

Studiengang Energie & Umwelttechnik

Vertiefungsrichtung Smart Grid

Bachelorarbeit Diplom 2019

David Wenger

*Quantifizierung der Flexibilität von
technischen Anlagen (Heizungen und
Warmwasser) und Steuerungsmethoden, um
diese Flexibilität zur Regulierung des
Stromverteilungsnetzes zu benutzen*

- Dozent
Pierre Roduit
- Experte
Georges Darbellay
- Datum der Abgabe des Schlussberichts
16.08.2018

Es handelt sich um den Originalbericht des/der Studierenden.
Er wurde nicht korrigiert und kann deshalb Ungenauigkeiten oder Fehler enthalten.

SYND	ETE	TEVI
X	X	X

Filière / Studiengang ETE	Année académique / Studienjahr 2018/19	No TD / Nr. DA sg/2019/67
Mandant / Auftraggeber <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input checked="" type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution	Etudiant / Student David Wenger Professeur / Dozent Pierre Roduit	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja ¹ <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes) Georges Darbellay Energies Sion-Région, Rue de l'Industrie 43, 1951 Sion	

Titre / Titel Quantifizierung der Flexibilität von technischen Anlagen (Heizung und Warmwasser) und Steuerungsmethoden um diese Flexibilität zur Regulierung des Stromverteilungsnetzes zu benutzen
Description / Beschreibung Das Ziel des GOFLEX H2020-Projekts ist, eine elektrische Lastmanagementlösung einzusetzen, die zur Regulierung des ESR-Stromverteilungsnetzes beiträgt. Zusätzlich zu Fabriken und Ladestationen für Elektrofahrzeugen, sind die technischen Anlagen (Heizung und Sanitär-Warmwasser) von hunderte Häusern verbunden, um Messung und Steuerung zu ermöglichen. Das Ziel dieses Projekts ist, die elektrische Flexibilität dieser technischen Anlagen zu quantifizieren, um zu bewerten, wieviel diese Anlagen zur Maximierung des Eigenverbrauchs oder zur Unterstützung des Stromverteilungsnetzes genutzt werden können. Ein zweites Ziel dieses Projekts ist, Methoden zur Steuerung dieser Flexibilität zu implementieren, um diese technischen Installationen optimal zu verwalten. Diese Methoden werden mit realen Häusern geprüft werden.
Objectifs / Ziele: – Lernen, wie das Goflex-System funktioniert – Methoden zur Quantifizierung der Flexibilität definieren – Flexibilität von realen Anlagen quantifizieren – Methoden definieren, um diese Flexibilität zu steuern – Diese Methoden mit realen Gebäude prüfen.

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum Responsable de l'orientation / Filière Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang:  ¹ Etudiant / Student : 	Délais / Termine Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 13.05.2019 Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation 13 – 14.06.2019 Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: 16.08.2019, 12:00 Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten: 28, 29 – 30.08.2019 Défense orale / Mündliche Verfechtung: 02 – 05.09.2019
---	--

¹ Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.

Quantifizierung der Flexibilität von Wohngebäuden

Diplomand David Wenger

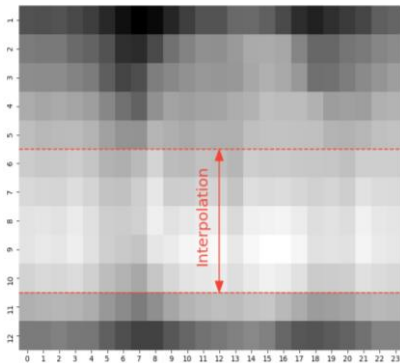
Ziel des Projekts

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird die Flexibilität der technischen Anlagen (Heizung und Warmwasseraufbereitung) in Wohngebäuden quantifiziert, um deren möglichen Beitrag zur Unterstützung der Regulierung der Stromverteilnetze zu bewerten.

Methoden | Experimente | Resultate

Das Ziel des Projekts GOFLEX ist es, technische und ökonomische Herausforderungen bei der Integration von erneuerbaren Energien in die bestehenden Stromnetze zu bewältigen. Dazu werden Smart Grid Lösungen entwickelt, welche die Flexibilität der elektrischen Verbraucher der Stromverteilnetze ausnutzen.

Die Diplomarbeit wurde parallel zum Projekt GOFLEX durchgeführt. Der Schwerpunkt der Arbeit lag auf der Analyse der Flexibilität von Wohngebäuden. Für die Quantifizierung der Flexibilität von technischen Anlagen in Wohngebäuden sind Methoden definiert worden, welche an realen Gebäuden des Projekts GOFLEX getestet wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die technischen Anlagen von Wohngebäuden flexible Betriebszeiten zulassen. Im Durchschnitt beträgt der Stromverbrauch während dem Sommer in etwa 0.75 kW pro Gebäude. Dieser kann problemlos um drei bis vier Stunden verschoben werden, ohne den Komfort der Bewohner einzuschränken. Beim Wiedereinschalten der Anlagen wurde ein Rebound-Effekt beobachtet, bei dem Verbrauchsspitzen vom 3-fachen Wert des Durchschnittsverbrauchs beobachtet wurden. Mit der entwickelten Steuerung konnte der Verbrauch nach dem Wiedereinschalten in der Simulation geglättet und die Lastspitzen halbiert werden. Die Simulationen zeigen, dass die Flexibilität der Wohngebäude eingesetzt werden kann, um die Ausgleichskosten auf der Ebene des Verteilnetzbetreibers zu reduzieren.



Anteil des mittleren Stromverbrauchs am maximalen Verbrauch (0-9%) in Funktion der Stunde (x-Achse) und des Monats (y-Achse)

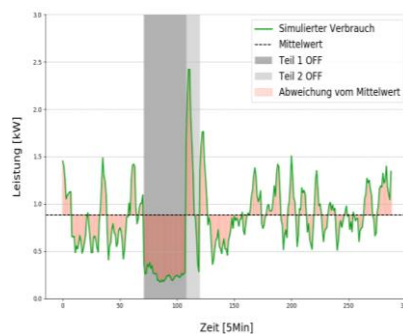
Diplomarbeit
 | 2019 |

Studiengang
 Energie & Umwelttechnik

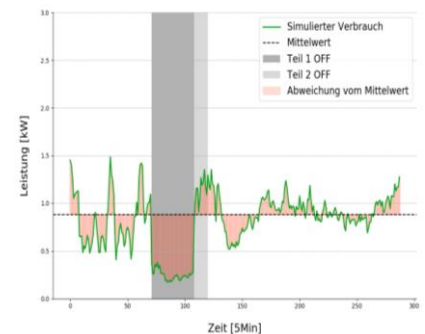
Anwendungsbereich
 Smart Grid

Verantwortliche/r Dozent/in
 Pierre Roudit
 pierre.roudit@hevs.ch

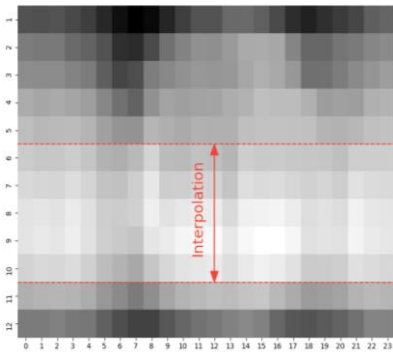
Partner
 Énergies Sion Région (ESR)



Simulation des Rebound Effekts nach dreistündiger Ausschaltung der technischen Anlagen von 10 Gebäuden ohne Steuerung.



Simulation des Rebound Effekts nach dreistündiger Ausschaltung der technischen Anlagen von 10 Gebäuden mit manueller Steuerung.



Part de la consommation électrique moyenne dans la consommation maximale (0-9%) en fonction de l'heure (axe des x) et du mois (axe des y)

Travail de diplôme
 | édition 2019 |

Filière
*Énergie et techniques
 environnementales*

Domaine d'application
Smart Grid

Professeur responsable
*Pierre Roduit
 pierre.roduit@hevs.ch*

Partenaire
Énergies Sion Région (ESR)

Quantification de la flexibilité des bâtiments résidentiels

Diplômant David Wenger

Objectif du projet

Ce mémoire a pour but de quantifier la flexibilité des installations techniques (chauffage et eau chaude) dans les bâtiments résidentiels afin d'évaluer leur contribution possible à l'appui de la régulation des réseaux électriques.

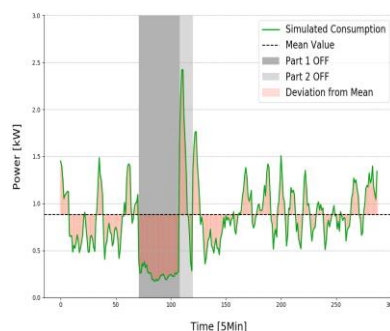
Méthodes | Expériences | Résultats

Le projet GOFLEX vise à répondre aux défis techniques et économiques de l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques existants.

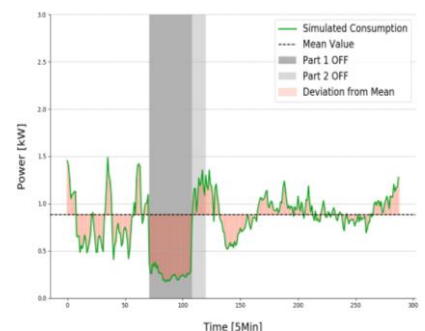
À cette intention, des solutions Smart Grid vont être développées, qui exploitent la flexibilité des consommateurs électriques dans les réseaux de distribution.

Le travail de bachelor s'est déroulé en parallèle du projet GOFLEX et portait sur l'analyse de la flexibilité des bâtiments résidentiels.

Pour la quantification de la flexibilité des installations techniques dans les bâtiments résidentiels, des méthodes ont été définies et testées sur des bâtiments réels du projet GOFLEX. Les résultats montrent que celles-ci sont flexibles dans le temps d'exploitation. En moyenne, la consommation d'électricité en été est d'environ 0.75 kW par bâtiment. Cela peut facilement être déplacé de trois à quatre heures sans limiter le confort des habitants. Lors de la remise sous tension des installations, un effet de rebond a été observé, avec des pics de consommation de 3 fois la valeur de la consommation moyenne. La solution de contrôle développée permet de lisser la consommation après la remise sous tension et de réduire les pics de plus de la moitié. Les simulations montrent que la flexibilité des bâtiments résidentiels peut être utilisée pour réduire les coûts d'équilibrage au niveau du gestionnaire de réseau de distribution.



Simulation de l'effet de rebond après une coupure de trois heures des installations techniques de 10 bâtiments sans contrôle intelligent.



Simulation de l'effet de rebond après une coupure de trois heures des installations techniques de 10 bâtiments avec un contrôle intelligent.



Inhaltsverzeichnis

1	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	I
2	TABELLENVERZEICHNIS	II
3	ABKÜRZUNGEN UND AKRONYME	III
4	EINLEITUNG	1
5	BESCHREIBUNG.....	2
5.1	GOFLEX	2
5.1.1	<i>Allgemein</i>	2
5.1.2	<i>Demonstrationsstandort Deutschland</i>	2
5.1.3	<i>Demonstrationsstandort Zypern</i>	3
5.1.4	<i>Demonstrationsstandort Schweiz</i>	3
5.2	AUSGANGSLAGE.....	3
5.2.1	<i>Wohngebäude</i>	3
5.2.2	<i>Datenschutz</i>	3
5.2.3	<i>Sensoren</i>	4
5.2.4	<i>Kommunikation.....</i>	5
5.2.5	<i>Steuerung.....</i>	6
5.3	SMART GRID	6
5.4	INTERNET OF THINGS	6
5.5	DEMAND SIDE MANAGEMENT	8
5.6	STROMPREIS	9
5.7	TERTIÄRREGELUNG	10
5.8	DEFINITION FLEXIBILITÄT	11
5.8.1	<i>Annex 67 IEA</i>	11
5.8.2	<i>Flexibilität von Wohngebäuden.....</i>	12
6	QUANTIFIZIERUNG DER FLEXIBILITÄT	13
6.1	VORHANDENE ANLAGEN	13
6.2	STROMVERBRAUCH.....	13
6.3	ANTEIL ELEKTRISCHER HEIZ- UND WARMWASSERANLAGEN	15
6.4	SAISONALE UNTERSCHIEDE	16
6.5	ALLGEMEINES ZUR INNENTEMPERATUR.....	17
6.6	ALLGEMEINES ZUR WARMWASSERTEMPERATUR	17
6.7	EINFLUSS DER AUSSENTEMPERATUR.....	18
6.8	STATISTISCHE AUSWERTUNG	19
6.8.1	<i>Einfluss der Anzahl Gebäude auf den Stromverbrauch</i>	19
6.8.2	<i>Auswirkung des Gruppierens von Gebäuden</i>	22
6.8.3	<i>Einfluss der Tageszeit auf den Stromverbrauch</i>	23
6.8.4	<i>Energieverbrauch und Betriebsdauer</i>	24
6.8.5	<i>Durchschnittlicher Stromverbrauch.....</i>	27
6.8.6	<i>Interpretation</i>	28
6.9	TESTS.....	28
6.9.1	<i>Phase 1 – Stündlicher Wechsel ON/OFF des Boilers eines Gebäudes</i>	28
6.9.2	<i>Phase 2 – Zweistündige Ausschaltungen des Boilers eines Gebäudes.....</i>	30
6.9.3	<i>Phase 3 – Vierstündige Ausschaltungen des Boilers eines Gebäudes</i>	31
6.9.4	<i>Phase 4 – Dreistündige Ausschaltung der Lasten von 18 Gebäuden</i>	32
6.9.5	<i>Phase 5 – Zwölfstündige Ausschaltung der Lasten von 11 Gebäuden</i>	33
7	STEUERUNG DER FLEXIBILITÄT	35
7.1	ZIEL.....	35
7.2	METHODIK.....	35

7.2.1	<i>Ausschalten prädiktiv</i>	35
7.2.2	<i>Ausschalten reaktiv</i>	36
7.2.3	<i>Wiedereinschalten</i>	36
7.3	EINGÄNGE / AUSGÄNGE.....	37
7.4	LIMITIERENDE FAKTOREN	37
7.5	SIMULATION	38
7.5.1	<i>Simulation Wiedereinschalten</i>	38
7.5.2	<i>Simulation komplette Steuerung</i>	39
8	SCHLUSSFOLGERUNG	42
9	DANKSAGUNG	43
10	DATUM UND UNTERSCHRIFT	43
11	ANHANG	IV
12	LITERATURVERZEICHNIS	V

1 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER KOMMUNIKATION ZWISCHEN DEN VERSCHIEDENEN KOMPONENTEN EINES GEBÄUDES DES PROJEKTS GOFLEX. QUELLE: [6].....	5
ABBILDUNG 2: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER KOMMUNIKATION ZWISCHEN DEN EINZELNEN MITSPIELERN DER DEMONSTRATION DES PROJEKTS GOFLEX IN DER SCHWEIZ. QUELLE: [6].....	7
ABBILDUNG 3: KLASSIFIZIERUNG DER VERSCHIEDENEN DSM-METHODEN. QUELLE: [32].....	8
ABBILDUNG 4: ZUSAMMENSETZUNG DES STROMPREISES FÜR DEN NETZBETREIBER. QUELLE: [33].....	9
ABBILDUNG 5: PREISE DER VERSCHIEDENEN STROM-PRODUKTE IN DER SCHWEIZ IN DEN JAHREN 2016 UND 2017 IN €/MWH.	10
ABBILDUNG 6: DURCHSCHNITTLICHER TAGESVERLAUF DES STROMBEDARFS IM MAI 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 13.2 °C, AUFGETEILT IN HEIZ-/WARMWASSERVERBRAUCH UND GESAMTVERBRAUCH. DIE KURVEN ENTSPRECHEN DEN MITTELWERTEN JEDER VIERTEL STUNDE VON 32 GEBÄUDEN.	14
ABBILDUNG 7: JAHRESVERLAUF DER MITTLEREN TÄGLICHEN LUFTTEMPERATUR IN SION (VS) VOM 31.07.2018 - 30.07.2019. SCHWARZ: TAGESMITTEL NORMPERIODE (1981-2010). GESTRICHELT: STANDARDABWEICHUNG. HELLGRAU: HÖCHST-/TIEFSTWERTE. QUELLE: [25].....	16
ABBILDUNG 8: JAHRESVERLAUF DER AUSSENTEMPERATUR UND DES WÖCHENTLICHEN ENERGIEVERBRAUCHES DES BOILERS UND DER HEIZUNG EINES GEBÄUDES (SEMIAH1). DIE MESSWERTE STAMMEN AUS DEN JAHREN 2018/19.	17
ABBILDUNG 9: MITTELWERTE DES DURCHSCHNITTLICHEN TAGESVERLAUFS DER LEISTUNG, DER INNENTEMPERATUR UND DER WARMWASSTERTEMPERATUR VON 131 GEBÄUDEN, SOWIE DER DURCHSCHNITTLICHE TAGESVERLAUF DER AUSSENTEMPERATUR IM MONAT MAI 2019.....	18
ABBILDUNG 11: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER DURCHSCHNITTLICHEN LEISTUNG JEDER VIERTEL STUNDE IM MAI 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 13.2 °C.....	20
ABBILDUNG 10: MITTELWERT UND STANDARDABWEICHUNG DES STROMVERBRAUCHES IM MAI 2019 IN FUNKTION DER ANZAHL AGGREGIERTER GEBÄUDE BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 13.2 °C.	21
ABBILDUNG 12: DURCHSCHNITTLICHE HÄUFIGKEITSVERTEILUNG VON 10 GRUPPEN À 5 GEBÄUDE IM MAI 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 13.2 °C.	22
ABBILDUNG 13: DURCHSCHNITTLICHE HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DES MITTLEREN STROMVERBRAUCHS VON 50 GEBÄUDEN AUFGETEILT IN ACHT INTERVALLE À DREI STUNDEN IM MAI 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 13.2 °C.	23
ABBILDUNG 14: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DES ENERGIEVERBRAUCHS DER EVENTS IM MAI 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 13.2 °C. GEZÄHLT WURDEN 18'775 EVENTS VON 31 GEBÄUDEN.	25
ABBILDUNG 15: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER DAUER DER EVENTS IM MAI 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 13.2 °C. GEZÄHLT WURDEN 18'775 EVENTS VON 31 GEBÄUDEN.....	26
ABBILDUNG 16: PROZENTUALER ANTEIL DES DURCHSCHNITTLICHEN STROMVERBRAUCHS AM MAXIMALEN STROMVERBRAUCH VON 56 GEBÄUDEN FÜR JEDEN MONAT DES JAHRES UND JEDE STUNDE DES TAGES.	27
ABBILDUNG 17: DURCHSCHNITTLICHER TAGESVERLAUF (MITTELWERT JEDER VIERTEL STUNDE) DES STROMVERBRAUCHS DES BOILERS (SEMIAH1) VOR DER TESTPHASE (SCHWARZ) UND WÄHREND DER TESTPHASE VOM 21.05.2019-04.06.2019 (GRÜN). GRAUE FLÄCHEN: ZEITRÄUME OHNE STROMZUFUHR.	29
ABBILDUNG 18: DURCHSCHNITTLICHER TAGESVERLAUF (MITTELWERT JEDER VIERTEL STUNDE) DES STROMVERBRAUCHS DES BOILERS (SEMIAH1) VOR DER TESTPHASE (SCHWARZ) UND WÄHREND DER TESTPHASE VOM 06.06.2019-18.06.2019 (GRÜN). GRAUE FLÄCHEN: ZEITRÄUME OHNE STROMZUFUHR.	30
ABBILDUNG 19: DURCHSCHNITTLICHER TAGESVERLAUF (MITTELWERT JEDER VIERTEL STUNDE) DES STROMVERBRAUCHS DES BOILERS (SEMIAH1) VOR DER TESTPHASE (SCHWARZ) UND WÄHREND DER TESTPHASE VOM 24.06.2019-08.07.2019 (GRÜN). GRAUE FLÄCHEN: ZEITRÄUME OHNE STROMZUFUHR.	31
ABBILDUNG 20: DURCHSCHNITTLICHER TAGESVERLAUF DES STROMVERBRAUCHS PRO GEBÄUDE VOR DER TESTPHASE (SCHWARZ) UND WÄHREND DER TESTPHASE VOM 26.06.2019-09.07.2019 (GRÜN, MITTELWERT ALLER 5 MINUTEN). GRAUE FLÄCHEN: ZEITRÄUME OHNE STROMZUFUHR. ANZAHL GEBÄUDE: 18.	32
ABBILDUNG 21: STROMVERBRAUCH VON 11 GEBÄUDEN. ZWISCHEN 04:00 UND 16:00 AM 09.08.2019 (GRAU EINGEFÄRBT) WURDEN DIE ANLAGEN AUSGESCHALTET.	33
ABBILDUNG 22: SIMULATION DES WIEDEREINSCHALTENS VON 10 GEBÄUDEN OHNE STEUERUNG.	38
ABBILDUNG 23: SIMULATION DES WIEDEREINSCHALTENS VON 10 GEBÄUDEN MIT MANUELLER STEUERUNG.....	39

ABBILDUNG 24: SIMULATION DES STROMVERBRAUCHES UNTER ANWENDUNG DER ENTWICKELTEN STEUERUNG. SIMULIERT WURDE DER STROMVERBRAUCH VON 10 GEBÄUDEN IM MAI 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 13.2 °C.	40
ABBILDUNG 25: DURCHSCHNITTLICHER TAGESVERLAUF DES STROMVERBRAUCHS VON GEBÄUDEN MIT UND OHNE SOLARANLAGE IM FEBRUAR 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 4.1 °C.	48
ABBILDUNG 26: DURCHSCHNITTLICHER TAGESVERLAUF DES STROMVERBRAUCHS VON GEBÄUDEN MIT UND OHNE SOLARANLAGE IM MAI 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 13.2 °C.	49
ABBILDUNG 27: MITTELWERTE DES DURCHSCHNITTLICHEN TAGESVERLAUFS DER LEISTUNG, DER INNENTEMPERATUR UND DER WARMWASSTERTEMPERATUR VON 101 GEBÄUDEN, SOWIE DER DURCHSCHNITTLICHE TAGESVERLAUF DER AUSSENTEMPERATUR IM MONAT FEBRUAR 2019.	51
ABBILDUNG 28: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER DURCHSCHNITTLICHEN LEISTUNG JEDER VIERTEL STUNDE IM FEBRUAR 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 4.1 °C.	52
ABBILDUNG 29: MITTELWERT UND STANDARDABWEICHUNG DES STROMVERBRAUCHES IM FEBRUAR 2019 IN FUNKTION DER ANZAHL AGGREGIERTER GEBÄUDE BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 4.1 °C.	53
ABBILDUNG 30: DURCHSCHNITT DER HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER LEISTUNG VON 50 GEBÄUDEN IM MAI 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 13.2 °C.	54
ABBILDUNG 31: DURCHSCHNITTLICHE HÄUFIGKEITSVERTEILUNG VON 10 GRUPPEN À 5 GEBÄUDEN IM FEBRUAR 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 4.1 °C.	55
ABBILDUNG 32: DURCHSCHNITTLICHE HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DES MITTLEREN STROMVERBRAUCHS VON 50 GEBÄUDEN AUFGETEILT IN ACHT INTERVALLE À DREI STUNDEN IM FEBRUAR 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 4.1 °C.	56
ABBILDUNG 33: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DES ENERGIEVERBRAUCHS DER EVENTS IM FEBRUAR 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 4.1 °C. GEZÄHLT WURDEN 15'167 EVENTS VON 31 GEBÄUDEN.	58
ABBILDUNG 34: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER DAUER DER EVENTS IM FEBRUAR 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 4.1 °C. GEZÄHLT WURDEN 15'167 EVENTS VON 31 GEBÄUDEN.	59
ABBILDUNG 35: IN BEZUG AUF DEN MITTELWERT DES STROMVERBRAUCHES VON 56 GEBÄUDEN NORMALISIERTER DURCHSCHNITTLICHER STROMVERBRAUCH FÜR JEDEN MONAT DES JAHRES UND JEDE STUNDE DES TAGES.	60
ABBILDUNG 36: ZUSTANDSDIAGRAMM DER STEUERUNG DER PRÄDIKTIVEN AUSSCHALTUNG.	61
ABBILDUNG 37: ZUSTANDSDIAGRAMM DER STEUERUNG DER REAKTIVEN AUSSCHALTUNG.	62
ABBILDUNG 38: ZUSTANDSDIAGRAMM DER STEUERUNG DES WIEDERANSCHALTENS.	63
ABBILDUNG 39: STEUERUNGSSTATUS DER EINZELNEN GEBÄUDE DER SIMULATION.	64

2 Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: ÜBERSICHT DER INSTALLIERTEN SENSOREN.	4
TABELLE 2: DIMENSIONEN DER FLEXIBILITÄT NACH W. GOLDEN UND P. POWELL.	11
TABELLE 3: MITTELWERTE UND STANDARDABWEICHUNGEN DES STROMVERBRAUCHES PRO GEBÄUDE ZU VERSCHIEDENEN TAGESZEITEN. ES WURDEN DIE DATEN VON 50 GEBÄUDEN IM MAI 2019 BEI EINER DURCHSCHNITTLICHEN AUSSENTEMPERATUR VON 13.2 °C VERWENDET.	24
TABELLE 4: INFORMATIONEN ZU DEN INSTALLIERTEN SMART METER.	44
TABELLE 5: INFORMATIONEN ZU DEN INSTALLIERTEN MESSSENSOREN.	45
TABELLE 6: BESCHREIBUNG DER MASSE FÜR DIE BESTIMMUNG DER FLEXIBILITÄT. [16]	46
TABELLE 7: KATEGORISIERUNG DER FLEXIBILITÄT EINES WOHNGEBÄUDES NACH DESSEN ANLAGETYPEN.	47

3 Abkürzungen und Akronyme

BG	Bilanzgruppe
CA	Certificate Authentification
DB	Datenbank
DLMS	Device Language Message Specification
DR	Demand Response
DSM	Demand Side Management
EMS	Energy Management System
ESR	Énergies Sion Région
FMAN	Flexibility Manager
FMAR	Flexibility Market
GOFLEX	Generalized Operational FLEXibility for Integrating Renewables in the Distribution Grid
GREIV	Grosse Einspeisevergütung
HES-SO	Haute école spécialisée de Suisse occidentale
IEA	International Energy Agency
IoT	Internet of Things
KEV	Kostendeckende Einspeisevergütung
KLEIV	Kleine Einspeisevergütung
M-Bus	Meter-Bus
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
OTC	Over the counter
PV	Photovoltaik
SSL	Secure Sockets Layer
TLS	Transport Layer Security
VPN	Virtual Privat Network

4 Einleitung

Seit der Annahme der Energiestrategie 2050 durch das Schweizer Volk ist der Begriff Energiewende so präsent wie nie. Das allgemeine Interesse an einer nachhaltigen Energieversorgung nimmt zu. Kraftwerke, welche mit fossilen Brennstoffen oder Atomenergie betrieben werden, werden durch erneuerbare Energie wie beispielsweise Photovoltaik (PV) oder Windenergie ersetzt. Ausserdem wird Energie vermehrt delokalisiert produziert, wodurch die Topologie der Stromnetze verändert wird. Die herkömmliche Struktur der Stromnetze, bei welcher Strom vom lokalen Produzenten hin zu den verschiedenen Verbrauchern fliesst, gilt nicht länger. Delokalisierte Produzenten können den Strom ins Netz speisen und so die Richtung des Leistungsflusses umkehren. Weiter führt die wetterabhängige Volatilität der Produktion von erneuerbaren Energien zu einer erschwerten Vorhersage der Produktion. Damit die Versorgung überall und jederzeit gewährleistet werden kann, ist es wichtig, dass sich Produktion und Verbrauch von Strom stets im Gleichgewicht befinden. Eine ungenaue Vorhersage der Energiebilanz bewirkt eine Zunahme an Ausgleichsmassnahmen. Diese sind nur begrenzt vorhanden und teuer.

Damit die Herausforderungen, welche die Energiewende mit sich bringt, gemeistert werden können, werden neue Technologien benötigt. In diesem Zusammenhang taucht oftmals der Begriff Smart Grids auf, was auf Deutsch so viel wie intelligente Netze bedeutet. Bislang wurden, um hohe Belastungen der Stromnetze zu vermeiden, hauptsächlich die Netze und deren Komponenten ausgebaut. In den sogenannten Smart Grids werden vermehrt intelligente Lösungen angewandt, welche meist durch den Gebrauch von Messdaten charakterisiert werden. Mittels Algorithmen, künstlicher Intelligenz, Vorhersagen und herkömmlichen Steuerungen werden der Verbrauch und die Produktion gegenseitig angepasst. Smart Grid Lösungen unterstützen die Integration von erneuerbaren Energien in die bestehenden Stromnetze.

Ein Ansatz für eine Smart Grid Lösung wird derzeit mit dem Projekt GOFLEX H2020 erforscht. Im Rahmen des Projekts GOFLEX geht es darum, die Flexibilität von elektrischen Anlagen zu nutzen, um die ökonomische und technische Wettbewerbsfähigkeit von erneuerbaren Energien zu fördern.

Das Projekt wird derzeit in drei verschiedenen Standorten in Europa getestet, so auch im Wallis in der Schweiz mit der ESR als Verteilnetzbetreiber. Unter den Teilnehmern des Projektes sind verschiedene Konsumenten, darunter auch Prosumenten, sprich Verbraucher mit eigener Produktion, Besitzer von elektrischen Fahrzeugen, industrielle Verbraucher und öffentliche Ladestationen für elektrische Fahrzeuge.

Im Rahmen der Diplomarbeit geht es darum, die Flexibilität von technischen Anlagen in Wohngebäuden zu analysieren. Für die Arbeit stehen sämtliche Messwerte des GOFLEX Projekts im Wallis zur Verfügung und ein Teil der Gebäude darf für die Durchführung von Tests gesteuert werden.

In einem ersten Schritt geht es darum, das Projekt GOFLEX zu beschreiben und zugleich auf die Problematik der Integration von erneuerbaren Energien ins bestehende Stromnetz hinzuweisen und den Begriff der Flexibilität einzuleiten.

Weil es bereits viele verschiedene Definitionen für den Begriff gibt, wird versucht, eine passende Definition festzulegen.

Im Zusammenhang mit der Definition der Flexibilität werden Methoden entwickelt, welche die Quantifikation der Flexibilität von Wohngebäuden ermöglichen. Diese Methoden werden auf die Gebäude von GOFLEX angewandt, um deren Flexibilität zu beurteilen.

Im zweiten Teil der Arbeit wird eine Steuerung entwickelt, welche darauf zielt, die Flexibilität der Wohngebäude zu nutzen, um die Kosten für Ausgleichsenergie zu reduzieren.

5 Beschreibung

5.1 GOFLEX

5.1.1 Allgemein

Horizon 2020 ist ein Forschungs- und Innovationsprogramm der Europäischen Union. Während sieben Jahren (2014-2020) stehen Budgets von insgesamt über 80 Milliarden Euro zur Verfügung. Die finanzielle Unterstützung soll die Wettbewerbsfähigkeit von Europa sichern. Mit dem Geld werden das ökonomische Wachstum vorangetrieben und neue Arbeitsstellen geschaffen. Ziel ist es, dass die Qualität der europäischen Wissenschaft erhalten bleibt, Hindernisse für Erfindungen beiseite geräumt werden und die Zusammenarbeit privater und öffentlicher Sektoren erleichtert wird.

Das Projekt GOFLEX («Generalized Operational FLEXibility for Integrating Renewables in the Distribution Grid») wird derzeit vom Programm Horizon 2020 mit ca. 7 Mio. Euro finanziell unterstützt, zusätzlich erhält es staatliche finanzielle Unterstützung. Das gesamte Budget beläuft sich auf ca. 11 Mio. Euro [1]. Ziel des Projekts ist es, erneuerbare Energien konkurrenzfähig zu machen.

Die Zunahme von erneuerbarer Energie ist technisch und ökonomisch herausfordernd. Erneuerbare Energien sind nicht nur teuer, sie sind auch wenig flexibel und können nicht auf das Konsumverhalten angepasst werden. Damit die Netzstabilität bestehen bleibt, müssen Verbrauch und Produktion im Gleichgewicht stehen. Heutzutage sind es die Verteilnetzbetreiber, welche eingreifen müssen, wenn dieses Gleichgewicht nicht eingehalten wird. GOFLEX zielt auf die Automatisierung solcher Eingriffe ab.

Bestehende Stromnetze weisen heute eine typische Top-Down Struktur auf, sprich Energie fließt vom Produzenten zum Konsumenten und die Produktion wird dem Verbrauch angepasst. Aktuell sind Verbraucher kaum oder wenig flexibel und nur wenige sind ausgerüstet, um gesteuert zu werden. Mit zunehmender Anzahl an Prosumenten ändert die Topologie der Netzwerke. Der Stromfluss kann die Richtung ändern, Verbraucher können sogar Energie ans Netz abgeben wodurch lokal die Spannung steigt und dadurch das Netz überlastet werden kann. Schwierigkeiten durch die neue Bottom Up Struktur möchten mit der GOFLEX Technologie verhindert werden, in dem die Produktion und der Verbrauch auf lokalem Niveau geregelt werden.

Aufgrund der geringen Flexibilität der erneuerbaren Energieproduktion liegt der Ansatz von GOFLEX beim Verbraucher. Anstatt den Zeitpunkt der Energieproduktion anzupassen, wird der Zeitpunkt vom Verbrauch der Energie gesteuert. Thermische Prozesse wie beispielsweise Wärmepumpen oder Heisswasseranlagen sind teilweise flexibel. Das bedeutet, dass man den Zeitpunkt des Einschaltens verschieben kann, ohne dass der Komfort des Verbrauchers beeinträchtigt wird.

In drei verschiedenen Standorten mit insgesamt über 400 Prosumenten wird GOFLEX getestet. Dabei werden jeweils unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt, welche in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

5.1.2 Demonstrationsstandort Deutschland

Das Ziel der Demonstration in Wunsiedel ist es, den gesamten Energiebedarf der ca. 20'000 Kunden der SWW Wunsiedel GmbH (Strom-Wasser-Wärme) mit 100% regionaler und erneuerbarer Energie zu decken [2].

5.1.3 Demonstrationsstandort Zypern

Die Demonstration in Zypern unterteilt sich in zwei Projekte.

Die Universität von Zypern plant in einem ersten Teil ihr Inselnetz (auch Microgrid; von anderen Netzwerken isoliert) mit Photovoltaik Anlagen mit einer Spitzenleistung von über 10 MWp und einer Batterie mit einer Kapazität von 1 MWh auszustatten. Ziel ist es, den Eigenverbrauch zu steigern und dem Verteilnetz Flexibilität anbieten zu können.

In einem zweiten Teil wird ein Energy Management System (EMS) für Prosumenten erstellt, wodurch die Prosumenten dem Verteilnetz Flexibilität anbieten können [3].

5.1.4 Demonstrationsstandort Schweiz

Der Verteilnetzbetreiber Énergies Sion Région (ESR) mit über 55'000 Konsumenten und die Haute école spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO) arbeiten an einer gemeinsamen Lösung, um mit Hilfe von GOFLEX die Kosten für Ausgleichsenergie zu reduzieren und um den Ausbau der Stromnetze zu verzögern, indem Spitzenlasten mit Hilfe von Demand Side Management reduziert werden [4].

5.2 Ausgangslage

5.2.1 Wohngebäude

Wohngebäude verfügen über verschiedene elektrische Anlagen, von denen nur ein Teil flexibel ist. Flexible oder teils flexible Lasten umfassen Wärmepumpen, elektrische Heizungen, Klimageräte, Lüftungen, Warmwasserboiler, Gefrierschränke, Kühlschränke und elektrische Fahrzeuge. Zu den nicht oder kaum flexiblen Lasten gehören die Beleuchtung, elektrische Herde, elektronische Geräte und mehr. Für das Projekt GOFLEX haben die ESR und die HES-SO spezifisch nach Gebäuden gesucht, welche mit Heiz- und Warmwassersystemen ausgestattet sind, die elektrisch betrieben werden. Die Messung des Verbrauchs des ersten Gebäudes hat am 02.06.2018 begonnen. Seither wurden stets neue Gebäude hinzugefügt und überwacht. Bei den Wohngebäuden handelt es sich um Wohnungen oder Einfamilienhäusern im Raum Sion VS. Einige Auswertungen und Tests wurden mit dem Gebäude «Semiah1» durchgeführt. Dieses Gebäude ist zwar nicht Teil des GOFLEX Projekts, allerdings ist es ebenfalls mit den notwendigen Installationen ausgerüstet. Das Gebäude besitzt zwei separate Anlagen für die Heizung und die Warmwasseraufbereitung, welche beide mit Elektrizität betrieben werden. Der Vorteil bei diesem Gebäude ist, dass der Stromverbrauch beider Anlagen separat gemessen wird und beide Anlagen einzeln gesteuert werden können.

5.2.2 Datenschutz

Die HES-SO und die ESR haben zusammen mit einem spezialisierten Anwalt und einem Kommissionsmitglied des Walliser Datenschutzes die nötigen Schritte (gemäss der Verordnung zum Bundesgesetz über den Datenschutz, 235.11) eingeleitet, damit beim Projekt der Datenschutz der teilnehmenden Personen nicht verletzt wird. Die gesammelten Daten werden verschlüsselt mit den anderen GOFLEX Partnern geteilt und nur Personen, welche dazu berechtigt sind, dürfen die Daten einsehen. Die Teilnehmer wurden darüber informiert, was für Daten von ihnen gesammelt werden und für welchen Zweck. Die Teilnehmer können jederzeit aus dem Projekt aussteigen, falls sie dies wünschen.

5.2.3 Sensoren

Damit die Flexibilität des Verbrauchers quantifiziert werden kann, werden diverse Messungen vorgenommen. **Tabelle 1** fasst die im Projekt GOFLEX verwendeten Messsensoren, sowie deren verwendete Übertragungstechnologie zum gemeinsamen Gateway zusammen.

Tabelle 1: Übersicht der installierten Sensoren.

Messung:	Sensor Typ:	Übertragung:
Innentemperatur	Philio PAT02-B	Z-Wave
Warmwassertemperatur	Qubino Flush On/Off Thermostat (ZMNHID)	Z-Wave
Sub-Meter (Heiz-/Photovoltaiksysteme)	Aeotec Home Energy Meter Gen5 (ZW095)	Z-Wave
Smart Meter (Technical/Energy/Billing)	Landis+Gyr E450	M-Bus / DLMS

Die detaillierte Beschreibung der Messungen befindet sich in Anhang 11.1 und Anhang 11.2. Bereits bestehende Smart Meter wurden von den Technikern der ESR durch solche des Typs «Landis+Gyr E450» ersetzt.

Die installierten Smart Meter ermöglichen ein regelmässiges Speichern der Messwerte der Spannung, des Stroms, der Leistung, der verbrauchten Energie und der Kosten für die Energie. Zusammen mit den Messungen der Innentemperatur und der Warmwassertemperatur im Boiler kann das Verhalten dieser Systeme in Bezug auf den Stromverbrauch analysiert werden.

5.2.4 Kommunikation

In der Abbildung 1 ist schematisch dargestellt, wie die interne Kommunikation eines Gebäudes aufgebaut ist.

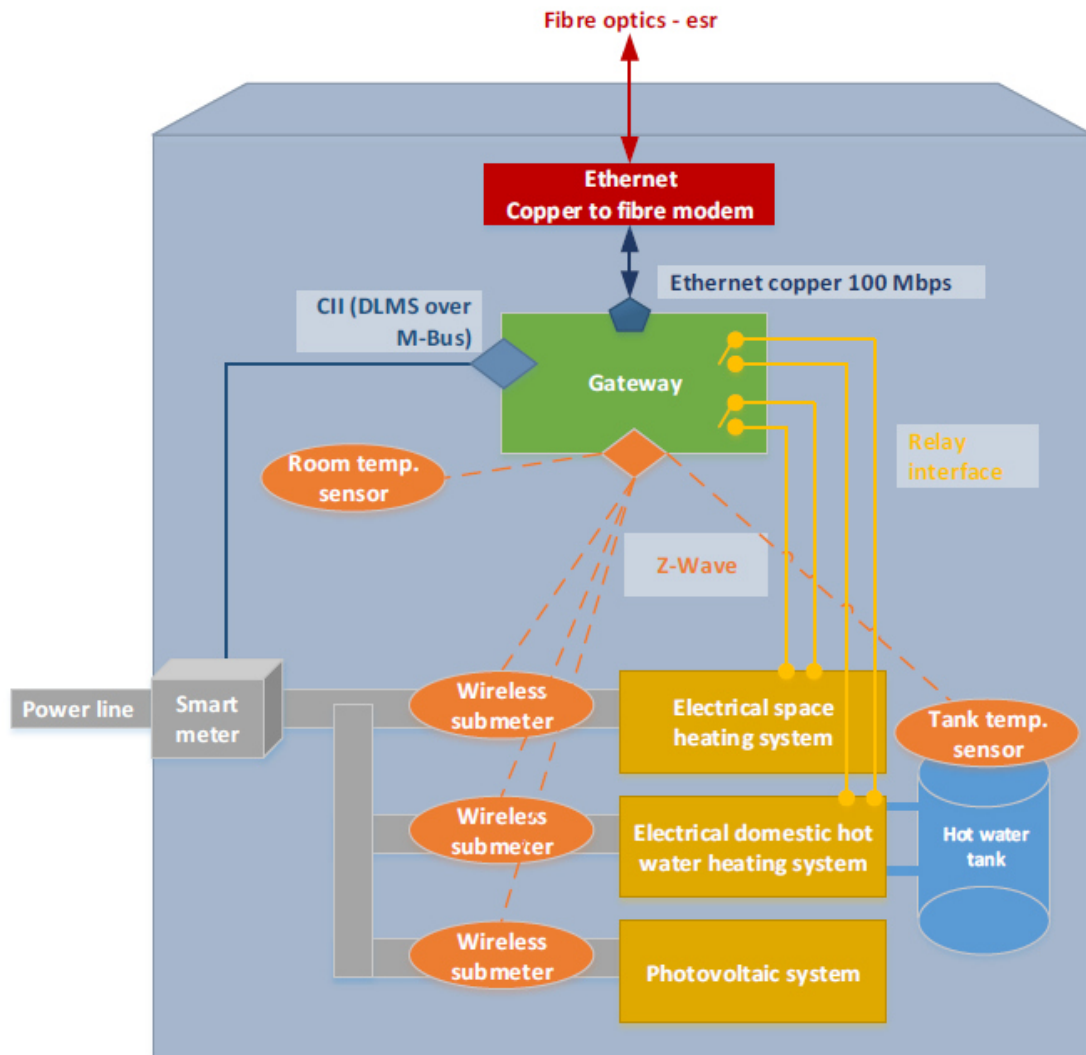


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Kommunikation zwischen den verschiedenen Komponenten eines Gebäudes des Projekts GOFLEX. Quelle: [6]

Es ist zu beachten, dass die realen Installationen vom Schema abweichen können, da je nach Typ der Anlagen nicht alle Sensoren installiert werden.

Die Temperaturmessungen und die Submeter übertragen die Messwerte drahtlos mittels Z-Wave an das Gateway. Bei den Smart Metern wird per Device Language Message Specification (DLMS) oder Meter-Bus (M-Bus) mit dem Gateway kommuniziert. Die Kommunikation zwischen dem Aggregator und dem Gateway des Gebäudes findet per Ethernet über Glasfaser oder Koaxialkabel statt.

Die Installation der Sensoren und der Kommunikationskomponenten werden von der HES-SO und der ESR durchgeführt, sobald sich ein Kunde für das Projekt registriert hat.

5.2.5 Steuerung

Für die Steuerung der Lasten wird das Direct Control Model verwendet. Hierbei sind lokale Aktoren mit dem lokalen Gateway verbunden, welches mit dem dezentralen Aggregator kommuniziert. In der Schweiz wurden früher Gebäude mit einer Rundsteuerung ausgestattet. Diese wurde verwendet, um während Zeiten mit Lastspitzen verschiedene Lasten, wie zum Beispiel die Geschirrspülmaschinen zu trennen. Die Verbindung von den Geräten zur Rundsteuerung können für das Projekt GOFLEX wiederverwendet werden. Hierfür wird die Verbindung von der Rundsteuerung auf das Gateway umgelenkt.

Damit die elektrischen Anlagen gesteuert werden können, sind sie an Relais angeschlossen, welche über das Gateway gesteuert werden können. Durch das Öffnen der Relais wird den Anlagen die Stromzufuhr abgeschnitten, so dass sie nicht betrieben werden können. Wird der Relaiskontakt geschlossen und ist somit die Stromzufuhr wieder hergestellt, hängt es von der internen Steuerung der Anlage ab, ob die Anlage Strom verbraucht. Die Steuerung erlaubt das Trennen aber nur indirekt das Hinzufügen von Lasten, mehr dazu in Kapitel 6.9.5.

Während der GOFLEX Projektphase wurden Heiz- und Warmwasseranlagen mit Relais ausgerüstet, so dass diese Anlagen gesteuert werden können.

5.3 Smart Grid

Smart Grid bedeutet auf Deutsch übersetzt «intelligentes Netz». Diese Netze unterscheiden sich von den herkömmlichen Stromnetzen vor allem durch die Anwendung von Kommunikationstechnologien.

Die International Energy Agency (IEA) definiert den Begriff Smart Grid folgendermassen: «A smart grid is an electricity network that uses digital and other advanced technologies to monitor and manage the transport of electricity from all generation sources to meet the varying electricity demands of end-users. Smart grids coordinate the needs and capabilities of all generators, grid operators, end-users and electricity market stakeholders to operate all parts of the system as efficiently as possible, minimising costs and environmental impacts while maximising system reliability, resilience and stability» [5].

5.4 Internet of Things

Die Kommunikation zwischen dem Aggregator und den Konsumenten wird durch die OpenSource Lösung cloud.io ermöglicht, welche von der HES-SO entwickelt wurde. Mit cloud.io ist es möglich, in Echtzeit zwischen Geräten zu kommunizieren und diese zu steuern. Eine solche Struktur, in denen Geräte über Internet miteinander verbunden sind, wird Internet of Things (IoT) genannt. Die Konsumenten werden dabei als Endpoints bezeichnet und das Programm, welches die Konsumenten steuert, wird Application genannt.

Die cloud.io entspricht einem Broker und besteht weiter aus drei Datenbanken (DB) [6]:

- Prozess DB, beinhaltet aktuelle Zustandswerte der Endpoints sowie eine Liste der Endpoints, die online bzw. offline sind.
- Historische DB, enthält alle vergangenen Messwerte.
- Zugriffsrechte DB, hält die Rechte auf das Schreiben und Lesen einer Application auf einem Endpoint fest.

Endpoints können über cloud.io Messwerte an die DB verschicken, sowie neue Befehle empfangen.

Applications können historische und Prozess DB abfragen, Sensoren abonnieren, um über Änderungen der Werte benachrichtigt zu werden und die Sollwerte der Aktuatoren aktualisieren.

Die einzelnen cloud.io Geräte sind über Secure Sockets Layer (SSL) / Transport Layer Security (TLS) miteinander verbunden, weshalb eine gegenseitige auf Zertifikaten basierte Berechtigung benötigt wird. Jedes Gerät besitzt seine eigene Certificate Authority (CA) und seinen eigenen privaten Key.

Die Applications und Endpoints stellen die Verbindung zu cloud.io über Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) her. Die Kommunikation mit MQTT wird oft für IoT verwendet. Geräte versenden Anfragen an den Broker, welcher die gesamte Datenmenge gespeichert hält und diese verarbeitet. So ist es selbst leistungsschwachen Geräten möglich, sich mit anderen Geräten in Verbindung zu setzen.

Abbildung 2 zeigt die Struktur des GOFLEX Projekts im Raum Wallis in der Schweiz auf.

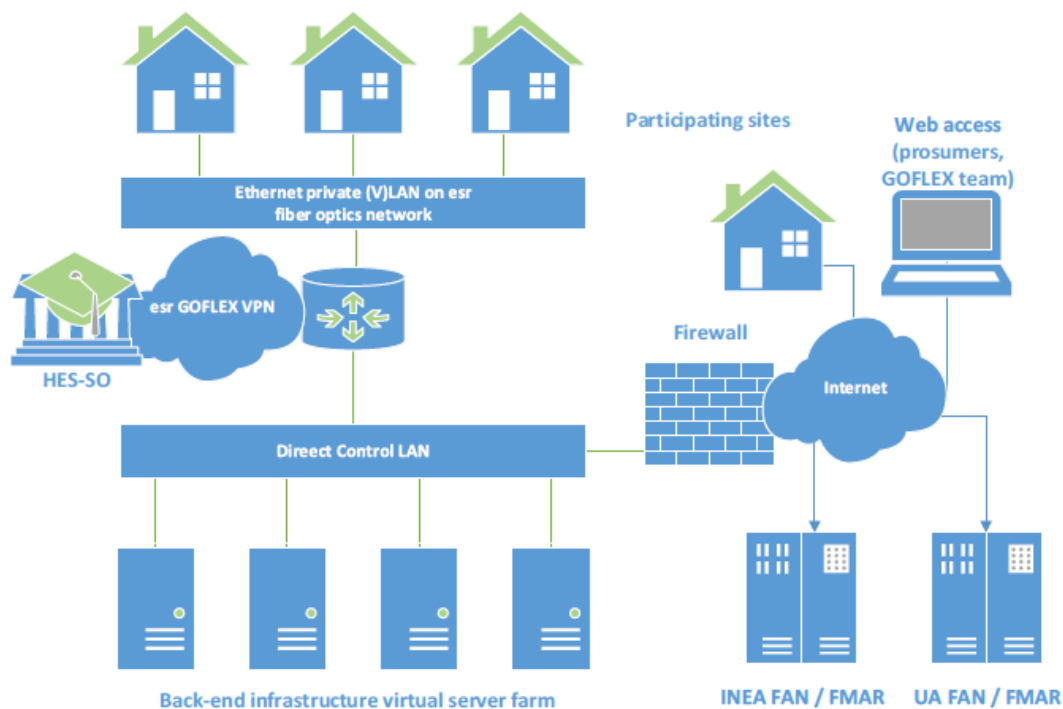


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Kommunikation zwischen den einzelnen Mitspielern der Demonstration des Projekts GOFLEX in der Schweiz. Quelle: [6]

Die erwähnten DB befinden sich in einem Virtual Privat Network (VPN) der ESR. Hier werden sämtliche Messwerte und Steuersignale festgehalten. Die Kunden und die am Projekt beteiligten Personen können über das Internet auf diese DB zugreifen, sofern sie dazu berechtigt sind. Aktuell übernimmt das GOFLEX Team die Rolle des Aggregators. Künftig wird diese Rolle von einem Flexibility Manager (FMAN) übernommen, welcher die aggregierte Flexibilität auf einem Flexibility Market (FMAR) verhandelt [7].

5.5 Demand Side Management

Demand Side Management (DSM) ist ein Element, welches häufig in Smart Grids verwendet wird, um den Energieverbrauch zu regeln. DSM zielt darauf, das Verbraucherverhalten mit den Bedürfnissen der Netzbetreiber in Einklang zu bringen. Mit Hilfe von Demand Response (DR) können Verbrauchsspitzen verhindert werden, indem entweder weniger Strom während Spitzenzeiten verbraucht wird, oder der Verbrauch auf Zeiten ausserhalb der Spitzen verschoben wird. Weil die zunehmende Produktion von erneuerbarer Energie wenig Flexibilität aufweist, ist DSM ein wichtiges Mittel, um den Verbrauch und die Produktion im Gleichgewicht zu halten. So wird ebenfalls verhindert, dass grosse Mengen an Ausgleichsenergie benötigt werden, wodurch der Strompreis steigen würde [8].

Durch die Anwendung von DSM in den Stromnetzen kann der Ausbau von Netzwerkkomponenten reduziert oder aufgeschoben werden.

Damit auch in Zukunft die Netzstabilität und faire Strompreise garantiert werden können, ist DSM essenziell.

Um den Verbrauch anzupassen, werden beim DSM verschiedene Anreize gesetzt, die den Verbraucher anregen, sein Verhalten anzupassen. Abbildung 3 fasst die verschiedenen Anreize zusammen.

Je nach Anreiz reagiert der Verbraucher mehr oder weniger schnell. Dies ist entscheidend damit

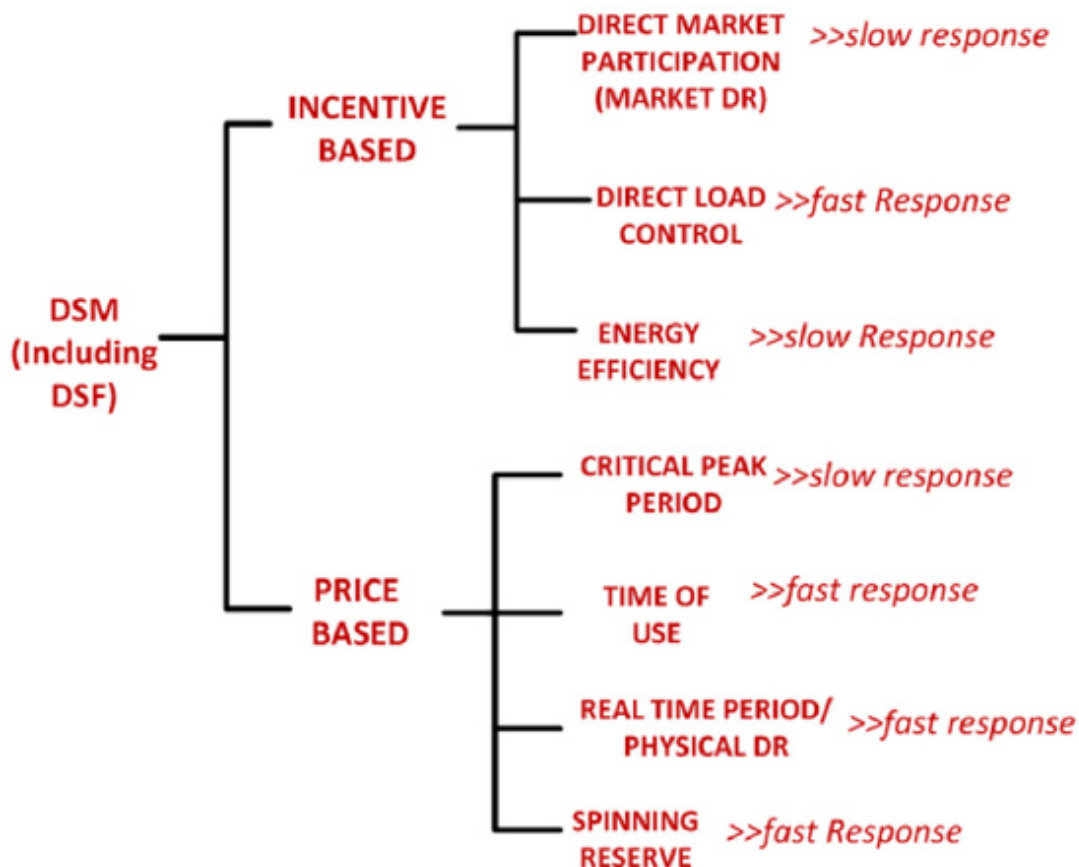


Abbildung 3: Klassifizierung der verschiedenen DSM-Methoden. Quelle: [32]

DSM funktionieren kann. Die Direct Load Control, welche im Projekt GOFLEX eingesetzt wird, wird zentral ausgeführt. Weil nicht der Verbraucher, sondern der Aggregator für die Steuerung zuständig ist, werden hohe Reaktionsgeschwindigkeiten erreicht.

5.6 Strompreis

Damit die Stabilität der Stromnetze garantiert werden kann, müssen der Stromverbrauch und die Produktion im Gleichgewicht stehen. In der Schweiz ist die Swissgrid AG für die Stabilität des Netzwerks zuständig. Falls Produktion und Verbrauch nicht mehr im Gleichgewicht sind, muss Swissgrid teure Regelenergie verwenden, um dieses wiederherzustellen. Diese Regelenergie muss von den sogenannten Bilanzgruppen (BG) bezahlt werden. Es handelt sich dabei um virtuelle Gruppen, welche beliebig viele Konsumenten und Produzenten zusammenfassen. Weil die Regelenergie über die BG auch weiter an deren Kunden verrechnet wird, besteht für jeden Teilnehmer das Interesse, seine Produktion und seinen Verbrauch im Gleichgewicht zu halten. Die ESR ist sowohl Verteilnetzbetreiber als auch eine Sub-BG. Die ESR muss ihren Stromverbrauch entweder durch eigene Produktion oder durch Einkäufe begleichen. Strom kann entweder über direkten Handel «Over The Counter» (OTC) oder vom Strommarkt (EEX, EPEX) gekauft werden. Auf dem Markt gibt es zum einen den Long-Term-Handel, den Day-Ahead-Handel und den Intra-Day-Handel. Je kurzfristiger der Strom gekauft wird, desto teurer ist er in der Regel. In Abbildung 4 ist zu sehen, wie sich der Strompreis für den Netzbetreiber zusammensetzt.

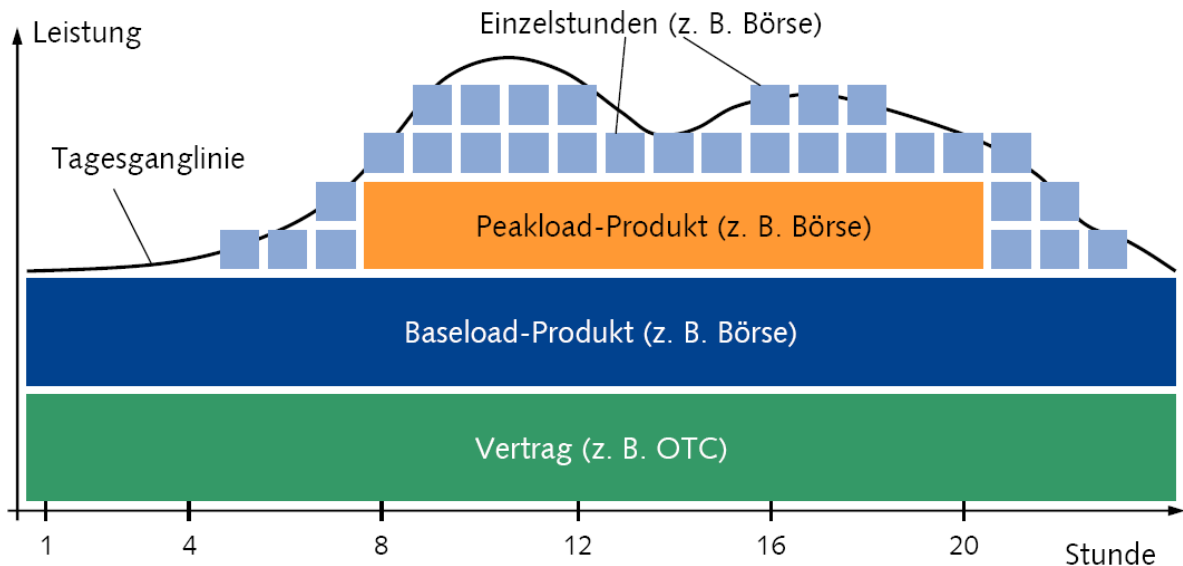


Abbildung 4: Zusammensetzung des Strompreises für den Netzbetreiber. Quelle: [33]

Langfristige Verträge, beispielsweise OTC oder von der Börse, werden abgeschlossen, um die Basislast zu decken (grün und dunkelblau). Die Basislast wird für den ganzen Tag gekauft. Bei diesen Verträgen handelt es sich meistens um den Kauf von Energie für 1-3 Jahre. Etwas kurzfristiger wird die Spitzenlast (orange) eingekauft. Die Spitzenlast deckt nur gewisse Stunden des Tages und wird ebenfalls von der Börse bezogen. Einen Tag im Voraus und noch während dem Tag wird die Energie für einzelne Stunden (hellblau) auf der Börse gekauft. Es ist ebenfalls möglich negative Energie zu kaufen, sprich bereits gekaufte Spitzen- oder Basislast zu verkaufen. Eine flache und gut vorhersehbare Tagesganglinie begünstigt den langfristigen und somit günstigeren Einkauf von Energie.

Stimmt die Vorhersage, beziehungsweise der gekaufte Strom, nicht mit dem effektiven Verbrauch überein, so muss die Differenz mit Ausgleichsenergie beglichen werden. Der Preis für Ausgleichsenergie wird von Swissgrid für alle 15 Minuten bestimmt und wird jeweils nach der

Bilanzierung abgerechnet. In der Regel kostet Ausgleichsenergie mehr als Strom, welcher vom Markt bezogen wird. Deshalb ist es von besonderem Interesse, den Stromverbrauch so gut wie möglich vorherzusagen zu können [9], [10].

In Abbildung 5 sind die Preise der Jahre 2016 und 2017 der verschiedenen Stromprodukte dargestellt.

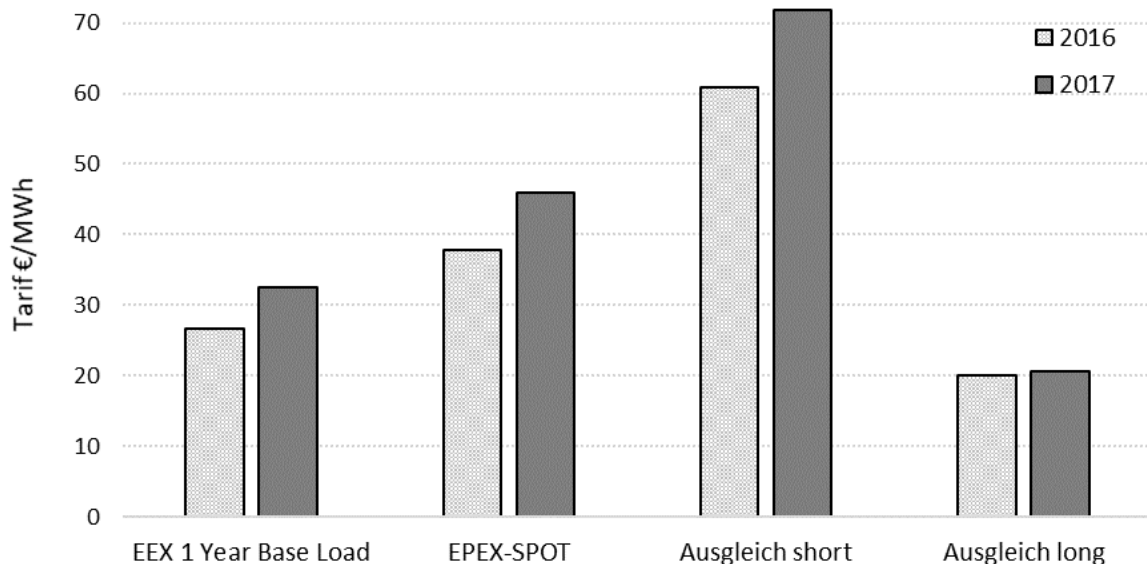


Abbildung 5: Preise der verschiedenen Strom-Produkte in der Schweiz in den Jahren 2016 und 2017 in €/MWh.

Je früher der Vertrag abgeschlossen wird, desto weniger kostet die Energie. Die Preise für die Überdeckung (Ausgleich short) werden an die Bilanzgruppenverantwortlichen bezahlt, bei einer Unterdeckung (Ausgleich long) wird ihnen die Energie in Rechnung gestellt.

Die Preise für die Ausgleichsenergie werden von Swissgrid publiziert [10].

Die Preise für den EEX Strompreis Phelix Baseload ein Jahr im Voraus werden von finanzen.net publiziert [11].

Die Preise für den Spotmarkt EPEX sind auf energy-partner.ch einsehbar [12].

5.7 Tertiärregelung

Die im vorherigen Abschnitt beschriebene Ausgleichsenergie, welche Swissgrid aufwendet, um das Stromnetz im Gleichgewicht zu halten, kann in drei Komponenten aufgeteilt werden. Energie für Primär-, Sekundär- und Tertiärregelung. Energie für Primärregelung muss innert Sekunden, für Sekundärregelung innert 5 Minuten und für Tertiärregelung innert 15-20 Minuten bereitstehen. Die benötigte Energie für die Tertiärregelung wird von Swissgrid wöchentlich bis täglich ausgeschrieben. Interessenten können für die ausgeschriebene Regelleistung bieten. Die minimale Energie, welche bereitgestellt werden muss, beträgt +5 MW oder -5 MW. Für kleine Produzenten oder Verbraucher besteht die Möglichkeit des Poolings. Hierbei schliessen sich mehrere Einheiten zusammen, um ein virtuelles Kraftwerk zu erschliessen, welches über die benötigte Regelleistung verfügt [13].

5.8 Definition Flexibilität

Flexibilität ist zwar ein geläufiger Begriff, jedoch ist er im Bereich der energetischen Systeme noch nicht klar definiert. Obwohl es bereits viele Ansätze für die Definition der Flexibilität gibt, ist es schwierig auf Grund der verschiedenen Anwendungsbereiche eine einheitliche Definition zu finden.

Gemäss dem Duden bedeutet Flexibilität: «Die Fähigkeit des flexiblen, anpassungsfähigen Verhaltens» [14].

Damit der Energiehaushalt eines Gebäudes flexibel sein kann, muss dessen Stromverbrauch anpassbar sein.

Die Flexibilität wird im Bereich der Energiesysteme von der Union der Elektrizitätswirtschaft eurelectric folgendermassen definiert: «The ability to manage variability and volatility in order to balance supply and demand within the constraints of infrastructure» [15]. Bei dieser Definition wird bereits erwähnt, dass die Flexibilität nicht nur auf der Seite der Produktion, sondern auch bei den Verbrauchern vorhanden ist. Jedoch enthält die Beschreibung keine Hinweise darüber, wie die Flexibilität quantifiziert werden kann.

W. Golden und P. Powell präzisieren den Begriff, indem sie ihm vier Dimensionen verleihen. Die Dimensionen und eine kurze Erklärung sind in Tabelle 2 eingetragen [16].

Tabelle 2: Dimensionen der Flexibilität nach W. Golden und P. Powell.

Dimension der Flexibilität	Umfang
Zeitlich	Kurzfristig - Mittelfristig - Langfristig
Reichweite	Vorhersehbare Umstände - Unvorhersehbare Umstände
Absicht	Offensiv - Defensiv
Fokus	Intern - Extern

Mit Hilfe dieser Dimensionen kann die Flexibilität eines Systems oberflächlich beschrieben werden. Für eine quantitative Bestimmung der Flexibilität sind jedoch Masseinheiten notwendig, welche es erlauben, die Systeme miteinander zu vergleichen. Golden und Powell nennen in ihrem Bericht vier Masse: Effizienz, Reaktionsfähigkeit, Vielseitigkeit und Robustheit. Verschiedene in der Literatur vorhandene Erklärungen für diese Masse sind in Anhang 11.3 aufgeführt.

Selbst mit den Dimensionen und den Massen kann die Flexibilität nicht einheitlich bestimmt werden, weil die Interpretationen je nach Anwendungsbereich zu subjektiv sind.

Im Annex 67 der IEA konzentriert sich die Definition auf den Bereich der Wohngebäude.

5.8.1 Annex 67 IEA

Der Annex 67 der IEA hat zum Ziel, den Begriff energetische Flexibilität von technischen Anlagen von Wohngebäuden genauer zu beschreiben, den Nutzen zu bestimmen welche diese Flexibilität für die Netzwerke bietet und mögliche Ansätze zur Steuerung solcher Flexibilität zu

entwerfen. Neue Kenntnisse seien wichtig, um erneuerbare Energien in die Smart Grids zu integrieren.

Die Flexibilität wird gemäss Annex 67 von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Energiespeicherung
- Management des Verbrauches
- Vor Ort produzierte Energie
- Verbraucherverhalten
- Verbraucherakzeptanz

Bei der Steuerung der Flexibilität sind vor allem Anlagen für die Heizung, Warmwasseraufbereitung, Kühlung und Ventilation interessant. Dabei ist es wichtig, den Komfort der Bewohner nicht einzuschränken.

Insgesamt dauert die Arbeit am Annex 67 der IEA drei Jahre ab dem Juni 2015, gefolgt von einem Jahr Berichterstattung [17].

5.8.2 Flexibilität von Wohngebäuden

Clauss J. et. al definieren die Flexibilität von technischen Anlagen in Wohngebäuden folgendermassen:

«Energy flexibility can be seen as the ability to manage a building's demand and generation according to local climate conditions, user needs and grid requirements. It can also be understood as a building property, if it is seen as the margin in which the building can be operated while respecting its functional requirements. »

Die funktionellen Anforderungen sind von der Anlage abhängig. In Bezug auf die Heizungs- und Warmwassersysteme geht es dabei aber vor allem um den Komfort des Bewohners. Weil nicht jeder Bewohner denselben Komfort wünscht, können keine einheitlichen Werte festgelegt werden, welche respektiert werden müssen.

Des Weiteren erwähnt Clauss J. in seiner Definition, dass die Flexibilität abhängig von den Bedürfnissen der Netzwerke ist. Somit weist er darauf hin, dass die Definition ebenfalls vom Verwendungszweck der Flexibilität abhängig ist. Für die Reduktion von Spitzenlasten wird nicht dieselbe Flexibilität benötigt, wie für den Ausgleich von fehlerhaften Produktionsvorher-sagen.

W. Golden und P. Powell erweitern die Definition, in dem sie zusätzlich auf die Kosten eingehen:

«The current terminology has adopted the term flexibility to indicate the capacity to adapt across time, circumstances (foreseeable or not), intention (positive or negative reactions) and area of application. For the applications to the electrical system, flexibility refers to the possibility of deploying the available resources to respond in an adequate and reliable way to the load and generation variations during time at acceptable costs» [16].

6 Quantifizierung der Flexibilität

6.1 *Vorhandene Anlagen*

Die Flexibilität der technischen Anlagen eines Gebäudes hängt primär von den installierten Anlagen ab. Je mehr elektrische Anlagen in einem Gebäude vorliegen, desto mehr Möglichkeiten ergeben sich, diese flexibel zu steuern. Die folgenden Kriterien können dazu verwendet werden, die Flexibilität eines Wohngebäudes grob einzuordnen [6].

- Gebrauch von Elektrizität für Raumheizung, Warmwasseraufbereitung oder beides
 - Wird weder für die Heizung noch für die Warmwasseraufbereitung elektrische Energie benötigt, so besitzt das Gebäude keine elektrische Flexibilität
- Raumheizung und Warmwasseraufbereitung kombiniert oder individuell
 - Ein Gebäude verfügt über mehr Flexibilität, wenn zwei separate Anlagen für die Heizung und die Warmwasseraufbereitung verwendet werden, weil bei einem kombinierten System die Anlage wieder eingeschaltet werden muss, sobald entweder die minimale Raum- oder Warmwassertemperatur unterschritten wird
- Direkte elektrische Heizung oder Wärmepumpe
 - Die direkte elektrische Heizung verbraucht mehr Strom als eine Wärmepumpe und verfügt somit über mehr Flexibilität
- PV-Anlage vorhanden
 - Bei Kunden mit installierter PV-Anlage hat der Eigenverbrauch Priorität, wodurch die Flexibilität eingeschränkt wird.

Diese Kriterien erlauben eine grobe Einschätzung der Flexibilität. Allerdings hängt die effektive Flexibilität eines Gebäudes von vielen Faktoren ab, wie beispielsweise internen Regelungen, Komfort der Bewohner und Umwelteinflüssen.

Die Tabelle in Anhang 11.4 kategorisiert die Flexibilität der Gebäude nach Typ von Anlagen.

6.2 *Stromverbrauch*

Die Flexibilität von Heiz- und Warmwassersystemen ist deshalb so gross, weil die Möglichkeit besteht, die Energie in Form von Wärme zu speichern. Bei der Warmwasseraufbereitung kann das Wasser im Tank gespeichert und für einen späteren Nutzen vorgewärmt werden. Wohngebäude haben eine ausreichend hohe Trägheit, so dass Wärme auch während langer Zeit innerhalb der Räume gespeichert werden kann. Zusätzlich werden Häuser passiv von der Sonne erwärmt, wodurch der Wärmeverlust begrenzt wird. Der Anteil des Stromverbrauchs, welcher für Heiz- und Warmwassersysteme benötigt wird, hängt stark von den vorhandenen Anlagen ab. Für das Projekt GOFLEX werden grösstenteils Gebäude analysiert, welche mit Heiz- und Warmwasseranlagen ausgestattet sind, die mit elektrischer Energie versorgt werden. Weil der Verbrauch von allen anderen Stromverbrauchern in einem Haushalt nur schlecht steuerbar ist, wird in Abbildung 6 der Anteil des Stromes, welcher für Heizung und Warmwasseraufbereitung benötigt wird, dem Gesamtverbrauch gegenübergestellt.

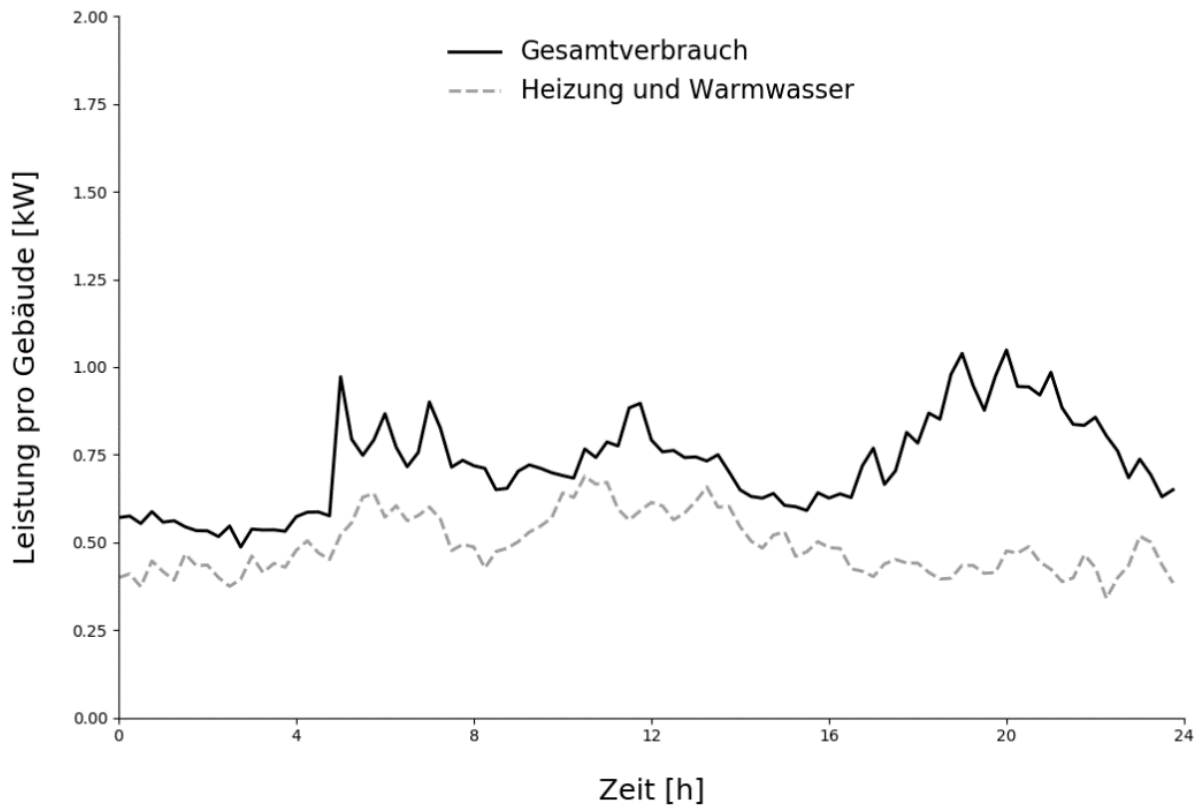


Abbildung 6: Durchschnittlicher Tagesverlauf des Strombedarfs im Mai 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 13.2 °C, aufgeteilt in Heiz-/Warmwasserverbrauch und Gesamtverbrauch. Die Kurven entsprechen den Mittelwerten jeder viertel Stunde von 32 Gebäuden.

Der Stromverbrauch für Heizung und Warmwasseraufbereitung macht bereits einen grossen Anteil am Gesamtverbrauch aus. Die Kurve des Gesamtverbrauches widerspiegelt die Anwesenheit von Personen im Gebäude. Besonders abends ist der Stromverbrauch erhöht, weil zu dieser Zeit am meisten Leute zu Hause sind. An einem durchschnittlichen Tag im Mai wird pro Gebäude von insgesamt 17.37 kWh ca. 68% der Energie für die Heizung und das Warmwasser verbraucht. Im Februar beträgt dieser Anteil ca. 72% von 29.21 kWh.

In der Schweiz gibt es starke saisonale Temperaturschwankungen. Dies führt dazu, dass sich das Verbrauchsmuster im Sommer stark von jenem im Winter unterscheidet. Heizsysteme bleiben grösstenteils während den Monaten Mai bis Oktober ausgeschaltet. Der Warmwasserverbrauch bleibt das ganze Jahr über relativ konstant. Der Strombedarf für die Warmwasseraufbereitung folgt dem Warmwasserbedarf. Morgens und abends, wenn sich die meisten Leute duschen oder baden, wird ein höherer Verbrauch verzeichnet. Mittags gibt es ebenfalls eine kleine Erhöhung des Verbrauchs, welcher auf den Warmwasserbedarf zum Abwaschen von Geschirr zurückzuführen ist. In den Winterperioden kommt zusätzlich der Strombedarf der Heizsysteme hinzu, welcher vor allem in der Nacht anfällt.

Auf Grund der zusätzlich anfallenden Heizleistung im Winter, ist die Flexibilität der Lasten von Wohngebäuden im Winter grösser als im Sommer.

6.3 Anteil Elektrischer Heiz- und Warmwasseranlagen

Die für GOFLEX registrierten Wohnungen wurden statistisch ausgewertet und mit dem schweizerischen Durchschnitt verglichen, um das Potenzial an Flexibilität besser zu verstehen.

Es gibt sowohl unter den Heizsystemen als auch den Warmwassersystemen des Projekts GOFLEX drei verschiedene Anlagentypen: Wärmepumpen, Holzhöfen und Boiler, welche entweder mit Elektrizität, Holz oder Gas versorgt werden.

Von insgesamt 140 Wohnungen werden 134 Heizungen und 119 Warmwassersysteme mit Wärmepumpen betrieben, welche mit elektrischer Energie gespeist werden. In den 119 Wohnungen, welche ihr Warmwasser mit einer Wärmepumpe erwärmen, wird dieselbe Anlage für Warmwasser und Heizung verwendet. Holzheizungen und Gasboiler besitzen teilweise eine direkte elektrische Begleitheizung, welche das Wasser innert kurzer Zeit stark erhitzen kann.

Das Bundesamt für Statistik [18] erhebt ebenfalls Statistiken über die Energieträger von Wohngebäuden. Der Anteil an elektrischen Anlagen im Projekt GOFLEX liegt deutlich über dem Durchschnitt. Das liegt daran, dass für das Projekt spezifisch nach Gebäuden mit elektrischen Anlagen gesucht wurde. Insgesamt bestehen in der Schweiz 18 % der Heizsysteme aus Wärmepumpen und 7 % aus direkten elektrischen Heizungen. Das Warmwasser in Wohngebäuden wird zu 13 % mit Wärmepumpen und zu 33 % direkt elektrisch aufbereitet. Zusammengefasst sind demnach in der Schweiz 25 % der Heizsysteme und 46 % der Warmwassersysteme potenziell durch den Verteilnetzbetreiber steuerbar. Gemäss dem Fachverein Wärmepumpen Schweiz (FWS) könnte sich die Anzahl verkaufter Wärmepumpen pro Jahr bis 2040 mehr als verdoppeln [19].

Ein weiteres Kriterium für die Flexibilität von Wohnhäusern ist die Installation einer PV-Anlage. Seit dem 1.1.2018 werden keine neuen Installationen mehr in die Einspeisevergütung (KEV) aufgenommen, PV-Anlagen werden stattdessen durch eine Einmalvergütung (KLEIV/GREIV) subventioniert [20]. Der Tarif für das Einspeisen von Solarstrom hängt vom Verteilnetzbetreiber ab und basiert auf dem Energiegesetz. Für den Besitzer einer PV-Anlage ist es auf dem heutigen Stand finanziell interessanter, seinen produzierten Strom, wenn möglich, selbst zu verbrauchen (Autokonsum), statt ihn ins Netz zu speisen und das Defizit vom Netz zu beziehen. Bei der Steuerung der Flexibilität solcher Kunden ist es deshalb wichtig, dass der Eigenverbrauch nicht eingeschränkt wird. Falls die PV-Anlage mit einer internen Steuerung ausgestattet ist, welche den Autokonsum maximiert, ist es schwierig die Flexibilität dieser Wohnhäuser zu nutzen. Eine detaillierte Analyse solcher Kunden befindet sich in Anhang 11.5. Die effektive Flexibilität solcher Kunden hängt stark von den in Zukunft existierenden ökonomischen Modellen in Bezug auf die Flexibilität von Wohnhäusern ab.

Unter den insgesamt 140 Teilnehmern am Projekt GOFLEX sind 48 mit einer PV-Anlage ausgestattet. Schweizweit wird die Anzahl installierter PV-Anlagen (Stand Ende 2018) auf 85'000 geschätzt, allerdings sind hier sämtliche Anlagen und nicht nur die von Wohnhäusern inbegriffen [21].

Mit dem zunehmenden Lebensstandard steigt auch die Anzahl installierter Klimageräte. In Europa hat sich der Energieverbrauch für die Raumkühlung seit 1990 verdreifacht und beträgt 1.2 % des gesamten Energieverbrauchs von Wohngebäuden. Im Jahr 2050 wird geschätzt, dass der Anteil auf fast 8 % steigen wird [22].

In der Schweiz fiel 2016 28.2 % des gesamten Energieverbrauchs auf Haushalte an. Dies entspricht einer Energie von ca. 240'000 TJ bzw. 65 TWh [23]. Davon wurden 68.3 % für Raumwärme und 13.4 % für Warmwasseraufbereitung verwendet. Gemäss der Berechnung in Anhang 11.6 wird in der Schweiz für elektrische Heiz- und Warmwassersysteme im Durchschnitt etwa 1.7 GW Strom verbraucht. Dies entspricht dem Potenzial an Flexibilität von Haushalten im Jahr 2016. Zum Vergleich: Das Atomkraftwerk Leibstadt im Kanton Aargau

verfügt über eine Nettoleistung von 1.28 GW [24]. Über das effektive Potenzial kann nur spekuliert werden. Zum einen sind nicht alle Bewohner einverstanden, ihre Flexibilität für die Steuerung anzubieten. Zum anderen gibt es immer mehr Bewohner mit eigener Energieproduktion, wie beispielsweise Solarenergie. Diese Bewohner versorgen ihre Heiz- und Warmwassersysteme teils selbst mit Energie und stehen nicht für die Steuerung zur Verfügung. Weil die Anzahl installierter Wärmepumpen gemäss FWS zunehmen wird, könnte das Potenzial dennoch zunehmen.

6.4 Saisonale Unterschiede

Das Klima in der Schweiz reicht von arktisch kalt im Winter bis hin zu heiss und trocken im Sommer. Die saisonalen Temperaturschwankungen sind stark ausgeprägt und wirken sich auch auf das Heizverhalten der Bevölkerung aus. Abbildung 7 [25] zeigt den Jahresverlauf der mittleren täglichen Lufttemperatur in Sion.

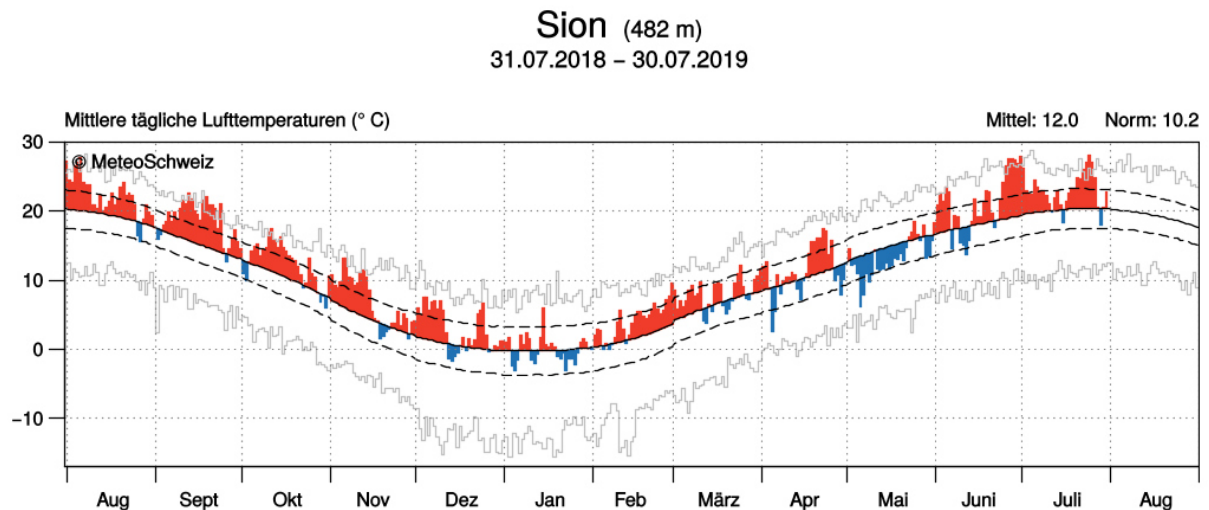


Abbildung 7: Jahresverlauf der mittleren täglichen Lufttemperatur in Sion (VS) vom 31.07.2018 - 30.07.2019. Schwarz: Tagesmittel Normperiode (1981-2010). Gestrichelt: Standardabweichung. Hellgrau: Höchst-/Tiefstwerte. Quelle: [25]

Die mittleren täglichen Temperaturen reichen von 0 °C im Januar bis zu 21 °C im Juli. Diese saisonalen Temperaturschwankungen führen dazu, dass es in der Schweiz eine Heizperiode gibt. Während dieser Zeit werden Heizsysteme benötigt, damit die Raumtemperatur über 20 °C bleibt. Der Zeitraum hängt stark von der Lage der Gebäude ab, befindet sich aber in der Regel zwischen September und Mai. Während der Heizperiode steigt der Stromverbrauch stark an. Das bedeutet, dass es mehr Lasten gibt, welche für DSM benutzt werden können. Abbildung 8 zeigt den wöchentlichen Energieverbrauch eines Gebäudes über das ganze Jahr (2018/19). Der Verbrauch wird aufgeteilt in Heizung und Boiler.

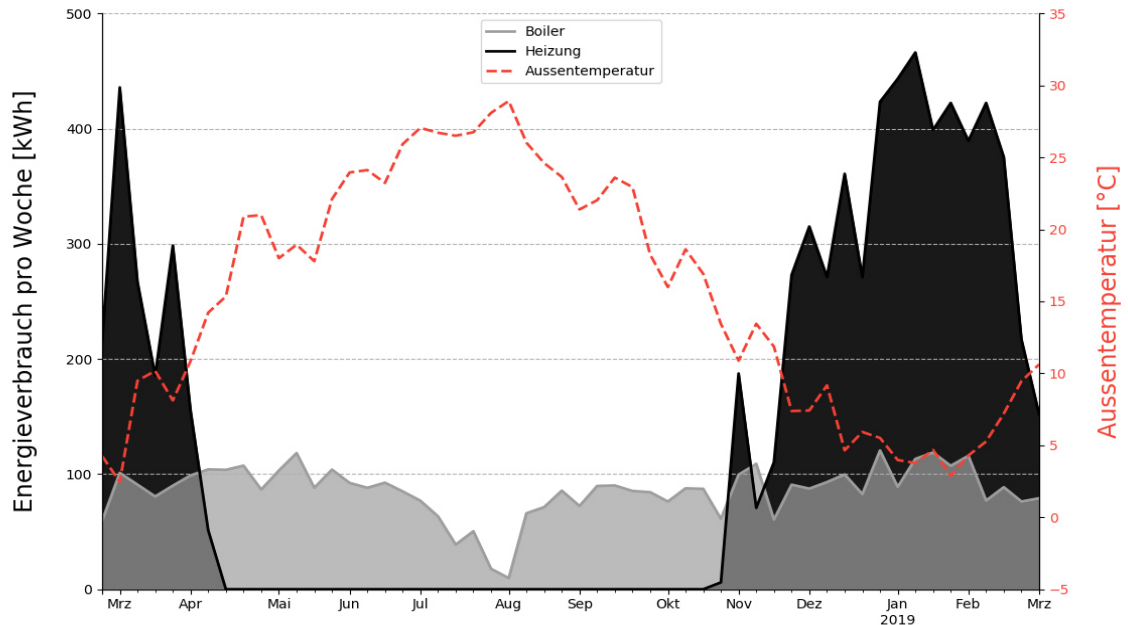


Abbildung 8: Jahresverlauf der Aussentemperatur und des wöchentlichen Energieverbrauches des Boilers und der Heizung eines Gebäudes (Semiah1). Die Messwerte stammen aus den Jahren 2018/19.

Im Zentralwallis ist die Heizperiode meist kürzer als im Durchschnitt in der Schweiz. Auf der Grafik ist zu erkennen, dass die Heizperiode einsetzt, sobald die durchschnittliche tägliche Aussentemperatur unter 20 °C fällt. Ausserhalb der Heizperiode wird kein Strom für die Heizung verbraucht. Der Energiebedarf für den Boiler bleibt über das ganze Jahr relativ konstant, nur während den Ferien im August ist zu erkennen, dass ebenfalls kaum Strom verbraucht wird. Auf Grund der saisonalen Unterschiede wird bei der folgenden Analyse der Flexibilität unterschieden zwischen Heizperiode und ausserhalb der Heizperiode. Weil die Diplomarbeit ausserhalb der Heizperiode durchgeführt wurde konzentriert sich der Hauptteil auf die Analyse ausserhalb der Heizperiode. Während der Heizperiode konnten keine praktischen Tests durchgeführt werden, jedoch wurden die bereits vorhandenen Messungen ausgewertet. Die Resultate befinden sich im Anhang und werden in den jeweiligen Kapiteln referenziert.

6.5 Allgemeines zur Innentemperatur

Die SIA Norm EN15251:2007 empfiehlt für die Auslegung von Gebäuden und raumluftechnischen Anlagen während den Heizperioden eine Innentemperatur von 18-21°C (Wohngebäude) je nach Gebäudekategorie.

Der Sollwert der Innentemperatur kann jedoch in den meisten Fällen vom Bewohner selbst angepasst werden oder vom Installateur abgeändert werden.

Während den Kühlperioden wird für die Auslegung eine Temperatur von 25.5-27 °C (Wohngebäude) empfohlen [26].

6.6 Allgemeines zur Warmwassertemperatur

Die Referenztemperatur für die Warmwasserzubereitung hängt von der Art der Installation ab. Allgemein kann gesagt werden, dass die Temperatur so geregelt werden muss, dass sich keine Legionellen bilden können.

Die SIA Norm 385 empfiehlt folgende Warmwassertemperaturen:

- Wassererwärmer Austritt: 60°C
- Warmgehaltene Leitung: 55°C
- Entnahmestelle: 50°C

Systeme, welche mit tieferen Temperaturen arbeiten, sollten täglich das Wasser während einer Stunde auf über 60°C erhitzen, damit das Wasser von Legionellen sterilisiert wird [27]. Ausserdem sollte die Wassertemperatur nicht für lange Zeit über 65°C liegen, um zu verhindern, dass sich Kalk bildet.

Oft wird warmes Wasser in Schichtladespeichern aufbewahrt. In solchen Reservoirs befindet sich das warme Wasser auf Grund seiner geringeren Dichte immer weiter oben, als das kalte Wasser. Der Übergang von kaltem zu warmem Wasser, Thermokline genannt, findet oftmals in einem kleinen Bereich statt. Auf Grund der Schichtung ist es schwierig, die Warmwassertemperatur zu messen. Weil die Temperatursonden nicht bei jedem Kunden an derselben Stelle des Wasserspeichers liegen, ist die Wassertemperatur nicht aussagekräftig. Ist hingegen die Position der Sonde bekannt kann das verbleibende Volumen an Warmwasser berechnet werden. Sobald die Temperaturabnahme des Warmwassers im Reservoir rapide zunimmt, kann angenommen werden, dass nur noch oberhalb der Sonde warmes Wasser enthalten ist.

6.7 Einfluss der Aussentemperatur

Um den Einfluss der Aussentemperatur auf den Strombedarf und die Innen- und Warmwassertemperatur zu analysieren, werden die jeweiligen durchschnittlichen Tagesverläufe des Monats Mai 2019 gegenübergestellt und verglichen. Das Ergebnis wird in Abbildung 9 dargestellt.

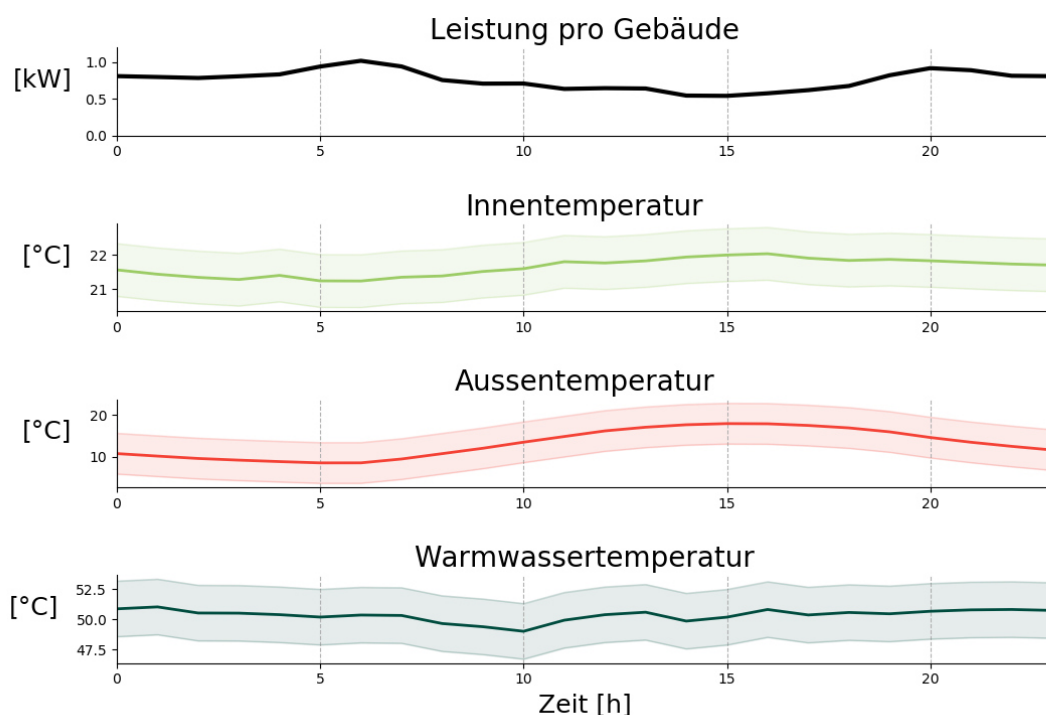


Abbildung 9: Mittelwerte des durchschnittlichen Tagesverlaufs der Leistung, der Innentemperatur und der Warmwassertemperatur von 131 Gebäuden, sowie der durchschnittliche Tagesverlauf der Aussentemperatur im Monat Mai 2019.

Der durchschnittliche elektrische Verbrauch erreicht zwei Spitzen, eine morgens um 06:00 Uhr, die andere abends um 20:00 Uhr. Zu diesen Zeiten ist der Warmwasserbedarf in Wohngebäuden am höchsten. Im Mai werden die meisten Heizungen bereits nicht mehr betrieben, weshalb der Stromverbrauch tiefer ausfällt als während der Heizperiode. Im Durchschnitt wird im Mai 0.76 kW Strom verbraucht.

Der Verlauf der Innentemperatur nimmt eine ähnliche Form an wie die der Aussentemperatur. Die Standardabweichung der Warmwassertemperatur beträgt 2 °C. Die relativ hohe Standardabweichung ist auf zwei Ursachen zurückzuführen. Einerseits werden die meisten Regelungen der Warmwasserzubereitung mit einer Hysterese der Wassertemperatur gesteuert. Eine Schwankung der Wassertemperatur ist deshalb normal. Andererseits kann die Standardabweichung auch mit der bereits erwähnten Ungenauigkeit der Temperaturmessung zusammenhängen. Die hohe Standardabweichung ist ein Hinweis darauf, dass der Komfort des Bewohners durch eine kurze Änderung der Wassertemperatur kaum eingeschränkt wird. Weil Energie in Form von thermischer Energie in einem Warmwasserspeicher aufbewahrt werden kann, ist es möglich, den Zeitpunkt der Warmwasseraufbereitung flexibel zu wählen, solange die Temperatur einen Mindestwert nicht unterschreitet.

Die Analyse des Einflusses der Aussentemperatur im Winter ist in Anhang 11.7 beschrieben.

6.8 Statistische Auswertung

Weil der Stromverbrauch von Heizungs- und Warmwasseranlagen auf Grund der verschiedenen Regelsysteme sehr unregelmässig anfällt, ist es schwierig, eine präzise Vorhersage des Stromverbrauchs zu einem bestimmten Zeitpunkt durchzuführen. Besonders ausserhalb der Heizperioden sind die Heiz- und Warmwasseranlagen während der meisten Zeit ausser Betrieb. Nur einige Male am Tag werden die Anlagen während ca. 30 Minuten eingeschaltet.

Damit die Flexibilität genutzt werden kann, muss vorhergesagt werden, wieviel Leistung zu einem bestimmten Zeitpunkt unterbunden werden kann. Eine Vorhersage ist immer mit einer gewissen Unsicherheit verbunden, deshalb werden in diesem Abschnitt die vorhandenen Messwerte statistisch ausgewertet, um Rückschluss auf die Häufigkeitsverteilung des Stromverbrauchs zu ziehen.

In der Energiebranche wird oft in Intervallen von 15 Minuten gerechnet. Die Ausgleichsenergie wird ebenfalls in Intervallen von 15 Minuten verrechnet. Deshalb werden für die folgenden Analysen die Werte auf Intervalle von 15 Minuten gemittelt.

Ziel der Auswertung ist es, zu beobachten, welche Menge an Leistung wie oft vorkommt, und wovon die Häufigkeit beeinflusst wird.

6.8.1 Einfluss der Anzahl Gebäude auf den Stromverbrauch

Misst man den Stromverbrauch für Heiz- und Warmwasseranlagen eines einzelnen Gebäudes, so ist dieser in den meisten Fällen gleich null. Aggregiert man jedoch mehrere Gebäude, so ist die Wahrscheinlichkeit geringer, dass zum selben Zeitpunkt keines der Gebäude Strom verbraucht.

Mit Hilfe der Histogramme in Abbildung 10 wird gezeigt, inwiefern das Aggregieren der Gebäude die Häufigkeitsverteilung beeinflusst. Für das Histogramm wird der Stromverbrauch der Gebäude in 30 gleich grosse Klassen von jeweils 0.1 kW aufgeteilt. Anschliessend wird gezählt, wie viele Perioden von 15 Minuten es während einem Monat gibt, in denen der Stromverbrauch einer der jeweiligen Klassen entspricht. Die Histogramme werden gemäss folgender Formel erstellt:

$$\text{Hist} \left(\frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \right) \quad (1)$$

P_i = Mittlerer Stromverbrauch eines Gebäudes in einer viertel Stunde

n = Anzahl Gebäude

i = Gebäude

Für Abbildung 10 wurden folgende Anzahl Gebäude verwendet: $n = [1, 5, 10, 50]$.

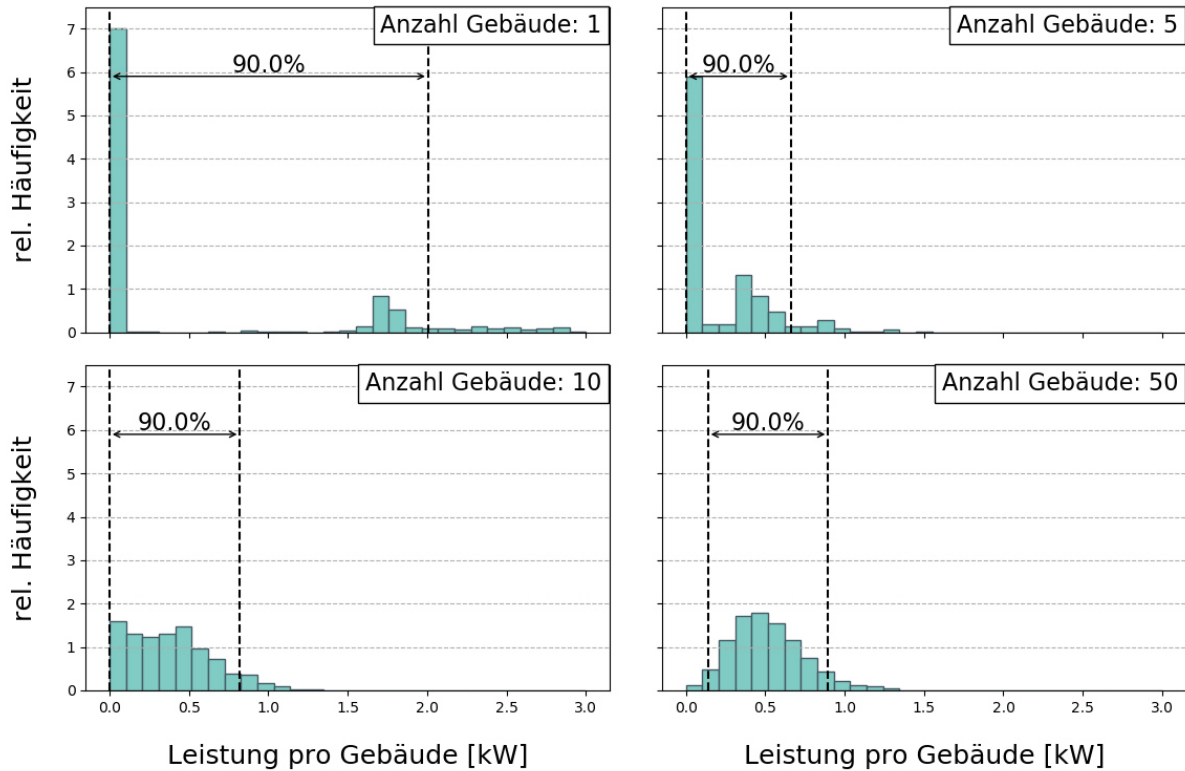


Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Leistung jeder viertel Stunde im Mai 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 13.2 °C.

Das Konfidenzintervall zeigt die Grenzen an, zwischen welchen sich 90% der Werte befinden. Die Grafiken zeigen, dass eine höhere Anzahl von Gebäuden dazu führt, dass seltener gar kein Strom verbraucht wird und die Leistung weniger gestreut ist. Dies kann ebenfalls mit den Standardabweichungen beobachtet werden. Abbildung 11 stellt die Mittelwerte und die Standardabweichungen in Funktion der Anzahl aggregierter Gebäude dar.

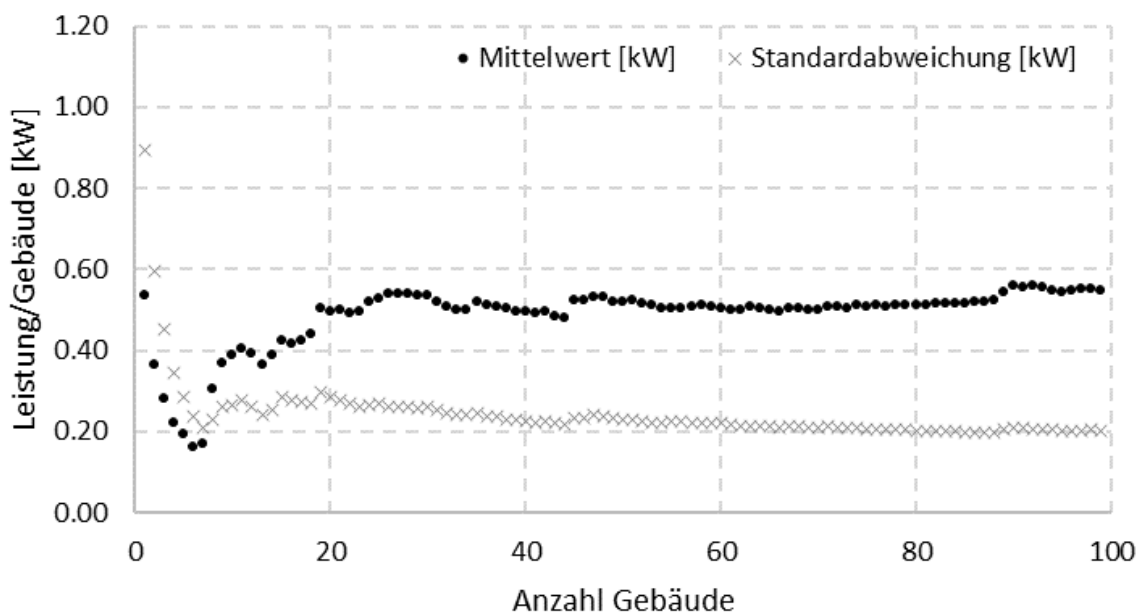


Abbildung 11: Mittelwert und Standardabweichung des Stromverbrauches im Mai 2019 in Funktion der Anzahl aggregierter Gebäude bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 13.2 °C.

Mit einer zunehmenden Anzahl an Gebäuden nimmt die Standardabweichung ab. Mit nur einem Gebäude ist der Mittelwert kleiner als die Standardabweichung. Eine Vorhersage der Leistung ist in diesem Fall kaum möglich. Wie erwartet, wird mit einem einzelnen Gebäude am häufigsten keine Leistung verbraucht. Das Konfidenzintervall beinhaltet sowohl eine Leistung von 2 kW als auch eine Leistung von 0 kW. Die Vorhersage für ein einzelnes Gebäude ist demzufolge sehr unsicher. Je mehr Gebäude man aggregiert, desto seltener tritt der Fall auf, in dem keine Leistung verbraucht wird. Mit 50 Gebäuden wird bereits mit einer Sicherheit von 90% im Durchschnitt zwischen 0.14 kW und 0.89 kW pro Gebäude verbraucht. Der Mittelwert des Verbrauchs beträgt 0.52 kW pro Gebäude. Von 10 Gebäuden zu 50 Gebäuden verkleinert sich ausserdem die Breite des Konfidenzintervalls, weil die Standardabweichung abnimmt.

Die drei Histogramme mit einer Gebäudeanzahl von 1, 5 und 10 zeigen, dass die Daten mit einer ungenügenden Anzahl an Gebäuden nicht normalverteilt sind. Nicht normalverteilte Daten können schlecht geschätzt werden, weshalb keine präzise Vorhersage möglich ist. Daher ist auch der Mittelwert der Daten nur wenig aussagekräftig.

Besonders bei einer geringen Anzahl an Gebäuden führt das Aggregieren zu einer starken Verbesserung der Sicherheit der Vorhersage. Je mehr Gebäude man aggregiert, desto höher ist der Mittelwert und desto weniger weichen die Werte von diesem ab.

Ähnliche Resultate wurden ebenfalls im Winter beobachtet. Die Beschreibung und die entsprechenden Grafiken befinden sich unter Anhang 11.8 und Anhang 11.9.

Die Analysen in Anhang 11.10 zeigen die durchschnittliche Häufigkeitsverteilung von 50 Gebäuden ohne Aggregieren. Die Beobachtungen bestätigen die Wichtigkeit des Aggregierens.

6.8.2 Auswirkung des Gruppierens von Gebäuden

Nicht immer muss die Leistung aller aggregierten Gebäude unterbunden werden. Im folgenden Abschnitt wird deshalb untersucht, wie genau der Strombedarf vorhergesagt werden kann, wenn die aggregierten Gebäude in Gruppen unterteilt werden.

Nachfolgend wird ein Histogramm mit 10 Gruppen à 5 Gebäuden erstellt. Dazu berechnet man zuerst den durchschnittlichen Stromverbrauch jeder Gruppe von 5 Gebäuden, erstellt die Häufigkeitsverteilung und mittelt die Häufigkeitsverteilungen der 10 Gruppen, um ein durchschnittliches Histogramm zu erstellen. Die Formel zum Erstellen des Histogramms lautet wie folgt:

$$\frac{\sum_{j=1}^{10} \left(\text{Hist}_j \left(\frac{\sum_{i=1}^5 P_i}{5} \right) \right)}{10} \quad (2)$$

P_i = Mittlerer Stromverbrauch eines Gebäudes in einer viertel Stunde

i = Gebäude

j = Gruppe

Abbildung 12 stellt ein Histogramm mit 150 gleich grossen Klassen von 0.1 kW dar.

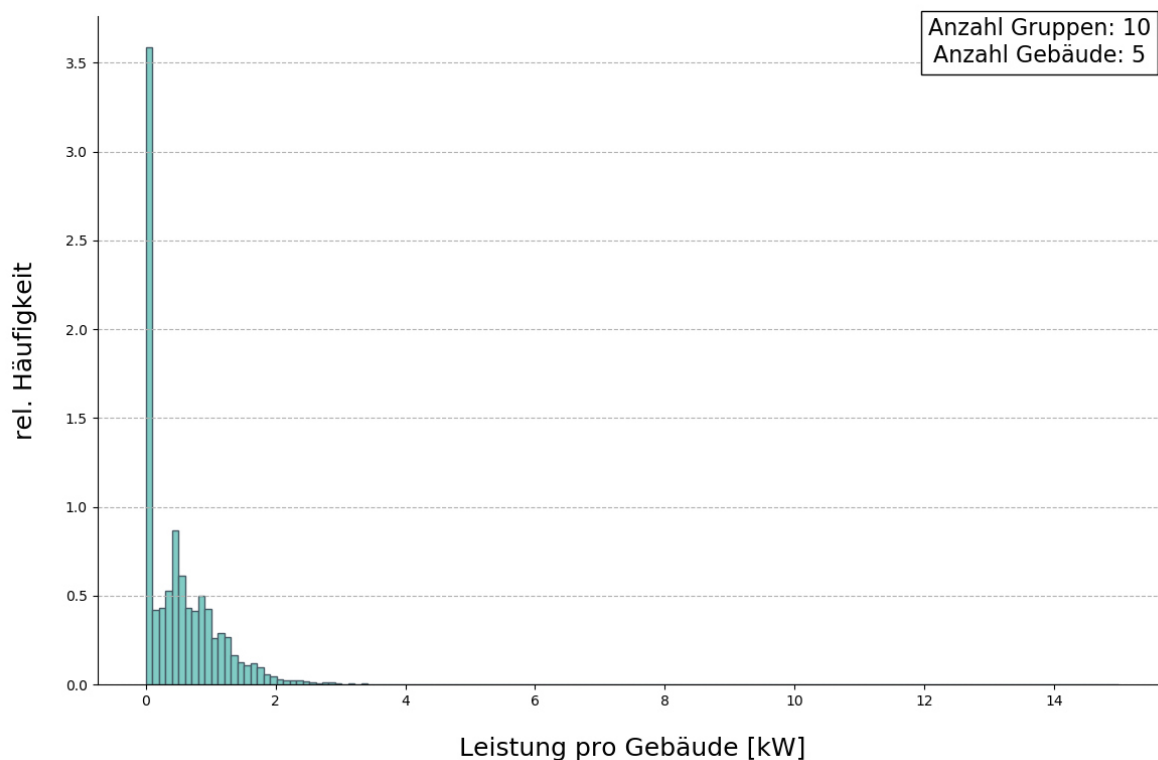


Abbildung 12: Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung von 10 Gruppen à 5 Gebäude im Mai 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 13.2 °C.

Die Unterteilung der Gebäude in Gruppen führt dazu, dass die Leistung nicht mehr normalverteilt ist. Der Strombedarf kann nicht präzise vorhergesagt werden.

Die Häufigkeit, mit der keine Leistung verbraucht wird, ist sehr hoch. Der durchschnittliche Mittelwert aller Gruppen beträgt 0.52 kW und die durchschnittliche Standardabweichung

0.58 kW. Wird nur ein Teil der aggregierten Flexibilität der Gebäude benötigt, ist das Risiko einer Falscheinschätzung erhöht.

Auch während der Heizperiode führt das Gruppieren von Gebäuden zu ähnlichen Resultaten, wie dies in Anhang 11.11 beobachtet wird.

6.8.3 Einfluss der Tageszeit auf den Stromverbrauch

In Kapitel 6 wurde bereits erwähnt, dass der Stromverbrauch im Verlauf des Tages variiert. Es ist anzunehmen, dass die Häufigkeitsverteilung zu gewissen Tageszeiten breiter gestreut ist. Deswegen wird der durchschnittliche Leistungsverbrauch von 50 Gebäuden in acht Intervalle von drei Stunden aufgeteilt und für jedes Intervall ein Histogramm gemäss Formel 1 erstellt. Für die Erstellung des Histogramms wurde der Verbrauch erneut in gleich grosse Klassen mit einer Breite von 0.1 kW eingeteilt. Abbildung 13 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der Leistung im Mai während jeweils drei Stunden.

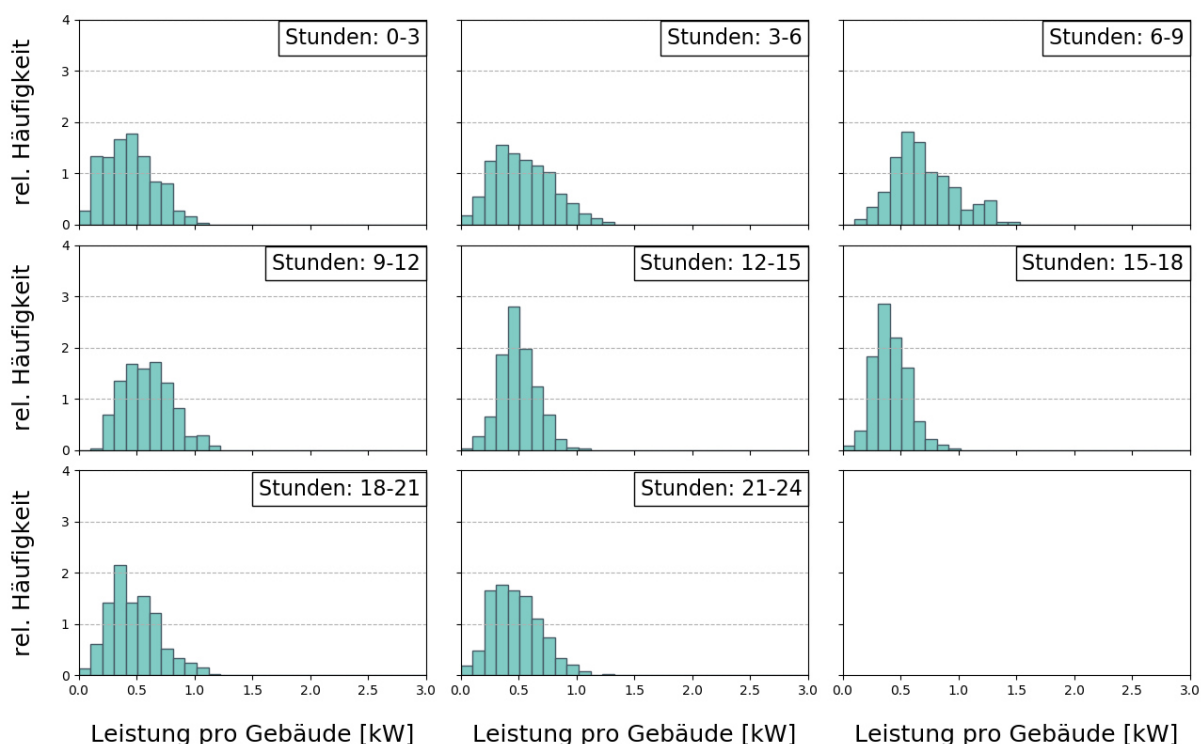


Abbildung 13: Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung des mittleren Stromverbrauchs von 50 Gebäuden aufgeteilt in acht Intervalle à drei Stunden im Mai 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 13.2 °C.

Es wird beobachtet, dass die Streuung breiter ausfällt bei erhöhter durchschnittlicher Leistung, wie dies beispielsweise von 6:00 bis 9:00 Uhr der Fall ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass gar kein Strom verbraucht wird, ist in diesem Fall gering. In diesem Zeitraum kann mehr Leistung unterbunden werden, jedoch ist das Risiko grösser, dass der Strombedarf falsch eingeschätzt wird.

Während den Zeiträumen mit einem tiefen Warmwasserverbrauch, beispielsweise während 12:00 bis 18:00 Uhr, ist die Streuung weniger breit, und der Mittelwert der verbrauchten Leistung niedriger.

Tabelle 3: Mittelwerte und Standardabweichungen des Stromverbrauches pro Gebäude zu verschiedenen Tageszeiten. Es wurden die Daten von 50 Gebäuden im Mai 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 13.2 °C verwendet.

Stunden	Mittelwert [kW]	Stdabw. [kW]
0-3	0.45	0.22
3-6	0.54	0.26
6-9	<u>0.71</u>	<u>0.28</u>
9-12	0.61	0.22
12-15	0.50	0.16
15-18	<u>0.42</u>	<u>0.15</u>
18-21	0.49	0.23
21-24	0.49	0.22

Tabelle 3 unterstützt diese Beobachtungen. Wenn der Mittelwert höher ist, so fällt auch die Standardabweichung höher aus. Im Gegensatz dazu sind die Werte mit einem tieferen Mittelwert weniger gestreut.

Um das Risiko einer falschen Vorhersage einschätzen zu können, ist es also wichtig, nicht nur die Anzahl Gebäude zu betrachten, sondern auch den Zeitraum.

Zeiträume mit einem überdurchschnittlichen Verbrauch besitzen mehr Potenzial für das Unterbinden von Leistung, sind aber mit einem höheren Risiko einer Falscheinschätzung verbunden. Die Grafik unter Anhang 11.12 zeigt, dass der Stromverbrauch während der Heizperiode den ganzen Tag mehr gestreut ist, als im Mai. Der durchschnittliche Verbrauch ist auch während 6:00 bis 9:00 Uhr am höchsten.

6.8.4 Energieverbrauch und Betriebsdauer

Die Flexibilität von elektrischen Anlagen hängt nicht nur von der verbrauchten Leistung, sondern auch von der Dauer des Verbrauches, beziehungsweise der Energie ab. Der Zeitraum zwischen dem Einschalten der elektrischen Anlagen bis hin zum Wiederausschalten wird als Event bezeichnet. In Anhang 11.13 wird beschrieben, wie berechnet wurde, wie lange ein Event dauert und wie viel Energie währenddessen verbraucht wird.

Mit den berechneten Werten wurden Histogramme erstellt, um die Häufigkeitsverteilung des Energieverbrauchs und der Dauer der Events zu analysieren. Für das Histogramm des Energieverbrauchs wurden 30 Klassen zwischen 0 und 25 kWh gewählt, was einer Klassenbreite von 0.83 kWh entspricht. Für das Histogramm der Dauer wurden 30 Klassen zwischen 0 und 5 h gewählt, was einer Klassenbreite von 10 min. entspricht.

Gezählt wurden sämtliche Events aller 31 Gebäude im Monat Mai 2019. Die Häufigkeitsverteilung des Energieverbrauchs ist in Abbildung 14 dargestellt.

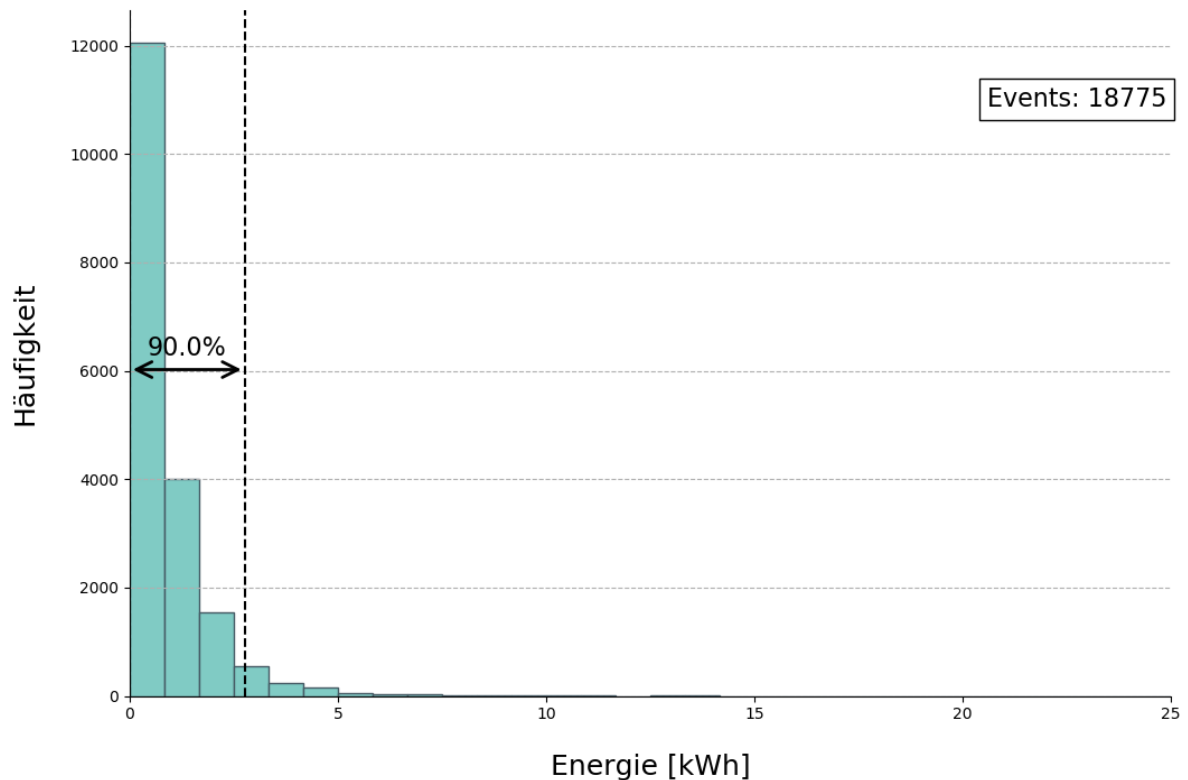


Abbildung 14: Häufigkeitsverteilung des Energieverbrauchs der Events im Mai 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 13.2 °C. Gezählt wurden 18'775 Events von 31 Gebäuden.

In 90% der Fälle wird während einem Event weniger als 2.76 kWh verbraucht. Der durchschnittliche und der maximale Energieverbrauch im Mai betragen 0.87 kWh respektiv 23.39 kWh. Gemäss Anhang 11.14 wird während der Heizperiode ungefähr ein Drittel mehr Energie verbraucht.

Die Dauer der Events sind in Abbildung 15 abgebildet.

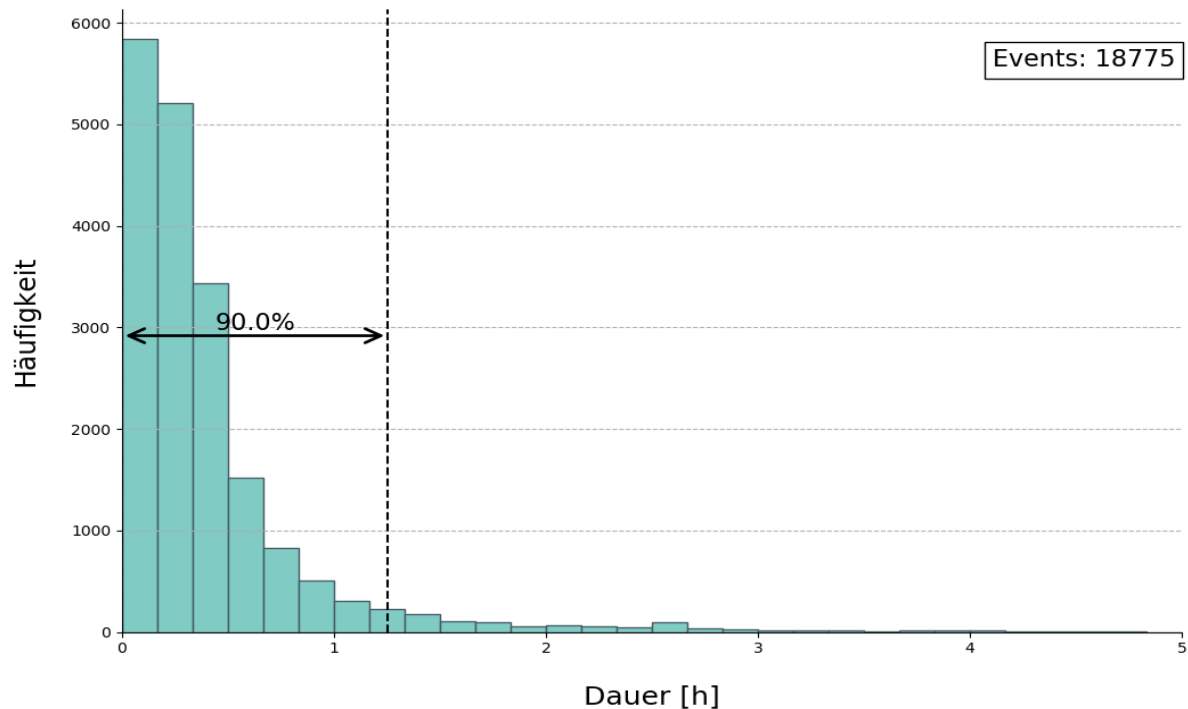


Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der Dauer der Events im Mai 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 13.2 °C. Gezählt wurden 18'775 Events von 31 Gebäuden.

Die meisten Events sind von kurzer Dauer. Die Dauer von 90% der Events beträgt weniger als 1 h und 15 min.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Event eines Gebäudes im Durchschnitt nur etwa 24 Minuten dauert. Zum Vergleich, ein Event während der Heizperiode dauert ungefähr 34 Minuten, wie dies in Anhang 11.15 gezeigt wird. Wie auch schon im Kapitel 6.8.1 erklärt wurde, ist es sinnvoll, Gebäude zu aggregieren. Das Aggregieren von Gebäuden erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass während der Zeit der Trennung der Lasten ein Event stattfinden würde und somit Energie gespart wird. Aus diesem Grund steht mit aggregierten Gebäuden nicht nur mehr Leistung, sondern auch mehr Energie zur Verfügung, welche gesteuert werden kann.

6.8.5 Durchschnittlicher Stromverbrauch

Es konnte gezeigt werden, dass die Häufigkeitsverteilung sowohl von der Tageszeit als auch von der Jahreszeit abhängt. Für eine präzise Vorhersage der Flexibilität müssen diese Parameter berücksichtigt werden.

Die Heatmap in Abbildung 16 zeigt die durchschnittliche Leistung der Wohngebäude jedes Monats des Jahres und jeder Stunde des Tages auf.

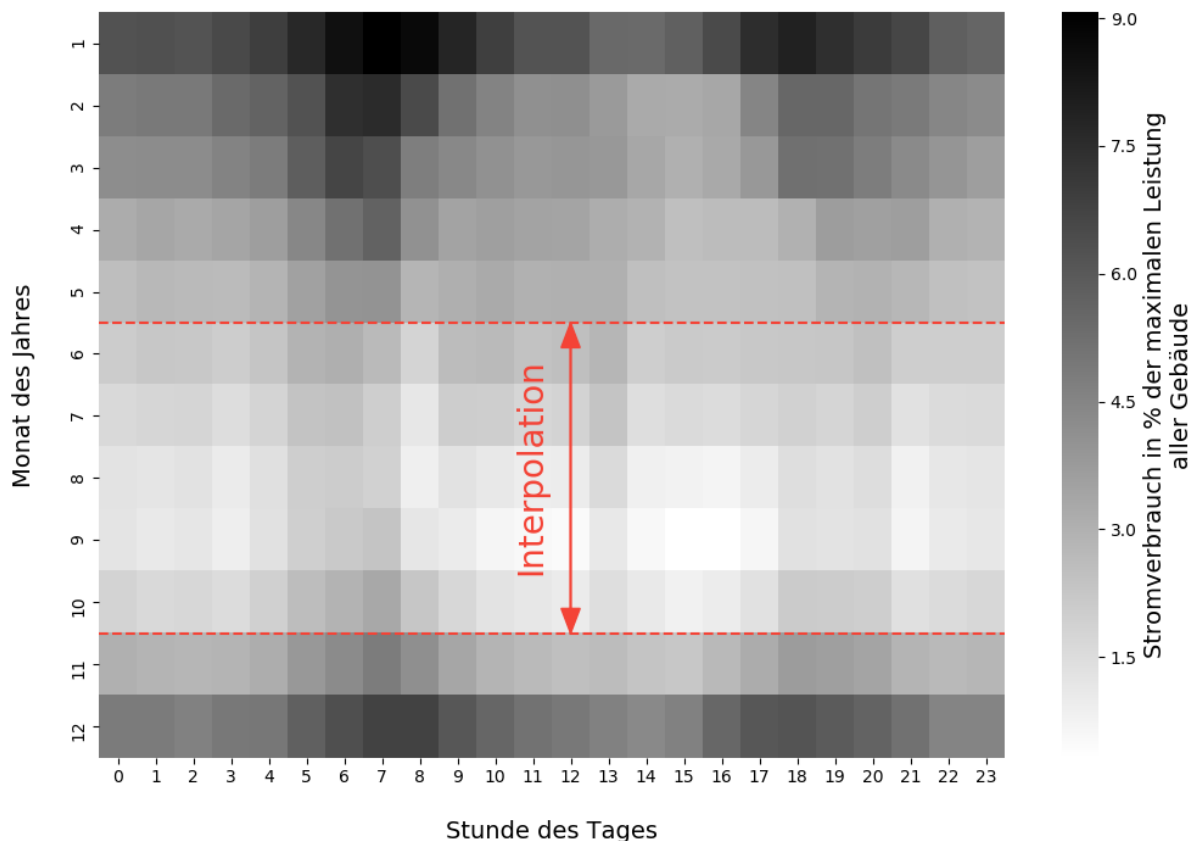


Abbildung 16: Prozentualer Anteil des durchschnittlichen Stromverbrauchs am maximalen Stromverbrauch von 56 Gebäuden für jeden Monat des Jahres und jede Stunde des Tages.

Bei den Werten handelt es sich um den prozentualen Anteil am maximalen Stromverbrauch aller Gebäude.

Für die Berechnung des zu erwartenden Stromverbrauchs wurde von 56 Gebäuden für jeden Monat der durchschnittliche Verbrauch im Verlauf des Tages berechnet.

Auf Grund von unzureichenden Messwerten musste die Leistung der Monate Juni bis Oktober auf der Heatmap interpoliert werden. Für die fehlenden Monate wird ein ähnliches Verhalten wie im Mai erwartet, wobei der Strombedarf geringfügig tiefer ausfallen dürfte, weil die Anzahl betriebener Heizungen weiter abnimmt. Unter Kapitel 6.4 wurde bereits erwähnt, dass eine Kohärenz zwischen der Aussentemperatur und dem Strombedarf besteht. Die Form der Aussentemperaturkurve von Juni bis Oktober ist polynomial im zweiten Grad. Deshalb wurde eine polynomiale Interpolation 2. Grades angewandt, um die Leistung während den fehlenden Monaten zu ergänzen. Wenn die maximale Leistung eines Gebäudes bekannt ist, kann diese mit dem Wert der Grafik multipliziert werden, um den Stromverbrauch vorherzusagen.

Die maximale Leistung eines Gebäudes ist nicht immer bekannt, deswegen ist es oftmals einfacher, den durchschnittlichen Verbrauch an Hand von Messwerten zu ermitteln. Die Grafik in Anhang 11.16 dient der Vorhersage des Stromverbrauchs mit Hilfe des durchschnittlichen Verbrauches eines Gebäudes.

Der Stromverbrauch ist am höchsten in den Wintermonaten von 6:00 bis 8:00 Uhr. Die tiefsten Werte werden im Sommer von 15:00 bis 16:00 Uhr erreicht. Die höchste Flexibilität wird im Monat Februar erreicht. Während diesem Monat treten grosse Verbrauchsspitzen auf und gleichzeitig ist der Verbrauch während dem Rest des Tages relativ gering. Das bedeutet, dass der Stromverbrauch öfter zum selben Zeitpunkt anfällt und somit einfacher vorhergesagt werden kann. In Monaten wie im August ist der Stromverbrauch von Wohngebäuden am wenigsten flexibel. Der anfallende Stromverbrauch ist sehr gering und tritt willkürlich auf.

6.8.6 Interpretation

Der Stromverbrauch der Heiz- und Warmwasseranlagen von einzelnen Wohngebäuden kann nur schlecht vorhergesagt werden, weil die Anlage in den meisten Fällen entweder gar keinen Strom oder die maximale Leistung verbraucht. Versucht man hingegen den Stromverbrauch von vielen Gebäuden vorherzusagen, wird ein Teil der Gebäude keinen Strom verbrauchen und ein Teil die maximale Leistung. Dadurch gleicht sich der Verbrauch aus und die Wahrscheinlichkeit, dass der Stromverbrauch nahe am durchschnittlichen Verbrauch aller Gebäude liegt, nimmt zu.

Während der Heizperiode fällt der Stromverbrauch im Allgemeinen höher aus, allerdings ist auf Grund der breiteren Streuung der Werte die Vorhersage des Verbrauchs weniger präzise.

Die Analyse ergab ausserhalb der Heizperiode eine durchschnittlich zur Steuerung verfügbare Leistung von etwa 0.5 kW pro Gebäude. Damit genügend Energie für die Tertiärregelung bereitstehen würde, müssen mindestens 10'000 Gebäude gleichzeitig als Reserve zur Verfügung stehen. Im Wallis gibt es nur wenige Verteilnetzbetreiber mit so vielen Kunden. Zudem muss gewährleistet werden, dass diese Leistung jederzeit zur Verfügung steht, wodurch die Flexibilität nicht mehr andernorts eingesetzt werden kann. Die Flexibilität eignet sich am besten für die Reduzierung der Kosten der Ausgleichsenergie.

6.9 Tests

Bei den bisherigen Analysen wird das Verhalten der Lasten eines Wohngebäudes in seinem normalen Zustand beschrieben. Um die Flexibilität der Wohngebäude besser beschreiben zu können, ist es ebenfalls wichtig zu wissen, wie sich das Verhalten ändert, sobald die Lasten gesteuert werden.

Entsprechend wurden diverse Tests an den Gebäuden durchgeführt. In diesem Teilkapitel werden die Resultate der Tests ausgewertet.

6.9.1 Phase 1 – Stündlicher Wechsel ON/OFF des Boilers eines Gebäudes

Während der Testphase 1 wurde das Gebäude Semiah1 gesteuert, welches nicht Teil des GOFLEX Projekts ist, jedoch ebenfalls über MQTT gesteuert werden kann. Bei diesem Gebäude können der Boiler und die Heizung separat gesteuert und gemessen werden.

Der erste Test soll zeigen, dass der Stromverbrauch des Boilers komplett unterbunden werden kann, sich dieser jedoch beim Wiedereinschalten willkürlich verhält.

Hierfür wurde die Steuerung so programmiert, dass der Zustand der Relais des Boilers jede Stunde gewechselt wird. Während geraden Stunden werden die Relais geöffnet und während ungeraden Stunden geschlossen.

Die Testphase 1 begann am 21.05.2019 und dauerte bis zum 04.06.2019. Messfehler wurden für die Analyse entfernt.

Aus den erhaltenen Messwerten wurde der durchschnittliche Stromverbrauch jeder viertel Stunde des Tages berechnet. Damit die Ergebnisse verglichen werden können, wurden die Messwerte des Stromverbrauchs des Boilers während einem Jahr verwendet und ebenfalls auf die viertel Stunden des Tages gemittelt.

In der Abbildung 17 wird der normale Stromverbrauch des Boilers und der Verbrauch während der Testphase angezeigt. Die grau eingefärbten Flächen entsprechen den Stunden, in denen die Stromzufuhr unterbunden wurde.

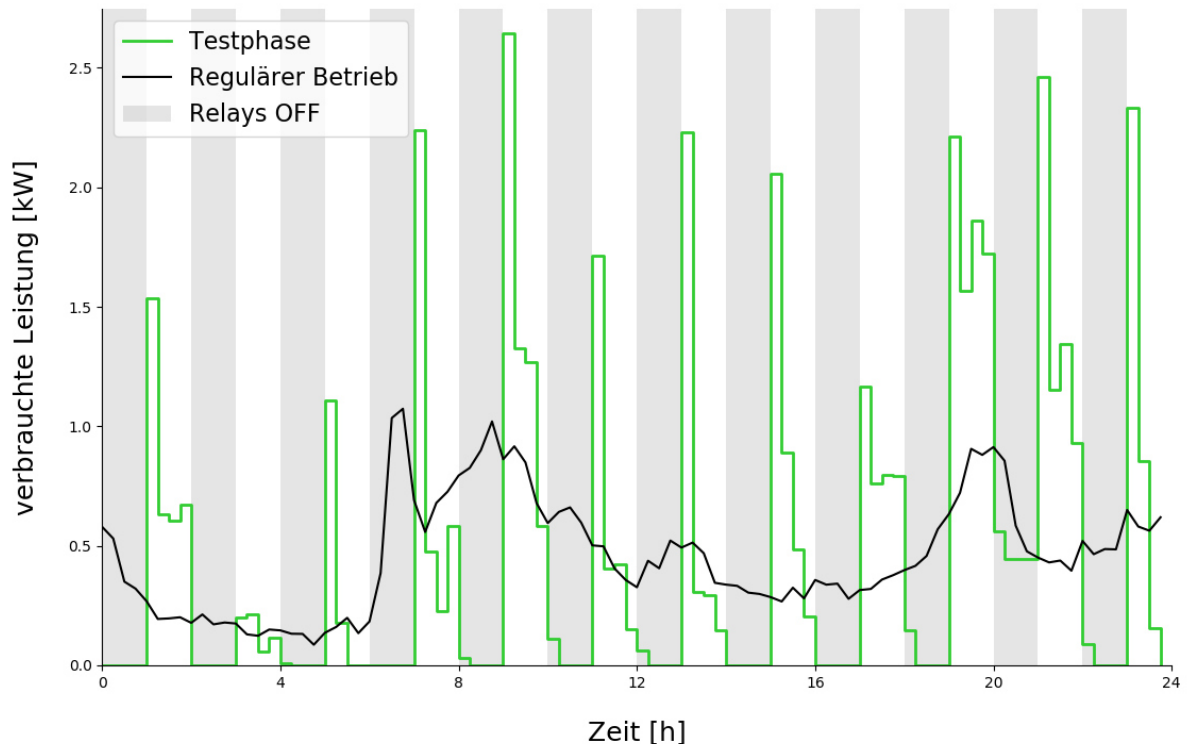


Abbildung 17: Durchschnittlicher Tagesverlauf (Mittelwert jeder viertel Stunde) des Stromverbrauchs des Boilers (Semiah1) vor der Testphase (schwarz) und während der Testphase vom 21.05.2019-04.06.2019 (grün). Graue Flächen: Zeiträume ohne Stromzufuhr.

Das Ergebnis zeigt, dass es möglich ist, den Stromverbrauch komplett zu unterbrechen. Der in den grauen Flächen ersichtliche Stromverbrauch ist auf Übertragungsprobleme der Steuersignale zurückzuführen. Nach dem Wiedereinschalten der Relais ist der Verbrauch deutlich höher als dies vor der Testphase der Fall war. Teils werden Peaks von über 2.5 kW erreicht, dies ist in etwa das 5-fache des durchschnittlichen Stromverbrauchs im regulären Zustand. Das liegt daran, dass der Boiler die Energie kompensieren muss, die er während der Zeit ohne Stromzufuhr nicht abgeben konnte. Dieser Effekt wird auch Rebound-Effekt genannt. Der Strombedarf nach dem Wiedereinschalten fällt sehr unterschiedlich aus, was auf die interne Steuerung der Anlage zurückzuführen ist. Der Energieverbrauch während der Tests fiel nicht höher aus als im Durchschnitt vor der Testphase. Während der Testphase konnte die Warmwassertemperatur aufrechterhalten werden und der Komfort des Kunden wurde dabei nicht eingeschränkt.

6.9.2 Phase 2 – Zweistündige Ausschaltungen des Boilers eines Gebäudes

Für die Testphase 2 wurde erneut das Gebäude Semiah1 gesteuert. Bei diesem Versuch wird der Boiler jeweils während zwei Stunden ausser Betrieb gesetzt und anschliessend für drei Stunden normal betrieben. Die Stunden ohne Stromzufuhr sind die folgenden: [2, 3, 6, 7, 11, 12, 16, 17, 21, 22].

Die Testphase begann am 06.06.2019 und dauerte bis zum 18.06.2019. Mit dem Test soll gezeigt werden, dass eine längere Ausschaltung der Geräte zu einem stärkeren Rebound-Effekt führt und dass der Zeitpunkt der Ausschaltung ebenfalls eine Rolle spielt.

Analog zur ersten Testphase wurden die Mittelwerte jeder viertel Stunde des Tages während der Testphase ermittelt und dem Stromverbrauch während dem regulären Betrieb gegenübergestellt, wie dies in Abbildung 18 dargestellt wird.

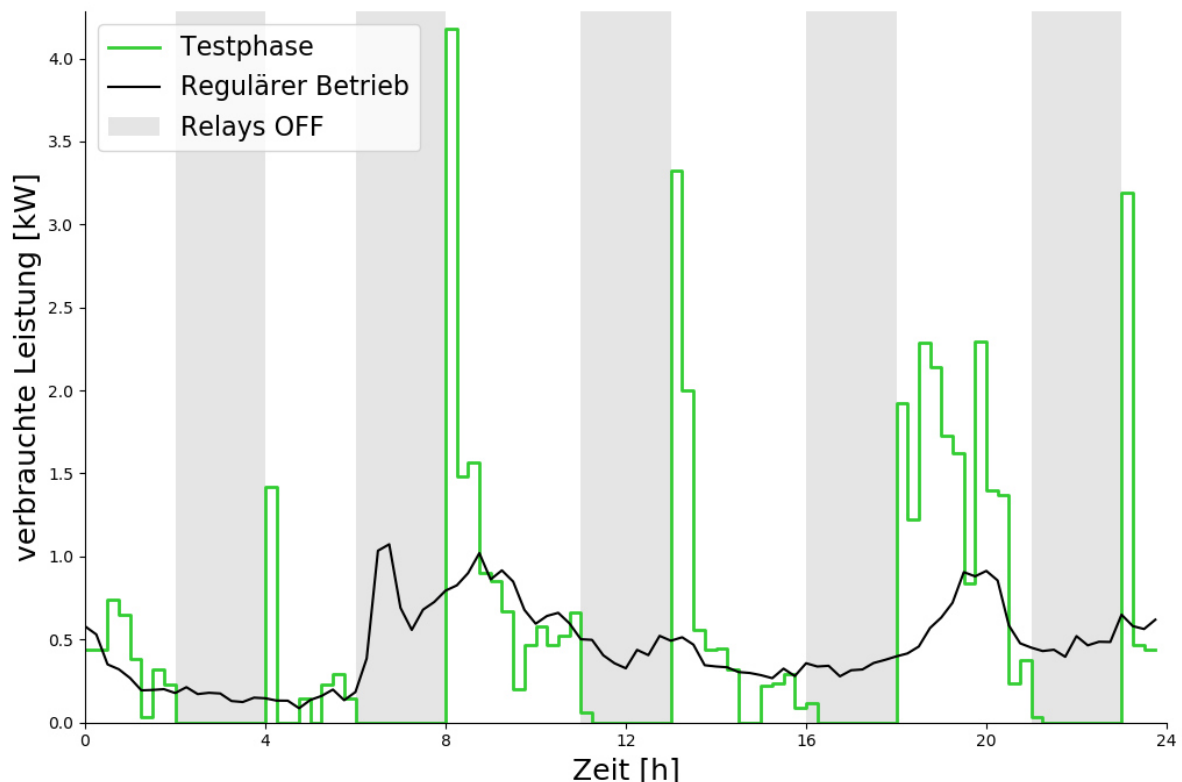


Abbildung 18: Durchschnittlicher Tagesverlauf (Mittelwert jeder viertel Stunde) des Stromverbrauchs des Boilers (Semiah1) vor der Testphase (schwarz) und während der Testphase vom 06.06.2019-18.06.2019 (grün). Graue Flächen: Zeiträume ohne Stromzufuhr.

Erneut beobachtet man, dass in der Testphase kein Verbrauch während den Zeiten ohne Stromzufuhr (grau) gemessen wird. Die Rebound-Verbrauchsspitzen (grüne Kurve) können Werte von bis zu 3.5 kW erreichen, sprich das 7-fache des durchschnittlichen Stromverbrauchs. Während den Zeiten mit einem hohen Stromverbrauch im regulären Betrieb (8:00-11:00 Uhr und 18:00-21:00 Uhr) wird nach dem Wiedereinschalten des Boilers besonders viel Energie verbraucht. In der Nacht, wenn durchschnittlich wenig Strom verbraucht wird, fällt die Verbrauchsspitze tiefer aus und es wird weniger Energie verbraucht. Während der Testphase wurde insgesamt ca. 10% mehr Energie verbraucht als während dem regulären Betrieb. Der Unterschied ist so gering, dass er ebenfalls Folge einer Abweichung im Verhaltensmuster des Verbrauchers sein kann.

Während der Testphase konnte die Warmwassertemperatur aufrechterhalten werden und es wurden keine Zwischenfälle verzeichnet.

6.9.3 Phase 3 – Vierstündige Ausschaltungen des Boilers eines Gebäudes

In der Testphase 3 wurde ebenfalls das Gebäude Semiah1 getestet. Während dieser Phase wurde die Last zwei Mal am Tag (6:00-10:00 Uhr und 18:00-22:00 Uhr) um jeweils vier Stunden verschoben. Die Testphase begann am 24.06.2019 und dauerte bis zum 08.07.2019. Zusätzlich zu den Beobachtungen der ersten zwei Tests wird mit diesem Test analysiert, wie sich das System von einer längeren Ausschaltung erholt.

In Abbildung 19 werden die Mittelwerte jeder viertel Stunde des Tages während der Testphase dem Stromverbrauch während dem regulären Betrieb gegenübergestellt.

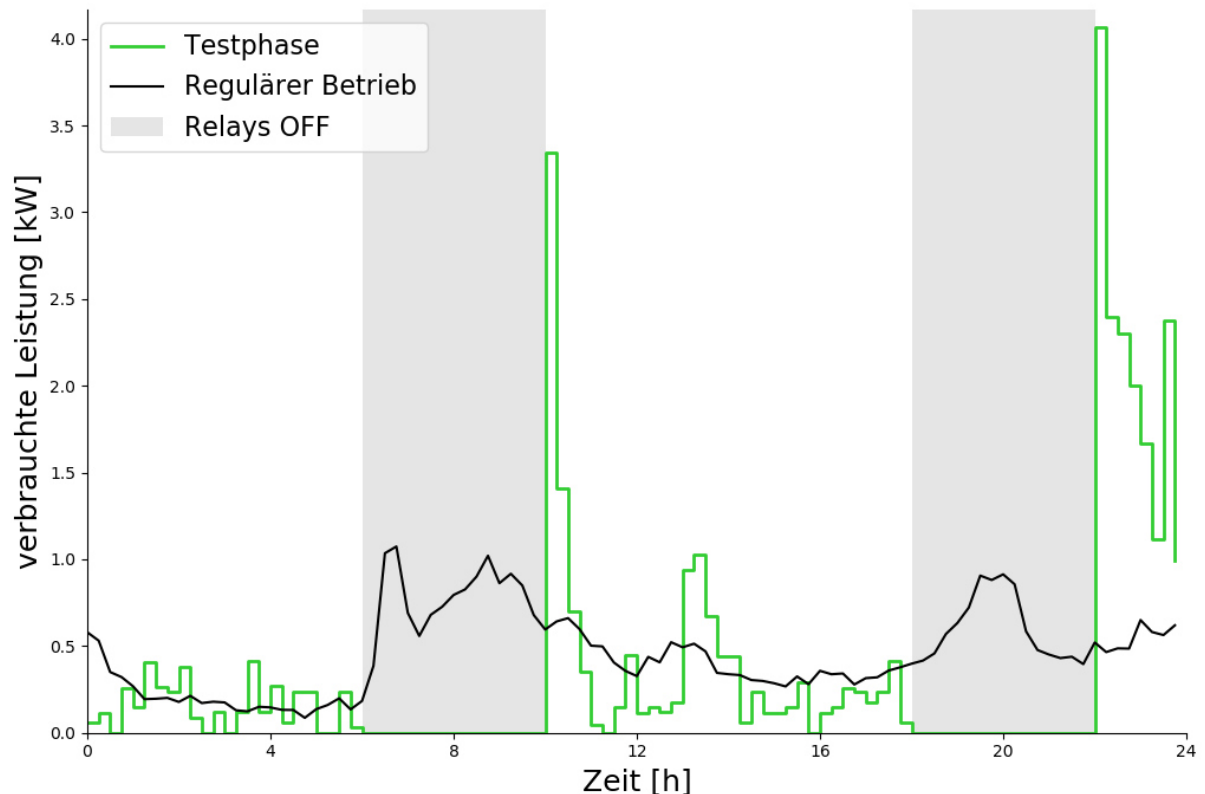


Abbildung 19: Durchschnittlicher Tagesverlauf (Mittelwert jeder viertel Stunde) des Stromverbrauchs des Boilers (Semiah1) vor der Testphase (schwarz) und während der Testphase vom 24.06.2019-08.07.2019 (grün). Graue Flächen: Zeiträume ohne Stromzufuhr.

Beim Wiedereinschalten (grüne Kurve), sprich um 10:00 Uhr und 22:00 Uhr erreicht der Verbrauch hohe Spitzen. Um 22:00 Uhr wurde im Durchschnitt während der Testphase 4 kW Strom für den Boiler verbraucht. Dies entspricht bereits 67 % der maximalen Leistung der Anlage und dem 8-fachen des durchschnittlichen Verbrauchs. Während der Testphase wurde ungefähr 25 % weniger Energie verbraucht, als während dem regulären Betrieb.

Auf der Grafik kann beobachtet werden, dass der Strombedarf nach dem Rebound-Effekt tiefer ausfällt, als dies im regulären Betrieb der Fall ist. Es sieht aus, als würde der Strombedarf nach dem Wiedereinschalten um die Kurve des regulären Betriebs oszillieren.

Die Warmwassertemperatur befand sich während der Testphase im normalen Bereich und der Komfort wurde nicht eingeschränkt.

6.9.4 Phase 4 – Dreistündige Ausschaltung der Lasten von 18 Gebäuden

Die Testphase 4 begann am 26.06.2019 und dauerte bis zum 09.07.2019. In dieser Phase wurden 31 Gebäude des Projekts GOFLEX gesteuert. Unter dem Kapitel 6.1 wurde bereits erwähnt, dass in den meisten Gebäuden des Projekts GOFLEX eine Wärmepumpe für Warmwasseraufbereitung und Heizung zuständig ist. Aus diesem Grund ist es teils nicht möglich, den Stromverbrauch für die Warmwasseraufbereitung einzeln zu trennen und zu messen. Weil aber die Testphase ausserhalb der Heizperiode stattfindet, wird davon ausgegangen, dass die Heizung während diesem Zeitraum keinen Strom verbraucht.

Während der Testphase wurde die Stromzufuhr sämtlicher Heiz- und Warmwassersysteme jeden zweiten Tag von 6:00 bis 9:00 Uhr unterbunden. Jeder zweite Tag, an dem die Stromzufuhr erhalten blieb, dient als Referenz für das Verhalten ohne Steuerung. Am Ende der Testphase steht jeder Wochentag jeweils einmal als Referenz und einmal als Testwert zur Verfügung.

Während der Testphase wurde die Datenübertragung vom 08.07.2019 bis 09.07.2019 unerwartet unterbrochen, deswegen wurden dieselben Wochentage der darauffolgenden Woche (15.07.2019 und 16.07.2019) gesteuert, um die Messwerte zu ergänzen.

Während der Testphase sind einige Anlagen ausgefallen oder enthielten zum Teil fehlerhafte Werte. Aus diesem Grund konnten schlussendlich noch 18 Gebäude für die Analyse verwendet werden. Die Messgeräte dieser Testgruppe besitzen eine höhere Auflösung, weshalb die Mittelwerte des Stromverbrauchs aller 5 Minuten des Tages aller Gebäude während der Testphase berechnet wurden. Als Referenzwerte wurden die Mittelwerte jeder Stunde des Tages aller Gebäude an Tagen ohne Steuerung verwendet. Die Messwerte während der Testphase sind in Abbildung 20 den Messwerten während den Referenztagen gegenübergestellt.

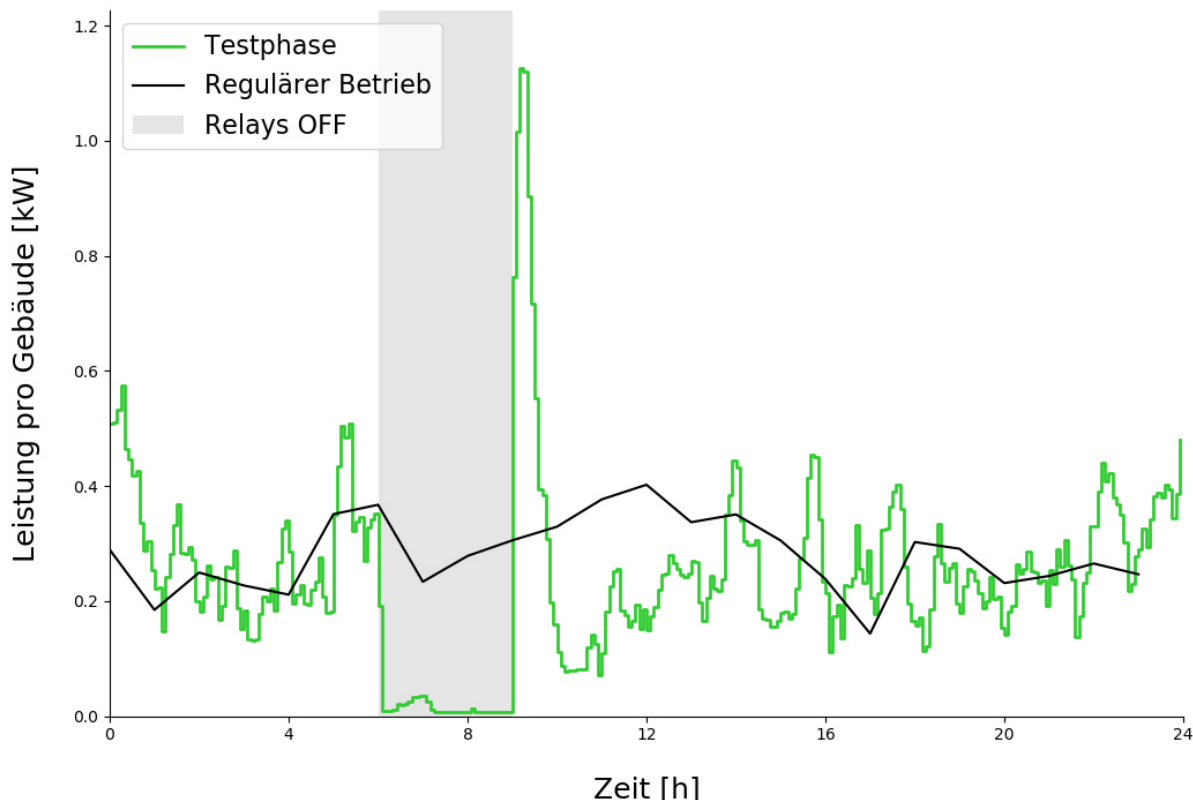


Abbildung 20: Durchschnittlicher Tagesverlauf des Stromverbrauchs pro Gebäude vor der Testphase (schwarz) und während der Testphase vom 26.06.2019-09.07.2019 (grün, Mittelwert aller 5 Minuten). Graue Flächen: Zeiträume ohne Stromzufuhr. Anzahl Gebäude: 18.

Die Resultate der Testphase 4 in Abbildung 20 zeigen den durchschnittlichen Stromverbrauch pro Gebäude während den Tagen ohne Steuerung (in grau), welche als Referenzwerte dienen, sowie den durchschnittlichen Stromverbrauch pro Gebäude an den Tagen mit Steuerung. Wie bereits mit den anderen Tests festgestellt werden konnte, ist der Stromverbrauch nach dem Wiedereinschalten der Anlagen deutlich höher. Die Spitze beträgt in etwa das 3-fache des Mittelwerts. Kurz nach dem Spitzenbedarf ist der Verbrauch in etwa halb so gross wie während den Referenztagen. Die internen Steuerungen der Geräte führen dazu, dass ein Grossteil der Anlagen nach dem Rebound-Effekt in einem ähnlichen Zeitraum wieder ausgeschaltet werden. Die Kurve oszilliert bis ungefähr 18:00 Uhr, bevor sich der Stromverbrauch wieder wie die Referenz verhält. Nach dem Wiedereinschalten der Anlagen dauerte es in der Testphase ungefähr neun Stunden, bis sich das System erholen konnte.

Während der Testphase fiel der Energiebedarf an den Tagen mit Steuerung 15% tiefer aus, als an den Referenztagen. Die Abweichung ist zu gering, um einen Zusammenhang zur Steuerung herstellen zu können.

6.9.5 Phase 5 – Zwölfstündige Ausschaltung der Lasten von 11 Gebäuden

In der Testphase 5 wurden die Anlagen einiger Gebäude des Projekts GOFLEX während 12 Stunden ausgeschaltet. Die Ausschaltung fand am 09.09.2019 von 4:00 – 16:00 Uhr statt. Der Test soll zeigen, dass nach einem längeren Trennen der Kontakte der Relais die Wahrscheinlichkeit zunimmt, dass eine Anlage beim Wiedereinschalten Strom verbraucht. Von den getesteten Gebäuden konnten die Messwerte von 11 Gebäuden verwendet werden. Die Auflösung der Messwerte wurde auf Intervalle von viertel Stunden heruntersetzt und gemittelt. Von den 11 Gebäuden waren die Anlagen von 10 Gebäuden innerhalb der ersten viertel Stunde nach dem Wiedereinschalten in Betrieb. In der Abbildung 21 wird der Stromverbrauch vom 08.08.2019 bis 14.08.2019 mit einer Auflösung von 15 Minuten angezeigt

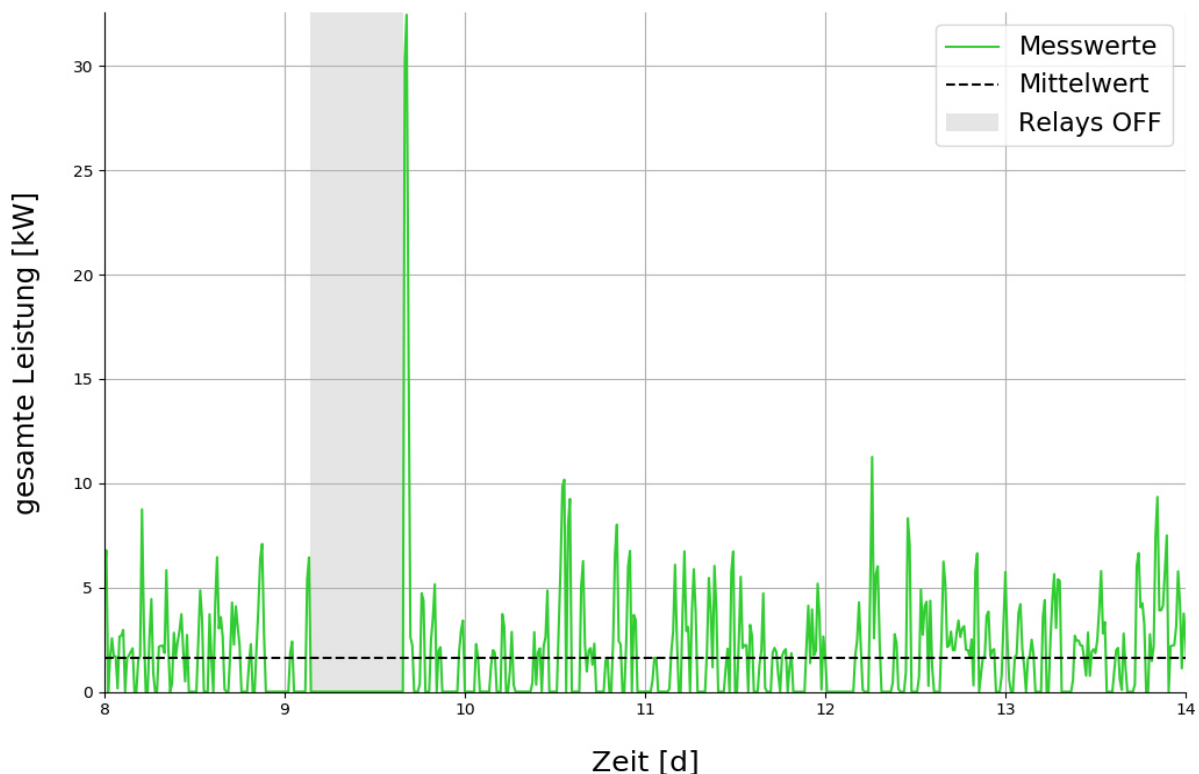


Abbildung 21: Stromverbrauch von 11 Gebäuden. Zwischen 04:00 und 16:00 am 09.08.2019 (grau eingefärbt) wurden die Anlagen ausgeschaltet.

In grau ist die Ausschaltung von 4:00 bis 16:00 Uhr am 09. August eingezeichnet. Der durchschnittliche Verbrauch während der Messperiode beträgt 1.6 kW. Die Spitze nach dem Wiedereinschalten am 09.08.2019 beträgt 32.5 kW, sprich das 20-fache des durchschnittlichen Verbrauchs.

Der Versuch zeigt, dass mit einer längeren Ausschaltung der Anlagen bewusst eine Verbrauchsspitze provoziert werden kann. Die Spitze hält jedoch nur 30-45 Minuten an, bevor der Verbrauch wieder unter den Durchschnitt sinkt. In der Nacht vom 9. auf den 10. August wird weniger Strom verbraucht, als dies während den anderen Nächten beobachtet wird. Die Ausschaltung bewirkt demzufolge noch Stunden nach dem Wiedereinschaltung eine Änderung des Verbrauchsverhaltens. Bei solch langen Ausschaltungen besteht das Risiko, dass der Komfort eingeschränkt wird. Von den 11 Gebäuden berichtete ein Kunde über kaltes Wasser. Deshalb ist es während solchen Ausschaltungen notwendig, die Wassertemperatur und während der Heizperiode die Raumtemperatur zu überwachen.

7 Steuerung der Flexibilität

7.1 Ziel

Die Resultate der Quantifizierung der Flexibilität in Kapitel 6 zeigen das Potenzial einer Steuerung der Flexibilität. Die Flexibilität der Wohngebäude kann für verschiedene Zwecke benutzt werden. Beispielsweise für die Tertiärregelung, die Netzentlastung durch Spitzenreduktion oder lokale Spannungsregelung oder für die Reduktion der benötigten Ausgleichsenergie. Eine der grössten Herausforderungen beim Integrieren von erneuerbaren Energien in die bestehenden Stromnetze ist die Volatilität der Stromproduktion. Die starken und unregelmässig anfallenden Produktionsschwankungen erneuerbarer Energien führen dazu, dass sich die BG öfter verschätzen und zu viel oder zu wenig Energie im Voraus kaufen. Damit die Netze trotzdem stabil bleiben, müssen mehr Massnahmen für den Ausgleich getroffen werden, was sich negativ auf die Strompreise auswirkt. Die Flexibilität der Wohngebäude erlaubt es, bei einer Stromunterdeckung, d.h. wenn weniger Energie gekauft wurde als effektiv verbraucht wird, Lasten kurzfristig zu trennen und so den Stromverbrauch zu senken. Folglich wird weniger Ausgleichsenergie benötigt und die Strompreise bleiben stabil.

7.2 Methodik

In Kapitel 5.2.5 wurde bereits erklärt, dass die Leistung der Lasten nicht auf einen gewünschten Wert geregelt werden kann. Über das Gateway kann die Stromzufuhr der Anlagen entweder getrennt oder eingeschaltet werden. Wird ein Signal an das Gateway gesendet, verhält sich der Ausgang nicht linear. Das bedeutet, dass beispielsweise ein Ausschalten der Anlage nicht zwingend zu einer Reduktion des Stromverbrauches führt, wenn die Anlage zu diesem Zeitpunkt nicht in Betrieb war. Bei der Steuerung der Lasten der Gebäude handelt es sich um ein nicht lineares System, welches nur schlecht modelliert werden kann. Der anfallende Stromverbrauch hängt zum einen vom Verhaltensmuster der Verbraucher ab, welches unter anderem vom Wetter abhängt, zum andern von den internen Steuerungen der Anlagen. Standardregler eignen sich auf Grund des fehlenden Modells schlecht für die Steuerung der Flexibilität. Stattdessen wird eine regelbasierte Steuerung empfohlen. Für eine solche Regelung wird kein Modell des Systems benötigt. Die Regeln werden programmiert.

Die Idee der Steuerung ist es, die Energiebilanz kurz vor der Abrechnung erneut vorherzusagen, um bei einer Unterdeckung reagieren zu können. Wird eine Unterdeckung vorhergesagt, so wird unter Berücksichtigung der Preise für Ausgleichsenergie, Strombörse und dem Zuschlag beim Wiedereinschalten der Anlagen evaluiert, ob es sich lohnt, die Lasten zu trennen. Falls die Lasten getrennt werden, wird die Leistungsreduktion gemessen und bei Bedarf angepasst. Beim Wiederanschalten der Lasten dienen die Messwerte der Tests als Vorhersage für das Verhalten des Stromverbrauchs. Dieser wird durch asynchrones Wiederanschalten den Bedürfnissen angepasst.

Die Regelung wird im Folgenden in drei Untersysteme geteilt. Für jedes dieser Untersysteme wurde ein Zustandsdiagramm erstellt. Die Zustandsdiagramme sind in Anhang 11.17 beschrieben.

7.2.1 Ausschalten prädiktiv

Die erste Teilsteuerung bestimmt, wann es sich lohnt, die Lasten zu steuern. Dazu wird der Bedarf an Ausgleichsenergie für die nächsten drei Stunden verwendet und überprüft, ob Lasten getrennt werden müssen. Unter Berücksichtigung der zusätzlich anfallenden Energie auf Grund des Rebound-Effekts wird berechnet, wie lange die Gebäude getrennt werden sollen. Die Dauer

der Ausschaltung muss mindestens eine Stunde betragen. Weil der Rebound-Effekt während der ersten Stunde nach dem Wiedereinschalten am auffälligsten ist, wird nur diese Stunde berücksichtigt, um die Differenz zwischen eingesparter Energie und Rebound-Energie zu berechnen. Nachdem der Zeitpunkt und die Menge zu reduzierender Energie berechnet wurden, werden die Gebäude bestimmt, welche gesteuert werden. Wie bereits in Kapitel 6.8.1 beschrieben wurde, verbessert sich die Genauigkeit der Vorhersage der Flexibilität, wenn viele Gebäude verwendet werden. Deshalb werden zuerst Gebäude mit einer tiefen mittleren Leistung gesteuert. Die Gebäude werden nach deren mittleren Leistung in steigender Richtung geordnet. Mit der Formel 3 wird berechnet, wie viele Gebäude gesteuert werden müssen.

$$P_{flex} = \sum_{i=1}^n P_{mean}(i) * F_{flex}(i) \quad (3)$$

P_{mean} = Durchschnittliche Leistung des Gebäudes

F_{flex} = Faktor der Flexibilität, basierend auf der Grafik in Anhang 11.16

P_{flex} = Vorhergesagte Leistung, welche reduziert werden kann

i = Index des Gebäudes in der geordneten Liste

Sobald P_{flex} grösser ist als die benötigte Ausgleichsenergie, oder keine Gebäude mehr zur Verfügung stehen, ist die Anzahl der Gebäude zum Steuern bestimmt.

7.2.2 Ausschalten reaktiv

Weil die Vorhersage der Flexibilität fehlerhaft sein kann, muss in einem zweiten Untersystem die Anzahl der zu trennenden Gebäude in einem geschlossenen Regelsystem angepasst werden. Hierfür wird der Stromverbrauch der gesteuerten Gebäude vor und nach dem Ausschalten verglichen. Falls weniger Leistung getrennt wurde als erwartet, so werden mehr Gebäude gesteuert, insofern noch nicht alle gesteuert werden. Wenn aber zu viel Last getrennt wurde, werden die Gebäude nicht wieder angeschaltet, um schnelles Takten zu verhindern. Die Anzahl Gebäude, welche getrennt werden, wird ebenfalls mit der Formel 3 bestimmt, ausser dass P_{flex} in diesem Fall grösser sein muss als die Differenz von der gemessenen Leistung vor und nach dem Trennen.

7.2.3 Wiedereinschalten

Nachdem die im ersten System bestimmte Dauer der Lastunterbindung verstrichen ist, wird die Stromzufuhr zu den Anlagen der Gebäude wiederhergestellt. Damit eine grosse Spitze auf Grund des Rebound-Effekts verhindert und der Verbrauch möglichst der Kurve des Bedarfs an Ausgleichsenergie angepasst werden kann, wird für die Regelung ein drittes Untersystem benötigt.

Der Stromverbrauch nach dem Wiedereinschalten wird vorhergesagt, in dem die mittlere Leistung des Gebäudes mit der normalisierten Leistungskurve des Rebound-Effekts (erstellt mit Hilfe der Daten von Test Phase 4) multipliziert wird. Für vier verschiedene Zeitpunkte wird berechnet, wann die Differenz zwischen der vorhergesagten Rebound-Energie und der Referenzkurve am geringsten ausfällt. Die Zeitpunkte liegen 15 Minuten auseinander. Beim Wiedereinschalten werden zuerst die Gebäude eingeschaltet, welche am längstem ausgeschaltet waren, sprich diejenigen mit der tiefsten mittleren Leistung.

Nach dem Wiedereinschalten wird den Gebäuden während 12 Stunden der Status Recap zugeschrieben, damit sie während dieser Zeit nicht erneut gesteuert werden und genügend Zeit zur Erholung haben.

Insofern nicht alle Gebäude benötigt werden, um den Verbrauch um die gewünschte Menge zu reduzieren, so kann ein Teil der Gebäude als Reserve verwendet werden, um den Verbrauch nach dem Wiedereinschalten auszugleichen. Dazu werden die Reservegebäude kurz vor dem Wiedereinschalten der restlichen Gebäude ausgeschaltet. Zusätzlich kann ein geschlossenes Regelsystem implementiert werden, welches dafür sorgt, dass zusätzlich Gebäude wiedereingeschaltet werden, wenn zu wenig Energie verbraucht wird. In der Diplomarbeit wurden letztere zwei Elemente noch nicht implementiert.

7.3 Eingänge / Ausgänge

Eingänge:

- Vorhersage der Ausgleichsenergie
- Vorhersage der Flexibilität
- Vorhersage der Rebound-Energie
- Messung des Stromverbrauchs der Gebäude

Ausgänge:

- Liste mit zu steuernden Gebäuden
- Dauer der Lasttrennung

7.4 Limitierende Faktoren

Damit die Steuerung sich nicht negativ auf die Komponenten des Systems verhält, müssen der Steuerung Grenzen gesetzt werden.

Wärmepumpen eignen sich schlecht für schnelles Takten. Nicht nur erhöht schnelles Takten den Energiebedarf, auch werden die Bestandteile der Anlage mehr abgenutzt. Im Anlaufbetrieb benötigten Wärmepumpen viel Strom für den Verdichter und sind deshalb weniger effizient. Ausserdem wird durch den erhöhten Strombedarf der Verdichter stärker erhitzt [28], [29].

Damit die Anlagen auf Grund der Steuerung nicht stärker abgenutzt werden, sollte auf schnelles Takten verzichtet werden. Für die Steuerung wurde die Mindestdauer einer Ausschaltung auf eine Stunde begrenzt. Dies beeinträchtigt die Reaktivität der Steuerung. Die Tests haben gezeigt, dass die Geräte nach einer dreistündigen Ausschaltung ungefähr neun Stunden benötigt haben, um sich zu erholen und ihr ursprüngliches Verhaltensmuster wieder aufzunehmen. Weil die Dauer der Ausschaltung wegen dem asynchronen Wiedereinschalten bis zu vier Stunden betragen kann, wird sicherheitshalber eine Erholungszeit von 12 Stunden einkalkuliert.

Damit sich in Zukunft ausreichend Kunden bereit erklären, ihre Flexibilität anzubieten, darf der Komfort der Kunden unter der Steuerung nicht leiden. Deshalb ist es wichtig, dass die Anlagen wiedereingeschaltet werden, sobald die Innentemperatur oder die Warmwassertemperatur einen Grenzwert unterschreitet.

Weil die Temperaturmessungen der Teilnehmer des Projekts GOFLEX teilweise noch nicht oder falsch funktionieren, wurde stattdessen eine maximale Ausschaltdauer von vier Stunden festgelegt.

7.5 Simulation

7.5.1 Simulation Wiedereinschalten

In Kapitel 6.9 wurde auf den Rebound-Effekt hingewiesen. Der auf diesen Effekt zurückzuführende Spitzenverbrauch nach dem Wiedereinschalten der Geräte kann das Stromnetz zusätzlich belasten. Um diesem Effekt entgegenzuwirken und die Spitze zu reduzieren, werden die Anlagen asynchron wiedereingeschaltet. Um den Effekt zu beobachten, wurde das Ergebnis simuliert. Dazu werden die Messwerte der Testphase 4 (Kapitel 6.9.4) von den 10 Gebäuden mit dem tiefsten durchschnittlichen Stromverbrauch verwendet, sprich Messwerte des Monats Mai 2019.

Für die Simulation wurden folgende Annahmen getroffen:

- Der Stromverbrauch vor der Steuerung entspricht dem normalisierten durchschnittlichen Verbrauch aller Gebäude während der Testphase an Tagen ohne Steuerung, multipliziert mit der durchschnittlichen Leistung des jeweiligen Gebäudes.
- Während der Steuerung verbrauchen die Gebäude keinen Strom.
- Nach dem Wiedereinschalten entspricht der Stromverbrauch dem normalisierten durchschnittlichen Verbrauch aller Gebäude während der Testphase nach dem Wiedereinschalten, multipliziert mit der durchschnittlichen Leistung des jeweiligen Gebäudes.
- Während den Tests betrug die Dauer des Ausschaltens drei Stunden. Bei der Simulation wird mit demselben Verhalten gerechnet, auch wenn die Dauer des Ausschaltens nicht drei Stunden beträgt.

Beim simulierten Szenario handelt es sich um eine Leistungsreduktion von 6:00 bis 9:00 Uhr. Von 9:00 bis 10:00 Uhr werden die Gebäude asynchron eingeschaltet. Zusätzlich werden Reservegebäude von 9:00 bis 10:00 Uhr ausgeschaltet und von 10:00 bis 11:00 Uhr asynchron wiedereingeschaltet. Für die Simulation wurden die Werte von zehn Gebäuden verwendet. Zum Vergleich wird die Simulation zuerst ohne Steuerung durchgeführt (Abbildung 22) und danach mit manuell festgelegten Zeiten für das Wiedereinschalten (Abbildung 23).

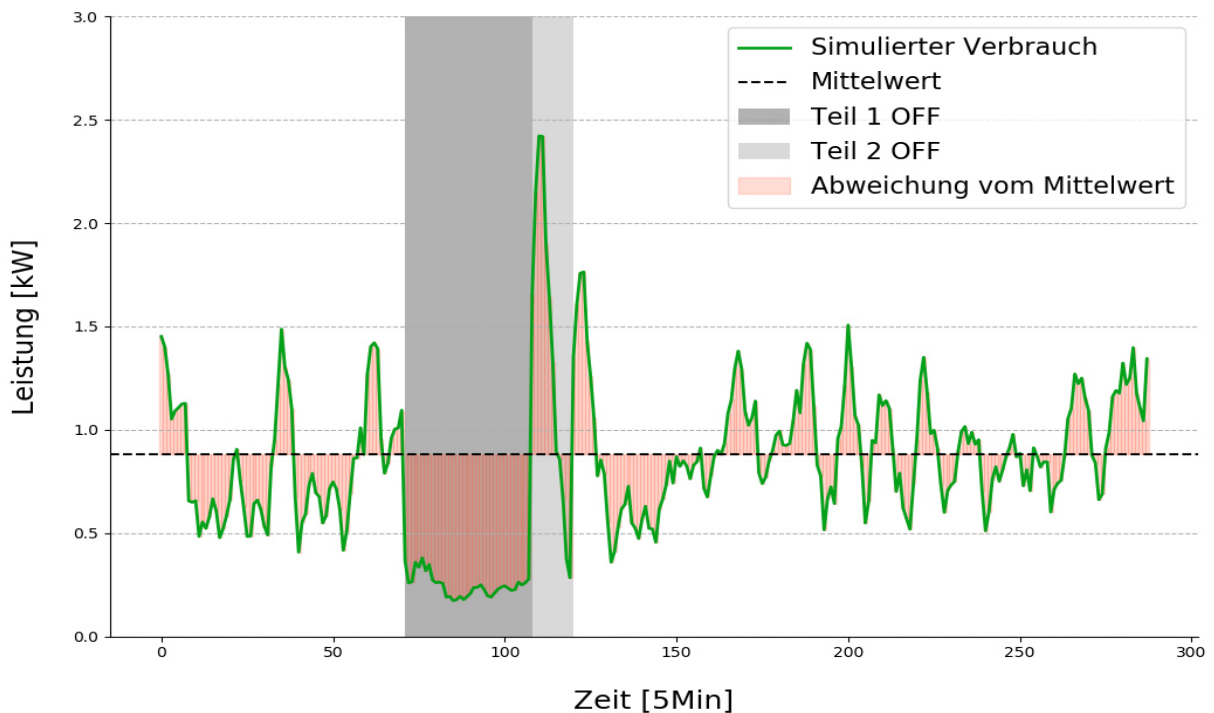


Abbildung 22: Simulation des Wiedereinschaltens von 10 Gebäuden ohne Steuerung.

Der Rebound-Effekt ist mit zwei Spitzen von ca. 2.5 kW und 1.8 kW deutlich zu erkennen. Den Spitzen folgt ein Verbrauchsminimum von ungefähr 0.7 kW. Durch asynchrones Wiedereinschalten fällt der Verbrauch nach dem Wiedereinschalten deutlich glatter aus, wie dies in Abbildung 23 ersichtlich ist.



Abbildung 23: Simulation des Wiedereinschaltens von 10 Gebäuden mit manueller Steuerung.

Die Verbrauchsspitzen konnten auf ungefähr 1.3kW reduziert werden, das Verbrauchsminimum bleibt weiterhin vorhanden.

Die Simulation zeigt, dass es möglich ist, den Rebound-Effekt in Grenzen zu halten. Der Verbrauch nach dem Wiedereinschalten der Geräte kann durch asynchrones Einschalten angepasst werden.

7.5.2 Simulation komplette Steuerung

In der Realität können beliebig viele Szenarien auftreten. Eine ausführliche Simulation, welche alle Umstände berücksichtigt, ist sehr zeitaufwändig. Die entwickelte Steuerung wurde noch nicht optimiert und soll lediglich zeigen, dass es möglich ist, die Flexibilität der Gebäude zu verwenden, um den Bedarf an Ausgleichsenergie zu reduzieren. Ein Prototyp der Steuerung wurde in Python programmiert und auf ein typisches Szenario simuliert. Für die Simulation wurden ebenfalls die Messwerte aus Testphase 4 verwendet, jedoch von allen 18 Gebäuden.

Für die Simulation wurden folgende Annahmen getroffen:

- Der Stromverbrauch vor der Steuerung entspricht dem normalisierten durchschnittlichen Verbrauch aller Gebäude während der Testphase an Tagen ohne Steuerung, multipliziert mit der durchschnittlichen Leistung des jeweiligen Gebäudes.
- Nach dem Wiedereinschalten entspricht der Stromverbrauch dem normalisierten durchschnittlichen Verbrauch aller Gebäude während der Testphase nach dem Wiedereinschalten, multipliziert mit der durchschnittlichen Leistung des jeweiligen Gebäudes.
- Während den Tests betrug die Dauer des Ausschaltens drei Stunden. Bei der Simulation wird mit demselben Verhalten gerechnet, auch wenn die Dauer des Ausschaltens nicht drei Stunden beträgt.
- Die Kurve des Bedarfs an Ausgleichsenergie wurde manuell erstellt, so dass es an einem Tag zwei Perioden gibt, in denen Ausgleichsenergie benötigt wird. Die erste Periode findet von 2:15 bis 4:15 Uhr statt, die zweite von 12:30 bis 13:45 Uhr.

Das Resultat der Simulation ist in Abbildung 24 dargestellt.

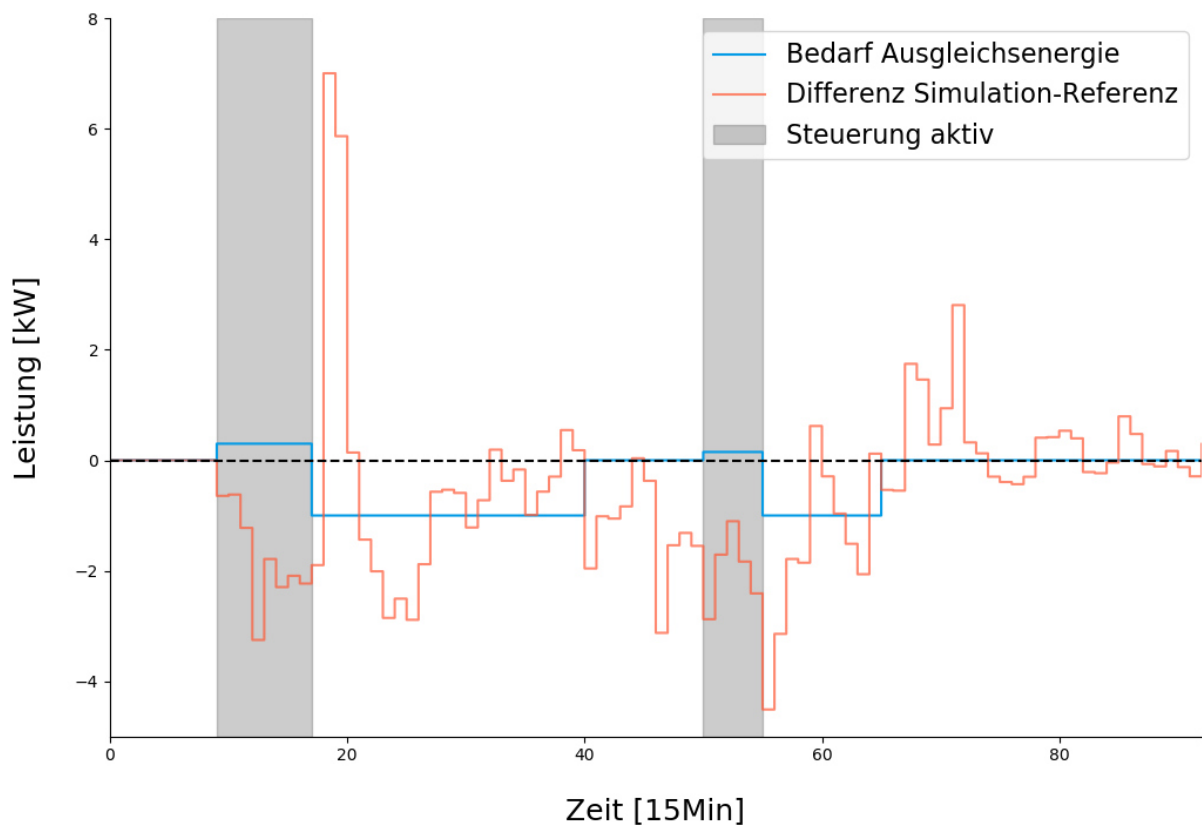


Abbildung 24: Simulation des Stromverbrauches unter Anwendung der entwickelten Steuerung. Simuliert wurde der Stromverbrauch von 10 Gebäuden im Mai 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 13.2 °C.

Es wird beobachtet, dass der Strombedarf während der ersten Ausschaltung (graue Fläche links) erfolgreich reduziert wurde. Die Grafik in Anhang 11.18 zeigt ausserdem, dass die reaktive Ausschaltung funktioniert und zusätzliche Gebäude ausgeschaltet werden falls nicht genügend Leistung reduziert wird. Der Spitzenverbrauch nach dem Wiedereinschalten fällt relativ hoch aus. Es wäre deshalb sinnvoll, die Steuerung mit einem geschlossenen Regelsystem zu ergänzen, welches die Leistung nach dem Wiedereinschalten misst. Die zweite Ausschaltung (graue Fläche rechts) ist schwierig zu deuten, weil als Referenz der durchschnittliche Verbrauch der

Gebäude verwendet wurde und als Simulationswert das Verhalten der Gebäude nach dem Wiedereinschalten. Die Grafik in Anhang 11.18 zeigt jedoch, dass die Gebäude der ersten Ausschaltung in der Reserve blieben und nur neue Gebäude gesteuert wurden.

Die drei Untersysteme der Steuerung konnten erfolgreich simuliert werden. Weitere fundierte Simulationen sind notwendig, um die Steuerung zu optimieren. Besonders das Wiedereinschalten muss optimiert werden.

Gemäss Abschnitt 6.8.1 ist für die Steuerung der Flexibilität eine grosse Anzahl an aggregierten Gebäuden notwendig. Bevor die Steuerung an einer grossen Anzahl von reellen Gebäuden getestet wird, sollte sichergestellt werden, dass die Simulationsphase abgeschlossen ist und die Steuerung optimiert wurde.

8 Schlussfolgerung

Für die Modernisierung der Stromnetze reichen herkömmliche Methoden nicht mehr aus. Anstatt die Netze weiter auszubauen, werden neue intelligente Lösungen benötigt, wie man sie teilweise bereits in den Smart Grids vorfindet. Mit dem Projekt GOFLEX können wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, welche erforderlich sind, um vermehrt erneuerbare Energien in die bestehenden Netze zu integrieren. Das Teilprojekt mit dem Demonstrationsstandort in der Schweiz zeigt, dass nicht nur die Stromproduktion, sondern auch der Verbrauch Flexibilität aufweist. Die aktuelle Top-Down Struktur der Netzwerke ist nicht ausgelegt für die Volatilität von erneuerbaren Energien. Die Kommunikation muss in beide Richtungen stattfinden, um eine Interaktion von Produzenten und Verbrauchern zu ermöglichen.

Im Rahmen der Diplomarbeit konnte gezeigt werden, dass die elektrischen Verbraucher von Wohngebäuden flexible Betriebszeiten ohne Komforteinbusse zulassen. Die Flexibilität der Wohngebäude wird in Zukunft zunehmen, weil immer mehr alte Heizungs- und Warmwasseranlagen durch neue energieeffizientere Wärmepumpen ersetzt werden, welche elektrisch statt mit Öl, Gas oder Holz betrieben werden.

Die Flexibilität einzelner Gebäude kann grob eingeschätzt werden, je nach Anlagen, welche für die Heizung und die Warmwasseraufbereitung verwendet werden. Für eine detaillierte Analyse werden Messwerte des Stromverbrauchs dieser Anlagen benötigt und es müssen praktische Tests durchgeführt werden.

Durch das Aggregieren von Gebäuden kann die Flexibilität deutlich erhöht werden. Die Auswertungen haben gezeigt, dass eine Anzahl von mindestens 50 Gebäuden sinnvoll ist. Mit einer grossen Anzahl an Gebäuden kommt es seltener vor, dass keines der Gebäude zu einem bestimmten Zeitpunkt Strom verbraucht und der Stromverbrauch ist normalverteilt. Ausserdem ist es einfacher den Verbrauch einer Vielzahl von Gebäuden vorherzusagen, als den eines einzelnen Gebäudes.

Die Resultate zeigen, dass es möglich ist, den durchschnittlichen Stromverbrauch von Anlagen für die Warmwasseraufbereitung um drei bis vier Stunden zu verschieben, ohne dabei den Komfort der Bewohner einzuschränken. Die durchschnittliche Leistung die so unterbunden werden kann, beträgt im Sommer in etwa 0.75 kW. Das zeitliche Verschieben der Lasten führt zu einer deutlichen Erhöhung des Stromverbrauchs beim Wiedereinschalten. Dieser als Rebound bezeichnete Effekt kann bewusst ausgenutzt werden, um den Stromverbrauch zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erhöhen.

Der Verteilnetzbetreiber kann die Flexibilität von Wohngebäuden mittels zentraler Steuerung verwenden, um falsche Vorhersagen von Verbrauch und Produktion auszugleichen. Dadurch wird verhindert, dass Swissgrid vermehrt teure Regelenergie einsetzen muss, um die Stabilität der Netze zu gewährleisten, was zu einer Steigerung der Strompreise führen würde.

Im letzten Teil konnte eine Steuerung entwickelt werden, um mit Hilfe der Flexibilität den Bedarf an Ausgleichsenergie zu reduzieren. Die Simulation der Steuerung zeigt, dass es möglich ist, die Flexibilität zu steuern und die Spitzenlasten des Rebound-Effekts zu halbieren. Weiterführend sollte die Steuerung mit einer grossen Anzahl an Gebäuden getestet und optimiert werden.

9 Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt meinem Dozenten Herrn Pierre Roduit, der meine Arbeit betreut und mit hilfreichen Anregungen begleitet hat.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Pierre Ferrez und Marc Pignat bedanken, die mir die notwendigen Mittel zur Verfügung gestellt haben, um Zugriff auf die Daten des Projekts zu erlangen.

Herrn Didier Forclaz danke ich für die Einführung in das Thema Flexibilität.

Abschliessend richte ich meinen Dank an alle, die hier namentlich nicht erwähnt wurden und mich bei der Arbeit unterstützt haben.

10 Datum und Unterschrift

David Wenger

Sion, den 16. August 2019

11 Anhang

11.1	INFORMATIONEN ÜBER DIE INSTALLIERTEN SMART METER	44
11.2	INFORMATIONEN ÜBER DIE INSTALLIERTEN MESSSENSOREN	45
11.3	MASSE ZUR BESTIMMUNG DER FLEXIBILITÄT	46
11.4	KATEGORISIERUNG DER FLEXIBILITÄT NACH ANLAGETYPEN	47
11.5	WOHNGEBÄUDE MIT PV-ANLAGEN	48
11.6	BERECHNUNG DES POTENZIALS AN STEUERBARER LEISTUNG IN DER SCHWEIZ	50
11.7	EINFLUSS DER AUSSENTEMPERATUR IM WINTER	51
11.8	HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER LEISTUNG IM WINTER	52
11.9	EINFLUSS DER ANZAHL GEBÄUDE IM WINTER	53
11.10	DURCHSCHNITTLICHE HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER LEISTUNG	54
11.11	GRUPPIEREN VON GEBÄUDEN WÄHREND DER HEIZPERIODE	55
11.12	HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DES STROMVERBRAUCHS IN FUNKTION DER TAGESZEIT WÄHREND DER HEIZPERIODE	56
11.13	BERECHNUNG DER DAUER UND DES ENERGIEVERBRAUCHES EINES EVENTS	57
11.14	HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DES ENERGIEVERBRAUCHS EINES EVENTS IM WINTER	58
11.15	HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER DAUER EINES EVENTS IM WINTER	59
11.16	FLEXIBILITÄT VON WOHNGEBÄUDEN	60
11.17	ZUSTANDSDIAGRAMME DER STEUERUNG	61
11.18	SIMULATION KOMPLETTE STEUERUNG	64

11.1 Informationen über die installierten Smart Meter

Table 4: Informationen zu den installierten Smart Meter.

Group "Technical"	Group "Energy"	Group "Billing"
Acquisition period: 5 seconds	Acquisition period: 5 minutes	Acquisition period: 30 days
Logical name push setup consumer information 1	Logical name push setup consumer message	Object list push setup con- sumer information 2
Device ID 1 (utility serial number 1, ID 2.1)	Device ID 1 (utility serial number 1, ID 2.1)	Logical name push setup consumer information 2
Device ID 2 (utility serial number 2, ID 2.2)	Device ID 2 (utility serial number 2, ID 2.2)	Device ID 1 (utility serial number 1, ID 2.1)
Active power import +P	Clock	Device ID 2 (utility serial number 2, ID 2.2)
Active power export -P	Active energy import +A (QI+QIV)	Active energy import +A (QI+QV) rate 1
Reactive power import +Q	Active energy export -A (QII+QIII)	Active energy import +A (QI+QV) rate 2
Reactive power export -Q	Reactive energy +Ri (QI)	Active energy import -A (QII+QIII) rate 1
Current L1	Reactive energy +Rc (QII)	Active energy import -A (QII+QIII) rate 2
Current L2	Reactive energy -Ri (QIII)	
Current L3	Reactive energy -Rc (QIV)	
Voltage L1		
Voltage L2		
Voltage L3		

11.2 Informationen über die installierten Messsensoren

Tabelle 5: Informationen zu den installierten Messsensoren.

Sensor	Measured value	Acquisition
Room temperature sensor	Ambient temperature	Once per 15 minutes or on temperature change (dead band 0.5 K)
Water temperature sensor	Domestic hot water boiler temperature	Once per minute or on temperature change (dead band 0.5 K)
Sub-meter	Power	15 seconds (if changing)
	Phase L1, L2 and L3 voltages	15 seconds
	Phase L1, L2 and L3 currents	15 seconds (if changing)
	Energy	15 seconds

11.3 Masse zur Bestimmung der Flexibilität

Tabelle 6: Beschreibung der Masse für die Bestimmung der Flexibilität. [16]

Classification	Reference	Flexibility
Efficiency	Sabel [52]	Produce a range of goods at the lowest total cost
	Anderson [4]	Accommodate change with minimal degradation of performance
	Upton [62,64]	Uniformity on a performance measure
Responsiveness	Avison et al [9]	Improves the quality of internal resources
	Eppink [24]	Response capacity
	Bolwijn & Kumpe [13]	The ability to change quickly
	Evans [25]	Increase speed of manoeuvre, expedient capability
	Upton [62]	Mobility
	Lucas & Olson [40]	Respond quickly
	Upton [63]	Ability to change quickly
	Avison et al [9]	Speed of response, agility, manoeuvrability, responsiveness
	Das & Elango [17]	Nimble and quick, timely and appropriate
	De Leeuw & Volberda [19]	Responsiveness, agility, suppleness, rapidity
	Volberda [67]	Responsiveness
	Monteiro & Macdonald [42]	Ability to respond and change
Versatility	Krijnen [36]	Take account likely developments in environment
	Gustavsson [29]	Adaptable and capable of change
	Evans [25]	Susceptibility to modification, liquidity, malleability, pliability, extend scope of manoeuvre
	Sabel [52]	Capacity to produce a range of different products
	Upton [62, 64]	Accommodate large range on the dimension of change Uniformity on a performance measure
	Avison et al [9]	Range of activities that a system can perform, adaptability, versatility
	Robustness	Eppink [24]
Krijnen [36]		Adaptable to unpredictable or unforeseeable circumstances
Aaker & Mascarenhas [1]		Ability to adapt to substantial, uncertain, and fast-occurring environmental changes
Harrigan [32]		Ability of firms to reposition in a market, change game plans or dismantle current strategies
Carlsson [15]		Maintain flexibility under conditions of uncertainty
Best et al. [12]		Maintain flexibility under conditions of uncertainty
Evans [25]		Corrigibility, capacity for new situations
Lucas & Olson [40])		Ability to adapt to new or changing requirements
	Avison et al [9]	Necessary for survival, resilience, robustness Attribute enables organisation to react to developments Ability to prepare for/manage uncertain future proactively Concept of flexibility is most closely related to, but distinguishable from, robustness.

11.4 Kategorisierung der Flexibilität nach Anlagentypen

Die untenstehende Tabelle 7 dient als Referenz, um die Flexibilität eines Gebäudes nach dessen Anlagentypen einzuteilen. Weil die effektive Flexibilität des Gebäudes von Faktoren wie internen Regelungen, Komfort der Bewohner, Umwelteinflüssen und anderem abhängt, dient die Tabelle nur als grobe Einschätzung.

Die Flexibilität der Gebäude mit PV Anlagen ist derzeit vor Allem während der Heizperiode eingeschränkt. Ausserdem hängt die Flexibilität dieser Gebäude stark von den ökonomischen Modellen ab. Derzeit gibt es noch kein ökonomisches Modell für die Flexibilität.

Tabelle 7: Kategorisierung der Flexibilität eines Wohngebäudes nach dessen Anlagentypen.

	Mit PV			Ohne PV		
	WP		direkt el.	WP		direkt el.
	kombiniert	separat		kombiniert	separat	
el. Heizung	-	1	2	-	6	7
el. Warmwasser	-	2	3	-	7	8
beides el.	4	5	6	9	10	11

-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	kaum Flexibilität			wenig Flexibilität			gute Flexibilität		hohe Flexibilität		

11.5 Wohngebäude mit PV-Anlagen

Die Wohngebäude des Projekts GOFLEX, welche über eine PV-Anlage verfügen, wurden ausgewertet. In Abbildung 25 und Abbildung 26 ist der durchschnittliche Stromverbrauch der Gebäude mit Solaranlage dem durchschnittlichen Verbrauch der Gebäude ohne PV-Anlage gegenübergestellt.

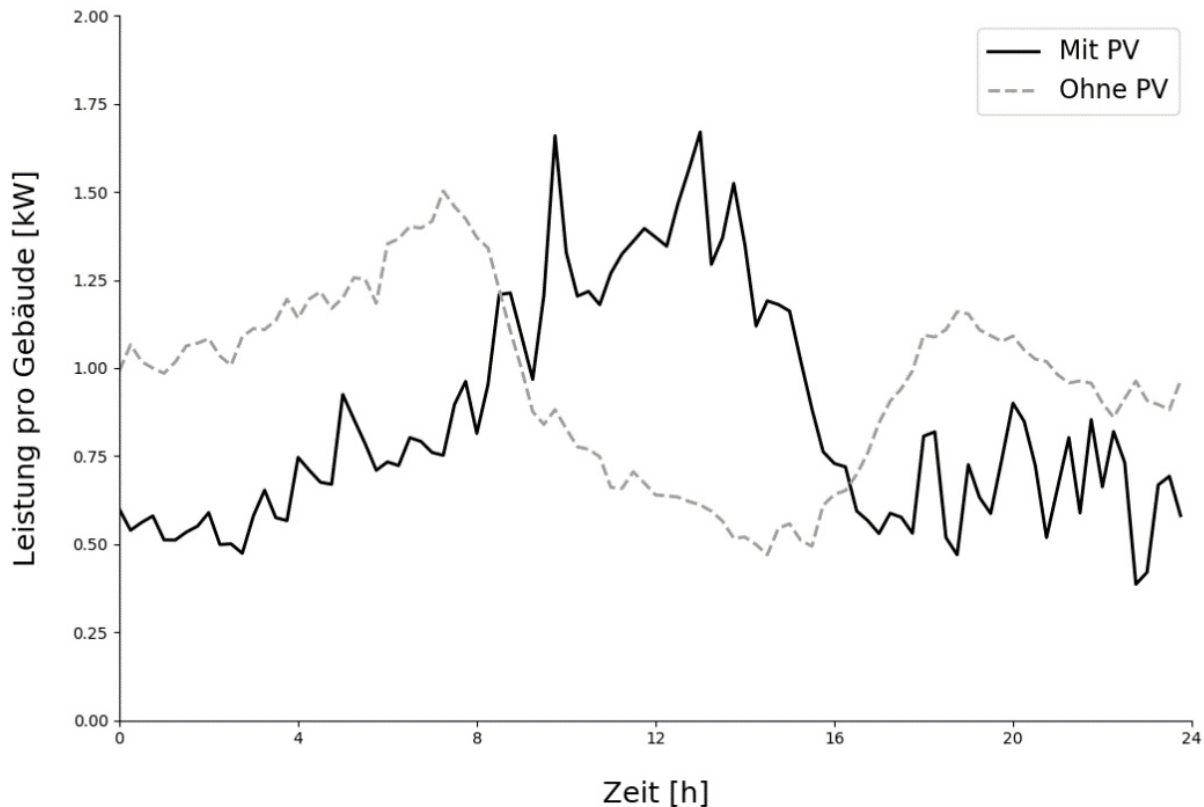


Abbildung 25: Durchschnittlicher Tagesverlauf des Stromverbrauchs von Gebäuden mit und ohne Solaranlage im Februar 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 4.1 °C.

Es fällt auf, dass Gebäude mit Solaranlage im Durchschnitt mehr Strom verbrauchen, als Gebäude ohne Solaranlage. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass es sich bei den Gebäuden mit Solaranlage hauptsächlich um Einfamilienhäuser handelt, bei den Gebäuden ohne Solaranlage teils auch um Wohnungen in Wohnblöcken. Eine Analyse der Schweizerischen Agentur für Energieeffizienz (S.A.F.E) zeigt, dass Einfamilienhäuser im Durchschnitt mehr Strom verbrauchen, als Wohnungen [30].

Sowohl im Februar als auch im Mai liegt der durchschnittliche Verbrauch in der Nacht bei etwa 0.7 kW. Im Februar allerdings ist der Stromverbrauch während dem Tag deutlich erhöht. Diese Beobachtung lässt darauf schliessen, dass Steuerungen für die Erhöhung des Eigenverbrauchs derzeit vor allem auf die Heizungssysteme Einfluss haben, nicht aber auf die Warmwasseranlagen. Die Flexibilität der Heizungssysteme von Gebäuden mit PV-Anlagen kann durch solche Steuerungen eingeschränkt werden.

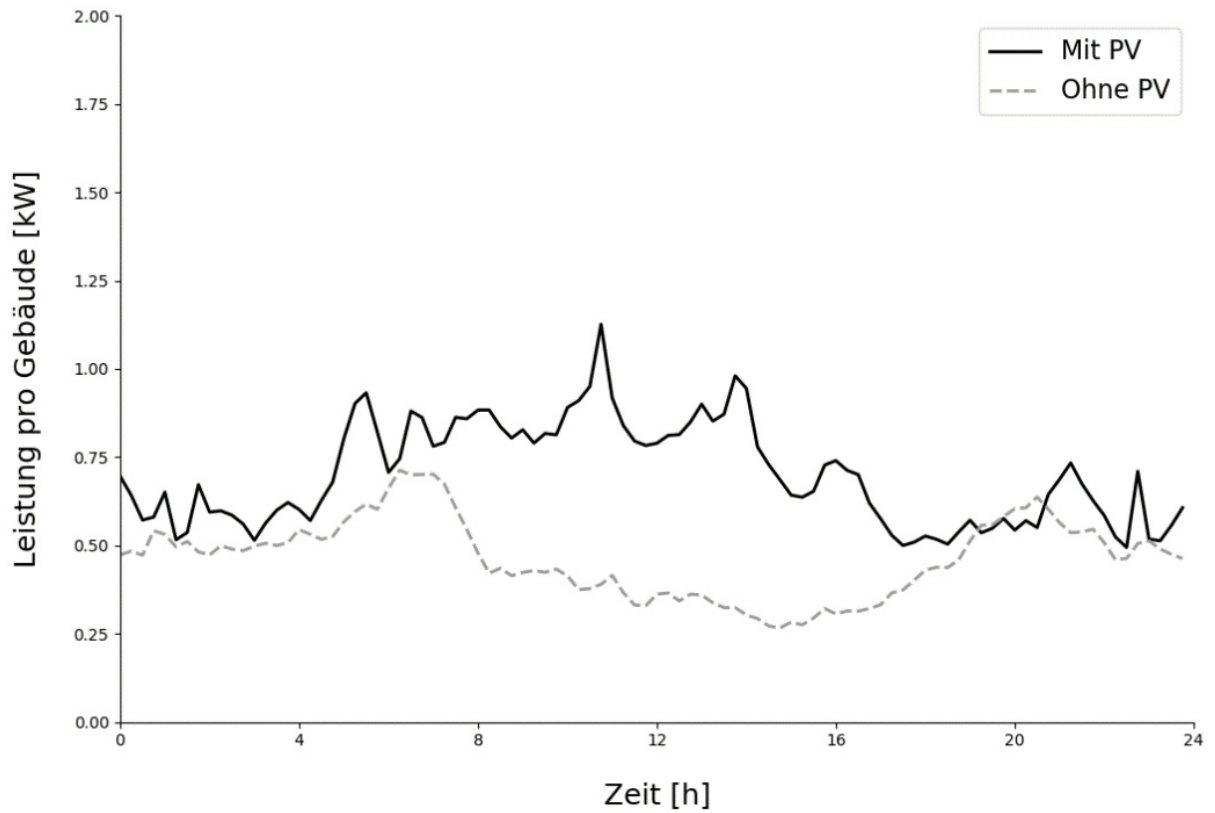


Abbildung 26: Durchschnittlicher Tagesverlauf des Stromverbrauchs von Gebäuden mit und ohne Solaranlage im Mai 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 13.2 °C.

11.6 Berechnung des Potenzials an steuerbarer Leistung in der Schweiz

In Kapitel 6.1 wurde der Energieverbrauch der Schweiz statistisch ausgewertet. Diese Analyse erlaubt es, den durchschnittlichen Verbrauch von elektrischen Heiz- und Warmwassersystemen in der Schweiz zu berechnen. Dazu wird folgende Formel angewandt:

$$P = \frac{E_{tot} * k_{Haushalt} * (k_{Raum} * k_{elRaum} + k_{Wasser} * k_{elWasser})}{t} \quad (4)$$

P = Durchschnittliche Leistung aller technischen Anlagen von Wohngebäuden (CH)

E_{tot} = Gesamter Jahresenergieverbrauch (CH)

$k_{Haushalt}$ = Anteil des Energieverbrauchs für den Sektor Haushalt

k_{Raum} = Anteil des Energieverbrauchs für die Raumheizung

k_{elRaum} = Anteil elektrischer Energie am Energieverbrauch für Raumheizung

k_{Wasser} = Anteil des Energieverbrauches für Warmwasser

$k_{elWasser}$ = Anteil elektrischer Energie am Energieverbrauch für Warmwasser

t = Anzahl Stunden eines Jahres

Die Berechnung wurde numerisch durchgeführt für das Jahr 2016:

$$P = \frac{852'900TJ * 28.2\% * (68.3\% * 25\% + 13.4\% * 46\%)}{8'760h * 3.6}$$

$$P = 1.772 \text{ GW}$$

Für die Berechnungen wurden folgende Annahmen getroffen:

1. Der Stromverbrauch von Heizungen und Warmwassersystemen entspricht dem durchschnittlichen Verbrauch, obwohl dieser je nach Jahreszeit ändert.
2. Der erhaltene Wert steht nicht durchgehend zur Verfügung. In Kapitel 6.8.5 wurde gezeigt, dass die zur Verfügung stehende Leistung von der Tageszeit und der Jahreszeit abhängt.
3. Der erhaltene Wert entspricht dem optimalen Fall. Nicht nur müssten die Gebäude noch mit den für die Steuerung benötigten Anlagen ausgerüstet werden, sondern müssen die Bewohner auch einverstanden sein, ihre Flexibilität anzubieten. Des Weiteren gibt es immer mehr Selbstversorger, welche ihre Heiz- und Warmwassersysteme mit eigens produzierter Energie, wie beispielsweise Solarenergie, versorgen. Die Verbraucher von diesen Bewohnern können nicht gesteuert werden.
4. Stimmt die Vermutung vom Fachverein Wärmepumpen Schweiz, dass sich die Anzahl Wärmepumpen bis 2040 verdoppeln könnte, steigt das Potenzial an steuerbarer Leistung und gleicht die oben genannten limitierenden Faktoren aus.

11.7 Einfluss der Aussentemperatur im Winter

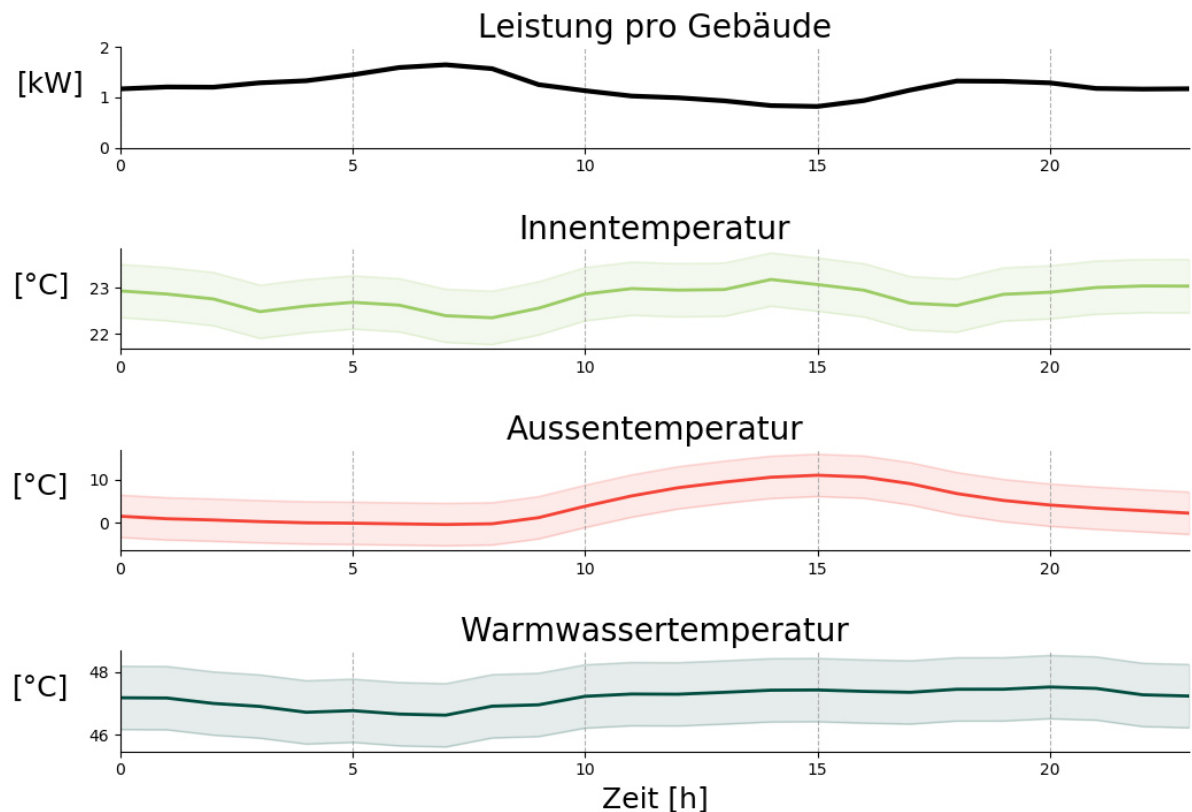


Abbildung 27: Mittelwerte des durchschnittlichen Tagesverlaufs der Leistung, der Innentemperatur und der Warmwassertemperatur von 101 Gebäuden, sowie der durchschnittliche Tagesverlauf der Aussentemperatur im Monat Februar 2019.

In Abbildung 27 ist zu sehen, dass der durchschnittliche elektrische Verbrauch im Februar zwei Spitzen erreicht, eine morgens um 7:00 Uhr, die andere abends um 18:00 Uhr. Eine solche Kurve ist typisch für den elektrischen Verbrauch der Warmwasserzubereitung. Weil der Februar Teil der Heizperiode ist, wird durchschnittlich mehr Leistung verbraucht als im Mai. Der mittlere Stromverbrauch im Februar beträgt 1.2 kW.

Die Innentemperatur folgt während dem Tag der Aussentemperatur, in der Nacht wird mehr geheizt, so dass die Temperatur erneut steigt.

Die Standardabweichung der Warmwassertemperatur beträgt 1 °C. Dies ist nur halb so viel wie im Monat Mai gemessen. Das liegt daran, dass viele Gebäude dieselbe Wärmepumpe für die Heizung, sowie für die Warmwasseraufbereitung benutzen und die Anlage deshalb öfters in Betrieb ist.

Die Innentemperatur weist eine Standardabweichung von ungefähr 0.5 °C auf. Für die Bewohner ist ein Temperaturunterschied von 1 °C kaum spürbar. In der Regel sind die Gebäude gut isoliert und werden tagsüber passiv von der Sonne gewärmt. Aus diesem Grund nimmt die Innentemperatur ohne Heizung nur langsam ab.

In der Nacht nimmt die Aussentemperatur ab und es scheint keine Sonne, weshalb stärker geheizt werden muss, um die Raumtemperatur aufrecht zu halten. Aus diesem Grund kann in der Nacht weniger flexibel geheizt werden als tagsüber.

11.8 Häufigkeitsverteilung der Leistung im Winter

Im Winter verhält sich die Häufigkeitsverteilung ähnlich wie im Sommer. Auf Grund des zufällig anfallenden Strombedarfs für Heizungen im Winter ist die Streuung im Februar breiter, jedoch wird seltener gar keine Leistung verbraucht und der durchschnittliche Verbrauch fällt höher aus. Nichtsdestotrotz ist es auch während der Heizperiode wichtig, Gebäude zu aggregieren. Der Einfluss der Anzahl Gebäude auf die Häufigkeitsverteilung der Leistung ist in Abbildung 28 zu sehen.

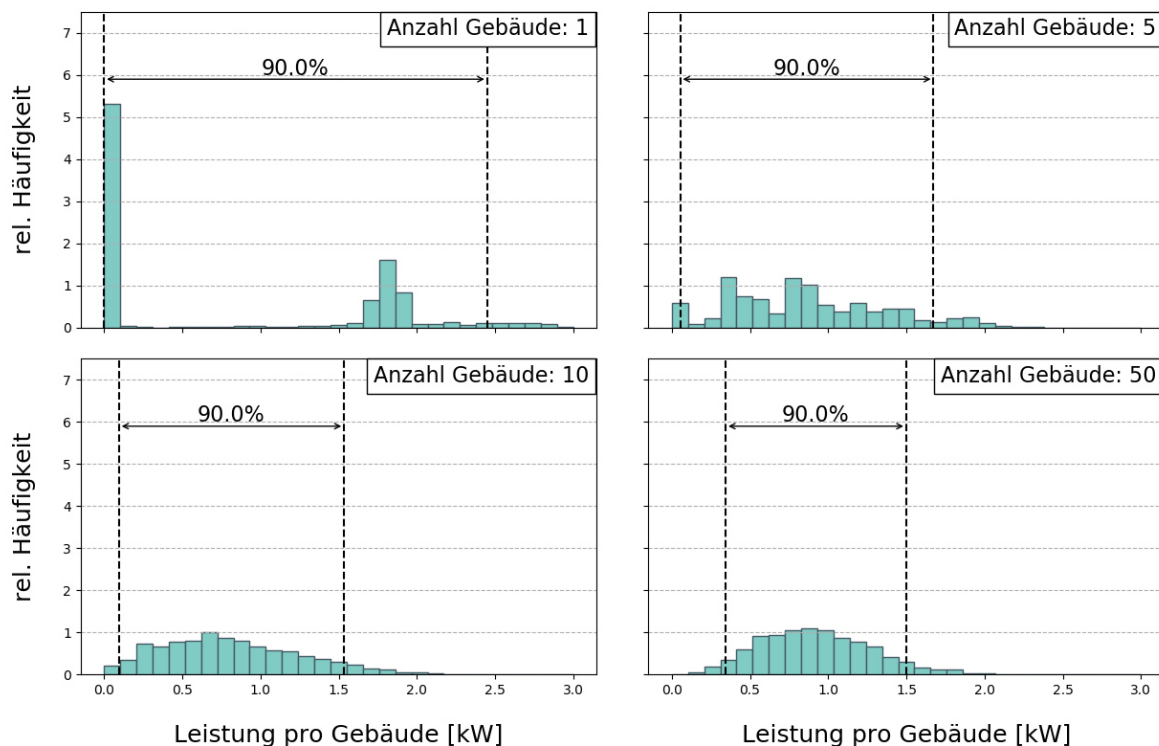


Abbildung 28: Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Leistung jeder viertel Stunde im Februar 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 4.1 °C.

11.9 Einfluss der Anzahl Gebäude im Winter

In Abbildung 29 ist zu sehen, dass das Aggregieren von Gebäuden im Februar denselben Effekt bewirkt wie im Mai.

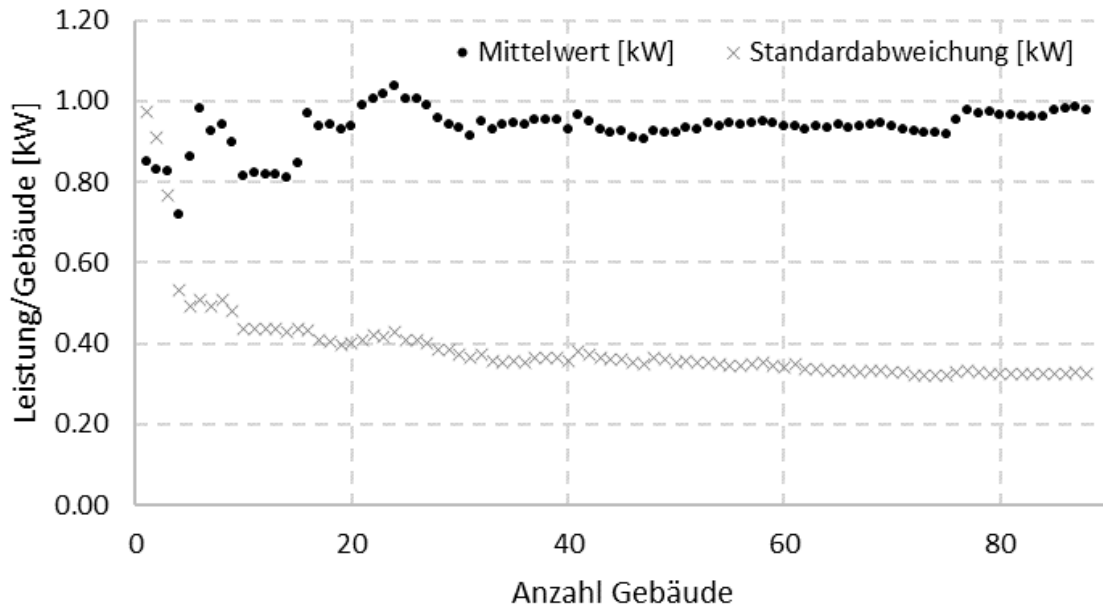


Abbildung 29: Mittelwert und Standardabweichung des Stromverbrauches im Februar 2019 in Funktion der Anzahl aggregierter Gebäude bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 4.1 °C.

Die Standardabweichung nimmt mit steigender Anzahl an Gebäuden ab und der Mittelwert ist mit einer geringen Anzahl an Gebäuden unregelmässig und nimmt ab ca. 20 Gebäuden zu. Der Mittelwert ist gegenüber dem Mai in etwa doppelt so gross, die Standardabweichung ungefähr 1.5 Mal so gross. Das liegt daran, dass die Heizung im Winter mehr Strom verbraucht.

11.10 Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung der Leistung

Addiert man die Histogramme der einzelnen Gebäude miteinander, so erkennt man, dass die Verteilung eines einzelnen Gebäudes auch im Durchschnitt nicht normal ist. Am höchsten ist die Wahrscheinlichkeit, dass zu einem gegebenen Zeitpunkt kein Strom verbraucht wird. Es wurden die Histogramme von 50 verschiedenen Gebäuden gemittelt. Die Formel, welche für das Erstellen des Histogramms verwendet wurde, sieht wie folgt aus:

$$\frac{\sum_{i=1}^{50} (\text{Hist}(P_i))}{50} \quad (5)$$

P_i = Durchschnittlicher Stromverbrauch des Gebäudes in einer viertel Stunde
 i = Gebäude

Abbildung 30 zeigt die durchschnittliche Häufigkeitsverteilung der 50 Gebäude im Mai mit 300 Klassen mit einer Klassenbreite von 0.1 kW.

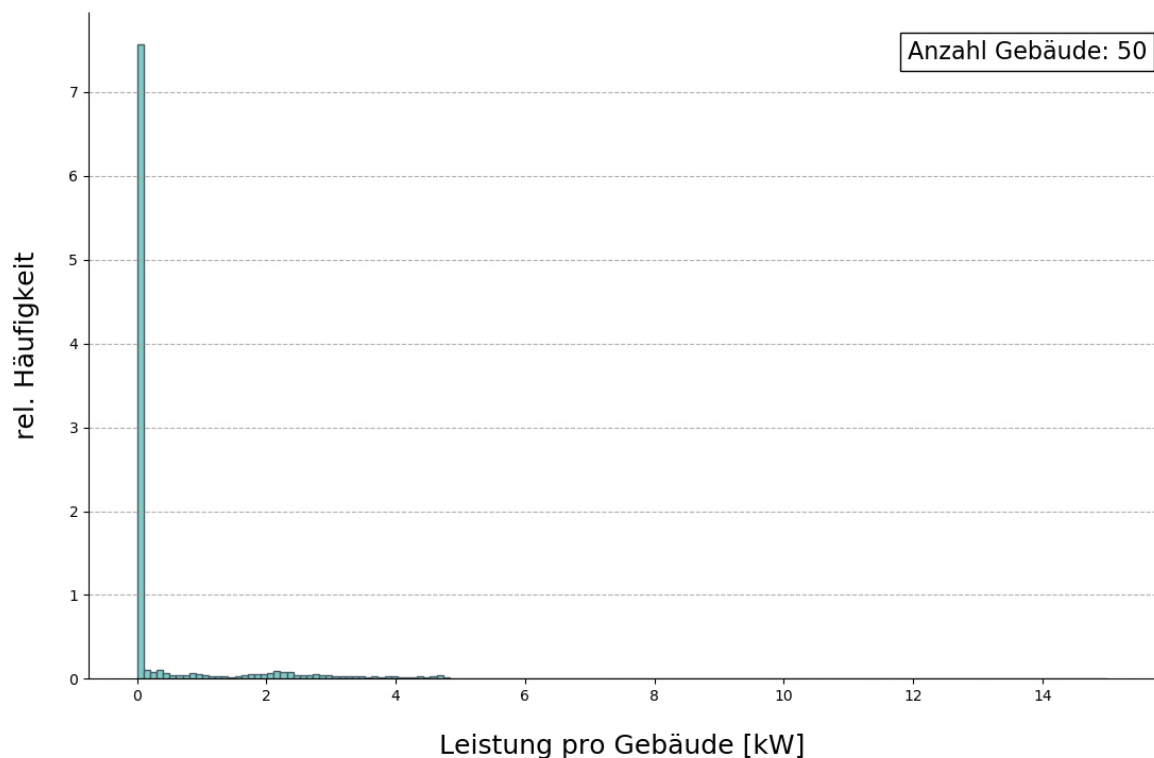


Abbildung 30: Durchschnitt der Häufigkeitsverteilung der Leistung von 50 Gebäuden im Mai 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 13.2 °C.

Analysiert man die Gebäude im Einzelnen, so ist die Verteilung der Häufigkeit breiter gestreut. Das liegt an der Vielzahl unterschiedlicher Anlagen. Die Grafik zeigt ausserdem, dass es einfacher ist, den Stromverbrauch von vielen aggregierten Gebäuden vorherzusagen als den Stromverbrauch von einzelnen Gebäuden.

11.11 Gruppieren von Gebäuden während der Heizperiode

Folgend wird ein Histogramm erstellt mit 10 Gruppen(j) à 5 Gebäuden(i). Dazu berechnet man zuerst den durchschnittlichen Stromverbrauch jeder Gruppe von 5 Gebäuden, erstellt die Häufigkeitsverteilung und mittelt die Häufigkeitsverteilungen der 10 Gruppen, um ein durchschnittliches Histogramm zu erstellen. Für die Erstellung des Histogramms wird Formel 2 verwendet. Abbildung 31 stellt ein Histogramm mit 150 gleich grossen Klassen von 0.1 kW dar.

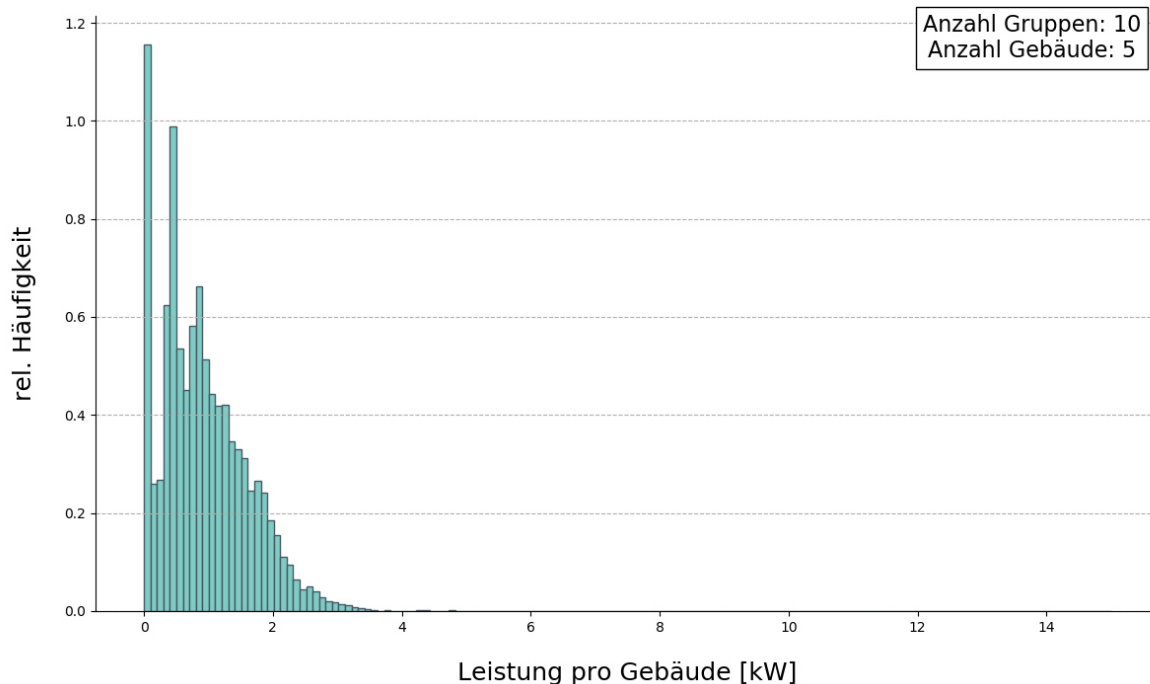


Abbildung 31: Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung von 10 Gruppen à 5 Gebäuden im Februar 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 4.1 °C.

Die Häufigkeit, mit der kein Strom verbraucht wird, fällt tiefer aus als im Mai. Hingegen kann auch im Februar keine genaue Vorhersage des Verbrauchs einer Gruppe von Gebäuden durchgeführt werden.

11.12 Häufigkeitsverteilung des Stromverbrauchs in Funktion der Tageszeit während der Heizperiode

Der durchschnittliche Leistungsverbrauch von 50 Gebäuden wird in acht Intervalle von drei Stunden aufgeteilt und für jedes Intervall ein Histogramm gemäss Formel 1 erstellt. Für die Erstellung des Histogramms wurde der Verbrauch erneut in gleich grosse Klassen mit einer Breite von 0.1 kW eingeteilt. Abbildung 32 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Leistung im Februar während jeweils drei Stunden.

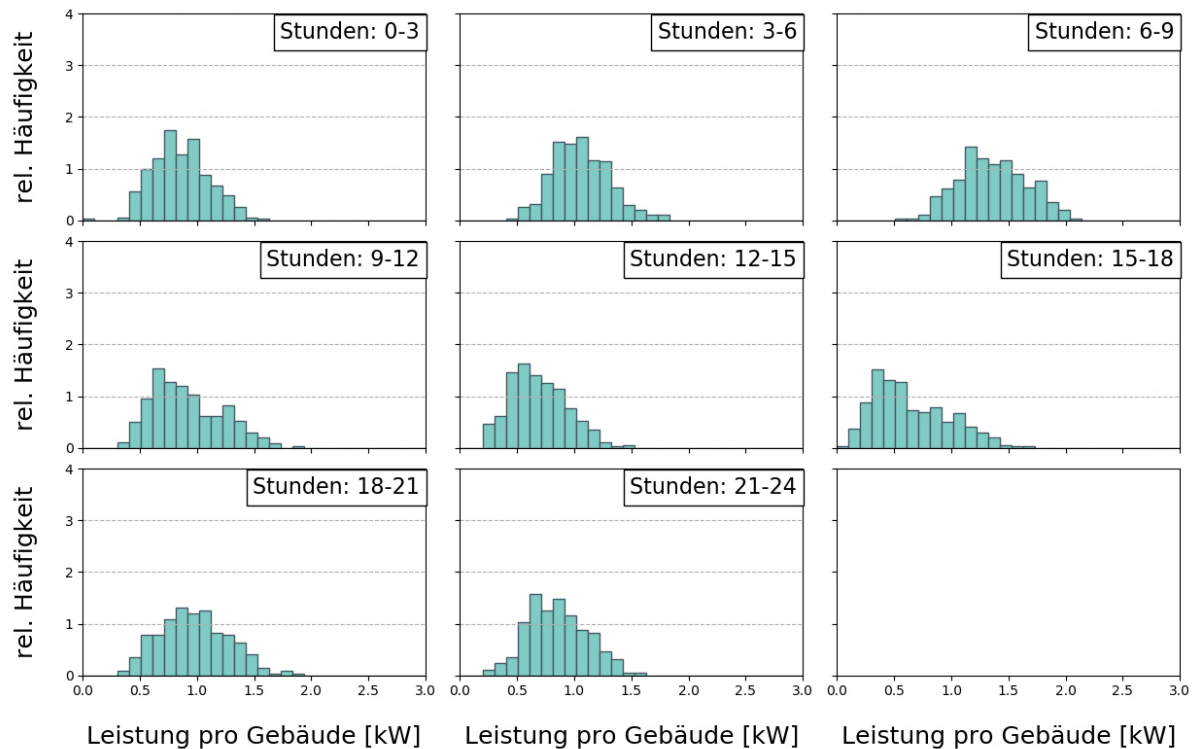


Abbildung 32: Durchschnittliche Häufigkeitsverteilung des mittleren Stromverbrauchs von 50 Gebäuden aufgeteilt in acht Intervalle à drei Stunden im Februar 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 4.1 °C.

Im Vergleich zum Mai sind die Werte während der Heizperiode den ganzen Tag mehr gestreut. Der höchste durchschnittliche Stromverbrauch wird ebenfalls zwischen 06:00 und 09:00 gemessen.

11.13 Berechnung der Dauer und des Energieverbrauches eines Events

Für die Analyse der Dauer und des Energieverbrauches eines Events wurden die Messwerte sämtlicher Gebäude des Projekts GOFLEX verwendet. Es wurde festgelegt, dass ein Event startet, sobald der Stromverbrauch mehr als 10 W beträgt. Das Event dauert so lange an, bis der Verbrauch wieder unter 10 W sinkt. Die Dauer des Events entspricht dem Zeitunterschied zwischen der letzten und der ersten Messung. Die verbrauchte Energie entspricht dem Integral der Leistung von der ersten Messung bis zur letzten Messung, wie dies in der Formel 6 gezeigt wird.

$$\int_{t_0}^{t_n} P(t) * dt \quad (6)$$

$P(t)$ = Leistung zum Zeitpunkt t

t_0 = Start eines Events

t_n = Ende eines Events

Es mussten folgende Annahmen getroffen werden:

- Verbraucht eine Anlage mehr als 0 W und weniger als 10 W, so handelt es sich dabei nicht um ein Event.
- Weil die Messwerte der Heiz- und Warmwassersysteme nicht immer unterschieden werden, werden die Messungen aller Sensoren eines Gebäudes addiert. Es besteht die Möglichkeit, dass dabei zwei unterschiedliche Events als ein einzelner Event erkannt werden.
- Durch das Auftreten von Messfehlern ist es möglich, dass zwischen zwei Events keine Messwerte vorhanden sind und die beiden Events als ein einzelnes erkannt werden.
- Die Dauer eines Events wurde auf 5 Stunden beschränkt, um Messfehler zu beseitigen.

11.14 Häufigkeitsverteilung des Energieverbrauchs eines Events im Winter

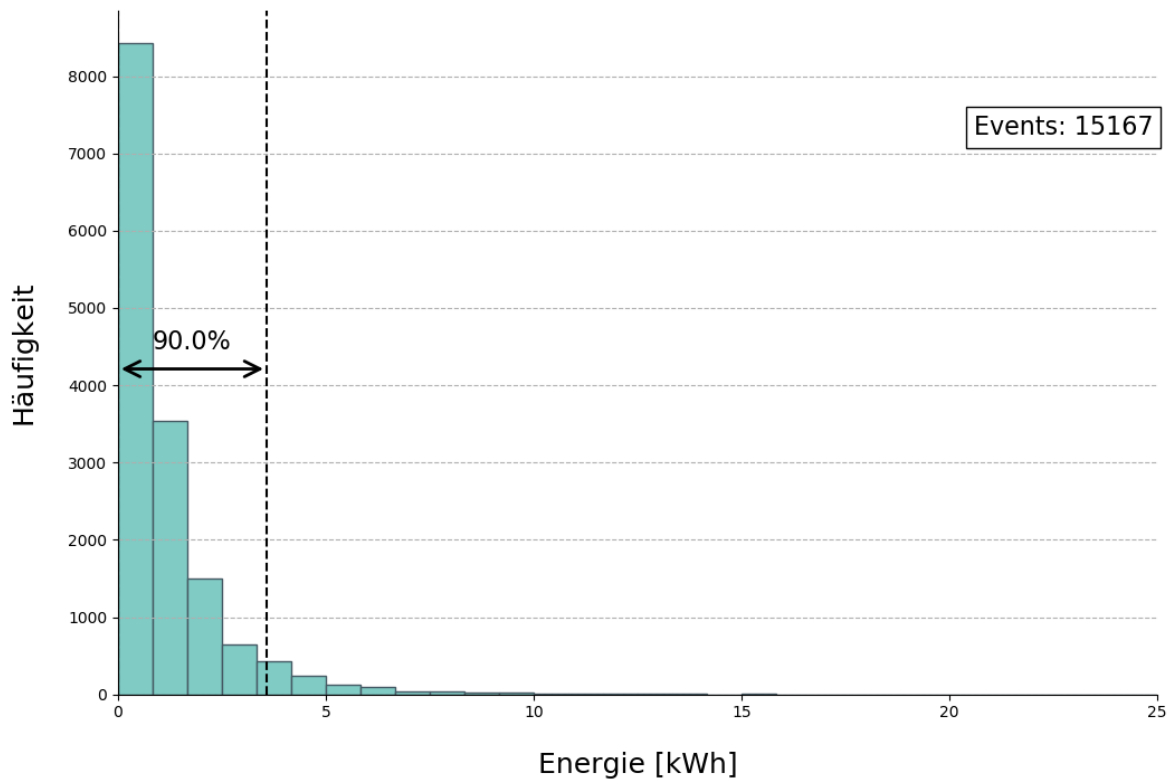


Abbildung 33: Häufigkeitsverteilung des Energieverbrauchs der Events im Februar 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 4.1 °C. Gezählt wurden 15'167 Events von 31 Gebäuden.

Abbildung 33 bildet die Häufigkeitsverteilung des Energieverbrauchs eines Events im Februar ab. Für das Histogramm des Energieverbrauchs wurden 30 Klassen zwischen 0 und 25 kWh gewählt, was einer Klassenbreite von 0.83 kWh entspricht. Der Energieverbrauch der Events beträgt in 90% der Fälle weniger als 3.57 kWh. Ein durchschnittliches Event verbraucht 1.16 kWh. Der maximale Energieverbrauch eines Events liegt bei 22.78 kWh.

11.15 Häufigkeitsverteilung der Dauer eines Events im Winter

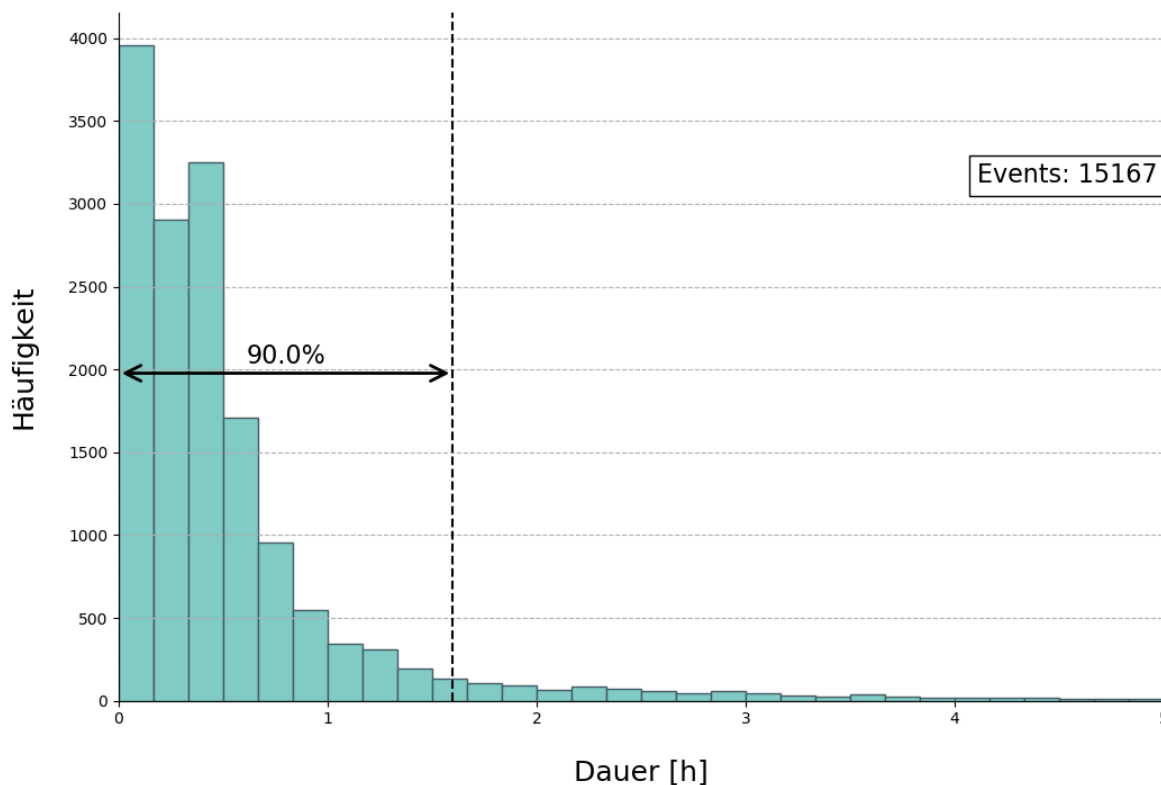


Abbildung 34: Häufigkeitsverteilung der Dauer der Events im Februar 2019 bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 4.1 °C. Gezählt wurden 15'167 Events von 31 Gebäuden.

Die Häufigkeitsverteilung der Dauer eines Events im Februar 2019 ist in Abbildung 34 abgebildet. Die Dauer von 90% der Events beträgt weniger als 1h und 35Min. Ein durchschnittliches Event während der Heizperiode dauert 34 Minuten. Somit dauern Events während der Heizperiode normalerweise etwas länger als ausserhalb der Heizperiode.

11.16 Flexibilität von Wohngebäuden

Untenstehend in Abbildung 35 ist der normalisierte Stromverbrauch in Bezug auf den Mittelwert der Messungen der 56 Gebäude dargestellt.

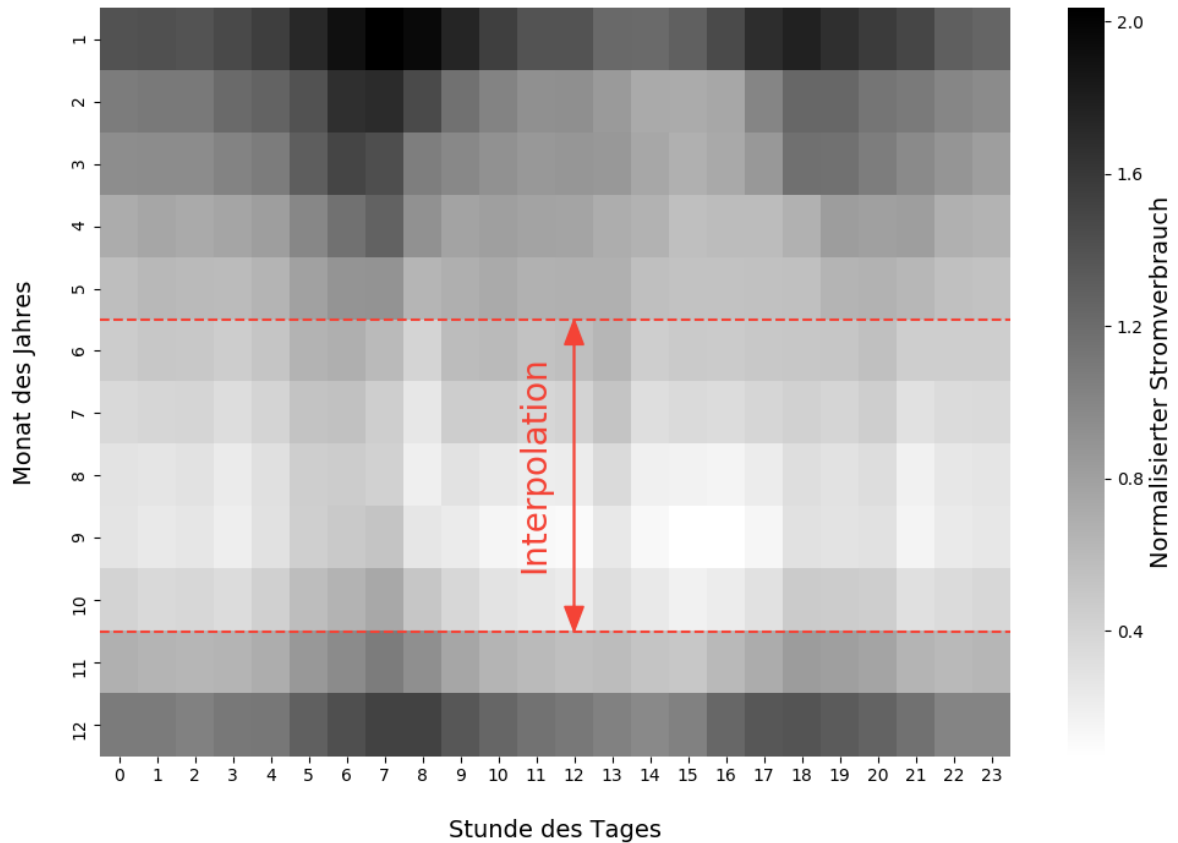
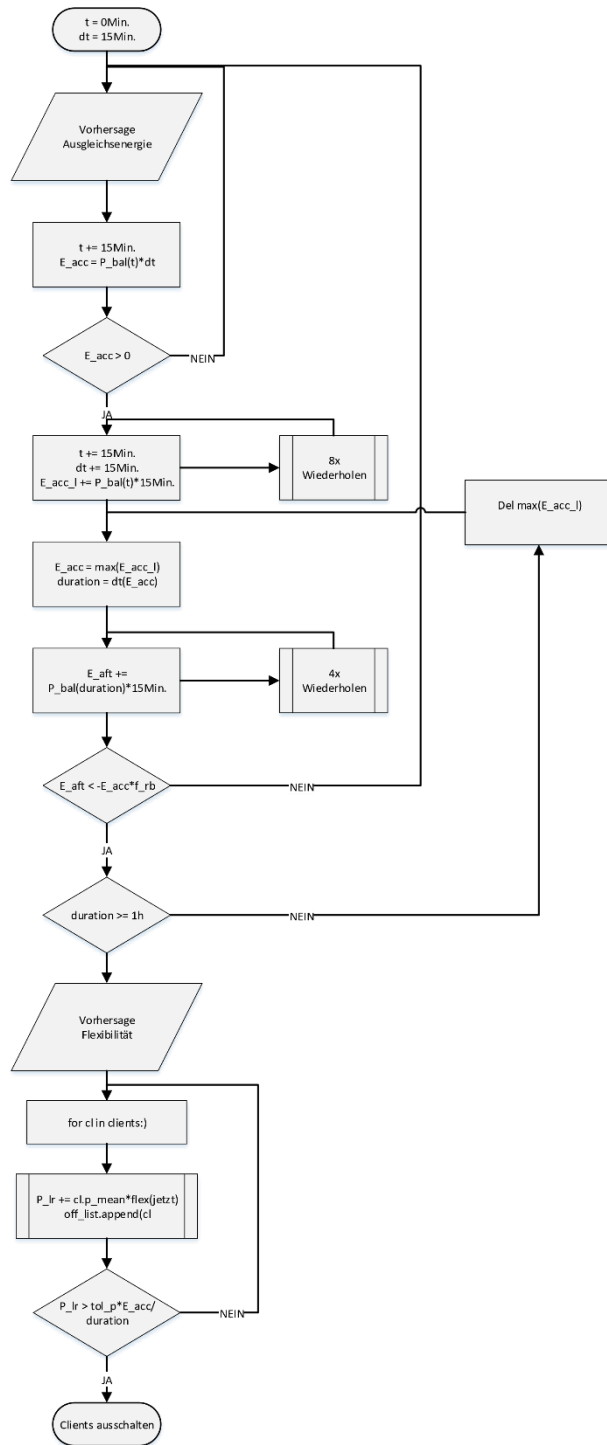


Abbildung 35: In Bezug auf den Mittelwert des Stromverbrauches von 56 Gebäuden normalisierter durchschnittlicher Stromverbrauch für jeden Monat des Jahres und jede Stunde des Tages.

Um den Stromverbrauch eines einzelnen Gebäudes vorherzusagen, kann der entsprechende Wert aus der Grafik mit dem durchschnittlichen Verbrauch des Gebäudes multipliziert werden. Um die Werte zu normalisieren, wurde der gemessene Stromverbrauch addiert und anschließend geteilt an den Mittelwert multipliziert mit der Anzahl Gebäude.

11.17 Zustandsdiagramme der Steuerung

Ausschalten prädiktiv



LEGENDE

$t = \text{Zeit}$

$d = \text{Zeit seit
Beginn der Steuerung}$

$P_{bal} = \text{Leistung
der Ausgleichsenergie}$

$E_{acc} = \text{Ausgleichsenergie
seit Beginn
der Steuerung}$

$E_{acc_l} = \text{Liste
mit Ausgleichsenergien}$

$duration = \text{Dauer
der Ausschaltung}$

$E_{aft} = \text{Energie
nach Wiedereinschalten}$

$f_{rb} = \text{Faktor für
Rebound Effekt}$

$P_{lr} = \text{vorhergesagte
Leistungsreduktion}$

$p_{mean} = \text{Durchschnittliche
Leistung eines
Gebäudes}$

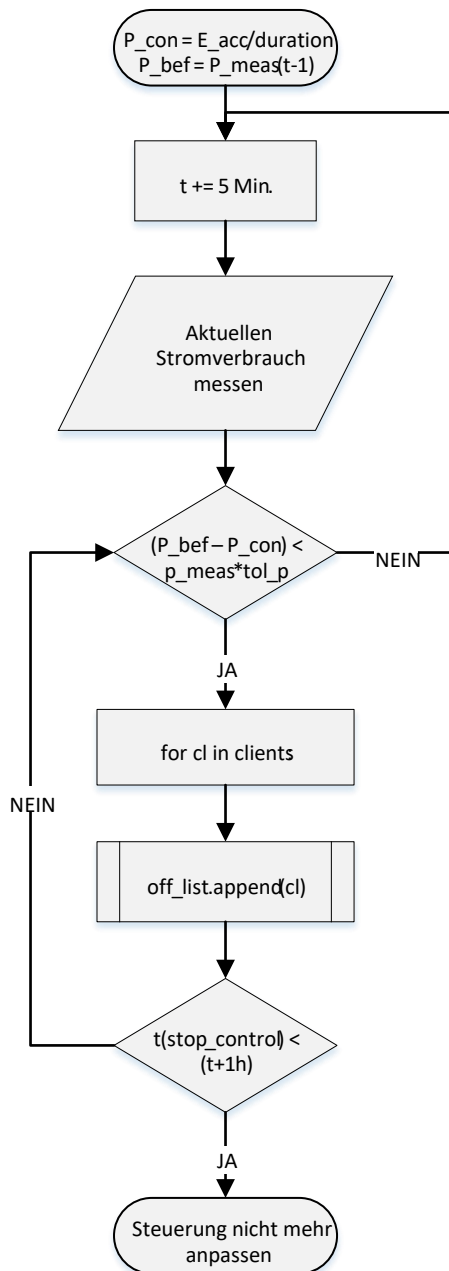
$flex = \text{Faktor für erwartete
Flexibilität}$

$off_{list} = \text{Liste mit
Gebäuden zum
Ausschalten}$

$tol_p = \text{Toleranz}$

Abbildung 36: Zustandsdiagramm der Steuerung der prädiktiven Ausschaltung.

Ausschalten reaktiv



LEGENDE

t = Zeit

P_{con} = Durchschnittliche
Leistung zum
Ausgleichen

E_{acc} = Ausgleichsenergie
seit Beginn
der Steuerung

$duration$ = Dauer der
Ausschaltung

P_{bef} = Leistung vor
Ausschaltung

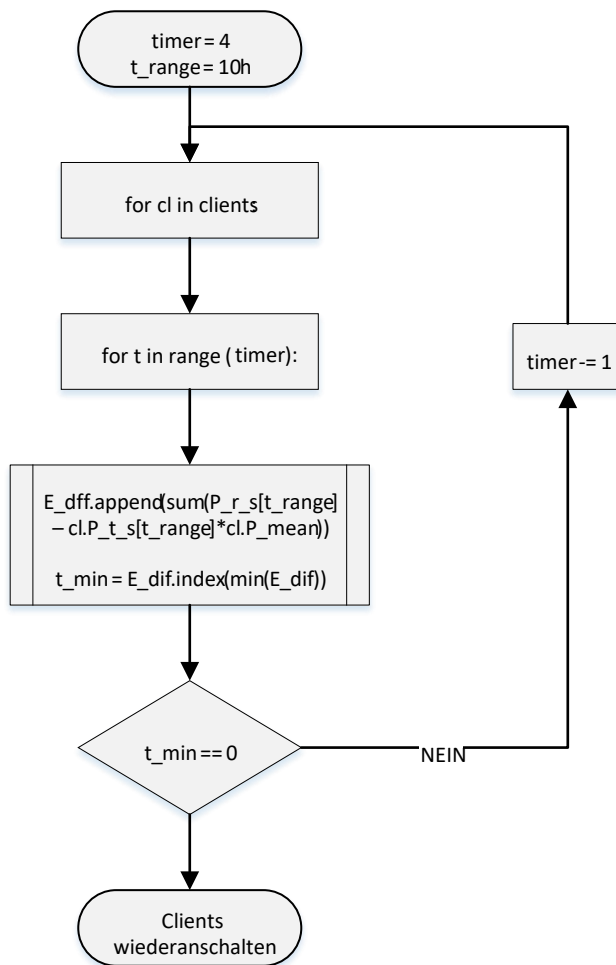
P_{meas} = Gemessene
Leistung aller Gebäude

off_{list} = Liste mit
Gebäuden zum
Ausschalten

tol_p = Toleranz

Abbildung 37: Zustandsdiagramm der Steuerung der reaktiven Ausschaltung.

Wiedereinschalten



LEGENDE

$timer$ = Zeitraum in welchem eingeschaltet werden kann

t_{range} = Zeitraum, während welchem Energie verglichen wird

t = Zeit

E_{diff} = Energiedifferenzen Referenz, nach Steuerung

P_{r_s} = Referenz nach Steuerung

P_{t_s} = Erwartete Leistung nach Steuerung

P_{mean} = Durchschnittliche Leistung eines Gebäudes

t_{min} = Zeitpunkt des Wiedereinschaltens mit geringster E_{diff}

Abbildung 38: Zustandsdiagramm der Steuerung des Wiedereinschaltens

11.18 Simulation komplette Steuerung

Abbildung 39 zeigt den Status der Gebäude während der Simulation. Die Gebäude 179 bis 093

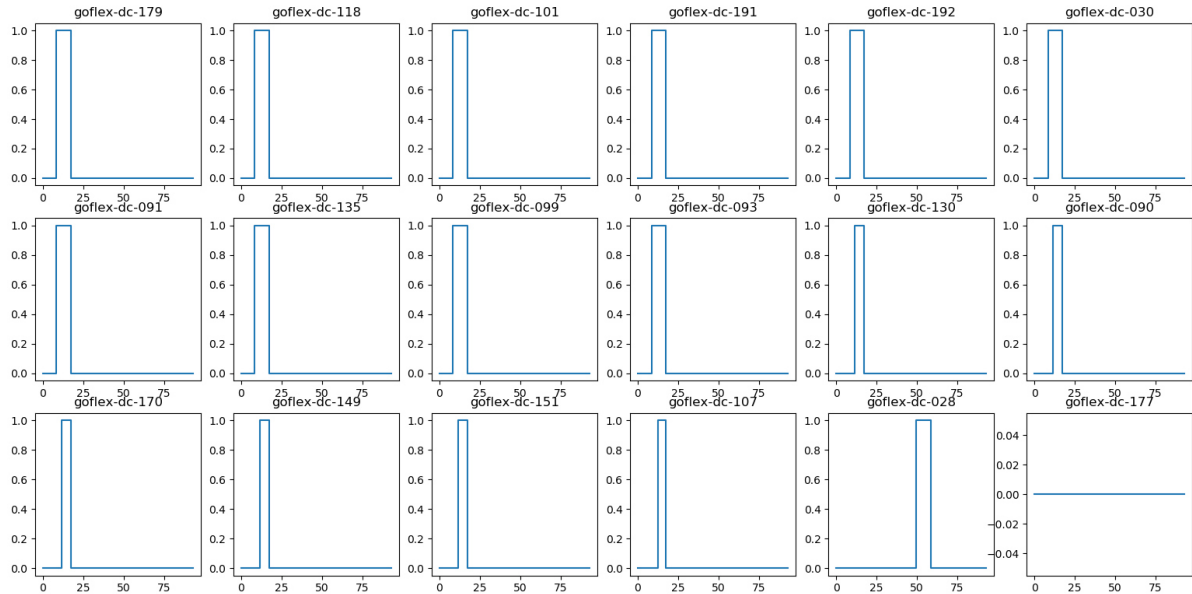


Abbildung 39: Steuerungsstatus der einzelnen Gebäude der Simulation.

(von links nach rechts) wurden in Folge des ersten Untersystems der Steuerung (prädiktive Ausschaltung) ausgeschaltet.

Gebäude 130 bis 107 wurden durch die reaktive Steuerung ausgeschaltet.

Gebäude 028 wurde bei der zweiten Ausschaltung prädiktiv ausgeschaltet, weil sich die restlichen Gebäude in der Erholungsphase befanden.

12 Literaturverzeichnis

- [1] P. O. EU, “Horizon 2020,” 15 Mai 2019. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/206239/reporting/en>.
- [2] GOFLEX, “GOFLEX Germany,” 7 Juni 2019. [Online]. Available: <https://goflex-project.eu/Germany.html>.
- [3] GOFLEX, “GOFLEX Zypern,” 7 Juni 2019. [Online]. Available: <https://goflex-project.eu/Cyprus.html>.
- [4] GOFLEX, “GOFLEX Switzerland,” 7 Juni 2019. [Online]. Available: <https://goflex-project.eu/Switzerland.html>.
- [5] IEA, “Technology Roadmaps - Smart Grids,” IEA, Paris, 2011.
- [6] E. HES-SO, “D8.3,” Sion, 2018.
- [7] H.-S. P. R. M. P.-O. ESR, “D8.2 Business Model Design and KPI Definition – Use Case 2,” ESR, HES-SO, Sion, 2017.
- [8] G. Linas and A. Kelum, “Demand side management in smart grid: A review and proposals for future direction,” Elsevier, 2014.
- [9] VSE, “Strompreisbildung,” VSE, Aarau, 2018.
- [10] Swissgrid, “Preise für Ausgleichsenergie,” Swissgrid, Aarau, 2019.
- [11] finanzen.net, “finanzen.net,” Juli 2019. [Online]. Available: <https://www.finanzen.net/rohstoffe/eex-strom-phelix-baseload-year-future/historisch>.
- [12] energy-partner.ch, “energy-partner.ch,” August 2019. [Online]. Available: <https://www.energy-partner.ch/themen/analyse-kurzfristpreise-2017>.
- [13] Swissgrid, “Grundlagen Systemdienstleistungsprodukte,” Swissgrid, Aarau, 2018.
- [14] Duden, “Duden,” 25 Juli 2019. [Online]. Available: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Flexibilitaet>.
- [15] eurelectric, “eurelectric,” 5 August 2019. [Online]. Available: <https://www.eurelectric.org/news/flexibility-bringing-the-european-power-sector-closer-to-reaching-its-climate-goals/>.
- [16] W. Golden and P. Powell, “Towards a definition of Flexibility: in search of the HolyGrail?,” Omega, 2000.

- [17] S. Ø. Jensen, “annex67,” 14 Juni 2019. [Online]. Available: www.annex67.org.
- [18] B. f. S. BFS, “Erhebung der Energieträger von Wohngebäuden (SETW),” BFS, Neuchâtel, 2017.
- [19] F. Maxime, G. Milton, G. Georges, H. Peter, M. Claudia, S. Peterhans, R. Dott and W. Eugster, “Jahresbericht,” FWS, Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz, Bern, 2017.
- [20] B. f. E. BFE, “Förderung der Photovoltaik,” BFE, Ittigen, 2019.
- [21] Swissolar, “Faktenblatt: Strom von der Sonne,” Swissolar, Zürich, 2019.
- [22] OECD/IEA, “The Future Of Cooling,” OECD/IEA, 2018.
- [23] B. f. E. BFE, “Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2017,” BBL, Verkauf Bundespublikationen, Bern, 2017.
- [24] K. -. K. Leibstadt, “KKL - Kernkraftwerk Leibstadt,” August 2019. [Online]. Available: <https://www.kkl.ch/kernenergie/unser-kraftwerk.html>.
- [25] E. D. d. I. MeteoSchweiz, “MeteoSchweiz,” 31 Juli 2019. [Online]. Available: <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klima-der-schweiz.html>.
- [26] B. SIA, “EN15251,” SN, Zürich, 2007.
- [27] Suissetec, “Suissetec,” 2015. [Online]. Available: https://www.suissetec.ch/files/PDFs/Merkblaetter/Sanitaer/Deutsch/2015_Info_Anlagen_fuer_Trinkwarmwasser_in_Gebaeuden.pdf.
- [28] E. A. NRW, “Optimaler Betrieb von Wärmepumpen - Ein Leitfaden,” Düsseldorf, 2018.
- [29] RAVEL, “Wärmepumpen - Planung, Bau und Betrieb von Elektrowärmepumpenanlagen,” 1993.
- [30] J. Nipkow, “Der typische Haushalt-Stromverbrauch,” S.A.F.E, Schweizerische Agentur für Energieeffizienz, Zürich, 2013.
- [31] B. f. S. BFS, “Statistik der erneuerbaren Energien,” BFS, Neuchâtel, 2018.
- [32] K. Aduda, T. Labeodan, W. Zeiler, G. Boxem and Y. Zhao, “Demand Side Flexibility: Potentials and building performance implications,” Elsevier, Eindhoven, 2016.
- [33] D. T. Niedrig, “Energie- und CO2-Handel,” Formaet Services GMBH, Rheinbach, 2019.