

DISS. ETH NO. 26972

FOSTERING SUSTAINABILITY USING INFORMATION TECHNOLOGY:
REAL-TIME FEEDBACK, INCENTIVES, AND SMART MARKETS

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

Presented by

ANSELMA MERET WÖRNER
M.Sc., Karlsruhe Institute of Technology
Born on January 21, 1992
Citizen of Germany

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Elgar Fleisch
Prof. Dr. Wolfgang Ketter
Prof. Dr. Verena Tiefenbeck

2020

Abstract

Despite growing public attention and policy efforts for environmental sustainability, worldwide energy consumption and greenhouse gas emissions are still increasing (International Energy Agency, 2020a). Technological advances have enabled improvements in energy efficiency, and hundreds of billions of US dollars are being invested in renewable energy generation every year (International Energy Agency, 2020a), however, actually implementing these technologies requires changes to commercial practices, regulatory frameworks, and market structures. The replacement of conventional energy generation by renewable resources is advancing rather slowly (International Energy Agency, 2020b), as their integration requires a fundamental transition in the energy sector. Energy that was traditionally supplied by few power plants is now generated in smaller, distributed renewable generators that are not centrally controlled. The resulting growing number of stakeholders and increasing volatility in supply challenges existing market structures, as well as the grid infrastructure. Beyond technological and structural aspects, human behavior is what ultimately drives energy consumption and the adoption of renewable technologies. Consumer choices have a massive impact on resource use, as residential households consume more than 20% of the worldwide total final energy consumption (International Energy Agency, 2020a). Likewise, personal transportation makes up roughly the same amount in most countries (eurostat, 2017; International Energy Agency, 2020a). However, empirical data and research studies reveal a persistent gap between individuals' intentions for environmentally-friendly behavior and their actual energy consumption and associated emissions.

Information and communication technology can play a pivotal role in advancing the energy transition. Ubiquitous connected devices and the data they capture can be useful tools to identify inefficient consumption patterns or the potential for investments in new technologies. By capturing, analyzing, and evaluating energy data in high granularity, information technology can support sustainable practices – not only on a macro or organizational level, but also on the individual level. Yet, given the recency and fast pace of technological progress in this area, existing research has mostly focused on the

technical capabilities of information and communication technologies in environmental contexts. There is a lack of empirical and applicable knowledge on the impact of such ‘green’ information systems in the real world.

To tackle this issue, this thesis examines different ways in which information technology can foster sustainability in the real world, a) among individual consumers and b) in integrating renewable energy resources into the energy market. To that end, state-of-the-art information systems designed in conceptual studies are deployed in field experiments. In the studies presented, a smart metering device, a blockchain system, and an autonomous intelligent agent are designed based on recent work from the computer science discipline. To understand the behavioral effects in real-world settings, field experiments are conducted. The design and implementation of these field experiments builds on theories from psychology and economics research. Herein, the work presented in this thesis complements conceptual research on information systems (IS) with a social-science perspective and empirical validations.

More precisely, Chapters 3 and 4 present data collected in two large field experiments on feedback interventions for resource conservation during an energy-intensive activity – namely showering. The results reveal significant savings effects induced by activity-specific real-time feedback, even in the absence of monetary incentives. The presented findings verify the effectiveness of behavioral interventions for resource conservation. They thus provide robust and unique empirical evidence for real-time feedback as a scalable and cost-efficient policy instrument for fostering resource conservation among the broader public. More so, the results highlight the importance of understanding motivational drivers in the design of behavioral interventions – in general, and in environmental contexts in particular. For practitioners, as well as policy makers, these results represent applicable and highly relevant insights for the design of conservation programs.

In a second set of studies (Chapters 5–7), this thesis examines smart energy markets for the integration of distributed energy resources like rooftop solar systems. Based on market design theory, a peer-to-peer (P2P) market in which households bid prices for local solar energy is designed and implemented on a blockchain infrastructure. The system is deployed in a field experiment and tested for the duration of an entire year. The collected data is the first empirical evidence on a P2P energy market and on individual bidding behavior in this context. The results show that P2P energy markets are technologically feasible and that they can provide dynamic price incentives for balancing the grid, while actively engaging consumers in the decision-making process on the energy market. These studies generate first-hand empirical insights that scrutinize the (so far mostly theoretical) proposals on smart, consumer-centric energy markets. The observed behavior reveals an intention–behavior gap in participants’ willingness to pay for local solar energy and indicates learning effects on the market dynamics over time. These unique findings shed light on the prices that can be expected on local energy markets and elucidate avenues for future research on the trade-off between automation and consumer engagement. The findings further serve as a decision basis for policy makers for creating a regulatory framework for future energy markets. Capturing and processing high resolution energy data is essential for coordinating decentralized energy resources and, thus, for delivering the

energy transition. Furthermore, semi-autonomous agents, which elicit consumer preferences and then act on their behalf, emerge as a desirable system, combining consumer engagement and efficiency in the future energy market.

A further simulation study addresses the need for such computational tools in smart energy markets due to the increasing complexity of high electricity demand and distributed energy resources. Software agents that use reinforcement learning are employed to schedule electricity loads created by electric vehicles. The results show that intelligent agents are successful in coordinating loads to relieve the grid infrastructure in this simulation, thus paving the way to facilitate the electrification of transportation in the existing grid.

All in all, this dissertation demonstrates that information systems can indeed spur the energy transition and foster sustainability, both on the individual consumer level and on the market level. The findings from large-scale field experiments generate novel empirical insights and contribute to the impact-oriented work on green information systems. A multi-disciplinary approach leveraging state-of-the-art technologies (blockchain technology, agent-based simulation, and reinforcement learning) and testing them in the field expands existing conceptual knowledge to a more holistic understanding. The research presented shows that, by incorporating behavioral factors and economic incentives, information systems can induce energy conservation in the real world and encourage renewable energy generation – and thus tackle some of the wicked problems entailed in mitigating climate change.

Kurzfassung

Trotz öffentlicher Aufmerksamkeit und politischen Bemühungen für ökologische Nachhaltigkeit steigen Treibhausgasemissionen und der weltweite Energieverbrauch unablässig an (International Energy Agency, 2020a). Obwohl in den vergangenen Jahren deutliche technische Fortschritte im Bereich der Energieeffizienz gemacht wurden und jährlich Hunderte Milliarden US-Dollar in erneuerbare Energieerzeugung investiert werden (International Energy Agency, 2020a), erscheint die tatsächliche Umsetzung von Einsparungsmassnahmen in der Praxis schwer. Die Ablösung konventioneller Energieerzeugung durch erneuerbare Ressourcen schreitet nur langsam voran (International Energy Agency, 2020b), da deren Einbindung gleichzeitig eine Anpassung von Geschäftspraktiken, von rechtlichen Rahmenbedingungen und von Marktstrukturen erfordert: Energie, die traditionell in grossen Kraftwerken zentral erzeugt wurde, soll in der Zukunft von kleineren und örtlich verteilten erneuerbaren Generatoren geliefert werden. Die dadurch wachsende Zahl von Stakeholdern im Energiemarkt stellt bestehende Marktstrukturen in Frage, und die hohe Volatilität erneuerbarer Energie belastet die Netzinfrastruktur. Neben technologischer und struktureller Aspekte sind Energieverbrauch und Emissionen allerdings auch durch individuelles Verhalten getrieben. Private Haushalte verbrauchen mehr als 20% des weltweiten Energiebedarfs (International Energy Agency, 2020a) und der Personenverkehr beläuft sich in den meisten Ländern auf weitere 20% (eurostat, 2017; International Energy Agency, 2020a). Empirische Daten und Studien aus der Verhaltensforschung zeigen auf, dass eine anhaltende Kluft zwischen der Absicht zu umweltfreundlichem Verhalten und tatsächlichem Handeln besteht – was die Energiewende auch auf dieser Ebene verlangsamt.

Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) kann hier Abhilfe schaffen: Vernetzte Geräte und die von ihnen erfassten Daten können verwendet werden, um ineffiziente Verbrauchsmuster oder Potential für Investitionen in erneuerbare Technologien zu erkennen. Durch die Erfassung, Analyse und Auswertung von hochaufgelösten Energiedaten kann IKT ökologisch nachhaltiges Verhalten vorantreiben – nicht nur auf makro-ökonomischer oder organisationaler, sondern auch auf individueller Ebene. Angesichts der rasanten Fortschritte im Bereich IKT konzentriert sich die Forschung zu Informationssystemen für Nachhaltigkeit bislang jedoch hauptsächlich auf deren rein technische Möglichkeiten; es mangelt an empirischer und anwendungsorientierter Forschung zu den Effekten solcher ‘grünen’ Informationssysteme in der Praxis.

Die vorliegende Dissertation untersucht verschiedene Ansätze, um Nachhaltigkeit in der Praxis mithilfe von IKT zu fördern. Zu diesem Zweck werden modernste Informationssysteme in konzeptionellen Studien entworfen und, insbesondere, in Feldexperimenten auch

auf ihre Effekte hin empirisch untersucht. Auf Grundlage aktueller Forschung aus der Informatik, werden für die vorgestellten Studien ein intelligentes Messgerät, ein Blockchain-basierter Markt und ein intelligenter Software-Agent entwickelt. Diese Systeme werden in Feldexperimenten eingesetzt, um die aus ihrer Nutzung resultierenden Verhaltens-effekte in der realen Welt zu analysieren. Die Konzeption und Implementierung der Feldexperimente baut dabei auf Theorien aus der Psychologie und der Ökonomie auf. So ergänzt diese Dissertation die bisher hauptsächlich konzeptionelle Forschung zu IKT im Nachhaltigkeitsbereich durch eine sozialwissenschaftliche Perspektive und empirische Validierungen.

Konkret stellen die Kapitel 3 und 4 zwei umfangreiche Feldexperimente zu Verhaltensinterventionen vor. Hierbei werden Individuen während einer energieintensiven Aktivität – des Duschens – mit Echtzeit-Feedback zu ihrem Ressourcenverbrauch konfrontiert. Die Experimentalergebnisse zeigen deutliche und statistisch signifikante Einsparungseffekte dieser Feedback-Intervention. Beide Studien liefern robuste empirische Belege dafür, dass Echtzeit-Feedback eine skalierbare und kosteneffiziente Maßnahme zur Förderung von Ressourceneinsparungen in der breiten Öffentlichkeit darstellt.

In einer zweiten Reihe von Studien (Kapitel 5–7) untersucht die vorliegende Arbeit digitale Energiemärkte für die Integration von verteilten Generatoren wie Solaranlagen. Basierend auf der Markt-Design-Theorie wird eine Handelsplattform entworfen und entwickelt, über die private Haushalte online Solarenergie, die auf ihren Dächern produziert wird, an Nachbarn verkaufen können. Das System wird auf einer Blockchain-Infrastruktur implementiert und in einem Feldexperiment eingesetzt, in dem die Plattform über die Dauer eines Jahres hinweg mit realen Nutzern getestet wird. Die gesammelten Daten liefern die ersten empirischen Erkenntnisse zum Handel von Solarenergie unter privaten Haushalten (auch ‘peer-to-peer’ Markt genannt). Die hier gezeigten Ergebnisse belegen, dass solche lokalen, Nutzer-zentrierten Energiemärkte bereits technologisch umsetzbar sind und dass ein solcher Marktplatz dynamische Preisanreize für den Ausgleich des Stromnetzes bieten kann. Die Ergebnisse legen zudem eine Diskrepanz zwischen von den Teilnehmern zuvor angegebener und während des Experiments tatsächlich beobachteter Zahlungsbereitschaft für Solarenergie offen. Die hier enthaltenen Studien zu lokalen Energiemärkten tragen hierin einzigartige empirische Erkenntnisse zur bisher meist theoretischen Erforschung solcher verbraucherzentrierten, digitalen Energiemärkte bei. Die vorgestellten Erkenntnisse über individuelles Verhalten in diesem Kontext geben Einblicke in Verbraucherpräferenzen für Solarenergie. Darüber hinaus erweisen sich Softwareagenten, die Präferenzen von Verbrauchern erlernen und in deren Namen handeln, als ein vielversprechendes Instrument, das Verbraucherengagement und Effizienz verbindet. Die vorgestellten Studienergebnisse dienen als Grundlage für politische Entscheidungsträger bei der Umsetzung der Energiewende und der Schaffung von verbraucherorientierten Energiemärkten. Die Erfassung und Verarbeitung hochaufgelöster Energiedaten erweist sich dabei für die Koordination dezentraler Energieressourcen als wesentlich.

Zum Abschluss befasst sich eine zusätzliche Simulationsstudie (Kapitel 8) mit dem Einsatz von künstlicher Intelligenz im Energiemarkt, um die zunehmenden Komplexität verteilter Energieressourcen beherrschbar zu machen. In einer Simulation werden

Software-Agenten untersucht, die neuste Techniken des Maschinellen Lernens nutzen, um Ladelasten von Elektrofahrzeugen zu koordinieren. Die Ergebnisse zeigen, dass es intelligenten Software-Agenten gelingt, Lasten bei dynamischen Marktpreisen so zu koordinieren, dass die Netzinfrastruktur entlastet wird. Dies gelingt in der vorgestellten Modellierung, ohne dass Daten über individuelle Fahrprofile oder deren Energiebedarf an einen zentralen Aggregator kommuniziert werden müssen. Dieser Ansatz kann zur Elektrifizierung des Verkehrs in bestehender Netzinfrastruktur beitragen, die notwendig ist, um eine deutlichen Emissionsreduktion zu erreichen.

Alles in allem belegt diese Dissertation, dass IKT die Energiewende vorantreiben und Nachhaltigkeit sowohl auf der Ebene des einzelnen Haushalts, als auch auf kollektiver Marktebene fördern kann. Die vorgestellte Forschung veranschaulicht wie Informationssysteme Energieeinsparungen induzieren und die Erzeugung erneuerbarer Energie vorantreiben können, wenn bei deren Gestaltung verhaltenswissenschaftliche Erkenntnisse beachtet, und effektive Anreize gesetzt werden. So können Informationssysteme einige der vielschichtigen Probleme lösen, die mit der Eindämmung des Klimawandels verbunden sind.