelner Geräte, in verteilten und hybriden Systemen höher ist. Letztere verursachen aber einen grösseren Aufwand bei der Installation, also bis ein solches System zur Nutzung bereit ist. Dies kann den Benutzer davon abhalten, sich für ein solches System zu entscheiden. Indirekte Sensoren in hybriden Systemen müssen zusätzlich gewartet werden, da sie keine Energie vom Stromnetz beziehen können.

Die Zukunftsvision, dass jedes Gerät einen Chip besitzt, der den Stromverbrauch meldet und die Möglichkeit gibt, das Gerät auch gleich zu steuern, scheint am erfolgversprechendsten zu sein. Bis dies aber soweit ist, werden zentralisierte Systeme und Lösungen wie ACme und ViridiScope in der nahen Zukunft dieses Gebiet dominieren. Dabei besteht vor allem im Bereich der verteilten Systeme Forschungsbedarf im Gebiet der Integration der einzelnen Knoten in ein Gesamtsystem.

---

<sup>7</sup>Lateinisch für 'an Ort und Stelle'

## Literatur

- [1] Cent-a-meter. <http://www.centameter.com.au/>.
- [2] Click. [http://www.ekz.ch/internet/ekz/de/ueberuns/100-jahre\\_ekz/click.html](http://www.ekz.ch/internet/ekz/de/ueberuns/100-jahre_ekz/click.html).
- [3] digitalSTROM. <http://www.digitalstrom.org/>.
- [4] Durchschnittlicher Energieverbrauch Flachbildschirm und Toaster. [http://www.energysavers.gov/your\\_home/appliances/index.cfm/mytopic=10040](http://www.energysavers.gov/your_home/appliances/index.cfm/mytopic=10040).
- [5] EM-2500. <http://energymonitor.com/>.
- [6] IEEE 802.15.4. <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>.
- [7] Kill-a-watt. <http://www.p3international.com/products/special/P4400/P4400-CE.html>.
- [8] Wattson. <http://www.diykyoto.com/uk/wattson/>.
- [9] I. Ajzen. The theory of planned behavior. *Organizational behavior and human decision processes*, 50(2):179–211, 1991.
- [10] J. Froehlich, T. Dillahunt, P. Klasnja, J. Mankoff, S. Consolvo, B. Harrison, and J. A. Landay. Ubi-green: investigating a mobile tool for tracking and supporting green transportation habits. In *CHI '09: Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems*, pages 1043–1052, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [11] M. Gschwend. Monitoring energy usage on device level: centralized solutions. 2010.
- [12] X. Jiang, S. Dawson-Haggerty, P. Dutta, and D. Culler. Design and implementation of a high-fidelity ac metering network. In *Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks-Volume 00*, pages 253–264. IEEE Computer Society, 2009.
- [13] X. Jiang, M. Van Ly, J. Taneja, P. Dutta, and D. Culler. Experiences with a High-Fidelity Wireless Building Energy Auditing Network. In *Proceedings of the Seventh ACM Conference on Embedded Networked Sensor System (SenSys 09)*.
- [14] Y. Kim, T. Schmid, Z. Charbiwala, and M. Srivastava. ViridiScope: design and implementation of a fine grained power monitoring system for homes. In *Proceedings of the 11th international conference on Ubiquitous computing*, pages 245–254. ACM, 2009.
- [15] F. Mattern, T. Staake, and M. Weiss. ICT for green - how computers can help us to conserve energy. In *Proceedings of e-Energy 2010*, Passau, Germany, Apr. 2010.
- [16] J. Petersen, V. Shunturov, K. Janda, G. Platt, and K. Weinberger. Dormitory residents reduce electricity consumption when exposed to real-time visual feedback and incentives. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 8(1):16–33, 2007.