



Paul Weber, BSc

Analyse des Verbraucherverhaltens im Niederspannungsnetz und die damit verbundenen Herausforderungen für das Stromnetz

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Elektrotechnik - Energietechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

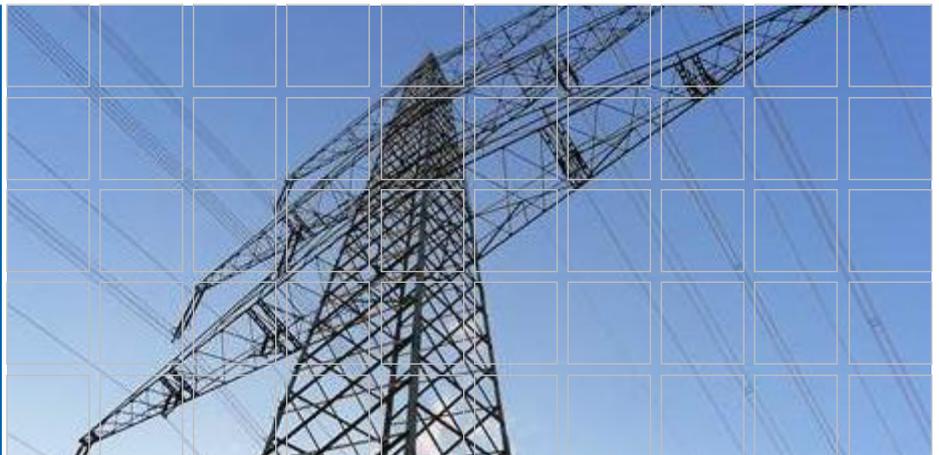
Betreuer:

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber
Dipl.-Ing. Markus Resch, BSc

Institut für Elektrische Anlagen und Netze
Inffeldgasse 18/1
8010 Graz

Graz, Juni 2021

IEAN



© fotopro

Analyse des Verbraucherverhaltens im Niederspannungsnetz und die damit verbundenen Heraus- forderungen für das Stromnetz

Eine Masterarbeit von
Paul Weber, BSc

Betreuer
Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber
Dipl.-Ing. Markus Resch, BSc

Juni 2021

Technische Universität Graz
Institut für Elektrische Anlagen und Netze
Inffeldgasse 18/I
8010 Graz
Austria

Institusleiter

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber

Betreuer

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber
Dipl.-Ing. Markus Resch, BSc

Eine Masterarbeit von
Paul Weber, BSc

Juni 2021

Kurzfassung

Durch den vermehrten Einsatz von Elektronikkomponenten in diversen Haushaltsgeräten und Anwendungen ändert sich das Verhalten dieser im Niederspannungsnetz. Diese Auswirkungen werden mit einem mehrkanaligen Messgerät untersucht indem sechs Haushalte über den Zeitraum von einer Woche gemessen werden. Aus den ermittelten Daten werden typische Wirk- und Blindleistungskurven relevanter Geräte ermittelt. Ebenfalls werden die Haushalte bezüglich Netzurückwirkungen (Oberschwingungsspannungen und -ströme) untersucht. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen über die Auswirkungen auf das Niederspannungsnetz können künftige Herausforderungen eruiert werden.

Schlüsselwörter: Lastgänge, Haushalte, Netzurückwirkungen, Oberschwingungsspannungen, Oberschwingungsströme

Abstract

The increased use of electronic components in various household appliances and applications changes the behavior of these in the low-voltage grid. These effects are examined using a multi-channel measuring device in which six households are measured over a period of one week. Typical active and reactive power curves of relevant devices are determined from the data obtained. Households are also examined with regard to perturbations (harmonic voltages and currents). With this knowledge the effects on the low-voltage grid and future challenges can be determined.

Keywords: load profiles, households, grid perturbations, harmonic voltages, harmonic currents

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ort

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken die mich während meines Studiums unterstützt haben.

Zuerst möchte ich meinen Betreuern Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber und Dipl.-Ing. Markus Resch BSc für die wissenschaftliche Betreuung und Begutachtung meiner Masterarbeit danken. Sie nahmen sich immer ausreichend Zeit für meine Fragenstellungen und gaben stets hilfreiche Kritik und Anregungen.

Ein besonderer Dank gilt allen Bewohnern der Haushalte, welche ich im Zuge meiner Masterarbeit gemessen habe, für die Erlaubnis zu Messen und ihre akribisch genaue Führung der Betriebszeitentagebücher der relevanten Geräte, ohne diese meine Analysearbeit weitaus schwieriger gewesen wäre.

Den Studenten unserer Lerngruppe möchte ich für die zahlreichen Diskussionen, Hilfestellungen und Ablenkungen vom Studienalltag danken.

Ebenfalls möchte ich mich bei meiner Freundin Nadine bedanken, welche mich immer wieder motivierte und mir viel Geduld entgegengebracht hat. Danke für die vielen Diskussionen und das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Abschließend möchte ich mich noch bei meinen Eltern bedanken, ohne deren Unterstützung das alles nicht möglich gewesen wäre. Sie haben mich immer wieder ermuntert das Studium trotz mancher Selbstzweifel fortzuführen und abzuschließen.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	1
1.1	Ziel	1
1.2	Methode	1
1.3	Ergebnisse	1
2	Einleitung	2
3	Ausgangslage und Motivation	6
4	Gemessene Haushalte	7
4.1	Auswahlkriterien der Haushalte	7
4.2	Eckdaten der Haushalte	8
4.3	Besonderheiten der Haushalte	8
5	Messkonzept	10
5.1	Verwendete Messgeräte und Zubehör	10
5.1.1	Blindleistungsberrechnung Dewesoft	12
5.1.2	Kalibrierung der Strommesszangen	12
5.2	Messaufbau	13
5.3	Messunsicherheit	15
5.4	Messvorgang	15
5.5	Mathematische Korrektur der Messergebnisse	17
6	Lastgänge der gemessenen Haushalte	19
7	Lastgänge relevanter Lasten	28
7.1	Vergleich von Ceranfeld und Induktionskochfeld	28
7.2	Backrohr	32
7.3	Geschirrspüler	33
7.4	Vergleich einer älteren und neueren Waschmaschine	35
7.5	Vergleich verschiedener Wärmepumpen	37
7.5.1	3-Phasige Luftwärmepumpe	38
7.5.2	1-Phasige Luftwärmepumpe	39
7.5.3	3-Phasige Erdwärmepumpe	41
7.5.4	Ladeverhalten eines E-Autos	43

8	Oberschwingungen	45
8.1	Relevante Normen	45
8.1.1	EN 50160 [1]	45
8.1.2	EN 61000-3-2 [2]	46
8.1.3	EN 61000-3-12 [3]	47
8.2	Mathematische Berechnung	48
8.3	Messergebnisse	49
8.4	Haushalt mit dem maximalen THC	51
8.5	Haushalt mit dem maximalen THV	56
9	Conclusio und Ausblick	61
	Symbolverzeichnis	63
	Abkürzungsverzeichnis	64
	Literaturverzeichnis	65
	Anhang	67

Abbildungsverzeichnis

2.1	Elektrischer Endverbrauch 2019 Österreichs aufgeteilt in Sektoren [4]	2
2.2	Energieverbrauch eines Haushalts prozentual aufgeteilt auf die einzelnen Verbraucher [5]	3
5.1	Einstellung des Kanalsetups der Kanäle 0 - 7	11
5.2	Schematischer Messaufbau	13
5.3	Realer Messaufbau im Haushalt 1	14
5.4	Erfassung der Betriebszeiten durch die im Haushalt lebenden Personen	16
5.5	Messabweichung der Blindleistung vom Wert 0 bezogen auf die Wirkleistung	17
6.1	Leistungen und Blindleistungen aller 3 Phasen von Haushalt 1	22
6.2	Leistungen und Blindleistungen aller 3 Phasen von Haushalt 2	23
6.3	Leistungen und Blindleistungen aller 3 Phasen von Haushalt 3	24
6.4	Leistungen und Blindleistungen aller 3 Phasen von Haushalt 6	26
7.1	Wirk- und Blindleistungsverläufe eines Induktionsfeldes	29
7.2	Wirk- und Blindleistungsverläufe eines Induktionsfeldes	30
7.3	Kurvenverläufe eines Backrohres	32
7.4	Kurvenverläufe eines Geschirrspülers	33
7.5	Kurvenverlauf einer älteren Waschmaschine	35
7.6	Kurvenverlauf einer neueren Waschmaschine	36
7.7	Heizbetrieb der 3-phasigen Luftwärmepumpe	38
7.8	Heizbetrieb der 1-phasigen Luftwärmepumpe	39
7.9	Warmwasserbereitung der 1-phasigen Luftwärmepumpe	40
7.10	Heizbetrieb und Warmwasserbereitstellung einer 3-phasigen Erdwärmepumpe	41
7.11	Ladestation des E-Autos im Haushalt 6	43
8.1	Oberschwingungströme des Haushaltes 2	51
8.2	Oberschwingungsströme und -spannungen des Haushaltes 2	52
8.3	Oberschwingungsspannungen des Haushaltes 2	54
8.4	Oberschwingungsspannungen und -ströme des Haushaltes 2	55
8.5	Oberschwingungströme des Haushaltes 4	56
8.6	Oberschwingungsströme und -spannungen des Haushaltes 4	57
8.7	Oberschwingungsspannungen des Haushaltes 4	58

8.8	Oberschwingungsspannungen und -ströme des Haushaltes 4	60
D.1	Darstellung der Messaufbauten in den verschiedenen Örtlichkeiten . . .	67
D.2	Darstellung der Messaufbauten in den verschiedenen Örtlichkeiten . . .	68
D.3	Darstellung der Messaufbauten im Haushalt 4	69
D.4	Formular zur Betriebszeiterfassung	71
D.5	Leistungen und Bldindleistungen aller 3 Phasen des Haushaltes 4	72
D.6	Leistungen und Bldindleistungen aller 3 Phasen des Haushaltes 5	73
D.7	Kurvenverlauf des Induktionsfelder in HH 2	74
D.8	Kurvenverlauf des Backrohrs in HH 2	75
D.9	Kurvenverlauf des Backrohrs in HH 3	75
D.10	Kurvenverlauf des Backrohrs in HH 4	76
D.11	Kurvenverlauf des Geschirrspülers in HH 1	76
D.12	Kurvenverlauf des Geschirrspülers in HH 2	77
D.13	Kurvenverlauf des Geschirrspülers in HH 4	77
D.14	Kurvenverlauf der Waschmaschine in HH 1	78
D.15	Kurvenverlauf der Waschmaschine in HH 4	78
D.16	Kurvenverlauf der Erdwärmepumpe in HH 4	79
D.17	Harmonische Ströme und Spannungen HH 1	80
D.18	Harmonische Ströme und Spannungen HH 3	80
D.19	Harmonische Ströme und Spannungen HH 5	81
D.20	Harmonische Ströme und Spannungen HH 6	81

Tabellenverzeichnis

2.1	Aufschlüsselung des Energiebedarfs eines durchschnittlichen Haushalts mit Elektroheizung oder Wärmepumpe [5]	4
2.2	Auffistung der Daten verschiedener Leuchtmitteltechnologien [6],[7],[8] .	5
4.1	Eckdaten der ausgewählten Haushalte	8
6.1	Messzeiten der gemessenen Haushalte	19
6.2	Wirk- und Blindenergiebedarf der einzelnen Haushalte	20
6.3	Werteübersicht der gemessenen Haushalte	21
8.1	Werte einzelner Oberschwingungsspannungen an der Übergabestelle bis zur 25. Ordnung in Prozent der Grundschwingungsspannung u_1 [1] . . .	46
8.2	Grenzwerte für Klasse A [2]	47
8.3	Aussendungsgrenzwerte für Oberschwingungsströme für Geräte, die keine symmetrischen dreiphasigen Geräte sind [3]	48
8.4	Zeiten der maximalen THC's und THV's der einzelnen Phasen und Haushalte	49
8.5	Gemessene und berechnete Werte der Oberschwingungsanalyse	50

1 Kurzfassung

1.1 Ziel

Ziel dieser Arbeit ist es, das Verbraucherverhalten von Haushalten mit neueren Geräten und einer Wärmepumpe als Heizsystem messtechnisch zu erfassen. Aus der Analyse der Messdaten sollen typische Wirk- und Blindleistungskurven für diverse Verbraucher sowie Netzrückwirkungen (Oberschwingungsströme und -spannungen) des gesamten Haushaltes ermittelt werden. Mittels der daraus gewonnenen Erkenntnisse über die Auswirkungen auf das Niederspannungsnetz können künftige Herausforderungen eruiert werden.

1.2 Methode

Im Zuge der Untersuchungen werden die Phasenspannungen und -ströme von 6 Haushalten, über einen Zeitraum von jeweils einer Woche gemessen. Dafür wird ein mehrkanaliges Messgerät (Dewetron 3010) mit einer Abtastfrequenz von 5 kHz verwendet. Die erste Auswertung der Messdaten erfolgt mithilfe der Messgerätesoftware (Dewesoft 7), welche bereits die Oberschwingungen im Frequenzbereich sowie die berechneten Wirk- und Blindleistungen der einzelnen Phasen ermittelt. Die weitere Auswertung und Analyse wird in der Softwareumgebung Matlab bewerkstelligt.

1.3 Ergebnisse

Bei der Analyse der Haushalte sowie deren Geräte hat sich herausgestellt, dass das Blindleistungsverhalten der Grundlast von neueren Haushalte kapazitiv ist. Abhängig vom Nutzungsverhalten der Betriebsmittel sowie der verbauten Geräte wird diese Grundlast beeinflusst.

Die Auswertung der harmonischen Oberschwingungsspannungen zeigt, dass die Werte der maximalen harmonischen Gesamtverzerrung nur knapp über dem in der Norm [1] angeführten Grenzwert von 8 % liegen. Dieser gilt jedoch für den 10-Minuten-Mittelwert, wird dieser für die Messergebnisse berechnet, wird der Grenzwert in jedem der Haushalte weit unterschritten.

2 Einleitung

Der elektrische Energieverbrauch in Österreich ist in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen, 2019 belief er sich auf 63,51 TWh [4]. Die folgende Abbildung 2.1 zeigt die sektorale Aufteilung des elektrischen Endverbrauchs 2019 in Österreich in die einzelnen Gruppierungen. Dabei fällt auf, dass 29 % des Verbrauchs auf die Haushalte entfallen, welche somit den zweitgrößten elektrischen Energieverbraucher in Österreich darstellen und damit eine nicht unwesentliche Rolle für Lastflussrechnungen und Lastvorhersagen einnehmen. In dieser Arbeit soll der Einfluss des Haushaltssektors auf das Stromnetz untersucht werden um damit mögliche zukünftige Herausforderungen für den Betrieb eines stabilen Netzes evaluieren zu können.

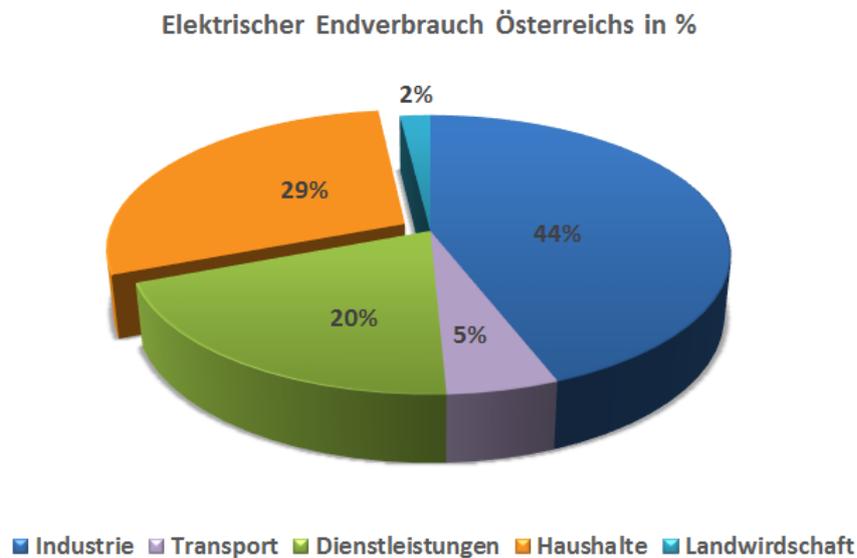


Abbildung 2.1: Elektrischer Endverbrauch 2019 Österreichs aufgeteilt in Sektoren [4]

Die nachfolgende Abbildung 2.2 zeigt die Aufteilung des elektrischen Energieverbrauchs Österreichs im Jahre 2016 von Haushalten mit Elektroheizung oder Wärmepumpen aufgeschlüsselt in die verschiedenen Verwendungsgebiete (ausgenommen Heizung). Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit sind keine aktuelleren Daten verfügbar. In diesem Jahr belief sich der el. Energieverbrauch im Haushaltssektor auf rund 17,84 TWh, dies entspricht 28,71 % des gesamten el. Energieverbrauchs in Österreich.

Teilt man nun den Energieverbrauch auf alle Haushalte auf, entspricht dies einem durchschnittlichen Jahresverbrauch von rund 4 kWh für die in Abbildung 2.2 gezeigten Gruppierungen.

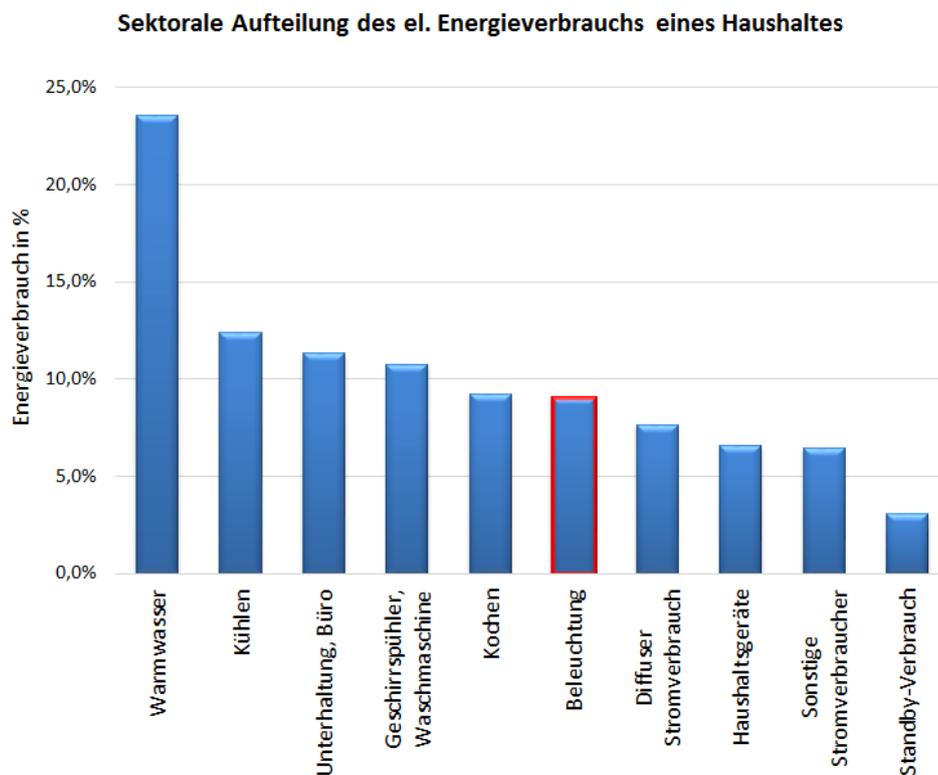


Abbildung 2.2: Energieverbrauch eines Haushalts prozentual aufgeteilt auf die einzelnen Verbraucher [5]

Der Energieverbrauch für das verwendete Heizsystem (Wärmepumpe oder Elektroheizung) beläuft sich auf rund 5,18 kWh. Die genaue Aufschlüsselung des Energieverbrauchs eines Haushalts mit Elektroheizung und Wärmepumpe ist in der nachfolgende Tabelle 2.1 ersichtlich.

	Stromverbrauch in kWh		
	2008	2012	2016
Elektroheizung und Heizungswärmepumpe			
Stromverbrauch insgesamt	7.814,5	8.951,3	9.185,4
Heizen	4.278,4	4.228,4	5.176,1
Hauptheizer	4.195,2	4.193,4	5.065,7
Zusatzheizer	83,2	35,0	110,4
Hilfsenergie	0,0	0,0	0,0
Umwälzpumpe	0,0	0,0	0,0
Warmwasserbereitstellung	1.156,3	946,3	945,6
Warmwasserbereitung	1.152,2	940,9	924,6
Umwälzpumpe	4,1	5,4	21,1
Kochen	402,0	453,6	370,5
Herd, Backrohr	338,8	335,5	340,3
Küchengeräte mit Thermofunktion ¹	63,1	118,1	30,1
Kühlen	471,6	567,6	497,6
Kühlschränke, Kühlgefrierkombinationen	262,0	358,1	299,3
Gefrierschränke, Gefriertruhen	209,6	209,5	198,3
Geschirrspüler	185,9	363,0	248,3
Wäschewaschen	104,9	238,4	182,9
Waschmaschinen, Waschtrockner	90,8	215,7	182,6
Wäschetrockner	14,1	22,7	0,3
Haushaltsgeräte²	203,6	367,0	262,5
Unterhaltung, Büro, Kommunikation	250,7	515,5	453,2
Beleuchtung	276,9	343,7	361,0
Klimatisierung	0,5	38,0	18,1
Sonstige relevante Stromverbraucher³	122,1	144,7	234,2
Ladegeräte	2,3	5,2	6,5
Standby-Verbrauch	103,0	464,5	122,4
Diffuser Stromverbrauch	256,3	275,5	306,5
Q: STATISTIK AUSTRIA, Energiestatistik: Strom- und Gastagebücher 2008/2012/2016, im Auftrag der Energie-Control Austria und des BMNT. Erstellt am 17.03.2018.- Aufgrund geringer Stichprobengröße erheben diese keinen Anspruch auf Repräsentativität in allen Untergruppen! - 1) z.B. Wasserkocher, Toaster, Mikrowelle, Fritteusen, Kaffeemaschinen. - 2) z.B. Mixer, Elektormesser. - 3) Stromverbraucher wie elektrische Rasenmäher, Zimmerbrunnen, Wasserbetten o.ä.			

Tabelle 2.1: Aufschlüsselung des Energiebedarfs eines durchschnittlichen Haushalts mit Elektroheizung oder Wärmepumpe [5]

Wie bereits erwähnt steigt der elektrische Energieverbrauch in Österreich trotz der Tatsache der steigenden Energieeffizienz und damit verminderter Energieaufnahme vieler Geräte und Betriebsmittel. Ein gutes Beispiel hierfür ist die im Folgenden näher betrachtete Gruppierung Beleuchtung (rot umrahmt in Abbildung 2.2), welche rund 9 % des gesamten Energieverbrauchs eines Haushaltes ausmacht.

Die folgende Tabelle 2.2 zeigt die Leistungs- und Lichtstromdaten verschiedener Leuchtmitteltechnologien und das Verhältnis von Leistung zu Lichtstrom der jeweiligen Technologie.

Technologien	Leistung	Lichtstrom	Verhältnis
	W	lm	mW/lm
Glühbirne	100	1380	72,46
Energiesparlampe	23	1380	16,67
LED - Lampe	13	1521	8,55

Tabelle 2.2: Auflistung der Daten verschiedener Leuchtmitteltechnologien [6],[7],[8]

Im September 2009 begann die sukzessive Verdrängung von herkömmlichen Glühlampen aus den Haushalten durch das Verbot der Auslieferung bzw. des Verkaufs von 100 W Glühbirnen an den Handel in Österreich [9]. Zu diesem Zeitpunkt war die Energiesparlampe schon in einem breiten Sortiment vorhanden, diese wurde jedoch wenig später von der noch effizienteren LED-Technologie abgelöst, weshalb sich die folgenden Ausführungen und Vergleiche auf herkömmliche Glühbirnen und LED Lampen beschränken.

Wenn man nun die einzelnen Leuchtmitteltechnologien miteinander vergleicht, fällt auf, dass das Verhältnis von Leistung zu Lichtstrom in einem weiten Bereich von 8,55 - 72,46 mW/lm liegt. Das heißt, durch die Verwendung von LED-Leuchtmitteln statt herkömmlicher Glühbirnen ergibt sich eine Steigerung der Energieeffizienz um rund 88 %. Das bedeutet, dass der Energieverbrauch sinkt. Da sich in vielen Fällen die Anzahl der Leuchtmittel in einem Raum in den letzten Jahren jedoch ebenso vergrößert hat, relativiert sich diese Minderung des Energieverbrauches.

Die Verwendung von vorwiegend LED-Leuchtmitteln hat noch eine weitere Auswirkung als jene der gesteigerten Effizienz. Die meisten dieser Leuchtmittel haben Elektronik-Komponenten verbaut, welche die Blindleistungsaufnahme besagter Technologie im Vergleich zu herkömmlichen Glühbirnen wesentlich verändert. Der Leistungsfaktor einer Glühbirne besitzt den Wert 1, d.h. Strom und Spannung sind in Phase und es kommt zu keiner Blindleistungsaufnahme. Bei LED-Leuchtmitteln hingegen wird der Leistungsfaktor meist mit > 0.5 angegeben [7], d.h. Strom und Spannung sind nicht in Phase und es kommt zu einer Blindleistungsaufnahme. Dieses Verhalten kann auch bei vielen anderen neuen Geräten beobachtet werden, was im Kapitel 7 detaillierter beschrieben wird.

3 Ausgangslage und Motivation

In den verschiedensten Literaturen für Lastflussberechnungen wird oft ein Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ von 0.9 bis 0.99 für Haushalte angegeben [10], hierbei wird jedoch meist keine Auskunft darüber gegeben, ob dieser kapazitiv oder induktiv ist. Aufgrund der Annahme, dass viele Verbraucher eine induktive Last darstellen, wird der Leistungsfaktor als solcher angesehen. Infolge der Tatsache, dass vermehrt neuartige Geräte, welche leistungselektronische Komponenten enthalten, eingesetzt werden, stellt sich die Frage, ob dies eine Veränderung der Leistungsfaktoren mit sich bringt. Dies würde die Schlussfolgerungen und Simulationen der Verbraucher im Zuge von Lastflussberechnungen grundlegend beeinflussen.

Zurzeit wird elektrische Energie nach der Menge an benötigten kWh verrechnet. Durch die steigende Anzahl von Photovoltaikanlagen ändert sich jedoch das Verhalten der Verbraucher von ausschließlichem Energiebezug zu einer Mischung aus Bezug und Einspeisung. Dies hat zur Folge, dass die Energieversorgungsunternehmen (EVUs) weniger Umsatz durch die verbrauchte Energie generieren, die Netzstabilität, sowie die Anschlüsse mit der geforderten Anschlussleistung dennoch sicherstellen bzw. zur Verfügung stellen müssen. Im Fall von privaten Haushalten liegt die Anschlussleistung bei 3 kW [11], welche mit einem Netzbereitstellungsentgelt verrechnet werden. Damit liegt der maximale Bezug eines Haushaltes eigentlich bei 3 kW, in vielen Fällen wird dieser Grenzwert jedoch überschritten. Zurzeit werden diese Überschreitungen noch nicht verfolgt oder beanstandet, da erst mit dem Einbau der Smart Meter die Möglichkeit hierfür geschaffen wird.

In Zukunft könnten Energieversorgungsunternehmen auch andere Verrechnungsmodelle verwenden, wobei eine Möglichkeit in der Verrechnung der maximal bezogenen Leistung des Haushaltes liegt. Im Zuge dessen ist es für die Hauseigentümer von Vorteil die Lastgänge der Verbraucher und des gesamten Haushaltes zu kennen und zu analysieren, um den maximalen Leistungsbezug zu einem Zeitpunkt so gering wie möglich zu halten. Zur Reduktion von Spitzen in einzelnen Phasen ist es von großer Bedeutung eine gleichmäßige Aufteilung der Verbraucher auf alle 3 Phasen sicher zu stellen .

4 Gemessene Haushalte

Dieses Kapitel beschreibt die Auswahlkriterien der gemessenen Haushalte, welche für die Analyse und Interpretation von wesentlicher Bedeutung sind. Des Weiteren werden die Eckdaten der ausgewählten Haushalte aufgelistet und die damit einhergehenden Besonderheiten der einzelnen Haushalte erläutert. Insgesamt werden 6 Haushalte gemessen deren Eigenschaften im Folgenden beschrieben werden.

4.1 Auswahlkriterien der Haushalte

Die Auswahl der Haushalte hat eine essenzielle Bedeutung für die Aussagekraft der sich daraus ergebenden Ergebnisse. Um die Haushalte und deren Geräte möglichst gut miteinander vergleichen zu können, sollten diese folgende Kriterien erfüllen:

- Neue Haushaltsgeräte und Verbraucher
- Abschaltbare Vorzählersicherungen
- Genügend Platz für das Messequipment im Verteiler
- Wärmepumpe (wenn möglich)

Das Blindleitungsverhalten neuer Geräte ist grundverschieden zu jenem von älteren Geräten. Da sich diese Arbeit mit dem Verbraucherverhalten neuerer Haushalte und deren Einfluss auf das Niederspannungsnetz beschäftigt, ist es wichtig Haushalte mit neuem Equipment zu untersuchen.

Die abschaltbaren Vorzählersicherungen spielen eine wichtige Rolle beim Einbau des Messequipments. Ohne diese könnte der Verteiler ohne einen Techniker des jeweiligen Energieversorgungsunternehmens (EVU) nicht spannungsfrei geschaltet werden um das Messequipment einzubauen, da der Vorzählerteil mit den darin befindlichen Sicherungen versperrt ist. Dies würde zusätzliche Kosten verursachen.

Die Stromzangen benötigen einiges an Platz um eingebaut werden zu können, deshalb ist es wichtig, dass die Leitungen gut zugänglich sind und genug Platz für die Stromzangen vorhanden ist.

Wärmepumpen benötigen mehr elektrische Energie als andere Heizsysteme, wie zum Beispiel Ölheizungen, Holzheizungen, etc. und haben daher auch einen größeren Einfluss auf das elektrische Netz.

4.2 Eckdaten der Haushalte

Bei den Haushalten handelt es sich um Neubauten (Fertigstellungszeitpunkt ≤ 5 Jahren) bzw. um Haushalte welche auf dem neuesten Stand der Technik sind, d.h. die verbauten Geräte/Betriebsmittel sowie die Beleuchtungsanlage sind in den letzten Jahren auf- bzw. umgerüstet worden.

Die nachfolgende Tabelle 4.1 listet die Eckdaten der gemessenen Haushalte auf. Die Werte der Wohnfläche beruhen auf den Angaben der Hauseigentümer und sind zum Teil geschätzte Werte.

HH	Typ	Wohnfläche	Heizungsart	Ort	# Personen
1	EFH	150 m^2	Luftwärmepumpe	Neusiedl b. Güssing	4
2	EFH	177 m^2	Erdwärmepumpe	Hatzendorf	3
3	EFH	150 m^2	Luftwärmepumpe	Kainbach	2
4	EFH	157 m^2	Erdwärmepumpe	Großwilfersdorf	4
5	Zubau	190 m^2	-	Grieselstein	1
6	EFH	170 m^2	Gasheizung	Graz	2

Tabelle 4.1: Eckdaten der ausgewählten Haushalte

4.3 Besonderheiten der Haushalte

• Haushalt 1:

Bauweise: Fertigteilhaus

Dieser Haushalt besitzt 2 Photovoltaik-Anlagen, eine 5 kW_P-Anlage (Wechselrichter Steca) am Dach des Wohnhauses, sowie eine 3 kW_P-Anlage (Wechselrichter Fronius) am Dach der Garage (Nebengebäude). Die Wärmepumpe wird nur für den Heizbetrieb verwendet, das heißt Bereitstellung von Wärme für Heizkörper und Puffer. Das Brauchwarmwasser wird durch eine Ölheizung bzw. solarthermische Anlage bereitgestellt.

• Haushalt 2:

Bauweise: Holzriegelhaus

Keine nennenswerten Besonderheiten.

• Haushalt 3:

Bauweise: Holzriegelhaus

Hier ist eine einphasige Luftwärmepumpe verbaut, welche über Phase 3 versorgt wird. Des Weiteren besitzt dieser Haushalt eine Wohnraumlüftung.

• Haushalt 4:

Bauweise: Ziegelmassivhaus

Besitzt wie Haushalt 3 eine Wohnraumlüftung.

• Haushalt 5:

Bauweise: Ziegelmassivhaus

Wie in Tabelle 4.1 ersichtlich, handelt es sich um einen Zubau zu einem Einfamilienhaus, mit welchem sich die Heizungsanlage geteilt wird. Die Heizung an sich wird vom Hauptverteiler des Haupthauses versorgt und ist somit nicht Bestand der Messungen.

• Haushalt 6:

Bauweise: Keine Angabe

Dieser Haushalt besitzt einen Außenpool, welcher über den gesamten Verlauf des Jahres beheizt wird, sowie eine Ladestation für ein Elektroauto. Generell handelt es sich hierbei um ein älteres Haus, dessen Errichtungsjahr mehr als 5 Jahre zurückliegt.

Alle Haushalte mit einer Wärmepumpe haben noch einen E-Heizstab im Puffer verbaut um auch bei tiefen Temperaturen, unterhalb der Auslegungstemperatur der Wärmepumpe, die gewünschten Wassertemperaturen erreichen zu können.

5 Messkonzept

Im Allgemeinen handelt es sich bei den Messungen der Haushalte um eine Lastgangmessung über einen Zeitraum von einer Woche. Für jede Sekunde wird dabei der Mittelwert gebildet und stündlich in einem Messfile gespeichert. Dabei werden die drei Phasenspannungen (U_1 , U_2 & U_3) bezogen auf den Neutralleiter, die dazugehörigen Phasenströme (I_1 , I_2 & I_3). Die Spannung und der Strom des Neutralleiters (U_N & I_N) werden für Kontrollzwecke, um etwaige Fehler zu erkennen, ebenfalls gemessen. Aus diesen Werten werden mittels der Mathematikfunktion des verwendeten Messgerätes (Dewetron 3010, Software Dewesoft 7) die Leistungen und Blindleistungen berechnet. Des Weiteren werden alle harmonischen Ströme und Spannungen bis zur vierzigsten Ordnung gemessen.

5.1 Verwendete Messgeräte und Zubehör

Zur Messung wird ein mehrkanaliges Messgerät (Dewetron 3010) verwendet. Die Spannungen werden direkt mittels konduktiven Verbindungen gemessen und die Ströme indirekt über induktive Kopplung mittels Strommesszangen. Die Messgenauigkeit für die Strommessung wäre zwar mit einem Shunt-Widerstandes genauer, dafür müssten jedoch Umbauarbeiten am zu messenden Objekt vorgenommen werden.

In der nachfolgenden Abbildung 5.1 sind die Setup-Einstellungen der 8 verwendeten Kanäle (0 - 7) ersichtlich. Für die Messung der Spannungsverläufe werden die Kanäle 0, 2 und 4 verwendet, bei diesen handelt es sich um DAQP - HV (High Voltage) Module. Der Eingangsspannungsbereich wird auf 400 V eingestellt, da dies der nächst größere Wert der zu erwartenden Eingangsspannung von 230 V ist.

S...	EIN/AUS	NAME	Verstärker (002)	Physikalische Werte	KAL.	SETUP
0	EIN	UL1	DAQP-DMM 400 V .. 10 kHz SN: 218784	- -401,6 398,4 0 V	Null	Setup 0
1	EIN	IL1	DAQP-LV 5 V .. 300 kHz (BE) SN: 325580	- -50,74 50,32 0,0 A	Null	Setup 1
2	EIN	UL2	DAQP-DMM 400 V .. 10 kHz SN: 218786	- -401,6 398,4 0 V	Null	Setup 2
3	EIN	IL2	DAQP-LV 5 V .. 300 kHz (BE) SN: 366863	- -50,84 50,54 0,0 A	Null	Setup 3
4	EIN	UL3	DAQP-DMM 400 V .. 20 kHz SN: 197827	- -401,6 398,4 0 V	Null	Setup 4
5	EIN	IL3	DAQP-LV 5 V .. 300 kHz (BE) SN: 374453	- -50,48 50,2 0,0 A	Null	Setup 5
6	EIN	UN	DAQP-DMM 10 V .. 10 kHz SN: 218783	- -10,04 9,963 -0,01 V	Null	Setup 6
7	EIN	IN	DAQP-LV 5 V .. 300 kHz (BE) SN: 366861	- -50,39 50,54 0,0 A	Null	Setup 7

Abbildung 5.1: Einstellung des Kanalsetups der Kanäle 0 - 7

Für die Messung der Stromverläufe werden die Kanäle 1, 3, 5 und 7 verwendet, bei diesen handelt es sich um DAQP - LV (Low Voltage) Module. Die Einstellung dieser Kanäle wird im folgenden Unterpunkt beschrieben.

Der eingestellte Wert der Abtastfrequenz beträgt 5 kHz, dies ist im linken oberen Teil von Abbildung 5.1 (rot umrahmt) ersichtlich. Mit dieser Einstellung können noch ohne Weiteres die Oberschwingungen bis zur vierzigsten Ordnung gemessen werden und die Menge der generierten Ausgangsdaten wird nicht zu groß. Die Speicher-Option wird mit „immer langsam“ mit reduzierter Aufzeichnungsrate und Mittelwertbildung über 1 s gewählt. Mit diesen Einstellungen ergibt sich eine Dateigröße von ca. 6.5 GB pro Woche und gemessenem Haushalt.

Bei den für die Strommessung verwendeten Strommesszangen handelt es sich um Chauvin Arnoux MN 38 der Kategorie CAT 3. Diese liefern eine dem Strom proportionale Ausgangsspannung von $100 \frac{mV}{A}$. Um nach dem Einbau an der Messstelle die Funktion der Stromzangen zu überprüfen wird ein Zangenmultimeter der Type Heme Analyst 2050 verwendet.

Des Weiteren wird ein Spannungsprüfer der Type Fluke T100 Voltage Tester verwendet, um vor dem Einbau des Messequipments die Spannungsfreiheit zu überprüfen und mittels der Durchgangsprüffunktion die Phasennummer der relevanten Lasten/Geräte zu bestimmen um in weiterer Folge die Auswertung zu vereinfachen.

5.1.1 Blindleistungsberrechnung Dewesoft

Für diese Arbeit ist es von essentieller Bedeutung das Vorzeichen der Blindleistung zu kennen, um somit festzustellen, ob diese kapazitiv oder induktiv ist. Bei der mittels Mathematikfunktion des Messgerätes bestimmten Gesamt-Blindleistung ist der Betrag jener korrekt, das Vorzeichen geht jedoch verloren, da die Blindleistung aus der geometrischen Differenz von Scheinleistung und Wirkleistung errechnet wird. Die hierfür verwendete Formel ist im Folgenden ersichtlich.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (5.1)$$

Aufgrund dieser Tatsache werden für sämtliche Betrachtungen dieser Arbeit die Grundschiebungswerte der Blindleistung herangezogen. Für die Grundschiebungsbindleistung ist das Vorzeichen bekannt, jedoch stimmt der Betrag mit dem von der gesamten Blindleistung nicht überein, da der Betrag der Harmonischen, die sogenannte Verzerrungsbindleistung, nicht berücksichtigt wird. Die folgende Formel 5.2 zeigt die Vorgehensweise zur Berechnung der Verzerrungsbindleistung.

$$D = \sqrt{Q^2 - Q_{H1}^2} \quad (5.2)$$

5.1.2 Kalibrierung der Strommesszangen

Für die Kalibrierung der Strommesszangen wird ein Universal Relaisprüfgerät CMC 256-6 der Firma Omicron verwendet. Dieses Gerät kann über seine Stromausgänge einen davor eingestellten konstanten Strom ausgeben. Um den mit dem Konstantstrom durchflossenen Leiter wird nun eine Stromzange geklemmt. Im Messsetup von Dewesoft kann im Unterpunkt Setup des jeweiligen Kanals eine 2-Punkt Skalierung durchgeführt werden.

Es werden 2 Punkte (Stromwerte) gewählt, die der Vorortmessung am nächsten kommen. Einer der Stromwerte sollte sehr klein sein, hierfür wird der Wert 1 A verwendet. Der zweite Wert sollte im oberen Segment der Anschlussleistung der gemessenen Haushalte liegen, dieser wird mit 10 A angenommen. Mithilfe dieser zwei Punkte wird die 2-Punkt Kalibrierung der Stromzangen durchgeführt und anschließend nochmals mit einem zufälligen Wert überprüft.

5.2 Messaufbau

Wie in Kapitel 2 erläutert, soll das elektrische Verhalten von Haushalten mit neuen Betriebsmitteln und Ausstattungen charakterisiert werden. Dazu werden die Zeitverläufe von Strom und Spannung der einzelnen Phasen in der Zuleitung zu den Verbrauchern gemessen. Abbildung 5.2 zeigt den schematischen Messaufbau, dabei ist das hierfür verwendete mehrkanalige Messgerät Dewetron 3010 ersichtlich. Weiters kann man erkennen, dass die Strommesszangen vor dem Fehlerstromschutzschalter eingebaut werden, da nach diesem die Verdrahtung meist mit Schnellverdrahtungsschienen erfolgt. Die Spannungsmessungen werden nach dem Fehlerstromschutzschalter eingebaut um das Messequipment durch diesen zu schützen.

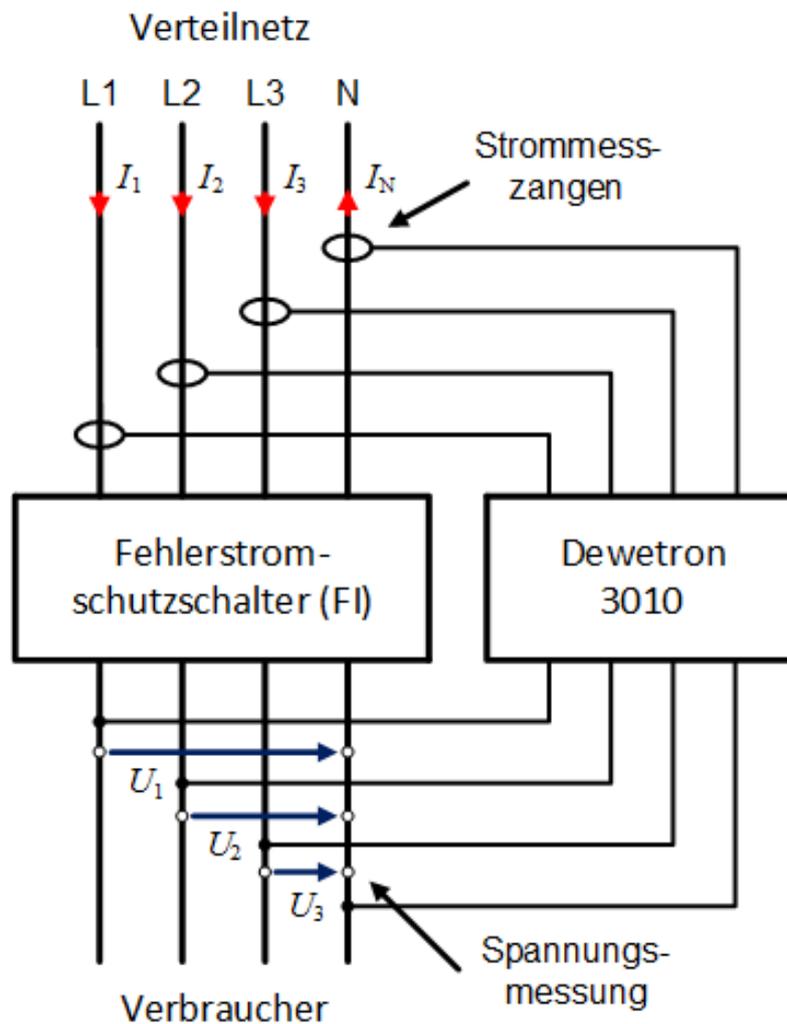


Abbildung 5.2: Schematischer Messaufbau

Die nachfolgende Abbildung 5.3 zeigt den realen Messaufbau in Haushalt 1. Der Verteiler befindet sich im Gang des Untergeschosses. Die Messaufbauten der anderen Haushalte sind im Anhang ersichtlich.

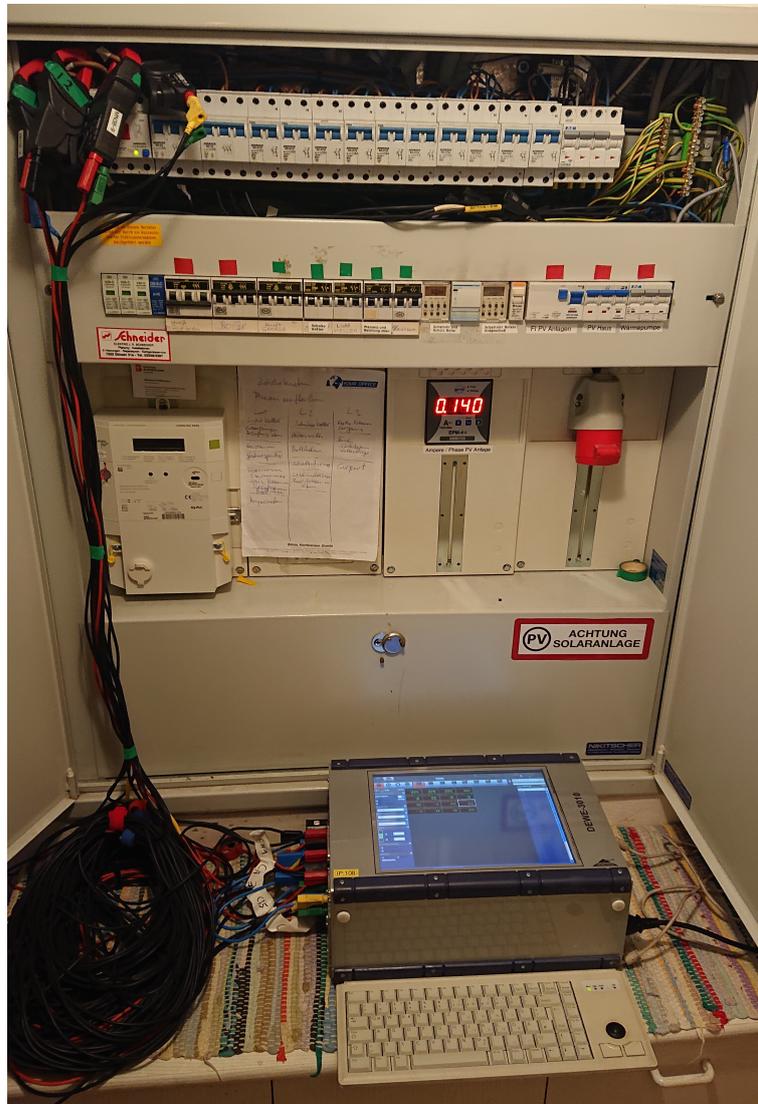


Abbildung 5.3: Realer Messaufbau im Haushalt 1

Im Zuge der Messungen wird versucht den Berührungsschutz so gut wie möglich wiederherzustellen. Da dies durch den enormen Platzbedarf des Messequipments, vor allem der Strommesszangen, nicht vollständig möglich ist, werden die Personen des Haushaltes auf diesen Umstand hingewiesen. Es wird versucht, die Zugänglichkeit der Schutzorgane (Fehlerstromschutzschalter und Leistungsschutzschalter) zu gewährleisten, um diese im Störfall betätigen zu können.

5.3 Messunsicherheit

Um eine möglichst genaue Interpretation der Messdaten zu ermöglichen, ist es wichtig die Messunsicherheiten der einzelnen Komponenten des Messaufbaus zu kennen. Nachfolgend sind die Angaben der Hersteller aus den Datenblättern zu sehen ([12],[13],[14],[15]):

- Stromzangen Chauvin Arnoux MN 38 im Bereich 20 A
Messabweichung: $\leq 1\% + 50\text{ mV}$
- DAQP - LV Kanäle des Dewetrons im Bereich 5 V
Messabweichung: $\pm 0,02\%$ vom Messwert $\pm 0,05\%$ vom Messbereich
- DAQP - HV Kanäle des Dewetrons im Bereich 400 V
Messabweichung: $\pm 0,05\%$ vom Messwert $\pm 0,05\%$ vom Messbereich
- Kalibrierwerkzeug CMC 256-6 von Omicron im Bereich 0 - 12,5 A
Messabweichung:
Garantiert: $< 0,04\%$ vom Anzeigewert $+ 0,01\%$ vom Bereich
Typisch: $< 0,015\%$ vom Anzeigewert $+ 0,0005\%$ vom Bereich

Wie an den Werten für die Messabweichung der DAQP-Module ersichtlich ist, hängt die Messabweichung vom eingestellten Messbereich sowie vom Messwert selbst ab. Daher wird der Messbereich so gut wie möglich dem zu messenden Wert angepasst, um den Messfehler gering zu halten.

5.4 Messvorgang

Vor Beginn der Messungen werden die Hausbesitzer über den Messvorgang aufgeklärt und die Relevanz der Messungen für den Verlauf der Masterarbeit geschildert. Es wird auch der damit verbundene Arbeitsaufwand für die Personen im Haushalt erläutert, da diese ein Gerätetagebuch führen sollen, in welchem die Betriebszeiten für alle relevanten Geräte eingetragen werden sollen. Diese Aufzeichnungen erleichtern die spätere Analyse der gemessenen Daten erheblich. Bei den Geräten handelt es sich um all jene mit einem hohen elektrischen Energieverbrauch (z.B. Geschirrspüler, Waschmaschine, Backrohr, Ceranfeld etc.).

Ein dafür erstelltes Formular wird bei jedem relevanten Gerät mit einem Stift platziert, um sicherstellen zu können, dass die Personen das Formular bei Benutzung eines Gerätes immer im Blickfeld haben und somit nicht vergessen die Betriebszeiten einzutragen. Ein Beispiel kann folgender Abbildung 5.4 entnommen werden.



Abbildung 5.4: Erfassung der Betriebszeiten durch die im Haushalt lebenden Personen

Der Einbau des Messequipments und die Arbeiten im Verteiler erfolgen mit größter Sorgfalt und unter Einhaltung aller Sicherheitsvorschriften (5 Sicherheitsregeln). Nach dem Spannungsfreischalten des Verteilers erfolgt die Bestimmung der Phasennummer der relevanten Verbraucher um die nachfolgende Analyse der Messdaten zu vereinfachen. Im nächsten Schritt werden alle benötigten Messinstrumente eingebaut und am Messgerät angeschlossen. In Folge des Einbaus wird nochmal alles kontrolliert, bevor der Verteiler unter Spannung gesetzt wird. Anschließend wird die Messung gestartet, die gemessenen Werte kontrolliert und mittels einer Stromzange auf Richtigkeit überprüft.

Die Messung wird für einen Zeitraum von mindestens 7 Tagen durchgeführt, dabei erstellt das Messgerät automatisch nach jeder vollen Stunde ein neues Outputfile, um bei Stromausfall oder etwaigen anderen Fehlern einem Verlust der gesamten Messdaten vorzubeugen. Nach Ablauf der Messzeit wird das Messgerät ausgebaut und alles in den ursprünglichen Zustand vor den Messungen zurückgestellt. Dabei werden nochmals alle Schrauben der Betriebsmittel (Leitungsschutzschalter, FI etc.) angezogen um sicherzustellen, dass kein Wackelkontakt und damit verbundene Fehler auftreten können.

Nach Analyse der Daten werden die Hauseigentümer noch über etwaige Erkenntnisse der Messungen informiert. Dazu gehören zum Beispiel die Auslastung der einzelnen Phasen, der Standby-Energiebedarf uvm.

5.5 Mathematische Korrektur der Messergebnisse

Bei der Analyse der Daten ist aufgefallen, dass auch Ohm'sche Lasten (z.B. Backrohr und Ceranfeld) ein kapazitives Blindleistungsverhalten aufweisen. Da dies jedoch nicht der Fall sein kann, wurde die Messanordnung abermals auf ihre Messunsicherheiten geprüft. Dabei wurde festgestellt, dass die Stromzangen eine nicht unerhebliche Phasenverschiebung aufweisen und somit die Messergebnisse verfälscht werden.

Die Phasenverschiebung der einzelnen Zangen wird mittels dem Kalibrierwerkzeug CMC 256-6 bestimmt und der Messvorgang mit einem Dewetron 3010 aufgezeichnet. Gleichzeitig wird mittels einem Präzisions-Shunt-Widerstand die Messung überwacht um ein noch genaueres Ergebnis der Abweichung zu bekommen. Dabei wird der mit der Spannung in Phase liegende Strom schrittweise bis zum maximalen Ausgangsstrom des CMC's erhöht. Die aus den gemessenen Werten von Strom und Spannung berechnete Blindleistung sollte Null ergeben. In der nachfolgenden Abbildung 5.5 ist ersichtlich, dass entgegen dieser Annahme eine Abweichung vom Wert Null besteht.

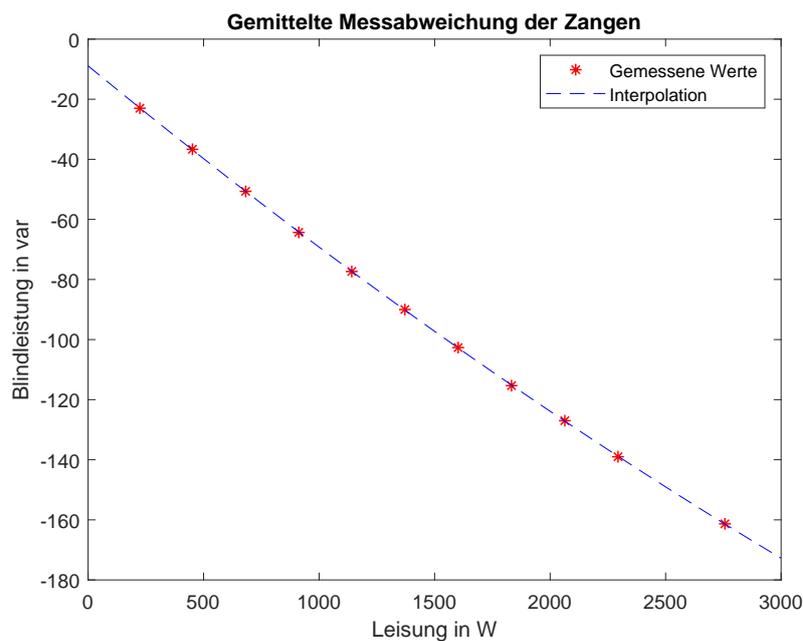


Abbildung 5.5: Messabweichung der Blindleistung vom Wert 0 bezogen auf die Wirkleistung

Die roten Sterne in Abbildung 5.5 kennzeichnen hierbei die aus den gemessenen Werten berechneten Blindleistungen. Anhand dieser wird mittels Matlab (Befehl: polyfit) ein Polynom zweiten Grades angepasst, welches im Plot blau-strichliert dargestellt ist.

Mit dieser Funktion werden alle Blindleistungswerte abhängig von der Wirkleistung korrigiert, da die Phasenverschiebung der Messzangen abhängig vom gemessenen Strom ist, welcher wiederum proportional zur Wirkleistung ist. Die Messabweichung der einzelnen Zangen ist unterschiedlich, daher wird der Mittelwert aller Zangen berechnet und für die Korrektur verwendet. Aufgrund der unterschiedlichen Abweichung jeder Zange sind Blindleistungswerte im kleinen Wertebereich mit Vorsicht zu genießen.

6 Lastgänge der gemessenen Haushalte

Bei den Lastgängen der gemessenen Haushalte handelt es sich um die Wirkleistungs- und Blindleistungsverläufe der Grundwelle aller Phasen des Haushaltes. Insgesamt werden sechs Haushalte gemessen, wobei folgend die interessantesten davon dargestellt und interpretiert werden. Tabelle 6.1 enthält die Daten der Messzeiten und Tabelle 6.3 die Eckdaten aller sechs Haushalte. Die Werte sowie die Kurvenverläufe sind im Verbraucherzählpeilsystem dargestellt.

HH	Messstart		Messende	
	Tag	Uhrzeit	Tag	Uhrzeit
1	17-Dec-2020	11:00:01	24-Dec-2020	11:00:01
2	29-Dec-2020	11:00:01	05-Jan-2021	11:00:01
3	25-Jan-2021	11:00:01	01-Feb-2021	11:00:01
4	05-Feb-2021	11:00:01	12-Feb-2021	11:00:01
5	16-Feb-2021	11:00:01	23-Feb-2021	11:00:01
6	13-Apr-2021	11:00:01	21-Apr-2021	11:00:01

Tabelle 6.1: Messzeiten der gemessenen Haushalte

In Bezugnahme auf die Monate der Messungen, ersichtlich in Tabelle 6.1, sei erwähnt, dass sämtliche Messreihen im Winterhalbjahr 20/21 aufgenommen wurden. Durch diese Wahl können auch die Auswirkungen der Wärmepumpen auf die Kurvenverläufe untersucht werden. Um eine vollständige Analyse der Haushalte zu ermöglichen, wäre es unabdinglich Vergleichsmessungen in den Sommermonaten durchzuführen, was jedoch den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Zu den besonders interessanten Haushalten zählen Haushalt 1 bis 3 und 6. Auf die Besonderheiten der einzelnen Haushalte wird im Anschluss eingegangen. Die Kurvenverläufe der übrigen Haushalte (HH 4 & HH 5) befinden sich im Anhang.

Tabelle 6.2 zeigt die benötigte Wirk- und Blindenergie jeder einzelnen Phase der gemessenen Haushalte. Bei der Blindenergie werden jeweils die der kapazitiven (kap) und induktiven (ind) Blindenergien für sich zusammengezählt. Es handelt sich dabei um die Energien der Grundwelle.

Bezeichnung		Wirkenergie	Blindenergie	
		kWh	ind kvarh	kap kvarh
HH 1	PH 1	71,52	0,20	-30,33
	PH 2	90,19	0,71	-16,49
	PH 3	61,60	0,22	-23,29
HH 2	PH 1	101,57	26,00	-13,78
	PH 2	58,50	24,34	-16,25
	PH 3	48,95	22,90	-14,95
HH 3	PH 1	24,90	0,01	-11,13
	PH 2	20,49	0,11	-2,44
	PH 3	109,58	0,07	-31,55
HH 4	PH 1	91,16	26,61	-4,01
	PH 2	50,85	34,46	-2,61
	PH 3	77,26	19,34	-17,43
HH 5	PH 1	1,58	0,00	-0,69
	PH 2	16,96	1,13	-0,02
	PH 3	3,09	0,01	-14,99
HH 6	PH 1	76,92	5,29	-1,76
	PH 2	123,94	14,77	0,00
	PH 3	135,83	3,97	-10,33

Tabelle 6.2: Wirk- und Blindenergiebedarf der einzelnen Haushalte

An den Werten der Wirkenergie in Tabelle 6.2 ist zu erkennen, dass diese von Haushalt zu Haushalt und auch von Phase zu Phase, abhängig von der Personenanzahl im Haushalt sowie der verbauten Geräte und der Benutzung dieser, sehr stark variieren. Des Weiteren ist gut zu erkennen, welche Phasen im Haushalt mehr belastet sind und welche weniger. Natürlich ist auch der momentane Wirkleistungsverbrauch für die Belastung der Phasen ausschlaggebend.

Anhand der Spalte der Blindenergie ist ersichtlich, ob der Haushalt ein kapazitives oder induktives Verhalten aufweist. Die Werte beziehen sich auf das Verbraucherzählpfeilsystem, d.h. negative Werte bedeuten kapazitive Energie und bei positiven Werten handelt es sich um induktive Energie.

Die nachfolgende Tabelle 6.3 zeigt die Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der Grundwelle der gemessenen Leistungen und Blindleistungen aller 3 Phasen der einzelnen Haushalte. PF bezeichnet den Leistungsfaktor ($\cos(\varphi)$) und wird mittels Mittelwertbildung über die gesamte Messdauer berechnet.

Bezeichnung		P_{\min}	Q_{\min}	P_{\max}	Q_{\max}	P_{mean}	Q_{mean}	PF
		W	var	W	var	W	var	-
HH 1	PH 1	-1676	-501	4017	290	426	-179	0,92
	PH 2	-1658	-353	5671	688	537	-94	0,99
	PH 3	-1759	-295	5313	291	367	-137	0,94
HH 2	PH 1	145	-227	4524	1751	605	73	0,99
	PH 2	7	-251	4654	2321	348	48	0,99
	PH 3	-29	-276	6979	1438	291	47	0,99
HH 3	PH 1	72	-114	2262	469	148	-66	0,91
	PH 2	6	-55	5308	461	122	-14	0,99
	PH 3	-32	-547	3525	397	652	-187	0,96
HH 4	PH 1	60	-87	5809	1149	543	135	0,97
	PH 2	-6	-1711	4909	2057	303	190	0,85
	PH 3	23	-652	5006	1847	460	11	1,00
HH 5	PH 1	2	-25	423	26	9	-4	0,92
	PH 2	68	-32	2346	55	101	7	1,00
	PH 3	3	-375	2258	159	18	-89	0,20
HH 6	PH 1	-23	-235	5722	538	403	19	1,00
	PH 2	108	5	4812	285	650	77	0,99
	PH 3	56	-497	5128	685	712	-33	1,00

Tabelle 6.3: Werteübersicht der gemessenen Haushalte

Der Haushalt 1 hingegen hat zwei Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von insgesamt 8 kW_P verbaut, daher sind die negativen Minimalwerte in der Tabelle gerechtfertigt. Die Werte liegen im Bereich von -1656 W und -1759 W, was für eine 8 kW_P-Anlage wenig erscheint. Wenn man jedoch den Zeitraum in Tabelle 6.1 betrachtet, kann man erkennen, dass die Messung in der Woche vor Weihnachten stattfand. Zusammen mit den bewölkten Wetterverhältnissen während der Messung, lassen sich diese Werte jedoch erklären. Die Kurvenverläufe der Wirkleistung und Blindleistung der Grundwelle, des besagten Haushalts, sind in blau bzw. rot in der folgenden Abbildung 6.1 zu sehen.

Die Werte der minimalen Wirkleistung von HH 2 PH 3, HH 3 PH 3 und HH 6 PH 1 in Tabelle 6.3 sind negativ, obwohl in diesen Haushalten keine Energieerzeugungseinheiten verbaut sind. Daher ist dieser Wert als Messfehler anzusehen und könnte auf schnelle Änderungen in den Kurvenverläufen von Strom und Spannung zurückzuführen sein.

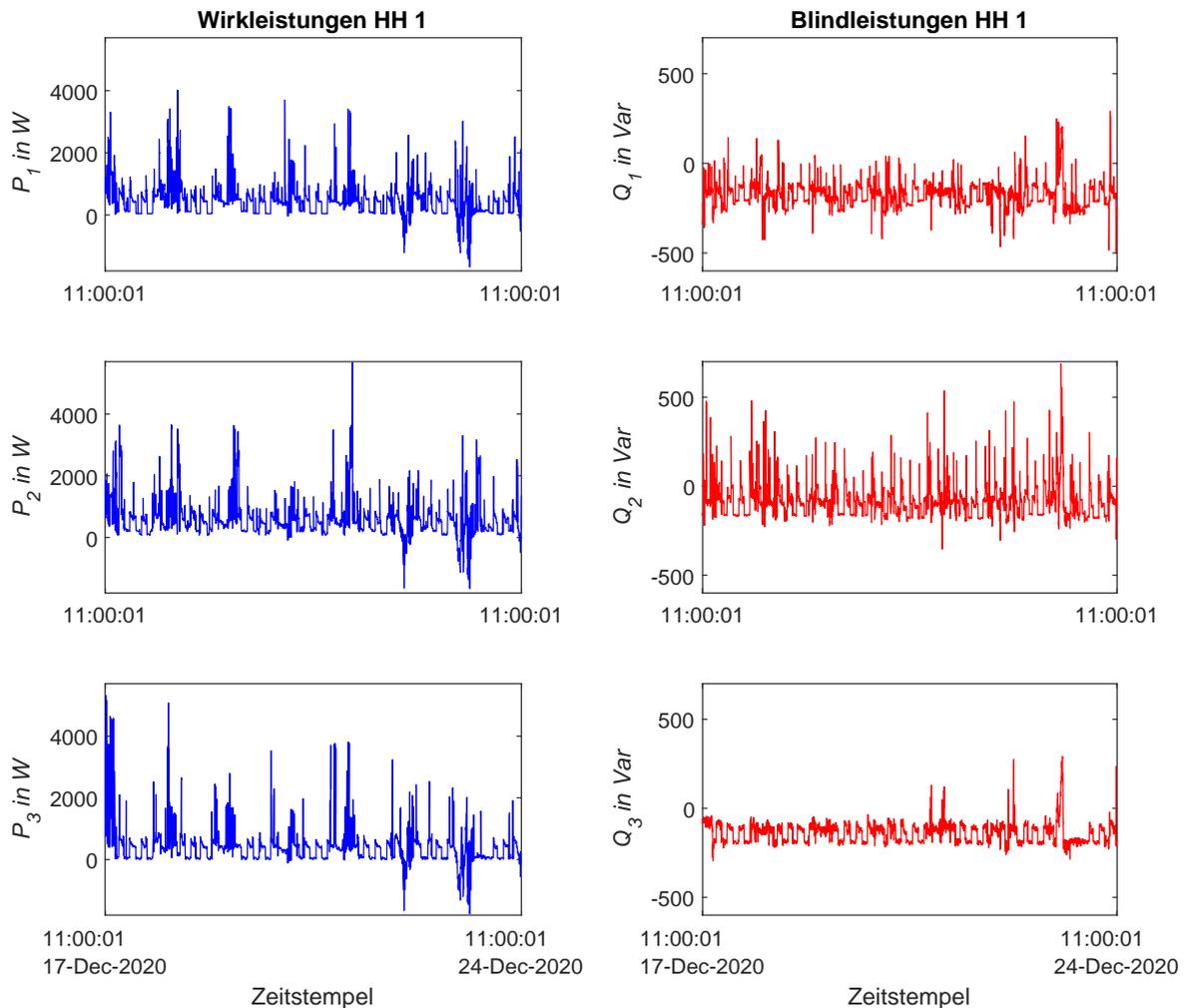


Abbildung 6.1: Leistungen und Blindleistungen aller 3 Phasen von Haushalt 1

Im Verlauf der Wirkleistung aller drei Phasen, dargestellt in blau in Abbildung 6.1, sind die Mittagspeaks aller 7 Tage der Messung gut erkennbar. Es fällt auf, dass die Peaks der letzten beiden Tage negativ sind, welche auf die schon vorhin erläuterte Photovoltaikanlage zurückzuführen sind. Die Spitzenlasten der einzelnen Phasen sind in Tabelle 6.3 Haushalt 1 ersichtlich. Der Maximalwert von 5,6 kW tritt in Phase 2 auf. Die Mittelwerte der Wirkleistung über den Messzeitraum liegen im Bereich von 366 W bis 537 W.

In den Blindleistungsverläufen in Abbildung 6.1, dargestellt in rot, ist zu erkennen, dass diese sich größtenteils im kapazitiven Bereich bewegen, was auch die Werte in Tabelle 6.2 belegen. Weiters ist ersichtlich, dass in Phase 2 mehr induktive Peaks auftreten als in den beiden anderen Phasen. An dieser Phase sind mehrere verschiedene Verbraucher und Räume angeschlossen (Mikrowelle, Rollläden uvm.), daher ist es beinahe unmöglich

die Ursache dafür zu eruieren. In den anderen beiden Phasen 1 und 2 sind die maximalen induktiven Peaks genau zu jenen Zeiten, an welchen die Photovoltaikanlage Energie produziert. Die Leistungsfaktor-Einstellungen der 2 Photovoltaikwechselrichter konnte nicht festgestellt werden, da diese durch ein Passwort des Herstellers geschützt sind. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass die Steuerung der Luftwärmepumpe erkennt, wenn die PV-Anlage Energie produziert, woraufhin die Luftwärmepumpe eingeschaltet wird. In den Kurvenverläufen in Abbildung 7.7 im folgenden Kapitel ist ersichtlich, dass die Wärmepumpe ein induktives Verhalten aufweist, welches jedoch zu gering ist, um die induktiven Ausschläge in den Phasen zu erklären. Somit wäre es möglich, dass die PV-Anlage mit einem induktiven Leistungsfaktor betrieben wird.

Die nachfolgende Abbildung 6.2 zeigt die Kurvenverläufe der Wirkleistung und Blindleistung der Grundwelle des Haushaltes 2 in rot und blau.

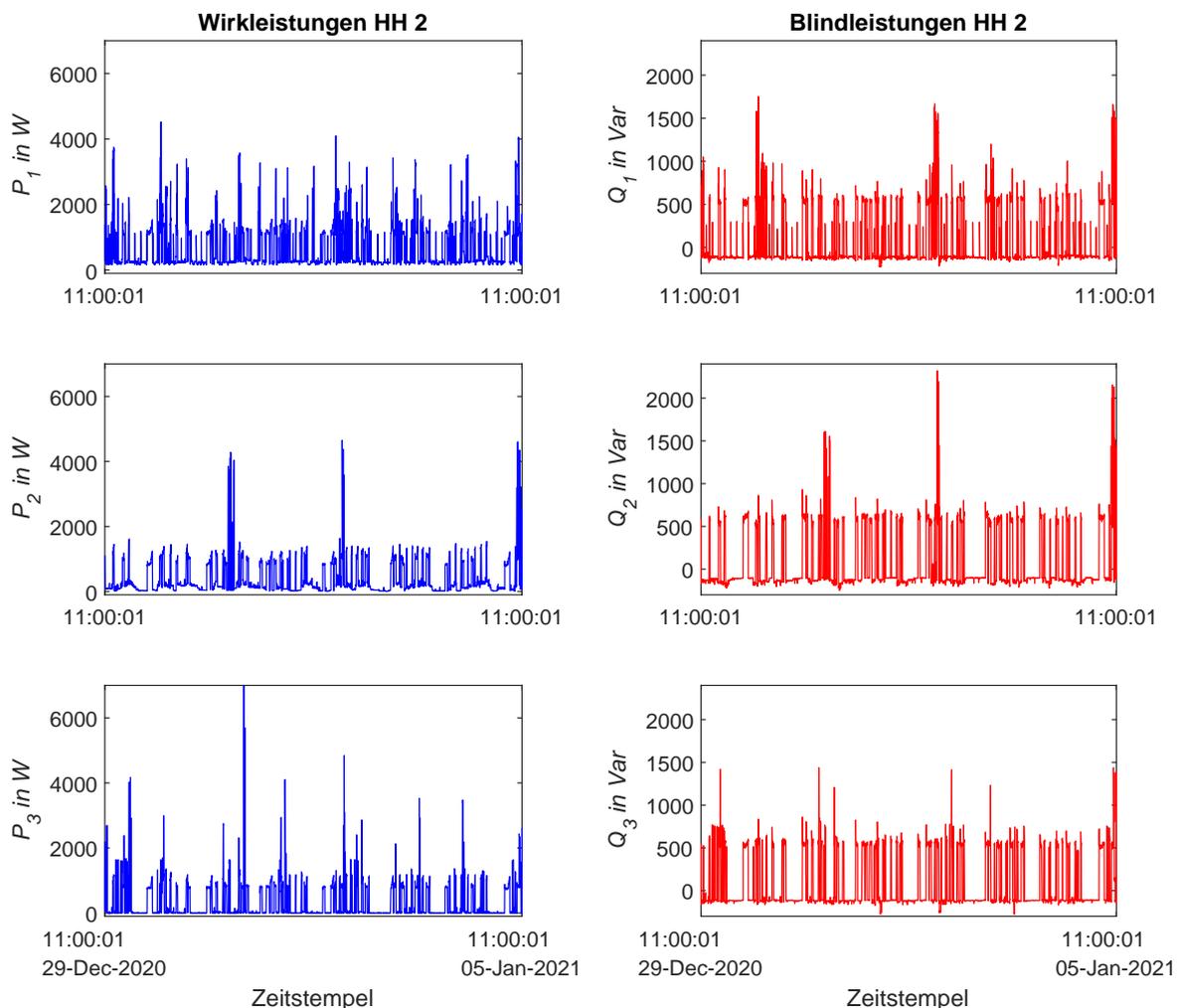


Abbildung 6.2: Leistungen und Blindleistungen aller 3 Phasen von Haushalt 2

Die Wirkleistungsverläufe in Abbildung 6.2 lassen darauf schließen, dass die erste Phase mehr beansprucht wird, als die anderen beiden. In der Tabelle 6.2 des Energiebedarfs wird diese Erkenntnis mit den dort ermittelten Zahlen untermauert. Weiters kann man keine klaren Mittagsspitzen erkennen, was auf einen unrythmischen Tagesablauf der Personen im Haushalt schließen lässt. Die Grundlast der Blindleistungsverläufe in Abbildung 6.2 ist kapazitiv, wird jedoch durch diverse Verbraucher ins Induktive angehoben. Einer dieser stark induktiven Verbraucher ist die Erdwärmepumpe, deren Kurvenverläufe im folgenden Kapitel in Abbildung 7.10 zu sehen sind. Würde man diesen Haushalt im Sommerhalbjahr messen, in welchem die Wärmepumpe nicht so viel Energie benötigt, wären die Messergebnisse grundverschieden zu den hier vorliegenden.

Abbildung 6.3 zeigt die Kurvenverläufe der Wirk- und Blindleistungen aller 3 Phasen des Haushalts 3. Bei diesen Verläufen handelt es sich um jene der Grundwelle.

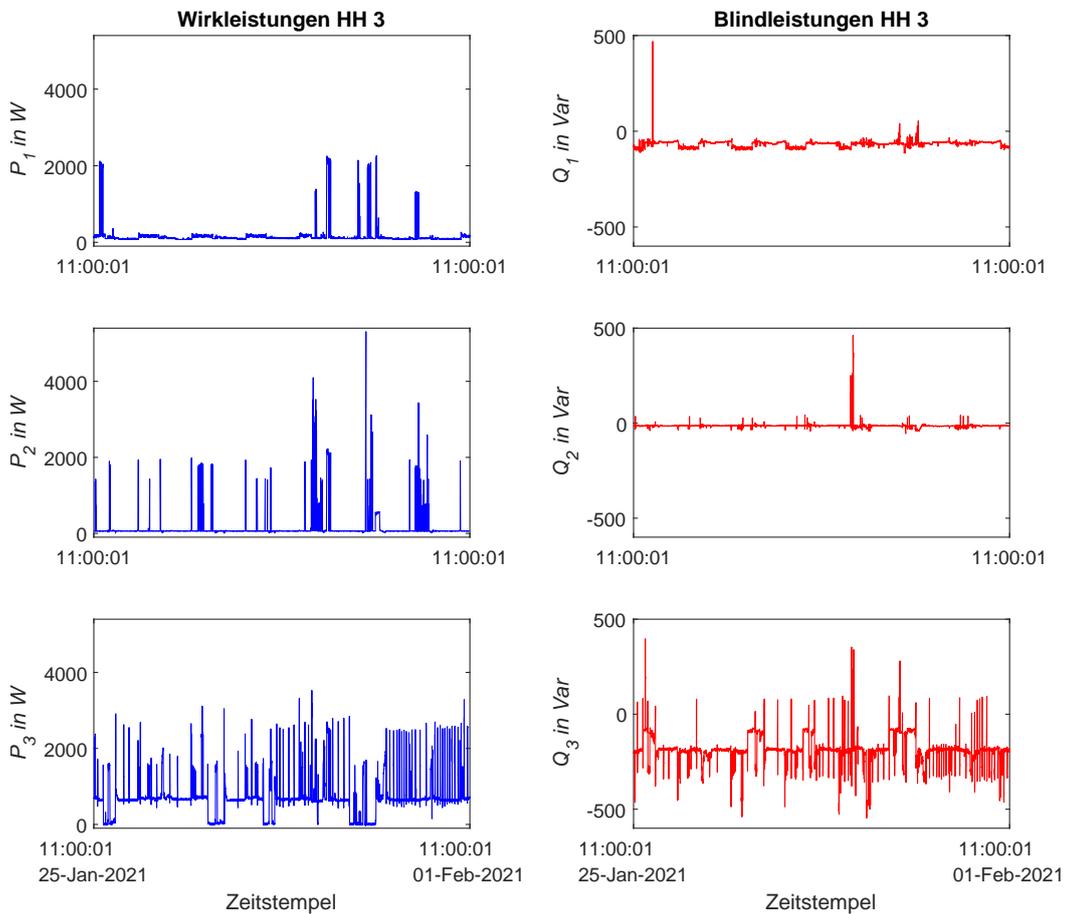


Abbildung 6.3: Leistungen und Blindleistungen aller 3 Phasen von Haushalt 3

In den Wirkleistungsverläufen in Abbildung 6.3 sieht man auf den ersten Blick, dass Phase 1 und 2 deutlich weniger belastet werden als die dritte Phase. Dies liegt daran, dass das Heizsystem dieses Haushalts eine 1-phasige Luftwärmepumpe inkludiert, welche über Phase 3 versorgt wird.

Das erwähnte Verhalten ist ebenfalls im Blindleistungsverlauf der Abbildung 6.3, dargestellt in rot, ersichtlich. In Phase 3 ist erkennbar, dass die 1-phasige Luftwärmepumpe ein kapazitives Verhalten aufweist, wie in den folgenden Kapiteln näher erörtert wird. Die Kurvenverläufe der Phasen 1 und 2 zeigen ebenfalls kapazitives Verhalten, wenn auch weniger stark ausgeprägt als in Phase 3. Dies ist auch durch die Energiewerte in Tabelle 6.2 belegt.

Die folgende Abbildung 6.4 stellt die Kurvenverläufe der Wirk- sowie der Blindleistung aller 3 Phasen von Haushalt 6 in blau bzw. rot dar.

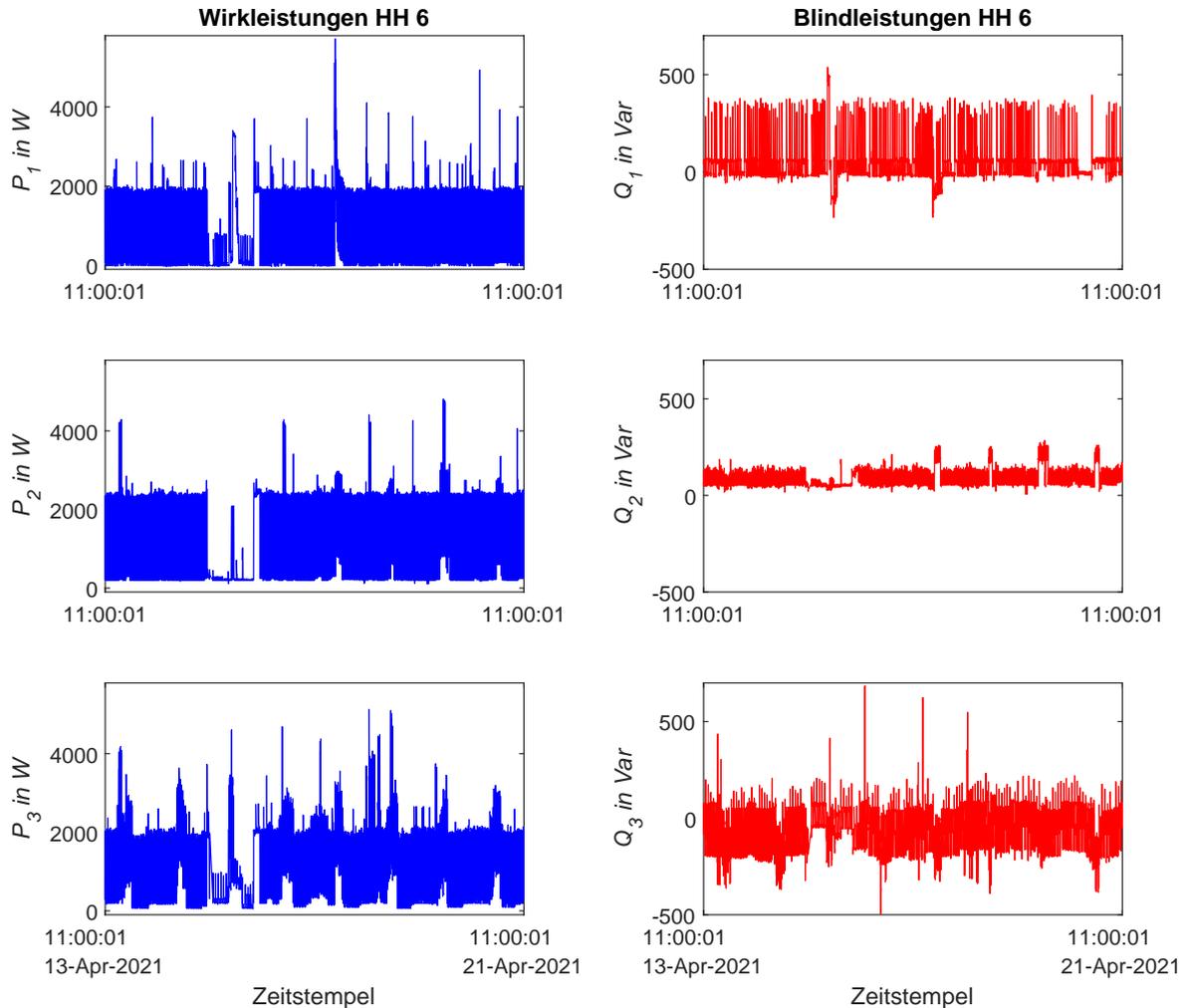


Abbildung 6.4: Leistungen und Blindleistungen aller 3 Phasen von Haushalt 6

Dieser Haushalt weist den höchsten Energiebedarf aller gemessenen Haushalte auf (ersichtlich in Tabelle 6.2). Das ist zum Einen dadurch zu begründen, dass dieser Haushalt einen beheizten Außenpool besitzt. Laut Anmerkung des Hauseigentümers wird dieser mit einer Leistung von ca. 6 kW geheizt. Wenn man diese Gesamtleistung durch die 3 angeschlossenen Phasen aufteilt, ergibt dies einen Verbrauch von 2 kW pro Phase, was dem zumeist vorhandenen Grundverbrauch in Abbildung 6.4 entspricht. Die Betriebsdauer der Heizung ist abhängig von Wasser- und Außentemperatur. Des Weiteren besitzt der Hauseigentümer ein Elektroauto, welches über eine Ladesteckdose am Parkplatz des Hauses geladen werden kann.

Die einzelnen Kuvenverläufe der Blindleistung in Haushalt 6 weisen ein gänzlich unterschiedliches Verhalten auf. Phase 1 hat ein induktives Verhalten mit teilweisen kapazitiven Peaks. Die zwei großen kapazitiven Peaks sind auf das 1-phasige Laden des Elektrofahrzeuges zurückzuführen, dieses Verhalten wird in Kapitel 7 näher behandelt. Der Kuvenverlauf der zweiten Phase besitzt ein rein induktives Verhalten mit einem Offset von rund 50 var Grundlast.

Die dritte Phase hingegen weist ein leicht kapazitives Verhalten auf. Dies ist auf die darüber versorgten Geräte zurückzuführen. Auf dieser Phase hängen diverse Geräte wie Kühlschränke, Staubsaugeranlage, 1-phasiger Motor für die Wasser-Zirkulation im Pool und viele mehr.

7 Lastgänge relevanter Lasten

Im Folgenden werden die gemessenen Lastgänge relevanter Geräte analysiert und interpretiert. Für jedes Gerät wird ein aussagekräftiges Diagramm gezeigt, die Kurvenverläufe der übrigen Haushaltsgeräte befinden sich im Anhang. Bei den relevanten Geräten handelt es sich um jene mit einem hohen Energieverbrauch (Backrohr, Ceranfeld, Geschirrspüler, Waschmaschine, Wärmepumpe etc.). Dabei ist zu beachten, dass immer die Gesamtleistung jeder Phase des Haushaltes gemessen wird, das heißt dass auch andere Geräte zu den Einschaltzeiten der relevanten Lasten im Hintergrund betrieben werden und somit einen Offset bzw. Rauschen verursachen. Es wird versucht jeweils eine Betriebszeit der relevanten Last zu finden, zu der ein möglichst geringer Einfluss anderer Geräte besteht. Weiters sind in den folgenden Abbildungen immer die Grundschiebungswerte der Leistungen abgebildet, da ansonsten das Vorzeichen der Blindleistung verloren gehen würde (Erklärung in Kapitel 5). Die Kurvenverläufe aller folgenden Lasten sind im Verbraucherzählpeilsystem dargestellt.

Bei Haushalt 5 und 6 wurde das Gerätetagebuch leider nicht akribisch genug geführt, bzw. waren manche der relevanten Lasten im gemessenen Zeitraum nicht in Betrieb. Daher ist die Analyse der relevanten Lasten der genannten Haushalte nicht Bestandteil der folgenden Untersuchungen.

7.1 Vergleich von Ceranfeld und Induktionskochfeld

Abbildung 7.1 zeigt den Wirkleistungs-, Blindleistungs- und Leistungsfaktorverlauf eines herkömmlichen Cerankochfeldes, aufgenommen in Haushalt 3. Der Wirkleistungsverlauf der Grundwelle ist dabei in blau, der Blindleistungsverlauf der Grundwelle in rot und der Leistungsfaktorverlauf in schwarz dargestellt. Das Ceranfeld ist vom Hersteller NEFF.

Wenn man nun den Graph der Wirkleistung in Abbildung 7.1 betrachtet, fällt auf, dass es sich um ein getaktetes Signal handelt. Diese Kurvenform kommt durch das verbaute Thermostat zustande, es handelt sich dabei meist um einen Regler mit Bimetallelement. Wird das Ceranfeld eingeschaltet, fließt so lange Strom bis die gewünschte Temperatur erreicht ist, woraufhin der Regler den Stromfluss unterbindet. Bei dieser Regelung gibt

es nur eine Leistungsstufe des Kochfeldes, wie in Abbildung 7.2 ersichtlich ist. In diesem Fall liegt die Leistungsstufe bei rund 1700 W. Die gewünschten Temperaturen werden durch die Dauer der Ein- und Ausschaltzeiten erreicht. Beim Kurvenverlauf der Blindleistung kann man erkennen, dass diese zu den Zeitspannen des Wirkleistungsverbrauches um ca. 15 var in den kapazitiven Bereich springt. Da es sich bei den Heizelementen meist um Heizwiderstände handelt, kann dies nicht der Fall sein. Der Ausschlag ist auf die Messungenauigkeit der Strommesszangen zurückzuführen. Betrachtet man nun den Leistungsfaktor, hat die Messungenauigkeit keinen großen Einfluss, da diese sehr klein im Vergleich zur Wirkleistung ist.

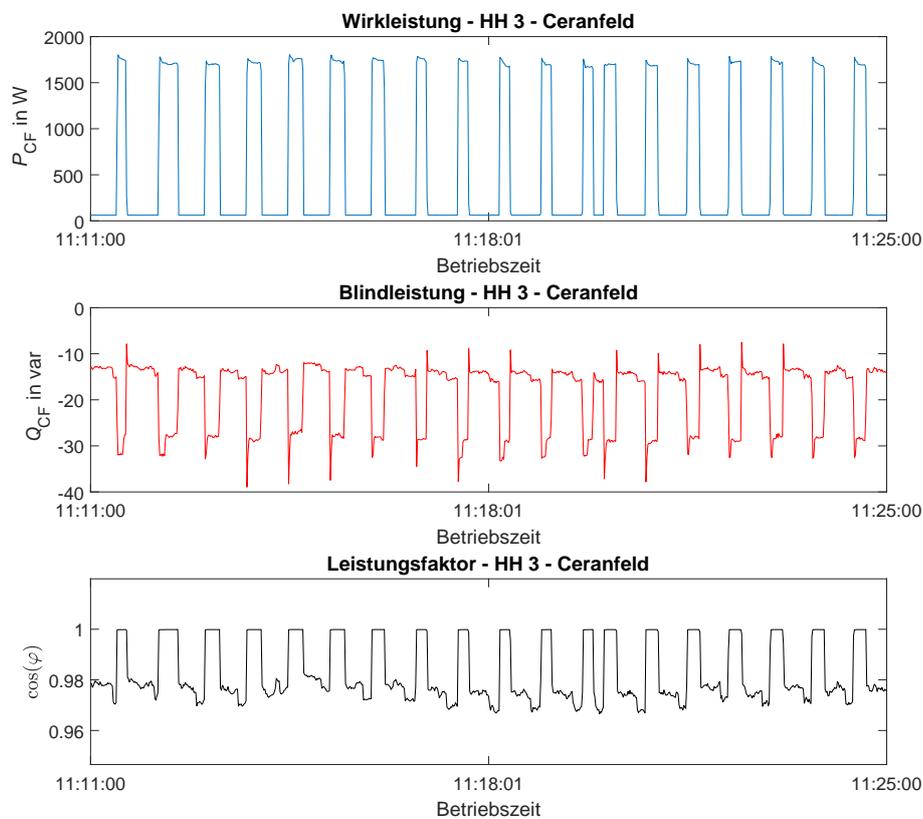


Abbildung 7.1: Wirk- und Blindleistungsverläufe eines Induktionsfeldes

Abbildung 7.2 zeigt den Wirkleistungs-, Blindleistungs- und Leistungs-factorverlauf eines Induktionskochfeldes in, aufgenommen in Haushalt 1. Der blaue Graph stellt die Wirkleistung der Grundwelle, der rote Graph die Blindleistung der Grundwelle, und der schwarze Verlauf den Leistungs-factor dar. Die Type des Induktionsfeldes ist nicht bekannt, es handelt sich jedoch um ein Gerät von AEG.

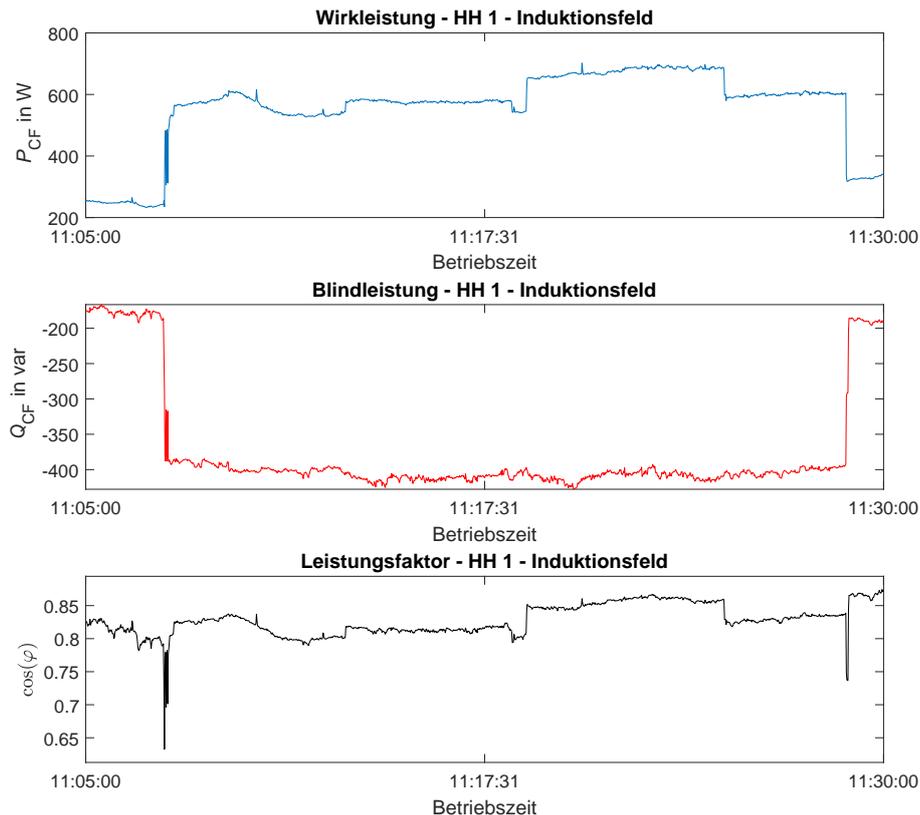


Abbildung 7.2: Wirk- und Blindleistungsverläufe eines Induktionsfeldes

Bei Betrachtung des Wirkleistungsverlaufes des Induktionsfeldes ist zu erkennen, dass dieser sich gravierend vom herkömmlichen Ceranfeld in Abbildung 7.1 unterscheidet. Ab dem Einschaltzeitpunkt beginnt das Induktionsfeld konstant Leistung zu verbrauchen. Die Schwankungen, welche im Kurvenverlauf zu sehen sind, sind auf andere Geräte, welche zur gleichen Zeit auf der selben Phase betrieben werden, zurückzuführen. Wie bereits im Vorfeld erläutert, wird stets der Leistungsverlauf des gesamten Haushaltes pro Phase gemessen.

Weiters kann man erkennen, dass die Amplitude der Leistung des Induktionsfeldes bei rund 600 W liegt und somit nur gut einem Drittel der Amplitude des herkömmlichen Ceranfeldes entspricht. Da es sich hierbei um gänzlich unterschiedliche Technologien

und Bauweisen handelt, kann diese Aussage jedoch nicht so pauschal getätigt werden. Beim Vergleich der benötigten Energie, das heißt Berechnung des Integrals der Leistung über die Zeit (Berechnung der Energie für 10 Minuten: Induktionsfeld 96 W, Ceranfeld 92 W), ergeben sich ähnlich große Werte. Das bedeutet, dass zum Erhitzen der gleichen Menge Kochgut beide Felder annähernd gleich viel Energie benötigen.

Für den Betrieb eines stabilen Netzes ist die Kurvenform des Induktionsfeldes besser geeignet. Beim Einschalten kommt es zwar zu einem Sprung auf die gewünschte Amplitude, diese ist jedoch weitaus kleiner als beim herkömmlichen Ceranfeld. Das herkömmliche Kochfeld weist eine größere Amplitude auf und das Heizelement wird durch den Energieregler auch um ein Vielfaches häufiger ein- und ausgeschaltet. Der Blindleistungsverlauf in rot in Abbildung 7.2 springt beim Einschaltzeitpunkt des Induktionsfeldes um ca. 200 var in den kapazitiven Bereich, somit ergibt sich ein kapazitives Verhalten des Induktionsfeldes, was auf den verbauten Frequenzumrichter zurückzuführen ist. Dieser transformiert die Frequenz der Betriebsspannung von 50 Hz in einen Frequenzbereich im Bereich von 20 - 30 kHz, je nach Hersteller. Die im Frequenzumrichter verbauten Zwischenkreiskondensatoren sind der Grund für die kapazitive Leistungsaufnahme. Dieses Verhalten ist grundverschieden zu jenem eines herkömmlichen Ceranfeldes, welches ein annähernd blindleistungsneutrales Verhalten aufweist.

7.2 Backrohr

Die nachfolgende Abbildung 7.3 zeigt den Wirkleistungs-, Blindleistungs- und Leistungs-factorverlauf eines Backrohres, aufgenommen in Haushalt 1. Die Grundwelle der Wirkleistung ist in blau, jene der Blindleistung in rot, und der Leistungs-factorverlauf in schwarz ersichtlich.

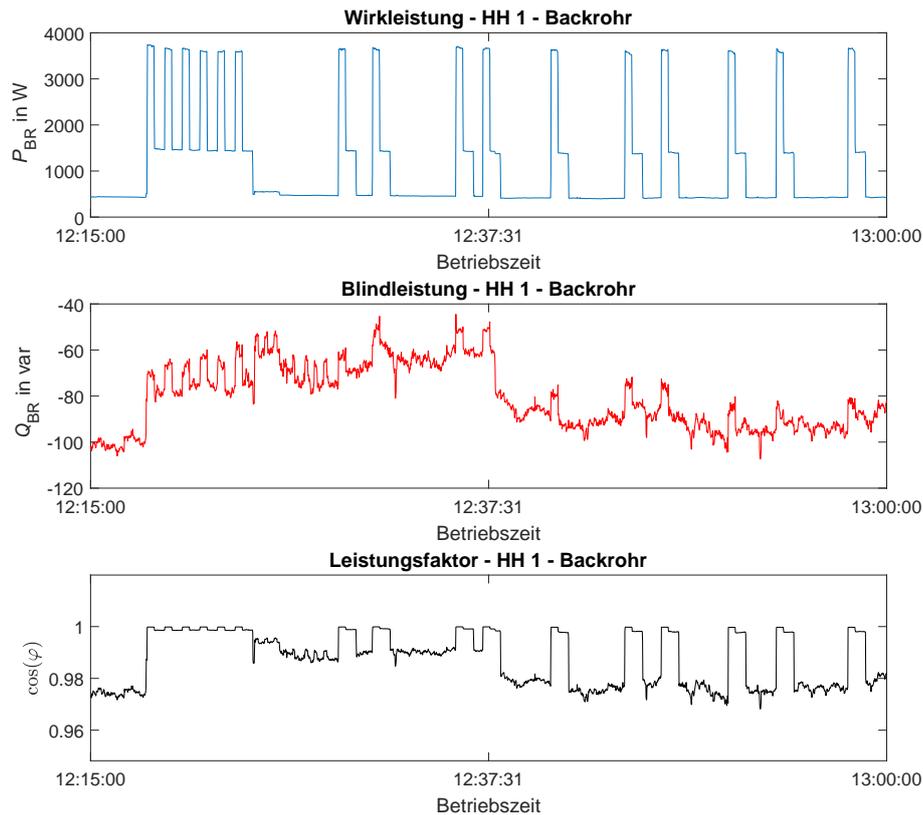


Abbildung 7.3: Kurvenverläufe eines Backrohres

Beim Vergleich mit der Leistungskurve in Abbildung 7.1 fällt auf, dass sich die Kurvenformen ähneln. Dies ist der Fall da beide Geräte thermostat-gesteuert sind und es sich um ohmsche Heizelemente handelt. Auch andere Geräte, wie z.B. Bügeleisen, Toaster, Heizlüfter, E-Patrone im Boiler und viele mehr, weisen vergleichbare Lastgänge auf.

Die maximale Leistung inklusive Offset ist mit rund 3600 W zu beziffern. Die Regelung funktioniert genau gleich wie die eines Ceranfeldes mit Energieregler, beschrieben im Unterpunkt 7.1. Betrachtet man den Blindleistungsverlauf in rot, so ist zu erkennen, dass das Backrohr kleine induktive Ausschläge verursacht, was auf die Heizspiralen oder den Lüftermotor zurückzuführen ist. Da diese Ausschläge sehr gering sind, ist der Leistungs-factor beim Betrieb der Heizelemente nahezu 1.

7.3 Geschirrspüler

Abbildung 7.4 zeigt die ermittelten Daten eines Geschirrspülers, aufgenommen in Haushalt 3. Dabei sind der Wirkleistungsverlauf und der Blindleistungsverlauf der jeweiligen Grundwelle in blau bzw. rot und der Leistungsfaktorverlauf in schwarz dargestellt.

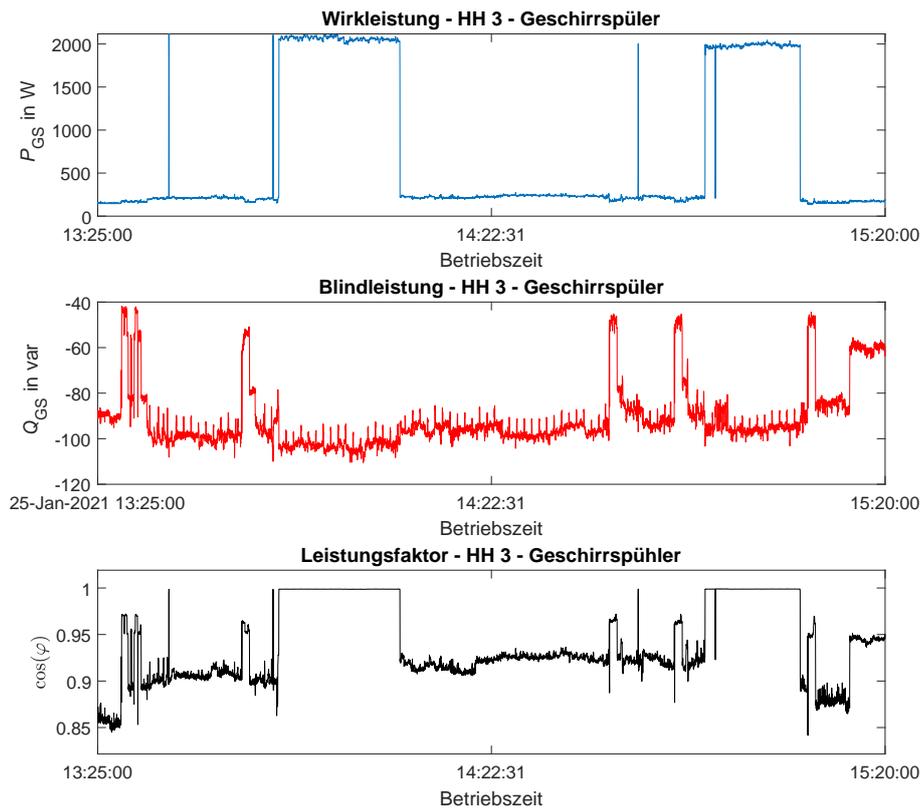


Abbildung 7.4: Kurvenverläufe eines Geschirrspülers

Der Geschirrspüler hat ähnlich wie eine Waschmaschine unterschiedliche Betriebsphasen, abhängig vom gewählten Programm. Die Bezeichnung dieser erfolgt in Anlehnung an die Ausführungen in [16]. Wenn man nun den Wirkleistungsverlauf in Abbildung 7.4 betrachtet, kann man erkennen, dass ein relativ konstanter Offset vorhanden ist. Die erste markante Phase mit einem Leistungsverbrauch von ca. 2000 W über eine längere Zeitdauer, zeigt den Heizvorgang des Geschirrspülers, in welchem das zuvor eingelassene Wasser auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt wird. Danach folgen verschiedene Spülphasen und Klarspülphasen, abhängig vom gewählten Programm, bis die zweite Heizphase gestartet wird. Abschließend folgt die Trocknungsphase.

Anhand des Blindleistungsverlaufs in Abbildung 7.4 können keine wesentlichen Rückschlüsse auf einzelne Betriebsphasen des Geschirrspülers getroffen werden. Es fällt jedoch auf, dass bereits vor dem Einschalten des Gerätes ein kapazitiver Offset vorhanden ist. Der Verlauf ist im Wesentlichen konstant, mit Ausnahme einzelner kurzweiliger Peaks, welche auch von anderen Geräten verursacht worden sein könnten. Betrachtet man den zeitlichen Verlauf des Leistungsfaktors ist ersichtlich, dass zu den Heizaktivitäten der Leistungsfaktor nahezu 1 ist, da die benötigte Wirkleistung viel größer als die Blindleistung ist.

7.4 Vergleich einer älteren und neueren Waschmaschine

Abbildung 7.5 zeigt die ermittelten Daten einer älteren Waschmaschine, aufgenommen in Haushalt 2. Dabei sind der Wirkleistungsverlauf und der Blindleistungsverlauf der jeweiligen Grundwelle in blau bzw. rot und der Leistungsfaktorverlauf in schwarz ersichtlich. Die Kurvenverläufe einer neueren Waschmaschine, aufgenommen in Haushalt 3, sind in Abbildung 7.6 ersichtlich.

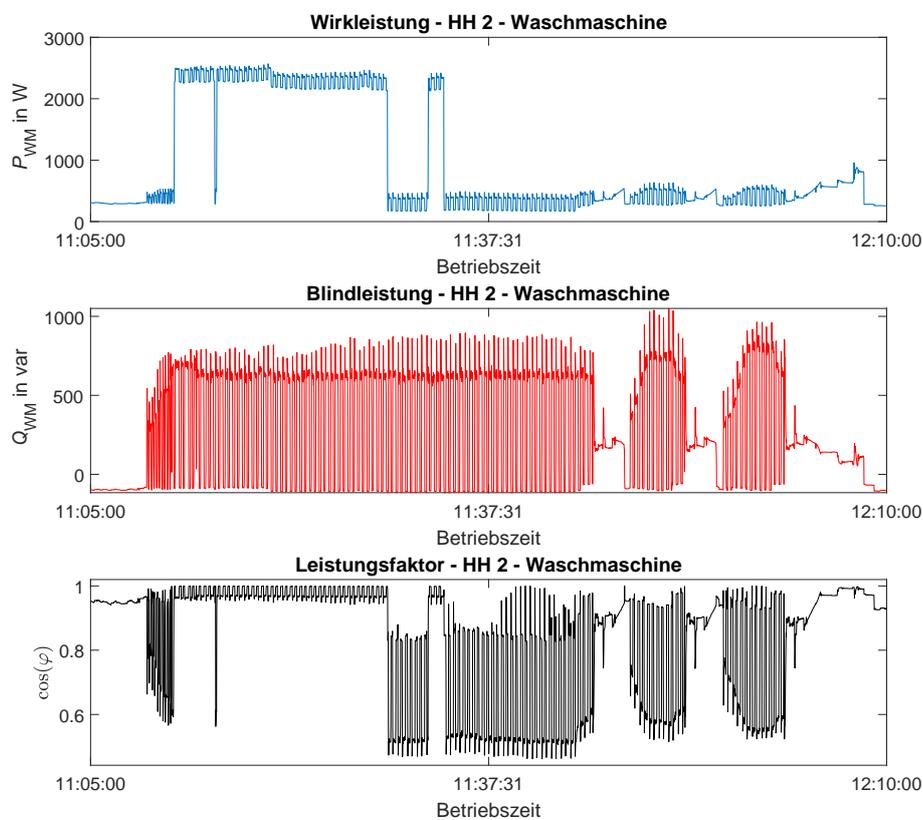


Abbildung 7.5: Kurvenverlauf einer älteren Waschmaschine

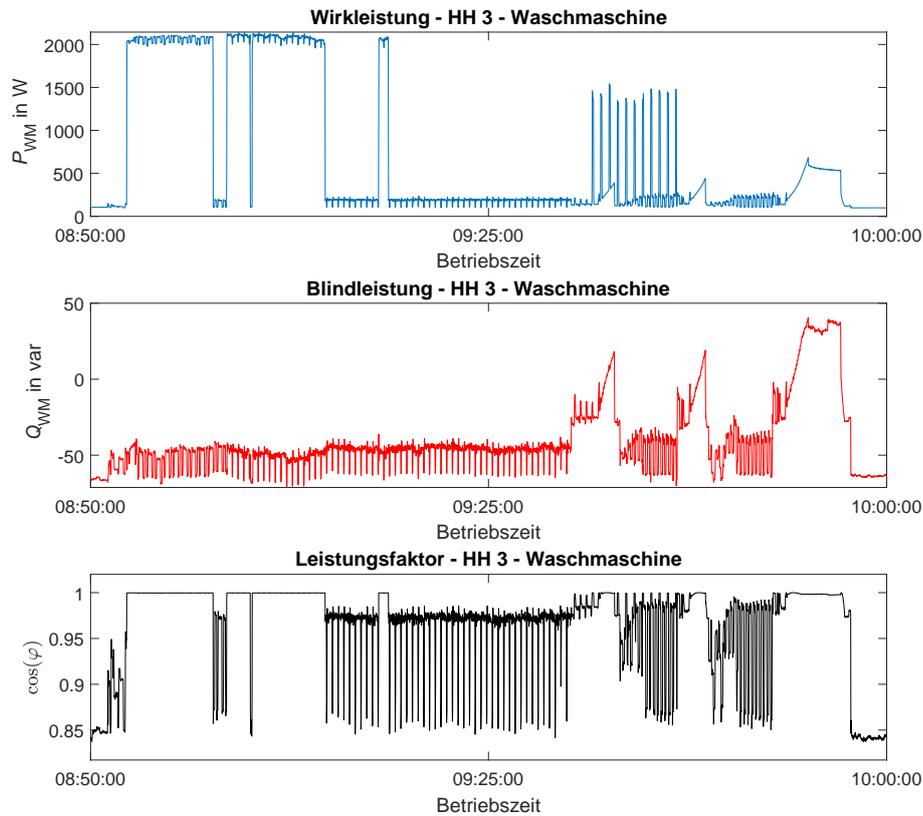


Abbildung 7.6: Kurvenverlauf einer neueren Waschmaschine

Der Kurvenverlauf einer Waschmaschine setzt sich aus mehreren unterschiedlichen Phasen während eines Waschganges, abhängig vom eingestellten Programm, zusammen. Die Bezeichnung dieser Betriebsphasen erfolgt auf Basis der Ausführungen in [16]. Die erste Aktivität ist die Steuerung der Wasserzufuhr der Maschine mittels eines Ventils. Anschließend wird das Wasser auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt. Die Heizphase ist sehr deutlich in beiden Abbildung 7.5 und 7.6 zu sehen, diese erfolgt im Bereich der höchsten Wirkleistungsaufnahme in der ersten Hälfte des Kurvenverlaufes. Bereits während der Aufheizphase beginnt die Waschmaschine mit der Waschaktivität. Bei dieser dreht sich die Trommel periodisch vorwärts und rückwärts. Dieses Hin- und Herdrehen des Motors verursacht die induktiven Ausschläge (Peaks) der älteren Waschmaschine, zu sehen im Blindleistungsverlauf in Abbildung 7.5. Bei der neueren Waschmaschine sind kapazitive Ausschläge (Peaks) zu erkennen, dies ist auf die Ansteuerung des Motors zurückzuführen, welche höchstwahrscheinlich mithilfe eines Frequenzumrichters erfolgt.

Die nächste Waschphase ist die Spül- und Schleuderphase, diese Bereiche sind in beiden Abbildungen in der jeweiligen zweiten Hälfte des Verlaufes zu sehen. Die zwei kleineren rampenförmigen Verläufe sind dabei die Spülphase und die letzte große Rampe bezeichnet die Schleuderphase.

Wenn man nun die Kurvenverläufe der neueren und älteren Waschmaschine (Abbildung 7.5 und 7.6) direkt miteinander vergleicht, ist ersichtlich, dass die Grundform des Wirkleistungsverlaufes nahezu identisch sind. Beim Blindleistungsverlauf hingegen sind große Unterschiede erkennbar, welche auf die unterschiedliche Ansteuerung des Motors zurückzuführen sind.

Die ältere Maschine weist ein viel unruhigeres Blindleistungsverhalten, mit Sprüngen in einem Bereich von 0 bis 1000 var, auf. Dieses unruhige Verhalten spiegelt sich auch im Verlauf des Leistungsfaktors wieder, welcher im Bereich 0,5 bis 1 induktiv liegt.

Der Blindleistungsverlauf ersichtlich in Abbildung 7.6, weist ein wesentlich ruhigeres Verhalten auf. Die Blindleistung variiert in einem Bereich von -70 bis 40 var. Die Peaks während des Waschvorganges (Vorwärts- und Rückwärtsbewegung der Trommel) sind kapazitiv, was auf die Ansteuerung des Motors zurückzuführen ist.

Der Leistungsfaktorverlauf in Abbildung 7.6 variiert in einem kleineren Bereich, von 0,85 bis 1, als jener der älteren Waschmaschine.

7.5 Vergleich verschiedener Wärmepumpen

Alle Wärmepumpen können zum Heizen und/oder zur Warmwasserbereitung verwendet werden. Die meisten der Neubauten verwenden sogenannte Niedrig-Temperatur Heizungen, d.h. die Vorlauftemperatur für den Heizkreis ist niedriger als bei herkömmlichen Heizungen. Für das Brauchwarmwasser müssen die Temperaturen jedoch höher sein um verschiedene Hygienebedingungen zu erfüllen (z.B. Legionellenabtötung). Daher benötigen Wärmepumpen für die Warmwasserbereitung mehr Leistung als für den Heizbetrieb, dies ist in den Abbildungen 7.8, 7.9 und 7.10 ersichtlich.

7.5.1 3-Phasige Luftwärmepumpe

Folgende Abbildung 7.7 zeigt die ermittelten Daten einer 3-phasigen Luftwärmepumpe, aufgenommen in Haushalt 1. Dabei sind der Wirkleistungsverlauf und der Blindleistungsverlauf der jeweiligen Grundwelle ersichtlich.

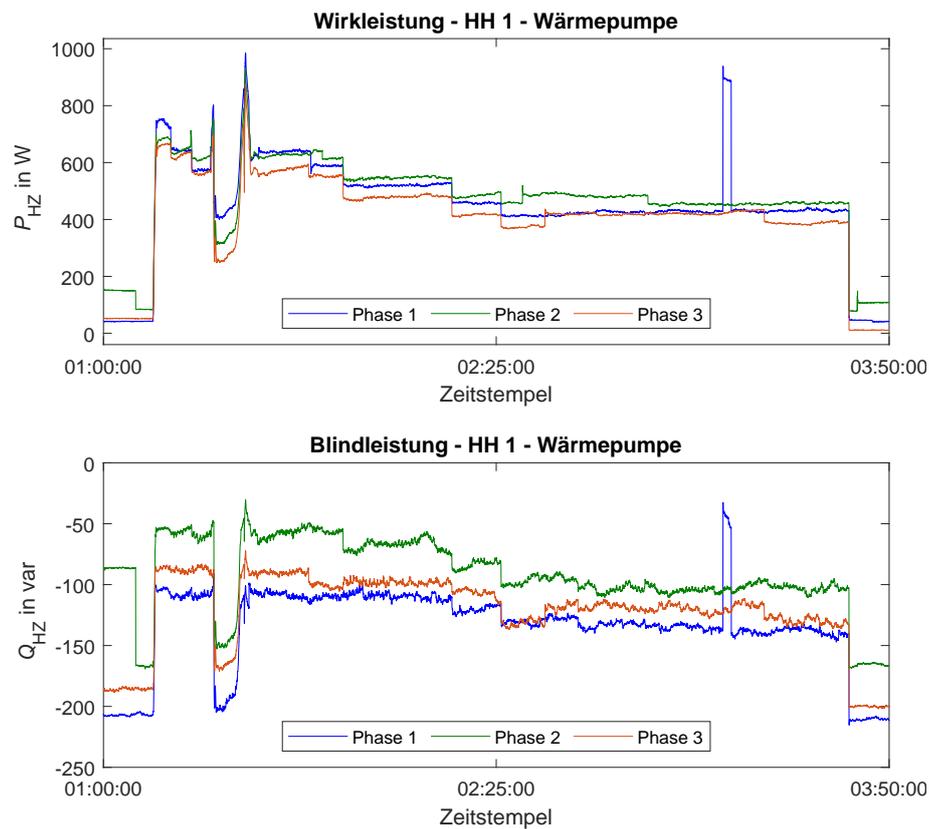


Abbildung 7.7: Heizbetrieb der 3-phasigen Luftwärmepumpe

Wie in Kapitel 4 schon erläutert, wird diese Wärmepumpe lediglich zum Erwärmen des Heizwassers verwendet, d.h. zum Aufheizen des Puffers. Das Brauchwasser wird mittels Ölheizung oder solathermisch erhitzt. Vergleicht man die Kurvenverläufe der einzelnen Phasen von Wirkleistung (blau) und Blindleistung (rot) der Abbildung 7.7 miteinander, erkennt man, dass die Verläufe in den einzelnen Phasen, bis auf den Offset und Rauschen, verursacht von anderen Geräten, ident sind, d.h. die 3-phasige Luftwärmepumpe belastet das Netz gleichmäßig.

Bei Betrachtung des Blindleistungsverlaufs in Abbildung 7.7 fällt auf, dass die benötigte Blindleistung rund 100 var beträgt (positiver Sprung um 100 var), da der Offset der einzelnen Phasen negativ ist, bleiben die Kurvenverläufe dennoch im kapazitiven Bereich.

7.5.2 1-Phasige Luftwärmepumpe

Folgende Abbildung 7.8 zeigt die ermittelten Daten des Heizbetriebs einer 1-phasigen Luftwärmepumpe, aufgenommen in Haushalt 3. Dabei sind der Wirkleistungsverlauf und der Blindleistungsverlauf der jeweiligen Grundwelle in blau bzw. rot und der Leistungsfaktorverlauf in schwarz ersichtlich. Die grün strichlierte Box verdeutlicht den Zeitraum des Heizbetriebes der Luftwärmepumpe. Wenn man den Zeitstempel betrachtet, fällt auf, dass die 1-phasige Wärmepumpe über 2 Tage annähernd permanent in Betrieb ist. Der schwarze Pfeil hebt die Warmwasserbereitung (vergrößert dargestellt in Abbildung 7.9) dieser Wärmepumpe hervor.

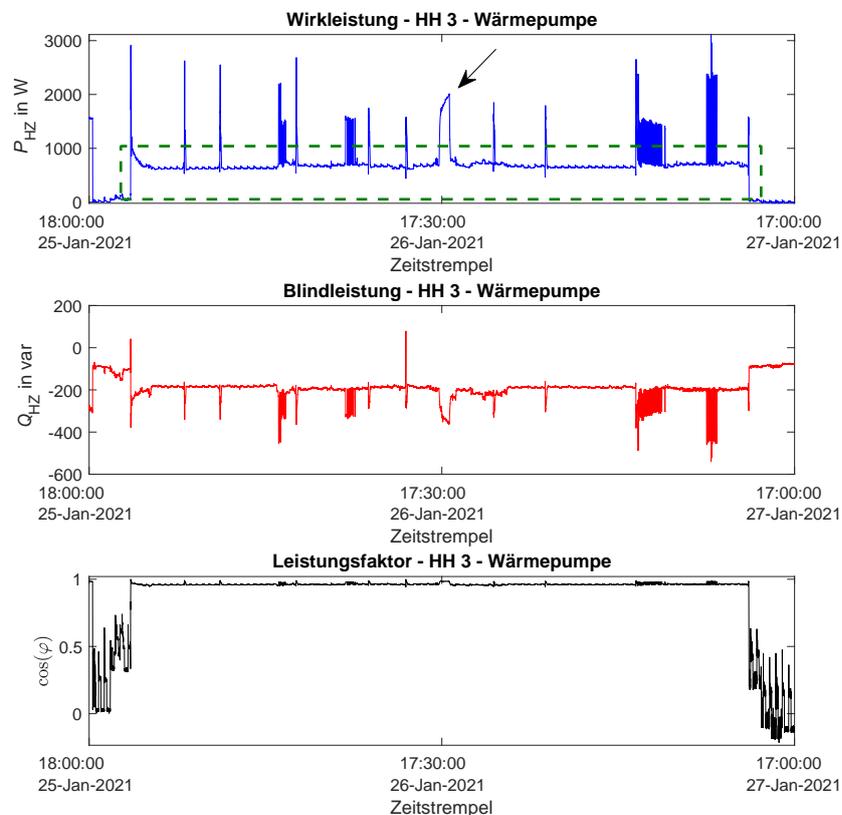


Abbildung 7.8: Heizbetrieb der 1-phasigen Luftwärmepumpe

Wie der Typ der Luftwärmepumpe schon indiziert, belastet die 1-phasige Wärmepumpe nur eine Phase, in diesem Fall ist es die Phase 3 des Haushaltes 3. In Abbildung 7.8 im ersten Kurvenverlauf kann man erkennen, dass die Wärmepumpe mit konstanter Leistung mit einer Amplitude von ca. 620 W arbeitet. Die gewünschte Raumtemperatur

wird mittels der Laufzeit der Wärmepumpe geregelt, in diesem Fall muss sie dafür in den Dauerbetrieb schalten. Die übrigen Peaks in diesem Zeitraum werden von anderen Geräten verursacht, die auf der gleichen Phase betrieben werden.

Beim Blindleistungsverlauf in Abbildung 7.8 fällt auf, dass bei Betrieb der Wärmepumpe die Blindleistung um -100 var springt und somit ein kapazitives Betriebsverhalten aufweist. Der sich daraus ergebende Leistungsfaktor beträgt 0,96 kapazitiv.

Die nachfolgende Abbildung 7.9 zeigt die ermittelten Daten der Warmwasserbereitung einer 1-phasigen Luftwärmepumpe, aufgenommen in Haushalt 3. Dabei sind der Wirkleistungsverlauf und der Blindleistungsverlauf der jeweiligen Grundwelle in blau bzw. rot und der Leistungsfaktorverlauf in schwarz ersichtlich.

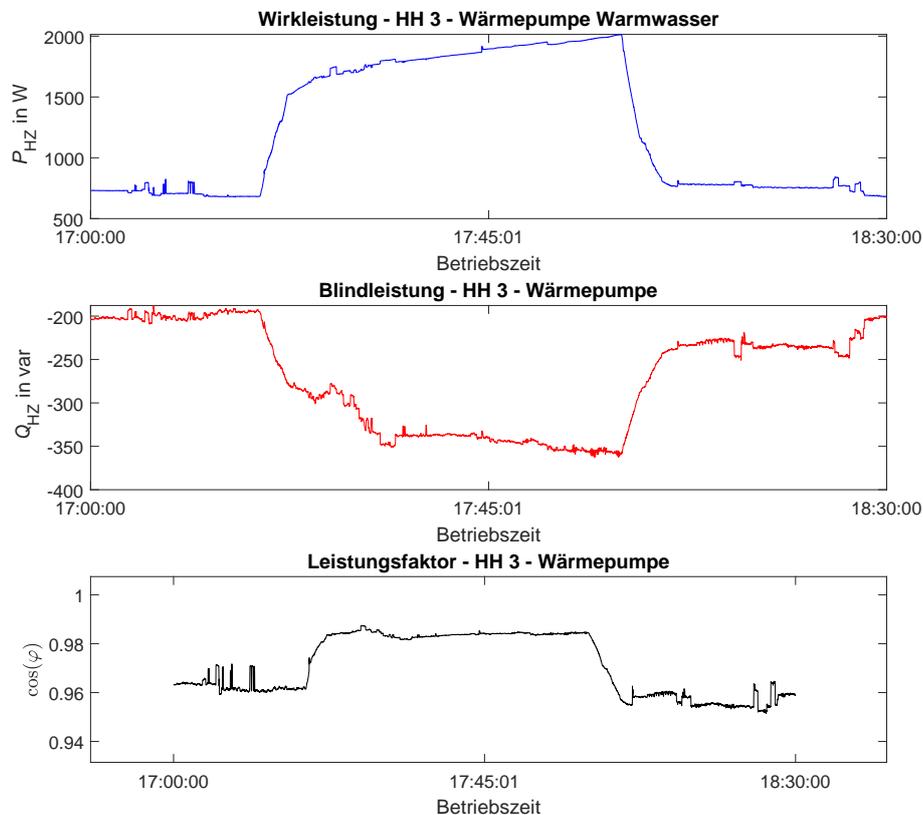


Abbildung 7.9: Warmwasserbereitung der 1-phasigen Luftwärmepumpe

Wie schon am Anfang dieses Kapitels erwähnt, wird für die Brauchwarmwasserbereitung mehr Leistung benötigt, da die Temperatur wegen hygienetechnischer Vorschriften höher sein sollte. Dieses Verhalten ist in Abbildung 7.9 sehr gut zu erkennen. Die Wärmepumpe fährt vom Heizbetrieb direkt in den Warmwasserbereitungsbetrieb, das heißt von einer Leistung von 620 W auf bis zu 2000 W. Die Dauer dieses Betriebs ist abhängig von

der Temperatur des Brauchwassers, in diesem Fall beträgt die Dauer ca. 45 min. Zur gleichen Zeit steigt auch der Blindleistungsbedarf nahezu proportional zur Wirkleistung von -200 var auf bis zu -365 var, womit sich ein kapazitives Blindleistungsverhalten mit einem Leistungsfaktor von 0,98 ergibt.

7.5.3 3-Phasige Erdwärmepumpe

Abbildung 7.10 zeigt die ermittelten Daten einer 3-phasigen Erdwärmepumpe, aufgenommen in Haushalt 2. Dabei ist im oberen Graph der Wirkleistungsverlauf der 3 Phasen der Grundwelle ersichtlich, und im unteren die dazugehörigen Blindleistungsverläufe. Im Wirkleistungsverlauf ist der Übergang vom Heizbetrieb (links von der strichliert eingezeichneten Orientierungslinie) zur Warmwasserbereitung (rechte Seite der Linie) gekennzeichnet.

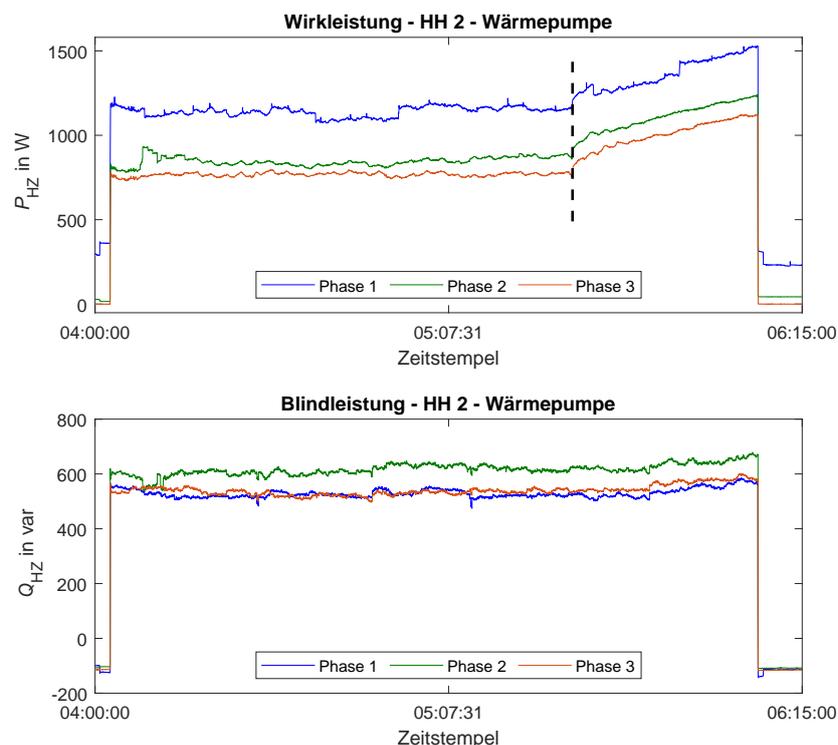


Abbildung 7.10: Heizbetrieb und Warmwasserbereitstellung einer 3-phasigen Erdwärmepumpe

Diese Wärmepumpe ist so eingestellt, dass 3 mal täglich das Brauchwarmwasser aufgeheizt wird. Die Zeiten des Heizvorganges sind so gewählt, dass diese jeweils vor den

Zeiten liegen zu jenen typischerweise Warmwasser benötigt wird. Die Heizzeiten sind hierbei von 05:30 - 06:15 Uhr morgens, zu Mittag von 10:10 - 10:50 Uhr und am Abend von 19:45 - 20:20 Uhr.

Wenn man nun den Wirkleistungsverlauf in Abbildung 7.10 betrachtet, fällt auf, dass die Wärmepumpe im Heizbetrieb in allen 3 Phasen eine konstante Leistungsaufnahme aufweist, abgesehen vom Offset, der durch andere Geräte verursacht wird. Die gewünschte Wassertemperatur im Speicher wird durch die Länge der Betriebszeitspanne geregelt, d.h. die Wärmepumpe wird abhängig von der Außentemperatur und gewünschten Innentemperatur mehrmals am Tag ein- und bei Erreichen der jeweiligen Schwelltemperatur wieder ausgeschaltet.

Durch das Aneinanderreihen von Heizbetrieb und Warmwasserbereitung wird versucht die Anzahl der Einschaltzyklen so gering wie möglich zu halten, da jeder Start eine große Beanspruchung für die Wärmepumpe bedeutet.

Im unteren Graph ist der Blindleistungsverlauf jeder Phase der Erdwärmepumpe ersichtlich. Es fällt auf, dass die Amplitude im Betrieb von -110 var auf 540 var springt, somit ergibt sich eine benötigte Blindleistung von 650 var. Dieser Wert ist sehr groß wenn man bedenkt, dass die benötigte Wirkleistung lediglich 750 W beträgt (ohne Offset). Mit diesen Werten ergibt sich ein Leistungsfaktor von 0,75 induktiv für den Heizbetrieb. Da die Blindleistung nahezu konstant bleibt und sich auch im Warmwasserbereitstellungsbetrieb kaum ändert, wird der Leistungsfaktor mit steigender Wirkleistung größer.

7.5.4 Ladeverhalten eines E-Autos

Die nachfolgende Abbildung 7.11 zeigt den Wirkleistungs-, Blindleistungs- und Leistungsfaktorverlauf einer Elektroauto-Ladestation, aufgenommen in Haushalt 6. Die Grundwelle der Wirkleistung ist in blau, jene der Blindleistung in rot, und der Leistungsfaktorverlauf in schwarz ersichtlich.

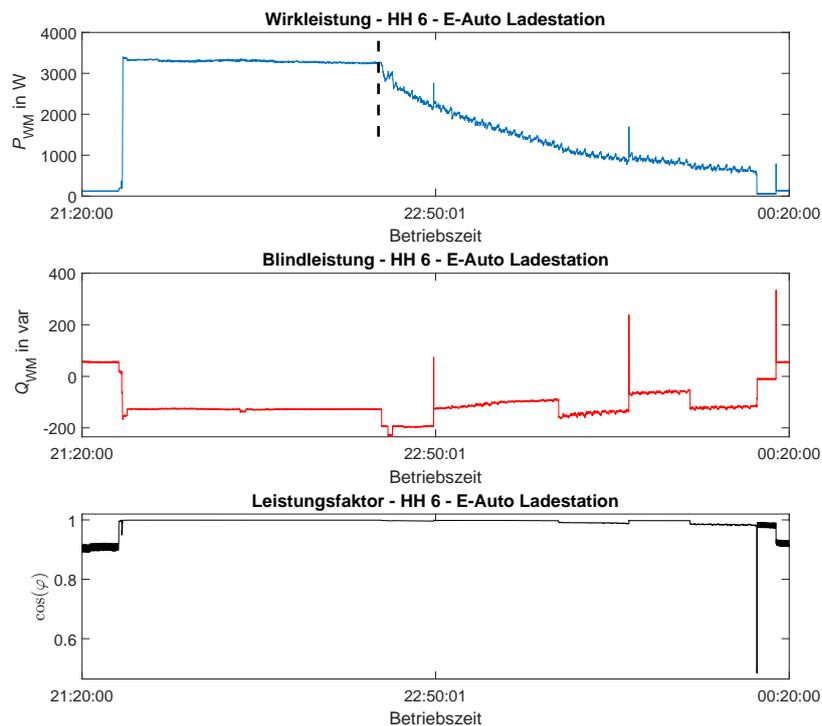


Abbildung 7.11: Ladestation des E-Autos im Haushalt 6

In den meisten Elektroautos sind Lithium-Ionen-Akkumulatoren verbaut. Diese werden mit einem sogenannten CC-CV-Ladeverfahren geladen. CC steht für constant current (= konstanter Strom), diese Phase ist links der strichlierten Linie in Abbildung 7.11 zu sehen. Rechts der strichlierten Linie ist die konstant Spannungsphase (CV) der Ladung zu erkennen. Die Länge der CC-Phase hängt von dem Ladestand (SOC ... State of Charge) des E-Autos ab (weitere Informationen siehe Quelle)[17].

Bei dieser Ladestation handelt es sich um eine herkömmliche Schutzkontaktsteckdose abgesichert mit einem C 16 Automaten. Betrachtet man nun den Wirkleistungsverlauf, dargestellt in Abbildung 7.11, kann man erkennen, dass das E-Auto zu Beginn

des Ladezyklus mit konstanter Leistung von ca. 3300 W lädt. Nach dieser Konstantleistungsphase klingt diese kontinuierlich, bis zum Ende des Ladevorgangs, ab.

Der Blindleistungsverlauf, dargestellt in rot in Abbildung 7.11, lässt ein kapazitives Verhalten erkennen. Dieses nimmt nach der Konstantstrom-Ladephase kontinuierlich bis zum Ende des Ladevorganges ab. Die Sprünge in diesem Verlauf sind auf andere Geräte, welche auf der gleichen Phase betrieben werden, zurückzuführen.

Der Leistungsfaktorverlauf, dargestellt in schwarz in Abbildung 7.11, ist über den gesamten Ladevorgang nahezu 1, da die Blindleistung im Vergleich zur benötigten Wirkleistung relativ klein ist.

8 Oberschwingungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Oberschwingungsmessungen der einzelnen Haushalte analysiert und interpretiert. Die Oberschwingungen werden direkt vom Messgerät gemessen und in Vektoren ausgegeben. Die Verarbeitung und Analyse der Daten erfolgt in der Softwareumgebung Matlab.

8.1 Relevante Normen

Im Folgenden werden die wichtigsten und relevanten Normen in Bezug auf Oberschwingungsspannungen und -ströme aufgelistet und die für diese Arbeit relevanten Stellen zitiert.

8.1.1 EN 50160 [1]

OVE EN 50160: In dieser Norm sind die Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen definiert.

Relevante Information für diese Arbeit:

„Unter normalen Betriebsbedingungen müssen innerhalb eines beliebigen Wochenintervalls 95 % der 10-Minuten-Mittelwerte des Spannungseffektivwertes jeder einzelnen Oberschwingung kleiner sein als die oder gleich den in Tabelle 1 [in dieser Arbeit Tabelle 8.1] hierfür genannten Werte sein. Resonanzen können höhere Spannungen bei einer einzelnen Oberschwingung hervorrufen.

Darüber hinaus muss der gesamte Oberschwingungsgehalt THD der Versorgungsspannung (gebildet aus allen Oberschwingungen bis zur Ordnungszahl 40) $\leq 8\%$ sein.“
[1]

Ungeradzahlige Harmonische				Geradzahlige Harmonische	
Keine Vielfache von 3		Vielfache von 3			
Ordnung h	Relative Spannungsamplitude u_h	Ordnung h	Relative Spannungsamplitude u_h	Ordnung h	Relative Spannungsamplitude u_h
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	1,0	6 bis 24	0,5 %
13	3,0	21	0,75		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				
ANMERKUNG Für die Oberschwingungen oberhalb der 25. Ordnung werden keine Werte angegeben, da sie gewöhnlich niedrig, allerdings wegen Resonanzerscheinungen weitgehend unvorhersehbar sind.					

Tabelle 8.1: Werte einzelner Oberschwingungsspannungen an der Übergabestelle bis zur 25. Ordnung in Prozent der Grundschwingungsspannung u_1 [1]

8.1.2 EN 61000-3-2 [2]

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 3-2: Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom 16 A je Leiter)

Relevante Information für diese Arbeit:

„Die Geräte werden in verschiedene Klassen eingeteilt. Beispielhaft werden folgend die Grenzwerte für Klasse A dargestellt.

Klasse A:

Symmetrische dreiphasige Geräte, Haushaltsgeräte (ausgenommen diejenigen Geräte, die in Klasse B, C oder D fallen), Staubsauger, Hochdruckreiniger, Elektrowerkzeug (ausgenommen tragbares Elektrowerkzeug), unabhängige phasengesteuerte Beleuchtungsregler (bzw. unabhängige phasengesteuerte Dimmer), Audio-Einrichtungen und professionell genutzte Leuchten für Bühnen- und Studiobeleuchtung.“ [2]

Oberschwingungsordnung n	Zulässiger Höchstwert des Oberschwingungsstromes A
Ungeradzahlige Oberschwingungen	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \times 15/n$
Geradzahlige Oberschwingungen	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \times 8/n$

Tabelle 8.2: Grenzwerte für Klasse A [2]

Diese Grenzwerte in Tabelle 8.2 werden zur Veranschaulichung herangezogen, da bei den gemessenen Haushalten lediglich die Gesamtströme der Phasen gemessen werden und somit keine Aussage über einzelne Geräte getroffen werden kann. Jedoch können die Werte des gesamten Haushalts mit diesen Werten verglichen werden, ob diese in einem kritischen Bereich liegen oder nicht.

8.1.3 EN 61000-3-12 [3]

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-12: Grenzwerte - Grenzwerte für Oberschwingungsströme, verursacht von Geräten und Einrichtungen mit einem Eingangsstrom > 16 und ≤ 75 A je Leiter, die zum Anschluss an öffentliche Niederspannungsnetze vorgesehen sind (IEC 61000-3-12:2011)

Relevante Information für diese Arbeit:

Mindestwert von R_{sce}	Zulässige einzelne Oberschwingungsströme I_h/I_{ref} ^a %						Zulässige Oberschwingungs- strom Kennwerte %	
	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}	THC/ I_{ref}	PWHC/ I_{ref}
33	21,6	10,7	7,2	3,8	3,1	2	23	23
66	24	12	8	5	4	3	26	26
120	27	15	10	6	5	4	30	30
250	35	20	13	9	8	6	40	40
≤ 350	41	24	15	12	10	8	47	47
Die relativen Werte für geradzahlige Oberschwingungen bis zur 12. Ordnung dürfen 16/h % nicht überschreiten. Geradzahlige Oberschwingungen oberhalb der 12. Ordnung werden beim THC und beim PWHC in der gleichen Weise wie ungeradzahlige Oberschwingungen berücksichtigt.								
Linear Interpolation zwischen aufeinanderfolgende R_{sce} -Werte ist zulässig.								
^a I_{ref} = Bezugsstrom; I_h = Oberschwingungsstrom-Komponente								

Tabelle 8.3: Aussendungsgrenzwerte für Oberschwingungsströme für Geräte, die keine symmetrischen dreiphasigen Geräte sind [3]

8.2 Mathematische Berechnung

Um die Oberschwingungsströme und -spannungen besser vergleichen zu können, wird zunächst die geometrische Summe dieser berechnet. Die nachfolgende Formel zeigt die Berechnung der Summe des gesamten Oberschwingungsstromes (THC ... Total Harmonic Current), für die Spannung (THV ... Total Harmonic Voltage) erfolgt diese Berechnung genau gleich.

$$\text{THC} = \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2} \quad n = 40 \quad (8.1)$$

Oberschwingungen werden auch oft durch die harmonische Gesamtverzerrung (THD ... Total Harmonic Distortion) ausgedrückt. Hierbei werden die gesamten Oberschwingungen anhand der Division durch die Grundschwingung normiert. Daher ist es nicht sinnvoll lediglich THD-Werte, ohne Referenz auf die Grundschwingung, miteinander zu vergleichen. Nachfolgend ist die Formel der harmonischen Gesamtverzerrung des Stromes ersichtlich, für die Spannung wird dies genau gleich berechnet.

$$\text{THDi} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \quad n = 40 \quad (8.2)$$

8.3 Messergebnisse

Tabelle 8.4 zeigt die Zeiten zu jenen die maximalen Werte des THC's und THV's der einzelnen Phasen auftreten. Wie man erkennen kann, treten die Maximalwerte des THC's in jeder Phase immer zu unterschiedlichen Zeiten auf, was darauf schließen lässt, dass diese durch ein Zusammenspiel einzelner einphasiger Verbraucher entsteht. Anhand des geführten Gerätetagebuches wurde versucht einzelne Werte auf spezielle Geräte zurückzuführen. Dies ist jedoch nicht möglich, da teilweise auch Kombinationen von mehreren kleineren Geräten, welche nicht im Gerätetagebuch aufgezeichnet werden, Ursache für die Oberschwingungsströme sein können.

Vergleicht man hingegen die Zeitwerte der Spannungszeitpunkte in Tabelle 8.4 fällt auf, dass teils in allen drei Phasen der maximale THV zum gleichen Zeitpunkt auftritt. Dies ist in Haushalt 2 und 4 der Fall, für dieses Verhalten kann es mehrere Gründe geben, was im Folgenden diskutiert wird.

Bezeichnung		THC	Zeitpunkt		THV	Zeitpunkt	
		A	Tag	Uhrzeit	V	Tag	Uhrzeit
HH 1	PH 1	2,68	23-Dec-2020	10:27:14	19,55	23-Dec-2020	00:00:21
	PH 2	3,90	21-Dec-2020	12:58:44	18,75	18-Dec-2020	22:00:51
	PH 3	1,75	22-Dec-2020	14:53:27	21,87	18-Dec-2020	02:13:04
HH 2	PH 1	2,13	05-Jan-2021	13:28:02	14,09	30-Dec-2020	04:31:11
	PH 2	5,93	31-Dec-2020	13:18:08	13,77	30-Dec-2020	04:31:11
	PH 3	4,18	03-Jan-2021	17:47:12	12,88	30-Dec-2020	04:31:10
HH 3	PH 1	2,47	30-Jan-2021	09:53:06	19,25	26-Jan-2021	21:46:44
	PH 2	1,61	29-Jan-2021	13:02:14	20,80	28-Jan-2021	22:01:25
	PH 3	2,88	27-Jan-2021	21:25:14	19,28	30-Jan-2021	19:58:59
HH 4	PH 1	3,17	09-Feb-2021	06:57:11	19,21	08-Feb-2021	13:42:57
	PH 2	2,36	07-Feb-2021	16:40:49	22,22	08-Feb-2021	13:42:57
	PH 3	1,96	08-Feb-2021	22:06:17	17,54	08-Feb-2021	13:42:57
HH 5	PH 1	0,10	17-Feb-2021	19:40:12	12,81	15-Feb-2021	20:04:24
	PH 2	1,29	19-Feb-2021	12:43:51	12,94	22-Feb-2021	09:27:49
	PH 3	0,62	19-Feb-2021	13:32:38	13,50	15-Feb-2021	20:04:24
HH 6	PH 1	1,18	15-Apr-2021	22:38:53	16,26	21-Apr-2021	00:24:17
	PH 2	0,75	19-Apr-2021	22:15:00	16,67	14-Apr-2021	13:36:08
	PH 3	2,76	16-Apr-2021	13:00:22	19,46	21-Apr-2021	00:24:16

Tabelle 8.4: Zeiten der maximalen THC's und THV's der einzelnen Phasen und Haushalte

Folgende Tabelle 8.5 zeigt die gemessenen und berechneten Werte der Oberschwingungsanalyse der einzelnen Phasen und Haushalte. Die Werte der einzelnen Phasen entsprechen den Zeitwerten an denen der Maximalwert der Summe der Oberschwingungswerte auftritt, die in Tabelle 8.4 ersichtlich sind.

Bezeichnung		Gemessen		Berechnet			
		I_1	U_1	THC	THDi	THV	THDu
		A	V	A	%	V	%
HH 1	PH 1	6,28	230,53	2,68	42,71	19,55	8,48
	PH 2	10,71	229,75	3,90	36,45	18,75	8,16
	PH 3	4,96	233,00	1,75	35,25	21,87	9,39
HH 2	PH 1	7,23	228,38	2,13	29,49	14,09	6,17
	PH 2	17,27	229,18	5,93	34,32	13,77	6,01
	PH 3	8,87	228,98	4,18	47,06	12,88	5,62
HH 3	PH 1	2,95	229,53	2,47	83,78	19,25	8,39
	PH 2	2,39	232,83	1,61	67,50	20,80	8,93
	PH 3	4,07	229,18	2,88	70,88	19,28	8,41
HH 4	PH 1	9,98	231,62	3,17	31,77	19,21	8,29
	PH 2	4,76	203,05	2,36	49,26	22,22	10,94
	PH 3	5,33	219,39	1,96	36,86	17,54	8,00
HH 5	PH 1	0,43	236,02	0,10	23,86	12,81	5,43
	PH 2	10,02	233,64	1,29	12,87	12,94	5,54
	PH 3	0,98	235,61	0,62	63,51	13,50	5,73
HH 6	PH 1	13,65	226,06	1,18	8,66	16,26	7,19
	PH 2	5,23	229,08	0,75	14,43	16,67	7,28
	PH 3	7,30	225,60	2,76	37,82	19,46	8,62

Tabelle 8.5: Gemessene und berechnete Werte der Oberschwingungsanalyse

Für die Analyse werden die zwei Haushalte mit den größten THC's und THV's herangezogen. Im Falle des maximalen THC's handelt es sich um Haushalt 2, ersichtlich in Tabelle 8.5 (Zeile: HH 2 PH 2, Spalte: THC) und im Fall des maximalen THV's um den Haushalt 4, wiederum ersichtlich in Tabelle 8.5 (Zeile: HH 4 PH 2, Spalte: THV). Die übrigen Diagramme mit den Oberschwingungsspannungen und -strömen befinden sich im Anhang.

In den Diagrammen der Oberschwingungsspannungen und -ströme sind diese bis zur Ordnung 20 dargestellt, diese ansonsten unübersichtlich sein würden. Davon abgesehen sind die entsprechenden Werte der höheren Ordnung so gering, dass deren Einfluss vernachlässigbar klein ist.

8.4 Haushalt mit dem maximalen THC

Abbildung 8.1 zeigt die Oberschwingungsströme von Haushalt 2 der einzelnen Phasen bis zur 20. Ordnung. Die Werte der einzelnen Phasen entsprechen den Zeitpunkten aus Tabelle 8.4. Diese Zeitpunkte jeder Phase sind jene, zu denen die Summe der Oberschwingungsströme, über die gesamte Messdauer des Haushaltes 2, am größten ist.

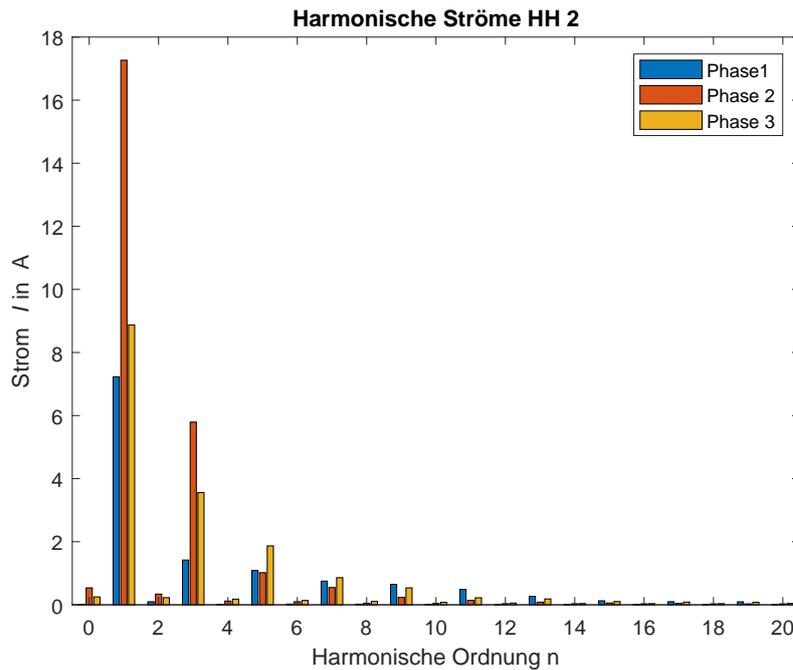


Abbildung 8.1: Oberschwingungsströme des Haushaltes 2

In Abbildung 8.1 fällt auf, dass die Werte der Ströme ab der Ordnung 13, verglichen zu den Werten der Grundschwingung, sehr gering sind. Ebenfalls ist zu erkennen, dass die ungerade Oberschwingungen viel stärker vertreten sind als die geraden Oberschwingungen, welche sozusagen nicht vorhanden sind.

Die Amplituden der einzelnen Phasen überschreiten zum Teil die in der Norm EN 61000-3-2 in Tabelle 8.2 definierten Grenzwerte. Da diese nur für Geräte mit einem Eingangstrom ≤ 16 A gelten und hier die Maximalwerte der einzelnen Phasen eines gesamten Haushaltes ersichtlich sind, kann im Grunde keine definierte Aussage über die Einhaltung oder Verletzung dieser Grenzwerte getätigt werden. Unter der Annahme, dass zu den Zeitpunkten der Grenzwert-Überschreitung meist mehrere Geräte gleichzeitig in Betrieb sind, kann davon ausgegangen werden, dass die einzelnen Geräte die Norm einhalten. Des Weiteren sei an dieser Stelle erwähnt, dass die gemessenen

Werte stets unter den in der Norm EN 61000-3-12 definierten Grenzwerte, ersichtlich in Tabelle 8.3, liegen, wobei diese für Anwendungen und Geräte mit einem Eingangsstrom $> 16 \text{ A}$ und $\leq 75 \text{ A}$ gelten.

In der folgenden Abbildung 8.2 sind die Stromverläufe der Grundschwingung in der Zeitspanne 60 s vor und nach dem Auftreten des maximalen THC's der jeweiligen Phase in rot ersichtlich, d.h. der verursachende Zeitpunkt ist in der Mitte des Verlaufes abgebildet. In blau sind die dazugehörigen Spannungsverläufe der Grundschwingung in der selben Zeitspanne zusehen.

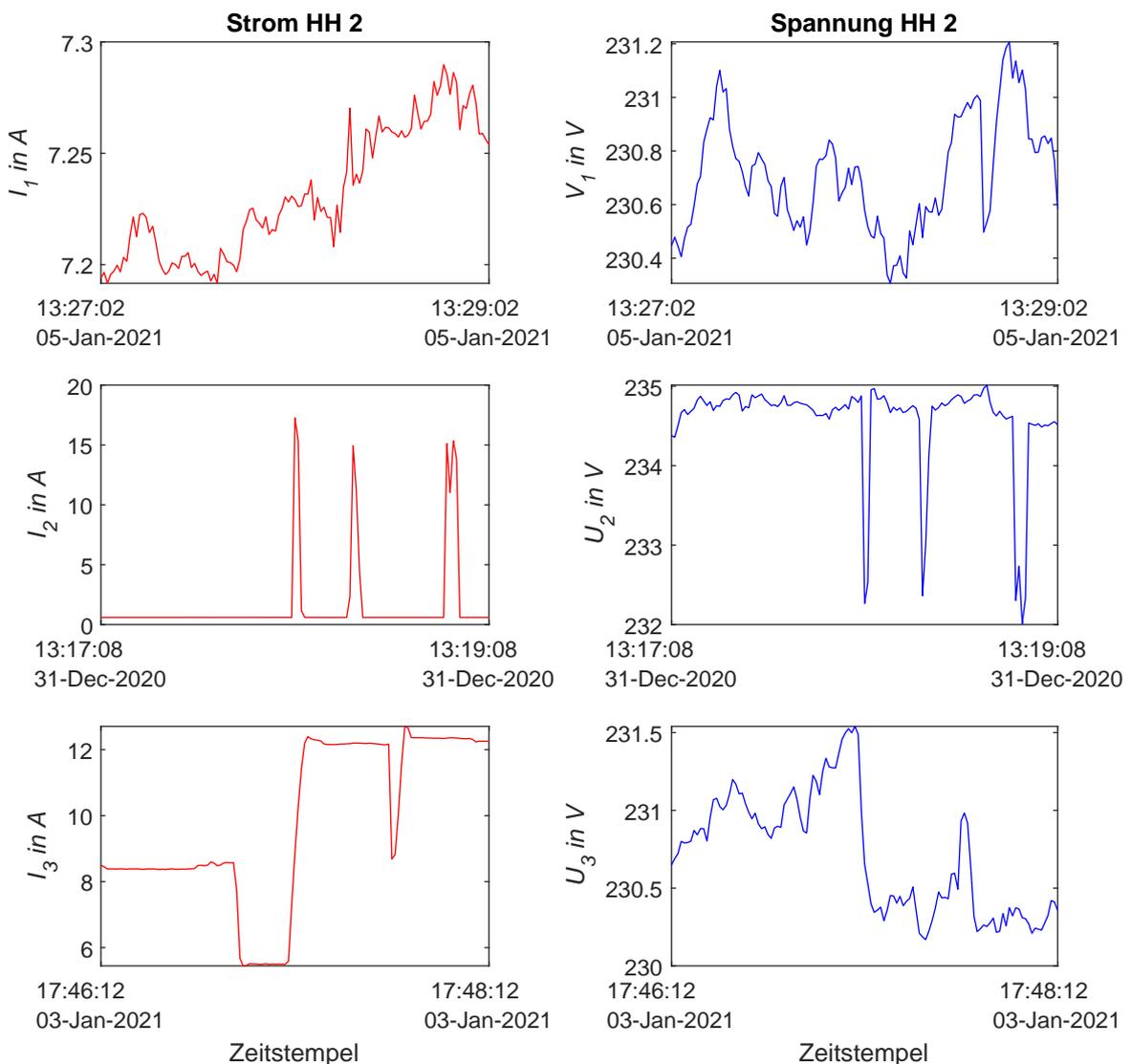


Abbildung 8.2: Oberschwingungsströme und -spannungen des Haushaltes 2

Bei Betrachtung des Stromverlaufs von Phase 1 (I_1) ist keine wesentliche Ursache für den maximalen Wert des THC's ersichtlich (keine steilen Sprünge oder Peaks im Verlauf). Hierbei ist anzumerken, dass in dieser Zeitspanne der Wert des THC's allgemein sehr hoch ist und genau zu diesem Zeitpunkt in der letzten Nachkommastelle größer ist als die übrigen Werte. Weiters handelt es sich bei den Kurvenverläufen um 1 s Mittelwerte, was dazuführen könnte, dass ein Peak sozusagen „weggemittelt“ wird.

Bei den zwei übrigen Phasen (I_2 & I_3) sind die für die hohen THC's ursächlichen großen Anstiege deutlich ersichtlich. Die verursachenden Geräte der Oberschwingungen können nicht ermittelt werden, da nicht bekannt ist, ob nur einzelner oder mehrere gleichzeitig betriebene Geräte zu diesen Kurvenverläufen führen. Weiters wurden nicht alle Geräte im Betriebszeitentagebuch erfasst, da dies einen zu großen Aufwand für die Hauseigentümer bedeutet hätte.

Da bei ausgeschalteten Geräten kein Stromfluss vorhanden ist, kann geschlussfolgert werden, dass die die Oberschwingungsströme durch den Haushalt selbst, und nicht durch das übergeordnete Netz, verursacht werden.

Bei den Spannungsverläufen ist ersichtlich, dass die erhöhte Stromaufnahme einen Einfluss auf diese Verläufe hat, die Schwankungen jedoch im Bereich von 0,8 bis 3 V liegen und damit der durch die Norm vorgeschriebene Grenzwert von 207 V nicht unterschritten wird[1].

Abbildung 8.3 zeigt die Oberschwingungsspannungen der einzelnen Phasen bis zur 20. Ordnung. Die Werte der einzelnen Phasen entsprechen den Zeitpunkten aus Tabelle 8.4. Diese Zeitpunkte jeder Phase sind jene, zu denen die Summe der Oberschwingungsspannungen, über die gesamte Messdauer des Haushaltes 2, am größten sind.

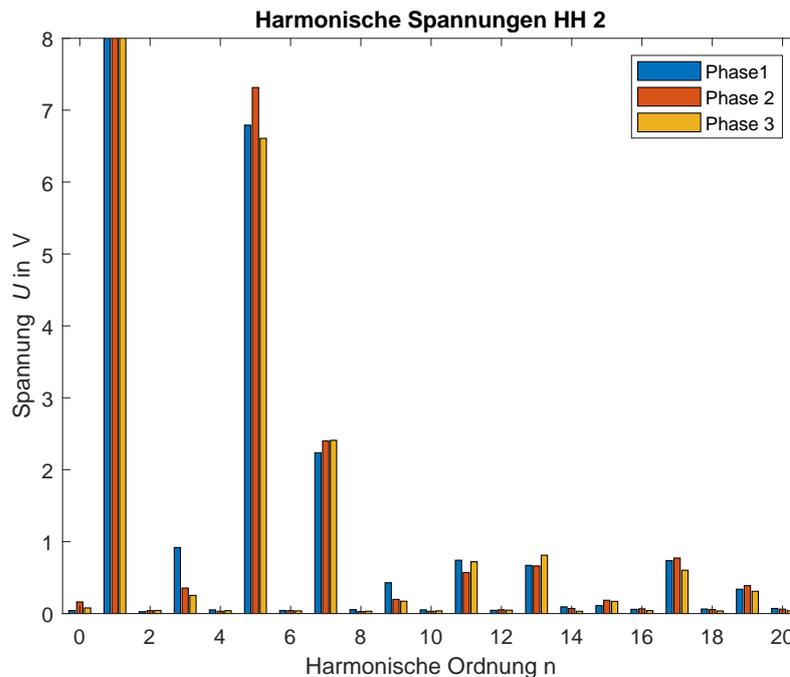


Abbildung 8.3: Oberschwingungsspannungen des Haushaltes 2

In Abbildung 8.3 ist die Grundwelle, welche in einem Wertebereich von rund 228 V bis 229 V liegt (ersichtlich in Tabelle 8.5), abgeschnitten, da ansonsten das Diagramm durch die Unlesbarkeit der Oberschwingungen seine Aussagekraft verliert.

Die Werte der einzelnen Oberschwingungsordnungen der jeweiligen Phase liegen über den Grenzwerten in Tabelle 8.1. Da es sich bei den Grenzwerten jedoch um die Mittelwerte über 10 Minuten handelt und bei den Werten in Abbildung 8.3 um die Maximalwerte (gemittelt über 1 s), können diese nicht unmittelbar miteinander verglichen werden. Werden die Messwerte ebenfalls über 10 Minuten gemittelt, liegen die Ergebnisse stets unter den in der Norm definierten Grenzwerten. Die Mittelwerte werden an dieser Stelle nicht nochmals explizit angegeben. Der THDu der einzelnen Phasen zum Zeitpunkt des maximalen THV's ist ebenfalls kleiner als die 8 %, welche in der Norm EN 50160 definiert sind.

Die folgende Abbildung 8.4 zeigt die Spannungsverläufe der Grundschwingung in der Zeitspanne 60 s vor und nach dem Auftreten des maximalen THV's der jeweiligen Phase in blau, d.h. der verursachende Zeitpunkt ist in der Mitte des Verlaufes zu sehen. In rot sind die Stromverläufe der Grundschwingung in der selben Zeitspanne ersichtlich.

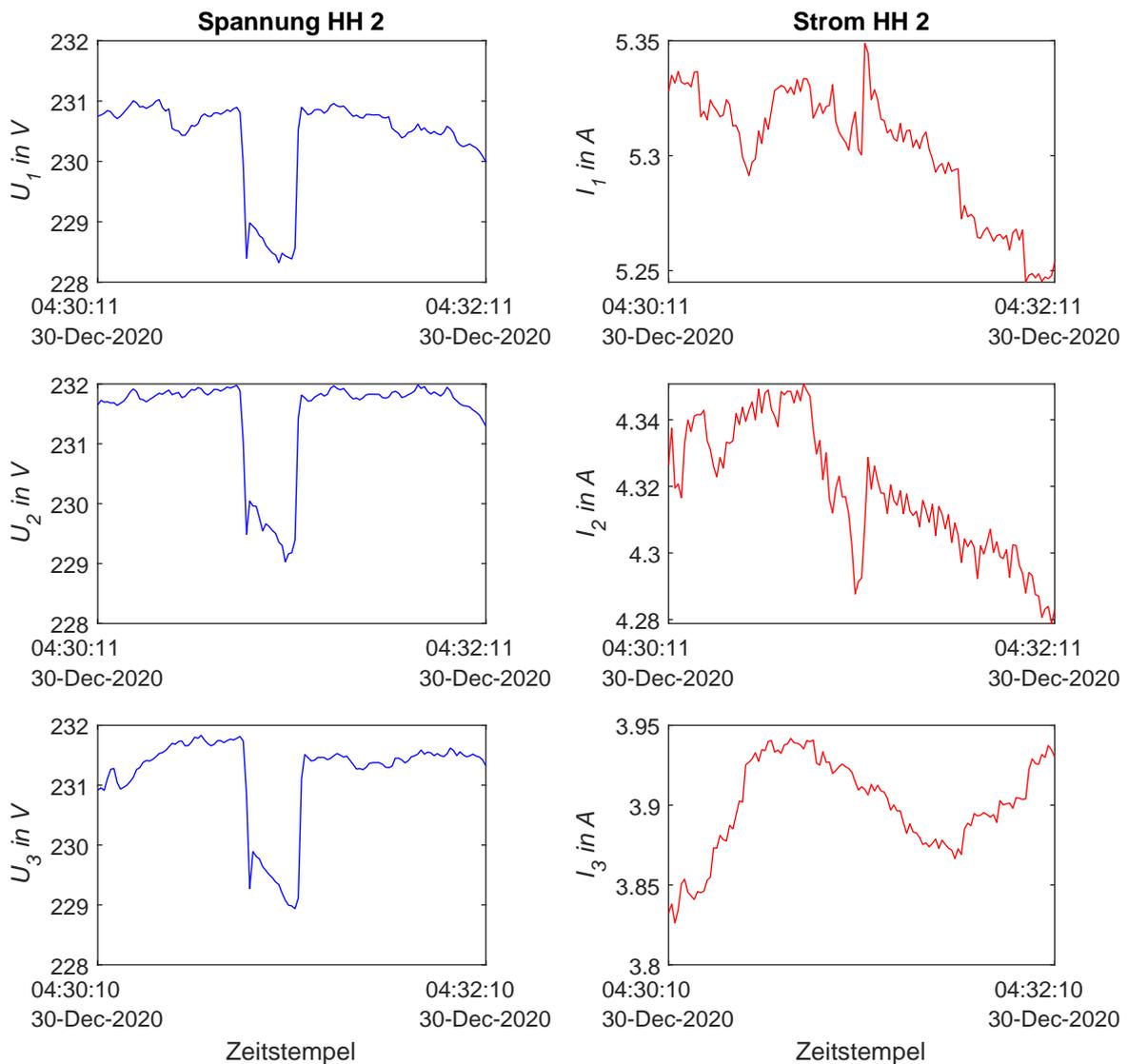


Abbildung 8.4: Oberschwingungsspannungen und -ströme des Haushaltes 2

In Abbildung 8.4 ist der Grund für das Auftreten des maximalen THV's in jeder Phase, in Form des steilen Anstiegs in der Mitte der Verläufe, eindeutig zu erkennen. Ebenfalls fällt auf, dass der Spannungseinbruch in allen 3 Phasen gleichzeitig auftritt. Dies lässt darauf schließen, dass dieses Verhalten durch äußere, nicht im selbst Haushalt

liegende Umstände, verursacht wird. Wenn die Ursache der Oberschwingungsspannungen im Haushalt selbst liegen würde, beispielsweise durch Einschalten eines 3-phasigen Verbrauchers, müssten die Stromverläufe aller 3 Phasen eine ähnliche Kurvenform aufweisen. Des Weiteren ist die Amplitude der Stromänderung jeder Phase zu gering um solche Spannungseinbrüche auszulösen. Für dieses Verhalten kann es viele Ursachen geben, z.B. eine Störung oder Umschaltung im EVU, oder auch die Verwendung eines großen 3-phasigen Verbrauchers in der Nähe des Haushaltes.

8.5 Haushalt mit dem maximalen THV

In der folgenden Abbildung 8.5 sind die Oberschwingungsströme der einzelnen Phasen bis zur 20. Ordnung von Haushalt 4 zu sehen. Die Werte der einzelnen Phasen entsprechen den Zeitpunkten aus Tabelle 8.4. Diese Zeitpunkte sind jene, zu denen die Summe der Oberschwingungsströme jeder Phase, über die gesamte Messdauer von Haushalt 4, am größten ist.

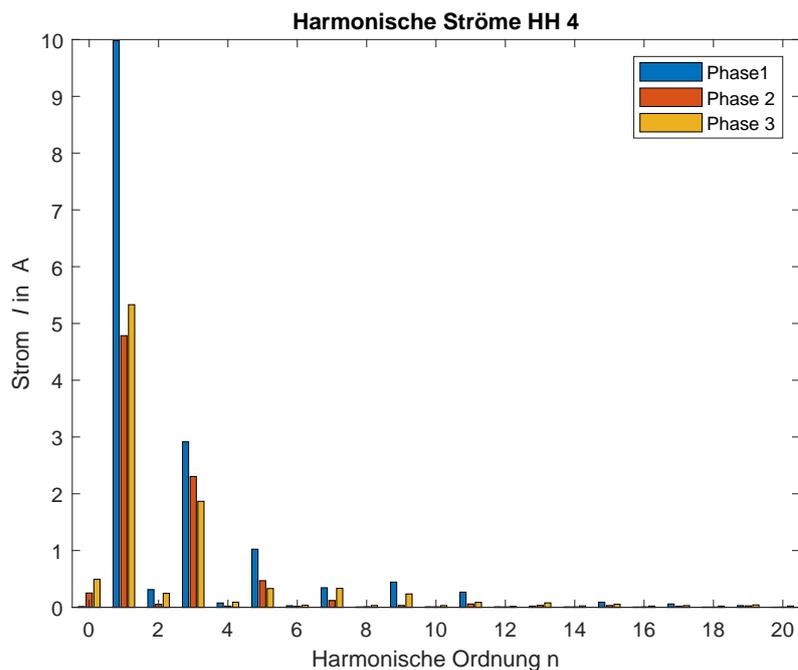


Abbildung 8.5: Oberschwingungsströme des Haushaltes 4

In Abbildung 8.5 sind die Oberschwingungsströme ab der 13. Ordnung sehr gering zum Vergleich zu ihrer Grundwelle. Es ist zu erkennen, dass die Ströme der 3 Harmonischen der Phase 1 und 2 knapp über den Grenzwerten der Norm EN 61000-3-2 liegen. Der

Wert der 3. Phase liegt hingegen darunter. Vergleicht man die Amplituden mit jenen von Haushalt 2, ersichtlich in Abbildung 8.1, ist ersichtlich, dass Haushalt 4 kleinere Amplituden aufweist, die Diagramme ansonsten jedoch sehr ähnlich sind, d.h. die Oberschwingungen treten hauptsächlich in ungeraden Ordnungen auf und die Amplituden ab der 13. Ordnung sind sehr klein.

Die nächste Abbildung 8.6 zeigt die Stromverläufe der Grundschiwingung in der Zeitspanne 60 s vor und nach dem Auftreten des maximalen THC's der jeweiligen Phase in rot, d.h. der verursachende Zeitpunkt ist in der Mitte des Verlaufes zu sehen. In blau sind die Spannungsverläufe der Grundschiwingung in der selben Zeitspanne dargestellt.

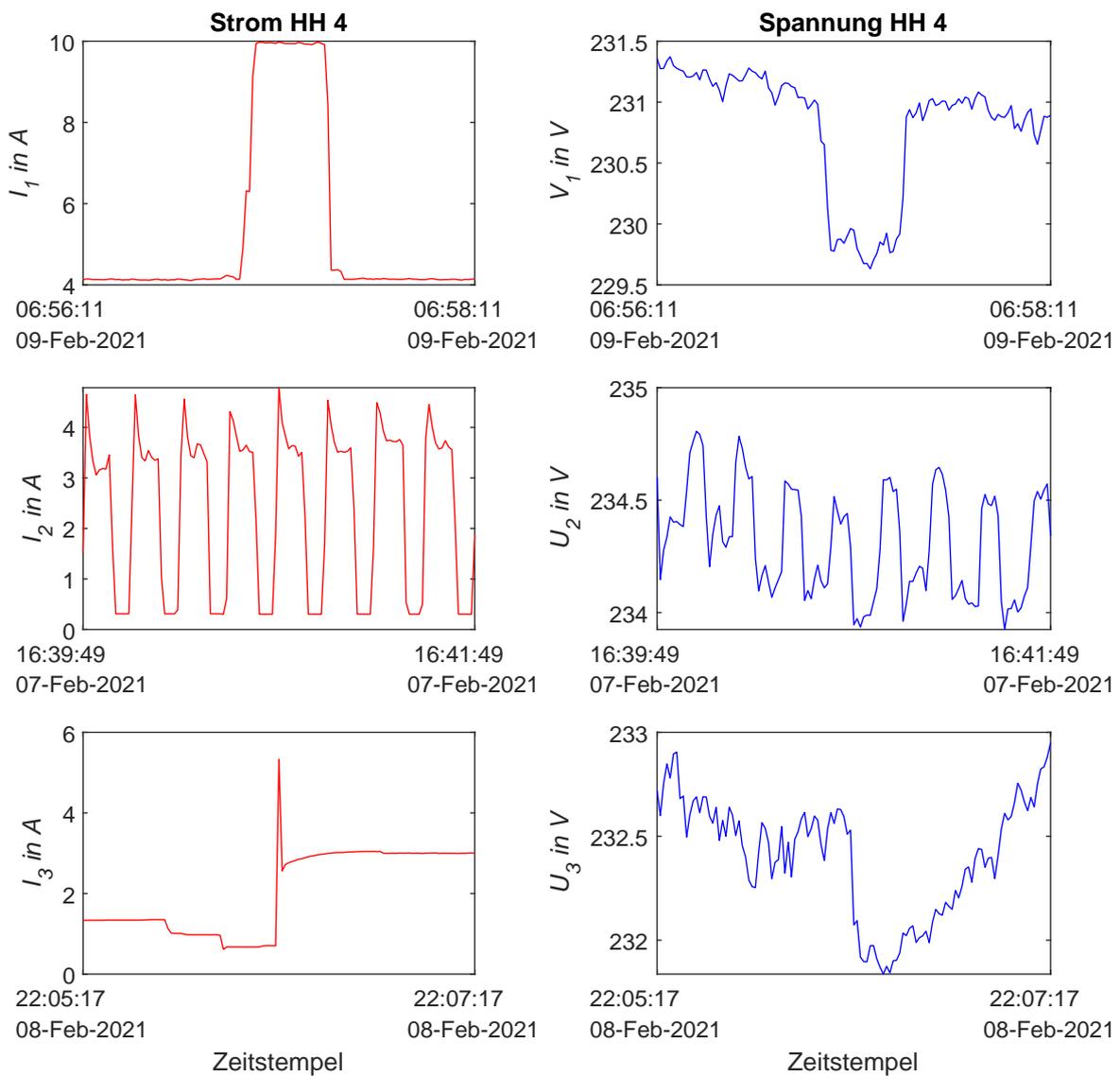


Abbildung 8.6: Oberschwingungsströme und -spannungen des Haushaltes 4

Anhand der Kurvenverläufe des Stromes in Abbildung 8.6 ist die Ursache für die maximalen THC's in Phase 2 und 3, anhand der steilen Anstiege im Verlauf, deutlich erkennbar. In Phase 1 liegen die Werte des THC's zu dieser Zeit in einem hohen Wertebereich. Im Fall des maximalen THC's unterscheidet sich wiederum lediglich die letzte Nachkommastelle. Die Verursacher können, wie bereits bei Haushalt 2 erläutert, nicht eruiert werden. Weiters ist ersichtlich, dass wie in Haushalt 2 die auftretenden maximalen THC's zu unterschiedlichen Zeitpunkten stattfinden, das heißt die Ursache der Oberschwingungen kann in einzelnen oder mehreren 1-phasigen Verbräuchen vermutet werden. Ebenso sind die Kurvenverläufe der Ströme der jeweiligen Phase unterschiedlich, weshalb ein 3-phasiger Verbraucher zur Gänze ausgeschlossen werden kann.

Die durch die Stromspitzen verursachten Spannungsschwankungen der jeweiligen Phase sind im Bereich von maximal 1.5 V und damit verschwindend klein.

In der folgenden Abbildung 8.7 sind die Oberschwingungsspannungen der einzelnen Phasen bis zur 20. Ordnung zu sehen. Die Werte der einzelnen Phasen entsprechen den Zeitpunkten aus Tabelle 8.4. Diese Zeitpunkte sind jene, zu denen die Summe der Oberschwingungsspannungen der einzelnen Phasen, über die gesamte Messdauer des Haushaltes 4, am größten ist.

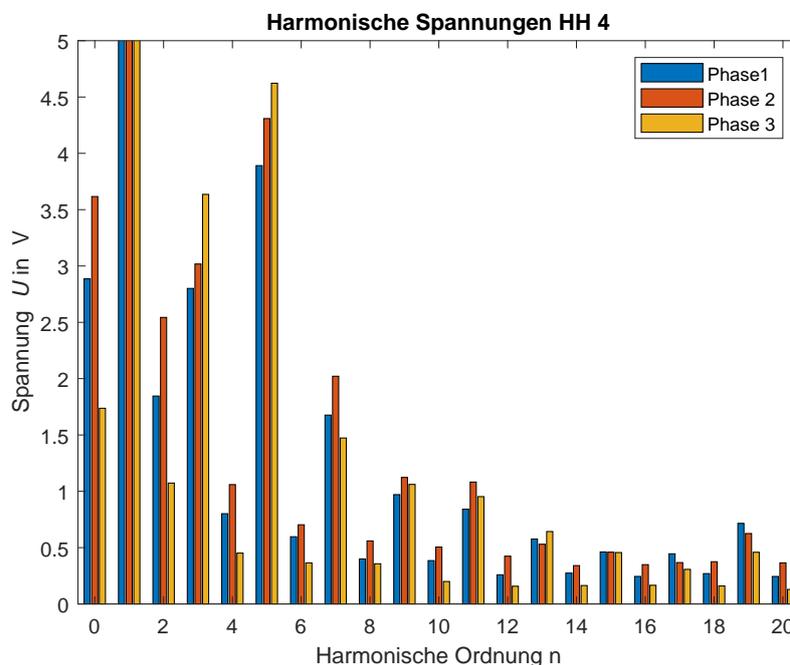


Abbildung 8.7: Oberschwingungsspannungen des Haushaltes 4

In Abbildung 8.7 ist die Grundwelle, deren Werte im Bereich von 203 V bis 232 V liegen (ersichtlich in Tabelle 8.5), abgeschnitten, da ansonsten das Diagramm seine Aussagekraft, durch die fehlende Erkennbarkeit der kleineren Oberschwingungswerte, verliert.

Vergleicht man die Amplituden der Abbildung 8.3 und 8.7 ist zu erkennen, dass in Haushalt 2 die Amplituden zwar höher sind, hauptsächlich aber nur die ungeraden Oberwingungen vorhanden sind. In Haushalt 4 hingegen sind auch die geraden Oberschwingungen vorhanden, wodurch die Summe aller Oberschwingungsspannungen größer ist. Der aus den gemessenen Werten berechnete THDu liegt für Haushalt 4 im Bereich zwischen 8 und 10,94 % und ist somit größer als der in Norm EN 50160 definierte Grenzwert von 8%. Dieser gilt jedoch für den 10 minütigen Mittelwert, bei Bildung dessen liegen die gemessenen Werte weit unter der normativen Grenze.

Die folgende Abbildung 8.8 zeigt die Spannungsverläufe der Grundschwingung in der Zeitspanne 60 s vor und nach dem auftreten des maximalen THV's der jeweiligen Phase in blau, d.h. der verursachende Zeitpunkt ist in der Mitte des Verlaufes zu sehen. In rot sind die Stromverläufe der Grundschwingung zur selben Zeitspanne ersichtlich.

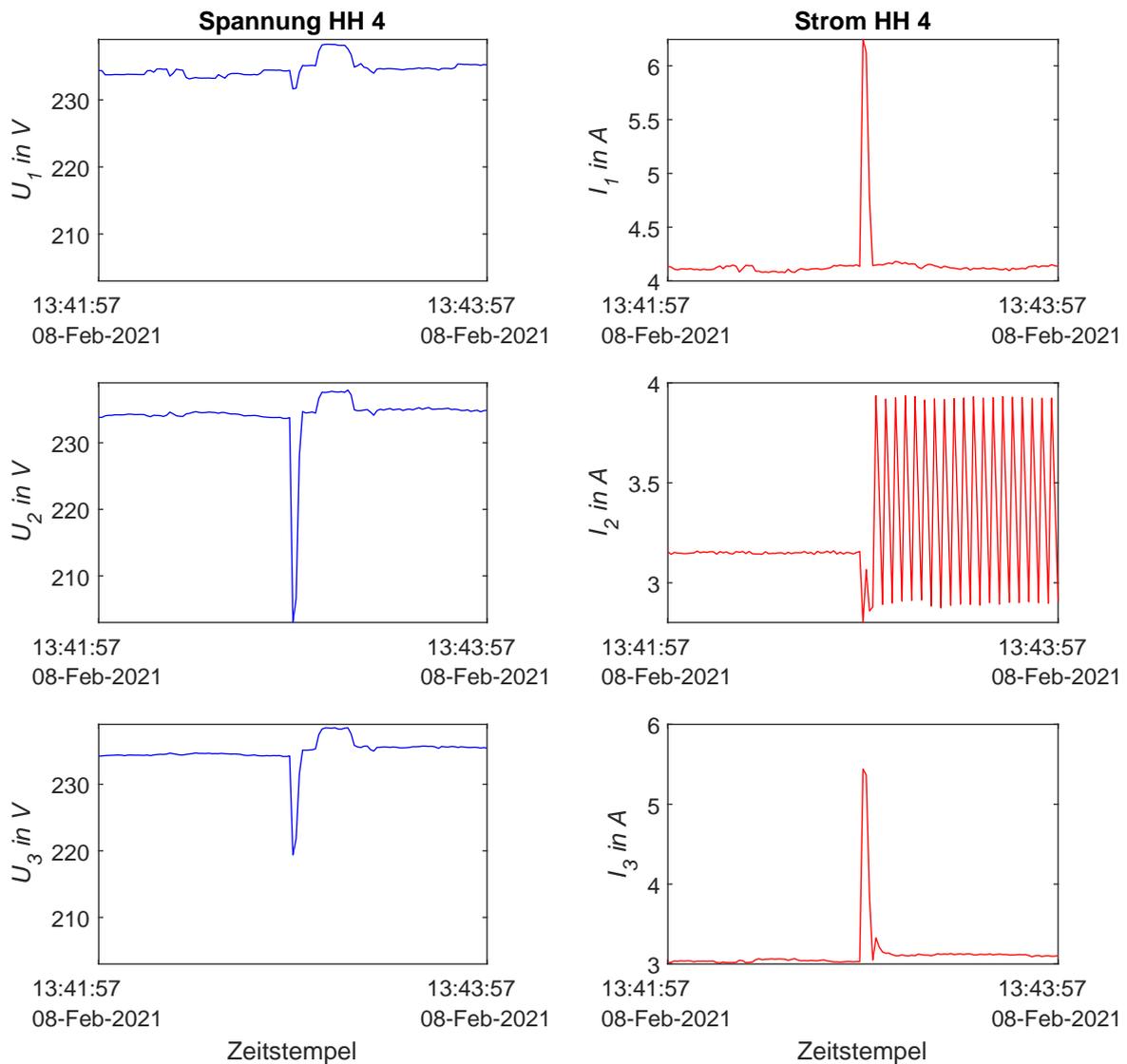


Abbildung 8.8: Oberschwingungsspannungen und -ströme des Haushaltes 4

In den Spannungsverläufen der Abbildung 8.8 ist zu erkennen, dass in Phase 2 ein enormer Spannungseinbruch von rund 30 V auftritt. Auch in den anderen Phasen 1 und 3 tritt ein Spannungseinbruch zur selben Zeit auf, was auf einen Fehler im Netz oder dergleichen schließen lässt. Die Ursache dafür liegt somit nicht im Haushalt selbst.

Zur Zeit der Spannungsänderungen sind auch Stromspitzen ersichtlich, welche in einem Bereich von maximal 2,5 A liegen und als Folge der Spannungseinbrüche entstehen, da sich die Verbraucher an die geänderten Verhältnisse anpassen und wie im Fall der Phase 2 sogar zu oszillieren beginnen. Diese Schwingungen dauert rund 4 Minuten an, bis das verursachende Gerät wieder einen stabilen Arbeitspunkt erreicht.

9 Conclusio und Ausblick

Bei der Analyse der Haushalte sowie deren Geräte hat sich herausgestellt, dass das Blindleistungsverhalten der Grundlast neuerer Haushalte kapazitiv ist. Abhängig vom Nutzungsverhalten der Betriebsmittel sowie der verbauten Geräte wird diese Grundlast beeinflusst.

Die Auswertung der harmonischen Oberschwingungsspannungen zeigt, dass die Werte der maximalen harmonischen Gesamtverzerrung nur knapp über dem in der Norm [1] angeführten Grenzwert von 8 % liegen. Dieser gilt jedoch für den 10-Minuten-Mittelwert, bei der Bildung dessen für die Messergebnisse, wird der Grenzwert in jedem der Haushalte weit unterschritten.

Für die emittierten Oberschwingungsströme eines Haushaltes sind keine normativen Grenzwerte vorhanden, daher werden zum Vergleich die Grenzwerte der Normen EN 61000-3-2 & EN 61000-3-12 herangezogen, diese beinhalten zwar die Werte für einzelne Geräte, jedoch nicht jene für einen gesamten Haushalt. Bei der Analyse stellte sich heraus, dass die Werte zum Zeitpunkt der maximalen Oberschwingungsströme der einzelnen Phasen und Haushalte zum Teil über den Grenzwerten welche in EN 61000-3-2 definiert sind, liegen, aber immer unter jenen der Norm EN 61000-3-12.

In den kommenden Jahren werden voraussichtlich immer mehr Haushalte auf den heutigen Stand der Technik gebracht und mit neuen, teils umrichter gesteuerten, Betriebsmitteln ausgestattet. Das führt dazu, dass immer mehr kapazitive Blindleistung durch die Haushalte bereitgestellt wird. Dieser Umstand hat gravierende Auswirkungen auf den Betrieb des Niederspannungsnetzes und die Netzstabilität, sofern diese Erkenntnis nicht in die Lastflussberechnungen und Simulationen bzw. Voraussagen der Netzbetreiber mit einfließen.

Um die Analyse des Verbraucherverhaltens der Haushalte zu vervollständigen, wäre es unabdinglich diese auch im Sommerhalbjahr zu messen um den Einfluss der Wärmepumpen zu minimieren und ebenfalls Veränderungen des Verbraucherverhaltens, aufgrund der wechselnden Klima- und Wetterverhältnisse, in die Analyse miteinzubeziehen. Die Auswirkungen der Tatsache, dass vermehrt Klimageräte in Haushalten zum Einsatz kommen, könnte dadurch auch analysiert werden.

Die derzeit nicht existenten normativen Grenzwerte der emittierten Oberschwingungsströme und -spannungen kompletter Haushalte macht es schwierig aussagekräftige Angaben über mögliche Probleme oder Auswirkungen dahingehend zu tätigen.

Symbolverzeichnis

$\cos(\varphi)$	Leistungsfaktor
I_1	Strom der Phase 1 in A
I_2	Strom der Phase 2 in A
I_3	Strom der Phase 3 in A
I_h	Oberschwingungsstrom-Komponente in A
I_{ref}	Bezugsstrom in A
P_1	Wirkleistung der Phase 1 in W
P_2	Wirkleistung der Phase 2 in W
P_3	Wirkleistung der Phase 3 in W
P_{max}	maximale Wirkleistung in W
P_{mean}	gemittelte Wirkleistung in W
P_{min}	minimal Wirkleistung in W
$\varphi(t)$	Phasenwinkel in $^\circ$
Q_1	Blindleistung der Phase 1 in var
R_{sce}	Kurzschlussleistungsverhältnis
U_1	Spannung der Phase 1 in V
U_2	Spannung der Phase 2 in V
U_3	Spannung der Phase 3 in V
U_h	Oberschwingungsspannungs-Komponente in V

Abkürzungsverzeichnis

BR	Backrohr
CF	Ceranfeld/Kochfeld
EFH	Einfamilienhaus
el	elektrischen
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
GS	Geschirrspühler
HH	Haushalt
HZ	Heizung
PF	Leistungsfaktor/ Power factor
THDi	Total Harmonic Distortion of current
THDu	Total Harmonic Distortion of voltage
THC	Total Harmonic Current
THV	Total Harmonic Voltage
TR	Trockner
WM	Waschmaschine

Literaturverzeichnis

- [1] *Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen (EN 50160)*, Dez 2020.
- [2] *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-2: Grenzwerte - Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter) (IEC 61000-3-2:2018)*, Jan 2020.
- [3] *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-12: Grenzwerte - Grenzwerte fuer Oberschwingungsströme, verursacht von Geräten und Einrichtungen mit einem Eingangsstrom > 16 und ≤ 75 A je Leiter, die zum Anschluss an öffentliche Niederspannungsnetze vorgesehen sind (IEC 61000-3-12:2011)*, Juni 2012.
- [4] Gesamt Energiebilanz Österreich 1970 bis 2019, Statistic Austria . Online erhältlich http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html. (abgerufen am 30. März 2021).
- [5] Durchschnittlicher Stromverbrauch eines Haushalts 2008, 2012 und 2016, Statistic Austria . Online erhältlich http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energieeinsatz_der_haushalte/index.html. (abgerufen am 31. März 2021).
- [6] Kennwerte einer herkömmlichen Glühbirne . Online erhältlich <https://de.wikipedia.org/wiki/Glühlampe>. (abgerufen am 31. März 2021).
- [7] Kennwerte eines LED leuchtmittels . Online erhältlich <https://www.osram.de/cb/>. (abgerufen am 31. März 2021).
- [8] Kennwerte einer Energiesparlampe . Online erhältlich <https://de.wikipedia.org/wiki/Kompaktleuchtstofflampe>. (abgerufen am 31. März 2021).
- [9] Information zum Glühlampenverbot . Online erhältlich https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen_wohnen_und_umwelt/energie_sparen/Seite.2430400.html#:~:text=Seit%201.,an%20den%20Handel%20ausgeliefert%20werden. (abgerufen am 07. April 2021).
- [10] Herwig Renner. *Regelung und Stabilität elektrischer Energiesysteme Vorlesungsskript*. 2013.

-
- [11] Preisblatt der Netz Burgenland GmbH, Bereich Strom. Online erhältlich https://www.netzburgenland.at/fileadmin/user_upload/2020_12_22_--Preisblatt_Strombereich_KJ2021.pdf. (abgerufen am 12. Mai 2021).
- [12] AC Zangenstromwandler. Online erhältlich <https://www.chauvin-arnoux.at/sites/default/files/D00PWK12.PDF>. (abgerufen am 16. März 2021).
- [13] Isolated low voltage module. Online erhältlich https://www.systemtech.se/static/files/42/dewetron_daqp-lv_e.pdf. (abgerufen am 16. März 2021).
- [14] Isolated high voltage module. Online erhältlich https://www.pro-4-pro.com/media/product/13031/attachment_de-1398244805.pdf. (abgerufen am 16. März 2021).
- [15] CMC 256plus - Hochpräzises Schutzprüfgerät und universelles Kalibrierwerkzeug. Online erhältlich <https://www.omicronenergy.com/download/document/17525E09-A23D-46E3-A16A-E60351C63FD7/>. (abgerufen am 30. März 2021).
- [16] Thomas Mallits. *Analyse des Stromverbrauches in Haushalten mit Mustererkennung (Eine mögliche Anwendung für Smart Meter)*. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2011.
- [17] Andreas Sulzenbacher. *Niederfrequente Netzrückwirkungen von Elektrofahrzeugen (EN 50160)*. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2016.

Anhang

Bilder der Messaufbauten



(a) Messaufbau im Haushalt 2



(b) Messaufbau im Haushalt 6

Abbildung D.1: Darstellung der Messaufbauten in den verschiedenen Örtlichkeiten



(a) Messaufbau im Haushalt 3



(b) Messaufbau im Haushalt 5

Abbildung D.2: Darstellung der Messaufbauten in den verschiedenen Örtlichkeiten



Abbildung D.3: Darstellung der Messaufbauten im Haushalt 4

Lastgänge der gemessenen Haushalte

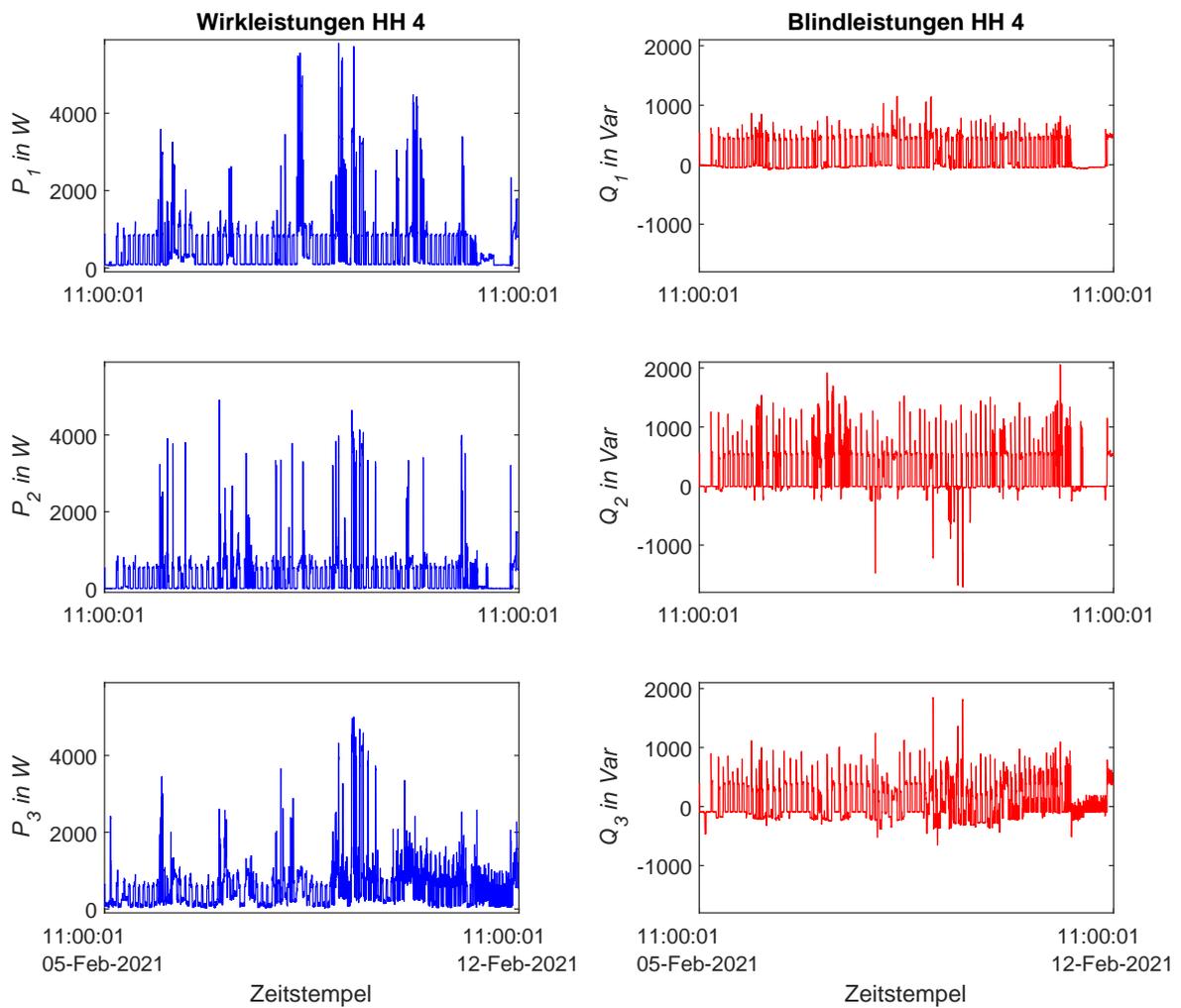


Abbildung D.5: Leistungen und Blindleistungen aller 3 Phasen des Haushalts 4

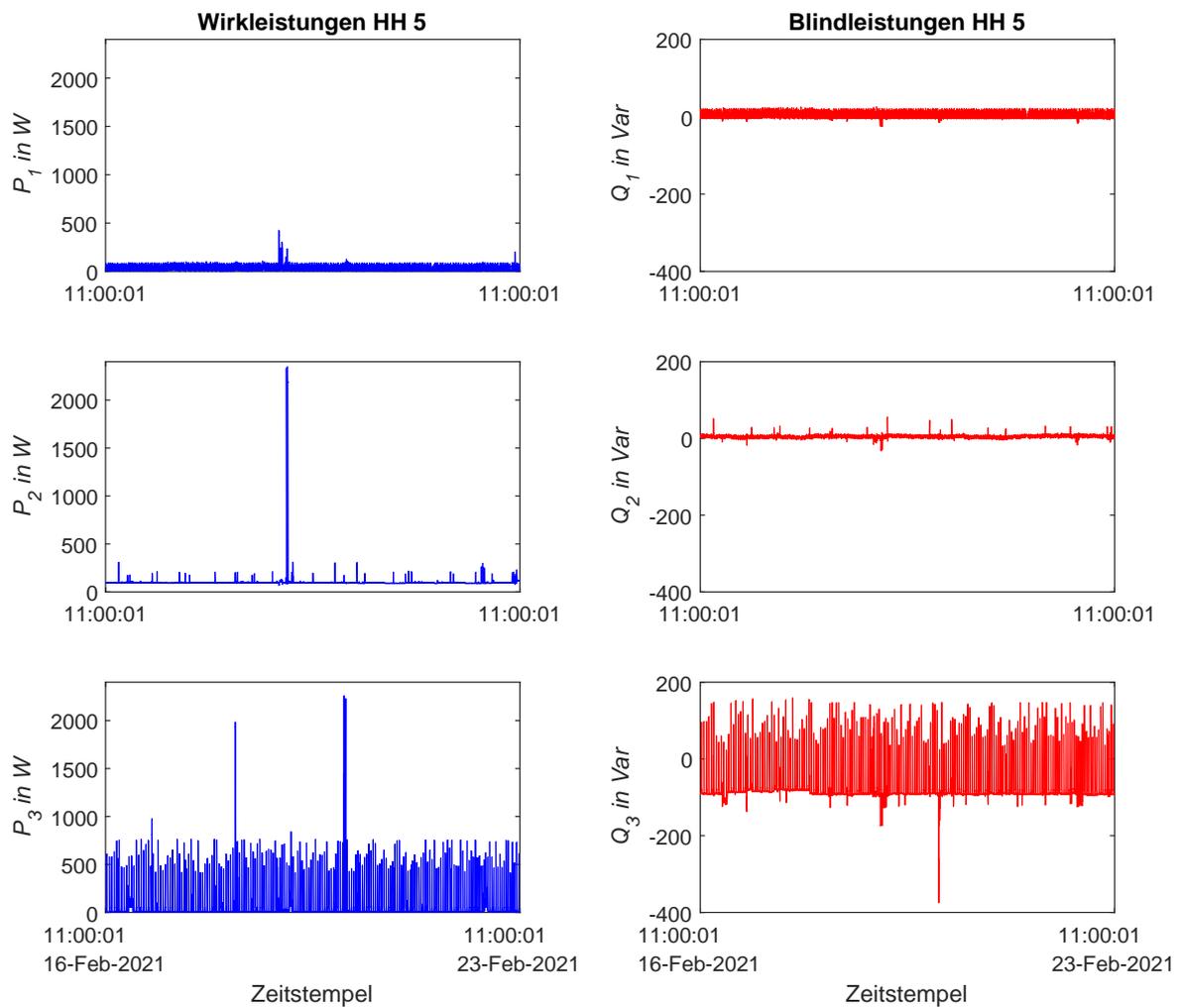


Abbildung D.6: Leistungen und Blindleistungen aller 3 Phasen des Haushalts 5

Lastgänge relevanter Lasten

Ceranfeld und Induktionsfelder

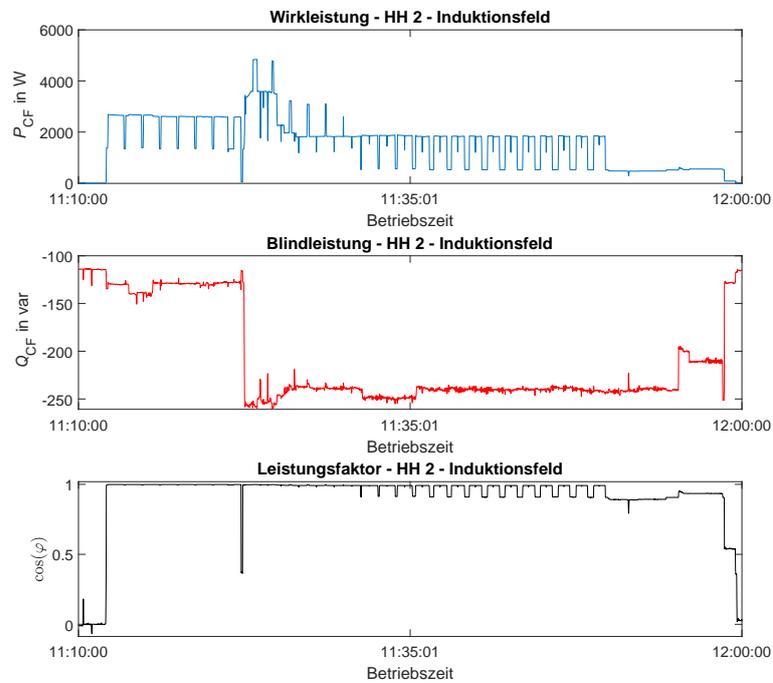


Abbildung D.7: Kurvenverlauf des Induktionsfelder in HH 2

Backrohr

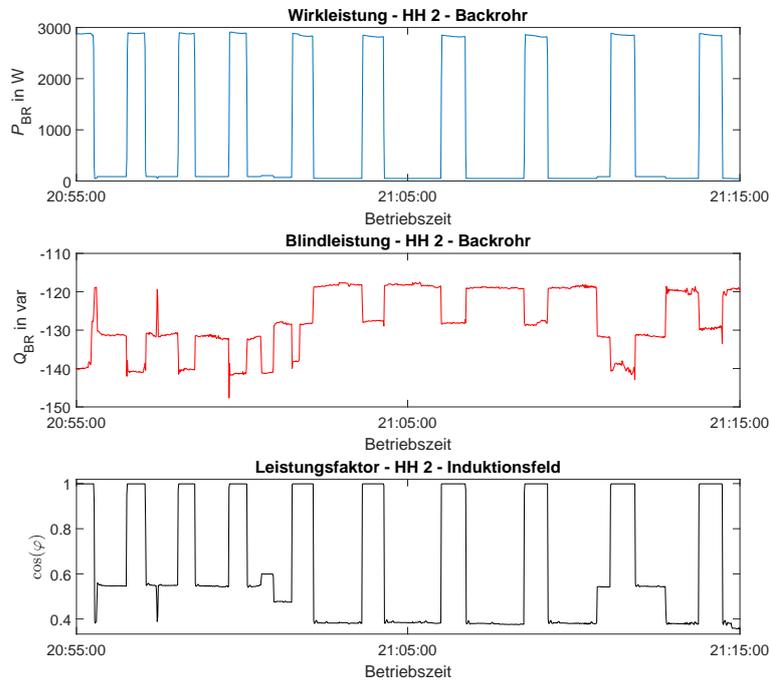


Abbildung D.8: Kurvenverlauf des Backrohrs in HH 2

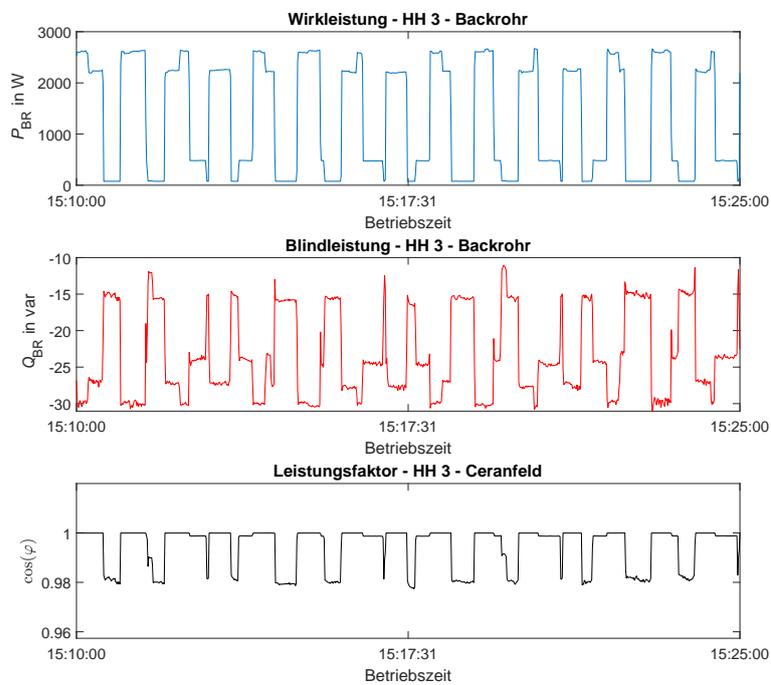


Abbildung D.9: Kurvenverlauf des Backrohrs in HH 3

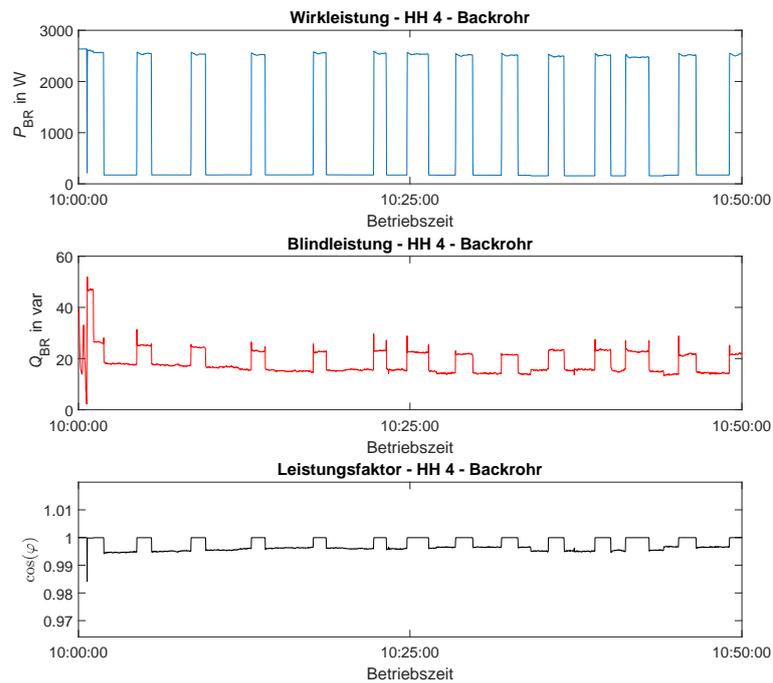


Abbildung D.10: Kurvenverlauf des Backrohrs in HH 4

Geschirrspüler

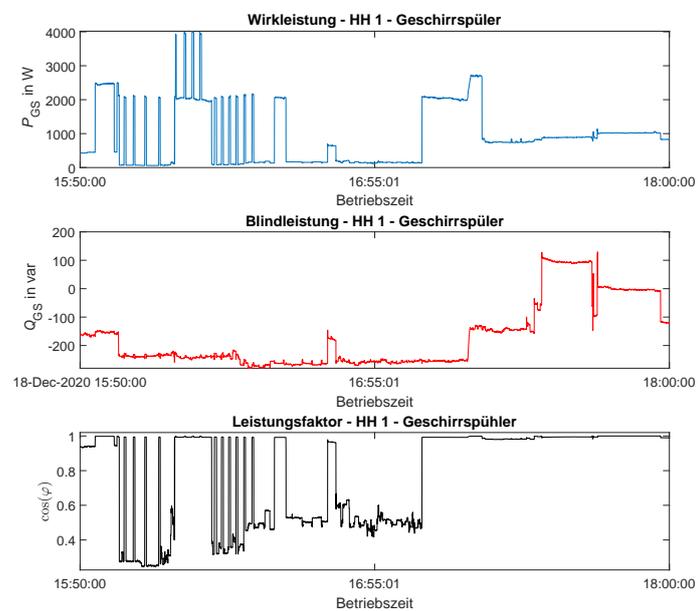


Abbildung D.11: Kurvenverlauf des Geschirrspülers in HH 1

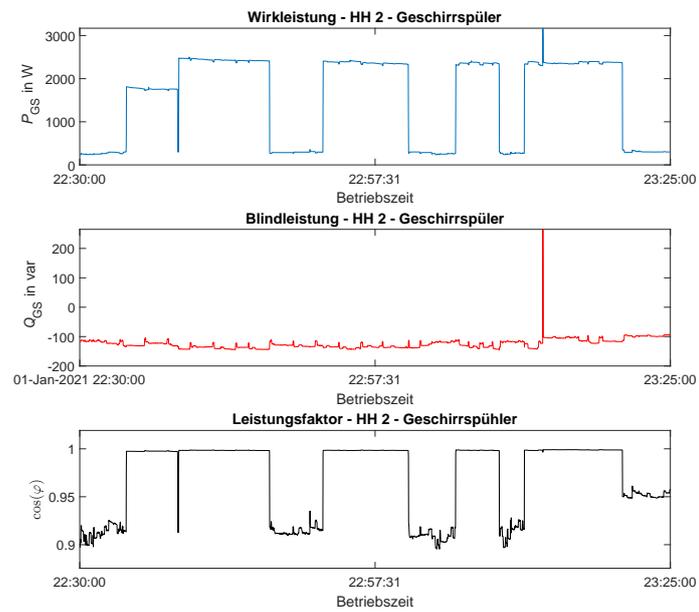


Abbildung D.12: Kurvenverlauf des Geschirrspülers in HH 2

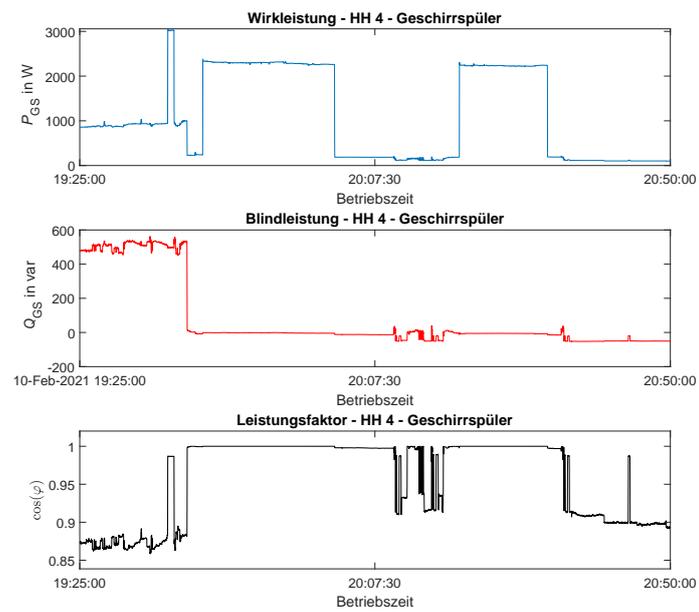


Abbildung D.13: Kurvenverlauf des Geschirrspülers in HH 4

Waschmaschine

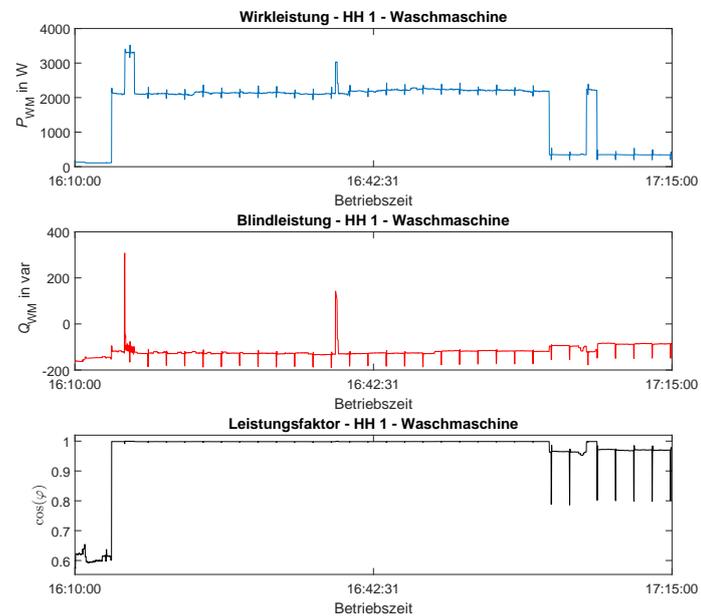


Abbildung D.14: Kurvenverlauf der Waschmaschine in HH 1

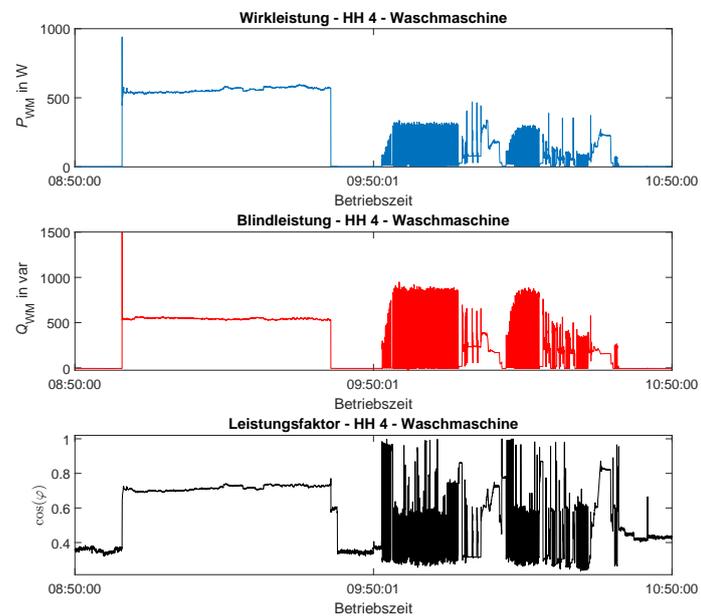


Abbildung D.15: Kurvenverlauf der Waschmaschine in HH 4

Wärmepumpen

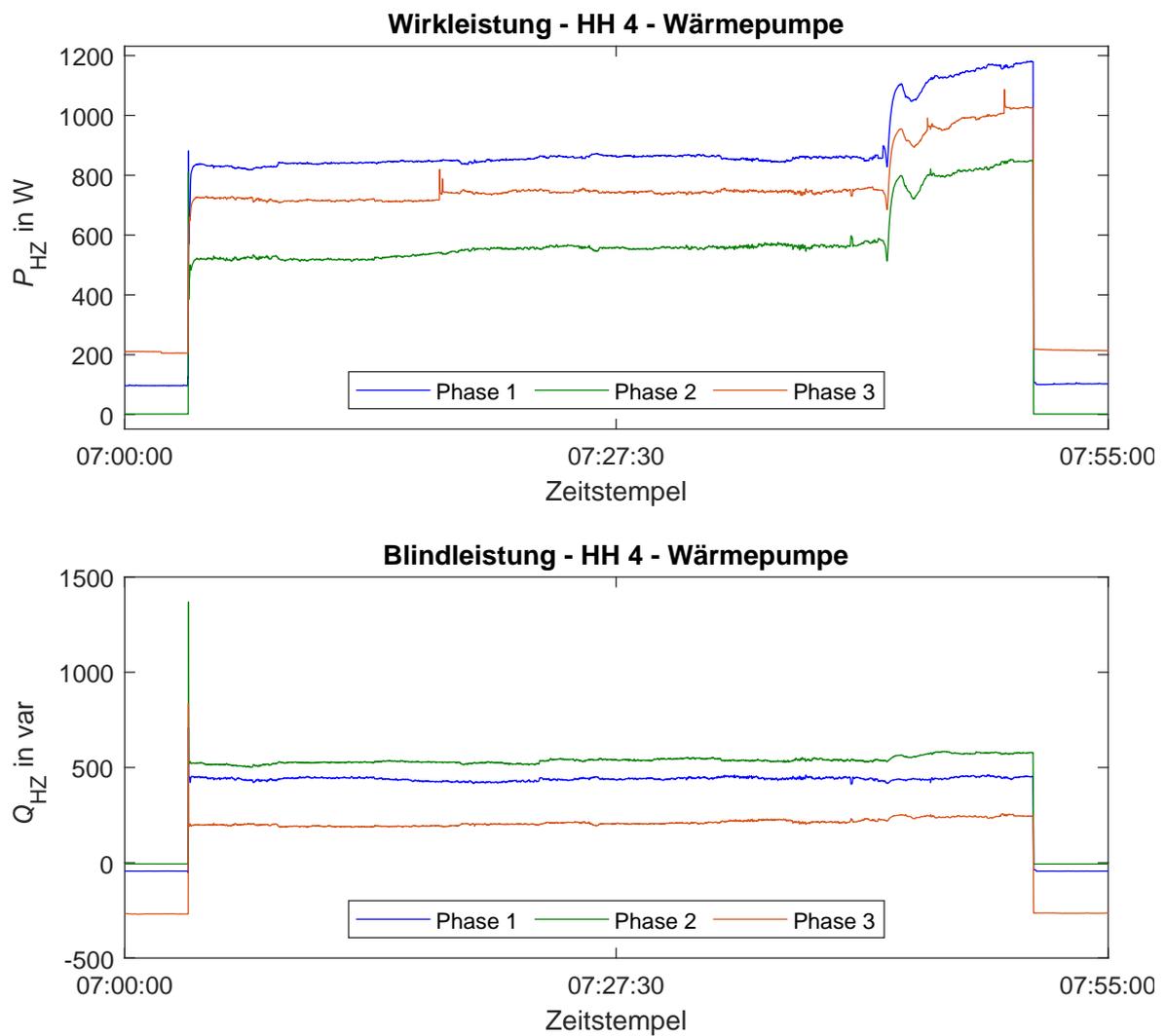


Abbildung D.16: Kurvenverlauf der Erdwärmepumpe in HH 4

Oberschwingungen

Folgen sind die Abblendungen der Oberschwingungsströme und Spannungen der übrigen Haushalte, welche nicht in der Arbeit gezeigt worden sind, zusehen.

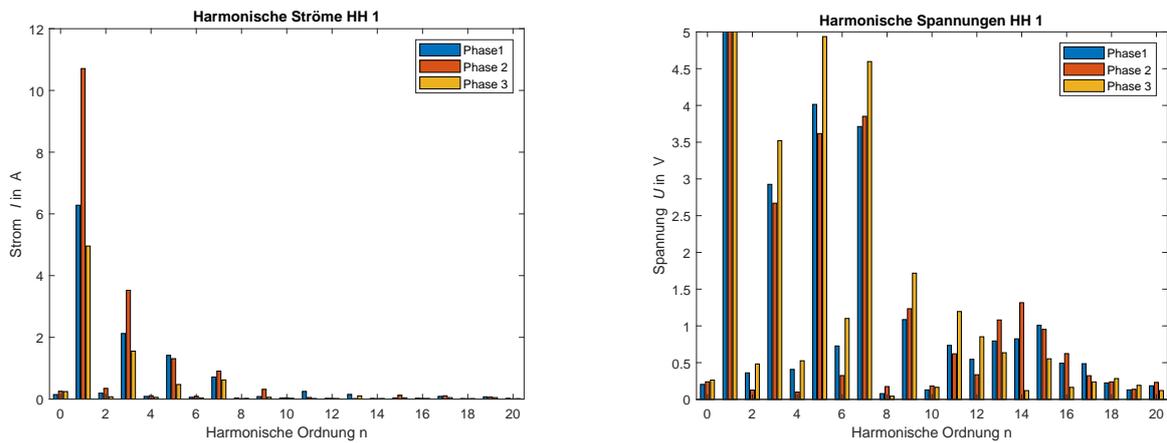


Abbildung D.17: Harmonische Ströme und Spannungen HH 1

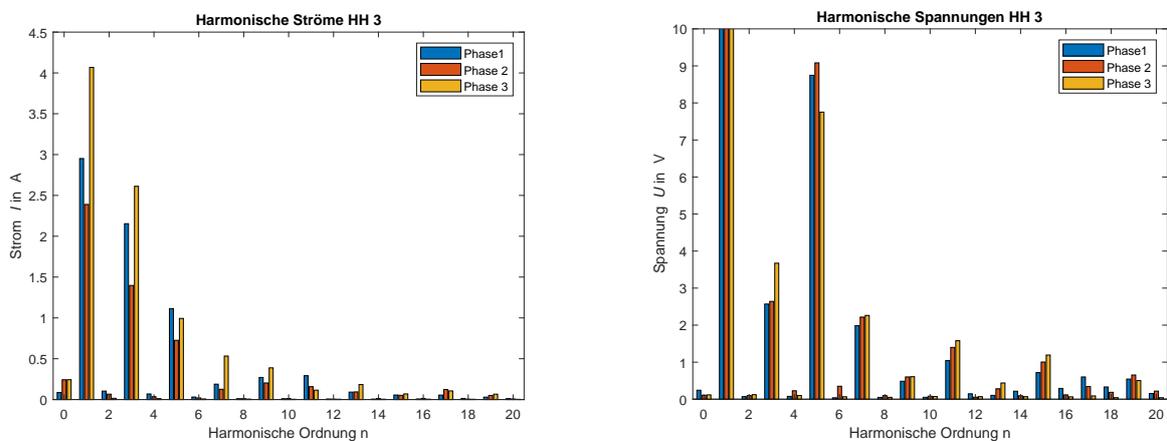


Abbildung D.18: Harmonische Ströme und Spannungen HH 3

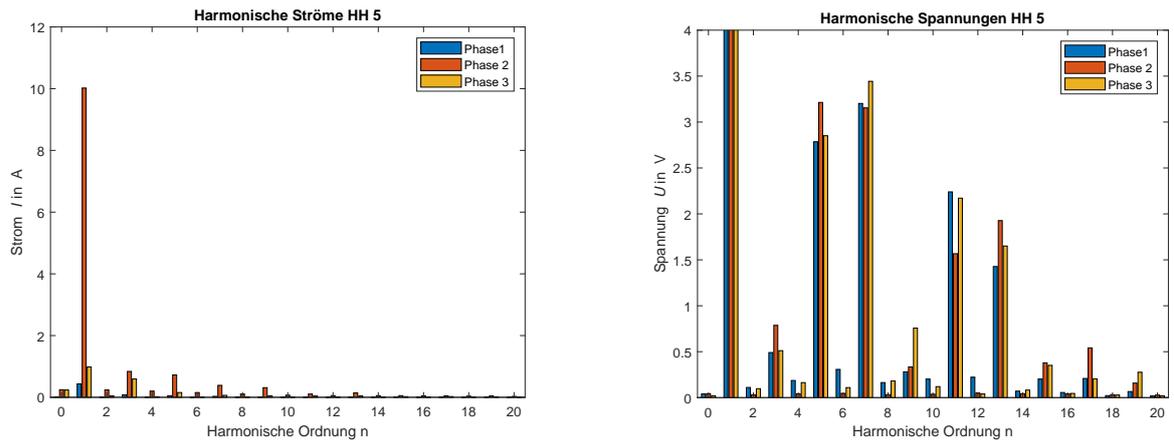


Abbildung D.19: Harmonische Ströme und Spannungen HH 5

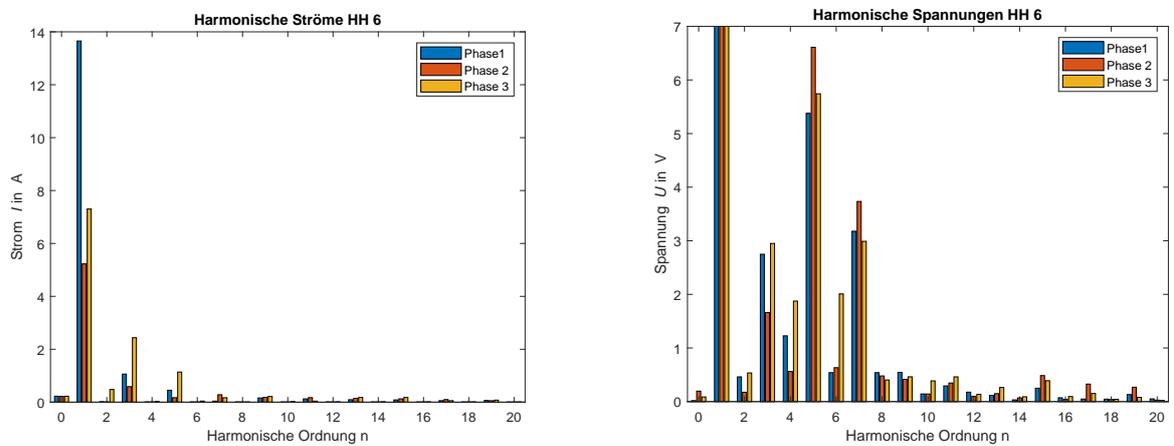


Abbildung D.20: Harmonische Ströme und Spannungen HH 6