

Infrastructure Mediated Sensing

Peter Bucher

ETH Zürich, März 2008

Zusammenfassung. Durch zunehmendes Interesse im Bereich der benutzerorientierten Heim- und Gebäudeautomation kommt der Wunsch nach komplexeren Anwendungen auf. Diese sollen gezielt auf die Vorlieben und das Verhalten der Bewohner eingehen und sich bei Bedarf anpassen. Es ist ein grosser technischer Aufwand notwendig, um solche Anwendungen zur Verfügung stellen zu können. Bisherige konnten sich beim Endverbraucher nicht durchsetzen. Infrastructure mediated sensing beschreibt Systeme, welche mit schon bestehender Infrastruktur oder möglichst wenig Veränderung an der vorhandenen Infrastruktur Informationen in einem Gebäude sammeln können. Das System soll sich dabei in das Umfeld des Nutzers einfügen, ohne dass er es als störend wahrnimmt, sei es durch sichtbare Gerätschaften oder explizite Interaktion. Ziel ist es, Anwendungen zur Verfügung stellen zu können, ohne gleichzeitig die Ästhetik der Bauten zu stören. Diese Arbeit behandelt einige Ansätze dazu und zeigt die Vor- und Nachteile der Einzelnen auf.

1 Einleitung

Schon seit Urzeiten strebt der Mensch danach, sich mit allen Mitteln das alltägliche Leben zu erleichtern. Sei es mit Maschinen, die uns Arbeiten abnehmen oder mit kleinen Dingen wie Notizbücher, die uns helfen, nichts zu vergessen.

Ein relativ neues Feld ist die durch den Benutzer gesteuerte Gebäudeautomatisierung. Dinge in Gebäuden zu lokalisieren und zu steuern hat viele Vorteile. Eine kurze Anfrage an das System bringt die verlorenen Autoschlüssel schnellstmöglich wieder hervor. Der Fernseher macht sich selbst aus, wenn niemand in der Nähe ist. Die Beleuchtung eines Raumes passt sich der Tageszeit und den individuellen Bedürfnissen der Personen an, die sich momentan darin befinden. Falls eine kranke Person Hilfe braucht, wird automatisch ein Alarm ausgelöst. Die Liste liesse sich noch lange fortsetzen. Viele dieser Möglichkeiten lassen sich heute schon realisieren, doch sie haben fast alle gemeinsam, dass sie Informationen darüber benötigen, was für Aktivitäten gerade im Gebäude stattfinden und welche Personen sich darin aufhalten. Vor allem ist es für das System wichtig zu wissen, wo genau sich eine Person befindet, um entsprechend zu reagieren.

In dieser Arbeit wird die Funktionsweise von drei verschiedenen Systemen erklärt, welche Aktivitäten in einem Gebäude im Sinne von infrastructure mediated sensing registrieren können: pressure sensing in HVAC system ductwork

[1], detecting unique electrical events [2] und PowerLine Positioning [3]. Anschliessend werden die Resultate aus Feldversuchen bewertet und Probleme der entsprechenden Ideen diskutiert.

2 Infrastructure Mediated Sensing

Der Begriff 'infrastructure mediated sensing' wurde am Georgia Institute of Technology in Atlanta durch Shwetak N. Patel aus der Ubicomp Research Group geprägt. Die Gruppe ist ebenfalls sehr stark an der Aware Home Research Initiative unter der Leitung von Gregory D. Abowd beteiligt. Für das Projekt hat man speziell ein Haus gebaut, das mit verschiedensten Technologien die Aktivitäten der Bewohner wahrnimmt. Man forscht daran, wie mit solchen Technologien die Bewohnern im Alltag unterstützt werden können und welche technischen, ästhetischen und sozialen Probleme damit einher gehen.

Unter infrastructure mediated sensing versteht man Systeme, die schon bestehende Infrastruktur dafür nutzen, Aktivitäten in der Umwelt zu registrieren und deren Ort zu bestimmen. Mit diesen Informationen lassen sich höhere Anwendungen realisieren oder auch bestehende optimieren. Alternativ wird oft auch von 'home bus snooping' gesprochen, um eine Analogie zum Bus herzustellen, wie wir ihn in Computern finden, wo er verschiedene Komponenten miteinander verbindet und den Austausch von Daten ermöglicht.

Diese Aufgabe lässt sich natürlich auch mit heute bereits verfügbaren Technologien bewerkstelligen. Zum Beispiel können Bewegungssensoren, Mikrofone und Lichtschranken die Aktivitäten in einem Raum feststellen. RFID-Lesegeräte identifizieren die Person vor dem Betreten und beim Verlassen eines Raumes. Mit Empfangsstationen von Funkgeräten wie Mobilfunkantennen lässt sich die Position bestimmen. Eine solche Installation hätte aber einige besonders markante Nachteile. Kameras können nur erfassen, was in ihrem Blickfeld liegt und sind im Allgemeinen nicht schön anzusehen. An Mobilfunkantennen können von den Betreibern jederzeit Änderungen vorgenommen werden, was eine Neukalibrierung nötig macht. RFID-Lesegeräte erfordern das bewusste Mitführen eines RFID-Tags. Dazu kommt auch, dass die Anschaffungskosten und die nötigen Massnahmen für eine Installation sehr hoch sind. Deshalb konnten sich solche Lösungen besonders aus ästhetischen und finanziellen Gründen nicht bei einer breiten Masse durchsetzen.

Die folgenden drei Projekte versuchen, viele dieser hemmenden Gründe so gut wie möglich zu vermeiden. Durch kostengünstige Modifikationen an der schon bestehenden Infrastruktur können Informationen aus der Umgebung registriert werden. Aufgrund ihrer Einfachheit sind diese auch massentauglicher als bisherige Lösungen.

2.1 Pressure Sensing in HVAC System Ductwork

HVAC steht für "heating, ventilating and air conditioning" und bezeichnet ein System, welches die Temperatur in einem Gebäude reguliert. Im Betrieb wird

die Luft in den Räumen kontinuierlich umgewälzt, indem ein Gebläse Luft in ein Röhrensystem presst und durch ein separates Röhrensystem ansaugt (siehe Abbildung 1). Dadurch entsteht ein Druckunterschied im HVAC, bekannt als der statische Druck, welcher auch als Masseinheit für den Widerstand auf die Gebläseeinheit gebraucht wird. Der Druck ist davon abhängig, wie die Luft im Gebäude zirkulieren kann. So besteht zum Beispiel je nachdem welche Türen und Fenster offenstehen ein anderer statischer Druck im Gebläse.

Die Idee von pressure sensing in HVAC system ductwork besteht darin, durch das Anbringen von Sensoren Luftdruckunterschiede zu bestimmen. Schon das Öffnen bzw. Schliessen einer Tür oder eine Person, die sich durch den Türrahmen bewegt, verändert die Luftströmungsverhältnisse soweit gehend, dass dies in Form von Luftdruckschwankungen registriert werden kann. Dadurch, dass das HVAC durch ein Lufröhrensystem mit allen Räumen eines Gebäudes verbunden ist, können Luftdruckschwankungen an zentraler Stelle gemessen werden. Das Ausmass der Veränderung ist für jeden Durchgang charakteristisch genug um die Position des Ereignisses zu bestimmen.

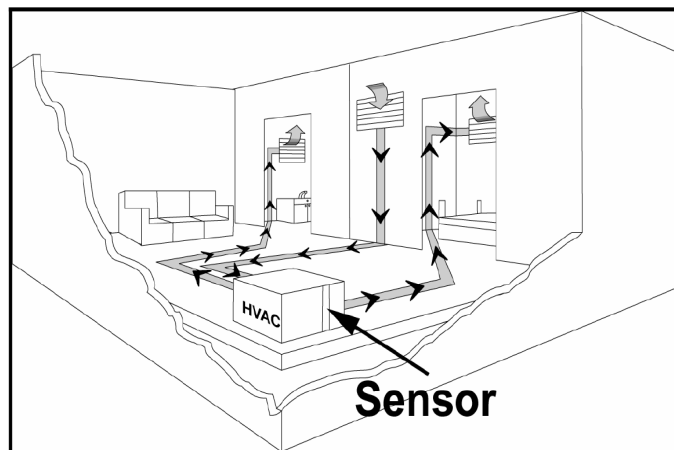


Abb. 1. HVAC Luftstrom-Beispiel

Die benötigten Luftdruck-Sensoren werden auf dem Luftfilter des Gebläses angebracht. Damit sind die Sensoren an zentraler Stelle und für die Bewohner nicht sichtbar. Vorteile davon sind auch, dass weniger Sensoren benötigt werden, als wenn in jedem Raum ein eigener Sensor installiert wird, welcher wiederum per Kabel oder via Funk mit dem System verbunden sein müsste. Zudem muss der Luftfilter regelmässig gewartet werden und ist deshalb im allgemeinen sehr leicht zugänglich. Für grössere Gebäude wäre es trotzdem auch denkbar, zusätzliche Sensoren an Zweigstellen im Röhrensystem zu befestigen. Dies zieht aber einen

bedeutenden Mehraufwand nach sich, da die Zweigstellen nicht immer gut zugänglich sind. Im Falle einer Fehlfunktion ist ein Austausch bedeutend aufwändiger.

2.2 Detecting Unique Electrical Events

Um Informationen innerhalb eines Gebäudes zu übertragen, bietet sich die bestehende Elektroinstallation als günstige Lösung an. In dem Zusammenhang besonders bekannt sind einige von der HomePlug Powerline Alliance [4] zertifizierte Produkte, die zum Beispiel ein lokales Netz über die Steckdose ermöglichen oder Powerline Access, womit man Internet und Telefonie über die Steckdose ermöglichen wollte. Gründe wie schlechte Verkabelungen und eine hohe Rauschempfindlichkeit verhinderten, dass sich vor allem Powerline Access nicht auf dem breiten Markt durchsetzen konnte.

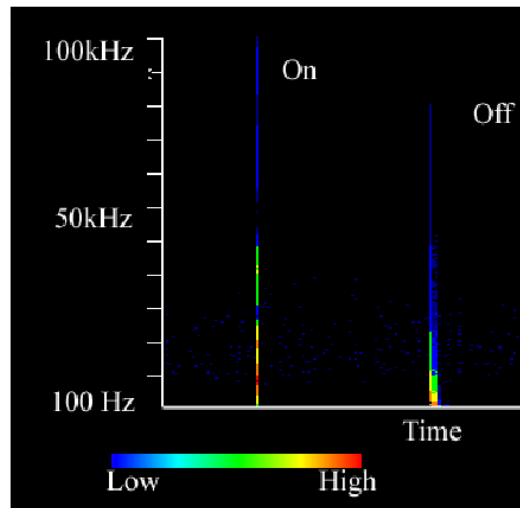


Abb. 2. Frequenz- und Amplitudenanalyse über die Zeit beim Ein- und Ausschalten eines Lichtschalters

Heute sind Elektroinstallationen so gut wie überall vorhanden und umspannen zudem meist das gesamte Gebäude. Das Prinzip des Systems beruht darauf, dass elektrische Geräte, wenn sie in Betrieb genommen werden, für kurze oder kontinuierliche Zeit ein elektrisches Rauschen auf den Stromleitungen erzeugen [5] (siehe Abbildung 2). Dieses Rauschen, was beim Einsatz von Powerline-Produkten deren Übertragung stören kann, wird hier ausgenutzt indem man es mit einem Bandpass-Filter herausfiltert und mit Hilfe eines Oszilloskops sichtbar

macht bzw. an einen PC überträgt. Das empfangene Signal wird anschliessend in seine Frequenzbestandteile zerlegt. Die Dauer, Anteile und Intensität der beteiligten Frequenzen sind dabei von Gerät zu Gerät unterschiedlich. So haben zum Beispiel zwei Lichtschalter des gleichen Herstellers auf Grund der mechanischen Herstellung und einer anderen Distanz zur Messapparatur unterschiedliche Rauschmuster. Mit dieser Vorrichtung können die meisten elektrischen Ereignisse registriert werden. Sowohl solche die vom Menschen ausgelöst werden, als auch automatische wie zum Beispiel das Einschalten der Heizung. Der Ursprung eines registrierten Ereignisses kann folglich bei fest installierten Geräten genau bestimmt werden.

Die Installation selbst zeigt sich ausserordentlich einfach. Es wird lediglich eine Steckdose und ein Messgerät benötigt. Das macht es besonders zur nachträglichen Installation attraktiv. Die benötigte Technik ist ebenfalls sehr einfach und preisgünstig herzustellen.

2.3 PowerLine Positioning

Wie schon erwähnt, sind Elektroinstallationen wegen ihrer weiten Verfügbarkeit besonders für eine breite Adaption geeignet. Im Gegensatz zur im vorherigen Abschnitt beschriebenen Technologie will man mit PowerLine Positioning (PLP) nicht einzelne Ereignisse erkennen, sondern die räumliche Position von Objekten oder Personen im Gebäude bestimmen. Es sei noch erwähnt, dass die Arbeitsweise von PowerLine Positioning nichts mit der im vorherigen Abschnitt genannten Powerline-Technologie zu tun hat.

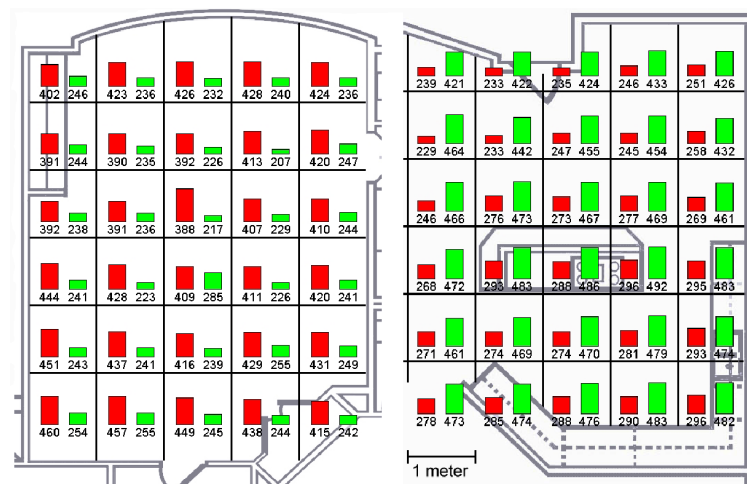


Abb. 3. Grundriss mit eingetragenen Messwerten der zwei induzierten Signale

Für PLP werden zwei Tongeneratoren optimalerweise an gegenüberliegenden Punkten im Gebäude an das Stromnetz angehängt. Ein Tongenerator ist ein Gerät welches ein Tonsignal im Bereich von 10-500kHz in die elektrischen Leitungen induziert. Angeschlossene Elektrogeräte werden dadurch nicht beeinflusst. Die von den Tongeneratoren induzierten Signale müssen von unterschiedlicher Frequenz sein. Dadurch verhalten sich die elektrischen Leitungen wie Antennen und die induzierten Signale können von einem Tondetektor empfangen werden. Die Amplituden der empfangenen Signale sind sowohl von der Distanz zu den Leitungen, als auch der Distanz zum Tongenerator selbst abhängig, da die elektrischen Leitungen das Tonsignal dämpfen. Nun kann man an verschiedenen Positionen im Gebäude die Amplituden der beiden Signale messen und per Funk an eine Basisstation übertragen. Weil die Amplituden von der Position abhängig sind, kann sich das System für jeden Ort im Gebäude die Werte merken und später gemessene wieder einem Ort zuordnen. (siehe Abbildung 3).

Die benötigten Geräte sind ebenfalls sehr einfach sowie kostengünstig herzustellen und die mitzutragenden Tondetektoren liessen sich etwa in der Grösse eines Schlüsselanhängers konstruieren. Die Installation ist nur unbedeutend schwieriger als beim vorhergehenden System.

3 Ergebnisse, Probleme und Lösungen

Alle Systeme haben gemeinsam, dass sie für das Erkennen von Ereignissen Machine-learning-Techniken nutzen. Aus diesem Grund ist eine initiale Trainingsphase notwendig um geeignete Ereignisvektoren zu generieren. Spätere Ereignisse werden dann entweder mit Hilfe von “K-Nearest Neighbour” [6] (Power-Line Positioning) oder “Support Vector Machines” [7] (Electrical Events, Pressure Sensing) klassifiziert und einem gelernten Testvektor zugeordnet. Das hat zur Folge, dass bei einer zu grossen Anzahl an Testvektoren die Erkennungsrate sinkt, da die Wahrscheinlichkeit von ähnlichen Vektoren steigt.

3.1 Pressure Sensing in HVAC System Ductwork

Das Öffnen und Schliessen von Türen kann schon in einem einfachen Feldversuch einigermaßen gut detektiert werden. Es werden bei laufendem HVAC etwa 75-80% davon erkannt. Personen die sich durch einen Türrahmen bewegten, wurden zu ca. 65% erkannt, wobei in kleineren Wohnungen bessere Ergebnisse erzielt werden konnten. Die Installation der benötigten Sensoren ist einfach und rasch vorgenommen. Doch eine sehr stark schwankende Erkennungsrate zeigt, dass das System als alleinige Informationsquelle nicht ausreicht. Es gibt aber auch weitere Punkte die man bedenken sollte.

- In Europa sind HVAC-Systeme hauptsächlich in grösseren Gebäuden zu finden. In Eigenheimen sind sie noch eher selten anzutreffen. In den USA und Kanada jedoch waren schon 1997 zwei Drittel der Haushalte mit einem solchen ausgerüstet und die Tendenz ist allgemein steigend.

- Die Erkennungsrate ist stark von dem Luftröhrensystem und der Grösse der Räume abhängig. Speziell im Hinblick auf diese Anwendung konzipierte Systeme könnten diese sicherlich steigern. Je nach Grösse des Gebäudes kann es auch vorkommen, dass mehrere unabhängige HVAC-Einheiten installiert sind, was die Analyse verkompliziert.
- Bei ausgeschaltetem HVAC sinkt die Erkennungsrate von ca. 75-80% auf 65%. Das Luftröhrensystem ist dadurch nur noch in der Lage, grössere Luftbewegungen wie beim Öffnen einer Tür detektierbar an die Sensoren weiter zu leiten. Bewegungen von Personen können nicht mehr erkannt werden.

3.2 Detecting Unique Electrical Events

Schon mit sehr wenigen Trainingsdaten können die Ereignisse gut bestimmt werden. Zwei Trainingsinputs pro Ereignis reichen aus, um es in vier von fünf Fällen zu erkennen. Längere Trainingsphasen resultieren erwartungsgemäss in besseren Resultaten. So steigt die Erkennungsrate mit fünf Instanzen auf neun von zehn Fällen. Für den Feldversuch mit je vier Trainingsinstanzen pro möglichem Ereignis wurden Erkennungsraten um die 85-90% erzielt. Das ist vor allem angesichts der Einfachheit des Systems beachtlich. Jedoch hat das System seine Grenzen.

- Werden zwei Geräte zur gleichen Zeit eingeschaltet oder ein Gerät schnell ein und wieder ausgeschaltet, wird sich das erzeugte Rauschen überlagern und eine genaue Erkennung verhindern. Solche Ereignisse müssten speziell trainiert werden, was den Trainingsaufwand enorm steigert.
- Geräte welche weniger als 27 Watt benötigen wie zum Beispiel Strompaarlampen oder Radiowecker, erzeugen kaum detektierbares Rauschen. Mit feineren Messgeräten liesse sich das sicherlich verbessern.
- In Europa ist es nicht unüblich, dass verschiedene Geräte an unterschiedlichen Phasen betrieben werden. Das heisst es gibt zwei oder mehr von einander unabhängige Stromkreisläufe in einem Haus. Die verschiedenen Phasen müssten so aneinander gekoppelt werden, dass das Rauschen überall empfangen werden kann.

3.3 PowerLine Positioning

Schon Versuche mit zwei Tongeneratoren in verschiedenen Heimen erzielten äusserst vielversprechende Resultate. In 88 bis 95% der Fälle lag die gemeldete Position in einem Umkreis von 3 Metern der tatsächlichen Position. Dabei hat die Grösse bzw. Anzahl der Räume auf die Genauigkeit keinen nennenswerten Einfluss. Der Einsatz von mehr als zwei Tongeneratoren konnte die Ergebnisse nur geringfügig verbessern. Auch dieses System hat wie die vorhergehenden ebenfalls gewisse Einschränkungen.

- Ältere Installationen sind weniger effizient. Das liegt zum Einen daran, dass grundsätzlich weniger Kabel und Steckdosen verlegt wurden, wodurch die Abdeckung der Fläche geringer ist, und zum Anderen, dass die Erdung nur teilweise vorhanden ist oder gar gänzlich fehlt.

- Elektrische Geräte wie Fernseher können die Detektoren stören, wobei das Problem nur innerhalb einiger Zentimeter zum Gerät auftritt. Durch zusätzliche Filterung der aufgenommenen Signale sollte sich das Problem soweit wie möglich eindämmen lassen und die Nutzung nicht behindern.
- Zu identifizierende Personen oder Objekte müssen einen Detektor und Sender an sich haben, damit das System funktioniert.
- Elektroinstallationen mit mehreren Phasen bergen dasselbe Problem wie im vorhergehenden Abschnitt und müssten entsprechend gekoppelt werden, um das Tonsignal auf die gesamte Elektroinstallation auszuweiten.

4 Fazit

Die Feldversuche der vorgestellten Systeme haben gezeigt, dass einige mehr und andere weniger gut für einen breiten Einsatz geeignet sind. Dabei stellten sich vor allem Systeme, die auf der Elektroinstallation basieren, als zuverlässiger und einfacher zu installieren heraus. Sie zeigen uns, dass schon bestehende Infrastruktur für zukünftige Techniken genutzt werden kann und die Installationskosten trotzdem gering ausfallen. PowerLine Positioning hat dahingehend beachtliche Resultate sowohl in der Einfachheit wie auch in der Genauigkeit vorzuweisen. Diese lassen sich durch spezialisierte Geräte und längere Trainingsphasen sicherlich noch weiter verbessern. Einzig die Notwendigkeit von Empfangsstationen und das Mitführen eines Detektors trüben den Ansatz, da sie von den Personen bewusst wahrgenommen werden. Entwicklungen im Bereich wearable computing [8] könnten das bewusste Mitführen vermeidbar machen, indem der Detektor direkt in die Kleidung integriert wird.

Detecting unique electrical events hingegen kann Informationen sammeln, ohne dass der Benutzer seine bisherigen Gewohnheiten anpassen muss und bleibt vor ihm absolut verborgen. Leider können einige Elektroinstallationen wegen ihres Alters oder durch äussere Einflüsse schon im Vorhinein ein konstantes Rauschen aufweisen. Für solche Fälle muss die Erkennungssoftware intelligent genug sein um das zusätzliche Rauschen verlässlich rauszufiltern.

Das Problem, das durch die Verkabelung mit mehreren Phasen entsteht, ist nicht zu unterschätzen. Die für den Ansatz ausreichende Koppelung ist nicht einfach und verkompliziert die Installation. Alternativ könnte man für jede Phase separate Messgeräte einsetzen, was sich jedoch wieder in den Kosten niederschlägt.

Im Vergleich zu den beiden vorherigen Ansätzen scheint der HVAC-Ansatz als alleiniges System auf Grund der Einschränkungen durch gegebene Installationen, allgemeiner Verfügbarkeit und schwankender Zuverlässigkeit der registrierten Ereignisse nicht geeignet. Im Zusammenspiel mit anderen Techniken könnten solche Systeme jedoch unterstützend oder sich gegenseitig ergänzend eingesetzt werden. Ihre Resultate könnten dann gewichtet in eine gemeinsame Entscheidung mit einfließen. Trotzdem wäre der Einsatz als Alarmanlage im Niedrigpreis-Segment denkbar. Allgemein lassen sich die Erkennungsraten

verbessern, indem zusätzliche Komponenten betrachtet werden. Zum Beispiel könnte man im PowerLine-Ansatz neben den Amplituden der Töne auch die Phasendifferenz messen und damit die Positionen weiter differenzieren.

Da die verbaute Infrastruktur für jedes Gebäude individuell ist, ist die allgemein notwendige Trainingsphase der Systeme unausweichlich und verschieden lang. Für einen dauernden Einsatz muss jedes zu erkennende Ereignis mehrmals ausgelöst werden. Je nach Einrichtung sind das einige hunderte bis tausende Ereignisse die erzeugt werden müssen. Hinzu kommt noch, dass gleichzeitige Ereignisse den Aufwand noch weiter erhöhen, da sie sehr variabel sind und immer leicht unterschiedlich ausfallen werden. Es sollte auch der Sicherheitsaspekt nicht vernachlässigt werden. Die registrierten Daten sind sehr persönlich und ermöglichen genaue Verhaltensanalysen, welche wiederum genutzt werden könnten, um genau dieses zu manipulieren. Mit direktem Zugriff wäre es zum Beispiel auch möglich herauszufinden, ob Alarmanlagen aktiv sind oder sich jemand im Gebäude befindet.

Sicherlich gibt es noch die einen oder anderen Probleme zu lösen, doch die Vorteile, die solche Systeme mit sich bringen sind enorm. Die bisherigen Resultate lassen jetzt schon vermuten, dass solche Ideen mit zunehmender Nachfrage nach entsprechenden Anwendungen sicherlich in dieser oder anderer Form zur Marktreife weiter entwickelt werden.

Literatur

- [1] Patel, S.N., Reynolds, M.S., Abowd, G.D. Detecting Human Movement by Differential Air Pressure Sensing in HVAC System Ductwork: An Exploration in Infrastructure Mediated Sensing. To appear in the Proceedings of Pervasive 2008. Sydney, Australia. 2008
- [2] Patel, S.N., Robertson, T., Kientz, J.A., Reynolds, M.S., Abowd, G.D. At the Flick of a Switch: Detecting and Classifying Unique Electrical Events on the Residential Power Line. In the Proceedings of Ubicomp 2007
- [3] Patel, S.N., Truong, K.N., and Abowd, G.D. PowerLine Positioning: A Practical Sub-Room-Level Indoor Location System for Domestic Use. In the Proceedings of Ubicomp 2006, Orange County, California, 2006
- [4] HomePlug Power Alliance, <http://www.homeplug.org>, April 2008
- [5] Marubayashi, G.: Noise Measurements of the Residential Power Line. In: The Proceedings of International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, pp. 104-108 (1997)
- [6] Mitchell, T. Machine Learning, McGraw Hil. ISBN 0070428077. 1997
- [7] Christopher J. C. Burges: A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. Data Mining and Knowledge Discovery 2:121 - 167, 1998
- [8] IFE Wearable Computing Group - <http://www.wearable.ethz.ch/>