



Sebastian Georg Pertl, BSc

**Analyse der Einsetzbarkeit von Mikroturbinen zum  
energieautarken Betrieb von Druckmesssystemen an  
Trinkwasserhausanschlüssen**

**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

Mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. Michael Pointl, BSc

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, September 2018



Kontakt:  
Sebastian Pertl  
sebastian@pertl-ing.de

## **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.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature



## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei Allen bedanken, die mich im Studium und während dem Verfassen dieser Arbeit unterstützt haben. Mein Besonderer Dank gilt meiner Betreuerin Frau Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Daniela Fuchs-Hanusch und meinen mitbetreuenden Assistenten Dipl.-Ing. Michael Pointl, BSc.

Ein weiterer Dank gilt Roland Fuchs, der mir bei der Konstruktion des Labormodells zur Seite stand und viele Arbeiten durchführte. Des Weiteren möchte ich mich noch bei David Cahmy bedanken, der mir bei Problemen seitens der verwendeten Datenbank zur Seite stand.

Mein weiterer Dank geht an Roman Neunteufel von der Universität für Bodenkultur Wien für die Datenbereitstellung und an die Firma KINETRON für die Bereitstellung mehrerer Mikroturbinen.

Des Weiteren möchte ich meiner Mutter Michaela Pertl einen großen Dank aussprechen, die neben dieser auch sämtliche anderen Arbeiten während meines Studiums Korrektur gelesen hat.

Abschließend möchte ich mich noch ganz besonders bei meiner Freundin Natalie Weißenbacher bedanken, ohne die ich vermutlich nicht in Graz studiert hätte und die mich während des gesamten Studiums sowohl fachlich, als auch privat unterstützt hat. Ebenso möchte ich mich noch bei meinen Eltern, Großeltern und meiner Schwester bedanken, die mir bei wichtigen Entscheidungen zur Seite gestanden und mich stets unterstützt haben.



## Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit dem Bau eines Messsystems, welches in Trinkwasserhausanschlüsse eingebaut und mittels einer Mikroturbine energieautark betrieben werden kann, um eine regelmäßige Druckmessung durchzuführen. Die damit erhobenen Messdaten sollen der kontinuierlichen Überwachung des Trinkwassernetzes dienen und können in weiterer Folge zum Beispiel Daten für die Ortung von Leckagen in Trinkwassernetzen auf Basis von daten- oder modellbasierter Ansätze liefern.

Methodisch werden aufbauend auf den Stand der Wissenschaft und der Technik, die Randbedingungen für die Einsetzbarkeit eines solchen Messsystems bestimmt. Als Grundlage für die Hardwarespezifikation wurden die Verbrauchsdaten realer Trinkwasser-Hausanschlüsse aufbereitet und näher untersucht. Daraus abgeleitet wurde ein energieeffizientes Druckmesssystem, zusammen mit einer geeigneten Mikroturbine und einem entsprechenden Akku, zur Messung, Speicherung und Übertragung von Druckmessdaten entworfen und getestet. Zur Abschätzung der Eignung des Systems für den energieautarken Dauerbetrieb an Hausanschlüssen, wurden Testläufe an einem eigens konzipierten Labormodell – auf Basis der Hausanschlussmessdaten – durchgeführt. Die Untersuchungen am Messsystem zeigen neben den Auswirkungen der Installation eines solchen Messsystems auf die Trinkwasserversorgung, auch die Beeinflussung des Messergebnisses durch das Verbrauchsverhalten am Trinkwasser Hausanschluss.

Zusammengefasst zeigen die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Untersuchungen, dass der Langzeitbetrieb eines derartigen Druckmesssystems möglich ist. Die Auswirkungen des Messsystems auf die Versorgung liegen für österreichische Druckverhältnisse in einem akzeptablen Bereich. Die Energieversorgung kann bereits über eine Mikroturbine am Trinkwasserhausanschluss von Einfamilienhäusern sichergestellt werden. Die durchgeführten Untersuchungen lassen auf ein hohes Potential des Messsystems – auch aufgrund der identifizierten Optimierungsmöglichkeiten – bei flächendeckenden Einsatz für die kontinuierliche Überwachung von Leckagen Trinkwassernetzen, zum Beispiel zum Zweck der Detektion von Leckagen, schließen.



## **Abstract**

This work presents the design and implementation of a pressure-monitoring device for the installation at house connections of water distribution systems (WDS). The device is intended for energy self-sufficient long-term operation when powered with a compact micro turbine and a suitable battery considering typical demand patterns at such house connections.

Continuous time series generated by the pressure-monitoring device can be used for water distribution system monitoring in cases where a high temporal resolution of the data is required, e. g. for leak detection and leak localisation.

For the performance analysis and feasibility assessment of the designed micro turbine-powered monitoring device, a multi-step approach was chosen.

In a first step, existing case studies for the implementation of turbines in water distribution systems and a review of technical constraints and legal requirements for such systems were analysed. In a second step, long-term demand data from several Austrian households was processed and analysed. Findings from these first two steps were combined and used for the selection of a suitable micro turbine and a sensible battery, as well as for the design of an experimental setup.

The experimental setup was used to emulate the supply pressure and characteristic demand patterns at house connections in order to assess the long-term performance of the designed pressure-monitoring device, when powered with a micro turbine.

Extensive laboratory testing were used to assess the impact of the installed measurement system on a customer's supply pressure as well as the impact of variations in customer demand patterns on the performance and accuracy of the monitoring device.

While the observed effects of the micro turbine are acceptable for customers of most Austrian WDS, limitations of the monitoring device regarding power generation, power consumption and data transmission intervals became evident. Nonetheless, the results of this work indicate a considerable potential for the widespread use of micro turbine-powered pressure-monitoring devices for long-term WDS monitoring.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Zielsetzung.....	1
1.2	Durchführung einer Potentialanalyse .....	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Literatur</b> .....	<b>3</b>
2.1	Technische Grundlagen .....	3
2.1.1	Trinkwassernetz-Überwachung .....	3
2.1.2	Druckverhältnis österreichischer Trinkwassernetze.....	5
2.1.3	Stromerzeugung im Trinkwassernetz .....	5
2.2	Rechtliche und Normative Grundlagen .....	10
2.2.1	Abgrenzung zwischen öffentlichem und privaten Netz .....	10
2.2.2	Versorgungssicherheit.....	11
2.2.3	Ausführung der Trinkwasserinstallation im Gebäude .....	11
2.2.4	Werkstoffe .....	12
2.2.5	Datenschutz .....	14
2.3	Physikalische Grundlagen.....	17
2.3.1	Hydraulische Grundlagen .....	17
2.3.2	Elektrotechnische Grundlagen .....	23
<b>3</b>	<b>Methodik</b> .....	<b>29</b>
3.1	Randbedingungen für die Einsetzbarkeit am Hausanschluss .	29
3.2	Daten .....	32
3.2.1	Datenaufbereitung und -auswertung .....	32
3.2.2	Datenbanksystem PostgreSQL mit der Erweiterung Timescale .....	32
3.2.3	Datengrundlage .....	33
3.2.4	Zusätzliche Metadaten .....	35
3.2.5	Datenbereiche .....	36
3.3	Turbinenauswahl.....	37
3.4	Druckmesssystem.....	37

3.4.1	Mess- und Übertragungselektronik .....	38
3.4.2	Programmierung .....	42
3.4.3	Systemintegration .....	45
3.4.4	Messung des Energieverbrauches.....	48
3.5	Laborversuch.....	48
3.5.1	Entnahmeeinheit.....	49
3.5.2	Steuerungseinheit .....	50
3.5.3	Programmierung .....	52
3.5.4	Systemintegration .....	54
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>57</b>
4.1	Analyse des Wasserverbrauches .....	57
4.1.1	Durchschnittlicher täglicher Wasserverbrauch pro Einwohner.....	57
4.2	Analyse der Durchflüsse.....	59
4.2.1	Tagesganglinien.....	59
4.2.2	Häufigkeitsverteilung der Durchflüsse.....	61
4.2.3	Dauer der einzelnen Wasserentnahmen.....	64
4.2.4	Anteil Wasserentnahme pro Tag.....	66
4.3	Mikroturbine und Energiespeicher .....	67
4.3.1	Anforderungen .....	68
4.3.2	Spezifikation der gewählten Turbine .....	69
4.3.3	Energiespeicher .....	70
4.4	Systemevaluierung .....	72
4.4.1	Test des Messsystems .....	72
4.4.2	Test der Einheit am Labormodell .....	79
4.5	Potential und Grenzen des untersuchten Messsystems.....	89
4.5.1	Akkuverhalten im Langzeitbetrieb .....	89
4.5.2	Optimierung der Energieversorgung und Verzicht auf Turbine.....	90
4.5.3	Andere Übertragungstechnik .....	90
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>91</b>

**Literaturverzeichnis ..... 93**

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Darstellung Turbinen mit außen sitzenden Generatoren (von Schoenebeck, 2015) .....	6
Abbildung 2-2: Darstellung Turbine als Ersatz für Druckminderer (Fondation The Ark, 2015) .....	7
Abbildung 2-3: Darstellung unterschiedlicher Einbauarten für Mikroturbinen in Bypass-Leitungen (Ye & Soga, 2011).....	8
Abbildung 2-4: Darstellung „hydrothermal energy harvester“ (links) und „water pressure fluctuation energy harvester“ (rechts) (Ye & Soga, 2011).....	9
Abbildung 2-5: Darstellung Trinkwasser-Hausanschluss (Austrian Standards, 2018).....	10
Abbildung 2-6: Belastungswerte laut Norm (Austrian Standards, 2013).....	12
Abbildung 2-7: Prüfschema für nichtmetallene Werkstoffe (Tuschewitzki & Schel, 2013) .....	13
Abbildung 2-8: Auswahl unterschiedlicher Smart-Meter Funktionspakete im Stromsektor (Arbeiterkammer, 2017) .....	15
Abbildung 2-9: Darstellung Zusammenhang Fließgeschwindigkeit und Druckhöhe mit unterschiedlichen Ausflussbeiwerten .....	20
Abbildung 3-1: schematische Darstellung der Drucklinien im Trinkwasser-Hausanschluss (Austrian Standards, 2018 mod.) .....	29
Abbildung 3-2: Datenbankstruktur Messdaten .....	33
Abbildung 3-3: Mindestkomponenten für die Verwendung des ATmega328 (Filakovsky & Kelemen, 2017) .....	38
Abbildung 3-4: Drucksensoren links: Honeywell PX2-Series, rechts: PX3-Series (Honeywell, 2018) .....	40
Abbildung 3-5: Schemaplan des Programmablaufes .....	44
Abbildung 3-6: Schaltplan des entwickelten Messsystems .....	45
Abbildung 3-7: Schaltplan des gebauten Prototyps.....	46
Abbildung 3-8: Foto des selbst konstruierten Messsystems.....	47
Abbildung 3-9: Entnahmeeinheit mit Wasserhähnen und Magnetventilen.....	49
Abbildung 3-10:Foto der Steuerungseinheit .....	50
Abbildung 3-11:Screenshot der graphischen Oberfläche .....	53
Abbildung 3-12:Foto der Messstrecke und Turbine des Labormodells.....	54

---

Abbildung 3-13: Schemaskizze des Labormodells und der angeschlossenen Hardware .....	55
Abbildung 4-1: Tagesganglinie des Wasserverbrauchs (links) und des mittleren Durchflusses (rechts) am Donnerstag 14. April 2011 .....	59
Abbildung 4-2: Darstellung aller Verbräuche (links) und Durchflüsse (rechts) im Messzeitraum über den Tagesgang .....	60
Abbildung 4-3: Häufigkeitsverteilung der Durchflüsse für Haushalt 3 .....	61
Abbildung 4-4: Häufigkeitsverteilung der Durchflüsse für alle Haushalte .....	61
Abbildung 4-5: Häufigkeitsverteilung der Durchflüsse über $0.05 \text{ L/s}$ für alle Haushalte .....	62
Abbildung 4-6: Verteilung des Durchflusses über alle Haushalte .....	63
Abbildung 4-7: Verzerrung Messdaten durch Messintervall .....	64
Abbildung 4-8: Verteilung der gemessenen Laufzeiten .....	65
Abbildung 4-9: Verteilung der gemessenen Laufzeiten .....	66
Abbildung 4-10: Verteilung relevanter Durchflüsse (Haushalt 3) .....	66
Abbildung 4-11: Verteilung relevanter Durchflüsse je Wochentag (Haushalt 3) .....	67
Abbildung 4-12: Verteilung der Durchflüsse größer als $0.05 \text{ L/s}$ je Haushalt .....	68
Abbildung 4-13: Foto der gewählten Mikroturbine (KINETRON, 2015) .....	69
Abbildung 4-14: Schnitt durch die Turbine (KINETRON, 2015 mod.) .....	69
Abbildung 4-15: Kennlinie des Turbinenherstellers (KINETRON, 2015) .....	70
Abbildung 4-16: Selbstentladung von NiMh-Akkus unterschiedlicher Bauform (Schnabel, 2018b) .....	71
Abbildung 4-17: gemessener Stromfluss bei Wake-Up .....	73
Abbildung 4-18: gemessener Stromfluss während der Druckmessung .....	74
Abbildung 4-19: Plot des Stromverbrauchs des Messsystems .....	75
Abbildung 4-20: Plot des Stromverbrauchs des GSM-Moduls .....	75
Abbildung 4-21: Drucktagesganglinie am Labormodell-Anschluss .....	79
Abbildung 4-22: Vergleich dreier Schaltzustände bei unterschiedlichen Versorgungsdrücken .....	80
Abbildung 4-23: Drucklinie mit Druckstoß durch Magnetventil .....	81
Abbildung 4-24: Vergleich Leistungskurve laut Hersteller (KINETRON, 2015) und eigene Messung .....	83
Abbildung 4-25: Vergleich der Messung des Messsystems mit der Druckaufzeichnung der Steuerungseinheit .....	87
Abbildung 4-26: Detailansicht: Vergleich der Messung des Messsystems mit der Druckaufzeichnung der Steuerungseinheit .....	88

Abbildung 4-27: Verteilung der Abweichungen zwischen der Messung an der Steuereinheit und des Messsystems.....	88
Abbildung 4-28: gemessener Druckabfall der Mikroturbine .....	89

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Richtwerte für den Mindestbetriebsdruck an der Übergabestelle für den Betriebsfall 1 und den Betriebsfall 2 (Austrian Standards, 2018) .....	11
Tabelle 2-2:	übliche Werte für Volumenströme, Werte in Klammern stellen Mindestanforderungen für die Armaturen dar (Austrian Standards, 2013) .....	17
Tabelle 2-3:	übliche Werte für elektrische Leistungen (Rohner, 2015; Conrad Electronic, 2018) .....	24
Tabelle 2-4:	übliche Werte für elektrische Ladungen (Conrad Electronic, 2018) .....	27
Tabelle 3-1:	Beispielwerte für Beeinflussung des Messergebnisses durch Wasserentnahmen im Haus für typische Anschlussdimensionen und Entnahmemengen .....	30
Tabelle 3-2:	Aufzeichnung Speichermenge vor und nach Aufbereitung .....	34
Tabelle 3-3:	Übersicht über die gemessenen Haushalte .....	35
Tabelle 3-4:	Übersicht der Datenbereiche je kontinuierliche Messdatengruppe .....	36
Tabelle 3-5:	Recherchierter Stromverbrauch des Arduino Mini Pro (Rohner, 2015) .....	39
Tabelle 3-6:	theoretische Stromflüsse mit geschätzter Laufzeit und daraus abgeleiteter Energieumsatz des Messsystems .....	47
Tabelle 4-1:	Auswertungen des Wasserverbrauches je Haushalt .....	58
Tabelle 4-2:	Messdaten und berechneter Durchfluss .....	64
Tabelle 4-3:	Zahlensysteme im Vergleich .....	76
Tabelle 4-4:	gemessene Stromflüsse und daraus abgeleiteter Energieumsatz des Messsystems .....	77
Tabelle 4-5:	Täglich erzeugbare Energie der Messdatengruppen in mWh .....	84
Tabelle 4-6:	Ermittelte, notwendige Speicherkapazität in mWh .....	86

## Abkürzungsverzeichnis und Begriffserklärung

A/D-Wandler	Analog-Digital-Wandler <i>Ein Bauteil, das analoge Signale in einen digitalen Datenstrom umwandelt</i>
ANSI	American National Standards Institute
Arduino	Physical-Computing-Plattform <i>Eine aus Hard- und Software bestehende Plattform, die genutzt werden kann, um interaktive elektronische Komponenten zu entwickeln.</i>
AWG	American Wire Gauge <i>Amerikanische Bezeichnung für Durchmesser und Querschnittsfläche von Drähten</i>
Brandfall	Löschwasserbedarf bei einem mittleren stündlichen Verbrauch an verbrauchsreichen Tagen (Brandfall, Nachweis ab 20 000 Einwohner nicht erforderlich)
Breakboard	Lochraster Experimentierplatine <i>Eine Steckplatine, auf der elektrische Schaltungen zusammengestellt werden können, ohne dass Verbindungen gelötet werden müssen. Für die Verbindung der Bauteile werden gesteckte Kabel verwendet.</i>
CrNi-Stahl	Chrom-Nickel-Stahl
Datenbus	Ein System zur Datenübertragung <i>Man unterscheidet bei Datenbussystemen zwischen parallelen und seriellen Typen. Der parallele Datenbus wird vom Master der Kommunikationspartner über eine Adressierungsleitung angesprochen, anschließend kann ausschließlich mit dem angesprochenen Partner über die Datenleitung kommuniziert werden. Beim seriellen Datenbus enthält jedes Datenpaket zusätzlich die Empfängeradresse, daher könne mehrere Geräte gleichzeitig über den Bus kommunizieren.</i>
DIN	Deutsches Institut für Normung
DTEWV	Durchschnittliche tägliche Eigenwasserversorgung
DTVEW	Durchschnittlicher täglicher Verbrauch je Einwohner
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
EN	Europäische Norm
ESP8266	32-Bit-Mikrocontroller der Firma Espressif <i>Der Mikrocontroller bietet einen 32-Bit-Prozessor und arbeitet mit einem Systemtakt von 80-160 MHz, hat 64 kB RAM als Befehlsspeicher und 96 kB Ram als Datenspeicher. Der ESP8266 besitzt außerdem eine WLAN-Schnittstelle. wodurch er sich neben der Datenübertragung via USB auch direkt in ein vorhandenes W-Lan einbinden lässt.</i>
EWZ	Einwohnerzahl

Gleichrichter	Ein elektrisches Bauteil, dass Wechselstrom in Gleichstrom umwandelt
GSM	Global System for Mobile Communications <i>Ein Standard für Mobilfunknetze (hauptsächlich für Telefonie) der durch viele Erweiterungen (GPRS, EDGE, ...) mittlerweile auch für Datenübertragungen genutzt wird.</i>
GUI	Graphical User Interface <i>Bezeichnung für die graphische Bedienoberfläche von Computerprogrammen</i>
HH	Haushalt
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HTTPs	Hypertext Transfer Protocol Secure
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit <i>Ein serieller Datenbus zur Kommunikation zwischen Controller und anderen ICs.</i>
IC	Integrated Circuit <i>Eine vorgefertigte Schaltung die meist in einem Chipgehäuse Platz findet. Jeder Mikrocontroller fällt beispielsweise unter den Begriff IC.</i>
IDE	Integrated Development Environment <i>Eine Sammlung hilfreicher Werkzeuge in einer Softwareumgebung zur Vereinfachung der Arbeit bei der Softwareentwicklung</i>
ISO	Internationale Organisation für Normung
Lilo-Akku	Lithium-Ionen-Akku
LiPo-Akku	Lithium-Polymer-Akku <i>Dies ist eine spezielle Bauform des Lilo-Akkus.</i>
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network <i>Bei der Technologie handelt es sich um ein energiesparendes kabelloses Netzwerkprotokoll, das frei verfügbar ist und für die Kommunikation von „Internet of Things“-Geräten entwickelt wurde.</i>
LSD-NiMh-Akku	Low Self Discharge Nickel-Metall-Hydrid-Akku
Maximalfall	größter stündlicher Verbrauch an verbrauchsreichen Tagen
NiMh-Akku	Nickel-Metall-Hydrid-Akku
ÖNORM	von Austrian Standards International veröffentlichte nationale österreichische Norm
PHP	Hypertext Preprocessor <i>Skriptsprache zur Webentwicklung.</i>

RAM	<b>Random-Access Memory</b> <i>Direktzugriffsspeicher, der zumeist als Arbeitsspeicher Verwendung findet.</i>
RTC-Modul	<b>Real Time Clock</b> <i>Ein Uhren-Modul in der Elektrotechnik, welches auch nach ab- und wieder anschalten des Moduls noch die richtige Uhrzeit bereitstellt. Bewerkstelligt wird dies meist über eine Batterie.</i>
Sleep-Modus	<b>Bereitschaftszustand</b> <i>Ein stromsparender Schaltzustand bei einem Mikrocontroller, in den er mithilfe spezieller Befehle versetzt werden kann. Durch diesen Modus startet der Prozessor im Vergleich zum ab- und wieder anschalten an der gleichen Stelle im Programmablauf wieder und der Arbeitsspeicher des Prozessors bleibt erhalten.</i>
Smart Meter	<b>Intelligenter Zähler</b> <i>Ein „Smart Meter“ stellt einen Zähler (meist Stromzähler, aber auch Wasserzähler oder ähnliches) dar, der Messdaten aufzeichnet und entweder direkt übermittelt oder vor Ort ausgelesen werden kann. Im Vergleich zu herkömmlichen analogen Zählwerken lassen sich aus Erhebungen mit „Smart Meter“ Zeitreihen erstellen die detaillierten Informationen über den Verbrauch beinhalten.</i>
SMTP	<b>Simple Mail Transfer Protocol</b> <i>Protokoll zur Übertragung von E-Mails in Computernetzwerken.</i>
SQL	<b>Structured Query Language</b> <i>Eine Skriptsprache für die Abfrage und Manipulation von Daten in relationalen Datenbanken.</i>
UBA	<b>Umweltbundesamt</b>

# 1 Einleitung

Derzeit wird die abgegebene Trinkwassermenge in Österreich lediglich einmal jährlich bei der Zählerstands-Ablesung ermittelt. So lassen sich aktuell unter Zuhilfenahme der Massenbilanz lediglich jährlich Wasserverluste ermitteln. Die Erkennung von Leckagen erfolgt daher aktuell nicht auf Basis einer Massenbilanz, sondern auf Vergleichen der Tagesganglinien – vorzugsweise in den Nachtstunden – mit der durchschnittlichen Tagesganglinie. Größere Leckagen lassen sich so identifizieren, kleine allerdings nur sehr schwer bis gar nicht.

Mangels ausreichender Messstellen können derzeit ohne Messungen von außen, über beispielsweise Hydranten oder aktives Suchen mithilfe gängiger Leckage-Ortungstechnik, kaum Schäden im System erkannt werden. Die Wasserversorgung verläuft größtenteils unterirdisch, daher ist das Nachrüsten von Messtechnik nicht ohne weiteres möglich. Hierfür sind umfangreiche Erdarbeiten, meistens im Straßenbereich notwendig. Auch die Wartung und der Austausch von eingesetzter Hardware gestaltet sich schwierig, da hierfür erneute Erdarbeiten notwendig werden oder entsprechende Bauwerke vorzusehen sind.

Ein direkterer Zugriff auf das Trinkwassernetz ist allerdings bei jedem Hausanschluss möglich. Hier befindet sich aktuell der Wasserzähler, welcher, meist mechanisch, die entnommene Wassermenge dokumentiert. An dieser Stelle wäre die Nachrüstung zusätzlicher Messtechnik kostengünstig möglich, da keinerlei Erdarbeiten notwendig sind. Ein Zugang für die Wartung und den Austausch des Wasserzählers muss möglich sein, der auch für Einbau und Betrieb eines zusätzlichen Messsystems verwendet werden könnte.

## 1.1 Zielsetzung

Aufgrund des Trends in Richtung „Internet of Things“ sollte es auch für die Trinkwasserversorgung möglich sein, eine kostengünstige, flächendeckende Überwachung des Trinkwassernetzes zu etablieren.

Derzeit werden in Österreich Wasserzähler alle 5 Jahre gewartet beziehungsweise gewechselt. Um den zusätzlichen Arbeitsaufwand durch das geplante Messsystem gering zu halten, wird eine entsprechende Laufzeit angestrebt. Bei reinen Batterie- oder Akkulösungen die über 5 Jahre hinweg laufen sollen, werden entsprechend große Energiespeicher benötigt.

Da in einem Großteil von Österreich bei den Trinkwasseranschlüssen Druckminderer eingesetzt werden um überschüssigen Versorgungsdruck abzubauen, entstand die Idee der Nutzung dieses Drucküberschusses durch den

Einbau einer Mikroturbine, welche die überschüssige Druckenergie in elektrische Energie umwandelt. Wichtiges Ziel bei der Spezifikation der Turbine ist, dass diese zwar möglichst effizient Druckenergie umwandelt, es aber keinesfalls zu einer Unterversorgung im Haus kommen darf. Der Druckabfall in einer Turbine steigt in der Regel mit dem Durchfluss exponentiell an, daher ist es wichtig eine Bauform zu finden, die bei Spitzendurchflüssen nicht zu viel Fließwiderstand bietet und so zu einer signifikanten Minderung des maximalen Durchflusses führt.

### **1.2 Durchführung einer Potentialanalyse**

Für die Beurteilung der Machbarkeit und der Auswirkungen eines Messsystems mit Generator im Trinkwasser-Hausanschluss wird das Thema mithilfe eines rechnerischen Modells und eines realen Labormodells getestet.

Die als Basis für die Modelle dienenden Daten werden in einem ersten Schritt analysiert, ausgewertet und aufbereitet. Hier ist vor allem die Betrachtung der Messdaten als Durchflüsse anstelle von Volumina notwendig. Nachfolgend wird ein geeignetes Druckmesssystem entwickelt. Bei diesem liegt ein besonderes Augenmerk auf einer möglichst energieeffizienten Lösung. Neben dem Druckmesssystem ist auch die Spezifikation einer geeigneten Turbine und eines passenden Energiespeichers notwendig. Ziel der Arbeit ist die Zusammenstellung eines Systems bei dem die erzeugte Energie größer der benötigten Energie ist und Zeiten ohne Stromerzeugung durch die Turbine mithilfe des Energiespeichers überbrückt werden können. Aus der für die Turbine ermittelte Leistungskennlinie und dem ermittelten Energiebedarf wird zusammen mit den Hausanschlussmessdaten ein rechnerischer Nachweis über die notwendige Akkuspeicherkapazität geführt. Abschließend wird das Messsystem in einem Laborversuch auf seine Betriebsstabilität und sein Messverhalten hin untersucht. Für diesen Zweck wird ein Labormodell konstruiert, welches Verbräuche von Hausanschlüssen für das Messsystem simulieren kann.

## **2 Grundlagen und Literatur**

In einem ersten Schritt wurden der Stand der Wissenschaft und der Technik bezüglich des Betriebs von Systemen zur Energiegewinnung in Trinkwassernetzen erhoben. Neben den technischen Grundlagen in denen die Gründe für die Netzüberwachung und beispielhafte Umsetzungen gezeigt werden, wurden auch rechtliche und normative Grundlagen recherchiert. Des Weiteren werden abschließend die notwendigen physikalischen Grundlagen beschrieben.

### **2.1 Technische Grundlagen**

In diesem Abschnitt werden die technischen Gründe und Rahmenbedingungen für die Umsetzung der durch die Mikroturbine betriebene Messelektronik aufgezeigt. Außerdem werden Beispiele von bereits umgesetzten Projekten angeführt und einzelne Grundlagenarbeiten aus dem Bereich Stromversorgung aus Trinkwassernetzen zusammengefasst.

#### **2.1.1 Trinkwassernetz-Überwachung**

Für die detailliertere Überwachung von Trinkwassernetzen gibt es mehrere Gründe. Zum einen ist es für Netzbetreiber wichtig den aktuellen Netzzustand, die Entwicklung und das Netzverhalten zu kennen. Außerdem können aus der Netzüberwachung auch Wasserverluste und ähnliches abgeleitet werden.

##### **2.1.1.1 Betriebsoptimierung**

Durch die Kenntnisse des Netzzustandes kann der Betrieb eines Trinkwassernetzes optimiert werden. Gibt es in einem Netz beispielsweise nur geringe Entnahmen und herrschen hohe Drücke vor, so können über eine Reduzierung von Drücken zum einen vorhandene Drucksteigerungsanlagen entlastet werden, als auch die Belastung für die Rohre vermindert werden. Im Falle einer Druckabsenkung kann es vor allem bei Kunststoffnetzen auch zu einer Reduzierung der Wasserverluste über nicht bekannte Leckagen führen. Durch den verringerten Systemdruck werden Risse kleiner oder können sich sogar wieder komplett schließen.

Andererseits kann auf gestiegene Nachfrage gegebenenfalls durch zuschalten von Pumpen oder die gezielte Steuerung von Schiebern reagiert werden, um so Versorgungsengpässe zu vermeiden oder zu erkennen. Des Weiteren kann die Kenntnis des Netzzustandes als wichtige Planungsgrundlage für Aus- und Umbauten am System dienen.

### **2.1.1.2 Leckage- oder Diebstahlsortung**

Für die Ortung von Leckagen gibt es mehrere Ansätze. Die einfachste Methode bildet die Volumenbilanz. Außerdem existieren datenbasierte Ansätze. Messungen am Hausanschluss bieten eine gute Möglichkeit, um Messdaten für die Methoden zur Leckage- oder Diebstahlsortung zu generieren. Gegenüber in das Netz integrierte Bauteile, ergeben sich bei Messungen am Hausanschluss gewisse Vorteile. Derartige Messinstrumente sind beispielsweise ohne Grabungsarbeiten zugänglich und damit sind die Kosten für Einbau, Wartung und Austausch deutlich geringer als bei direktem Einbau in das Hauptnetz.

#### *2.1.1.2.1 Volumenbilanz*

Bei der Volumenbilanzierung werden die Zuflüsse mit den Abgaben verglichen. Differenzen weisen auf nicht gemessene Entnahmen hin. Hier ist allerdings zusätzlich zwischen zulässigen Entnahmen (durch nicht gemessene Entnahmen, zum Beispiel durch die Feuerwehr), unzulässigen Entnahmen (Wasserdiebstahl) und Leckagen zu unterscheiden.

Grundlage für die Auswertung über diese Methode ist eine nahezu 100 % Netzabdeckung mit Durchflussmessern, so dass der Anteil der ungemessenen Hausanschlussentnahmen gegen Null geht.

#### *2.1.1.2.2 Modell- und Datenbasierte Ansätze*

Eine weitere Möglichkeit bieten modell- oder datenbasierte Ansätze (Wu & Liu, 2017; Steffelbauer u. a., 2017). Hier werden tatsächliche Netzzustände (Durchflüsse, Drücke) erfasst und auf Basis mathematischer Modelle versucht den Netzzustand zu bewerten.

Der Unterschied zwischen beiden Methoden ist, dass der modellbasierte Ansatz auf einem hydraulischen Modell basiert, das heißt es werden die physikalischen Parameter des Netzes bei der Beurteilung mit einbezogen. Im Gegensatz dazu versuchen statistische Modelle, Trends und Störungen rein auf Basis der statistischen Auswertung der Messergebnisse zu erkennen.

### **2.1.2 Druckverhältnis österreichischer Trinkwassernetze**

Aufgrund der geographischen Situation in Österreich, die größtenteils durch Berglandschaften geprägt ist, werden notwendige Versorgungsdrücke zumeist ohne Drucksteigerungsanlagen erreicht. Meist findet man Trinkwasserbehälter an entsprechender Position, so dass das Trinkwassernetz direkt versorgt werden kann. Aus diesem Umstand heraus ist es in Österreich üblich, dass tendenziell zu hohe Drücke am Hausanschluss anstehen und deshalb eine Druckminderer-Anlage vor dem Wasserzähler installiert wird. Deshalb bietet es sich an, den überschüssigen Druck nicht im Druckminderer ungenutzt abzuwerfen, sondern mit einer Mikroturbine in elektrische Energie umzusetzen und diesen für den Betrieb von Messtechnik zu nutzen.

### **2.1.3 Stromerzeugung im Trinkwassernetz**

Die Idee der Stromgewinnung aus Trinkwassernetzen ist keine neue. Im Hauptnetz der Trinkwasserversorgung ist dies mittlerweile Stand der Technik (Fritsch u. a., 2014). Grundsätzlich ist die Energiegewinnung aus dem Trinkwassernetz dort sinnvoll möglich, wo das Wasser rein gravitativ fließt. Der Einbau von Turbinen in eine Leitung die durch Pumpen betrieben wird, grenzt eher an Energieverschwendung, da die elektrische Energie mithilfe strömenden Wassers verteilt wird. Aufgrund der verlustbehafteten Wandlungsprozesse (von elektrischer Energie in Bewegungsenergie, von Bewegungsenergie in elektrische Energie) und der vergleichsweise hohen Weiterleitungsverluste bei strömenden Wasser anstelle von elektrischer Leitung, ist diese Form der Verteilung tendenziell ineffizient.

Für eine abschließende Beurteilung der Sinnhaftigkeit, ist allerdings stets eine wirtschaftliche Beurteilung notwendig, da die Herstellungskosten für eine Stromversorgung zu entlegenen Orten (für zum Beispiel eine UV-Anlage) durchaus die wirtschaftlichen Verluste durch die vermeintlich ineffiziente Weiterleitung übersteigen können.

Im Folgenden werden zwei Beispiele bereits realisierter Anlagen in Trinkwasserleitungen näher beschrieben.

### 2.1.3.1 Turbinen in Wasserleitung in Portland

In Portland (USA) wurde eine Trinkwasser-Hauptleitung mit entsprechend leistungsstarken Turbinen ausgestattet (siehe Abbildung 2-1), so dass hier Strom für die Versorgung ganzer Gebäude generiert werden kann. Hier wird das natürliche Gefälle der Leitung ausgenutzt um die Stromgeneratoren anzutreiben. Ein weiterer wichtiger Punkt für die Betreiber dieser Turbinen war die frühzeitige Erkennung von Schäden, da jede Turbine mit Sensoren zur Prüfung der Wasserqualität und des Druckes ausgestattet wurde. Vor allem in Dürreperioden hat die frühzeitige Erkennung von Leckagen einen enormen Vorteil. (von Schoenebeck, 2015)



Abbildung 2-1: Darstellung Turbinen mit außen sitzenden Generatoren (von Schoenebeck, 2015)

### 2.1.3.2 Generatoren für Trinkwasser

Eine weitere Idee für den Einsatz von Generatoren in Trinkwassernetzen wurde an der Fachhochschule Westschweiz und der ETH Lausanne entwickelt (Fondation The Ark, 2015). Bei dem Projekt wurde das ungenutzte Potenzial in Trinkwassernetzen untersucht, das über Druckminderer abgeführt wird. Um diese Energie nutzbar zu machen wurde eine Turbine mit einer Leistung von ca. 5 – 25 kW entworfen (siehe Abbildung 2-2). Diese besteht aus zwei gegenläufigen Rotoren, über die zum einen der Druck reduziert wird und zum anderen Bewegungsenergie erzeugt wird. Im Rahmen der Studie wurde ein hydraulischer Entwurf für die Läufer samt numerischer Strömungssimulation, Herstellung und Leistung der Mikroturbine untersucht.

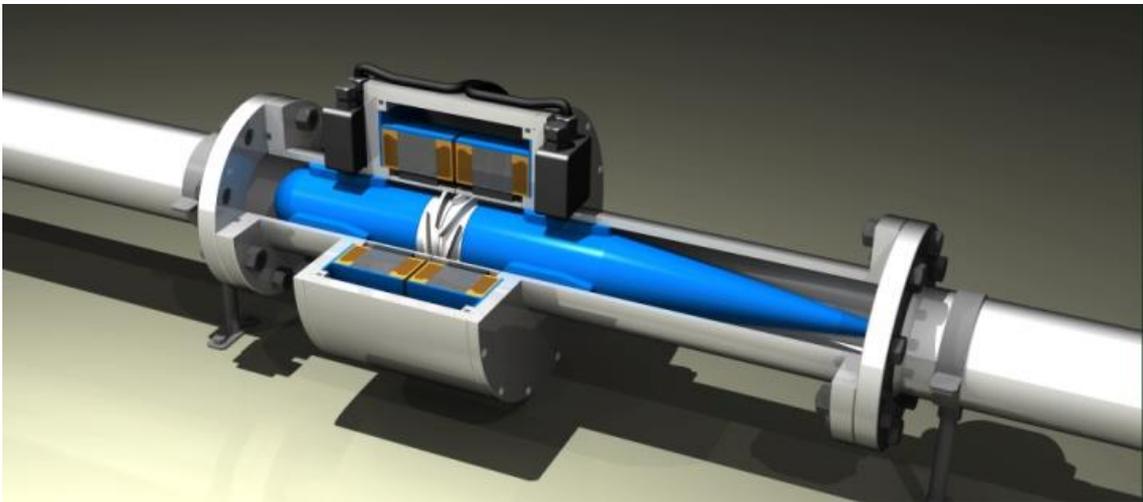


Abbildung 2-2: Darstellung Turbine als Ersatz für Druckminderer (Fondation The Ark, 2015)

Die Konstruktion wurde auf Basis des Strömungsmodells optimiert. Mithilfe einer Leistungsanalyse im 3D-Strömungsmodell, wurde ein hydraulischer Wirkungsgrad von größer 80 % erreicht. Beim Prototypen, der auf einem hydraulischen Prüfstand untersucht wurde, konnte aufgrund mechanischer Einflüsse der berechnete Wirkungsgrad nicht bestätigt werden. Abschließend werden in der Arbeit erste Erkenntnisse zur hydraulischen Entwurfsoptimierung anhand Schaufel-Kaskaden-Simulationen vorgestellt. (D. Biner u. a., 2015; Fondation The Ark, 2015)

### 2.1.3.3 Entwicklung von Turbinen zum Betrieb autarker Mess- und Steuerungseinheiten in Trinkwassernetzen

Basis für diese Entwicklung an der Universität der Bundeswehr München in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Aachen (Rödel u. a., 2016) bilden Untersuchungen der University of Cambridge (Ye & Soga, 2011). Hier wurde bereits der autarke Betrieb von Sensoren zur Überwachung von Wasserverteilungssystemen untersucht.

In Cambridge wurde die grundlegende Untersuchung angestellt, unter der Voraussetzung, dass die elektrische Energieversorgung fehlt und / oder der Batteriewechsel nur schwer möglich ist. In der Arbeit wurden unterschiedliche Möglichkeiten zur Energieerzeugung untersucht. Es wurde die Erzeugung elektrischer Energie aus hydraulischer Energie in unterschiedlichen Bypass-Leitungen (siehe Abbildung 2-3), thermischer Energie aus dem Wasser-Luft Temperaturgradient (siehe Abbildung 2-4 links) und kinetischer Energie aus Wasserdruckschwankungen (siehe Abbildung 2-4 rechts) untersucht.

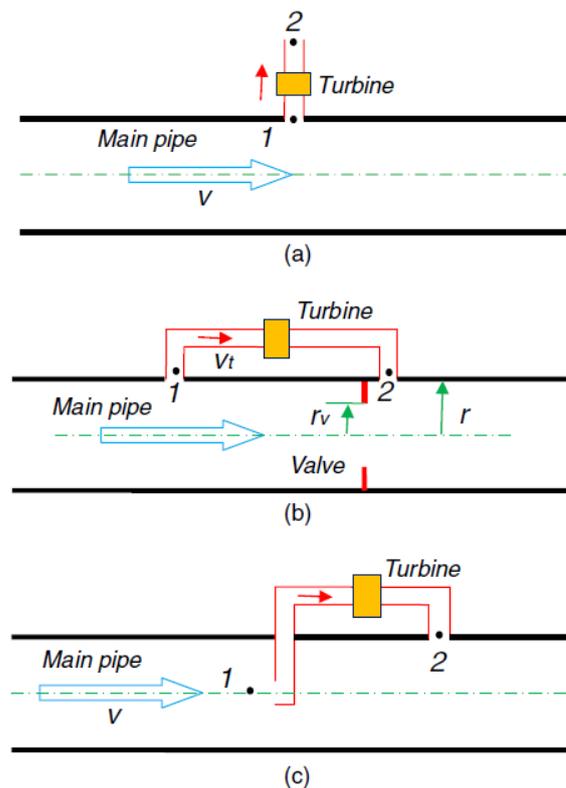


Abbildung 2-3: Darstellung unterschiedlicher Einbauarten für Mikroturbinen in Bypass-Leitungen (Ye & Soga, 2011)

Die Systeme wurden modelliert und anschließend anhand simulierter und realer Daten analysiert. Der in der Arbeit vorgestellte „hydrothermal energy harvester“ und der „water pressure fluctuation energy harvester“ bieten das Potenzial einige Milliwatt Sekunden zu erzeugen.

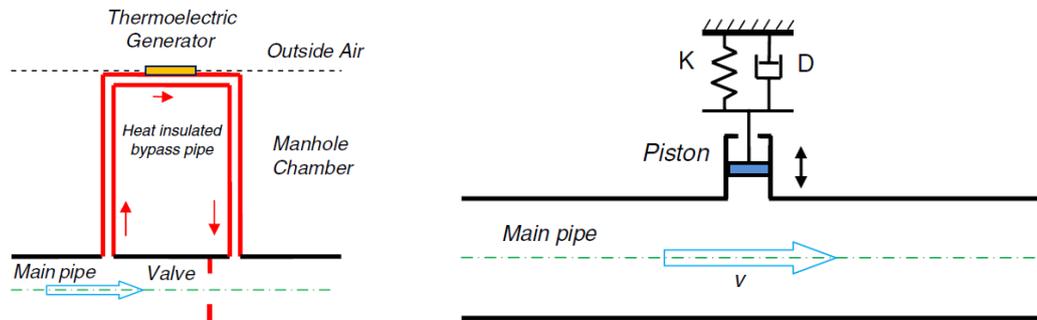


Abbildung 2-4: Darstellung „hydrothermal energy harvester“ (links) und „water pressure fluctuation energy harvester“ (rechts) (Ye & Soga, 2011)

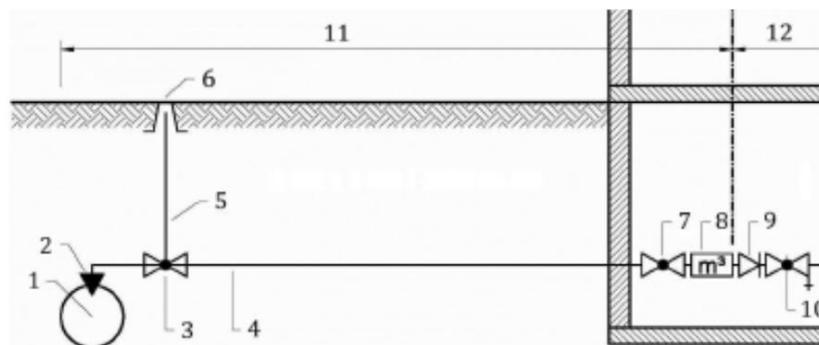
Aufbauend auf die Arbeit von Soga (2011) haben Rödel u. a. (2016) eine Bypass-Turbine näher untersucht. Hier wurden Strömungssimulationen durchgeführt, welche die kinetische und hydraulische Energie des Wasserflusses in elektrische Energie umwandelt. Aus den Untersuchungen resultiert das Potenzial, dass bis zu 65 mW bei einer Wassergeschwindigkeit von 1.6 m/s erzeugbar sind. Eine der Hauptaufgaben für die Versorgung von Sensoren besteht darin, die Sensoren entsprechend der erzeugbaren Energie über die Zeit zu optimieren. Allerdings gibt es auch bei den Mikroturbinen noch ein erhebliches Optimierungspotenzial bevor die kommerzielle Produktion sinnvoll möglich ist.

## 2.2 Rechtliche und Normative Grundlagen

Dieses Kapitel umfasst die rechtlichen und normativen Rahmenbedingungen für den Einbau einer Messelektronik in den Trinkwasserhausanschluss. Hier werden die definierten Vorgaben bezüglich Zuständigkeiten, Werkstoffe und der Versorgungssicherheit zusammengefasst. Außerdem wird das Thema des Datenschutzes im Kontext der Hausanschlussüberwachung aufgezeigt.

### 2.2.1 Abgrenzung zwischen öffentlichem und privaten Netz

Ein Problem in Bezug auf die Überwachung des Trinkwassernetzes ist, dass die Zuständigkeit für die Überwachung beim Versorgungsunternehmen liegt, sich die Anschlüsse allerdings auf Privatgrund befinden. Der Einbau von Messgeräten in den Abschnitt der Anschlussleitung ist auch innerhalb des Gebäudes möglich, da die Anschlussleitung erst mit dem Wasserzähler endet (siehe Abbildung 2-5) (Austrian Standards, 2018). Eine Verpflichtung zur Herstellung eines Stromanschlusses nahe des Trinkwasseranschlusses existiert nicht und auch die dadurch verursachten Stromkosten (wenn diese auch sehr gering wären) sind ein weiterer Problempunkt. Eine autarke, selbstversorgende Messeinrichtung würde – ähnlich einem Wasserzähler – keine derartigen Probleme bereiten.



**Legende:**

1	Versorgungsleitung	8	Wasserzähler
2	Abzweigung (oben oder seitlich)	9	Rückflussverhinderer
3, 7	Absperrvorrichtung	10	Absperrvorrichtung mit Entleerungsfunktion
4	Anschlussleitung	11	Bereich der Anschlussleitung
5	Einbaugarnitur	12	Bereich der Verbrauchsleitung
6	Straßenkappe		

**Bild 2 — Schematische Darstellung einer Anschlussleitung bzw. des Übergangs zur Verbrauchsleitung**

Abbildung 2-5: Darstellung Trinkwasser-Hausanschluss (Austrian Standards, 2018)

## 2.2.2 Versorgungssicherheit

Wichtigstes Ziel der Wasserversorgung ist die Sicherstellung der Versorgung jedes Anschlussnehmers. Bei Eingriffen in die Trinkwasserversorgung ist daher immer auf die einschlägigen Vorschriften und Richtlinien zu achten. Die ÖNORM B 2538 definiert Mindestbetriebsdrücke abhängig von der Geschößzahl des angeschlossenen Gebäudes und des jeweiligen Betriebsfalls (Maximalfall, Brandfall, siehe Tabelle 2-1). Als maximaler Druck an der Übergabestelle definiert die Norm 0.60 MPa (6.0 bar) an der Übergabestelle. (Austrian Standards, 2018)

Tabelle 2-1: Richtwerte für den Mindestbetriebsdruck an der Übergabestelle für den Betriebsfall 1 und den Betriebsfall 2 (Austrian Standards, 2018)

Durchschnittliche Geschößzahl über Gelände in der Versorgungszone	Mindestbetriebsdruck MPa (bar)	
	Maximalfall	Brandfall
bis 3	0.30 (3.0)	0.17 (1.7)
bis 4	0.36 (3.6)	0.22 (2.2)
bis 5	0.42 (4.2)	0.27 (2.7)
6 und mehr	0.48 (4.8)	0.32 (3.2)

Da in Österreich aufgrund der topographischen Verhältnisse zumeist Drücke an der oberen Betriebsgrenze vorherrschen, kann der Einbau einer Mikroturbine zum Betrieb von Messelektronik sinnvoll und auch möglich sein. Hier wird der Druck vor dem Druckminderer herabgesetzt und die Druckenergie in elektrische Energie umgewandelt, anstelle abgeworfen zu werden.

## 2.2.3 Ausführung der Trinkwasserinstallation im Gebäude

Die Rahmenbedingungen für die Planung, Installation, Änderung, Prüfung, Instandhaltung und den Betrieb von Trinkwasserinstallationen im Gebäude werden in der 5-teiligen ÖNORM EN 806 festgelegt (Austrian Standards, 2001; 2005; 2010; 2012c; 2013). Einige Bereiche werden in der genannten Norm auf europäischer Ebene nicht geregelt um nationale Regelungen zu ermöglichen. Diese nationalen Regelungen finden sich in Österreich in der ÖNORM B 2531 wieder. (Austrian Standards, 2012b)

Aus ÖNORM EN 806-3 können für die Bemessung von Anschlussleitungen Bemessungswerte für Entnahmearmaturendurchflüsse (siehe Abbildung 2-6) entnommen werden, die für die Bemessung von Versorgungsleitungen im Gebäude genutzt werden. Des Weiteren findet man darin Hinweise zu maximalen

Fließgeschwindigkeiten, von denen sich wiederum die Dimensionierung der Rohrrinnendurchmesser im Gebäude ableiten lässt. (Austrian Standards, 2013)

**Tabelle 2 — Entnahmematutendurchflüsse  $Q_A$ , Mindest-Entnahmematutendurchflüsse  $Q_{min}$ , und Belastungswerte für Entnahmestellen**

Entnahmestelle	$Q_A$	$Q_{min}$	Belastungswerte
	l/s	l/s	
Waschtisch, Handwaschbecken, Bidet, Spülkasten	0,1	0,1	1
Haushalt-Küchenspüle, -Waschmaschine <sup>a</sup> , Geschirrspülmaschine, Ausgussbecken, Duschbrausekopf	0,2	0,15	2
Urinaldruckspüler	0,3	0,15	3
Badewannenauslauf	0,4	0,3	4
Entnahmematut für Garten/Garage	0,5	0,4	5
Gewerbe-Küchenspüle DN 20, -Badewannenauslauf	0,8	0,8	8
Druckspüler DN 20	1,5	1,0	15

<sup>a</sup> Für Gewerbe-Waschmaschinen nach Angabe des Herstellers.

Abbildung 2-6: Belastungswerte laut Norm (Austrian Standards, 2013)

### 2.2.4 Werkstoffe

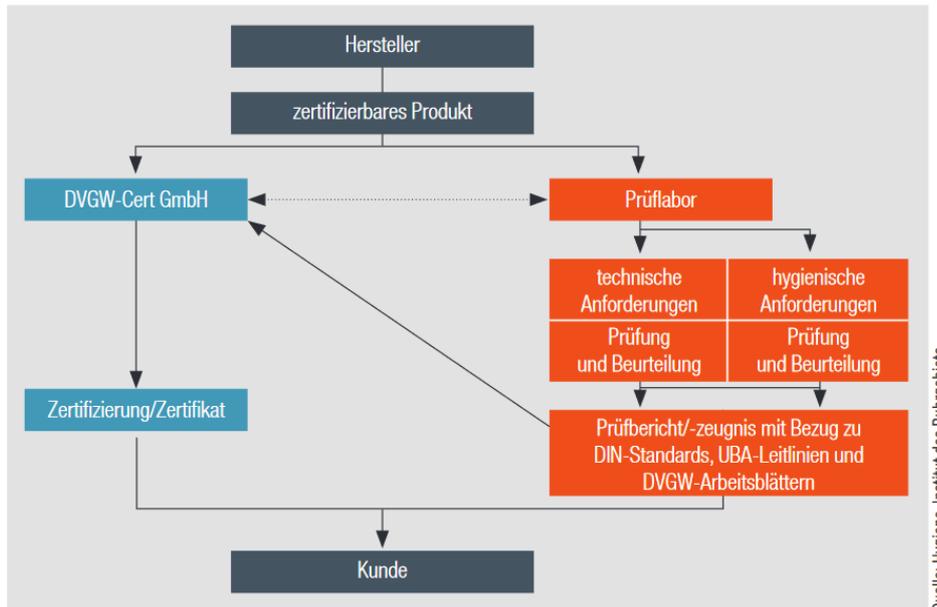
Um das Trinkwasser in seiner Qualität zu erhalten, ist ein sorgsamer Umgang mit dem Medium zu gewährleisten. Gemäß Trinkwasserverordnung §5 ist „... vorzusorgen, dass eine negative Beeinflussung des Wassers hintangehalten wird ...“ (Bundesministerium für soziale Sicherheit und Generationen, 2018). Aus diesem Grund werden auch hohe Anforderungen an die in der Trinkwasserversorgung verwendeten Werkstoffe gestellt. In Österreich ist „Trinkwassertauglichkeit von ortsfesten Trinkwasserversorgungsanlagen“ gemäß Europäischer Bauproduktenrichtlinie national in der dreiteiligen ÖNORM B 5014 geregelt. (Austrian Standards, 2012a; 2016; 2017a; 2017b)

### 2.2.4.1 DVGW-Produktzertifizierung

Da für die Beurteilung der Eignung für die Verwendung im Trinkwassersektor eine Vielzahl von Normen und Regelwerke zu beachten ist, ist es für nicht fachkundige Personen oft schwierig, die Einhaltung aller relevanten Regelwerke zu überblicken. Aus diesem Grund bietet der Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) eine Zertifizierung von Produkten an. Die Zertifizierungsgrundlage umfasst alle bekannten und relevanten Anforderungen und bietet somit eine gewisse Rechtssicherheit. (Tuschewitzki & Schel, 2013)

Die Produktzertifizierung kann entweder komplett durch die DVGW-Cert GmbH erfolgen, das heißt sämtliche Produktprüfungen werden durch die Zertifizierungsstelle durchgeführt, oder ein Prüflabor führt die Prüfungen nach DIN, UBA und DVGW durch und wird anschließend nur von der DVGW-Cert GmbH bestätigt (siehe Abbildung 2-7). Bei Einhaltung sämtlicher Anforderungen wird in beiden Fällen ein DVGW-Zertifikat ausgestellt.

Da es sich bei Normen um Regeln handelt, die lediglich Empfehlungen nach Stand der Technik entsprechen, kann auch in Österreich das DVGW-Zertifikat als Stand der Technik angesehen werden. Abweichungen zwischen Deutscher und Österreichischer Normung sind gegebenenfalls zu beachten.



Quelle: Hygiene-Institut des Ruhrgebiets

Abb. 3: Nichtmetallene Werkstoffe: trinkwasserhygienische Untersuchung/Bewertung und Zertifizierung (nach Klinger und Koch)

Abbildung 2-7: Prüfschema für nichtmetallene Werkstoffe (Tuschewitzki & Schel, 2013)

### 2.2.5 Datenschutz

Mit Inkrafttreten der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) am 25. Mai 2018, wird der Schutz personenbezogener Daten teilweise neu geregelt (Europäisches Parlament & Rat der europäischen Union, 2016). Auswirkungen der neuen Rechtslage auf den Einsatz von Messsystemen an Trinkwasserhausanschlüssen lassen sich anhand von Smart Metern aus dem Stromsektor abschätzen, da diese dort bereits Stand der Technik sind. Vor allem im Bereich der Überwachung des Stromnetzes sind „Smart Meter“ bereits Stand der Technik. Auf Basis einer EU-Richtlinie sollen bis 2020 mindestens 80 % der privaten Haushalte mit einem „Smart Meter“ ausgestattet werden (Europäisches Parlament & Rat der europäischen Union, 2009). In Österreich wurde diese Vorgabe auf Basis einer Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend festgelegt (Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, 2010). Allerdings wurde auch hier sehr viel Wert auf den Datenschutz gelegt, so dass es keine Verpflichtung für Endkunden zur Daten-Übermittlung gibt. Für die Strom-Messung sieht der Gesetzgeber 3 mögliche Betriebsmodi (siehe Abbildung 2-8) vor. Neben dem Standardbetrieb (Speicherung von 15-Min-Messwerten und Übertragung des Tagesverbrauches) existieren zwei weitere mögliche Modi: „Opt-Out“ Betrieb wie beim herkömmlichen Stromzähler mit manueller Ablesung oder „Opt-In“ hier werden die 15-Minuten-Messwerte dem Netzbetreiber übermittelt. (Arbeiterkammer, 2017)

# SMART METER

## Meine Entscheidungsmöglichkeiten

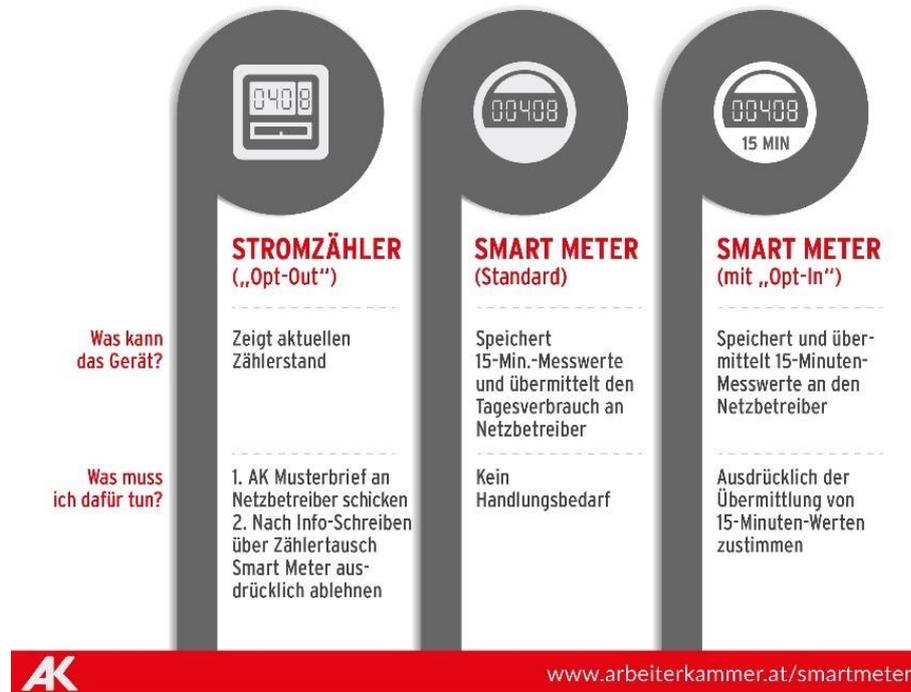


Abbildung 2-8: Auswahl unterschiedlicher Smart-Meter Funktionspakete im Stromsektor (Arbeiterkammer, 2017)

### 2.2.5.1 Hintergrund

Die übermittelten Messdaten bieten für Netzbetreiber hilfreiche Informationen zum aktuellen Netz-Zustand und die Netz-Last. Auf Basis der gesammelten Daten können dann zum Beispiel Kapazitätsengpässe prognostiziert werden, Schäden am System frühzeitig erkannt, oder ein bedarfsorientierter Netz-Betrieb umgesetzt werden.

Damit ist es im Interesse der Netzbetreiber, möglichst hoch aufgelöste Datensätze über die „Smart Meter“ zu erhalten. Aus einer hohen Datenauflösung lassen sich allerdings bei Auswertung auf Haushaltsebene Gewohnheiten der Bewohner ableiten. Daher ist das Thema „Smart Metering“ im engen Zusammenhang mit dem Datenschutz zu sehen.

Des Weiteren sind die erhobenen Daten auch ausreichend zu schützen. Aus den erhobenen Daten lassen sich beispielsweise auch tägliche Gewohnheiten zum Beispiel Arbeitszeiten oder Abwesenheit der Bewohner ableiten. Diese Daten könnten dann beispielsweise zur Planung von Wohnungseinbrüchen genutzt werden.

### **2.2.5.2 Trinkwasser**

Im Bereich Trinkwasser existieren zwei relevante Messgrößen für die Netzüberwachung. Zum einen ist die Messung des Durchflusses vor allem für die Volumenbilanz relevant. Aus dieser Größe kann man Gewohnheiten der Bewohner ableiten. Für die Beurteilung des Netzzustandes sind möglichst hochauflösende Daten notwendig um Kapazitätsengpässe erkennen und verfolgen zu können.

Die zweite relevante Messgröße in Trinkwassernetzen stellt der Systemdruck dar. Hier verhält sich die Messung im Hausanschluss anders als die Messung des Durchflusses, da die Druckmessung durch Wasserbewegung im Hausanschluss potentiell negativ beeinflusst wird. Da die Größe der Beeinflussung des Messergebnisses, wie die Berechnungen unter 3.1 zeigen, marginal ausfällt, lassen sich aus der Druckmessung damit keine Daten des Verbrauchs ableiten.

### **2.2.5.3 Datenspeicherung**

Vor allem das Thema der Datenspeicherung ist im Kontext der europäischen Datenschutz-Grundverordnung neu geregelt. Hier wurde vor allem das „Recht auf Vergessenwerden“ verankert (Art. 17 Europäisches Parlament & Rat der europäischen Union, 2016). Die Speicherung von Verbrauchsdaten ist im Bereich der Trinkwasserversorgung vor allem zur Ermittlung von Langzeittrends relevant.

Gerade die Speicherung von Daten bringt allerdings weitere Probleme mit sich. Für den Trinkwasserhausanschluss und einen Versorgungsvertrag ist der Eigentümer zuständig. Die erhobenen Daten betreffen allerdings den Nutzer.

Damit muss nach geltendem Recht neben dem Vertrag für die Versorgung des Anwesens auch noch eine Datenschutzvereinbarung mit dem Nutzer geschlossen werden (Art. 6 Europäisches Parlament & Rat der europäischen Union, 2016). In dieser Vereinbarung ist offen zu legen, welche Daten erhoben, zu welchem Zweck sie genutzt und durch wen beziehungsweise welche Firma diese verarbeitet werden.

## 2.3 Physikalische Grundlagen

Zur Bearbeitung der Aufgabenstellung sind physikalische Zusammenhänge aus dem Bereich der Hydraulik und der Elektrotechnik von Nöten. Nachfolgend wurden die für die Bearbeitung notwendigen Grundlagen zusammengefasst.

### 2.3.1 Hydraulische Grundlagen

Basis für die nachfolgenden Untersuchungen bildet die Hydraulik, also das Strömungsverhalten von Flüssigkeiten, in diesem Anwendungsfall von Wasser.

#### 2.3.1.1 Volumenstrom

Grundlage für die Untersuchung von Strömungen bildet der Volumenstrom. Dieser gibt das strömende Volumen pro Zeiteinheit wieder. Einfach gefasst, kann der Volumenstrom  $Q$  aus einer Querschnittsfläche  $A$  multipliziert mit der mittleren Fließgeschwindigkeit  $v_m$  bestimmt werden. (Fritsch u. a., 2014)

$$Q = v_m * A \qquad \text{Gleichung 2-1}$$

mit:

$Q$  ... Durchfluss

$v_m$  ... mittlere Fließgeschwindigkeit,  $A$  ... Querschnittsfläche

Üblicherweise werden bei Trinkwasserinstallationen Fließgeschwindigkeiten  $v_m$  im Bereich von 0 – 2 m/s in der Planung angesetzt. (Austrian Standards, 2013)

Tabelle 2-2: übliche Werte für Volumenströme, Werte in Klammern stellen Mindestanforderungen für die Armaturen dar (Austrian Standards, 2013)

Armatur	Volumenstrom	
	[l/s]	[l/min]
Wasserhahn Handwaschbecken	0.10	6.0
Waschmaschine	0.20 (0.15)	12.0 (9.0)
Badewannenauslauf	0.40 (0.30)	24.0 (18.0)

### 2.3.1.2 Energieerzeugung aus Wasserfluss

Die erzeugbare Leistung aus dem Wasserdurchfluss ist abhängig von der Fluiddichte  $\rho$ , der Erdbeschleunigung  $g$  und einem Wirkungsgrad  $\eta$ . Außerdem fließt der Druckhöhenverlust  $\Delta h$  und der Volumenstrom  $Q$  ein. (Fritsch u. a., 2014)

$$P = \rho * g * \eta * \Delta h * Q \quad \text{Gleichung 2-2}$$

mit:

$P$  ... Leistung,  $\rho$  ... Dichte von Wasser,  $g$  ... Erdbeschleunigung,  $\eta$  ... Wirkungsgrad,  $\Delta h$  ... Druckhöhenverlust,  $Q$  ... Durchfluss

Für Wasser wird üblicherweise die Dichte  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  angesetzt, die Erdbeschleunigung  $g$  wird mit  $9.81 \text{ m/s}^2$  angesetzt. Der Wirkungsgrad von Wasserkraftwerken liegt bei Kraftwerken mit Durchströmturbinen bei etwa 85 %. (Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 2012)

### 2.3.1.3 Bernoulli-Gleichung

Die Bernoulli-Gleichung stellt die Basis rechnerischer Nachweise im Bereich der Strömung von Fluiden dar. Die Gleichung basiert auf der Annahme, dass die Energie des Fluids entlang der Bewegungsrichtung konstant ist. (Fritsch u. a., 2014)

$$W = \frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + g * z = \text{const.} \quad \text{Gleichung 2-3}$$

mit:

$W$  ... spezifische Energie,  $v$  ... Fließgeschwindigkeit,  $p$  ... statischer Druck,  $\rho$  ... Dichte,  $g$  ... Erdbeschleunigung,  $z$  ... Höhe über Bezugsniveau

In der Wasserversorgung findet meist eine abgewandelte Form der Bernoulli-Gleichung Anwendung, die durch Division mit  $g$  in die Bernoulli-Druckhöhengleichung umgeformt wird.

$$h_e = \overbrace{\frac{v^2}{2g}}^{\text{Fließdruckhöhe}} + \overbrace{\frac{p}{\rho g}}^{\text{Druckhöhe}} + \overbrace{z}^{\text{geodätische Höhe}} = \text{const.} \quad \text{Gleichung 2-4}$$

mit:

$h_e$  ... Energiehöhe,  $v$  ... Fließgeschwindigkeit,  $p$  ... statischer Druck,  $\rho$  ... Dichte,  $g$  ... Erdbeschleunigung,  $z$  ... Höhe über Bezugsniveau

Eine weitere häufig vorhandene Vereinfachung im Bereich der Wasserversorgung, ist der Ansatz von  $g = 10 \text{ m/s}^2$  und  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  woraus sich folgende Gleichung ergibt (Fritsch u. a., 2014).

$$h_e = \overbrace{\frac{v^2}{2 * 10}}^{\text{Fließdruck-}}_{\text{höhe}} + \overbrace{p * 10}^{\text{Druckhöhe}} + \overbrace{z}^{\text{geodätische}}_{\text{Höhe}} = \text{const.} \quad \text{Gleichung 2-5}$$

mit:

$h_e$  ... Energiehöhe,  $v$  ... Fließgeschwindigkeit,  $p$  ... statischer Druck,  
 $z$  ... Höhe über Bezugsniveau

Abgeleitet aus der Vereinfachung ergeben sich im Bereich der Trinkwasserversorgung Fließdruckhöhen von bis zu 0.200 m (0.204 m bei genauer Berechnung nach Gleichung 2-4) bei wirtschaftlichen Fließgeschwindigkeiten von bis zu 2.0 m/s. Bei der Druckhöhe handelt es sich zumeist um Größen bis zu 160 m (Druckstufe 16 bar, bei genauer Berechnung: 163.099 m). Die geodätische Höhe definiert sich als unabhängige Größe, bei der für Berechnungen lediglich vorausgesetzt ist, dass das gleiche Bezugsniveau herangezogen wird.

### 2.3.1.4 Ausflussgesetz von Torricelli

Der Ausfluss aus einem Gefäß ist abhängig von der Füllhöhe. Die Ausflussgeschwindigkeit ist abhängig von der Druckhöhe  $h$ . Zusätzlich kann der Ausfluss- oder Verlustbeiwert  $\alpha$  zwischen 0 und 1 liegen. (Fritsch u. a., 2014)

$$v = \alpha \sqrt{2gh} \quad \text{Gleichung 2-6}$$

mit:

$v$  ... Fließgeschwindigkeit

$\alpha$  ... Ausfluss- oder Verlustbeiwert,  $g$  ... Erdbeschleunigung,  $h$  ... Druckhöhe

Das Ausflussgesetz nach Torricelli kann auch für die Wasserentnahme aus einem Trinkwassernetz herangezogen werden. Solange die Netzlieferkapazität deutlich größer als die Entnahmemenge ist, ist davon auszugehen, dass die Druckhöhe unverändert bleibt und damit die potentielle Entnahmemenge direkt mithilfe der Druckhöhe bestimmt werden kann (siehe Abbildung 2-9). Diese Annahme gilt allerdings nur sofern sich der Netzzustand nicht aufgrund anderer Einflüsse ändert. Einziger unbekannter Faktor ist  $\alpha$ , der durch Versuche zu bestimmen ist, da dieser Strömungsverluste darstellt und damit einen Bezug zur Entnahmematur und Einbausituation hat.

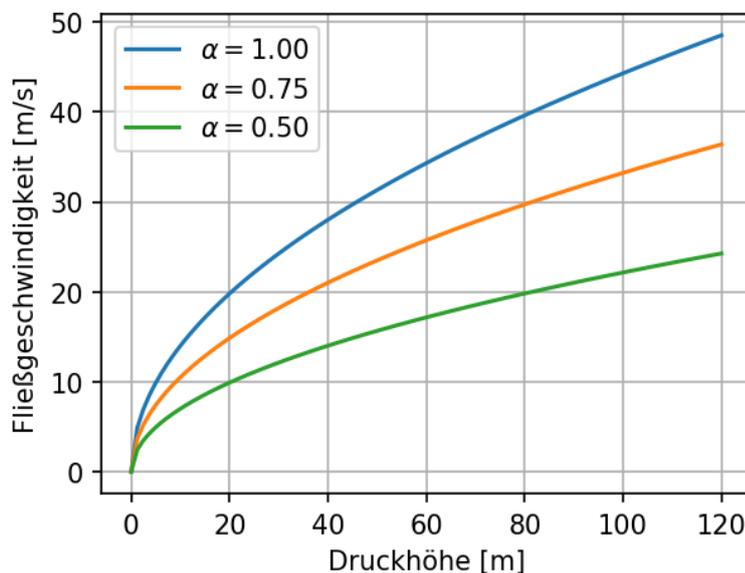


Abbildung 2-9: Darstellung Zusammenhang Fließgeschwindigkeit und Druckhöhe mit unterschiedlichen Ausflussbeiwerten

### 2.3.1.5 Druckstoß

Ein Druckstoß beschreibt die dynamische Druckänderung einer Flüssigkeit bei der Beeinflussung des Strömungsvorgangs zum Beispiel durch Schließen eines Ventils. (Fritsch u. a., 2014)

$$\Delta p = a * \Delta v * \rho \qquad \text{Gleichung 2-7}$$

mit:

$\Delta p$  ... Druckänderung

$\rho$  ... Dichte,  $c$  ... Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit,  $\Delta v$  ... Geschwindigkeitsänderung

Der dargestellte Zusammenhang gilt nur für Rohrleitungen, bei denen die Wandreibung im Bereich des Wassertransports liegt und solange  $\Delta v < c$ . Dabei beschreibt die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit  $a = 1300 \text{ m/s}$  die Geschwindigkeit mit der sich die Druckwelle im Wasser (bei 10 °C) ausbreitet.

### 2.3.1.6 Druckverluste bei Strömung

Druckverluste stellen sich bei der Strömung eines Fluids entweder als lokale Einzelverluste bei Geometrieänderungen oder auf Basis von Wandreibung ein.

Lokale Einzelverluste lassen sich über die Dichte  $\rho$  des Fluides, der Fließgeschwindigkeit  $v$  und des dimensionslosen Widerstandsbeiwertes  $\zeta$  bestimmen. (Fritsch u. a., 2014)

$$\Delta p = \zeta * \frac{\rho}{2} * v^2 \quad \text{Gleichung 2-8}$$

*mit:*

$\Delta p$  ... Druckverlust

$\zeta$  ... Widerstandsbeiwert,  $\rho$  ... Dichte,  $v$  ... Fließgeschwindigkeit

Rohrreibungsverluste werden mithilfe des dimensionslosen Rohrreibungswertes  $\lambda$ , der Leitungslänge  $L$  und des Rohrdurchmessers  $d$  bestimmt. (Fritsch u. a., 2014)

$$\Delta p = \lambda * \frac{l}{d} * \frac{\rho}{2} * v^2 \quad \text{Gleichung 2-9}$$

*mit:*

$\Delta p$  ... Druckverlust,  $\lambda$  ... Rohrreibungswert,

$l$  ... Länge,  $d$  ... Rohrdurchmesser,  $\rho$  ... Dichte,  $v$  ... Fließgeschwindigkeit

## **2.3.2 Elektrotechnische Grundlagen**

Basis für die Konzeptionierung von elektronischen Schaltungen sind Grundlagen in der Elektrotechnik. In der Elektrotechnik sind die physikalischen Größen Spannung und Strom die beiden Basisgrößen. Vereinfacht gibt die Spannung das Potential an Ladungen zu verschieben. Die Spannung charakterisiert die Stärke einer Stromquelle. Dahingegen beschreibt der elektrische Strom die tatsächlich transportierte Ladung. (Hering u. a., 2017)

### **2.3.2.1 Gleich- und Wechselstrom**

In der Elektrotechnik beschäftigt man sich meist mit zwei unterschiedlichen Betriebsmodi: dem Gleich- oder dem Wechselstrom. Die beiden Modi sind für unterschiedliche Einsatzzwecke geeignet und werden daher parallel eingesetzt. (Hering u. a., 2017)

Wechselstrom wird vorwiegend zum Transport des Stroms vom Erzeuger zum Abnehmer verwendet. Bei diesem Betriebsmodus wird die Stromrichtung periodisch geändert, in Österreich liegt die Netzfrequenz bei 50 Herz, das heißt 50 Richtungswechsel pro Sekunde. Wechselstrom bietet die Möglichkeit einer sehr einfachen und effizienten Änderung der Spannungen mithilfe von Transformatoren. Aus diesem Grund setzte sich das Wechselspannungsnetz in weiten Teilen der Stromversorgung durch.

Gleichstrom hingegen wird in nahezu allen elektronischen Geräten verwendet. Gleichstrom kann direkt aus dem Wechselstrom, mithilfe eines Gleichrichters, gewonnen werden. In den meisten Netzteilen wird die Wechselspannung aus dem Stromnetz erst über einen Transformator auf das gewünschte Spannungsniveau gebracht und anschließend über einen Gleichrichter zu Gleichstrom umgewandelt. Gerade für logische Schaltprozesse oder ähnliches bietet sich Gleichstrom an, da hier ein konstantes Steuersignal ausgegeben werden kann. Wechselstrom hingegen würde periodisch das Vorzeichen wechseln.

Da sich die Arbeit primär mit der Dimensionierung elektronischer Bauteile beschäftigt, werden nachfolgend nur noch die Zusammenhänge für Gleichströme dargestellt. Bei Wechselströmen weichen die Berechnungen zum Teil ab.

### 2.3.2.2 Elektrische Leistung

Die elektrische Leistung beschreibt die durch das Zusammenwirken von Spannung  $U$  und Stromstärke  $I$  entstehende Energie bezogen auf eine Zeitspanne. Die Leistung  $P$  wird in Watt angegeben. (Hering u. a., 2017)

$$P = U * I \qquad \text{Gleichung 2-10}$$

mit:

$P$  ... elektrische Leistung,  $U$  ... Spannung,  $I$  ... Stromstärke

Da der Ausdruck „energieeffizient“ mittlerweile überall verwendet wird und oftmals eine Assoziation mit beispielsweise LEDs besteht, werden in Tabelle 2-3 übliche Leistungen miteinander verglichen. Bei einer Verschiebung der Bezugsebene von Steckdose zu Akku oder Batterie, kommt dem Wort „energieeffizient“ eine andere Bedeutung zu. Daher sollte immer eine Bezugsebene den Betrachtungen hinzugezogen werden.

Tabelle 2-3: übliche Werte für elektrische Leistungen (Rohner, 2015; Conrad Electronic, 2018)

Bauteil	Spannung	Strom	Leistung
	[V]	[A]	[W]
Absicherung im Wohnbereich (z.B. Steckdose)	230	16	3 700
LED-Lampe	230	0.02 - 0.06	4-12
USB-BC (USB Battery Charging) <sup>1</sup>	5	1.50	7.50
Einzel-LED auf Platine	2	0.020	0.04
Mikrocontroller im Sleep-Modus	5	$7 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-5}$

### 2.3.2.3 Elektrische Energie

Multipliziert man die elektrische Leistung  $P$  mit einer Zeitspanne  $t$ , so erhält man die Energie die übertragen oder gespeichert wird. Die elektrische Energie  $W$  wird üblicherweise in Wattstunden angegeben. (Hering u. a., 2017)

$$W = P * t \qquad \text{Gleichung 2-11}$$

mit:

$W$  ... Energie beziehungsweise Arbeit,  $P$  ... Leistung,  $t$  ... Zeit

---

<sup>1</sup> Maximalwert für USB-Steckerverbindungen, gilt nicht für USB-C (Schnabel, 2018c)

Die elektrische Energie gibt das tatsächliche Arbeitsvermögen bezogen auf eine Zeitspanne an. Eine Wattstunde bedeutet, dass ein Watt über eine Stunde geleistet wird, allerdings kann es auch bedeuten, dass 0.1 Watt über 10 Stunden geleistet werden. Über diese Bezugsgröße lässt sich aus Spannung, Stromstärke und Laufzeit ein Vergleich anstellen, ob ausreichend Energie vorhanden ist um den Bedarf abzudecken.

#### **2.3.2.4 Wirkungsgrad**

Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Anwendung auf Basis der physikalischen Grundgesetze in der Wirklichkeit, ist die dimensionslose Größe des Wirkungsgrades maßgebend. Der Wirkungsgrad  $\eta$  wird in der Regel in Prozent angegeben und beschreibt das Verhältnis zugeführter  $P_{\text{zuge}}$  zu nutzbarer Leistung  $P_{\text{nutz}}$  beziehungsweise Energie. (Hering u. a., 2017)

$$\eta = \frac{P_{\text{nutz}}}{P_{\text{zuge}}} \qquad \text{Gleichung 2-12}$$

*mit:*

$\eta$  ... Wirkungsgrad,  $P_{\text{nutz}}$  ... nutzbare Leistung,  $P_{\text{zuge}}$  ... zugeführte Leistung

Vor allem bei rechnerischen Betrachtungen ist die Verwendung von Wirkungsgraden bei den einzelnen Wandlungsprozessen essentiell, da es hier schnell zu Überschätzungen der Energieverfügbarkeit und Unterschätzung des Energiebedarfes kommen kann.

### 2.3.2.5 Ohm'sches Gesetz

Das Ohm'sche Gesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannung  $U$  und Stromstärke  $I$ . Wird an einem Bauteil eine Spannung angelegt, so fließt ein spezifischer Strom, der sich aus dem Widerstand  $R$  des Bauteils ableitet. Der Widerstand wird in Ohm angegeben. (Hering u. a., 2017)

$$U = R * I \qquad \text{Gleichung 2-13}$$

mit:

$U$  ... Spannung,  $R$  ... Widerstand,  $I$  ... Strom

Jeder stromdurchflossene Leiter wirkt als Widerstand. Dies gilt es überall dort zu beachten, wo es zu verhältnismäßig hohen Strömen kommt, bezogen auf den Anwendungsfall. Als Beispiel sei hier die Verwendung üblicher Steckplatinen und deren Kabel bei Strömen über 1 Ampere anzuführen. Der hohe Widerstand führt zu einem hohen Spannungsabfall entlang des Leiters und kann damit zu Versorgungsproblemen in nachfolgender Elektronik führen.

$$R = \rho * \frac{l}{A} \qquad \text{Gleichung 2-14}$$

mit:

$\rho$  ... spezifischer Widerstand,  $R$  ... Widerstand,  $l$  ... Länge des Leiters,  
 $A$  ... Querschnittsfläche des Leiters

Der spezifische Widerstand von Kupferkabeln liegt im Bereich von  $\rho = 1.56 \times 10^{-2} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ . Gerade bei günstigen Verbindungskabeln (AWG 28:  $A = 0.08 \text{ mm}^2$ ) welche bei handelsüblichen Breadboards verwendet werden kann es bei Kabellängen von 20 cm und einem Strom von 2 Ampere schon zu einem Spannungsverlust von 0.08 Volt kommen. Dies ist ausreichend, dass die Versorgung für ein elektronisches Bauteil zusammenbricht.

### 2.3.2.6 Elektrische Ladung

Die elektrische Ladung beschreibt einen fließenden Strom  $I$  bezogen auf eine Zeitspanne  $t$ . Die Ladung  $Q$  wird in der Einheit Coulomb, was einer Amperesekunde entspricht, angegeben. (Hering u. a., 2017)

Allgemein: 
$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Gleichung 2-15

bei konstanten Strom: 
$$Q = I * t$$

mit:

$\eta$  ... Wirkungsgrad,  $P_{\text{nutz}}$  ... nutzbare Leistung,  $P_{\text{zuge}}$  ... zugeführte Leistung

Ladungen werden vor allem bei Batterien und Akkus angegeben um deren Speicherkapazität wiederzugeben. In der nachfolgenden Tabelle 2-4 wurden einige handelsübliche Werte für elektrische Ladungen bei Batterien beziehungsweise Akkus angegeben. Die Werte beziehen sich auf recherchierte Werte der derzeit im Handel verfügbaren und gebräuchlichen Bauteile.

Tabelle 2-4: übliche Werte für elektrische Ladungen (Conrad Elektronik, 2018)

Bauteil	Spannung	Ladung	Energie
	[V]	[Ah]	[Wh]
Auto-Batterie	12	45 - 100	540 - 1200
USB-Powerbank	5	10 - 25	50 - 125
Panasonic Akku (Lilo NCR18650B)	3.6	3.2	11.52
Energizer L91 Mignon Batterie	1.5	3.0	4.5
Lithium Knopfzellenbatterie CR2023	3.0	0.23	0.69

Eine Differenzierung zwischen der Bezeichnung Akku und Batterie basiert meist darauf, dass Akkus wiederaufladbar sind und Batterien nicht. Diese gängige Definition ist allerdings falsch (Autobatterie ist zum Beispiel auch aufladbar). Eine richtige Definition findet man zum Beispiel in der DIN 40729: demnach muss eine Batterie lediglich aus mindestens zwei einzelnen Zellen bestehen die miteinander verbunden sind. Dabei ist es unerheblich ob diese Batterie wiederaufladbar ist oder nicht.

Wichtig ist auch die Differenzierung der Einsatzgebiete von wiederaufladbaren und nicht wiederaufladbaren Lösungen. Nicht wiederaufladbare Bauteile bieten meist eine sehr hohe Spannungsstabilität bei sehr geringer Selbstentladung (zum

Beispiel Lithium-Ionen-Batterie bei 1 % pro Jahr) (Korthauer, 2013). Andererseits bieten wiederaufladbare Systeme oft die Möglichkeit, dass hohe Spitzenströme vom Vielfachen der Kapazität abgedeckt werden können. Als Beispiel können hier die Modellbau-Akkupacks von Conrad Energy mit Entladekapazitäten von bis zu 25 C angeführt werden, was bedeutet, dass die Akkus mit dem 25-fachen ihrer Kapazität entladen werden können (Conrad Elektronik, 2018). Allerdings mit deutlichen Einbußen aufgrund der Selbstentladung von bis zu 5 % der Kapazität pro Monat. Eine hohe Beanspruchung durch große Spitzenströme bei der Ladung- oder Entladung können den verwendeten Zellen schaden und ihre Lebensdauer signifikant verkürzen. Daher sollte trotz der Möglichkeit, Spitzenströme zu entnehmen, diese Eigenschaft nicht überstrapaziert und tendenziell flache Lade- und Entladezyklen angestrebt werden.

Will man die Restkapazität eines Akkus bestimmen, so kann dies über die Zellspannung erfolgen. Mit abnehmender Kapazität nimmt auch die Zellspannung ab, bis sie bei der komplett entladenen Zelle zusammenbricht.

### 3 Methodik

In diesem Abschnitt wird die Methodik zur Analyse der sinnvollen Installation und des energieautarken Betriebs eines Druckmesssystems an Trinkwasserhausanschlüssen dargelegt. Zuerst werden die Randbedingungen für die Einsetzbarkeit des Systems bestimmt. Nachfolgend werden die Verbrauchsdaten von realen Hausanschlüssen aufbereitet und untersucht. Das Vorgehen bei der Turbinenauswahl, sowie die Konzeption und Implementierung des Druckmesssystems und des Labormodells werden vorgestellt.

#### 3.1 Randbedingungen für die Einsetzbarkeit am Hausanschluss

Die Messungen im Hausanschluss haben das Ziel den Druckzustand im Hauptnetz zu erfassen. Daher sind Messungen nur dann sinnvoll, wenn es zu keiner Beeinflussung durch den Hausanschluss kommt. Fließt kein Wasser im Hausanschluss, gibt die Messung am Hausanschluss das Druckniveau des Hauptnetzes wieder (es gilt:  $p_{\text{netz}} = p_{\text{mess1}}$ ). Durch die Wasserbewegung in der Anschlussleitung kommt es zu Druckverlusten aufgrund der Rohrwandreibung und der Strömungseinflüsse an Störstellen (siehe Druckhöhenlinien in Abbildung 3-1). Außerdem nimmt der gemessene statische Druck des Wassers ( $p_{\text{mess2}}$ ) um den Fließdruck ab.

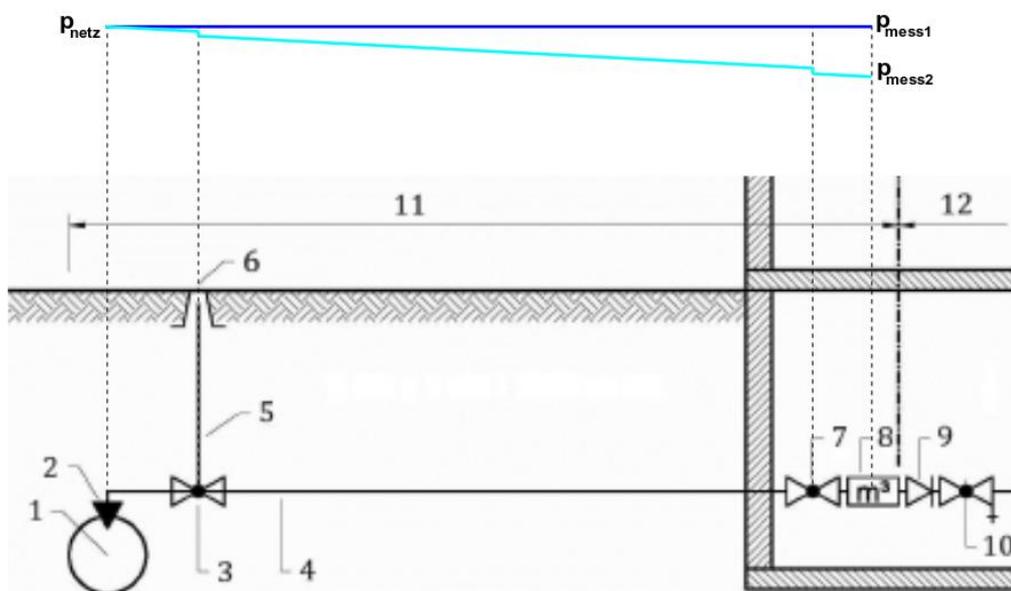


Abbildung 3-1: schematische Darstellung der Drucklinien im Trinkwasser-Hausanschluss (Austrian Standards, 2018 mod.)

Aufgrund der Größenverhältnisse zwischen Hauptnetz und Anschlussleitung kann davon ausgegangen werden, dass es in der Hauptleitung aufgrund der Öffnung einer Entnahmestelle im Haus zu keiner nennenswerten Absenkung des statischen Drucks kommt. Auf Basis dieser Annahme kann davon ausgegangen werden, dass die einzig auftretende Veränderung im Druck durch das strömende Wasser im Hausanschluss verursacht wird. Hier kommt es zum einen zu Einströmverlusten am Hausanschlussschieber. Dieser wird vereinfacht als kantiger Einlauf angesetzt  $\zeta = 0.50$  und stellt einen Einzelverlust dar (Fritsch u. a., 2014). Zusätzlich ergibt sich aus der Reibung an der Rohrwandung (Kunststoffrohr:  $k = 0.01$ ) der Reibungsverlust (Fritsch u. a., 2014). Außerdem wird der statische Druck, der vom Drucksensor aufgenommen wird (bei senkrecht zur Flussrichtung eingebauten Druckmesser) um den Fließdruck verringert.

$$p_{netz} = \overbrace{\zeta * \frac{\rho}{2} * v^2}^{\text{Einzelverlust Einlauf}} + \overbrace{\lambda * \frac{l}{d} * \frac{\rho * v^2}{2}}^{\text{Rohrwandreibung}} + \overbrace{\frac{\rho * v^2}{2}}^{\text{dyn. Druck}} + p_{mess} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

mit:

$\Delta p$  ... Druckverlust,  $\lambda$  ... Rohrreibungswert,  $\zeta$  ... Widerstandsbeiwert  
 $l$  ... Länge,  $d$  ... Rohrdurchmesser,  $\rho$  ... Dichte,  $v$  ... Fließgeschwindigkeit

Auf Basis der in Gleichung 3-1 aufgestellten Formel, wurden für übliche Trinkwasser-Hausanschluss-Leitungsdurchmesser und übliche Durchflussmengen in Tabelle 3-1 exemplarisch die Druckverluste berechnet.

Tabelle 3-1: Beispielwerte für Beeinflussung des Messergebnisses durch Wasserentnahmen im Haus für typische Anschlussdimensionen und Entnahmemengen

Innendurchmesser [mm]	Durchfluss [l/s]	Druckverluste			Gesamt [bar]
		Einlauf [bar]	Rohr [bar]	dyn. Druck [bar]	
20	0.10	0.000	0.001	0.008	0.008
	0.20	0.001	0.002	0.030	0.033
	0.30	0.002	0.005	0.068	0.075
25	0.10	0.000	0.000	0.002	0.003
	0.20	0.000	0.001	0.009	0.011
	0.30	0.001	0.002	0.021	0.024
32	0.10	0.000	0.000	0.001	0.001
	0.20	0.000	0.000	0.003	0.003
	0.30	0.000	0.001	0.006	0.007

Aus den Ergebnissen der Berechnung geht hervor, dass der gesamte rechnerische Druckverlust in der Hausanschlussleitung meist geringer als 0.03 bar ist. Einzig bei verhältnismäßig hohem Durchfluss von  $0.3 \text{ l/s}$  im  $\frac{3}{4}$ -Zoll-Hausanschluss (Innendurchmesser 20 mm) liegt der Druckverlust bei rechnerischen 0.08 bar.

Außerdem ergibt sich, dass eine Beeinflussung des Hauptnetzes durch die Entnahme marginal klein ist. Da der Leitungsdurchmesser im Hauptnetz sehr viel größer als der im Hausanschluss ist, lässt sich daraus schließen, dass ein einzelner Hausanschluss keinen unmittelbaren Einfluss auf das Druckniveau im Hauptnetz hat. Erst das Zusammenwirken vieler Hausanschlüsse beeinflusst dessen Druck.

Bei der Konfiguration des Messsystems wurde ein Drucksensor mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 0.02 \text{ bar}$  und einer Langzeitstabilität von  $\pm 0.04 \text{ bar}$  ausgewählt (vergleiche 3.4.1.2). Auch unter Einbeziehung einer rechnerischen Ungenauigkeit bei der Bestimmung des Druckverlustes ist davon auszugehen, dass dieser durch die Wasserentnahme im Haus zu keiner nennenswerten Beeinflussung des Messergebnisses führt.

## **3.2 Daten**

Als Datengrundlage für die folgenden Analysen dienen die Rohdaten der Studie „Wasserverbrauch und Wasserbedarf“ (Neunteufel u. a., 2012). Die Rohdaten umfassen Smart-Meter Messdaten mehrerer Hausanschlüsse über unterschiedliche Zeitbereiche. Um die Aufbereitung und Auswertung der Daten einfach zu gestalten wurden die Datensätze in ein Datenbanksystem überführt.

### **3.2.1 Datenaufbereitung und -auswertung**

Für die Datenaufbereitung und Analyse wurde die Skriptsprache Python 3 verwendet (Python Software Foundation, 2018). Mit der Open-Source-Softwareumgebung SciPy bietet Python 3 ein umfassendes Paket für wissenschaftliche Datenaufbereitung, -analyse und -auswertung (SciPy developers, 2018). SciPy umfasst eine Bibliothek für numerische Berechnungen (NumPy) welches in Python Vektoren und Matrizenrechnungen ermöglicht. Außerdem umfasst es eine Bibliothek zur graphischen Darstellung von Daten (Matplotlib) und eine Bibliothek (Pandas) mit umfangreichen Funktionen für die Analyse von Daten. Alle Bibliotheken können miteinander kombiniert eingesetzt werden, weshalb sich diese Umgebung vor allem für die rechnerische und graphische Datenauswertung hervorragend eignet.

Für die Datenbankbindung wurde zusätzlich die Python-Bibliothek SQLAlchemy verwendet, mit deren Hilfe Datensätze direkt aus unterschiedlichen Datenbanksystemen zum Beispiel in ein Pandas-Datenobjekt übergeben werden können. (SQLAlchemy, 2018)

### **3.2.2 Datenbanksystem PostgreSQL mit der Erweiterung Timescale**

Für die Ablage und Abfrage der Daten wurde das Datenbanksystem PostgreSQL mit der Erweiterung Timescale gewählt (PostgreSQL Global Development Group, 2018a; Timescale, Inc, 2018). PostgreSQL ist eines der großen, freien, objektrelationalen Datenbankmanagementsystemen. Es wird von einer Open-Source-Community entwickelt und bietet die Möglichkeit, Erweiterungen einzubinden. Die Erweiterung Timescale ermöglicht die effiziente Ablage und Verarbeitung von Zeitseriendaten ohne auf den SQL-Support von PostgreSQL verzichten zu müssen. Damit bietet es im Vergleich zu anderen Zeitseriendatenbanken (wie zum Beispiel: InfluxDB, Graphite) die Möglichkeit komplexer, verschachtelter Datenabfragen.

### 3.2.3 Datengrundlage

Bei den Rohdaten handelt es sich um ASCII-Dateien, welche lediglich einen Zeitstempel und die gezählten Messimpulse  $x$  (1 Messimpuls entspricht  $1/10$  Liter) im Zeitbereich (von 10 Sekunden) beinhalten. Die Umrechnung der gemessenen Impulse in einen Durchfluss  $Q$  ist in Gleichung 3-2 dargestellt.

$$1 \text{ [Puls]} = \frac{1}{10} \frac{\left[\frac{l}{s}\right]}{10 \text{ [s]}} = 0.01 \left[\frac{l}{s}\right] \Rightarrow Q = x * 100 \left[\frac{l}{s}\right] \quad \text{Gleichung 3-2}$$

mit:

$x$  ... aufgezeichnete Messimpulse,  $Q$  ... Durchfluss ( $l/s$ )

Aus der Dateibezeichnung geht der gemessene Haushalt hervor. In der Datenbank werden die gemessenen Werte (value: Messwert) zusammen mit Metadaten (ts: Zeitstempel, hh: Haushaltsnummer, grp: Messgruppennummer vergleiche 3.1.2) in der Datenbank abgelegt (siehe Datenbankstruktur in Abbildung 3-2). Zur Sicherheit und um Fehler nachverfolgen zu können wurde zusätzlich die Quelldatei bei jedem Datensatz angefügt.

wave_ts	
PS	ts: timestamp
hh:	smallint
value:	real
datei:	text
grp:	text

Abbildung 3-2: Datenbankstruktur Messdaten

Für die Datenspeicherung wurde versucht, diese möglichst effizient zu gestalten, da es sich um eine umfangreiche Tabelle mit 16.4 Millionen Datensätzen handelt. Bereits bei der Auswahl der Datentypen für die Datenbank wurde auf Ressourcenschonung hoher Wert gelegt.

Als Datentypen für Zeichensätze wie zum Beispiel dem Dateinamen der Quelldatei und dem Gruppenbezeichner wurde das einfache „text“ Format gewählt. Gegenüber anderen Datentypen (zum Beispiel „character varying“) zur Speicherung von Zeichenketten bietet es keinerlei Nachteil, jedoch den Vorteil, dass es keine Zeichenbeschränkung kennt. Der Speicherplatzbedarf ist exakt der

gleiche wie bei Verwendung des Datentyps „character varying“, da Postgres intern dieselbe Basis-Datenstruktur „varlena“ nutzt. (depesz, 2010)

Des Weiteren wurden die Zahlenwerte für Hausanschlussnummern als „smallinteger“ abgelegt (2 Bytes) anstelle des beim CSV-Import verwendeten bigint (8 Bytes) und für die Messwerte „real“ (4 Bytes) anstelle des standardmäßig verwendeten „double precision“ (8 Bytes) eingesetzt (PostgreSQL Global Development Group, 2018b).

Alleine durch die Verwendung der Postgres Erweiterung Timescale, konnte rund 80 % des benötigten Speichers eingespart werden (Timescale, Inc, 2018). Anschließend wurden die Datentypen nach wie zuvor erwähnt ausgetauscht. Da der Speicherbedarf trotz der Optimierungen noch verhältnismäßig groß war, wurden abschließend noch alle Null-Messwerte entfernt, da diese in Form von Lücken über die Zeitstempel identifizierbar sind und deren Speicherung in der Datenbank somit nutzlos ist. Durch diese letzte Maßnahme konnte die Datensatzanzahl deutlich von 16.4 Millionen auf rund 961 000 (6 %) reduziert werden. Damit einher ging eine nochmalige Einsparung von 19 % was zu einer gesamten Reduktion des benötigten Speichers von 99 % führte (vergleiche Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Aufzeichnung Speichermenge vor und nach Aufbereitung

Beschreibung	Benötigte Speichermenge	Verbesserung (Differenz)	Anteil von Ausgangssituation
Ausgangssituation: Datenimport ohne Optimierung	9 588.79 MB		100.00 %
Verwendung der Erweiterung Timescale	1 865.59 MB	-7 723.20 MB	19.46 %
Löschen der Nullmessungen	103.19 MB	-1 762.40 MB	1.08 %
Datentypwechsel Spalte hh: bigint in smallint	88.00 MB	-15.19 MB	0.92 %
Datentypwechsel Spalte value: real statt double precision	87.31 MB	-0.69 MB	0.91 %

Durch die Optimierung des Speicherbedarfs wird auch die Ausführungsgeschwindigkeit bei Berechnungen auf Basis der Daten deutlich beschleunigt.

### 3.2.4 Zusätzliche Metadaten

Die Daten umfassen Messdaten von Messungen aus 24 verschiedenen Haushalten. Zu den Daten liegen noch weitere Meta-Daten vor, die nachfolgend dargestellt sind. Sie umfassen zum einen die örtliche Lage des Messobjektes, die Eigenwasserversorgung (EWW), die durchschnittliche tägliche Eigenwasserversorgung (DTEWV) und deren Nutzung, die Einwohnerzahl (EWZ) und die Gartengröße (siehe Tabelle 3-3).

Tabelle 3-3: Übersicht über die gemessenen Haushalte

HH	Stadt	EWW	Nutzung	DTEWV [ <sup>L</sup> /d EW]	EWZ	DTEWV Winter [ <sup>L</sup> /d EW]	DTEWV Sommer [ <sup>L</sup> /d EW]	Garten- größe [m <sup>2</sup> ]
1	Wien	RW	Garten	86	2	-		800
2	Villach	nein		45	5			250
3	Ansfelden	nein		141	3			2200
4	Höchst	RW	Garten	75	1			200
5	Wien	nein		131	3			560
6	Wien	RW	Garten	64	3	-		200
7	Großhöflein	nein		72	3			800
8	Rust	RW	Garten, WC, WM	58	4	9.5	125.0	120
9	Wienersdorf	RW	Garten	115	1			170
10	Kottingbrunn	nein		89	2			200
11	Bad Vöslau	BR	Garten	76	3			700
12	Gießhübel	nein		558	2			1500
13	Langau	RW + BR	Garten und KFZ	53	2	0.0	0.0	800
14	Heidenreich- stein	RW + BR	RW: Garten BR: WC, WM, Garten	21	4		52	2000
15	Linz	nein		22	4			600
16	Linz	nein		66	4			300
17	Villach	nein		57	1			800
18	Villach	RW	Garten	89	1			1200
19	Villach	nein		58	3			450
20	Höchst	nein		34	2			1500
21	Höchst	nein		268	3			1000
22	Höchst	nein		35	4			900
23	Eisgarn	RW	Garten	28	3			1000
24	Heidenreichstein	Brunnen	WC, WM, GS, WH	16	5	25		2000

HH = Haushalt; RW = Regenwasser; BR = Brunnen; WM = Waschmaschine; GS = Geschirrspüler; WH = Wasserhahn  
EWW = Eigenwasserversorgung; EWZ = Einwohnerzahl; DTEWV = Durchschnittliche tägliche Eigenwasserversorgung

### 3.2.5 Datenbereiche

Da sich im Rahmen dieser Arbeit mit dem autarken Betrieb von Messelektronik auseinandergesetzt wird, ist der zeitliche Horizont der Daten eine der wichtigsten Kenngrößen. Aussagen über die Einsetzbarkeit können nur dann getroffen werden, wenn Daten über mindestens ein Jahr hinweg vorhanden sind. Nur dann kann davon ausgegangen werden, dass saisonale Einflüsse (Urlaub, Gartenbewässerung, Poolfüllung, ...) das Ergebnis nicht maßgeblich beeinflussen, da sie im Jahresschnitt eingerechnet sind.

Um diesbezüglich eine Aussage treffen zu können, werden die Daten in kontinuierliche Messgruppen eingeteilt (siehe Tabelle 3-4). Die Messgruppen erhalten dabei eine eindeutige Bezeichnung xx-y, wobei xx für die Nummer des Haushalts (1-24) steht und y für die laufende Nummer der Messgruppe des Haushaltes.

Tabelle 3-4: Übersicht der Datenbereiche je kontinuierliche Messdatengruppe

Gruppe	Beginn	Ende	Tage	Gruppe	Beginn	Ende	Tage
1-1	13.07.2010	01.07.2011	353	14-1	23.12.2010	23.12.2010	0
1-2	01.08.2011	03.09.2011	33	14-2	30.06.2011	14.07.2011	14
1-3	06.10.2010	04.03.2011	149	14-3	13.10.2011	30.10.2011	17
2-1	02.03.2011	14.10.2011	226	15-1	16.02.2011	03.03.2011	15
3-1	31.01.2011	13.10.2011	255	15-2	30.06.2011	15.07.2011	15
4-1	15.11.2010	30.11.2010	15	15-3	14.10.2011	02.11.2011	19
4-2	14.07.2011	29.07.2011	15	16-1	16.02.2011	02.03.2011	14
5-1	01.07.2011	15.07.2011	14	17-1	04.03.2011	27.05.2011	84
5-2	19.07.2011	03.08.2011	15	18-1	05.03.2011	27.05.2011	83
6-1	03.12.2010	17.12.2010	14	19-1	05.03.2011	27.05.2011	83
6-2	30.05.2011	14.06.2011	15	20-1	23.08.2011	13.10.2011	51
7-1	03.12.2010	17.12.2010	14	21-1	31.01.2011	15.02.2011	15
7-2	31.05.2011	14.06.2011	14	21-2	22.08.2011	30.08.2011	8
8-1	11.01.2011	26.01.2011	15	21-3	03.09.2011	06.09.2011	3
8-2	15.06.2011	29.06.2011	14	21-4	08.09.2011	13.10.2011	35
9-1	10.01.2011	25.01.2011	15	22-1	31.01.2011	15.02.2011	15
9-2	15.06.2011	29.06.2011	14	22-2	22.08.2011	13.10.2011	52
10-1	10.01.2011	25.01.2011	15	23-1	02.12.2010	16.12.2010	14
10-2	15.06.2011	29.06.2011	14	23-2	09.09.2011	24.09.2011	15
11-1	18.12.2010	10.01.2011	23	24-1	17.11.2010	01.12.2010	14
11-2	30.05.2011	14.06.2011	15	24-2	26.09.2011	12.10.2011	16
12-1	16.02.2011	03.03.2011	15				
12-2	02.08.2011	03.08.2011	1				
13-1	05.08.2011	21.08.2011	16				

### **3.3 Turbinenauswahl**

Auf Basis der ermittelten Grundlagen der Datenanalyse wird zusammen mit den aus der Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnissen eine geeignete Turbine ausgewählt.

Diese muss eine möglichst hohe Energieausbeute bei möglichst geringen Einfluss auf den Hausanschluss besitzen. Für die Turbinenauswahl wird eine notwendige Leistung von rund 500 mW bei einem zulässigen Druckverlust von rund 0.5 bar festgelegt (Pertl, 2017).

### **3.4 Druckmesssystem**

Zentrales Objekt dieser Arbeit ist das Druckmesssystem, welches die Daten ermittelt und in einem gewählten Zeitintervall an einen zentralen Server überträgt. Für das System besteht der Anspruch, dass es möglichst energieeffizient arbeitet. Als Datenübermittlungsstandard wird aufgrund der Netzabdeckung auf das „Global System for Mobile Communications“ (GSM) zurückgegriffen. Des Weiteren werden eine Akku-Anbindung und eine Ladungsüberwachung benötigt.

Betrieben werden soll das Messsystem über einen Akku, der zur Unterstützung an eine Turbine angeschlossen ist. Die Energieausbeute der Turbine muss im Durchschnitt größer sein, als die von der Messelektronik benötigte Energie inklusive der Beachtung von Wirkungsgraden der Elektronik (Lade-, Entladewirkungsgrad und Selbstentladung des Akkus). Dabei soll der Akku Zeiten ohne Wasserentnahme überbrücken.

Der Betriebsmodus wurde bei der Konzeption des Messsystems wie folgt vorgegeben: 5-minütlich messen, 2-mal täglich senden. Der Modus hat Einflüsse auf das Messsystem und deren Zusammenstellung, daher wurden vorab diese Eckdaten festgelegt.

### 3.4.1 Mess- und Übertragungselektronik

In diesem Abschnitt werden die verwendeten elektronischen Bauteile für das Messsystem vorgestellt.

#### 3.4.1.1 Mikrochip ATmega328P

Als Basis für das Druckmesssystem wurde auf den gebräuchlichen Mikrocontroller ATmega328P zurückgegriffen. Dieser wird unter anderem auf dem Entwicklungsboard Arduino eingesetzt. Aufgrund der großen Verbreitung des Entwicklungsboards und der großen Community gibt es sehr viele Tutorials, Berichte und Erfahrungen im Internet, auf welche zurückgegriffen werden kann.

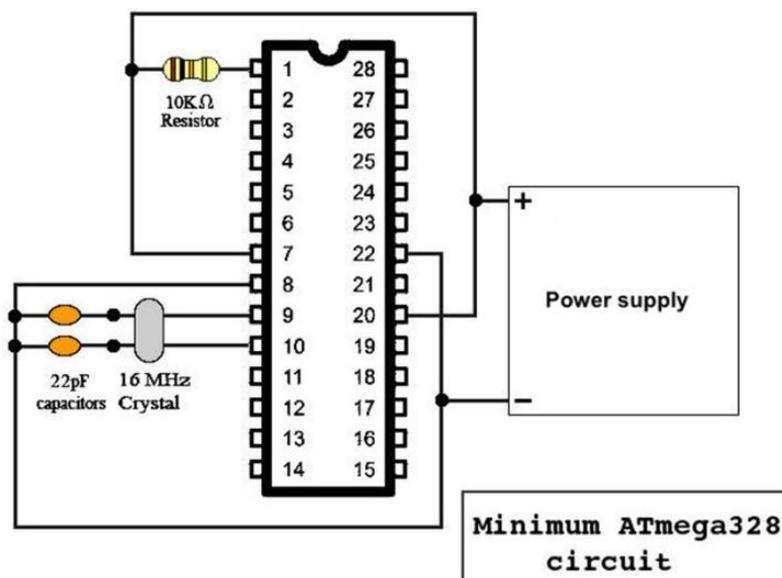


Abbildung 3-3: Mindestkomponenten für die Verwendung des ATmega328 (Filakovsky & Kelemen, 2017)

Als Grundlage für die Eigenkonstruktion wird das Arduino Pro Mini Board (5 Volt, 16 MHz) verwendet, da hier das notwendige Quarz und notwendige Verbindungen (mit Widerständen und Kondensatoren, siehe Abbildung 3-3) bereits auf der Platine enthalten sind. Dieses lässt sich durch einige kleine Umbauten sehr energieeffizient umrüsten. Hohe Energieverluste entstehen vor allem durch die eingebaute Power-LED (ständig leuchtend) und den ineffizienten Spannungsregler. Da sich der Mikrochip den größten Teil der Zeit im Sleep-beziehungsweise Deep-Sleep-Modus befindet, sind derartige Modifikationen sehr wirksam (vergleiche Tabelle 3-5).

Tabelle 3-5: Recherchierter Stromverbrauch des Arduino Mini Pro (Rohner, 2015)

Chip-Zustand	Betriebszustand	Stromfluss
Ohne Modifikation	Normal	21.85 mA
	Sleep-Modus	3.28 mA
PowerLED entfernt	Normal	19.05 mA
	Sleep-Modus	0.0308 mA
Spannungsregler entfernt	Normal	19.15 mA
	Sleep-Modus	0.0274 mA

Eine weitere Optimierung des Stromverbrauches ließe sich durch die Verwendung der 3.3 Volt Variante mit 8 MHz oder mit der 1.8 Volt Variante mit 4 MHz erreichen. Durch die Verwendung einer geringeren Betriebsspannung lässt sich der Leistungsumsatz verringern. Da sowohl der Drucksensor als auch das GSM-Modul auf 5 Volt basieren, wurde diese Möglichkeit allerdings nicht genutzt. Des Weiteren wurde beim Sleep-Modus darauf verzichtet, den tiefsten Modus zu aktivieren, da damit der Arbeitsspeicher des Mikrocontrollers geleert und damit ein zusätzliches Modul zur Datenablage benötigt würde, wie zum Beispiel ein Festwertspeicher (EPROM).



Der Drucksensor bietet eine Messgenauigkeit von  $\pm 0.25\%$  und eine Langzeitstabilität von  $\pm 0.50\%$  des Arbeitsbereiches (Honeywell, 2014). Bei einem Arbeitsbereich von  $8\text{ bar}$  entspricht die Messgenauigkeit damit  $\pm 0.02\text{ bar}$  und die Langzeitstabilität  $\pm 0.04\text{ bar}$ . Eine höhere Genauigkeit des Drucksensors bedingt einen höheren Stromverbrauch. Deshalb wurde dieser Sensor mit – für den Anwendungszweck – ausreichender Genauigkeit ausgewählt.

Neben der Messgenauigkeit des Sensors hat auch noch die Auflösung des eingesetzten Analog-Digital-Wandlers Einfluss auf das Messergebnis. Der ATmega328P hat einen 10-bit Wandler, dies entspricht einer Auflösung von  $2^{10} = 1024$  Schritten. Bei einem Arbeitsbereich von  $8\text{ bar}$  ergibt sich damit eine Auflösung von  $8\text{ bar}/1024 = 0.008\text{ bar}$ .

#### **3.4.1.3 Übertragungsmodul SIM800L**

Neben dem bereits erwähnten Atmega328P wird das GSM-Modul SIM800L verwendet. Das GSM-Modul bietet die Möglichkeit, über sogenannte AT-Befehle, alle üblichen Funktionen im Mobilfunknetz über eine serielle Schnittstelle zu nutzen. (SIMCom, 2013)

Das Modul benötigt im Ruhemodus ca.  $0.8\text{ mA}$ , aus diesem Grund ist es zielführend, das Modul nur einzuschalten, wenn es wirklich benötigt wird. Aufgrund des hohen Strombedarfs kann man das Modul nicht direkt über einen Digital-Pin schalten. Daher wird für die Schaltung des Moduls auf einen schaltbaren Spannungsregler zurückgegriffen, der im Sleep-Modus nur wenige  $\mu\text{A}$  benötigt.

Für die Übertragung der Daten zum Server wird das Hypertext Transfer Protocol (HTTP) eingesetzt. Dieses Protokoll ist sehr weit verbreitet und wird eingesetzt um Webseiten an den Webbrowser zu senden. Allerdings bietet es auch die Möglichkeit, Daten vom Client an einen Server zu übertragen, diese Funktion findet zum Beispiel bei Web-Formularen Anwendung.

#### **3.4.1.4 RTC-Modul**

Um die Messwerte zeitlich zuordnen zu können wird zusätzlich ein „real time clock“-Modul (RTC-Modul), vom Typ DS3231 verbaut (maxim integrated, 2015). Eine RTC beinhaltet eine hochgenaue Uhr, die über eine Knopfzellenbatterie gestützt läuft. Auch wenn Serverseitig bei Empfang der Daten ebenfalls ein Zeitstempel angefügt werden kann, so ist es dennoch sinnvoll, die Daten lokal bereits mit einem Zeitstempel zu versehen.

### 3.4.2 Programmierung

Das Messsystem wird über die Arduino IDE mit der Programmiersprache „C“ programmiert.

Die Arduino IDE (integrierte Entwicklungsumgebung) bietet eine einfache Möglichkeit Programme zu entwickeln, diese zu kompilieren und anschließend auf den Mikrocontroller zu laden (Arduino, 2018). Die Software beschränkt sich nicht nur auf – wie der Name vielleicht vermuten lässt – die Arduino-Boards, sondern kann auch über Module für andere Mikrocontroller wie zum Beispiel den ESP8266 verwendet werden.

Bei der Programmiersprache „C“ handelt es sich um eine der Basis Programmiersprachen. Die Kerne der meisten Betriebssysteme wurden mit „Assembler“ und „C“ geschrieben. Gegenüber „Assembler“ bietet „C“ den Vorteil, dass es einen standardisierten Befehlssatz (ab 1983 ANSI-, seit 1989 ISO-Standard) bietet (Wolf, 2009). Außerdem gibt es, durch den offenen Standard, für nahezu jede Plattform (vom Mikrocontroller bis zum High-End-Computer) einen passenden „C“-Compiler, wodurch ein entwickelter Quelltext meist mit kleinen Änderungen auf andere Plattformen übernommen werden kann. „C“ bietet außerdem den Vorteil, dass geschriebene Programme einen verhältnismäßig geringen Umfang haben und sich somit auch für die Programmierung kleinster Mikrocontroller eignet.

#### 3.4.2.1 Software

Die Programmierung eines Mikrocontrollers umfasst eine Setup-Routine, der bei Starten des Geräts ausgeführt wird und einen Schleifenblock (Hauptprogramm), der anschließend wiederholt ausgeführt wird. Im Setup werden die benötigten Laufzeitvariablen gesetzt, das Objekt zur Kommunikation über die serielle Schnittstelle mit dem GSM-Modul und die I<sup>2</sup>C Verbindung zum RTC-Modul vorbereitet.

Für die Kommunikation mit dem DS3231 RTC-Modul wurde auf einen Fork der Bibliothek „Adafruit RTClib“ von Fabio Cuomo zurückgegriffen, der von ihm auf Github veröffentlicht wurde (Cuomo, 2017; Adafruit Industries, 2017). Diese stellt einen vorgefertigten Befehlssatz zur Ansteuerung und Programmierung des DS3231 RTC-Moduls bereit. Durch die Verwendung der Bibliothek kann auf das Setzen von Byte-Codes zur Kommunikation mit dem Modul verzichtet werden, da dies intern in der Bibliothek in Funktionen verpackt wurde.

Anschließend beginnt das Hauptprogramm zu laufen, welches zuerst prüft ob der Datenspeicher leer ist. Ist dies der Fall, wird das RTC-Modul aktiviert, die Zeit ausgelesen und anschließend wieder abgeschaltet. Im nächsten Schritt wird

geprüft, ob der Zähler für das Messintervall kleiner als das Messintervall ist. Bei Zutreffen wird der Zähler für das Messintervall um eins erhöht, anderenfalls wird eine Messung ausgelöst und der Zähler zurückgesetzt. Bei der Messung wird in zwei Schritten vorgegangen, da der Drucksensor erst circa eine Sekunde nach der Versorgung mit Strom stabile Messergebnisse liefert. Zuerst wird der Sensor mit Strom versorgt, anschließend wird der Mikrochip 2 Sekunden schlafen gelegt um anschließend zu messen und den Sensor wieder abzuschalten.

Abschließend wird mit dem Zähler für das Sendeintervall gleich verfahren. Ist das Sendeintervall noch nicht erreicht, wird er um eine Stelle erhöht, anderenfalls werden die Daten gesendet und aus dem lokalen Speicher gelöscht. Am Ende des Hauptprogramms wird 8 Sekunden lang der Sleep-Modus aktiviert.

Bei der Aktivierung dieses Modus wird auf die Bibliothek „Lightweight low power library for Arduino“, welche auf Github unter dem Pseudonym „rocketscream“ veröffentlicht wurde, zurückgegriffen (rocketscream, 2018). Diese Bibliothek vereinfacht den Umgang mit der Senkung des Stromverbrauchs im Sleep-Modus des Mikrocontrollers. Hier werden alle notwendigen Abschaltbefehle in einfachen Funktionen zusammengefasst, außerdem kümmern sich die Funktionen auch darum, dass die notwendigen Elemente zur Beendigung des Sleep-Modus aktiviert und entsprechend programmiert werden.

Nach Beendigung des Sleep-Modus beginnt das Hauptprogramm von vorne. Das Programmschema wurde in Abbildung 3-5 zusätzlich in Form eines Flussdiagrammes zusammengefasst.

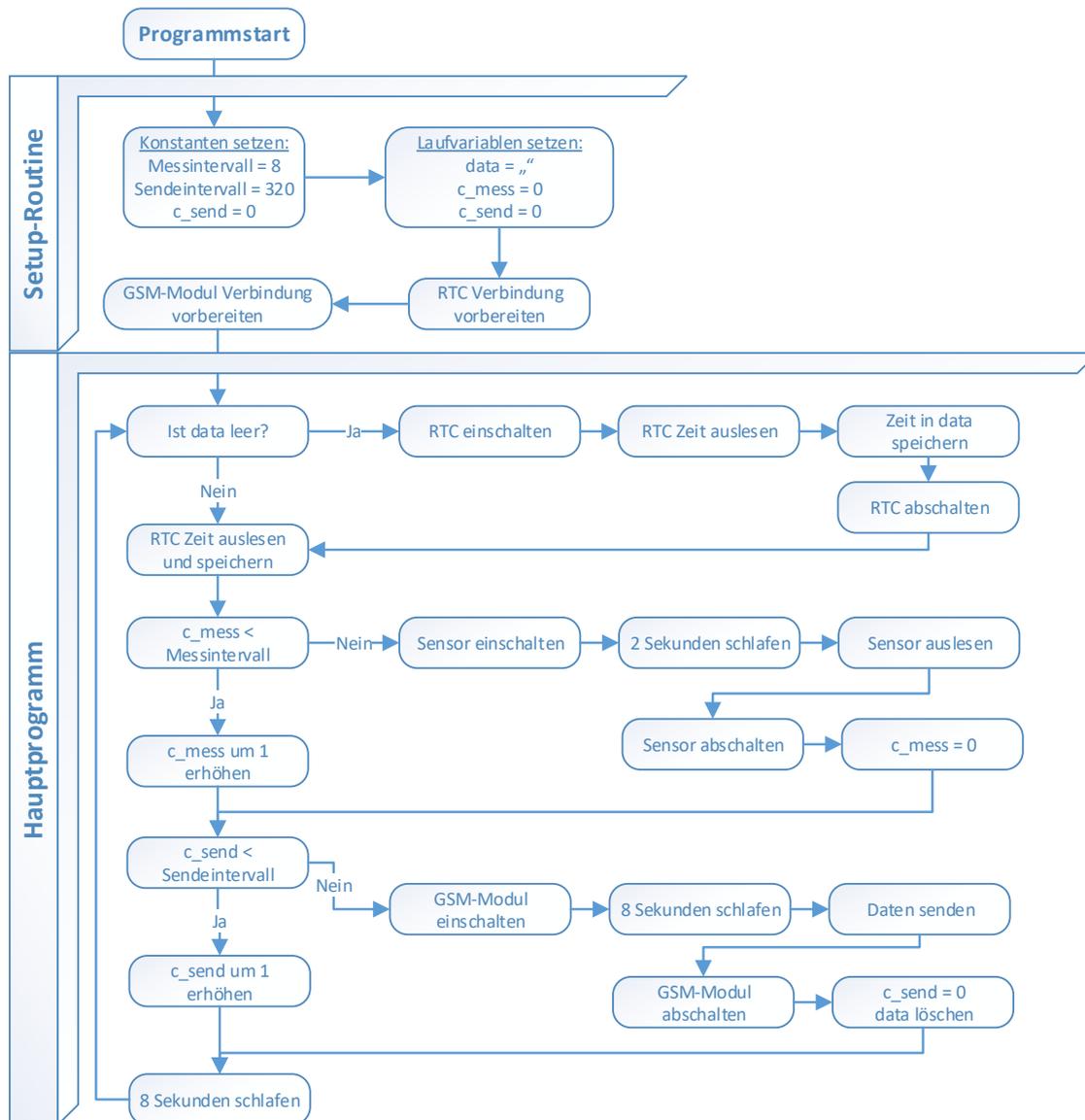


Abbildung 3-5: Schemaplan des Programmablaufes

Vom Programm werden 1098 der 2048 Bytes belegt, daher stehen für die Zwischenspeicherung der Messwerte maximal 950 Bytes zur Verfügung. Davon ausgehend, dass der Messwert einen dreistelligen Wert darstellt und zusätzlich ein Trennzeichen notwendig ist, belegt ein Messwert 4 Bytes. Bei 5-minütigen Messintervall und 2-mal täglichem Versand sind je Stunde 12 Messwerte abzulegen und daraus folgend 144 Messwerte bis der Speicher geleert werden kann. Der dafür benötigte Speicherbedarf liegt bei 144 Messwerten zu je 4 Bytes bei 576 Bytes, so dass noch genügend Speicher für den Zeitstempel zur Verfügung stehen. Die Erhöhung des Messintervalls ist nur möglich, sofern der Speicher des Mikrochips ausreichend ist, ansonsten sind die Daten gegebenenfalls häufiger zu übertragen oder es ist ein zusätzlicher Speicher vorzusehen.

### 3.4.3 Systemintegration

Aus den vorangegangenen Komponenten wurde ein Konzept für eine Messelektronik entwickelt, welche in folgender Abbildung 3-6 zusammengestellt ist. Neben den oben genannten Komponenten wurden noch effiziente Spannungsregler, welche Ruhestrome im Mikroampere-Bereich besitzen, vorgesehen. Als Akku wurde eine Reihenschaltung von 2 Lithium-Zellen (7.4 Volt) oder 6 Nickel-Metall-Hydrid-Zellen (7.2 Volt) vorgesehen, da die Spannungsregelung abwärts mit 90-95 % (Texas Instruments, 2016) Wirkungsgrad möglich ist. Eine geringere Versorgungsspannung, durch Verwendung weniger Zellen, ist nicht zielführend, da ein Spannungsregler der Spannungen hoch zieht nur etwa 80 % erreicht (Texas Instruments, 2013). Symbolisch wurden Spannungsregler vor und nach dem Akkuelement eingefügt. An diesen Stellen sind noch Über- und Tiefentladeschutz-Einheiten und bei der Verwendung von Lithium-Zellen, eine Ladesteuerung (mit Spannung- und Stromregelung), vorzusehen.

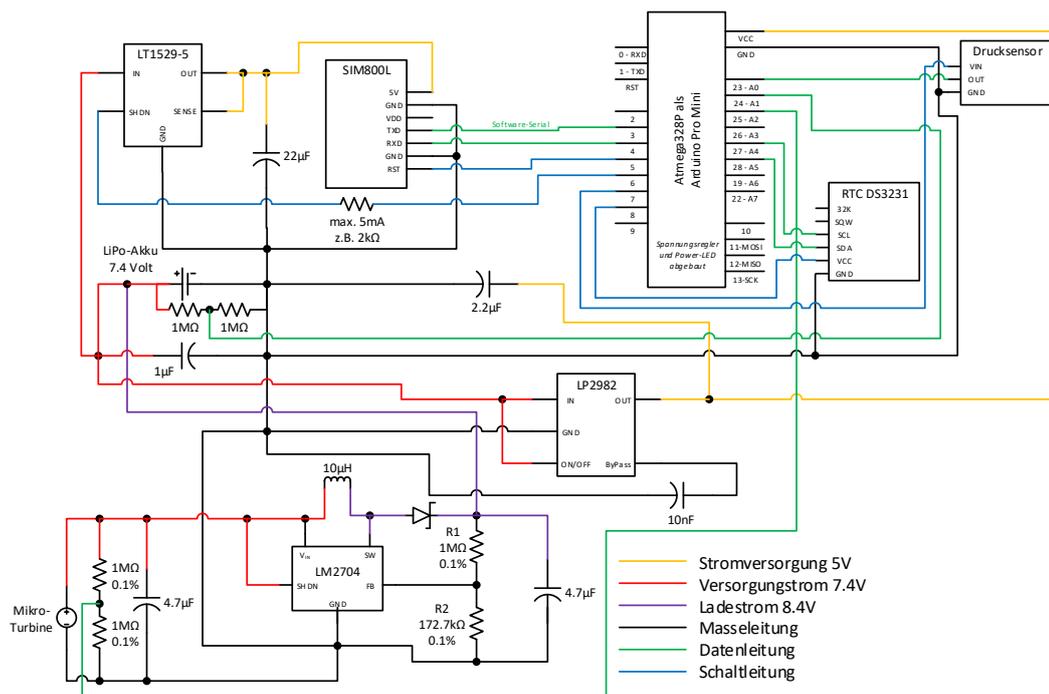


Abbildung 3-6: Schaltplan des entwickelten Messsystems

Neben den Datenleitungen zum Drucksensor (A0) wurden zusätzliche Messleitungen vorgesehen, die die Spannung der Mikroturbine (A1) und des Akkus (A2) überwachen.

Aufgrund der Komplexität der Spezifikation von Akkus und der Ladeelektronik wird auf den Einbau von Akkus im ersten Prototypen zugunsten der

Betriebssicherheit verzichtet (vergleiche Abbildung 3-7). Für die Umsetzung der Anwendung müssten mehrere Zellen in Reihe geschaltet werden um das Spannungsniveau von rund 7 Volt zu erreichen. Für Versuchszwecke wurde das Messsystem (siehe Abbildung 3-8) von der Akku- und Turbinen-Komponente abgetrennt. Im Versuchsaufbau mit dem Prototyp werden die Turbine und das Messsystem separat betrieben und anschließend die erzeugte elektrische Energie mit der benötigten Energie verglichen.

Die Stromversorgung des Messsystems übernahm beim Versuchsaufbau eine handelsübliche Powerbank. Zur Sicherung der Spannungstabilität, aufgrund der hohen Spitzenströme des GSM-Moduls, mussten die beiden Ausgänge der Powerbank parallel genutzt werden. An der Turbine wird für die Ermittlung der erzeugten Energie ein Lastwiderstand angeschlossen, bei dem der Spannungsabfall und der Stromfluss gemessen wird.

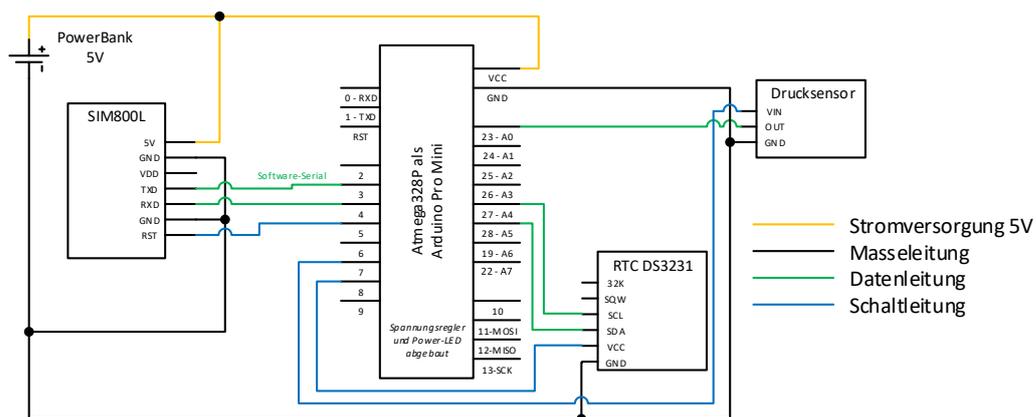


Abbildung 3-7: Schaltplan des gebauten Prototyps

Bei der Datenübertragung zum Server wurde der Weg über das Internet mithilfe des HTTP-Protokolls (HTTP) gewählt. Dies ist vor allem mit der einfachen Umsetzung einer serverseitigen Empfangseinheit und der unbegrenzten Datenmenge beim Versand zu begründen. Serverseitig wurde ein einfaches PHP Skript entwickelt, das die gesendeten Daten empfängt, das Format umwandelt und anschließend in die Datenbank einträgt.

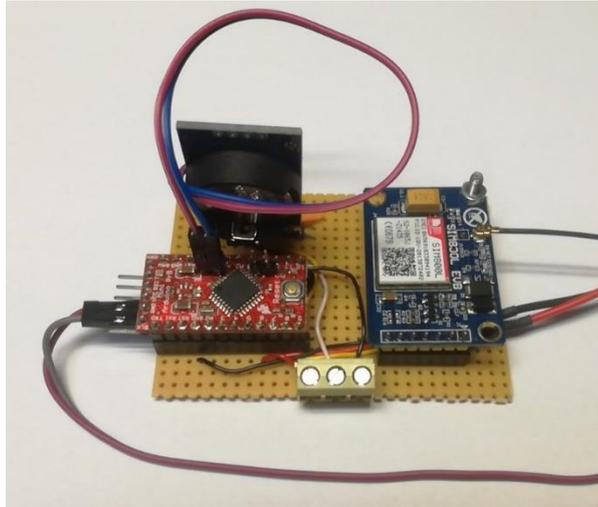


Abbildung 3-8: Foto des selbst konstruierten Messsystems

Abschließend wurden die recherchierten Kenndaten des Energiebedarfs für die einzelnen Betriebsmodi zusammengefasst. Nachfolgende Tabelle 3-6 zeigt die Zusammenstellung der Stromflüsse und des daraus errechneten Energieumsatzes des Prototyps. Die Daten wurden auf tägliche Bedarfsmengen in Wattsekunden und Wattstunden umgerechnet, so dass ein Vergleich mit den in den Grundlagen genannten Werten für Energiespeicher möglich ist.

Tabelle 3-6: theoretische Stromflüsse mit geschätzter Laufzeit und daraus abgeleiteter Energieumsatz des Messsystems

Betriebs- modus	Tägliche Laufzeit je Modus		Anteil täglich	Gemessene Werte			
	[s/d]			I	P	W	
				[mA]	[mW]	[Ws/d]	[mWh/d]
Sleep		85 704	99.19%	0.075	0.375	32.1	8.9
Messen	2 x 24 x 12	576	0.67%	20	100	57.6	16.0
Senden	60 x 2	120	0.14%	200	1000	120.0	33.3
GESAMT:						209.7	58.3

### 3.4.4 Messung des Energieverbrauches

Zur Messung und Aufzeichnung des Stromflusses wurde eine zusätzliche Strommesseinheit auf Basis eines ESP8266 entworfen und zusammengestellt, die eine Spannungsmessung mit einer Abtastrate von ca. 100 Hz pro Kanal ermöglicht und ausreichend Speicher für die Datenhaltung bereitstellt (Espressif, 2018). Die Messungen werden jeweils als Mittelwert über 10 Messungen gespeichert um die Datenmenge zu minimieren. Aus dem gemessenen Spannungsabfall an einem bekannten Widerstand wurde aus der gemessenen Spannung der Stromfluss nach dem Ohm'schen Gesetz (vergleiche 2.3.2.5) abgeleitet. Die hohen Ströme des GSM-Moduls werden aufgrund deren Höhe über einen Strommesssensor gemessen, da es bei der Messung über einen Widerstand zu großen Spannungsabfällen und damit zum Abschalten der Elektronik kommt.

Um besser aufgelöste Messergebnisse zu erhalten, wurde zusätzlich ein AD-Wandler (ADS 1115) mit 4 Ports und 16-Bit Auflösung eingesetzt (Texas Instruments, 2018). Durch die hohe Auflösung des A/D-Wandlers von 16 anstelle von 10 Bit lässt sich der Messbereich feiner aufgliedern (Teilung des Messbereichs bei 10-Bit:  $2^{10} = 1024$ , 16-Bit:  $2^{16} = 65536$ ).

### 3.5 Laborversuch

Für den Laborversuch wurde ein Modell eines Trinkwasserhausanschlusses konstruiert, über das Entnahmen aus dem Netz auf Basis der vorliegenden Messdaten realitätsnah simuliert werden können. Da es sich bei der Untersuchung der Einsetzbarkeit der Messelektronik vor allem um Untersuchungen des Energiehaushalts handelt, kann der Versuch nur in Echtzeit durchgeführt werden. Nur so können die Selbstentladeprozesse am Akku und seine Alterung real dargestellt werden.

Für den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Testlauf am Labormodell wurde anstelle des Akkus eine USB-Powerbank installiert. Wie bereits zuvor erwähnt, ist die richtige Spezifikation der Ladetechnik – vor allem bei Lithium-Akkus – nicht ganz trivial und daher wurde auf diese Komponente aus Sicherheitsgründen verzichtet. Das Modell wird so konzipiert, dass es selbstständig lauffähig ist, auf Störungen selbstständig reagieren und gegebenenfalls diese sogar korrigieren kann.

### 3.5.1 Entnahmeeinheit

Die Entnahmeeinheit besteht aus Abgängen, die jeweils ein Magnetventil und anschließend ein Schraubventil besitzen (siehe Abbildung 3-9). Die Abgänge sind parallel geschaltet, so dass auch mehrere Abgänge gleichzeitig betrieben werden können. Durch diese Charakteristik der Entnahmeeinheit können nur gewisse Auflösungen für den Tagesgang erreicht werden. Je nach Anzahl  $n$  der Abgänge, können maximal  $2^n$  verschiedene Schaltzustände erreicht werden. Entsprechend der Anzahl der Abgänge kann folglich die Auflösung des Laborversuches nach Gleichung 3-3 bestimmt werden.

$$Q_{\text{schrift}} = \frac{Q_{\text{max}}}{2^n - 1} \quad \text{Gleichung 3-3}$$

mit:

$x$  ... aufgezeichnete Messimpulse,  $Q$  ... Durchfluss (l/s)

Für die Erreichung der maximalen Anzahl unterschiedlicher Schaltzustände ist es notwendig, dass der Durchfluss jedes Abgangs  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$  entsprechend auf  $Q_i = 2^{i-1} \cdot Q_{\text{schrift}}$  festgelegt wird.



Abbildung 3-9: Entnahmeeinheit mit Wasserhähnen und Magnetventilen

Auf Basis dieses theoretischen Ansatzes wurden 5 Abgänge als ausreichend definiert. Damit stehen  $2^5 = 32$  verschiedene Schaltzustände zur Verfügung. Bei einem maximalen Durchfluss von  $Q_{\text{max}} = 0.2 \text{ l/s}$  liegt die mögliche Auflösung damit bei  $Q_{\text{schrift}} = 0.2/32-1 = 0.006 \text{ l/s}$  was für den Laborversuch mehr als ausreichend ist.

### 3.5.1.1 Durchflussmessung

Zur Überwachung des Entnahmeorgans wurde in der Messstrecke ein Durchflussmesser vorgesehen. Mit den Messdaten dieses Durchflussmessers kann das Modell bestimmen, ob der aktuelle Schaltzustand die gewünschte Entnahmemenge erzeugt und gegebenenfalls nachsteuern, falls es hier zu große Abweichungen gibt. Als Durchflussmesser wird ein Kobold MIK-5NA-25A-L343 verwendet, der einen Messbereich für Durchflüsse von 0 - 16 L/min beziehungsweise 0 - 0.27 L/s besitzt (Kobold, 2016).

### 3.5.2 Steuerungseinheit

Die Steuerungseinheit (siehe Abbildung 3-10) stellt das Herzstück des Labormodells dar. Über diese Einheit wird die Entnahmeeinheit angesteuert und die verbauten Sensoren zur Modellüberwachung ausgelesen. Außerdem übernimmt sie die Überwachung des Modells und führt gegebenenfalls notwendige Aktionen aus.

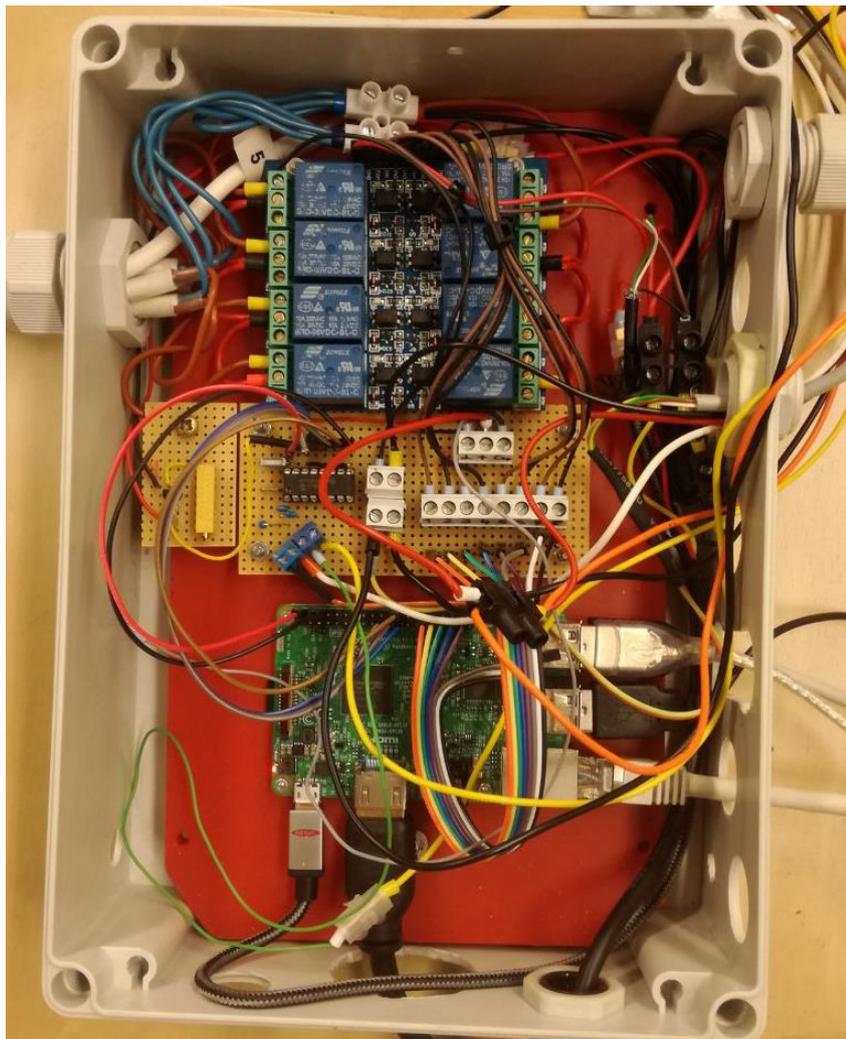


Abbildung 3-10: Foto der Steuerungseinheit

### **3.5.2.1 Raspberry Pi**

Als Rechenkern für die Steuerungseinheit wurde ein Raspberry Pi verwendet. Dieser Einplatinencomputer bietet die Möglichkeit über die GPIO-Ausgänge direkt Schaltvorgänge am Modell durchzuführen, besitzt aber zudem die Möglichkeit, ein vollwertiges Betriebssystem zu betreiben (Raspberry Pi Foundation, 2018). Durch seine hohe Verbreitung sind im Internet eine Vielzahl von vorgefertigten Bibliotheken und Tools für den Raspberry Pi verfügbar. So ist er leicht in ein Netzwerk zu integrieren und damit ist die Echtzeitverbindung zu einem Datenbankserver ohne weiteres möglich.

### **3.5.2.2 Relaiskarte**

Für die Schaltung der eingesetzten Magnetventile bei der Entnahmeeinheit ist es notwendig eine Relaiskarte zu nutzen. Mit einem Relais können hohe Ströme mit geringen Steuerströmen geschaltet werden. Bei der eingesetzten Relaiskarte sind zusätzlich Optokoppler verbaut, damit entsteht ein weiterer getrennter Schaltkreis zwischen Ansteuerung und Relaisschaltung. Dadurch kann eine Beeinflussung des Steuerstroms durch den Schaltstrom ausgeschlossen werden. (Pollin Electronic GmbH, 2014)

### **3.5.2.3 Drucküberwachung**

Für die Drucküberwachung im Modell werden die gleichen Drucksensoren verwendet, wie sie im Messsystem verbaut wurden (siehe 3.4.1.2). Die Druckmessung übernimmt die Überwachung des Modells, bietet Vergleichswerte und zeichnet die Druckverluste der Turbine auf.

### **3.5.3 Programmierung**

Die softwareseitige Umsetzung der Steuerung basiert auf Python 3. Da die Software sowohl für die direkte Steuerung des Modells als auch für den 24 Stunden Betrieb genutzt werden kann, wurde diese in mehrere Elemente aufgegliedert. Es wurde ein Systemdienst entwickelt, der die Steuerung und Überwachung des Modells im Hintergrund übernimmt. Grundlage für die Steuerung bietet eine Konfigurationsdatei die vom Systemdienst geladen wird. Zur komfortableren Nutzung der Steuerung wurde zusätzlich eine graphische Oberfläche auf Basis der Python Bibliothek PyQt programmiert, die die Konfigurationsdatei bearbeitet und einen Steuerbefehl zum Laden der geänderten Datei schickt.

Das Modul PyQt bietet die Möglichkeit das GUI-Toolkit Qt in Python einzubinden. Qt bietet dabei die Möglichkeit einer plattformübergreifenden Entwicklung von graphischen Benutzeroberflächen, da es für eine große Anzahl der gängigen Betriebssysteme verfügbar ist. Über das Modul PyQt werden im Qt-Designer entwickelte Oberflächen auch in Python verfügbar gemacht und bieten so eine komfortable Möglichkeit zur schnellen Erstellung einer graphischen Benutzeroberfläche.

#### **3.5.3.1 Systemdienst zur Steuerung und Überwachung**

Der Überwachungsthread des Systemdienstes liest regelmäßig den Durchfluss und die beiden angeschlossenen Drucksensoren zur Überwachung des Druckabfalls aus. Die Daten werden intern gespeichert, um als Basis für die Ansteuerung der Entnahmeeinheit zu dienen. Zusätzlich werden die Daten an den Datenbankserver übertragen.

Der Steuerungsthread des Systemdienstes umfasst drei verschiedene Betriebsmodi. Im „direkt Modus“ können die Magnetventile einzeln angesprochen und geschaltet werden. Dieser Modus dient vor allem der Wartung und Einstellung des Modells. Im „manuellen Modus“ können Durchflüsse angegeben werden, welche das Modell anschließend über die Entnahmeeinheit einstellt. Im „automatischen Modus“ erfolgt eine Steuerung des Modells entsprechend eines ausgewählten Programms. Hier stehen wiederum drei Möglichkeiten zur Verfügung: Kalibrierung, Zufall und Datenbank. Basis für die Steuerung der Entnahmeeinheit bildet die automatische Kalibrierung, hier werden alle möglichen Schaltzustände einmalig geschaltet und die gemessenen Durchflüsse aufgezeichnet. Die generierten Daten stellen einen Zusammenhang zwischen Durchflussmenge und Schaltung der Entnahmeeinheit dar, über den die Steuerungseinheit nachfolgend die notwendigen Schaltungen aus den

vorgegebenen Durchflüssen und dem aktuellen Versorgungsdruck ableitet. Im Zufallsmodus werden zufällige Schaltungen über zufällige Dauern geschaltet, dies dient der Prüfung des Modells ohne definierte Zeitreihe. Im Datenbankprogramm wird eine vorhandene Zeitreihe am Modell wiedergegeben. Über dieses Programm lassen sich beliebige vorhandene Messreihen für das Messsystem simulieren.

Als zusätzliche Sicherheit für den 24 Stunden Betrieb des Modells wurde zusätzlich eine Kommunikationskomponente über den Nachrichtendienst „Telegram“ realisiert. Über diesen werden Statusnachrichten und Fehlermeldungen direkt an ein Handy oder einen PC übermittelt, somit ist eine Überwachung des Systems auch von außerhalb des Labors möglich.

### 3.5.3.2 Graphische Bedienoberfläche (GUI)

Zur direkten Steuerung der Software am Raspberry Pi wurde eine GUI entwickelt (siehe Abbildung 3-11), die Anpassungen an der Konfigurationsdatei durchführt und über das Unix Signal den Systemdienst zum Laden der geänderten Konfigurationsdatei anspricht. Damit kann eine direkte Steuerung des Modells auch ohne Konsoleneingriff erfolgen.

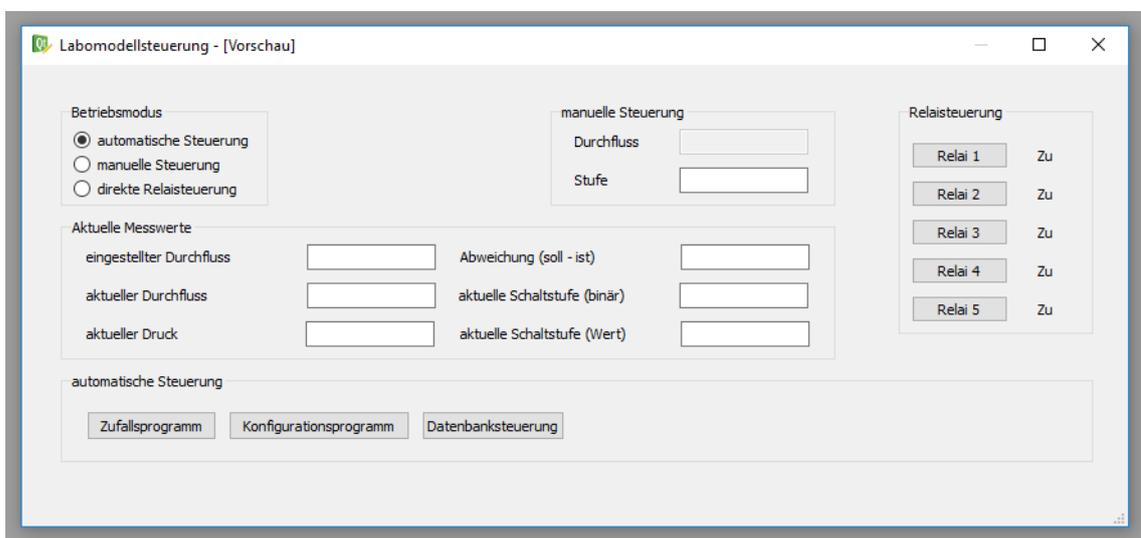


Abbildung 3-11: Screenshot der graphischen Oberfläche

Die graphische Oberfläche kann auch zur Erstellung einer Konfigurationsdatei auf einem anderen Gerät genutzt werden, von dem diese später auf die Steuerungseinheit überspielt wird. Der Befehl, der den Dienst zum Laden der Konfiguration auffordert, muss bei diesem Weg allerdings manuell ausgeführt werden.

### 3.5.4 Systemintegration

Aus den Komponenten der Entnahme- und Steuerungseinheit wurde zusammen mit der Programmierung das Labormodell konstruiert. Zu den bereits definierten Elementen kommen noch einige notwendige Schnittstellen, die Turbine und die Integration des Messsystems.

Zur interaktiven Visualisierung und Auswertung von Daten aus Datenbanken am PC und in Echtzeit steht das Tool Grafana zur Verfügung (Grafana Labs, 2018). Dieses eignet sich besonders für die schnelle und einfache Visualisierung der Daten am Bildschirm. Da es als Webserver konzipiert ist, stehen die Daten auch unabhängig von der Plattform und – sofern eine Verbindung zum Server besteht – auch außerhalb des Labors zur Verfügung.

#### 3.5.4.1 Modellaufbau

Das Labormodell wird direkt an einem Wasserhahn im Labor angeschlossen. Aus Sicherheitsgründen und zum Schutz des Labors wurde in der Zuleitung ein Wassermengenwächter installiert, der im Falle eines Schadens am Modell die Zuleitung sperrt. Danach wurde der Durchflussmesser und zwei Drucksensoren angeordnet. Ein Drucksensor dient der Steuereinheit zur Messung, der zweite Sensor wird an das Messsystem angebunden. Anschließend folgen die Mikroturbine und danach ein weiterer Drucksensor für die Überwachung des Druckabfalls nach der Turbine über die Steuerungseinheit. Die Messstrecke des Labormodells ist in Abbildung 3-12 dargestellt. Zuletzt folgt in der Installation noch die Entnahmeeinheit.



Abbildung 3-12: Foto der Messstrecke und Turbine des Labormodells

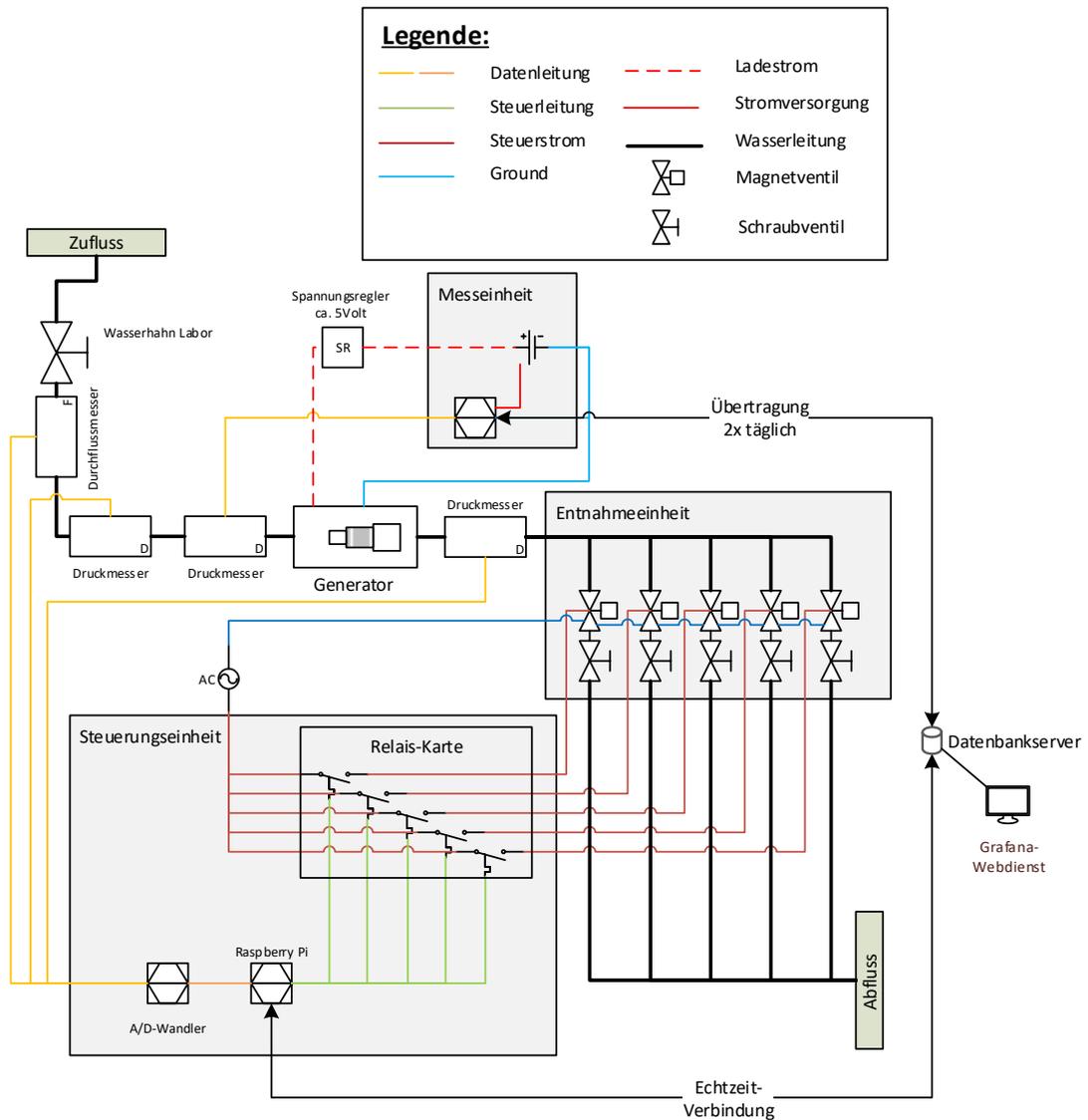


Abbildung 3-13: Schemaskizze des Labormodells und der angeschlossenen Hardware



## 4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen im Rahmen der zuvor definierten Methodik zusammengestellt, die Grenzen der eingesetzten Komponenten und Ansätze aufgezeigt und das Potential des entworfenen Messsystems analysiert.

### 4.1 Analyse des Wasserverbrauches

Eine wichtige Kenngröße im Trinkwasserbereich ist der Wasserverbrauch. Er liegt in Österreich laut Hochrechnung im Jahr 2011 bei 135 Liter pro Einwohner und Tag (Neunteufel u. a., 2012). Diese Hochrechnung wurde zwar unter anderem aus den für diese Arbeit vorliegenden Daten abgeleitet, dennoch kann man nicht davon ausgehen, dass die übergebenen Datensätze repräsentativ für Österreich sind.

#### 4.1.1 Durchschnittlicher täglicher Wasserverbrauch pro Einwohner

Die Ermittlung des durchschnittlichen täglichen Wasserverbrauchs pro Einwohner (DTVEW) wurde anhand der vorliegenden Mess- und Metadaten abgeleitet. Zudem wurden Besonderheiten und Auffälligkeiten bei den Daten vermerkt. Die Analyse wurde je Haushalt durchgeführt, da sich gezeigt hat, dass die kleineren kontinuierlichen Messgruppen sich auf unterschiedliche Saisonen (Sommer, Winter, Herbst) verteilen und damit ein Mittelwert daraus, dem täglichen Verbrauch im Jahresschnitt am nächsten kommt (vergleiche Tabelle 4-1).

In den Daten finden sich bei zwei Haushalten vermutliche Poolfüllungen, da hier innerhalb von wenigen Tagen einmal 10 000 Liter und einmal 25 000 Liter entnommen wurden. Vor allem bei kurzen Messreihen, wie bei Haushalt 12, sieht man den deutlichen Einfluss (Verdoppelung des durchschnittlichen täglichen Verbrauchs je Einwohner) dieses Ereignisses.

Die Daten zeigen eine starke Spreizung des durchschnittlichen täglichen Verbrauchs je Einwohner von 16 – 237  $\text{L}/\text{d}^*\text{EW}$  auf. Der geringe Verbrauch von Haushalt 24 mit lediglich 16  $\text{L}/\text{d}^*\text{EW}$  ist auf die Eigenwasserversorgung über einen Brunnen und die Nutzung des Wassers für fast alle Anlagen zurückzuführen.

Tabelle 4-1: Auswertungen des Wasserverbrauches je Haushalt

HH	Verbrauch L	Tage d	DTV L/d	EW	DTVEW L/d <sub>EW</sub>	Anmerkungen
1	66 087	386	171	2	86	
2	34 090	150	227	5	45	
3	95 927	226	424	3	141	Poolfüllung ca. 10 000 L abzüglich Poolfüllung DTVEW: 127 L/d <sub>EW</sub>
4	19 163	255	75	1	75	
5	11 746	30	392	3	131	
6	5 609	29	193	3	64	
7	6 274	29	216	3	72	
8	6 773	29	234	4	58	
9	3 448	30	115	1	115	
10	5 352	30	178	2	89	
11	6 838	30	228	3	76	
12	43 489	39	1115	2	558	Poolfüllung ca. 25 000 L abzüglich Poolfüllung DTVEW: 237 L/d <sub>EW</sub>
13	3 301	31	106	2	53	
14	2 598	31	84	4	21	
15	4 329	50	87	4	22	
16	3 950	15	263	4	66	
17	4 799	84	57	1	57	
18	7 467	84	89	1	89	
19	14 636	84	174	3	58	
20	5 569	51	67	2	34	
21	50 643	63	804	3	268	sehr hohe Abendspitze
22	9 487	67	142	4	35	
23	2 521	30	84	3	28	
24	2 352	30	78	5	16	

DTV = Durchschnittlich täglicher Verbrauch; DTVEW = Durchschnittlich täglicher Verbrauch je Einwohner

Als repräsentativ für Österreich und für die Nutzung in Langzeituntersuchungen, im Kontext dieser Arbeit geeignet, zeigen sich aufgrund des Verbrauchs und des Umfangs der Messdaten lediglich die Haushalte 1, 3 und 4. Bei Haushalt 5 – 24 kann, aufgrund des geringen Datenumfanges von weniger als 100 Tage, nicht ausgeschlossen werden, dass ein atypisches Verhalten zugrunde gelegt wird.

## 4.2 Analyse der Durchflüsse

Anstelle der sonst üblicherweise dargestellten Messgröße des Volumens werden nachfolgend die Durchflüsse der Messdaten über gewisse Zeiträume analysiert. Um einen Bezug herzustellen, werden zusätzlich die üblichen volumenbasierten Auswertungen gegenübergestellt.

Zur Vereinheitlichung der dargestellten Daten und um Zusammenhänge ableiten zu können, werden für die nachfolgende Analyse, sofern nicht anders angegeben, die Daten des Haushaltes 3 (Messdatengruppe 3-1) herangezogen.

### 4.2.1 Tagesganglinien

Vergleicht man die sonst üblichen Tagesganglinien mit den Ganglinien basierend auf dem Durchfluss, so kann man feststellen, dass sich das entnommene Volumen über den Tagesgang ändert, der aufgetretene mittlere Durchfluss allerdings relativ gleichbleibend über den gesamten Tag auftritt. In Abbildung 4-1 ist dieser Zusammenhang an einem Tag mit durchschnittlichem Verbrauch exemplarisch dargestellt.

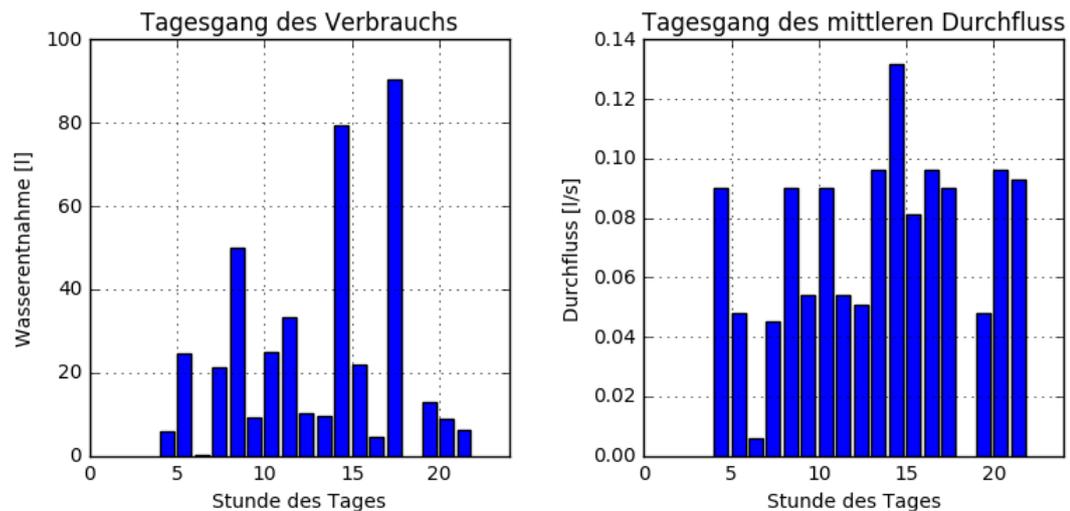


Abbildung 4-1: Tagesganglinie des Wasserverbrauchs (links) und des mittleren Durchflusses (rechts) am Donnerstag 14. April 2011

Auch bei der Überlagerung aller Tagesgänge im Beobachtungszeitraum zeichnet sich deutlich ab, dass der Durchfluss relativ unabhängig von der Tageszeit ist (siehe Abbildung 4-2). Der Durchfluss für Haushalt 3 liegt entsprechend dieser Auswertungen im Durchschnitt etwa bei  $0.08 \text{ L/s}$ .

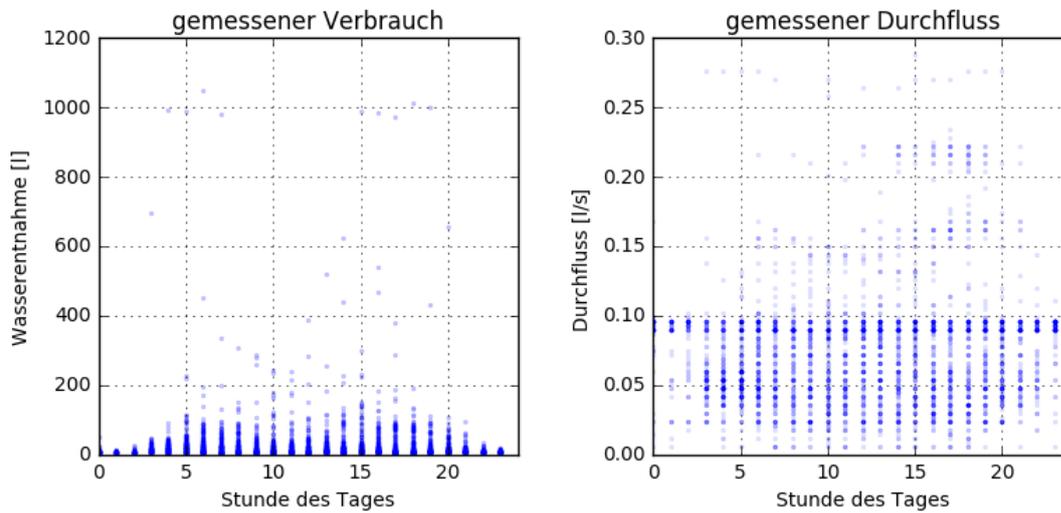


Abbildung 4-2: Darstellung aller Verbräuche (links) und Durchflüsse (rechts) im Messzeitraum über den Tagesgang

#### 4.2.2 Häufigkeitsverteilung der Durchflüsse

Für die Auslegung einer Turbine ist eine sehr wichtige Kennzahl der Arbeitsbereich. Hierfür ist es notwendig, Häufigkeitsverteilungen der Durchflüsse zu kennen.

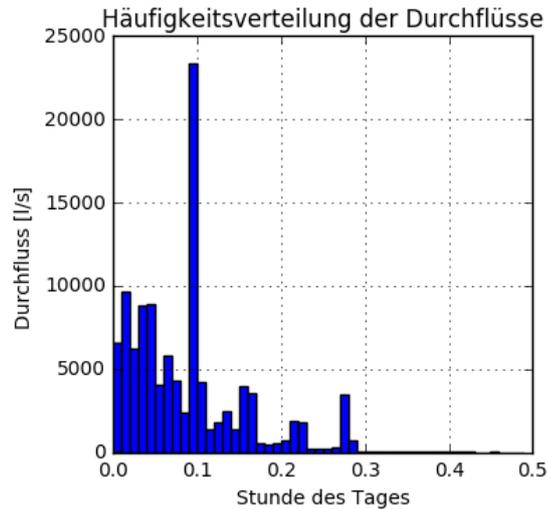


Abbildung 4-3: Häufigkeitsverteilung der Durchflüsse für Haushalt 3

Da sich die vorhergehende Betrachtung in Abbildung 4-3 nur auf einen Haushalt bezogen hat, könnte der am häufigsten auftretende Durchfluss auch für den Haushalt aufgrund der Sanitärinstallation charakteristisch sein. Aus diesem Grund wurden die Betrachtungen auf alle Haushalte erweitert.

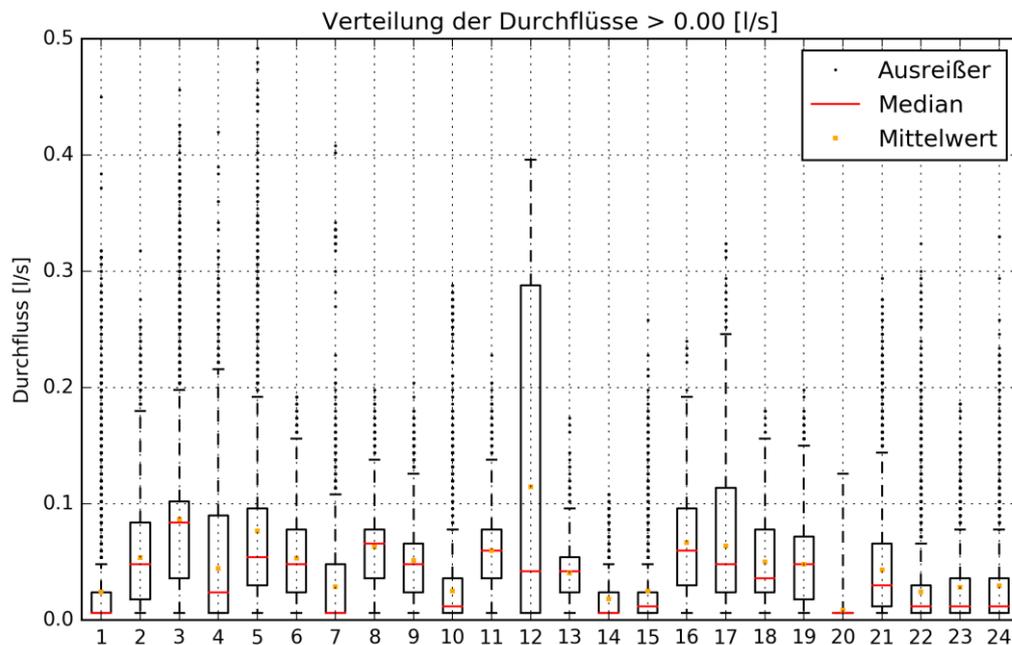


Abbildung 4-4: Häufigkeitsverteilung der Durchflüsse für alle Haushalte

Aus Abbildung 4-4 geht hervor, dass teilweise sehr geringe Durchflüsse äußerst dominant sind (zum Beispiel bei Haushalt 1, 7, 10, 14, 15, ...). Da ein gewisser Mindestdurchfluss erreicht werden muss um sinnvoll Strom zu erzeugen zu können, wurden nachfolgend sehr kleine Durchflüsse unter  $0.05 \text{ l/s}$  ( $= 3 \text{ l/min}$ ), in Abbildung 4-6, aus der Auswertung ausgeschlossen.

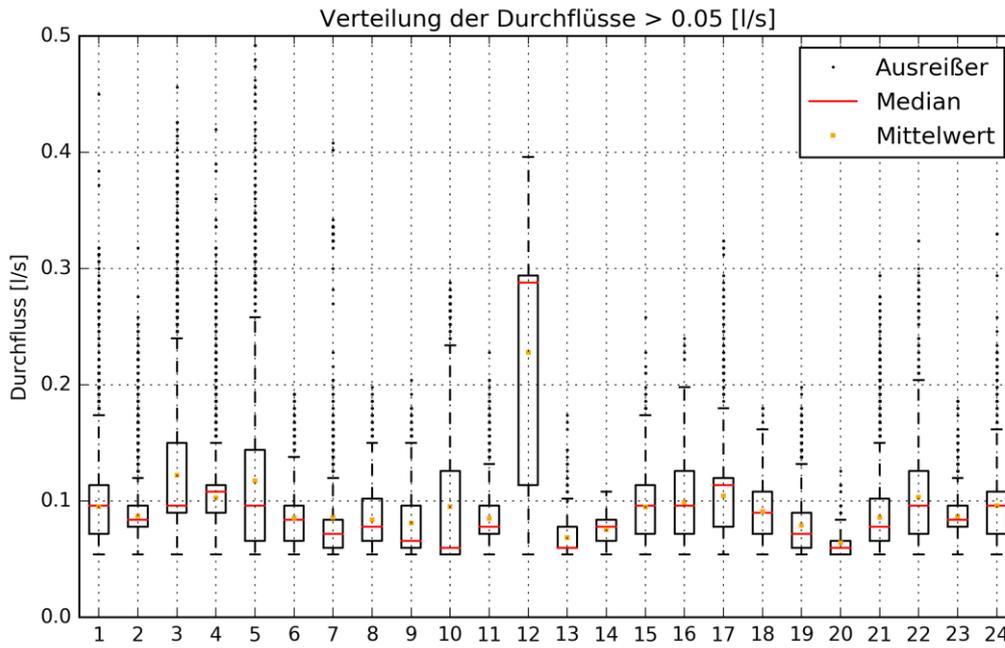


Abbildung 4-5: Häufigkeitsverteilung der Durchflüsse über  $0.05 \text{ l/s}$  für alle Haushalte

Aus dieser bereinigten Auswertung geht hervor, dass der mittlere Durchfluss über alle Haushalte im Bereich von  $0.08 - 0.11 \text{ l/s}$  liegt. Einzig Haushalt 12 weist einen deutlich höheren Wert vor. Das liegt an einer augenscheinlichen Poolfüllung über ca. 24 Stunden, bei der 25 000 Liter Wasser mit im Schnitt  $0.3 \text{ l/s}$  abgegeben wurden. Bei Haushalt 3 zeichnet sich die Poolfüllung nicht derart ab, da dort die Messreihe über sehr viele Tage mittelt.

Fasst man nun alle Haushalte zusammen erhält man das in Abbildung 4-6 dargestellte Ergebnis, das sich dann entsprechend für die Auswahl einer Turbine eignet.

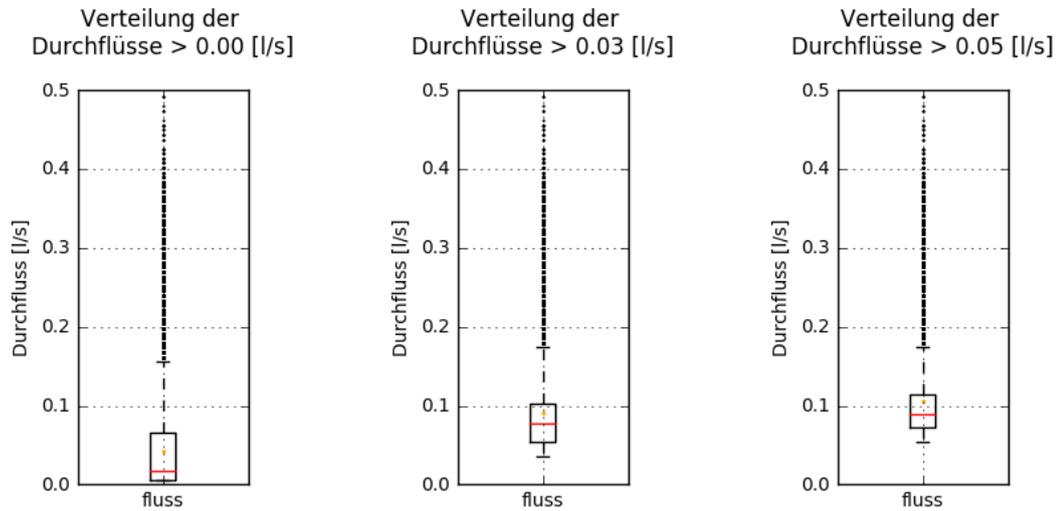


Abbildung 4-6: Verteilung des Durchflusses über alle Haushalte

### 4.2.3 Dauer der einzelnen Wasserentnahmen

Für die Verwendung der Daten im Rahmen dieser Arbeit ist ein weiterer wichtiger Eckpunkt die Dauer der Wasserentnahmen. Hieraus ergibt sich die Eignung der Daten für die nachfolgenden Untersuchungen.

Im vorhergehenden Abschnitt wurden Durchflüsse untersucht die aus dem Messintervall von 10 Sekunden abgeleitet wurden. Da nicht davon auszugehen ist, dass das Messintervall immer mit dem Entnahmeintervall übereinstimmt, ist die Umrechnung der 10-Sekunden-Werte in Durchflüsse potentiell mit einem Fehler behaftet, der die Durchflüsse geringer als tatsächlich erscheinen lässt.

In Abbildung 4-7 und Tabelle 4-2 wird das Problem zusammen mit nachfolgender Beschreibung kurz erläutert: *Bei Entnahmekurve 1 wird anstelle des tatsächlichen Durchflusses von 0.1 L/s ein gemittelter Durchfluss von 0.02 L/s angenommen. Bei Entnahmekurve 2 sieht man, dass lediglich im mittleren Bereich 10-20 Sekunden der wirkliche Wert bestimmt werden kann.*

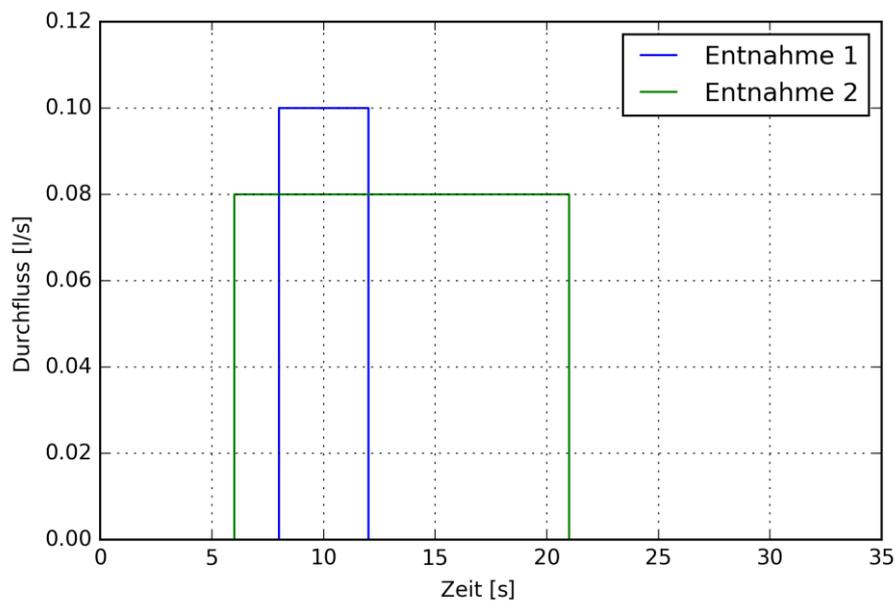


Abbildung 4-7: Verzerrung Messdaten durch Messintervall

Tabelle 4-2: Messdaten und berechneter Durchfluss

Entnahme	Messintervall			Durchfluss (berechnet)			Durchfluss (tatsächlich)
	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	
	L	L	L	L/s	L/s	L/s	L/s
1	0.20	0.20	0.00	0.02	0.02	0.00	0.10
2	0.32	0.80	0.08	0.032	0.08	0.008	0.08

Zur Klärung dieser Problematik wurde eine Lückenanalyse über die gesamten Messdaten durchgeführt. Als Ergebnis dieser Analyse konnte eine Verteilung der Wasserentnahmen entsprechend ihrer Laufzeit erzeugt werden. Aus Abbildung 4-8 geht hervor, dass 77 % der Daten Laufzeiten von kleiner 30 Sekunden haben und damit potenziell die Gefahr bieten, dass hier der Durchfluss unterschätzt wird.

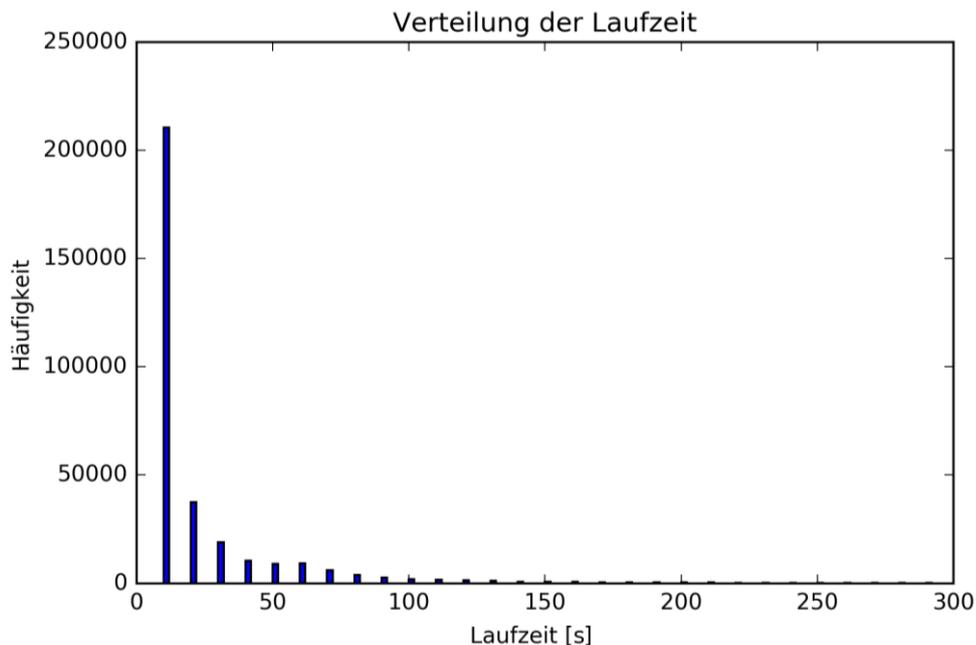


Abbildung 4-8: Verteilung der gemessenen Laufzeiten

In einem weiteren Schritt wurden schließlich nur die Datenpunkte herangezogen, die zeitlich gesehen zwei benachbarte Messpunkte besitzen. Bei diesen Messpunkten kann davon ausgegangen werden, dass diese einen realen Durchfluss wiedergeben. Die Verteilung dieser Durchflüsse in Abbildung 4-9 zeigt ebenfalls eine sehr hohe Datendichte bei sehr kleinen Durchflüssen kleiner  $0.03 \text{ L/s}$  und eine weitere Spitze bei ca.  $0.1 \text{ L/s}$ . Damit lässt sich zeigen, dass sich aufgrund des groben Messintervalls höchstwahrscheinlich keine Verzerrung der Daten ergibt.

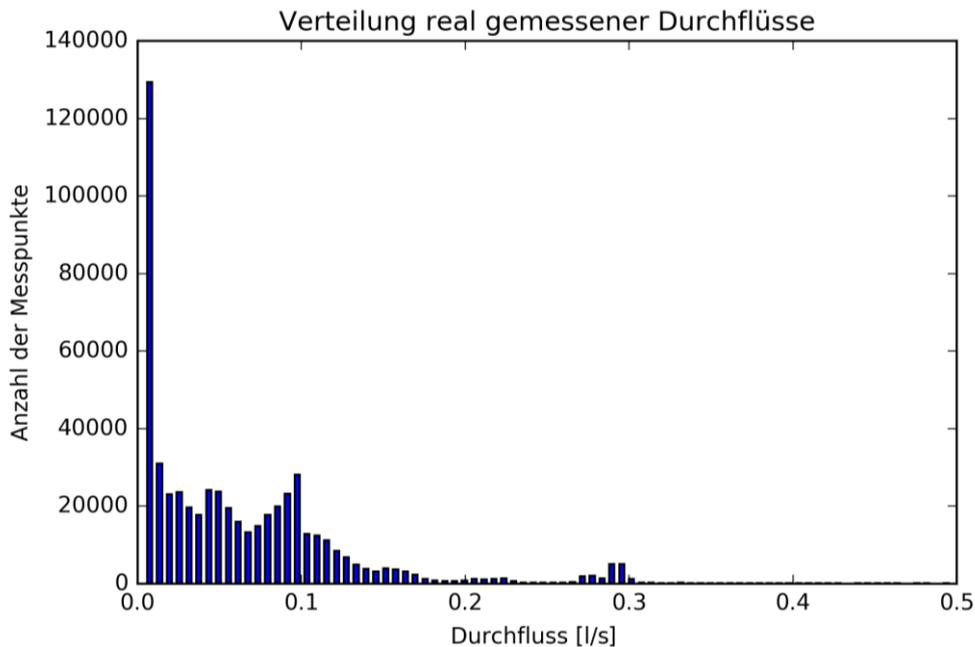


Abbildung 4-9: Verteilung der gemessenen Laufzeiten

#### 4.2.4 Anteil Wasserentnahme pro Tag

Ein weiterer interessanter Kennwert für den Betrieb einer Stromerzeugung am Trinkwasserhausanschluss ist die tägliche Laufzeit der Turbine. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird von einem Anlaufpunkt der Turbine von  $0.05 \text{ l/s}$  ausgegangen, daher werden kleinere Durchflüsse nicht beachtet. Auch wenn diese vielleicht nur aufgrund des Messintervalls als kleiner  $0.05 \text{ l/s}$  aufgezeichnet wurden (vergleiche 4.2.3).

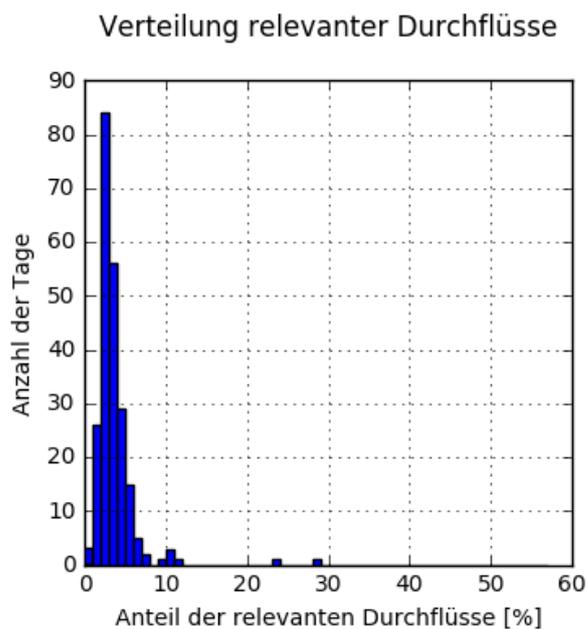


Abbildung 4-10: Verteilung relevanter Durchflüsse (Haushalt 3)

Ergebnis dieser Auswertung ist, bezogen auf Haushalt 3, dass im Mittel mit 50 Minuten (rund 4 % des Tages) täglicher Betriebszeit der Turbine gerechnet werden kann (siehe Abbildung 4-10). Die durchschnittliche Laufzeit der Turbine schwankt auch im Laufe der Woche nicht wesentlich (siehe Abbildung 4-11).

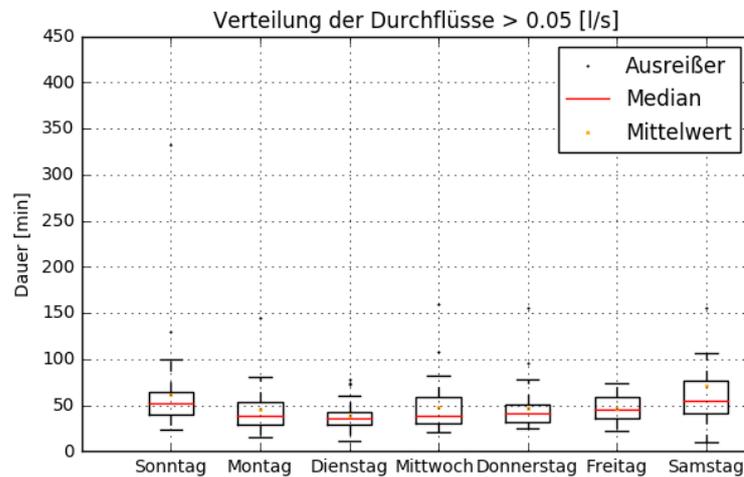


Abbildung 4-11: Verteilung relevanter Durchflüsse je Wochentag (Haushalt 3)

### 4.3 Mikroturbine und Energiespeicher

Für die Auswahl eines geeigneten Generators wurden die Auswertungen der Studie Wasserverbrauch aus Abschnitt 0 herangezogen. Als wichtigste Kenngröße wurde der durchschnittliche Durchfluss verwendet. Da derartige Turbinen gewisse Mindest-Durchflüsse benötigen bevor sie mit der Stromerzeugung beginnen, wurde die Auswertung aus 0 verwendet, bei denen Durchflüsse unter  $0.05 \text{ l/s}$  ausgeschlossen wurden.

### 4.3.1 Anforderungen

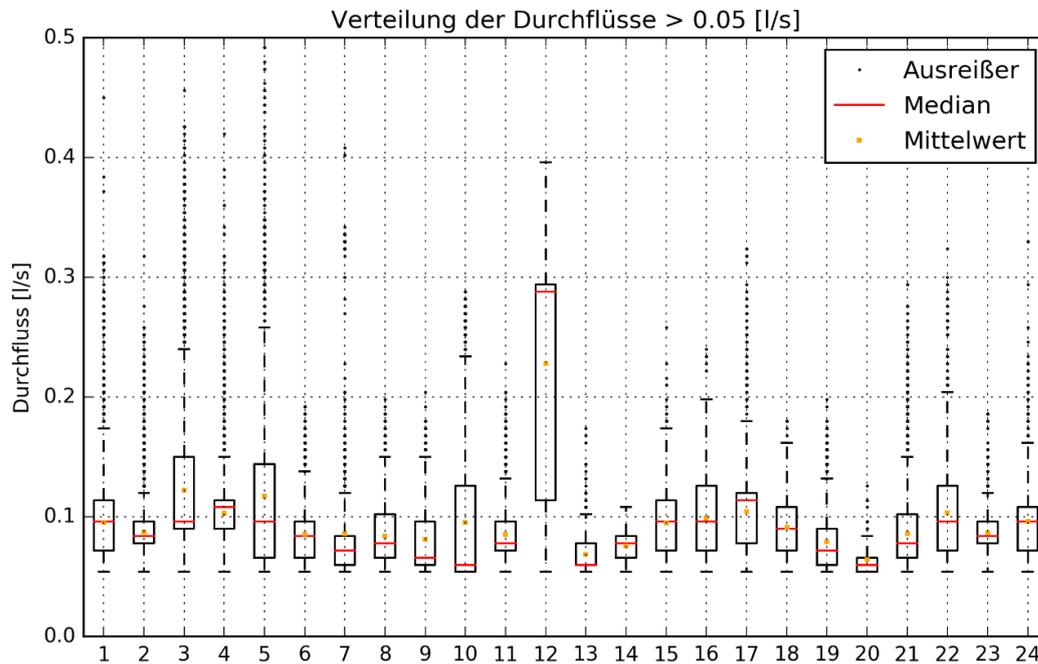


Abbildung 4-12: Verteilung der Durchflüsse größer als 0.05 L/s je Haushalt

Auf Basis der Auswertung (siehe Abbildung 4-12) wurde der mittlere Durchfluss im Bereich 0.08 - 0.10 l/s mit einem zulässigen Druckverlust in der Turbine mit rund 0.5 bar festgelegt. Aus einer vorangegangenen Arbeit wurde zusätzlich die notwendige Leistung mit rund 500 mW übernommen (Pertl, 2017). Aus den vorgegebenen Spezifikationen leitet sich ein Wirkungsgrad von 10 % ab.

$$\eta = \frac{P}{100 * \Delta p * Q} = \frac{0.5 \text{ W}}{100 * 0.5 \text{ bar} * 0.1 \frac{\text{l}}{\text{s}}} = 0.10 = 10 \% \quad \text{Gleichung 4-1}$$

mit:

$P$  ... Leistung [W],  $\Delta p$  ... Druckabfall [bar],  $Q$  ... Durchfluss [l/s]

Ein weiteres Augenmerk bei der Generatorauswahl ist, dass der Druckverlust nach oben hin auf Basis der Einbauart begrenzt wird. Hier bietet sich ein Einbau in einem Bypass an, so dass der exponentielle Effekt des Druckabfalls begrenzt wird. (Rödel u. a., 2016)

### 4.3.2 Spezifikation der gewählten Turbine

Entsprechend der angegebenen Spezifikationen wurde eine Turbine vom Hersteller KINETRON ausgewählt (siehe Abbildung 4-13). Die gewählte Turbine (Typ: WTG3T250) bietet bei rund  $5 \text{ L}/\text{min} = 0.083 \text{ L}/\text{s}$  einen Druckabfall von 0.5 bar und eine Leistungsausbeute von rund 700 mW (KINETRON, 2015). Aufgrund einer Bypass-Konstruktion (siehe Abbildung 4-14) wird der normalerweise exponentiell ansteigende Druckverlust stark abgeschwächt (siehe Abbildung 4-15).



Abbildung 4-13: Foto der gewählten Mikroturbine (KINETRON, 2015)

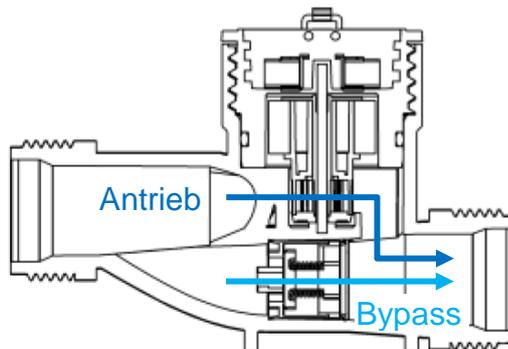


Abbildung 4-14: Schnitt durch die Turbine (KINETRON, 2015 mod.)

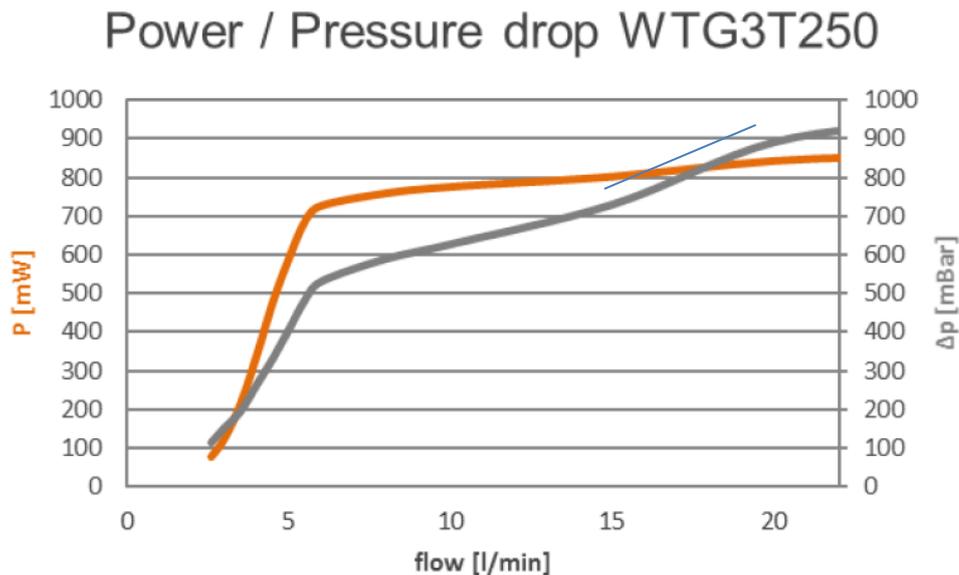


Abbildung 4-15: Kennlinie des Turbinenherstellers (KINETRON, 2015)

### 4.3.3 Energiespeicher

Bei der Auswahl des Energiespeichers sind folgende Kriterien maßgebend: die Entladekapazität, die Ladekapazität und die Selbstentladung. Eine hohe Entladekapazität fordert vor allem das Übertragungsmodul. Hier werden kurzzeitig bis zu 2 Ampere benötigt um die Übertragung durchzuführen. Des Weiteren sind sehr geringe Ladeströme zu erwarten, da die Turbine maximal 800 mW liefert. Bei 5 Volt Ladespannung bedeutet dies einen Ladestrom von rund 150 mA. Die Selbstentladung ist vor allem deshalb relevant, da hier zum Teil sehr viel Energie verloren gehen kann. Nach ausführlichen Recherchen kommen für die Anwendung zwei Akkutypen in Frage. Zum einen wären dies Nickel-Metall-Hydrid-Akkus und zum anderen Lithium-Akkus.

Einfache Nickel-Metall-Hydrid-Akkus haben eine hohe Selbstentladung. Hier gibt es eine spezielle Bauform mit geringerem Innenwiderstand, der zu einer stabileren Spannung führt (vergleiche Abbildung 4-16). Daraus ergibt sich eine höhere Effizienz für diesen Akkutypen. Diese Bauform wird als LSD-NiMh-Akku geführt, wobei LSD für „Low Self Discharge“ steht. Mehrere Zellen können problemlos in Reihe geschaltet und geladen werden, lediglich ein Überlade- und Tiefentladeschutz ist für die Akkus vorzusehen. (Schnabel, 2018b)

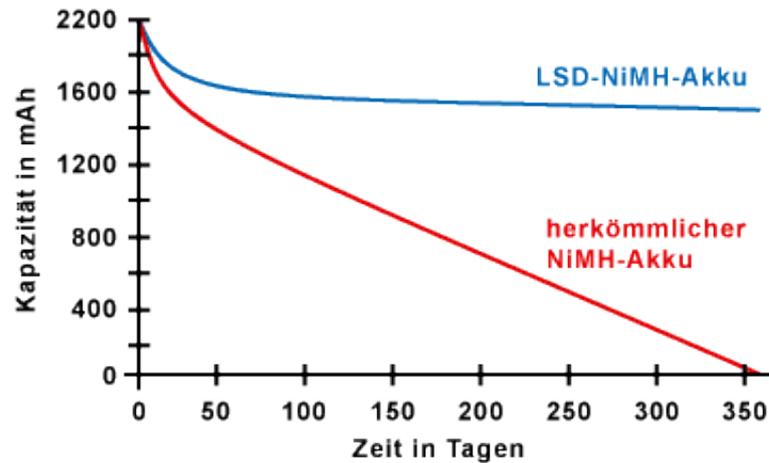


Abbildung 4-16: Selbstentladung von NiMH-Akkus unterschiedlicher Bauform (Schnabel, 2018b)

Alternativ gibt es Lithium-Ionen beziehungsweise Lithium-Polymer Akkus, welche sehr weite Verbreitung in Mobilgeräten, wie zum Beispiel in Handys, haben. Lithium-Akkus benötigen allerdings eine spezielle Ladeprozedur (erst konstanter Strom bei ansteigender Spannung, später konstante Spannung mit abnehmender Stromstärke), vor allem wenn mehrere Zellen in Reihe verwendet werden (Schnabel, 2018a). Lithium-Akkus haben eine geringe Selbstentladung und bieten andererseits eine sehr hohe Entladekapazität. Das Thema der Akkutechnik, vor allem im speziellen Anwendungskontext, ist sehr komplex und übersteigt die fachlichen Möglichkeiten eines Bauingenieurs. Zur genauen Spezifikation eines Akkus und der Ladesteuerung wird umfassendes Wissen in der Elektrotechnik benötigt, welches in einem späteren Entwicklungsstadium der Messelektronik hinzugezogen werden muss.

### **4.4 Systemevaluierung**

Im Zuge der Systemevaluierung wurde das Messsystem auf seinen Energieverbrauch hin untersucht und mit den unter 3.4.3 zusammengestellten recherchierten Werten verglichen. Nach ausführlichen Testläufen wurde der Test des Messsystems am Labormodell durchgeführt. Hier wurden erst die Randbedingungen am Modell untersucht, die erzeugbare Energie und die Akkukapazität abgeleitet. Abschließend wurden die Steuer- und Messdaten miteinander verglichen.

#### **4.4.1 Test des Messsystems**

Bei den Tests am Messsystem wurde ein besonderes Augenmerk auf den tatsächlichen Energieverbrauch des Systems in den verschiedenen Betriebsmodi gelegt. Außerdem wurde das System einem ausführlichen Test bezüglich der Betriebsstabilität über mehrere Wochen hinweg unterzogen.

##### **4.4.1.1 Ermittlung des Energieverbrauchs**

Die Ermittlung des Energieverbrauchs erfolgt mithilfe des unter 3.4.4 vorgestellten Messsystems. Die Ermittlung des Verbrauchs wurde in drei Betriebszuständen durchgeführt: Sleep-Modus, Mess-Modus und Sende-Modus.

###### *4.4.1.1.1 Sleep-Modus*

Zur Verbesserung der Energieeffizienz wird der Mikrochip regelmäßig in den Sleep-Modus versetzt. In diesem Modus werden viele nicht benötigte Elemente des Mikrochips deaktiviert und der Stromverbrauch reduziert. Um zu prüfen ob eine Aktion notwendig ist, muss der Chip regelmäßig aufgeweckt werden. Aufgrund hardwareseitiger Limitierungen ist die maximale Sleep Dauer 8 Sekunden, daher ist der Stromverbrauch über ein 8-Sekunden Intervall zu mitteln. Um die vergangene Zeit auch über die Sleep Intervalle hinweg ermitteln zu können, wird bei jedem Aufwachen ein Zähler erhöht und geprüft ob das Mess- oder Sendeintervall erreicht wurde. Im Falle, dass ein Intervall erreicht wurde, wird die entsprechende Operation gestartet. Für den Fall, dass keine Aktion gestartet werden muss, wird der Chip erneut für 8 Sekunden schlafen gelegt. In Abbildung 4-17 wurden diese Wake-Up Intervalle ohne zusätzliche Aktion aus der gesamten Messreihe extrahiert und dargestellt. Die beiden Höcker entstehen durch das Messverfahren, da die Strommesseinheit intern über 10 Messwerte einen Mittelwert bildet und anschließend erst speichert. Bei der rechnerischen Analyse der Messdaten ergab sich für diese Konfiguration ein durchschnittlicher Stromfluss von 0.145 mA über das 8 Sekunden Intervall.

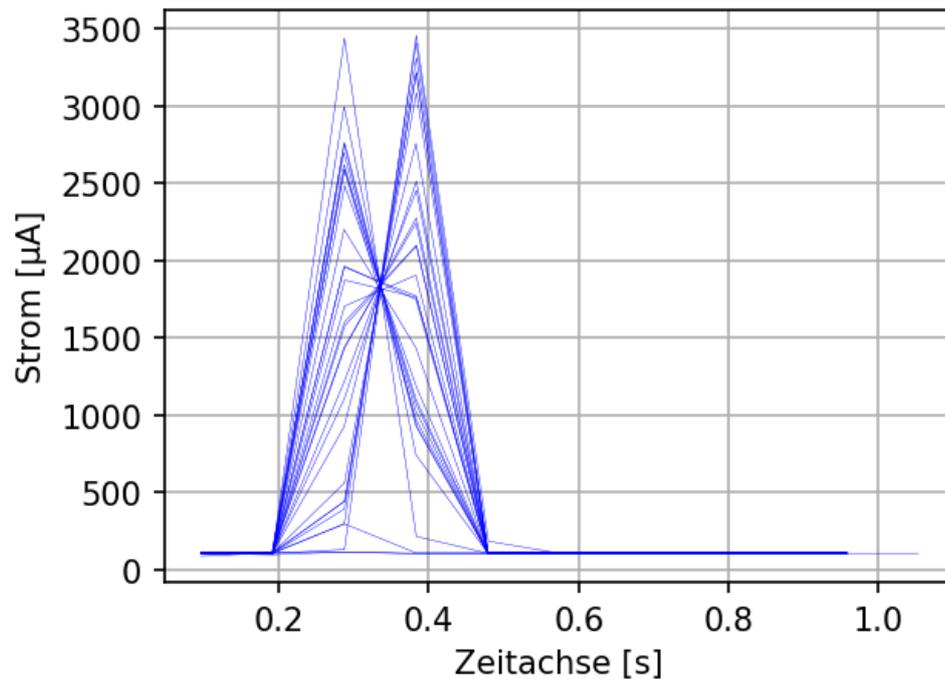


Abbildung 4-17: gemessener Stromfluss bei Wake-Up

Alternativ zu dem gewählten Modus besteht auch die Möglichkeit, den Mikrochip über ein externes Signal zu Wecken. Hierfür würde sich das verbaute Real Time Clock Modul (RTC-Modul) anbieten. Bei diesem kann ein beliebiger Alarmzeitpunkt programmiert werden. Das Modul ändert den Zustand des Alarmpins sobald der entsprechende Zeitpunkt erreicht wurde. Bei dem eingesetzten RTC-Modul muss für die Nutzung der Alarmfunktion allerdings ständig eine Stromversorgung anliegen, welche rund 0.150 mA Dauerstrom benötigt. Zusammen mit dem Stromfluss des Messsystems von 0.103 mA ergibt sich somit ein durchschnittlicher Stromfluss von 0.253 mA.

Aus den ermittelten Werten geht damit hervor, dass ein regelmäßiges Aufwachen im 8-Sekunden Intervall gegenüber dem externen Wake-Up nur ca. 60 % des Stroms benötigt und damit aufgrund gleicher Spannung bei beiden Fällen auch um 60 % effizienter ist.

### 4.4.1.1.2 Mess-Modus

Beim Messen des Drucks wird aufgrund der Trägheit des Sensors auf eine 2-Phasen-Methode zurückgegriffen. Erkennt der Mikrocontroller, dass das Messintervall erreicht ist, wird erst der Sensor mit Strom versorgt. Da dieser circa eine Sekunde benötigt, bis er ein stabiles Messergebnis liefert, wird das Messsystem anschließend 2 Sekunden in den Sleep-Modus versetzt. Nach Ablauf des Intervalls wird der Analogeingang mehrfach ausgelesen und der Mittelwert bestimmt, um Schwankungen im Messergebnis auszugleichen. Abschließend wird der so bestimmte Messwert gespeichert und die Stromversorgung zum Drucksensor wieder deaktiviert.

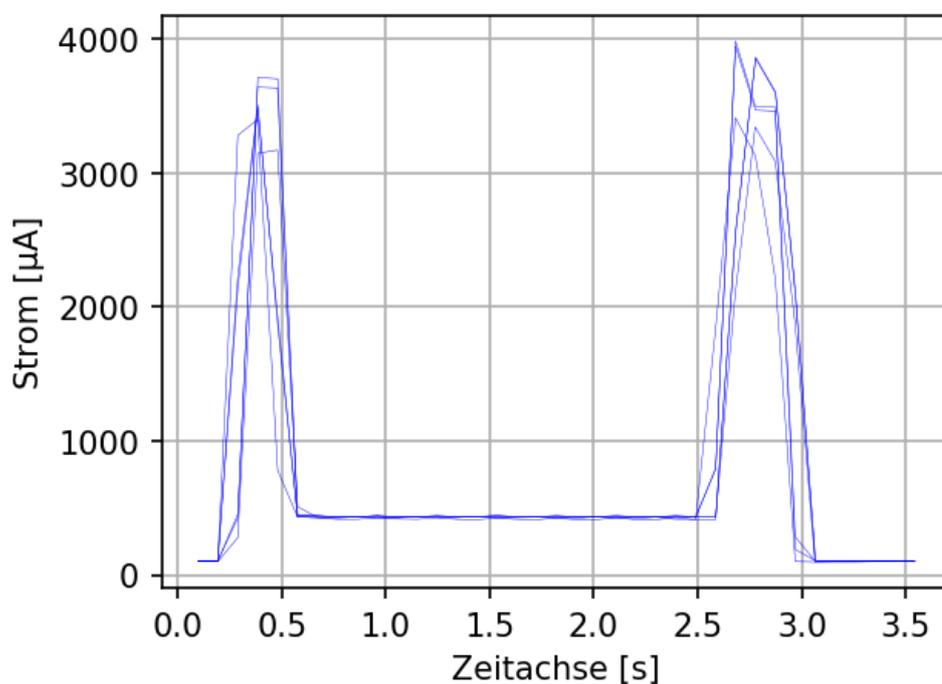


Abbildung 4-18: gemessener Stromfluss während der Druckmessung

Die Stromfluss-Messungen während der laufenden Druckmessung (siehe Abbildung 4-18) ergab einen durchschnittlichen Stromverbrauch von 0.980 mA über 2.80 Sekunden.

### 4.4.1.1.3 Sende-Modus

Der komplexeste und energieintensivste Vorgang den das Messsystem zu bewerkstelligen hat, ist der Sende-Vorgang (siehe Abbildung 4-19). Dazu muss erst das GSM-Modul mit Strom versorgt werden. Mit Aktivierung der Stromversorgung, baut es selbstständig eine Verbindung zum Mobilfunknetz auf. Anschließend muss eine Datenverbindung zum Netzbetreiber geöffnet werden, um schlussendlich über HTTP eine Serververbindung aufbauen zu können, über die die Messdaten übertragen werden. Neben der Komplexität des

Programmablaufs kommt es hier auch zum größten Stromverbrauch. Das GSM-Modul benötigt in der Spitze bis zu 2 Ampere (SIMCom, 2015), was bereits bei der Konstruktion der Einheit zu einigen Problemen führte. Aufgrund der hohen Ströme wird zur Messung des Stromflusses am Modul ein eigener Strommesssensor eingesetzt und daher über einen zweiten Kanal gemessen (siehe Abbildung 4-20).

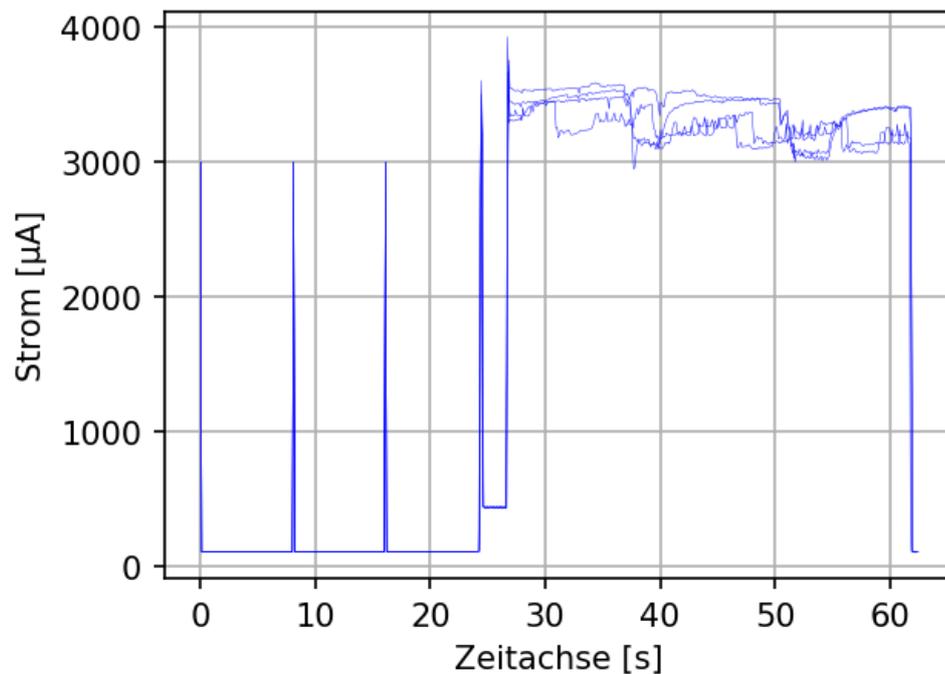


Abbildung 4-19: Plot des Stromverbrauchs des Messsystems

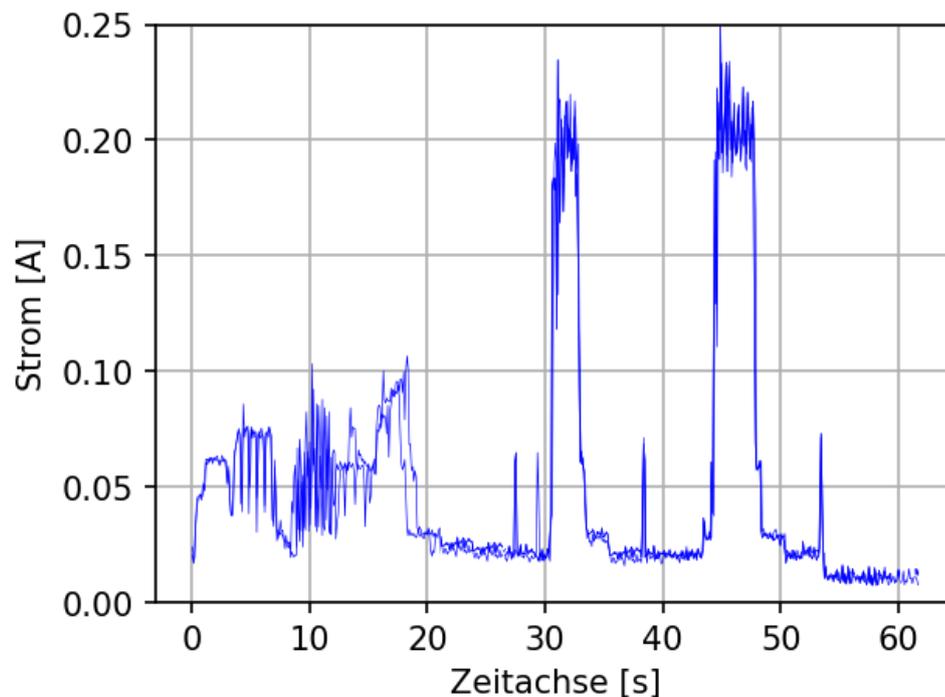


Abbildung 4-20: Plot des Stromverbrauchs des GSM-Moduls

Eine alternative Möglichkeit zur Datenübertragung wäre der Short Message Service (SMS). Vorteil dieser Übertragungsart ist, dass bereits eine sehr geringe Netzverfügbarkeit zum Versand der Daten ausreicht. Des Weiteren bedarf es keinem langwierigen Verbindungsaufbau wie bei HTTP(s), bei dem zusätzliche Verbindungen zum Netzbetreiber initialisiert werden müssen um Verbindung aufzubauen. Ein Nachteil bei der Verwendung der SMS ist, dass Nachrichten auf 160 Zeichen begrenzt sind. Hier können Algorithmen zur Komprimierung der Datenmenge helfen, allerdings besteht die Limitierung weiterhin.

Für die Verringerung der Zeichen wäre beispielsweise die Verwendung eines anderen Zahlensystems zielführend (vergleiche Tabelle 4-3). Während im Dezimalsystem mit zwei Stellen lediglich 100 verschiedene Werte (00 – 99) übertragen werden können, kann beispielsweise das Hexadezimalsystem mit zwei Zeichen 256 verschiedene Werte (00 – FF) übertragen. Durch die Ausweitung des Hexadezimalsystems über alle alphanumerischen Zeichen (Groß- und Kleinschreibung) die in einer SMS verwendet werden können, kann so eine Zahl bis  $(10+26+26)^2 = 3\,844$  mit nur 2 Zeichen übertragen werden. Erweiterbar ist das System noch um die gängigen Sonderzeichen und um weitere Zeichen. Entsprechend der zu übertragenden Messwerte könnte so ein optimiertes Protokoll entwickelt werden, welches auch die Übertragung via SMS erlaubt.

Tabelle 4-3: Zahlensysteme im Vergleich

Zahlensystem	Zeichen	Wertebereich je Zeichen
Dezimalsystem	0-9	10
Hexadezimalsystem	0-9, A-F	16
Eigenes System	0-9, A-Z, a-z	62
Eigenes System erweitert	0-9, A-Z, a-z, Sonderzeichen	90
	128 Zeichen	128

Ein weiterer Ansatz zur Optimierung der Zeichenanzahl wäre die Übertragung nur eines Messwertes. Alle nachfolgenden Messwerte werden nicht direkt, sondern als Veränderung des Messwertes übertragen. Bei geringen Schwankungen kann eine derartige Übertragungstechnik ebenfalls die Datenmenge reduzieren.

Da die GSM-Verbindung einen Zugriff auf das Internet zulässt, ließen sich über diesen Weg auch beliebige vorhandene Protokolle wie zum Beispiel SMTP, welches für den E-Mail-Versand verwendet wird, nutzen oder gar ganz freie, eigene Protokolle definieren. Aufgrund des dahinterstehenden Aufwandes, da

sowohl eine serverseitige als auch eine clientseitige Entwicklung notwendig wäre, wurde auf weitere Ausführungen anderer Methoden verzichtet. Auch im Hinblick darauf, dass mit HTTP ein sehr bewährter Standard zur Verfügung steht.

#### 4.4.1.1.4 Zusammenstellung des Ergebnisses

Vergleicht man die gemessenen Werte (siehe Tabelle 4-4) mit den auf Basis der Datenblätter abgeschätzten Werte (siehe Tabelle 3-6) so kann man feststellen, dass der Energieumsatz des Messsystems fast um 100 % überschätzt wurde. Dies ist vor allem auf das Verhalten des Drucksensors und des GSM-Moduls zurückzuführen, da dort der benötigte Strom deutlich überschätzt wurde. Um eine endgültige Aussage über den Energieverbrauch treffen zu können, ist die Verbrauchsmessung mehrfach bei unterschiedlichen Randbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte, ...) durchzuführen. Der Energiebedarf kann auf diese Randbedingungen mitunter stark variieren.

Tabelle 4-4: gemessene Stromflüsse und daraus abgeleiteter Energieumsatz des Messsystems

Betriebsmodus	Tägliche Laufzeit je Modus		Anteil täglich	Gemessene Werte			
	[s/d]			I	P	W	
				[mA]	[mW]	[Ws/d]	[mWh/d]
Sleep		85 464	98.9 %	0.145	0.725	61.961	17.211
Messen	2.8 x 24 x 12	806.4	0.9 %	0.980	4.900	3.951	1.098
Senden	(30 + 35) x 2	130	0.2 %	60.00	300.0	39.00	10.833
GESAMT:						104.91	29.142

Der ermittelte Energiebedarf lässt eine erste grobe Abschätzung der Einsetzbarkeit der Messelektronik zu. Vergleicht man die ermittelten 30 mWh die täglich von der Elektronik benötigt werden, mit einer entsprechenden Lithiumbatterie die rund 11 Wh speichert, so ergibt sich daraus eine theoretische Nutzungsdauer von ungefähr einem Jahr. Da das Spannungsniveau einer Zelle allerdings niedriger als die benötigte Spannung ist, ist es hier sinnvoll zwei Zellen in Reihe zu schalten. Damit addiert sich die Spannung beider Zellen. Das Hinunterregeln einer Spannung ist effizienter möglich als das Hochregeln. Mit einem effizienten Spannungsregler kann ein Wirkungsgrad von ~ 90 % erreicht werden (Texas Instruments, 2016). Durch die Verwendung zweier Zellen kann damit eine theoretische Nutzungsdauer von fast zwei Jahren erreicht werden (ohne Beachtung von Wirkungsgraden).

Aufgrund der hohen Entladeströme des GSM-Moduls – von bis zu 2 Ampere (SIMCom, 2015) – ist dies mit nicht aufladbaren Batterien allerdings praktisch nicht umsetzbar, da diese nicht für derartige Stromspitzen ausgelegt sind. Bei der Verwendung von aufladbaren Akkus kommt der zusätzliche Effekt zum Tragen, dass diese einer Selbstentladung unterliegen und so auch ohne Belastung nach 1-2 Jahren keine Ladung mehr besitzen. Für den Einsatz von Akku-Lösungen ist es erforderlich für eine regelmäßige Ladung des Systems zu sorgen.

Da aus den Messungen hervorgeht, dass es sich lediglich um Stromspitzen handelt, wäre der Einsatz von Kondensatoren zur Überbrückung der notwendigen Versorgungsspitzen denkbar. Kondensatoren laden sich auf, sobald Spannung anliegt und geben diese bei Spannungseinbrüchen gegebenenfalls ab, beziehungsweise stabilisieren die Spannung. Werden wie bei dem GSM-Modul kurzzeitig sehr hohe Ströme benötigt, kommt es meist zu einem Spannungsabfall, dem der Kondensator entgegenwirkt.

#### **4.4.1.2 Testlauf des Messsystems**

Als Vorbereitung für die Versuchsreihe am Labormodell wurde das Messsystem über mehrere Wochen hinweg betrieben. Ziel dieses Testlaufes war, die Betriebstauglichkeit des Messsystems unter realen Bedingungen zu untersuchen. Vor allem die Stromversorgung über die Powerbank machte, aufgrund der hohen Ströme, immer wieder Probleme, weshalb hier im Zuge des Testlaufes noch einige Verbesserungen (Änderung der Verdrahtung, Parallelschaltung der beiden Powerbank-Ausgänge) umgesetzt wurden.

Im mehrwöchigen Testbetrieb konnten durch Verkürzung des Sleep-Intervalls von 8 auf 2 Sekunden und der damit einhergehenden Vervierfachung der Mess- und Übertragungshäufigkeit am Stück 150 Übertragungen in einer Laufzeit von 3 Wochen erfolgreich durchgeführt werden.

#### 4.4.2 Test der Einheit am Labormodell

Neben den Messungen und Untersuchungen am Messsystem wurden zusätzlich noch Testläufe am Labormodell bei realen Randbedingungen durchgeführt.

##### 4.4.2.1 Randbedingungen am Modell

Da das Labormodell direkt am Trinkwassernetz betrieben wird, stellt sich hier auch eine Drucktagesganglinie ein (siehe Abbildung 4-21).

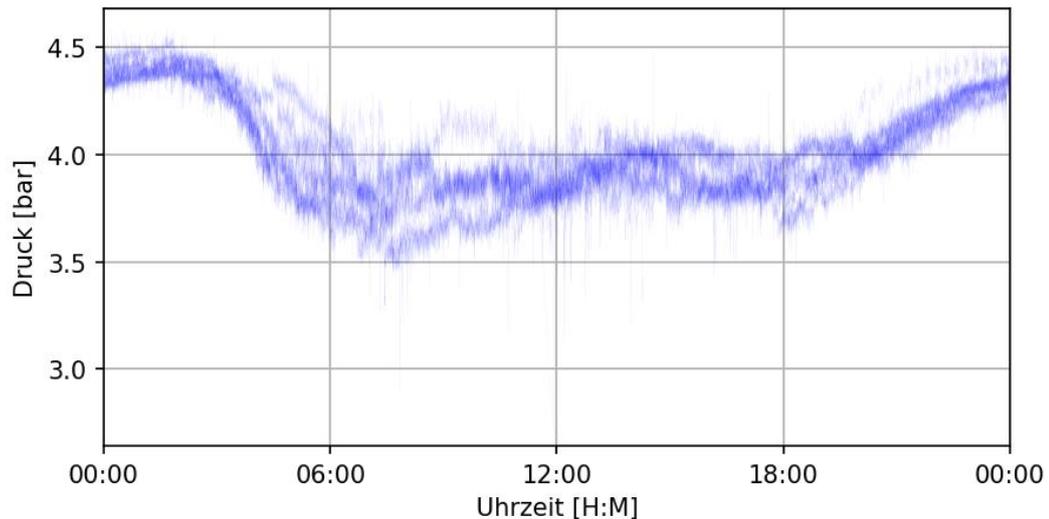


Abbildung 4-21: Drucktagesganglinie am Labormodell-Anschluss

Da die Schraubventile vor Versuchsbeginn eingestellt werden, ändert sich der Ausflussquerschnitt nicht. Bei Veränderung des Drucks über den Tagesgang (siehe Abbildung 4-22) ändert sich aber dennoch die Durchflussmenge. Dies ist auf das Ausflussgesetz von Torricelli (vergleiche 2.3.1.4) zurückzuführen. Die Steuerungseinheit bezieht daher die Druckmessung zur Vorhersage des notwendigen Schaltzustandes mit ein.

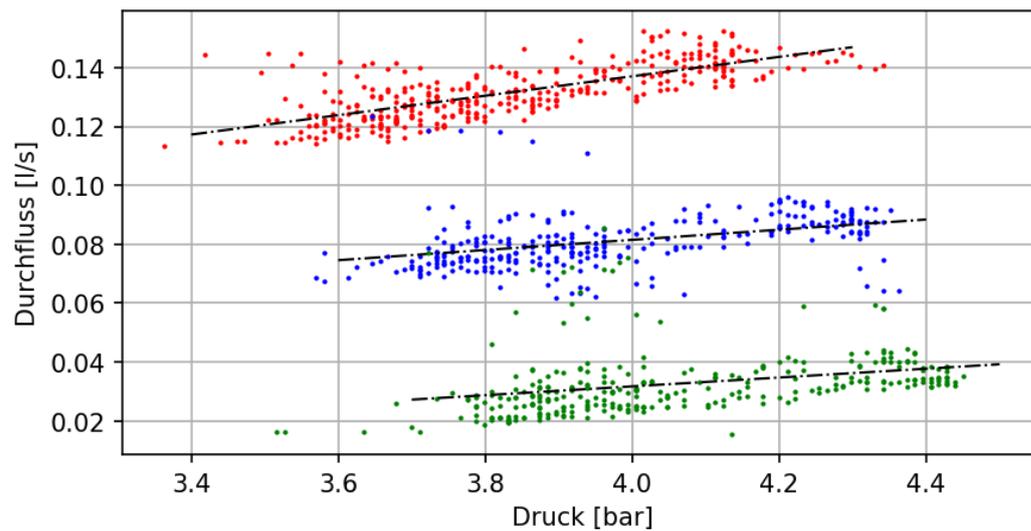


Abbildung 4-22: Vergleich dreier Schaltzustände bei unterschiedlichen Versorgungsdrücken

Bei Versuchen bezüglich der Justierung der Schraubventile zeigte sich, dass die erwartete Einstellauflösung von  $0.006 \text{ l/s}$  (vergleiche 3.5.1) nicht möglich ist. Zum einen lassen sich die Schraubventile nicht derart fein einstellen und durch die Druckschwankungen kommen zusätzliche Abweichungen zustande. Aufgrund der Kompensation der Veränderungen durch die Software der Steuereinheit sind aber dennoch ausreichend viele, unterschiedliche Schaltzustände möglich.

#### 4.4.2.1.1 Schalteinflüsse

Bei weiteren Voruntersuchungen wurde außerdem festgestellt, dass durch die Schaltung der Durchflüsse über die Magnetventile das System zum Teil sehr stark beansprucht wird. Die Schaltzeit von Magnetventilen liegt im Bereich von einer zehntel Sekunde und daher entstehen im System vor allem beim Schließen, während der Abgabe großer Durchflussmengen, große Druckstöße (vergleiche 2.3.1.5). In Abbildung 4-23 wird als Beispiel ein Schaltvorgang mit einer entsprechenden Druckspitze dargestellt. Die wahre Spitze liegt vermutlich ein Vielfaches höher, da hier zum einen die Ansprechzeit des Drucksensors, als auch die Abtastrate des Messsystems (Mittelwert aus 10 Messungen pro Sekunde) das Ergebnis verfälschen.

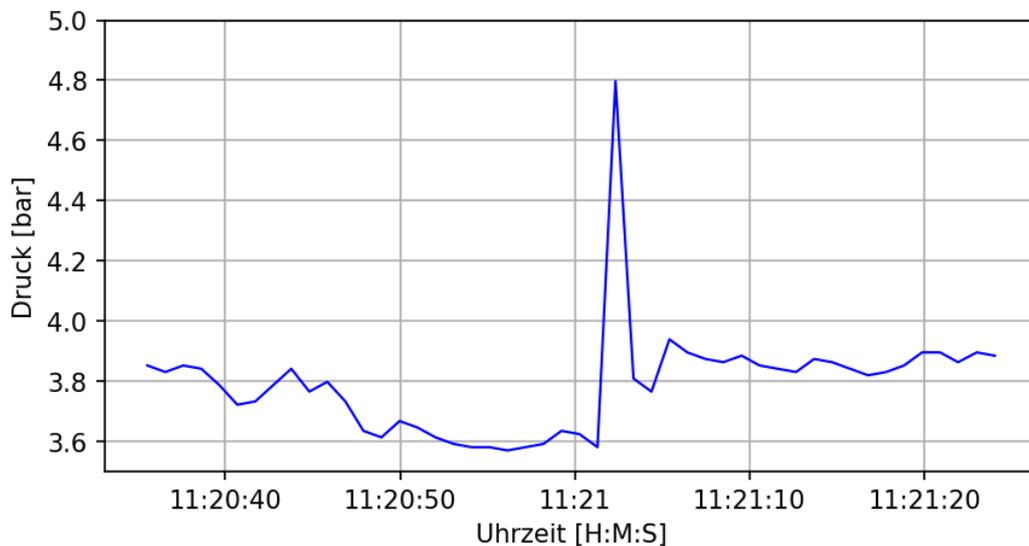


Abbildung 4-23: Drucklinie mit Druckstoß durch Magnetventil

Zur Vermeidung dieser großen Druckstöße und um das Modell und die Trinkwasserversorgung des Labors zu schonen, wurde softwareseitig versucht das Problem zu lindern. Druckstöße entstehen vor allem, wenn bei höheren Durchflussraten die Ventile geschlossen werden. Um das System zu schonen werden mehrere Ventile nicht gleichzeitig, sondern in Abstand von ca. einer Sekunde angesteuert. Außerdem wird darauf geachtet, dass erst Ventile mit hohem und nachfolgend Ventile mit niedrigem Durchfluss geschaltet werden. So kann der Druckanstieg, der beim Schalten großer Öffnungen entsteht, zusätzlich noch über die geöffneten Ventile entweichen.

#### 4.4.2.2 Erzeugbare Energie

In einem weiteren Schritt wird die erzeugbare Energie aus den vorhandenen Hausanschlussmessdaten abgeleitet. Für die Berechnung der erzeugbaren Energie wird eine Leistungskennlinie benötigt. Neben der Kennlinie des Herstellers wurde zusätzlich eine Messung durchgeführt um die Herstellerangaben zu prüfen. Für die theoretische Auswertung der erzeugbaren Energie wurde aus der vorgenommenen Messung eine mathematische Funktion abgeleitet, die sich näherungsweise in zwei lineare Bereiche einteilen lässt. Ab dem Einschaltpunkt von  $3 \text{ L}/_{\text{min}} = 0.05 \text{ L}/_{\text{s}}$  steigt die Leistungsausbeute sehr stark an, bis sie ab ca.  $5.85 \text{ L}/_{\text{min}} = 0.098 \text{ L}/_{\text{s}}$  nur noch leicht linear ansteigt.

$$P_{\text{erz}}(Q) = \begin{cases} 0 & \text{für } Q < 0.05 \frac{\text{L}}{\text{s}} \\ 5432.4 * Q - 190 & \text{für } 0.05 \frac{\text{L}}{\text{s}} < Q < 0.098 \frac{\text{L}}{\text{s}} \\ 463.8 * Q + 294 & \text{für } 0.098 \frac{\text{L}}{\text{s}} < Q < 0.25 \frac{\text{L}}{\text{s}} \end{cases} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

mit:

$P_{\text{erz}}$  ... elektrische Leistung [mW],  $Q$  ... Durchfluss [l/s]

Nachfolgend wird in Abbildung 4-24 die Kennlinie des Herstellers der selbst ermittelten Kennlinie gegenübergestellt. Wie ersichtlich ist, weicht die Herstellerangabe deutlich von der gemessenen Leistungsausbeute ab. Welche Umstände dieser Abweichung zugrunde liegen konnte nicht näher bestimmt werden. Einen Einfluss auf das Ergebnis hat sicherlich der verwendete Gleichrichter, mangels Hardware für die Wechselstrom-Messung mit Aufzeichnungsfunktion konnte dies allerdings nicht im Detail untersucht werden. Aus dem Vergleich der beiden Messkurven ergibt sich eine mittlere Minderung der Leistung von rund 50 % zwischen Datenblatt und realer Messung.

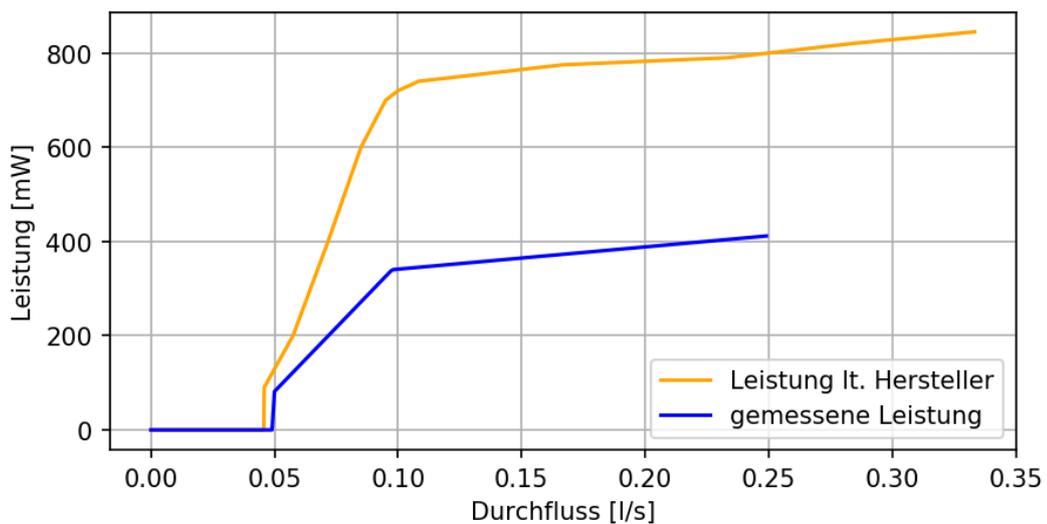


Abbildung 4-24: Vergleich Leistungskurve laut Hersteller (KINETRON, 2015) und eigene Messung

Die aus der Messung ermittelte Leistung ist anschließend noch mit den Wirkungsgraden aus den Wandlungsprozessen abzumindern. Der typische Wirkungsgrad für Lade- und Entladezyklen bei Lithium-Akkus liegt, laut Recherchen in einschlägiger Fachliteratur, bei rund 90 % (Korthauer, 2013). Des Weiteren werden die Wirkungsgrade vor dem Akku im „Step-Up“ Regler ~ 85 % (Texas Instruments, 2013) und anschließend im Spannungsregler ~ 90 % (Texas Instruments, 2016) beachtet. Abschließend werden noch nachteilige Einflüsse aus der Umgebung (im Keller meist kühle Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit) mit etwa 80 % angesetzt.

$$\eta_{ges} = 90 \% * 85 \% * 90 \% * 80 \% = 55.08 \% \approx 55 \% \quad \text{Gleichung 4-3}$$

mit:

$\eta_{ges}$  ... Gesamtwirkungsgrad [-]

Aus der Vereinigung der Wirkungsgrade ergibt sich aus Gleichung 4-3 somit ein Gesamtwirkungsgrad von rund 55 %.

Der Energieertrag kann aus der ermittelten Leistungskurve abgeleitet werden. Mithilfe von Gleichung 4-2 und den vorliegenden Hausanschluss-Messdaten der Studie „Wasserverbrauch und Wasserbedarf“ lässt sich die Leistung für jeden Messdatensatz ermitteln. Durch die Einbeziehung des Messintervalls von 10 Sekunden, lässt sich nach Gleichung 4-4 die erzeugte Energie errechnen.

$$W_{\text{erz}}(Q, t) = \int_0^t P_{\text{erz}}(Q) dt \quad \text{Gleichung 4-4}$$

mit:

$W_{\text{erz}}$  ... erzeugbare elektrische Energie [mWs],  $P_{\text{erz}}$  ... elektrische Leistung [mW],

$Q$  ... Durchfluss [l/s]

Die Ermittlung der nutzbaren elektrischen Energie wird auf Basis der definierten zusammenhängenden Messzeiträume (vergleiche 3.2.5) durchgeführt. Die Bezeichnung der Messdatengruppen wurde als Referenz übernommen. Zusätzlich wurde die erzeugbare Energie in Tabelle 4-5 noch mit dem Wirkungsgrad auf eine tatsächliche Energiemenge umgerechnet.

Tabelle 4-5: Täglich erzeugbare Energie der Messdatengruppen in mWh

Gruppe	Tägliche erzeugbare Energie	Tägliche Tats. Energie (Beachtung des Wirkungsgrads)	Gruppe	Tägliche erzeugbare Energie	Tägliche Tats. Energie (Beachtung des Wirkungsgrads)
1-1	46.019	25.311	13-1	31.646	17.405
1-2	416.390	229.014	14-1	n.V.	n.V.
1-3	28.339	15.586	14-2	55.344	30.439
2-1	97.262	53.494	14-3	0.324	0.178
3-1	212.048	116.627	15-1	n.V.	n.V.
4-1	798.421	439.132	15-2	133.185	73.252
4-2	2.556	1.406	15-3	0.381	0.209
5-1	181.546	99.850	16-1	182.068	100.137
5-2	202.102	111.156	17-1	35.735	19.654
6-1	122.173	67.195	18-1	49.770	27.373
6-2	108.800	59.840	19-1	102.211	56.216
7-1	107.641	59.202	20-1	1.752	0.963
7-2	101.870	56.029	21-1	105.874	58.231
8-1	149.515	82.234	21-2	683.607	375.984
8-2	163.754	90.064	21-3	583.807	321.094
9-1	40.863	22.475	21-4	514.752	283.113
9-2	76.422	42.032	22-1	199.164	109.540
10-1	19.801	10.891	22-2	3.690	2.030
10-2	71.067	39.087	23-1	84.824	46.653
11-1	87.413	48.077	23-2	0.187	0.103
11-2	154.481	84.965	24-1	75.537	41.545
12-1	112.751	62.013	24-2	1.037	0.570
12-2	2247.054	1235.880			

Die ermittelte, tatsächlich erzeugbare Energie liegt bei 29 der 45 Datensätze über dem Bedarf der Messelektronik. Bei zwei Messdatengruppen konnten keine Ergebnisse ermittelt werden, da bei Gruppe 14-1 der Messdatenumfang keinen Tag umfasst und Gruppe 15-1 umfasst nur Durchflüsse die unterhalb des Einschaltpunktes der Turbine liegen. Bei 20 der untersuchten Datensätze wird sogar mehr als das doppelte der notwendigen Energie erzeugt.

#### 4.4.2.3 Bestimmung der Akkukapazität

Aus dem vorangegangenen Punkt, in dem die erzeugbare Energie berechnet wird, kann das grundsätzliche Potential der Einsetzbarkeit abgeschätzt werden. Allerdings ist es notwendig den Akku als Zwischenspeicher noch einmal separat zu betrachten. Bei der Abschätzung der durchschnittlich erzeugbaren Energie wird der Speichervorgang außer Acht gelassen. Um die erforderliche Speicherkapazität des Akkus zu ermitteln, ist eine Betrachtung über die Laufzeit notwendig. Neben dem Lade- und Entladevorgang kommt es über die Laufzeit zu einer Selbstentladung des Akkus, welche über die Zeit als zusätzlicher „Verbrauch“ angesehen werden muss. Bei den gewählten Akkutypen LSD NiMH und Li-Ion liegt sie bei rund 1-2 % pro Monat (Schnabel, 2018a; 2018b). Diese Werte sind allerdings bei einer idealen Lagertemperatur von ca. 20 °C maßgebend. Im Keller trifft man meist eine geringere Temperatur bei dafür höherer Luftfeuchtigkeit an. Daher wird nachfolgend von einer Selbstentladung von 5 % der Akkukapazität pro Monat ausgegangen. Außerdem wird damit auch beachtet, dass anfänglich eine erhöhte Selbstentladung auftritt. Für die Ermittlung der Akkukapazität muss die Speicherentwicklung zu jedem Zeitpunkt im Zeitbereich berechnet werden.

$$W_{sp}(Q, t) = \int_0^t W_{erz}(Q, t) * \eta - W_{el}(t) - W_{sel}(t, Kapazität) dt \quad \text{Gleichung 4-5}$$

mit:

$W_{sp}$  ... gespeicherte elektrische Energie [Ws],  $W_{erz}$  ... erzeugte elektrische Energie [Ws],

$W_{sel}$  ... Selbstentladung des Akkus [Ws]  $Q$  ... Durchfluss [l/s],

$\eta$  ... Wirkungsgrad der Lade- und Entnahmeeinheit

Die Ermittlung der Selbstentladung wird unter der Annahme, dass ein Akku mit 22 Wh eingesetzt wird, einbezogen. Die Differenz zwischen maximaler und minimaler gespeicherten Energie ergibt die notwendige Akkukapazität in Tabelle 4-6. Die so ermittelte Kapazität muss kleiner der angenommenen sein.

Tabelle 4-6: Ermittelte, notwendige Speicherkapazität in mWh

<b>Gruppe</b>	<b>Speicher</b>	<b>Gruppe</b>	<b>Speicher</b>	<b>Gruppe</b>	<b>Speicher</b>
1-1	5852.33	10-1	827.01	16-1	444.49
1-2	1866.26	10-2	654.64	17-1	3874.41
1-3	645.59	11-1	184.39	18-1	3338.44
2-1	2227.12	11-2	342.91	19-1	1403.53
3-1	14878.00	12-1	653.28	20-1	4776.56
4-1	6774.90	12-2	362.09	21-1	128.59
4-2	3395.25	13-1	707.72	21-2	2530.92
5-1	420.52	13-2	51.27	21-3	753.90
5-2	722.86	13-3	703.06	21-4	7590.41
6-1	122.63	14-1	10.04	22-1	675.74
6-2	115.67	14-2	501.72	22-2	3311.05
7-1	230.34	14-3	1117.64	23-1	326.77
7-2	375.60	15-1	973.02	23-2	988.61
8-1	361.23	15-2	675.90	24-1	412.34
8-2	316.22	15-3	1289.64	24-2	997.84
9-1	649.99				
9-2	414.93				

Bei der ermittelten Speicherkapazität sind vor allem die Gruppen von Interesse, bei denen weniger Energie über die Turbine gewonnen werden kann, als benötigt wird. Hier kommt es durch die Turbine lediglich zu einer Verlängerung der Akkulaufzeit, da sich der Akku aber tendenziell leert, hat seine Kapazität maßgebliche Bedeutung für die Laufzeit.

Speziell Messdatensatzgruppe 1-1 lässt Schlüsse auf die Einsetzbarkeit des Systems zu und zeigt die Notwendigkeit des Akkus. Da es sich hierbei um die einzige Messdatensatzgruppe handelt, die sich annähernd über ein ganzes Jahr (353 Tage) erstreckt. Durch den Einsatz eines Akkus mit 22 Wh lässt sich das System anstelle von fast 2 Jahren mit Batterie, nun fast 4 Jahre betreiben, da jährlich in etwa 5.8 Wh der Akkukapazität benötigt werden.

#### 4.4.2.4 Vergleich Steuer- und Messdaten

Für den Test am Labormodell wurde eine regelmäßige Schaltung der Ventile auf unterschiedliche Durchflussniveaus durchgeführt. Somit konnten zum einen die Veränderungen des Durchflusses aufgrund abweichender Druckverhältnisse untersucht werden, als auch das Messverhalten des Messsystems und der Einfluss der Turbine auf die Trinkwasserversorgung.

Wie in Abbildung 4-25 ersichtlich ist, sind die gemessenen Drücke des Messsystems ähnlich den aufgezeichneten Drücken der Steuerungseinheit. Lediglich ein leichter horizontaler Verschiebung, aufgrund einer leichten Abweichung in der Zeitachse, ist in dem gewählten Ausschnitt ersichtlich.

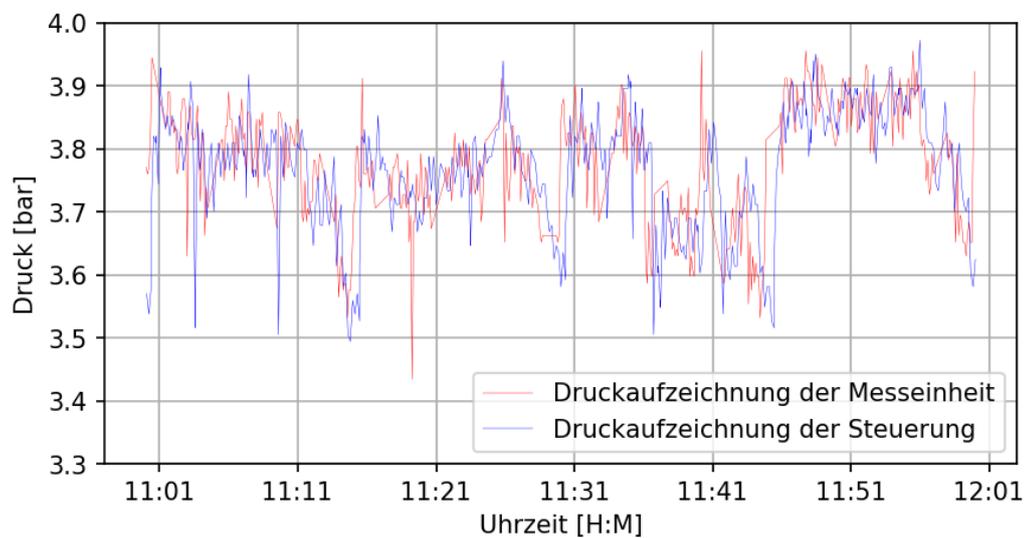


Abbildung 4-25: Vergleich der Messung des Messsystems mit der Druckaufzeichnung der Steuerungseinheit

Bei näherer Betrachtung einzelner Zeitbereiche (siehe Abbildung 4-26), die nicht durch die Schaltung von Magnetventilen beeinflusst wurden, kann eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse festgestellt werden.

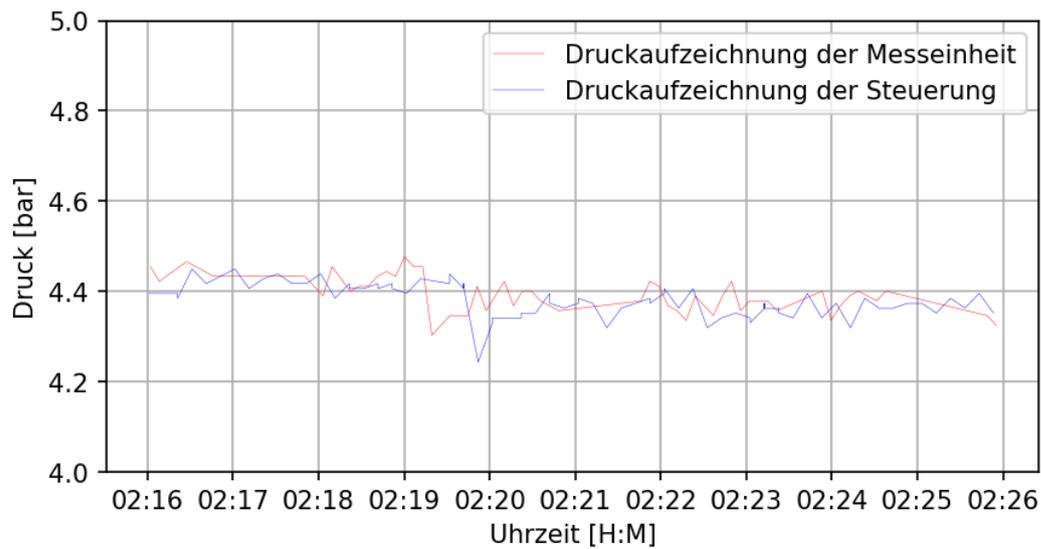


Abbildung 4-26: Detailansicht: Vergleich der Messung des Messsystems mit der Druckaufzeichnung der Steuerungseinheit

Bei der statistischen Analyse der Daten ist festzustellen, dass die Abweichung zwischen Mess- und Steuerungseinheit bei 18 500 Datensätzen im Mittel bei +0.01 bar mit einer Standardabweichung von 0.08 bar liegt (siehe Abbildung 4-27).

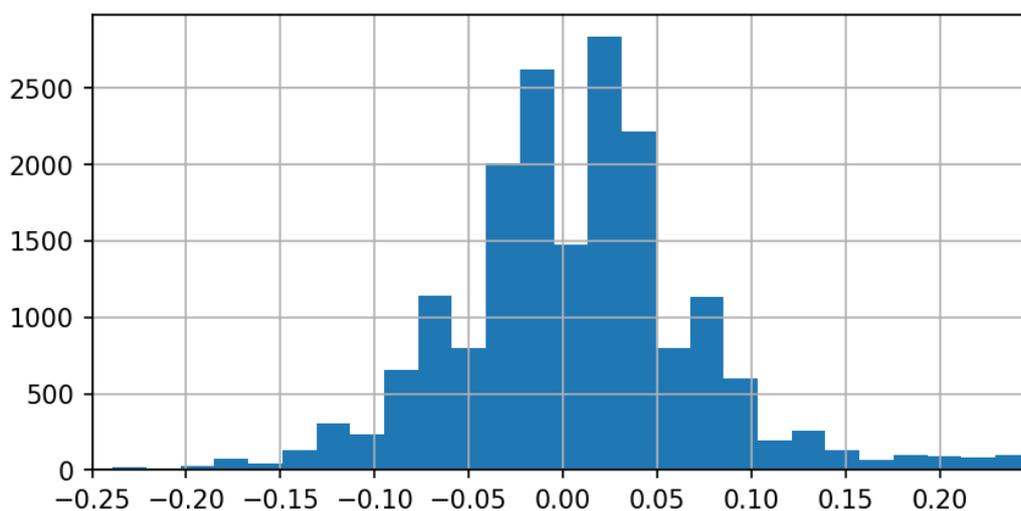


Abbildung 4-27: Verteilung der Abweichungen zwischen der Messung an der Steuereinheit und des Messsystems

Die Auswirkungen der Turbine auf den Hausanschluss, durch den Druckverlust in der Turbine, wurden mit maximal 0.6 bar gemessen und entsprechen damit weitestgehend den Herstellerangaben (vergleiche Abbildung 4-28).

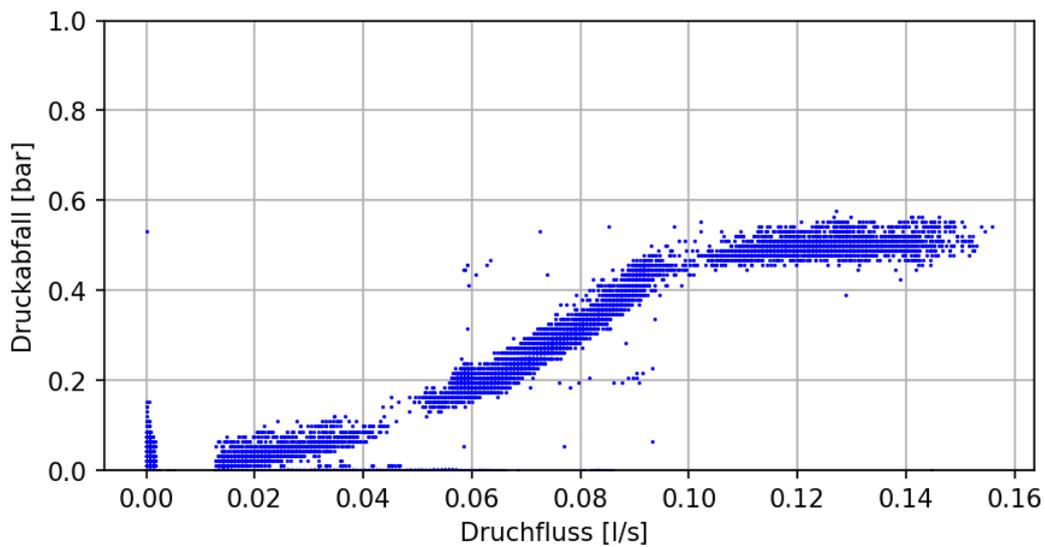


Abbildung 4-28: gemessener Druckabfall der Mikroturbine

## 4.5 Potential und Grenzen des untersuchten Messsystems

Im Rahmen der Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Durchflüsse an einem Trinkwasser-Hausanschluss ausreichen, um ein geeignetes Messsystem zu betreiben. Diese Aussage ist allerdings als Abschätzung anzusehen, da sie auf einem Laborversuch und einem definierten Betriebszustand (2-mal täglich senden, 5-minütig messen) basiert. Um diese limitierenden Faktoren näher zu betrachten, sind unter anderem die Untersuchung des Akkuverhalten im Langzeitbetrieb und eine Optimierung der Energieversorgung durchzuführen. Außerdem ist die Verwendung einer alternativen Übertragungstechnik zu prüfen.

### 4.5.1 Akkuverhalten im Langzeitbetrieb

Im Zuge dieser Arbeit wurden die technischen Rahmenbedingungen für den Einsatz eines mikroturbinengestützten Messsystems untersucht und Kurzzeitversuche durchgeführt. Da das Messsystem vor dem Wasserzähler aber in privaten Räumlichkeiten installiert wird und der Versorger diese in der Regel nur für Zählerwechsel aufsucht, sollte deren Laufzeit auch dem Wartungsbeziehungsweise Wechselintervall von 5 Jahre entsprechen.

Zur konkreten Abschätzung des Langzeitverhaltens des Messsystems, ist es in einem weiteren Schritt notwendig, den Akku auf die Spezifikationen des hier entwickelten Messsystems abzustimmen. Außerdem ist die Konstruktion der Lade- und Entladeeinheit (Über- und Tiefentladeschutz, Strom- und Spannungsregelung) notwendig. Im Anschluss daran ist es erforderlich, das

Messsystem einem Langzeittest zu unterziehen, so dass das reale Verhalten des Akkus beurteilt werden kann.

### **4.5.2 Optimierung der Energieversorgung und Verzicht auf Turbine**

Als Ausschlusskriterium für den Einsatz von nicht wiederaufladbaren Batterien, welche eine deutlich geringere Selbstentladung (1 % pro Jahr anstelle 1 % pro Monat) aufweisen als wiederaufladbare Batterien, wurden die hohen Ströme beim Verbindungsaufbau des GSM-Moduls genannt. Durch den Einsatz von Kondensatoren in entsprechender Größe und gegebenenfalls auch Stückzahl ließe sich diese Limitierung aufheben.

Kondensatoren laden sich auf, sobald Spannung anliegt und geben diese bei Spannungseinbrüchen gegebenenfalls ab, beziehungsweise stabilisieren die Spannung. Werden wie bei dem GSM-Modul kurzzeitig sehr hohe Ströme benötigt, kommt es meist zu einem Spannungsabfall, dem der Kondensator entgegenwirkt.

### **4.5.3 Andere Übertragungstechnik**

Bei Ersatz des GSM-Moduls durch eine andere Übertragungstechnik, welche keine hohen Stromspitzen erfordert, wäre ein Betrieb des Messsystems im geplanten Betriebsmodus auch ohne Turbine möglich.

Hier würde sich beispielsweise das „Long Range Wide Area Network“ kurz LoRaWAN anbieten. Dieses zeichnet sich vor allem durch seinen sehr geringen Stromverbrauch aus. Mit dieser Technologie könnte auch eine höhere Übertragungsrates – als zweimal täglich – über eine Batterielösung umgesetzt werden. Hauptproblem bei dieser Technologie ist die fehlende Infrastruktur, in die die Messgeräte eingebunden werden können. Die Verbindung zwischen den Endgeräten und dem Internet übernehmen dabei sogenannte Gateways, welche die Datenpakete anschließend an einen Server übermitteln. Die Reichweiten dieser Technik erstrecken sich von bis zu 40 km im ländlichen Bereich, bis auf unter 2 km im innerstädtischen Bereich. Aufgrund des Umstandes, dass sich Trinkwasseranschlüsse in der Regel im Keller befinden, ist davon auszugehen, dass die Reichweite noch geringer ausfällt und damit ein erheblicher Aufwand für die Errichtung der Infrastruktur notwendig wird. Sollte sich bei uns, wie bereits in der Schweiz durch die Firma Swisscom, ein Betreiber ein LoRaWAN-Netz aufbauen, würde sich dies für das Betreiben von Messsensoren anbieten.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Nach ausführlicher Recherche der technischen und rechtlichen Grundlagen, wurde der Stand der Technik und der Stand der Wissenschaft zur Energiegewinnung in Trinkwassernetzen zusammengestellt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Idee von Turbinen in der Trinkwasserversorgung keine neue ist. Derartige Systeme werden bereits vielfach in Hauptleitungen eingesetzt, wo an entlegenen Positionen elektrische Anlagen zu betreiben sind. Als Beispiel wurde hier der Betrieb von UV-Anlagen bei Quellfassungen gefunden. Im Gegensatz zur Energiegewinnung in Hauptleitungen, konnten in der Literatur kaum Beispiele gefunden werden, die Trinkwasserhausanschlüsse betrachten. In dieser Arbeit wurde daher versucht, durch die Kombination existierender Literatur mit Beispielen aus der Praxis, das Potential des energieautarken Betriebs eines Messsystems an der Hausanschlussleitung im Trinkwassernetz zu untersuchen.

Aufbauend auf die Grundlagenrecherche wurden vorhandene Hausanschluss-Messdaten auf ihren Durchfluss und damit auf ihr nutzbares Potential hin untersucht. Die Untersuchung ergab, dass die Durchflüsse am Hausanschluss fast unabhängig von der Haushaltsgröße ausfallen. Vernachlässigt man marginal kleine Durchflüsse, so ergibt sich ein Mittelwert von circa  $0.1 \frac{l}{s}$  als Standarddurchfluss. Dies lässt eine Spezifikation der Turbine ohne nähere Kenntnis des Hausanschlusses zu.

Bei der Auswahl und Konzeptionierung des Messsystems zeigte sich, dass bei Low-Power-Hardware sehr viele Dinge zu beachten sind und dass die ausgewählte Datenübertragungstechnik sehr limitierend für die Zusammenstellung der Hardware ist. Hier fallen kurzzeitig Ströme im Faktor 10 000 an, welche eine besondere Herausforderung vor allem für die Energieversorgung darstellt.

Als Grundlage für die Einsetzbarkeit eines Messsystems am Hausanschluss wurden die Auswirkungen des Hausanschlusses auf die Messung untersucht. Es stellte sich dabei heraus, dass der Durchfluss im Hausanschluss kaum Einfluss auf das Messergebnis hat.

Außerdem konnte nachgewiesen werden, dass in den meisten Fällen die über die Turbine gewonnene Energie die benötigte Energie übersteigt. Selbst wenn dies nicht der Fall ist, kann dennoch durch die Turbine eine Verlängerung der Laufzeit auf mehrere Jahre sichergestellt werden. Der Einfluss der Turbine auf den Hausanschluss ist, durch die entsprechend ausgewählte Turbinenform, welche intern einen Bypass besitzt, gering. Der maximal gemessene Druckabfall

durch die Turbine lag bei 0.60 bar und liegt damit für österreichische Druckverhältnisse in einem akzeptablen Bereich.

Abschließend lässt sich allerdings festhalten, dass die Energieversorgung lediglich für den definierten Betriebsfall (2-mal täglich senden, 5-minütig messen) sinnvoll und gleichzeitig auch möglich ist. Eine Echtzeitüberwachung mit häufigerer Übertragung ist mit dem Messsystem so nicht möglich, da häufigere Verbindungsaufbauten und Datenübertragungen die Energiebilanz sehr stark negativ beeinflussen.

Zusammengefasst zeigen die im Rahmen dieser Arbeit ausgeführten Untersuchungen, dass trotz des hohem Stromverbrauchs durch das eingesetzte GSM-Modul der Langzeitbetrieb eines Druckmesssystems möglich ist. Die Energieversorgung kann bereits über eine Mikroturbine am Trinkwasserhausanschluss von Einfamilienhäusern sichergestellt werden. Die durchgeführten Untersuchungen lassen auf ein hohes Potential des Messsystems - auch aufgrund der Optimierungsmöglichkeiten - bei flächendeckenden Einsatz für die Detektion von Leckagen in Trinkwassernetzen schließen.

## Literaturverzeichnis

- Adafruit Industries (2017) Adafruit RTCLib. [online] <https://github.com/adafruit/RTCLib> (Zugegriffen 21. Juni 2018).
- Arbeiterkammer (2017) Smart Meter. [online] [https://www.arbeiterkammer.at/beratung/konsument/Datenschutz/FAQs\\_zum\\_Smart\\_Meter.html](https://www.arbeiterkammer.at/beratung/konsument/Datenschutz/FAQs_zum_Smart_Meter.html) (Zugegriffen 11. Juni 2018).
- Arduino (2018) Arduino IDE. [online] <https://www.arduino.cc/en/Main/Software?> (Zugegriffen 21. Juni 2018).
- Austrian Standards (2012a) Geprüfte Werkstoffe für gesundes Trinkwasser. [online] <https://www.austrian-standards.at/presse/meldung/gepruefte-werkstoffe-fuer-gesundes-trinkwasser/> (Zugegriffen 23. August 2018).
- Austrian Standards (2012b) *ÖNORM B 2531:2012-09-01: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Nationale Ergänzungen zu den ÖNORMEN EN 806-1 bis -5*, Österreichisches Normungsinstitut.
- Austrian Standards (2018) *ÖNORM B 2538:2002-11-01: Wasserversorgung - Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden*, Österreichisches Normungsinstitut.
- Austrian Standards (2016) *ÖNORM B 5014-1:2016-08-15: Sensorische und chemische Anforderungen und Prüfung von Werkstoffen im Trinkwasserbereich - Teil 1: Organische Werkstoffe*, Österreichisches Normungsinstitut.
- Austrian Standards (2017a) *ÖNORM B 5014-2:2017-01-01: Sensorische und chemische Anforderungen und Prüfung von Werkstoffen im Trinkwasserbereich - Teil 2: Zementgebundene Werkstoffe*, Österreichisches Normungsinstitut.
- Austrian Standards (2017b) *ÖNORM B 5014-3:2017-05-01: Sensorische und chemische Anforderungen und Prüfung von Werkstoffen im Trinkwasserbereich - Teil 3: Metallische Werkstoffe*, Österreichisches Normungsinstitut.
- Austrian Standards (2001) *ÖNORM EN 806-1:2001-03-01: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 1: Allgemeines*, Österreichisches Normungsinstitut.
- Austrian Standards (2005) *ÖNORM EN 806-2:2005-07-01: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 2: Planung*, Österreichisches Normungsinstitut.

- Austrian Standards (2013) *ÖNORM EN 806-3:2013-08-01: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 3: Berechnung der Rohrinnendurchmesser - Vereinfachtes Verfahren*, Österreichisches Normungsinstitut.
- Austrian Standards (2010) *ÖNORM EN 806-4:2010-07-15: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 4: Installation*, Österreichisches Normungsinstitut.
- Austrian Standards (2012c) *ÖNORM EN 806-5:2012-03-15: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 5: Betrieb und Wartung*, Österreichisches Normungsinstitut.
- Bundesministerium für soziale Sicherheit und Generationen (2018) *Trinkwasserverordnung - TWV*, [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20001483> (Zugegriffen 12. Juni 2018).
- Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (2010) *Intelligente Messgeräte-Einführungsverordnung - IME-VO*, [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20007808> (Zugegriffen 12. Juni 2018).
- Conrad Electronic (2018) [online] <https://www.conrad.at/> (Zugegriffen 28. August 2018).
- Cuomo F. (2017) A modified arduino library for DS3231 RTC. [online] <https://github.com/FabioCuomo/FabioCuomo-DS3231> (Zugegriffen 21. Juni 2018).
- D. Biner, V. Hasmatuchi, F. Avellan, & C. Münch-Alligné (2015) „Design & performance of a hydraulic micro-turbine with counter-rotating runners“ in 2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE)., 1–10.
- depez (2010) CHAR(x) vs. VARCHAR(x) vs. VARCHAR vs. TEXT. [online] <https://www.depez.com/2010/03/02/charx-vs-varcharx-vs-varchar-vs-text/> (Zugegriffen 20. Juni 2018).
- Espressif (2018) *ESP8266EX Datasheet*,
- Europäisches Parlament & Rat der europäischen Union (2016) *Datenschutz-Grundverordnung (EU)*, [online] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016R0679&from=DE> (Zugegriffen 12. Juni 2018).
- Europäisches Parlament & Rat der europäischen Union (2009) *Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt*, [online] <https://www.e-control.at/documents/20903/-/-/dfaefbc9-02ae-4f4b-a1c1-c9ce43b44c5c> (Zugegriffen 12. Juni 2018).

- Filakovsky F. & Kelemen M. (2017) The Basics in Designing a Mobile Robot. *Journal of Automation and Control*, **5**(2), 81–84.
- Fondation The Ark (2015) Eine innovative Miniturbine, um das Energiepotenzial der Wasserversorgungsnetze zu nutzen. [online] <http://www.theark.ch/de/news/eine-innovative-miniturbine-um-das-energiepotenzial-der-wasserversorgungsnetze-zu-nutzen-8176> (Zugegriffen 21. Juni 2018).
- Grafana Labs (2018) Grafana. [online] <https://grafana.com/> (Zugegriffen 21. Juni 2018).
- Hering E., Bressler K., & Gutekunst J. (2017) *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, Springer Berlin Heidelberg. [online] <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-54214-9>.
- Honeywell (2014) *Heavy Duty Pressure Transducers PX2 Series*,
- Honeywell (2018) *Heavy Duty Pressure Transducers PX3 Series*,
- Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (2012) *Konstruktiver Wasserbau Grundlagen Lenbehelf SS 2012*,
- KINETRON (2015) *Water Turbine Generator WTG3T250*,
- Kobold (2016) *Magnetisch-Induktiver Durchflussmesser Kompakt*,
- Korthauer R. (2013) *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Springer Berlin Heidelberg. [online] <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-30653-2>.
- maxim integrated (2015) *DS3231 Extremely Accurate I<sup>2</sup>C-Integrated RTC/TCXO/Crystal*,
- Neunteufel R., Richard L., & Perfler R. (2012) *Wasserverbrauch und Wasserbedarf*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. [online] <https://www.bmlfuw.gv.at/dam/jcr:5d05561a-53a5-47ad-b0b2-2df5d9bae05e/Wasserverbrauch%20und%20Wasserbedarf.pdf> (Zugegriffen 18. Mai 2017).
- Fritsch P., Hoch W., Merkl G., Otillinger F., Rautenberg J., Weiß M., & Wricke B. (2014) *Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Pollin Electronic GmbH (2014) *Relaiskarte RB-8/5V, 8-Kanal*,
- PostgreSQL Global Development Group (2018a) PostgreSQL. [online] <https://www.postgresql.org/> (Zugegriffen 21. Juni 2018).

- PostgreSQL Global Development Group (2018b) PostgreSQL Documentation Chapter 8. Data Types. [online] <https://www.postgresql.org/docs/9.5/static/datatype.html> (Zugegriffen 23. August 2018).
- Python Software Foundation (2018) Python. [online] <https://www.python.org/> (Zugegriffen 21. Juni 2018).
- Raspberry Pi Foundation (2018) *Raspberry Pi*, [online] <https://www.raspberrypi.org/> (Zugegriffen 28. August 2018).
- rocketscream (2018) Lightweight low power library for Arduino. [online] <https://github.com/rocketscream/Low-Power> (Zugegriffen 21. Juni 2018).
- Rödel S., Krätzig T., & Meyer L. (2016) Testing and developing energy harvester systems for operation of energy-self-sufficient measurement and control units in drinking water supply. *Water Science and Technology: Water Supply*, **16**(2), 263–273.
- Rohner A. (2015) How to modify an Arduino Pro Mini (clone) for low power consumption. [online] <https://andreasrohner.at/posts/Electronics/How-to-modify-an-Arduino-Pro-Mini-clone-for-low-power-consumption/> (Zugegriffen 28. August 2018).
- Schnabel P. (2018a) Lithium-Ionen-Akkus. [online] <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0810281.htm> (Zugegriffen 13. Juni 2018).
- Schnabel P. (2018b) Nickel-Metallhydrid-Akku (NiMH). [online] <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/1101251.htm> (Zugegriffen 13. Juni 2018).
- Schnabel P. (2018c) USB-PD - USB Power Delivery. [online] <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/com/1809251.htm> (Zugegriffen 24. Juni 2018).
- von Schoenebeck G. (2015) Strom durch Turbine in der Wasserleitung. [online] <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/strom-turbine-in-wasserleitung/> (Zugegriffen 24. März 2018).
- SciPy developers (2018) SciPy. [online] <https://www.scipy.org/> (Zugegriffen 21. Juni 2018).
- Pertl S. (2017) *Messungen am Energy-Harvester*, Technische Universität Graz.
- SIMCom (2013) *SIM800 Series\_AT Command Manual\_V1.01*,
- SIMCom (2015) *SIM800\_Hardware Design\_V1.08*,
- SQLAlchemy (2018) SQLAlchemy. [online] <https://www.sqlalchemy.org/> (Zugegriffen 21. Juni 2018).

- Steffelbauer D., Günther M., Neumayer M., & Fuchs-Hanusch D. (2017) *AZM – Aktives Zustandsmonitoring von Trinkwasserverteilnetzen*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft BMLFUW, Wien, Österreich.
- Texas Instruments (2018) *ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator*,
- Texas Instruments (2013) *LM2704 Micropower Step-up DC/DC Converter with 550mA Peak Current Limit*,
- Texas Instruments (2016) *LP2982 50-mA Micropower Ultra-Low-Dropout LDO in SOT-23 Package*,
- Timescale, Inc (2018) Timescale. [online] <https://www.timescale.com/> (Zugegriffen 21. Juni 2018).
- Tuschewitzki G.-J. & Schel C. (2013) *Materialien und Werkstoffe im Kontakt mit Trinkwasser aus Sicht der Trinkwasserverordnung*, [online] <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/wasser/qualitaet/1302schell.pdf> (Zugegriffen 12. Juni 2018).
- Wolf J. (2009) *C von A bis Z*,
- Wu Y. & Liu S. (2017) *A review of data-driven approaches for burst detection in water distribution systems*,
- Ye G. & Soga K. (2011) Energy Harvesting from Water Distribution Systems. *Journal of Energy Engineering*, **138**(1), 7–17.