



Felix Stadlmann, BSc

**Reduktion von Unsicherheiten in der
hydraulischen Modellierung von Trinkwassernetzen
durch GIS-basierte Verbrauchsabschätzung**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Infrastruktur

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuerin:

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Daniela Fuchs-Hanusch

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, März 2026

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

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 entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used anything other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or contextually from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

18.03.2026

Unterschrift / Signature

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich auf dem Weg durch mein Studium und bis zum Abschluss dieser Arbeit begleitet haben. Vielen Dank, dass ihr mich immer unterstützt habt.

Ein großer Dank gilt der Betreuerin dieser Masterarbeit, Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Daniela Fuchs-Hanusch, für die Unterstützung und den Austausch während des Entstehungsprozesses dieser Arbeit.

Ein weiterer großer Dank gilt allen meinen Freunden und Studienkollegen für die schönen Momente der letzten Jahre, auch abseits des Unilebens. Besondere Erwähnung gilt dabei den *kamoten* Freunden und der MWG.

Der größte Dank gilt jedoch meinen Eltern für die unermüdliche und unglaubliche Unterstützung. Natürlich nicht nur im Zuge dieser Arbeit und beim Korrekturlesen, sondern für ihre Unterstützung mein ganzes Leben lang. Vielen lieben Dank!

Kurzfassung

Hydraulische Modelle von Trinkwasserversorgungsnetzen stellen eine wichtige Grundlage für deren Planung und Betrieb dar. Ihre Aussagekraft ist jedoch häufig durch Unsicherheiten im Bereich der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Wasserentnahmen beschränkt. Das Ziel dieser Arbeit war, die verbrauchsbedingten Unsicherheiten zu reduzieren und dadurch die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Druckdaten zu verkleinern. Zum Erreichen dieses Zieles wurde ein auf Geoinformationssystemen (GIS) basierender Ansatz verwendet, der Verbrauchsobjekte systematisch erfasst und zu Gruppen zusammenfasst. Basierend auf den Gruppen wurden statistisch ermittelte Verbrauchsverteilungen eingeführt, um der Kalibrierung regulierende Anhaltspunkte zu bieten.

Als Grundlage diente das hydraulische Modell eines realen Gemeindenetzes und dazugehörige Messdaten von Langzeitmessungen. Mittels GIS-Auswertung wurden potenziell verbrauchsrelevante Metadaten abgeleitet, wie Gebäudetyp, Geschoßanzahl, Wohnfläche und räumliche Lage. Für daraus abgeleitete Gruppierungen wurden mittels statistischer Kennzahlen einwohnerbezogene Verbrauchsannahmen eingeführt, die im Zuge der Kalibrierung als Regularisierung eines mitunter unterbestimmten Problems dienten. Die Verbrauchskalibrierung erfolgte je Szenario, wobei jedes Szenario eine individuelle und von anderen Szenarien unabhängige Lösung der Verbräuche fand. In die Auswertung floss die Summe aller Szenarien je untersuchtem Zeitpunkt ein. Zur Beurteilung der Auswirkungen unterschiedlicher Verbrauchsannahmen sowie Gruppierungen wurden Vorkalibrierungen durchgeführt, die mittels multikriterieller Entscheidungsanalyse bewertet wurden. Auf dieser Grundlage wurden Vorkalibrierungen durchgeführt, um die Stabilität und Plausibilität der Ergebnisse zu prüfen.

Die Ergebnisse zeigen, dass GIS-basierte Gruppierungen in Kombination mit regulierenden Verbrauchsannahmen zu stabilen Lösungen der Kalibrierung führen können, und dass gleichzeitig die Druckabweichungen gegenüber dem Eingangsmodell deutlich um ca. 75% reduziert werden konnten. Jedoch zeigte die Auswertung der Langzeitkalibrierungen auch, dass nicht jede der ermittelten Lösungen der Verbrauchsabschätzung im gegebenen Untersuchungsgebiet plausibel erscheint. Die Wahl der Gruppierungen ist entscheidend für die Interpretierbarkeit und Plausibilität der Ergebnisse. Besonders die Gebäudeart des Verbrauchsobjektes erscheint als ein gut geeignetes Mittel, um sowohl Gruppierung als auch Verbrauchsannahme daran aufzubauen.

Aufbauend auf dieser Arbeit ergeben sich zukünftige Themen in der Übertragbarkeit auf andere Trinkwasserversorgungsnetze sowie in der Implementierung weiterer Randbedingungen, um Gruppierungen mit einer geringen Anzahl von Verbrauchsobjekten besser abbilden zu können.

Abstract

Hydraulic models of drinking water supply networks are an important basis for their planning and operation. However, their significance is often limited by uncertainties in the spatial and temporal distribution of water withdrawals. The aim of this work was to reduce consumption-related uncertainties and thereby minimise the deviations between measured and simulated pressure data. To achieve this goal, an approach based on geographic information systems (GIS) was used, which systematically records consumption objects and groups them together. Based on these groups, statistically determined consumption distributions were introduced to provide regulatory reference points for calibration.

The hydraulic model of a water distribution network in an Austrian municipality as well as associated long-term measurement data served as the basis. GIS analysis was used to derive metadata relevant to consumption, such as building type, number of floors, living space and location. For the groupings derived from this, population-related consumption assumptions were introduced using statistical indicators, which served as a regularisation of a sometimes underdetermined problem during calibration. Consumption calibration was carried out for each scenario, with each scenario finding an individual solution to consumption that was independent of other scenarios. The evaluation included the sum of all scenarios for each time point examined. To assess the effects of different consumption assumptions and groupings, pre-calibrations were carried out and evaluated using multi-criteria decision analysis. On this basis, pre-calibrations were carried out to check the stability and plausibility of the results.

The results show that GIS-based groupings in combination with regulatory consumption assumptions can lead to stable calibration solutions, and that at the same time, pressure deviations from the input model could be significantly reduced by approximately 75%. However, the evaluation of the long-term calibrations also showed that not all of the determined solutions for the consumption estimation appear plausible in the given study area. The choice of groupings is crucial for the interpretability and plausibility of the results. In particular, the building type of the consumption object appears to be a well-suited means of establishing both grouping and consumption assumptions.

Building on this work, future topics arise in the transferability to other drinking water supply networks and in the implementation of further boundary conditions in order to better represent groupings with a small number of consumption objects.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Motivation	1
1.2	Forschungsfrage	2
2	Grundlagen	3
2.1	Hydraulische Modelle von Trinkwassernetzen	3
2.1.1	Grundlagen der Modellierung	4
2.1.2	Rohrhydraulik	10
2.2	Hydraulische Kalibrierung von WVN	11
2.3	Kalibrierung mittels genetischen Algorithmus	13
2.3.1	Funktionsweise	13
2.3.2	Elemente und Operatoren eines GA	14
2.4	Beschreibung des zugrunde liegenden Rohrrauigkeitskalibrierers	15
2.4.1	Aufbau des Kalibrierungsprogrammes und Eingangsdaten	16
2.5	Beschreibung des zu untersuchenden Netzes	21
2.5.1	Statistische Gemeindedaten	21
2.5.2	Umfeld des Untersuchungsnetzes	21
2.5.3	Systemdaten	22
2.6	Messreihe 2016 und Rohrrauigkeitskalibrierung	24
2.6.1	Beschreibung der Messreihe	25
2.6.2	Rohrrauigkeitskalibrierung	26
2.7	Beschreibung der benötigten Daten für Kalibrierung	27
2.7.1	Hydraulisches Modell des WVN	27
2.7.2	Messdaten der Messreihe 2016	27
2.7.3	Datengrundlage für die statistische Annahme von Verbrauchswerten	28
2.7.4	Python Code des bestehenden Rohrrauigkeitskalibrierers	28
2.8	Verwendete Programme	28
2.8.1	EPANET	28
2.8.2	OOPNET	29

2.8.3	QGIS.....	29
2.8.4	PyCharm und Python.....	29
2.8.5	ChatGPT.....	29
3	Methodik.....	30
3.1	Parameterermittlung über GIS.....	30
3.1.1	Gruppierung der Verbraucher über GIS-Ermittlung.....	30
3.1.2	Zuordnung der Verbraucher an das WVN.....	32
3.2	Statistische Parameter für a-priori Verbrauchsansatz	33
3.2.1	Kennzahlen der Untersuchungsgemeinde (2016).....	34
3.2.2	GIS-Auswertung der Wohnobjekte nach durchschnittlicher Wohnfläche je Person (Mikrozensus 2016)	35
3.2.3	GIS-Auswertung der Wohnobjekte nach durchschnittlicher Haushaltsgröße je Objekttyp (Mikrozensus 2016)	36
3.2.4	Annahmen für Objekte der Gebäudeklassen 3 und 4	36
3.2.5	Datenunsicherheit.....	37
3.3	Szenarienentwicklung.....	37
3.3.1	Bearbeitung der Eingangsdaten zu Durchschnittswerten je Stunde	39
3.3.2	Erstellung der Szenariendateien.....	41
3.4	Kalibrieransatz und Code-Entwicklung.....	42
3.4.1	Ansätze und Logik	42
3.4.2	Aufbau des neuen Kalibrierers.....	49
3.5	Kalibrierungsversuche	52
3.5.1	Vorkalibrierung.....	52
3.5.2	Langzeitkalibrierungen.....	57
3.6	Auswertung	58
3.6.1	Sensitivitätsanalyse	59
3.6.2	Multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDA)	59
3.6.3	Untersuchung der Druckabweichungen.....	63
3.6.4	Plausibilität der Verbrauchsverteilungen.....	64
4	Ergebnisse und Diskussion.....	65
4.1	Gruppierung infolge der GIS-Auswertung.....	65
4.2	Vorkalibrierungen	70

4.2.1	Teil 1 (a-priori) MCDA Auswertung	70
4.2.2	Teil 2 (Gruppierung) MCDA Auswertung	76
4.2.3	Teil 3 (Kombination) MCDA Auswertung	84
4.2.4	Teil 3 Untersuchung der Druckabweichungen	89
4.3	Langzeitkalibrierungen	94
4.3.1	Vergleich mit den Ergebnissen der Vorkalibrierung	94
4.3.2	Untersuchung der Druckabweichungen.....	98
4.3.3	Untersuchung der Verbrauchsabschätzungen	102
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	113
5.1	GIS-basierte Gruppierung	113
5.2	A-priori Verbrauchsverteilungen.....	114
5.3	Vorkalibrierung	114
5.4	Langzeitkalibrierungen: Druckabweichungen und Stabilität ..	115
5.5	Langzeitkalibrierung: Verbrauchsabschätzung	115
5.6	Auswirkungen von Gruppen mit geringer Anzahl von Objekten 116	
6	Ausblick	118
	Literaturverzeichnis	120
	Anhang.....	A-i
Anhang A	Skripte und Funktionen des bestehenden Rohrraugigkeitkalibrierers.....	A-ii
Anhang B	Screenshots der originalen Messdaten (Grafana)	B-i
Anhang C	Verbrauchanteile je Gruppe; Unterteilung für Verbrauchsauswertung; Kalibrierung K02.....	C-i
Anhang D	Druckabweichungen je Sensor, Gegenüberstellung der Uhrzeiten, verschiedene Modelle	D-i
Anhang E	Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen, Vorkalibrierung Teil 3	E-i
Anhang F	Druckabweichungen der Langzeitkalibrierungen, Gesamtergebnisse je Stunde	F-i

Anhang G	Verbrauchsabschätzungen aller Gruppen, Samstage	
	G-i
Anhang H	Verbrauchsabschätzungen aller Gruppen, Sonntage	
	H-i

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Modellelemente von EPANET	6
Abbildung 2-2: Exemplarische Ganglinien diverser Versorgungsgebiete (Klingel 2018)	10
Abbildung 2-3: Ablaufdiagramm eines GA (Steffelbauer, 2018 mod.).....	14
Abbildung 2-4: Ablaufdiagramm des bestehenden Autokalibrierers.....	16
Abbildung 2-5: Ausschnitt der Metadaten <i>des bestehenden Kalibrierers</i>	19
Abbildung 2-6: Parameter der Szenarien für die Kalibrierung der Rohrrauigkeit.....	20
Abbildung 2-7: Übersichtskarte Untersuchungsnetz/-gebiet	22
Abbildung 2-8: Übersicht Rohrrauigkeiten.....	23
Abbildung 2-9: Knotenpunkte mit angenommenem Verbrauch	24
Abbildung 2-10: Anordnung der Druckmesspunkte.....	25
Abbildung 2-11: Druckdifferenz des kalibrierten Systems (Rohrrauigkeit) über Langzeitdaten (Fuchs-Hanusch 2021)	26
Abbildung 3-1: Zuordnung der Verbraucher an das hydraulische Modell des WVN	33
Abbildung 3-2: Lage der verbleibenden Drucksensoren im WVN	38
Abbildung 3-3: Ganglinie des Hochbehälters (30.05.2016).....	39
Abbildung 3-4: 10-Minuten Durchschnittswerte.....	40
Abbildung 3-5: Übersicht der Langzeitkalibrierungen.....	58
Abbildung 4-1: Übersicht der Gebäudeklassen im Untersuchungsgebiet	66
Abbildung 4-2: Übersicht der Geschößanzahl im Untersuchungsgebiet	67
Abbildung 4-3: Übersicht der Wohnflächen im Untersuchungsgebiet	68
Abbildung 4-4: Histogramm der Wohnflächen.....	68
Abbildung 4-5: Unterteilung nach Regionen im Untersuchungsgebiet	69
Abbildung 4-6: Bewertung der Gruppierungen (Vorkalibrierung Teil 2).....	82
Abbildung 4-7: Vergleich der Gruppierungen je Verbrauchsannahme	88
Abbildung 4-8: Boxplot: Druckhöhendifferenz pro Sensor (Vorkalibrierung V00; Uhrzeit 07:00)	91
Abbildung 4-9: Boxplot: Druckhöhendifferenz pro Sensor (Vorkalibrierung V00; Uhrzeit 08:00)	91
Abbildung 4-10: Boxplot: Druckhöhendifferenz pro Sensor (Kalibrierung K02; Uhrzeit 07:00)	92
Abbildung 4-11: Boxplot: Druckhöhendifferenz pro Sensor (Kalibrierung K02; Uhrzeit 08:00)	92
Abbildung 4-12: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (K02).....	93
Abbildung 4-13: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (V00).....	94
Abbildung 4-14: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (K02).....	99
Abbildung 4-15: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (K03).....	100

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-16: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (K09)	100
Abbildung 4-17: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (K12)	101
Abbildung 4-18: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (Z01).....	101
Abbildung 4-19: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (Z02).....	102
Abbildung 4-20: Anteil der Individualverbräuche je Gruppe über alle Stunden (K02).....	103
Abbildung 4-21: Anteil der Individualverbräuche je Gruppe über alle Stunden (K03).....	103
Abbildung 4-22: Anteil der Individualverbräuche je Gruppe über alle Stunden (K09).....	105
Abbildung 4-23: Anteil der Individualverbräuche je Gruppe über alle Stunden (K12).....	105
Abbildung 4-24: Anteil der Individualverbräuche je Gruppe über alle Stunden (Z01).....	106
Abbildung 4-25: Anteil der Individualverbräuche je Gruppe über alle Stunden (Z02).....	107
Abbildung 4-26: Verbrauchsabschätzung aller Gruppen (K02).....	108
Abbildung 4-27: Verbrauchsabschätzung aller Gruppen (K03).....	108
Abbildung 4-28: Verbrauchsabschätzung aller Gruppen (K09).....	110
Abbildung 4-29: Verbrauchsabschätzung aller Gruppen (K12).....	110
Abbildung 4-30: Verbrauchsabschätzung Gruppe (Klasse ,1', Region ,6') Kalibrierung K12	111
Abbildung 4-31: Verbrauchsabschätzung aller Gruppen (Z01).....	111
Abbildung 4-32: Verbrauchsabschätzung aller Gruppen (Z02).....	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Elemente eines EPANET Modells	7
Tabelle 2-2: Statistische Daten des Gemeindegebiets	21
Tabelle 3-1: Bevölkerungs- und Wohnungsdaten der Untersuchungsgemeinde	34
Tabelle 3-2: Durchschnittliche Wohnfläche pro Person nach Bundesland und Rechtsverhältnis ((Statistik Austria 2017) Tabelle 6 (Ausschnitt)).....	35
Tabelle 3-3: Durchschnittliche Haushaltsgröße nach Rechtsverhältnis ((Statistik Austria 2017) Tabelle 4 (Ausschnitt)).....	36
Tabelle 3-4: Parameter des EA; gesteuert über Konfigurationsdatei	44
Tabelle 3-5: Übersicht des Versuchsprogrammes der Vorkalibrierung Teil 1 (a-priori)	53
Tabelle 3-6: Umfang der Gruppierungsparameter	54
Tabelle 3-7: Übersicht des Versuchsprogrammes der Vorkalibrierung Teil 2 (Gruppierung)	55
Tabelle 3-8: Matrix der Vorkalibrierung Teil 3 (Kombination).....	56
Tabelle 3-9: Übersicht des Versuchsprogrammes der Vorkalibrierung Teil 3 (Kombination)	56
Tabelle 3-10: Bewertungsparameter der MCDA.....	60
Tabelle 3-11: Absolute Bewertungswerte (MCDA) der Vorkalibrierungen	61
Tabelle 4-1: Gebäudeklassen des Untersuchungsgebiets (exkl. Gebäude Baujahr nach 2016)	65
Tabelle 4-2: Anzahl der Geschoße im Untersuchungsgebiet (ohne Gebäude Baujahr nach 2016).....	66
Tabelle 4-3: Unterteilung der Regionen im Untersuchungsgebiet (ohne Gebäude Baujahr nach 2016).....	70
Tabelle 4-4: Vorkalibrierung Teil 1: Ergebnisse der Fitnessbewertung.....	71
Tabelle 4-5: Vorkalibrierung Teil 1: Ergebnisse der Druckabweichung (Gesamt).....	72
Tabelle 4-6: Vorkalibrierung Teil 1: Ergebnisse der Druckabweichung je Sensor	73
Tabelle 4-7: Vorkalibrierung Teil 1: Ergebnisse der Verbrauchsverteilung und Laufzeit	74
Tabelle 4-8: Vorkalibrierung Teil 1: Gesamtbewertung MCDA	75
Tabelle 4-9: Vorkalibrierung Teil 1: Vergleich der bestgereihten Verbrauchsannahmen	76
Tabelle 4-10: Vorkalibrierung Teil 2: Ergebnisse der Fitnessbewertung.....	77
Tabelle 4-11: Vorkalibrierung Teil 2: Ergebnisse der Druckabweichung (Gesamt).....	78

Tabelle 4-12: Vorkalibrierung Teil 2: Ergebnisse der Druckabweichung je Sensor.....	79
Tabelle 4-13: Anzahl der Gruppen für ausgewählte Gruppierungen	79
Tabelle 4-14: Vorkalibrierung Teil 2: Ergebnisse der Verbrauchsverteilung und Laufzeit.....	80
Tabelle 4-15: Vorkalibrierung Teil 2: Gesamtbewertung MCDA.....	81
Tabelle 4-16: Vorkalibrierung Teil 2: Vergleich der bestgereihten Gruppierungen	82
Tabelle 4-17: Reihung der Gruppierungen mit Gruppierungsdetails	83
Tabelle 4-18: Vorkalibrierung Teil 3: Ergebnisse der Fitnessbewertung	85
Tabelle 4-19: Vorkalibrierung Teil 3: Ergebnisse der Druckabweichung (Gesamt)	85
Tabelle 4-20: Vorkalibrierung Teil 3: Ergebnisse der Druckabweichung je Sensor.....	86
Tabelle 4-21: Vorkalibrierung Teil 3: Ergebnisse der Verbrauchsverteilung und Laufzeit.....	86
Tabelle 4-22: Vorkalibrierung Teil 3: Gesamtbewertung MCDA.....	87
Tabelle 4-23: Vorkalibrierung Teil 3: Vergleich der bestgereihten Gruppierungen	89
Tabelle 4-24: Ausreißer der Druckmesspunkte je Stunde.....	90
Tabelle 4-25: K02 Vergleich Langzeitkalibrierung / Vorkalibrierung	96
Tabelle 4-26: K03 Vergleich Langzeitkalibrierung / Vorkalibrierung	96
Tabelle 4-27: K09 Vergleich Langzeitkalibrierung / Vorkalibrierung	97
Tabelle 4-28: K12 Vergleich Langzeitkalibrierung / Vorkalibrierung	97
Tabelle 4-29: Vergleich der Zusatzkalibrierungen Z01 und Z02.....	98

Abkürzungsverzeichnis

Im Folgenden werden Abkürzungen erklärt, die im Laufe dieser Arbeit mehrfach wiederholt werden.

DN	Durchmesser
EFH	Einfamilienhaus
GA	Genetischer Algorithmus
GIS	Geographisches Informationssystem
ID	Innendurchmesser
IQR	Interquartilsabstand
MCDA	Multikriterielle Entscheidungsanalyse (engl.: Multi Criteria Decision Analysis)
MFH	Mehrfamilienhaus
m.ü.A.	Meter über Adria
mWS	Meter Wassersäule
SWW	Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der Technischen Universität Graz
WVS	Wasserversorgungssystem

1 Einleitung

Hydraulische Modelle von Trinkwasserversorgungsnetzen sind ein zentraler Bestandteil der Planung, des Betriebs und der Analyse von Wasserversorgungsnetzen. Deren Aussagekraft und Nutzen hängen jedoch maßgeblich davon ab, wie gut die realen Systembedingungen innerhalb des Modelles abgebildet werden können. Trotz vieler Analysen und Modellanpassungen verbleiben dennoch häufig signifikante Unsicherheiten im Modell. Eine der größten Unsicherheiten ist hierbei das Verbrauchsverhalten der Verbraucher sowie deren Verteilung innerhalb eines Wasserversorgungsnetzes. Diese Unsicherheiten haben häufig deutlich spürbare Auswirkungen auf die Genauigkeit des Modells verglichen mit real gemessenen Daten.

Vor diesem Hintergrund wird ein Ansatz zur Verteilung der Verbräuche innerhalb des Netzes anhand von GIS-basierten Parametern sowie der Nutzung eines neu entwickelten Verbrauchskalibrierers untersucht mit dem Ziel, die Druckabweichungen zwischen simulierten und gemessenen Daten zu reduzieren.

1.1 Aufgabenstellung und Motivation

Diese Arbeit baut auf einem Messversuch des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau (SWW) der Technischen Universität Graz auf, welcher im Jahr 2016 innerhalb einer steirischen Gemeinde durchgeführt wurde. Ziel war es, ein Teilnetz der Wasserversorgung der Gemeinde zu untersuchen und Leckagen zu simulieren, um u.a. das hydraulische Modell des Netzes zu verbessern. Auf diesem durchgeführten Messversuch basierte bereits direkt eine Dissertation (D. B. Steffelbauer 2018) mit dem Ziel der Leckageerkennung und -ortung sowie der Untersuchung der optimalen Sensorplatzierung für ebendiese. Weiters erarbeitete Lippacher (2018) bereits auf Grundlage von Daten einer Messnacht, in deren Zuge Extremmaßnahmen (Feuerlöschfall) durchgeführt wurden, und mithilfe eines ebenfalls am SWW entwickelten Kalibrierprogrammes Methoden für eine Kalibrierung der Rohrrauigkeiten. Ziel der Arbeit von Lippacher war es, die Differenzen zwischen den gemessenen und den im hydraulischen Netz simulierten Drücken durch Variation der Rohrrauigkeiten zu reduzieren. Das daraus resultierende und kalibrierte hydraulische Modell dient als Grundlage für die vorliegende Arbeit. Trotz dieser Arbeiten und Anpassungen am Modell weist das Modell nach wie vor noch Unsicherheiten in Bezug auf die Wasserverbräuche auf. Diese Unsicherheiten resultieren in teilweise deutlichen Abweichungen der gemessenen zu den simulierten Druckwerten während unterschiedlicher Zeitpunkte. Besonders stark treten diese Abweichungen zu Zeitpunkten mit verstärktem Verbrauch auf. Aufgrund dieser Tatsache ergibt sich die Vermutung, dass die Verbräuche sowie die Verbrauchsverteilungen innerhalb des Netzes trotz Berücksichtigung von Abrechnungsdaten der angeschlossenen Verbraucher noch unscharf definiert sind.

Im Zuge dieser Arbeit wird ein Ansatz untersucht, welcher versucht, über eine reine GIS-Auswertung mit statistischen Kennzahlen die Verbräuche sowie deren Verteilung im Netz abzuschätzen. Ziel ist es, durch die Reduzierung von Unsicherheiten innerhalb des Modells die Druckabweichungen zwischen gemessenen und simulierten Daten zu verringern und zugleich plausible Verbrauchsverteilungen innerhalb des Netzes zu ermitteln.

Zum Erreichen dieses Zieles ist eine detaillierte GIS-Auswertung des Untersuchungsgebietes notwendig sowie die Entwicklung eines Kalibrierers für Verbräuche, der auf dem bestehenden Rohrrauigkeitskalibrierer basieren soll. Im Zuge der GIS-Auswertung werden zum einen unterschiedliche Gruppierungsmöglichkeiten der Verbrauchsobjekte für die Kalibrierung definiert. Zum anderen werden basierend auf der GIS-Auswertung relative Verbrauchsverteilungen eingeführt. Diese Verbrauchsverteilungen werden anhand von statistischen Daten sowie anhand der ermittelten Gruppierungsmöglichkeiten erstellt. Ziel dieser a-priori Verbrauchsannahmen ist die Regulierung und Vermeidung von Extremlösungen im Zuge von ansonsten mitunter unterbestimmten Kalibrierungen.

1.2 Forschungsfrage

Nachdem bereits die Umgebung und der Umfang dieser Arbeit abgesteckt sind, lauten die zentralen Forschungsfragen dieser Arbeit:

- Nach welchen Gesichtspunkten sollte eine GIS-Auswertung des Untersuchungsgebietes erfolgen, um Größenordnung und Verteilung des Trinkwasserverbrauchs des Gebietes ableiten zu können?
- Können mit einem a-priori Ansatz der Verbrauchsverteilungen sowie den ermittelten Gruppierungsmöglichkeiten Simulationsergebnisse mit einer Verbesserung der Druckdifferenz erzielt werden?
- Welche Auswirkungen haben Verbraucher mit geringem a-priori Wissen und/oder eine geringe Anzahl von Verbrauchern auf die Berechnung der Verbräuche und der Druckabweichungen?
- Welche Kombinationen von statistischen a-priori Verbrauchsannahmen und Ergebnissen der GIS-Gruppierung sind für eine verbesserte Abschätzung der Verbräuche und des Tagesganges der Verbräuche geeignet?

2 Grundlagen

Dieses Kapitel beschreibt die theoretischen Grundlagen der hydraulischen Modellierung und behandelt einzelne Komponenten eines realen Wasserversorgungsnetzes (WVN) und deren Abbildung in einem hydraulischen Modell sowie die Unsicherheiten, welche beim Erstellen eines Modells vorhanden sein können. Weiters wird das der Arbeit zugrunde liegende Trinkwassernetz und die verfügbaren Ausgangsdaten beschrieben.

2.1 Hydraulische Modelle von Trinkwassernetzen

Im Zuge dieses Kapitels wird die Wichtigkeit von hydraulischen Modellen, ihre Bestandteile und auch ihre Unsicherheiten behandelt. Zudem werden die theoretischen Grundlagen der Rohrhydraulik und Netzberechnung erläutert.

Hydraulische Modelle sind für Wasserversorgungsunternehmen von großer Wichtigkeit. Sei es für zukünftige Planungen und Überprüfungen infolge von gesteigertem Verbrauch oder für Echtzeitüberwachungen des Systems zur Leck Kontrolle oder zur Optimierung des Betriebs. Das hydraulische Modell eines Trinkwassernetzes muss in der Lage sein, das Verhalten seines ihm gegenüberstehenden und tatsächlich existierenden Trinkwassernetzes möglichst genau wiederzugeben. Ohne eine verlässliche Übereinstimmung des Verhaltens bei bekannten Ausgangslagen können keine zuverlässigen Aussagen über mögliche Entwicklungen anhand des Modells getroffen werden. (Conejos Fuertes u. a. 2020)

Unter einem hydraulischen Modell versteht man die Darstellung eines realen Trinkwassernetzes in einem digitalen, numerischen Modell. Die Hauptverwendung eines hydraulischen Modells besteht in der Analyse der Druckverhältnisse und der Durchflussleistungen eines Trinkwassernetzes. Für eine entsprechende Simulation ist die Eingabe der systemspezifischen Eigenschaften, u.a. Parameter der Netzkomponenten, Verbräuche, Ganglinien und Betriebszustände, notwendig. Eine Analyse kann für einen bestimmten Zeitpunkt oder, mit Hilfe von Zeitreihen, einen längeren Zeitraum durchgeführt werden. Es wird bei der Modellierung von Rohrnetzen unterschieden zwischen der stationären und der instationären bzw. dynamischen Modellierung. Im Zuge einer stationären Modellierung wird ein sogenanntes hydraulisches Gleichgewicht ermittelt, um die Durchflüsse und Druckhöhen aller Haltungen und Knotenpunkte bestimmen zu können. Dies geschieht unter Berücksichtigung der vorhandenen geodätischen Höhen und der Verbrauchswerte einzelner Knotenpunkte durch die Ermittlung des sogenannten hydraulischen Gleichgewichts. Während eine stationäre hydraulische Modellierung nur einen einzelnen Zeitpunkt beschreibt, kann ein längerer Zeitraum durch die Aneinanderreihung mehrerer stationärer Berechnungen abgebildet werden,

man spricht in diesem Fall von einer instationären bzw. dynamischen hydraulischen Modellierung. Für die Erstellung einer instationären Modellierung ist es notwendig, eine oder mehrere Zeitreihen der veränderbaren Eingangswerte (z.B. Verbrauchswerte, Füllstände der Hochbehälter, Systemzustände) zur Berechnung hinzuzufügen. (Klingel 2018).

2.1.1 Grundlagen der Modellierung

In diesem Kapitel werden notwendige Grundlagen und Methodiken zur Erstellung eines hydraulischen Rohrnetzmodells besprochen. Weiters wird auf die Unterschiede zwischen realer Welt und den entsprechenden hydraulischen Modellen sowie den daraus resultierenden Unsicherheiten eingegangen.

Für die Erstellung eines hydraulischen Modells ist es notwendig, ein möglichst genaues und vollständiges Verständnis über das abzubildende reale Trinkwassernetz zu besitzen. Ein Trinkwassernetz besteht in seiner Gänze aus vielen unterschiedlichen Komponenten mit individuellen Attributen, wie Rohrleitungen, Pumpen, Hochbehälter etc., und Parametern, wie Verbrauchs- und Druckwerte. (Klingel 2018)

Da im Laufe dieser Arbeit mit dem Simulationsprogramm EPANET bzw. dem darauf basierenden und durch das SWW entwickelten Programm OOPNET (D. Steffelbauer und Fuchs-Hanusch 2015) gearbeitet wird, beziehen sich die in diesem Kapitel genannten Grundsätze in erster Linie auf die Modellierung mittels EPANET, besitzen aber grundlegend allgemeine Gültigkeit. Neben der Möglichkeit die Rohrhydraulik zu ermitteln, bietet EPANET auch die Möglichkeit, Simulationen über Verunreinigungen im Trinkwassernetz durchzuführen. Da dies jedoch kein Bestandteil dieser Arbeit ist, wird im weiteren Verlauf nicht darauf eingegangen.

Bevor ein hydraulisches Modell erstellt werden kann, wird ein genaues Verständnis über die zu erfüllenden Aufgaben und Anforderungen des Modells benötigt. Abhängig von dieser Definition ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Genauigkeit des Detaillierungsgrades des Modells. Der erforderliche Detaillierungsgrad hat einen direkten und großen Einfluss auf die Qualität und Quantität der benötigten Daten und den Modellierungsprozess an sich und somit auch einen Einfluss auf die Kosten der Erstellung eines hydraulischen Modells. (Klingel, 2018)

2.1.1.1 Datengrundlage

In der realen Welt besteht ein Trinkwassernetz aus einer Vielzahl von Leitungen, Formstücken und Einbauteilen verschiedenster Materialien und Rohrdimensionen. Dazu kommen netzspezifische Daten, wie Pumpensteuerungen und Verbräuche. Wie all diese verschiedenen Elemente und die spezifischen Eigenschaften dieser Elemente möglichst realitätsnah in einem hydraulischen Modell abgebildet werden können, behandelt das folgende Unterkapitel.

Zu Beginn des hydraulischen Modellierungsprozesses müssen die notwendigen Daten erhoben und aufbereitet werden, um sie im hydraulischen Modell benutzen zu können. Welche Daten in welcher Genauigkeit erhoben werden müssen, richtet sich grundsätzlich nach den Anforderungen, die das hydraulische Modell erfüllen soll, wie bereits in Kapitel 2.1.1 eingangs erwähnt.

Die American Water Works Association beschreibt folgende vier Gruppen zur Unterscheidung der für eine hydraulische Modellierung notwendigen Daten (American Water Works Association 2005):

1. Geographische Daten: Darunter werden alle lagebezogenen Daten zusammengefasst, wie z.B. topographische Informationen des Netzgebietes, Landnutzungen, Luftbilder zur Ermittlung besonderer Verbraucher.
2. Systemdaten: Diese Daten geben die grundlegenden Parameter des Trinkwassernetzes wieder und umfassen u.a. Informationen zu den Rohrleitungen, Sonderbauwerken und Armaturen.
3. Betriebsdaten: Diese Daten beschreiben die Randbedingungen des Modells und umfassen u.a. Daten aus Durchfluss- und Druckmessungen, Betriebszustände der Schieber und Pumpendaten sowie Einspeisedaten der Hochbehälter.
4. Verbräuche: Hierunter werden alle protokollierten Daten sowie deren zeitliche Entwicklung im Zusammenhang mit Entnahmevorgängen zusammengefasst, z.B. Anzahl der Einwohner im Versorgungsgebiet, Wasserzählerdaten und Ganglinien.

In welcher Form und auch Qualität diese Daten erhoben werden können, ist von Fall zu Fall unterschiedlich. Ebenso lassen sich durch die unterschiedlichen Anforderungen an die Modelle keine verallgemeinernden Aussagen über die benötigte Qualität und Quantität der zu erhebenden Daten feststellen. Aufgrund dieser sehr individuellen Herausforderung der Datenerhebung ist dieser Schritt im Modellierungsprozess der mitunter aufwändigste. Die Datenerhebung und -aufbereitung ist aber auch der kritischste Schritt, da sich fehlende oder falsch interpretierte Grundlagen als Fehler durch das gesamte weitere Modell ziehen können und im Anschluss aufwändig ausgebessert werden müssen. Daten, die nicht direkt erhoben werden können, müssen mitunter über andere verfügbare Datenquellen abgeleitet werden, sogenannte Sekundärdaten. (Klingel 2018)

2.1.1.2 Bestandteile eines hydraulischen Modells

In einem hydraulischen Modell werden all diese Daten in einem digitalen Knoten-Kanten System dargestellt und somit aber auch vereinfacht. Grundlage des hydraulischen Modells ist ein Netz aus Punkten. Diese Knoten genannte Punkte definieren grundlegende Eigenschaften des Netzes, wie Position und Höhe und können auch noch weiter spezifiziert werden, um weitere Eigenschaften darstellen zu können. Durch die Höhe kann schlussendlich durch die hydraulische Berechnung jedem Knoten ein spezifischer Druck für einen gegebenen Zeitpunkt zugewiesen werden. (Rossman 2000)

Nachdem im vorherigen Kapitel beschrieben wurde, welche Daten zur Erstellung eines hydraulischen Modells notwendig sind, befasst sich das folgende Kapitel mit der Abbildung des realen Modells in einem digitalen hydraulischen Modell.

Ein hydraulisches Modell, wie es auch in EPANET genutzt wird, bildet das reale Trinkwassernetz graphisch als eine Abstraktion aus Knoten und Kanten ab. Durch diese Abstraktion der realen Welt kann die Komplexität des Modells auf wesentliche Systembestandteile reduziert werden, um eine rechnerische Lösung der Rohrhydraulik zu ermöglichen. Eine solche graphische Darstellung von einem Knoten-Kanten-Modell befindet sich in Abbildung 2-1 inklusive der Beschreibung einiger Modellelemente.

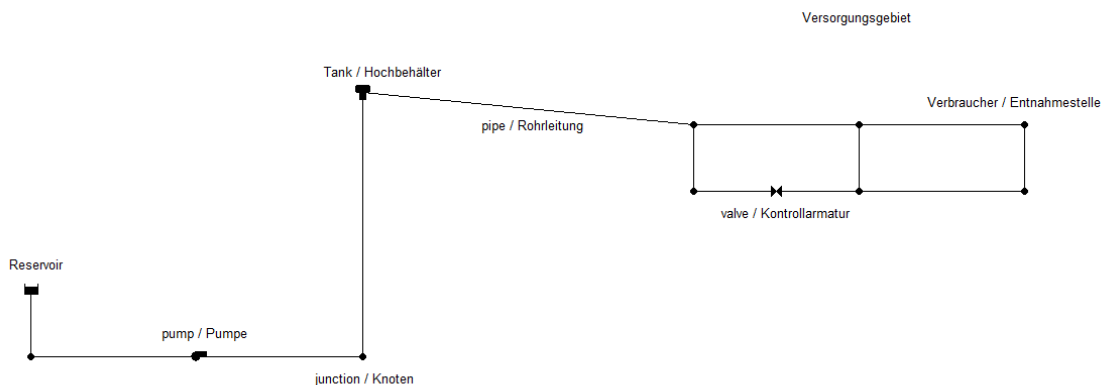


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Modellelemente von EPANET

Grundlage des graphischen Modells sind sogenannte Knoten, im englischen „junctions“. Diese Knoten beschreiben Lagepunkte mit geographischen Koordinaten und Höhen entlang des Netzes. Durch diese Lageinformationen kann im Zuge der Berechnung für jeden Knoten ein rechnerischer Wert, für den vorherrschenden Druck bestimmt werden, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben wird. Zusätzlich können Knoten Entnahmestellen für den Wasserverbrauch, wie etwa Haus-

anschlüsse oder Hydranten, darstellen, wobei die Entnahme entweder kontinuierlich oder über einen Zeitraum mittels Ganglinien (vgl. Kapitel 2.1.1.3) beschrieben werden kann. Auch natürliche (z.B. Grundwasser) oder künstliche (z.B. Hochbehälter) Wasserspeicher können als Knoten modelliert werden. Als Höheninformation werden bei diesen Elementen Wasserspiegelhöhen als Ausgangslage für das Druckpotential im gesamten Netz definiert. (Rossman 2000)

Tabelle 2-1: Elemente eines EPANET Modells

EPANET	Darstellung	Eigenschaften	abstrahiertes Systemelement
Junction	Knoten	Koordinaten Höhe Verbrauch Ganglinie	Rohrverbindungen Verbraucher
Reservoir	Knoten	Koordinaten Wasserspiegelhöhe Ganglinie	Speicher mit vorgegebenem Potential (Grundwasser, Seen etc.)
Tank	Knoten	Koordinaten geographische Höhe Wasserstandshöhen Geometrie Ganglinie Überlaufen ja/nein	Speicher mit berechnetem Wasserstand (z.B. Hoch-/Tiefbehälter)
Pipe	Kante	verbundene Knoten Länge Durchmesser Rauigkeit offen/geschlossen Rückflussarmatur ja/nein	Rohrleitung Absperrschieber Rückflussarmatur
Pump	Kante	verbundene Knoten Pumpenkurve u. Leistung offen/geschlossen	Pumpen
Valve	Kante	verbundene Knoten Durchmesser Art der Armatur Einstellung der Armatur Rauigkeit	Kontrollarmaturen: -Druckreduzierer -Druckhalteventil -Druckunterbrecher -Durchflussregler -Drosselklappe

Neben den Knoten sind die zweite Komponente der graphischen Darstellung des hydraulischen Modells die sogenannten Kanten. Dabei handelt es sich um die Verbindungen zwischen den verschiedenen Knoten im Netz. Als Kanten können Elemente wie Rohrleitungen, Absperrschieber, Pumpen sowie Druck- und Durchflusskontrollarmaturen abgebildet werden. Kanten können Informationen über

Rohrleitungslänge, Rohrdurchmesser, Rohrrauigkeiten/Verlustbeiwerte, Pumpenleistungen oder Druck-/Durchflussbedingungen (bei Kontrollarmaturen) beinhalten. Eine Auflistung der verschiedenen graphischen Elemente und ihrer abstrahierten Elemente eines realen Trinkwassernetzes befindet sich in Tabelle 2-1.

2.1.1.3 Verbräuche und Ganglinien

Verbräuche sind zeitlich variable Daten und äußerlichen Einflüssen ausgesetzt. Der Verbrauch eines Verbrauchsobjekts ist zu jedem Zeitpunkt abhängig vom Verhalten der jeweiligen Nutzer bzw. der Nutzung des jeweiligen Verbrauchsobjektes und verändert sich über den Tag laufend. Allerdings gibt es auch Schwankungen des Verbrauchs über die unterschiedlichen Wochentage, besonders an Wochenenden und Feiertagen sowie saisonale Schwankungen aufgrund der Außentemperatur. Diese Schwankungen können durch Ganglinien des Verbrauchs beschrieben werden. Diese Ganglinien zeigen typischerweise u.a. für Wohngebäude an Wochentagen klare Spitzen während der Morgen und Abendstunden. Diese Ganglinien lassen sich sowohl für einzelne Verbrauchsobjekte als auch für Klassen von Verbrauchern oder ganzen WVN bilden. Die klaren Spitzen des Verbrauchs sind im Zuge dessen besonders an Werktagen klar erkennbar, wenn die Bewohner eines Gebietes zur ungefähr gleichen Zeit aufstehen. An arbeitsfreien Tagen flachen diese klar definierten Spitzen mitunter ab. Ebenfalls einen Einfluss auf die Ganglinie des WVN haben die soziale und wirtschaftliche Struktur des WVN. In Gebieten mit weniger Einwohnern sind diese Spitzen des Verbrauchs mitunter markanter und auch früher als z.B. innerhalb von Städten bzw. WVN mit mehr Einwohnern. Ebenso hat der Anteil der Gewerbe- und Industriegebiete innerhalb eines WVN einen Einfluss auf die Verbrauchsganglinie. Mitunter werden diese gleichmäßiger, oder die Spitzen verschieben sich durch die Überlagerung des Verbrauchs der Arbeits- und Öffnungszeiten der Gewerbebetriebe mit jenen des häuslichen Verbrauchs. (Klingel 2018)

Die Ermittlung des Verbrauches eines WVN erfolgt durch die Summe der Verbräuche aller angeschlossenen Objekte. Darüber hinaus gibt es jedoch noch weitere Verbräuche wie mitunter betriebliche Wasserentnahmen des Netzbetreibers, Hydrantenentnahmen und Verluste innerhalb des WVN. Diese Wasseraustritte aus dem WVN können nur durch Messungen des Gesamtzuflusses durch den Netzbetreiber festgestellt werden. Die Ermittlung der Verbräuche durch angeschlossene Objekte erfolgt durch Wasserzähler mithilfe einer Volumensmessung. In der Regel handelt es sich hierbei um Wasserzähler, die jedoch häufig nur jährlich bis vierteljährlich abgelesen werden und somit lediglich Aussagen über den Gesamtverbrauch des Objekts im Ablesezeitraum, nicht aber über die Ganglinien liefern können. Auf Grundlage dieser Messungen können lediglich Durchschnittswerte wie der mittlere Tages- und Stundenverbrauch je Verbrauchsobjekt ermittelt werden. Diese Durchschnittswerte sind jedoch für die Si-

mulierung eines hydraulischen Modells nicht geeignet, da sie nicht die tatsächlichen Schwankungen des tageszeitabhängigen Stundenverbrauchs berücksichtigen. Um diese Veränderung zu berücksichtigen wird ein dimensionsloser und zeitabhängiger Faktor verwendet. Dieser Lastfaktor drückt dabei den Quotienten aus Stundenverbrauch $Q(h)$ und mittlerem Stundenverbrauch Q_{hm} aus, wie in Gleichung 2-1 dargestellt. (Klingel 2018)

$$f(h) = \frac{Q(h)}{Q_{hm}} \quad \text{Gleichung 2-1}$$

mit:

$f(h)$... zeitabhängiger Lastfaktor der Stunde h [-]

$Q(h)$... Stundenverbrauch zur Stunde $[m^3/h]$

Q_{hm} ... mittlerer Stundenverbrauch $[m^3/h]$

Für die Erstellung von typischen Tagesganglinien sind Beobachtungen und Auswertungen über mehrere Jahre notwendig. Dies ist für die Modellierung eines hydraulischen Modells meistens nicht praktikabel. Deshalb werden hierfür mitunter exemplarische Ganglinien mit dem relativen Lastzeitfaktor für unterschiedliche Siedlungsgrößen und Gebietscharakteristika aus der Literatur und Regelwerken wie dem DVGW W 410 herangezogen. Dadurch können Abschätzungen des Tagesganges innerhalb eines Untersuchungsgebietes erzielt werden. Da es sich jedoch nur um allgemeine Aussagen handelt, bergen Abschätzungen dieser Art gewisse Unsicherheiten für die Modellierung. In Abbildung 2-2 sind unterschiedliche Ganglinien für diverse Siedlungsgebiete gemäß DVGW W 410 dargestellt. (Klingel 2018; Neunteufel, Richard, und Perfler 2010)

Eine weitere wichtige Messgröße ist der mittlere häusliche Wasserbedarf. Dieser Wert ist einwohnerbezogen und beschreibt den durchschnittlichen Tagesbedarf eines Einwohners. In der Literatur werden für diesen Wert allgemein 120 Liter pro Einwohner und Tag angenommen (Klingel 2018). Allerdings variiert dieser Durchschnittswert und zeigt u.a. starke Abweichungen über unterschiedliche Wohnformen, wie sowohl Neunteufel et al. (2012) als auch Pleimer (2024) jeweils aufzeigen. Beide Arbeiten untersuchten u.a. den durchschnittlichen täglichen Wasserverbrauch österreichischer Haushalte und unterschieden dabei zwischen den Wohnformen „Mehrparteienhaus“, „Reihenhaus“ und „Einfamilienhaus“. Dabei zeigt sich, dass der durchschnittliche Tagesbedarf eines Einwohners je Wohnform zwischen 116 und 173 l/EW*d liegt, wobei das Einfamilienhaus den größten Bedarf aufweist.

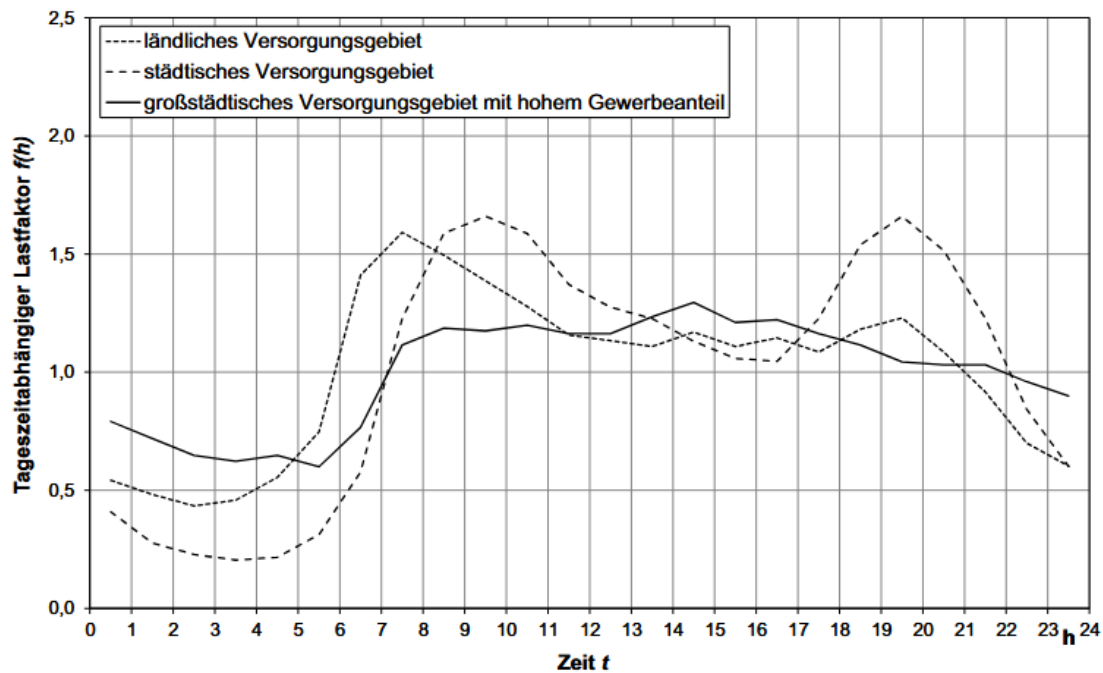


Abbildung 2-2: Exemplarische Ganglinien diverser Versorgungsgebiete (Klingel 2018)

2.1.2 Rohrhydraulik

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten Grundsätze der Rohrhydraulik und Netzberechnung eines stationären Systems gegeben. Die Berechnung der stationären Netzzustände wird im Zuge dieser Arbeit durch das Programm OOPNET durchgeführt (vgl. Kapitel 2.8.2).

Für die stationäre Betrachtung eines Zeitpunktes ergeben sich die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge anhand der Massenerhaltung sowie der Beschreibung der Energiehöhen und der Erfassung der Druckverluste innerhalb der Rohrleitungen. Für ein vollgefülltes Rohr gilt die Kontinuitätsgleichung (Gleichung 2-2), wodurch beliebige Querschnitte eines Rohres ohne zusätzliche Entnahme den gleichen Durchfluss aufweisen. (Klingel 2018)

$$Q = v * A = \textit{konstant} \qquad \text{Gleichung 2-2}$$

mit:

- Q ... Durchfluss [m^3/s]
- v ... Fließgeschwindigkeit [m/s]
- A ... Rohrquerschnitt [m^2]

Gemäß der Energieerhaltung gilt die Bernoulli-Gleichung (Gleichung 2-3 bzw. Gleichung 2-4) für inkompressible Flüssigkeiten in verlustfreier Strömung. Nach Division aller Terme der Gleichung 2-4 durch $\rho * g$ erhält man alle Terme in der Dimension der Höhe anstelle des Druckes. (Gross 2018)

$$E_0 = H + P + V = \textit{konstant} \quad \text{Gleichung 2-3}$$

$$E_0 = h_{geo} * \rho * g + p + \frac{v^2 * \rho}{2} = \textit{konstant} \quad \text{Gleichung 2-4}$$

mit:

E_0	... absolute Energiehöhe	h_{geo}	... geodätische Höhe
H	... geodätischer Druck	ρ	... Dichte des Mediums
P	... statischer Druck	g	... Gravitationskraft
V	... dynamischer Druck	p	... statischer Druck
		v	... Fließgeschwindigkeit

Da es sich bei Rohrleitungsnetzen nie um verlustfreie Systeme handelt, muss für die Berücksichtigung von Energieumwandlungen bzw. Entnahmen aus dem System zwischen zwei Betrachtungspunkten die Bernoulli-Gleichung durch den Term der Druckverlusthöhe h_v erweitert werden. Die Druckverlusthöhe bildet hierbei die Summe aus Reibungsverlusten und allen lokalen Verlusthöhen, wie aus Gleichung 2-5 ersichtlich ist. (Klingel 2018)

$$h_v = \sum h_r + \sum h_l \quad \text{Gleichung 2-5}$$

mit:

h_v	... Druckverlusthöhe
h_r	... Rohrreibungsverluste
h_l	... lokale Verluste

Weitere Bedingungen, die für das gesamte Rohrnetz erfüllt sein müssen, sind die Massen- sowie die Energieerhaltung. Die Massenerhaltung bzw. Knotenbedingung beschreibt, dass die Summe aller Zuflüsse gleich der Menge aller Abflüsse inkl. Entnahmen sein muss. Die Energieerhaltung bzw. Maschenbedingung besagt, dass die Summe aller Druckverlusthöhen entlang zweier separater Pfade, die zwei gleiche Punkte miteinander verbinden, ebenfalls null sein muss. Erst bei gleichzeitiger Erfüllung aller dieser Bedingungen liegt ein hydraulisches Gleichgewicht vor, und die stationäre Netzberechnung gilt als gelöst. (Klingel 2018)

2.2 Hydraulische Kalibrierung von WVN

Die hydraulische Kalibrierung von WVN dient der Ermittlung jener Parameter innerhalb des hydraulischen Modells, die nicht direkt gemessen werden können. Dieser Schritt dient der Verringerung der Modellunsicherheit und hat zum Ziel, die Abweichungen zwischen in der realen Welt gemessenen Messwerten und den simulierten Werten des hydraulischen Modells zu verringern. (Kapelan, Savić, und Walters 2007)

Savic et al. (2009) fassen in ihrer Arbeit die vielfachen und unterschiedlichen Ansätze für die hydraulische Kalibrierung von WVN in drei Gruppen zusammen:

- Iterative Modellverfahren, die durch eine trial-and-error Methode und stark vereinfachte Systeme versuchen, die unbekannt Parameter entsprechend anzunähern.
- Explizite Modellverfahren oder auch hydraulische Simulationsmodelle nutzen eine Vielzahl von stationären Netzgleichungen und weiteren Formeln, welche von den verfügbaren Messdaten abgeleitet wurden. Die Formeln in diesem Verfahren werden explizit gelöst, besondere Erwähnung findet das Newton-Raphson-Verfahren.
- Implizite Modellverfahren oder auch Optimierungsmodelle

Iterative Modellverfahren nutzen trial-and-error Methoden und stark vereinfachte hydraulische Modelle, um über die Lösung von stationären Netzgleichungen die unbekannt Parameter zu bestimmen. Wie der Name schon sagt, werden diese Methoden iterativ angewendet und eignen sich ausschließlich für die Lösung einer kleinen Anzahl unbekannter Parameter. Auf den Grundlagen des iterativen Modellverfahrens bauten schließlich zukünftige Kalibrierungsverfahren auf. (Savic, Kapelan, und Jonkergouw 2009)

Explizite Modellverfahren sind eine Weiterentwicklung und nutzen neben einem erweiterten System stationärer Netzgleichungen zusätzliche Gleichungen, welche von der Menge an verfügbaren Messdaten und -punkten abgeleitet wurden. Die Anzahl der unbekannt und zu kalibrierenden Parameter ist jedoch durch die Anzahl der zur Verfügung stehenden Messdaten bzw. -punkte begrenzt. Übersteigt die Anzahl an unbekannt Parametern jene der verfügbaren Messpunkte handelt es sich um ein unterbestimmtes Problem. Eine Möglichkeit zur Vermeidung dieses Problems innerhalb des Kalibrierungsmodells ist die Bildung von Parametergruppen. (Savic, Kapelan, und Jonkergouw 2009)

Implizite Modellverfahren definieren die Kalibrierung als ein Optimierungsproblem und verbinden einen Optimierer mit einem hydraulischen Berechnungsprogramm. Der Optimierer generiert dabei Parameterdaten, welche anschließend an das hydraulische Berechnungsprogramm weitergereicht werden, um eine hydraulische Berechnung durchzuführen. Als Ergebnis der hydraulischen Berechnung werden u.a. Daten der Messpunkte (z.B. Druck- und Durchflussdaten sowie Füllstandsdaten) ausgegeben. Diese simulierten Daten können anschließend vollautomatisch mit den tatsächlichen Messwerten verglichen werden. Diese Auswertung bietet anschließend die Grundlage für den Optimierer bei der Generierung neuer Sets an Parameterdaten. Für die Verwendung in implizierten Modellverfahren eignen sich u.a. genetische Algorithmen, wie sie in Kapitel 2.3 beschrieben sind. (Savic, Kapelan, und Jonkergouw 2009)

2.3 Kalibrierung mittels genetischen Algorithmus

Genetische Algorithmen (=GA) dienen der Ermittlung von Optimierungslösungen und werden im Zuge dieser Arbeit zur Ermittlung der Verbrauchsverteilung mittels automatischer Kalibrierung eingesetzt.

GAs bilden die Prinzipien der natürlichen Evolution (Selektion, Rekombination und Mutation) ab und nutzen diese, um in komplexen Suchräumen optimale Lösungen zu finden. Diese Art Algorithmus wurde bereits in den 1970er Jahren entwickelt und in den folgenden Jahren weiterentwickelt. Heute findet der GA, aufgrund der guten Parallelisierbarkeit und der Möglichkeit in multimodalen Ziellandschaften globale Lösungen zu finden, u.a. in ingenieurwissenschaftlichen Optimierungsproblemen Anwendung. (De Jong, Fogel, und Schwefel 1997; Goldberg und Holland 1988; Lippacher 2018)

Im Kontext von Trinkwasserversorgung können GA eingesetzt werden, um hydraulische Modelle bezüglich ihrer Parameter (z.B. Rohrrauigkeiten, lokale Verlustbeiwerte und Leckageortung) zu optimieren. Dabei versucht der GA die Abweichung zwischen simulierten und echten Messwerten (in der Regel Druck- und Durchflussdaten) zu minimieren. Der GA ermittelt dabei durch Evolutionen immer neue Werte für die zu kalibrierenden Parameter, während die Auswertung und Beurteilung im Anschluss an jede Evolutionsstufe durch wiederholende hydraulische Simulationen und Berechnung einer zuvor definierten Fitnessfunktion geschehen. (Lippacher 2018; Ramaseder 2016; D. B. Steffelbauer 2018)

2.3.1 Funktionsweise

Die Funktionsweise eines GAs basiert auf iterativen Generationen in Anlehnung an Darwins Evolutionstheorie. Anstatt eine Lösung für das Optimierungsproblem zu berechnen, wird je Generation eine Vielzahl von möglichen Lösungen (=Chromosome) erzeugt und bewertet. Je Generation werden die Individuen verändert und anschließend bewertet und entsprechend ihrer Eignung selektiert. Abbildung 2-3 stellt den Ablauf eines GA grob dar. Die Veränderungen geschehen durch Rekombination von mind. 2 Elternchromosomen der vorigen Generation zu einem Nachkommen (=Crossover) sowie durch zufällige Mutationen der Chromosomen. Die Bestandteile eines GA werden im folgenden Kapitel 2.3.2 beschrieben. (Grefenstette 1986; Malhotra, Singh, und Singh 2011)

Dieser Ansatz der Evolutionstheorie basiert auf der Wahrscheinlichkeit, dass die neue Generation bessere Werte liefert als die vorangegangene. Um die Berechnung des GA zu beenden, kann eine maximale Anzahl an Generationen gesetzt sein, oder es sind Abbruchbedingungen aktiv, die bei Erreichen einer gewissen Güte oder nach Stagnation der Ergebnisse einen Abbruch herbeiführen können. (Malhotra, Singh, und Singh 2011; D. B. Steffelbauer 2018)

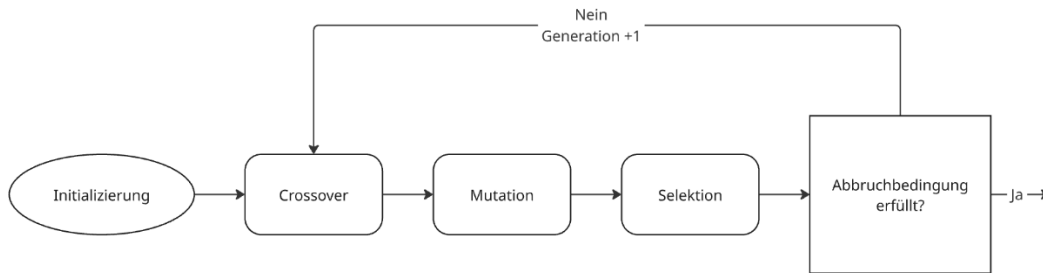


Abbildung 2-3: Ablaufdiagramm eines GA (Steffelbauer, 2018 mod.)

2.3.2 Elemente und Operatoren eines GA

Ein GA kann sich aus einer Vielzahl an Elementen und Operatoren sowie Variationen dieser zusammensetzen (Grefenstette 1986). Die für die vorliegende Arbeit relevanten werden im Folgenden grob beschrieben.

2.3.2.1 Generationen

Jede Generation stellt einen Zeitschritt innerhalb des GA dar. Innerhalb jeder Generation finden die gleichen Abläufe statt (Razali und Geraghty 2011):

- Erzeugung neuer Chromosomen durch Reproduktion und Mutation (vgl. Kapitel 2.3.2.3)
- Selektion der Individuen (vgl. Kapitel 2.3.2.4)
- Bewertung jedes Individuums mittels Fitnessfunktion (vgl. Kapitel 2.3.2.5)

2.3.2.2 Population und Chromosomen

Die Population beschreibt die Gesamtheit an Chromosomen, die jeder Generation jeweils eindeutige Lösungswerte liefern. Die Populationsgröße bleibt über alle Generationen gleich, jedoch verändern sich Chromosomen der Population je Generation. Chromosomen besitzen weiters Gene, wobei die Anzahl der Gene von der Anzahl der zu ermittelnden Parametern abhängt. (Malhotra, Singh, und Singh 2011)

2.3.2.3 Reproduktion und Mutation

Der erste Operator der Reproduktion ist das so genannte Crossover. Hierbei werden die Gene unterschiedlicher Individuen kombiniert und durchmischt. Die Auswahl der zu durchmischenden Chromosomen und Gene erfolgt probabilistisch. (D. B. Steffelbauer 2018)

Ein weiterer Operator ist die Mutation. Der Operator verändert dabei die Gene eines Individuums in geringem Ausmaß entsprechend einer Mutationswahrscheinlichkeit. (D. B. Steffelbauer 2018)

2.3.2.4 Selektion

Die Selektion geschieht nach dem Crossover sowie der Mutation der Individuen. Sie ermittelt, welche der, durch Crossover und Mutation, abgeänderten Individuen in die nächste Generation mitaufgenommen werden. Die Beurteilung erfolgt basierend auf der Fitness (vgl. Kapitel 2.3.2.5) der jeweiligen Chromosomen. (Malhotra, Singh, und Singh 2011)

2.3.2.5 Fitnessfunktion

Die Fitnessfunktion bewertet, wie gut der Parametersatz eines Chromosoms die Vergleichsdaten abbildet. Eine häufig geeignete Art ist die Erstellung der Fitness anhand von Fehler- bzw. Differenzgrößen zwischen gemessenen und simulierten Werten. (Lippacher 2018; D. B. Steffelbauer 2018)

Eine standardisierte Fitnessfunktion, wie sie auch im Zuge der vorliegenden Arbeit verwendet wird, ist in Gleichung 2-6 dargestellt (Savic, Kapelan, und Jonker-gouw 2009).

$$\min_x F(x) = \sum_{j=1}^n w_j * |y_{j,meas} - y_{j,sim}|^b \quad \text{Gleichung 2-6}$$

mit:

- F ... gesuchte minimale Fitness
- w_j ... Gewichtungsfaktoren
- $y_{j,meas}$... Messwerte
- $y_{j,sim}$... simulierte Werte
- b ... Exponent der Abweichungen

2.4 Beschreibung des zugrunde liegenden Rohrrauigkeitskalibrierers

Im Zuge dieser Arbeit wird ein bereits vorhandenes Kalibrierungsprogramm des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der Technischen Universität Graz herangenommen und weiterentwickelt. Dieses Programm nutzt einen differenziellen Evolutionsalgorithmus und wurde mit dem Ziel entwickelt, die Rohrrauigkeiten innerhalb eines Netzes anhand unterschiedlicher Rohrparameter zu kalibrieren.

Auf die grundlegenden Eingangsparameter, Funktionen und den Aufbau des Programms wird in diesem Kapitel genauer eingegangen, da es die Grundlage für die weitere Bearbeitung der Problemstellung dieser Arbeit darstellt.

Im Anhang A werden der Aufbau sowie die im Programm enthaltenen Funktionen ausführlich erläutert.

2.4.1 Aufbau des Kalibrierungsprogrammes und Eingangsdaten

Das Programm ist in der Programmiersprache Python geschrieben und besteht aus mehreren Modulen. Das Programm wird über die Open-Source Software Jenkins angesteuert und nutzt für die Lösung der hydraulischen Modellierung über eine Schnittstelle von OOPNET die Software EPANET. Bei OOPNET handelt es sich um ein ebenso am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der Technischen Universität Graz entwickeltes objekt-basierendes hydraulisches Simulationsprogramm, welches ebenfalls in Python geschrieben wurde und für die hydraulische Lösung über eine Schnittstelle EPANET ansteuert (D. Steffelbauer und Fuchs-Hanusch 2015).

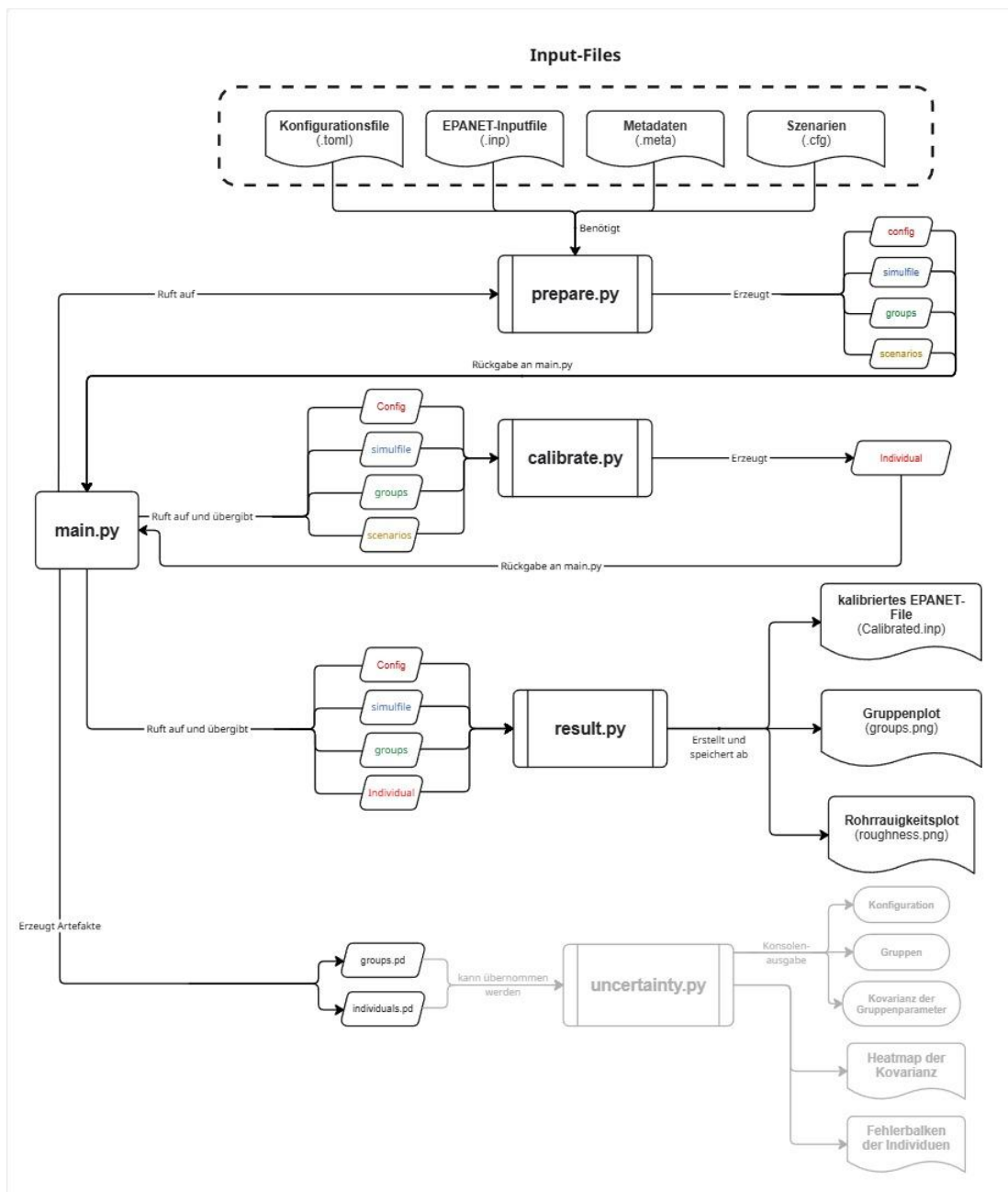


Abbildung 2-4: Ablaufdiagramm des bestehenden Autokalibrierers

Im Folgenden wird auf die Inputfiles und die Module des Kalibrierungsprogrammes eingegangen.

2.4.1.1 Konfigurationsfile (*.toml)

Bei der *.toml-Datei handelt es sich um die Konfigurationsdatei des Kalibrierungsprogrammes. Es definiert die Eingangsparameter der Kalibrierung und dient so gleich als Eingabebereich für den Anwender, um innerhalb verschiedener Kalibrierungsdurchgänge unterschiedliche Parameter festzulegen.

Die Eingangsparameter innerhalb der Konfigurationsdatei können dabei unterschieden werden in:

- Parameter der Simulation
- Parameter des genetischen Algorithmus
- Parameter der Kalibrierung

Die Parameter der Simulation sind Dateinamen und -pfade und beziehen sich auf das zu kalibrierende Netz und die aus Messversuchen gewonnenen Daten. Folgende Parameter werden bestimmt:

- **Name:** Dateiname des zu kalibrierenden EPANET Netzes; Dateiformat: *.inp (vgl. Kapitel 2.4.1.2)
- **Metadata:** Dateiname mit den Metadaten der einzelnen Rohrleitungen; Dateiformat: *.meta (vgl. Kapitel 2.4.1.3)
- **Scenarios:** Dateiname des für die Kalibrierung zu verwendenden Datensatzes mit den Druck- und Durchflussdaten sowie der Füllstandsmessung des Hochbehälters zu einem Zeitpunkt der Druckmessungen; Dateiformat: *.cfg (vgl. Kapitel 0)

Die Parameter des genetischen Algorithmus beschreiben die Eingangsgrößen zur Findung der Kalibrierungslösung mit der höchsten Fitness mithilfe des GA. Folgende Parameter werden bestimmt:

- **Population:** Legt die Anzahl der Populationen für die Kalibrierung fest.
- **Generations:** Bestimmt die Anzahl der Generationen über die sich die Population innerhalb der Kalibrierung weiterentwickeln kann. Nach Erreichen der letzten Generation wird die Kalibrierung beendet.
- **CR (=Crossover Rate):** Beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass aus zwei Chromosomen der vergangenen Generation Datenmaterial weitergegeben wird, um einen Nachkommen zu erzeugen.
- **F (=Mutations Faktor):** Stellt einen realen und konstanten Faktor $\in [0,2]$ dar, welcher die Verstärkung der differentiellen Varianz beschreibt (Storn und Price 1997).
- **R_Min bzw. R_Max:** Diese beiden Parameter beschreiben die minimale bzw. maximale Rohrrauigkeit innerhalb derer sich die Variablen für die Kalibrierung bewegen dürfen.

Die Parameter der Kalibrierung beschreiben die für die Kalibrierung zu betrachtenden Metadaten und gruppieren diese in Abhängigkeit der gewünschten Werte. Rohrleitungen innerhalb dieser Gruppen weisen im Zuge der Berechnung immer den gleichen Kalibrierungswert auf, im Fall des vorliegenden Kalibrierungsprogrammes die gleiche Rohrrauigkeit.

2.4.1.2 EPANET-Inputfile (*.inp)

Das Inputfile beschreibt das zu kalibrierende Rohrleitungsnetz und wurde mithilfe des Modellierungsprogrammes EPANET erstellt. Innerhalb des Files sind alle Knoten und Kanten des Netzes wie folgt definiert:

Knoten:

- „ID“: Zuordnung des Knotens mittels eindeutiger Bezeichnung
- „Elev“: Beschreibt die Elevation (engl.) bzw. absolute Höhe des Knotenpunktes
- „Demand“: Beschreibt den Verbrauch an einem Knoten. Verbrauchsknoten können Hausanschlüsse oder Hydranten sein.
- „Pattern“: beschreibt den zeitlichen Verlauf des Verbrauchs über einen gewissen Zeitraum. Innerhalb des Files wird der Name der Ganglinie des angegeben.

Kanten:

- „ID“: Zuordnung der Kante mittels eindeutiger Bezeichnung
- „Node1“/„Node2“: ID/Bezeichnung der Anfangs- und Endknoten der Rohrleitung
- „Length“: Länge der Rohrleitung in Meter
- „Diameter“: Durchmesser der Rohrleitung in Millimeter
- „Roughness“: Rohrrauigkeit der Rohrleitung in Millimeter (Darcy-Weisbach). Dieser Parameter wird im Zuge der Kalibrierung geändert und optimiert.
- „MinorLoss“: Verlustbeiwert der Rohrleitung. Dieser Parameter kann, wenn gewünscht, ebenfalls im Zuge der Kalibrierung geändert und optimiert werden.
- „Status“: Simuliert innerhalb des Rohres einen Schieber und beschreibt somit, ob ein Durchfluss durch das Rohr möglich ist.

Zusätzlich werden innerhalb des Inputfiles auch noch alle weiteren Objekte und Parameter des Rohrleitungsnetzes beschrieben, die für eine Modellierung und Simulation des Netzes notwendig sind (vgl. Kapitel 2.1). Dies sind u.a. Objekte wie Reservoirs bzw. Tanks, Pumpen und Schieber. Weiters werden alle Parameter wie Verbrauchskurven und Simulationsparameter ebenfalls beschrieben.

2.4.1.3 Metadaten (*.meta)

Innerhalb des Metadatenfiles werden für jede Rohrleitung die erforderlichen Metadaten verknüpft. Die Metadaten werden für die Gruppierung der Rohrleitungen benötigt. Dies bedeutet, dass alle Parameter, nach denen die Rohrleitungen gruppiert werden sollen, entweder innerhalb des EPANET-Inputfiles (vgl. Kapitel 2.4.1.2) oder über die Metadaten definiert sein müssen. Alle Rohrleitungen sind über ihre ID eindeutig definiert. Ein Ausschnitt der Metadaten des bestehenden Programmes ist in Abbildung 2-5 ersichtlich.

```
id,material,age,diameter,fittings,fit_density
LHG2460,PVC,1983,81.4,0,0
LHG2461a,PVC,1983,81.4,0,0
LHG2467b,PVC,1983,126.6,0,0
LHG3108,GGG,1978,125,0,0
LHG3109,GGG,1978,125,0,0
LHG3109a,GGG,1978,125,0,0
LHG3110,PVC,1978,126.6,0,0
LHG3110_1,PVC,1978,126.6,1,11.51492285
```

Abbildung 2-5: Ausschnitt der Metadaten *des bestehenden Kalibrierers*

2.4.1.4 Szenarien (.cfg)

Die für die Kalibrierung benötigten Messwerte werden in eigenen *.cfg-Dateien abgespeichert. Jede Szenariendatei stellt dabei einen Zeitpunkt dar und beinhaltet alle Informationen, die für eine vollständige Kalibrierung erforderlich sind. Im Zusammenhang mit der Kalibrierung von WVN umfassen diese erforderlichen Daten häufig die Druckdaten von ausgewählten Druckmessstellen innerhalb des Netzes, Durchflussdaten einer oder mehrerer Messstellen sowie Füllstandsmessungen der Hochbehälter.

Weiters können Parameter beinhaltet sein, die eine Testumgebung beschreiben, wie dies auch bei den Szenarien des Rohrrauigkeitskalibrierers der Fall ist. Durchflussmessungen an bestimmten Knoten geben die Hydrantenöffnungen im Zuge der Messreihe 2016 wieder (vgl. Kapitel 2.6), wie auch in Abbildung 2-6 ersichtlich ist.

```
[[Flow]
LHG2461a = 12.97148243

[Demand]
HG3302 = 0.0
HG3537 = 0.0
HG3880 = 0.0
HG4118 = 12.02993673

[Pressure]
HG3420 = 76.14047235
HG3445 = 62.04551025
HG3835 = 82.43396498
HG3933 = 84.28275377
HG4150 = 45.75504647
HG4162 = 68.6183547
HG4215 = 71.2023271
HG4339b = 89.64389326
HG4383 = 83.33616918
HG4540 = 55.70416729
HG4576 = 24.08263887
HG4744 = 25.50325983

[Tank]
wNode_1 = 507.5586923
```

Abbildung 2-6: Parameter der Szenarien für die Kalibrierung der Rohrrauigkeit

2.5 Beschreibung des zu untersuchenden Netzes

In den folgenden Unterkapiteln wird das Gemeinde des Untersuchungsgebietes anhand statistischer Daten sowie der Bebauung beschrieben. Weiters wird das WVN anhand des hydraulischen Modells betrachtet. **Statistische Gemeindedaten**

Das Gemeindegebiet umfasst eine Fläche von 11,0km² und hatte mit Stichtag 01.01.2016 bzw. 01.01.2017 eine Wohnbevölkerung von 4850 bzw. 4942 Einwohnern (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, A17 Landes- und Regionalentwicklung 2016, 2017).

Zusätzlich wurde über die Mikrozensus 2011 und 2021 u.a. Daten über die Anzahl von Wohngebäuden innerhalb der Gemeinde gesammelt (Statistik Austria 2025). Die gesammelten statistischen Daten sind in Tabelle 2-2 zusammengefasst, einzelne Daten wurden bei fehlender Datengrundlage für die Jahre 2016 und 2017 über Interpolation rechnerisch ermittelt.

Tabelle 2-2: Statistische Daten des Gemeindegebiets

Datenquellen: Steirische Statistiken Heft 10/2016 und 08/2017 sowie Landesstatistik Steiermark (Gebietsstand 2025)					
Stichtag	Fläche	Einwohner	Bevölkerungsdichte	Wohngebäude	Einwohner je Wohngebäude
	[km ²]	[-]	[EW/km ²]	[-]	[-]
31.10.2011		4453	403	1550	2,9
01.01.2016		4850	438	1613	3,0"
01.01.2017		4942	449	1628	3,0"
31.10.2021		5346	486	1700	3,1
31.10.2023		5503	500	1729	3,2
31.10.2025	11,0				

in Grau: Interpolation der Wohngebäude über die Jahre
": berechnete Werte für Einwohner je Wohngebäude über interpolierten Wohngebäude

2.5.2 Umfeld des Untersuchungsnetzes

Das Untersuchungsnetz erstreckt sich über rd. 0,9km². Das Untersuchungsgebiet besteht Großteils aus bebauten Wohnbauflächen, sowie einigen bewaldeten Abschnitten und Grünflächen bzw. agrarwirtschaftlichen Flächen.

Die Topografie des Untersuchungsgebietes ist hügelig mit abfallenden Hängen und innerhalb des Projektgebiets finden sich Höhen von rd. 510 – 400 m.ü.A., wobei auf der Höhe von 510 m.ü.A. der Hochbehälter angeordnet ist.

Die Bebauung im Untersuchungsgebiet besteht vorwiegend aus Einfamilienhäusern sowie Wohnungsbauten. Bis auf ein Gasthaus sind keine weiteren Gewerbebetriebe an das WVN angeschlossen. In Abbildung 2-7 sind die Rohrleitungen sowie der Hochbehälter innerhalb des Untersuchungsgebietes dargestellt.

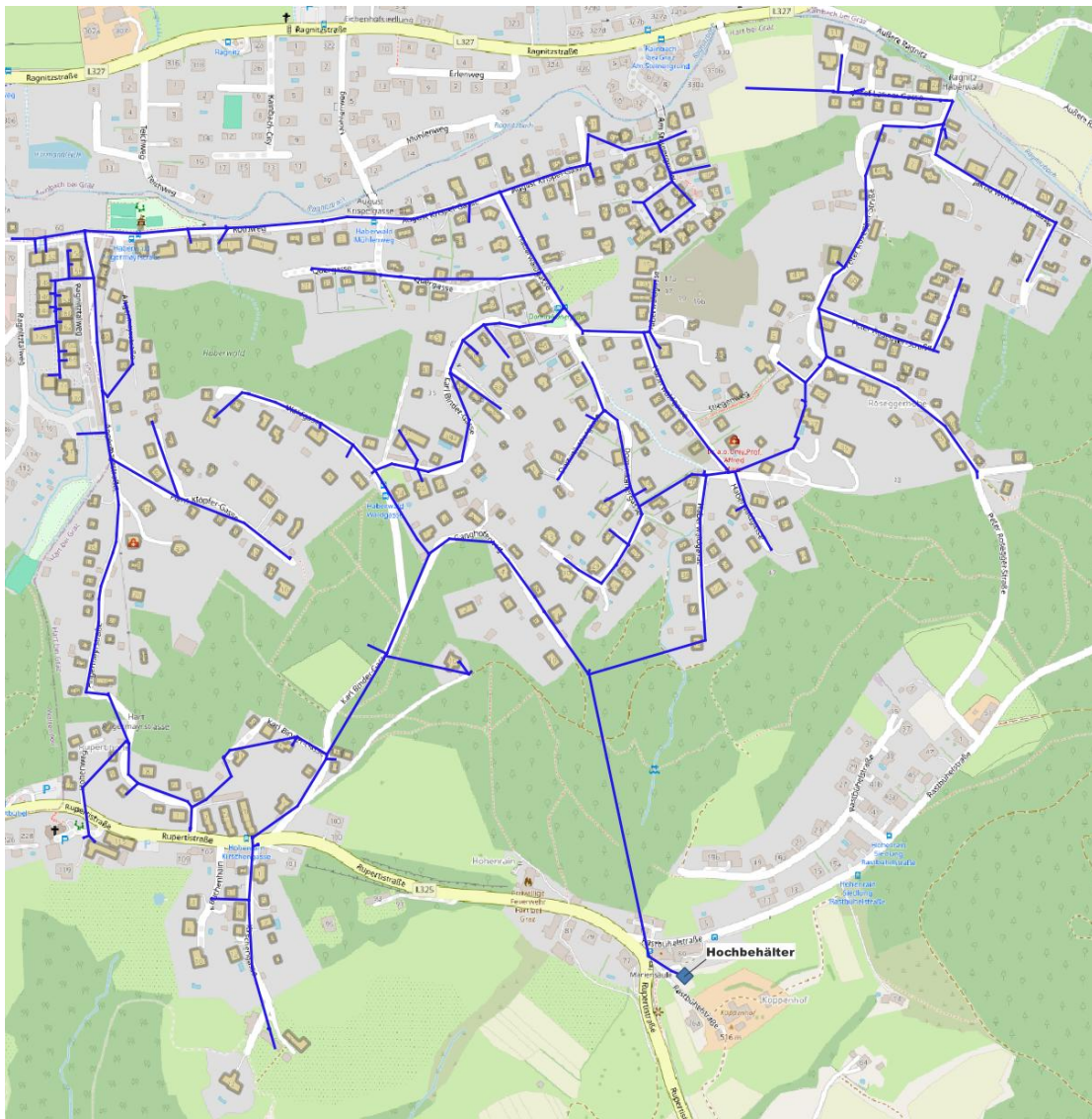


Abbildung 2-7: Übersichtskarte Untersuchungsnetz/-gebiet

2.5.3 Systemdaten

Die Analyse des Wasserversorgungsnetzes erfolgte durch ein EPANET-File, welches durch das SWW bereitgestellt und bereits auf Rohrraugigkeiten kalibriert wurde.

2.5.3.1 Rohrleitungen

In Summe besteht das Netz aus rd. 9,5km Rohrleitungen. Ein Großteil des Netzes besteht aus Rohren mit einem ID von 81,4mm. Diese Rohre dienen als Verteilungsrohre innerhalb des Netzes. Weitere Verteilungsrohre direkt nach dem Hochbehälter bzw. am Beginn des Wasserversorgungsnetzes sind hauptsächlich mit ID von 99,4 bzw. 126,6mm vorhanden.

Zusätzlich liegen über die Metadatenfile Aussagen über die Rohrmaterialien und das Alter der Rohrleitungen vor. Ein Großteil (73,50%) des WVN wurde im

Jahr 1978 errichtet und ein ähnlich großer Anteil an PVC Rohren existiert innerhalb des Netzes. Anhand der Arbeit von Lippacher (2018) wurden die Rohrrauigkeiten innerhalb des hydraulischen Modells kalibriert (vgl. Kapitel 2.6.2), das Ergebnis der kalibrierten Rohrrauigkeiten dieser Arbeit ist in Abbildung 2-8 ersichtlich.

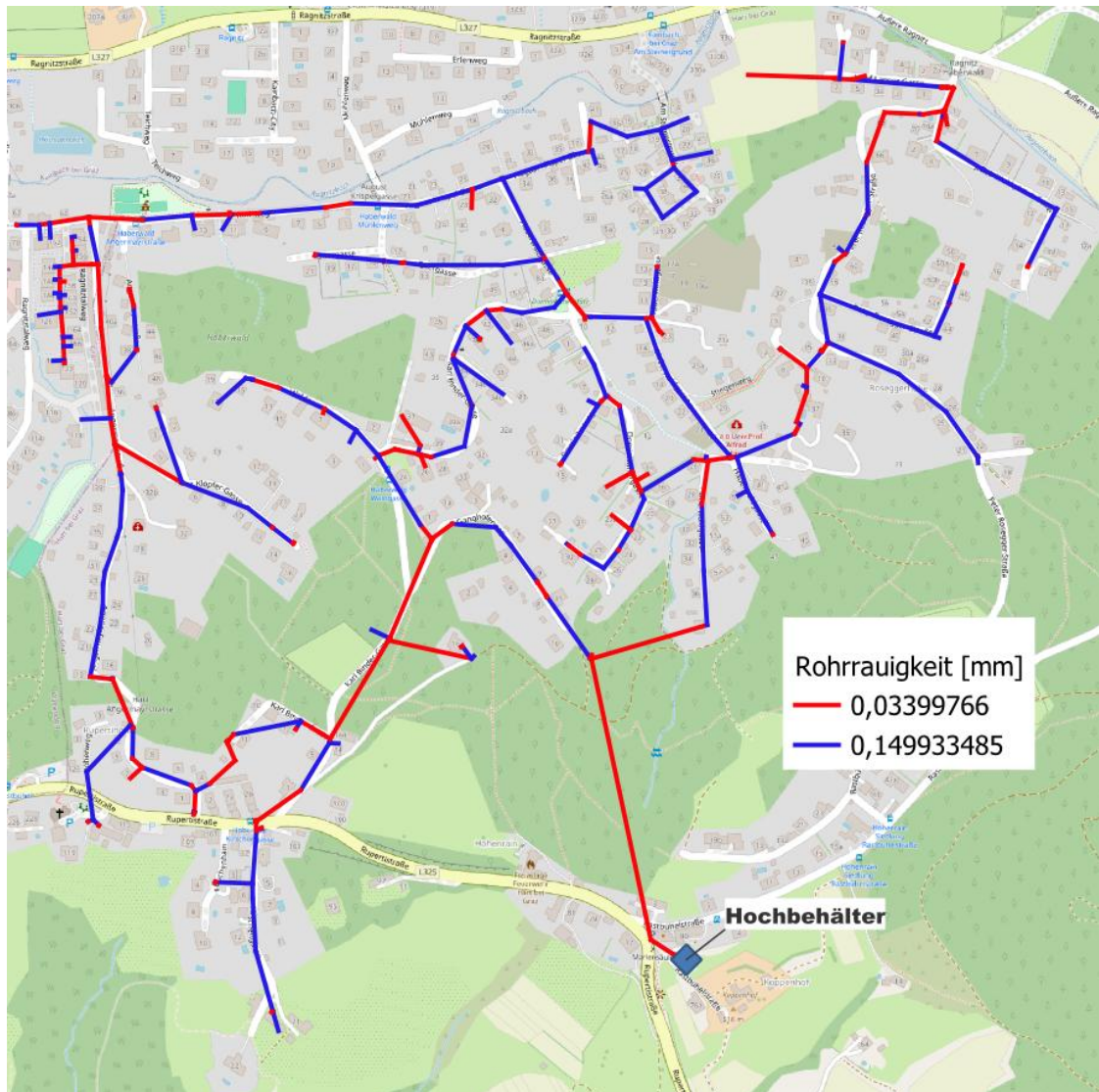


Abbildung 2-8: Übersicht Rohrrauigkeiten

2.5.3.2 Verbraucher/Anschlusspunkte

Im vorliegenden kalibrierten EPANET-File des Untersuchungsnetzes weisen 243 von 473 Knotenpunkten einen ausgewiesenen Verbrauch auf, wobei alle Verbraucher statisch sind und keine Ganglinien des Verbrauchs aufweisen.



Abbildung 2-9: Knotenpunkte mit angenommenem Verbrauch

2.6 Messreihe 2016 und Rohrrauigkeitskalibrierung

Im Jahr 2016 wurde innerhalb des Untersuchungsnetzes eine Messreihe vorgenommen. Erfasst wurden u.a. der Zufluss in das Wasserversorgungsnetz, die Füllhöhe des Hochbehälters und der Druck innerhalb des Systems an 12 ausgewählten Punkten. In weiterer Folge wurde auf Basis der unabhängig erfolgten Messreihe in einer weiteren Arbeit am SWW (Lippacher 2018) das hydraulische Modell des WVN u.a. auf Rohrrauigkeiten hin kalibriert.

2.6.1 Beschreibung der Messreihe

Die Messreihe wurde in der Zeit zwischen Anfang April 2016 bis Ende August 2016 durch das SWW durchgeführt. Während der Untersuchungszeit wurden auch verschiedene Lastfälle und Leckagefälle simuliert, um einen Datengrundsatz für eine Kalibrierung des Netzes zu generieren sowie für eine Leckageortung innerhalb des Netzes anhand von Kalibrierungen. (Fuchs-Hanusch u. a. 2017; D. B. Steffelbauer 2018)

Im Zuge der Messreihe wurden die Daten 12 verschiedener Drucksensoren erhoben, deren Positionen in Abbildung 2-10 ersichtlich sind. Ebenfalls beobachtet wurden mittels Durchflussmessungen unmittelbar am Hochbehälter der Gesamtzufluss in das WVN und die Füllstandshöhe des Hochbehälters.

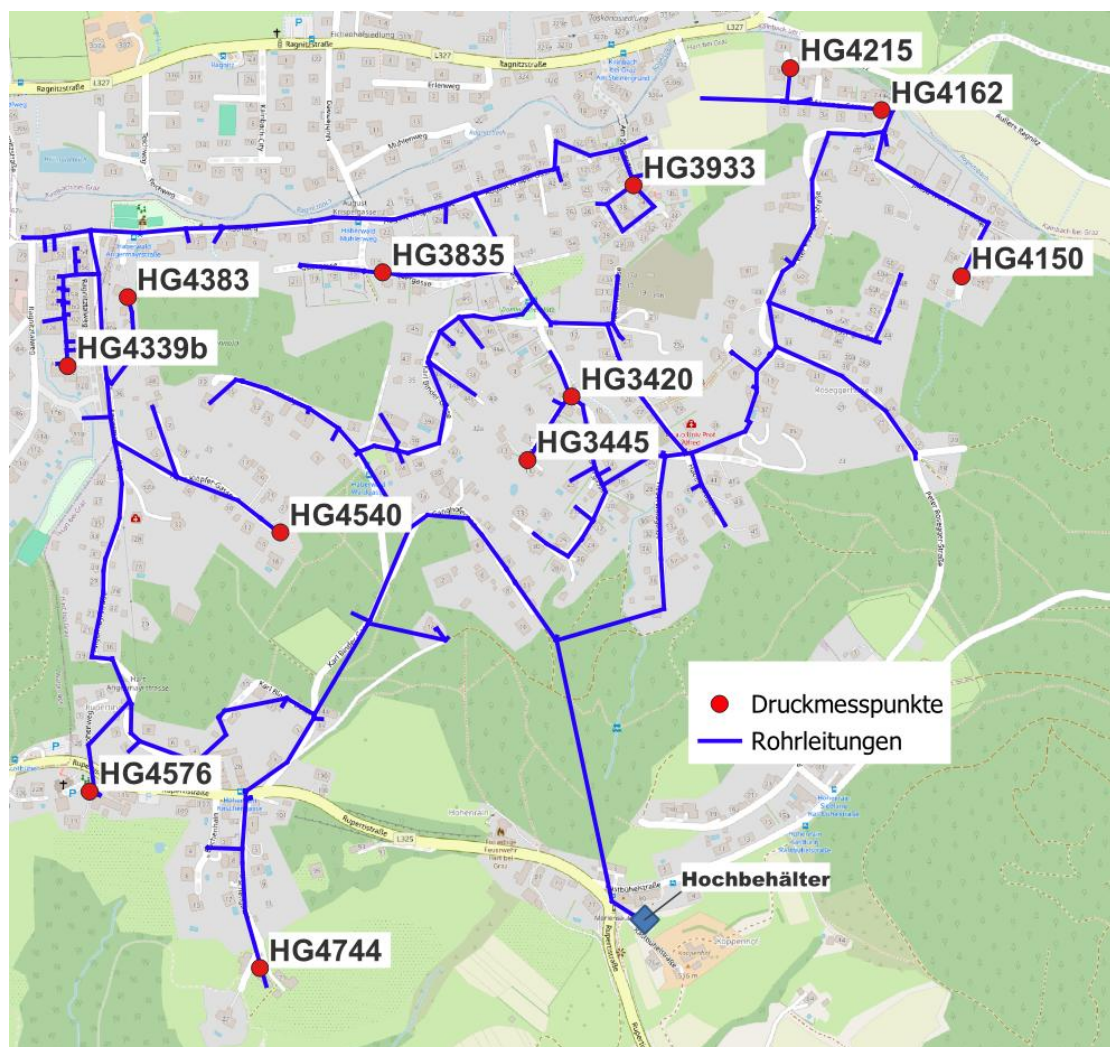


Abbildung 2-10: Anordnung der Druckmesspunkte

Fuchs-Hanusch et al. (2017) beschreiben in ihrer Arbeit die Auswahl der Sensorplatzierungen und die verschiedenen Testprofile während des Untersuchungszeitraums. Da für diese Arbeit nur die Messdaten eines, durch Versuchsabläufe, ungestörten Zeitabschnittes benötigt werden, und das Thema der Sensorplatzierung nicht Teil dieser Arbeit ist, wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

2.6.2 Rohrrauigkeitskalibrierung

In seiner Arbeit am SWW untersuchte Lippacher (2018) u.a. Methoden zur Kalibrierung des hydraulischen Modells hinsichtlich der Rohrrauigkeiten. In dieser Arbeit werden die Rohrleitungen entsprechend unterschiedlicher Kriterien (u.a. Material, Durchmesser und Verlegejahr) gruppiert und je Gruppe mithilfe eines GA kalibriert. Die Kalibrierungen erfolgten anhand der Messdaten eines Fire-Flow Tests in der Nacht vom 11.04.2016 auf den 12.04.2016. Als geeignetste Gruppierungsparameter wurden die (1) Einbautendichte sowie (2) die Kombination aus Einbautendichte und Verlegejahr ermittelt, wobei in beiden Fällen eine mittlere Abweichung zwischen simulierten und gemessenen Druckwerten von 0,26m erreicht wurde. Die Ergebnisse der kalibrierten Rohrrauigkeiten sind auch in Abbildung 2-8 (Kapitel 2.5.3.1) ersichtlich. (Lippacher 2018)

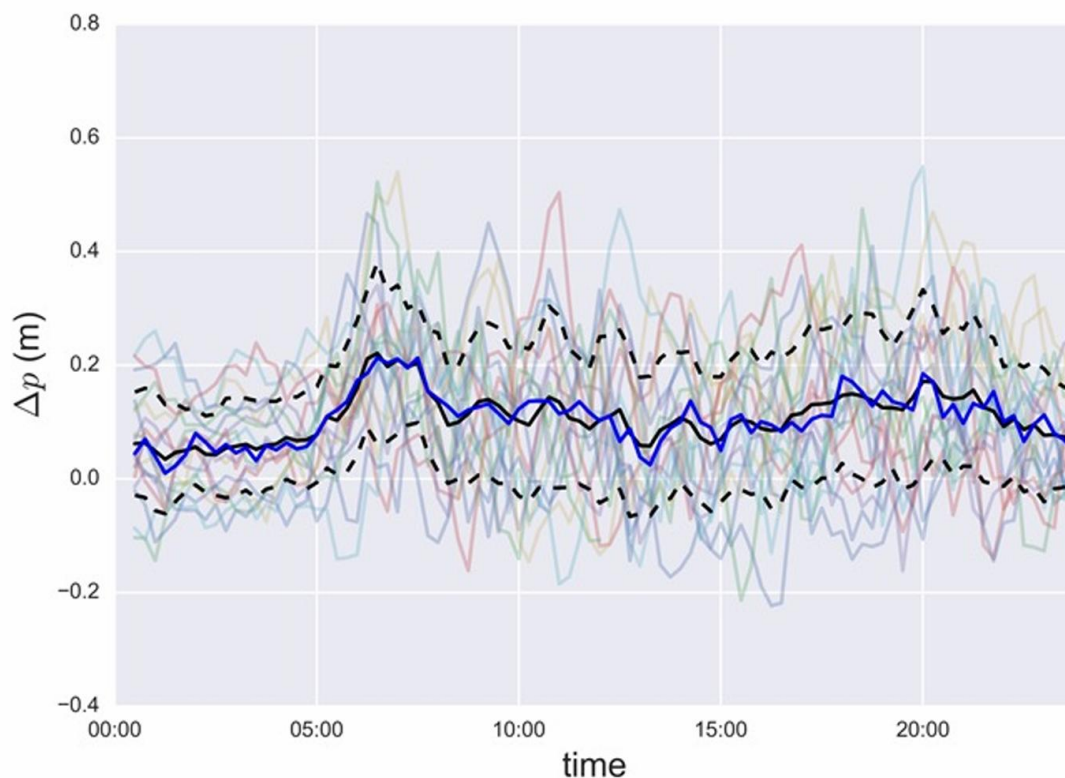


Abbildung 2-11: Druckdifferenz des kalibrierten Systems (Rohrrauigkeit) über Langzeitdaten (Fuchs-Hanusch 2021)

Auf Grundlage des kalibrierten hydraulischen Modells wurden in weiterer Folge durch das SWW Auswertungen der Druckdifferenz über die Langzeitmessungsdaten im ungestörten System durchgeführt und in Abbildung 2-11 dargestellt. Zu beobachten ist, dass die Druckdifferenz außerhalb der Zeiten des Nachtminimums zunimmt. Dies kann darauf hindeuten, dass das hydraulische Modell in Zeiten mit geringem Gesamtverbrauch (Nachtminimum) auf die entsprechenden Parameter (Rohrrauigkeit) sehr gut kalibriert ist, jedoch tagsüber die Verbrauchsverteilungen im Modell noch nicht entsprechend an die tatsächliche Verteilung angepasst sind.

2.7 Beschreibung der benötigten Daten für Kalibrierung

In den folgenden Unterkapiteln wird zusammenfassend auf die erforderlichen Daten für die Kalibrierung mittels des neuen Verbrauchskalibrierers und deren Herkunft eingegangen.

2.7.1 Hydraulisches Modell des WVN

Um die durch den Optimierer ermittelten Verbrauchsparameter berechnen zu können, wird ein hydraulisches Modell des WVN benötigt, welches im Zuge der Kalibrierung die stationären Netzgleichungen löst und die simulierten Druck- und Durchflussdaten der entsprechenden Messpunkte ermittelt.

Das hydraulische Modell wurde bereitgestellt durch das SWW und entspricht dem auf Rohrrauigkeiten kalibrierten Netz basierend auf der Arbeit von Lippacher (2018). Die kalibrierten Rohrrauigkeiten sind in Abbildung 2-8 (Kapitel 2.5.3.1) ersichtlich sowie die auf dem kalibrierten Modell resultierenden Druckabweichungen zu den Messdaten in Abbildung 2-11 (Kapitel 2.6.2) ersichtlich.

2.7.2 Messdaten der Messreihe 2016

Die Daten der Messreihe bilden die Grundlage, um im Laufe der Kalibrierung die simulierten Ergebnisse mit Daten der realen Welt vergleichen zu können und der Fitnessfunktion eine Vergleichsgrundlage liefern zu können. Die Messdaten umfassen dabei Druckdaten mehrerer Drucksensoren, eine Durchflussmessung für den Gesamtdurchfluss in das System sowie eine Füllstandsmessung des Hochbehälters.

Die Daten wurden bereitgestellt durch das SWW, und der Zugang sowie Download zur weiteren Verwendung erfolgte über das Open Source Programmpaket Grafana. Steffelbauer (2018) führte in seiner Dissertation bereits eine Auswertung der Datengrundlage durch, auf deren Basis die Daten und Zeiträume dieser Arbeit ermittelt wurden. Die genaue Bearbeitung und Ermittlung der Daten werden in Kapitel 3.3 erklärt.

2.7.3 Datengrundlage für die statistische Annahme von Verbrauchswerten

Die Ermittlung der möglichen Verbrauchsverteilungen wurde ausschließlich mit öffentlich zugänglichen Datengrundlagen durchgeführt. Diese umfassen u.a. Einwohnerzahlen der Gemeinde sowie Daten des Mikrozensus 2016 (Statistik Austria 2017). Eine genaue Beschreibung der Auswertungen findet sich in den Kapiteln 3.1 und 3.2.

2.7.4 Python Code des bestehenden Rohrraugigkeitskalibrierers

Der Code des bestehenden Kalibrierers wurde durch das SWW zur Verfügung gestellt und diente als Grundlage für den Aufbau des neuen Verbrauchskalibrierers, indem Logik, Grundstruktur und Codeabschnitte soweit möglich weiterverwendet wurden. Die Beschreibung des bestehenden Codes findet sich in Kapitel 2.4, die Erarbeitung des neuen Programmes wird in Kapitel 3.4 erklärt.

2.8 Verwendete Programme

Das folgende Kapitel fasst die verwendeten Softwarepakete und Programme kurz zusammen.

2.8.1 EPANET

EPANET ist ein hydraulisches Modellierungs- und Simulationsprogramm für Druckleitungsnetze der US Environmental Protection Agency, welches als Open Source Produkt kostenfrei herunterladbar ist. Sein Einsatzbereich ist die Modellierung von Druckleitungsnetzen anhand des Knoten und Kanten Prinzips (vgl. Kapitel 2.1) und der Berechnung der Netzgleichungen. Es kann dabei Simulationen über mehrere Zeitschritte durchführen - inklusive der Berücksichtigung verschiedener Verlustparameter - und dabei Parametergrößen wie u.a. Durchflüsse aller Kanten, Druckdaten aller Knoten und Füllstandshöhen von Wasserspeichern für jeden dieser Zeitschritte ermitteln. (Rossman 2000)

EPANET wurde im Zuge dieser Arbeit in der Version 2.2 genutzt und herangezogen zur Auswertung von Elementen innerhalb des bereits kalibrierten EPANET-Inputfiles (vgl. Kapitel 2.7.1)

2.8.2 OOPNET

Bei OOPNET (Object-oriented EPANET in Python) handelt es sich um eine Python basierte Schnittstelle zu EPANET, welche am SWW entwickelt wurde. OOPNET ist in der Lage, EPANET basierte Inputfiles in objektorientierte Strukturen zu übersetzen und mittels Schnittstelle zu EPANET zu manipulieren und zu simulieren. Das Ziel von OOPNET ist eine vereinfachte automatische Manipulation am Netz, um sowohl die gleichzeitige als auch die wiederholende Simulation großer Simulationspakete mittels der relativ einfachen Programmiersprache Python zu ermöglichen. (D. Steffelbauer und Fuchs-Hanusch 2015)

OOPNET diente im Zuge dieser Arbeit als Simulationsprogramm für die Verbrauchskalibrierung und wurde in der Version 0.6.5 genutzt.

2.8.3 QGIS

Für Auswertung mittels Geographischem Informationssystem (GIS) wurde im Zuge dieser Arbeit das Open Source Softwarepaket QGIS in der Version 3.40 genutzt. Im Zusammenspiel mit öffentlich zugänglichen Kartensystemen wie OpenStreetMap diente es der Auswertung des Untersuchungsgebietes sowie der Ermittlung statistischer Größen für Gruppierung und Verbrauchsverteilungsansatz.

2.8.4 PyCharm und Python

PyCharm ist eine integrierte Entwicklungsumgebung des Unternehmens JetBrains. Es diente im Zuge dieser Arbeit in der Version 2025.3 zusammen mit der Programmiersprache Python 3.12 als Entwicklungstool und Grundlage für die Erstellung des neuen Verbrauchskalibrierers. Weiters wurden Auswertungen und Grafiken dieser mit Pythonskripten durchgeführt.

2.8.5 ChatGPT

Für diese Arbeit wurde das Large Language Model ChatGPT der Firma OpenAI als Unterstützung im Zuge der Codeerstellung und Fehlersuche genutzt. In den Kapiteln der Codeerstellung werden repräsentative Prompts angeführt, welche beschreiben, wie ChatGPT Rollen des Codes Schreibens übernommen hat.

3 Methodik

Im Zuge dieses Kapitels wird auf die Ansätze und Methoden eingegangen, die bei der Beantwortung der Forschungsfragen helfen sollen. Die Kapitel sind unterteilt in die Unterkapitel

- Parameterermittlung der Verbraucher mittels GIS
- Statistische Parameter für a-priori Annahme der Verbrauchsverteilung
- Szenarienentwicklung auf Grundlage des Messversuchs von 2016
- Kalibrierungsansatz sowie Code-Entwicklung
- Ablauf der Kalibrierungsversuche
- Auswertung und Beurteilung der Daten

3.1 Parameterermittlung über GIS

Die Untersuchung des Gebiets, in dem die Messversuche 2016 durchgeführt wurden, erfolgte mittels GIS-Auswertung sowie unterschiedlichen öffentlich zugänglichen Internetdiensten und Informationen. Die folgenden Unterkapitel behandeln die Ermittlung von möglichen Verbrauchergruppierungen sowie die Zuordnung ebendieser Verbraucher an das hydraulische Modell des WVN.

3.1.1 Gruppierung der Verbraucher über GIS-Ermittlung

Das vorhandene Kalibrierungsprogramm setzt für die Kalibrierung eine Unterteilung der zu untersuchenden Komponenten voraus. Im Falle der Kalibrierung von Rohrleitungen können dies Metadaten wie z.B. Durchmesser, Alter, Material, Länge etc. sein. Nicht alle dieser Parameter sind zwangsläufig für eine Kalibrierung geeignet, jedoch lässt sich durch einen Vergleich der Fitness sowie einer Auswertung der Druckabweichungen der simulierten und gemessenen Drücke der unterschiedlichen Parameter sehr gut ein Rückschluss über die Eignung der unterschiedlichen Parameter treffen, wie auch Lippacher (2018) zeigt.

Im Zuge dieser Arbeit wurde für die Zuordnung verschiedener Kategorisierungswerte versucht, die im Untersuchungsgebiet vorhandenen Verbraucher zu ermitteln und zu gruppieren, wobei nur auf öffentlich verfügbare Informationen zurückgegriffen werden konnte. Aus diesem Grund mussten für die Gruppierung der Verbraucher Kategorien bestimmt werden, deren spezifische Parameter mittels öffentlich zugänglicher Daten und Methoden ausgewertet werden konnten.

Die Erhebung dieser Gruppierungen erfolgte mittels GIS-Ermittlung sowie öffentlich zugänglicher Statistiken, wie z.B. Einwohnerdaten und Statistiken zur Lebenssituation in Österreich.

Für die Untersuchung der Kalibrierungsmöglichkeiten wurden folgende Kategorien festgelegt, die im Folgenden noch genauer beschrieben werden:

- Gebäudeklasse (Kapitel 3.1.1.1)
- Anzahl der Stockwerke (Kapitel 3.1.1.2)
- Wohnfläche (Kapitel 3.1.1.3)
- Region/Gebiet (Kapitel 3.1.1.4)

Zur Ermittlung der Parameter wurden die im Untersuchungsgebiet vorhandenen Gebäude mit Hilfe verschiedener Internetdienste untersucht und ausgewertet:

- *GIS-Steiermark* (Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2025): Auswertung von Satellitenbildern und Grundstücksgrenzen
- *Karten zu Gebäude- und Wohnregister-Daten* (Statistik Austria 2022): Kartensatz „Neuerrichtungen von Gebäuden ab 2011“ zur Auswertung von Gebäuden/Verbrauchern, die nach 2016 errichtet wurden
- *Google Maps und Street View* (Google LLC 2025b): Auswertung von Gebäudeklassen und Geschoßanzahl
- *Google Earth* (Google LLC 2025a): Auswertung der Geschoßanzahl

Die Ermittlung der Gruppen und die Verknüpfung der Verbraucher mit dem hydraulischen Modell des WVN wurden direkt im GIS-Programm vorgenommen. Die Daten (im Weiteren: Verbrauchsmatrix) wurden in entsprechenden shape-files schrittweise erweitert, bearbeitet und anschließend für die Erstellung der Metadaten exportiert.

3.1.1.1 Gebäudeklasse

Die Ermittlung der Gebäudeklassen erfolgte mittels augenscheinlicher Auswertung durch Online Kartendienste. Im Zuge der Auswertung der Gebäudeklassen konnten mit Hilfe von öffentlich verfügbaren Daten zur „Neuerrichtung von Gebäuden ab 2011“, jene Objekte ausgeschlossen werden, welche erst nach den Messversuchen im Frühjahr und Sommer 2016 errichtet wurden (Statistik Austria 2022). Es konnte nicht festgestellt werden, ob bzw. welche Objekte sich vor der Errichtung dieser Neubauten an deren Stelle befanden. Im Untersuchungsgebiet betrifft das 15 Objekte, welche im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter berücksichtigt werden.

3.1.1.2 Geschoßanzahl

Die Auswertung der Geschoßanzahl der angeschlossenen Verbrauchsobjekte erfolgte ebenfalls augenscheinlich mit Hilfe öffentlicher Kartendienste. Die Definition eines Geschoßes folgte dem steiermärkischen Baurecht u.a. in folgenden Punkten:

- Ein Geschoß muss eine Raumhöhe von $\geq 2,10\text{m}$ aufweisen.
- Kein Geschoß sind Dachgeschoße, deren Kniestockhöhe geringer ist als $1,25\text{m}$ und deren Dachneigung geringer als 70° ist.
(Land Steiermark 2025)

Auf eventuell vorhandene unterirdische Geschoße konnte aufgrund fehlender Daten nicht eingegangen werden.

3.1.1.3 Wohnfläche

Anhand von Luftbildern und der ältesten verfügbaren Stichtagsdaten des Katasters, datiert auf den 01.04.2021, wurde für die ermittelten Verbrauchsobjekte jeweils eine Geschoßfläche ermittelt. Das Ziel dieser Ermittlung war die statistische Erstellung von Einwohnerzahlen anhand der Wohnfläche als Produkt aus Geschoßanzahl (Kapitel 3.1.1.2) und -fläche.

3.1.1.4 Region/Gebiet

Die Unterteilung des Untersuchungsgebiets in kleinere Unterbereiche soll überprüfen, welchen Einfluss die räumliche Verteilung der Verbraucher auf die Ergebnisse der Verbrauchskalibrierung hat. Zu diesem Zweck wurde das Untersuchungsgebiet entsprechend des Layouts des WVN in Regionen unterteilt. Die Unterteilung erfolgte unter dem Gesichtspunkt einer praktikablen, aber plausiblen Aufteilung entlang der Hauptversorgungsleitungen. Zugehörige Stichleitungen und zusammenhängende Siedlungsstrukturen wurden dabei entsprechend den Hauptversorgungsleitungen in Regionen zusammengefasst.

3.1.2 Zuordnung der Verbraucher an das WVN

Um mit den mittels GIS ermittelten Verbrauchern eine Kalibrierung durchführen zu können, ist es notwendig, diese dem hydraulischen Modell zuzuordnen. Dies erfolgte durch räumliche Zuordnung direkt im GIS-Programm. Jedem Verbraucher wurde der am nächsten liegende Knotenpunkt des hydraulischen WVN zugeordnet und der entsprechende Knotenpunkt in der Verbrauchsmatrix gespeichert. In Summe werden durch die räumliche Zuordnung die 359 Verbraucher auf 218 verschiedene Knoten verteilt.

Die Ergebnisse der automatischen Zuordnung wurden manuell überprüft und in einzelnen Fällen angepasst, um eine plausible Darstellung der Anschlussverhältnisse zu erzielen, wie in Abbildung 3-1 ersichtlich. Ebenfalls dargestellt ist die

Lage der verwendeten Druckmesspunkte, auf die in Kapitel 3.3 näher eingegangen wird.



Abbildung 3-1: Zuordnung der Verbraucher an das hydraulische Modell des WVN

3.2 Statistische Parameter für a-priori Verbrauchsansatz

Um Struktur und Verteilung der Verbräuche in die Kalibrierung miteinzubeziehen, sind a-priori Annahmen über die Bevölkerung und somit über den Verbrauch notwendig. Nachdem die Anzahl der an das WVN angeschlossenen Verbrauchersobjekte ermittelt wurde (vgl. Kapitel 3.1.1) geht es im weiteren Verlauf um eine erste Abschätzung des Verbrauchs je Objekt. Als Grundlage dienen dafür statistische Kennzahlen zum Wasserverbrauch und der Wohnsituation sowie zur Einwohnerlage der untersuchten Gemeinde aus dem Jahr 2016. Zur Darstellung der Verbraucherverteilung werden Einwohnerwerte (EW) genutzt, welche

Methoden zur statistischen Einschätzung der Bevölkerung und Wohnsituation allein mit öffentlich verfügbaren Daten bergen hohe Unsicherheiten, was die Qua-

lität der Daten in einem akuten Anwendungsfall angeht. Dieser Umstand ist sowohl bei der Auswertung der Daten als auch bei der eigentlichen Wahl und Gewichtung der Parameter für die Kalibrierung zu berücksichtigen.

3.2.1 Kennzahlen der Untersuchungsgemeinde (2016)

Auf Grundlage der Bevölkerungsdaten aus den Jahren 2016 und 2017 sowie der Daten der Registerzählungen aus den Jahren 2011 und 2021 (Statistik Austria 2025) können für die konkrete Gemeinde folgende Werte erhoben werden.

Tabelle 3-1: Bevölkerungs- und Wohnungsdaten der Untersuchungsgemeinde

Datenquellen: Steirische Statistiken Heft 10/2016 und 08/2017 sowie Landesstatistik Steiermark (Gebietsstand 2025)				
Stichtag	Fläche	Einwohner	Wohngebäude	Einwohner je Wohngebäude
	[km ²]	[-]	[-]	[-]
31.10.2011		4453	1550	2,9
01.01.2016		4850	1613	3,0"
01.01.2017		4942	1628	3,0"
31.10.2021		5346	1700	3,1
31.10.2023		5503	1729	3,2
31.10.2025	11,0			

in Grau: Interpolation der Wohngebäude über die Jahre
 "": berechnete Werte für Einwohner je Wohngebäude über interpolierten Wohngebäude

Da für die Jahre 2016 und 2017 keine Erhebung der Wohngebäude gefunden werden konnte, wurden jene Werte in Tabelle 3-1 rechnerisch interpoliert. Anschließend wurde der Wert für die Einwohner je Wohngebäude für die Jahre 2016 und 2017 berechnet.

Auf Grundlage des Werts der Einwohner je Wohngebäude und der ermittelten Objekte (Anzahl: 359) innerhalb des Projektgebiets kann eine Bevölkerungszahl von 1085 Einwohner für das Projektgebiet abgeschätzt werden. Diese Methode schreibt jedoch sowohl EFH als auch MFH die gleiche Einwohnerzahl für das gesamte Objekt zu. Weiters können durch diese Methode keine Aussagen über die Objekte der Gebäudeklasse 3 und 4 (Anm: Gasthaus und öffentlicher Platz) getroffen werden. Diese Verteilung ist in der Realität unrealistisch. Dennoch werden die Daten in die Kalibrierung mitübernommen, um eine Aussage über die Auswirkungen dieses Ansatzes sowie des Ansatzes der a-priori Verbrauchsverteilung treffen zu können.

Auf den Ergebnissen dieser Verteilung beruht die im weiteren Verlauf angewendete Verbrauchsannahme „Gleichverteilt“ mit einem einheitlichen Einwohnerwert von 3,0 je Verbrauchsobjekt.

3.2.2 GIS-Auswertung der Wohnobjekte nach durchschnittlicher Wohnfläche je Person (Mikrozensus 2016)

Die in Kapitel 3.1.1.3 ermittelten Wohnraumfläche der einzelnen Verbrauchsobjekte wurde in Relation gesetzt zum Wert der durchschnittlichen Wohnfläche pro Person, erhoben durch die Statistik Austria für den Mikrozensus 2016.

Tabelle 3-2: Durchschnittliche Wohnfläche pro Person nach Bundesland und Rechtsverhältnis ((Statistik Austria 2017) Tabelle 6 (Ausschnitt))

Merkmale	Österreich	Burgenland	Kärnten	Niederösterreich	Oberösterreich	Salzburg	Steiermark
	Durchschnittliche Wohnfläche pro Person in m ²						
Insgesamt	44,6	52,6	48,0	50,0	46,7	41,9	46,4
Rechtsverhältnis							
Hauseigentum	51,2	54,3	50,9	53,7	50,6	46,6	51,5
Wohnungseigentum	43,1	48,8	46,4	44,6	45,0	40,9	42,7

Die ermittelte Wohnraumfläche wurde anhand der in Kapitel 3.1.1.1 definierten Gebäudeklassen für die Klassen 1 (EFH) und 2 (MFH) entsprechend der in Tabelle 3-2 gekennzeichneten Werte ausgewertet. Für MFH wurde über alle Objekte vereinfacht das Rechtsverhältnis des Wohnungseigentums angenommen.

Anhand dieser Auswertung kommen die Verbrauchsobjekte der Klassen 1 und 2 in Summe auf 2366,7 EW. Vergleicht man diese Bevölkerungszahl mit der Gesamtbevölkerung der Gemeinde (01.01.2016: 4942) sowie dem Verhältnis Gebäude im Untersuchungsgebiet zu Gebäude im Gemeindegebiet (~22%) erscheint dieser Ansatz in der vorliegenden Form für unplausibel. Dennoch werden die Daten in die Kalibrierung mitübernommen, da der absolute Anteil an Bewohnern keinen Einfluss auf die Kalibrierung hat, sondern nur die relative Verteilung.

Auf den Ergebnissen dieser Verteilung beruht die im weiteren Verlauf angewendete Verbrauchsannahme „Fläche“ mit einem individuellen Einwohnerwerten je Verbrauchsobjekt.

3.2.3 GIS-Auswertung der Wohnobjekte nach durchschnittlicher Haushaltsgröße je Objekttyp (Mikrozensus 2016)

Zur Ermittlung der Einwohner wurde weiters die durchschnittliche Haushaltsgröße des Mikrozensus 2016 herangezogen.

Tabelle 3-3: Durchschnittliche Haushaltsgröße nach Rechtsverhältnis ((Statistik Austria 2017) Tabelle 4 (Ausschnitt))

Merkmale	Hauptwohnsitzwohnungen insgesamt in 1.000	Haushaltsgröße					durchschnittliche Haushaltsgröße
		1 Person	2 Personen	3 Personen	4 Personen	5 und mehr Personen	
		in %					
Insgesamt	3.864,8	37,0	30,1	15,1	11,7	6,2	2,2
Rechtsverhältnis							
Hauseigentum	1.456,7	18,8	32,1	20,9	18,5	9,8	2,7
Wohnungseigentum	407,6	44,1	30,7	12,9	9,3	3,0	2,0

Anhand der definierten Gebäudeklassen (vgl. Kapitel 3.1.1.1) wurden für die Klassen 1 (EFH) und 2 (MFH) die durchschnittlichen Einwohner ermittelt. Analog zu 3.2.2 wurde für MFH das Rechtsverhältnis des Wohnungseigentums angenommen, wobei je Objekt der Gebäudeklasse 2 (MFH) nach augenscheinlicher Auswertung eine durchschnittliche Parteienanzahl von 6 Parteien je Objekt angenommen wurde. Dadurch ergibt sich für Objekte dieser Gebäudeklasse ein durchschnittlicher Wert von 12 EW je Objekt. Durch diese Auswertung kommen die Verbrauchsobjekte der Klassen 1 und 2 in Summe auf 1404,3 EW. Dieser Wert erscheint mit einem Verhältnis zur Gesamtbevölkerung von ca. 28% bei einem Gebäudeanteil von ca. 22% als erstmal grundsätzlich plausibel.

Dennoch birgt die Auswertung über diesen Ansatz eine Datenunsicherheit, welche im Zuge der Kalibrierung in einer gesonderten Gewichtung der a-priori Annahmen berücksichtigt werden muss.

Zusammen mit den Annahmen aus Kapitel 3.2.4 ergeben diese Ergebnisse die Verbrauchsverteilung „Gebäudeklasse“, mit 2,7 bzw. 12 Einwohnerwerten je Verbrauchsobjekt für die Gebäudeklassen 1 bzw. 2.

3.2.4 Annahmen für Objekte der Gebäudeklassen 3 und 4

Für die verbleibenden Verbrauchsobjekte der Klassen 3 (Gasthaus) und 4 (Spielplatz/WC) mussten weitere Annahmen anhand öffentlich verfügbarer Informationen getroffen werden. Die Einschätzung des Verbrauchs gestaltete sich als schwierig, da keine bis kaum Informationen zur Verfügung standen. Da es sich in beiden Fällen jedoch um jeweils nur ein Objekt je Klasse handelt, ist zu hinterfragen, welchen Einfluss diese auf das Gesamtergebnis haben werden.

Für das Gasthaus im südwestlichen Untersuchungsgebiet konnte ermittelt werden, dass es sich um ein Gasthaus mit Mittags- und Abendbetrieb sowie bis zu ca. 120 Sitzplätze handelt (FirmenABC 2024; Hirschenwirt 2017). Auf Grundlage

der Umrechnung des Wasserverbrauchs eines Gewerbebetriebs in den durchschnittlichen Wasserverbrauch eines Einwohners (=Einwohnerwert) nimmt die Bedarfstabelle des Amts der Oö. Landesregierung Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft (2011) einen Wert von 0,2 EW für jeden Sitzplatz an. Bei angenommenen 120 Sitzplätzen ergibt dies einen Bedarf von 24 EW für das Verbrauchsobjekt der Gebäudeklasse 3.

Für das Objekt der Klasse 4 konnten keine weiteren Angaben gefunden werden. Ebenso sind die Angaben über die Existenz eines WC und Wasseranschluss widersprüchlich. Mangels fundierter Angaben und Anhaltspunkte wurde für dieses einzelne Objekt ein Wert von 2 EW als Referenz für die Verbrauchsverteilung angenommen, und die Auswirkungen dieser Klasse sind im Laufe der Kalibrierung zu überprüfen.

3.2.5 Datenunsicherheit

Die Entscheidung, die a-priori Parameter über rein statistische Ansätze zu ermitteln, behaftet die Werte dieser a-priori Ermittlung mit nicht weiter quantifizierbaren Unsicherheiten. Diese Unsicherheiten können durch den gewählten Ansatz nicht weiter reduziert werden und müssen im Zuge der Auswertung soweit wie möglich berücksichtigt werden. Anhand der kalibrierten Verbrauchsverteilungen in Zusammenhang mit der zeitlichen Verteilung bzw. der Ganglinien der unterschiedlichen Gruppierungen können weitere Rückschlüsse über die Plausibilität des gewählten Ansatzes getroffen werden.

3.3 Szenarientwicklung

Die Szenarienerstellung erfolgte auf Grundlage der Daten der Messreihe aus dem Jahr 2016 (s. Kapitel 2.6). Im Zuge einer Dissertation (D. B. Steffelbauer 2018) wurde aus der Messreihe bereits der Zeitraum vom 30. Mai 2016 bis zum 12. Juli 2016 für die Bearbeitung herangezogen. Bei diesem Zeitraum handelt es sich um eine längere Messphase ohne Simulierung eines Leckagefalles, gefolgt von einer simulierten Leckage ab dem 4. Juli bis zum Ende des Zeitraums am 12. Juli.

Während dieses Zeitraums waren im Untersuchungsnetz insgesamt 6 Drucksensoren verteilt. Steffelbauer (2018) beurteilt in seiner Arbeit bereits die Funktionalität und Datenqualität dieser Drucksensoren und stellt dabei fest, dass 2 von 6 Drucksensoren Fehlfunktionen, entweder während (HG3420) oder vor und nach (HG4215) dem Betrachtungszeitraum, aufwiesen. Infolgedessen konnten diese zwei Drucksensoren nicht für eine weitere Bearbeitung herangezogen werden. Die Positionen sowie Bezeichnungen der 4 verbleibenden Drucksensoren sind in Abbildung 3-2 ersichtlich.

Aufgrund dieser Analysen wird für die vorliegende Masterarbeit der gleiche Untersuchungszeitraum herangezogen, wobei der Zeitraum, um jene vollen Tage

verkürzt wird, an denen eine simulierte Leckage auftritt. Dadurch ergibt sich für diese Arbeit ein Untersuchungszeitraum vom 30. Mai 2016 bis zum 03. Juli 2016. Die relevanten Eingangsdaten der Messreihe umfassen den Gesamtzufluss in das WVN, die Druckmessungen und die Füllhöhe des Hochbehälters. Weiters liegen Durchflussdaten zu simulierten Leckagen vor. Diese werden für die weitere Auswertung jedoch nicht benötigt, da nur Zeiträume ohne simulierte Leckage untersucht werden. Die Daten des Zuflusses sowie der Druckmessungen wurden mit einer Auflösung von einer Minute erfasst. Währenddessen wurden die Daten der Füllhöhe des Hochbehälters in unterschiedlichen Auflösungen, zwischen zwei Minuten bis stündlich, erfasst. In Anhang B sind die Eingangsdaten der Messreihe anhand von Screenshots innerhalb des Programmes Grafana dargestellt.

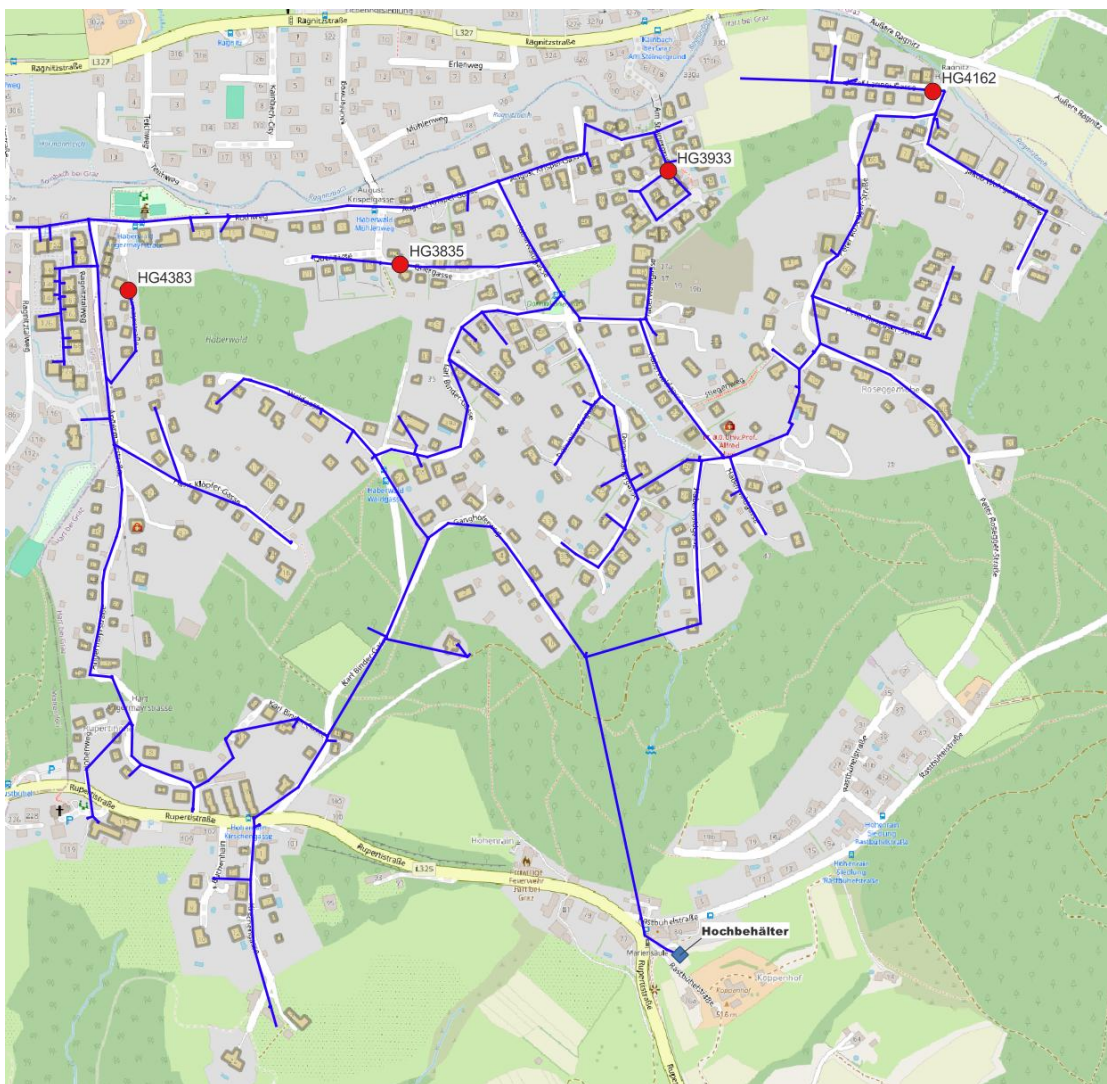


Abbildung 3-2: Lage der verbleibenden Drucksensoren im WVN

Die Kalibrierungen der Verbrauchswerte werden mit 10-minütigen Durchschnittswerten durchgeführt, jeweils 5 Minuten vor und nach jeder vollen Stunde. Ein innerhalb der Ursprungsdaten ersichtlicher Ausreißer mit einem Zufluss von

>6 l/s erfolgte am 01.06.2016 in der Zeit zwischen 12:46 – 12:48 und liegt somit außerhalb der für die Szenarienerstellung benötigten Zeitschritte. Die Füllhöhe des Hochbehälters wurde ab dem 30.06.2016 nur noch stündlich jeweils zur vollen Stunde erfasst. Aus den davorliegenden Daten lässt sich beobachten, dass sich die Füllhöhe innerhalb von 10 Minuten nur um etwa zwei bis drei Zentimeter ändert, wie in Abbildung 3-3 beispielhaft für die Befüllung und Entleerung des Hochbehälters am 30.05.2016 dargestellt. Da diese Veränderung in Bezug auf den Wasserdruck nur eine Schwankung von 0,002-0,003 bar bedeutet, hat diese Einzelmessung auf die Kalibrierung kaum einen Einfluss. Berücksichtigt werden muss jedoch die, durch die Einzelmessung, entstehende Unsicherheit durch mögliche Fehlmessungen in der Interpretation der Ergebnisse.

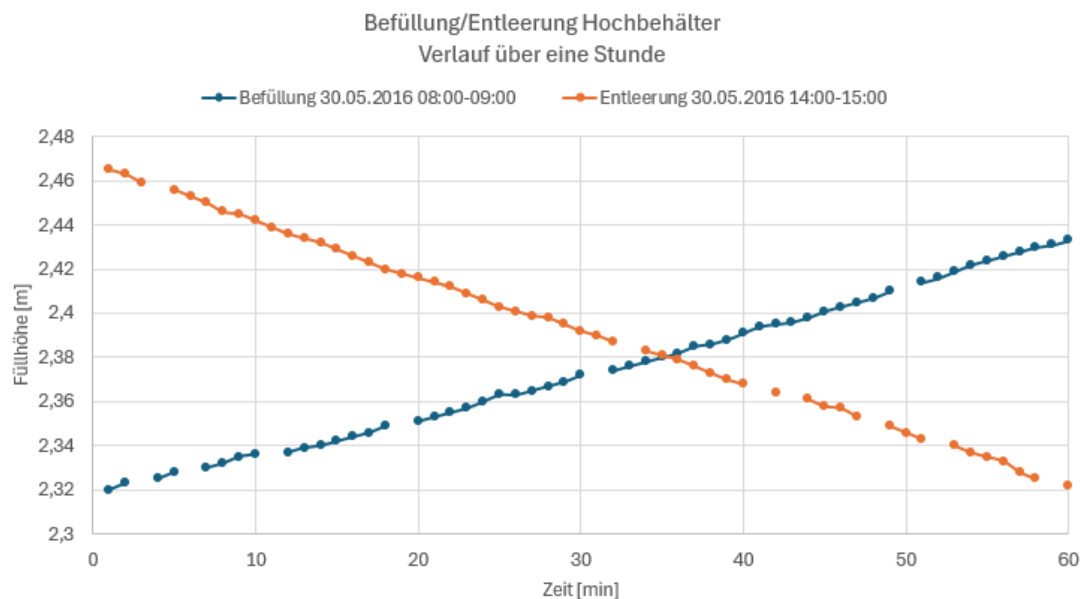


Abbildung 3-3: Ganglinie des Hochbehälters (30.05.2016)

3.3.1 Bearbeitung der Eingangsdaten zu Durchschnittswerten je Stunde

Die Eingangsdaten werden mittels eines Python Programmes ausgewertet, und für jede volle Stunde wird ein Durchschnittswert je Parameter ermittelt. Dabei werden, wie bereits in 3.3 erklärt, die Durchschnittswerte über alle Zeitschritte zwischen X:55 bis X+1:05 berechnet. Das Ergebnis dieser Datenbearbeitung ist in Abbildung 3-4 ersichtlich. Im Zuge dieses Schrittes wird noch keine Anpassung der Rohdaten vorgenommen, dies geschieht im Zuge der Szenarienerstellung (vgl. Kapitel 3.3.2).

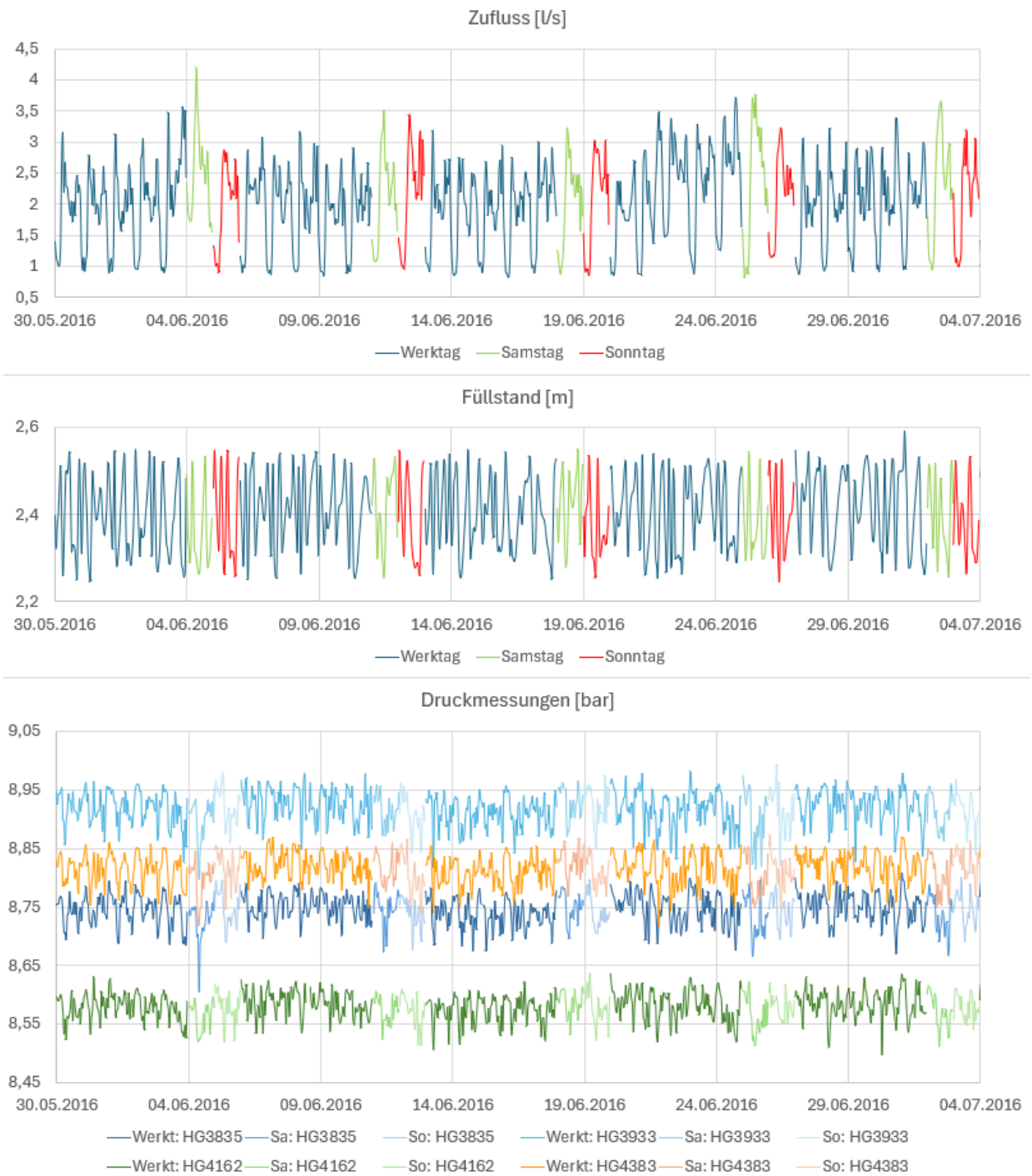


Abbildung 3-4: 10-Minuten Durchschnittswerte

Für die Erstellung der Durchschnittsdaten wurde ein Python Programm genutzt, welches mit Hilfe von ChatGPT erstellt wurde. Der folgende repräsentative Prompt beschreibt die Überlegungen und Anforderungen an den Code:

Erstelle ein Python-Skript, das Messdaten aus einer .csv-Datei mit einer 1-minütigen Auflösung einliest, daraus innerhalb eines definierten Zeitraumes je voller Stunde Durchschnittswerte bildet und die Ergebnisse nach Wochentagen kategorisiert und in .csv-Dateien abspeichert.

Rahmenbedingungen:

- Die Eingabedatei enthält eine Zeitspalte „Time“ im Format „DD.MM.YYYY HH:MM“ und mehrere numerische Spalten mit Parameterwerten.
- Das Skript soll zu Beginn alle Messschritte herausfiltern, die innerhalb eines definierten Zeitfensters um jede volle Stunde liegen. Alle anderen Zeitschritte werden verworfen.
- Anschließend soll für jedes Stundenfenster je Parameter ein einziger Mittelwert berechnet und abgespeichert werden. Als Zeitstempel je Stundenfenster wird das Datum der vollen Stunde inkl. Datum verwendet werden.
- Die Zeitstempel sollen über das Datum ihren entsprechenden Wochentagen zugeordnet werden, wobei Montag bis Freitag als „Werktage“ klassifiziert werden.
- Abschließend sollen 5 csv-Dateien ausgegeben werden:
 1. csv-Datei mit allen gefilterten Einzelmessungen innerhalb der Zeitfenster (Prüfung des Programmes)
 2. csv-Datei mit allen stündlichen Mittelwertdaten über den ganzen Zeitraum
 3. je eine csv-Datei (wie Punkt 2.) für 1) Werktage, 2) Samstage, 3) Sonntage

Prompt 3-1: Erstellung der Durchschnittswerte

Wie aus dem Prompt 3-1 ersichtlich ist, wurden die Durchschnittswerte zusätzlich nach den entsprechenden Wochentagen kategorisiert, wobei die Tage Montag bis Freitag in der Kategorie „Werktage“ zusammengefasst wurden. Dadurch können die Ergebnisse der Kalibrierung bei Bedarf auch hinsichtlich der Unterschiede zwischen verschiedenen Wochentagen untersuchen zu können. Diese Unterscheidung wird im Zuge der Auswertung und Überprüfung der Verbrauchsabschätzung durchgeführt (vgl. Kapitel 4.3.3), um die Variation der Ganglinien über die Wochentage zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 2.1.1.3).

3.3.2 Erstellung der Szenariendateien

Um die in Kapitel 3.3.1 ermittelten Werte kalibrieren zu können, müssen diese Daten in Szenariendateien geschrieben werden, welche das Kalibrierungsprogramm öffnen und einlesen kann. Dazu wurden alle Parameter je Stundenwert in eine eigene cfg-Datei geschrieben. Zusätzlich mussten die Daten der Drucksensoren und der Wert der Füllhöhe des Hochbehälters angepasst werden, da sie in den Messdaten nicht in der richtigen Einheit oder nur als relativer Wert vorliegen.

Die Daten der Druckmesssonden wurden in der Druckeinheit Bar erfasst, das hydraulische Simulationsprogramm EPANET bzw. OOPNET benötigt die Druckdaten in der Einheit Meter Wassersäule [mWS]. Gemäß Klingel (2018) ergibt sich

für die Umrechnung der Messdaten von [bar] zu [mWS] ein Umrechnungsfaktor von 10,197162 m/bar.

Um durch die Füllstandsdaten des Hochbehälters eine absolute Druckhöhe in Relation zum restlichen Wasserversorgungsnetz zu erhalten, wurde die Wasserstandshöhe zum jeweiligen Zeitpunkt mit der Sohlhöhe des Hochbehälters (505,3 m.ü.A) addiert.

Für den 08.06.2016 liegen in der Zeit zwischen 11:52 bis 14:23 keine Daten für mindestens eine der Druckmessungen vor. Folglich konnten für diesen Zeitraum keine Durchschnittswerte für eine oder mehrere Druckmessungen berechnet werden, und für die Zeitpunkte 12:00, 13:00 und 14:00 konnten keine Szenarien erstellt werden, da kein vollständiger Datensatz gegeben war.

3.4 Kalibrieransatz und Code-Entwicklung

Als Grundlage des Verbrauchskalibrierers wird der Kalibrierer für Rohrrauigkeiten (vgl. Kapitel 2.4) herangezogen. Der grundsätzliche Aufbau sowie die Logik und Semantik des Kalibrierers bedienen sich am Grundgerüst des bestehenden Kalibrierers. In den folgenden Unterkapiteln wird auf die grundsätzliche Logik und deren Implementierung sowie auf den Aufbau des Verbrauchskalibrierers eingegangen.

3.4.1 Ansätze und Logik

Der bestehende Kalibrierer behandelt und kalibriert anhand der Rohrrauigkeiten einen über den Betrachtungs- und Untersuchungszeitraum unveränderten Zustand. Der neue Kalibrierer behandelt mithilfe der Verbräuche jedoch Zustände, die sich je nach Uhrzeit, Wochentag und auch Jahreszeit unterscheiden können. Aufgrund dessen muss im neuen Kalibrierer eine andere Logik für die Kalibrierung der entsprechenden Szenarien gewählt werden. Während der bestehende Kalibrierer über mehrere Szenarien den besten Zustand über alle diese Szenarien untersucht, ist das Ziel des neuen Kalibrierers die Lösung des besten Zustands je Einzelszenario. Die entsprechende Analyse und Beurteilung dieser Einzelergebnisse obliegen im Anschluss der Kalibrierung einer gesonderten Auswertung. Im Zuge der Analyse ist zu überprüfen, ob die Ergebnisse der Kalibrierung eines Szenarios stabil sind und reproduzierbare Ergebnisse liefern.

Der Ansatz des Kalibrierers nutzt eine heuristische a-priori Annahme der Verbrauchswerte ausgehend von den Metadaten aus der GIS-Auswertung (vgl. Kapitel 3.2) für die Erstellung einer Verbrauchsverteilung. Diese a-priori Annahme kann als Komponente der Fitnessbewertung für den Evolutionsalgorithmus benutzt werden. Dabei ist darauf zu achten, den GA nicht zu sehr in dieser a-priori Annahme einzuschränken.

Parameter wie der Suchraum des GA, die Parameter eben dieses und auch die Kalibrierungsparameter der a-priori Komponenten werden im Vorhinein der Kalibrierung über die *.toml-Konfigurationsdatei gesteuert, vergleichbar zum alten Rohrrauigkeitskalibrierer.

3.4.1.1 Gruppierung

Zu Beginn einer Kalibrierung werden die ermittelten Verbraucher über die in der Konfigurationsdatei definierten Gruppierungsmöglichkeiten gruppiert. Die Möglichkeiten umfassen dabei die in Kapitel 3.1.1 definierten Parameter Gebäudeklasse, Geschoßanzahl, Fläche und Region und gelten für die Gesamtdauer der Kalibrierung über alle Szenarien. Die Parameter können beliebig kombiniert werden oder auch nur einzeln angewandt werden, jedoch ist zu beachten, dass eine sehr große Anzahl an Gruppen sowohl zu längeren Laufzeiten als auch Instabilitäten in der Kalibrierung führen kann.

3.4.1.2 Initiale Verbrauchsannahme je Szenario

Für jedes Szenario wird zu Beginn der Kalibrierung eine initiale a-priori Verbrauchsannahme getroffen. Grundlage dieser Annahme sind die in Kapitel 3.2 ermittelten Einwohnerwerte. Da es sich bei jeder Kalibrierung um eine Einzelbetrachtung handelt, stellen die Einwohnerwerte anstelle eines tatsächlichen Tages- oder Jahresverbrauch eine relative Verteilung der Bevölkerung innerhalb des Untersuchungsgebietes dar. Auf Grundlage dieser Annahme wird der gemessene Zufluss in das WVN auf jeden Verbraucher, entsprechend dem Verhältnis am Gesamtanteil der Bevölkerung, aufgeteilt.

$$w_i^{(EW)} = \frac{EW_i}{\sum_{m=1}^N EW_m} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

mit:

- i ... Index je Verbraucher
- w ... a-priori Anteil je Verbraucher [-]
- EW ... Einwohnerwert aus Metadaten [-]

Aus den Metadaten werden in prepare.py die Einwohnerwerte herangezogen, um mithilfe der Gleichung 3-1 eine prozentuelle Gewichtung der einzelnen Verbraucher über alle Verbraucher zu ermitteln.

$$Q_i^{(EW)} = w_i * Q_{meas} \quad \text{Gleichung 3-2}$$

mit:

- i ... Index je Verbraucher
- Q_i ... initiale Verbrauchsannahme je Verbraucher [l/s]
- w_i ... a-priori Anteil je Verbraucher [-]
- Q_{meas} ... gemessener Zufluss in das WVN [l/s]

Anschließend wird mithilfe des ermittelten Anteils und des Gesamtzuflusses in das WVN ein initialer Verbrauch je Objekt ermittelt, wie Gleichung 3-2 zeigt. Durch die Zuordnung der Verbraucher zu Knotenpunkten des WVN (vgl. Kapitel 3.1.2) ist es abschließend möglich, die Verbräuche auf die Knotenpunkte aufzuaddieren.

3.4.1.3 Genetischer Algorithmus

Mithilfe eines genetischen Algorithmus versucht das Programm über eine Vielzahl von Generationen das Optima der Verbrauchsverteilung über die definierten Gruppen zu finden. Im Zuge der Optimierung wird die Verbrauchsverteilung mithilfe einer Fitnessfunktion (vgl. Kapitel 3.4.1.4) laufend bewertet, um die geeignetsten Individuen bestimmen zu können und am Ende der Kalibrierung das ermittelte lokale Optimum ausgeben zu können.

Da die vorliegende Arbeit u.a. die Auswirkungen verschiedener Parameterkombinationen und a-priori Annahmen, nicht jedoch den Einfluss unterschiedlicher Parameter des Kalibrierungsprogrammes untersucht, wurden für alle Berechnungen die immer gleichen Parameter des GA gesetzt. Diese wurden im Zuge von Testkalibrierungen erhoben. Das Ziel war die Definition einer ausreichend großen Populationsgröße mit entsprechender Generationenanzahl, um Mutationen innerhalb der Verbrauchsverteilung zu ermöglichen und dem Programm die Möglichkeit zu geben, ein lokales Optimum zu finden.

Tabelle 3-4: Parameter des EA; gesteuert über Konfigurationsdatei

Parameter	Wert
Population	48
Generationen	120
CR (Crossover Rate)	0,9
F (Mutationsrate)	0,6

Die in Tabelle 3-4 dargestellten Parameter wurden über die Konfigurationsdatei für alle weiteren Versuche gleich angesetzt. Weiters wurde innerhalb des Programmcodes eine Abbruchbedingung definiert. Diese beendet den aktuellen Kalibrierungslauf des jeweiligen Szenarios sauber vorzeitig, sobald 15 Generationen in Folge keine Verbesserung der Fitness größer $1 \cdot 10^{-4}$ [-] auftritt. Die Möglichkeiten zur Beeinflussung des Algorithmus durch den Benutzer wurden gegenüber dem bestehenden Kalibrierer nicht geändert. Weitere Parameter zur Steuerung sind innerhalb des Programmes hart definiert. Dies umfasst u.a. die Mutationsstrategie (DE/rand to best/1) und das Boomlevel ($1 \cdot 10^{-3}$ [-]). Das Boomlevel prüft für jede Generation die Streuung des Parameterraums aller Individuen um deren Mittelwert. Fällt diese Streuung unter das Boomlevel wird die Population

„aufgesprengt“ und durch eine neue Zufallspopulation ersetzt. Dabei wird das bis zu diesem Zeitpunkt beste Individuum anstelle eines Zufallsindividuum eingesetzt und die Populationsgröße bleibt unverändert. Durch diesen Schritt wird der Algorithmus gezwungen wieder neue Werte zu erforschen, während der bisherige Bestwert als Stütze verbleibt.

3.4.1.4 Fitnessfunktion

Die Fitnessfunktion dient als Bewertungsfunktion der Verbrauchsverteilung innerhalb des GA. Die Fitnessbewertung besteht, wie in Gleichung 3-3 ersichtlich, aus mehreren Variablen, welche sich kategorisieren lassen in Hydraulikparameter (F_P , F_Q , F_{negP}), Reportparameter (F_{misP} , F_{missQ}) und einen a-priori Anteil ($\lambda * F_{prior}$).

$$\min_x f(x) = F_P(x) + F_Q(x) + F_{negP}(x) + F_{misP}(x) + F_{missQ}(x) + \lambda * F_{prior}(x) \quad \text{Gleichung 3-3}$$

mit:

F	... Gesamtfitness
x	... Vektor der unbekannt Parameter
F_P	... Druckfehler
F_Q	... Durchflussfehler
F_{negP}	... Strafterm für negative Drücke
F_{missP}	... Strafterm für fehlende Drücke
F_{missQ}	... Strafterm für fehlenden Durchfluss
λ	... globaler Gewichtungsfaktor für die a-priori Regularisierung
F_{prior}	... Abweichung vom Zielanteil der Verbrauchsverteilung

Der gewählte Ansatz der Fitnessfunktion soll das Ziel erfüllen, die Druckdaten als Hauptzielgröße der Kalibrierung zu nutzen, jedoch auch die im Vorhinein ermittelte mögliche Verteilung der Verbraucher bis zu einem gewissen Grad zu berücksichtigen. Aus diesem Grund sind die Anteile der Abweichung vom Zielanteil der Verbrauchsverteilung mit Gewichtungsfaktoren versehen. Als Exponent b der Abweichung (vgl. Kapitel 2.3.2.5, Gleichung 2-6) wird für alle Fehlerterme der Wert 2 als die euklidische Distanz herangezogen. Ausnahme sind Strafterme für fehlende oder klar falsche Druckmessung (d.h. wenn das Druckergebnis in der Simulation negativ ausfällt, obwohl dies in den Messdaten nicht der Fall ist), welche dem entsprechenden Chromosom pauschal einen drastisch hohen Wert zuweisen. Dadurch wird der GA angeleitet, diese Extremwerte der Fitness nicht mehr in der weiteren Reproduktion zu verwenden.

Druckfehler F_P

Der Anteil des Druckfehlers an der Gesamtfitness wird durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Druckmessungen mit den simulierten Druckdaten erreicht. Die Druckmessungen werden aus der Szenariendatei ausgelesen und die simulierten Druckdaten werden durch OOPNET nach jeder Simulation ausgegeben.

$$F_P(x) = \sum_{j \in Sp} (P_{j,meas} - P_{j,sim}(x))^2 \quad \text{Gleichung 3-4}$$

mit:

- F_P ... Druckfehler
- Sp ... Menge der Druckmessungsknoten im Szenario
- $P_{j,meas}$... gemessener Druck am Knoten j [m]
- $P_{j,sim}$... simulierter Druck am Knoten j [m]

Durchflussfehler F_Q

Der Anteil des Durchflussfehlers an der Gesamtfitness wird durch die Gegenüberstellung der Durchflussmessung mit dem simulierten Durchfluss in der entsprechenden Kante erreicht. Die Durchflussmessung wird aus der Szenariendatei ausgelesen und der simulierte Durchfluss durch OOPNET nach jeder Simulation ausgegeben. Da die innerhalb der Simulation angesetzten Verbräuche direkt aus der Durchflussmessung des entsprechenden Szenarios abgeleitet werden, ist dieser Faktor nur als Sicherheitsebene relevant und sollte im Regelfall immer null sein.

$$F_Q(x) = \sum_{k \in Sp} (Q_{k,meas} - Q_{k,sim}(x))^2 \quad \text{Gleichung 3-5}$$

mit:

- F_Q ... Durchflussfehler
- Sp ... Menge der Durchflussmengen im Szenario
- $Q_{k,meas}$... gemessener Durchfluss innerhalb der Kante k [l/s]
- $Q_{k,sim}$... simulierter Durchfluss innerhalb der Kante k [l/s]

Strafterm für negativ simulierte Drücke F_{negP}

Für den Fall, dass in der Simulation an den Druckmessknoten negative Druckdaten erscheinen, wird der entsprechenden Simulation je Anzahl der negativen Druckdaten eine schlechtere Fitness über den zusätzlichen Strafterm ausgestellt.

$$F_{negP}(x) = 100 * \sum_{j \in S_p} P_{j,sim}(x) * \sigma(-P_{j,sim}(x)) \quad \text{Gleichung 3-6}$$

mit:

- F_{negP} ... Strafterm für negativ simulierte Druckdaten
- S_p ... Menge der Druckmessknoten im Szenario
- $P_{j,sim}$... simulierter Druck innerhalb des Knotens j [m]
- $\sigma(x)$... Sigmafunktion: $\sigma(x) = 1$ für $x > 0$

Strafterm für fehlende Druck- bzw. Durchflussdaten im Report F_{missP} / F_{missQ}

Für den Fall, dass die Simulation keine Druck- oder Durchflussdaten für den entsprechenden Knotenpunkt oder die entsprechende Durchflusskante ausgibt, wird der entsprechenden Simulation je Anzahl der fehlenden Reportdaten eine schlechtere Fitness über den zusätzlichen Strafterm ausgestellt.

$$F_{missP}(x) = 1000 * \sum_{j \in S_p} P_{j,sim}(x) |_{p=?} \quad \text{Gleichung 3-7}$$

$$F_{missQ}(x) = 1000 * \sum_{k \in S_p} Q_{k,sim}(x) |_{q=?} \quad \text{Gleichung 3-8}$$

mit:

- F_{missP} ... Strafterm für fehlende Druckdaten
- F_{missQ} ... Strafterm für fehlende Durchflussdaten
- S_p ... Menge der Druckmessknoten bzw. Durchflussmessungen im Szenario
- $P_{j,sim}$... simulierter Druck innerhalb des Knotens j [m]
- p ... Ergebnis der Druckdaten
- $Q_{k,sim}$... simulierter Durchfluss innerhalb der Kante k [l/s]
- q ... Ergebnis der Durchflussdaten

Abweichung vom Zielanteil $\lambda * F_{prior}$

Der letzte Ausdruck der Fitnessfunktion soll das Kalibrierungsprogramm in einen gewissen Rahmen einschränken, welcher um eine der zuvor ermittelten Verbrauchsverteilungen angeordnet ist. Zur Auswahl stehen die in Kapitel 3.2 ermittelten Verbrauchsverteilungen „Gebäudeklasse“, „Fläche“ und „Gleichverteilt“.

Da dem Programm genug Raum für Lösungen außerhalb dieser a-priori Verteilung gewährt werden muss, war die Einführung von Gewichtungsfaktoren notwendig. Der globale Gewichtungsfaktor λ reduziert die Gesamtgewichtung des a-priori Anteils, um dieser Anforderung gerecht zu werden.

Für die Annahme der „Gebäudeklasse“ können weiters lokale Gewichtungsfaktoren w_k Unsicherheiten der a-priori Ermittlung berücksichtigen und innerhalb der Konfigurationsdatei für jede Gebäudeklasse separat gesetzt werden.

$$\lambda * F_{prior}(x) = \lambda * \sum_{k \in K} w_k (p_k - q_k(x))^2 \quad \text{Gleichung 3-9}$$

$$p_k = \frac{Q_k}{\sum_{c \in K} Q_c} \quad \text{Gleichung 3-10}$$

mit:

λ ... globaler Gewichtungsfaktor für die a-priori Regularisierung

F_{prior} ... Strafterm für Abweichung vom Zielwert

K ... Menge der Kategorien

w_k ... lokaler Gewichtungsfaktor der Kategorie k (ausschließlich für „Gebäudeklasse“)

p_k ... simulierter Anteil am Verbrauch der Kategorie k

q_k ... a-priori Zielanteil am Verbrauch der Kategorie k (vgl. Gleichung 3-11)

Q_k ... simulierter Gesamtverbrauch der Kategorie k [l/s]

Q_c ... simulierter Gesamtverbrauch aller Kategorien [l/s]

Die Variable für den simulierten Verbrauchsanteil p_k ergibt sich aus der Summe der Verbräuche der jeweiligen Gruppe. Gleichermaßen ergibt sich der Zielanteil q_k aus der Summe der Einwohnerwerte der jeweiligen Gruppe. Die Gruppe ergibt sich dabei aus einer Unterteilung, analog zu den Unterteilungen der Gruppierungskategorien (vgl. Tabelle 3-6, Kapitel 3.5.1.2).

$$q_k = \frac{EW_k}{\sum_{c \in K} EW_c} \quad \text{Gleichung 3-11}$$

mit:

q_k ... a-priori Anteil am Verbrauch der Kategorie k

EW_k ... Einwohnerwert der Kategorie k aus Metadaten [-]

K ... Menge der Kategorien

EW_c ... Einwohnerwert aller Kategorien aus Metadaten [-]

Die Abweichung vom Zielanteil kann als Anteil der Fitnessfunktion deaktiviert werden. Dies geschieht über Eingaben in die Konfigurationsdatei, entweder durch das Setzen des Parameters *use_apriori* = *false* oder durch Setzen des globalen Gewichtungsfaktors λ auf Null.

3.4.1.5 Beschreibung des a-priori Ansatzes innerhalb des Kalibrierers

Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, handelt es sich bei der Kalibrierung um ein unterbestimmtes inverses Problem sobald die Anzahl der im WVN positionierten Messsensoren geringer ist als die Anzahl der zu kalibrierenden Sensoren. Durch die Einführung von Nebenbedingungen kann trotz einer geringen Anzahl

von Sensoren die Anzahl der Unbekannten reduziert werden. Der in dieser Arbeit verwendete a-priori Fitnessstern folgt dieser Logik und ermöglicht neben der Verwendung von Messwerten (Druck und Abfluss) auch die Einbringung von im Vorherein ermittelten Informationen. Durch diese Nebenbedingung fordert der Fitnessstern die Kalibrierung auf, die Verbrauchsverteilung in einem plausiblen Rahmen zu halten, indem sie sich an einer a-priori Zielverteilung orientiert. Die im Vorherein ermittelten Verbrauchswerte basieren dabei auf der Annahme, dass gleichartige Verbrauchergruppen ein vergleichbares Verbrauchsverhalten aufweisen. (Sanz und Pérez 2014)

Die Annahmen der Verbrauchsverteilungen basieren dabei rein auf statistischen Auswertungen und Annahmen (vgl. Kapitel 3.1.1 und 3.2). Der a-priori Ansatz nutzt die ermittelten EW, um eine plausible Verteilung des Verbrauchs zu erzielen und um zu verhindern, dass der Kalibrierer zu Extremverbräuchen einzelner Gruppen greift. Die a-priori Annahme kann dabei auf die ermittelten EW für Gebäudeklassen, dem Produkt aus Geschoßanzahl und -fläche zugreifen. Weiters ist eine einheitliche Verbrauchsverteilung („EW_equal“) verfügbar, um die Auswirkungen der anderen Annahmen betrachten zu können. Die Auswahl und Gruppierung der a-priori Verteilung kann unabhängig von der Gruppierung der eigentlichen Verbraucher gesetzt werden, um unterschiedliche Kombinationen untersuchen und auswerten zu können. Aufgrund der rein statistischen Grundlage der Verbrauchsannahmen ist im Zuge der Vorkalibrierung besonders zu prüfen, welchen Einfluss die Gewichtung des a-priori Anteils an der Fitness hat.

3.4.2 Aufbau des neuen Kalibrierers

Der neue Verbrauchskalibrierer nutzt die Logik und Teile des Codes der Unterprogramme *prepare.py*, *calibrate.py* und *result.py* des bestehenden Kalibrierers. Um, im Gegensatz zum bestehenden Rohrrauigkeitskalibrierer, mehrere Szenarien unabhängig voneinander und nacheinander berechnen zu können, wurde für die genannten Unterprogramme ein neues Steuerungsskript geschrieben (*frame.py*). Dieses Skript ersetzt das Skript *main.py* aus dem bestehenden Kalibrierer und hat zum Ziel, jedes Szenario nacheinander und unabhängig voneinander zu berechnen, wobei für jeden Rechendurchlauf eine Lösung bzw. ein lokales Optimum versucht wird zu finden. Die Lösung und weitere Simulationsdaten dieses Szenarios werden nach jedem Rechenlauf in mehreren fortlaufenden Datenloggern protokolliert. Die Logger erfassen dabei u.a. Daten über die Fitness, Gruppierung, Gruppendaten und -Verbräuche, Individualverbräuche, Druckdaten und -abweichungen sowie eindeutig zuordenbare Indizes des jeweiligen Rechenlaufes. Jedes Szenario kann im Zuge der Kalibrierung mehrmals und unabhängig wiederholt werden, um die Stabilität der Ergebnisse überprüfen zu können. Für die vorliegende Arbeit wurde jedes Szenario mehrfach wiederholt (vgl. Kapitel 3.5) und die Daten mittels eindeutig zuordenbarer Szenarienbezeichnung sowie einer, je Szenario neustartenden, Lauf-ID gespeichert.

Die Erstellung des neuen Kalibrierers sowie Anpassungen an den Unterprogrammen des bestehenden Kalibrierers wurden mit Hilfe von ChatGPT umgesetzt. Im Folgenden wird auf die wesentlichen Änderungen eingegangen, und es werden einzelne repräsentative Prompts angegeben, die den Erstellprozess mit Hilfe von ChatGPT dokumentieren.

3.4.2.1 `frame.py`

Das Steuerungsskript wurde von Grund auf neu aufgebaut und ersetzt das Skript `main.py` des Rohrrauigkeitskalibrierers. Es übernimmt die Ansteuerung der Unterprogramme und lädt zu Beginn einer gesamten Kalibrierung (=Batch) die vorbereitenden Daten aus dem `prepare.py` Skript. Dieser Schritt muss nur einmalig ausgeführt werden, da sich die Eingangsdaten je Batch nicht ändern. Anschließend ruft es im Zuge von Schleifen alle definierten Szenarien auf und kalibriert jedes einzelne nacheinander und ggf. mehrmals. Es speichert die Ergebnisse in Loggerdateien. Im Zuge der Ergebnislogger wurde auch eine Auto-Start Funktion implementiert, welche es bei einem Abbruch während der Kalibrierung ermöglicht, diese wieder aufzunehmen.

Da der vorliegende Kalibrierer mitunter hunderte Szenarien je Batch kalibrieren muss, wurden auch Schritte zum harten Durchsetzen von Multiprocessing und globalen Workerpools innerhalb des GA sowie dem regelmäßigen Schließen und Reinigen der Workerpools gesetzt. Dies dient der Effizienz des Kalibrierers und zur Vermeidung von Überladung der Rechenkapazitäten mit alten, nicht mehr genutzten Daten im Zuge einer langen Kalibrierung. Nichtsdestotrotz kam es innerhalb des OOPNET Aufsatzes zu einem Laufzeitdrift, wobei die Ursache hierfür nicht gefunden werden konnte. Deshalb wurde weiters eine Auto-Restart Funktion implementiert, welche die gesamte Kalibrierung und Rechenauslastung in zuvor definierten Intervallen von abgeschlossenen Szenarien zurücksetzt und mit Hilfe der Auto-Start Funktion die Kalibrierung wieder nahtlos aufnimmt.

Erstelle ein Batch-Framework in Python, für die Steuerung und Wiederholung von Kalibrierungen mittels GA. Das Programm soll eine Liste von Szenarien aus einer Konfigurationsdatei sowie dem darin definierten Unterordner einlesen und die wiederholte Kalibrierung je Szenario steuern, jedes Szenario kann dabei x-fach wiederholt werden. Implementiere eine Resume/Restart Mechanik, sowie dazugehörigen Zwischenstands-Logger. Nutze für alle Kalibrierungen einen globalen Multiprocessing-Pool zur Verwendung über mehrere Szenarien. Stelle sicher, dass der Pool sauber geschlossen wird, wenn a) das Programm erfolgreich beendet wird b) zu jedem Stundenwechsel der Szenarien oder c) vor jeder Initiierung der Restart Mechanik.

Prompt 3-2: Erstellung des Steuerungsprogrammes `frame.py`

3.4.2.2 prepare.py

Das Vorbereitungsskript liest die Konfigurationsdatei, die Metadaten sowie das Inputfile des hydraulischen Modells ein und gruppiert die Verbraucher anhand der Definition der Konfigurationsdatei. Aufgrund der geänderten Eingangsparameter wurden für die Verwendung innerhalb des Verbrauchskalibrierers Anpassungen beim Einlesen der Metadaten sowie innerhalb der Gruppierungslogik vorgenommen.

3.4.2.3 calibrate.py

Das Skript zur Änderung der Kalibrierung erforderte grundlegende Anpassungen im Bereich der Logik, um das Kalibrierungsziel von der Rohrrauigkeit hin zu den Verbrauchsgruppen zu ändern. Neben geänderten Parametern, welche an den GA übergeben werden, ist besonders eine geänderte Fitnesslogik und -funktion maßgebend. Eine ausführliche Erklärung und Aufschlüsselung der neuen Fitnessfunktion ist in Kapitel 3.4.1.4 zu finden.

Zusätzlich zu den neuen Verbrauchsgruppen, wurde der Versuch unternommen, einen globalen Verlustanteil einzuführen. Dieser Verlustanteil sollte ebenfalls als globaler Verbraucher agieren, indem er einen Verlustwert kalibriert, welcher vom Gesamtzufluss in das System abgezogen wird, bevor der übrigbleibende Verbrauch auf die regulären Verbraucher aufgeteilt werden würde. In Vorversuchen zeigte dieser Ansatz jedoch die Tendenz, den Verlustbeiwert immer gegen 0 bzw. das definierte Minimum kalibrieren zu wollen. Aufgrund dessen und da davon auszugehen ist, dass eine Verringerung der Zuflussmenge nicht das hydraulische Verhalten von einem oder mehreren Leckagen innerhalb des Systems näherungsweise abbilden kann, wurde dieser Ansatz wieder verworfen und wird im Zuge dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

Weiters wurden innerhalb dieses Skripts Parameter für einen durch Stagnation bedingten Abbruch eines einzelnen Rechenlaufs des EA gesetzt. Die Einführung der Abbruchbedingung erforderte geringe Anpassungen bzw. Erweiterungen innerhalb des zugrunde liegenden EA, welcher über das Unterprogramm *differential_evolution.py* gesteuert wird.

3.4.2.4 result.py

Die bestehenden Funktionen des Unterprogramms (vgl. Anhang A) blieben unberührt, jedoch wurden sie für die Verbrauchskalibrierung über die Konfigurationsdatei inaktiv gesetzt. Das Skript wurde um Funktionen erweitert, welche die Ergebnisse der Kalibrierung je Rechenlauf in mehreren Datenloggern abspeichern. Im Gegensatz zum bestehenden Kalibrierer werden die Funktionen des Skripts direkt durch das Unterprogramm *calibrate.py* in jedem Rechenlauf aufgerufen.

3.5 Kalibrierungsversuche

Der Kalibrierungsablauf bestand aus zwei Phasen. In einer ersten Phase wurden Vorkalibrierungen mit unterschiedlichen Parameterkombinationen durchgeführt, um die Auswirkungen unterschiedlicher Parameter ersichtlich zu machen. Anhand der Daten der Vorkalibrierung wurden anschließend Kalibrierungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt. Das Ziel der abschließenden Kalibrierungen ist die Beantwortung der Fragen, welche Auswirkungen unterschiedliche Gruppierungen auf die Verbrauchsparameter und deren Plausibilität haben.

3.5.1 Vorkalibrierung

Wie anhand des von Lippacher (2018) auf Rohrraugigkeiten kalibrierten Modells festgestellt wurde, treten innerhalb dieses Netzes die größten Abweichungen der Druckdifferenz in den Morgenstunden zwischen 06:00 – 08:00 auf. Aus diesem Grund wurden für diese Vorkalibrierungen nur mit den Szenarien der Uhrzeiten 07:00 und 08:00 durchgeführt, um auf den Fall der bisherigen größten Abweichung zu kalibrieren. Alle Kalibrierungen der Vorkalibrierung wurden mit jeweils 5 Wiederholungen je Szenarien durchgeführt, um im Sinne einer Sensitivitätsanalyse die Auswirkungen der untersuchten Parameter zu bestimmen. Die gewählte Anzahl von Wiederholungen stellt einen Kompromiss dar zwischen vielen Wiederholungen, um stabile und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, und um die Rechendauer vieler Kombinationen nicht ausufern zu lassen.

Die Vorkalibrierung wurde in drei Teilen durchgeführt, wobei im Zuge des ersten Teiles die Auswirkungen der a-priori Verbrauchsannahme untersucht wurden. Innerhalb des zweiten Teiles wurden Untersuchungen zu den Gruppierungsmöglichkeiten durchgeführt und abschließend wurden in Teil 3 die besten Parameterkombinationen aus Teil 1 und 2 überprüft.

Im Anschluss wurden mit den besten Parameterkombinationen aus der Vorkalibrierung sechs Langzeitkalibrierungen durchgeführt. Ziel der Langzeitkalibrierungen war es, nachzuweisen, dass die Druckdifferenzen über längere Zeiträume stabil bleiben sowie eine Überprüfung der Plausibilität der Ganglinien der ermittelten Verbrauchsverteilungen.

3.5.1.1 Vorkalibrierung Teil 1 (a-priori)

Im ersten Teil der Vorkalibrierung wurden die Auswirkungen der unterschiedlichen a-priori Verbrauchannahmen anhand von unterschiedlichen Gewichtungen innerhalb des Fitnessterms untersucht. Als Vergleichskalibrierung diente eine Kalibrierung der Verbrauchsverteilungen ohne aktiven a-priori Fitnessterm. In Tabelle 3-5 sind die genauen Parametereinstellungen der Vorkalibrierung ersichtlich.

Tabelle 3-5: Übersicht des Versuchsprogrammes der Vorkalibrierung Teil 1 (a-priori)

		Vorkalibrierung Teil 1 (a-priori)															
	Nr.	V00	A01	A02	A03	A04	A05	A06	A07	A08	A09	A10	A11	A12	A13	A14	A15
Hydraulik & Initialisierung	Mode	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs
	Q_Min [l/s]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Q_Max [l/s]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	EW (Initiale Verteilung)	-	Cat.	Cat.	Cat.	Cat.	Cat.	Area	Area	Area	Area	Area	Equal	Equal	Equal	Equal	Equal
Gruppe	Klasse	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]
	Geschoße	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fläche	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Region	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
a-priori Zielanteil	Zielgröße	-	Cat.	Cat.	Cat.	Cat.	Cat.	Area	Area	Area	Area	Area	Equal	Equal	Equal	Equal	Equal
	globale Gewichtung	0	0,01	0,1	1	10	100	0,01	0,1	1	10	100	0,01	0,1	1	10	100
lokale Gewichtung "Kategorie"	(01) lokale Gewichtung	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	(02) lokale Gewichtung	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	(03) lokale Gewichtung	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	(04) lokale Gewichtung	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Cat. ... "Gebäudeklasse"

Area ... "Fläche"

Equal ... "Gleichverteilung"

Für alle Vorkalibrierungen wurden grundsätzlich die gleichen Parameter gesetzt, um klare Aussagen über die Auswirkung der a-priori Annahmen treffen zu können. Im Zuge der Vorkalibrierung wurden die Auswirkungen der Verbrauchsannahmen Kategorie (Cat.), Fläche (Area) und Gleichverteilt (Equal) untersucht, wobei sowohl die initiale Verbrauchsannahme (vgl. Kapitel 3.4.1.2) als auch die Abweichung vom Zielanteil der Fitnessfunktion (vgl. Kapitel 3.4.1.4) auf die jeweilige Annahme eingestellt wurden.

Für jede diese Annahmen wurden je 5 Kalibrierungen mit abweichenden globalen Gewichtungsfaktoren λ durchgeführt. Für die lokalen Gewichtungsfaktoren der Annahme „Gebäudeklasse“ wurden für die Verbraucher der Klassen 1 (Einfamilienhäuser) und 2 (Reihen-/Wohnhäuser) ein Wert von 1,0 angesetzt, während für die Verbraucher der Klassen 3 (Gasthaus) und 4 (Spielplatz/WC) ein Wert von 0,6 angenommen wurde. Durch die geringere Gewichtung dieser beiden Klassen wurde versucht, die erhöhten Unsicherheiten dieser beiden Kategorisierungen zu berücksichtigen. Für die Annahme „Fläche“ wurde der standardmäßige lokale Gewichtungsfaktor von 1,0 genutzt, da zwischen den Unsicherheiten der unterschiedlichen Klassen keine Unterschiede bestehen. Die Gruppierung zur Ermittlung der Zielanteile (vgl. Kapitel 3.4.1.4) innerhalb dieser Verbrauchsannahme folgte dabei der gleichen Kategorisierung wie auch nach der Gruppierung der Fläche nach Tabelle 3-6, Kapitel 3.5.1.2. Ein standardmäßiger lokaler Gewichtungsfaktor von 1,0 galt ebenfalls für die Annahme „Gleichverteilung“, da es hierbei nur eine einzige Klasse der a-priori Fitnessuntersuchung gibt.

3.5.1.2 Vorkalibrierung Teil 2 (Gruppierung)

Anhand der Erkenntnisse des ersten Teils der Vorkalibrierung erfolgt die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Gruppierungsmöglichkeiten. Für die Gruppierungen können die in Kapitel 3.1.1 ermittelten Parameter kombiniert werden. Innerhalb der einzelnen Gruppen gelten die in Tabelle 3-6 aufgeführten Kategorisierungsgruppen und -bereiche.

Tabelle 3-6: Umfang der Gruppierungsparameter

Kategorie	Gesamtheit der Kategorisierung	Gruppierungsbereiche
Gebäudeklasse	[1,2,3,4]	[alle] [1,2,3] [1,2]
Geschoßanzahl	[1,2,3]	[<u>alle</u>]
Wohnfläche	[0-100, 100-200, 200-300, 300-400, 400-500, 500-600, 600-700, 700-800, 800-900, 900-1000, 1000-1600]	[<u>alle</u>]
Region	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]	[<u>alle</u>]

Auf Grundlage dieser Gruppierungsbereiche ergeben sich die in Tabelle 3-7 aufgezeigten Kombinationsmöglichkeiten für den zweiten Teil der Vorkalibrierung. Für die Parameter der a-priori Verbrauchsannahme wurde nach Auswertung der Ergebnisse der Vorkalibrierung die bestgereichte Parameterkombination genutzt (Anm.: Vorkalibrierung A04, vgl. Kapitel 4.2.1.2). Diese Parameterkombination des ersten Teils wurde ebenfalls innerhalb des zweiten Teils mit dem Augenmerk der Gruppierung bewertet.

Tabelle 3-7: Übersicht des Versuchsprogrammes der Vorkalibrierung Teil 2 (Gruppierung)

		Teil 1		Vorkalibrierung Teil 2 (Gruppierung)												
Nr.		V00	A04	G01	G02	G03	G04	G05	G06	G07	G08	G09	G10	G11	G12	G13
Hydraulik & Initialisierung	Mode	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs
	Q_Min [l/s]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Q_Max [l/s]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	EW (Initiale Verteilung)	-	Cat.	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat
Gruppe	Klasse	[alle]	[alle]	[1,2,3]	[1,2]	-	-	-	[alle]	[1,2,3]	[1,2]	[alle]	[1,2,3]	[1,2]	-	-
	Geschoße	-	-	-	-	[alle]	-	-	-	-	-	-	-	-	[alle]	-
	Fläche	-	-	-	-	-	[alle]	-	[alle]	[alle]	[alle]	-	-	-	-	[alle]
	Region	-	-	-	-	-	-	[alle]	-	-	-	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]	[alle]
a-priori Zielanteil	Zielgröße	-	Cat.	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat	Cat
	globale Gewichtung	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
lokale Gewichtung "Kategorie"	(01) lokale Gewichtung	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	(02) lokale Gewichtung	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	(03) lokale Gewichtung	-	0,6	0,6	0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0	0,6	0,6	0	0,6	0,6
	(04) lokale Gewichtung	-	0,6	0	0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0	0	0,6	0	0	0,6

Cat. ... "Gebäudeklasse"

Area ... "Fläche"

Equal ... "Gleichverteilt"

Die Parameter der lokalen Gewichtungsfaktoren für die Gebäudeklassen 3 und 4 orientieren sich am Vorhandensein der jeweiligen Gebäudeklasse in den Gruppierungsmöglichkeiten. Wird eine der beiden Gebäudeklassen bewusst nicht gruppiert, werden die jeweiligen Gewichtungsfaktoren auf 0 gesetzt, um auf die Abweichung vom Zielanteil keinen Einfluss zu nehmen.

3.5.1.3 Vorkalibrierung Teil 3 (Kombination)

Im Zuge des abschließenden Teiles der Vorkalibrierung wurden die Erkenntnisse aus den ersten beiden Teilen herangezogen mit dem Ziel Kombinationen der jeweils bestgereichten a-priori Verbrauchsannahmen und Gruppierungskombinationen zu vergleichen. Durch diesen Schritt sollte untersucht werden, ob eine der getroffenen unveränderten Parameterauswahlen der jeweiligen Vorkalibrierung einen unbemerkten Einfluss auf die Ergebnisse hatten.

Die Auswahl der Kalibrierungsparameter erfolgte durch die Auswertungen der Vorkalibrierung Teil 1 und 2. Aus den Vorkalibrierungen des ersten bzw. zweiten Teiles wurden die jeweils bestgereichten 3 bzw. 4 Parameterkombinationen gewählt und entsprechend der Matrix aus Tabelle 3-8 miteinander kalibriert. Für die Parameterkombination aus der Vorkalibrierung Teil 1 wurde jeweils die am besten gereichte Parameterkombination je Verbrauchsannahme (Gebäudeklasse, Fläche und Gleichverteilt) herangezogen. Für die Parameterkombinationen der Vorkalibrierung Teil 2 wurden die vier insgesamt am besten gereichten Gruppierungen herangezogen.

Tabelle 3-8: Matrix der Vorkalibrierung Teil 3 (Kombination)

		Verbrauchsannahme		
		Bestger. „Klasse“ A(K)	Bestger. „Fläche“ A(F)	Bestger. „Gleichvert.“ A(F)
Gruppierung	#1 Gruppe (G04)	A(K) x G1	A(F) x G1	A(G) x G1
	#2 Gruppe (G07)	A(K) x G2	A(F) x G2	A(G) x G2
	#3 Gruppe (G08)	A(K) x G3	A(F) x G3	A(G) x G3
	#4 Gruppe (G10)	A(K) x G3	A(F) x G3	A(G) x G3

Anhand dieser Kombinationsmatrix ergibt sich im Detail das in Tabelle 3-9 angeführte Versuchsprogramm für den Teil 3 der Vorkalibrierungen. Anzumerken ist, dass es sich bei den Kalibrierungen K01 bis K04 um die Kalibrierungen G04, G07, G08 und G10 handelt. Die Ergebnisse dieser Kalibrierungen wurden aus dem zweiten Teil der Vorkalibrierung übernommen.

Tabelle 3-9: Übersicht des Versuchsprogrammes der Vorkalibrierung Teil 3 (Kombination)

		Vorkalibrierung Teil 3 (Kombination)												
Nr.	V00	K01	K02	K03	K04	K05	K06	K07	K08	K09	K10	K11	K12	
Hydraulik & Initiati-sierung	Mode	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	abs	
	Q_Min [l/s]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Q_Max [l/s]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	
	EW (Initiale Verteilung)	-	Cat.	Cat.	Cat.	Cat.	Area	Area	Area	Area	Equal	Equal	Equal	Equal
Gruppe	Klasse	[alle]	-	[1,2,3]	[1,2]	[1,2,3]	-	[1,2,3]	[1,2]	[1,2,3]	-	[1,2,3]	[1,2]	[1,2,3]
	Geschoße	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Fläche	-	[alle]	[alle]	[alle]	-	[alle]	[alle]	[alle]	-	[alle]	[alle]	[alle]	-
	Region	-	-	-	-	[alle]	-	-	-	[alle]	-	-	-	[alle]
a-priori Zielanteil	Zielgröße	-	Cat.	Cat.	Cat.	Cat.	Area	Area	Area	Area	Equal	Equal	Equal	Equal
	globale Gewichtung	0	10	10	10	10	1	1	1	1	100	100	100	100
lokale Gewichtung "Kategorie"	(01) lokale Gewichtung	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	(02) lokale Gewichtung	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	(03) lokale Gewichtung	-	0,6	0,6	0	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-
	(04) lokale Gewichtung	-	0,6	0	0	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-

Cat. ... "Gebäudeklasse"

Area ... "Fläche"

Equal ... "Gleichverteilt"

3.5.2 Langzeitkalibrierungen

Im Anschluss an die Vorkalibrierung wurden weitere Kalibrierungen durchgeführt. Die Parameterwahl richtete sich innerhalb dieser Kalibrierung nach den Ergebnissen der Vorkalibrierung und wurden dabei für die Uhrzeiten von 05:00 bis 23:00 für alle entwickelten Szenarien (vgl. Kapitel 3.3) innerhalb des Zeitraumes 30.05.2016 – 03.07.2016 durchgeführt.

Das Ziel dieser Langzeitkalibrierungen sind Aussagen über die Plausibilität der kalibrierten Verbrauchsverteilungen sowie die Überprüfung und der Vergleich der Stabilität des Kalibrierers über einen längeren Zeitraum mit den Ergebnissen der Vorkalibrierungen.

Im Zuge der Auswertung der Langzeitkalibrierungen wurde festgestellt, dass die Untersuchung der Verbrauchsanteile und -werte, für die im Zuge der Vorkalibrierung ermittelten Kalibrierungen, aufgrund einer großen Anzahl an Gruppierungen schwierig umzusetzen ist. Dies liegt am gewählten Bewertungsverfahren (vgl. Kapitel 3.6.2), welches zwar die gewählten Parametereinstellungen objektiv bewerten kann, nicht jedoch eine objektive Bewertung der Plausibilität der Verbrauchsergebnisse selbst gewährt. Aufgrund dessen wurden im Zuge der Langzeitkalibrierung zwei weitere Kalibrierungen eingeführt. Diese beiden Kalibrierungen Z01 und Z02 nutzen die Verbrauchsannahmen der bestgereihten Kalibrierung der Vorkalibrierung Teil 3. Als Gruppierungseinstellungen nutzen sie die vereinfachte Gruppierung ausschließlich nach dem Parameter der Gebäudeklasse. Die Gebäudeklasse 4 wurde dabei in beiden Fällen ausgeschlossen, da zum einen Kalibrierungen mit dieser Kategorie auch im Zuge der Vorkalibrierungen jeweils schlechter gewertet wurde als Kalibrierungen ohne diese Kategorie. Weiters wird anhand der gewählten Gruppierungen für Z01 und Z02 untersucht welchen Einfluss das einzelne Verbrauchsobjekt der Gebäudeklasse 3 hat. Die detaillierten Parametereinstellungen aller Langzeitkalibrierungen sind in Abbildung 3-5 ersichtlich.

		Langzeitkalibrierung					
Nr.		K02	K03	K09	K12	Z01	Z02
Hydraulik & Initialisierung	Mode	abs	abs	abs	abs	abs	abs
	Q_Min [l/s]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Q_Max [l/s]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	EW (Initiale Verteilung)	Cat.	Cat.	Equal	Equal	Cat.	Cat.
Gruppe	Klasse	[1,2,3]	[1,2]	-	[1,2,3]	[1,2,3]	[1,2]
	Geschoße	-	-	-	-	-	-
	Fläche	[alle]	[alle]	[alle]	-	-	-
	Region	-	-	-	[alle]	-	-
a-priori Zielanteil	Zielgröße	Cat.	Cat.	Equal	Equal	Cat.	Cat.
	globale Gewichtung	10	10	100	100	10	10
lokale Gewichtung "Kategorie"	(01) lokale Gewichtung	1	1	-	-	1	1
	(02) lokale Gewichtung	1	1	-	-	1	1
	(03) lokale Gewichtung	0,6	0	-	-	0,6	0
	(04) lokale Gewichtung	0	0	-	-	0	0

Cat. ... "Gebäudeklasse"

Equal ... "Gleichverteilt"

Abbildung 3-5: Übersicht der Langzeitkalibrierungen

3.6 Auswertung

Als Ergebnisse der Kalibrierung werden für jeden Rechenlauf mehrere Loggerdateien angelegt. Die Loggerdateien enthalten neben den Ergebnissen weitere Einträge zur eindeutigen Zuordnung zu Szenario und laufender Nummer der Kalibrierung bei mehrfacher Kalibrierung eines Szenarios (=run_id). Die Loggerdateien bestehen im Detail aus:

- *diagnostics.csv*: Reiner Diagnostiklogger zur Überwachung von u.a. Rechenleistungen und Laufzeitdrifts. Für die Auswertung der Kalibrierergebnisse nicht notwendig.
- *group_log.csv*: Ergebnislogger, der je kalibriertem Einzelszenario für jede Gruppe der Parametergruppierung eine Ergebniszeile schreibt. Die Ergebnisse umfassen u.a. Gruppen- und Individualverbrauch sowie Anzahl der Verbraucher in der entsprechenden Gruppe.
- *Laufzeit.csv*: Reiner Diagnostiklogger, der die Laufzeit jedes gänzlich abgeschlossenen Szenarios (beinhaltet alle Wiederholungen eines Szenarios) erfasst. Für die Auswertung der Kalibrierergebnisse nicht notwendig.
- *pressure_log.csv*: Ergebnislogger, der je kalibriertem Einzelszenario für jeden Druckmesspunkt innerhalb des Szenarios eine Ergebniszeile schreibt. Die Ergebnisse umfassen die gemessene Druckhöhe laut dem Szenario und die simulierte Druckhöhe.

- *run_log.csv*: Ergebnislogger, der je kalibriertem Einzelszenario eine Zusammenfassung als Ergebniszeile schreibt. Die Ergebnisse umfassen u.a. die Fitness, gemessenen und simulierten Zufluss, die kalibrierten Gruppenverbräuche und Auswertung der Druckdifferenzen.

Anhand dieser Daten erfolgt die Auswertung der Kalibrierungen wie in den folgenden Unterkapitel beschrieben.

3.6.1 Sensitivitätsanalyse

Zur Bestimmung des Einflusses unterschiedlicher Parameter und Gewichtungsfaktoren wurde im Zuge der Vorkalibrierung eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Diese betrifft die Vorkalibrierung der a-priori Verbrauchsannahmen sowie deren globale Gewichtungsfaktoren und die unterschiedlichen Gruppierungsmöglichkeiten. Im Zuge der Sensitivitätsanalyse wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Parametereinstellungen geprüft. Um die Nachvollziehbarkeit der Auswirkungen auf das Gesamtergebnis zu gewährleisten, wurde die Vorkalibrierung in mehrere Teile unterteilt, wobei immer nur einzelne Parameter gegeneinander verglichen wurden (vgl. Kapitel 3.5.1). Die Auswertung der Sensitivitätsanalyse erfolgte mittels mulikriterieller Entscheidungsanalyse und wird in Kapitel 3.6.2 beschrieben.

3.6.2 Multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDA)

Im Zuge aller Kalibrierungen erfolgt eine Auswertung anhand einiger Schlüsselparameter im Zuge einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse (engl.: *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA)). Im Zuge der MCDA werden Ergebnisse mehrerer Parameter untersucht und entsprechend einer vorher festgelegten Entscheidungsmatrix bewertet. (Taherdoost und Madanchian 2023)

Die MDCA diente im Zuge der Vorkalibrierung als eine Bewertungsmöglichkeit der Auswirkungen der Sensitivitätsanalyse und wurde für alle Teile der Vorkalibrierung angewendet. Die Ergebnisse lassen sich thematisch in die Bereiche Fitness, Druckabweichungen, Verbrauchsverteilung und Ressourcen einteilen. Das Hauptaugenmerk der Vorkalibrierung lag dabei auf den Bereichen Fitness und Druckabweichungen. Im Zuge der Vorkalibrierung sind Aussagen über die Plausibilität der Verbrauchsverteilungen aufgrund des gewählten Kalibrierzeitraums von 2 Stunden nur begrenzt möglich, weshalb das Hauptaugenmerk dieses Bereichs auf der Stabilität der Verteilungen lag.

Aufgrund der mehrfachen Berechnung jedes Szenarios erfolgte die Aggregation der unterschiedlichen Ergebniswerte zuerst über alle Runs eines Szenarios, bevor anschließend die erforderlichen Ergebnisse über alle Szenarien aggregiert wurden, um Gesamtkennwerte zu erhalten. Alle Ergebniswerte für die MCDA wurden über alle kalibrierten Stunden aggregiert. Die bewerteten Parameter je

Ergebnisbereich werden in den folgenden Unterkapiteln erklärt, eine Zusammenfassung inklusive gewählter Bewertungsfaktoren ist in Tabelle 3-10 ersichtlich.

Tabelle 3-10: Bewertungsparameter der MCDA

Ergebnisbereich	Parameter	Bewertungsfaktor
Fitness	Fitness _(Median)	2,0x
	Fitness _(IQR)	1,0x
	Fitness _(Std)	1,0x
Druckabweichung	Druckabweichung _(Gesamt, Median)	2,0x
	Druckabweichung _(Gesamt, IQR)	2,0x
	Druckabweichung _(Sensor, Median)	1,0x
Verbrauchsverteilung	Verbrauchsverteilung _(Median der Std, alle Gruppen)	*~0,6x
	Verbrauchsverteilung _(CV)	*~0,6x
Ressourcen	Laufzeit	*~0,6x

* ... reduziert; genaue Gewichtung abhängig von Anzahl der jeweiligen Vergleichskalibrierungen in der Vorkalibrierung

In der folgenden Tabelle 3-11 werden die absoluten Bewertungswerte, in Abhängigkeit zur Anzahl der durchgeführten Kalibrierungen dargestellt. Im Falle einer erforderlichen eindeutigen Bestreihung mit jedoch zwei punktegleichen Parameterkombinationen wurde jene Kombination bevorzugt, welche die kürzere Laufzeit aufweist, um bei vergleichbaren Bewertungen Ressourcen und Rechenleistung zu sparen.

In den Ergebnistabellen werden die Druckabweichungen als positive oder negative reelle Werte dargestellt. Die Auswertung der Abweichungen erfolgte jedoch über den Betragswert.

Tabelle 3-11: Absolute Bewertungswerte (MCDA) der Vorkalibrierungen

	Vorkalibrierung		
	Teil 1	Teil 2	Teil 3
Fitness _(Median)	2 - 10	2 - 30	2 - 26
Fitness _(IQR)	1 - 5	1 - 15	1 - 13
Fitness _(Std)	1 - 5	1 - 15	1 - 13
ΔP _(Gesamt, Median)	2 - 10	2 - 30	2 - 26
ΔP _(Gesamt, IQR)	2 - 10	2 - 30	2 - 26
ΔP HG3835 _(Median)	1 - 5	1 - 15	1 - 13
ΔP HG3933 _(Median)	1 - 5	1 - 15	1 - 13
ΔP HG4162 _(Median)	1 - 5	1 - 15	1 - 13
ΔP HG4383 _(Median)	1 - 5	1 - 15	1 - 13
Gruppenverbräuche (Median der Std)	1 - 3	1 - 9	1 - 8
Gruppenverbräuche (Median de Variationskoeffizienten)	1 - 3	1 - 9	1 - 8
Laufzeit (Median)	1 - 3	1 - 9	1 - 8

3.6.2.1 Fitnesswerte

In die Bewertung der MCDA fließen folgende drei Fitnesskennzahlen:

Median der Fitness

Beschreibt den Medianwert der Fitness über alle Wiederholungen aller Szenarien.

Interquartilsabstand der Fitness

Beschreibt die Breite des Intervalls zwischen der 75% und 25% Quantile, innerhalb dessen 50% aller Werte der Fitness über alle Szenarien liegen.

Standardabweichung der Fitness

Beschreibt die Standardabweichung aller Szenarien-Fitnesswerte um das arithmetische Mittel dieser.

3.6.2.2 Druckabweichungen

Die Bewertungen der Druckabweichungen erfolgen anhand von drei Kennzahlen:

Median der gesamten Druckabweichung über alle Druckmesssensoren

Ermittelt die Gesamtheit aller Szenarien und Druckmesssensoren und stellt diese in einem Medianwert dar.

Interquartilsabstand der gesamten Druckabweichung

Beschreibt die Breite des Intervalls zwischen der 75% und 25% Quantile, innerhalb dessen 50% aller Werte der Druckabweichung über alle Szenarien und Druckmesssensoren liegen.

Median der Druckabweichung je Druckmesssensor

Ermittelt für jeden Druckmesssensor einen Medianwert aller Druckabweichungen des entsprechenden Sensors. Zusätzlich zu den Werten der gesamten Druckabweichung dienen die spezifischen Sensorwerte der Erkennung von einzelnen Sensoren, welche systematisch schlechtere Druckabweichungen aufweisen.

3.6.2.3 Verbrauchsverteilung

Die Bewertung der Verbrauchsverteilungen im Zuge der MCDA beziehen sich ausschließlich auf Parameter der Gruppenstabilität:

Median der Standardabweichung der Gruppenverbräuche

Ermittelt den Medianwert aller Standardabweichungen des Anteils der Gruppenverbräuche am Gesamtverbrauch über alle Gruppen. Die Standardabweichung wird je Gruppe über alle Stunden erzeugt.

Median der Variationskoeffizienten der Gruppenverbräuche je Stunde

Ermittelt den Medianwert aller Variationskoeffizienten der jeweiligen Anteile der Gruppenverbräuche am Gesamtverbrauch pro Stunde. Die Aufnahme dieses Wertes erfolgte, um die relativen Schwankungen unterschiedlich großer Gruppenverbräuche gut darstellen zu können.

3.6.2.4 Ressourcen

Die Bewertung der Ressourcen bezieht sich auf erforderliche Rechenleistung und wurde im Sinne einer wirtschaftlichen Kalibrierung als Bewertungskriterium in die MCDA mitaufgenommen.

Median der Laufzeit je Szenario

Ermittelt den Medianwert der Laufzeit eines Szenarios. Ein Szenario umfasst alle Wiederholungen desselben.

3.6.3 Untersuchung der Druckabweichungen

Die Ergebnisse der Kalibrierungen werden sowohl nach Abschluss der Vorkalibrierung als auch im Zuge der Auswertung der Langzeitkalibrierungen hinsichtlich der Druckabweichungen im Detail ausgewertet. Dazu werden die allgemeinen Druckabweichungen und deren Stabilität mit Hilfe der in Kapitel 3.6.2.2 eingeführten Kennwerte untersucht. Zusätzlich kommen diverse Plots und Zeitreihendiagramme zum Einsatz, welche mit den Druckabweichungen des auf Rohrrauigkeiten kalibrierten Eingangsmodells verglichen werden (vgl. Abbildung 2-11; Kapitel 2.6.2).

Zusätzlich werden innerhalb der Auswertung der Langzeitkalibrierung die Ergebnisse der neu eingeführten Kalibrierungen Z01 und Z02 entsprechend den Kennwerten der MCDA mit den Ergebnissen der weiteren Kalibrierungen verglichen, um auf allfällige Abweichungen der neuen Kalibrierungen aufmerksam zu werden. Für den Vergleich werden aus den Ergebnissen der weiteren Langzeitkalibrierungen K02, K03, K09 und K12 für jeden Kennwert das arithmetische Mittel gebildet und mit den Ergebnissen der Zusatzkalibrierungen verglichen.

Im Zuge dieser Untersuchung wurde auch eine Ausreißerkontrolle vorgenommen, um zu überprüfen, ob gewisse Stunden oder Szenarien systematisch Ausreißer aufweisen. Zur Überprüfung wurden die Ausreißer nach Gleichung 3-12 und Gleichung 3-13 bestimmt. Die Bestimmung der Ausreißer erfolgte für jedes Druckergebnis der Simulation je Sensorknoten. Die Auswertung erfolgte über die Gesamtanzahl aller Ausreißer über alle Sensorknoten.

$$\text{Untere Grenze} = Q1 - 1,5 * IQR \quad \text{Gleichung 3-12}$$

$$\text{Obere Grenze} = Q3 + 1,5 * IQR \quad \text{Gleichung 3-13}$$

mit:

Q1 ... erste Quartil

Q3 ... drittes Quartil

IQR ... Interquartilsabstand

3.6.4 Plausibilität der Verbrauchsverteilungen

Für die Auswertung der Verbrauchsverteilungen werden die Ergebnisse der Kalibrierungen entsprechend ihrer Wochentage eingeordnet. Dieser Schritt geschieht, da unterschiedliche Wochentage häufig unterschiedliche Ganglinien aufweisen können, wie in Kapitel 2.1.1.3 erwähnt. Die Unterteilung in Wochentage erfolgt ausschließlich für die Untersuchung der Verbrauchsverteilungen. Da jedes Szenario unabhängig von allen anderen berechnet wird, hat dieser Schritt keinen Einfluss auf die Daten der Druckabweichungen. Ebenfalls nicht betroffen von dieser Aufteilung sind die Daten der Stabilitätsbewertung des Verbrauches der MCDA. Da es sich bei diesen um relative Anteile am Gesamtzulauf je Szenario, welche in Abhängigkeit der gewählten Verbrauchsannahme geschehen, handelt, haben unterschiedliche Wochentage keinen Einfluss auf die Stabilität dieser Verbrauchsannahme. Als Bestätigung dieser Annahme sind die detaillierten Plots der Verbrauchsverteilungen je Gruppe der Kalibrierung K02 für die unterteilten Wochentage „Werktag“, „Samstag“ und „Sonntag“ sowie für die gesamtheitliche Betrachtung in Anhang C ersichtlich.

Anhand der innerhalb der Datei `group_log.csv` gespeicherten Gruppen- und Individualverbräuche werden eine Reihe von Plots erstellt. Unter anderem wird aus den Individualverbräuchen je Gruppe für jede Uhrzeit ein Medianwert des Verbrauchs ermittelt. Daraus ergeben sich Plots mit der Darstellung der Ganglinien verschiedener Gruppierungen. Weiters werden anhand des Anteils einer Gruppe am Gesamtverbrauch des jeweiligen Szenarios Boxplots dieser Gruppenanteile erstellt und ausgewertet, um die Stabilität der jeweiligen Gruppen zu beurteilen.

Aufgrund der unterschiedlich großen Anzahl an Verbrauchsgruppierungen sowie deren unterschiedlicher Zusammensetzung wird die Beurteilung der Plausibilität ausschließlich anhand der Ganglinien der verschiedenen Gruppierungen je Szenario durchgeführt. Für eine Beurteilung der Stabilität werden Boxplots der Verbrauchsanteile herangezogen.

Die Auswertungen zur Plausibilität erfolgen erst im Zuge der Langzeitkalibrierungen, da während der Vorkalibrierungen ein wirkliches Verhalten der Ganglinien aufgrund des kurzen Untersuchungszeitraumes nicht sinnvoll durchgeführt werden kann.

4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden in einem ersten Schritt die Ergebnisse der Gruppierungen infolge der GIS-Auswertung präsentiert. Anschließend werden die Ergebnisse der Vorkalibrierung und der anschließenden Langzeitkalibrierung aufgezeigt und diskutiert.

4.1 Gruppierung infolge der GIS-Auswertung

Die ermittelten Gruppierungen richten sich nach den gewählten Methodiken aus Kapitel 3.1.1, und deren Ergebnisse werden in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.

4.1.1.1 Gebäudeklasse

Die Auswertung der vorhandenen Gebäudetypen zeigt, dass im Untersuchungsgebiet fast ausschließlich Wohnhäuser situiert sind (99%), wobei der Großteil dieser Wohnhäuser Einfamilienhäuser (EFH) sind. Bei den Mehrfamilienhäusern (MFH) handelt es sich dem Augenschein nach zum größeren Teil um Wohnungshäuser mit mehr als 5 Parteien und einigen Reihenhäusern mit 2-3 Parteien. Weiters befinden sich im Untersuchungsgebiet noch ein Gasthaus sowie ein Spiel- und Sportplatz mit einem Trinkwasseranschluss bzw. WC-Anschluss. In Summe wurden im Untersuchungsgebiet 359 Verbrauchsobjekte festgestellt, wie in Tabelle 4-1 ersichtlich. Abbildung 4-1 beschreibt die Verteilung dieser Objekte im Untersuchungsgebiet.

Tabelle 4-1: Gebäudeklassen des Untersuchungsgebiets (exkl. Gebäude Baujahr nach 2016)

Gebäude- klasse	Art des Gebäudes	Darstellung Abbildung 4-1	Anzahl
1	Einfamilienhaus (EFH)	grün	317
2	Mehrfamilienhaus (MFH)	lila	40
3	Gasthaus	rot	1
4	Spielplatz/WC	orange	1
GESAMT			359

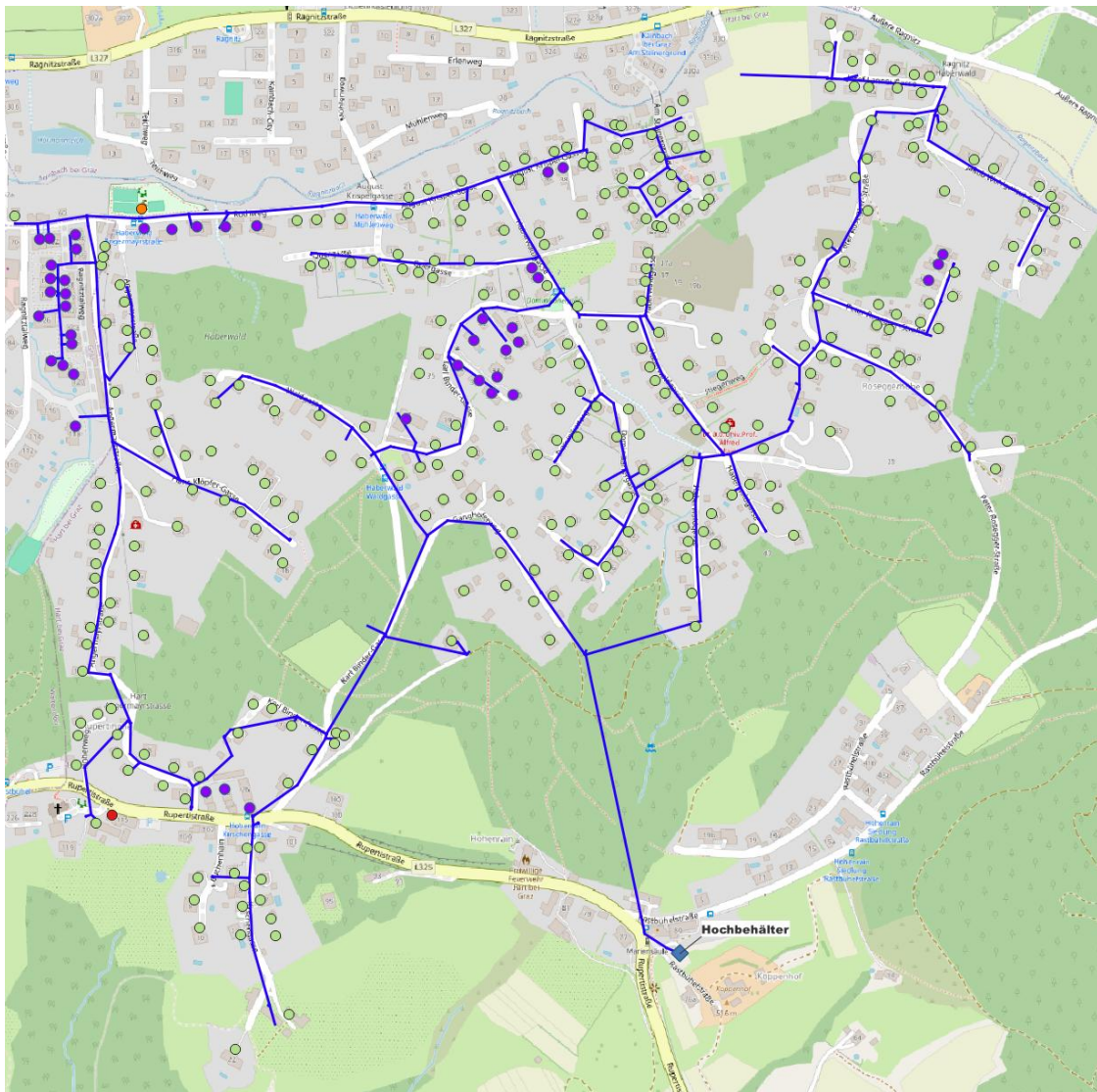


Abbildung 4-1: Übersicht der Gebäudeklassen im Untersuchungsgebiet

4.1.1.2 Geschoßanzahl

Die Auswertung der Geschoßanzahlen im Untersuchungsgebiet ergab, dass alle Verbrauchsobjekte zwischen ein bis drei Geschoße aufweisen. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 4-2 sowie deren Verteilung im Untersuchungsnetz in Abbildung 4-2 ersichtlich.

Tabelle 4-2: Anzahl der Geschoße im Untersuchungsgebiet (ohne Gebäude Baujahr nach 2016)

Anzahl Geschoße	Darstellung Abbildung 4-2	Anzahl
1	grün	33
2	rot	270
3	orange	56
GESAMT		359

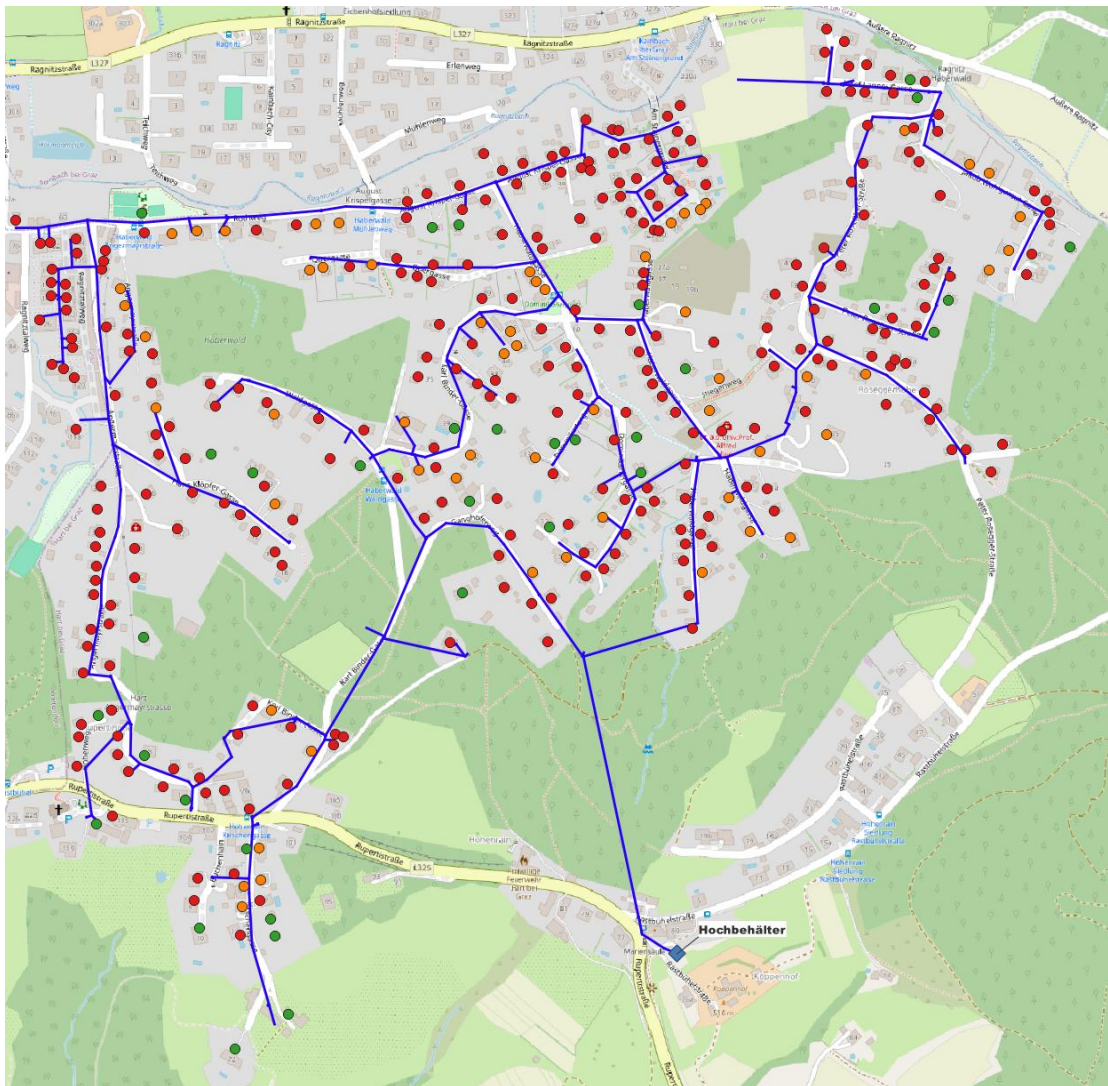


Abbildung 4-2: Übersicht der Geschoßanzahl im Untersuchungsgebiet

4.1.1.3 Wohnfläche

Die Ergebnisse der ermittelten Wohnflächen sind in Abbildung 4-3 als Verteilung innerhalb des Untersuchungsnetzes dargestellt. Abbildung 4-4 beschreibt diese Wohnflächen als Histogramm, wobei die Unterteilung jener der Gruppierung bzw. Verbrauchsannahme nach der Fläche folgt (vgl. Kapitel 3.5.1.2). Ausnahme sind die beiden Objekte mit einer Fläche größer als 1000m², diese wurden im Zuge der Kalibrierung zusammengefasst.

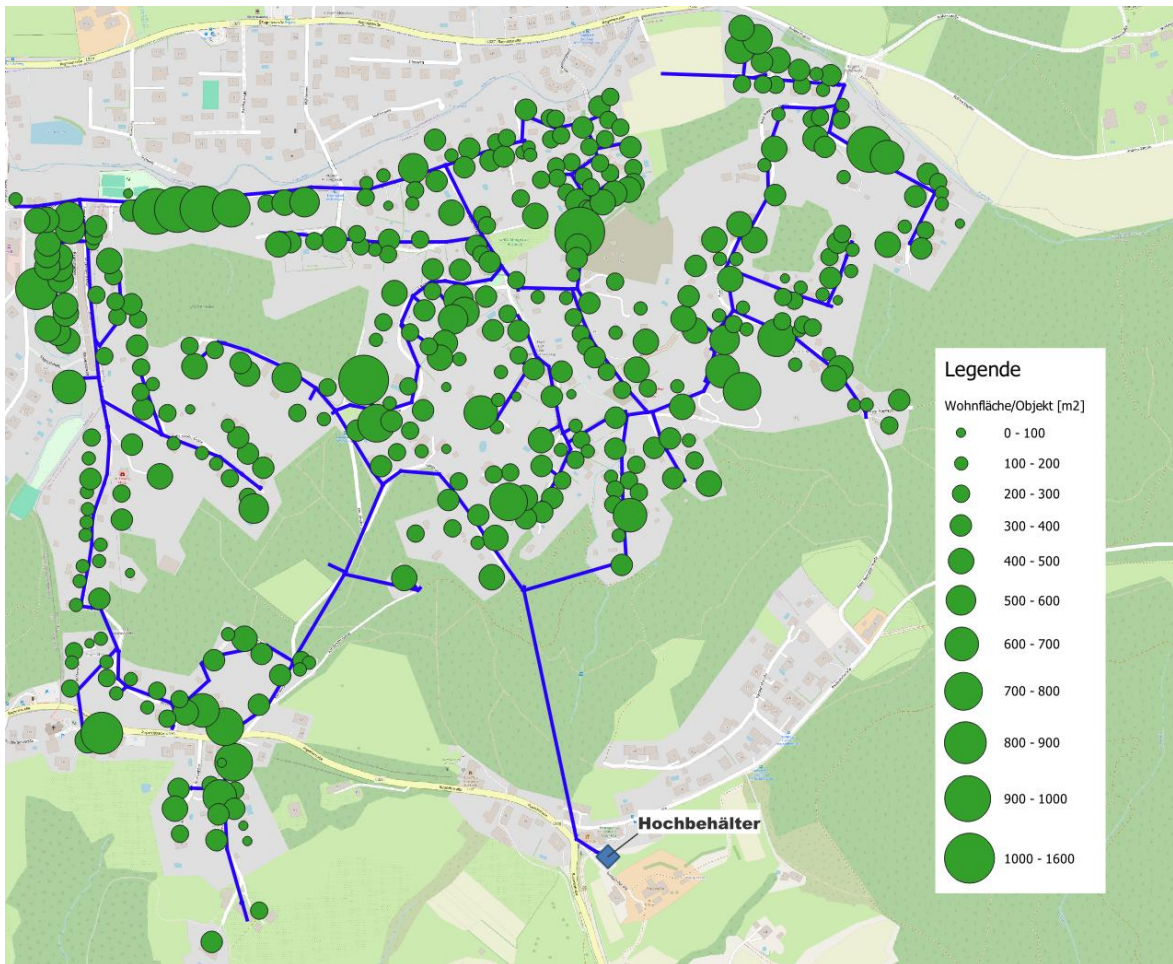


Abbildung 4-3: Übersicht der Wohnflächen im Untersuchungsgebiet

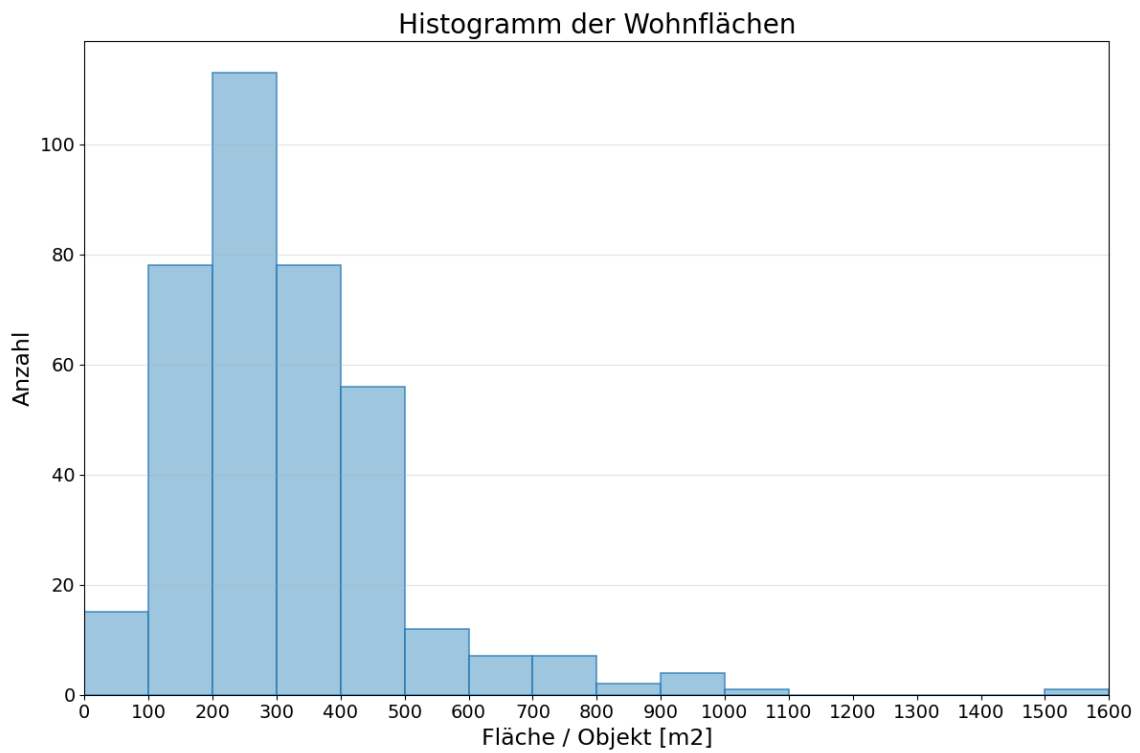


Abbildung 4-4: Histogramm der Wohnflächen

4.1.1.4 Region

Die Regionen des Untersuchungsgebietes ergeben sich wie in Abbildung 4-5 dargestellt. Die Anzahl der Verbrauchsobjekte je Region ist wiederum in Tabelle 4-3 ersichtlich.

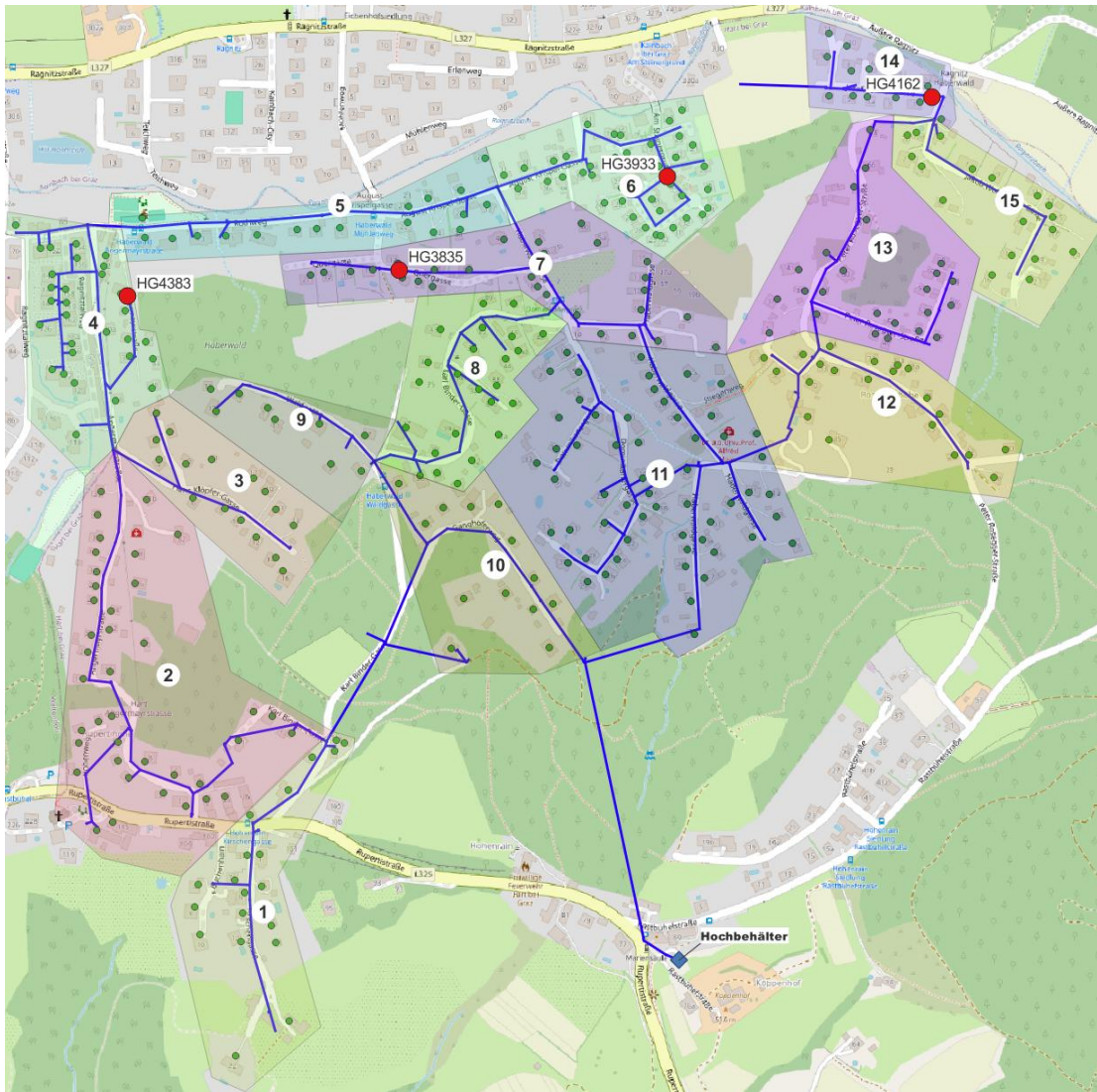


Abbildung 4-5: Unterteilung nach Regionen im Untersuchungsgebiet

Tabelle 4-3: Unterteilung der Regionen im Untersuchungsgebiet (ohne Gebäude Baujahr nach 2016)

Region	Anzahl Verbraucher
1	21
2	37
3	16
4	27
5	18
6	39
7	25
8	21
9	9
10	13
11	55
12	22
13	24
14	14
15	18
GESAMT	359

4.2 Vorkalibrierungen

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der Teile 1 – 3 der Vorkalibrierung mittels Tabellen und Grafiken dargestellt, wobei es vorrangig um die Beurteilung der gewählten Parameter geht. Auf die Ergebnisse der Verbräuche wird ebenfalls kurz eingegangen, eine vollständige Beurteilung ist jedoch erst nach den Ergebnissen der Langzeitkalibrierungen möglich.

Im Zuge jeder Vorkalibrierung wurden 35 Szenarien je untersuchter Uhrzeit kalibriert, in Summe somit 70 Szenarien mit jeweils 5 Wiederholungen.

4.2.1 Teil 1 (a-priori) MCDA Auswertung

Die Auswertung und Beurteilung des ersten Teiles erfolgte gesondert je Verbrauchsannahme „Gebäudeklasse“, „Fläche“ und „Gleichverteilt“. Für die Bewertung der MCDA wurde, aufgrund der 5 Parameterkombinationen je Verbrauchsannahme, eine Basisbewertung von 1-5 Punkten bei der Basisgewichtung von 1,0x angesetzt.

4.2.1.1 Teilergebnisse der MCDA

Auf den folgenden Seiten sind die Ergebnisse der Kalibrierung sowie die Einzelwertungen der MCDA für die folgenden Bereiche tabellarisch dargestellt:

- Fitness (Tabelle 4-4)
- Druckabweichung Gesamt (Tabelle 4-5)
- Druckabweichung je Sensor (Tabelle 4-6)
- Verbrauchsverteilung und Laufzeit (Tabelle 4-7)

Innerhalb der Tabellen sind die jeweils bestgereihten Ergebnisse je Verbrauchsannahme und Bewertungskriterium grün hinterlegt. Die Bewertungskriterien sowie deren Gewichtung wurden in Kapitel 3.6.2 beschrieben. Die Ergebnisse der Vergleichskalibrierung (V00; keine initiale Verbrauchsverteilung und keine Fitnessbewertung der Verbrauchsannahme) sind ebenfalls ersichtlich. Da die Bewertung jedoch nur innerhalb der Verbrauchsannahmen geschah, fließen die Werte der Vergleichskalibrierung nicht in die Bewertung des Teil 1 ein.

Tabelle 4-4: Vorkalibrierung Teil 1: Ergebnisse der Fitnessbewertung

		Fitness (Median)		Fitness (IQR)		Fitness (Std)		Gesamtpunkte
		Wert	Punkte	Wert	Punkte	Wert	Punkte	
Vgl.	V00	0,17709	---	0,24647	---	0,17952	---	---
„Gebäude- klasse“	A01	0,14973	6	0,16840	1	0,13202	3	10
	A02	0,15547	2	0,15871	2	0,13281	1	5
	A03	0,15281	4	0,15138	5	0,13188	4	13
	A04	0,14817	10	0,15702	3	0,13104	5	18
	A05	0,14851	8	0,15580	4	0,13213	2	14
„Fläche“	A06	0,15019	10	0,16546	4	0,13995	1	15
	A07	0,15129	8	0,16368	5	0,13054	5	18
	A08	0,15954	6	0,17306	3	0,13439	4	13
	A09	0,20056	4	0,17893	1	0,13518	2	7
	A10	0,59878	2	0,17875	2	0,13509	3	7
„Gleich- verteilt“	A11	0,13675	8	0,10181	5	0,12966	1	14
	A12	0,13722	6	0,10289	4	0,12316	4	14
	A13	0,13116	10	0,10308	3	0,12026	5	18
	A14	0,13886	2	0,11428	1	0,12595	2	5
	A15	0,13787	4	0,10733	2	0,12321	3	9

Auffallend an den Ergebnissen der Fitness (Tabelle 4-4) ist die Auswirkung der globalen Gewichtung der Verbrauchsannahme „Fläche“ auf den Medianwert. Dieser steigt mit zunehmendem λ -Wert stark an. Im Gegensatz dazu verbleiben die Werte der Verbrauchsannahmen „Gebäudeklasse“ und „Gleichverteilt“ trotz steigendem Gewichtungsfaktor relativ ähnlich. Da innerhalb der Berechnung A09 und A10 die Streuungen (IQR und Std) der Fitness jedoch kaum Veränderungen zeigen, ist nicht von instabilen Läufen auszugehen.

In Bezug auf die Stabilität und Streuungen der Fitnesswerte zeigen alle Verbrauchsannahmen sehr ähnliche Werte, einzig die Interquartilsabstände der Annahme „Gleichverteilt“ sind über alle Kalibrierungen deutlich besser als jene der anderen Annahmen.

Fast alle Parameterkombinationen weisen hinsichtlich der Fitnesskennwerte eine Verbesserung gegenüber der Vergleichskalibrierung V00 auf.

Tabelle 4-5: Vorkalibrierung Teil 1: Ergebnisse der Druckabweichung (Gesamt)

		ΔP (Median)		ΔP (IQR)		Gesamtpunkte
		Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	
Vgl.	V00	0,06859	---	0,15851	---	---
„Gebäude- klasse“	A01	0,03724	4	0,16451	10	14
	A02	0,03836	2	0,16842	2	4
	A03	0,03168	10	0,16614	8	18
	A04	0,03193	6	0,16680	6	12
	A05	0,03168	10	0,16705	4	14
„Fläche“	A06	0,04744	2	0,16735	6	8
	A07	0,04148	4	0,16745	4	8
	A08	0,03811	10	0,16929	2	12
	A09	0,03955	6	0,16618	8	14
	A10	0,03930	8	0,16514	10	18
„Gleich- verteilt“	A11	0,04654	2	0,16156	4	6
	A12	0,04559	4	0,15372	8	12
	A13	0,04300	6	0,15383	6	12
	A14	0,03880	8	0,14435	10	18
	A15	0,02263	10	0,16233	2	12

Anhand der Gesamtbetrachtung der Druckabweichungsergebnisse (Tabelle 4-5) zeigt sich, dass der Median aller Druckabweichungen über alle Sensoren für alle Verbrauchsannahmen niedrigere Werte aufweist als für die Vergleichskalibrierung V00. Allerdings steigt der IQR der meisten Parameterkombinationen leicht an verglichen mit V00. Auffallend ist, dass bei höherer Gewichtung der Fitness der Verbrauchsannahme eine geringe Verbesserung der Medianwerte auftritt.

Diese Verbesserung ist jedoch in der Größenordnung von Millimetern, und es ist zu beobachten, dass alle Druckabweichungen bereits geringer sind als jene des ursprünglichen Eingangsmodells (vgl. Abbildung 2-11, Kapitel 2.6.2).

In Tabelle 4-6 sind die Ergebnisse der Druckabweichungen (Medianwerte) je Sensor ersichtlich. Zu beobachten ist, dass über alle Parameterkombinationen und auch der Vergleichskalibrierung der Sensorpunkt HG4383 die größten Abweichungen aufweist. Eine Ursache dafür kann, nach dem Ausschluss von zwei Sensorpunkten, die räumliche Lage der verbliebenen 4 Sensoren sein (vgl. Abbildung 3-2, Kapitel 3.3).

Tabelle 4-6: Vorkalibrierung Teil 1: Ergebnisse der Druckabweichung je Sensor

		ΔP HG3835		ΔP HG3933		ΔP HG4162		ΔP HG4383		Gesamt- punkte
		(Median)		(Median)		(Median)		(Median)		
		Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	
Vgl.	V00	0,05175	---	0,03769	---	-0,02745	---	0,18116	---	---
„Gebäude- klasse“	A01	0,04131	1	0,02907	1	-0,01972	1	0,09406	1	4
	A02	0,03857	2	0,01435	3	-0,01559	2	0,09350	2	9
	A03	0,03612	5	0,01485	2	-0,01423	4	0,07575	5	16
	A04	0,03707	3	0,01335	5	-0,01390	5	0,07775	4	17
	A05	0,03657	4	0,01335	5	-0,01423	4	0,07775	4	17
„Fläche“	A06	0,04857	1	0,03712	1	-0,02259	1	0,10417	5	8
	A07	0,04326	4	0,02672	2	-0,02060	2	0,11621	1	9
	A08	0,04307	5	0,02085	5	-0,01953	3	0,10568	4	17
	A09	0,04557	2	0,02085	5	-0,01703	5	0,10677	2	14
	A10	0,04407	3	0,02085	5	-0,01703	5	0,10627	3	16
„Gleich- verteilt“	A11	0,02546	3	0,02509	2	-0,01673	4	0,05599	3	12
	A12	0,02546	3	0,02752	1	-0,02156	1	0,07275	1	6
	A13	0,02596	1	0,02409	3	-0,01861	3	0,06997	2	9
	A14	0,02468	4	0,02109	4	-0,01898	2	0,04845	4	14
	A15	0,01931	5	0,01257	5	-0,01109	5	0,03465	5	20

Die Betrachtung der Streuung der Anteile der Gruppenverbräuche (Tabelle 4-7) zeigt, dass eine größere Gewichtung der Fitness der Verbrauchsannahme in einer geringeren Streuung und somit gleichbleibender Verteilungen der Verbrauchsanteile resultiert. Dies bestätigt die gewünschte Wirkung des a-priori Einsatzes als Nebenbedingung der Fitnessfunktion zur Stabilisierung des ansonsten mitunter unterbestimmten Lösungsproblems.

Weiters deuten die Ergebnisse der Laufzeiten an, dass Kalibrierungen mit stark erhöhten λ -Werten längere Laufzeiten zur Folge haben. Eine genauere Untersuchung dieses Umstandes ist jedoch nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit, weshalb darauf im weiteren Verlauf nicht mehr eingegangen wird.

Tabelle 4-7: Vorkalibrierung Teil 1: Ergebnisse der Verbrauchsverteilung und Laufzeit

		Gruppenverbräuche (Median der Std)		Gruppenverbräuche (Median der Variationskoeffizienten)		Laufzeit (Median)		Gesamtpunkte
		Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	
Vgl.	V00	0,17754	---	0,87464	---	50,26	---	---
„Gebäude- klasse“	A01	0,09720		0,75211	1	52,59		1
	A02	0,06340		0,80938		50,85	2	2
	A03	0,02523	1	0,77942		46,14	3	4
	A04	0,01023	2	0,35901	2	51,59	1	5
	A05	0,00275	3	0,09722	3	65,02		6
„Fläche“	A06	0,11932		0,82604		48,56	1	1
	A07	0,07738		0,70777		49,38		0
	A08	0,04429	1	0,47692	1	47,72	3	5
	A09	0,01984	2	0,20347	2	47,86	2	6
	A10	0,00774	3	0,05936	3	56,23		6
„Gleich- verteilt“	A11	0,15787		1,17803	1	49,35		1
	A12	0,14526		1,08583	3	50,01		3
	A13	0,13410	2	1,10251	2	48,59	1	5
	A14	0,14177	1	1,31039		48,02	2	3
	A15	0,10912	3	1,61011		47,82	3	6

4.2.1.2 Gesamtbewertung der MCDA

Auf Grundlage der Einzelbewertungen ergibt sich die in Tabelle 4-8 ersichtliche Gesamtbewertung. Für jede der drei Verbrauchsannahmen wurde die am besten gereichte Parameterkombination für weitere Kalibrierungen genutzt. Für die Verbrauchsannahme der „Fläche“ wurden zwei Kombinationen mit identer Gesamtpunktzahl ermittelt (A08 vs. A10). Aufgrund der um 15% geringeren Rechen-dauer sowie der allgemein sehr guten Druckabweichungen wurde entschieden die Kombination A08 für die weitere Verwendung zu nutzen.

Tabelle 4-8: Vorkalibrierung Teil 1: Gesamtbewertung MCDA

		Fitness	Druckab- weichung (Gesamt)	Druckab- weichung (Sensoren)	Verbrauch & Laufzeit	Gesamt- punkte
		Pkt.	Pkt.	Pkt.	Pkt.	
„Gebäude- klasse“	A01	10	14	4	1	29
	A02	5	4	9	2	20
	A03	13	18	16	4	51
	A04	18	12	17	5	52
	A05	14	14	17	6	51
„Fläche“	A06	15	8	8	1	32
	A07	18	8	9	0	35
	A08	13	12	17	5	47
	A09	7	14	14	6	41
	A10	7	18	16	6	47
„Gleich- verteilt“	A11	14	6	12	1	33
	A12	14	12	6	3	35
	A13	18	12	9	5	44
	A14	5	18	14	3	40
	A15	9	12	20	6	47

Ersichtlich ist, dass alle bestgereihten Parameterkombinationen jeder Verbrauchsannahme ähnliche Punkteanzahlen aufweisen. In Tabelle 4-9 werden die Ergebnisse der besten Parameterkombination je Verbrauchsannahme miteinander verglichen. Auffallend sind die mitunter sehr starken relativen Unterschiede der Ergebnisse. In Summe weist die Kalibrierung A15 der Verbrauchsannahme „Gleichverteilt“ die besten Fitness- und Druckabweichungsergebnisse auf, liefert gleichzeitig jedoch auch die instabilsten Anteile der Gruppenverbräuche. Die größten Abweichungen zu den Bestwerten der Fitness- und Druckabweichungsergebnisse liefert die Verbrauchsannahme „Fläche“ (Kalibrierung A08).

Auf eine gemeinsame Bewertung der unterschiedlichen Verbrauchsannahmen wurde im Zuge des ersten Teiles noch verzichtet, da eine Bewertung der Kalibrierungen über alle bestgereihten Verbrauchsannahmen im Zuge der Vorkalibrierung Teil 3 in Kapitel 4.2.3 erfolgt.

Für die Vorkalibrierung Teil 2 wurde die Kalibrierung A04 der Verbrauchsannahme „Gebäudeklasse“ weitergenutzt, da sie das höchste Bewertungsergebnis aufweist und dabei sowohl gute Fitness- und Druckabweichungsergebnisse als auch die stabilsten Gruppenverbrauchsanteile liefert.

Tabelle 4-9: Vorkalibrierung Teil 1: Vergleich der bestgereihten Verbrauchsannahmen

	Minimum	A04	A08	A15
Fitness _(Median)	0,138 [-]	<u>107%</u>	116%	100%
Fitness _(IQR)	0,107 [-]	146%	161%	100%
Fitness _(Std)	0,123 [-]	<u>106%</u>	109%	100%
ΔP _(Gesamt, Median)	0,023 [mWS]	141%	<u>168%</u>	<u>100%</u>
ΔP _(Gesamt, IQR)	0,162 [mWS]	103%	104%	100%
ΔP HG3835 _(Median)	0,019 [mWS]	192%	<u>223%</u>	<u>100%</u>
ΔP HG3933 _(Median)	0,013 [mWS]	<u>106%</u>	<u>166%</u>	<u>100%</u>
ΔP HG4162 _(Median)	-0,011 [mWS]	<u>125%</u>	176%	<u>100%</u>
ΔP HG4383 _(Median)	0,035 [mWS]	224%	305%	<u>100%</u>
Gruppenverbräuche (Median der Std)	0,010 [-]	100%	433%	<u>1067%</u>
Gruppenverbräuche (Median de Variationskoeffizienten)	0,359 [-]	100%	133%	448%
Laufzeit (Median)	47,72 [s]	108%	<u>100%</u>	<u>100%</u>
<u>Unterstrichen</u> : absoluter Bestwert über alle Verbrauchsannahmen (Teil 1)				

4.2.2 Teil 2 (Gruppierung) MCDA Auswertung

Das genaue Kalibrierprogramm für den zweiten Teil wurde in Kapitel 3.5.1.2 bereits beschrieben. Im Gegensatz zum ersten Teil wurden für die Bewertung des zweiten Teiles alle Gruppierungskombinationen gemeinsam bewertet.

4.2.2.1 Teilergebnisse der MCDA

Auf den folgenden Seiten sind die Ergebnisse der Kalibrierung sowie die Einzelwertungen der MCDA für die folgenden Bereiche tabellarisch dargestellt:

- Fitness (Tabelle 4-10)
- Druckabweichung Gesamt (Tabelle 4-11)
- Druckabweichung je Sensor (Tabelle 4-12)
- Verbrauchsverteilung und Laufzeit (Tabelle 4-14)

Innerhalb der Tabellen sind die bestgereihten Ergebnisse je Bewertungskriterium grün hinterlegt. Die Bewertungskriterien sowie deren Gewichtung wurden in Kapitel 3.6.2 beschrieben. Die Ergebnisse der Vergleichskalibrierung (V00; keine initiale Verbrauchsverteilung und keine Fitnessbewertung der Verbrauchsannahme) sind ebenfalls ersichtlich. Ebenfalls sind die Ergebnisse der Kalibrierung A04 aus dem ersten Teil der Vorkalibrierung in den Tabellen und der Bewertung enthalten, da es sich hierbei bereits um eine der Gruppierungskombinationen handelt. Im Gegensatz zum Teil 1 der Vorkalibrierung erfolgt die Bewertung der Ergebnisse über alle Gruppierungskombinationen und auch der Vergleichskalibrierung V00.

Tabelle 4-10: Vorkalibrierung Teil 2: Ergebnisse der Fitnessbewertung

		Fitness (Median)		Fitness (IQR)		Fitness (Std)		Gesamtpunkte
		Wert	Punkte	Wert	Punkte	Wert	Punkte	
Vgl.	V00	0,17709	4	0,24647	1	0,17952	1	6
Gruppierungen	A04	0,14817	12	0,15702	5	0,13104	8	25
	G01	0,14925	10	0,15982	4	0,13091	10	24
	G02	0,14609	14	0,15284	6	0,12977	12	32
	G03	1,11073	2	0,11262	12	0,13296	4	18
	G04	0,14433	18	0,13503	7	0,13092	9	34
	G05	0,16573	8	0,16003	3	0,14063	2	13
	G06	0,14505	16	0,11628	10	0,13190	6	32
	G07	0,14169	22	0,11368	11	0,13018	11	44
	G08	0,14326	20	0,11151	14	0,13277	5	39
	G09	0,13746	28	0,12373	8	0,12478	15	51
	G10	0,13414	30	0,11000	15	0,12690	14	59
	G11	0,13857	26	0,12101	9	0,12734	13	48
	G12	0,16645	6	0,17576	2	0,13511	3	11
G13	0,14045	24	0,11257	13	0,13110	7	44	

Anhand des Medians der Fitnesswerte (Tabelle 4-10) lässt sich erkennen, dass mit Ausnahme der Gruppierungskombination G03 alle übrigen Kombinationen besser bewertete Ergebnisse liefern als die Vergleichskalibrierung. Ebenfalls finden der Großteil der neuen Kombinationen numerisch bessere und auch stabilere Ergebnisse als die ursprüngliche Kombination A04. Ein sehr ähnliches Bild bietet sich bei Betrachtung der Ergebnisse der Druckabweichungen (Gesamt) innerhalb der Tabelle 4-11.

Tabelle 4-11: Vorkalibrierung Teil 2: Ergebnisse der Druckabweichung (Gesamt)

		ΔP (Median)		ΔP (IQR)		Gesamtpunkte
		Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	
Vgl.	V00	0,06859	2	0,15851	10	12
Gruppierung	A04	0,03193	10	0,16680	8	18
	G01	0,02893	14	0,16680	8	22
	G02	0,02868	16	0,16834	4	20
	G03	-0,00926	26	0,15002	18	44
	G04	0,01549	22	0,13601	28	50
	G05	0,05766	4	0,15751	12	16
	G06	0,01027	24	0,14417	22	46
	G07	0,00135	30	0,13993	26	56
	G08	0,00328	28	0,13266	30	58
	G09	0,02755	18	0,15118	16	34
	G10	0,02517	20	0,14309	24	44
	G11	0,03122	12	0,14786	20	32
	G12	0,04540	6	0,17566	2	8
G13	0,03314	8	0,15345	14	22	

Ähnlich wie bereits im Zuge des Teils 1 der Vorkalibrierung weisen die Medianwerte der Druckabweichung (Tabelle 4-12) für den Sensorpunkt HG4383 mitunter deutlich größere Abweichungen als die übrigen Messpunkte. Im Mittel liegt die Druckabweichung des Sensors HG4383 für alle Gruppierungskalibrierungen 59% über der Druckabweichung des zweithöchsten Sensors (HG3835) bzw. 146% über dem Mittelwert aller anderen Sensoren. Ersichtlich ist jedoch auch, dass unterschiedliche Gruppierungen diese Deutlichkeit durchaus verringern oder gar eliminieren können. Bei genauerer Betrachtung dieses Umstandes fällt auf, dass die größten Abweichungen an diesem Drucksensor in Kombination mit Einzelgruppierungen¹ auftreten. Zusätzlich können Extremwerte in Kombination mit der Gruppierungskategorie „Region“ auftreten. Eine besonders hohe Homogenität der Druckabweichungen kann innerhalb der Gruppierungskombinationen G07 und G08 beobachtet werden. Anzumerken ist hierbei aber auch die Tatsache, dass die unterschiedlichen Gruppierungskombinationen in Verbindung mit einer a-priori Verbrauchsannahme konstant geringere und homogenere Druckabweichungen liefern als in der Vergleichskalibrierung V00 zu beobachten ist.

¹ Gemeint ist die Auswahl nur einer einzelnen Gruppierungskategorie („Gebäudeklasse“, „Geschoßanzahl“, „Fläche“ oder „Region“)

Tabelle 4-12: Vorkalibrierung Teil 2: Ergebnisse der Druckabweichung je Sensor

Vgl.	V00	ΔP HG3835		ΔP HG3933		ΔP HG4162		ΔP HG4383		Gesamt- punkte
		(Median)		(Median)		(Median)		(Median)		
		Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	
Gruppierung	A04	0,03707	4	0,01335	10	-0,01390	7	0,07775	5	26
	G01	0,03657	5	0,01285	11	-0,01423	6	0,07775	5	27
	G02	0,03607	6	0,01235	13	-0,01357	8	0,07225	6	33
	G03	0,01862	11	-0,02161	6	-0,00669	11	-0,01726	13	41
	G04	0,01626	12	-0,01261	12	-0,00569	12	0,04046	9	45
	G05	0,07446	1	0,04422	2	-0,02653	3	0,14905	2	8
	G06	0,01333	15	-0,01561	8	-0,00079	15	0,01762	12	50
	G07	0,01531	14	-0,02361	4	-0,00192	13	0,01574	14	45
	G08	0,01612	13	-0,02261	5	-0,00103	14	0,01018	15	47
	G09	0,03024	7	0,01654	7	-0,01031	9	0,03125	10	33
	G10	0,02822	8	0,00392	15	-0,00944	10	0,03028	11	44
	G11	0,02974	9	0,01437	9	-0,01448	5	0,05115	8	31
	G12	0,06741	2	0,04940	1	-0,03081	1	0,08686	3	7
	G13	0,02532	10	0,00407	14	-0,01606	4	0,06408	7	35

Die Stabilität der Anteile der Gruppenverbräuche ist in Tabelle 4-14 ersichtlich. Zu beobachten ist, dass durch die vorgegebenen Verbrauchsannahmen deutlich stabilere Gruppenverbräuche erzielt werden können. Aussagen über die Plausibilität dieser Verbräuche sind anhand dieser Bewertung jedoch noch nicht möglich und werden in Kapitel 4.3.3 behandelt. An den Laufzeiten ist ersichtlich, dass die Gruppierungskombinationen G12 und G13 deutlich längere Laufzeiten aufweisen als die übrigen Kombinationen. Dies kann sich durch die stark erhöhte Anzahl an Gruppen, durch die gewählten Gruppierungskombinationen, ergeben, und wird in Tabelle 4-13 für alle Gruppierungskombinationen mit mehr als einer Gruppierungskategorie dargestellt.

Tabelle 4-13: Anzahl der Gruppen für ausgewählte Gruppierungen

Grup.	G06	G07	G08	G09	G10	G11	G12	G13
Anz.	22	21	20	25	24	23	40	92

Tabelle 4-14: Vorkalibrierung Teil 2: Ergebnisse der Verbrauchsverteilung und Laufzeit

		Gruppenverbräuche (Median der Std)		Gruppenverbräuche (Median der Variationskoeffizienten)		Laufzeit (Median)		Gesamtpunkte
		Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	
Vgl.	V00	0,17754		0,87464		50,26	2	2
Gruppierung	A04	0,01023	6	0,35901	7	51,59	1	14
	G01	0,01228	5	0,03213	8	44,30	7	20
	G02	0,00977	8	0,02082	9	38,93	8	25
	G03	0,00111	9	8,29390		38,53	9	18
	G04	0,05713		0,62903	2	45,85	5	7
	G05	0,04104		1,79826		68,66		0
	G06	0,03003		0,64657		53,82		0
	G07	0,02977		0,53018	6	48,59	4	10
	G08	0,03052		0,63598	1	45,42	6	7
	G09	0,02555	3	0,60803	5	53,88		8
	G10	0,02611	2	0,61048	4	52,04		6
	G11	0,02680	1	0,62420	3	49,78	3	7
	G12	0,02401	4	2,89695		213,89		4
G13	0,01001	7	1,34229		139,15		7	

4.2.2.2 Gesamtbewertung der MCDA

Auf Grundlage der Einzelbewertungen ergibt sich die in Tabelle 4-15 ersichtliche Gesamtbewertung. Alle Gruppierungskombinationen wurden gleichermaßen in die Bewertung eingeschlossen und anhand der gewählten Bewertungskriterien ergeben sich 4 Gruppierungskombinationen, die im weiteren Verlauf der Vorkalibrierung genutzt werden.

Abbildung 4-6 beschreibt die gereihten Ergebnisse der Bewertung. Mehrere Kombinationen der Gruppierungen bieten ähnliche Bewertungen im mittleren Bereich der Bewertungsskala, jedoch ist eine klare Reihenfolge ersichtlich. Besonders auffallend sind die Bewertungen der drei bestgereihten Gruppierungen, welche sehr ähnlich zueinander sind und eine deutlich bessere Bewertung bieten als die restlichen Kombinationen. Alle drei Gruppierungen nutzen eine Kombination aus den Gruppierungskriterien Gebäudeklasse und entweder Fläche oder Region. Die Einordnungen dieser Gruppierungskriterien wurden in Kapitel 3.1.1 beschrieben. In allen drei Gruppierungen wurde die Gebäudeklasse 4 ausgeschlossen, mitunter auch die Gebäudeklasse 3 womit nur die Klassen 1 (EFH) und 2 (MFH) verblieben.

Ebenso ersichtlich ist das schlechte Abschneiden der Gruppierungen G05 und G12. Ein klarer Zusammenhang dieser beiden Gruppierungen mit einem klaren Grund für die schlechtere Bewertung verglichen mit den übrigen Gruppierungen konnte nicht gefunden werden. Die Gruppierung G05 nutzte ausschließlich das Kriterium der Region, während G12 eine Kombination aus Geschoßanzahl und Region nutzte. Das Kriterium der Region wurde aber auch in anderen Gruppierungen genutzt, welche bei weitem besser bewertet wurden. Unter anderem auch im Zuge der zweitgereihten Gruppierung G10.

Tabelle 4-15: Vorkalibrierung Teil 2: Gesamtbewertung MCDA

		Fitness	Druckabweichung (Gesamt)	Druckabweichung (Sensoren)	Verbrauch & Laufzeit	Gesamtpunkte
		Pkt.	Pkt.	Pkt.	Pkt.	
Vgl.	V00	6	12	9	2	29
Gruppierung	A04	25	18	26	14	83
	G01	24	22	27	20	93
	G02	32	20	33	25	110
	G03	18	44	41	18	121
	G04	34	50	45	7	136
	G05	13	16	8	0	37
	G06	32	46	50	0	128
	G07	44	56	45	10	155
	G08	39	58	47	7	151
	G09	51	34	33	8	126
	G10	59	44	44	6	153
	G11	48	32	31	7	118
	G12	11	8	7	4	30
G13	44	22	35	7	108	

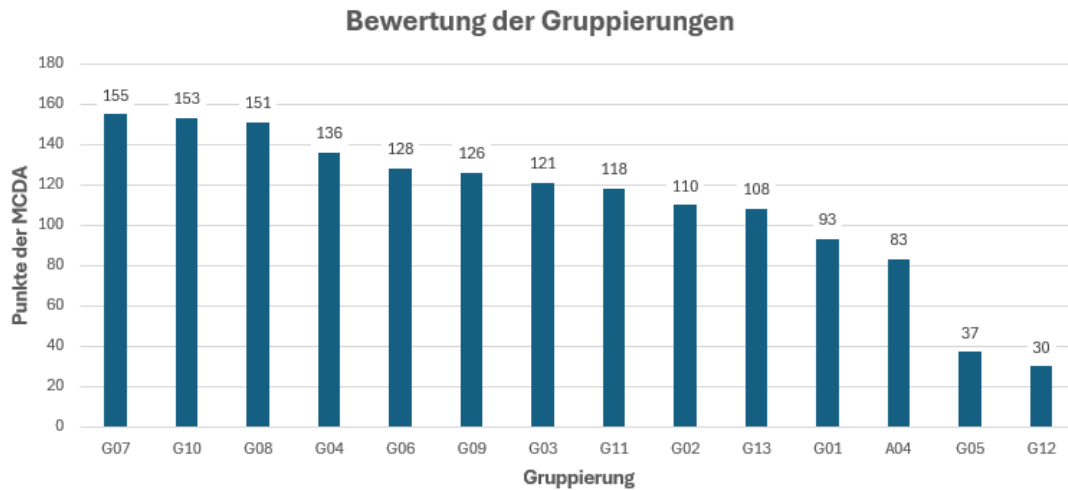


Abbildung 4-6: Bewertung der Gruppierungen (Vorkalibrierung Teil 2)

Tabelle 4-16: Vorkalibrierung Teil 2: Vergleich der bestgereihten Gruppierungen

	Minimum	G04	G07	G08	G10
Fitness _(Median)	0,134 [-]	108%	106%	107%	<u>100%</u>
Fitness _(IQR)	0,110 [-]	123%	103%	101%	<u>100%</u>
Fitness _(Std)	0,127 [-]	103%	103%	105%	100%
ΔP _(Gesamt, Median)	0,001 [mWS]	1.144%	<u>100%</u>	243%	1.859%
ΔP _(Gesamt, IQR)	0,133 [mWS]	103%	105%	<u>100%</u>	108%
ΔP HG3835 _(Median)	0,015 [mWS]	106%	100%	105%	184%
ΔP HG3933 _(Median)	0,004 [mWS]	321%	602%	576%	<u>100%</u>
ΔP HG4162 _(Median)	-0,001 [mWS]	551%	186%	100%	914%
ΔP HG4383 _(Median)	0,010 [mWS]	397%	155%	<u>100%</u>	298%
Gruppenverbräuche (Median der Std)	0,026 [-]	219%	114%	117%	100%
Gruppenverbräuche (Median de Variationskoeffizien- ten)	0,530 [-]	119%	100%	120%	115%
Laufzeit (Median)	45,42 [s]	101%	107%	100%	115%

Unterstrichen: absoluter Bestwert über alle Gruppierungskombinationen (Teil 2)

Bei Betrachtung der Detailergebnisse der vier bestgereihten Gruppierungsergebnisse zeigt sich, dass die Werte der Fitnessauswertung für alle Kombinationen sehr ähnliche Werte annimmt. Innerhalb der Druckabweichung ergeben sich starke relative Unterschiede, dies ist jedoch durch die sehr geringen Druckabweichungen der jeweiligen Bestwerte zu erklären. Alle Druckabweichungen befinden sich im Bereich weniger Zentimeter. Die Anteile der Gruppenverbräuche sind über alle Gruppierungskombinationen ähnlich stabil.

Die genauen Gruppierungsparameter sowie die Gesamtpunkte der MCDA Bewertung sind in Tabelle 4-17 in gereihter Reihenfolge ersichtlich. Da der Großteil der Gruppierungskalibrierungen mit dem Parameter der Gebäudeklasse durchgeführt wurde, sind Aussagen über die Wirksamkeit dieses Parameters, verglichen mit den anderen, schwer zu treffen. Dennoch ist ersichtlich, dass die Wahl der zu gruppierenden Gebäudeklassen 1-4 einen Einfluss auf die Bewertung der Kalibrierung hat. So sind Kalibrierung mit zwei bzw. drei der vier gewählten Klassen die am besten gewerteten Kalibrierungen. Auch zeigt sich anhand der Kalibrierungen mit Gruppierung ausschließlich nach der Gebäudeklasse, dass die Kombination der Klassen 1 (EFH) und 2 (MFH) eine deutlich bessere Bewertung erhält als die weiteren Kombinationen der Kategorie Gebäudeklasse.

Ebenfalls zeigen die Bewertungen, dass Gruppierungen nach der Kategorie der Fläche überwiegend bessere Ergebnisse liefern als vergleichbare Kalibrierungen mit Gruppierung nach der Region. Dies betrifft sowohl Kalibrierungen mit einer kombinierten Gruppierung nach den Gebäudeklassen als auch die Kalibrierungen, die nur die Kategorien Fläche bzw. Region nutzen.

Tabelle 4-17: Reihung der Gruppierungen mit Gruppierungsdetails

Gruppierung	Punkte	Gebäudeklasse	Geschoße	Fläche	Region
G07	155	[1,2,3]	-	[alle]	-
G10	153	[1,2,3]	-	-	[alle]
G08	151	[1,2]	-	[alle]	-
G04	136	-	-	[alle]	-
G06	128	[alle]	-	[alle]	-
G09	126	[alle]	-	-	[alle]
G03	121	-	[alle]	-	-
G11	118	[1,2]	-	-	[alle]
G02	110	[1,2]	-	-	-
G13	108	-	-	[alle]	[alle]
G01	93	[1,2,3]	-	-	-
A04	83	[alle]	-	-	-
G05	37	-	-	-	[alle]
G12	30	-	[alle]	-	[alle]

Drei der vier bestgereihten Gruppierungen nutzten das Gruppierungskriterium der Fläche. Für die Kalibrierung G04 war dies das einzige Kriterium, während die Kalibrierungen G07 und G08 jeweils eine Kombination mit der Gebäudeklasse nutzten.

4.2.3 Teil 3 (Kombination) MCDA Auswertung

Die abschließende Vorkalibrierung fand mit den Parametern der bestgereihten Verbrauchsannahmen sowie der bestgereihten Gruppierungen statt und wurde gemäß der Kombinationsmatrix in Tabelle 3-8 (Kapitel 3.5.1.3) durchgeführt.

Das Ziel dieser Kombinationen war die Überprüfung der weiteren Verbrauchsannahmen, um einseitige Effekte der in Teil 2 verwendeten Verbrauchsannahme „Gebäudeklasse“ zu überprüfen und auszuschließen.

4.2.3.1 Teilergebnisse der MCDA

Auf den folgenden Seiten sind die Ergebnisse der Kalibrierung sowie die Einzelwertungen der MCDA für die folgenden Bereiche tabellarisch dargestellt:

- Fitness (Tabelle 4-18)
- Druckabweichung Gesamt (Tabelle 4-19)
- Druckabweichung je Sensor (Tabelle 4-20)
- Verbrauchsverteilung und Laufzeit (Tabelle 4-21)

Innerhalb der Tabellen sind die bestgereihten Ergebnisse je Bewertungskriterium grün hinterlegt. Die Bewertungskriterien sowie deren Gewichtung wurden in Kapitel 3.6.2 beschrieben. Die Ergebnisse der Vergleichskalibrierung (V00; keine initiale Verbrauchsverteilung und keine Fitnessbewertung der Verbrauchsannahme) sind ebenfalls ersichtlich. Wie bereits im Teil 2 der Vorkalibrierung erfolgt die Bewertung der Ergebnisse über alle Gruppierungskombinationen und auch der Vergleichskalibrierung V00.

Die in den Ergebnistabellen dargestellten Kombinationen beziehen sich dabei auf die unterschiedlichen Verbrauchsannahmen wie folgt:

- K01 – K04: „Gebäudeklasse“
- K05 – K08: „Fläche“
- K09 – K12: „Gleichverteilt“

Anhand der Ergebnisse der Fitnessbewertung (Tabelle 4-18) zeigt sich, dass die Verbrauchsannahme „Fläche“ über die Parameter Median und Interquartilsabstand schlechter abschneidet als die beiden anderen Annahmen.

Tabelle 4-18: Vorkalibrierung Teil 3: Ergebnisse der Fitnessbewertung

		Fitness (Median)		Fitness (IQR)		Fitness (Std)		Gesamtpunkte
		Wert	Punkte	Wert	Punkte	Wert	Punkte	
Vgl.	V00	0,17709	2	0,24647	1	0,17952	1	4
Kombination	K01	0,14433	14	0,13503	5	0,13092	5	24
	K02	0,14169	20	0,11368	7	0,13018	9	36
	K03	0,14326	16	0,11151	9	0,13277	3	28
	K04	0,13414	24	0,11000	10	0,12690	11	45
	K05	0,15466	4	0,12588	6	0,13033	8	18
	K06	0,15293	6	0,15165	2	0,13181	4	12
	K07	0,14470	10	0,13813	4	0,13290	2	16
	K08	0,14465	12	0,14205	3	0,12264	13	28
	K09	0,14317	18	0,10012	12	0,13038	7	37
	K10	0,14475	8	0,11323	8	0,13042	6	22
	K11	0,14051	22	0,09995	13	0,12974	10	45
	K12	0,13256	26	0,10481	11	0,12360	12	49

Tabelle 4-19: Vorkalibrierung Teil 3: Ergebnisse der Druckabweichung (Gesamt)

		ΔP (Median)		ΔP (IQR)		Gesamtpunkte
		Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	
Vgl.	V00	0,06859	2	0,15851	8	10
Kombination	K01	0,01549	14	0,13601	24	38
	K02	0,00135	26	0,13993	22	48
	K03	0,00328	24	0,13266	26	50
	K04	0,02517	8	0,14309	16	24
	K05	0,01532	16	0,16426	2	18
	K06	0,02650	6	0,15869	6	12
	K07	0,01421	18	0,15870	4	22
	K08	0,04118	4	0,15346	10	14
	K09	0,01102	22	0,14267	20	42
	K10	0,02221	12	0,14485	12	24
	K11	0,01247	20	0,14442	14	34
	K12	0,02367	10	0,14268	18	28

Innerhalb der Bewertungen der Druckabweichungen (Tabelle 4-19 und Tabelle 4-20) ergibt sich ein ähnliches Bild, wonach Kalibrierungen anhand der Verbrauchsannahme „Fläche“ überwiegend größere Druckabweichungen ergeben, verglichen mit Kalibrierungen anderer Verbrauchsannahmen. Wie bereits mehrfach erwähnt, bewegen sich sowohl die Druckabweichungen als auch die Unterschiede zwischen den Kalibrierungen innerhalb sehr geringer absoluter Werte.

Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 4-20: Vorkalibrierung Teil 3: Ergebnisse der Druckabweichung je Sensor

		ΔP HG3835		ΔP HG3933		ΔP HG4162		ΔP HG4383		Gesamt- punkte
		(Median)		(Median)		(Median)		(Median)		
		Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	
Vgl.	V00	0,05175	1	0,03769	1	-0,02745	1	0,18116	1	4
Kombination	K01	0,01626	10	-0,01261	6	-0,00569	11	0,04046	6	33
	K02	0,01531	12	-0,02361	2	-0,00192	12	0,01574	12	38
	K03	0,01612	11	-0,02261	3	-0,00103	13	0,01018	13	40
	K04	0,02822	5	0,00392	8	-0,00944	6	0,03028	10	29
	K05	0,01932	9	-0,00015	13	-0,00672	9	0,03324	9	40
	K06	0,03407	3	0,00385	9	-0,01153	4	0,05858	3	19
	K07	0,03226	4	-0,00111	11	-0,00986	5	0,02986	11	31
	K08	0,03902	2	0,01839	4	-0,01786	2	0,06012	2	10
	K09	0,01482	13	-0,01615	5	-0,00772	7	0,03878	7	32
	K10	0,02153	8	-0,00078	12	-0,01222	3	0,05798	4	27
	K11	0,02331	6	0,00264	10	-0,00681	8	0,04758	5	29
	K12	0,02323	7	0,00537	7	-0,00631	10	0,03834	8	32

Tabelle 4-21: Vorkalibrierung Teil 3: Ergebnisse der Verbrauchsverteilung und Laufzeit

		Gruppenver- bräuche		Gruppenver- bräuche		Laufzeit		Ge- samt- punkte
		(Median der Std)		(Median der Variations- koeffizienten)		(Median)		
		Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	Wert	Pkt.	
Vgl.	V00	0,17754		0,87464		50,26	2	
Kombination	K01	0,05713		0,62903	1	45,85	6	7
	K02	0,02977		0,53018	7	48,59	5	12
	K03	0,03052		0,63598		45,42	8	8
	K04	0,02611	5	0,61048	3	52,04	4	12
	K05	0,02703	3	0,49667	8	61,14		11
	K06	0,02419	8	0,81546		65,49		8
	K07	0,02499	7	0,84362		64,84		7
	K08	0,02569	6	0,67992		53,76		6
	K09	0,05372		0,59372	4	45,83	7	11
	K10	0,02734	2	0,53846	6	52,75	3	11
	K11	0,02951	1	0,55368	5	53,60	1	7
	K12	0,02692	4	0,62040	2	53,24	2	8

4.2.3.2 Gesamtbewertung der MCDA

Basierend auf den Teilergebnissen der MCDA ergibt sich die in Tabelle 4-22 dargestellte Gesamtbewertung der Kombinationskalibrierungen. Für die Verwendung in den Langzeitkalibrierungen wurden nach der MCDA Bewertung die besten 4 Kombinationen weitergegeben.

Tabelle 4-22: Vorkalibrierung Teil 3: Gesamtbewertung MCDA

		Fit- ness	Druck- abwei- chung (Ge- samt)	Druckab- wei- chung (Senso- ren)	Ver- brauch & Laufzeit	Ge- samt- punkte	Rang
		Pkt.	Pkt.	Pkt.	Pkt.		
Vgl.	V00	4	10	4	0	18	13
Gruppierung	K01	24	38	33	7	96	7
	K02	36	48	38	12	129	1
	K03	28	50	40	8	118	2
	K04	45	24	29	12	106	6
	K05	18	18	40	11	87	8
	K06	12	12	19	8	51	12
	K07	16	22	31	7	76	10
	K08	28	14	10	6	58	11
	K09	37	42	32	11	115	3
	K10	22	24	27	11	81	9
	K11	45	34	29	7	114	5
	K12	49	28	32	8	115	3

Abbildung 4-7 betrachtet die Auswirkungen der Verbrauchsannahmen auf die unterschiedlichen Gruppierungen. Anhand des Bewertungsergebnisses zeigt sich, dass die Verbrauchsannahme „Fläche“ in Kombination mit allen 4 gewählten Gruppierungsmöglichkeiten die jeweils schlechteste Bewertung erhielt. Für die Gruppierungen G08 und G10 erzielten die Verbrauchsannahmen „Gebäudeklasse“ und „Gleichverteilt“ vergleichbare Ergebnisse, während bei den Gruppierungen G04 und G07 jeweils eine der Verbrauchsannahmen bessere Bewertungen erzielt als die andere.

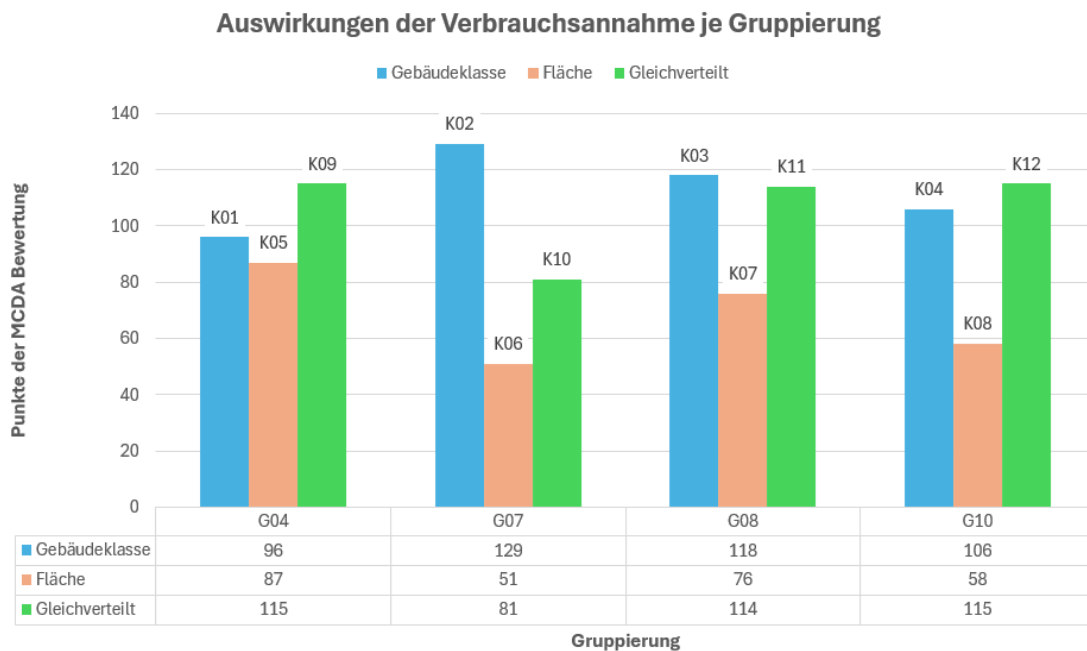


Abbildung 4-7: Vergleich der Gruppierungen je Verbrauchsannahme

In Tabelle 4-23 sind die Detailergebnisse der vier bestgereihten Kombinationen ersichtlich. Wie bereits innerhalb der Teile 1 und 2 weisen die Ergebnisse sehr geringe Größenordnungen auf, jedoch ist erkennbar, dass im Gegensatz zu früheren Teilen der Vorkalibrierung die Abweichungen über die Kombinationen größtenteils geringer ausfallen und alle Kombinationen homogenere Ergebnisse liefern.

Tabelle 4-23: Vorkalibrierung Teil 3: Vergleich der bestgereihten Gruppierungen

	Minimum	K02	K03	K09	K12
Fitness _(Median)	0,133 [-]	107%	108%	108%	<u>100%</u>
Fitness _(IQR)	0,100 [-]	114%	111%	100%	105%
Fitness _(Std)	0,124 [-]	105%	107%	105%	100%
ΔP _(Gesamt, Median)	0,001 [mWS]	<u>100%</u>	243%	814%	1.749%
ΔP _(Gesamt, IQR)	0,133 [mWS]	105%	<u>100%</u>	108%	108%
ΔP HG3835 _(Median)	0,015 [mWS]	103%	109%	<u>100%</u>	157%
ΔP HG3933 _(Median)	0,005 [mWS]	440%	421%	301%	<u>100%</u>
ΔP HG4162 _(Median)	0,001 [mWS]	186%	<u>100%</u>	748%	611%
ΔP HG4383 _(Median)	0,010 [mWS]	155%	<u>100%</u>	381%	377%
Gruppenverbräuche (Median der Std)	0,027 [-]	111%	113%	200%	100%
Gruppenverbräuche (Median de Variationskoeffizienten)	0,530 [-]	100%	120%	112%	117%
Laufzeit (Median)	45,42 [s]	107%	<u>100%</u>	101%	117%
<u>Unterstrichen:</u> absoluter Bestwert über alle Parameterkombinationen (Teil 3)					

4.2.4 Teil 3 Untersuchung der Druckabweichungen

Innerhalb dieses Unterkapitels werden die Ergebnisse der Druckabweichungen der durch die MCDA bestgereihten Kombinationen des Teil 3 nochmals separat untersucht und mit Hilfe von Plots und Tabellen miteinander verglichen.

Die Druckdaten wurden u.a. nach ihren spezifischen Werten je Stunde sowie je Stunde und Szenario ausgewertet. Überprüft wurde dabei auch das Ausreißerverhalten einzelner Szenarien. In Tabelle 4-24 sind die Druckabweichungen der Szenarien K02, K03, K09 und K12 je Stunde und Anzahl der Ausreißer dargestellt. Ebenfalls dargestellt sind die Ergebnisse der Vergleichskalibrierung V00.

Je Stunde wurden dabei über 35 Szenarien mit je fünf Wiederholungen und vier Druckmesspunkte 700 Druckmessungen erfasst. Die Anzahl der Ausreißer beschreibt dabei jede Druckmessung eines Druckmesspunktes, die außerhalb des definierten Bereiches (vgl. Kapitel 3.6.3) je Stunde für den jeweiligen spezifischen Druckmesspunkt liegt. Im Vergleich zur Vergleichskalibrierung V00 zeigen die weiteren Ergebnisse Verbesserungen auf. Dabei muss aber angemerkt werden, dass bereits die Vorkalibrierung durch den Ansatz der Kalibrierung der Verbraucher wesentliche Verbesserungen der Druckabweichungen gegenüber dem Eingangsmodell erreicht (kalibrierte Rohrraugigkeiten; vgl. Kapitel 2.6.2).

Ersichtlich ist ebenso, dass es innerhalb der Druckabweichungen je Stunde starke Unterschiede im Bereich der Ausreißer gibt. Alle dokumentierten Ausreißer geschehen bei Kalibrierungen der Uhrzeit 07:00. Bei genauerer Betrachtung handelt es sich hierbei jedes Mal um die gleichen bis zu acht Szenarien, wobei es sich bei fünf der Szenarien um Werktage handelt und bei den übrigen drei um Sonntage.

Tabelle 4-24: Ausreißer der Druckmesspunkte je Stunde

	Uhrzeit	$\Delta P_{(Median)}$ [m]	$\Delta P_{(IQR)}$ [m]	Anzahl d. Ausreißer
V00	07:00	0,0763	0,2632	22
	08:00	0,0326	0,2926	3
K02	07:00	0,0142	0,2322	26
	08:00	-0,0061	0,2795	0
K03	07:00	0,0141	0,2330	34
	08:00	-0,0061	0,2801	0
K09	07:00	0,0148	0,2378	34
	08:00	-0,0085	0,2857	0
K12	07:00	0,0279	0,2366	26
	08:00	0,0010	0,2743	0

Bei grafischer Gegenüberstellung der untersuchten Uhrzeiten 07:00 und 08:00 zeigen die Boxplots der Druckhöhendifferenzen, dass die Ausreißer der kalibrierten Modelle um 07:00 überwiegend an zwei Druckmesspunkten (HG3835 und HG3933) auftreten. Gleichzeitig ist eine starke Veränderung der Interquartilsabstände dieser beiden Messpunkte über die beiden Uhrzeiten klar erkennbar. In den Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11 ist diese Gegenüberstellung für die Kalibrierung K02 ersichtlich. Die Gegenüberstellungen der weiteren Kalibrierungen befinden sich im Anhang D. Weiters zeigen die Boxplots, dass im Vergleich zu den Ergebnissen der Vergleichskalibrierung V00 (Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9) die Druckabweichungen der einzelnen Sensoren stabiler und auch homogener gegen null ausfallen.

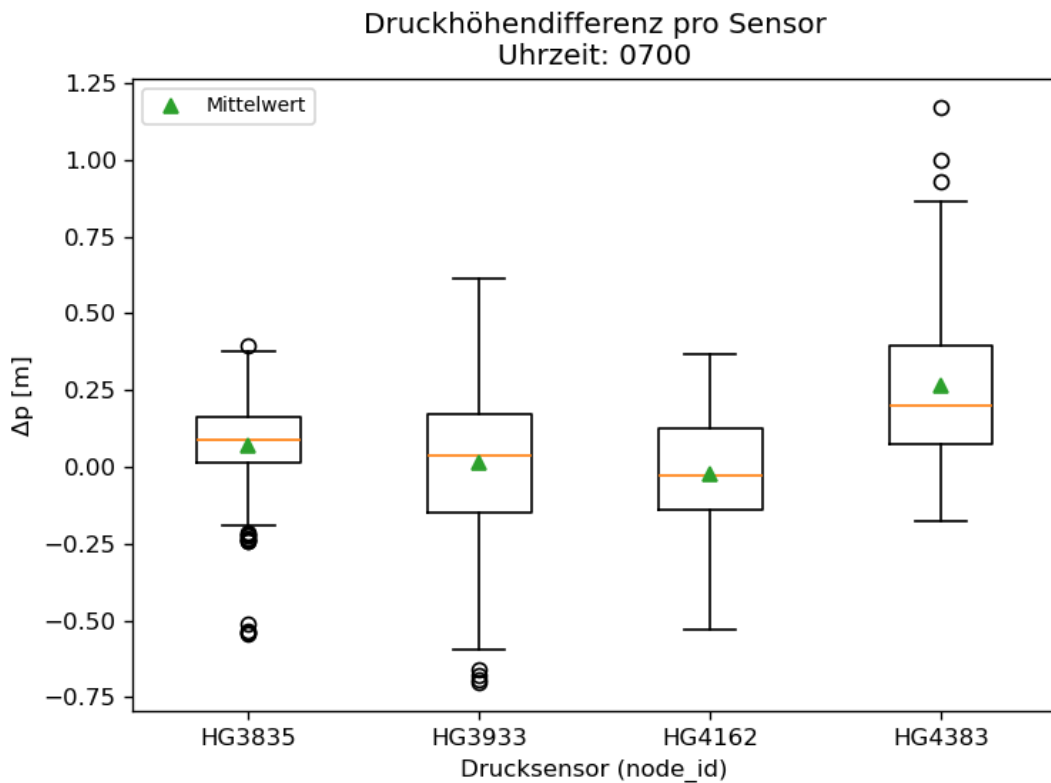


Abbildung 4-8: Boxplot: Druckhöhendifferenz pro Sensor (Vorkalibrierung V00; Uhrzeit 07:00)

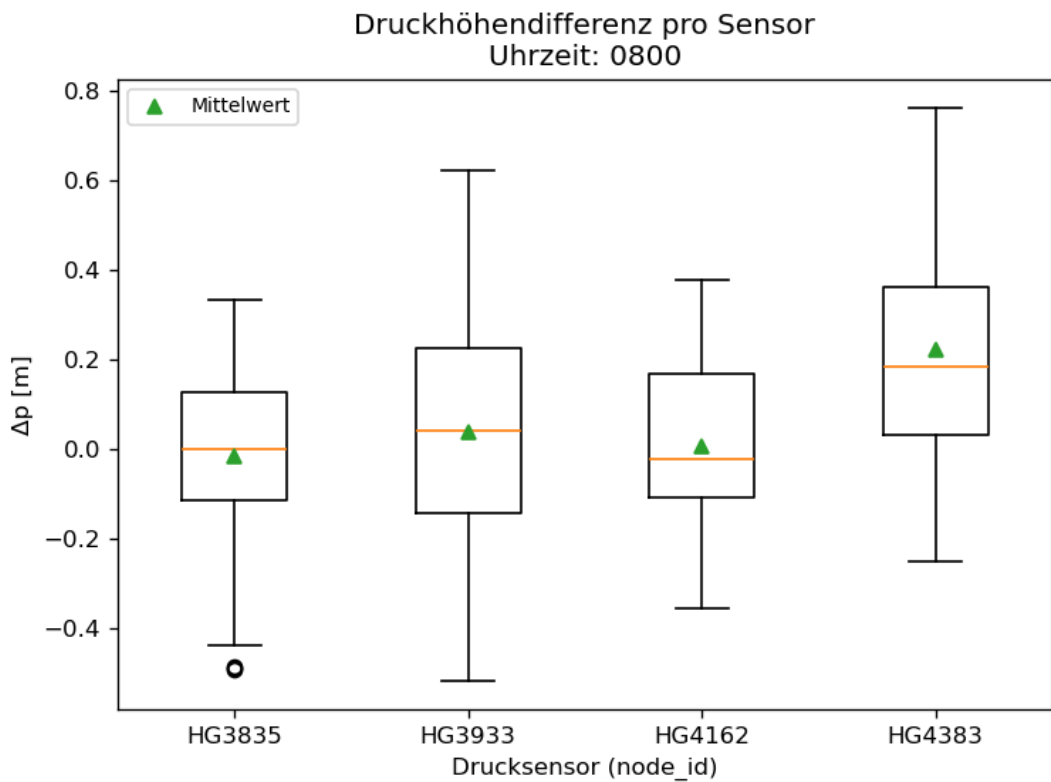


Abbildung 4-9: Boxplot: Druckhöhendifferenz pro Sensor (Vorkalibrierung V00; Uhrzeit 08:00)

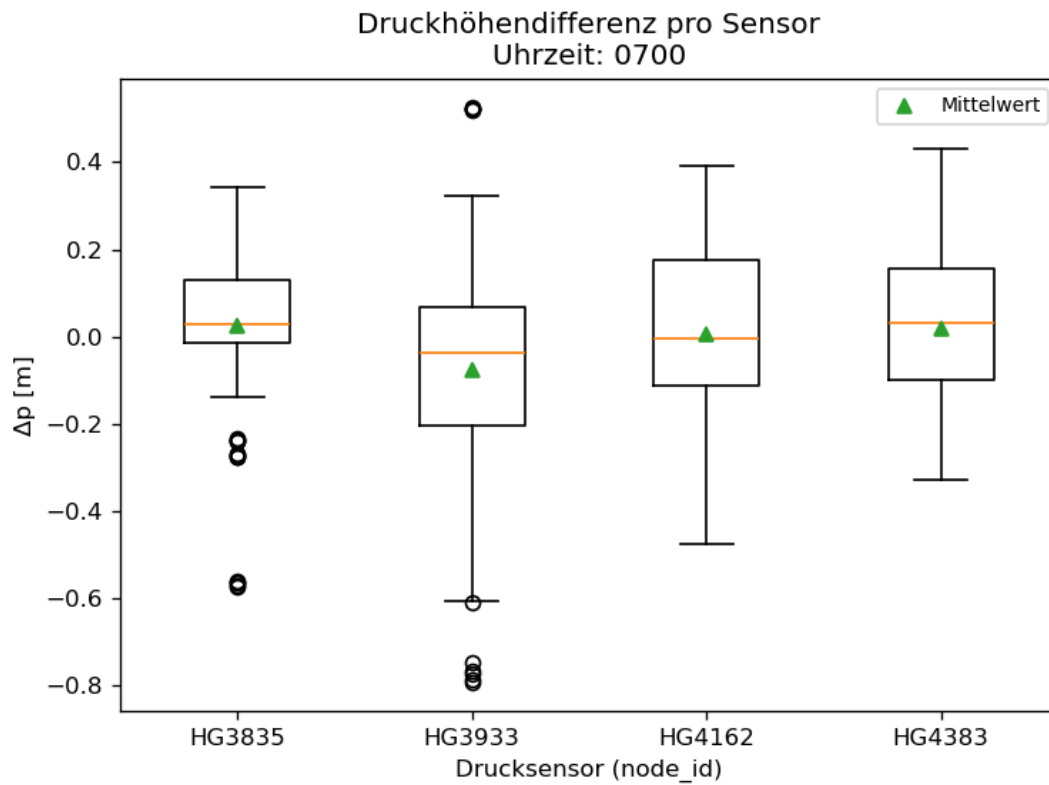


Abbildung 4-10: Boxplot: Druckhöhendifferenz pro Sensor (Kalibrierung K02; Uhrzeit 07:00)

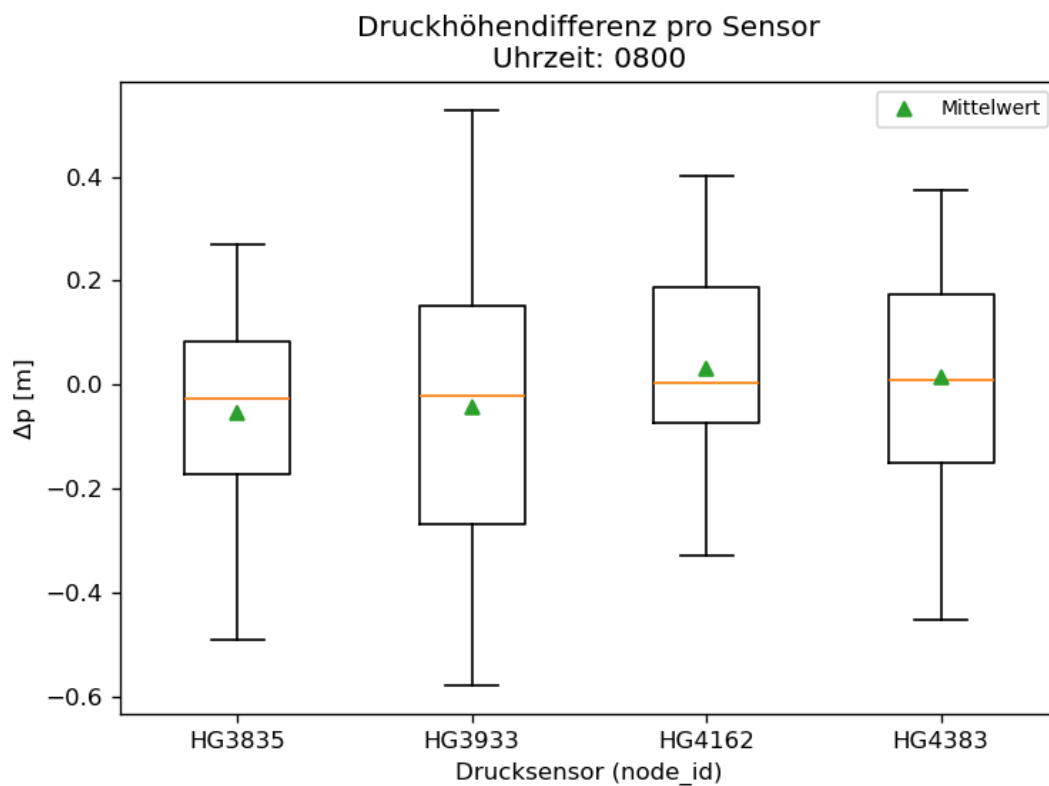


Abbildung 4-11: Boxplot: Druckhöhendifferenz pro Sensor (Kalibrierung K02; Uhrzeit 08:00)

Bei Betrachtung der Einzelergebnisse und statistischen Kennwerte der Druckabweichungen über die Zeit ergibt sich ein Zeitreihendiagramm, ähnlich zu jenem in Abbildung 2-11.

Abbildung 4-12 beschreibt diesen zeitlichen Verlauf der Druckabweichungen anhand des Medians der Druckabweichungen aller Szenarien (blaue Linie) je Stunde der Kalibrierung K02. Die Zeitreihendiagramme der weiteren Kalibrierungen K03, K09 und K12 sind in Anhang E zu finden und ähneln jenem der unten aufgeführten Abbildung. Zusätzlich dargestellt sind der Interquartilsabstand der Druckabweichungen sowie die Medianwerte der Druckabweichung je Szenario als dünne Linien. Der Gesamtmedianwert beider Stunden liegt jeweils nahe einer Druckdifferenz von wenigen Zentimetern und auch die Interquartilsabstände liegen bei maximal 20 Zentimeter. Verglichen zu den Druckabweichungen des Eingangsmodells zeigen sich starke Verbesserungen im Bereich der Druckabweichungen zur Spitzenstunde und auch der Stabilität der Ergebnisse durch den schmaleren Interquartilsabstand.

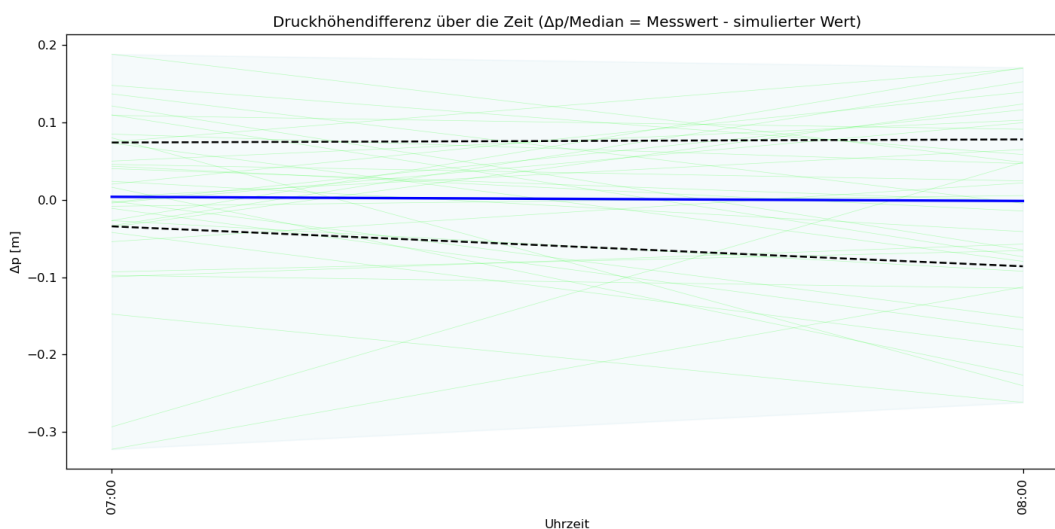


Abbildung 4-12: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (K02)

Anhand der gleichen grafischen Auswertung der Vergleichskalibrierung V00 (Abbildung 4-13) zeigt sich die Verbesserung durch die im Verlauf der Vorkalibrierungen ermittelten Verbrauchsannahmen und Gruppierungen. Die Druckabweichungen der Vergleichskalibrierung weisen im Gegensatz zu den Ergebnissen der weiteren Kalibrierungen eine stärkere Druckabweichung auf.

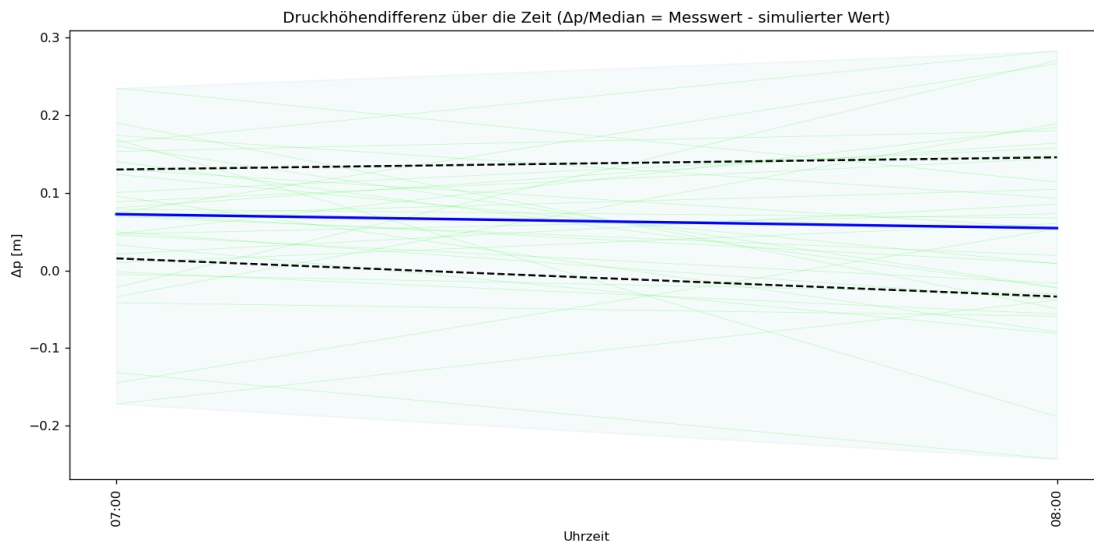


Abbildung 4-13: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (V00)

4.3 Langzeitkalibrierungen

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der Langzeitkalibrierungen mittels Tabellen und Grafiken dargestellt. In einem ersten Schritt werden die Ergebnisse der Langzeitkalibrierung über alle Stunden mit jenen der entsprechenden Vorkalibrierungen verglichen, um die Stabilität der Kalibrierungen über einen längeren Zeitraum zu prüfen. Im Anschluss wird auf die Ergebnisse der Druckabweichungen und Verbräuche im Detail eingegangen.

Im Zuge jeder Langzeitkalibrierung wurden 35 bzw. 34² Szenarien je untersuchter Uhrzeit für den Zeitraum 05:00 bis 23:00 kalibriert. In Summe wurden 662 Szenarien mit jeweils acht Wiederholungen berechnet.

Die vier bestgereihten Kalibrierungen der Vorkalibrierung Teil 3 behielten für die Langzeitkalibrierungen ihre jeweiligen Bezeichnungen. Wenn nicht anders ausgewiesen, beschreiben die Bezeichnungen K02, K03, K09 und K12 die jeweiligen Kalibrierungen der Langzeitkalibrierung. Für die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Langzeitkalibrierung mit jenen der Vorkalibrierung Teil 3 werden die Suffixe „Lang“ und „Vor“ genutzt, um die Ergebnisse gleicher Parametereinstellungen zu unterscheiden.

4.3.1 Vergleich mit den Ergebnissen der Vorkalibrierung

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Langzeitkalibrierung anhand der Kennwerte der MCDA Bewertung für die Vorkalibrierung dargestellt und jenen der Vorkalibrierung Teil 3 gegenübergestellt. Folgende Kalibrierungen der Vorkalibrierungen wurden für die Langzeitkalibrierung herangezogen:

² Die Uhrzeiten 12:00, 13:00 und 14:00 weisen jeweils wegen fehlender Druckdaten nur 34 Szenarien auf (vgl. Kapitel 3.3.2).

- Kalibrierung K02: Tabelle 4-25
- Kalibrierung K03: Tabelle 4-26
- Kalibrierung K09: Tabelle 4-27
- Kalibrierung K12: Tabelle 4-28

In allen Langzeitkalibrierungen ergeben sich für die Fitnesswerte Verbesserungen beim Medianwert aller Szenarien, jedoch einhergehend mit einer größeren Breite des Interquartilsabstandes. Der niedrigere Medianwert der Fitness deutet mitunter auf in Summe bessere Kalibrierergebnisse über alle Stunden. Jedoch zeigt der vergrößerte Interquartilsabstand auf, dass womöglich gewisse Stunden oder Szenarien deutlich schlechtere Ergebnisse liefern als der sonstige Großteil der Stunden und Szenarien. Dies kann auf eine verstärkte Heterogenität einzelner Szenarien und Stunden deuten oder auf das Festfahren in lokalen Optima im Zuge der Kalibrierung, worauf jedoch die Ergebnisse der Vorkalibrierung keine Anhaltspunkte bieten. Weiters spiegeln sich in allen Langzeitkalibrierungen die Erhöhungen der Wiederholungen je Szenario von fünf auf acht in den erhöhten Laufzeiten.

Die Stabilität der Anteile der jeweiligen Gruppenverbräuche, ausgedrückt über den Median der Standardabweichung aller Gruppenanteile und den Median des Variationskoeffizienten ebendieser, bleiben für alle Langzeitkalibrierungen sehr ähnlich zu jenen der Vorkalibrierung. Dies bedeutet, dass die Gruppenverbräuche über alle ermittelten Szenarien und Uhrzeiten eine ähnliche Stabilität aufweisen.

Bei Betrachtung der Druckabweichungen zeigen die Langzeitkalibrierungen im Vergleich zu den Vorkalibrierungen zwei unterschiedliche Verhaltensmuster. Die Kalibrierungen K02 und K03 weisen sowohl starke Relativanstiege der gesamt ermittelten Druckabweichung auf als auch jeweils starke Anstiege der Druckabweichung des Sensors HG4162 sowie des Sensors HG3933. Im Gegenzug reduzieren sich die Druckabweichungen des Sensors 4383 auffallend, wie in Tabelle 4-25 und Tabelle 4-26 ersichtlich. Die gesamt ermittelten Druckabweichungen der Kalibrierungen K09 und K12 reduzieren sich dagegen im Relativverhältnis während einzelne Sensorknoten Anstiege und Reduzierungen aufweisen (vgl. Tabelle 4-27 und Tabelle 4-28). Anzumerken ist, dass es sich hierbei um zum Teil starke Relativanstiege/-abnahmen handelt, die Absolutwerte jedoch im Ausmaß weniger Zentimeter bzw. maximal $3 \cdot 10^{-3}$ bar liegen und somit grundsätzlich von sehr stabilen und minimalen Druckabweichungen gesprochen werden kann. Die Schwankungen der Druckabweichungen, ausgedrückt über den Interquartilsabstand, betragen in allen Kalibrierungen ca. 14 cm oder 0,14 mWS, sowohl während der Vorkalibrierung als auch den Langzeitkalibrierungen.

Tabelle 4-25: K02 Vergleich Langzeitkalibrierung / Vorkalibrierung

	Einheit	K02		Verhältnis Lang / Vor
		Lang	Vor	
Fitness (Median)	[-]	0,1127	0,1417	80%
Fitness (IQR)	[-]	0,1395	0,1137	123%
Fitness (Std)	[-]	0,1251	0,1302	96%
ΔP (Median)	[mWS]	-0,0064	0,0014	470%
ΔP (IQR)	[mWS]	0,1427	0,1399	102%
ΔP HG3835 (Median)	[mWS]	-0,0164	0,0153	107%
ΔP HG3933 (Median)	[mWS]	-0,0472	-0,0236	200%
ΔP HG4162 (Median)	[mWS]	0,0189	-0,0019	984%
ΔP HG4383 (Median)	[mWS]	-0,0001	0,0157	1%
Gruppenverbräuche (Median der Std)	[-]	0,0294	0,0298	99%
Gruppenverbräuche (Median der Variationskoeffizienten)	[-]	0,5283	0,5302	100%
Laufzeit (Median)	[s]	87,545	48,5855	180%

Tabelle 4-26: K03 Vergleich Langzeitkalibrierung / Vorkalibrierung

	Einheit	K03		Verhältnis Lang / Vor
		Lang	Vor	
Fitness (Median)	[-]	0,1120	0,1433	78%
Fitness (IQR)	[-]	0,1410	0,1115	126%
Fitness (Std)	[-]	0,1248	0,1328	94%
ΔP (Median)	[mWS]	-0,0089	0,0033	269%
ΔP (IQR)	[mWS]	0,1481	0,1327	112%
ΔP HG3835 (Median)	[mWS]	-0,0171	0,0161	106%
ΔP HG3933 (Median)	[mWS]	-0,0511	-0,0226	226%
ΔP HG4162 (Median)	[mWS]	0,0201	-0,0010	1946%
ΔP HG4383 (Median)	[mWS]	-0,0030	0,0102	29%
Gruppenverbräuche (Median der Std)	[-]	0,0309	0,0305	101%
Gruppenverbräuche (Median der Variationskoeffizienten)	[-]	0,6573	0,6360	103%
Laufzeit (Median)	[s]	82,061	45,424	181%

Tabelle 4-27: K09 Vergleich Langzeitkalibrierung / Vorkalibrierung

	Einheit	K09		Verhältnis Lang / Vor
		Lang	Vor	
Fitness (Median)	[-]	0,1126	0,1432	79%
Fitness (IQR)	[-]	0,1352	0,1001	135%
Fitness (Std)	[-]	0,1218	0,1304	93%
ΔP (Median)	[mWS]	-0,0024	0,0110	22%
ΔP (IQR)	[mWS]	0,1450	0,1427	102%
ΔP HG3835 (Median)	[mWS]	-0,0163	0,0148	110%
ΔP HG3933 (Median)	[mWS]	-0,0438	-0,0162	271%
ΔP HG4162 (Median)	[mWS]	0,0134	-0,0077	173%
ΔP HG4383 (Median)	[mWS]	0,0076	0,0388	20%
Gruppenverbräuche (Median der Std)	[-]	0,0528	0,0537	98%
Gruppenverbräuche (Median der Variationskoeffizienten)	[-]	0,5950	0,5937	100%
Laufzeit (Median)	[s]	80,207	45,832	175%

Tabelle 4-28: K12 Vergleich Langzeitkalibrierung / Vorkalibrierung

	Einheit	K12		Verhältnis Lang / Vor
		Lang	Vor	
Fitness (Median)	[-]	0,1084	0,1326	82%
Fitness (IQR)	[-]	0,1284	0,1048	123%
Fitness (Std)	[-]	0,1143	0,1236	92%
ΔP (Median)	[mWS]	0,0066	0,0237	28%
ΔP (IQR)	[mWS]	0,1423	0,1427	100%
ΔP HG3835 (Median)	[mWS]	-0,0037	0,0232	16%
ΔP HG3933 (Median)	[mWS]	-0,0319	0,0054	594%
ΔP HG4162 (Median)	[mWS]	0,0119	-0,0063	188%
ΔP HG4383 (Median)	[mWS]	0,0188	0,0383	49%
Gruppenverbräuche (Median der Std)	[-]	0,0259	0,0269	96%
Gruppenverbräuche (Median der Variationskoeffizienten)	[-]	0,5891	0,6204	95%
Laufzeit (Median)	[s]	84,576	53,235	159%

Tabelle 4-29: Vergleich der Zusatzkalibrierungen Z01 und Z02

	Einheit	Mittel d. Vorkal.	Z01	Z02
Fitness (Median)	[-]	0,1114	0,1182	0,1168
Fitness (IQR)	[-]	0,1360	0,1466	0,1446
Fitness (Std)	[-]	0,1215	0,1234	0,1225
ΔP (Median)	[mWS]	0,0061	0,0135	0,0127
ΔP (IQR)	[mWS]	0,1445	0,1513	0,1522
ΔP HG3835 (Median)	[mWS]	0,0134	0,0005	0,0002
ΔP HG3933 (Median)	[mWS]	0,0435	-0,0193	-0,0205
ΔP HG4162 (Median)	[mWS]	0,0161	0,0057	0,0057
ΔP HG4383 (Median)	[mWS]	0,0074	0,0493	0,0449
Gruppenverbräuche (Median der Std)	[-]	0,0348	0,0108	0,0086
Gruppenverbräuche (Median der Variationskoeffizienten)	[-]	0,5924	0,0299	0,0169
Laufzeit (Median)	[s]	83,60	82,58	71,33

Zusätzlich zeigt Tabelle 4-29 die Ergebnisse der neu eingeführten Kalibrierungen Z01 und Z02. Dies zeigt, dass die Ergebnisse der Fitnessauswertung stark dem Mittelwert der Vorkalibrierungen ähneln. Im Bereich der Druckabweichungen ergeben sich gesamtheitlich Verschlechterungen, innerhalb der Detailergebnisse der einzelnen Drucksensoren jedoch auch Verbesserungen. Für die Ergebnisse der Stabilität der Verbrauchsanteile führen die neuen Kalibrierungen zu klaren Verbesserungen gegenüber dem Mittelwert der übrigen Kalibrierungen. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Kalibrierungen Z01 und Z02 in keinem der untersuchten Bereiche klar schlechter einzuschätzen wären als jene der Vorkalibrierung, bei einigen Kennwerten stellen sich sogar klare Verbesserungen ein.

4.3.2 Untersuchung der Druckabweichungen

Im Zuge dieses Kapitels werden die Ergebnisse der Kalibrierungen hinsichtlich der Druckabweichungen und der Stabilität dieser untersucht und ausgewertet. Das Ziel ist die Prüfung, ob Verbesserungen der Druckabweichungen im Vergleich zum auf Rohrrauigkeiten kalibrierten Eingangsnetz auch über längere Untersuchungszeiträume erreicht werden können.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Kalibrierungen mittels grafischer Auswertungen präsentiert. Ergebnistabellen der Druckabweichungen, Interquartilsabstände und Anzahl der Ausreißer für jede der sechs Langzeitkalibrierungen befinden sich im Anhang F.

Innerhalb Abbildung 4-14 bis Abbildung 4-17 sind die Druckabweichungen aller untersuchten Uhrzeiten und Parameterkombinationen als Zeitreihendiagramme dargestellt. Auffällig ist die starke Ähnlichkeit aller Kalibrierungen, sowohl was den Verlauf der Medianlinien als auch Lage/Uhrzeiten der Spitzen und Tiefen der Interquartilsabstände und der Minima und Maxima Werte. Dies kann mitunter an einzelnen Szenarien liegen, für die der Kalibrierer keine den Verbrauchsannahmen entsprechenden Lösungen finden kann. Ebenfalls nicht ausgeschlossen werden können Abweichungen und Messfehler der Eingangsdaten. Die Ergebnisse der Druckabweichungen unterscheiden sich über alle Langzeitkalibrierungen, allerdings befinden sich alle Druckabweichungen in der Größenordnung weniger Zentimeter. Die Schwankungen der Druckabweichungen über die Zeit erscheinen aufgrund der Ähnlichkeit über alle Kalibrierungen wie systemische Einflüsse.

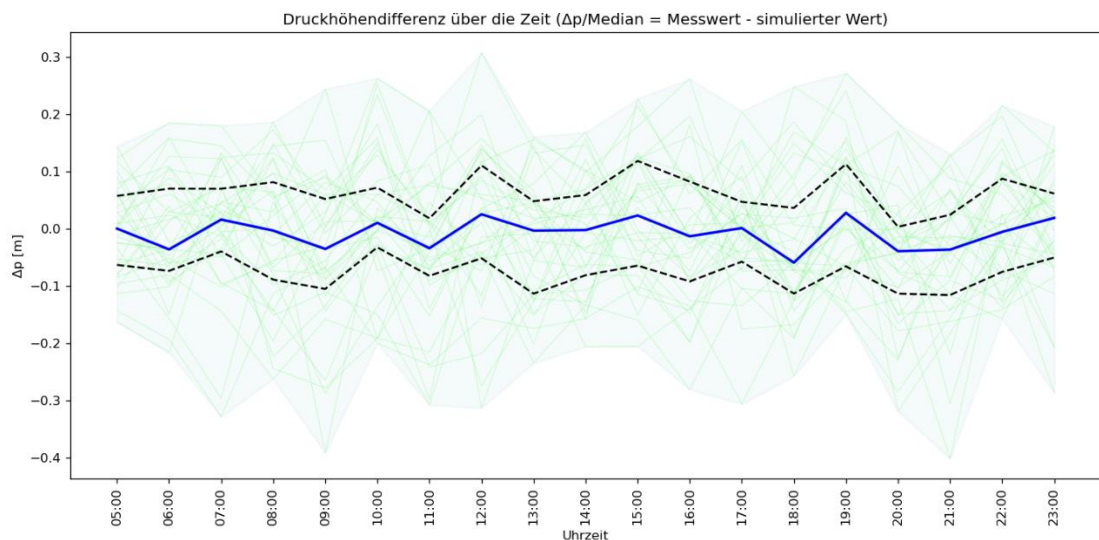


Abbildung 4-14: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (K02)

Ergebnisse und Diskussion

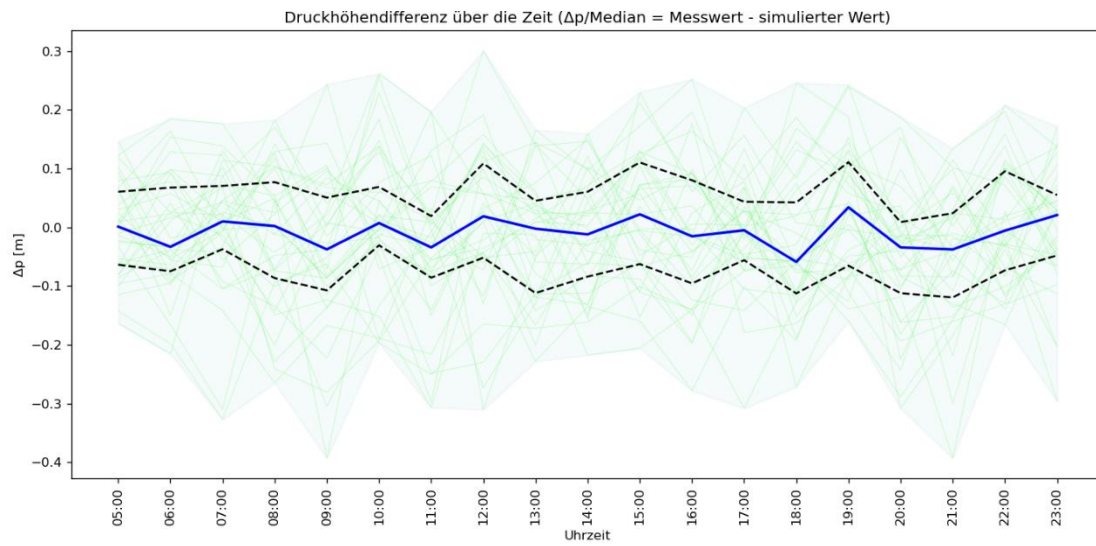


Abbildung 4-15: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (K03)

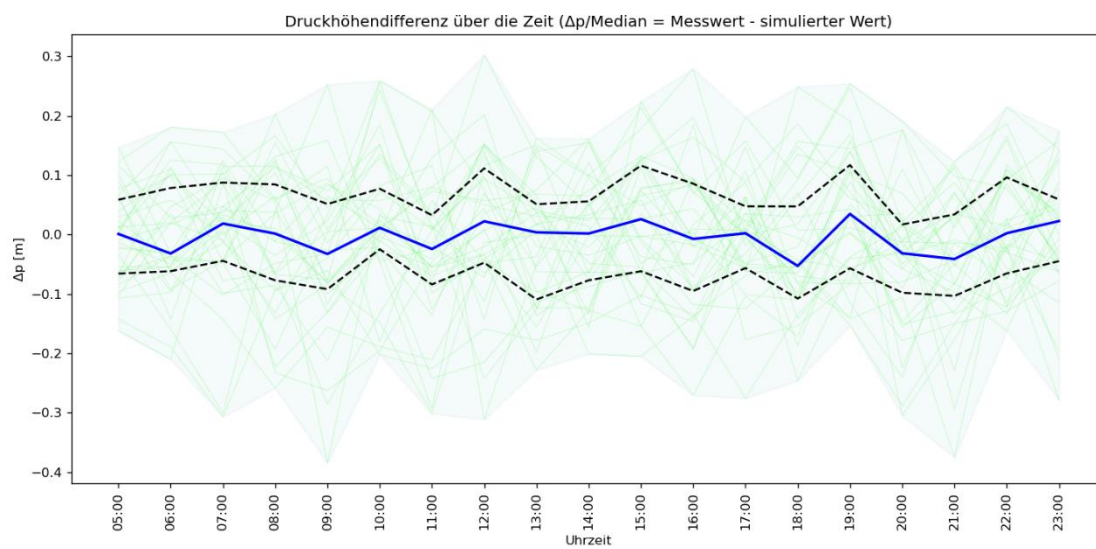


Abbildung 4-16: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (K09)

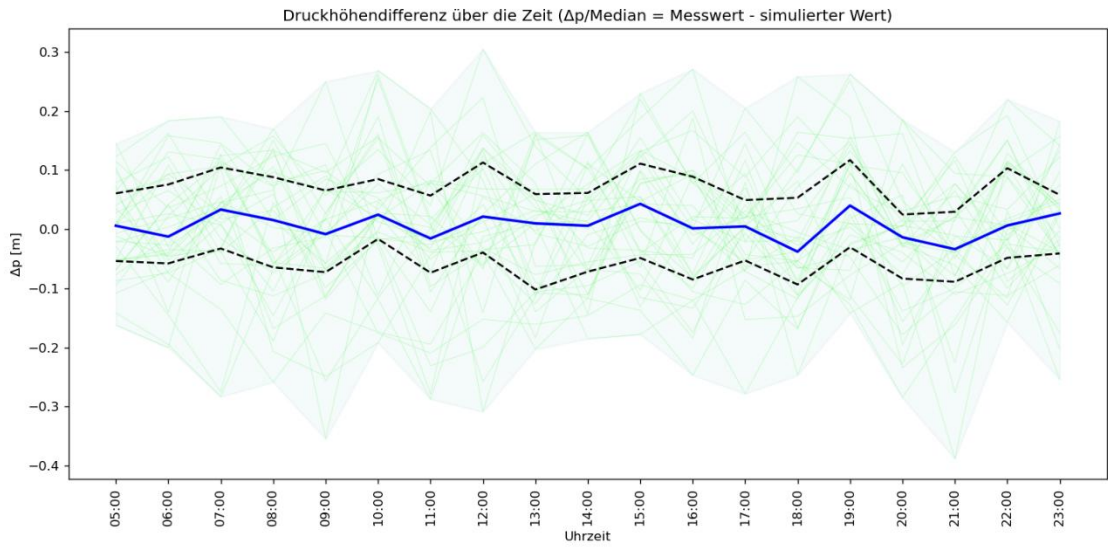


Abbildung 4-17: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (K12)

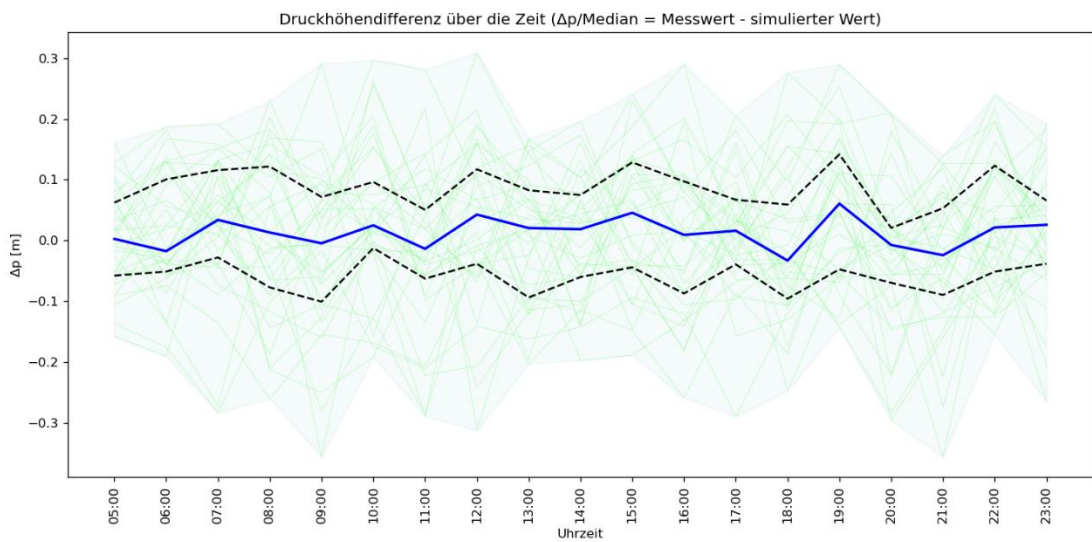


Abbildung 4-18: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (Z01)

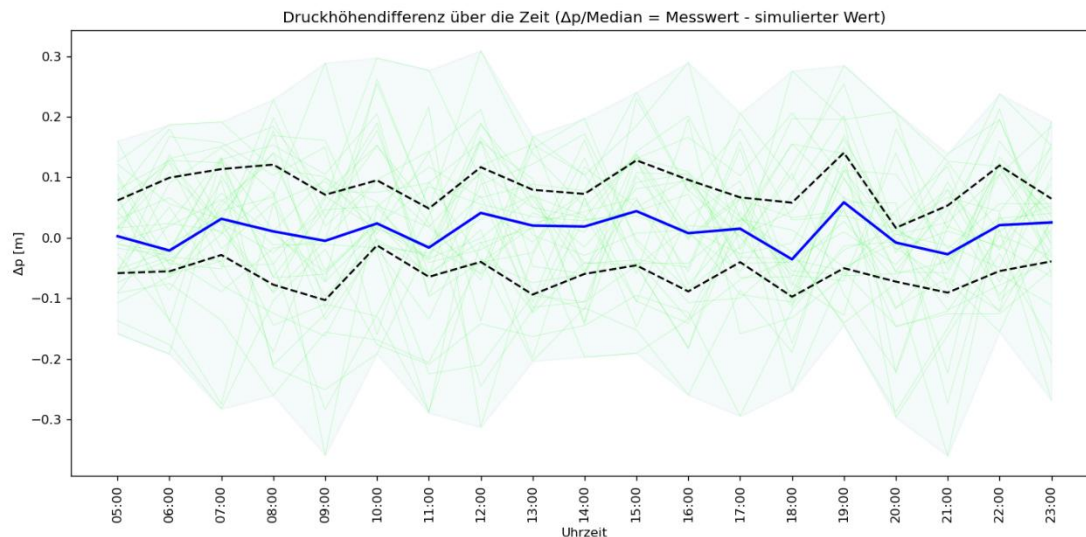


Abbildung 4-19: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen (Z02)

Klar festzustellen ist eine starke Homogenisierung der Druckabweichungen über längere Untersuchungszeiträume und auch für Uhrzeiten mit Spitzenverbräuchen gegenüber dem Eingangsmo­dell. Dieses weist besonders im Zeitraum 06:00 bis 08:00 Spitzen der Druckabweichungen auf und besitzt über den Tag verteilt einen stärkeren Offset. Durch die Ähnlichkeit der oben aufgeführten Druckabweichungen ergibt sich die Schwierigkeit einer genaueren Bewertung und Unterscheidung der Langzeitkalibrierungen hinsichtlich der Druckabweichungen.

4.3.3 Untersuchung der Verbrauchsabschätzungen

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der Verbrauchsabschätzungen präsentiert. Der erste Teil widmet sich dabei der Auswertung der Individualverbrauchsverteilungen und der Überprüfung der Auswirkungen der gewählten Verbrauchsannahmen.

Anschließend werden die Gan­glinien der Langzeitkalibrierungen untersucht und ausgewertet.

4.3.3.1 Anteile der Individualverbräuche

Die folgenden Abbildungen beschreiben die Verteilung und Stabilität der Individualverbräuche. Dabei wurde mittels Boxplots ermittelt, wie groß der Anteil der Individualverbräuche einer Gruppe am aufsummierten Individualverbrauch aller Gruppen für je ein Verbrauchsobjekt ist. Da die gewählten Verbrauchsannahmen über Einwohnerwerte eine relative Verteilung je Objekt ermöglichen, wird geprüft, inwiefern sich diese Annahmen auf die Verbrauchsverteilungen je Objekt auswirken.

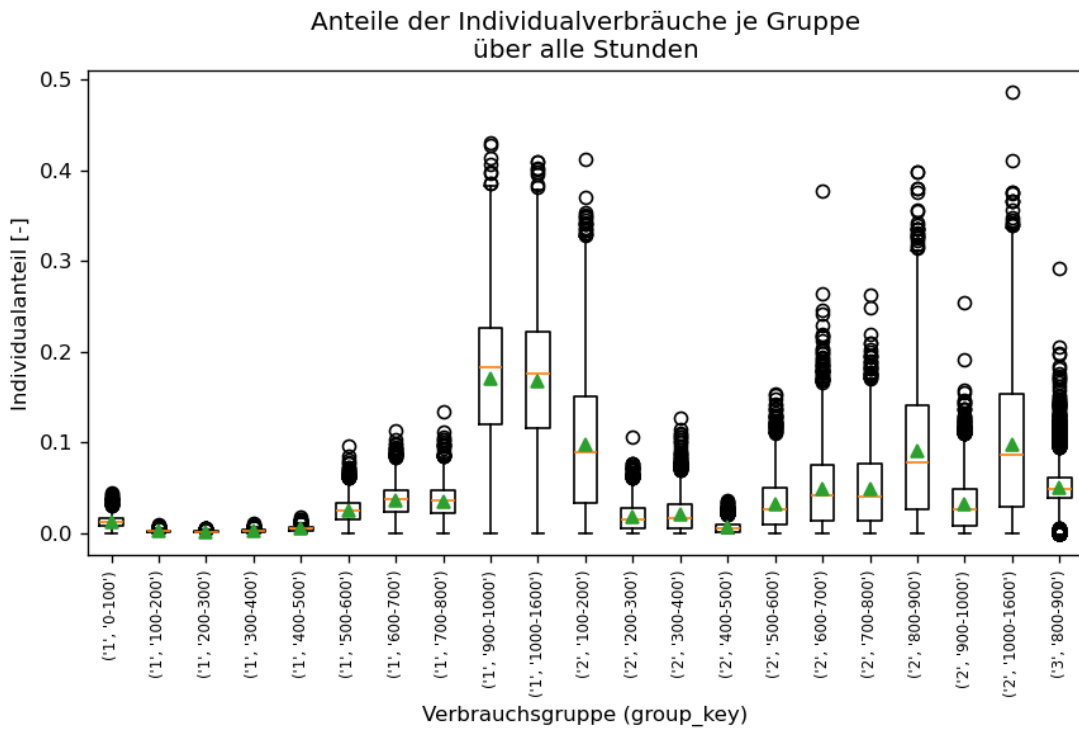


Abbildung 4-20: Anteil der Individualverbräuche je Gruppe über alle Stunden (K02)

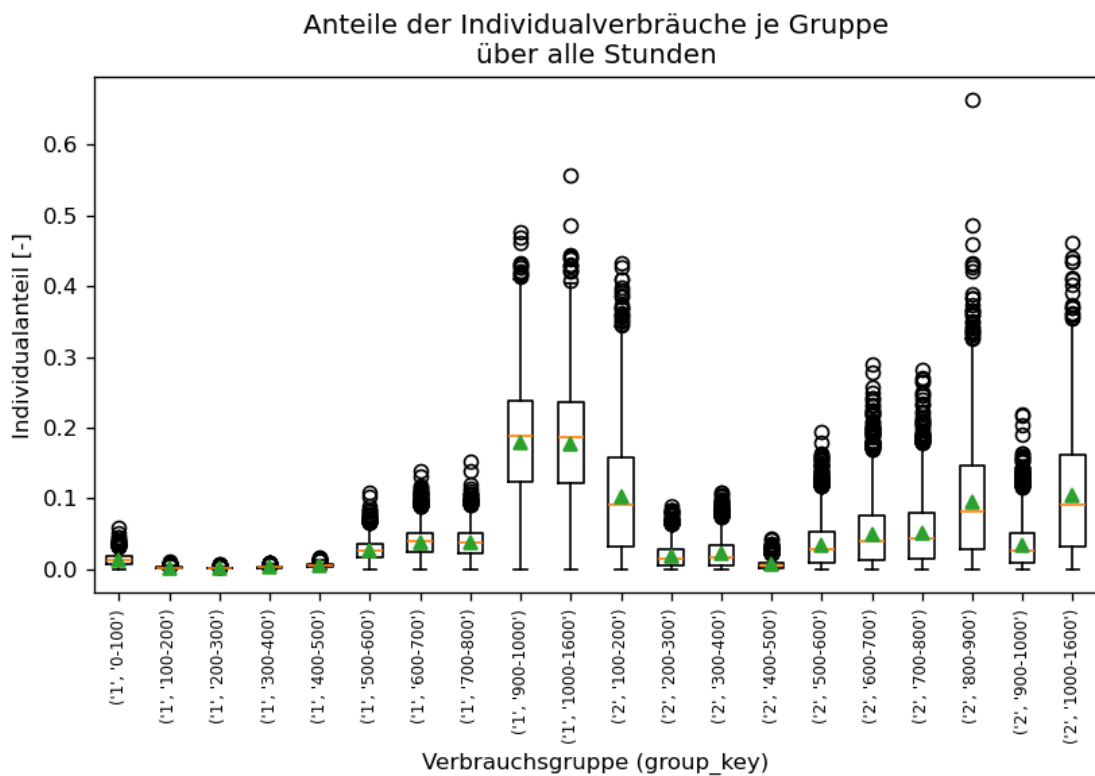


Abbildung 4-21: Anteil der Individualverbräuche je Gruppe über alle Stunden (K03)

Abbildung 4-20 und Abbildung 4-21 beschreiben die Kalibrierungen K02 und K03. Die Gruppierung dieser Kalibrierungen erfolgte anhand der Gebäudeklasse sowie der Fläche, ersichtlich anhand der Beschreibung der Verbrauchsgruppe (group_key): (,Gebäudeklasse', ,Fläche'). Bei beiden dieser Kalibrierungen handelt es sich bei der gewählten Verbrauchsverteilung um „Gebäudeklasse“. Beide Kalibrierungen zeigen Ansätze dieser Verteilung, die für die Klassen 1-3 eine Annahme der Einwohnerwertverteilung von 2,7:12:24 annimmt. Dennoch weisen die Gebäudeklassen 1 und 2 auch starke Ausreißer dieser Annahme auf. Für die Klasse 1 zeigt sich dabei ein steigender Verbrauch mit Gruppierungen, welche eine größere Fläche aufweisen. Dabei handelt es sich grundsätzlich um eine plausible Annahme, dass größere Verbrauchsobjekte einen größeren Verbrauch aufweisen. Diese Annahme ist bei Gebäuden der Klasse EFH jedoch mitunter zu hinterfragen. Für Objekte der Gebäudeklasse 2 (MFH) ergeben die Ausreißer einen vergleichbaren Anstieg des Verbrauchs mit steigender Fläche, Ausnahme ist die geringste Flächengruppierung (,2', ,100-200'). All das deutet darauf hin, dass die Verbrauchsannahme greift, jedoch der Algorithmus genug Freiheit aufweist, sich über die Annahme hinwegzusetzen, um die Druckabweichungen zu priorisieren. Bei Vergleich beider Kalibrierungen fällt auf, dass die Ausreißer aus der Verbrauchsannahme jeweils dieselben Gruppierungen betreffen.

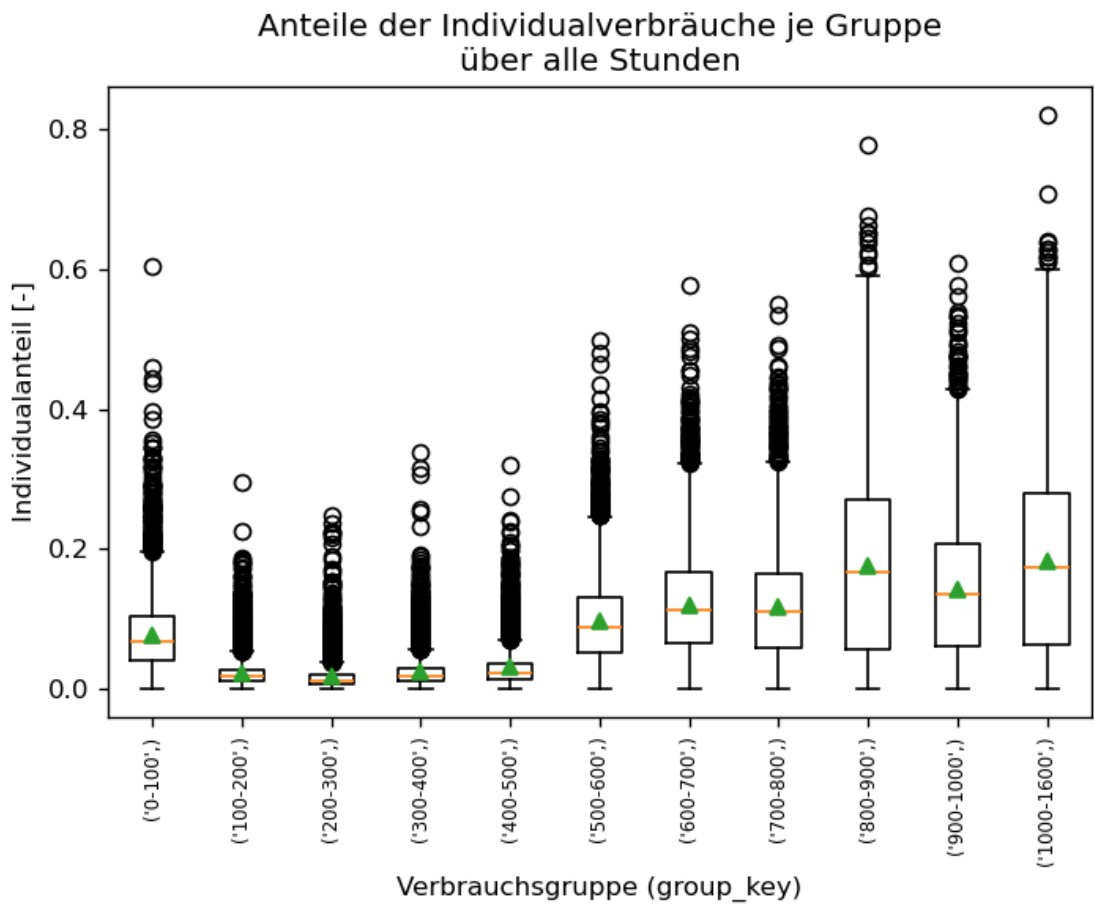


Abbildung 4-22: Anteil der Individualverbräuche je Gruppe über alle Stunden (K09)

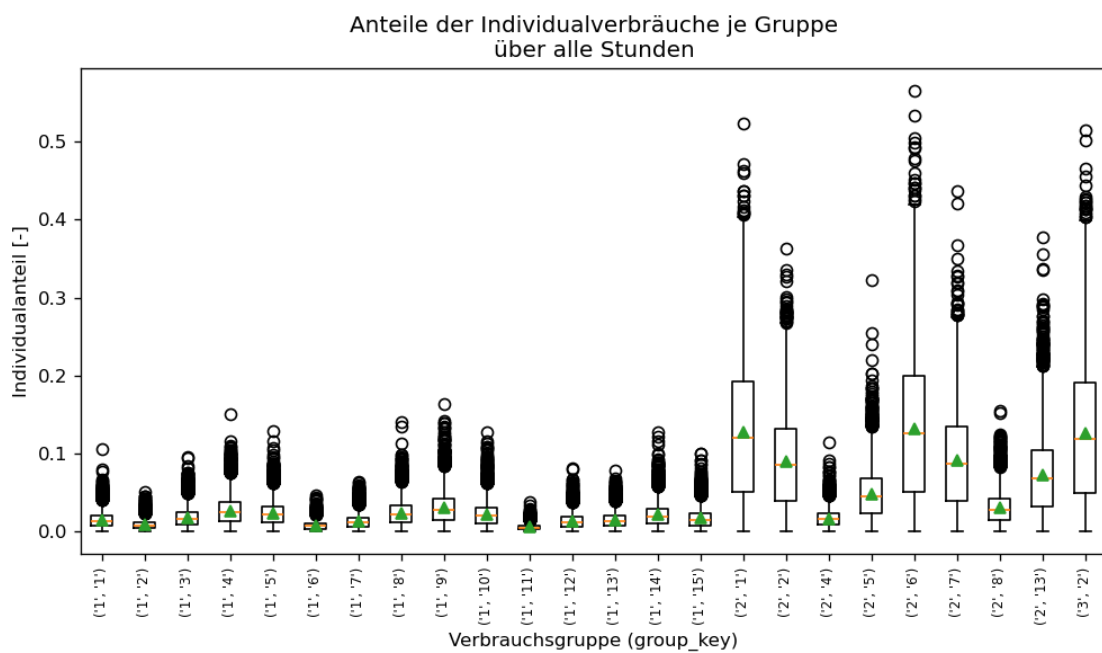


Abbildung 4-23: Anteil der Individualverbräuche je Gruppe über alle Stunden (K12)

Abbildung 4-22 und Abbildung 4-23 beschreiben beide jeweils die Verbrauchsannahme „Gleichverteilt“. Die Gruppierungen unterscheiden sich jedoch. So wurde die Kalibrierung K09 nach der Fläche der Verbrauchsobjekte gruppiert, während K12 nach einer Kombination aus Gebäudeklasse und Region gruppiert wurde. Eine wirkliche gleichverteilte Streuung der Anteile ist dabei nicht ersichtlich, jedoch sind die Verbräuche Gebäudeklasse 1 innerhalb der Kalibrierung K12 deutlich gleichmäßiger verteilt als etwa der Kalibrierungen K02 und K03. Auffallend an den Ergebnissen der Kalibrierung K12 ist zudem, dass die meisten Individualverbräuche der Gebäudeklasse 2 und 3 trotz gleichmäßiger Verbrauchsannahme über jenen der Gebäudeklasse 1 liegen. Für die Kalibrierung K09 ergeben sich ebenfalls trotz der gewählten Verbrauchsannahme wie auch schon im Zuge der Kalibrierungen K02 und K03 Tendenzen zu Individualverbräuchen, welche mit steigender Flächengröße zunehmen. Dass das Kalibrierprogramm trotz entsprechender a-priori Verbrauchsannahmen die Bedeutung gewisser Gruppierungsparameter zu berücksichtigen scheint, führt zu einer Hinterfragung der Bedeutung der Verbrauchsannahmen im Vergleich zur Ermittlung der Gruppierungsparameter.

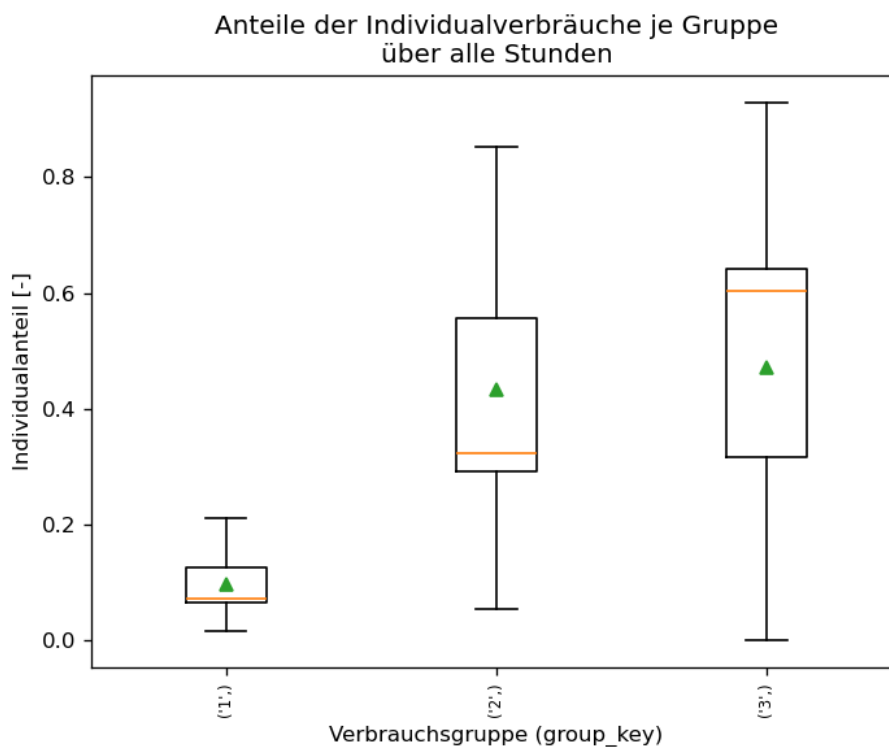


Abbildung 4-24: Anteil der Individualverbräuche je Gruppe über alle Stunden (Z01)

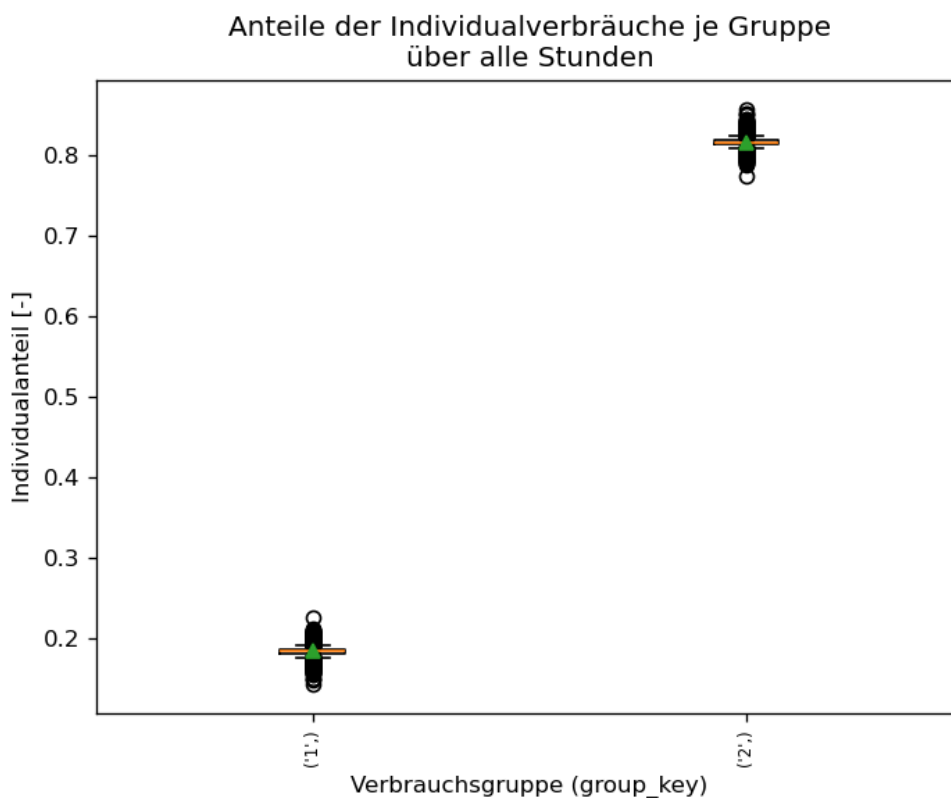


Abbildung 4-25: Anteil der Individualverbräuche je Gruppe über alle Stunden (Z02)

Abbildung 4-24 und Abbildung 4-25 beschreiben die Anteile der Individualverbräuche der beiden Zusatzkalibrierungen Z01 und Z02. Für beide Kalibrierungen wurde die Verbrauchsannahme der „Gebäudeklasse“ gewählt und die Gruppierung erfolgte ebenfalls ausschließlich nach dem Kriterium der Gebäudeklasse. Die Kalibrierung Z02 wurde ausschließlich anhand der Klassen 1 und 2 gruppiert. Es zeigen sich hierbei sehr homogene und der Verteilung der Verbrauchsannahme folgende Anteile der Individualverbräuche, wobei der Individualverbrauch eines Objekts der Gebäudeklasse 2 etwa viermal so groß ist wie jener eines Objekts der Klasse 1. Ein anderes Bild zeigt sich bei der Auswertung der Kalibrierung Z01, welche ebenfalls die Gebäudeklasse 3 (Gasthaus, einzelnes Objekt) beinhaltet. Die Einführung dieses einzelnen Verbrauchsobjektes führt zu deutlich inhomogeneren Ergebnissen mit starken Streuungen der Gebäudeklassen 2 und 3. Diese Streuungen deuten darauf hin, dass sich diese beiden Klassen abwechselnd dominiert haben und auf der Suche nach Lösungen zu Extremwerten neigten. Dieser Umstand kann mitunter an einer falschen Verbrauchsannahme von einer der beiden Gebäudeklassen im Verhältnis zu den anderen liegen.

4.3.3.2 Ganglinien der Verbrauchsgruppierungen

Die folgenden Abbildungen beschreiben je durchgeführter Langzeitkalibrierung die Ganglinien der Verbrauchsabschätzung des Individualverbrauchs aller Gruppierungen für die Kategorisierung der Wochentage nach „Werktage“. Die Ganglinien setzen sich dabei aus den Mittelwerten der Individualverbräuche je Gruppe aller Szenarien zur entsprechenden Uhrzeit zusammen. Die gleich aufgebauten Plots der Wochentage „Samstag“ und „Sonntag“ befinden sich in den Anhängen G und F.

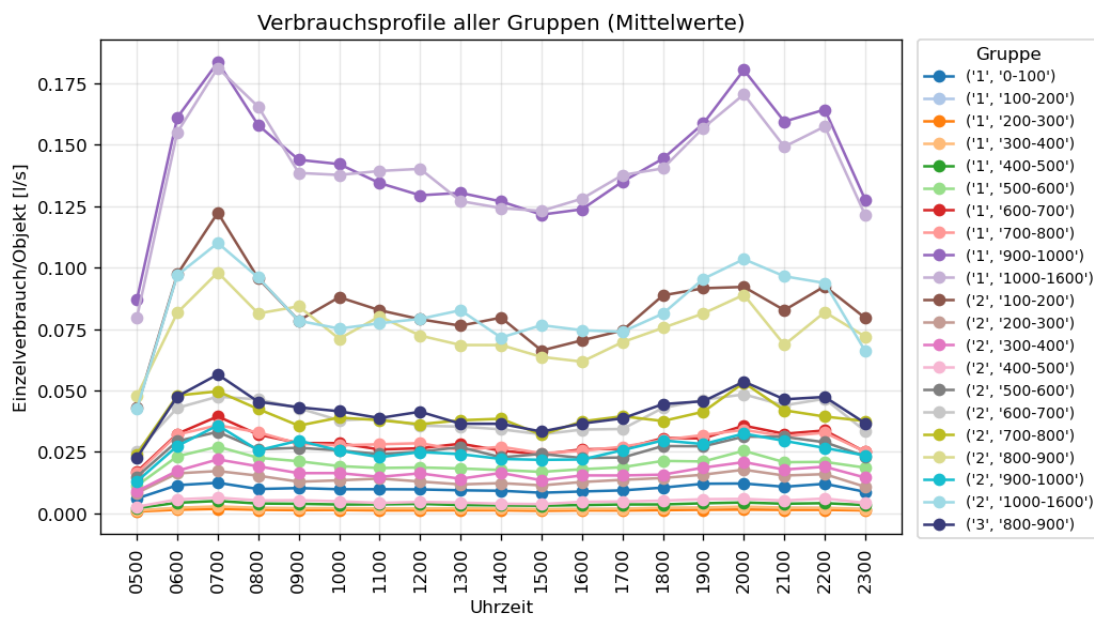


Abbildung 4-26: Verbrauchsabschätzung aller Gruppen (K02)

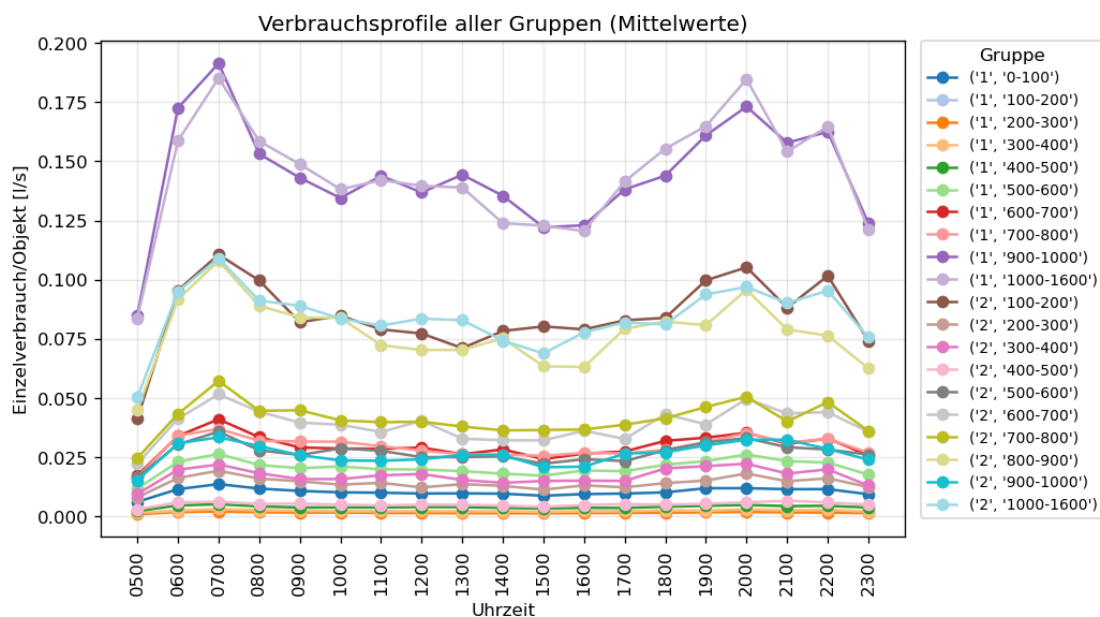


Abbildung 4-27: Verbrauchsabschätzung aller Gruppen (K03)

Die Ganglinien der Verbrauchsabschätzungen spiegeln das Bild der Anteile der Individualverbräuche aus Kapitel 4.3.3.1 wider, wobei sich anhand der Abbildung 4-26 bis Abbildung 4-29 die Auswirkungen verdeutlichen. Jene Gruppierungen mit teils sehr geringem Anteil am Individualverbrauch scheinen auch in den folgenden Plots mit einem entsprechend geringem Verbrauch auf. Diese Abschätzung mag für manche der Gruppen plausibel erscheinen, allerdings am Beispiel der Abbildung 4-28 erscheint es unplausibel, dass Objekte mit einer Wohnfläche von 0 – 100 m² einen über den Tag stets größeren Verbrauch aufweisen als Objekte der Gruppen mit 200 – 500 m². Dennoch spiegelt sich auch in dieser Abbildung die durch das Kalibrierprogramm berechnete Annahme wider, dass Objekte mit größerer Fläche tendenziell einen größeren Verbrauch aufweisen.

Diese Annahme ist jedoch genauso wie die grundsätzliche Annahme einer gleichmäßigen relativen Verteilung aller Verbrauchsobjekte über den Tag zu hinterfragen. In den Abbildungen ist ersichtlich, dass Kalibrierung mit einer großen Anzahl an Gruppierungen keine Abweichungen und Variationen aufweisen, und die Verbrauchsgruppen stets ihrer relativen Verteilung folgen.

Zusätzlich sind gewisse Verbrauchsannahmen gänzlich zu verwerfen, wie zum Beispiel jene der Kalibrierungen K02 und K03. Bei Einzelverbräuchen der größten Verbrauchsgruppen von mehr als 0,125 l/s über den Großteil des Tages verteilt, ergibt sich entsprechend der Abbildung 4-26 und Abbildung 4-27 ein Gesamttagesverbrauch von mindestens ca. 9000 l. Gemäß Kapitel 2.1.1.3 ergäbe sich hierbei mit einem durchschnittlichen Tagesbedarf von 116 l/EW für Mehrparteienhäuser ein Einwohnerwert von ca. 77. Dieser Wert ist im Untersuchungsgebiet je Verbrauchsobjekt als unplausibel einzustufen.

Im Gegensatz zu den eben erwähnten Spitzengruppen weisen die verbrauchsstärksten Annahmen der Kalibrierungen K09 und K12 Einzelverbräuche von ca. 0,05 bis 0,06 l/s über den Großteil des Tages auf, wie Abbildung 4-28 und Abbildung 4-29 zeigen. Hierbei handelt es sich um eine abgeschätzte Tagesmenge von ca. 3500 bzw. 4000 l/d, was Einwohnerwerten von ca. 20 – 30 bzw. 23 – 34 entspricht, wobei die in Kapitel 2.1.1.3 erwähnte Bandbreite des Tagesverbrauches angenommen wurde. Diese Werte sind im Untersuchungsgebiet grundsätzlich nicht direkt als unplausibel einzustufen.

Grundsätzlich zeigen alle Kalibrierungen klar den Verlauf des Tagesverbrauches mit klaren Spitzen zu Uhrzeiten mit erhöhtem Zufluss in das WVN. Die Spitzen der Verbrauchsobjekte mit generell geringem Verbrauch gehen in der gesammelten Darstellung der Ganglinien unter, doch sind sie im relativen Ausmaß ebenso vorhanden wie Abbildung 4-30 zeigt. Zusätzlich sind innerhalb dieser spezifischen Gruppendarstellung weitere statistische Kennwerte dargestellt.

Ergebnisse und Diskussion

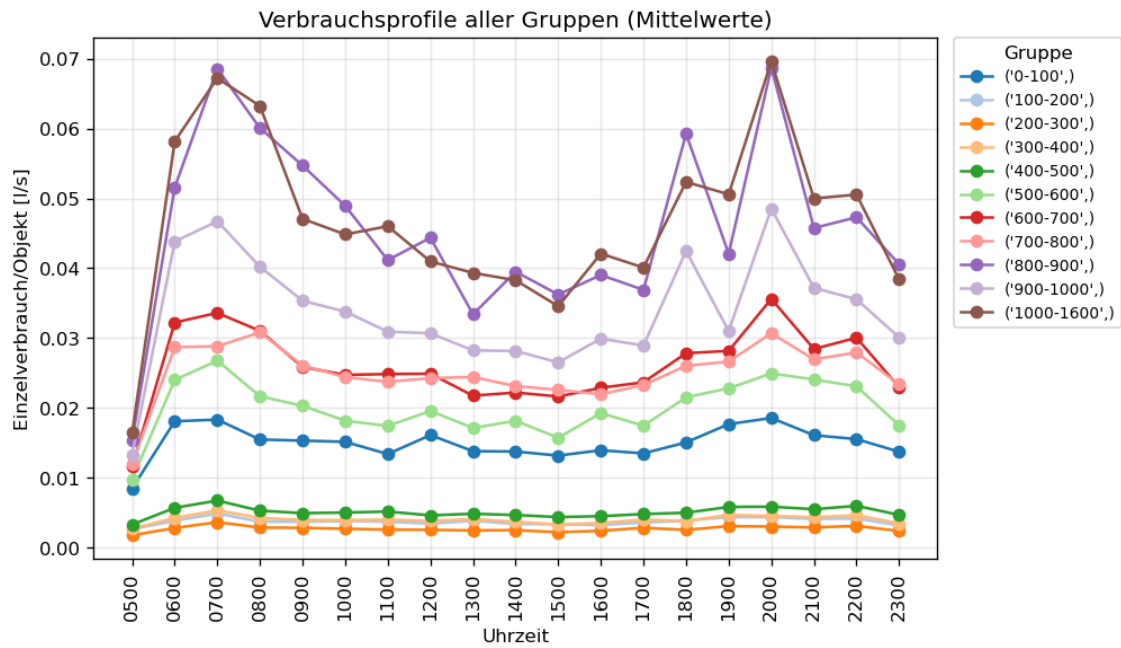


Abbildung 4-28: Verbrauchsabschätzung aller Gruppen (K09)

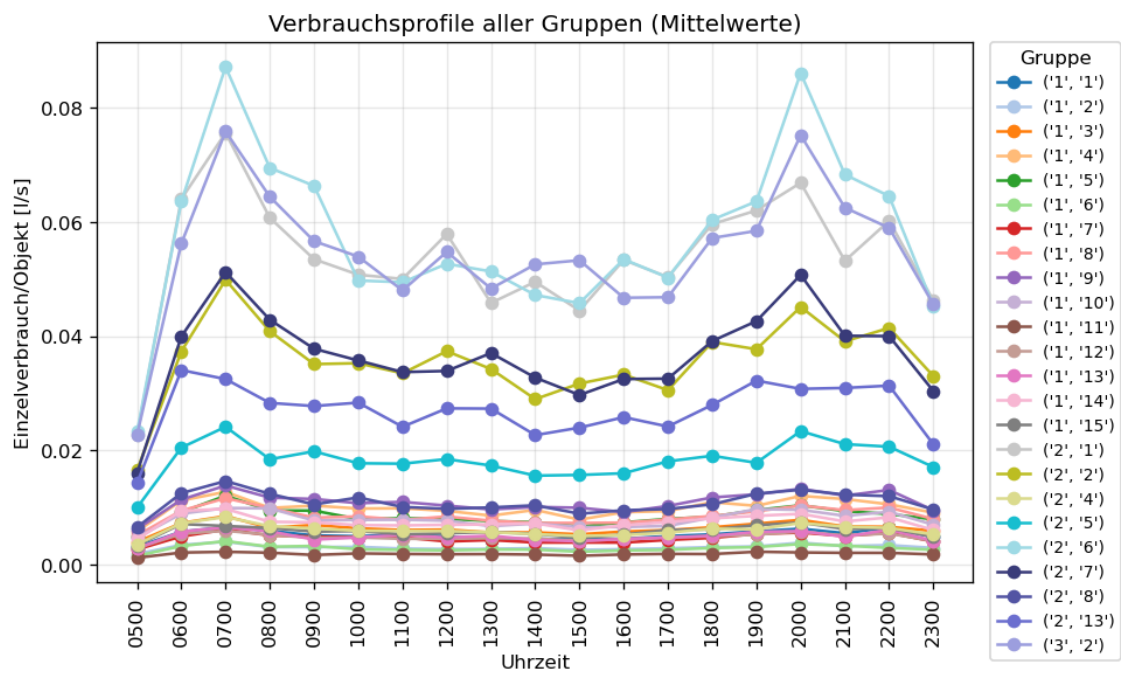


Abbildung 4-29: Verbrauchsabschätzung aller Gruppen (K12)

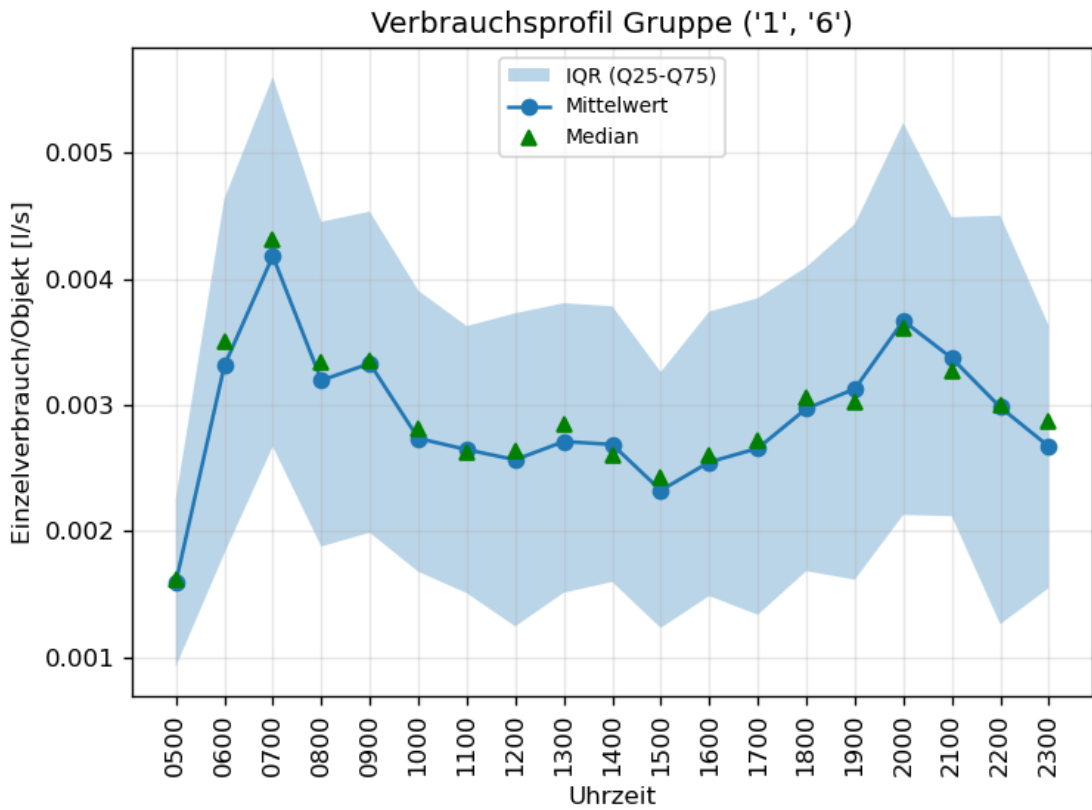


Abbildung 4-30: Verbrauchsabschätzung Gruppe (Klasse ,1', Region ,6') Kalibrierung K12

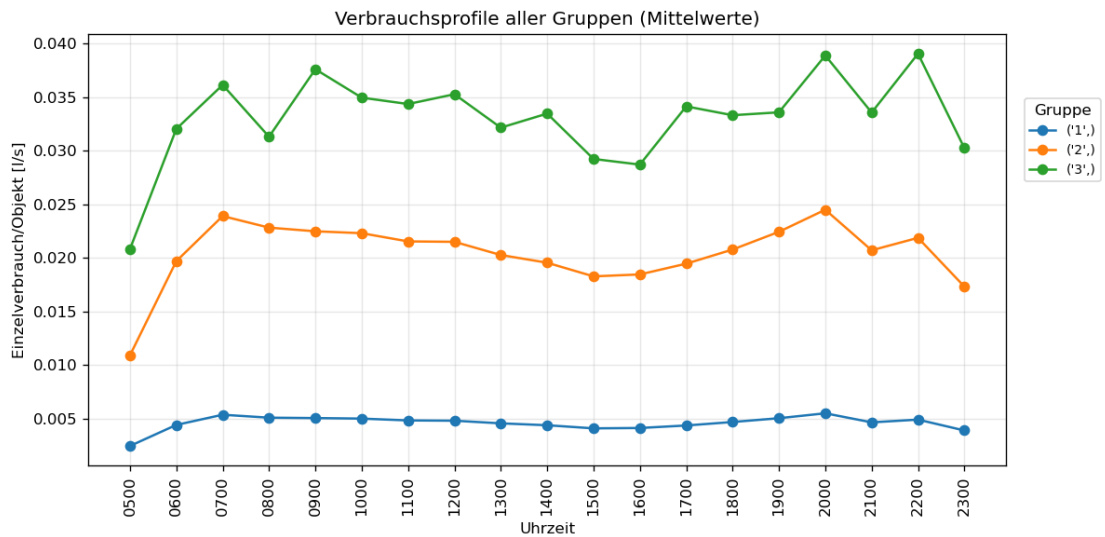


Abbildung 4-31: Verbrauchsabschätzung aller Gruppen (Z01)

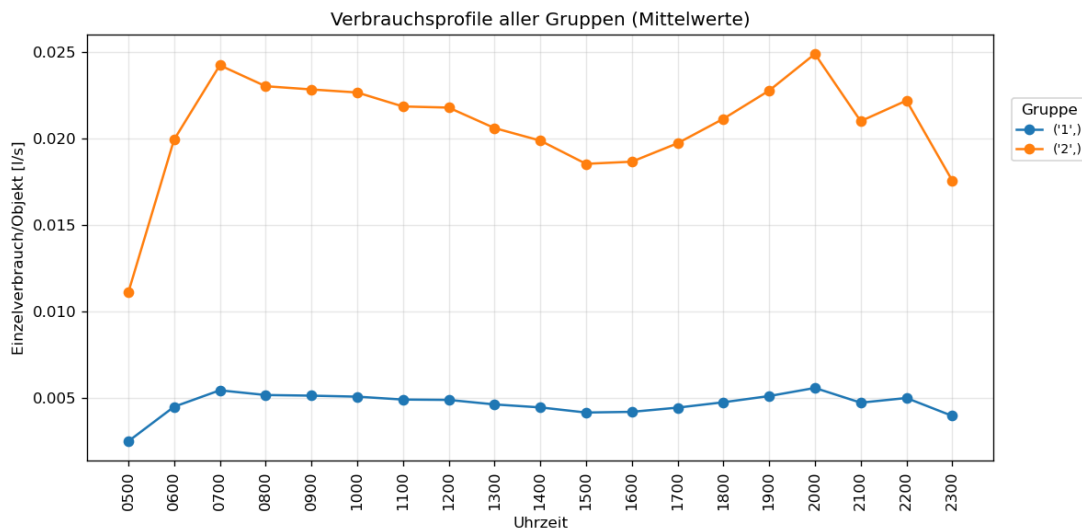


Abbildung 4-32: Verbrauchsabschätzung aller Gruppen (Z02)

Bei den Ergebnissen der Kalibrierung Z01 fällt in Abbildung 4-31 auf, dass die Gebäudeklasse 3, so wie die anderen Gruppen auch, den ganzen Tag über einen Verbrauch aufweist. Diese Beobachtung kann auch bei den vorherigen Kalibrierungen gemacht werden. Da es sich bei Gebäudeklasse 3 um ein einzelnes Gasthaus mit bekannten Öffnungszeiten handelt (vgl. Kapitel 3.2.4), erscheint es als unplausibel, dass dieses Verbrauchsobjekt den ganzen Tag über mit einem absoluten Spitzenverbrauch angenommen wird. Auf Grundlage dieser Beobachtung ist davon auszugehen, dass Objekte mit sehr spezifischen Verbrauchseigenschaften mit den vorliegenden Verbrauchsannahmen und dem Kalibrierungsprogramm zum jetzigen Zeitpunkt nicht gerecht dargestellt werden können. Im Vergleich mit Abbildung 4-32 der Kalibrierung Z02 ist ersichtlich, dass der Entfall der Gebäudeklasse 3 im Zuge der Gruppierung jedoch keine merkbaren Auswirkungen auf die Verbrauchsabschätzung der verbleibenden Gebäudeklassen hat. Da es sich bei Klasse 3 nur um ein einzelnes Objekt handelt, wird deren Verbrauch von der großen Anzahl an weiteren Verbrauchern aufgenommen.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, durch eine Kalibrierung mithilfe eines genetischen Algorithmus und einer GIS-basierten Untersuchung der Verbrauchsobjekte im Untersuchungsgebiet, eine Verbrauchsabschätzung zur Reduktion der Druckabweichungen zu ermitteln. Dabei stehen im Mittelpunkt die hydraulische Güte der gefundenen Lösungen sowie die Frage, ob die daraus abgeleiteten Verbrauchsverteilungen plausibel und fachlich begründbar sind. Die Ergebnisse sind dabei in Anbetracht der Forschungsfragen und der gewählten Arbeitsschritte zusammenzufassen.

Für die Beantwortung der Forschungsfragen gilt dabei der Grundsatz, dass ein Kalibrieransatz nur dann als geeignet einzustufen ist, wenn er sowohl hydraulisch stabile Verbesserungen der Druckabweichungen als auch plausible Verbrauchsabschätzungen liefert.

5.1 GIS-basierte Gruppierung

Die Grundlage der Kalibrierung stellt die GIS-basierte Gruppierung der Verbrauchsobjekte innerhalb des Untersuchungsgebietes dar. Anhand dieser Gruppierungen können im Zuge der Kalibrierung unterschiedliche Variablen geprüft und die gewählten Verbrauchsverteilungen angesetzt werden.

Anhand der Ergebnisse, besonders der Langzeitkalibrierung (vgl. Kapitel 4.3) lässt sich sagen, dass eine Gruppierung aufgrund der Gebäudeklasse eine hohe Relevanz hat, sowohl im Sinne der hydraulischen Güte als auch der Interpretierbarkeit der Verbrauchsverteilungen (vgl. Kapitel 4.3.3). Sie lässt sich zudem recht einfach mit üblichen Verbrauchscharakteristika verbinden. Weitere Parameter erhöhen die Differenzierung innerhalb der Kalibrierung, führen jedoch zu deutlich komplexeren Gruppierungsstrukturen.

Im Zuge der Vorkalibrierung ergibt sich, dass eine Kombination aus Gebäudeklasse und einer zweiten Gruppierungskategorie (Fläche oder Region) mitunter besser gereiht werden als andere (vgl. Kapitel 4.2.3.2). Besonders in den Ergebnissen der Langzeitkalibrierung zeigt sich jedoch eine klare Einschränkung dieser komplexen Gruppierungen mit vielen Teilgruppen. Die erhöhte Komplexität oder auch Gruppen, die nur aus Einzelobjekten bestehen, vergrößern das Risiko von instabilen Kalibrierungen bzw. dass einzelne Gruppen einen überproportionalen Einfluss auf die Ergebnisse erhalten. Die Ergebnisse aller Kalibrierungen zeigen, dass die GIS-Parameter entsprechend gewählt werden müssen, um eine Interpretierbarkeit der resultierenden Gruppenanzahl noch zu gewährleisten und eine ausreichend große Anzahl an Objekten je Gruppe aufweisen müssen zur Vermeidung von Extremwerten.

5.2 A-priori Verbrauchsverteilungen

Eines der Kernelemente ist die Implementierung der relativen a-priori Annahmen unterschiedlicher Verbrauchsverteilungen. Dabei handelt es sich nicht um absolute Vorgaben des Verbrauchs, sondern um relative Verteilungen im Verhältnis zu allen weiteren Verbrauchsobjekten innerhalb des Untersuchungsgebietes. Ziel dieser a-priori Annahmen ist die Regulierung möglicher hydraulischer Lösungen des Kalibrierers, die zwar hydraulisch geeignet sind, jedoch stark von möglichen Verteilungen abweichen. Die Ergebnisse der Vorkalibrierung Teil 1 (vgl. Kapitel 4.2.1.2) zeigen anhand der Stabilität der Gruppenverbräuche erwartungsgemäß, dass eine höhere Gewichtung der Fitnessbewertung dieser Zielverteilung zu einer Verringerung der Streuung der einzelnen Gruppenverbräuche führt.

Anhand der Ergebnisse der Vorkalibrierung Teil 3 (vgl. Kapitel 4.2.3.2) ist ersichtlich, dass die Verbrauchsannahmen „Gebäudeklasse“ und „Gleichverteilt“ vergleichbare Bewertungsergebnisse liefern, während im Gegenzug die Annahme der „Fläche“ in allen Fällen schlechter abschneidet. Diese Verteilung fiel bereits in der Erstellung der Verbrauchsannahme durch einen sehr hohen Gesamteinwohnerwert auf (vgl. Kapitel 3.2). Da es im Zuge der Verbrauchsannahmen jedoch um die relative Verteilung der Einwohnerwerte statt um absolute Einwohnerwerte geht, war die Überlegung, dass dieser hohe absolute Wert mitunter keine Relevanz aufweist. Ob dennoch ein Zusammenhang zwischen dem unplausiblen Gesamtwert der Annahme und den durchgehend schlechteren Ergebnissen der Vorkalibrierung gegeben ist, kann nicht abschließend beurteilt werden. Für die Gesamtfrage der Bedeutung und Wirksamkeit einer a-priori Verbrauchsannahme im Zuge der Kalibrierung lässt sich jedoch sagen, dass diese durchaus ein wirksames Mittel sein kann, um die Lösungen plausibel zu halten und Extremwertlösungen mitunter zu vermeiden. Dennoch ist hervorzuheben, dass diese sehr gezielt gewählt werden müssen und einer starken Datengrundlage bedürfen.

5.3 Vorkalibrierung

Die Vorkalibrierungen dienten primär der Untersuchung unterschiedlicher Parameterkombinationen und der strukturierten Vorauswahl von Parametersätzen für die Langzeitkalibrierungen. Die gewählte Bewertungsmethode der MCDA ermöglichte es, mehrere Parameter in die Bewertung einzuschließen. Hauptaugenmerk der Beurteilung war die hydraulische Güte und Stabilität der Kalibrierung, allerdings konnte anhand der gewählten Parameter auch die Stabilität der Gruppenverbräuche in die Bewertung einfließen. Eine gesonderte Beurteilung der Plausibilität der Verbräuche war im Zuge der Vorkalibrierung aufgrund des kurzen Untersuchungszeitraumes kaum möglich.

Die Teilergebnisse der Vorkalibrierung (vgl. Kapitel 4.2) zeigen besonders, dass alle Varianten und auch die Vergleichskalibrierung ohne aktive Verbrauchsannahme in Bezug auf die Druckabweichungen und Stabilität ebendieser, Verbesserungen gegenüber dem Eingangsmodell (vgl. Abbildung 2-11, Kapitel 2.6.2) aufweisen. Abschließend ist einmal mehr anzumerken, dass mitunter starke relative Abweichungen unterschiedlicher Bewertungsparameter zwischen den Kalibrierungen auftraten, es sich hierbei jedoch meistens um sehr geringe absolute Werte handelt. Im Zuge der Druckabweichungen lagen die absoluten Ergebnisse allesamt im Bereich weniger Zentimeter. Aufgrund dieser geringen Abweichungen kann mitunter die Bewertung der Kalibrierungen eine Unschärfe gewinnen, da die Gewichtung der Punkteverteilung im Verhältnis zur tatsächlichen Abweichung einzelner Parameter zueinander überproportional ausfallen könnte. Diesem Umstand wurde versucht nachzukommen, indem je Stufe der Vorkalibrierung mehrere Parameterkombinationen übernommen wurden und nicht nur die absolut am besten bewertete Kombination.

5.4 Langzeitkalibrierungen: Druckabweichungen und Stabilität

Die Ergebnisse der Langzeitkalibrierungen konnten zeigen, dass eine Verbesserung der Druckabweichungen auch über einen längeren Zeitraum stabil und zuverlässig erreicht werden kann (vgl. Kapitel 4.3.2). Jedoch ist am Interquartilsabstand der Fitness ersichtlich, dass die Stabilität der Kalibrierungen über alle Stunden und Szenarien abgenommen hat im Vergleich zur Vorkalibrierung. Ebenso fällt auf, dass alle Kalibrierungen ein sehr ähnliches Verhalten der Druckabweichungen und besonders der Extremwerte einzelner Runs aufweisen. Zum einen erschwerte das eine Auswertung und Unterscheidung der unterschiedlichen Langzeitkalibrierungen untereinander. Zum anderen kann es vermuten lassen, dass es sich hierbei um systemische Einflüsse handelt, die für bestimmte Szenarien über alle Parameterkombinationen deutlich schlechtere Werte liefern und das eigentliche Qualitätsniveau der Druckabweichungen aller Langzeitkalibrierungen für die gewählten Ansätze erreicht wurde. Die Ursachen dieser Einflüsse können sowohl in den Messdaten gewisser Szenarien selbst, in den Unsicherheiten des Modells oder auch in den Unsicherheiten der gewählten Kalibrieransätze liegen.

5.5 Langzeitkalibrierung: Verbrauchsabschätzung

Im Gegensatz zu den Druckabweichungen liefert die Betrachtung der Verbrauchsabschätzung (vgl. Kapitel 4.3.3) mitunter stark unterschiedliche Ergebnisse und eignet sich somit als Entscheidungsgrundlage. Anhand der Auswertung der Anteile der Individualverbräuche mittels Boxplots ist die Stabilität der gewählten Verbrauchsannahmen ersichtlich. Es zeigt sich, dass die Verbrauchsannahmen grundsätzlich funktionieren, jedoch zeigt sich auch eine Schwachstelle. Besonders bei Kalibrierungen mit einer großen Anzahl von Gruppierungen

neigt die Kalibrierung zur Findung von Extremwertlösungen, wobei einige Gruppen den Großteil der individuellen Last übernehmen und aus ihrer Verteilungsannahme ausbrechen. Dies kann daran liegen, dass es dem Algorithmus billiger kommt, einige wenige Gruppen schlechter zu bewerten, solange er gute hydraulische Lösungen findet und den Großteil der anderen Gruppen entsprechend der relativen Verteilung, jedoch mit sehr geringen absoluten Werten, ansetzen kann. Durch diese Art der Lösung ergeben sich zum Teil für Wohnobjekte im ländlichen Siedlungsraum un plausible Tagesverbräuche von 9000 Liter pro Tag.

Auch tritt dieses Verhalten bei Gruppierungen nach z.B. der Wohnfläche auf. Zum einen zeigt sich ein plausibles Bild, wonach größere Wohnflächen einen größeren Verbrauch aufweisen. Jedoch ist auch ersichtlich, dass der Algorithmus dazu neigt, kleinere Wohnflächen überproportional zu gewichten. Im Zuge dieser Bewertung kommen die Stärken der Zusatzkalibrierung Z01 und Z02 zum Vorschein. Bei vergleichbar guter hydraulischer Qualität findet der Algorithmus klar und leicht interpretierbare Verbrauchsverteilungen. Allerdings ergibt sich eine Einschränkung des vorliegenden Algorithmus, wie aus den Ergebnissen der Kalibrierung Z01 ersichtlich ist. Im momentanen Stand werden die Verbräuche von Gewerbebetrieben nicht plausibel dargestellt. Das steht im Zusammenhang mit der relativen Aufteilung der Verbräuche über alle Stunden. Um auch dem Gewerbebetrieb des Gasthauses einen plausiblen Verbrauch zuzuordnen, wäre die Einführung weiterer Randbedingungen für diese Verbraucher notwendig. Eine Möglichkeit kann mitunter sein, unter Berücksichtigung der Öffnungs- bzw. Betriebszeiten Zeiträume festzulegen, in denen ein Verbrauch angenommen werden kann. Dies setzt allerdings klare Kenntnis der zu untersuchenden Objekten voraus und ist mitunter nicht immer möglich.

Damit zeigt sich, dass trotz guter hydraulischer Qualität nicht jede Verbrauchsabschätzung auch fachlich plausibel sein muss oder kann. Die Bewertung der Ergebnisse der Verbrauchsabschätzung ist hierbei eine zwingende Anforderlichkeit. Der Ansatz einer a-priori Verbrauchsannahme reduziert die Wahrscheinlichkeit von Extremlösungen, kann sie jedoch nicht gänzlich ausschließen, wenn die Gruppierung oder die zugrunde liegende Verbrauchsannahme nicht passend sind.

5.6 Auswirkungen von Gruppen mit geringer Anzahl von Objekten

Wie bereits in Kapitel 5.5 erwähnt, zeigt sich anhand der Gruppierung der Gebäudeklasse 3 (Gewerbebetrieb; Gasthaus), dass der Algorithmus im vorliegenden Zustand dessen Verbrauch nicht plausibel darstellen kann. Bei Ausschluss dieser Klasse im Zuge der Kalibrierung Z02 (vgl. Kapitel 4.3.3.2) zeigt sich, dass der Wegfall eines einzelnen Objektes keine wahrzunehmende Auswirkung auf die Ergebnisse der Individualverbräuche der sonstigen Objekte hat. Dies liegt am geringen Verbrauch eines einzelnen Objektes, welcher von der Vielzahl der anderen Verbrauchsobjekte ohne große Auswirkungen aufgenommen werden

kann. Auffällig ist zudem die Veränderung der Stabilität der Verbräuche zwischen diesen beiden Kalibrierungen, welche sich durch den Wegfall der Klasse 3 stark stabilisieren.

Gleiches kann für die Gebäudeklasse 4 angenommen werden, die bereits im Zuge der Vorkalibrierung ausschied. Da es sich hierbei um ebenfalls nur ein einzelnes Verbrauchsobjekt mit einem zudem viel geringeren Einwohnerwert als der Gewerbebetrieb handelt, können die gleichen Schlüsse gezogen werden.

6 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass GIS-basierte Parameter sowie ein darauf basierender a-priori Ansatz der Verbrauchsverteilung grundsätzlich geeignet sind, eine Verbrauchskalibrierung strukturiert durchzuführen und dabei eine der großen Unsicherheiten von hydraulischen Modellen zu adressieren. Anschließend an diese Arbeit ergeben sich weiterführende Untersuchungsmöglichkeiten.

Der Ausschluss der Gebäudeklasse 3 bedeutet eine Vereinfachung des hydraulischen Modelles, mit dem Ziel plausible Lösungen zu erhalten. Der vorliegende Ansatz sowie der Verbrauchskalibrierer sind nicht in der Lage, das Verbrauchsverhalten von Verbrauchsobjekten plausibel zu implementieren, die aufgrund eines besonderen Nutzungsprofils abweichende Ganglinien aufweisen. Um sowohl Verbrauchsobjekte mit speziellen Nutzungsprofilen als auch individuelles und mitunter abweichendes Verhalten einzelner Ganglinien zu implementieren, sind Ergänzungen notwendig. Diese Ergänzungen könnten womöglich mit der Implementierung zeitlicher Randbedingungen für gewisse Verbrauchsobjekte oder dem Hinzufügen zusätzlicher Datenquellen, wie spezifische Vorgabeganglinien, untersucht werden.

Ein weiteres Thema, was im Zuge der vorliegenden Arbeit nicht behandelt werden konnte, ist die Implementierung von Leckagen innerhalb des Systems. In seiner vorliegenden Form nimmt der Algorithmus an, dass der gesamte Zufluss in das System auch bei den Verbrauchern ankommt. Diese Annahme ist eine weitere Vereinfachung, die in weiterführenden Überlegungen adressiert werden kann. Im Zuge dieser Arbeit wurde bereits die Grundüberlegung eines globalen Verlusts innerhalb des Algorithmus implementiert. Die Ergebnisse dieses Verlustfaktors wurden als Variable der Verbraucher hinzugefügt, allerdings zeigten frühe Untersuchungen, dass diese Variable immer gegen das gesetzte Minimum bzw. Null zog. Aufgrund dessen wurde diese Arbeitsthese rasch wieder verworfen, um den Umfang dieser Arbeit im Rahmen zu halten.

Ebenfalls zu untersuchen, wären weitere Plausibilitäts- und Validierungsstrategien. Der gewählte Ansatz beruht bewusst ausschließlich auf statistischen GIS-Werten, diese sind dennoch von Natur aus mit Unsicherheiten behaftet. Weitere Möglichkeiten wären die Überprüfung und Gegenüberstellung des Ansatzes mit weiteren Daten oder die Überprüfung der Implementierung in anderen WVN.

Schlussendlich ergaben sich im Zuge der Kalibrierung von vielen Szenarien und Wiederholungen exponentiell auftretende Laufzeitdrifts des Algorithmus. Diese Laufzeitdrifts traten über mehrere verwendeten Computersysteme auf und konnten schließlich durch die Implementierung einer Logik zum Neustart des Computers sowie einer automatischen Wiederaufnahme der Kalibrierung umgangen werden. Die Ursache des Laufzeitdrifts ließ sich auf die Aufrufung bzw. Ausführ-

zung des verwendeten Programmes OOPNET eingrenzen. Weitere Untersuchungen wurden jedoch nicht durchgeführt. Auch hier kann weiter aufgebaut werden, indem versucht werden kann, eine Stabilisierung der Laufzeit des verwendeten Kalibrierers zu implementieren.

Literaturverzeichnis

- American Water Works Association, hrsg. 2005. Manual of water supply practices *Computer Modeling of Water Distribution Systems*. 2nd ed. Denver, CO: American Water Works Association.
- Amt der Oö. Landesregierung Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft. 2011. „Bedarfseinheitentabelle“. https://www.land-oberoesterreich.gv.at/Mediaendateien/Formulare/Dokumente%20UWD%20Abt_WW/BS_Bedarfseinheitentabelle.pdf (18. November 2025).
- Amt der Steiermärkischen Landesregierung. 2025. „Basiskarte“. *GIS Steiermark*. <https://gis.stmk.gv.at/wgportal/atlasmobile/map/Basiskarten/Basiskarte> (25. Mai 2025).
- Amt der Steiermärkischen Landesregierung, A17 Landes- und Regionalentwicklung. 2016. „Wohnbevölkerung am 1.1.2016“. *Steirische Statistiken* 10/2016. https://www.landesentwicklung.steiermark.at/cms/dokumente/12658765_141979497/416a273c/Heft%2010-2016%20Bev%C3%B6lkerung%2001012016%2C%20Wanderungen%202015%20-%20Internet.pdf (17. November 2025).
- Amt der Steiermärkischen Landesregierung, A17 Landes- und Regionalentwicklung. 2017. „Wohnbevölkerung am 1.1.2017“. *Steirische Statistiken* 08/2017. https://www.landesentwicklung.steiermark.at/cms/dokumente/12658765_142970621/39473523/Heft%208-2017%20Bev%C3%B6lkerung%2001012017%2C%20Wanderungen%202016%20-%20Internet.pdf (17. November 2025).
- Conejos Fuertes, P., F. Martínez Alzamora, M. Hervás Carot, und J.C. Alonso Campos. 2020. „Building and exploiting a Digital Twin for the management of drinking water distribution networks“. *Urban Water Journal* 17(8): 704–13. doi:10.1080/1573062X.2020.1771382.
- De Jong, Kenneth, David Fogel, und Hans-Paul Schwefel. 1997. „A history of evolutionary computation“. In *Handbook of Evolutionary Computation*, IOP Publishing Ltd, , A2.3:1-12.
- FirmenABC. 2024. „Robert Siegfried Hasenhütl (Hirschenwirt)“. *FirmenABC*. https://www.firmenabc.at/robert-siegfried-hasenhuetl-hirschenwirt_Offp (17. Januar 2026).
- Fuchs-Hanusch, Daniela. 2021. „Vorlesungsunterlagen ‚Modellierung in der Siedlungswasserwirtschaft‘“. Gehalten auf der TU Graz.
- Fuchs-Hanusch, Daniela, Markus Günther, Markus Neumayer, und David Steffelbauer. 2017. *AZM - aktives Zustandsmonitoring von Trinkwasserverteilnetzen*. Wien: Bundesministerium für Land- und Fortwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Forschungsbericht. <https://www.bmluk.gv.at/service/publikationen/wasser/AZM-Trinkwasserverteilnetze.html> (12. April 2025).

- Goldberg, David E., und John H. Holland. 1988. „Genetic Algorithms and Machine Learning“. *Machine Learning* 3(2): 95–99. doi:10.1023/A:1022602019183.
- Google LLC. 2025a. „Google Earth“. *Google Earth*. <https://earth.google.com/web/search/Hart+bei+Graz/> (25. Mai 2025).
- Google LLC. 2025b. „Google Maps“. *Google Maps*. <https://www.google.at/maps/> (25. Mai 2025).
- Grefenstette, John. 1986. „Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms“. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 16(1): 122–28. doi:10.1109/TSMC.1986.289288.
- Gross, Dietmar. 2018. *Technische Mechanik. 4: Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden*. 10., verbesserte und ergänzte Auflage. Berlin: Springer Vieweg.
- Hirschenwirt. 2017. „Hirschenwirt | Graz“. *Facebook*. https://www.facebook.com/Hirschenwirt.Hasenhuetl?locale=de_DE (17. Januar 2026).
- Kapelan, Zoran, Dragan Savic, und Godfrey Walters. 2007. „Calibration of Water Distribution Hydraulic Models Using a Bayesian-Type Procedure“. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 133(8): 927–36. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:8(927).
- Klingel, Philipp. 2018. *Modellierung von Wasserverteilungssystemen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien. doi:10.1007/978-3-658-21270-4.
- Land Steiermark. 2025. *Steiermärkisches Baugesetz - Stmk. BauG, Fassung vom 16.1.2026*. https://www.technik.steiermark.at/cms/dokumente/11549819_58813874/0e611cdf/2025-08-26_Baugesetz_Endfassung_48-2025_inkl.%20Deckblatt.pdf (15. Januar 2026).
- Lippacher, Jakim Paul. 2018. „Methoden der Kalibrierung von Trinkwasservernetzen und deren Einfluss auf die modellbasierte Leckagelokalisierung“. Masterarbeit. TU Graz. doi:10.3217/qr17y-gst52.
- Malhotra, Rahul, Narinder Singh, und Yaduvir Singh. 2011. „Genetic Algorithms: Concepts, Design for Optimization of Process Controllers“. *Computer and Information Science* 4(2): p39. doi:10.5539/cis.v4n2p39.
- Neunteufel, Roman, Laurent Richard, und Reinhard Perfler. 2010. *Wasserverbrauch Österreich Literatur Studie*. Wien: Lebensministerium. Literaturstudie. <https://www.bmluk.gv.at/dam/jcr:00070937-0320-4544-b6a4-320325dcfd86/Wasserverbrauch%20Wasserbedarf%20Literaturstudie.pdf> (14. November 2025).
- Neunteufel, Roman, Laurent Richard, und Reinhard Perfler. 2012. *Wasserverbrauch Österreich - empirische Studie*. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Empirische Studie. https://www.umweltfoerderung.at/fileadmin/user_upload/umweltfoerderung/betriebe/Wasser_Betriebe/Studien_Wasserwirtschaft/Wasserverbrauchin_Oesterreich.pdf (14. November 2025).

- Pleimer, Anna-Maria. 2024. *Wasserverbrauch in österreichischen Haushalten*. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Studie. <https://www.bmluk.gv.at/dam/jcr:f48ecd8e-af97-48aa-9514-cba5861bd98b/Wasserverbrauch%20in%20%C3%B6sterreichischen%20Haushalten.pdf> (14. November 2025).
- Ramaseder, Laura. 2016. „Comparison of different sensor placement algorithms for model-based leak localization in a real world case study (Hart close to Graz)“. Masterarbeit. TU Graz. doi:10.3217/kc57f-kgs24.
- Razali, Noraini Mohd, und John Geraghty. 2011. „Genetic Algorithm Performance with Different Selection Strategies in Solving TSP“. In *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol II*, London. https://www.ia-eng.org/publication/WCE2011/WCE2011_pp1134-1139.pdf (20. Januar 2026).
- Rossmann, Lewis A. 2000. „EPANET 2 USERS MANUAL“. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=P1007WWU.txt> (20. Mai 2024).
- Sanz, G., und R. Pérez. 2014. „Demand Pattern Calibration in Water Distribution Networks“. In *Procedia Engineering: 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI2013*, Perugia, Italy, 1495–1504. doi:10.1016/j.proeng.2014.02.164.
- Savic, Dragan A., Zoran Kapelan, und Philip M. R. Jonker. 2009. „Quo Vadis Water Distribution Model Calibration?“ *Urban Water Journal* 6: 3–22. doi:10.1080/15730620802613380.
- Statistik Austria. 2017. *Wohnen 2016: Mikrozensus - Wohnungserhebung und EU-SILC*. Wien: Bundesanstalt Statistik Österreich. Mikrozensus. https://www.statistik.at/fileadmin/pages/350/tabellenband_wohnen_2016__3_.pdf (25. Mai 2025).
- Statistik Austria. 2022. „Karten zu Gebäude- und Wohnregisterdaten“. *STATISTIK AUSTRIA*. <https://www.statistik.at/datenbanken/adress-gebaeude-und-wohnungsregister/adress-gebaeude-und-wohnungsregister/daten-des-gebaeude-und-wohnungsregisters/karten-zu-gwr-daten> (25. Mai 2025).
- Statistik Austria. 2025. „Landesstatistik Steiermark 2025 - Hart bei Graz“. https://www.landesentwicklung.steiermark.at/cms/dokumente/12256479_141979478/9ebe1c05/60617.pdf (17. November 2025).
- Steffelbauer, D., und D. Fuchs-Hanusch. 2015. „OOPNET: An Object-Oriented EPANET in Python“. In *Procedia Engineering: 13th Computer Control for Water Industry Conference, CCWI 2015*, Leicester, Vereinigtes Königreich, 710–18. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.924.
- Steffelbauer, David B. 2018. „Model-Based Leak Localization in Water Distribution Systems“. Dissertation. TU Graz. <https://doi.org/10.3217/7jpk6-etg57> (5. Dezember 2025).

- Storn, Rainer, und Kenneth Price. 1997. „Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces“. *Journal of Global Optimization* 11(4): 341–59. doi:10.1023/A:1008202821328.
- Taherdoost, Hamed, und Mitra Madanchian. 2023. „Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts“. *Encyclopedia* 3(1): 77–87. doi:10.3390/encyclopedia3010006.

Anhang

- Anhang A: Skripte und Funktionen des bestehenden Rohrraigkeitskalibrierers
- Anhang B: Screenshots der originalen Messdaten (Grafana)
- Anhang C: Verbrauchanteile je Gruppe; Unterteilung für Verbrauchsauswertung; Kalibrierung K02
- Anhang D: Druckabweichungen je Sensor, Gegenüberstellung der Uhrzeiten, verschiedene Modelle
- Anhang E: Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen, Vorkalibrierung Teil 3
- Anhang F: Druckabweichungen der Langzeitkalibrierungen, Gesamtergebnisse je Stunde
- Anhang G: Verbrauchsabschätzungen aller Gruppen, Samstage
- Anhang H: Verbrauchsabschätzungen aller Gruppen, Sonntage

Anhang A Skripte und Funktionen des bestehenden Rohrraugigkeitkalibrierers

Im Folgenden wird auf die Skripte des bestehenden Kalibrierprogrammes eingegangen und ihre Funktionen sowie ihr Ineinandergreifen erklärt.

prepare.py

Innerhalb des Programmes *prepare* werden mehrere vorbereitende Funktionen ausgeführt. Diese Funktionen umfassen:

***readConfig(...)*:**

Öffnet und liest die in Kapitel 2.4.1.1 erwähnte *.toml* Konfigurationsdatei und speichert sie innerhalb eines Python-Dictionaries. Dieses Python-Dictionary wird anschließend als Argument *config* zurückgegeben.

***prepareEpanetFile(...)*:**

Das in der Konfigurationsdatei angegebene Epanetfile wird eingelesen und anschließend neu unter dem Pfad *...\data\simulationfiles* mit dem Namen *Input.inp* abgespeichert. Dieser Schritt dient im weiteren Verlauf dazu, dass innerhalb des Programmes der Name und Dateipfad des für die Simulation verwendeten Epanet-Files immer gleichbleibt.

Zusätzlich wird festgelegt, welche Parameter und mit welcher Genauigkeit innerhalb der Simulation aufgezeichnet werden sollen.

***group_cutter(...)*:**

Diese Funktion wird im Zuge der folgenden Funktion *grouping(...)* aufgerufen und gruppiert die Rohre des zu untersuchenden Netzes nach den gewünschten Parametern der Metadaten und den angegebenen Intervallen aus der Konfigurationsdatei (z.B. Baujahr des Rohres mit dem Intervall vor dem Jahr 2000 und nach dem Jahr 2000).

***grouping(...)*:**

Anhand der Angaben aus der Konfigurationsdatei sowie dem Epanet-File der Simulation und den Metadaten werden innerhalb der Funktion und mit Hilfe der vorhin erwähnten Funktion *group_cutter(...)* die Rohrleitung gruppiert. Die Funktion überprüft das Vorhandensein aller Metadatenparameter in der Konfigurationsdatei und gruppiert die Rohrleitungen gegebenenfalls entsprechend dem angegebenen Intervall.

readScenarios(...):

Der in der Konfigurationsdatei angegebene Ordner mit den für die Kalibrierung erforderlichen Szenarien wird unter dem Pfad `...data\scenariofiles` durchsucht, und alle Szenariendateien (`.cfg`-Dateien) werden eingelesen und innerhalb einer Python-Dictionarystruktur abgespeichert. Die Funktion gibt dieses Dictionary unter dem Namen `scenarios` aus.

Wichtig ist, dass sich im entsprechenden Ordner der Szenarien ausschließlich Dateien mit der Endung `.cfg` befinden.

prepare(...):

Diese Funktion vereint die, in den vorangegangenen Funktionen erzeugten Argumente und bereitet sie für die anschließende Kalibrierung vor.

calibrate.py

Das Programm `calibrate` übernimmt die innerhalb des Programmes `prepare` erarbeiteten Argumente `groups`, `simulfile`, `config` und `scenarios` und kalibriert mittels eines genetischen Algorithmus die Rohrrauigkeit der einzelnen Gruppen von Rohrleitungen und optional den Minor-Loss. Als GA kommt ein Skript des SWW zur Anwendung, welches auf dem Framework DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python) basiert. Die Funktion eines GA wird in Kapitel 2.3 behandelt. Zum Abschluss gibt das Programm das geeignetste Individuum aus (d.h. die beste Kombination an Rohrrauigkeiten für die unterschiedlichen Gruppierungen und ggf. Minor-Loss) und erstellt eine Korrelationsgrafik.

Die Funktionen des Programmes umfassen:

evaluate(...):

Im Zuge dieser Funktion wird die Fitness eines Individuums der Kalibrierung überprüft, sie wird innerhalb der folgenden Funktion `calibrate` aufgerufen und übernimmt das aus der Kalibrierung ermittelte geeignetste Individuum. Für jedes Szenario werden die Verbrauchswerte und der Füllstand des Hochbehälters sowie die Rohrrauigkeiten aus der Kalibrierung je Gruppierung der Rohrleitungen im Simulationsfile entsprechend angepasst und anschließend simuliert. Die Funktion erstellt zusätzlich, nachdem alle Szenarien simuliert wurden, einen Korrelationsplot zwischen den simulierten und den gemessenen Druckwerten erstellen. Am Ende der Funktion wird die Fitness des zu untersuchenden Individuums ausgegeben.

calibrate(...):

Diese Funktion startet die Kalibrierung auf Grundlage aller zuvor erfolgten Eingaben festgelegten Parameter. Es werden die Anzahl der Rohrrauigkeitsgruppen

bestimmt und anschließend die minimale und maximale Grenze dieser Rohrrauigkeit gemäß der Angabe in der Konfigurationsdatei festgelegt. Die Funktion erstellt eine gereihte Liste geeigneter Individuen, basierend auf dem GA und der definierten Fitnessfunktion. Das bestgereihte Individuum wird anschließend mithilfe der vorhin erwähnten Funktion *evaluate(...)* bewertet, und ein Korrelationsplot wird erstellt und abgespeichert (s. Beschreibung Funktion *evaluate(...)*).⁴

results.py

Das Programm *results* übernimmt die visuelle Auswertung der Kalibrierung und gibt über seine Funktionen eine grafische Darstellung der Gruppierung der Rohrleitungen und eine Darstellung der kalibrierten Rohrrauigkeiten dieser Gruppen aus. Zusätzlich wird ein neues EPANET-File mit den kalibrierten Rohrrauigkeiten geschrieben und als *Calibrated.inp* im Hauptverzeichnis der Kalibrierung abgespeichert.

Die Funktionen des Programmes umfassen:

plotGroups(...):

Die Funktion liest das EPANET-File (Arg: *simulfile*), welches als Input für die Kalibrierung dient, aus und erstellt als Plot einen Lageplan des Rohrleitungsnetzes. Die Rohrleitungen werden dabei je nach Gruppenzuordnung farblich dargestellt (vgl. Beschreibung Funktion *grouping(...)*). Der Plot wird im Hauptverzeichnis der Kalibrierung abgespeichert (Dateiname: *groups.png*).

plotRoughness(...):

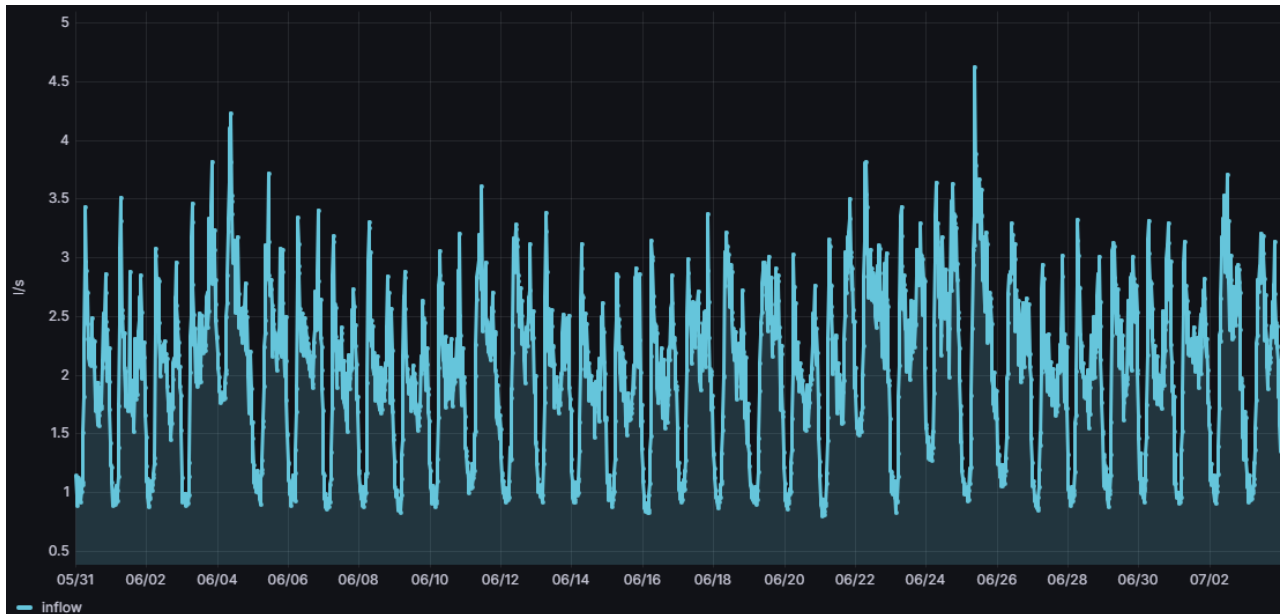
Die Funktion liest ebenfalls das erwähnte EPANET-File (Arg: *simulfile*) ein und übernimmt zusätzlich noch die Rohrleitungsobjekte aus dem Netz. Anschließend wird für alle Rohrleitungen einer Gruppe der geeignetste Wert für die Rohrrauigkeit dieser Gruppe aus der Kalibrierung übernommen und eingesetzt. Die Funktion gibt einen Plot über das gesamte Rohrleitungsnetz aus, wobei alle Rohrleitungen farblich ihrer Rohrrauigkeit nach codiert sind. Zusätzlich schreibt die Funktion ein neues EPANET-File mit dem Namen *Calibrated.inp*. Dieses File enthält das Rohrleitungsnetz der Kalibrierung mit den kalibrierten Rohrrauigkeiten und wird zusammen mit dem Plot (Dateiname: *roughness.png*) im Hauptverzeichnis der Kalibrierung abgespeichert.

main.py

Das Programm *main.py* dient als das Steuerungs- und Integrationsprogramm des Kalibrierungsprozesses. Es steuert nacheinander die bereits erwähnten Unterprogramme *prepare.py*, *calibrate.py* und *results.py* an. Am Ende des Programmes werden die Gruppierung der Rohrleitungen und das beste Individuum der

Kalibrierung als Artefakte zur weiteren Verwendung abgespeichert. Diese Dateien können im Anschluss durch das Programm *uncertainty.py* weiterverwendet werden. Das Programm *uncertainty.py* wird jedoch nicht durch das Programm *main.py* angesprochen, sondern muss gegebenenfalls im Anschluss separat gestartet werden.

Anhang B Screenshots der originalen Messdaten (Grafana)

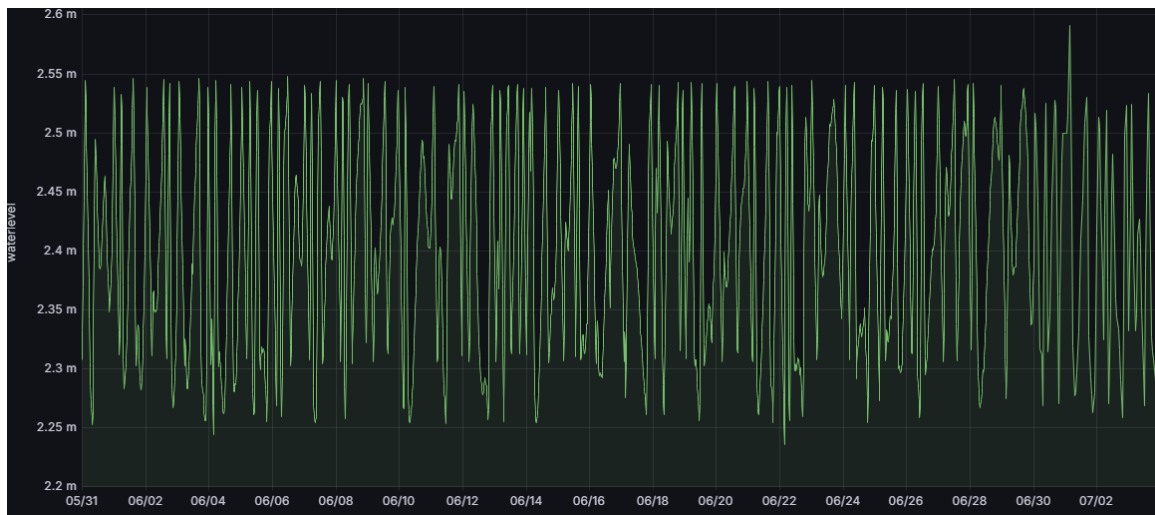


Zuflussmessung mittels IDM im Zeitraum 30.05.2016 23:59:59 bis 03.07.2016 23:59:59 (SWW)



Druckmessungen aller 6 aktiven Sensoren im Zeitraum 30.07.2016 23:59:59 bis 03.05.2016 23:59:59 (SWW)

Anhang B Screenshots der originalen Messdaten (Grafana)

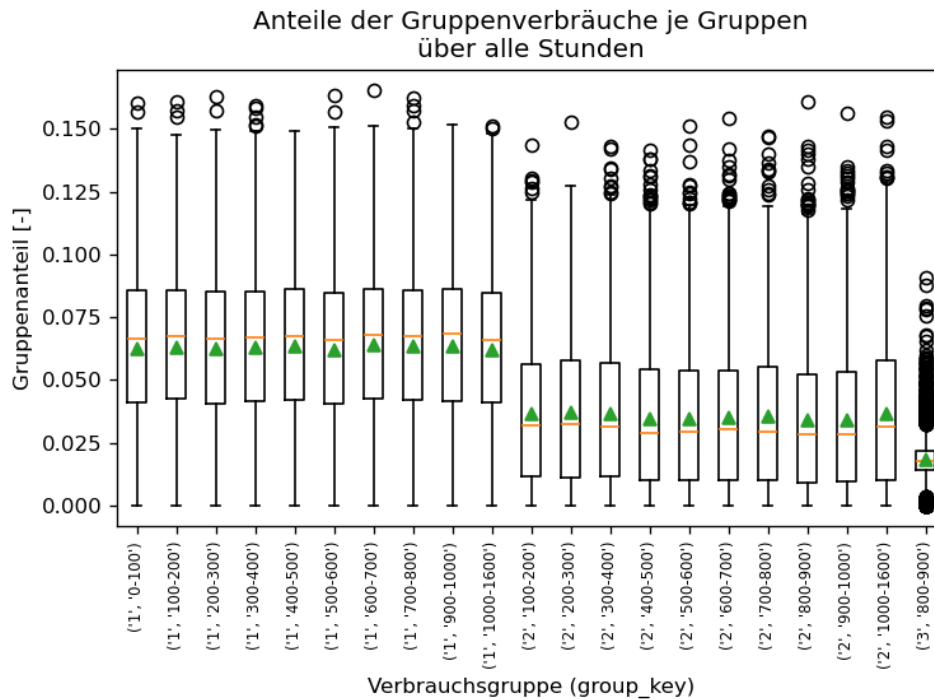


Füllstand des Hochbehälters im Zeitraum 30.05.2016 23:59:59 bis 03.07.2016 23:59:59 (SWW)

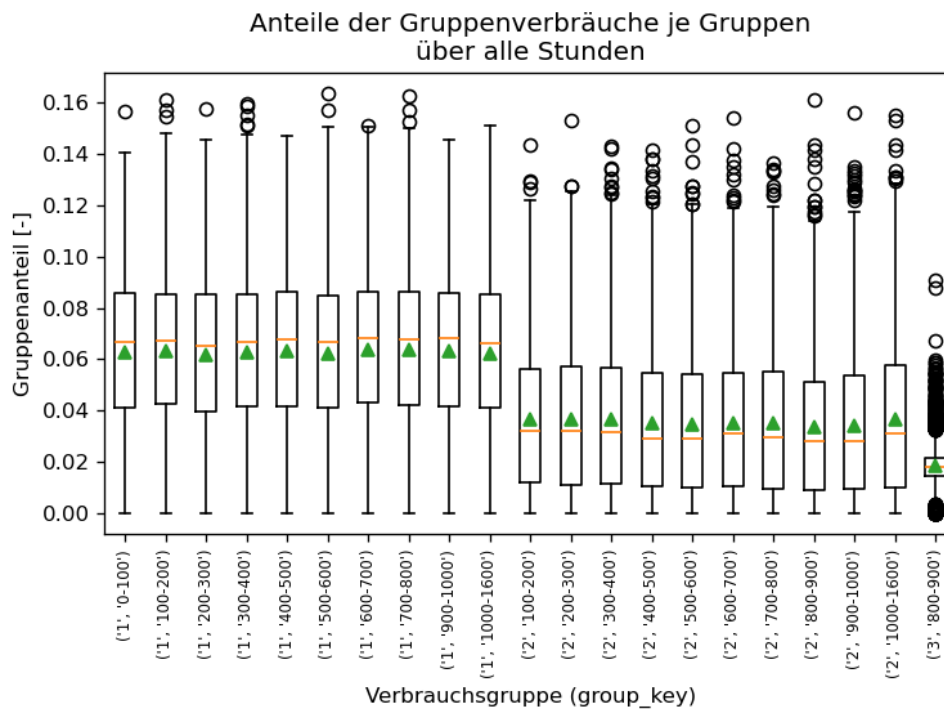
BD SENSORS	DMP 331
Edelstahlsensor	Druckmessumformer
Messbereich	0 – 16 bar abs.
Genauigkeit	Nach IEC 60770
Standard	Nenndruck < 0.4 bar: $\leq \pm 0.5\%$ FSO Nenndruck ≥ 0.4 bar: $\leq \pm 0.35\%$ FSO
Langzeitstabilität	$\leq \pm 0.1\%$ FSO / Jahr
Einstellzeit	≤ 10 ms
Kosten	ca. Euro 2.000,-- pro Stück

Technische Daten der Drucksensoren; eingebaut für Messversuch 2016 (Fuchs-Hanusch u. a. 2017)

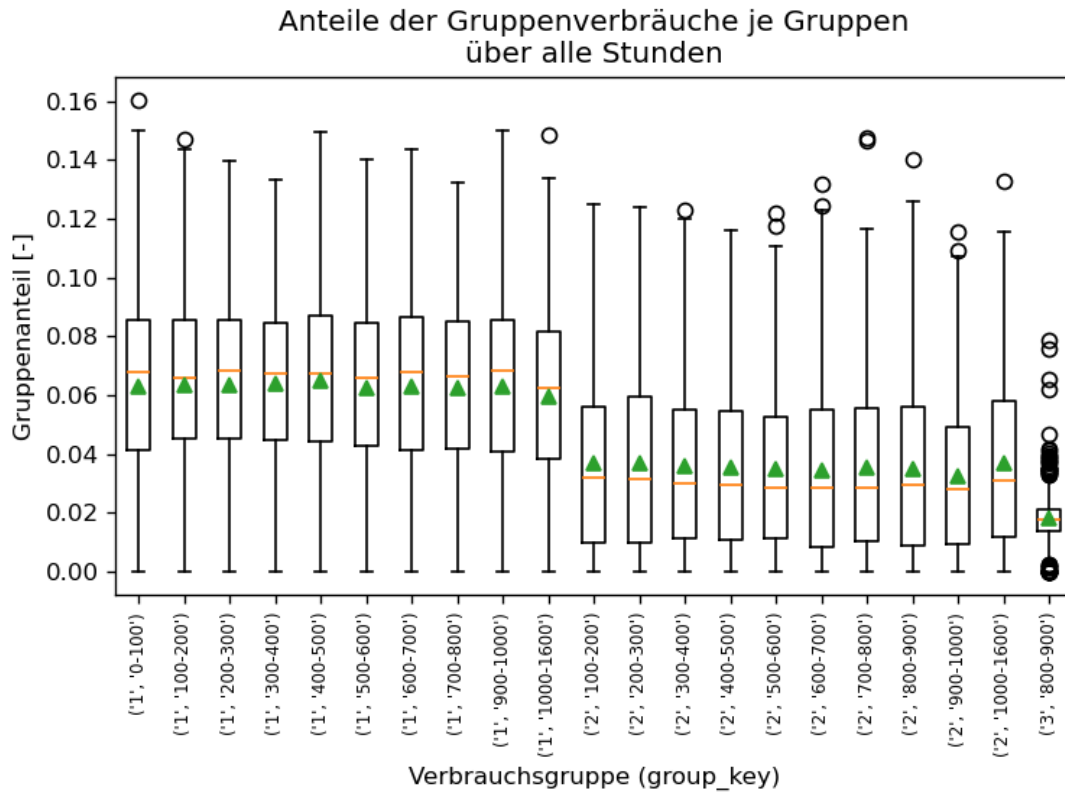
Anhang C Verbrauchanteile je Gruppe; Unterteilung für Verbrauchsauswertung; Kalibrierung K02



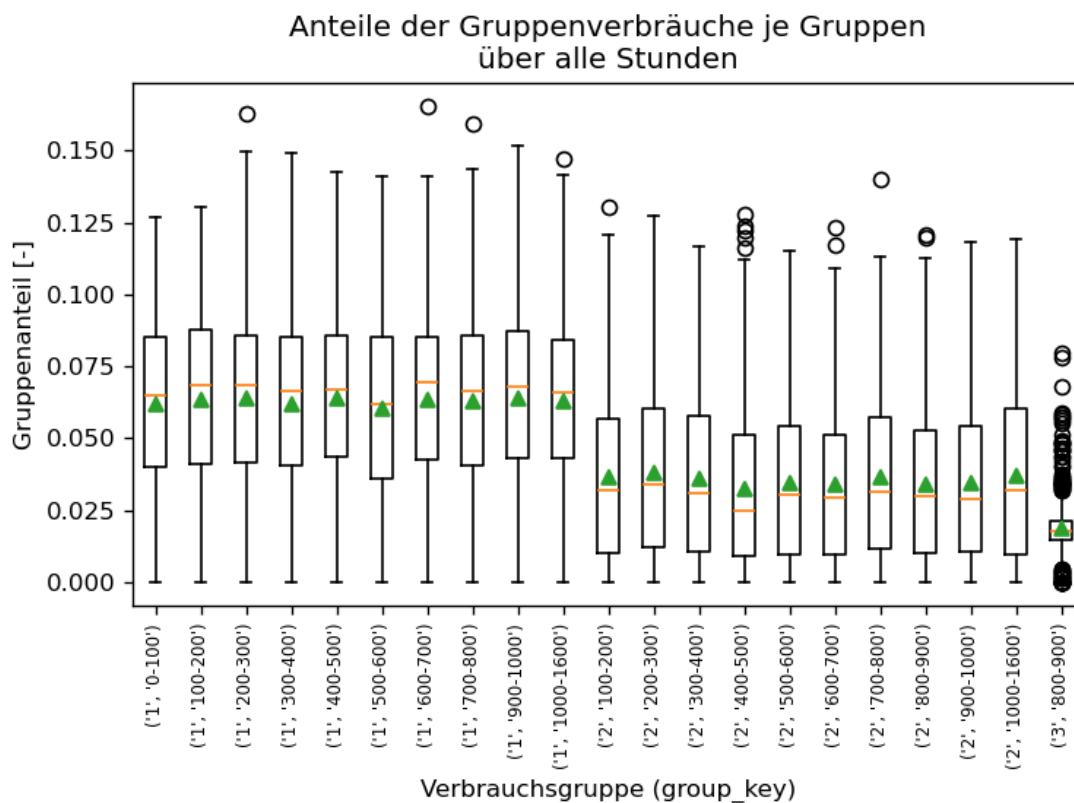
Kalibrierung K02; Anteile der Gruppenverbräuche (Alle Szenarien)



Kalibrierung K02; Anteile der Gruppenverbräuche (Wochentage)

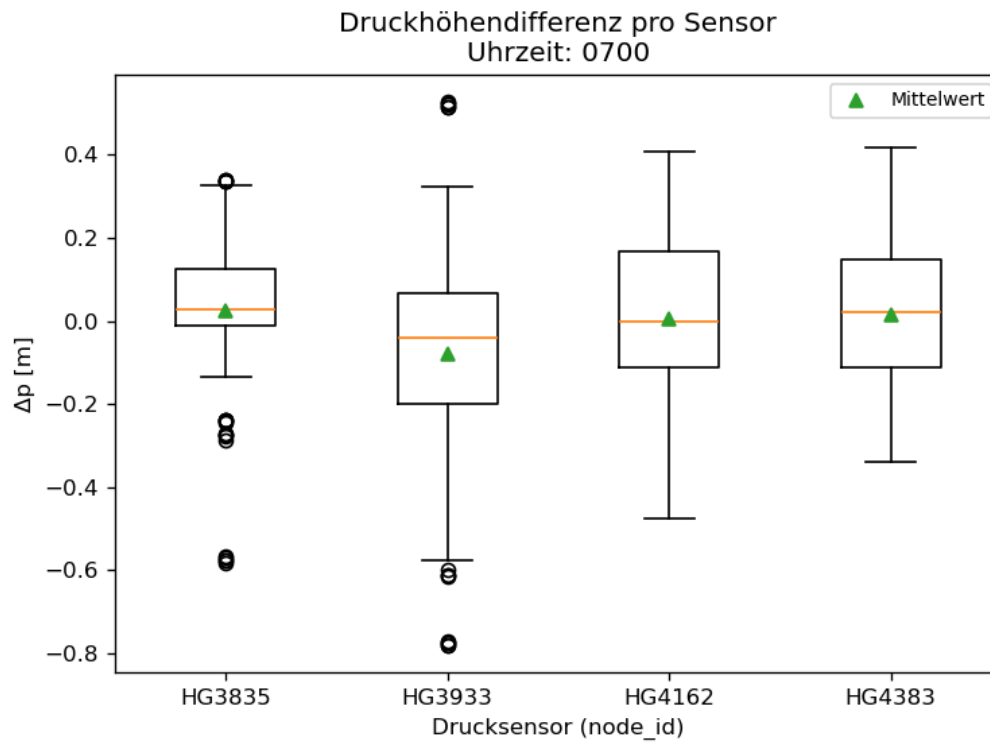


Kalibrierung K02; Anteile der Gruppenverbräuche (Samstage)

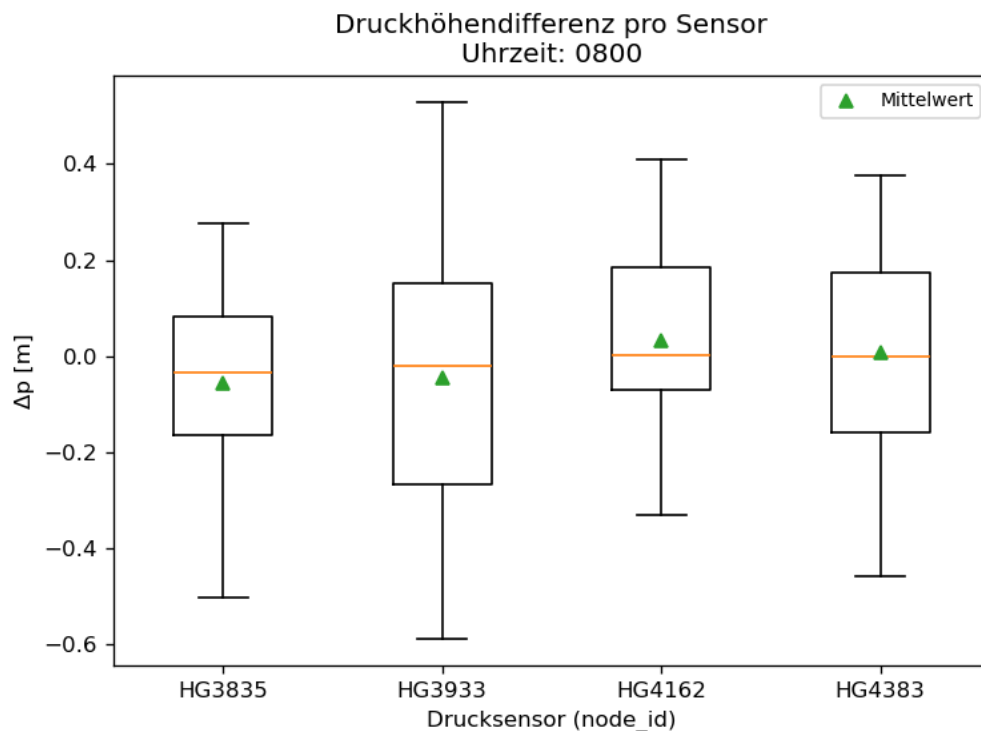


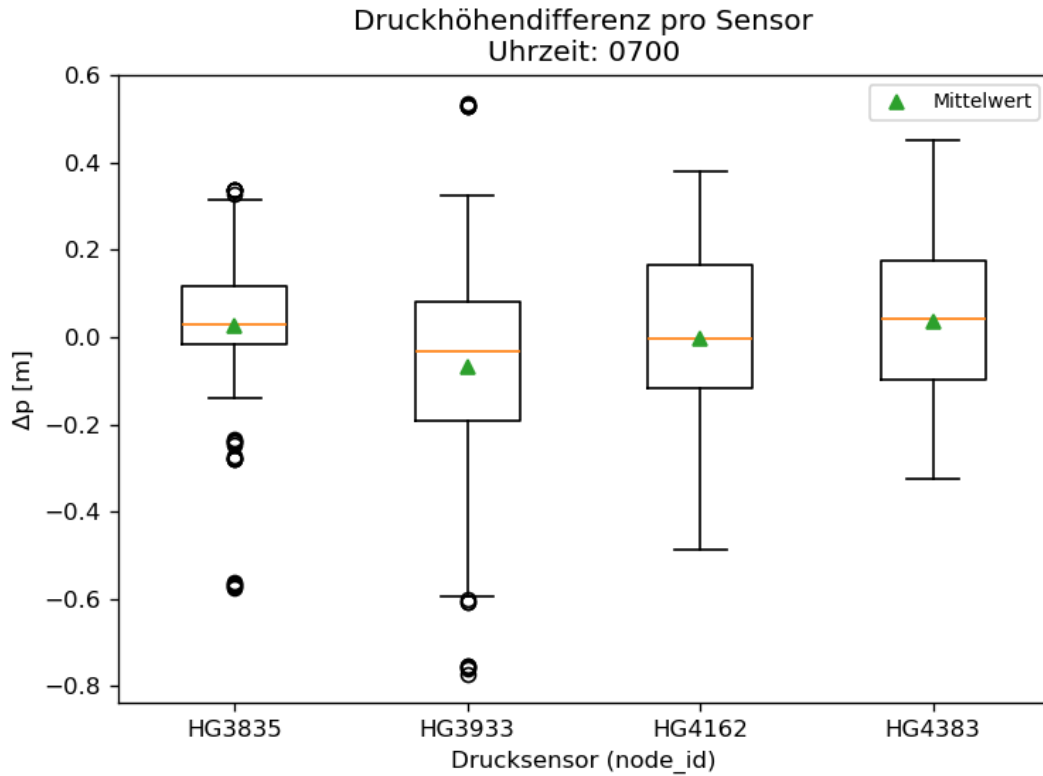
Kalibrierung K02; Anteile der Gruppenverbräuche (Sonntage)

Anhang D Druckabweichungen je Sensor, Gegenüberstellung der Uhrzeiten, verschiedene Modelle

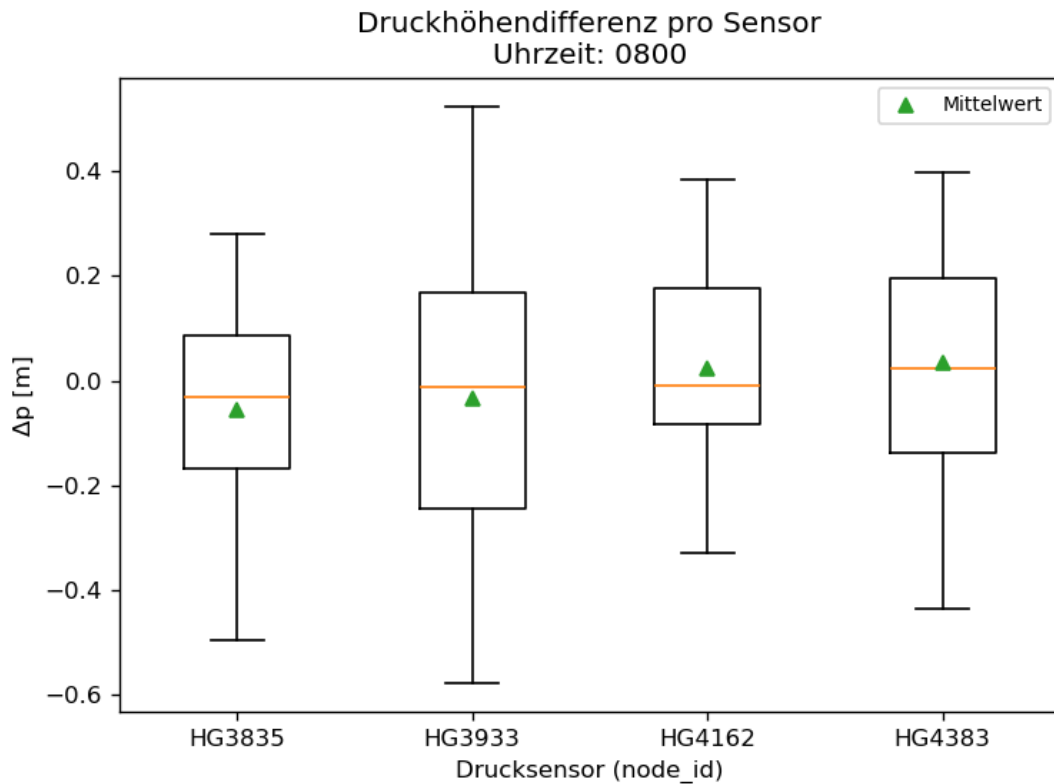


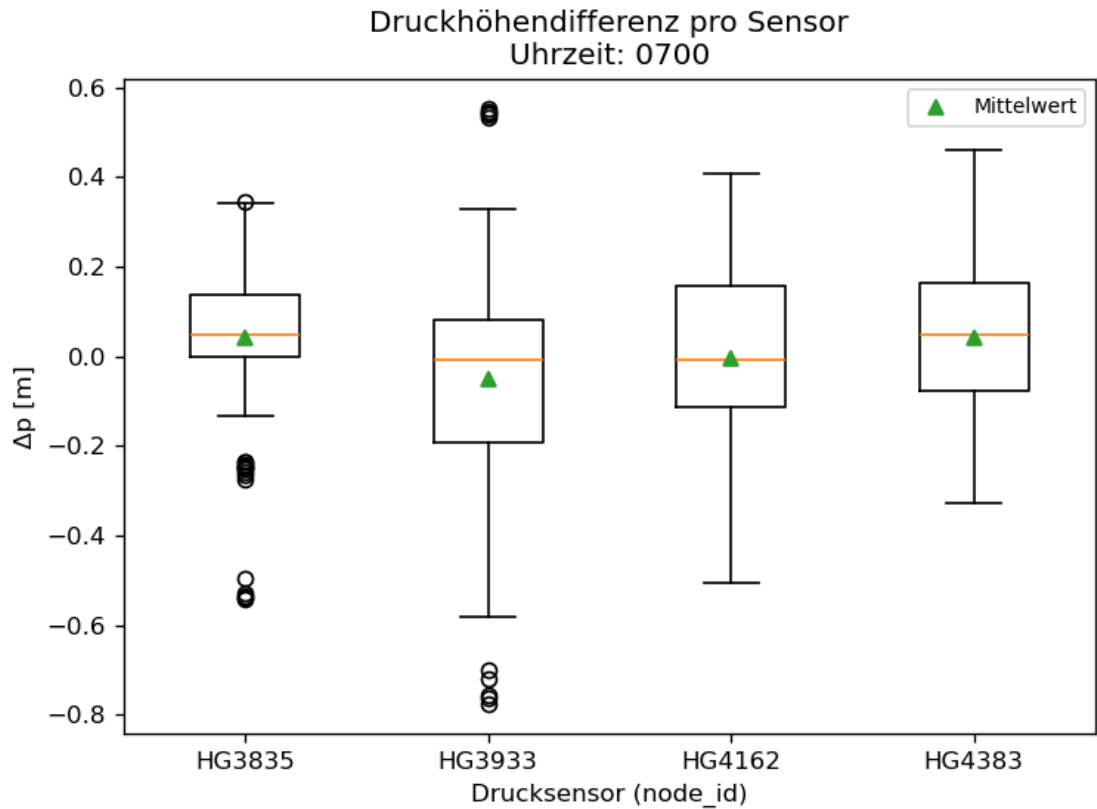
Vorkalibrierung Teil 3: Kalibrierung K03



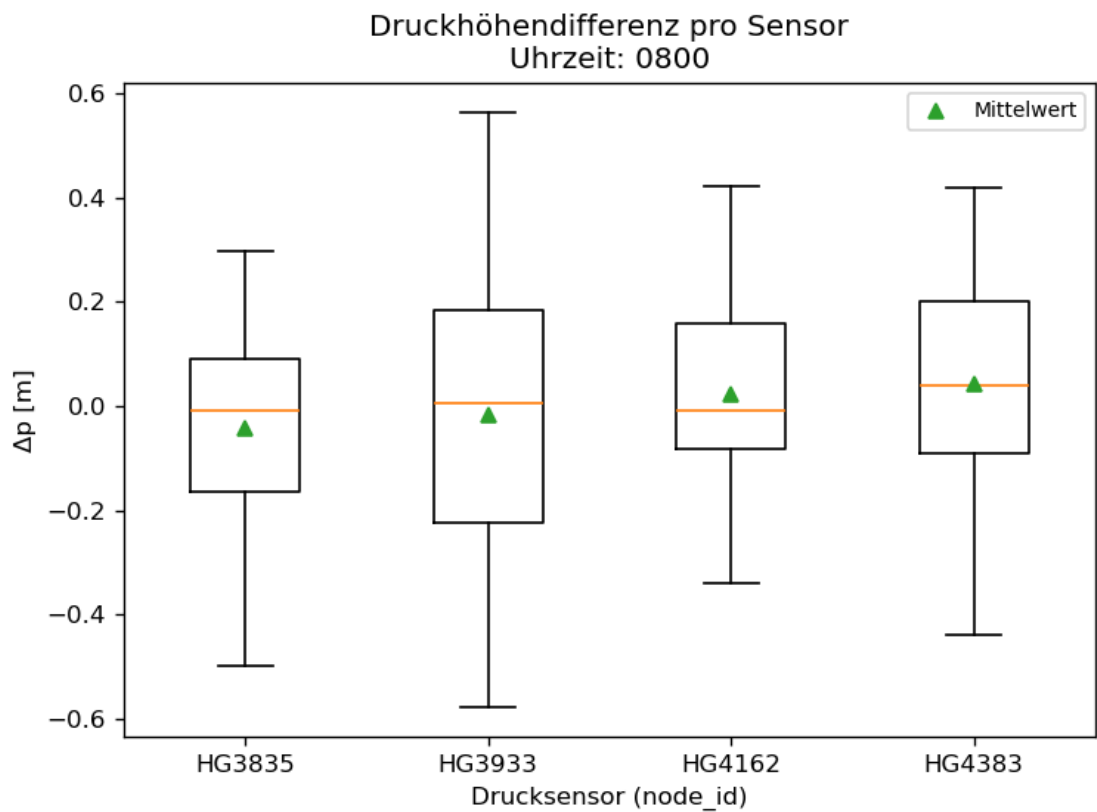


Vorkalibrierung Teil 3: Kalibrierung K09

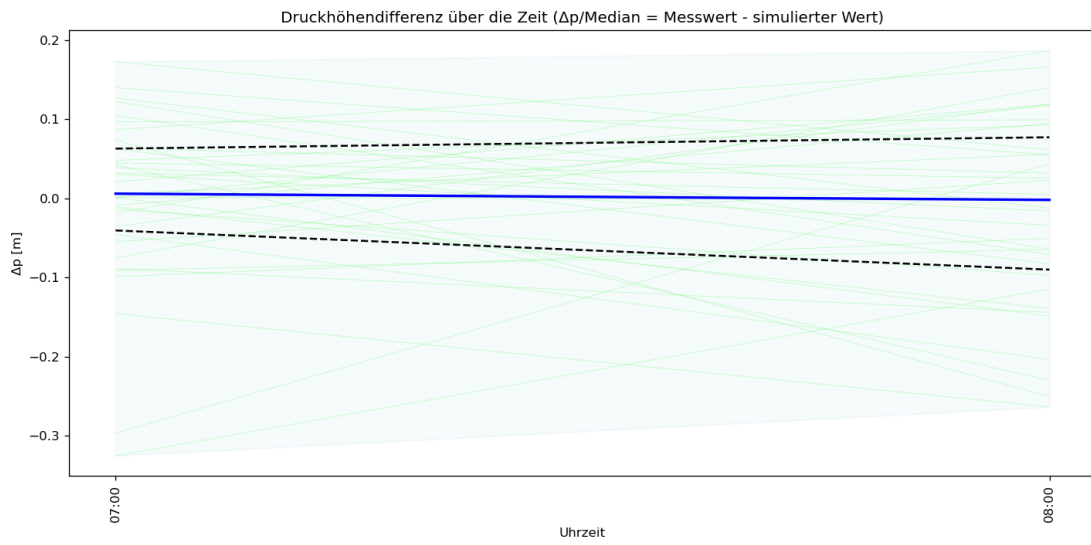




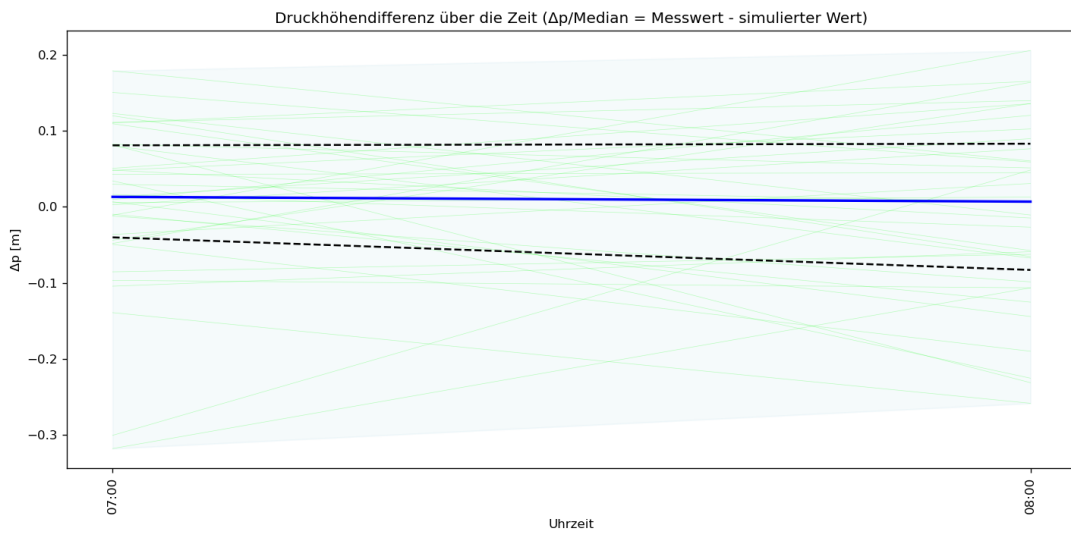
Vorkalibrierung Teil 3: Kalibrierung K12



Anhang E Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen, Vorkalibrierung Teil 3

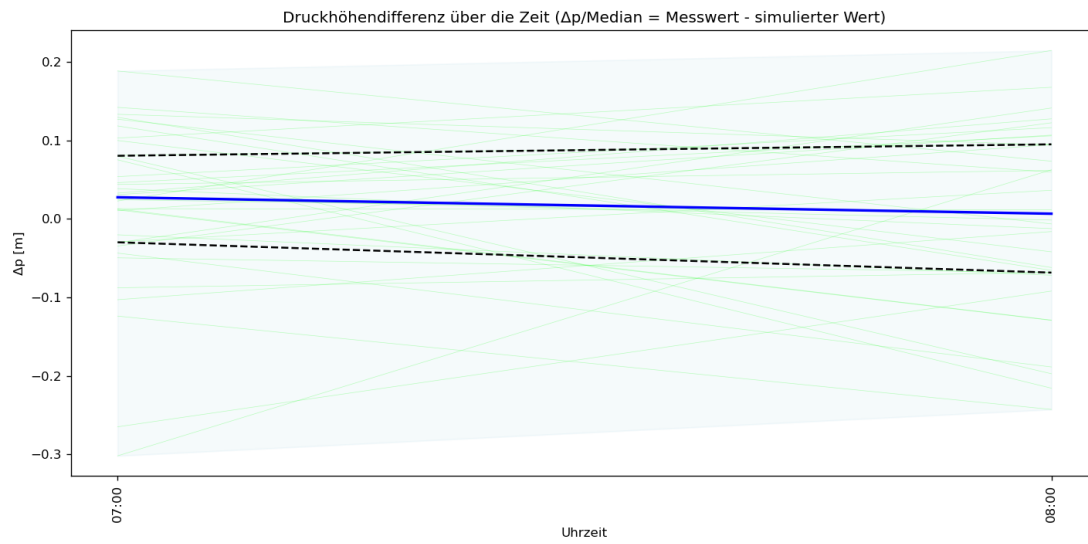


Vorkalibrierung Teil 3 Kalibrierung K03



Vorkalibrierung Teil 3 Kalibrierung K09

Anhang E Zeitlicher Verlauf der Druckabweichungen, Vorkalibrierung Teil 3



Vorkalibrierung Teil 3 Kalibrierung K12

Anhang F Druckabweichungen der Langzeitkalibrierungen, Gesamtergebnisse je Stunde

K02				
Uhrzeit	Druck- messungen	ΔP (Median, Gesamt) [m]	ΔP (IQR, Gesamt) [m]	Anzahl d. Ausreißer
05:00	1120	0,0032	0,1491	4
06:00	1120	-0,0160	0,2191	0
07:00	1120	0,0157	0,2304	53
08:00	1120	-0,0051	0,2815	0
09:00	1120	-0,0245	0,2346	91
10:00	1120	0,0051	0,3062	3
11:00	1120	-0,0354	0,2529	1
12:00	1088	0,0074	0,2231	48
13:00	1088	-0,0178	0,2393	8
14:00	1088	0,0001	0,2635	3
15:00	1120	0,0088	0,2447	1
16:00	1120	-0,0083	0,2549	9
17:00	1120	0,0052	0,2069	32
18:00	1120	-0,0472	0,2526	19
19:00	1120	0,0162	0,2586	38
20:00	1120	-0,0452	0,2589	40
21:00	1120	-0,0404	0,2493	49
22:00	1120	0,0028	0,2309	8
23:00	1120	-0,0043	0,2206	8

K03				
Uhrzeit	Druck- messungen	ΔP (Median, Gesamt) [m]	ΔP (IQR, Gesamt) [m]	Anzahl d. Ausreißer
05:00	1120	0,0029	0,1497	16
06:00	1120	-0,0186	0,2204	0
07:00	1120	0,0139	0,2435	48
08:00	1120	-0,0074	0,2861	0
09:00	1120	-0,0319	0,2345	91
10:00	1120	0,0030	0,3020	7
11:00	1120	-0,0377	0,2542	0
12:00	1088	0,0050	0,2268	44
13:00	1088	-0,0187	0,2429	9
14:00	1088	-0,0013	0,2615	6
15:00	1120	0,0073	0,2425	5
16:00	1120	-0,0097	0,2562	11
17:00	1120	0,0048	0,2055	32
18:00	1120	-0,0509	0,2494	26
19:00	1120	0,0163	0,2551	42
20:00	1120	-0,0514	0,2575	41
21:00	1120	-0,0416	0,2556	56
22:00	1120	0,0033	0,2269	8
23:00	1120	-0,0047	0,2221	9

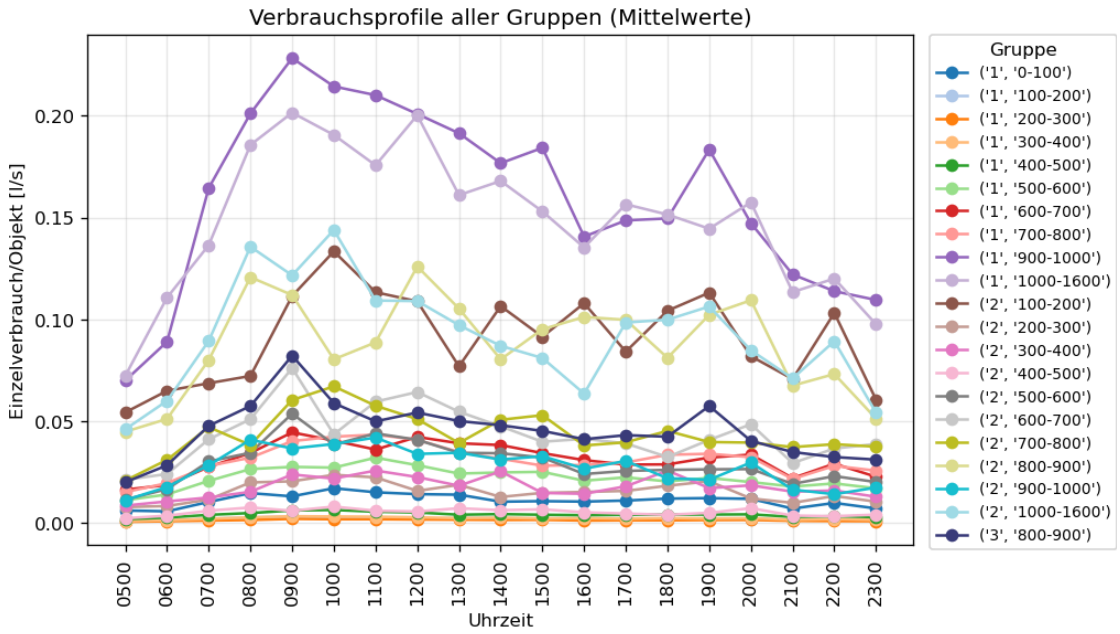
K09				
Uhrzeit	Druck- messungen	ΔP (Median, Gesamt) [m]	ΔP (IQR, Gesamt) [m]	Anzahl d. Ausreißer
05:00	1120	0,0042	0,1469	7
06:00	1120	-0,0149	0,2127	0
07:00	1120	0,0155	0,2504	43
08:00	1120	-0,0069	0,2877	0
09:00	1120	-0,0258	0,2407	88
10:00	1120	0,0090	0,2994	3
11:00	1120	-0,0348	0,2400	0
12:00	1088	0,0116	0,2196	44
13:00	1088	-0,0158	0,2389	8
14:00	1088	0,0008	0,2576	0
15:00	1120	0,0125	0,2360	7
16:00	1120	-0,0035	0,2514	9
17:00	1120	0,0077	0,2088	32
18:00	1120	-0,0423	0,2464	26
19:00	1120	0,0196	0,2621	31
20:00	1120	-0,0380	0,2551	42
21:00	1120	-0,0405	0,2488	55
22:00	1120	0,0064	0,2299	8
23:00	1120	-0,0043	0,2176	8

K12				
Uhrzeit	Druck- messungen	ΔP (Median, Gesamt) [m]	ΔP (IQR, Gesamt) [m]	Anzahl d. Ausreißer
05:00	1120	0,0044	0,1492	8
06:00	1120	-0,0076	0,2056	1
07:00	1120	0,0311	0,2435	40
08:00	1120	0,0011	0,2726	0
09:00	1120	-0,0082	0,2258	81
10:00	1120	0,0131	0,2892	0
11:00	1120	-0,0222	0,2320	7
12:00	1088	0,0156	0,2249	29
13:00	1088	-0,0003	0,2320	11
14:00	1088	0,0103	0,2467	8
15:00	1120	0,0213	0,2253	6
16:00	1120	-0,0024	0,2426	13
17:00	1120	0,0084	0,1976	32
18:00	1120	-0,0338	0,2391	20
19:00	1120	0,0241	0,2411	36
20:00	1120	-0,0248	0,2474	40
21:00	1120	-0,0319	0,2366	34
22:00	1120	0,0096	0,2170	15
23:00	1120	0,0025	0,2099	10

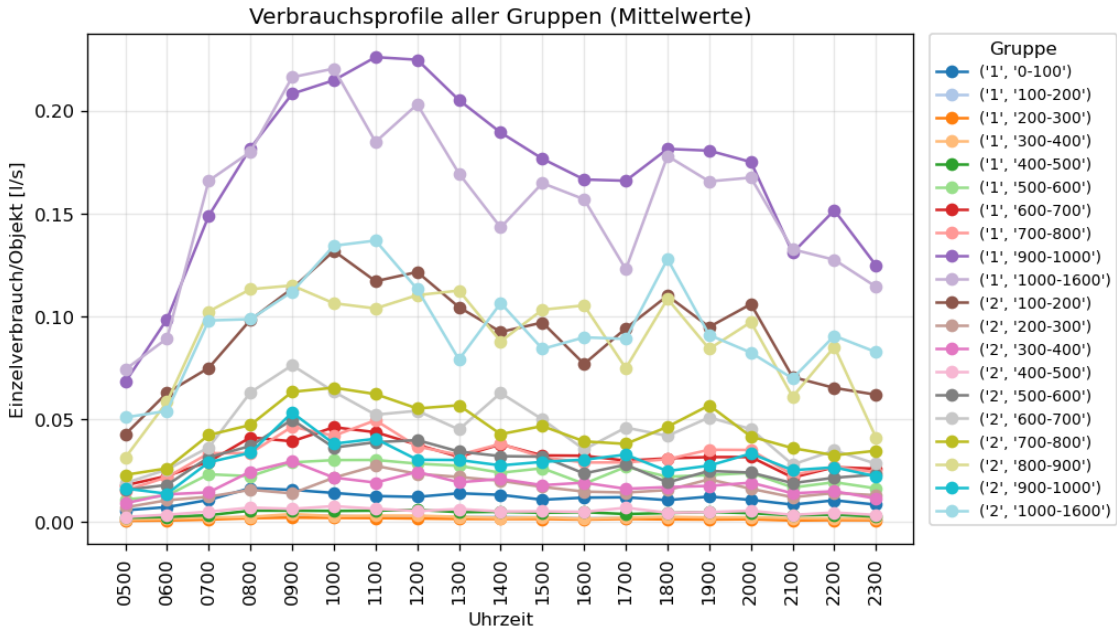
Z01				
Uhrzeit	Druck- messungen	ΔP (Median, Gesamt) [m]	ΔP (IQR, Gesamt) [m]	Anzahl d. Ausreißer
05:00	1120	0,0086	0,1482	16
06:00	1120	-0,0021	0,2095	0
07:00	1120	0,0450	0,2463	40
08:00	1120	0,0115	0,2874	0
09:00	1120	0,0101	0,2486	88
10:00	1120	0,0128	0,2929	0
11:00	1120	-0,0213	0,2552	0
12:00	1088	0,0200	0,2404	24
13:00	1088	0,0144	0,2526	11
14:00	1088	0,0106	0,2676	0
15:00	1120	0,0243	0,2265	5
16:00	1120	-0,0027	0,2549	0
17:00	1120	0,0247	0,2111	24
18:00	1120	-0,0197	0,2421	16
19:00	1120	0,0481	0,2657	24
20:00	1120	-0,0133	0,2529	31
21:00	1120	-0,0243	0,2448	40
22:00	1120	0,0192	0,2405	8
23:00	1120	0,0090	0,2204	8

Z02				
Uhrzeit	Druck- messungen	ΔP (Median, Gesamt) [m]	ΔP (IQR, Gesamt) [m]	Anzahl d. Ausreißer
05:00	1120	0,0079	0,1477	16
06:00	1120	-0,0044	0,2075	0
07:00	1120	0,0422	0,2457	40
08:00	1120	0,0111	0,2860	0
09:00	1120	0,0061	0,2482	88
10:00	1120	0,0125	0,2958	0
11:00	1120	-0,0245	0,2505	0
12:00	1088	0,0197	0,2395	24
13:00	1088	0,0127	0,2546	10
14:00	1088	0,0096	0,2652	0
15:00	1120	0,0228	0,2272	0
16:00	1120	-0,0024	0,2530	0
17:00	1120	0,0237	0,2101	24
18:00	1120	-0,0221	0,2419	16
19:00	1120	0,0448	0,2647	24
20:00	1120	-0,0144	0,2519	28
21:00	1120	-0,0256	0,2484	40
22:00	1120	0,0172	0,2422	8
23:00	1120	0,0085	0,2197	8

Anhang G Verbrauchsabschätzungen aller Gruppen, Samstag

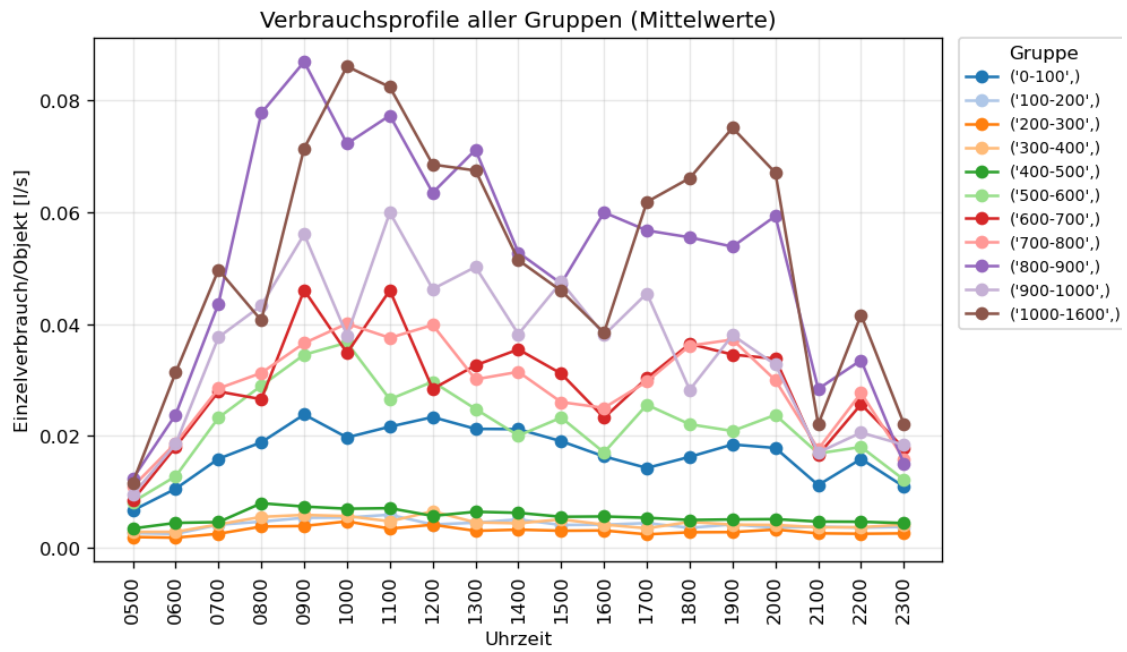


Kalibrierung K02

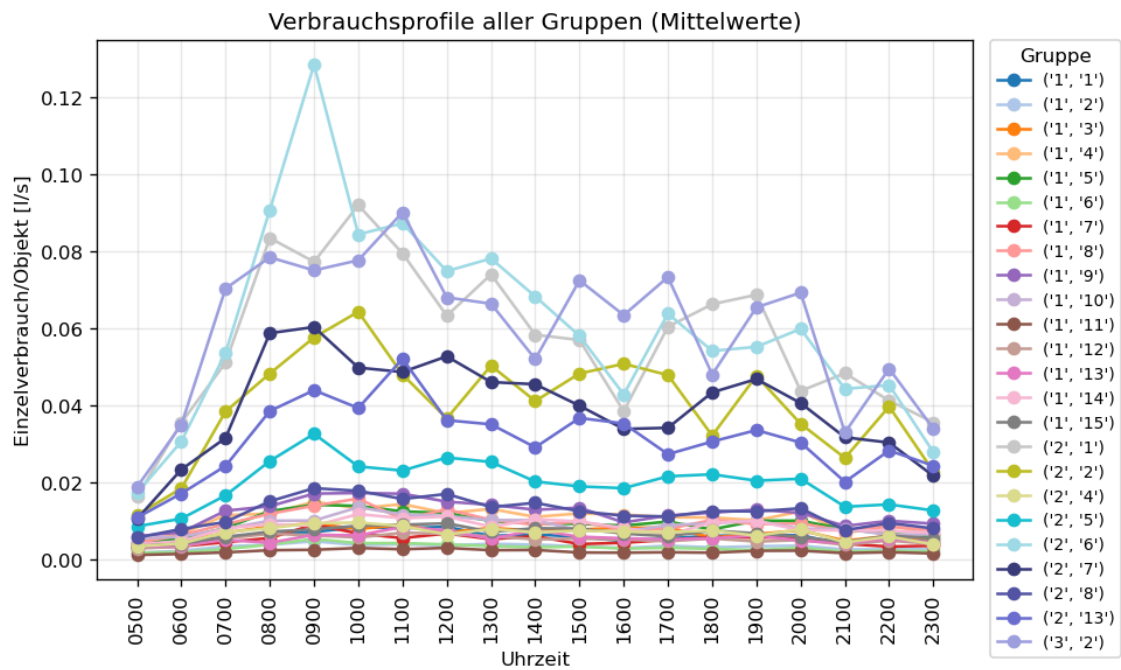


Kalibrierung K03

Anhang G Verbrauchsabschätzungen aller Gruppen, Samstag

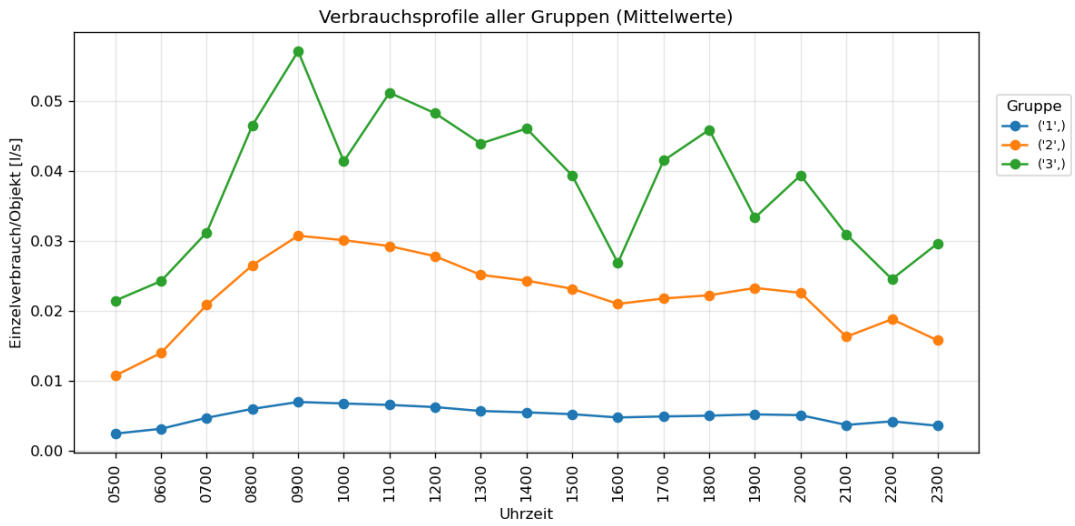


Kalibrierung K09

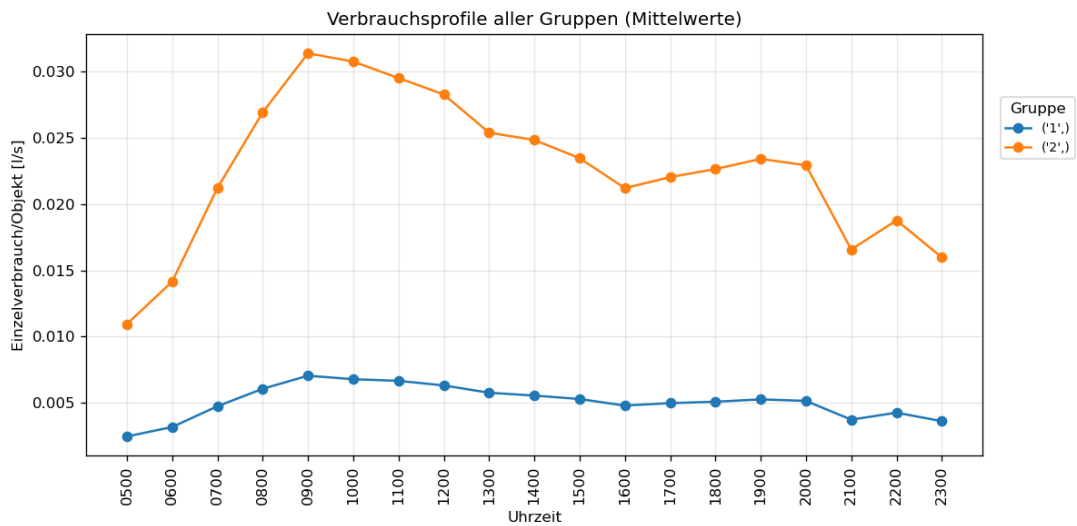


Kalibrierung K12

Anhang G Verbrauchsabschätzungen aller Gruppen, Samstag

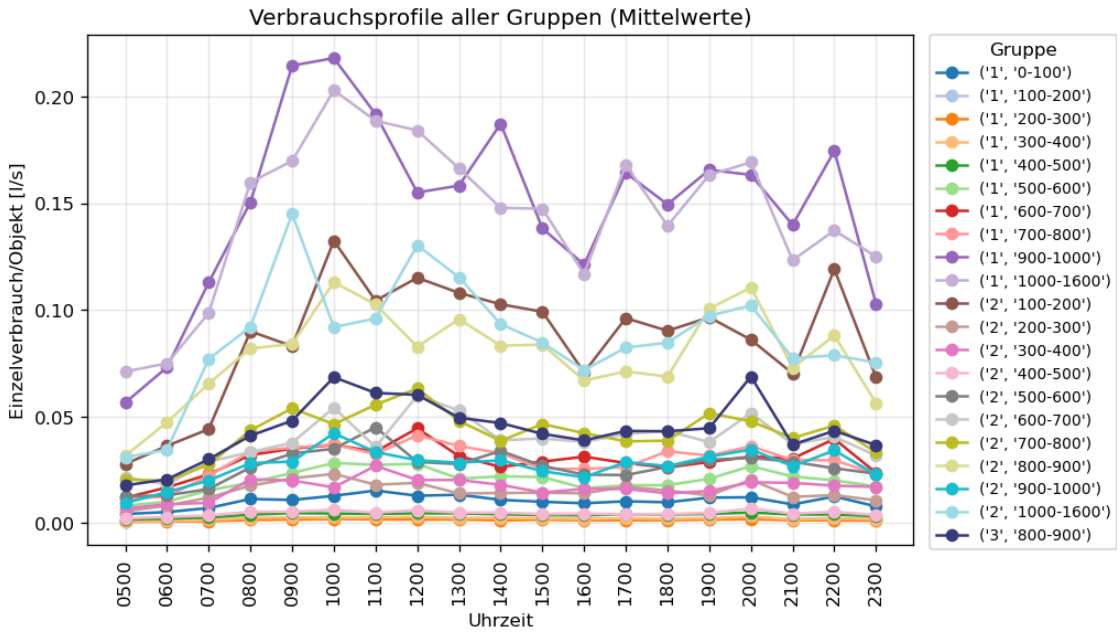


Kalibrierung Z01

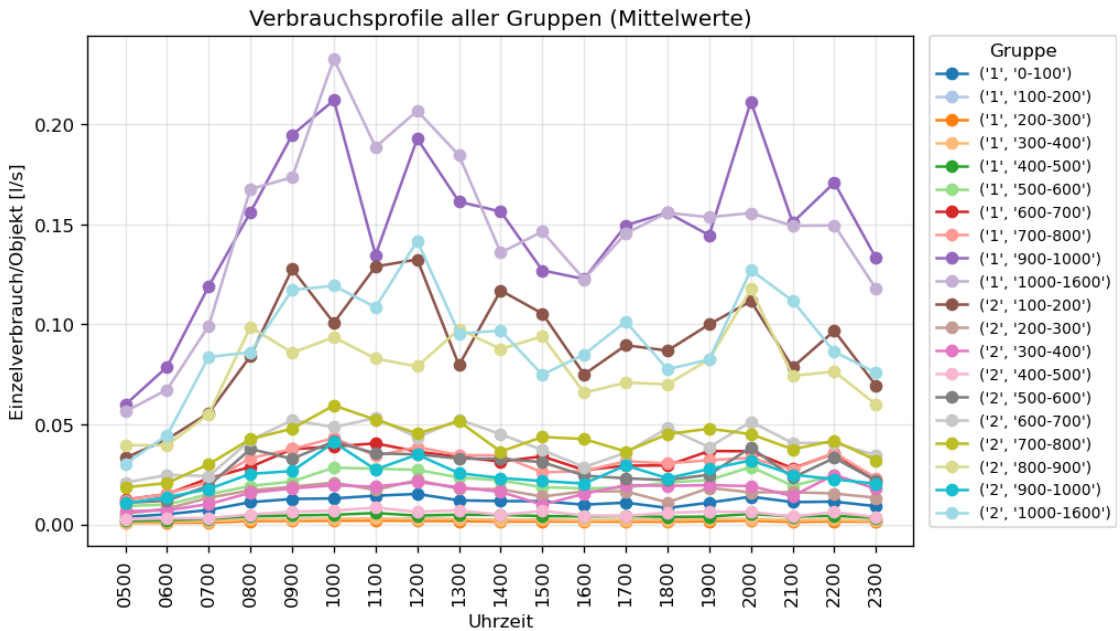


Kalibrierung Z02

Anhang H Verbrauchsabschätzungen aller Gruppen, Sonntage

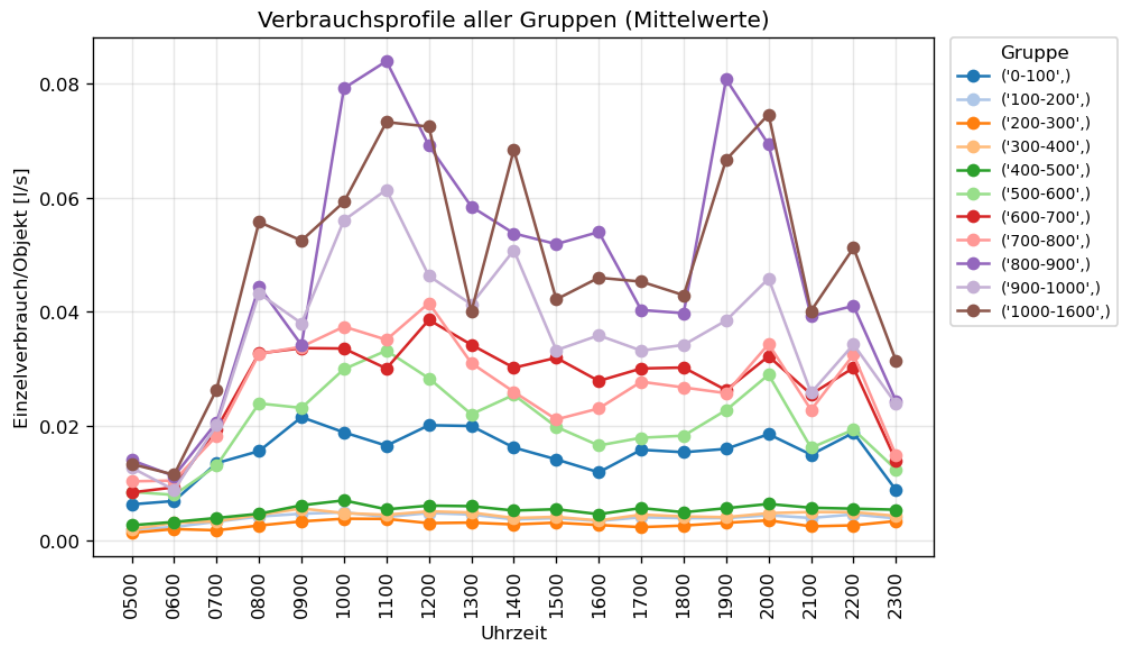


Kalibrierung K02

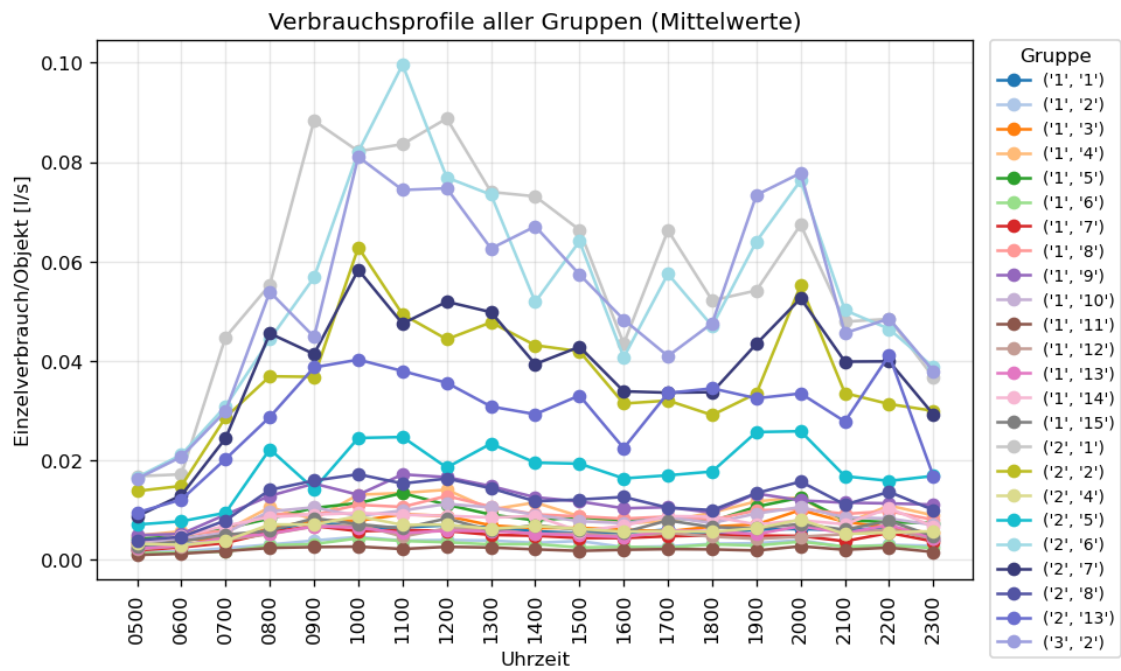


Kalibrierung K03

Anhang H Verbrauchsabschätzungen aller Gruppen, Sonntage

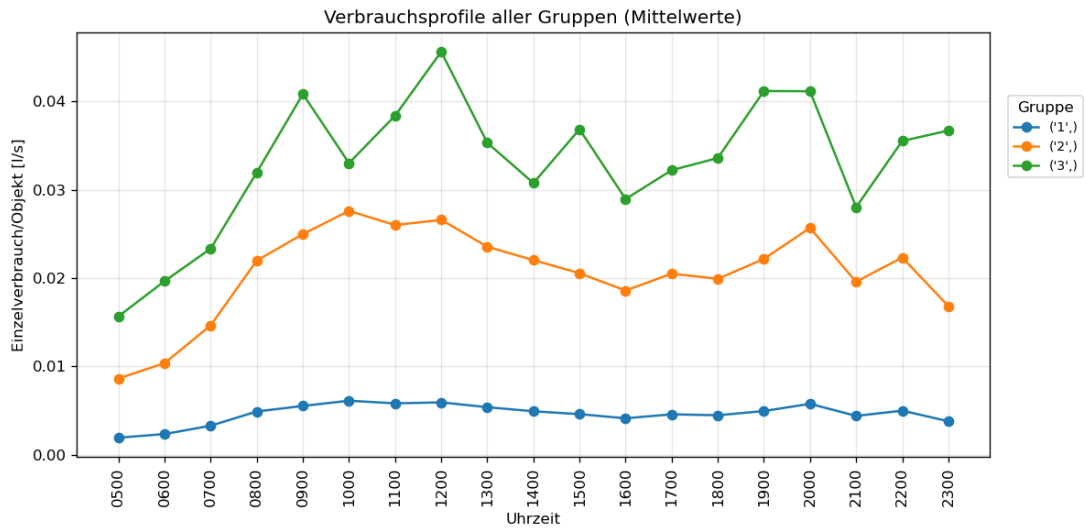


Kalibrierung K09

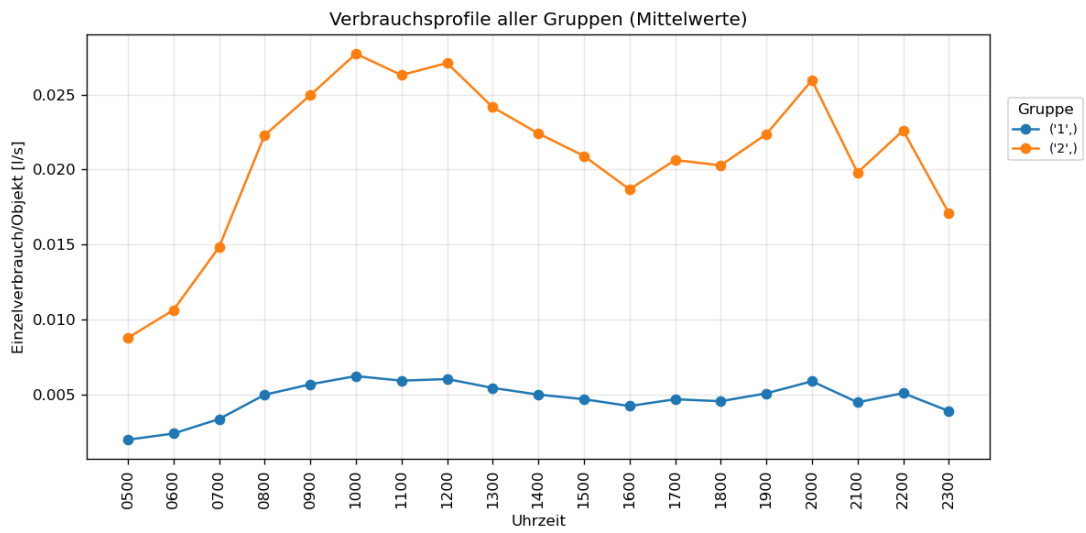


Kalibrierung K12

Anhang H Verbrauchsabschätzungen aller Gruppen, Sonntage



Kalibrierung Z01



Kalibrierung Z02