



Doctoral Thesis

Occupancy Sensing and Prediction for Automated Energy Savings

Author(s):

Kleiminger, Wilhelm

Publication Date:

2015

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010450096> →

Rights / License:

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 22632

Occupancy Sensing and Prediction for Automated Energy Savings

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

presented by

WILHELM KLEIMINGER

MEng (Hons) in Computing, Imperial College London
born on 8 September 1987
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Friedemann Mattern, examiner
Prof. Dr. H.-Jürgen Appelrath, co-examiner
Prof. Dr. Anind Dey, co-examiner
Prof. Dr. Silvia Santini, co-examiner

2015

Abstract

The ability to sense and predict occupancy – *i.e.* to establish when the residents are and will be in a building – represents a basic requirement for the energy-efficient operation of many building automation systems. In residential households, in particular, the absence of all residents allows a heating controller to automatically lower the temperature of the home, thereby saving energy that would have been otherwise wasted on heating an empty building. However, if the home has been thus allowed to cool, a boiler and heat distribution system need a non-negligible time to reheat the home to a comfortable temperature. Therefore, to avoid a loss of comfort, a heating control system also requires a sufficiently accurate prediction of when the occupants are going to return in order to trigger the heating at the right time. Since space heating accounts for a large fraction of residential energy use (*e.g.* 68% in the European Union member states), heating control systems based on occupancy sensing and prediction – often referred to as smart thermostats – play an important role in reducing energy consumption and carbon dioxide emissions, while at the same time ensuring occupant comfort.

The objective of this thesis is thus to investigate how the two main computational components of a smart thermostat – occupancy *sensing*, based on sensors that typically exist in a residential environment, as well as occupancy *prediction* from historical occupancy patterns – can be used to automatically reduce the energy consumption of a heating system while trying to maximise thermal comfort.

Current smart thermostats require the installation of dedicated hardware to sense whether the occupants are at home or away. This increases installation and maintenance costs and thus prevents widespread adoption of such potentially energy-saving solutions. To overcome this hurdle, we investigate the suitability of opportunistically using devices already existing in households to sense occupancy. This opportunistic sensing approach seeks to utilise available devices to replace or augment dedicated infrastructures. An example are smart electricity meters, which are mandated to be installed in many households worldwide. We hypothesise that the information contained in the electrical load of the

household, as measured by the smart electricity meter, can be used to infer its occupancy. To verify this hypothesis, we have performed an extensive data collection campaign over seven months in six Swiss households to collect occupancy ground truth data as well as the aggregated and device-level electrical consumption of the households. Using this data, we employ supervised machine learning algorithms to infer occupancy solely from the households' aggregated electricity consumption. We show that such an approach yields a classification accuracy of up to 94%.

As soon as the occupancy *sensing* infrastructure detects that residents left the house, the temperature can be allowed to drop resulting in energy savings during this setback period. However, a reactive strategy cannot be employed upon the arrival of the occupants as it may take a considerable amount of time to bring the house back to a comfortable temperature. To avoid loss of comfort, occupancy *prediction* algorithms are used to predict the time of arrival of the occupants to determine the right time to start pre-heating the house. To analyse the performance of such prediction approaches we have derived occupancy schedules from a large, publicly available mobile phone location dataset. Using the schedules from 45 participants we show that current state-of-the-art occupancy prediction algorithms achieve an accuracy around 85%, which is close to the theoretical optimum given by the *predictability* of the schedules (which in practice always feature some level of irregular behaviour).

The accuracy of the occupancy prediction alone does not necessarily reflect the energy savings and comfort loss that can be achieved or caused by a smart thermostat. The actual savings depend upon the occupancy schedule of the household, the prediction accuracy, the weather conditions and the physical properties of the building. The final part of this thesis thus deals with the simulation of various heating scenarios to investigate the effect of a smart thermostat on the overall energy savings under different environmental conditions. To this end, we assess the overall energy expenditure in several building scenarios. Furthermore, we develop a new methodology to accurately assess the impact of the weather conditions on the energy savings. We show that building parameters result in a range of savings from 6% to 17%, while the savings in the 25% of households with the lowest occupancy are 4-5 times higher than in the quarter with the highest occupancy.

The unifying theme of this thesis is to show how current technology, which already exists in many homes, can help to save energy without sacrificing comfort. For this purpose, we draw upon recent work in the distributed systems domain to access smart electricity meters and machine learning algorithms to derive occupancy data. We show how predictable occupancy schedules are and, by providing a simulation framework to evaluate different occupancy prediction algorithms, we seek to answer the question how much energy a smart thermostat can save.

Kurzfassung

Grundvoraussetzung für eine energieeffiziente Steuerung von Gebäudeprozessen sind Erkennung und Vorhersage der Anwesenheit von Bewohnern in den Gebäuden. In privaten Haushalten erlaubt die Abwesenheit der Bewohner einem intelligenten Heizungsregelungssystem beispielsweise, die Temperatur zu senken und somit Energie einzusparen, die ansonsten für das Heizen des unbewohnten Wohnraums verschwendet werden würde. Allerdings benötigt ein ausgekühltes Haus wieder ausreichend Zeit, um auf eine angenehme Temperatur aufgeheizt zu werden. Um Komforteinschränkungen zu vermeiden, ist für das Heizungsregelungssystem daher eine möglichst genaue Vorhersage über die zukünftige Anwesenheit der Bewohner erforderlich. Die Raumheizung stellt einen signifikanten Teil des Gesamtenergieverbrauchs privater Haushalte dar, in der Europäischen Union liegt er derzeit bei 68%. Daher können Heizungsregelungssysteme, welche auf Anwesenheitserkennung und -vorhersage der Bewohner beruhen, eine wichtige Rolle bei der Reduktion von Energieverbrauch und CO₂-Emission spielen, ohne dass sich Komforteinschränkungen für die Bewohner ergeben.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung, ob Anwesenheitserkennung – basierend auf Sensoren, die typischerweise in Haushalten bereits vorhanden sind – sowie Anwesenheitsvorhersage anhand historischer Anwesenheitsmuster dazu beitragen können, den Energieverbrauch eines Heizungssystems ohne Komforteinbussen zu senken.

Aktuelle intelligente Heizungsregelungssysteme setzen die Installation von dedizierter Hardware für die Anwesenheitserkennung voraus. Die sich daraus ergebenden Zusatzkosten für deren Einbau und Wartung sorgen dafür, dass solche Lösungen eher Nischenprodukten vorbehalten bleiben. Dieses Problem könnte sich durch eine „Zweckentfremdung“ bereits existierender Haushaltsgeräte für die Anwesenheitserkennung mildern lassen. Ein Beispiel eines solchen Ansatzes sind intelligente Stromzähler, die in vielen Haushalten durch Änderungen in der Gesetzgebung bereits zur Pflicht geworden sind. Wir stellen hierbei die These auf, dass die elektrische Lastkurve eines Haushalts genügend

Informationen beinhaltet, um daraus mit hoher Wahrscheinlichkeit die An- und Abwesenheit seiner Bewohner abzuleiten. Um diese These zu untersuchen, haben wir in sechs Schweizer Haushalten Messtechnik installiert, die den Gesamtstromverbrauch sowie den Verbrauch einzelner Geräte misst. Zusätzlich haben wir die „Ground Truth“ bezüglich der tatsächlichen Anwesenheit in diesen Haushalten aufgenommen. Wir zeigen, dass mit Hilfe von überwachtem maschinellem Lernen, basierend auf den Stromverbrauchsdaten, eine Genauigkeit von bis 94% bei der Erkennung von An- und Abwesenheit möglich ist.

Eine automatisierte Anwesenheitserkennung ermöglicht somit einen Effizienzgewinn beim Heizen. Haben die Bewohner das Haus verlassen, ist eine weitere Beheizung des Wohnraums nicht notwendig, das Heizungsregelungssystem kann die Innentemperatur auf einen tieferen Wert absinken lassen. Allerdings kann solch eine rein reaktive Steuerung nicht verwendet werden, um das Haus erst bei der Ankunft der Anwohner wieder aufzuheizen, da die Aufheizphase eine signifikante Zeit erfordert.

Um den richtigen Zeitpunkt für das Wiederaufheizen des Hauses zu bestimmen, können Algorithmen zur Anwesenheitsvorhersage genutzt werden. Damit kann die Aufheizphase bereits vor Rückkehr der Bewohner gestartet werden, und Komforteinbussen werden vermieden. Um solche Anwesenheitsvorhersagealgorithmen zu analysieren, haben wir Anwesenheitsdaten aus einem öffentlich verfügbaren Datensatz extrahiert und analysiert. Mit Hilfe der Daten von 45 Teilnehmern zeigen wir, dass aktuelle Algorithmen Genauigkeiten aufweisen, welche nur durch die prinzipielle Vorhersagbarkeit der nicht ganz regelmässigen täglichen Routine begrenzt werden.

Natürlich kann die Genauigkeit der Vorhersagealgorithmen nicht direkt den Effizienzgewinn und die Komforteinbussen eines intelligenten Heizungsregelungssystems abbilden. Die tatsächliche Energieersparnis hängt von einigen weiteren Faktoren wie den klimatischen Gegebenheiten der Region sowie den physikalischen Eigenschaften des Gebäudes ab. Daher untersuchen wir im letzten Teil dieser Arbeit den Effekt einer intelligenten Heizungssteuerung auf den Heizenergieverbrauch unter verschiedenen Kontextbedingungen. Für die Analyse entwickeln wir mehrere Gebäudeszenarien sowie eine Methode, um die Effekte von unterschiedlichen Wetterbedingungen auf die Gesamtheizenergie zu untersuchen.

Das Leitmotiv dieser Arbeit besteht darin, beim Heizen unter Ausnutzung von Technologien, die in vielen Haushalten bereits zum Alltag gehören, einen Effizienzgewinn zu erzielen. Um dieses Ziel zu erreichen, nutzen wir technologische und erkenntnisbezogene Fortschritte in den Bereichen verteilter Systeme und maschinellem Lernen, um Anwesenheitsinformationen aus elektrischen Lastkurven zu extrahieren. Ergänzend analysieren wir die prinzipielle Vorhersagbarkeit von Anwesenheit aus historischen Daten und zeigen welche Energieersparnis intelligente Heizungsregelungssysteme ermöglichen können.