



Angela Gratzner, BSc

# **Potentialanalyse energieeffizienter Druckmesssysteme**

Für die Leckagedetektion und -lokalisierung in  
Wasserversorgungssystemen

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur/In

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, Oktober 2019



Kontakt:  
Gratzer Angela  
angela.gratzer@gmail.com

## **EIDESSTÄTTLICHE 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.*

29. Oktober 2019

Datum / Date



Unterschrift / Signature



## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein Dank gilt dabei Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Daniela Fuchs-Hanusch und besonders Dipl.-Ing. Michael Pointl, BSc. vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der Technischen Universität Graz, welche das Entstehen dieser Arbeit ermöglicht und mich stets durch ihre fachkundliche Betreuung in den vergangenen Monaten unterstützt haben. Auch allen weiteren Kollegen des Instituts gilt mein Dank für eingebrachte Ideen und Impulse bei so mancher Diskussion.

Für die gewissenhaften Überprüfungen der Rechtschreibung und für die kritischen Anregungen zum Ausdruck und zu fachlichen Themen danke ich vor allem meinem Bruder Christoph.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Gabriela und Rudolf Gratzer, die mir mein Studium ermöglicht und mich in all meinen Entscheidungen bekräftigt haben, als auch meinen Brüdern Christoph und Bernhard, die mir besonders in Stresssituationen zur Seite standen.

Weiters möchte ich mich noch bei meinem Freund Rene bedanken, der in all den Jahren die Nerven behielt, obwohl ich diese teilweise schon verloren hatte und an meiner Seite stand, auch wenn die Entfernung unerträglich schien.

Nicht zuletzt möchte ich all meinen Studienkollegen, die ich in den vergangenen Jahren kennenlernen durfte, an dieser Stelle nochmals für die viele Unterstützung und gemeinsame Zeit, über das gesamte Studium hinweg, ein großes Dankeschön aussprechen. Nicht nur in der Vorlesungszeit waren die gemeinsamen Treffen eine willkommene Abwechslung, sondern auch die ein oder anderen „outgesourcten“ Grillfeiern waren, ohne Zweifel, phantastisch.



## Kurzfassung

Die technologischen Entwicklungen, rund um genaue Messtechniken und rasche Übertragungsmöglichkeiten, werden zukünftig Milliarden von Geräten miteinander verbinden. In dieser Arbeit wurde besonders Augenmerk auf Messsysteme gelegt, die im Smart-Water-Management Anwendung finden. Sie sollten Drücke aufzeichnen und die Ergebnisse innerhalb eines Wasserversorgungsnetzes übertragen können. Der Energieverbrauch der Druckmesssysteme sollte dabei so gering wie möglich gehalten werden.

Der Thematik eines solchen potentiellen und flächendeckenden Einsatzes in Wasserversorgungssystemen wurde bisher noch nicht genug Aufmerksamkeit geschenkt, obwohl davon auszugehen ist, dass diese Technik zukünftig eine zentrale Rolle in der Wasserversorgung einnehmen wird.

Ziel dieser Arbeit war es, die Leistungsfähigkeit und Grenzen von Messsystemen in Hinblick auf Leckagedetektion und Leckagelokalisierung zu analysieren. Es sollten Messsysteme gefunden werden, die die Leckagen schnell detektieren, sie möglichst genau lokalisieren, einen langfristigen Betrieb gewährleisten und mit einem geringem Wartungsaufwand verbunden sind. Am Ende sollte eine Empfehlung für ein geeignetes System stehen, welches die Aufgaben und Anforderungen bestmöglich abdeckt und dabei nicht zu kostenintensiv ist.

In erster Recherche wurde auf bereits vorherrschende Kommunikations- und Sensortechnologien in Verbindung mit Abtastraten und Aggregationsmethoden eingegangen. Mittels Ganglinienanalysen wurden die Vor- und Nachteile zwischen den Abtastraten und Aggregationsmethoden ermittelt. Die Aggregationsmethoden unterscheiden sich in die Einzelimpuls-, Mittelwert- und Medianmethode. Für die Abtastraten wurden selbst definierte Intervalle auf Basis der Literatur gewählt.

Die Kommunikationstechnologien unterscheiden sich grob in Langstrecken- und Kurzstreckenübertragungen. Für die Auswahl von Druckmesssystemen wurden allerdings nur die Langstreckentechnologien in Betracht gezogen.

Anschließend wurden über Laborversuche energieeffiziente Drucksensoren an einem Versuchsaufbau mittels Druckluft getestet. Mithilfe dieser Versuche sollten Aussagen hinsichtlich Energieverbrauch, Genauigkeit und Stabilität getroffen werden. Im Anschluss daran, wurden der Ergebnisse und Erkenntnisse zusammengefasst, um Laufzeitanalysemodelle erstellen zu können.

Am Ende konnte mittels eines Auswahlverfahrens ein geeignetes Druckmesssystem gewählt werden, welches alle Technologien in Verbindung bringt und optimale Bedingungen schafft. Die Ergebnisse der Messsysteme können sich daher stark voneinander unterscheiden, je nachdem, welche Eingangsparameter und anschließende Technologien ausgewählt werden.



## **Abstract**

Billions of monitoring devices will be connected in the future due to rapid developments in the fields of accurate measurement techniques and low-power transmission technologies. An application for such devices is pressure monitoring in the field of Smart-Water-Management. Suitable pressure-monitoring devices should be able to record and transmit pressure within water distribution networks at a high temporal resolution, while simultaneously keeping energy consumption as low as possible.

Although it can be assumed that in the near future, low-power monitoring devices will play an important role in day-to-day operations of water utilities, little effort has been made to investigate the potential and relevant boundaries for large-scale deployment of these devices in water distribution systems.

The aim of the thesis was to analyze the performance and limitations of measuring systems regarding leak detection and leakage localization. Ideal monitoring devices should be able to detect leakages quickly, locate them as accurately as possible and ensure long-term operation with little or possibly no on-site maintenance. The analyses conducted in this thesis are aimed at offering insights in the performance and limitations of such devices via a combination of literature review, data analysis and laboratory tests.

Laboratory tests were conducted to quantify the power consumption, reliability and accuracy of multiple low-power pressure sensors. Subsequently, based on a combination of laboratory tests and an extensive literature review, the power consumption of energy-efficient communication technologies for long-range communication was analysed for a wide spectrum of sampling rates, different data aggregation methods and data transmission intervals.

Findings from all these analyses were integrated in a simplified runtime evaluation for multiple low-power communication technologies, the results of which were used for performance comparison and the generation of a flow chart to support planners and water utilities to select monitoring devices best suited for their specific requirements and operating conditions.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Smart Cities	3
1.2	Smart Water	4
<b>2</b>	<b>Motivation und Zielsetzung</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Literaturstudie</b>	<b>7</b>
3.1	Leckagen	7
3.2	Methoden zur Leckagedetektion und -lokalisierung	8
3.2.1	Modellbasierte Methoden	9
3.2.2	Datenbasierte Methoden	11
3.2.3	Leistungsbewertung	13
3.3	Technologien zur Leckagedetektion und -lokalisierung	15
3.3.1	IoT-Kommunikationstechnologien	16
3.3.1	Drucksensoren	21
<b>4</b>	<b>Methodik und Datengrundlage</b>	<b>23</b>
4.1	Analyse von Daten realer Leitungsnetze	24
4.1.1	Versuchsgebiete und Datensätze	24
4.1.2	Bestimmung der Dauer des Nachtminimums	30
4.1.3	Analyse der Druckschwankungen	31
4.1.4	Visuelle Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Aggregationsmethoden	34
4.2	Messsystemanalyse	39
4.2.1	Drucksensoren	39
4.2.2	IoT-Module	43
4.2.3	Stabilität günstiger und energieeffizienter Drucksensoren	44
4.2.4	Einfache Laufzeitanalyse für die Messsysteme und Technologien	49
4.2.5	Laufzeitanalysen – einfaches Modell	51
4.3	Zusammenführen wesentlicher Randbedingungen	52
4.3.1	Aggregationsmethoden und Abstraten	53
4.3.2	Kommunikationstechnologien	54

4.3.3	Drucksensoren .....	54
<b>5</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>56</b>
5.1	Sensorversuche .....	56
5.1.1	Referenzsensor .....	56
5.1.2	Drucksensor Honeywell Typ PX2 .....	57
5.1.3	Drucksensor Honeywell Typ PX3 .....	59
5.1.4	Drucksensor Danfoss Typ MBS 2050.....	61
5.1.5	Stromverbrauch .....	63
5.2	Laufzeitanalyse .....	65
5.2.1	Laufzeitanalysen bei Betrieb über den ganzen Tag.....	65
<b>6</b>	<b>Auswahlverfahren – Zusammenführung der Erkenntnisse.....</b>	<b>67</b>
6.1	Aggregationsmethoden und Abstraten.....	67
6.2	Kommunikationstechnologien .....	68
6.3	Sensoren.....	70
6.4	Laufzeitanalysen .....	71
6.5	Zusammenführung der Ergebnisse .....	71
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>73</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>76</b>
	<b>Anhang A .....</b>	<b>1</b>
	<b>Anhang B .....</b>	<b>18</b>
	<b>Anhang C .....</b>	<b>35</b>
	<b>Anhang D .....</b>	<b>44</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Internet of Things – IoT (What is the Internet of Things?, 2019) .....	2
Abbildung 1-2:	Smart Cities (Smart Cities World, 2019) .....	3
Abbildung 1-3:	Smart City Graz (Rubikon Werbeagentur, 2019) .....	3
Abbildung 1-4:	IoT-Hierarchie Smart Water (IoT Architecture for Resource Efficiency in FSCs, 2019) .....	4
Abbildung 2-1:	Aufgaben und Anforderungen .....	6
Abbildung 3-1:	Vergleich der Kommunikationstechnologien (Connectivity Now and Beyond, 2019) .....	18
Abbildung 3-2:	SigFox-Abdeckung Österreich (SigFox, 2019) .....	20
Abbildung 4-1:	Arbeitsablauf über gesamten Zeitraum .....	23
Abbildung 4-2:	Leitungsnetz Zone Blau IV (Stadtgebiet Statistiken) .....	24
Abbildung 4-3:	Tagesgänge Sensoren in 1 min Abtastraten .....	26
Abbildung 4-4:	Leitungsnetz Zone Grün II (Stadtgebiet Statistiken) .....	26
Abbildung 4-5:	Tagesgänge Sensoren in 1 min Abtastraten .....	28
Abbildung 4-6:	Leitungsnetz Hart bei Graz (From Austria, Steiermark, Graz) .....	28
Abbildung 4-7:	Tagesgänge Sensoren in 1 min Abtastraten .....	29
Abbildung 4-8:	Tagesgang der Durchflussmessung im Behälter in 1 min Abtastraten .....	30
Abbildung 4-9:	Tagesgang der Durchflussmessung im Behälter in 1 min Abtastraten .....	30
Abbildung 4-10:	Tagesgang der Durchflussmessung im Behälter in 1 min Abtastraten .....	31
Abbildung 4-11:	Boxplots Zone Blau IV .....	32
Abbildung 4-12:	Boxplots Zone Grün II .....	33
Abbildung 4-13:	Boxplots Zone Hart bei Graz .....	33
Abbildung 4-14:	Exemplarische Darstellung der Diagramme .....	35
Abbildung 4-15:	Exemplarische Darstellung der Aggregationsmethoden .....	39
Abbildung 4-16:	Typ MBS 2050 (Danfoss, 2017) .....	40
Abbildung 4-17:	Typ PX2 (Honeywell, 2017) .....	41
Abbildung 4-18:	Typ PX3 (Honeywell, 2018) .....	41
Abbildung 4-19:	Typ 3100 Series (Gems Sensors&Controls) .....	43
Abbildung 4-20:	Pycom FyPy Mikrokontroller (Pycom, 2019) .....	44
Abbildung 4-21:	Versuchsablauf .....	45
Abbildung 4-22:	Beispielhafter Versuchsablauf .....	46
Abbildung 4-23:	Exemplarische Darstellung der Drucklinien .....	47
Abbildung 4-24:	Schematische Darstellung Laborversuch - Grundriss .....	48
Abbildung 4-25:	Schematische 3D-Darstellung Laborversuch .....	49

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 4-26:	Verbrauchsanteile 5 min – 15 min .....	52
Abbildung 5-1:	Stabilität des Referenzsensors .....	57
Abbildung 5-2:	Stabilität des Drucksensors Honeywell Typ PX2 .....	59
Abbildung 5-3:	Stabilität des Drucksensors Honeywell Typ PX3 .....	60
Abbildung 5-4:	Stabilität des Drucksensors Danfoss Typ MBS 2050 .....	62
Abbildung 5-5:	Sensorvergleich für Druckstufe von 5.0 bar .....	62
Abbildung 5-6:	Laufzeitanalysen über 24 Stunden .....	65
Abbildung 6-1:	Vor- und Nachteile der Aggregationsmethoden.....	68
Abbildung 6-2:	Eigenschaften der Sensoren während der Bewertung .....	70
Abbildung 6-3:	Entscheidungsprozess.....	72

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Software-basierte Methoden (Li et al., 2015, modifiziert) .....	9
Tabelle 3-2:	Rein hardware-basierte Methoden (Li et al. 2015, modifiziert).....	10
Tabelle 3-3:	Modellbasierte Methoden nach (Puust et al., 2010, modifiziert).....	10
Tabelle 3-4:	Darstellung verschiedener Methoden zur Rohrbruchdetektion und -lokalisierung (Wu & Liu, 2017, modifiziert).....	12
Tabelle 3-5:	Ausgewertete Kriterien der Leistungsbewertung (Wu & Liu, 2017, modifiziert) .....	14
Tabelle 3-6:	Vergleich von LoRa-IoT- und NB-IoT-Technologie auf Basis verschiedener Anforderungen .....	16
Tabelle 3-7:	Vergleich der angesprochenen Technologie auf Basis verschiedener Eigenschaften (Ali et al. 2017, modifiziert).....	18
Tabelle 3-8:	Vor- und Nachteile der Sensor-Technologien.....	22
Tabelle 4-1:	Wertebereiche aus Realdaten .....	34
Tabelle 4-2:	Mittlere Nachtminima der Zonen .....	34
Tabelle 4-3:	Exemplarische Darstellung der Abtastraten .....	36
Tabelle 4-4:	Drucksensoren .....	39
Tabelle 4-5:	Durchschnittliche Übertragungsdauern (Pointl et al., 2018) .....	44
Tabelle 4-6:	Konfiguration über 24 Stunden.....	50
Tabelle 4-7:	Konfiguration über 1.5 Stunden (Nachtminimum).....	50
Tabelle 4-8:	Eingangsdaten für Messsystembeispiele (Pycom, 2019, modifiziert).....	51
Tabelle 4-9:	Auswahl der Aggregationsmethoden.....	53
Tabelle 4-10:	Auswahl von Sensoren.....	55
Tabelle 5-1:	Werteverteilung des Referenzsensor aller Druckstufen .....	56
Tabelle 5-2:	Werteverteilung des Drucksensors Honeywell Typ PX2 aller Druckstufen [V].....	58
Tabelle 5-3:	Werteverteilung des Drucksensors Honeywell Typ PX2 aller Druckstufen [bar] .....	58
Tabelle 5-4:	Prozentuelle Abweichung Drucksensor Honeywell Typ PX2 .....	58
Tabelle 5-5:	Werteverteilung des Drucksensors Honeywell Typ PX3 aller Druckstufen [V].....	59
Tabelle 5-6:	Werteverteilung des Drucksensors Honeywell Typ PX3 aller Druckstufen [bar] .....	60
Tabelle 5-7:	Prozentuelle Abweichung Drucksensor Honeywell Typ PX3 .....	60

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 5-8: Werteverteilung des Drucksensors Danfoss Typ MBS 2050 aller Druckstufen [V] .....	61
Tabelle 5-9: Werteverteilung des Drucksensors Danfoss Typ MBS 2050 aller Druckstufen [bar] .....	61
Tabelle 5-10: Prozentuelle Abweichung Drucksensor Danfoss Typ MBS 2050 .....	61
Tabelle 5-11: Spannungsverlauf des Drucksensors Honeywell Typ PX2.....	63
Tabelle 5-12: Spannungsverlauf des Drucksensors Honeywell Typ PX3.....	63
Tabelle 5-13: Spannungsverlauf des Drucksensors Danfoss Typ MBS 2050 .....	64
Tabelle 6-1: Kommunikationstechnologien ((Ali et al., 2017), modifiziert).....	68

## Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog to Digital Converter
AL	Acoustic Logging
ANN	Artificial Neural Network
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BIS	Bayesian Inference System
DMA	District Metering Area
DT	Detection Time
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FDA	Frequency Domain Analysis
FIS	Fuzzy Inference System
FPR	False Positive Rate
FRM	Frequency Domain Response Analysis
GPR	Ground Penetrating Radar
GSM	Global System for Mobile Communications
H2H	Human to Human
IoT	Internet of Things
IQR	Interquartile Range
IR	Thermal Infrared
IRA	Impulse Response Analysis
ISM	Industrial, Scientific and Medical Band
ITA	Inverse Transient Analysis
IWA	International Water Association
LNC	Leak Noise Correlators
LoRa	Long Range
LPWA	Low Power Wide Area
LRM	Leak Reflection Method
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to Machine
MDN	Mixture Density Network
NB	Narrow Band
OFWAT	Water Services Regulation Authority
PMA	Pig – Mounted Acoustic
QoS	Quality of Service
SPC	Statistical Process Control
TDA	Time Domain Analysis
TDM	Transient Damping Method
TGT	Tracer Gas Technique
TPR	True Positive Rate

## Abkürzungsverzeichnis

UNB	Ultra-Narrow Band
USB	Universal Serial Bus
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WVS	Wasserversorgungssystem
WVU	Wasserversorgungsunternehmen

# 1 Einleitung

Aufgrund des raschen Wachstums der technologischen Möglichkeiten, wie z.B.: genauere Messtechniken und verbesserte als auch raschere Übertragungsmöglichkeiten, werden bis zum Jahr 2020 Milliarden von Geräten miteinander über drahtlose Kommunikation verbunden sein (Sinha et al., 2017). Mithilfe des Internet der Dinge (engl. Internet of Things, IoT) können physische und virtuelle Gegenstände in einer globalen Infrastruktur miteinander vernetzt werden und über Informations- und Kommunikationstechniken zusammenarbeiten. Daher wird eine Vielfalt an unterschiedlichen Kommunikationstechnologien betrachtet.

Diese sind von sehr schnellen technischen Neuerungen abhängig und können (Sinha et al., 2017):

- Technologien für die Verbindung von Alltagsgegenständen und Geräten mit großen Datenmengen und Netzwerken und
- Technologien für die Datenerfassung und Erkennung von Änderungen der physischen Stadien sein.

Daher sind im Raum des Internet of Things Low-Power-Wide-Area (LPWA)-Technologien nicht mehr wegzudenken. LPWA-Netze kommunizieren über weitere Entfernungen, als andere Netzwerke. *„Dieser Begriff bezieht sich nicht auf eine spezifische Technologie, sondern dient als Oberbegriff für jedes Netzwerk, das für drahtlose Kommunikation mit niedrigerer Energie als andere Netzwerke wie Mobilfunk-, Satelliten- oder WiFi-Netzwerke konzipiert wurde.“* (LPWA – Definition und Details, 2019)

Es gibt eine Vielzahl an LPWA-Technologien, wobei die zwei am häufigsten eingesetzten die Narrow-Band-IoT (NB-IoT) und Long-Range (LoRa)-Technologie sind. (Sinha et al., 2017)

LPWA-Netze werden mehrheitlich für die Machine-to-Machine (M2M)-Kommunikation verwendet. M2M-Technologien ermöglichen eine Kommunikation ohne menschliche Eingriffe, die also automatisiert durchführbar ist.

Das größte Problem von Messsystemen lässt sich beim Energieverbrauch finden. Nicht nur die Kommunikationstechnologien verbrauchen einen bestimmten Anteil der Energie von Messsystemen, sondern auch die Sensoren.

Weiters kann bei batteriebetriebenen Sensoren, in Bereichen von Brücken oder Hochhäusern, die Lademöglichkeit oder der Austausch der Batterien sehr schwierig sein und die Lebensdauer und die Funktionsfähigkeit der Sensoren sollte jedoch hoch sein. Aufgrund der Produktion vieler unterschiedlicher Sensoren, mit geringen Standards, wird dadurch die Interaktion zwischen den Objekten deutlich erschwert.

## Einleitung

---

Solche Sensoren müssen identifiziert und in Kommunikationsnetzwerke integriert werden, sodass der Informationsaustausch, statisch sowohl als auch dynamisch, erfolgen kann. Bei dem statischen Austausch erfolgt die Inbetriebnahme einmalig und wird manuell durchgeführt, wobei beim dynamischen Austausch eine Rekombination und Rekonfiguration jederzeit und ohne menschliche Hilfe möglich ist.

Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Anwendungsbereichen für diese Messsysteme im IoT, wie z.B.: Produktionstechnik, Smart Cities und Smart Building, Energie, usw. Jeder einzelne Bereich besitzt eigene spezifische Anforderungen, welche aber ohne großen Aufwand umgesetzt werden sollten. Der Energiebedarf sollte daher so gering wie möglich gehalten werden.

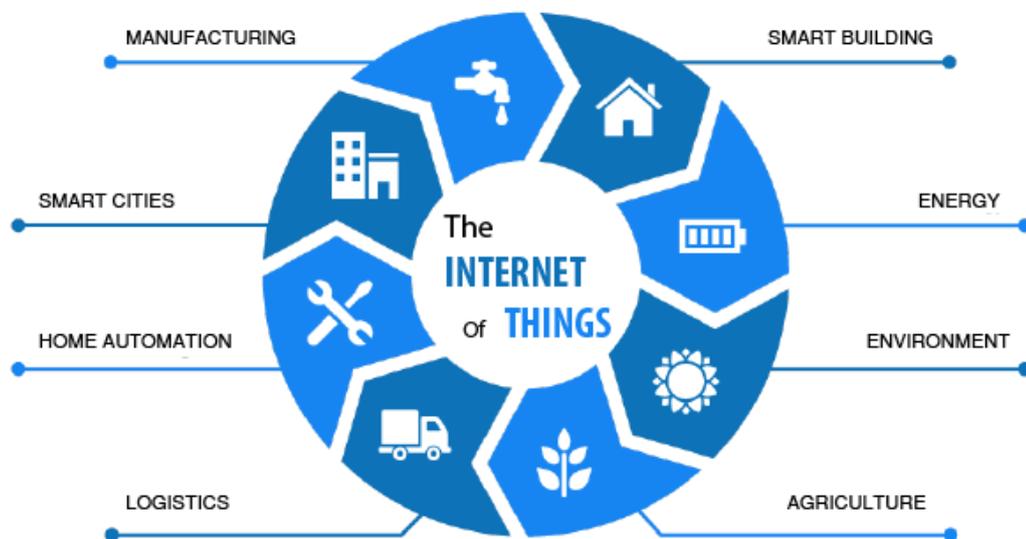


Abbildung 1-1: Internet of Things – IoT (What is the Internet of Things?, 2019)

Die Anforderungen der Systeme des IoT in Hinblick auf Abdeckung, Zuverlässigkeit, Latenz (Verzögerung bei der Datenübertragung) und Kosteneffizienz müssen abgewogen werden.

IoT kann mit Einbeziehungen der genannten Betrachtungen daher

- Echtzeitsteuerung
- neue Geschäftsmodelle
- Prozessoptimierung
- Ressourcenschonung
- und Reduzierung der Servicezeit ermöglichen.

Das IoT besitzt auch eine Vorreiterrolle in Sachen Digitalisierung von Städten, wodurch die Arbeit mit Messsystemen in Wasserversorgungssystemen (WVS) erleichtert werden kann.

## 1.1 Smart Cities

*„Mit dem Begriff Smart City wird eine energieeffiziente, ressourcenschonende und emissionsarme Stadt höchster Lebensqualität bezeichnet, wo neueste Energietechnologien zur Anwendung kommen.“ (Smart City Graz, 2019)*

Smart Cities dienen dazu, die Überwachung der Verfügbarkeit von Parkplätzen, Überwachung von Vibrationen und Materialzustände in Gebäuden und Brücken und so weiter zu erleichtern. Die Bandbreite dieser unterschiedlichen Anwendungen reicht von klein bis groß.



Abbildung 1-2: Smart Cities (Smart Cities World, 2019)

Ein Beispiel für eine geplante Smart City, in der Nähe, befindet sich in Graz, im Umfeld der Waagner-Biro-Straße und Graz-Reininghaus.



Abbildung 1-3: Smart City Graz (Rubikon Werbeagentur, 2019)

## 1.2 Smart Water

Ein Teilgebiet von Smart Cities ist Smart Water, welches sich mit der Untersuchung der Eignung des Wassers in Flüssen und im Meer für die Landwirtschaft und der Trinkwassernutzung, sowie Überwachung der Druckschwankungen entlang von Rohrleitungen befasst (Bhuvancswari & Porkodi, 2014).

Welche Art von Messsystem für Smart Water angewendet werden kann, ist von einigen Faktoren abhängig:

- Verbindung von Alltagsgegenständen und Geräten mit großen Datenbanken und Netzwerken
- Datenerfassung und Fähigkeit, Abweichungen zum Normalzustand zu erkennen
- und die Fähigkeit, etwas zu schaffen, damit zu interagieren und dies zu verbinden.

Die IoT-Hierarchie für Smart Water kann in vier Ebenen aufgeteilt werden (Pacheco et al., 2017):

- Anwendungs- (engl. Application layer)
- Dienst- (engl. Service layer)
- Kommunikations- (engl. Network layer)
- und Messebene (engl. Sensing layer).

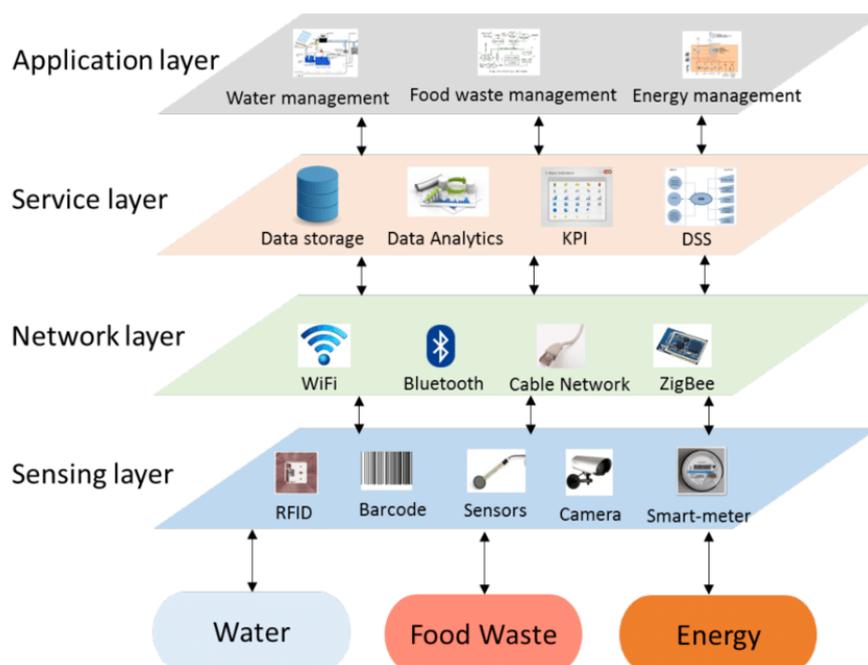


Abbildung 1-4: IoT-Hierarchie Smart Water (IoT Architecture for Resource Efficiency in FSCs, 2019)

Die Messsysteme innerhalb von Smart Water können physische Affekte erfassen und auf eine spezifische Art und Weise darauf reagieren. Ein Messsystem hat die Aufgabe, die auftretenden Signale in eine analoge oder digitale Form umzuwandeln, sodass die Rohdaten für Mensch und Maschine lesbar dargestellt werden können. Befinden sich in einem Netzwerk mehrere Sensoren, so stellt jeder dieser Sensoren einen Knoten dar und nachträgliche Implementationen sind kein Problem. Die Konnektivität ist jedoch eine anspruchsvolle Aufgabe, welche soweit optimiert werden muss, dass es zu keinen übermäßigen Problemen während der Datenübertragung kommt. Die Vielzahl an Knoten können entweder drahtgebunden oder drahtlos miteinander verbunden werden, wobei ein drahtloses Netzwerk über ein kleines Gerät mit geringer Leistung, welches über

- Stromversorgung
- Datenspeicher
- Mikroprozessoren
- Funkgerät mit niedrigem Stromverbrauch
- Analog-Digital-Umwandler (ADCs)
- Datentransceiver
- und Controller verfügt (Bhuvancswari & Porkodi, 2014).

Die Hauptaufgabe der anschließenden Messprotokolle liegt darin, die End-to-End-Zuverlässigkeit (direkte Verbindung zwischen zwei Punkten ohne Zwischenstationen) sicherzustellen, welche ein Maß für die Servicequalität ist (Bhuvancswari & Porkodi, 2014).

Intelligente Infrastrukturen können jedoch durch die Vielzahl an vorhandenen Schnittstellen angegriffen werden, einschließlich physischem Zugriff durch Universal-Serial-Bus (USB) oder drahtlose Kanäle. Weiters stellt die Fähigkeit des Zugriffs auf Subsysteme durch Kompromittierung einer einzelnen Steuereinheit über interne Kommunikation ein großes Problem dar. Dadurch können schädliche Befehle auf das Steuersystem ausgeführt werden, die ungewollte Aktionen zur Folge haben (z.B.: Veränderung der Daten). Deshalb müssen alle Schwachstellen und Bedrohungen in einem Messsystem identifiziert und Abhilfemaßnahmen müssen angewendet werden. IoT-Dienste müssen deshalb (Pacheco et al., 2017):

- vor epidemischen Angriffen schützen
- Sicherstellen, dass kritische Fehler und Angriffe überstanden werden können
- sowohl als auch die Sicherheit und Datenschutz der tatsächlich benötigten Daten gewährleisten.

## 2 Motivation und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die Leistungsfähigkeit von IoT-Messsystemen zu analysieren und deren Grenzen zu quantifizieren. Der Fokus wird dabei auf den Bereich der Leckagedetektion und -lokalisierung in Wasserversorgungssystemen geworfen.

Die Eignung der Messsysteme sollte dabei auch in Bezug auf Art und Häufigkeit der Datenübertragung, sowie an zeitliche Auflösung und Genauigkeit der Messdaten bewertet werden.

Daher ist es von großer Bedeutung, Messsysteme zu finden, die zum einen langfristig und ohne hohen Wartungsaufwand betrieben werden können und zum anderen geeignet sind, um Leckagen schnell zu detektieren und möglichst genau zu lokalisieren.

Die Messsensoren müssen für einen potentiellen, flächendeckenden Einsatz in WVS hinsichtlich Energieverbrauch, Genauigkeit und Stabilität auf Basis von Daten aus Feldversuchen experimentell untersucht werden.

Es gibt eine Vielzahl an IoT-Messsystemen, welche bereits in Testgebieten installiert wurden und sich mit der Leckagedetektion und Leckagelokalisierung beschäftigen.

Gemäß den Anforderungen an Smart Water in Verbindung mit IoT, werden Drucksensoren mittels Druckluft und an einem Versuchsaufbau getestet und anschließend daran, die Messsysteme hinsichtlich Energieverbrauch verglichen.

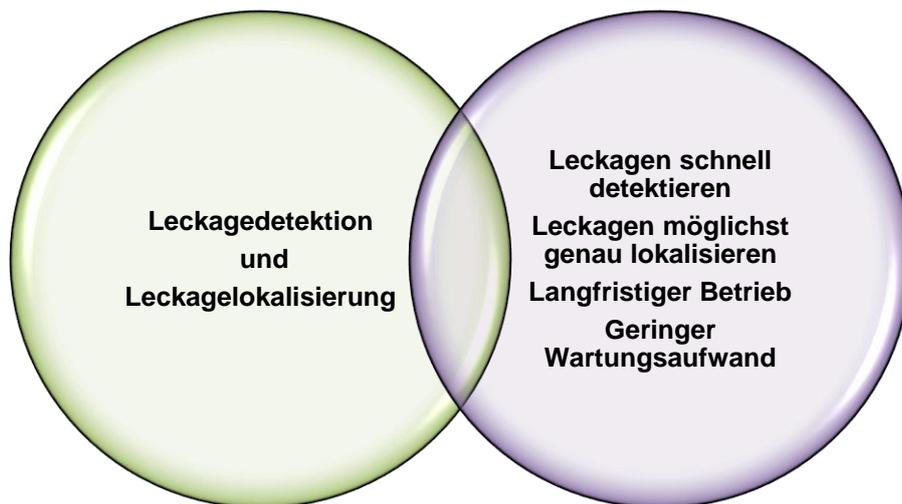


Abbildung 2-1: Aufgaben und Anforderungen

Am Ende sollte eine gemeinsame Schnittstelle zwischen den Aufgaben und Anforderungen geschaffen werden, wobei dies in den nächsten Kapiteln überprüft wird.

### 3 Literaturstudie

In diesem Kapitel wird auf die vorherrschenden Methoden zur Leckageeingrenzung, Kommunikationstechnologien und die Technologien der Drucksensoren, welche im Smart Water Anwendung finden, eingegangen. Dies ist nötig, um einen Überblick über die Bestandteile und Funktionsweisen eines Messsystems zu kriegen.

Es gibt schon eine Vielzahl an daten- sowohl als auch modellbasierten Methoden zur Leckagedetektion und -eingrenzung, auf Welche Bezug genommen werden kann und die nachstehend erläutert werden. Bei beiden Arten werden sowohl die Vorteile, als auch die Problematiken und Unsicherheiten beschrieben.

Danach wird auf die Vielzahl an Kommunikationstechnologien, mit denen die Drucksensoren arbeiten können, eingegangen und anschließend erfolgt eine kurze Erläuterung der Funktionsweisen von den Sensoren.

Zu aller Erst wird aber auf den Begriff Leckage eingegangen und welche Probleme im Zusammenhang mit Wasserversorgungssystemen auftreten können. Weiters wird die Bewertung einer auftretenden oder nicht auftretenden Leckage in Verbindung mit der hiesigen Detektion und Lokalisierung erläutert.

#### 3.1 Leckagen

Es muss der Bedarf aus öffentlichen, gewerblichen und industriellen Betrieben in WVS gedeckt werden, da diese von Leckagen unterschiedlicher Intensität und Lage ausgesetzt sind. Eine Leckagedetektion ist daher unumgänglich. Leckagen können entstehen durch (Moczulski et al., 2018):

- natürliche Abnutzungserscheinungen
- Korrosion der Innen- und Außenflächen von Rohren
- mechanische Schäden an Rohren durch übermäßige Belastungen
- Montagefehler
- jahreszeitliche Temperaturschwankungen
- Bodenbewegungen
- und Materialfehler in den Rohren.

Die Wasserverluste währenddessen können von verschiedenen Kriterien und technischen Standards abhängen, betragen jedoch in Industrieländern ca. 3 – 7 % und in Entwicklungsländern bis zu 50 % des gesamten Wasserverbrauches. Die Leckagen können nicht nur zu einer enormen Verschwendung von Wasser und Energie führen, sondern könnten des Weiteren die Wasserqualität benachteiligen (Moczulski et al., 2018).

Tritt eine Leckage in Wasserversorgungssystemen auf, so kann dies zu beachtlichen wirtschaftlichen Verlusten beim Transport führen. Die Verluste können die Instandhaltungskosten eines Netzes steigen lassen, welche nicht nur vom Wasserunternehmen sondern auch vom Endverbraucher zu tragen sind (Ferrandez-Gamot et al., 2015).

Durch das Auftreten von Leckagen gehen im Jahr rund 32 Milliarden m<sup>3</sup> (entspricht rund 81 Milliarden US-Dollar) verloren (Walski et al., 2009).

Eine Leckage kann, in Bezug auf Messsystemen, in drei Komponenten geteilt werden (Thornton et al., 2002):

- *Gemeldete Rohrbrüche und Undichtigkeiten*: Hohe Durchflussraten über kurze Laufzeiten; können stören und deshalb erkannt werden
- *Nicht gemeldete Pausen und Undichtigkeiten*: gemäßigte Durchflüsse über lange Laufzeiten; können durch aktive Detektionen lokalisiert werden
- *Sonstige Verluste*: Einzelereignisse aus Fugen, Armaturen und kleineren Rissen; sehr geringe Durchflussraten mit zufälliger Lokalisierung

### **3.2 Methoden zur Leckagedetektion und -lokalisierung**

Die Methoden zur Leckagedetektion und -eingrenzung können entweder daten-sowohl als auch modellbasiert arbeiten.

Unter datenbasierten Methoden versteht man das Arbeiten mittels verschiedener Verarbeitungsmodelle (z.B.: Klassifizierungs- oder statistische Methode, Clusteranalysen). Durch die Software-basierte Modellbildung auf Basis der Daten können über selbst berechnete zu hohe Abweichungen, im Vergleich zu den vorhandenen Ist-Daten, die Leckagen im Netz detektiert und auch lokalisiert werden.

Bei den modellbasierten Methoden werden die vorhandenen realen Datensätze, für die Erstellung eines hydraulischen Modells des betrachteten Wasserversorgungsnetzes, herangezogen. Mithilfe der Daten wird das Ausgangsmodell soweit validiert und kalibriert, dass im späteren Soll-Ist-Vergleich die Leckagen erkannt und geortet werden. Es kann dabei in Hardware- und Software-basierte Methoden unterschieden werden. Unter rein Hardware-basierte Methoden versteht man unter anderem die Bodenradar-Technologie als auch Gasinjektionen. Software-basierte Methoden können, im Unterschied dazu, künstliche neuronale Netze sein (Li et al., 2015). Bei Verwendung von Software-basierten Methoden kann z.B.: EPANET (US EPA, 2019) oder auch OOPNET (Steffelbauer, D. & Fuchs-Hanusch, D., 2015), zur Modellierung von Wasserverteilungssystemen, herangezogen werden.

Im Vergleich zu modellbasierten Methoden müssen bei datenbasierten Methoden die physikalischen Eigenschaften des untersuchten Wasserversorgungsnetzes

nicht bekannt sein. Allerdings kann es vorkommen, dass die Rohdaten für beide Varianten vorverarbeitet und eigens untersucht werden müssen.

Bei beiden Varianten werden die Vor- und Nachteile in Bezug auf Abstraten und herangezogene Datensätze ermittelt. Ziel dieser Methoden ist eine möglichst hohe True-Positive-Rate und gleichzeitig möglichst niedrige False-Positive-Rate zu erreichen.

Anschließend werden unterschiedlichsten Methoden vorgestellt, die in verschiedensten Bereichen angewendet werden können.

Tabelle 3-1 können ausgewählte Software-basierte Methoden zur Rohrbruchdetektion und -lokation entnommen werden, die sowohl bei den datenbasierten als auch modellbasierten Methoden angewendet werden können.

Tabelle 3-1: Software-basierte Methoden (Li et al., 2015, modifiziert)

		Methode	Inspektionsbereich	Detektierbare Leckgröße	Genauigkeit
Software-basiert	Numerisch	Invertransiente Analyse (ITA)	5936 m	3 L/s	50 m
		Zeitbereichsanalyse (TDA)	37.2 m	0.01 L/s	0.38 m
		Frequenzbereichsanalyse (FDA)	2000 m	4.73 L/s	< 500 m
	Nicht-Numerisch	künstliches neuronales Netz (ANN)			
		Bayesianisches Inferenzsystem (BIS)			
		Goldene Schnittmethode			
		Kalman-Filterung			

Es kann erkannt werden, dass für die nicht-numerischen Technologien die Parameter für Inspektionsbereich, detektierbare Leckgröße und Genauigkeit der einzelnen Methode nicht angegeben wurden. Diese Eigenschaften wurden allerdings für die rein Hardware-basierten Technologien in Tabelle 3-2 angegeben.

#### Charakteristiken der Software-basierten Methoden (Li et al., 2015):

- niedrige Kosten
- Leckagen können rechtzeitig und genau erkannt sowie lokalisiert werden
- einen möglichen Leckagebereich bestimmen
- Anwendung anspruchsvoller Algorithmen und Prinzipien

### 3.2.1 Modellbasierte Methoden

Es gibt unterschiedliche modellbasierte Methoden, die je nach Anwendungsbereich herangezogen werden können. Diese Art der Methoden kann grob in rein Hardware- oder Software-basierte Technologien unterschieden werden (Li et al., 2015).

Tabelle 3-2: Rein hardware-basierte Methoden (Li et al. 2015, modifiziert)

Methode		Erfassungsbereich	Grad der Leckageerkennung	Genauigkeit	
Rein Hardware-basiert	Akustisch	Hörstangen	200 - 500 m	~ 0.003 L/s	30 - 75 m
		Leckkorrelatoren	15 - 2000 m	~ 0.03 L/s	< 0.6 m
		Leckgeräuschlogger	bezogen auf Genauigkeit	Lecks über 10 dB	2.5 m
	Nicht-Akustisch	Gasinjektion	1 m	Unlimitiert	< 1 m
		Bodenradar-Technologie (GPR)	1 m	0.33 L/s	0.001 m
		thermische Infrarotfotografie (IR)	bezogen auf Temperaturdifferenz	Temperaturdifferenz zwischen 0.05 – 0.10°C	0.1 mrad

Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 können die verschiedensten modellbasierte Methoden entnommen werden.

Charakteristiken der rein Hardware-basierten Methoden (Li et al., 2015):

- Lokalisierung der Leckage
- hohe Kosten und hoher Zeitaufwand
- nicht zeitgemäß
- nur für Erkennungen von Lecks in einem kleinen Bereich

Nach (Puust et al., 2010) können die modellbasierten Methoden noch in drei weitere Untergruppen unterteilt werden (siehe Tabelle 3-3).

Tabelle 3-3: Modellbasierte Methoden nach (Puust et al., 2010, modifiziert)

Leckagebewertung	<i>Top-Down</i>	IWA-Ansatz
		OFWAT-Ansatz
	<i>Bottom-up</i>	24-Stunden-Zonenmessung
		Minimaler Nachtdurchfluss
Leckageerkennung (Erkennung)	<i>Hydraulisch transientenbasierte Techniken</i>	Leckreflexionsmethode (LRM)
		inverse Übergangsanalyse (ITA)
		Impulsantwortanalyse (IRA)
		Übergangsdämpfungsverfahren (TDM)
		Frequenzbereichsantwortanalyse (FRM)

Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgeführt.

<b>Leckageerkennung (Lokalisierung)</b>	<i>Numerische Leckerfassung oder nur Lecklokalisierungsmethoden</i>	Akustische Protokollierung (AL)
		Stufentest
		Bodenbewegungssensoren (GPR)
		Bodenradargeräte
<b>Leckageerkennung (Ortung)</b>	<i>Teure hochpräzise Technologien</i>	Leckgeräuschkorrelatoren (LNC)
		Prüfgastechnik (TGT)
		sensorakustische Wahrnehmung (PMA)
<b>Leckagekontrolle</b>	<i>aktive Leckkontrolle</i>	künstliches neuronales Netz (ANN)
	<i>aktives Druckmanagement</i>	genetische Algorithmen

Durch die Vielfalt an Methoden zur Leckageerkennung, werden diese, aufgrund ständiger Weiterentwicklungen, immer anspruchsvoller und raffinierter. Unabhängig davon, um welche Methode es sich handelt, ist es üblich, einige dieser oben genannten Technologien miteinander in Verbindung zu bringen. Aber nicht alle oben genannten Methoden können, im Speziellen, nur für Wasserversorgungssystemen angewendet werden.

### 3.2.2 Datenbasierte Methoden

Es werden die datenbasierten Methoden zur Leckagedetektion in WVS betrachtet. Die datengesteuerten Ansätze werden in drei Kategorien klassifiziert (Wu & Liu, 2017):

- Klassifizierungsmethode
- Vorhersage-Klassifizierungsmethode
- und statistische Methode

Bei der Klassifizierungsmethode werden zu diesem Zeitpunkt vorhandene typische Verbräuche zum Vergleich der Daten herangezogen. Für die Klassifizierung wird die Methode des Artificial-Neural-Networks (ANN) angewendet. In der zweiten Methode erfolgt die Klassifizierung anhand einer Vorhersagephase, welche ältere hydraulische Datensätze für den Vergleich heranzieht. Dabei kann es auch zu einem Datenauswahlprozess kommen, der Ausreißer aussortieren kann und Unsicherheiten sorgfältig behandelt. Bei der Leckagedetektion mithilfe der statistischen Methode muss kein Vorhersage- oder nur Klassifikationsmodell erstellt werden. Speziell wird hier die Methode der Statistical-Process-Control (SPC) angewendet. Es können damit Prozessvarianten überwacht und Ausreißer aufgedeckt werden (Wu & Liu, 2017). Eine mögliche Einteilung dieser Methoden findet sich in Tabelle 3-4.

Tabelle 3-4: Darstellung verschiedener Methoden zur Rohrbruchdetektion und -lokalisierung (Wu &amp; Liu, 2017, modifiziert)

	Referenz	betrachteter Datensatz	Technik	Kategorie
Rohrbruchdetektion	Wu (2016)	Durchfluss	Clusteranalysen	
	Jung (2015)	Durchfluss	Multivariate Analysen	Statistische Methode
	Mounce (2014)	Durchfluss/Druck	binäre Korrelationsmatrixspeicher	
	Romano (2014a, 2014b)	Durchfluss/Druck	ANN	Vorhersage-Klassifizierungsmethode
	Mounce (2010)	Durchfluss/Druck	ARIMA	Vorhersage-Klassifizierungsmethode
	Romano (2012)	Durchfluss/Druck	ANN, SPC, BIS	
	Mounce and Machell (2006)	Durchfluss	statische und zeitverzögerte ANNs	Klassifizierungsmethode
Rohrbruchlokalisierung	Mounce (2003)	Durchfluss/Druck	MDN und Klassifizierungsmodul	Vorhersage-Klassifizierungsmethode
	Mounce (2010)	Durchfluss	MDN and FIS	Vorhersage-Klassifizierungsmethode
	Farley (2013)	Durchfluss/Druck	datengesteuerte Methode	Vorhersage-Klassifizierungsmethode
	Romano (2013)	Druck	geostatistische Modelle	

Auf Basis unterschiedlicher Methoden hat sich gezeigt, dass datengestützte Ansätze vielversprechend bei der realen Detektion von Rohrbrüchen sind, aber die Thematik der Fehllarme darf nicht unterschätzt werden. Es müssen jedoch umfassende Leistungsbewertungen erfolgen, da die Erkennung stark in Beziehung mit der Methodik und Größe des Rohrbruches steht. Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass die Detektion in Bezug auf Druckverlustdaten und nicht auf Durchflussdaten die Ortung erleichtern und die Investitionen reduzieren kann.

Rohrbrüche werden als eine Form von Leckagen, die durch kurze Dauer, aber typischerweise hohen Durchfluss gekennzeichnet sind, definiert (Wu & Liu, 2017). Kommt es zu abrupten Druckentlastungen an einem Punkt im System, so führt dies zu einer Energiedissipation, welche das Eindringen von Verunreinigungen ab dem Bruchpunkt ermöglicht. Kleinere Ausbrüche, die spät abends geschehen, können sehr schwer bzw. zum Teil gar nicht entdeckt werden. Verschiedene Faktoren, wie Rohrzustand, Betrieb und Wetter, können bei schlechten Bedingungen auch zu einem Bruch führen.

Ein typisches tägliches Nachfragemuster ist durch Spitzen in den Morgen- und Abendstunden geprägt, wobei Wetteränderungen oder verschiedene Ereignisse (Wetteränderungen, Urlaubszeit, usw.) auch eigene Verbraucherschwankungen aufweisen.

Anhand Tabelle 3-4 und nachfolgend Tabelle 3-5 kann erkannt werden, dass die Verwendung von statistischen und zeitverzögerten ANN's die dort Beste aller Methodiken bildet, jedoch muss berücksichtigt werden, dass dabei die selben modellierten Rohrbruchdaten verwendet wurden, und daher das Vertrauen in die Leistung dieser Methode verringert ist. Ob diese Problematik in den Griff bekommen wurde, oder ob es neuere Untersuchungen gab, konnte nicht erfasst werden.

### 3.2.3 Leistungsbewertung

Die nachfolgenden Erkenntnisse zur Leistungsbewertung stammen aus dem Paper von (Wu & Liu, 2017), wenn die Quelle nicht gesondert angegeben wurde.

Ob eine Leckage im Wasserversorgungssystem auftritt, kann positiv oder negativ ausfallen. Aufgrund der beiden Möglichkeiten entschied man sich im Allgemeinen für die Verwendung von True-Positive-Rate (TPR) und False-Positive-Rate (FPR).

Hinsichtlich der Seltenheit von Rohrbrüchen in WVS müssen gute Erkennungsmethoden die FPR klein halten, selbst wenn die TPR reduziert wird. Je höher FPR ausfällt, desto höher ist die Fehlalarmquote, was Arbeiter in Wasserversorgungsunternehmen dazu verleiten lässt, häufig auftretende Alarme zu ignorieren. Die genaue Detektionszeit muss für die Methoden erfasst werden, dies kann auf historische Daten basieren oder durch Bruchsimulationen im System erfolgen. Diese Simulationen wirken sich zwar positiv auf die Bestimmung von Detektionszeiten aus, aber Druckabfall und Verschlechterung der Wasserqualität können die Folge sein. Zusätzlich zur TPR und FPR stellt die detektierbare Bruchgröße einen wichtigen Aspekt dar, da einige Methoden in der Lage sind, nur relativ hohe Verluste zu erkennen.

Überwachungsgeräte und Übertragungseinrichtungen spielen eine wichtige Rolle, da eine Korrelation zwischen Qualität der Daten sowie Abtast- und Übertragungsfrequenzen herrscht und TPR, FPR und Detektionszeit (DT) werden direkt von der Hardwarebasis beeinflusst. Aufgrund der Komplexität der Daten (eventuell fehlerhaft oder anormal) kann es erforderlich sein, ein Datenvorverarbeitungsmodul zu verwenden, um Werte zu füllen oder zu ersetzen. Geschieht dieser Prozess über einen längeren Zeitraum von über einer Stunde, so löst das Modul einen Alarm aus, um vor einem Hardwareproblem zu warnen.

Es darf die Analyse von Unsicherheiten bei der Überwachung nicht vernachlässigt werden, da dies einen Prozess zum Verstehen der Daten ausdrückt. Messfehler werden erst bei der Datenerfassung erzeugt und sind daher von der Leistungsfähigkeit der im System verwendeten Messsysteme abhängig. Bei der Drucküberwachung im WVS kann es bei der Übertragung zu einem Signalrauschen kommen, was die Verwendung von Druckdaten einschränken kann. Fehlende Datensätze, egal ob von älteren Datensätzen oder aufgrund fehlerhafter

Datenübertragung, schränken die Kontinuität der Online-Nutzung ein und erhöhen die FPR.

Die Lokalisierung eines Rohrbruches stellt noch eine große Herausforderung dar. Daher wurde versucht, durch Anwendung geostatistischer Modelle, Rohrbrüche in einer kleinen Rohrgruppe von District-Metering-Areas (DMAs) zu ermitteln. Werden Drucksensoren in einem bestimmten Bereich optimiert (z.B.: Anzahl der Sensoren im Netz erhöhen), können die Investitionen gesenkt und die Örtlichkeit von Rohrbrüchen gleichzeitig erfasst werden. Aufgrund zu weniger Sensoren, oder falscher Platzierung dieser, kann die Fehlerdetektion im System stark variieren. Es kann dazu führen, dass in großen WVS nur sehr große Verluste und in sehr kleinen Netzen nur kleine Verluste detektiert werden können. Je nach Art der angewandten Methode kann der Zeitraum zum Erkennen des Rohrbruches oder der Leckage sehr stark variieren (von Sekunden bis zu Stunden) (Li et al., 2015).

Eine Abtastrate von 1 bis 15 min reicht für die Leckagedetektion aus, wobei hochfrequentierte Zeitreihen unter 15 min die Auswertungsleistung erheblich verbessern. Aufgrund von Versuchen konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass die Detektionszeit in realen Anwendungen länger sein kann, da auch die Datenkommunikationsfrequenz niedriger, als die Abtastrate sein kann. Zu berücksichtigen ist, dass kleine Abtastraten und Übertragungsfrequenzen hohe Investitionen in den Verteilerzentren bedeuten. Kleinere Lecks können meistens erst innerhalb mehrerer Tage detektiert werden, aber Große werden dafür innerhalb von 5 bis 10 min sichtbar. Für die Erkennung kleinerer Leckagen ist ein größerer Datensatz zum Vergleich notwendig, um Abweichungen darstellen zu können (Wu & Liu, 2017).

Tabelle 3-5 enthält Kriterien zur Leistungsbewertung von datenbasierten Methoden und es muss berücksichtigt werden, dass die Art der Bewertung nicht von allen, in Tabelle 3-4 genannten Referenzen, durchgeführt wurde.

Nicht nur die Messsysteme selbst, sondern auch die daten- sowohl als auch modellbasierten Methoden, die im Anschluss erläutert werden, verfolgen ebenso das Ziel, eine möglichst hohe True-Positive-Rate (TPR) und gleichzeitig möglichst niedrige False-Positive-Rate (FPR) zu erreichen.

Tabelle 3-5: Ausgewertete Kriterien der Leistungsbewertung (Wu & Liu, 2017, modifiziert)

Referenz	TPR [%]	FPR [%]	DT	Bruchgröße	Getesteter Datensatz	Abtastrate [min]
Romano (2014a, 2014b)	-	8	Meistens innerhalb 1h	5 %- 16 %	Offline Durchfluss- und Druckdaten	15

Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgeführt.

Mounce (2010)	-	15	Einige Stunden	-	Online Durchflussdaten	15
Mounce and Machell (2006)	75	0	-	2 %- 10 %	Offline Durchflussdaten	1
Mounce (2010)	-	15	Einige Stunden	-	Online Durchflussdaten	15

### 3.3 Technologien zur Leckagedetektion und -lokalisierung

Um eine Echtzeitüberwachung von Wassernetzen zu ermöglichen, werden Sensordaten aus Telemetrie- und mathematischen Modellen herangezogen. Diese Daten schaffen es, abnormale Situationen zu erkennen und zu diagnostizieren. Der Vergleich von realen Echtzeit-Sensordaten mit Vorhersagen von daten- sowohl als auch modellbasierter Methoden kann es schaffen, Leckagen zu detektieren oder Probleme mit der Wasserqualität aufzudecken (Pérez et al., 2014).

Die Festlegung der Abtast- und Übertragungsraten ist nicht nur für die Messsystemwahl, sondern auch später bei daten- sowohl als auch modellbasierten Methoden ausschlaggebend. Es sollten optimale Abtastraten für die Datenanalyse bestimmt werden, da sie in Analyse- und Modellergebnissen einen erheblichen Einfluss haben. Kleinere Abtastraten erhöhen die Analysemöglichkeiten (Creaco et al., 2016).

Aufgrund der Wahl aus unterschiedlichen Abtastraten wird auf die Messintervalle und damit die (Druck-)Sensoren und die Übertragungsintervalle in Verbindung mit Übertragungstechnologien Einfluss ausgeübt. Daher ist es von Bedeutung, möglichst effiziente Messsysteme mit neuen Technologien und Sensoren für lange Laufzeiten und hohe Performance auszuwählen.

Daher wird in den nachfolgenden Kapiteln nicht nur auf die Arbeitsweisen der Kommunikationstechnologien für die Datenübertragung, sondern auch auf die der Drucksensoren eingegangen, die für die Leckagedetektion und -lokalisierung herangezogen werden können. Die hier betrachteten Sensoren arbeiten druckbasiert, da Druckluft eine kostengünstigere Variante, im Vergleich zu Wasser, für die Versuche darstellt.

Immer mehr Messsysteme können zur Trinkwassernetzüberwachung herangezogen werden, die günstig und extrem energieeffizient sind und flächendeckend eingesetzt werden können und somit können viele neue Möglichkeiten geschaffen werden. Dabei setzen die Messsysteme, meist ein Sensor, in Kombination mit einem Microcontroller mit Übertragungsmodul eine Batterie als Stromquelle ein und können daher langfristig wartungsfrei und damit kostengünstig betrieben werden. Übertragungsmodule bzw. Technologien aus dem Bereich des IoT leisten einen wesentlichen Beitrag für die Entwicklung.

### 3.3.1 IoT-Kommunikationstechnologien

Es gibt eine Vielzahl an drahtlosen Kommunikationen zwischen den verschiedenen Messsystemen für die Datenübertragung, die im IoT angewendet werden, wobei hier im Detail auf einige unterschiedlichen Technologien eingegangen wird, die in Verbindung mit der Leckagedetektionen gebracht werden können.

#### 3.3.1.1 Low-Power-Wide-Area (LPWA)

LPWA-Technologien ermöglichen eine großflächige Kommunikation auf Basis niedriger Kosten und günstigen Stromverbrauch. Viele dieser Technologien entstanden entweder in lizenzierten oder nicht lizenzierten Märkten (Sinha et al., 2017). LPWA-Technologien werden grob in LoRa- und NB-IoT unterschieden.

##### 3.3.1.1.1 Long-Range (LoRa)

Unter LoRa versteht man eine nicht lizenzierte Technologie, die mittels eines Bands mit 1 GHz und einer Reichweite bis zu 15 km, in städtischen Gebieten bis zu 2 km, arbeitet (LoRa Funktechnologie, 2019). Der Vorteil liegt in der Langstreckenfähigkeit und bei der Verwaltung der Datenrate.

##### 3.3.1.1.2 Narrow-Band-(NB-)IoT

NB-IoT ist zwar in dem lizenzierten Long-Term-Evolution-Standard (LTE) integriert, es kann aber auch als neue Luftschnittstelle angesehen werden. Der Vorteil hierbei liegt darin, dass das System so einfach wie möglich gehalten wird, um die Gerätekosten und den Batterieverbrauch möglichst gering halten zu können. Aufgrund dessen werden LTE-Standards, wie Messungen zur Überwachung der Kanalqualität und duale Konnektivität, entfernt (Sinha et al., 2017).

In Tabelle 3-6 wird exemplarisch auf die Vor- und Nachteile von LoRa und NB-IoT eingegangen. Sie werden in Bezug auf Servicequalität, Akkulaufzeit und Latenzzeit, Netzwerkabdeckung und Reichweite sowie Bereitstellungsmodell und Kosten miteinander verglichen.

Tabelle 3-6: Vergleich von LoRa-IoT- und NB-IoT-Technologie auf Basis verschiedener Anforderungen

	LoRa-IoT		NB-IoT	
	Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
Servicequalität (QoS)	Nicht lizenziertes Spektrum, basierend auf CSS-Modulation. Verarbeitung von Interferenzen, Multipfaden und Fading möglich.	Niedrige Servicequalität	Verwendung eines lizenzierten Spektrums und Time-slotted-synchronous-protocol ist optimal.	Hohe Kosten (> 500 Mil. Dollar pro MHz)

Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgeführt.

Akkulaufzeit & Latenz	Geräte können so lange im Ruhezustand verharren, wie es die Anwendung wünscht. Höhere Lebensdauer als bei NB-Geräten.	Der Umgang mit großen Datenmengen und der Umgang mit der Latenz.	Optimal für eine Anwendung mit niedriger Latenzzeit und hoher Datenrate.	Verbrauch von zusätzlicher Batterieenergie, aufgrund seltener aber regelmäßiger Synchronisation. Lebensdauer geringer als bei LoRa-Geräten.
Netzwerkabdeckung & Reichweite	Eine ganze Stadt kann mit einer Schnittstelle oder einer Basisstation abgedeckt werden. Sehr große Flexibilität. Breitere Netzabdeckung als NB-IoT.	-	Hauptsächlich Geräte der MTC-Klasse, die an Orten installiert werden, die weit außerhalb der üblichen Reichweite liegen.	Einsatz auf 4G / LTE-Basisstationen ist beschränkt. Nicht für ländliche oder vorstädtische Regionen geeignet, die keine 4G Abdeckung besitzen.
Bereitstellungsmodell	Ausgereift und produktionsbereit.	Landesweite Implementierungen befinden sich noch in der Rollout-Phase.	Das vorhandene Mobilfunknetz kann wiederverwendet oder aktualisiert werden.	Abhängig von der Größe des Mobilfunknetzes. Aufbau des Netzwerkes würde zusätzliche Zeit in Anspruch nehmen.
Kosten	Berücksichtigung von Netzwerkkosten, Gerätekosten und Bereitstellungskosten			
	Bietet einen enormen Kostenvorteil. Sie liegen zwischen \$100 und \$1000 pro Schnittstelle.			\$15.000 pro Basisstation

### 3.3.1.2 M2M-Anwendung

Da es eine Vielzahl an Möglichkeiten zum Informationsaustausch gibt, wird hier im speziellen nochmals auf die M2M-Anwendungen eingegangen, die automatisiert zwischen den Endgeräten oder mit einer zentralen Leitstelle kommunizieren.

Die nachfolgenden angesprochenen Technologien bieten unterschiedliche Teillösungen in Bezug auf Energieeffizienz, Reichweite, Zuverlässigkeit, Skalierbarkeit und Interoperabilität (Ali et al., 2017).

In Tabelle 3-7 werden die wichtigsten technischen Informationen einiger Systeme in Bezug auf Frequenzband, Datenrate, Reichweite und elektrische Leistung gezeigt.

Tabelle 3-7: Vergleich der angesprochenen Technologie auf Basis verschiedener Eigenschaften (Ali et al. 2017, modifiziert)

Technologie	Frequenzband	Datenrate	Reichweite	Elektr. Leistung
LoRa	433/868/915 MHz	1 – 10 Mbps	15 – 20 km	-
Wi-Fi	Unter 1 GHz	300 Mbps	1 km	0.685 W (137 mA)
Bluetooth	2.4 GHz	1 Mbps	10 m	0.605 W (121 mA)
ZigBee	2.4 GHz	250 Kbps	100 m	0.780 W (156 mA)
WiMAX	2.5 GHz	75 Mbps	6 km	-
SigFox	868/902 MHz	100 bps	30 – 50 km	0.960 W (192 mA)

Die Berechnung der elektrischen Leistung erfolgte über Spannung mal Stromstärke. Für die Spannung müssen exemplarisch 5.0 Volt als Ausgang bei den spezifischen M2M-Anwendungen verwendet werden (Pycom, 2019). Die vier Hauptquellen für den Energieverbrauch setzen sich zusammen aus (Hussain et al., 2017):

- Energie, um die Kommunikationsgeräte eingeschaltet zu halten
- Energie für die Übertragung und den Empfang von Steuerpaketen
- Energie, um die Sensoren eingeschaltet zu halten
- Energie für die Datenübertragung und Datenempfang

In Abbildung 3-1 werden die genannten Technologien noch einmal grafisch miteinander verglichen.

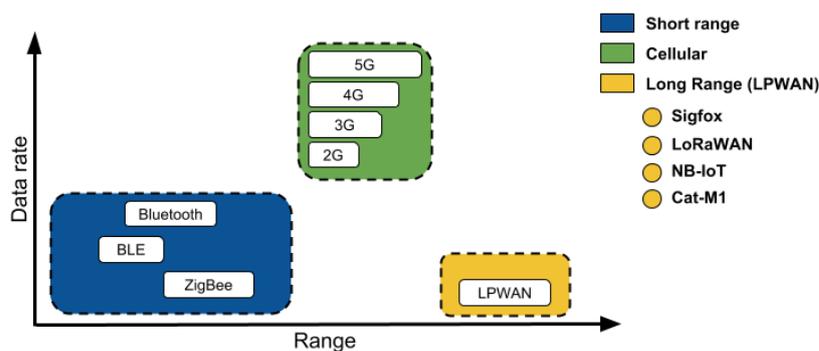


Abbildung 3-1: Vergleich der Kommunikationstechnologien (Connectivity Now and Beyond, 2019)

### 3.3.1.2.1 Wireless Fidelity (Wi-Fi)

Als Wi-Fi bezeichnet man im Allgemeinen die kabellose lokale Kommunikation. Es wird hauptsächlich in geschlossenen und kompakten Bereichen, wie Büroräume, Privathaushalten und kleinen gewerblichen Bereichen eingesetzt. Da die Reichweite durch einen Umkreis von ca. einem Kilometer begrenzt ist, wird Wi-Fi häufig auch als Wireless-Local-Area-Network (WLAN) bezeichnet. Hierbei wird

die Internetverbindung über Knoten bereitgestellt, die als drahtlose Netzwerkzugriffspunkte bezeichnet werden. Der Nachteil dieser Technik ist die geringe Reichweite, welche bei optimalen Bedingungen nur einen Kilometer einnimmt. Die Frequenzbereiche sind sehr störeffindlich und die Funktionsfähigkeit der Geräte kann angegriffen werden, da an verschiedenen Stellen freie Konnektivität besteht. Der hohe Stromverbrauch dieser Technologie darf auch nicht vernachlässigt werden (Ali et al., 2017).

#### **3.3.1.2.2 Bluetooth**

Die Bluetooth-Übertragung spielt eine wichtige Rolle innerhalb der Kommunikationstechnologien. Es können Daten innerhalb kleiner Pakete über mehrere Kanäle übertragen werden. Diese Technologie ist ideal für Sensoren, die nur periodische Daten übertragen und bis zur nächsten Aktivierung im Ruhezustand verharren können. Die Übertragungszeit liegt im Bereich von Millisekunden, obwohl die Datenraten relativ groß ausfallen können. Ein großer Nachteil dieser Technik ist die geringe Reichweite von nur ungefähr 10 m. Weiters können auch zu jedem Zeitpunkt nur zwei Geräte miteinander kommunizieren und die fragile Verbindung ist sehr anfällig für Trennungen während der Datenübertragung (Ali et al., 2017).

#### **3.3.1.2.3 ZigBee**

ZigBee ist ein Standard-Kommunikationsprotokoll für Messsysteme mit geringem Stromverbrauch. Am ZigBee-Netzwerk sind drei Arten von Systemen beteiligt, nämlich Koordinator, Router und Endbenutzergeräte. Router besitzen die Aufgabe, Leistungsbegrenzungen zu überwinden und mit dem Koordinator eine sichere Verbindung einzugehen. ZigBee bietet energieeffiziente Betriebsabläufe und dynamische Integration in das Netzwerk. Es muss jedoch beachtet werden, dass diese Technologie keinen sicheren Mechanismus für ein Netzwerk bietet und Interferenzen die Kommunikation beeinträchtigen können (Ali et al., 2017).

#### **3.3.1.2.4 Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX)**

Unter WiMAX versteht man eine eher kostspieligere, drahtlose standardisierte Ethernet-Version, welche ohne Probleme in Wi-Fi-Netzwerke integriert werden kann. Derzeit gibt es eine Reihe von Problemen, um das Potenzial voll auszuschöpfen, da zwar diese Anwendung für Langstreckennetzwerke entwickelt wurde, aber es dennoch zu vielen Abdeckungslücken kommen kann. Wenn keine Optimierung der Kapazität durchgeführt wird, kann die Kapazität stark beeinträchtigt werden und die Kommunikationskosten werden dadurch deutlich erhöht (Ali et al., 2017).

#### **3.3.1.2.5 SigFox**

Zweck der Technologie ist es, entfernte Geräte über Ultra-Narrow-Band (UNB) anzuschließen. Hierbei können kleine Datenmengen mit geringer Bandbreite

energieeffizient übertragen werden, welche sich für Fernüberwachung, Verkaufsstellen und Sicherheits- und Gesundheitsanwendungen eignen. Die Sendeleistung und der Stromverbrauch können trotz komplexer Schnittstellenoperationen geringgehalten werden. Aufgrund der Line-of-View-Communication können bei der Übertragung weite Entfernungen, ca. 30 bis 50 km in ländlichen Gebieten, zurückgelegt werden, in Städten reduziert sich, aufgrund der Hindernisse, die Entfernung auf 3 bis 10 km. Auftretende Probleme bei SigFox finden sich bei der sehr geringen Datenrate von 100 Bit/s und bei der sehr kleinen Datenübertragungsgeschwindigkeit wieder. Dadurch können kritische Bereiche, wie Medizin, Überwachung und Sicherheit, nicht unterstützt werden. Ein weiteres Problem stellt die Kommunikation nur in eine Richtung dar, da es nach erfolgreicher Übertragung zu keiner Bestätigung im System kommen kann und die Zuverlässigkeit wird stark beeinträchtigt (Ali et al., 2017).

In Österreich liegt die derzeitige Abdeckung bei rund 10 % der Fläche des Landes und rund 30 % der Einwohner könnten es benutzen. Die in Abbildung 3-2 bläulich gehaltene Fläche zeigt den bereits durch SigFox abgedeckten Bereich (SigFox, 2019).

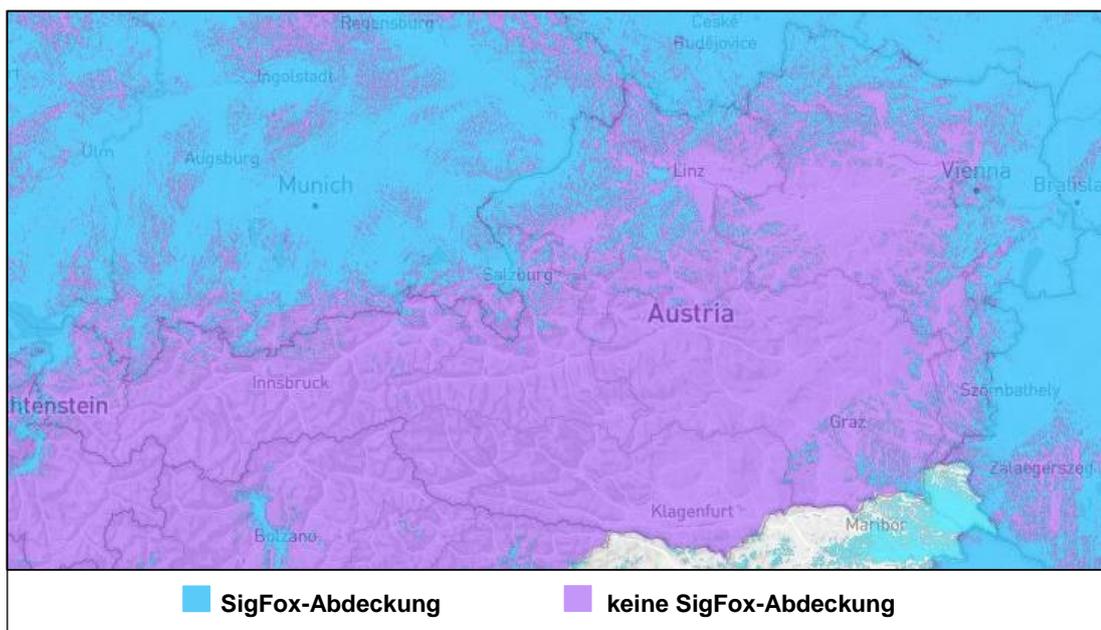


Abbildung 3-2: SigFox-Abdeckung Österreich (SigFox, 2019)

SigFox stellt das erste globale IoT-Netzwerk, welches einen länderübergreifenden Gebrauch ohne zusätzliche Roaming-Kosten gestattet. Durch die Datenübertragung mittels sehr geringem Stromverbrauch sind Lebensdauern der Akkus von bis zu 10 Jahren möglich (Heliot Group, 2019).

### 3.3.1.2.6 Global System for Mobile Communications (GSM)

GSM stellt ein Mobilfunksystem dar, welches als weltweites technisches Funkstandard arbeitet. Es ist der häufigste Standard im volldigitalen Mobilfunknetz, welcher primär für die Telefonie herangezogen wird. Die Übertragung von Daten

und Kurzmitteilungen ist auch möglich, jedoch ist diese Art der Datenübertragung nicht mehr zukunftssicher und diese ist stark vom Netzbetreiber abhängig. Mittels GSM ist eine leitungsvermittelte Übertragung der Daten möglich, wobei hier eine Rate von 14,4 kbit/s erreicht werden kann. Dies ist beträchtlich niedriger als bei den herkömmlichen, oben genannten, Technologien. Es kann die Übertragungsrate jedoch durch unterschiedliche zusätzliche Erweiterungen auf bis zu 200 kbit/s gesteigert werden (GmbH TopTarif Internet, 2019).

### 3.3.1 Drucksensoren

Wie schon zuvor genannt, basieren die Sensoren für die Messsysteme auf Druck. Dies basiert auf der Erkenntnis, da die Drucksensoren im Vergleich zu Durchflusssensoren geringere Installationskosten besitzen und der Wartungsaufwand ebenso kleiner ausfällt. Aufgrund dessen werden die Drucksensoren in Zukunft eine wichtige Rolle innerhalb der Leckagedetektion und -lokalisierung in Verbindung mit verschiedenen Methoden (siehe Kapitel 3.2) spielen (Steffelbauer, 2018).

Die Sensoren unterscheiden sich in ihrer Technologie voneinander, welche die ratiometrisch-piezoresistive oder die 2-Leiter bzw. 3-Leiter-Technologie sein kann.

Die ratiometrisch-piezoresistive-Technologie basiert auf den Veränderungen des elektrischen Widerstandes durch Druck- oder Zugeinwirkungen, über welche das Analogsignal in ein Spannungssignal umgewandelt werden kann, wobei die Speisespannung 3.3 oder 5 V beträgt.

Bei der 2-Leiter bzw. 3-Leiter-Technologie basiert die Spannungsänderung auf den Widerstandsänderung von Edelmetallen unter Temperatureinfluss. Ein Leiter wird an die Versorgung (typisch 24V DC) angeschlossen und der andere Leiter liefert das Ausgangssignal, typischerweise zwischen 4 und 20 mA.

Es gibt nicht nur Unsicherheiten bei der verwendeten Technologie, sondern auch bei der Positionierung von den Drucksensoren. Starke Nachfrageschwankungen im Wasserbedarf beeinflussen die Leckagedetektion und -lokalisierung und deshalb sollten die Sensoren an Positionen mit möglichst geringen Rauschpotential platziert werden (Steffelbauer, 2018).

Das Sensor-Verhalten kann als statisches Verhalten bezeichnet werden. Über die statische Kennlinie ist es möglich, den Zusammenhang zwischen der physikalischen Eingangsgröße und der Größe des Ausgangssignales zu beschreiben. Bei zeitlichen Schwankungen ist eine Erstellung der Kennlinie sehr schwierig. Über die Steigung kann man auf den Wert der Empfindlichkeit schließen. Gleich die statische Kennlinie einer Gerade, so ist die Empfindlichkeit konstant. Es kann allerdings auch vorkommen, dass nicht jede Eingangsänderung zu einer Korrektur des Ausgangssignals führt. Dieses Phänomen wird als Hysterese bezeichnet

(W. Müller, 2011). Die Vor- und Nachteile der beiden betrachteten Technologien können Tabelle 3-8 entnommen werden.

Tabelle 3-8: Vor- und Nachteile der Sensor-Technologien

	Vorteile	Nachteile
<b>Ratiometrisch-Piezoresistiv</b>	Keine interne Referenzspannung Reduzierter Energieverbrauch	Druck oder Zugeinwirkungen Veränderung des elektrischen Widerstandes
<b>2-Leiter bzw. 3-Leiter-Techn.</b>	Messungen über größere Entfernungen möglich	Zuleitungswiderstand gänzlich im Messergebnis Temperatureinfluss

### 3.3.1.1 Ratiometrisch-Piezoresistiv

Dient eine Batterie als Spannungsversorgung, so wird ein Signal benötigt, das mit einer geringen Leistung betrieben werden kann, um eine möglichst lange Betriebszeit zu gewährleisten. Üblicherweise werden solche Signale als 10 – 90 % der Versorgungsspannung übertragen. Es wird keine interne Referenzspannung erzeugt, deshalb reduziert sich der Energiebedarf der Elektronik (Analoge Ausgangssignale von Drucksensoren, 2019). Bei dieser Technologie kommt es durch Druck- oder Zugeinwirkung zu einer Veränderung des elektrischen Widerstandes. Dadurch ändern sich die Widerstände, sowie die elektrische Spannung und schließlich wird ein druckproportionales Messsignal ausgelöst (Niedenfür, 2019).

### 3.3.1.2 2-Leiter bzw. 3-Leiter-Technologie

Bei der 2-Leiter-Technologie fließt der Zuleitungswiderstand gänzlich in das Messergebnis. Bei konstanten Temperaturverhältnissen kann er durch einen temperaturunabhängigen Leitungsabgleichwiderstand kompensiert werden, d.h. es wird ein fixer Wert in Abzug gebracht.

Verwendet man die 3-Leiter-Technologie, so können Messungen über größere Entfernungen ermöglicht werden. Die Temperatureinflüsse werden durch einen weiteren Leiterdraht zum Anschlussdraht des Temperatursensors reduziert. Dadurch wird ein weiterer Messkreis generiert, der den Widerstand der Zuleitung ohne Temperatursensor darstellt. Zum Schluss wird der Widerstandswert vom Widerstandswerts des Messkreises subtrahiert (2 Leiter- und 3 Leitertechnik, 2019).

## 4 Methodik und Datengrundlage

Auf Basis der Literaturstudie werden Daten aus realen Leitungsnetzen analysiert und Laborversuche mittels IoT-Drucksensoren durchgeführt, um die Stabilität und Genauigkeit der IoT-Sensoren im Vergleich zu gängigen Sensoren festzustellen. Des Weiteren wird auf Grundlage der Literatur und Daten aus Experimenten mit IoT-Messsystemen eine einfache Methode zur Laufzeitanalyse angewendet.

Über Laufzeitanalysen können bei Herannahme eines gleichen Sensors und gleicher Batterie Technologievergleiche mittels unterschiedlicher IoT-Technologien, Messintervallen und Übertragungsintervallen erstellt werden. Die Analysen wurden für die Messung des Nachtminimums wie auch über den Tag durchgeführt.

Mithilfe eines selbst entwickelten Auswahlverfahrens, können Wasserversorgungsunternehmen (WVU) und Planer, in Abhängigkeit des eingesetzten Algorithmus für die Leckagedetektion, ein geeignetes Messsystem wählen. Dazu können die Diagramme aus Laufzeitanalysen und Erkenntnissen aus der Literatur zu den Grenzen der Kommunikationstechnologien verwendet werden.

In Abbildung 4-1 ist eine Übersicht des Arbeitsablaufes während des gesamten Zeitraumes dargestellt.

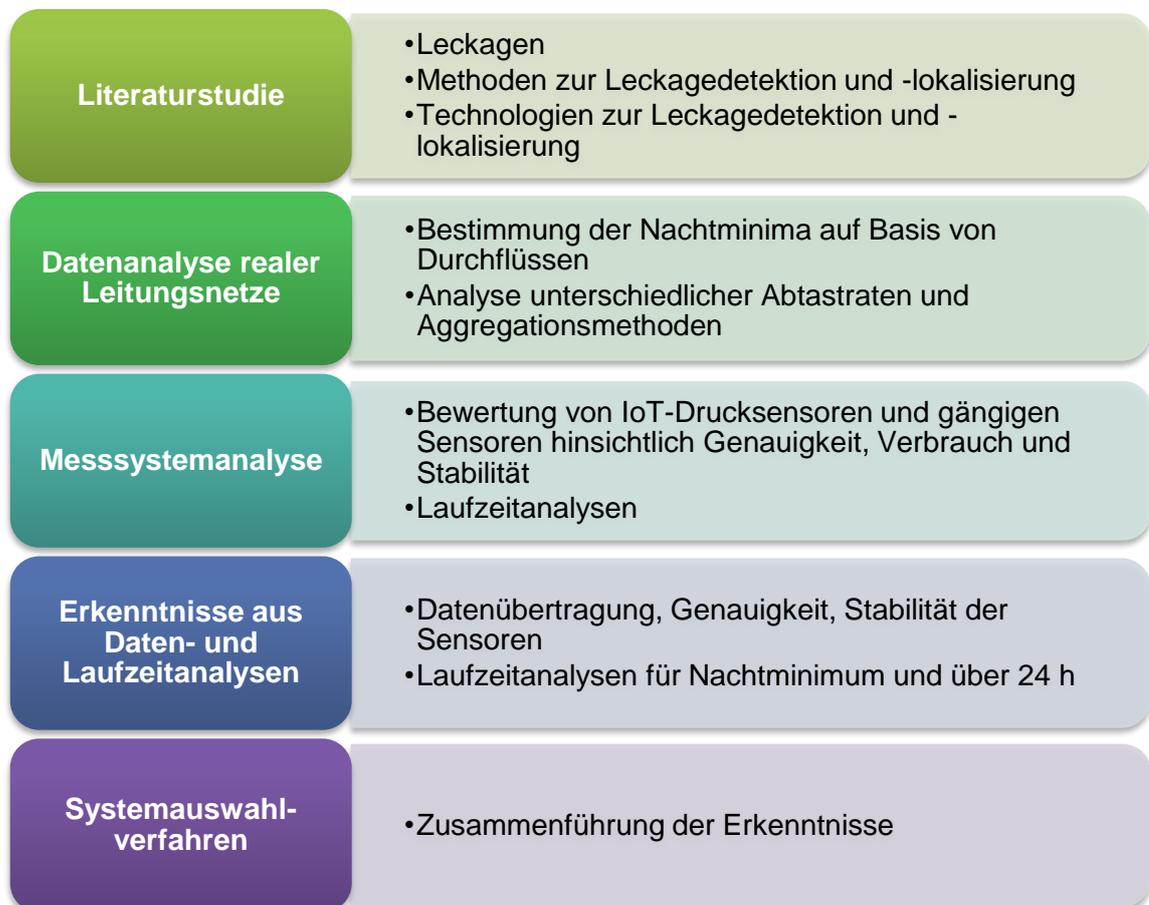


Abbildung 4-1: Arbeitsablauf über gesamten Zeitraum

Die folgenden Untersuchungen und Ergebnisse beziehen sich in Anlehnung an Literaturwerte (siehe auch Kapitel 3.2) auf die Leistungsfähigkeit der Messsysteme. Es wird vorweggenommen, dass die Analyse der tatsächlichen Leistungsfähigkeit eine Erprobung im Feld und mit den tatsächlich eingesetzten Algorithmen erfordert. Dieser Umstand, wenn auch nicht in dieser Arbeit behandelt, ist bereits im entwickelten Flow Chart für die Geräteauswahl integriert.

Für die folgenden Analysen und Darstellungen wurden R und die RStudio verwendet.

### 4.1 Analyse von Daten realer Leitungsnetze

Es werden die Druck- und Druckflussmesswerte aus dem Monitoring realer Leitungsnetze aus Wien und der Nähe von Graz analysiert. Die Analyse geschieht auf der Grundlage die Dauer des Nachtminimums, sowie die Druckbereiche während des Nachtminimums und über den Tag zu bestimmen. Dies dient zur Auswahl der Sensoren und der Festlegung des Druckbereiches für den Sensorvergleich im Labor.

#### 4.1.1 Versuchsgebiete und Datensätze

Als Datengrundlage für die Analyse realer Netze dienen drei Versorgungsnetze. Zwei dieser Netze befinden sich in Wien und das dritte Netz östlich gelegen von Graz. In den nachfolgenden Kapiteln wird auf die Eigenschaften und Rohdaten der Leitungsnetze, hier als Zonen definiert, eingegangen.

##### 4.1.1.1 Zone Blau IV

Das in Zone Blau IV behandelte Leitungsnetz befindet sich im Süd-Westen Wiens im 13. Bezirk (Hietzing). Die Lage wurde als schwarzes Rechteck in Abbildung 4-2 gekennzeichnet.

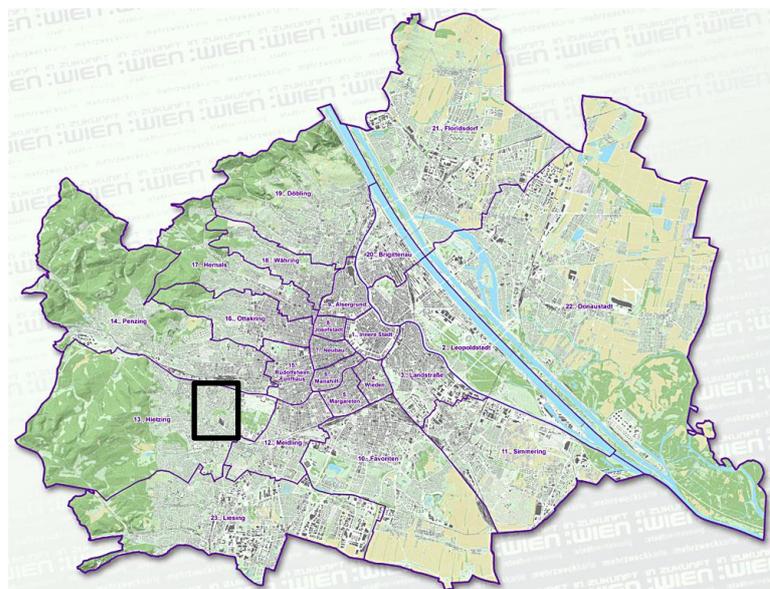


Abbildung 4-2: Leitungsnetz Zone Blau IV (Stadtgebiet Statistiken)

Dieses Netz beinhaltet zwölf Drucksensoren und einen Durchflusssensor, wobei sich bei der Einspeisung beim Behälter jeweils ein Druck- und Durchflussmesser befinden. Der Drucksensor beim Behälter wird nicht weiter untersucht. Die restlichen elf Sensoren wurden temporär an Hydranten und Hausanschlüssen installiert.

In dieser Zeitreihe wird der Zeitraum vom 10. Mai 2017 bis zum 30. Juni 2017 von jeweils 00:00 bis 23:59 Uhr betrachtet. Das sind pro Sensorort 74880 Messwerte (1440 Messwerte pro Tag) in 1 Minuten Puls-Intervallen. Die relevanten Nachtstunden werden über die Durchflussganglinie bestimmt.

Aufgrund der topografischen Verhältnisse, liegen die Druckwerte aller Sensoren nicht im selben Wertebereich, sondern unterscheiden sich teilweise um mehr als 1 bar.

Anhand Abbildung 4-3 können die Drucktagesgänge der Sensoren dieser Zone über eine Minute erkannt werden.

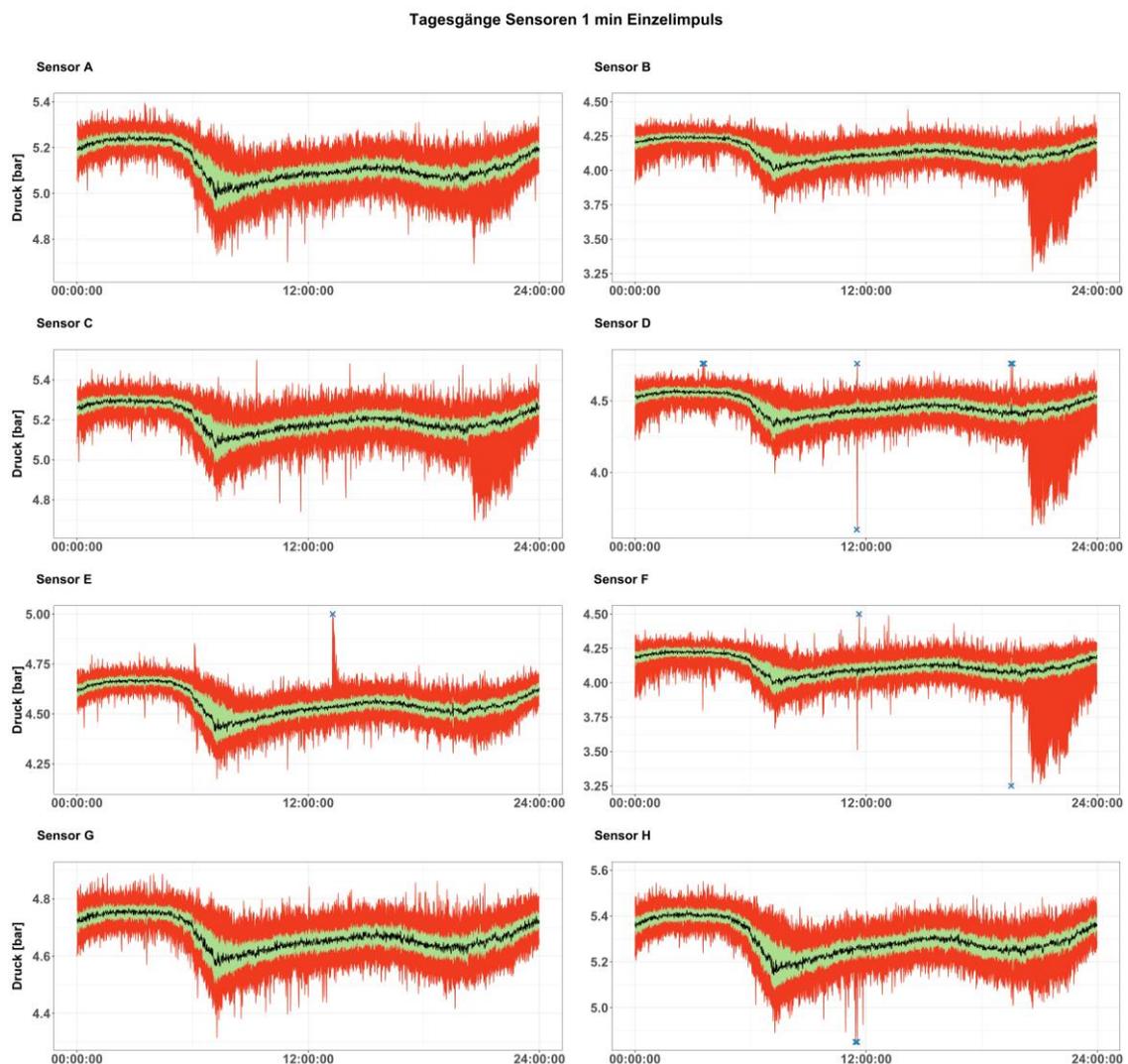


Abbildung wird auf der nächsten Seite fortgeführt.

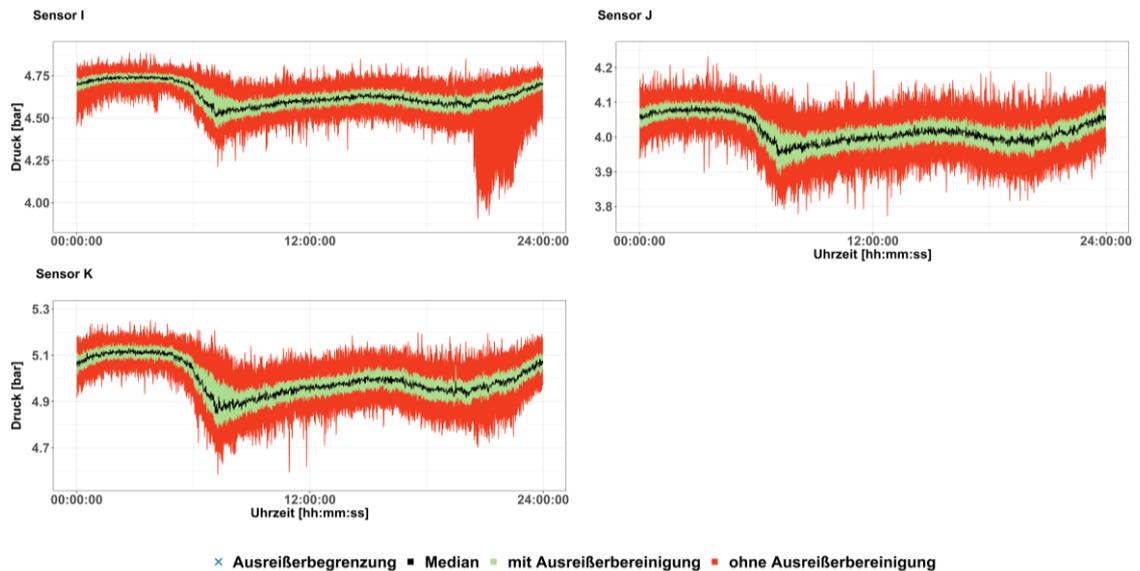


Abbildung 4-3: Tagesgänge Sensoren in 1 min Abtastraten

Es fällt auf, dass die Druckverläufe mit der Durchflussmessung übereinstimmen, da der Druck abfällt, je mehr Trinkwasser verbraucht wird. Zusätzlich kann in den Morgenstunden eine Rechtsverteilung erkannt werden (Pendant zur Linksverteilung bei der Durchflussmessung). Diese Übereinstimmung kann als interne Kontrolle bei der Datenauswertung verwendet werden. In den Abendstunden von 20:30 bis 23:59 Uhr finden wir bei den Sensoren B, C, D, F und I deutlich kleinere Minimalwerte als normal. Dadurch kann eventuell auf eine Hydrantenöffnung in der Nähe der Sensoren geschlossen werden, die an einem Tag in der Messreihe vorkam.

## 4.1.1.2 Zone Grün II

Das Leitungsnetz der Zone Grün II befindet sich im Süd-Westen Wiens im 13. Bezirk (Hietzing) und 23. Bezirk (Liesing). Das dort behandelte Netz schließt an das Leitungsnetz aus Zone Blau IV (siehe schwarzes Rechteck).

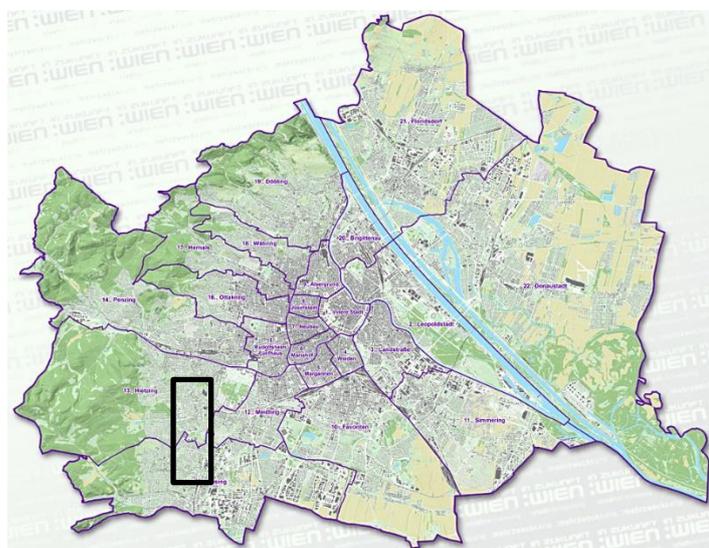


Abbildung 4-4: Leitungsnetz Zone Grün II (Stadtgebiet Statistiken)

In dieser Zone findet man 13 Drucksensoren und einen Durchflusssensor, welche auf Hydranten platziert wurden, vor. Ein Durchfluss- sowie Drucksensor befinden sich beim Behälter, wobei der Drucksensor beim Behälter nicht weiter behandelt wird.

In dieser Zone wird der Zeitraum vom 08. Juli 2018 bis zum 27. August 2018 von jeweils 00:00 bis 23:59 Uhr betrachtet. Das sind pro Sensorort 73440 Messwerte (1440 Werte pro Tag). Die relevanten Nachtstunden werden mithilfe der Durchflussganglinie festgelegt.

Aufgrund der topografischen Verhältnisse, liegen die Druckwerte aller Sensoren nicht im selben Druckbereich, sondern unterscheiden sich teilweise um mehr als 1 bar.

Anhand Abbildung 4-5 können die Drucktagesgänge der Sensoren in dieser Zone erkannt werden.

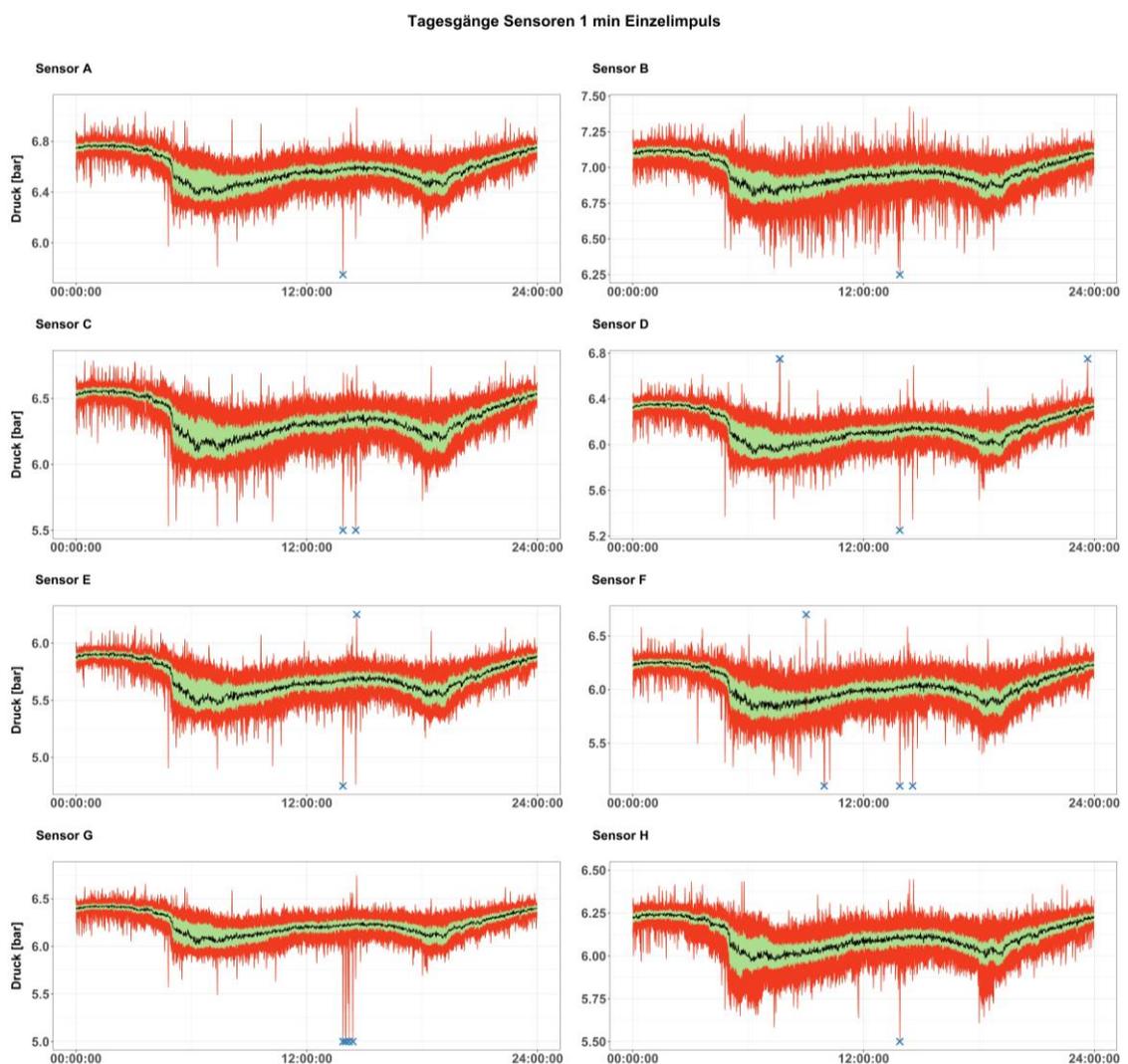


Abbildung wird auf der nächsten Seite fortgeführt.

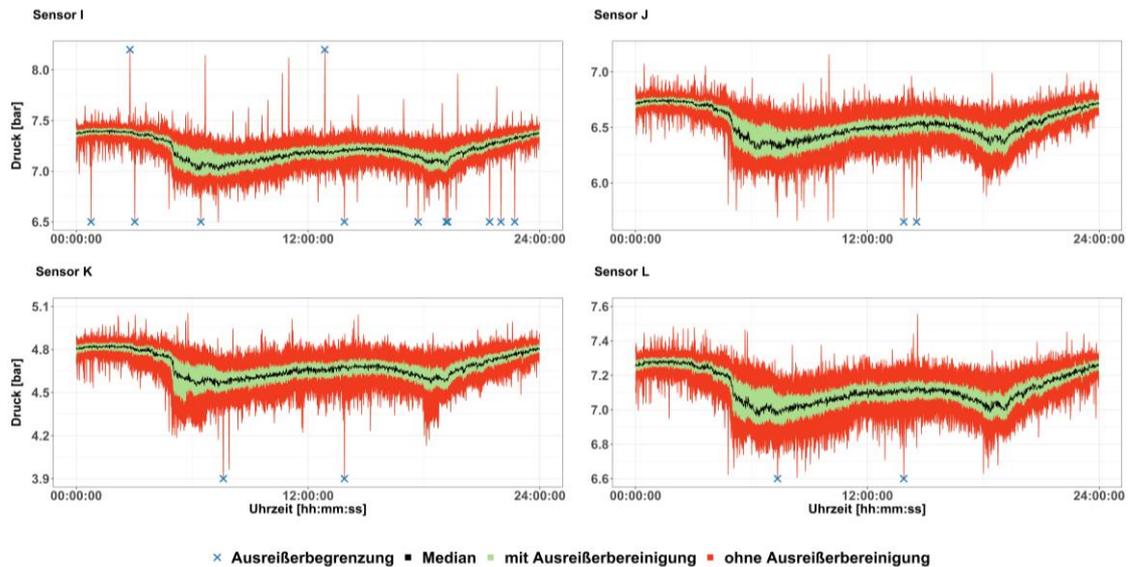


Abbildung 4-5: Tagesgänge Sensoren in 1 min Abtastraten

Es kann erkannt werden, dass die Druckverläufe mit der Durchflussmessung übereinstimmen. Zusätzlich kann in den Morgenstunden eine Rechtsverteilung erkannt werden. Weiters kann erkannt werden, dass es eventuell bei einigen Sensoren zu Messfehlern kam, deshalb auch abgeschnittene, mit blauem Kreuz gekennzeichnete, Extremwerte. Betrachtet man den Median, so sieht man, dass die Drucklinien um rund einem Bar während des Tages schwanken.

#### 4.1.1.3 Hart bei Graz

Das reale Leitungsnetz Hart bei Graz liegt östlich von Graz im Bezirk Graz-Umgebung (markiert als schwarzer Punkt).



Abbildung 4-6: Leitungsnetz Hart bei Graz (From Austria, Steiermark, Graz)

Dieses Netz beinhaltet sechs, an Hydranten aufgesetzte, Drucksensoren. Zusätzlich zu den Druckunterschieden im Netz werden noch der Durchfluss und der Wasserstand beim Behälter der Zone gemessen.

In dieser Zeitreihe wird der Zeitraum vom 30. Mai 2016 bis zum 20. Juni 2016 von jeweils 00:00 bis 23:59 Uhr betrachtet. Das ergibt pro Sensor 31680 Messwerte (1440 Messwerte pro Tag). Die für die Auswertung relevanten Nachtstunden werden mittels der Durchflussganglinie bestimmt.

Aufgrund der topografischen Verhältnisse, liegen die Druckwerte aller Sensoren nicht im selben Druckbereich, sondern unterscheiden sich teilweise um mehr als 1 bar.

In Abbildung 4-7 werden die Messwerte der Drucksensoren dargestellt.

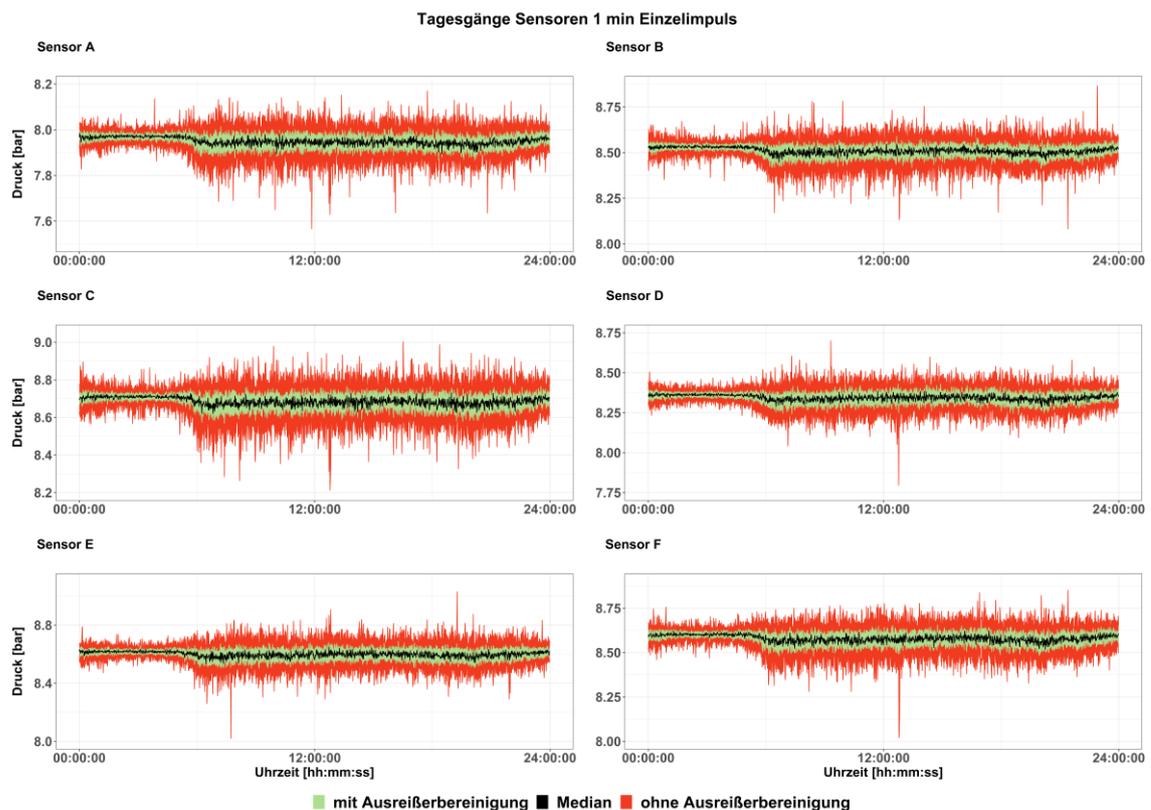


Abbildung 4-7: Tagesgänge Sensoren in 1 min Abtastraten

Anhand der Grafik werden die Druckverläufe in 1 min Abtastraten dargestellt. Es fällt sofort auf, dass die Druckverläufe mit der Durchflussmessung übereinstimmen, da der Druck abfällt, je mehr Trinkwasser verbraucht wird.

## 4.1.2 Bestimmung der Dauer des Nachtminimums

Auf Basis der Zuflusstagesganglinien der jeweiligen Zonen werden die realen Nachtminima für die Laufzeitanalysen ermittelt. Dies geschieht visuell, um für die Laufzeitanalysen die echten Dauern zur Verfügung zu haben.

### 4.1.2.1 Zone Blau IV

In Abbildung 4-8 werden die Rohdaten des Durchflusses als Tagesgang dargestellt.

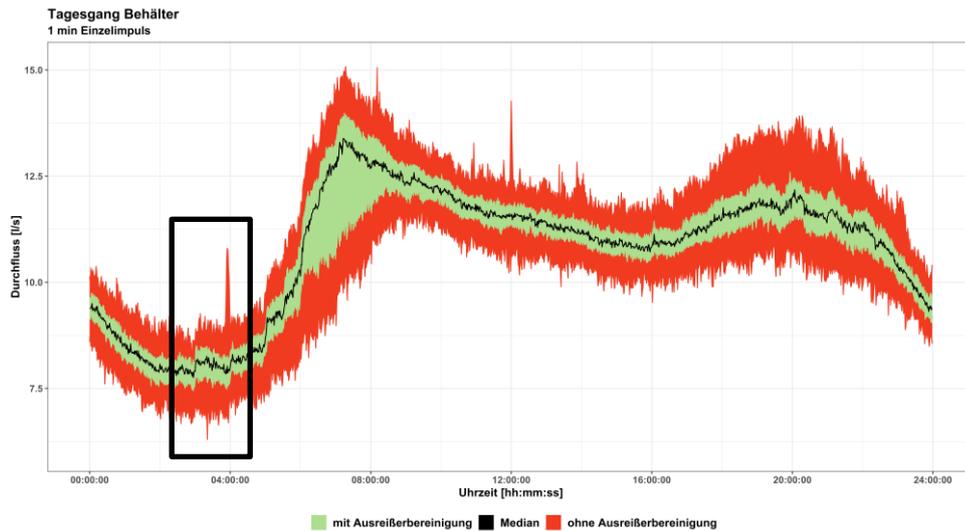


Abbildung 4-8: Tagesgang der Durchflussmessung im Behälter in 1 min Abtastraten  
Es ist ersichtlich, dass der niedrigste Verbrauch zwischen 03:00 bis 04:30 Uhr vorherrscht (gekennzeichnet als schwarzes Rechteck).

### 4.1.2.2 Zone Grün II

In Abbildung 4-9 kann der Tagesgang der Durchflussmessung in 1 min Intervallen erkannt werden.

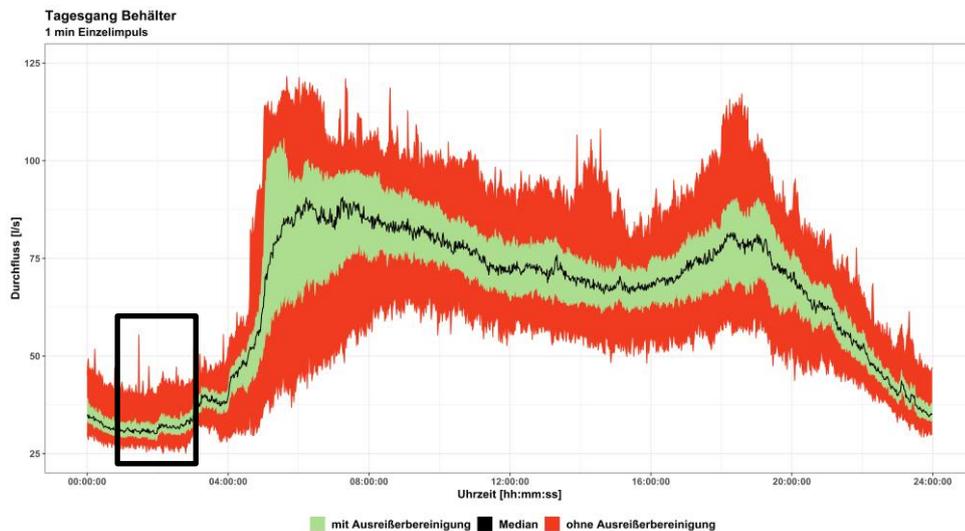


Abbildung 4-9: Tagesgang der Durchflussmessung im Behälter in 1 min Abtastraten

Es ist ersichtlich, dass der niedrigste Verbrauch zwischen 01:00 bis 02:30 Uhr vorherrscht. Die Verbrauchsspitze findet sich um 05:40 Uhr wieder. In den Abendstunden von 16:40 bis 19:00 Uhr kommt es zu einem Anstieg des Verbrauchs, danach sinkt dieser wieder ab.

#### 4.1.2.3 Zone Hart bei Graz

In Abbildung 4-10 werden die Rohdaten des Durchflusses als Tagesgang dargestellt.

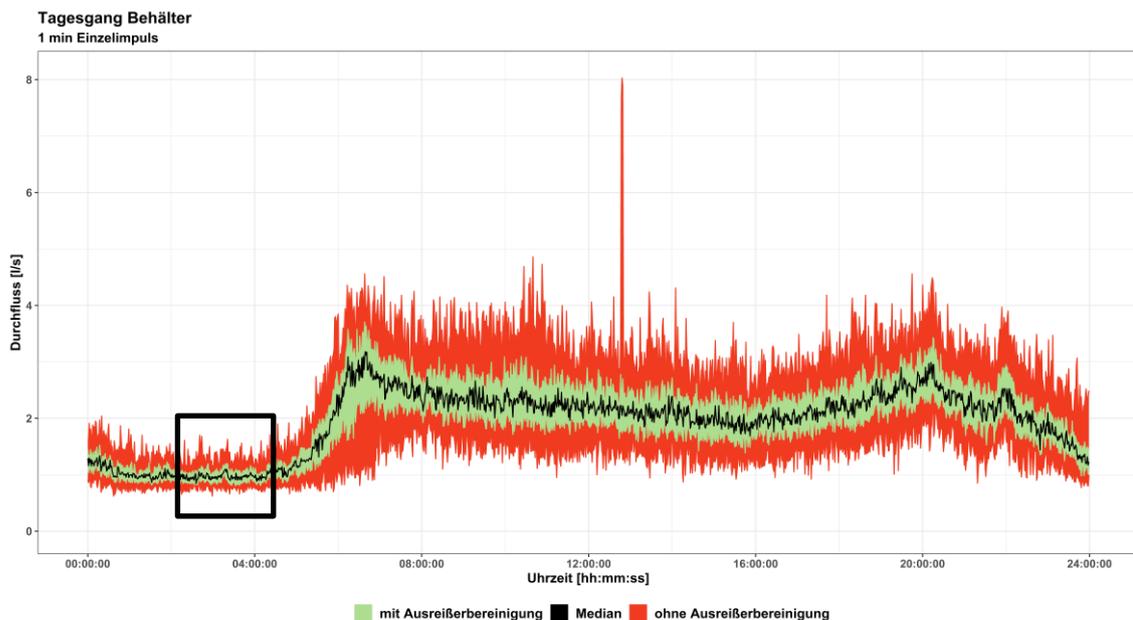


Abbildung 4-10: Tagesgang der Durchflussmessung im Behälter in 1 min Abtastraten

Es kann erkannt werden, dass in Abbildung 4-10 die Schwankungen im Durchflussbereich über die Nacht hinweg sich nur geringfügig ausbreiten. Daher wird das Nachtminimum gleich wie in Zone Blau IV gewählt und findet theoretisch zwischen 03:00 und 04:30 Uhr statt.

#### 4.1.3 Analyse der Druckschwankungen

In diesem Kapitel werden die Rohdaten der drei Zonen analysiert, um eine Sensorauswahl für die Laborversuche treffen zu können. Auf Basis dieser Daten kann des Weiteren der Ablauf des Laborversuches festgelegt werden.

Die Analyse der Rohdaten wird mittels Boxplots durchgeführt. Es werden die Rohdaten ohne Ausreißerbereinigung über 24 Stunden und über die, im Vorhinein festgelegten, Nachtstunden visualisiert.

Ein Boxplot ist eine grafische Darstellung der Verteilung von Zeitreihen. Es kann über Boxplots schnell ein Eindruck darüber vermittelt werden, in welchem Bereich die Daten liegen und wie sie sich über den definierten Bereich verteilen. Die Werte werden durch fünf Punkte zusammengefasst:

- Median
- 25 %-Quantil
- 75 %-Quantil
- Oberer Whisker (Extremwert)
- Unterer Whisker (Extremwert)

Der IQR, oder auch Interquartilsabstand, gibt das Intervall an, in dem die mittleren 50 % der Stichprobenelemente liegen. Es ist der Wertebereich, welcher sich zwischen dem 25 %- und 75 %-Quantil befindet. Der 1.5-fache Wert von IQR stammt aus der Definition von John W. Tukey und ist die gebräuchlichste Grenze bei der Erstellung von Boxplots und dient auch hier als äußere Grenze der Whisker. In den Ergebnistabellen kann der Anteil der Ausreißer in Prozent nach oben und unten erkannt werden (Boxplots, 2019).

### 4.1.3.1 Zone Blau IV

Abbildung 4-11 können die Boxplots für die Zone Blau IV entnommen werden. In A sind die Rohdaten über 24 Stunden und in B während den Nachtstunden dargestellt.

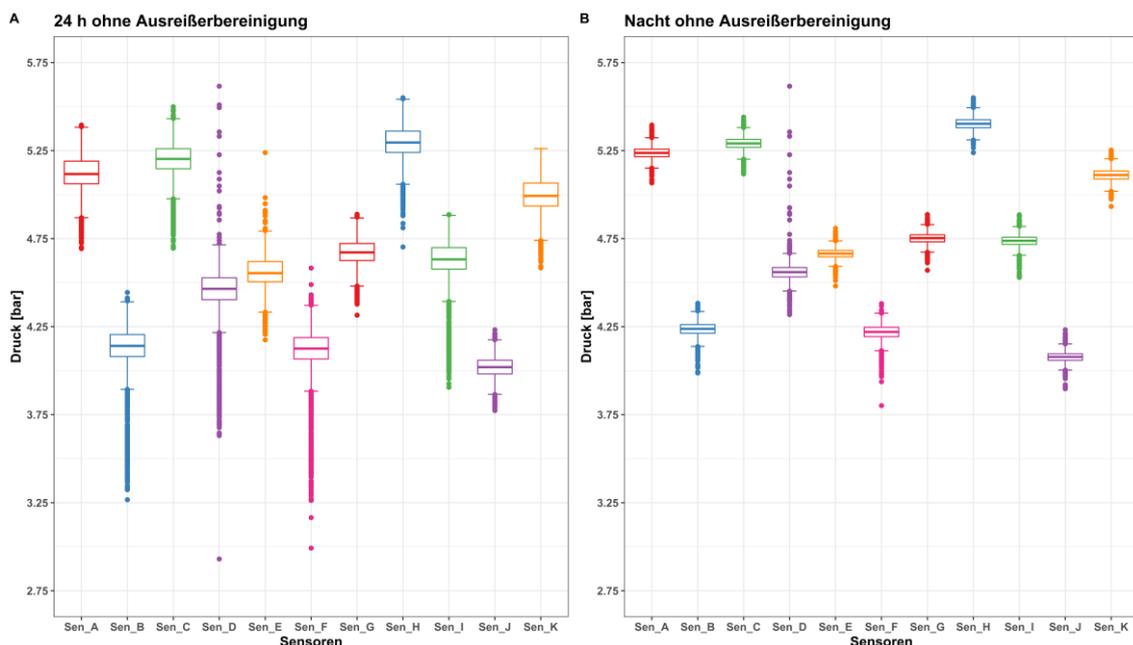


Abbildung 4-11: Boxplots Zone Blau IV

Man erkennt deutlich das Extremwertpotential in dieser Zone. Aufgrund der großen Datenmenge können diese allerdings vernachlässigt werden. Die Mediane befinden sich augenscheinlich in der Mitte jeder Box.

### 4.1.3.2 Zone Grün II

In der nachfolgenden Abbildung werden die Rohdaten für Zone Grün II mittels Boxplots visualisiert.

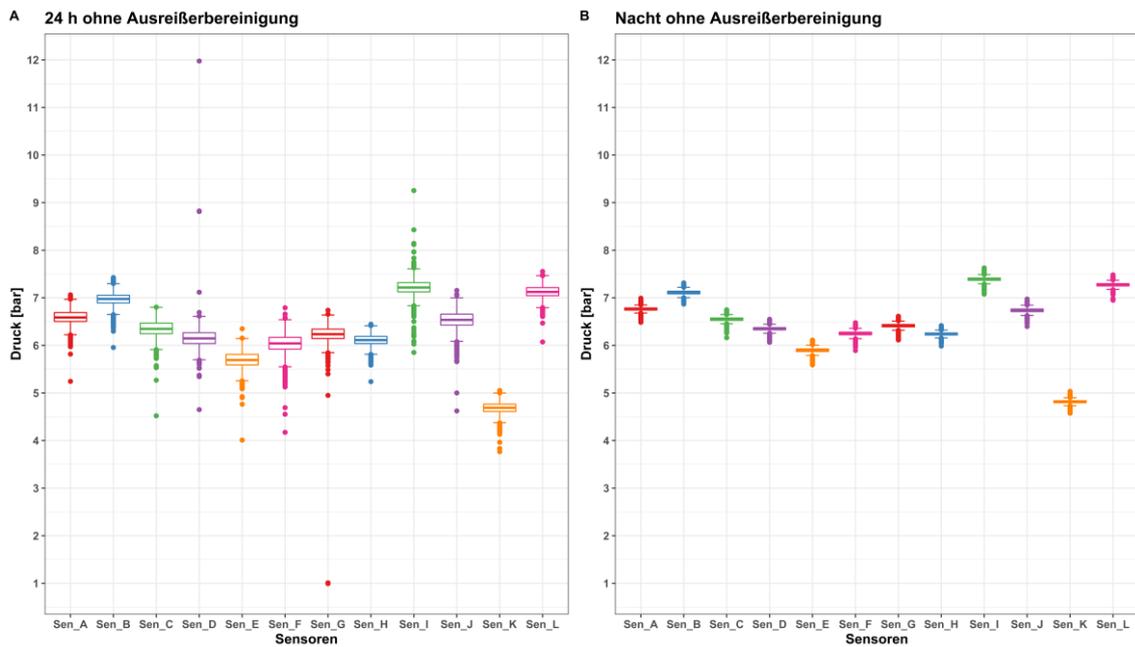


Abbildung 4-12: Boxplots Zone Grün II

In dieser Zone kommen zwei Extremwerte von Sensor D und Sensor G stark zur Geltung. Diese haben aber auf die restlichen Rohdaten und später auf die Analyse keinen Einfluss.

#### 4.1.3.3 Zone Hart bei Graz

Abbildung 4-13 können die Boxplots für die Zone Hart bei Graz entnommen werden. In A sind die Rohdaten über 24 Stunden und in B während den Nachtstunden dargestellt.

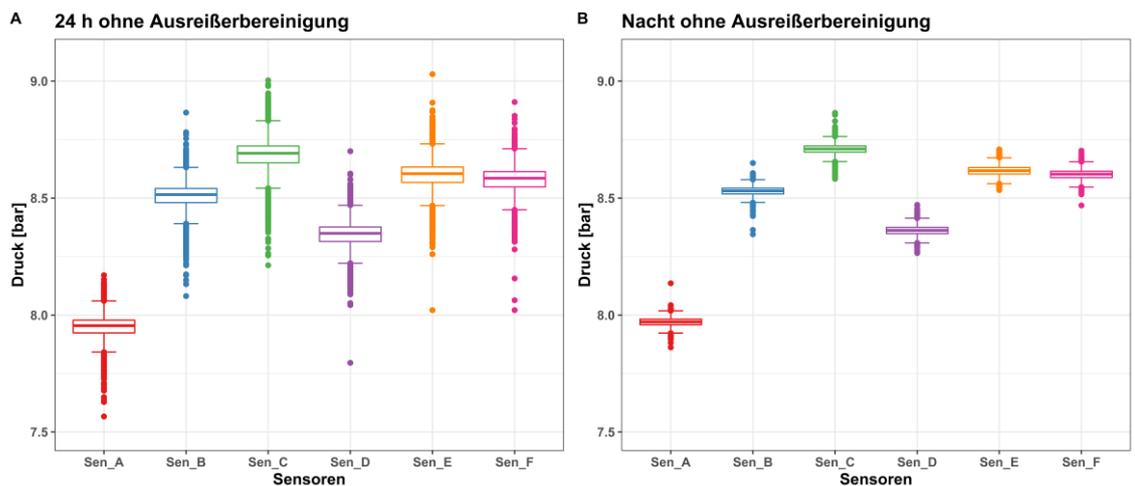


Abbildung 4-13: Boxplots Zone Hart bei Graz

#### 4.1.3.4 Bestimmung der Druckbereiche für Laborversuche

Auf Basis der Daten aus realen Leitungsnetzen werden nun die Minima und Maxima der jeweiligen Zonen über den Tag und in der Nacht bestimmt. Diese stellen die Grundlage für die Laborversuche dar.

Anhand der nachfolgenden Tabellen kann auf den abgedeckten Druckbereich der vorher betrachteten Zonen geschlossen werden.

In Tabelle 4-1 werden die kleinsten und größten Messwerte aller Zonen aufgelistet. Anhand dieser Werte werden die Druckstufen definiert.

Vorher wird definiert, dass die Auswahl der Druckstufen mit Ausreißerbereinigung erfolgt, da der prozentuelle Anteil dieser sehr gering ist.

Tabelle 4-1: Wertebereiche aus Realdaten

Ohne Ausreißerbereinigung					
Zone Blau IV		Zone Grün II		Zone Hart bei Graz	
MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
2.930 bar	5.616 bar	0.993 bar	11.975 bar	7.567 bar	9.030 bar
$\Delta = 2.686$ bar		$\Delta = 10.982$ bar		$\Delta = 1.463$ bar	

Anhand Tabelle 4-1 kann erkannt werden, dass sich die drei Zonen überlagern und so können Druckstufen von 4.0 bar bis 6.0 bar in 0.5 bar Schritten gewählt werden, da innerhalb dieser Grenzen Referenzdaten zur Verfügung stehen und die Grenzen des Referenzsensors somit eingehalten werden.

Die Nachtminima der Zonen sind für die Laborversuche ausschlaggebend, da in diesem Zeitbereich der Druck das Maximum in der Leitung erreicht und deshalb wurden die mittleren Nachtminima berechnet und können Tabelle 4-2 entnommen werden.

Tabelle 4-2: Mittlere Nachtminima der Zonen

Mittleres Nachtminimum		
Zone Blau IV	Zone Grün II	Zone Hart bei Graz
4,27 bar	6,48 bar	8.30 bar

#### 4.1.4 Visuelle Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Aggregationsmethoden

Anhand von Beispielgrafiken werden die Auswirkungen von unterschiedlichen Aggregationsmethoden hervorgehoben. Dies bedeutet Unterschiede in den Betriebsweisen und Messkonfigurationen. Verschiedene Aggregationsmethoden üben damit einen Einfluss in Folge auf die Laufzeiten und die Algorithmen für die Leckagedetektion und -lokalisierung aus.

Die Aggregationsmethoden unterscheiden sich hinsichtlich ihrer mathematischen Berechnungsregeln. Für die Einzelimpulsmethode ist keine Berechnung von Nöten, da hier der wahre Wert der Rohdaten herangezogen wird.

Für die Mittelwertmethode wird arithmetische Mittel über das Intervall der jeweiligen Abtastrate berechnet.

$$\text{Mittelwert}_{arithmetisch} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

mit:

$n$  ... Anzahl der Messdaten über Zeitintervall;  $x_i$  ... einzelner Messwert

Die Medianmethode befasst sich indes mit der Berechnung des Medians über das entsprechende Zeitintervall. „Der Median (auch Zentralwert genannt) ist der Wert in der Mitte einer der Größe nach geordneten Datenreihe.“ (Mittelwert, Median, Modus, 2019)

$$\text{Median} = \begin{cases} \frac{x_{n+1}}{2} & \text{für } n \text{ ungerade} \\ \frac{1}{2} (x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}) & \text{für } n \text{ gerade} \end{cases} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

mit:

$n$  ... Anzahl der Messdaten über Zeitintervall;  $x$  ... einzelner Messwert

Die Tagesgänge und Nachtstunden der Zeitreihen werden mittels Diagrammen dargestellt. Hierbei werden die einzelnen Tage mit den für den jeweiligen Zeitpunkt berechneten Median, 25 %- und 75 %-Quantil, sowie die Minimal- und Maximalwerte übereinandergelegt. Anschließend werden die Ergebnisse miteinander über Linien verbunden und in einem gestapelten Liniendiagramm visuell dargestellt.

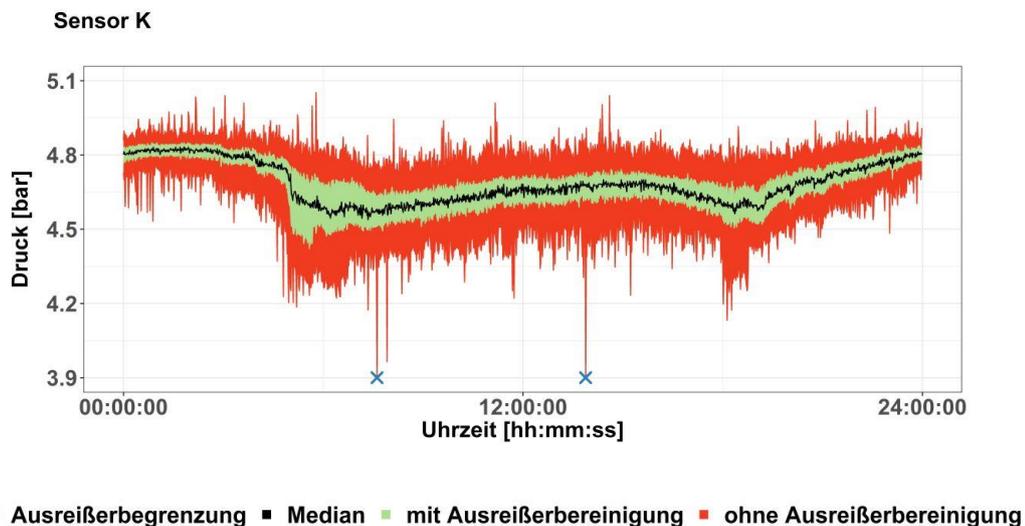


Abbildung 4-14: Exemplarische Darstellung der Diagramme

Die Diagramme werden für die Abtastraten von 1, 5, 15, 30 und 60 Minuten erstellt. Es muss darauf hingewiesen werden, dass für die Abtastrate von 5, 15, 30 und 60 Minuten drei Diagramme, genauer gesagt für jede einzelne Minute (genau zu diesem Zeitpunkt), für die Mittelwerte des Zeitschrittes und für die Medianwerte dessen, erstellt wurden.

Aufgrund der Darstellung kann es vorkommen, dass einige Extremwerte in der Darstellung abgeschnitten und mit einem blauen Kreuz gekennzeichnet wurden. Dies ist darauf zurückzuführen, da ansonsten die Darstellung stark zusammengedrückt wäre, weil ein fester Wertebereich für die Ordinate der jeweiligen Sensoren definiert wurde.

Die Diagramme der Messreihen im Anhang betrachtet werden.

### Unterschiede bezüglich der Abtastrate:

Je größer die Abtastrate gewählt wird, desto mehr können die Messwerte geglättet (Mittelwert- und Medianmethode) sowohl als auch abgeflacht werden. Es kann vorkommen, dass durch größere Abtastraten Kurzzeitereignisse, wie z.B.: Messfehler, verschwinden. Aussagen zum Tagesgangverlauf können anhand aller Abtastraten getroffen werden.

In Tabelle 4-3 können die oben aufgezählten Änderungen über die verschiedenen Abtastraten beobachtet werden. Es wurden exemplarisch die Minimal- und Maximalwerte sowie der Median dargestellt. Größere Abtastraten als auch höhere Übertragungsraten führen zu kleineren Datenpaketen und können somit die Laufzeit eines Messsystems bzw. einer Batterie erhöhen.

Tabelle 4-3: Exemplarische Darstellung der Abtastraten

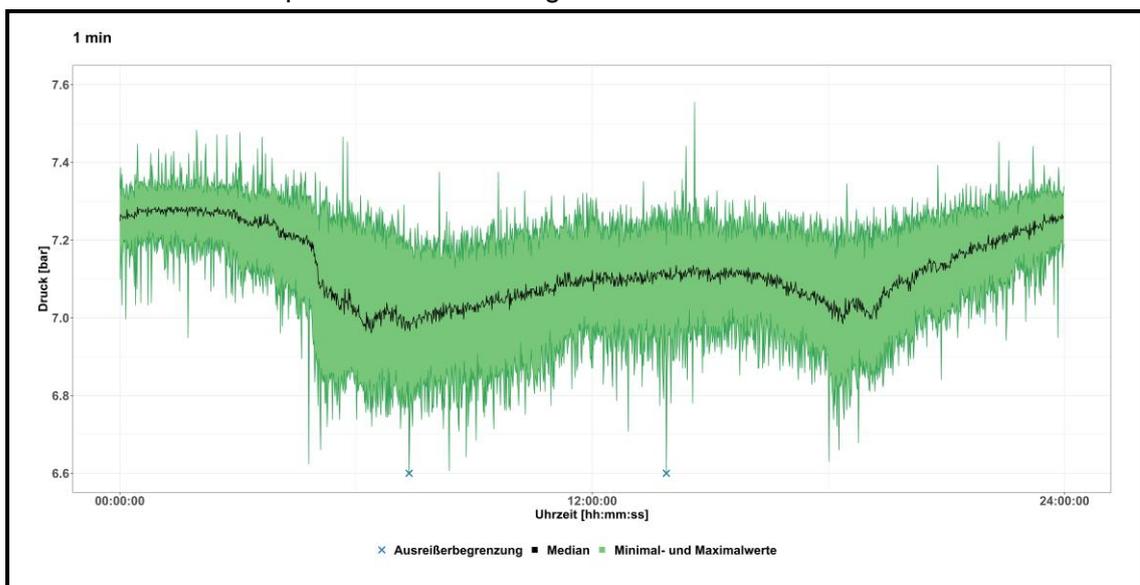


Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgeführt.

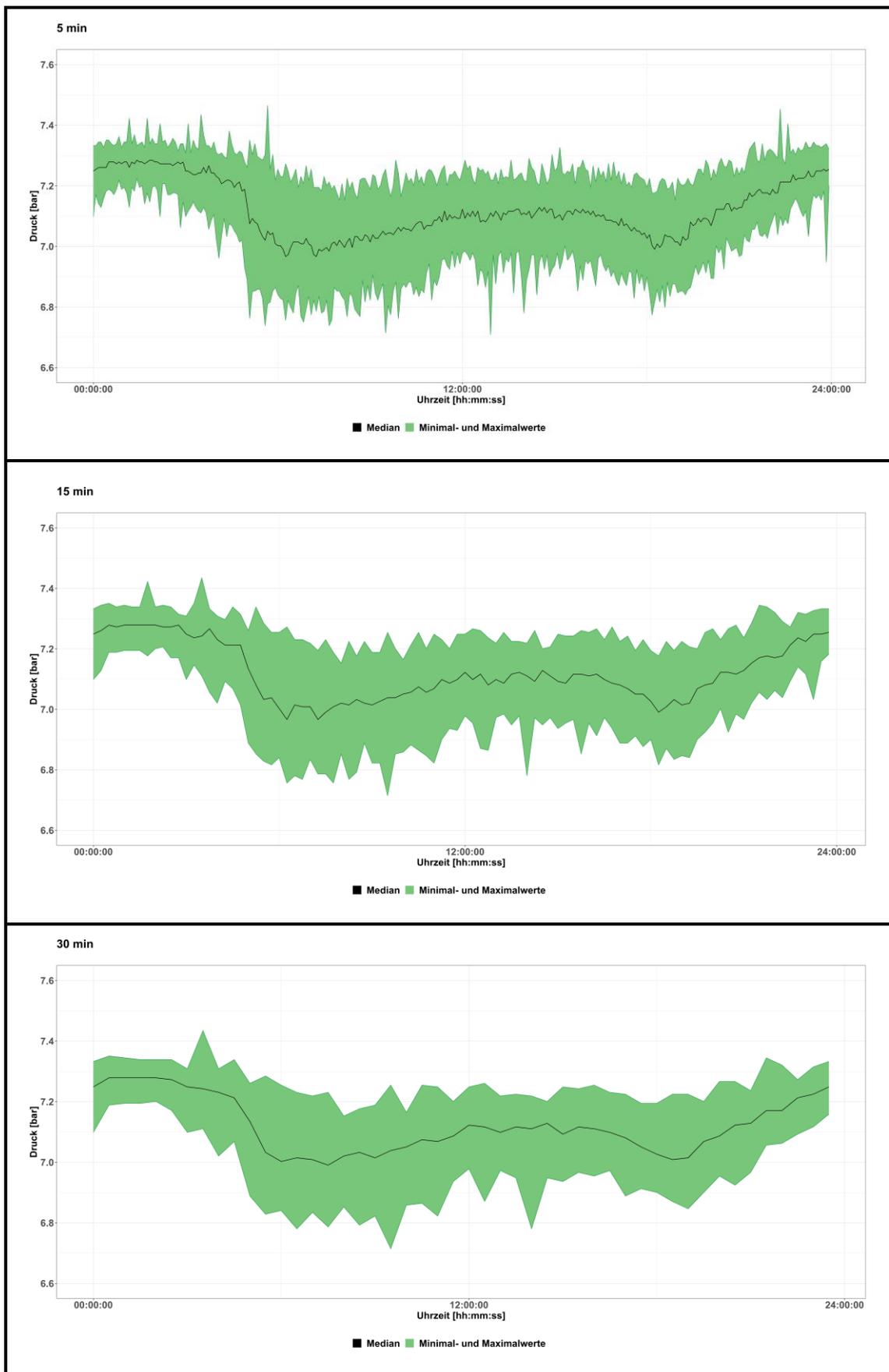
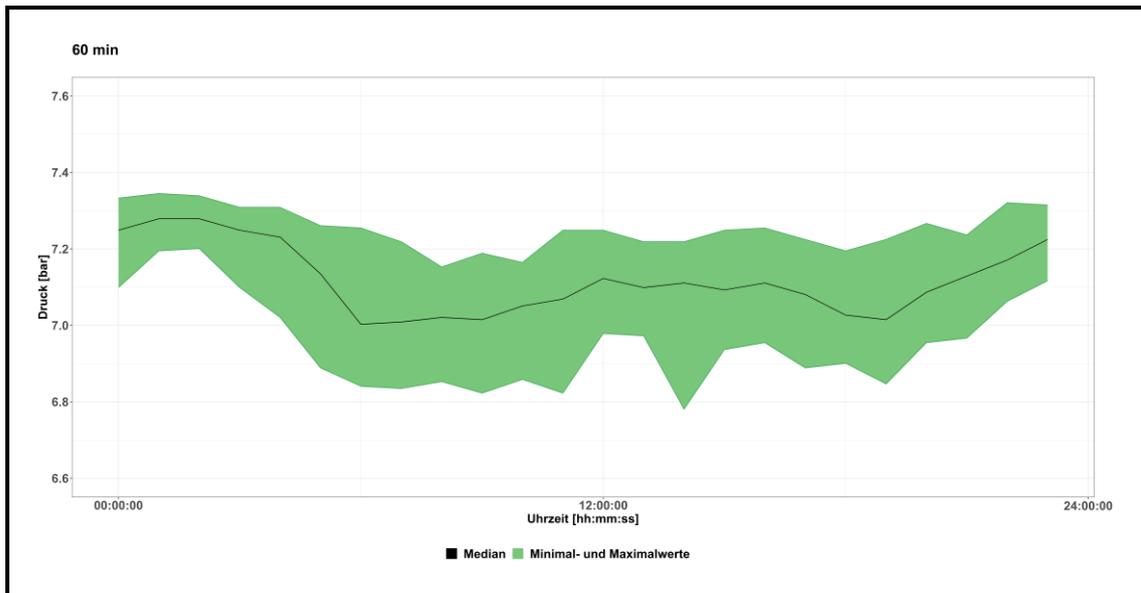


Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgeführt.



Unterschiede bezüglich der Aggregationsmethode:

Bei der Einzelimpulsmethode werden nur die Werte betrachtet, die mit der Abtastrate übereinstimmen und ein Vielfaches davon sind. Alle übrigen Messwerte zwischen den Abtastintervallen werden außer Acht gelassen. Bei der Mittelwert- und Medianmethode liegen die mathematischen Berechnungsregeln zu Grunde, weshalb dort die Werte des gesamten Intervalls betrachtet werden und nicht nur der einzelne Impuls zum jeweiligen Zeitpunkt. Die Spitzen in den Tagesgängen fallen bei der Mittelwert- als auch bei der Medianmethode flacher aus im Gegensatz zur Einzelimpulsmethode. Anhand der roten Rechtecke in Abbildung 4-15 sind leichte Unterschiede zwischen den Aggregationsmethoden zu erkennen.

Es wurden exemplarisch die Minimal- und Maximalwerte sowie der Median dargestellt.

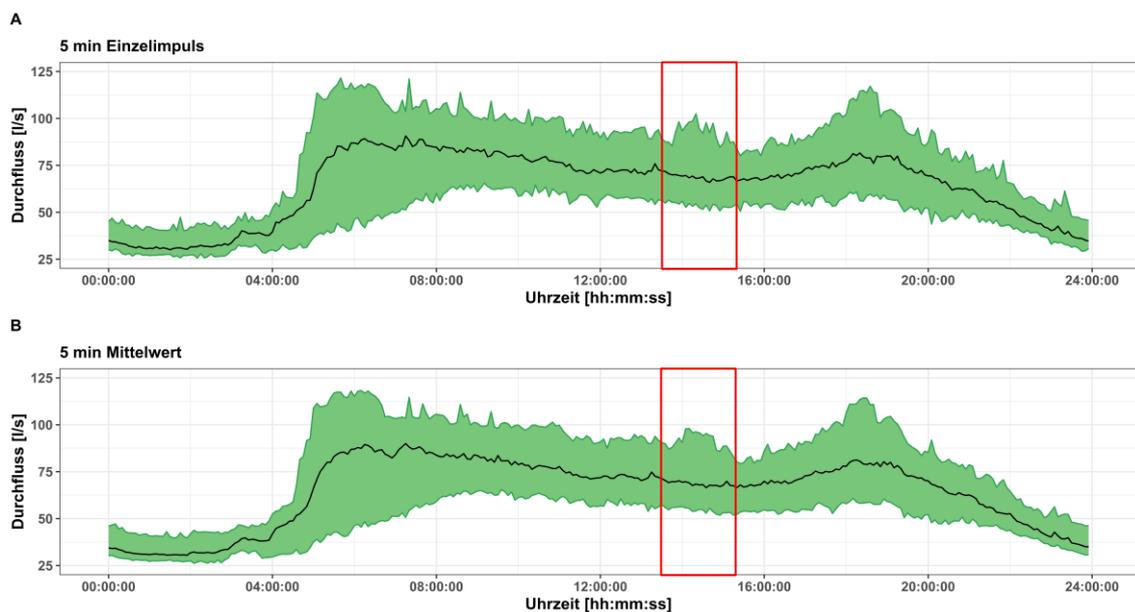


Abbildung wird auf der nächsten Seite fortgeführt.

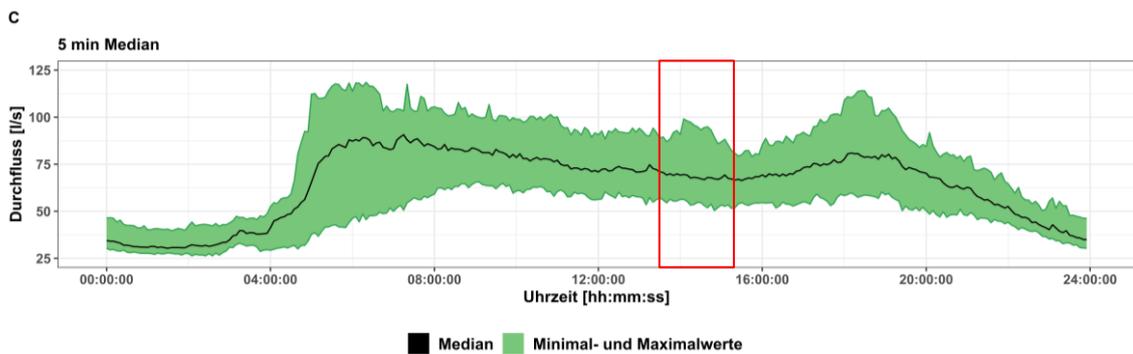


Abbildung 4-15: Exemplarische Darstellung der Aggregationsmethoden

Die Tagesganglinien können sich kaum bis auch stark voneinander unterscheiden, je nachdem, welche Aggregationsmethode in Verbindung mit einer Abtast-rate gewählt wird. Die Übertragungsrate hat auf die Messergebnisse keinen Einfluss und kann daher gleich dem Abtastratenintervall oder größer angesetzt werden.

## 4.2 Messsystemanalyse

Messsysteme werden vereinfacht als Kombination von Drucksensoren und Mikrocontroller inklusive einer Übertragungseinheit bezeichnet. Exemplarisch wurden in dieser Masterarbeit ausgewählte Sensoren bzw. Mikrocontroller eingesetzt.

### 4.2.1 Drucksensoren

In Tabelle 4-4 werden die Kenndaten ausgewählter Drucksensoren aufgezeigt, die im Technikum für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau zur Verfügung standen.

Tabelle 4-4: Drucksensoren

Drucksensoren				
Allg.	Seriennummer	MB 20xx	PX2	PX3
		Hersteller	Danfoss	Honeywell
Leistung	Ansprechzeit	< 4 ms	< 2 ms	< 2 ms
	Überlastdruck (statisch)	60 bar	31 bar	31 bar
	Berstdruck	6 x FS (max. 2000 bar)	51 bar	51 bar
	Lebensdauer	> 10 x 10 <sup>6</sup> Zyklen	> 10 Mil. Zyklen Betriebsdruck	> 10 Mil. Zyklen kalib. Druck
Elektrische Daten	Nom. Ausgangssig.	10 - 90% der [U <sub>B</sub> ]	0.5 – 4.5 V ratiom.	0.5 – 4.5 V ratiom.
	Versorgungsspannung	5 V d.c. (nom.)	5 V d.c. (nom.)	5 V d.c. (nom.)
	Stromverbrauch	≤ 5 mA bei [U <sub>B</sub> ]	max. 5.5 mA	max. 3 mA
	Lastwiderstand	≥ 10 kΩ bei [U <sub>B</sub> ]	> 2 kΩ	> 5 kΩ

Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgeführt.

Temp.	Komp. Temp.-Bereich	0 - 80 °C	- 40 - 125 °C	- 40 - 125 °C
	Lager-/Betriebstemp.	- 40 - 85 °C	- 40 - 125 °C	- 40 - 125 °C
Mech. Eig.	Nettogewicht	0.2 – 0.3 kg	k. A.	0.3 – 0.7 kg
	Gehäuse	Edelstahl	Edelstahl	Messing
	Füllung	keine	Öl	Öl
	Genauigkeit	$\leq \pm 1.00\%$ FS	$\pm 0.25\%$ FS	$\pm 0.25\%$ FS

#### 4.2.1.1 Danfoss Typ MBS 2000 / MBS 2050

Diese Machart der Drucksensoren ist besonders für raue Industrieanwendungen hergestellt worden. Sie verfügen über:

- eine Absolutwert- und Manometeranzeige (relativ)
- Messbereiche von 0 – 1 bis 0 – 600 bar
- sowie unterschiedliche Möglichkeiten für elektrische Anschlüsse und Druckanschlüsse
- robuste Konstruktion (säurefester Edelstahl) und hohe Vibrationsbeständigkeit

Es sollte jedoch beachtet werden, dass bei verschmutzten Medien die Düse verstopfen kann (Düsenöffnung 0.3 mm). Dieses Risiko kann jedoch durch eine aufrechte Montage im Betrieb verringert werden. Der Druckmesssensor der Machart MBS 2050 ist für hydraulische Anwendungen konzipiert worden, da er über einen integrierten Druckstoßminderer verfügt. Es können somit trotz starker Kavitation, Wasserschlag oder Druckspitzen Messungen im System erfolgen (Danfoss, 2017).



Abbildung 4-16: Typ MBS 2050 (Danfoss, 2017)

#### 4.2.1.2 Honeywell Typ PX2

Diese Art der Drucksensoren verwendet die piezoresistive Sensortechnologie mit Application-Specific-Integrated-Circuit (ASIC)-Signalaufbereitung. Die Aufnehmer messen den absoluten, abgedichteten Überdruck oder den belüfteten Überdruck. Die PX2-Serie wird im beiliegenden Datenblatt nicht für Medien, wie Wasser, gesättigte Luft (Dampf und Dunst) sowie Ammoniak, empfohlen (Honeywell, 2017).



Abbildung 4-17: Typ PX2 (Honeywell, 2017)

#### 4.2.1.3 Honeywell Typ PX3

PX3-Sensoren verwenden, wie die PX2-Sensoren, piezoresistive Sensortechnologie mit ASIC – Signalaufbereitung. Sie besitzen weiters:

- höhere Isolationswiderstände und Durchschlagfestigkeiten
- höhere elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)-Leistung
- höhere Frost- und Tauwiderstände gegen äußere Einflüsse
- und reduzierten Stromverbrauch.

Die PX3-Serie wird im beiliegenden Datenblatt nicht für Medien, wie Wasser, gesättigte Luft (Dampf und Dunst) sowie Ammoniak, empfohlen (Honeywell, 2018).



Abbildung 4-18: Typ PX3 (Honeywell, 2018)

Zusätzlich zu den genannten Sensoren werden noch viele mehr, für z.B. (DFRobot, 2019):

- Wasserdruckererkennung in WVS bei Häusern, Gärten und Farmen
- die Erkennung des Wasserdrucks in Außenbereichen, wie Flüssen, Seen und Meeren
- und Flüssigkeitsstanderkennung in Ausnahmefällen zu unterstützen

hergestellt.

Drucksensoren können aber nicht nur in Wasserverteilungsnetzen herangezogen werden, sondern in unterschiedlichen industriellen Bereichen, wie (Keller, 2015):

- Kälte- und Klimatechnik
- Pneumatik
- Hydraulik
- Kompressoren
- Maschinenbau
- Lüftungsanlagen
- Pumpentechnik, uvm. angewendet werden.

Es muss daher eigenständig entschieden werden, auf welche Sensoren, im Speziellen, die Wahl fällt.

Wie schon zuvor angesprochen, werden die Sensoren, die im üblichen Gebrauch herangezogen werden, hier als Referenzsensoren bezeichnet. Es wird als Referenzsensor der Typ 3100 Series der Firma Gems für die Versuche verwendet.

#### **4.2.1.4 Gems Typ 3100 Series**

Der Referenzsensor der Firma Gems bietet ein hohes Maß an Stabilität und Zuverlässigkeit mittels einer Dünnschicht-Sputtertechnologie. Des Weiteren können, durch die vielen Möglichkeiten an elektrischen Anschlüssen, die meisten Anwendungen abgedeckt werden, ohne etwaige Änderungen vornehmen zu müssen (Gems Sensors&Controls).

Eigenschaften von diesem Referenzsensor sind:

- Außergewöhnliche Langzeitstabilität
- 0-100 psi bzw. 0-7 bar Druckbereiche
- Hoher Prüfdruck mit allen mit Edelstahl benetzten Teilen
- Doppelte Druck- und Temperaturmessung möglich.



Abbildung 4-19: Typ 3100 Series (Gems Sensors&Controls)

Referenzsensoren sind im Allgemeinen gekennzeichnet durch (BD|Sensors, 2018):

- ausgezeichnetes Temperaturverhalten
- ideale Langzeitstabilität
- und kompakte Bauform.

Wie auch schon zuvor angesprochen, gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Referenzsensoren von unterschiedlichen Herstellern, die verschiedenste Vor- und Nachteile bieten.

#### 4.2.2 IoT-Module

Es werden zwei ausgewählte Mikrokontroller für die Messsysteme verwendet.

##### 4.2.2.1 Pycom FyPy

Der Mikrokontroller Pycom FiPy stellt die perfekte Grundlage im IoT-Netz dar, da dieser für die Kommunikationstechnologien SigFox, LoRa, WiFi, Bluetooth und LTE herangezogen werden kann. Eigenschaften dieses Mikrokontrollers können sein (Pycom, 2019):

- Verwendung auch als Nano LoRa-Gateway
- Passform für normales Steckbrett
- Extrem geringer Stromverbrauch
- Weltweite Verfügbarkeit

In Abbildung 4-20 wird der Mikrokontroller mit seinen Bestandteilen dargestellt.



Abbildung 4-20: Pycom FyPy Mikrokontroller (Pycom, 2019)

#### 4.2.2.2 Microtronics rapidM2M m3

Das Modul mit der Bezeichnung Microtronics rapidM2M m3 zieht einen GSM-Chip in Kombination mit einer externen Antenne heran, um die Kommunikation für die Datenübertragung zu ermöglichen. Aufgrund des GSM-Chips ist der Mikrokontroller nur für Messsysteme mit GSM geeignet (Pointl et al., 2018).

Typische Übertragungsdauern aus Versuchen können Tabelle 4-5 entnommen werden.

Tabelle 4-5: Durchschnittliche Übertragungsdauern (Pointl et al., 2018)

Intervall	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	3 h	4 h	6 h	12 h	24 h
Dauer [s]	20				30	40	50	60	240		

Auf Basis des Sendeintervalls und der Größe der zu sendenden Datenpakete, variieren die Betriebszeiten des Überwachungsgerätes (Pointl et al., 2018).

Dieser Mikrokontroller wird im Technikum zur Messung und Datenübertragung verwendet.

#### 4.2.3 Stabilität günstiger und energieeffizienter Drucksensoren

Im Laborversuch wird ein direkter Vergleich der Stabilität zwischen den IoT-Sensoren und gängigen (Referenz-)Sensoren geschaffen.

### 4.2.3.1 Versuchsbeschreibung

Die Auswahl der Sensoren wurde in Abhängigkeit der Realdaten getroffen und es wurden jene für die Versuche herangezogen, die bereits im Technikum verfügbar waren.

Die Messsensoren werden in Drucksensoren und einen Referenzsensor unterschieden, wobei als Referenzsensoren jene Sensoren bezeichnet werden, die im gängigen Gebrauch herangezogen werden. Bei den Drucksensoren beziehen sich die Kenndaten auf einen Betriebsdruck von 10 bar bzw. 150 psi und beim Referenzsensor auf einen zwischen 0 – 6 bar. Dieser Unterschied wird bei der Auswertung der Messdaten berücksichtigt.

Auf Basis der Datenanalyse aus realen Leitungsnetzen, wird ein Druckbereich bestimmt, welcher im Labor mit den Sensoren betrachtet wird. Die Festlegung der Druckstufen erfolgt eigenständig und auf Grundlage der erfolgten Ergebnisse im Laborversuch. Für die Lecklokalisierung ist der minimale Nachtverbrauch der Zonen von Interesse. Da jedoch der Referenzsensor in einem Druckbereich zwischen 0 und 6 bar arbeitet, werden die Druckstufen nach oben mit 6.0 bar begrenzt. Es werden Drücke zwischen 4.0 und 6.0 bar mit jeweils einer Stufe von 0.5 bar überprüft.

Nachdem die Druckstufen in Abhängigkeit der Sensoren und Realdaten festgelegt werden, wird der Versuchsaufbau angefertigt. Dieser ist einer Baumstruktur ähnlich. Der genaue Aufbau kann dem Kapitel 4.2.3.2 entnommen werden.

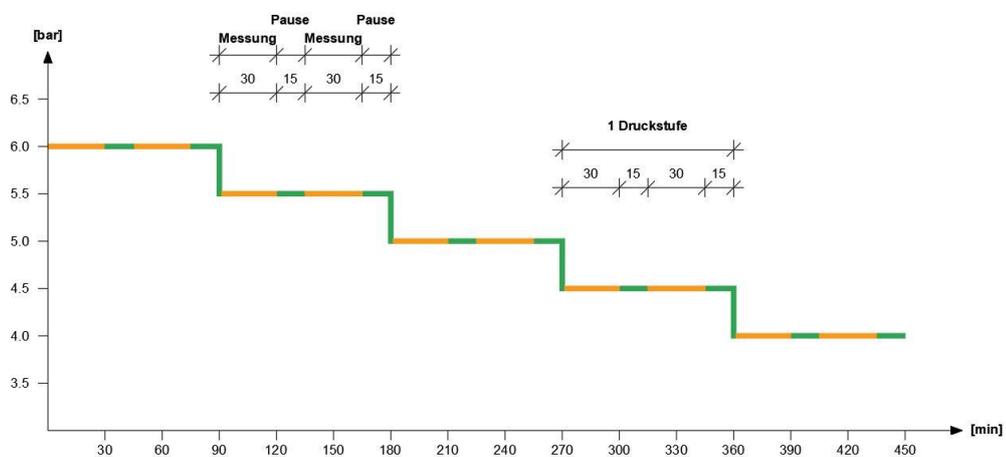


Abbildung 4-21: Versuchsablauf

In Abbildung 4-21 kann man schematisch den Ablauf des Versuches erkennen. Jede Druckstufe wird 60 min getestet, wobei nach jeweils 30 min eine schlagartige Erhöhung des Druckes um ca. 0.5 bar erfolgt. Dies wird als Einfachheit im weiteren Verlauf als Druckstoß bezeichnet. Der Druckstoß wurde absichtlich herbeigeführt, da die Reaktion auf ein solches Ergebnis informativ sein könnte. Nach dem Druckstoß findet eine 15-minütige Pause mit höherem Druck statt, nach der wieder auf den Eingangsdruck zurückgekehrt und dieser 30 min lang untersucht

wird. Nach einem zweimaligen Durchlauf dieses Schemas wird die neue Druckstufe eingestellt und überprüft.

Anhand Abbildung 4-22 kann man beispielhaft den gesamten Versuchsablauf für die Druckstufe von 6.0 bar eines Sensors in Volt erkennen. Dabei kann deutlich der Unterschied zwischen Messung und Pause beobachtet werden.

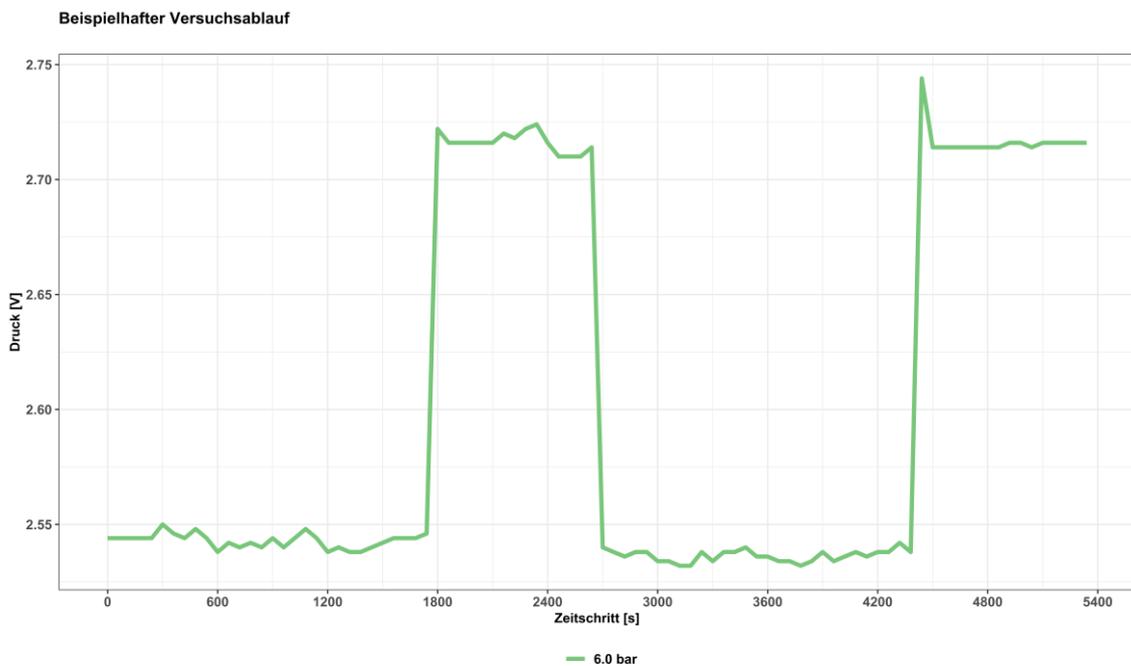


Abbildung 4-22: Beispielhafter Versuchsablauf

Für die Auswertung werden die 1-minütigen Einzelimpulswerte vor dem Druckstoß und nach der 15-minütigen Pause herangezogen (siehe Abbildung 4-23).

Anhand der Ergebnisanalyse kann erkannt werden, in wie weit die Drucksensoren vom Wertebereich des Referenzsensors abweichen. Des Weiteren kann die Stabilität durch die Druckstöße überprüft werden. Zu guter Letzt, werden die Batterieverbräuche und die Kosten über ein Jahr berechnet. Die Genauigkeit der Messung, der Batterieverbrauch und die Datenübertragung spielen eine wichtige Rolle, um später ein geeignetes Messsystem auszuwählen.

Nachdem die Daten ausgewertet werden, können die Drucksensoren miteinander verglichen und es kann eine Auswahl für einen geeigneten Drucksensor oder Verbindung mehrerer getroffen werden.

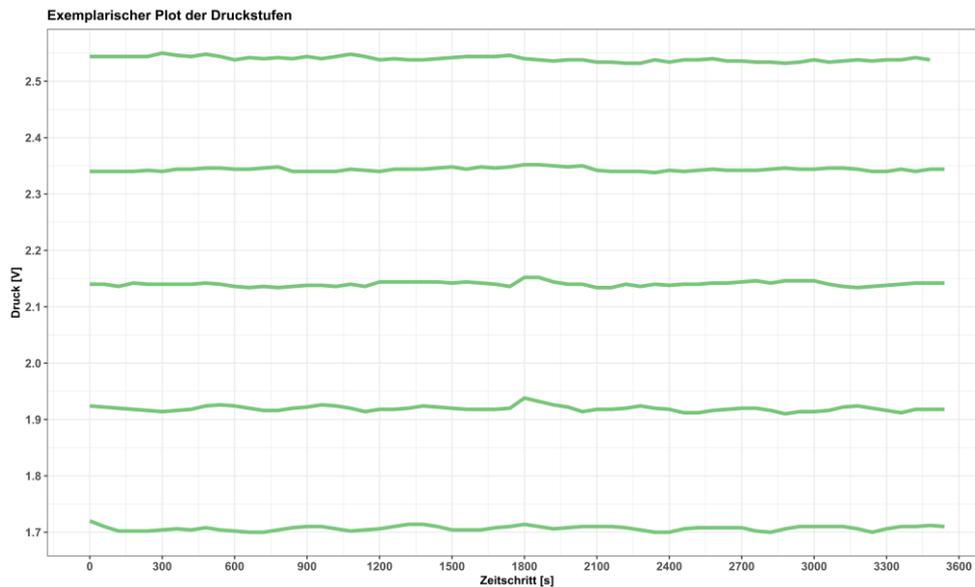


Abbildung 4-23: Exemplarische Darstellung der Drucklinien

#### 4.2.3.2 Versuchsaufbau

Nachfolgend wird auf die Bestandteile des Versuchsaufbaus eingegangen. Weiters wird eine Abbildung mittels AutoCAD in 2D und 3D erstellt, um die genaue Lage und Länge der Bestandteile zu veranschaulichen.

Bestandteile:

- Absperrventil
- Gerade Steckverbindung
- Y-Steckverbindung
- Drucksensoren
- Referenzsensor
- Basisstation
- Druckluftschlauch 6x4 mm
- Druckluftaufbereitung

Abbildung 4-24 zeigt schematisch den Versuchsaufbau mit seinen Bestandteilen. Der Aufbau ähnelt einer Baumstruktur, da dadurch die Sensoren leichter befestigt und bei aufkommenden Problemen schneller getauscht werden können, als an einem Ring. Am rechten Ast wird die Basisstation angeschlossen, um während des Versuchsablaufes die richtigen Druckeinstellungen treffen zu können. Am unteren Ende werden die Sensoren befestigt. Diese werden in den Abbildungen nur als Zylinder dargestellt. Wie die Sensoren aussehen, kann Kapitel 4.2.1 entnommen werden. In Abbildung 4-25 werden die Bestandteile der Abbildung 4-24 drei-dimensional dargestellt. Die Beschriftung und genauen Bezeichnungen der Bestandteile können Abbildung 4-24 entnommen werden.

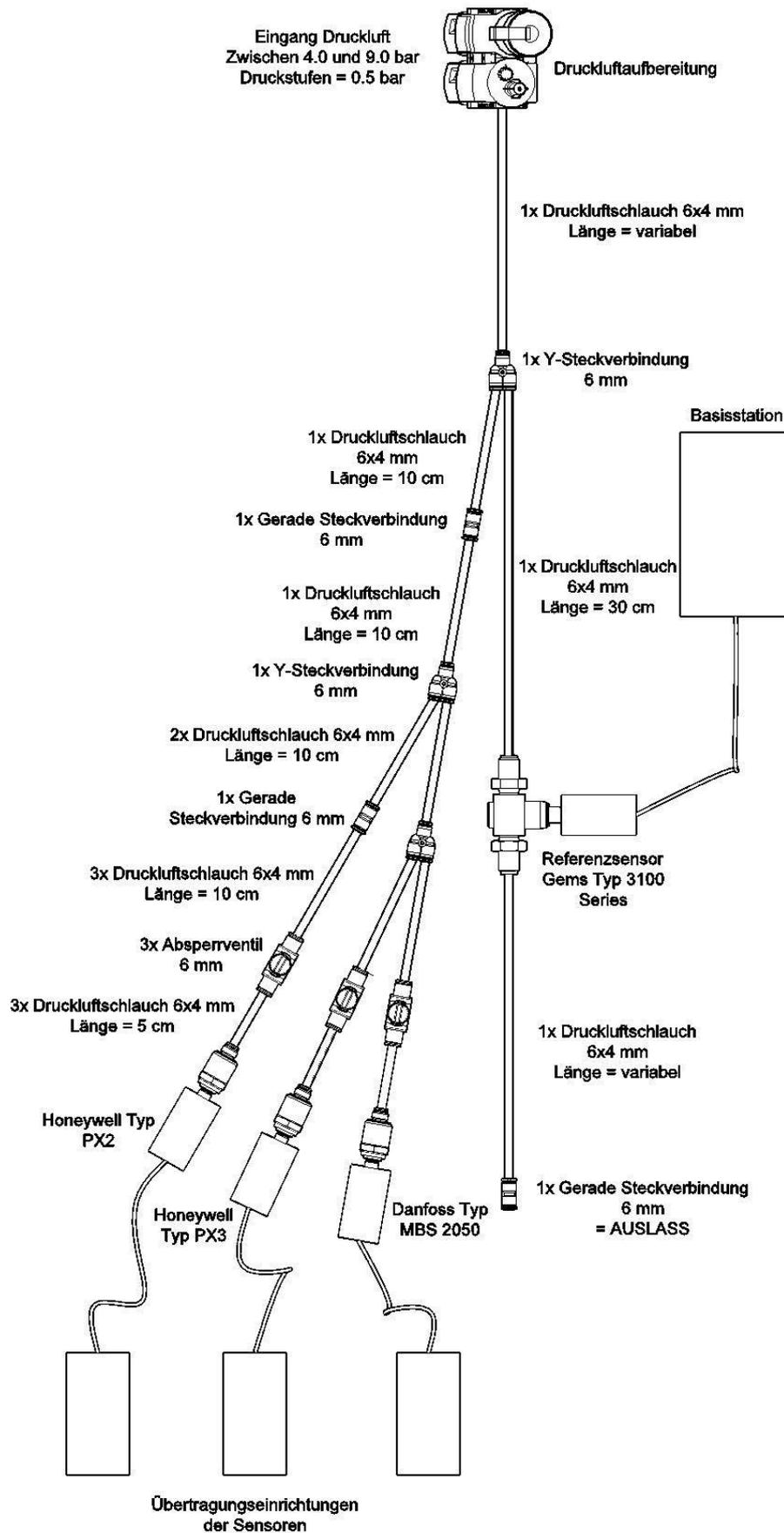


Abbildung 4-24: Schematische Darstellung Laborversuch - Grundriss

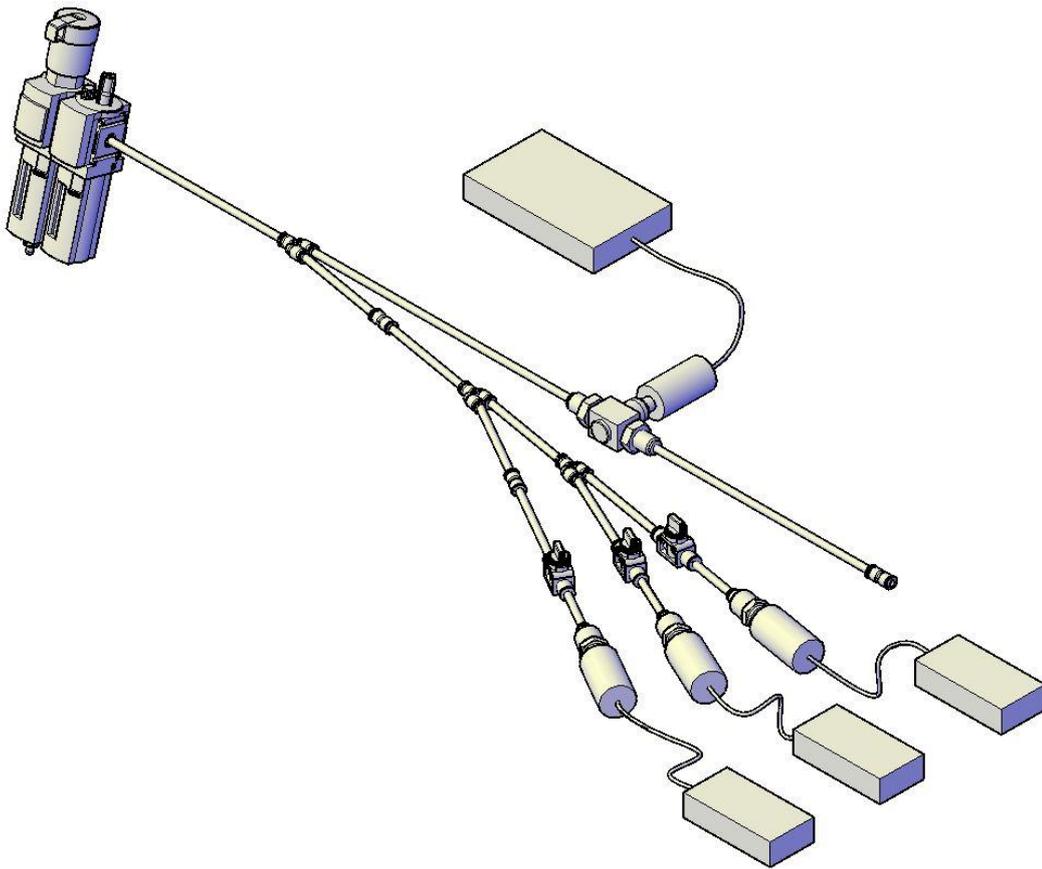


Abbildung 4-25: Schematische 3D-Darstellung Laborversuch

#### 4.2.4 Einfache Laufzeitanalyse für die Messsysteme und Technologien

Um die Laufzeit bzw. Batterielebensdauer abzuschätzen, kann ein sogenanntes Verkehrsmodell angewendet werden. Dieses Modell verhält sich ähnlich wie Sensorgeräten, bei denen Daten in regelmäßigen Abständen mit einem vordefinierten Intervall übertragen werden. Dazu werden der Aufbau und das Aufrechterhalten mit einer Verbindung benötigt, um den Austausch der Daten zwischen den Geräten zu gewährleisten (Lauridsen et al., 2018).

Um die Gesamtleistung messen zu können, wird das Leistungsmodell generell in vier Phasen unterteilt (Lauridsen et al., 2018):

- Aufbau der Verbindung
- Datenübertragung
- Trennen der Verbindung und Zurückkehren zum Ruhezustand
- Deep-Sleep-Modus (Leerlauf)

Der Einfachheit werden für die selbst erstellten Laufzeitmodelle drei Phasen berücksichtigt:

- Deep-Sleep-Modus
- Messung
- Übertragung

Es wird angenommen, dass der Deep-Sleep-Modus während des gesamten Betrachtungsintervalls konstant in die Berechnung der Laufzeit einfließt. Anschließend wird eine Sequenz erzeugt, die im festgelegten Abtastintervall Impulse erzeugt. Derselbe Schritt wird für die Übertragungsintervalle durchgeführt. Allerdings müssen die Abtastraten und Übertragungsraten nicht übereinstimmen. Im Anschluss daran, werden die Sequenzen linear überlagert und daraus wird anschließend die Laufzeit eines Messsystems berechnet. Für den Akku wird eine Ladungsmenge von 12 Ah und eine Spannung von 12 V angesetzt.

Die Abtastraten werden mit 1 min, 5 min, 15 min, 30 min und 60 min gewählt. Als Übertragungsintervall werden 1 min, 5 min, 15 min, 30 min, 60 min, 4 h, 6 h, 12 h und 24 h festgelegt.

Die Konfigurationen für die Bestimmung der Laufzeiten können Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7 entnommen werden.

Tabelle 4-6: Konfiguration über 24 Stunden

Übertragungsrate	Abtastrate				
	1 min	5 min	15 min	30 min	60 min
1 min		-	-	-	-
5 min			-	-	-
15 min				-	-
30 min					-
60 min					
240 min					
360 min					
720 min					
1440 min					

Tabelle 4-7: Konfiguration über 1.5 Stunden (Nachtminimum)

Übertragungsrate	Abtastrate		
	1 min	5 min	15 min
1 min		-	-
5 min			-

Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgesetzt.

15 min			
30 min			
45 min			
90 min			

Die in Grau gehaltenen Zellen können nicht berechnet werden, da nicht angenommen wird, dass das Übertragungsintervall kleiner als die Abtastrate gewählt werden kann.

Außerdem werden die Abtastraten für die Nachtminima mit 15 min begrenzt, da eine zu große Auflösung der Daten keinen Sinn machen würde. Die Übertragung erfolgt auch nur, wenn gemessen wird, d.h. bei Betrachtung des Nachtminimums werden bei einer Übertragungsrate von 90 min die Messwerte nur einmal pro Tag übermittelt.

Für die Berechnung der Laufzeiten werden die Kommunikationstechnologien GSM, LoRa, NB-IoT und SigFox herangezogen. Aus ersten Versuchen und aus Datenblättern können für die Übertragung und Deep-Sleep-Modus die Eingangsdaten zur Laufzeitbestimmung laut Tabelle 4-8 herangezogen werden.

Tabelle 4-8: Eingangsdaten für Messsystembeispiele (Pycom, 2019, modifiziert)

	Übertragung [mA]	Deep-Sleep [mA]
<b>GSM</b>	120.000	0.080
<b>LoRa</b>	32.000	0.081
<b>NB-IoT</b>	57.700	0.085
<b>SigFox</b>	49.58	0.105

Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass Übertragungsraten kleiner 15 min nicht für die Technologien LoRa und SigFox möglich sind, da diese in ihren Datenpaketen begrenzt sind.

#### 4.2.5 Laufzeitanalysen – einfaches Modell

Als Eingangsdaten und Energieverbrauch werden Daten aus der Literatur herangezogen und fallweise gemittelt. Für die Zusammenführung wird ein Sensor herangezogen, der im Deep-Sleep-Modus 0.08 mA und während der Messung zusätzlich 0.9 mA verbraucht.

Die Laufzeitmodelle werden für Messsysteme, die über 24 Stunden und nur während der Nachtstunden arbeiten, erstellt. Die Nachtminima werden für eine Dauer von 1.5 Stunden betrachtet (siehe auch Kapitel 4.1.2).

Es werden unterschiedliche Abtastraten, Datenübertragungsraten, Kommunikationstechnologien und Sensoren gewählt und in Zusammenhang gebracht, um einen Überblick auf den Stromverbrauch zu bekommen.

Um einen Vergleich zwischen den Messsystemen zu bekommen, werden diese mit unterschiedlichen Abtastraten und Übertragungsraten zusammengestellt und anschließend bewertet.

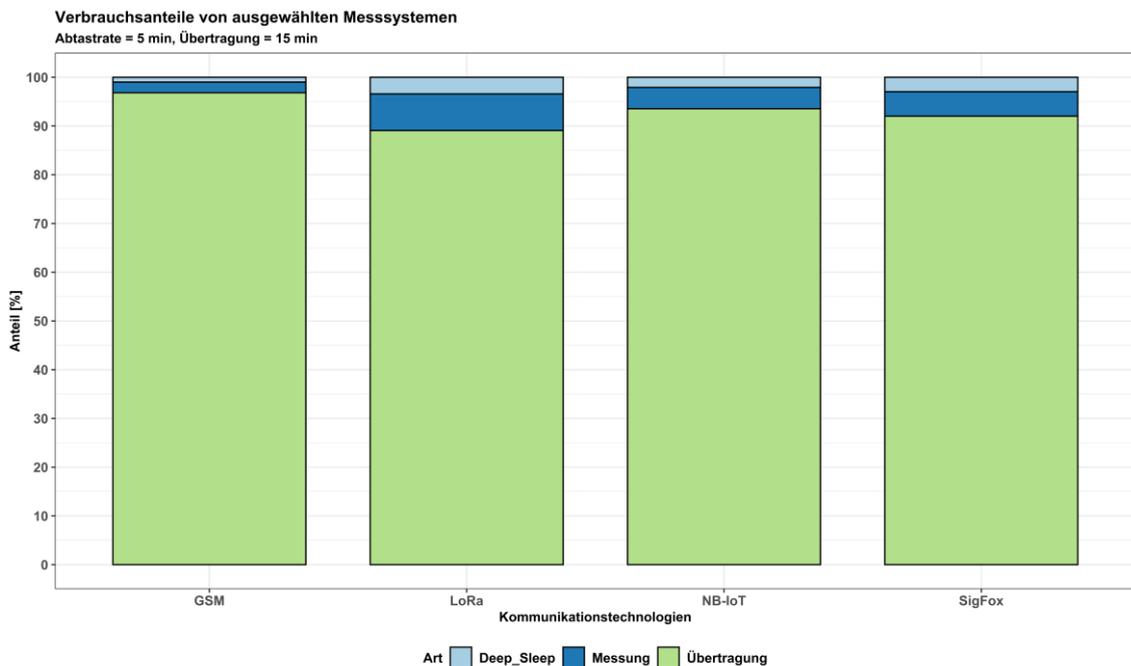


Abbildung 4-26: Verbrauchsanteile 5 min – 15 min

In Abbildung 4-26 können beispielhaft die Verbrauchsanteile von ausgewählten Kommunikationstechnologien während des Nachtstundenintervalls für eine Abtastrate von 5 Minuten und einem Übertragungsintervall von 15 min erkannt werden. Diese Abbildung stellt nur eine von vielen möglichen Zusammenstellungen für Messsysteme dar. Deep-Sleep, Messung und Übertragung nehmen die Hauptbestandteile für die Stromverbräuche an.

### 4.3 Zusammenführen wesentlicher Randbedingungen

Aus Literaturstudien, Sensoranalysen und Laufzeitanalysen ist es möglich, geeignete Druckmesssysteme auszuwählen und diese langfristig zu betreiben, sofern Algorithmen bekannt sind. Als Unterstützung dient hierfür ein Auswahlverfahren, das eigens für Wasserversorgungsunternehmen und Planer erstellt wurde und die wichtigsten Punkte zur Berücksichtigung bei der Systemauswahl beinhaltet.

Dieser Prozess soll als Hilfestellung gelten und kann für jeden beliebigen Fall eines Betreibers eines Wasserversorgungssystem herangezogen werden. Die Ergebnisse, hinsichtlich Kommunikationstechnologien und Drucksensoren, können sich daher je nach Aufgaben und Anforderungen unterscheiden. Ziel ist es, am Ende der Entscheidungsfindung die Schnittstelle zwischen den Aufgaben und Anforderungen der Leckagedetektion und -lokation geschaffen zu haben. Die ermittelten Ergebnisse dienen lediglich als Richtwerte für den Entscheidungsprozess.

Um ein Laufzeitmodell erstellen zu können, werden im Vorhinein die Vor- und Nachteile der Aggregationsmethoden und Abtastraten, Kommunikationstechnologien und Drucksensoren ermittelt.

### 4.3.1 Aggregationsmethoden und Abtastraten

Auf Basis der Datenanalyse aus Realdaten, können drei unterschiedlichen Aggregationsmethoden (Einzelimpuls-, Mittelwert- und Medianmethode) bewertet werden. Um eine Auswahl einer passenden Aggregationsmethode treffen zu können, werden im Ergebnisteil die Vor- und Nachteile gesammelt dargestellt.

Mit Abstimmung der Literatur wird die Abtastrate für 1, 5, 15, 30 und 60 Minuten gewählt. Typische Abtastraten für Tagesganganalysen sind 1 und 15 Minuten als auch 1 Tag, wobei dort in Fein- und Grobagggregation unterschieden wird (Creaco et al., 2016). Eine Grobagggregation von über 1 Stunde wäre hierfür eine zu starke Unterscheidung, weshalb man sich auf 1, 5, 15, 30 und 60 Minuten festlegte, da das Augenmerk auf den Tagesgang und die Nachtstunden gelegt wird. Eine zusätzliche Abtastrate von 5, 30 und 60 Minuten wird festgelegt, um die Auswirkungen je nach Aggregationsmethode über die Zeit zu betrachten. Es ist nur bei der Einzelimpulsmethode die Darstellung über eine Aggregation von 1 Minute möglich. Als Extremwert werden die Minimal- und Maximalwerte unter dem unteren und über dem oberen Whisker (siehe Kapitel 4.1.4) bezeichnet.

Für die Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der Aggregationsmethoden soll Tabelle 4-9 als Hilfestellung dienen. So können die Eigenschaften der Methoden übersichtlich aufgelistet werden.

Tabelle 4-9: Auswahl der Aggregationsmethoden

Aggregationsmethode					
Einzelimpuls		Mittelwert		Median	
Abtastrate 1, 5, 15, 30 und 60 Minuten		Abtastrate 5, 15, 30 und 60 Minuten		Abtastrate 5, 15, 30 und 60 Minuten	
Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
Abtastrate					
Analysemöglichkeit					
Extremwerte					

### 4.3.2 Kommunikationstechnologien

Die Kommunikationstechnologien unterscheiden sich grob hinsichtlich ihrer Benutzung in lizenzierten oder nicht lizenzierten Märkten. Da es eine Vielzahl an unterschiedlichen Technologien gibt, werden nur Ausgewählte miteinander verglichen und bewertet. Diese beschäftigen sich ausschließlich mit den LPWA-Kommunikationstechnologien, da die Kurzstreckenübertragungen für diese Thematik ausgeschlossen werden können.

Die Technologien unterscheiden sich durch eine Vielzahl an unterschiedlichen Eigenschaften. Es werden für die vorliegende Bewertung ausgewählte Charakteristiken fokussiert, da sich diese stark voneinander unterscheiden können und verschiedenste Ergebnisse hinsichtlich Vor- und Nachteile der betrachteten Technologien liefern. Diese werden deshalb gesondert beurteilt, um eine Übersichtlichkeit während der gesamten Beurteilung zu gewährleisten.

#### Eigenschaften der Kommunikationstechnologien (Ali et al., 2017):

- Abdeckung
- Bandbreite
- Energieeffizienz / -verbrauch
- Kosten
- Latenz (Verzögerungszeit)
- Reichweite (innerstädtisch)
- Sonstiges
- Zuverlässigkeit

### 4.3.3 Drucksensoren

Tabelle 4-10 soll als Hilfestellung für die Auswahl eines geeigneten Sensors gelten. Die Sensoren werden hinsichtlich ihres Energieverbrauches, ihrer Genauigkeit und Stabilität während der Messung und Datenübertragung miteinander verglichen. Da nur die Batteriespannung als Referenzgröße vorhanden ist, wird der Stromverbrauch selbst berechnet. Die Stabilität während der Datenübertragung und Messung gibt Aufschluss über eventuell vorhandene Ausfallsraten.

Der Energieverbrauch wird dadurch ermittelt, dass die Sensoren über einen festgelegten Zeitraum Daten übertragen und anhand dessen, können vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich Lebensdauer, Stromverbrauch und Stabilität während der Datenübertragung erzielt werden.

Tabelle 4-10: Auswahl von Sensoren

<b>Drucksensoren</b>		
<b>Honeywell Typ PX2</b>	<b>Honeywell Typ PX3</b>	<b>Danfoss Typ MBS 2050</b>
Druckluft variiert zwischen 4.0 bis 6.0 bar mittels Druckstufen von 0.5 bar		
<b>Batteriespannung</b>		
Stromverbrauch $W = U \times I \times t$		
<b>Genauigkeit während der Messung</b>		
<b>Stabilität während der Datenübertragung</b>		

## 5 Ergebnisse

In diesem Kapitel wird auf die Ergebnisse aus Sensorversuchen und Laufzeitanalysen eingegangen. Ziel dieses Kapitel ist es, Messsysteme und in Verbindung damit Sensoren zu finden, um optimale Ergebnisse hinsichtlich Leckagedetektion und -lokalisierung zu erzielen.

### 5.1 Sensorversuche

Es werden die Sensoren auf Basis der Realdaten aus Leitungsnetzen im Labor untersucht. Sie werden hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Stabilität miteinander verglichen, um Sensoren zu finden, die qualitativ und quantitativ genau genug sind, um für die Leckagedetektion und -lokalisierung herangezogen zu werden. Sie sollten lange Laufzeiten der Messsysteme bei geringem Stromverbrauch ermöglichen.

#### 5.1.1 Referenzsensor

Der Referenzsensor Gems Typ 3100 Series (siehe Kapitel 4.2.1.4) wird, wie die Drucksensoren, zwischen 4.0 und 6.0 bar getestet. Der Referenzsensor wird herangezogen, um die genauen Druckstufen festzulegen und Basis dessen, kann die Genauigkeit der Drucksensoren und die Abweichung dieser überprüft werden.

Tabelle 5-1: Werteverteilung des Referenzsensor aller Druckstufen

Druckstufen [bar]	MIN	Q <sub>25</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>75</sub>	MAX
6.00	5.97	5.99	5.99	5.99	6.00
5.50	5.50	5.53	5.53	5.53	5.54
5.00	4.98	5.00	5.00	5.01	5.02
4.50	4.48	4.49	4.49	4.50	4.51
4.00	4.00	4.02	4.03	4.04	4.05

Anhand Tabelle 5-1 kann erkannt werden, dass mithilfe des Referenzsensors die Druckbereiche sehr genau eingestellt worden sind. Die Abweichungen vom Minimal- zum Maximalwert befinden sich im Hundertstelbereich. Aufgrund der geringen Abweichung wurden keine Boxplots erstellt. Weiters kann erkannt werden, dass die alle Werte, egal um welche Druckstufe es sich handelt, dieselben Abweichungen zeigen. Die Stabilität des Referenzsensors kann daher sehr hoch angesetzt werden.

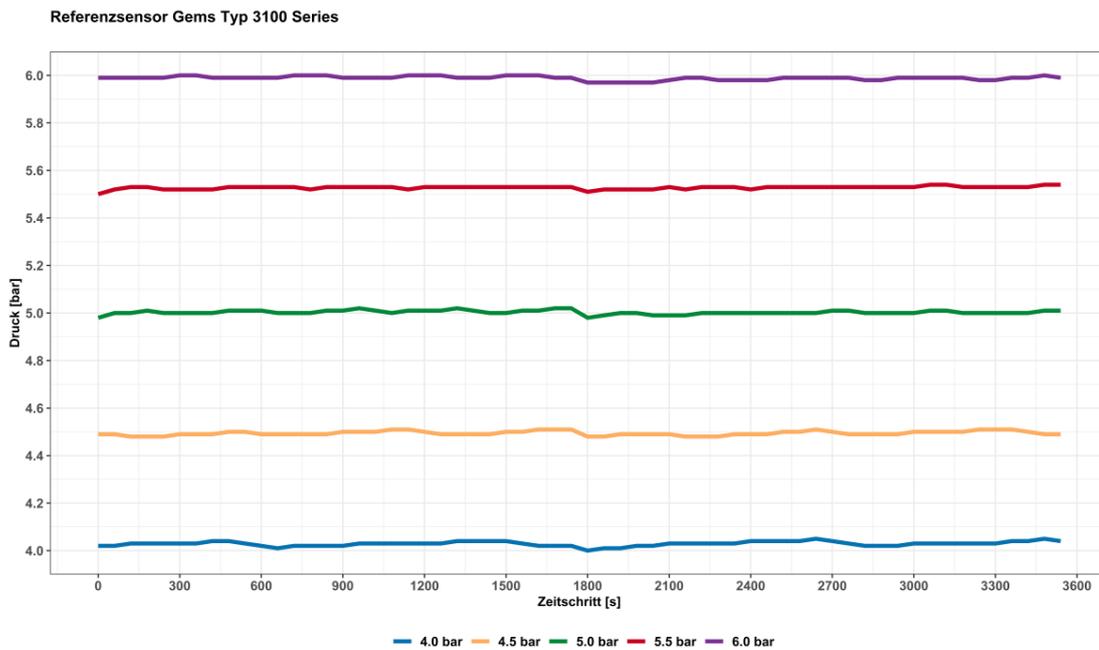


Abbildung 5-1: Stabilität des Referenzsensors

In Abbildung 5-1 werden die Einzelimpulswerte über die Zeit gezeigt. Die Messung erfolgt alle 30 Sekunden. Anhand dieser Darstellung kann behauptet werden, dass sich der Sensor sehr stabil verhält. Zum Zeitschritt 1800 Sekunden ist eine kleine Einkerbung ersichtlich, weshalb die plötzliche Druckerhöhung zur Pause eine kleine Auswirkung erzeugt. Jedoch kann mittels der Tabelle 5-1 erkannt werden, dass es sich dabei um Veränderungen im 1/100-Bereich handelt und deshalb der Druckstoß keine gravierenden Ergebnisse erzeugt.

Im Weiteren Schritt wird auf die Ergebnisse der Drucksensoren eingegangen. Zusätzlich zu der Werteverteilung und der Stabilität wird der Stromverbrauch über ein Jahr berechnet. Anschließend werden die Ergebnisse der Drucksensoren bewertet.

Es muss beachtet werden, dass die Rohdaten des Referenzsensors bereits mit der Einheit bar angegeben wurden, allerdings die der Drucksensoren in der Einheit Volt. Deswegen muss eine Umrechnung auf linearer Basis von Volt auf Bar mit dem Faktor 2.5 erfolgen. Die Abweichungen der Drucksensoren werden im Vergleich mit dem Referenzsensor berechnet.

### 5.1.2 Drucksensor Honeywell Typ PX2

In der nachfolgenden Tabelle können die Werteverteilungen der Druckstufen des Sensors Honeywell Typ PX2 (siehe Kapitel 4.2.1.2) erkannt werden. Die Werte müssen im Vorhinein von der Einheit Volt auf Bar umgerechnet werden.

Tabelle 5-2: Werteverteilung des Drucksensors Honeywell Typ PX2 aller Druckstufen [V]

Druckstufen [V]	MIN	Q <sub>25</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>75</sub>	MAX
6.00	2.532	2.537	2.538	2.544	2.550
5.50	2.346	2.340	2.344	2.346	2.352
5.00	2.142	2.138	2.140	2.142	2.152
4.50	1.922	1.916	1.918	1.922	1.938
4.00	1.710	1.704	1.708	1.710	1.720

Tabelle 5-3: Werteverteilung des Drucksensors Honeywell Typ PX2 aller Druckstufen [bar]

Druckstufen [bar]	MIN	Q <sub>25</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>75</sub>	MAX
6.00	6.330	6.343	6.345	6.360	6.375
5.50	5.865	5.850	5.860	5.865	5.880
5.00	5.355	5.344	5.350	5.355	5.380
4.50	4.805	4.790	4.795	4.805	4.845
4.00	4.275	4.260	4.270	4.275	4.300

Tabelle 5-4: Prozentuelle Abweichung Drucksensor Honeywell Typ PX2

Druckstufen [bar]	6.00	5.50	5.00	4.50	4.00
Abweichung [%]	5.842	6.618	7.135	6.844	6.900

Es kann, wie beim Referenzsensor, erkannt werden, dass sich die Werte sehr stabil verhalten (siehe Abbildung 5-2). Des Weiteren kann man um Zeitschritt 1800 Sekunden einen leichten Knick in den Druckstufen 5.0 und 4.5 bar erkennen. Dies liegt wiederum an dem plötzliche Druckstoß. Dieser hat aber keine gravierenden Auswirkungen auf die Ergebnisse (siehe Tabelle 5-3). Die Messung erfolgte bei diesem Drucksensor jede Minute.

Weiters ist in der Abbildung zu erkennen, dass der Messwert um ca. 0.35 bar vom Referenzwert abweicht. Diese Differenz kann mit dem in Graz herrschenden Luftdruck in Verbindung gebracht werden. Diese muss berücksichtigt werden, wenn Absolutwerte von Interesse sind.

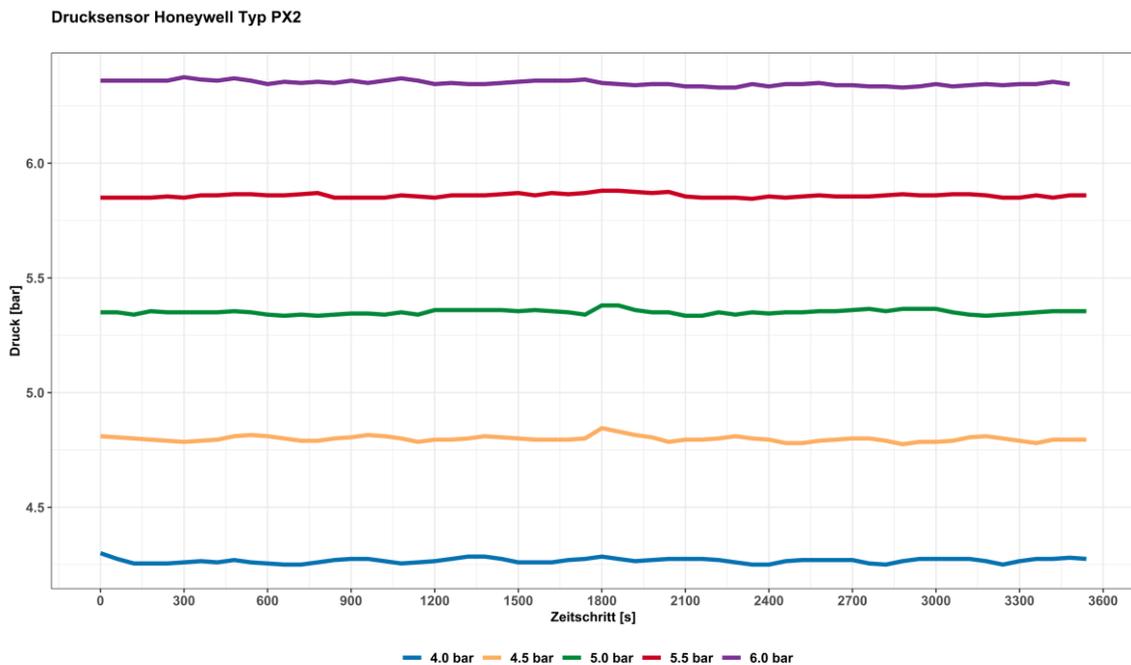


Abbildung 5-2: Stabilität des Drucksensors Honeywell Typ PX2

Mittels Abbildung 5-2 kann wieder auf die Stabilität geschlossen werden. Die Werte schwanken etwas mehr im Vergleich zum Referenzsensor. Da sich die Änderungen jedoch im Hundertstelbereich abspielen, sind diese zu vernachlässigen und die Behauptung eines sehr stabilen Sensors kann, aufgrund der Linearität, ausgesprochen werden.

### 5.1.3 Drucksensor Honeywell Typ PX3

Nachfolgend kann die Werteverteilung der Druckstufen des Sensors Honeywell Typ PX3 (siehe Kapitel 4.2.1.3) veranschaulicht werden. Die Werte werden im Vorhinein von der Einheit Volt auf Bar umgerechnet. Die Messung erfolgte jede Minute als Einzelimpuls.

Tabelle 5-5: Werteverteilung des Drucksensors Honeywell Typ PX3 aller Druckstufen [V]

Druckstufen [V]	MIN	Q <sub>25</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>75</sub>	MAX
6.00	2.532	2.534	2.538	2.543	2.546
5.50	2.336	2.340	2.342	2.346	2.352
5.00	2.132	2.136	2.180	2.140	2.152
4.50	1.924	1.930	1.932	1.934	1.938
4.00	1.732	1.740	1.744	1.747	1.750

## Ergebnisse

Tabelle 5-6: Werteverteilung des Drucksensors Honeywell Typ PX3 aller Druckstufen [bar]

Druckstufen [bar]	MIN	Q <sub>25</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>75</sub>	MAX
6.00	6.330	6.335	6.345	6.356	6.365
5.50	5.840	5.850	5.855	5.865	5.880
5.00	5.330	5.340	5.450	5.350	5.380
4.50	4.810	4.825	4.830	4.835	4.845
4.00	4.330	4.350	4.360	4.366	4.375

Tabelle 5-7: Prozentuelle Abweichung Drucksensor Honeywell Typ PX3

Druckstufen [bar]	6.00	5.50	5.00	4.50	4.00
Abweichung [%]	5.771	6.509	7.400	7.311	8.906

Es kann, wie schon zuvor, erkannt werden, dass sich die Werte sehr stabil verhalten (siehe Abbildung 5-3). Des Weiteren kann man um Zeitschritt 1800 Sekunden einen leichten Knick bei den Druckstufen 5.0, 4.5 und 4.0 bar erkennen. Dies liegt an dem Druckstoß. Der Knick fällt allerdings sehr gering aus (siehe auch Tabelle 5-5).

Weiters ist in der Abbildung zu erkennen, dass der Messwert um ca. 0.35 bar vom Referenzwert abweicht. Diese Differenz kann mit dem in Graz herrschenden Luftdruck in Verbindung gebracht werden. Diese muss berücksichtigt werden, wenn Absolutwerte von Interesse sind.

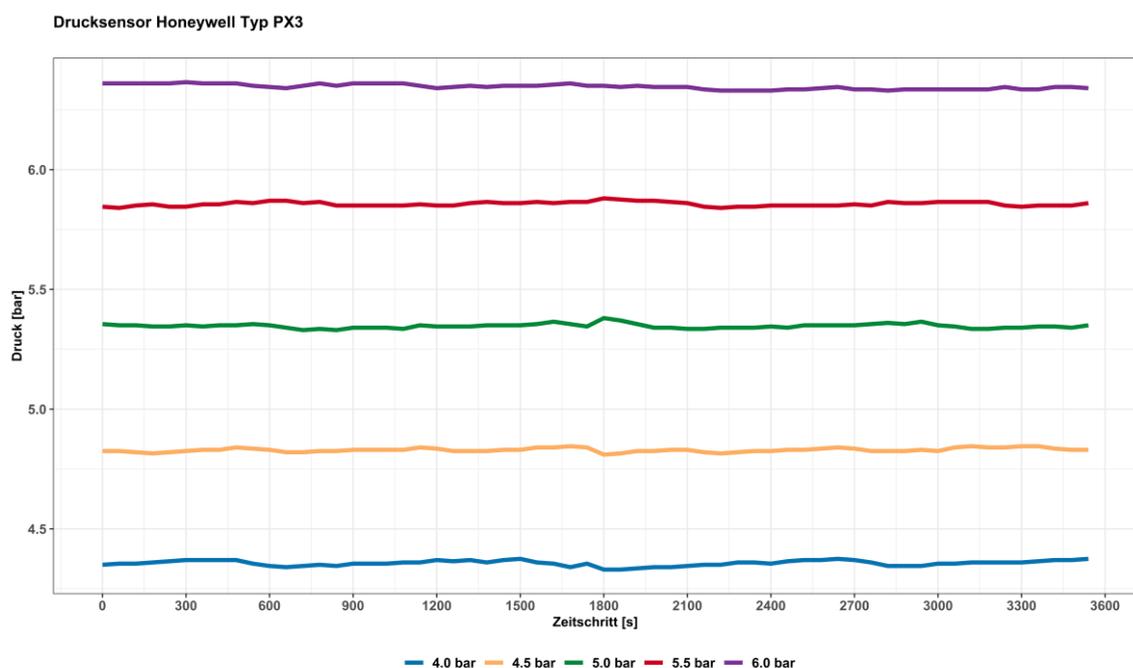


Abbildung 5-3: Stabilität des Drucksensors Honeywell Typ PX3

Mittels Abbildung 5-3 kann auf die Stabilität geschlossen werden. Die Werte schwanken im Hundertstelbereich und sind daher zu vernachlässigen. Die Aussage, dass der Drucksensor sehr stabil ist, kann zu 100% bestätigt werden.

#### 5.1.4 Drucksensor Danfoss Typ MBS 2050

In der nachfolgenden Tabelle können die Werteverteilungen der Druckstufen des Sensors Danfoss Typ MBS 2050 (siehe Kapitel 4.2.1.1) erkannt werden. Es erfolgt wieder eine Umrechnung von Volt auf Bar.

Tabelle 5-8: Werteverteilung des Drucksensors Danfoss Typ MBS 2050 aller Druckstufen [V]

Druckstufen [V]	MIN	Q <sub>25</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>75</sub>	MAX
6.00	2.920	2.926	2.928	2.932	2.938
5.50	2.726	2.728	2.732	2.736	2.742
5.00	2.522	2.526	2.528	2.532	2.542
4.50	2.316	2.322	2.323	2.328	2.328
4.00	2.124	2.130	2.143	2.136	2.140

Tabelle 5-9: Werteverteilung des Drucksensors Danfoss Typ MBS 2050 aller Druckstufen [bar]

Druckstufen [bar]	MIN	Q <sub>25</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>75</sub>	MAX
6.00	7.300	7.315	7.320	7.330	7.345
5.50	6.815	6.820	6.830	6.840	6.855
5.00	6.305	6.315	6.320	6.330	6.355
4.50	5.790	5.805	5.808	5.820	5.820
4.00	5.310	5.325	5.358	5.340	5.350

Tabelle 5-10: Prozentuelle Abweichung Drucksensor Danfoss Typ MBS 2050

Druckstufen [bar]	6.00	5.50	5.00	4.50	4.00
Abweichung [%]	22.033	24.218	26.500	29.078	33.413

Es kann, wie beim Referenzsensor, erkannt werden, dass sich die Werte sehr stabil verhalten (siehe Abbildung 5-4). Des Weiteren kann man um Zeitschritt 1800 Sekunden einen leichten Knick, wieder in den unteren Druckstufen, erkennen. Dies liegt an der Erhöhung der Druckstufe um 0.5 bar. Der Knick fällt allerdings sehr gering aus (siehe auch Tabelle 5-8).

## Ergebnisse

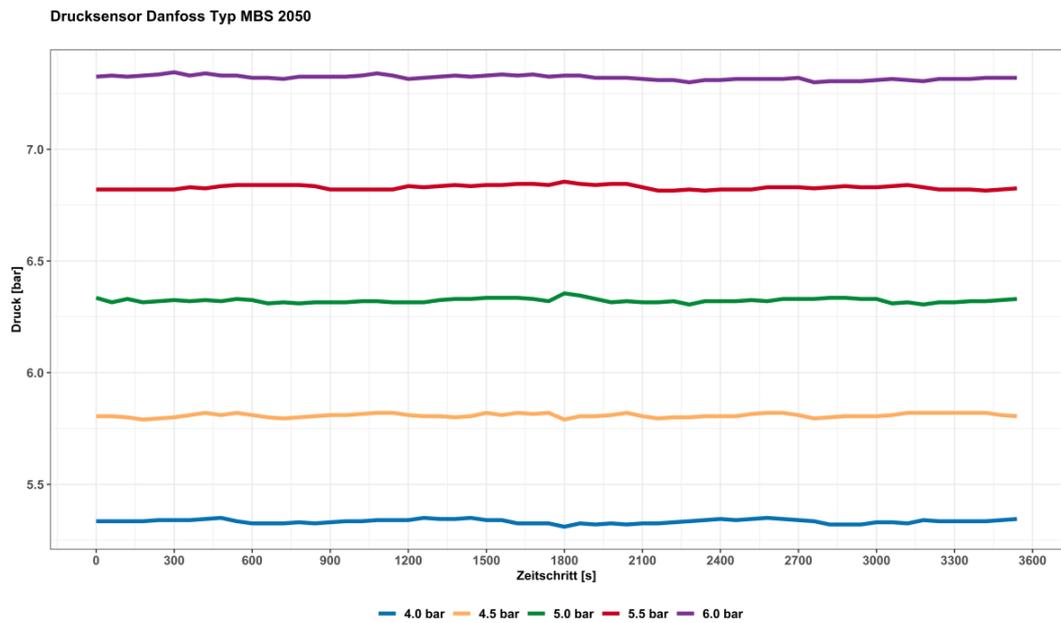


Abbildung 5-4: Stabilität des Drucksensors Danfoss Typ MBS 2050

Mittels Abbildung 5-4 kann wieder auf die Stabilität geschlossen werden. Die Werte schwanken etwas mehr im Vergleich zum Referenzsensor. Die Behauptung eines sehr stabilen Sensors kann ausgesprochen werden.

Aufgrund des Messprinzips beträgt die Abweichung zum Referenzsensor rund 1.30 bar, wobei 0.30 bar wieder dem Luftdruck, so wie bei den Sensoren des Typs Honeywell, zugesprochen werden können und 1.0 bar dem Messprinzip.

Die Unterschiede bezüglich der Druckstufen der einzelnen Sensoren kann exemplarisch Abbildung 5-5 entnommen werden, wo die Differenzen zum Referenzsensor für die Druckstufe von 5 bar aufgezeigt werden.

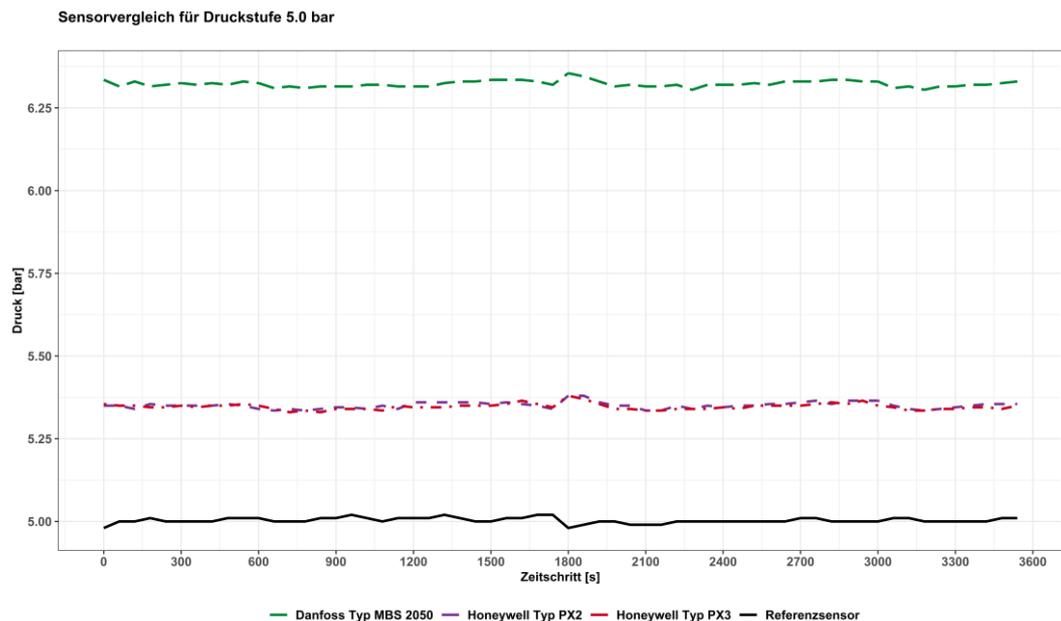


Abbildung 5-5: Sensorvergleich für Druckstufe von 5.0 bar

Die Sensoren der Marke Honeywell ähneln sich sehr stark. Der Sensor der Marke Danfoss misst, wie zu erkennen, einen größeren Druck gegenüber den beiden anderen, aufgrund der unterschiedlichen Messprinzipien der Sensoren. Die Unterschiede in den Abweichungen der Sensoren müssen berücksichtigt werden, wenn Absolutwerte von Interesse sind. Nach der Umrechnung auf Absolutwerte liefern sie die Drucksensoren vergleichbare Werte.

### 5.1.5 Stromverbrauch

Um einen Überblick über den Batterieverbrauch der Sensoren zu kriegen, werden die mittleren Spannungen für die Druckstufen und jeweiligen Sensoren berechnet. Über die Spannung und den Strom kann anschließend auf den Batterieverbrauch (=Arbeit) geschlossen werden. Für den Strom werden 5.0 Volt angenommen.

#### 5.1.5.1 Drucksensor Honeywell Typ PX2

Der Drucksensor Honeywell Typ PX2 wurde am 09. Oktober und 10. Oktober 2019 am Versuchsaufbau getestet.

Tabelle 5-11: Spannungsverlauf des Drucksensors Honeywell Typ PX2

Druckstufen [bar]	6.00	5.50	5.00	4.50	4.00
Spannung [V]	3.714	3.713	3.713	3.706	3.703
$U_{\text{Mittel}} = 3.710 \text{ V}$					

Dies ergibt eine mittlere Spannung von 3.710 Volt.

Die Leistung  $P$  ist somit:

$$P = U \cdot I = 3.71 \cdot 5.0 = \mathbf{18.55 \text{ W}}$$

Die Arbeit über ein Jahr ergibt sich zu:

$$W = \frac{P}{1000} \cdot 24 \cdot 365 = \frac{18.55}{1000} \cdot 24 \cdot 365 = \mathbf{162.50 \text{ kWh}}$$

Als Arbeit wird hier auch der Batterieverbrauch während eines Jahres bezeichnet.

#### 5.1.5.2 Drucksensor Honeywell Typ PX3

Der Drucksensor Honeywell Typ PX3 wurde am 17. September und 9. Oktober 2019 am Versuchsaufbau im Labor getestet. Die Batteriespannung kann der Tabelle 5-12 entnommen werden.

Tabelle 5-12: Spannungsverlauf des Drucksensors Honeywell Typ PX3

Druckstufen [bar]	6.00	5.50	5.00	4.50	4.00
Spannung [V]	3.806	3.806	3.806	4.078	4.076
$U_{\text{Mittel}} = 3.914 \text{ V}$					

Dies ergibt eine mittlere Spannung von 3.914 Volt.

Die Leistung  $P$  ist somit:

$$P = U \cdot I = 3.914 \cdot 5.0 = \mathbf{19.57\ W}$$

Die Arbeit über ein Jahr ergibt sich zu:

$$W = \frac{P}{1000} \cdot 24 \cdot 365 = \frac{19.57}{1000} \cdot 24 \cdot 365 = \mathbf{171.452\ kWh}$$

Als Arbeit wird hier auch der Batterieverbrauch während eines Jahres bezeichnet.

### 5.1.5.3 Drucksensor Danfoss Typ MBS 2050

Der Drucksensor Danfoss Typ MBS 2050 wurde am 17. September und 9. Oktober 2019 am Versuchsaufbau getestet. Die Batteriespannung kann Tabelle 5-13 entnommen werden.

Tabelle 5-13: Spannungsverlauf des Drucksensors Danfoss Typ MBS 2050

Druckstufen [bar]	6.00	5.50	5.00	4.50	4.00
Spannung [V]	3.803	3.802	3.801	4.089	4.087
$U_{\text{Mittel}} = 3.916\ \text{V}$					

Dies ergibt eine mittlere Spannung von 3.916 Volt.

Die Leistung  $P$  ist somit:

$$P = U \cdot I = 3.916 \cdot 5.0 = \mathbf{19.582\ W}$$

Die Arbeit über ein Jahr ergibt sich zu:

$$W = \frac{P}{1000} \cdot 24 \cdot 365 = \frac{19.582}{1000} \cdot 24 \cdot 365 = \mathbf{171.536\ kWh}$$

Als Arbeit wird hier auch der Batterieverbrauch während eines Jahres bezeichnet.

Die in Kapitel 5.1.5 berechneten Werte sollen nur als Richtwerte gelten und können sich von den Ergebnissen nach Installation in einem realen Leitungsnetz davon unterscheiden. Des Weiteren wurden die Druckstufen nur über einem Zeitraum von 90 Minuten getestet, weshalb eine genaue Einschätzung entfallen darf. Um die Lebensdauer eines Sensors zu überprüfen, müsste dieser in Vollbetrieb über längere Zeit laufen, was aber in diesem Fall nicht stattfand.

## 5.2 Laufzeitanalyse

Gemäß dem Schema aus Kapitel 4.2.5 für die Berechnung der Laufzeit, werden vier Übertragungstechnologien verglichen. Die Laufzeitvergleich geschieht unter Annahme, dass der Danfoss IoT-Sensor mit einer Stromstärke von 0.9 mA herangezogen wird. Für die Spannung des Sensors werden exemplarisch 5.0 V angenommen. Obwohl unterschiedliche Arten von Drucksensoren überprüft wurden, verbrauchen sie nahezu dieselbe Spannung und daher wird kein spezifischer Drucksensor für die Berechnung der Laufzeiten ausgewählt.

Die Laufzeitanalysen werden für den Betrieb über 24 Stunden dargestellt.

### 5.2.1 Laufzeitanalysen bei Betrieb über den ganzen Tag

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Laufzeitanalysen bei Betrieb über 24 Stunden, mit einer Batterieladungsmenge von 12 Ah und 12 V dargestellt.

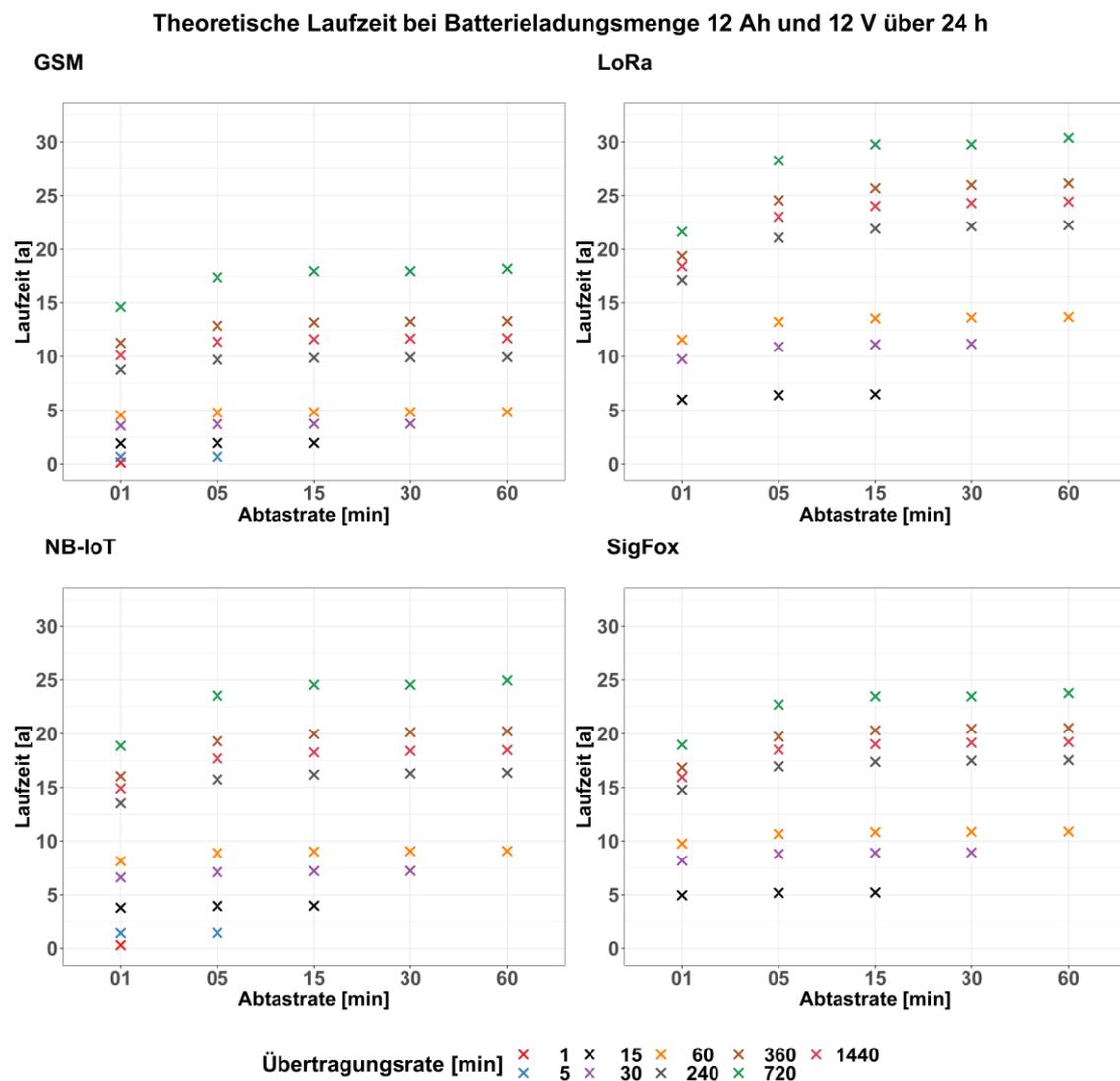


Abbildung 5-6: Laufzeitanalysen über 24 Stunden

Aufgrund der geringen Unterschiede in den Druckstufen werden nicht alle betrachteten Zonen, sondern nur exemplarisch eine Zone, auf die Laufzeit überprüft. Für LoRa und SigFox beginnen die Ergebnisse erst ab einer Übertragungsfrequenz von 15 min, da die Datenpaketübertragungen pro Tag limitiert sind.

Mithilfe von Abbildung 5-6 können die Laufzeitunterschiede zwischen den Messsystemen mit spezifischen Kommunikationstechnologien GSM, LoRa, NB-IoT und SigFox über 24 Stunden erkannt werden.

Beispielsweise kann ein Messsystem mittels NB-IoT mit einer Abtastrate von 1 min und einem Übertragungsintervall von 1440 min knapp 15 Jahre betrieben werden. Im Gegensatz dazu, kann dasselbe System mittels 720 min Übertragung und gleicher Abtastrate rund 20 Jahre in Betrieb gehalten werden. Das liegt daran, dass die Übertragungsdauern mit dem Übertragungsintervall ansteigen (siehe Tabelle 4-5). Mit diesen Eingangsparametern würde ein Messsystem mittels GSM rund 18, LoRa 30, NB-IoT 25 und mit SigFox rund 24 Jahre in Betrieb genommen werden können.

Es können somit mit allen Abtastraten und Übertragungsraten beliebige Zusammenstellung gewählt werden und anhand dessen, können die Laufzeiten auf Basis der Übertragungstechnologien über einen ganzen Tag verglichen werden.

Bei den theoretischen Ergebnissen der Laufzeitanalyse sollten jedoch die Entladekurven von Batterien berücksichtigt werden. Aufgrund dessen, werden in der Praxis die berechneten Laufzeiten aus Abbildung 5-6 höchstwahrscheinlich nicht erreicht.

Des Weiteren kann erkannt werden, je seltener übertragen und gemessen wird, desto geringer ist der Einfluss auf die Laufzeit eines Messsystems. Jedoch ist bei LoRa an größerer Anstieg der Laufzeit im Modell zu erkennen, als beispielsweise bei GSM oder SigFox.

Diese Ergebnisse sind nur theoretisch und basieren auf Mittelwerten aus der Literatur. Es müssen bei Anwendungen in der Praxis Störungen beim Verbindungsaufbau und -abbau sowie Netzabdeckungen uvm. berücksichtigt werden.

Laufzeitmodelle für die Nachtminima wurden nicht erstellt, da die Laufzeiten über 24 Stunden schon sehr hoch ausfallen und daher die Zeiten über die Nachtstunden ein Vielfaches davon sind.

## 6 Auswahlverfahren – Zusammenführung der Erkenntnisse

Es werden die Ergebnisse der Kommunikationstechnologien, Daten- und Laufzeitanalysen zusammengeführt.

### 6.1 Aggregationsmethoden und Abtastraten

Anhand der Datenauswertung aus den realen Leitungsnetzen wird deutlich, wie sehr sich die Messdaten je nach Abtaststrategie und Aggregationsmethode unterscheiden. Auf Basis der drei Zonen, der Größe der Datensätze und der betrachteten Messintervalle kann daher als Eingangsgröße zur Findung eines passenden Messsystems eine Aggregationsmethode in Verbindung mit einer Abtaststrategie gewählt werden.

Nach der Auswertung aller drei Zonen konnte erkannt werden, dass je größer die Abtaststrategie gewählt wird, desto mehr werden die Messwerte bei der Mittelwert- und Medianmethode geglättet.

Beim Einzelimpuls wird nur der bestimmte Wert zum bestimmten Intervall herangezogen, anders als bei der Mittelwert- und Medianmethode. Das heißt, Werte zwischen dem Abtastintervall werden bei dieser Methode nicht berücksichtigt. Wählt man die Mittelwertmethode, so ist ein Anteil der Extremwerte, wenn diese im Abtastintervall zu finden sind, vorhanden. Bei der Medianmethode werden die Extremwerte nicht berücksichtigt. Mithilfe der Bewertungsmethode kann man die Vor- und Nachteile aller Aggregationsmethoden in Verbindung mit den Abtaststrategien selbstständig abwägen. Bestimmt man eine fixe Abtaststrategie und entscheidet man sich für die Einzelimpulsmethode, so ist ein kleineres Datenpaket nötig, als wenn man sich für die Mittelwert- oder Medianmethode ausspricht. Die muss für die Kommunikationstechnologie berücksichtigt werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Charakteristiken der Aggregationsmethode können die Ergebnisse hinsichtlich False-Positive-Rate (FPR) und True-Positive-Rate (TPR) verfälscht werden. Die Einzelimpulsmethode und Mittelwertmethode könnten aufgrund der Extremwerte eine höhere False-Positive-Rate besitzen als die Medianmethode, da das System schneller einen Fehlalarm auslösen würde. Jedoch darf das System nur einen Fehlalarm und gleichzeitig eine hohe TPR auswerfen, wenn eine Anomalie in den Ganglinien auftritt, welche nicht nach kurzem Zeitraum, sondern nach einem Vielfachen der Abtaststrategie, wieder zum Normalzustand zurückkehrt.

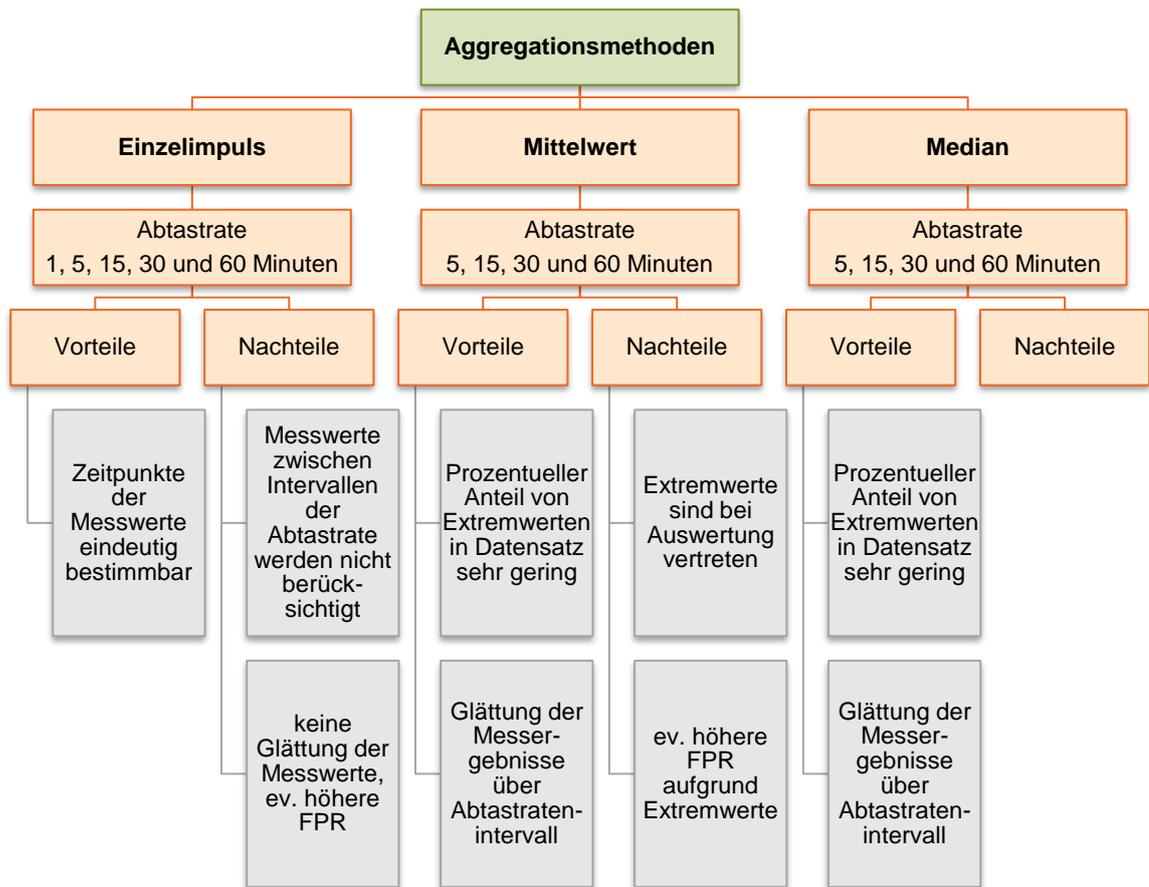


Abbildung 6-1: Vor- und Nachteile der Aggregationsmethoden

## 6.2 Kommunikationstechnologien

Die Kommunikationstechnologien unterscheiden sich grob hinsichtlich ihrer Benutzung in lizenzierten oder nicht lizenzierten Märkten. In diesem Kapitel werden die Vor- und Nachteile von LTE, NB-IoT, WiMAX, SigFox und LoRa vorgebracht. Die Kurzstreckentechnologien, z.B.: Bluetooth oder auch Wi-Fi, werden hier nicht weiter behandelt. Die Entscheidungsfindung der optimalsten Kommunikationstechnologie basiert auf den dort behandelten Eigenschaften, welche Tabelle 6-1 entnommen werden können.

Tabelle 6-1: Kommunikationstechnologien ((Ali et al., 2017), modifiziert)

Kommunikationstechn.	Nicht-lizenziert			Lizenziert	
	LTE	NB-IoT	WiMAX	SigFox	LoRa
<b>Abdeckung</b>	Verbesserungsbedarf, für Anwendungen in ländlichen Gebieten	Indoorabdeckung, Übertragung auch bei starken Hindernissen (unterirdisch)	Probleme im Zusammenhang mit Abdeckungs-lücken	-	Gute Abdeckung mittels ISM – Bänder
<b>Bandbreite</b>	200 kHz	200000 Nutzer für jede 200 kHz Übertragung	Bis 10 MHz	Bis 868 MHz	Abhängig von Kommunikationsart

Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgeführt.

## Auswahlverfahren – Zusammenführung der Erkenntnisse

<b>Energieeffizienz / -verbrauch</b>	Optimierungen müssen für geringeren Verbrauch vorgenommen werden	Geringer Verbrauch über längere Betriebszeiten	-	Kleiner Datensatz mit geringer Bandbreite kann energieeffizient übertragen werden	Batteriefreundlich aufgrund geringen Energieverbrauchs
<b>Kosten</b>	-	Geringe Kosten für Operationen < 180 kHz, günstiger als LTE	Sehr teuer	Keine zusätzlichen Roaming-Gebühren bei Länderübergreif	-
<b>Latenz</b>	Kann für echtzeit-kritische Anwendungen minimiert werden	Gering	-	-	-
<b>Reichweite</b>	2.5 – 5 km	< 15 km	Bis 6 km	3 – 10 km	15 – 20 km
<b>Sonstiges</b>	Ursprünglich für H2H-Anwendungen, kann bestehende Kommunikation stören, Kommunikation in beide Richtungen	Große Anzahl an Geräten kann verbunden werden, batteriesparende Funktionen (Lebensdauer bis 10 Jahre; keine Installation und Wartung lokaler Netze nötig, minimaler Aufwand bei Vernetzung, unabhängig von externen Stromquellen, beidseitige Kommunikation	Kapazität muss mittels Modulationschema optimiert werden, ansonsten steigen Kommunikationskosten, Kommunikation erfolgt beidseitig	Komplexe Schnittstellenoperationen verhindern geringen Stromverbrauch, langsame Datenübertragung, einseitige Kommunikation; Erstes globales Netzwerk mit länderübergreifender Nutzung; Gerätelebensdauer bis zu 10 Jahren möglich	Kommunikation in beide Richtungen, aufgrund physikalischer Einschränkungen nicht für > 100 Nachrichten pro Minute geeignet
<b>Zuverlässigkeit</b>	-	-	-	Wird aufgrund geringer Empfangsleistung beeinträchtigt	Hoher Sicherheitslevel wird benötigt

Die Lizenz für eine Kommunikationstechnologie ist nur erforderlich, wenn Übertragungen über die Grundstücksgrenze via Telekommunikation oder Sprachdienste auf Grundlage selbst betriebener Telekommunikationsnetzwerke erfolgen. Daher wird für diese Art der Kommunikation keine Lizenz benötigt, kann aber durchaus beantragt werden (Bärwald, 2009).

Die Koppelung einer Kommunikationstechnologie an einen unabhängigen Netzbetreiber ist eine gute Alternative, wenn man nicht an einen Mobilfunkbetreiber gebunden sein will.

Nach Gegenüberstellung der einzelnen Charakteristiken kann erkannt werden, dass jeder dieser Technologien seine Vor- und Nachteile bietet. Je nach Anwendungsbereich und auf welche Thematik genau das Augenmerk gelegt wird, müssen die Eigenschaften abgewogen und miteinander verglichen werden.

### 6.3 Sensoren

Durch die Überprüfung der Drucksensoren im Labor kann auf Energieverbrauch, Genauigkeit und Stabilität geschlossen werden. Die genannten Kriterien werden über ein definiertes Messintervall und gewählte Druckstufen beobachtet.

Es muss aber gesagt werden, dass diese Versuche nur unter optimalen Bedingungen im Labor durchgeführt werden. Würde man mehrere Sensoren in einem realen Leitungsnetz installieren, so kann es vorkommen, dass die hier ermittelten Ergebnisse nicht mit denen aus dem realen Netz übereinstimmen, da dies nur eine erste Analyse darstellt.

Der Weg für die Entscheidungsfindung, für die Drucksensoren während der Versuche, unter den festgelegten Voraussetzungen wird in Abbildung 6-2 aufgezeigt. Es finden sich alle drei Sensoren in dem Diagramm wieder und die Ergebnisse hinsichtlich Energieverbrauch, Genauigkeit und Stabilität können auch dem Ergebnisteil entnommen werden können.

Die Abweichung der Drucksensoren zum Referenzsensor wurde im Labor mehrmals untersucht und durch Herannahme unterschiedlicher Bestandteile überprüft.

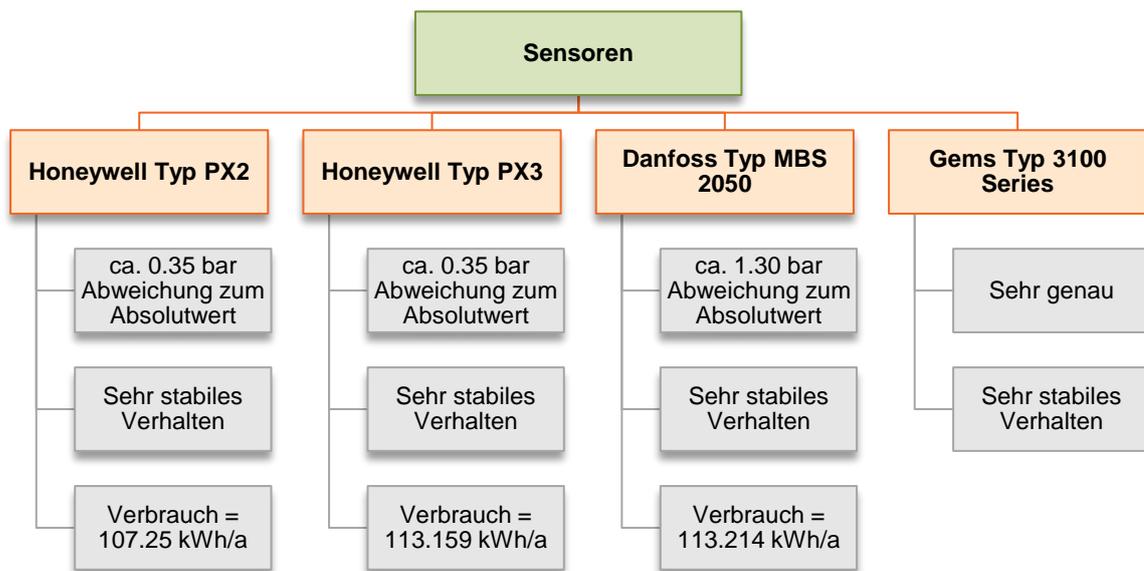


Abbildung 6-2: Eigenschaften der Sensoren während der Bewertung

Über dieses Bewertungsschema sieht man deutlich, dass die Unterschiede zueinander sehr gering sind. Jedoch ist der Sensor des Typs Danfoss zu vernachlässigen, da dieser eine sehr hohe Ungenauigkeit besitzt. Dieses Ergebnis ist sehr positiv, da beim Einkauf, in diesem Fall, nur der Preis des Sensors beachtet werden muss. Allerdings ist zu erkennen, dass der Stromverbrauch des Drucksensors Honeywell Typ PX2 etwas geringer ausfällt, als bei den beiden anderen.

## 6.4 Laufzeitanalysen

Vergleicht man nun beide Betriebsweisen, so können ganz klar Unterschiede in den Laufzeiten erkannt werden. Durch lange Laufzeiten können somit hohe Betriebszeiten und damit geringe Wartungseinheiten in Verbindung gebracht werden.

Mit der Betriebsweise von 24 Stunden kann ein Messsystem bis zu 32 Jahren ohne Tausch der Batterie angewendet werden.

Es darf aber nicht vernachlässigt werden, in wie weit sich die Laufzeiten ändern, wenn unterschiedliche Kommunikationstechnologien gewählt werden.

Ein Wasserversorgungsunternehmen oder Planer muss daher abwägen, ob eine Datenanalyse über 24 Stunden nötig ist und in Verbindung damit viele Wartungseinheiten, oder ob die Analyse der Nachtminima ausreicht.

Für weitere Vergleiche sollten mehrere Übertragungstechnologien und unterschiedliche Sensoren und Mikrokontroller eigens überprüft werden.

## 6.5 Zusammenführung der Ergebnisse

In den vorherigen Kapiteln wurden jeweils die Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile der Aggregationsmethoden und Abtastraten, Kommunikationstechnologien, Drucksensoren und Laufzeitanalysen aufgelistet und zusammengefasst.

Die in Kapitel 2 festgelegten Anforderungen für die Leckagedetektion und -lokation müssen dahingehend erfüllt werden, dass sie für den spezifischen Anwendungsfall optimale Ergebnisse liefern. Daher sollte der in Abbildung 6-3 dargestellte Entscheidungsprozess die Wahl auf eine geeignete Kommunikationstechnologie und einen Sensor, mithilfe der Ergebnisse aus Kapitel 5, erleichtern, ohne eine Literaturstudie oder etwaige Versuche durchführen zu müssen. Es sollten die Zusammenstellungen der Ergebnisse für eine Auswahl eines Messsystems ausreichen. Als Zieldefinition sowohl als auch Eingangsgröße dient eine ausgewählte Aggregationsmethode in Verbindung mit einer oder unterschiedlichen Abtastraten.

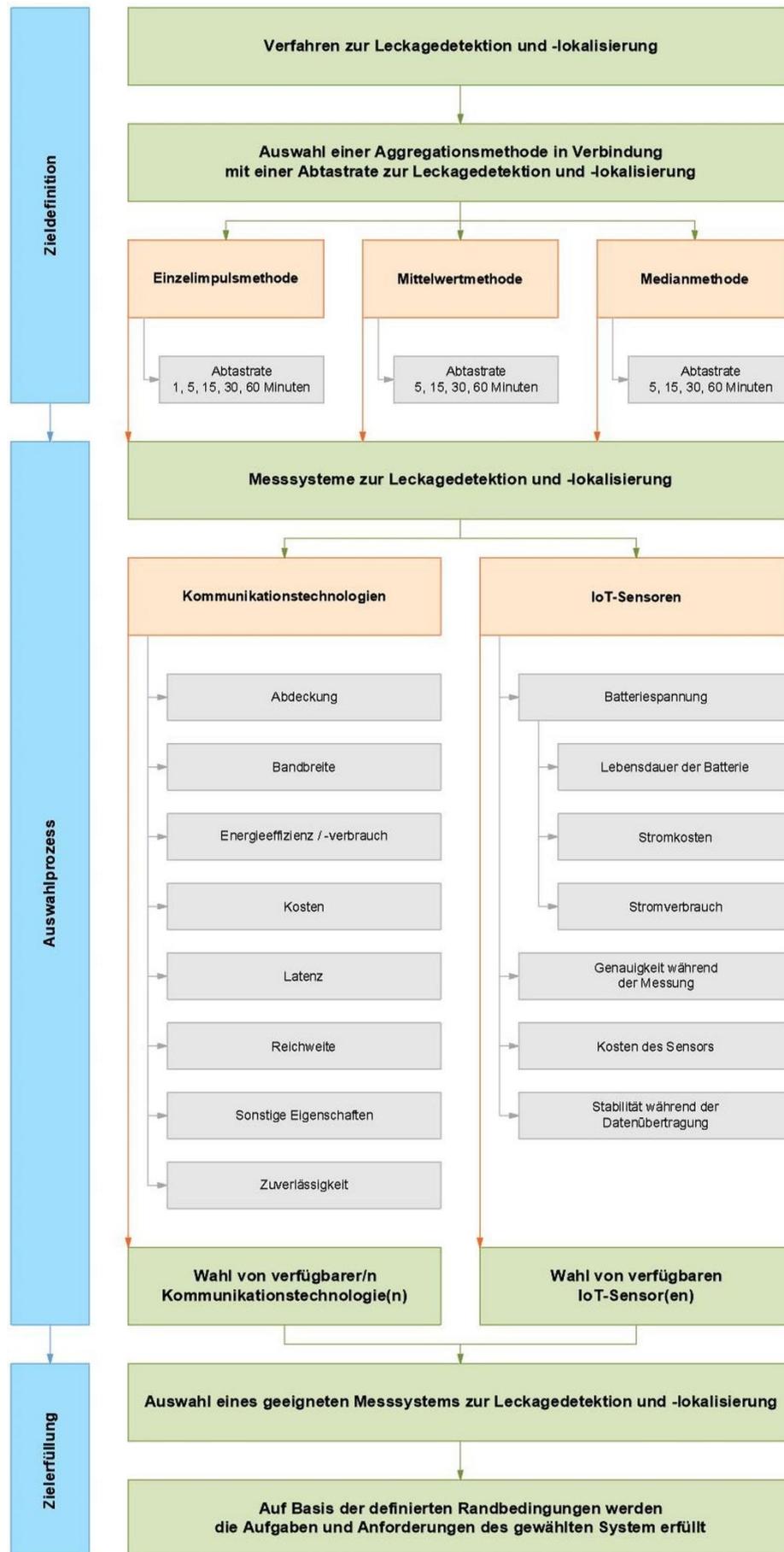


Abbildung 6-3: Entscheidungsprozess

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden zur Leckagedetektion und Leckagelokalisierung im Internet of Things. Sie unterscheiden sich grob in datenbasierte sowohl als auch modellbasierte Methoden. Es kann gesagt werden, dass für daten- sowohl als auch modellbasierten Methoden die Datensätze aus hydraulischen Messwerten unerlässlich sind. Sie unterscheiden sich in ihrer Verwendung der Datensätze und auch bei der Herangehensweise in der Leckagedetektion und -lokalisierung.

Ein Druckmesssystem im Smart Water wird unterteilt in Kommunikationstechnologien, Datenanalysen und Sensoren, weshalb auf diese Bestandteile genauer eingegangen wird.

Es gibt eine Menge an verschiedenen Kommunikationstechnologien, die sich grob in Langstrecken- und Kurzstreckentechniken unterscheiden lassen. Welche Art der Kommunikationstechnologie verwendet werden kann, hängt von den jeweiligen Anwendungen und Messbereichen ab. Es muss abgewogen werden, welche Technologien für den entsprechenden Anwendungsfall verwendet werden können, wobei eine Koppelung mehrerer Techniken auch möglich ist. Die Vor- und Nachteile hängen stark von den Eingangsdaten ab und es muss selbst getestet werden, in wie weit sich die ausgewählte Technologie in den selbst definierten Randbedingungen verhält. Je nach Übertragungsrate und Größe des zu übertragenden Datensatzes, müssen der Energieverbrauch und die dadurch entstehenden Kosten abgewogen werden. Aber nicht nur die Kosten dürfen in den Vordergrund gestellt werden, sondern auch Probleme im Zusammenhang mit der Datengröße und -übertragung dürfen nicht außer Acht gelassen werden.

Bei der Datenauswertung sind sowohl fehlende, als auch falsche Daten immer vorhanden, weshalb eine vorherige Aufbereitung und Untersuchung dieser nicht entfallen darf. Datensätze mit hohen Unsicherheiten stellen ein Hindernis für eine präzise und effektive Leckagedetektion und -lokalisierung dar.

Die Datenanalyse von Realdaten erfolgte nicht nur durch Betrachtung des Einzelimpuls, sondern auch für den Mittelwert und Median über die jeweils festgelegten Abtaststratenintervalle. Durch die Unterscheidung in drei Aggregationsmethoden konnten verschiedenste Erkenntnisse gewonnen werden, welche Vor- und Nachteile dieser Methoden bieten. Die Unterschiede zwischen Mittelwert- und Medianmethode sind aber sehr gering und es sollte im weiteren Verlauf nur zwischen Einzelimpuls und Mittelwert- oder Medianmethode differenziert werden.

Auf Basis der Auswertung aus realen Datensätzen können unterschiedlichste Abtaststraten gewählt werden. Mit Verkleinerung oder Vergrößerung der Abtaststraten gehen auch diverse Vor- und Nachteile einher. Bei sehr kleiner Abtaststraten muss mit einer sehr großen Datenmenge umgegangen werden, die nicht nur bei der Übertragung eine Rolle spielt, sondern auch Betriebsstationen und Netzwerke

benötigt, die genügend Speicherplatz aufweisen. Bei höheren Abtastraten kann die Erkenntnis über die Sensitivität der Sensoren verloren gehen und bei eventuell auftretenden Leckagen können diese erst später erkannt werden, da die auftretende Anomalie erst verzögert ersichtlich wird.

Für die Größe des Datenpaketes und die Genauigkeit sowohl als auch Sensitivität der Daten macht es einen Unterschied, ob die Einzelimpuls- oder Mittelwert- bzw. Medianmethode herangezogen wird. Bei gleichem Abtastratenintervall können bei der Einzelimpulsmethode die Werte zwischen der Abtastrate vernachlässigt und daher kann das Datenpaket sehr klein gehalten werden. Entscheidet man sich jedoch für die Mittelwert- bzw. Medianmethode, so kann dies zu einer sehr großen Datenmenge führen und dadurch kann der Energieverbrauch und infolge dessen die Kosten stark ansteigen. Auf Basis dieser Entscheidungen muss auch die richtige Kommunikationstechnologie gewählt werden, da nicht jede dieser Technologien mit großen oder kleinen Datensätzen während der Übertragung umgehen kann.

Bei den Drucksensoren werden die Messfehler meistens während der Datenerfassung generiert und hängen überwiegend von der Leistungsfähigkeit der jeweiligen Sensoren ab.

Da die Sensoren in einem definierten Wertebereich arbeiten, kann es vorkommen, dass geringe oder zu hohe Wasserdrücke nicht richtig gemessen werden könnten. Es müssen auch genügend Sensoren im Netz zur Verfügung stehen, da fehlende Sensoren starke Variationen in der Fehlerdetektion aufweisen können, wenn die Abstände zwischen ihnen zu groß gewählt werden. Allerdings führen mehr Sensoren wiederum zu größeren Datenpaketen und dadurch zu höheren Kosten.

Bei den Laborversuchen werden nur sehr kleine Datensätze, im Vergleich zu den Realdaten, ausgewertet. Der Versuchsaufbau, an dem die Sensoren getestet wurden, ähnelt einer Baumstruktur aufgrund dessen, weil der Aufbau und somit die Messungen schnell erfolgen können und auftretende Wartungseinheiten rasch durchgeführt werden können. Die Sensoren müssen bei etwaigen Problemen im Wasserversorgungsnetz zugänglich sein. Des Weiteren sollten eventuell mehrere Arten von Sensoren in einem Netz platziert werden, um so einen gleichzeitigen Ausfall aller Drucksensoren vorzubeugen und eine interne Kontrolle für die Druckmessung zu haben.

Die Datenanalyse aus den Laborversuchen zeigt nur sehr geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Sensoren. Es wurden zwei Sensoren derselben Herstellerfirma getestet und ein Weiterer. An den Ergebnissen sieht man eindeutig, dass die Stabilität während der Messung, auch mit einem künstlich erzeugten Druckstoß, sehr hoch ist. Daher kann eine Empfehlung für alle Drucksensoren für die Druckmessung in WVS ausgesprochen werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Energieverbrauch beim Drucksensor Honeywell Typ PX2 etwas geringer ist. Dies liegt daran, dass die Übertragungseinrichtung während des Versuchsprozess ausgetauscht wurde und mit einer neuen Batterie ersetzt wurde.

Es wurden die Laborversuche mittels Druckluft getestet, da dies eine kostengünstigere Variante im Vergleich zu Versuchen mit Wasser darstellt.

Im weiteren Schritt werden die Kommunikationstechnologien und Sensoren in Verbindung gebracht. Daher kann die Auswahl für ein geeignetes Druckmesssystem je nach Anwendungsfall erleichtert werden.

Anhand von Laufzeitanalysen kann die Batterielebensdauer für ein ausgewähltes Messsystem berechnet werden. Dazu wird zwischen Messung und Übertragung über 24 Stunden und in den Nachtstunden unterschieden. Erfolgt die Messung und Übertragung nur während der Nachtstunden, so kann die Laufzeit deutlich erhöht werden, im Vergleich zur Betriebsweise über 24 Stunden. Bei den Laufzeitanalysen machen nicht die Abtastraten und der Deep-Sleep-Modus den Großteil aus, sondern die Übertragungstechnologien. Daher sollte die Auswahl der Übertragungsrate stark überdacht werden. Des Weiteren können die Anzahl der Übertragungen von Datenpaketen während eines Tages begrenzt sein. Aufgrund dessen, kann für LoRa und SigFox keine Übertragungsrate kleiner 5 min gewählt werden. Diese Technologien haben ein großes Potential und eröffnen somit neue Möglichkeiten in der Leckagedetektion und -lokalisierung.

Welche Übertragungsmöglichkeit nach der Installation der Sensoren in WVS herangezogen werden kann, sollte eigens in einem realen Leitungsnetz überprüft werden.

Da die Drucksensoren auf einem provisorischem Aufbau im Labor getestet worden sind und darauf die Ergebnisse und Erkenntnisse basieren, darf nicht davon ausgegangen werden, dass in realen Anwendungen dieselben Ergebnisse entstehen. Dafür müssten die Sensoren in einem realen Leitungsnetz installiert werden.

Für noch genauere Untersuchungen sollten im weiteren Schritt Sensoren von mehreren Firmen getestet werden, da auch die Sensoren je nach Anwendungsgebiet Vor- und Nachteile bieten.

Nach Zusammenführung der Ergebnisse, mit definierten Eingangsparametern bezüglich Abtastrate und Übertragungsintervall, müssen diese mittels Algorithmen für Software-basierte Methoden zur Leckagedetektion und -lokalisierung überprüft werden. Die Druckempfindlichkeit von Sensoren beim Auftritt von Leckagen, der Energieverbrauch und Genauigkeit aller Bestandteile sollte daher mittels Simulationen überprüft werden. Die Algorithmen sollten als Ziel eine möglichst geringe FPR und eine möglichst hohe TPR haben.

## Literaturverzeichnis

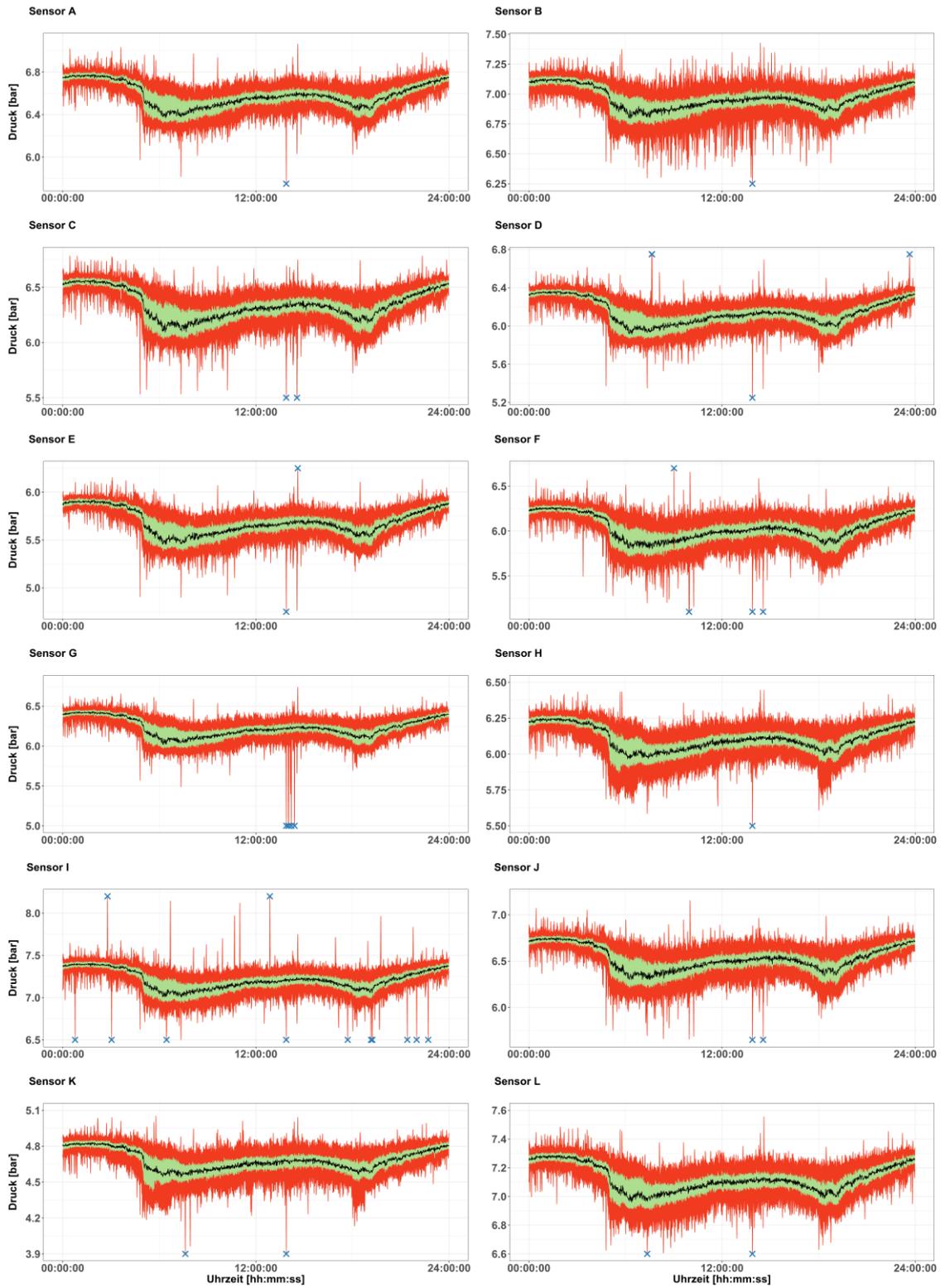
- 2 Leiter- und 3 Leitertechnik (2019) [online] <https://www.uweelectronic.de/de/temperaturmanagement-2/thermosensoren/2-3-und-4-leitertechnik.html> (Accessed March 25, 2019).
- Ali et al. (2017) "Technologies and challenges in developing Machine-to-Machine applications: A survey" in *Journal of Network and Computer Applications.*, 124–139.
- Bärwald, W. (2009) *Expert Praxislexikon Kommunikationstechnologien*, D-71272 Renningen, Expert Verlag.
- BD|Sensors (2018) Industrie-Druckmessumformer DMP\_321.
- Bhuvancswari & Porkodi (2014) "The Internet of Things (IoT) Applications and Communiation Enabling Technology Standards: An Overview"
- Boxplots (2019) [online] <https://www.crashkurs-statistik.de/boxplots/> (Accessed July 23, 2019).
- Connectivity Now and Beyond (2019) Ubidots Blog. [online] <https://ubidots.com/blog/exploring-cat-m1-nb-iot-lpwan-connections/> (Accessed March 19, 2019).
- Creaco et al. (2016) "Parameterizing residential water demand pulse models through smart meter readings" in *Environmental Modelling & Software*. ScienceDirect. [online] <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.019>.
- Danfoss (2017) Druckmessumformer für Hochleistungsanwendungen MBS 2000 und MBS 2050.
- DFRobot (2019) Gravity: Water Pressure Sensor SKU: SEN0257. [online] [https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Gravity:\\_Water\\_Pressure\\_Sensor\\_SKU:\\_SEN0257](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/Gravity:_Water_Pressure_Sensor_SKU:_SEN0257) (Accessed March 20, 2019).
- Ferrandez-Gamot et al. (2015) "Leak Localization in Water Distribution Networks using Pressure Residuals and Classifiers"
- From Austria, Steiermark, Graz [online] <http://www.yk13lahoa.com/diendan/archive/index.php/t-367.html> (Accessed October 16, 2019).
- Gems Sensors&Controls 3100 Series Compact High Pressure OEM Pressure Transmitter.
- Gems Sensors&Controls 3100B0010G01B000 | Gems Sensors G1/4 Drucksensor, max. 10bar | RS Components. [online] <https://de.rs-online.com/web/p/drucksensoren/1235543/> (Accessed October 10, 2019b).
- GmbH TopTarif Internet (2019) GSM. [online] <https://www.toptarif.de/internet/wissen/gsm/> (Accessed July 16, 2019).

- Heliot Group (2019) HELIOT. [online] <https://www.heliotgroup.com/> (Accessed August 20, 2019).
- Honeywell (2017) Heavy Duty Pressure Transducers PX2 Series. [online] [www.honeywell.com](http://www.honeywell.com).
- Honeywell (2018) Heavy Duty Pressure Transducers PX3 Series. [online] [www.honeywell.com](http://www.honeywell.com).
- Hussain et al. (2017) Medium access control techniques in M2M communication: survey and critical review. [online] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ett.2869> (Accessed June 25, 2019).
- IoT Architecture for Resource Efficiency in FSCs (2019) ResearchGate. [online] [https://www.researchgate.net/figure/IoT-Architecture-for-Resource-Efficiency-in-FSCs\\_fig2\\_328163597](https://www.researchgate.net/figure/IoT-Architecture-for-Resource-Efficiency-in-FSCs_fig2_328163597) (Accessed March 19, 2019).
- Keller (2015) Piezoresistive Drucktransmitter Serie 21 C. [online] [www.keller-druck.com](http://www.keller-druck.com).
- Lauridsen et al. (2018) “An Empirical NB-IoT Power Consumption Model for Battery Lifetime Estimation”
- Li et al. (2015) “A review of methods for burst/leakage detection and location in water distribution systems” in *Water Science & Technology: Water Supply.*, 429–441.
- LoRa Funktechnologie (2019) LineMetrics | Digitalisierung per Plug&Play. [online] <https://www.linemetrics.com/produkte/linemetrics-lora/> (Accessed March 19, 2019).
- LPWA – Definition und Details (2019) [online] <https://www.de.paessler.com/it-explained/lpwa> (Accessed June 24, 2019).
- Mittelwert, Median, Modus (2019) bettermarks - Österreich. [online] <https://at.bettermarks.com/mathe-portal/mathebuch/mittelwert-median-modus.html> (Accessed August 20, 2019).
- Moczulski et al. (2018) “SysDetLok - a leakage detection and localization system for water distribution networks” in *IFAC PapersOnLine.*, 521–528.
- Niefenführ, P. (2019) Der piezoresistive Effekt. [online] <https://blog.first-sensor.com/de/piezoresistiver-effekt> (Accessed March 20, 2019).
- Pacheco et al. (2017) “IoT Security Framework for Smart Water System” in *The University of Arizona, Tucson, Arizona, USA.*
- Pérez et al. (2014) “Leak Localization in Water Networks”
- Pointl et al. (2018) “Feasibility Study of a Micro Turbine-Powered Pressure Sensor for Leak Detection and Leak Localization” in *Kingston, Ontario, Canada.*

- Puust et al. (2010) "A review of methods for leakage management in pipe networks"
- Pycom (2019) Pycom. [online] <https://pycom.io/solutions/network/> (Accessed June 25, 2019).
- Ratiometrisches Signal (2019) WIKA-Blog. [online] <https://blog.wika.de/know-how/analoge-ausgangssignale-ratiometrisch/> (Accessed March 20, 2019).
- Rubikon Werbeagentur (2019) WEGRAZ. [online] <http://www.wegraz.at/de/projekte-hauptordner/my-smart-city-graz.php> (Accessed June 24, 2019).
- SigFox (2019) [online] <https://www.sigfox.com/en/coverage> (Accessed August 8, 2019).
- Sinha et al. (2017) "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT"
- Smart Cities World (2019) Smart Cities World. [online] <https://www.smartcities-world.net/news/news/smart-cities-services-worth-225bn-by-2026-1618> (Accessed March 19, 2019).
- Smart City Graz (2019) [online] <http://www.smartcitygraz.at/> (Accessed June 24, 2019).
- Stadtgebiet Statistiken [online] <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/stadtgebiet/> (Accessed October 16, 2019).
- Steffelbauer, D. & Fuchs-Hanusch, D. (2015) "OOPNET: An object-oriented EPANET in Python" in Elsevier Ltd.
- Steffelbauer, D. B. (2018) Model-Based Leak Localization in Water Distribution Systems.
- Thornton et al. (2002) *Water Loss Control*, Mc Graw Hill.
- US EPA (2019) EPANET. US EPA. [online] <https://www.epa.gov/water-research/epanet> (Accessed July 15, 2019).
- W. Müller (2011) Grundlagen zur Messtechnik - Sensoren. [online] [sensoren.odt](https://www.sensoren.odt) (Accessed September 16, 2019).
- Walski et al. (2009) "Pressure vs. Flow Relationship for Pipe Leaks"
- What is the Internet of Things? (2019) Malaysia Premier Property and Real Estate Portal. [online] <http://www.starproperty.my/index.php/articles/property-news/what-is-the-internet-of-things/> (Accessed June 24, 2019).
- Wu & Liu (2017) "A review of data-driven approaches for burst detection in water distribution systems" in *Urban Water Journal.*, 972–983.

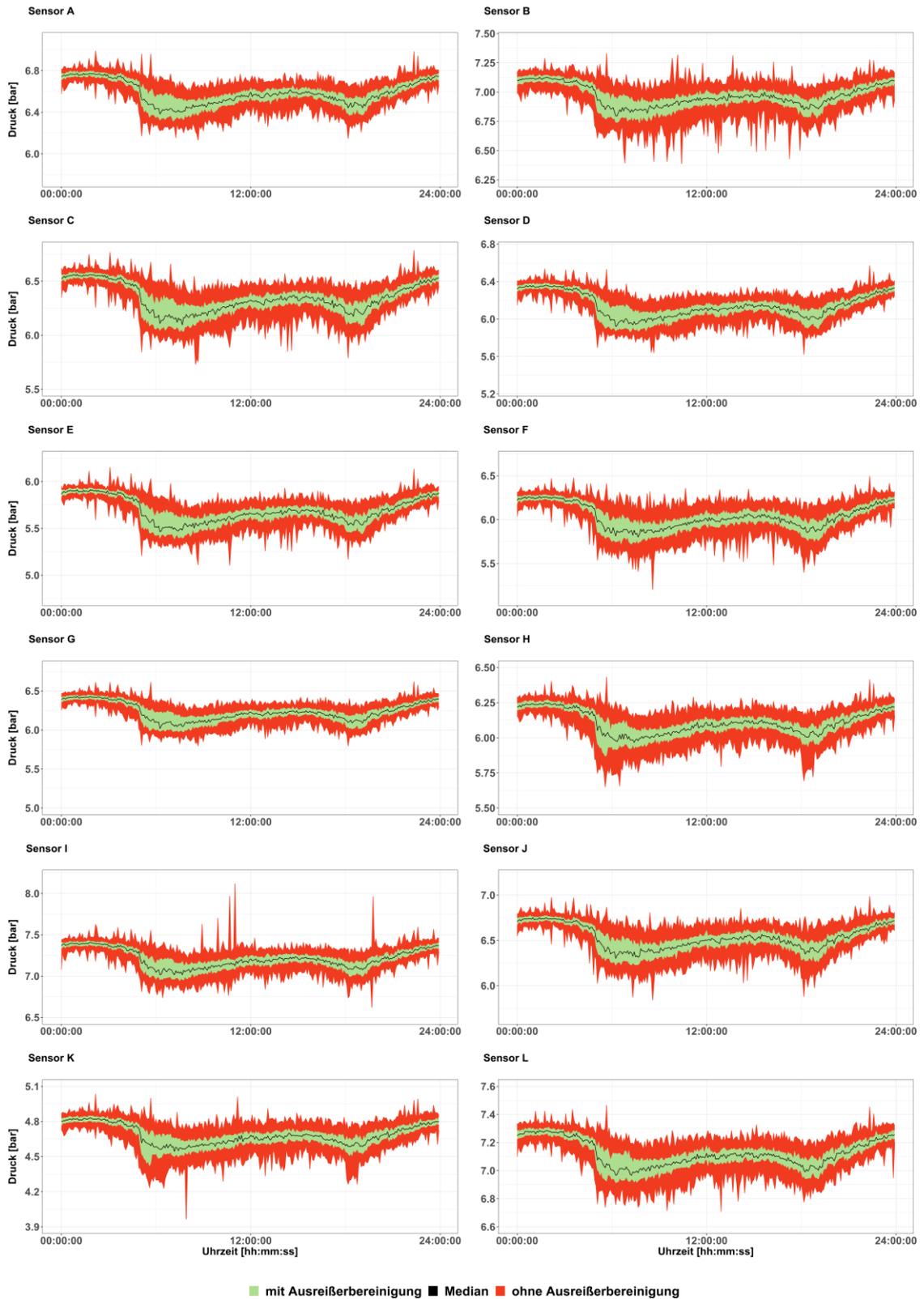
# Anhang A

Tagesgänge Sensoren 1 min Einzelimpuls

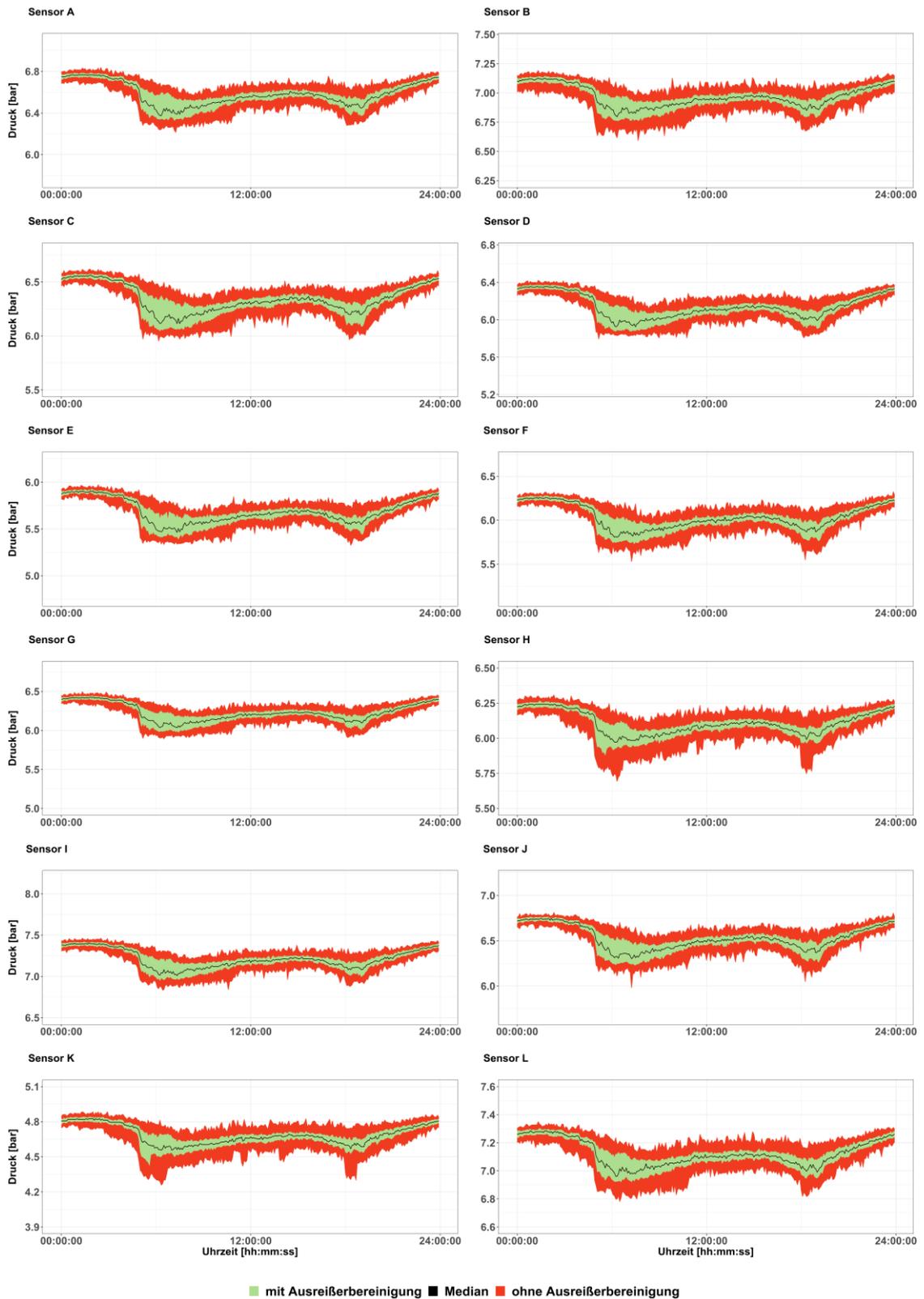


× Ausreißerbegrenzung ■ Median ■ mit Ausreißerbereinigung ■ ohne Ausreißerbereinigung

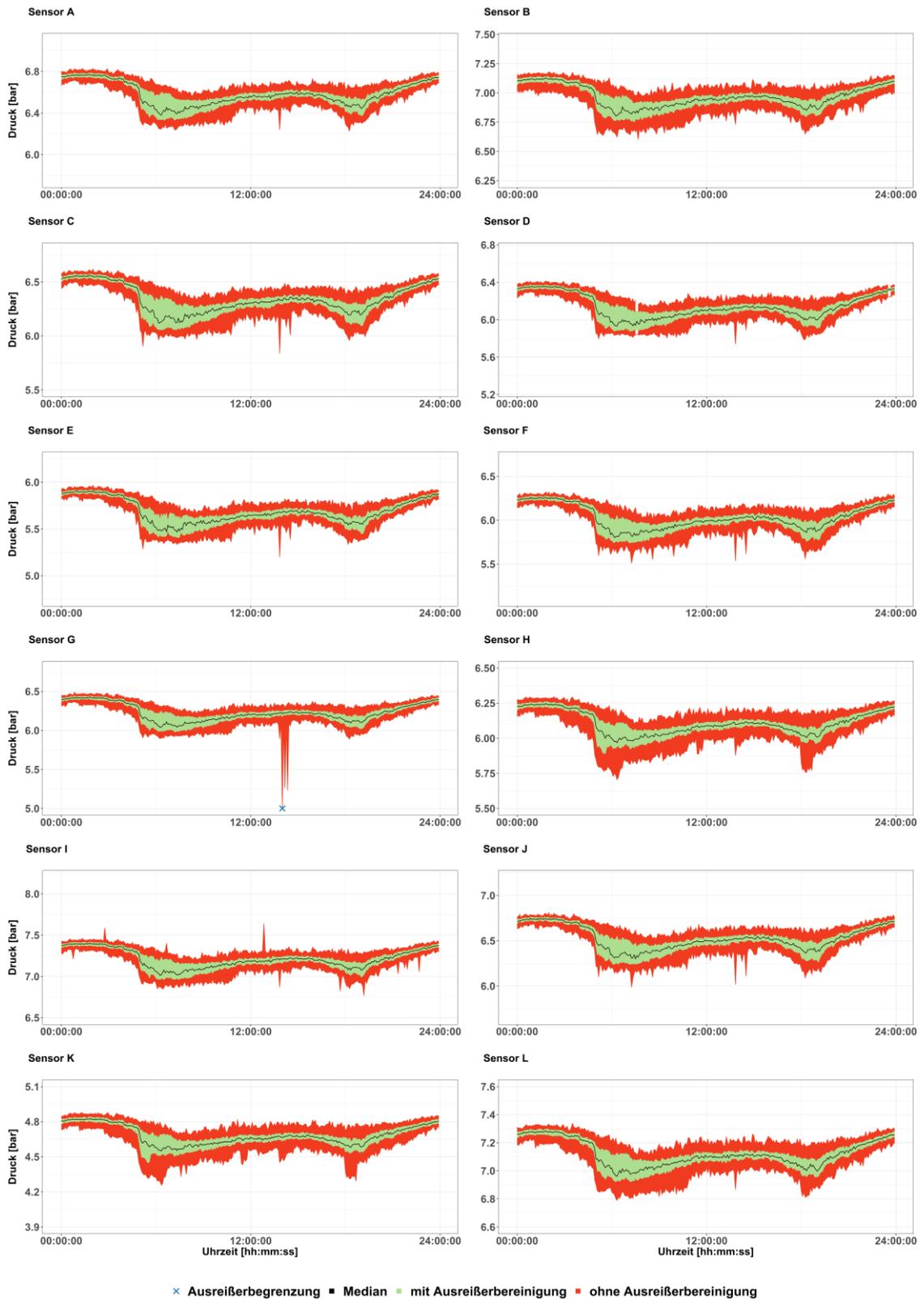
Tagesgänge Sensoren 5 min Einzelimpuls



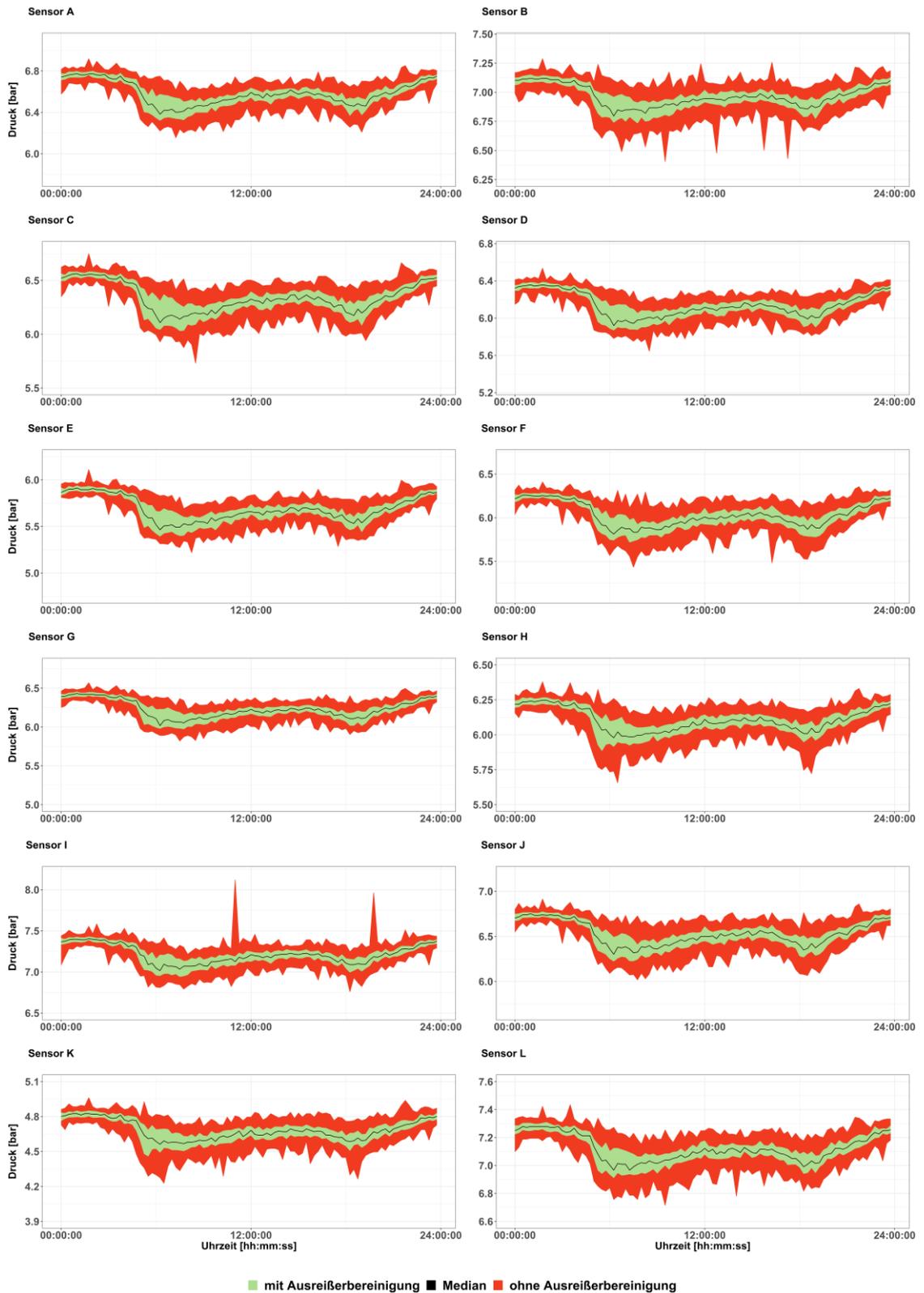
Tagesgänge Sensoren 5 min Median



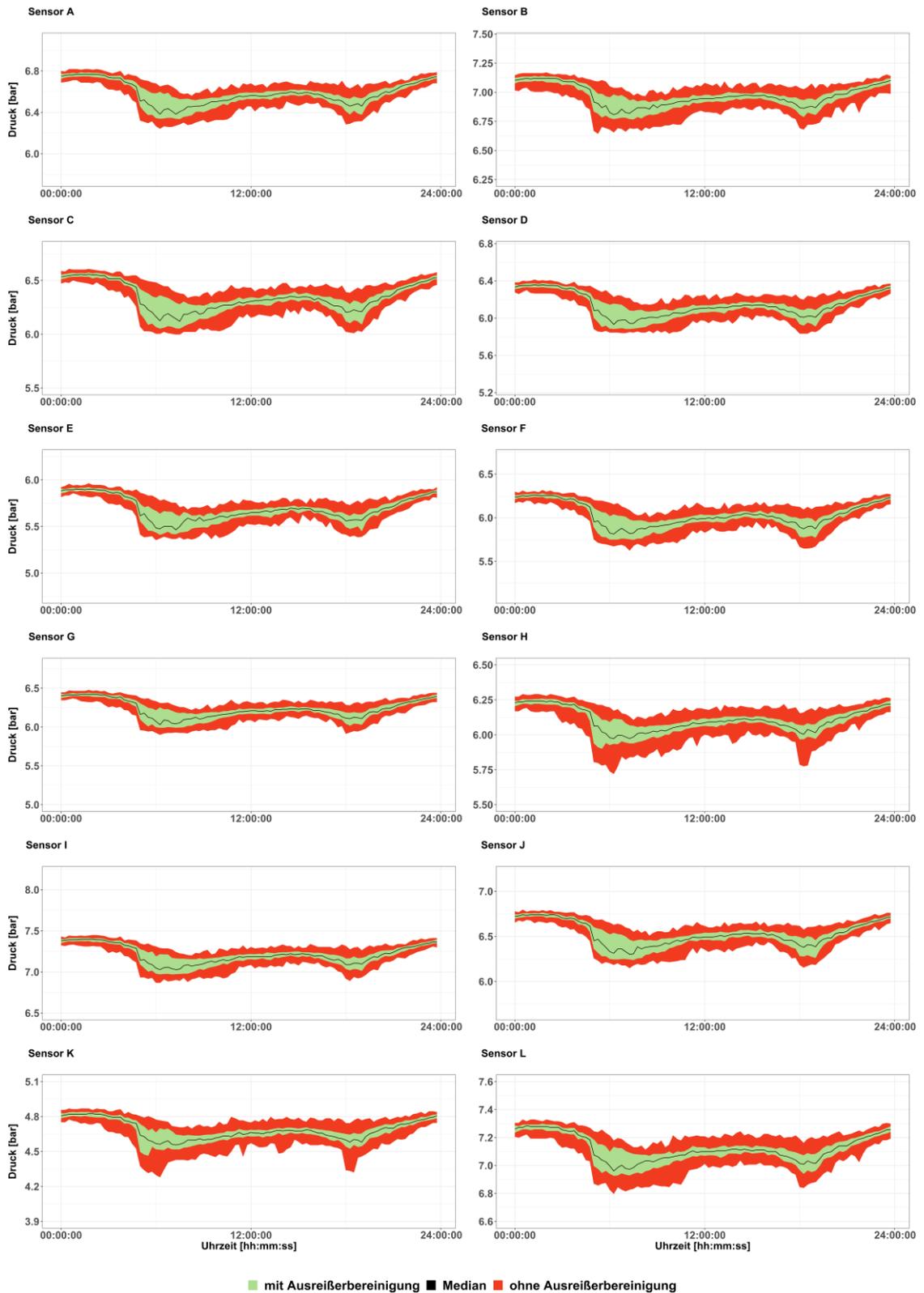
## Tagesgänge Sensoren 5 min Mittelwert



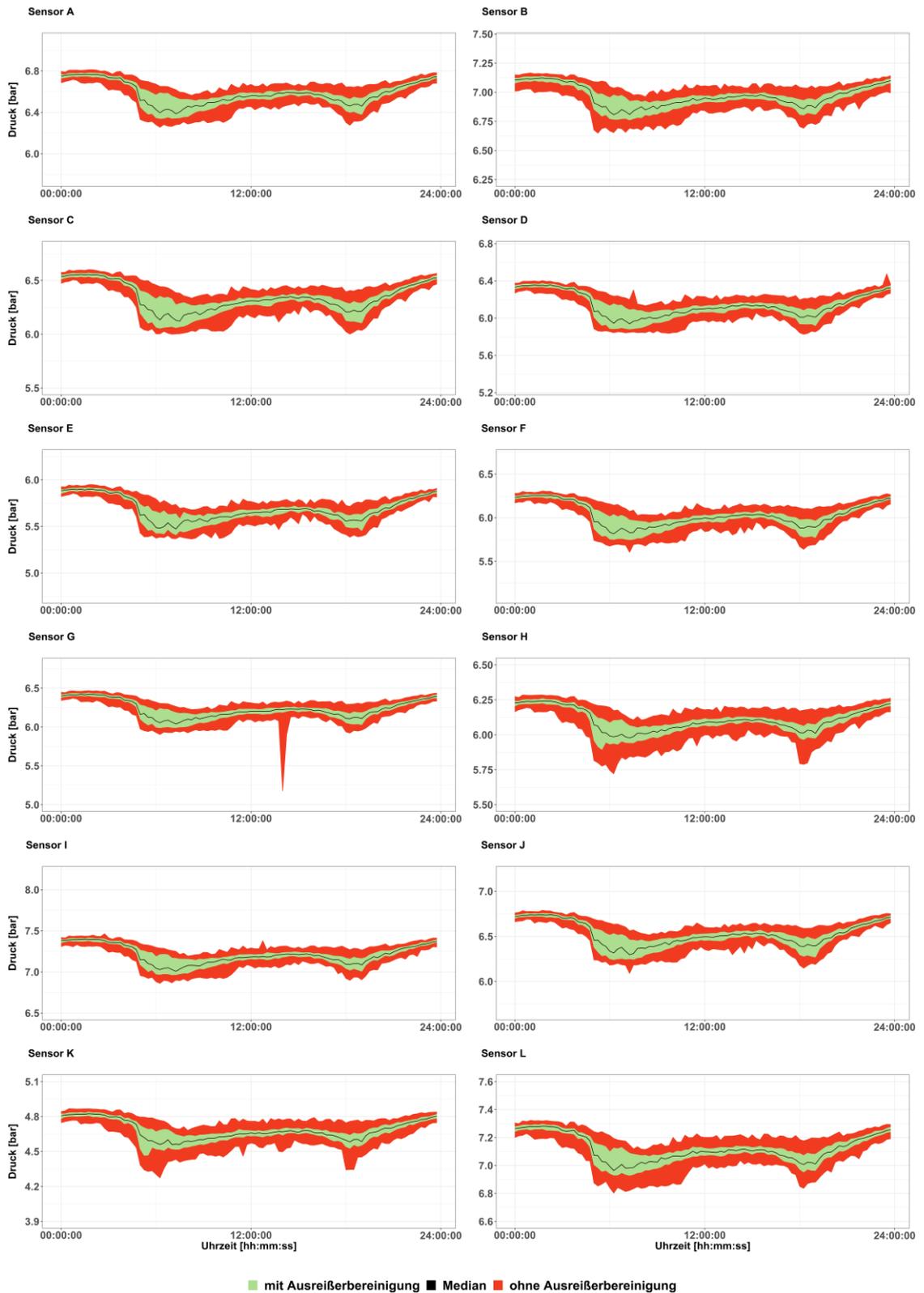
Tagesgänge Sensoren 15 min Einzelimpuls



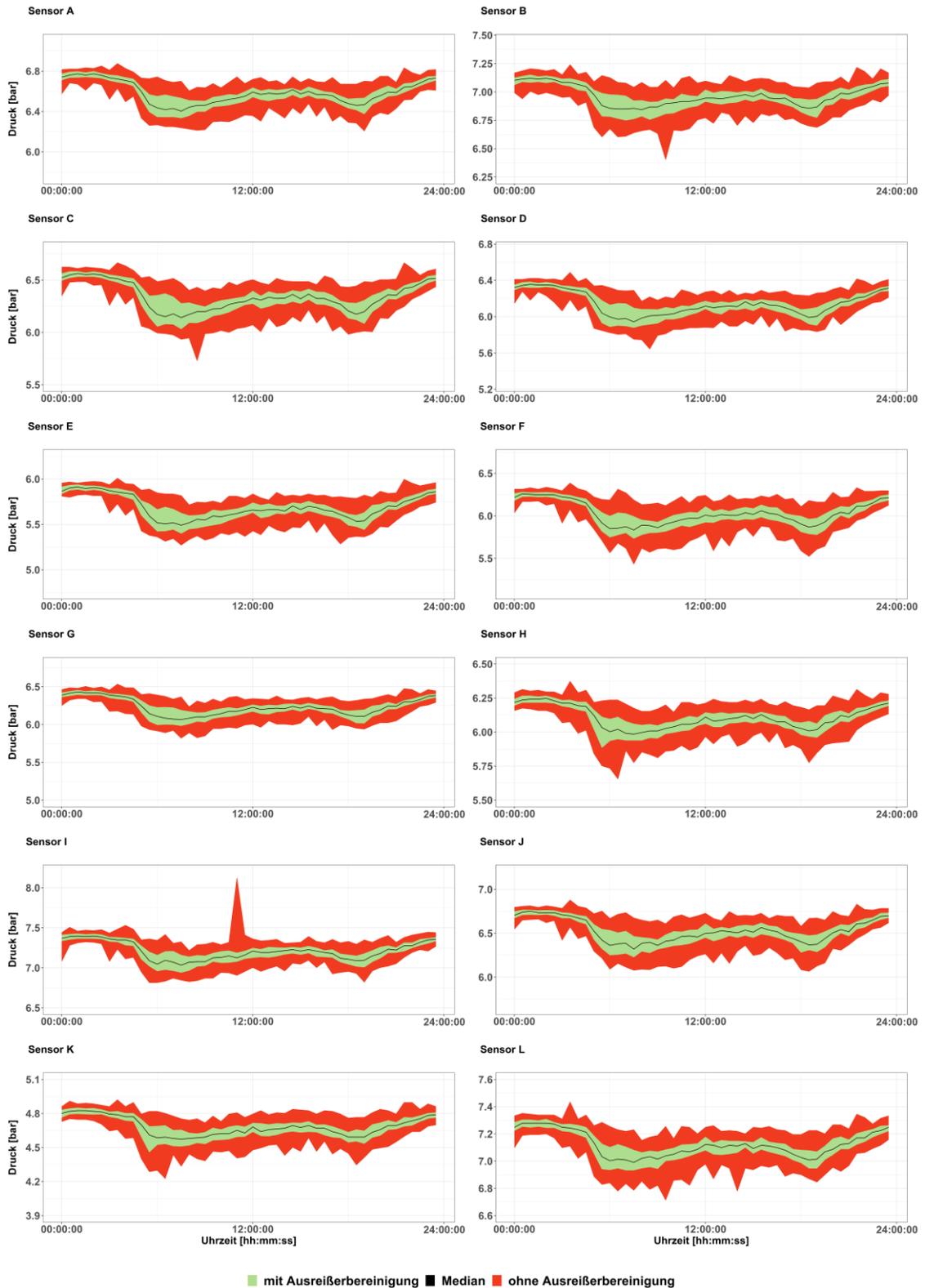
## Tagesgänge Sensoren 15 min Median



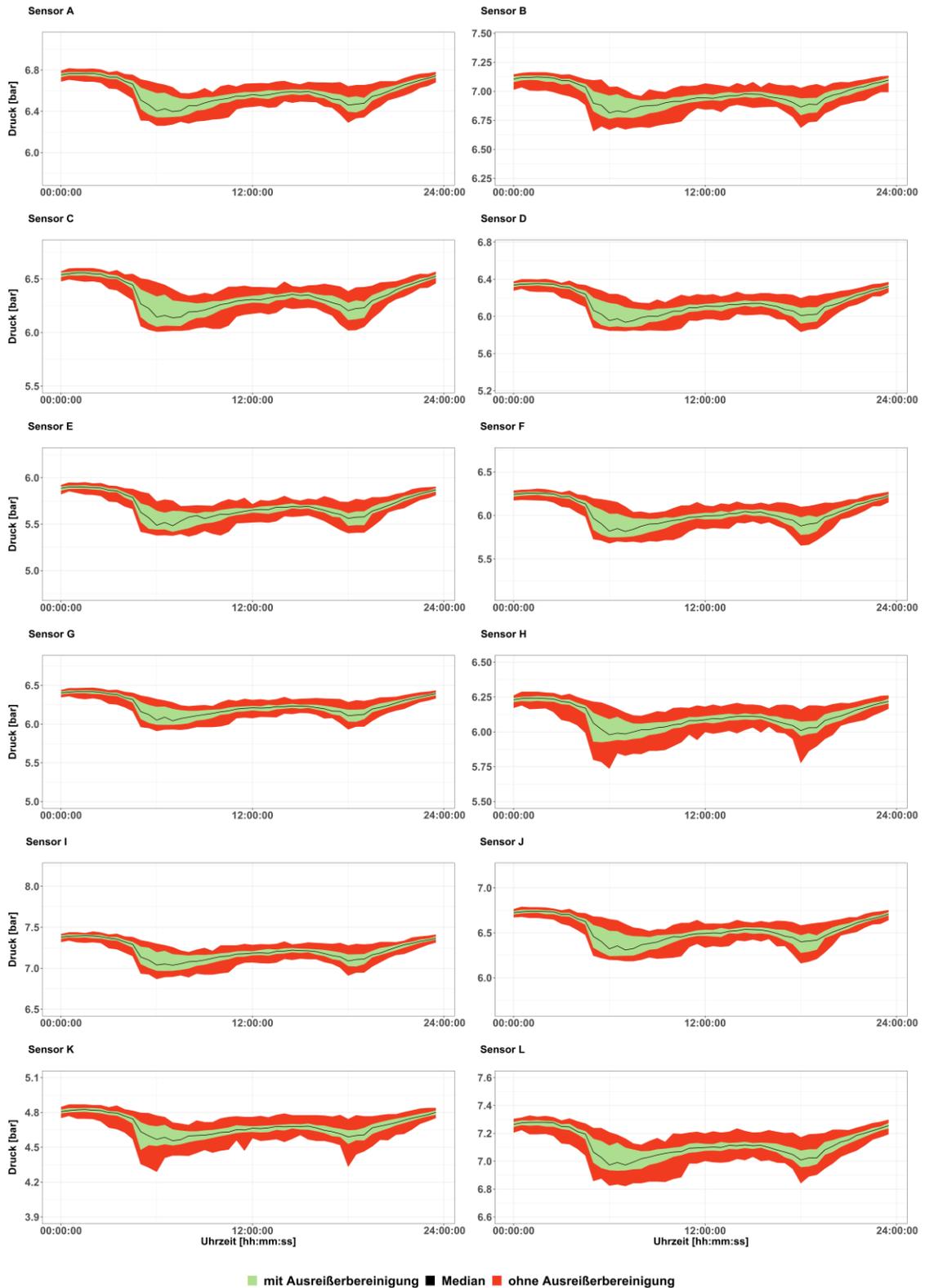
Tagesgänge Sensoren 15 min Mittelwert



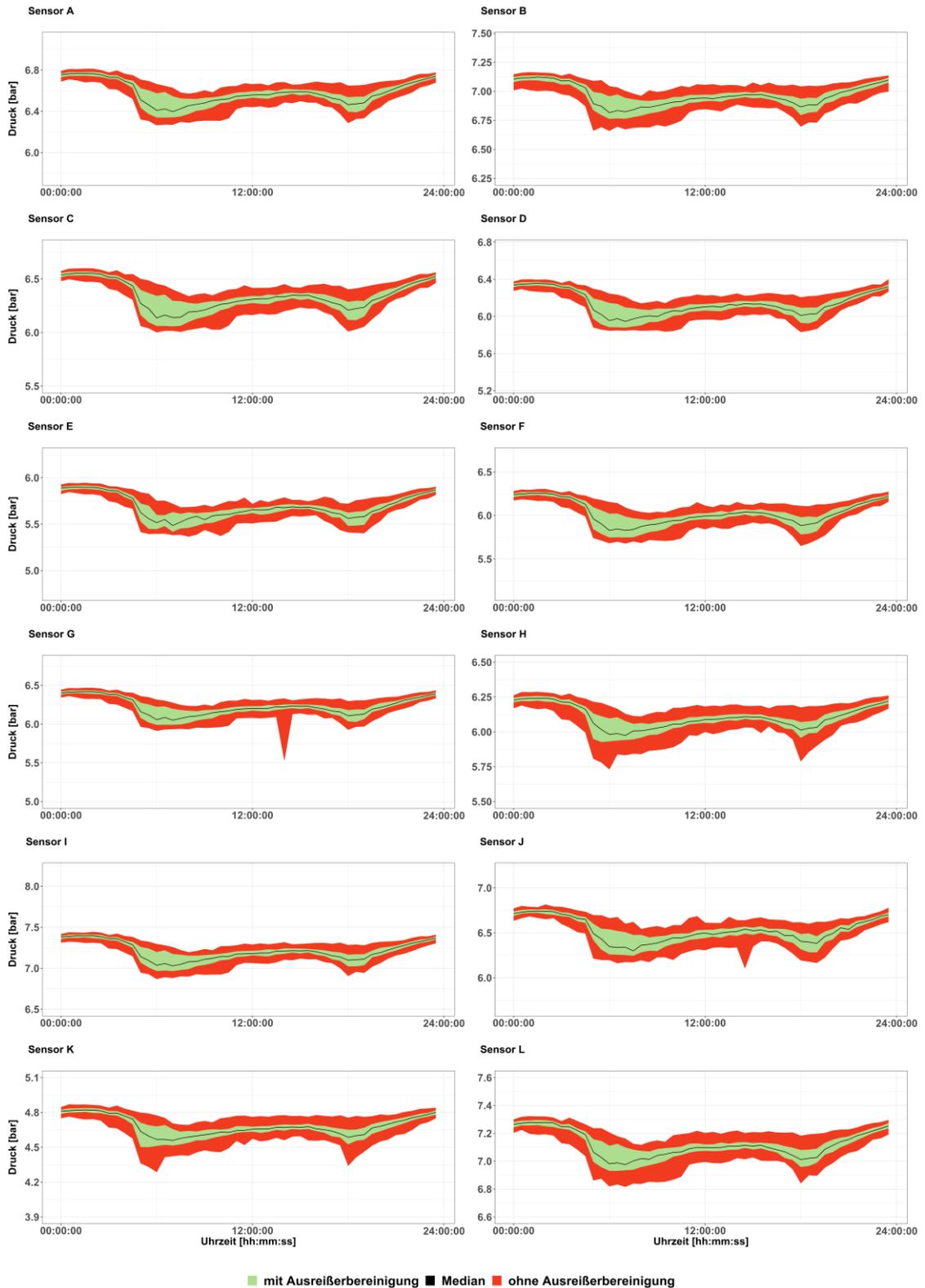
## Tagesgänge Sensoren 30 min Einzelimpuls



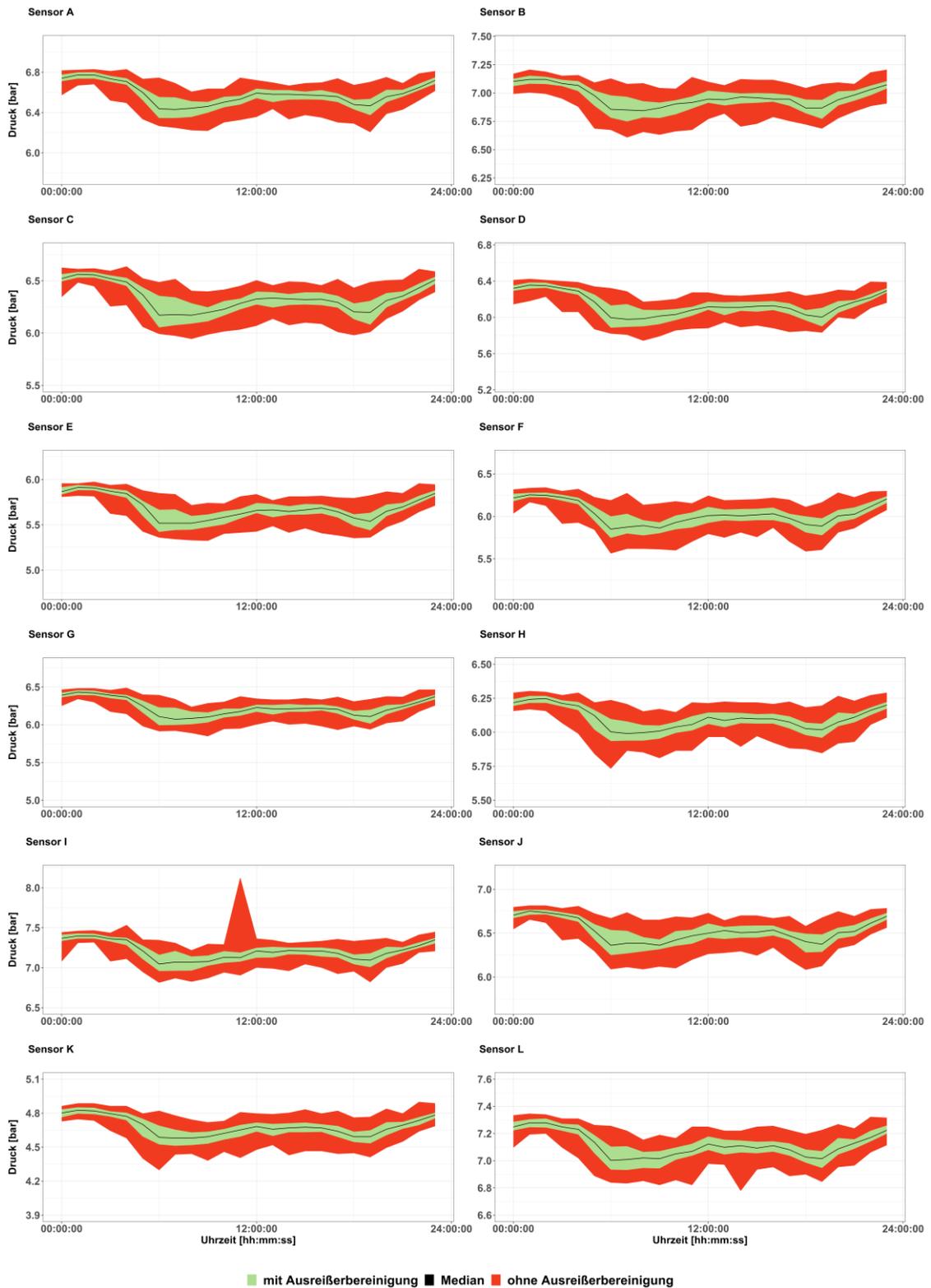
Tagesgänge Sensoren 30 min Median



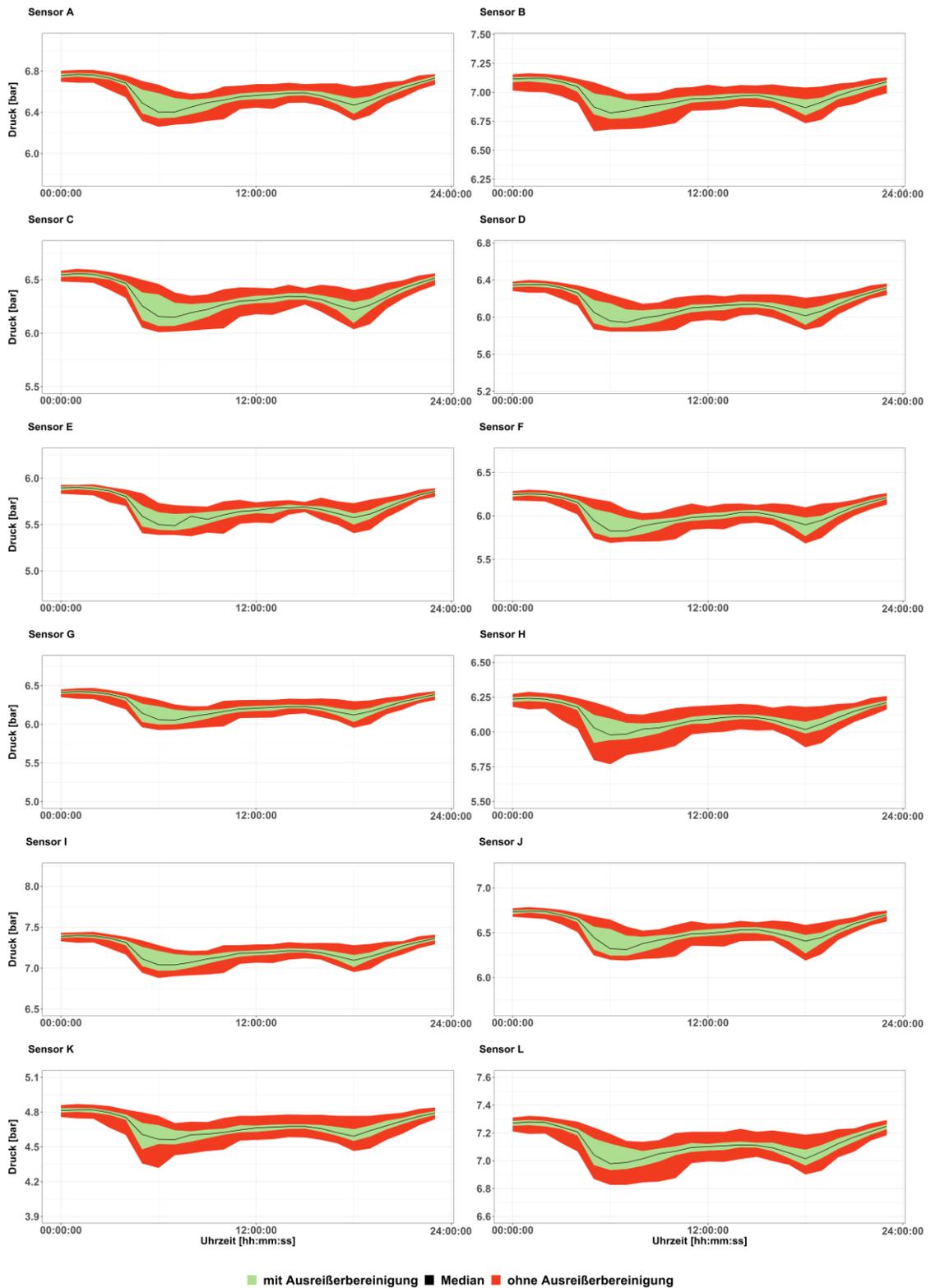
## Tagesgänge Sensoren 30 min Mittelwert



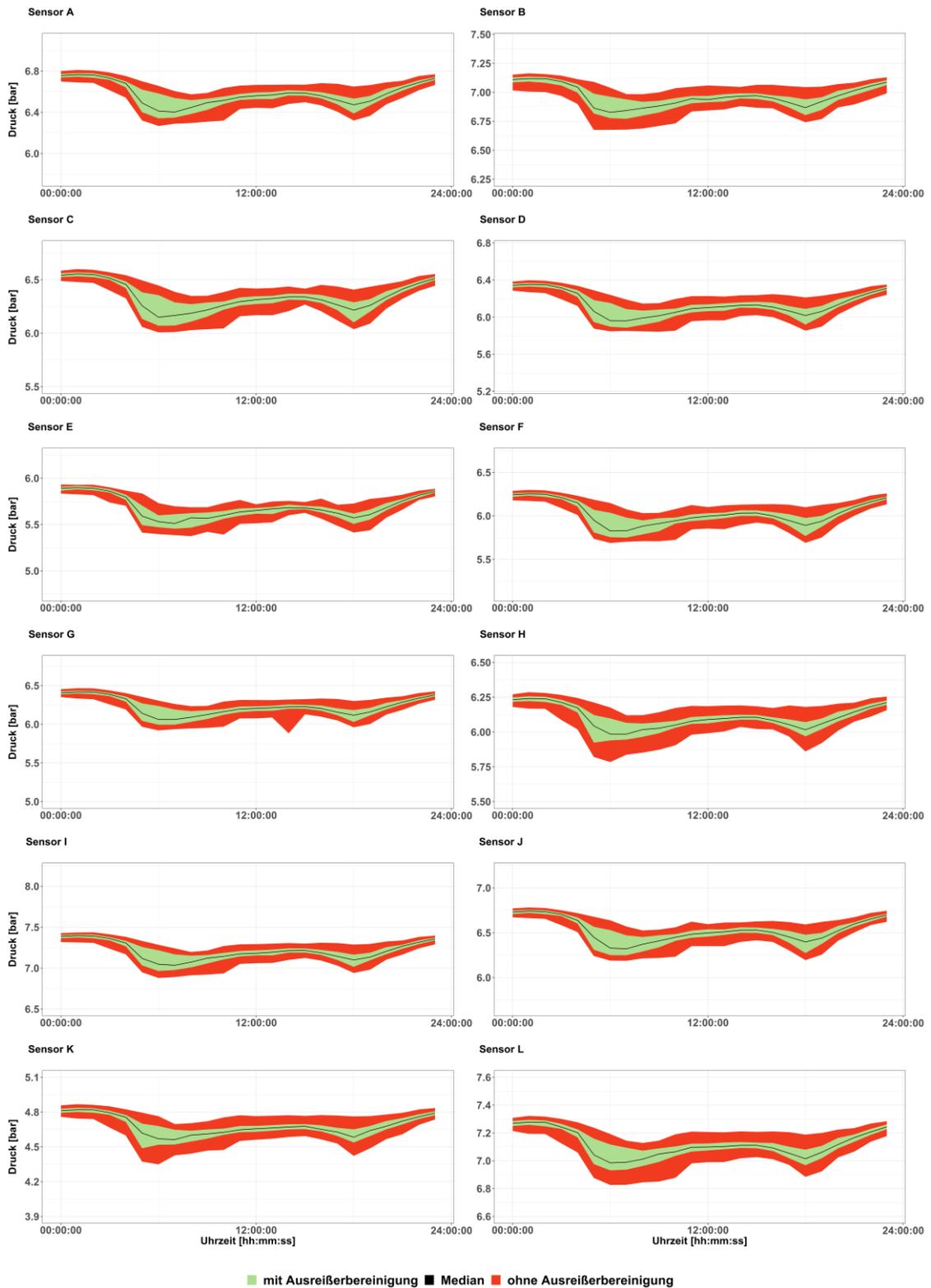
Tagesgänge Sensoren 60 min Einzelimpuls



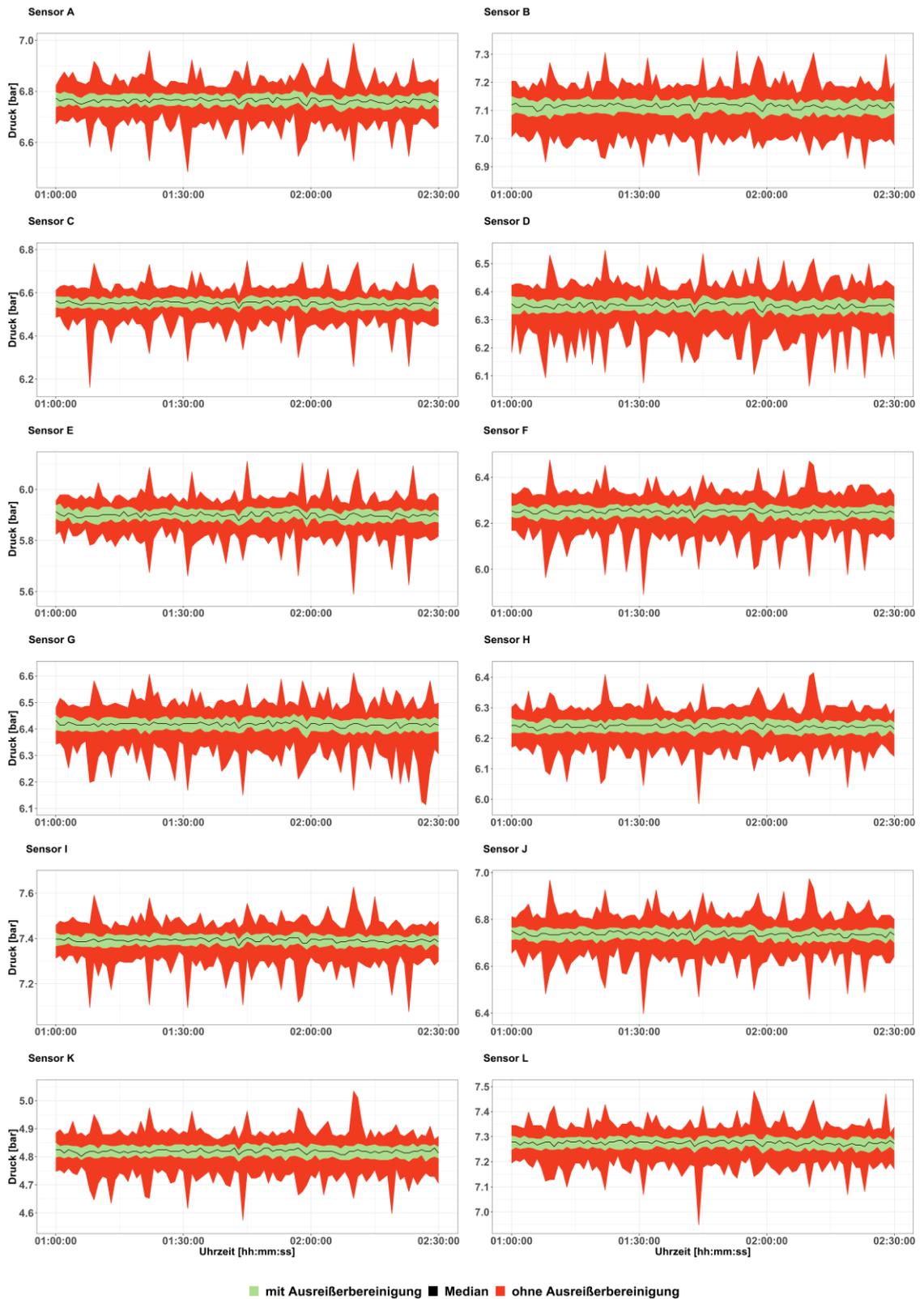
## Tagesgänge Sensoren 60 min Median



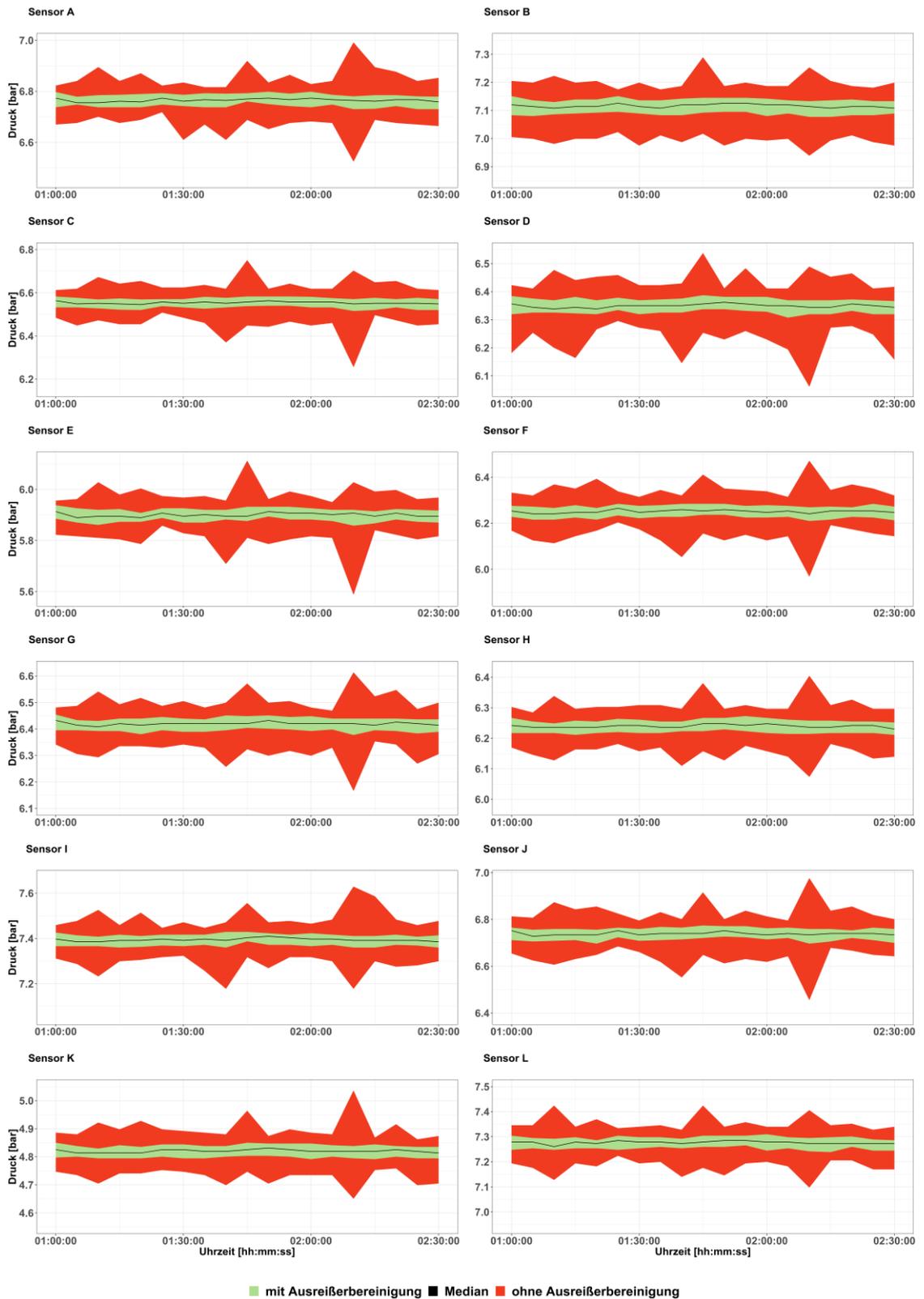
Tagesgänge Sensoren 60 min Mittelwert



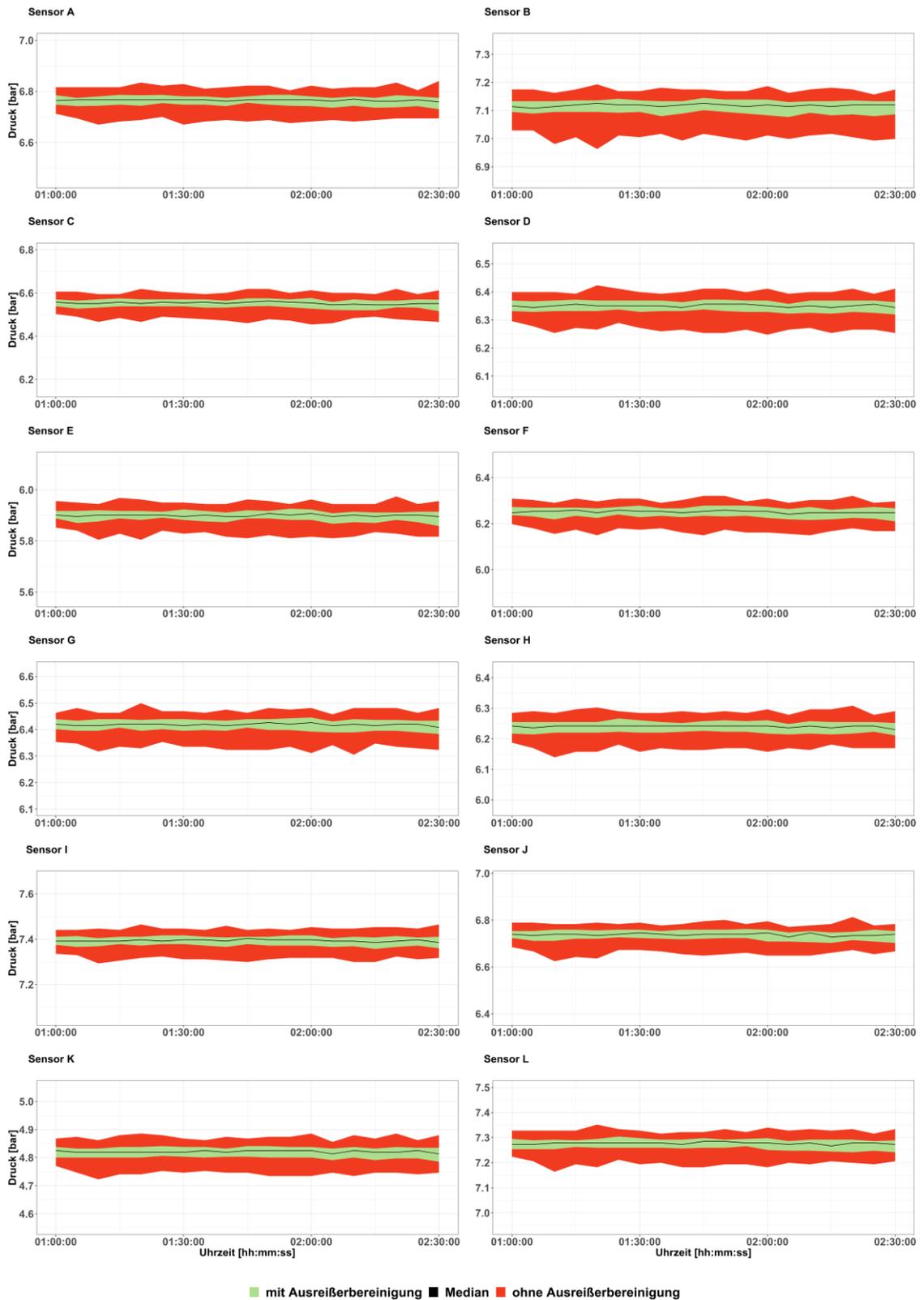
Nachtstunden Sensoren 1 min Einzelpuls



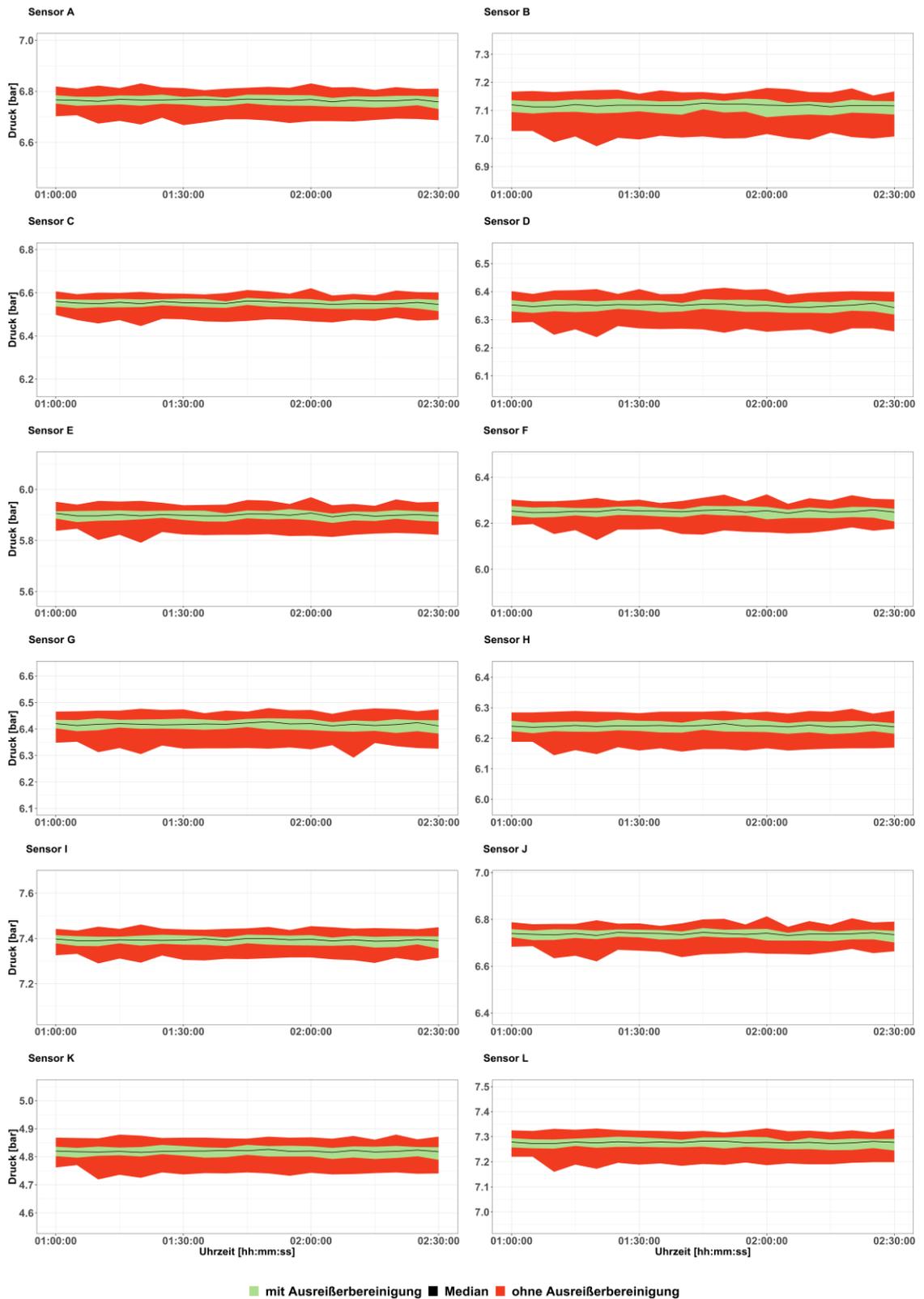
Nachtstunden Sensoren 5 min Einzelpuls



## Nachtstunden Sensoren 5 min Median

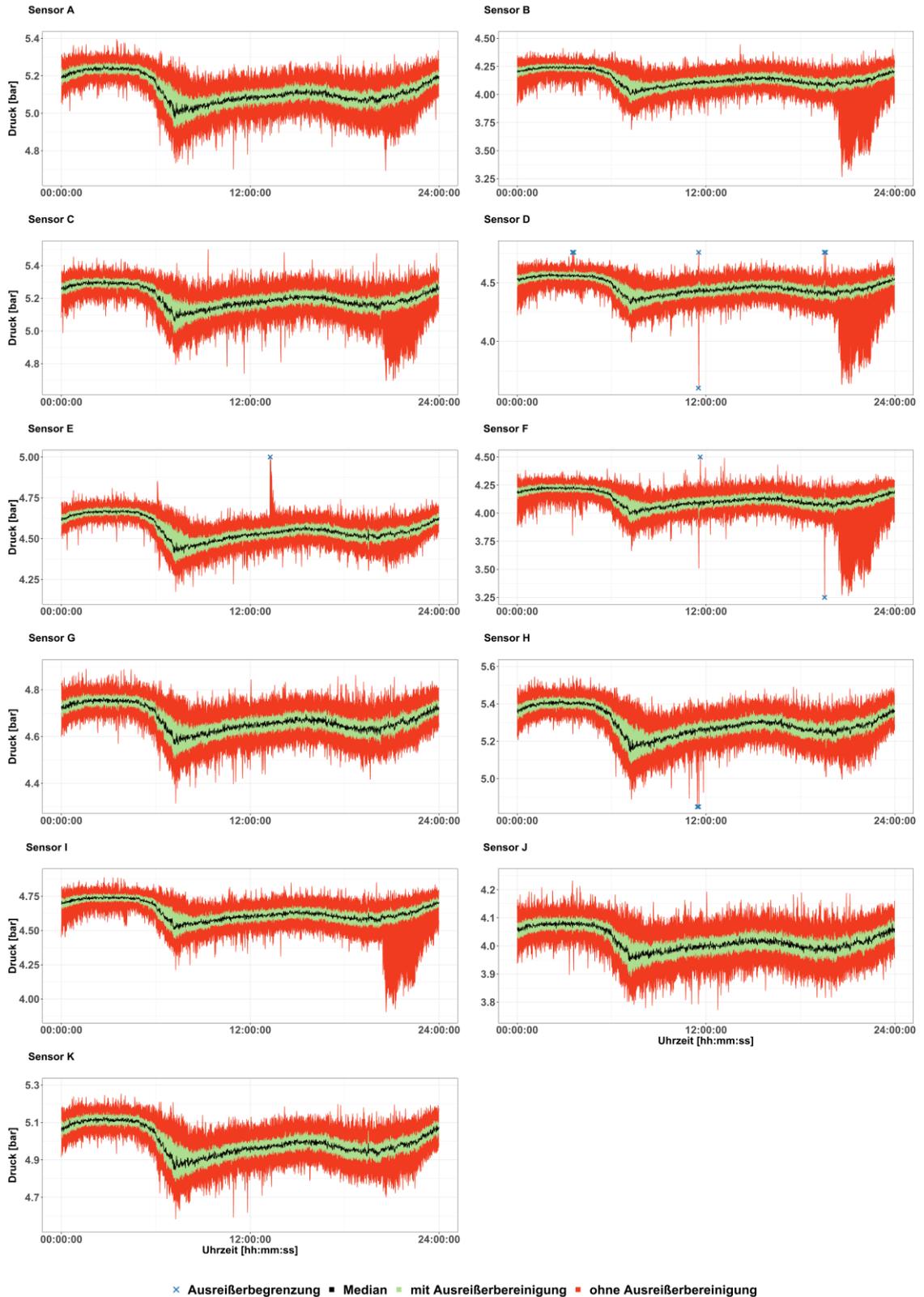


Nachtstunden Sensoren 5 min Mittelwert

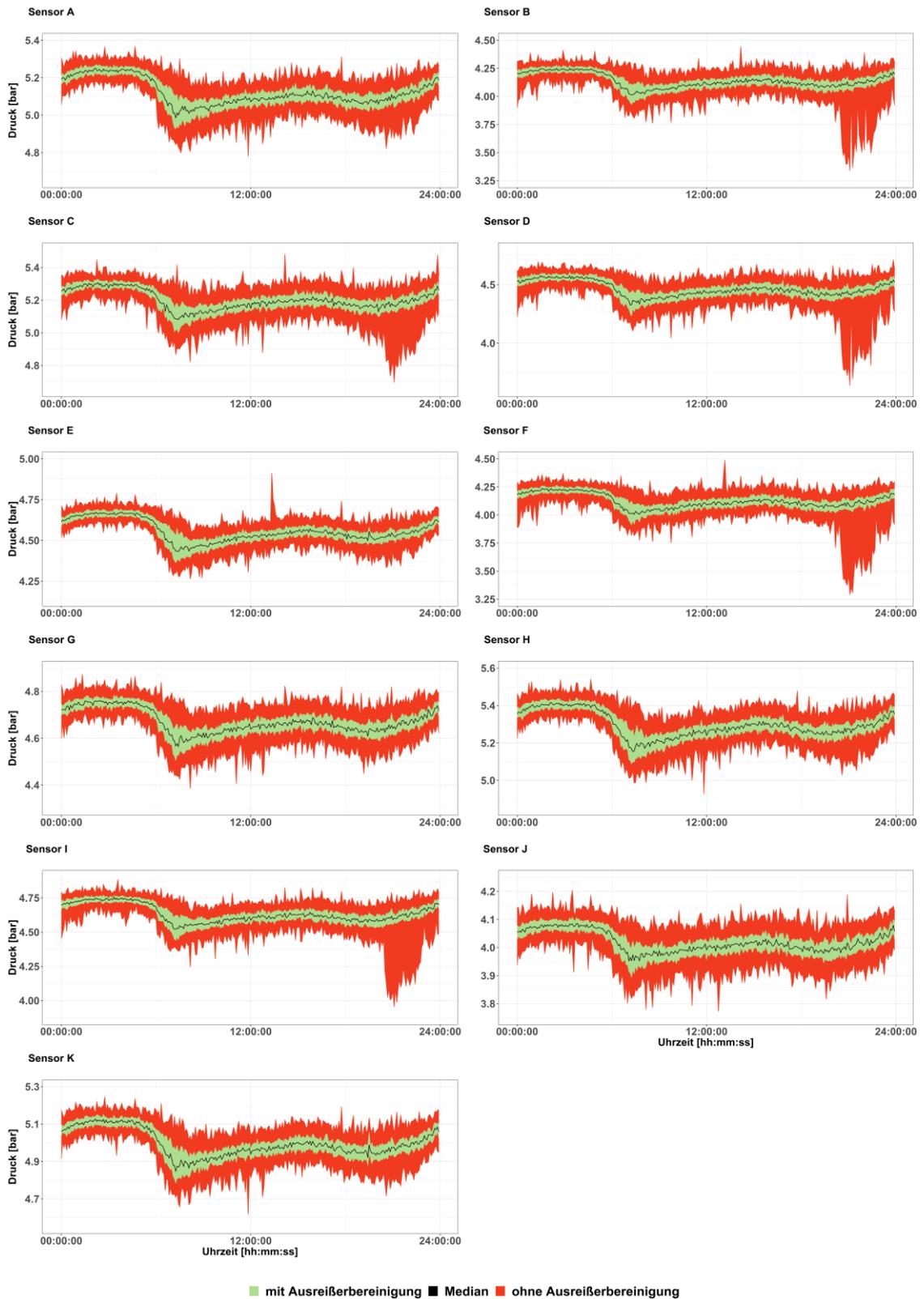


# Anhang B

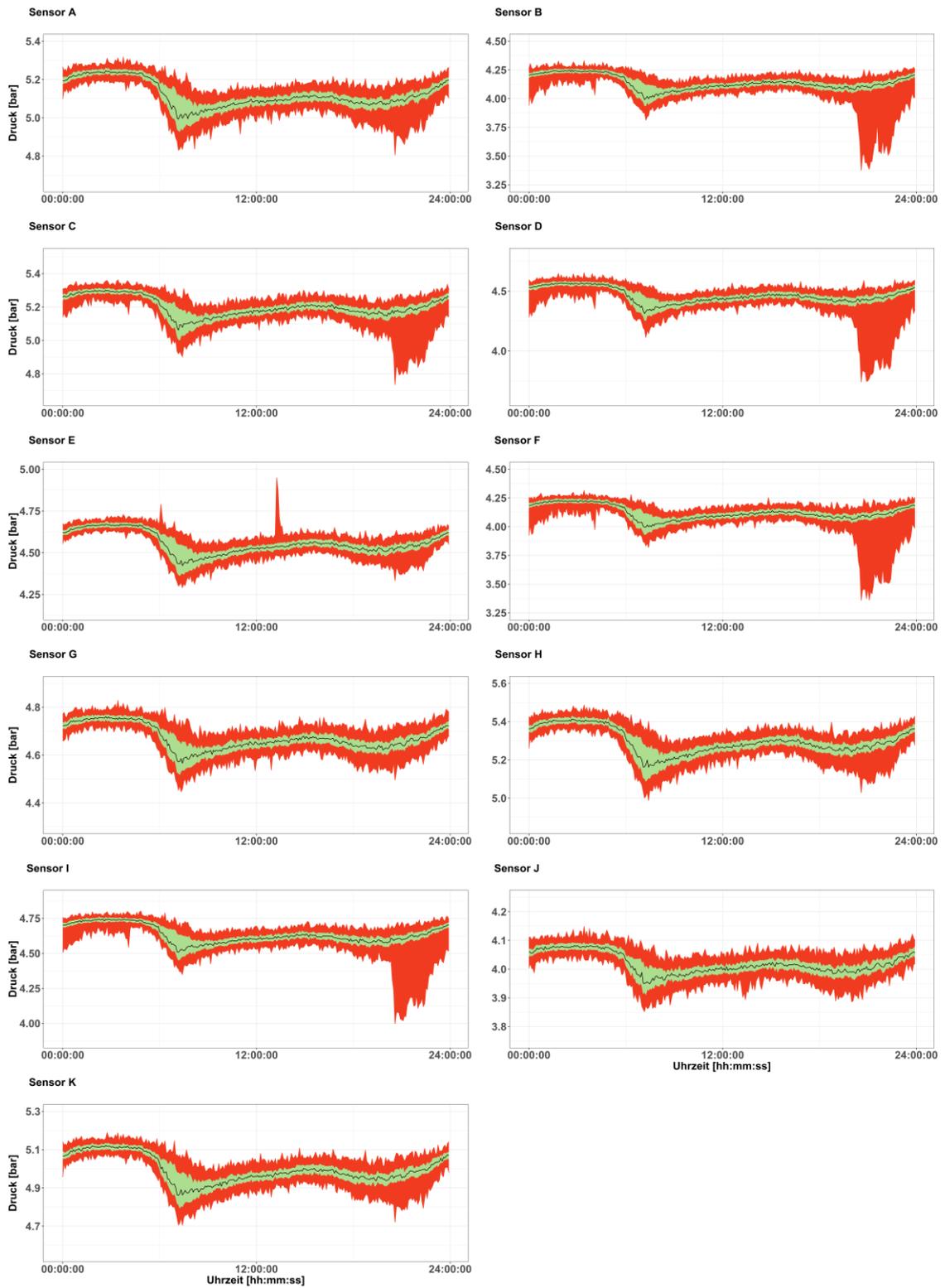
Tagesgänge Sensoren 1 min Einzelimpuls



Tagesgänge Sensoren 5 min Einzelimpuls

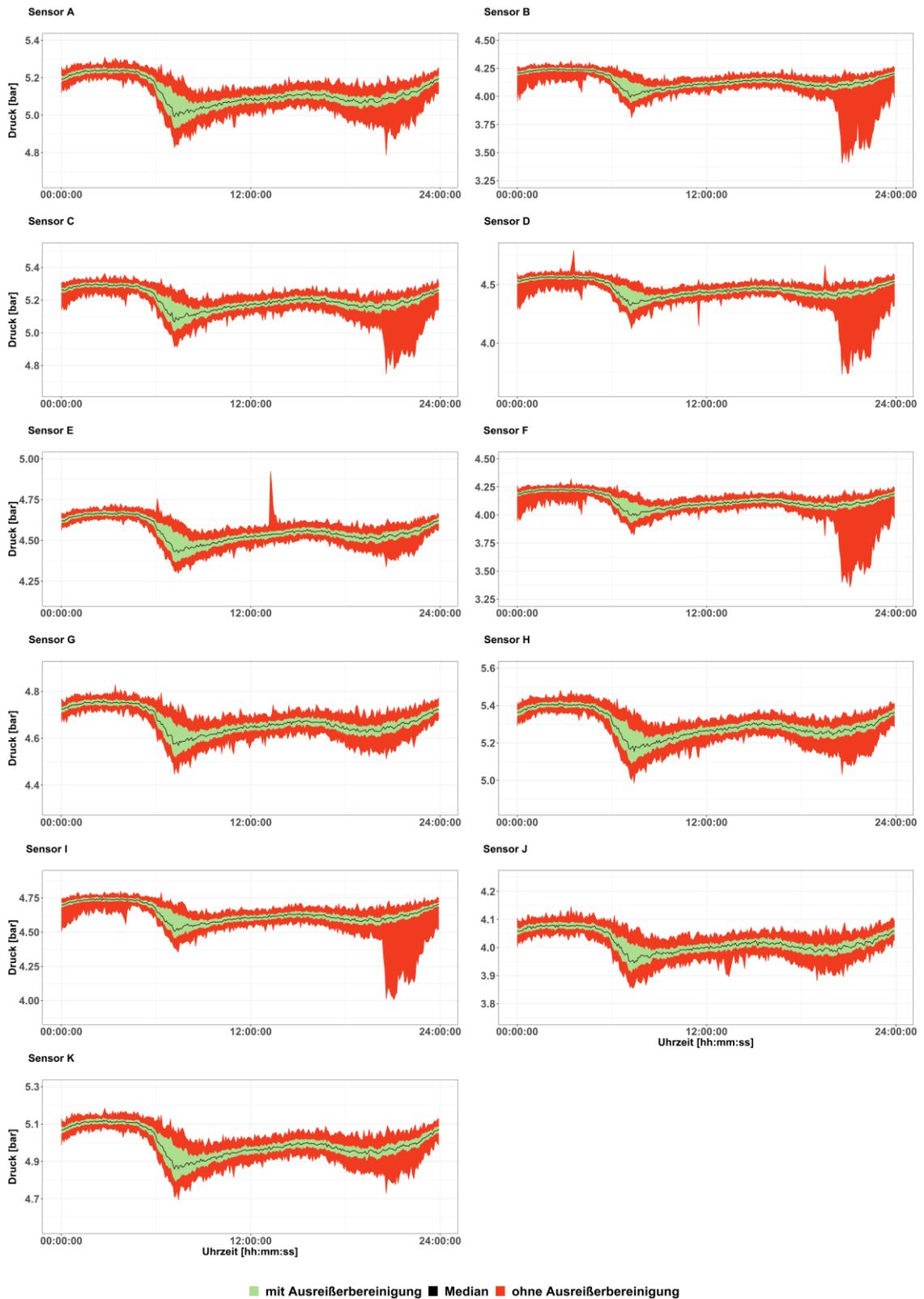


Tagesgänge Sensoren 5 min Median

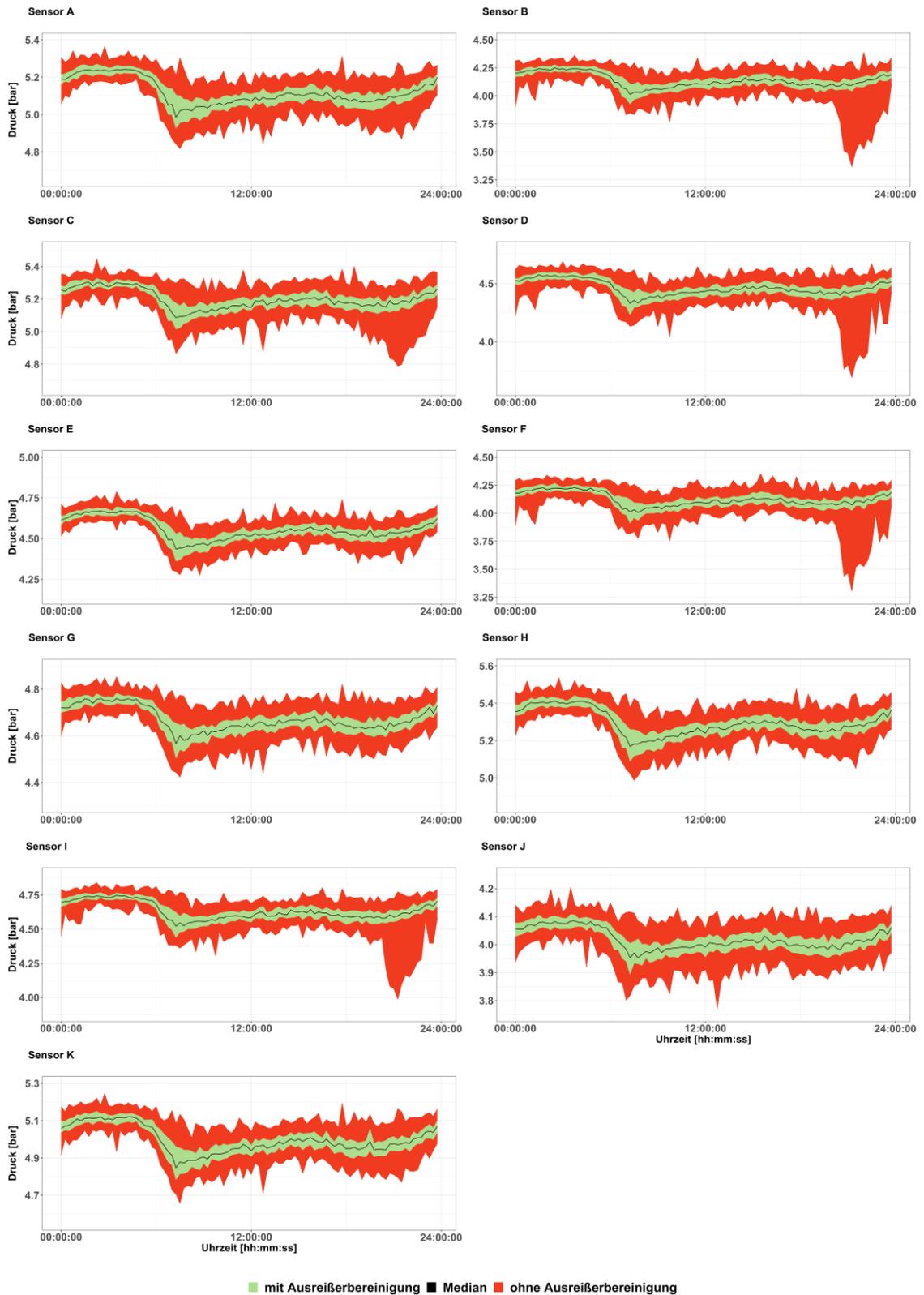


■ mit Ausreißerbereinigung ■ Median ■ ohne Ausreißerbereinigung

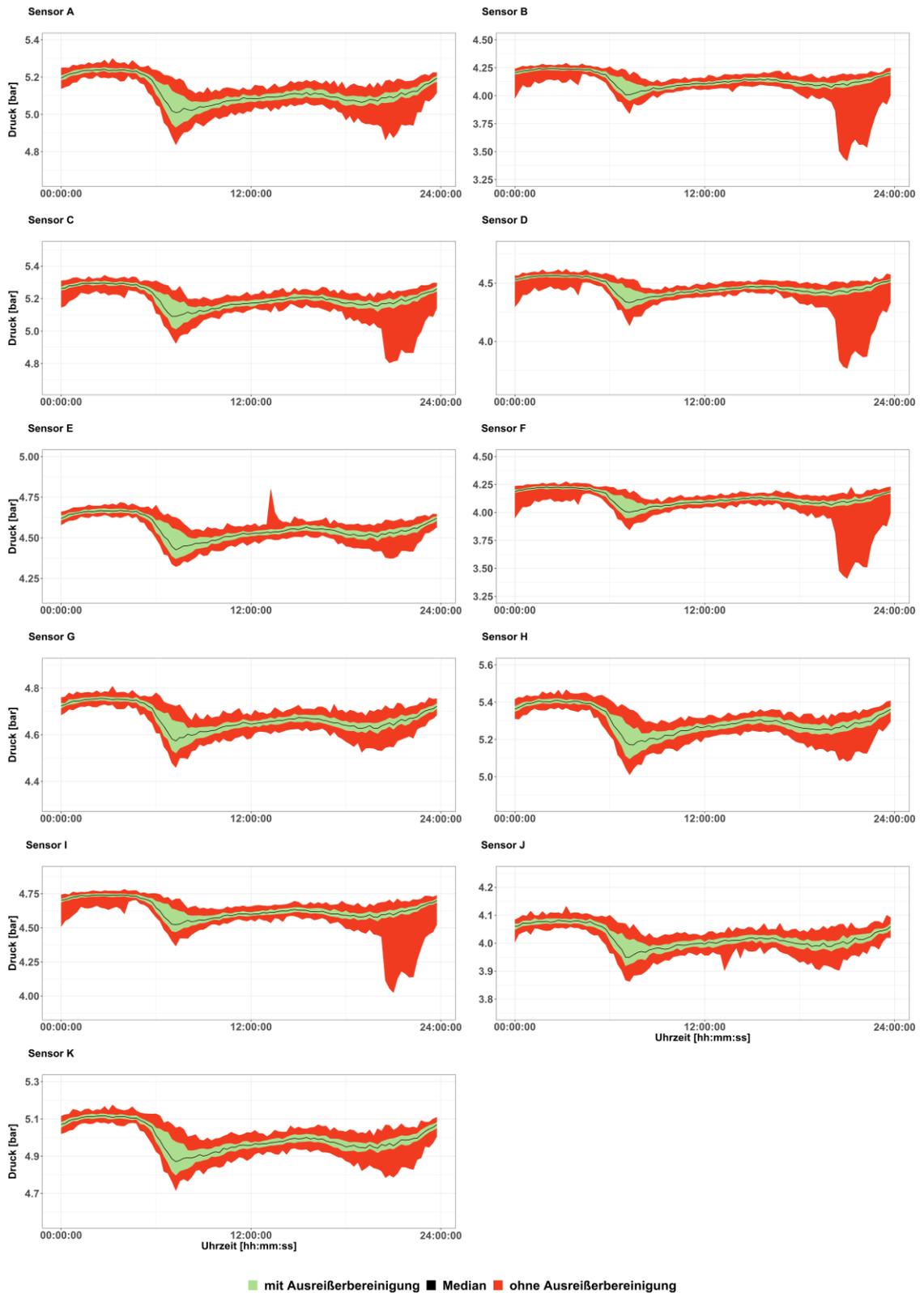
Tagesgänge Sensoren 5 min Mittelwert



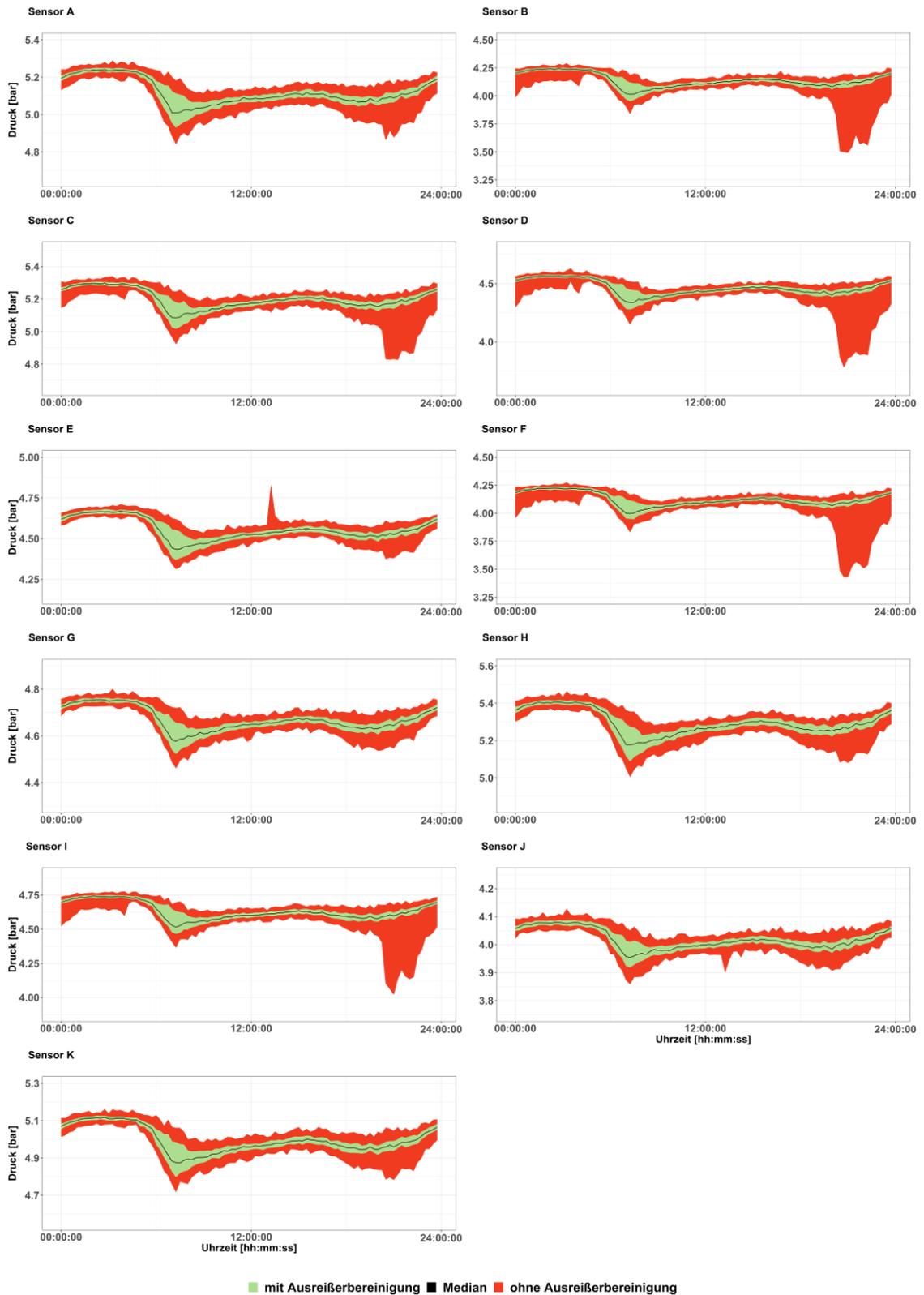
## Tagesgänge Sensoren 15 min Einzelimpuls



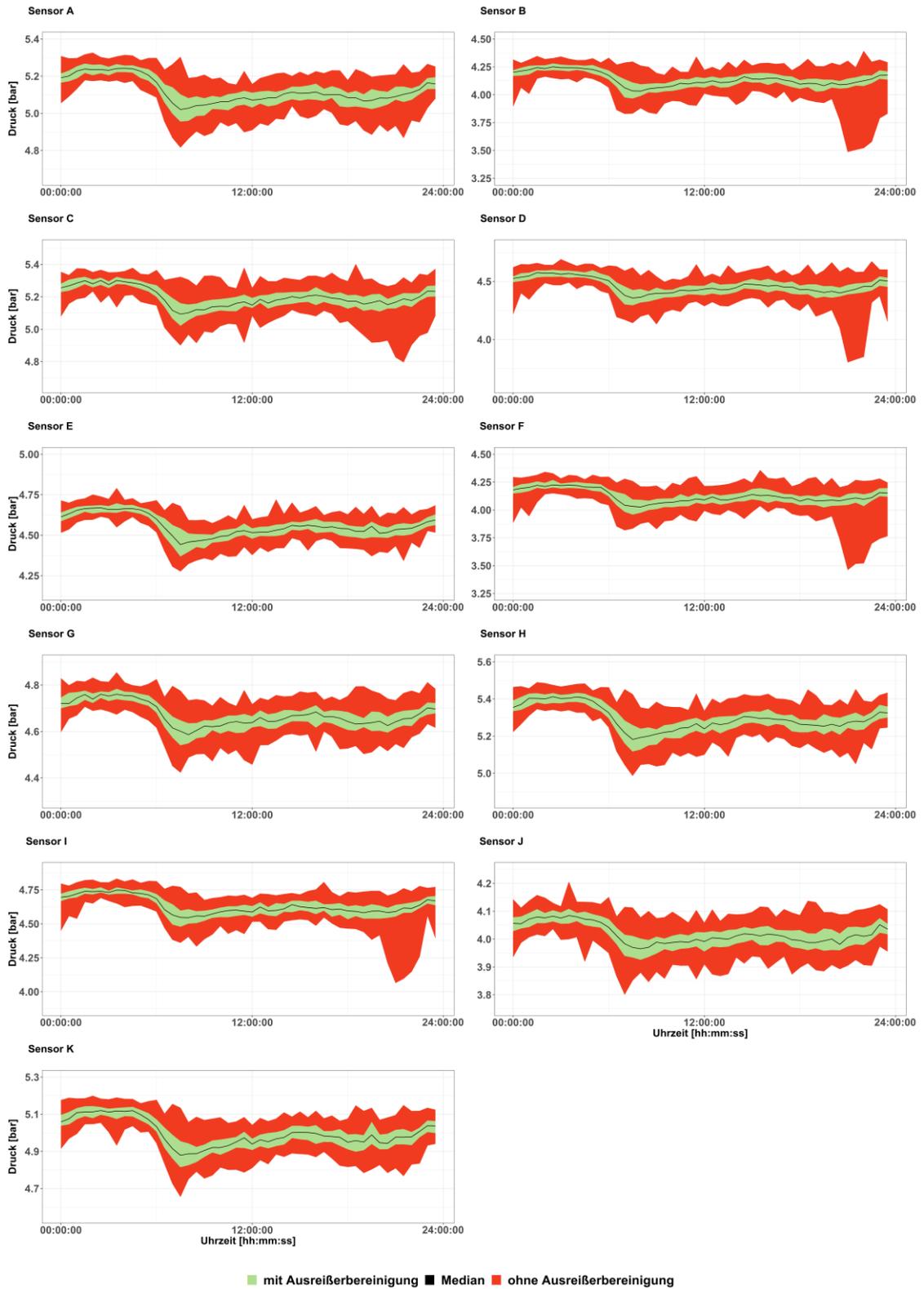
Tagesgänge Sensoren 15 min Median



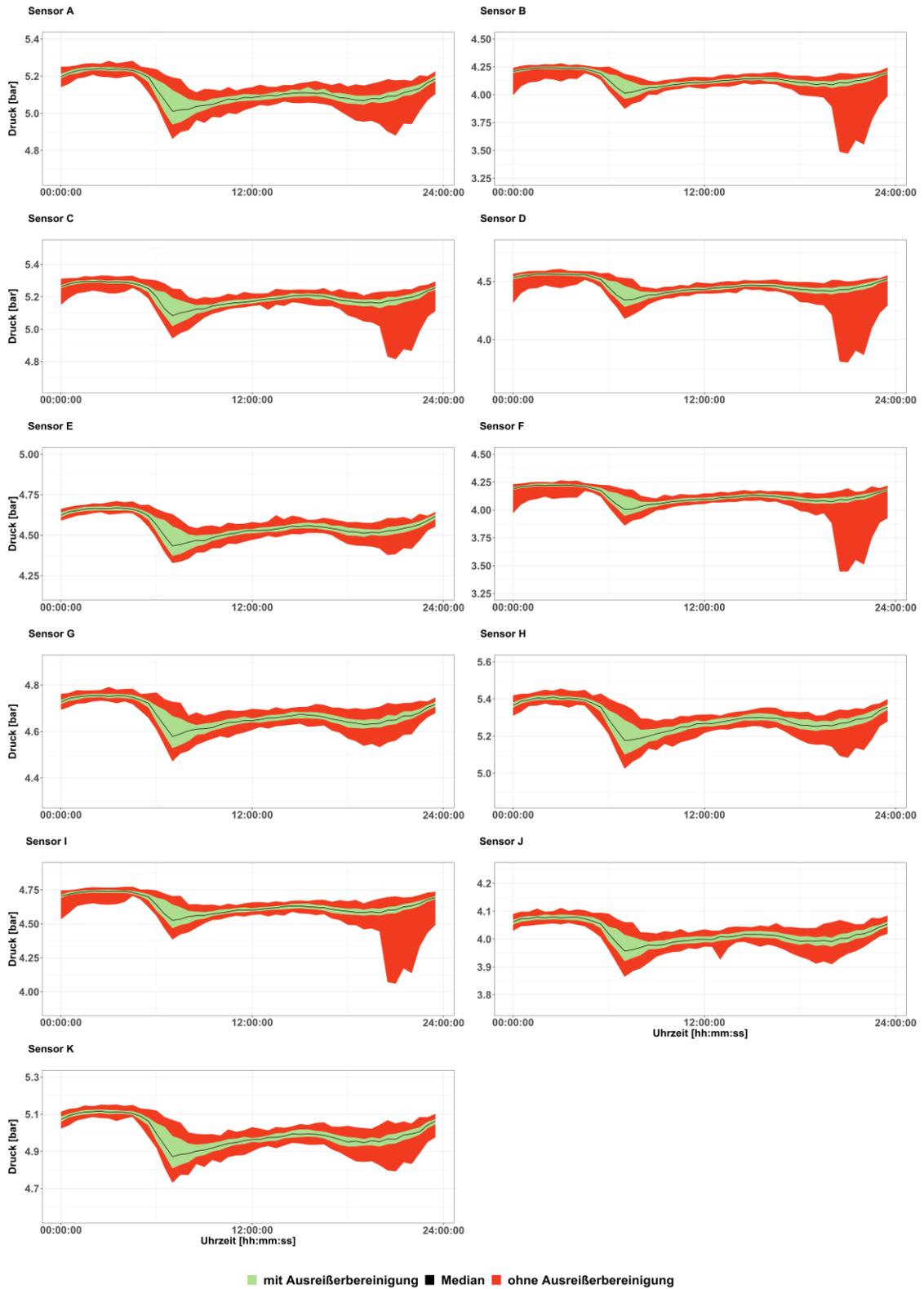
## Tagesgänge Sensoren 15 min Mittelwert



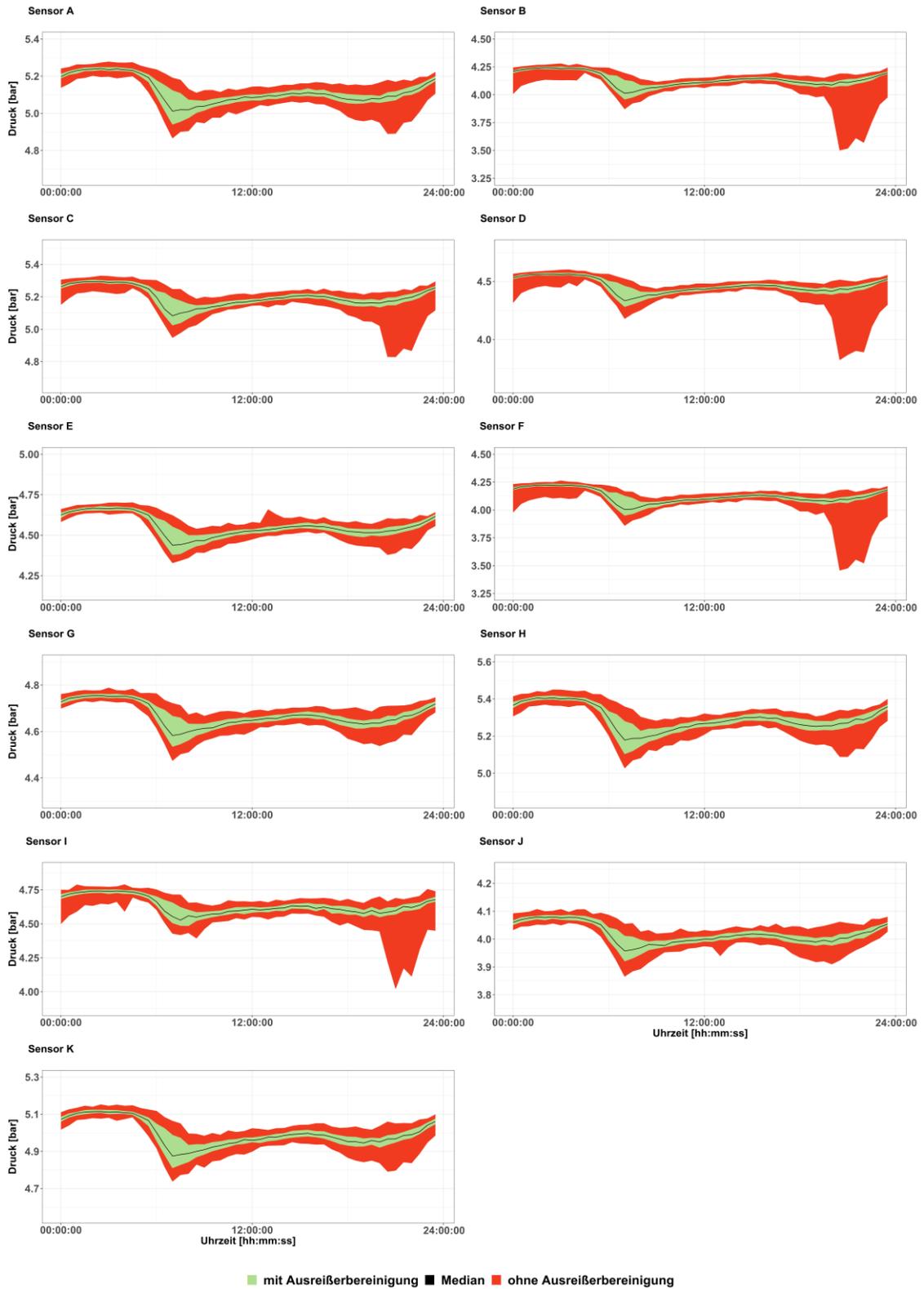
Tagesgänge Sensoren 30 min Einzelimpuls



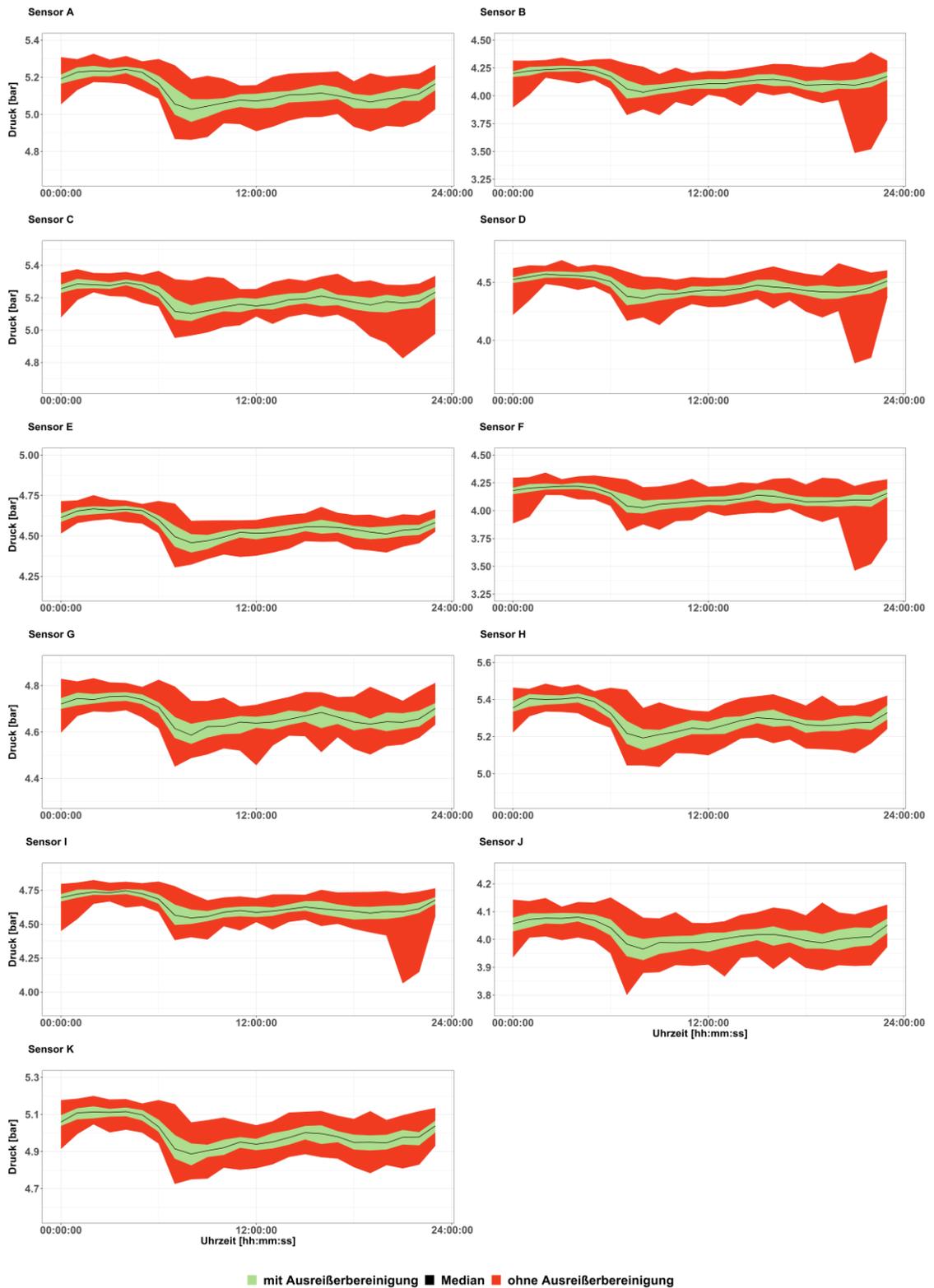
Tagesgänge Sensoren 30 min Median



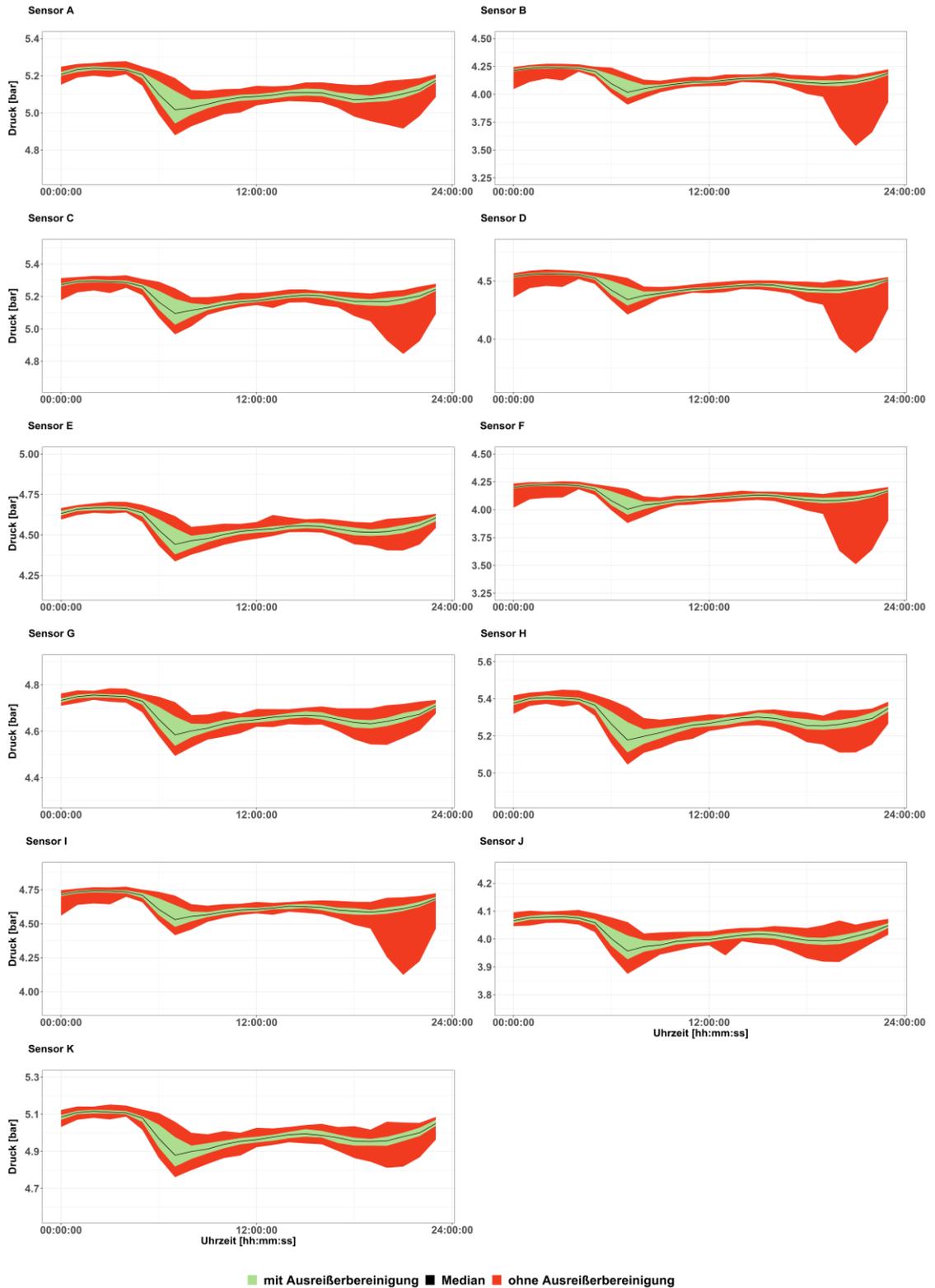
Tagesgänge Sensoren 30 min Mittelwert



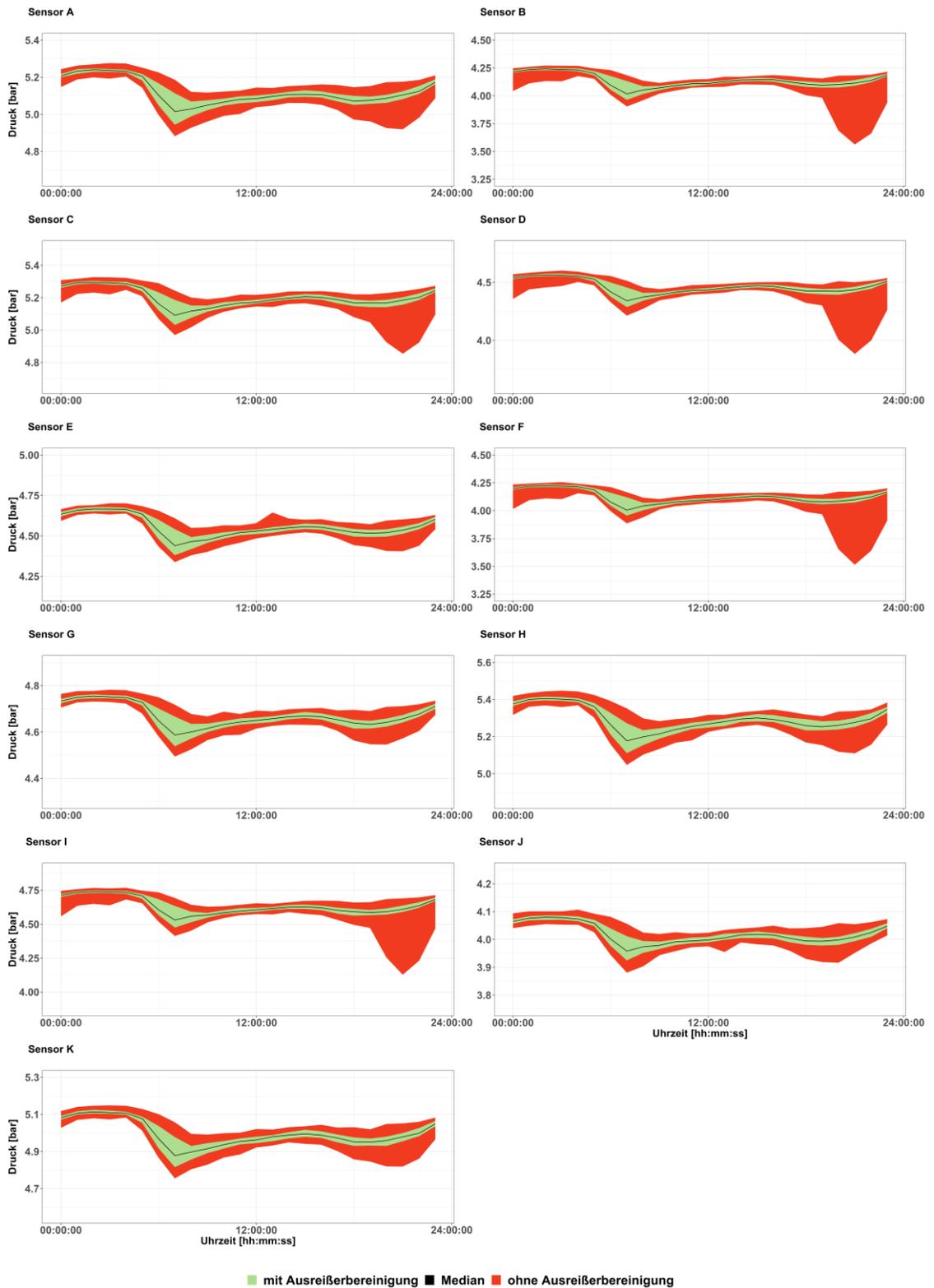
## Tagesgänge Sensoren 60 min Einzelimpuls



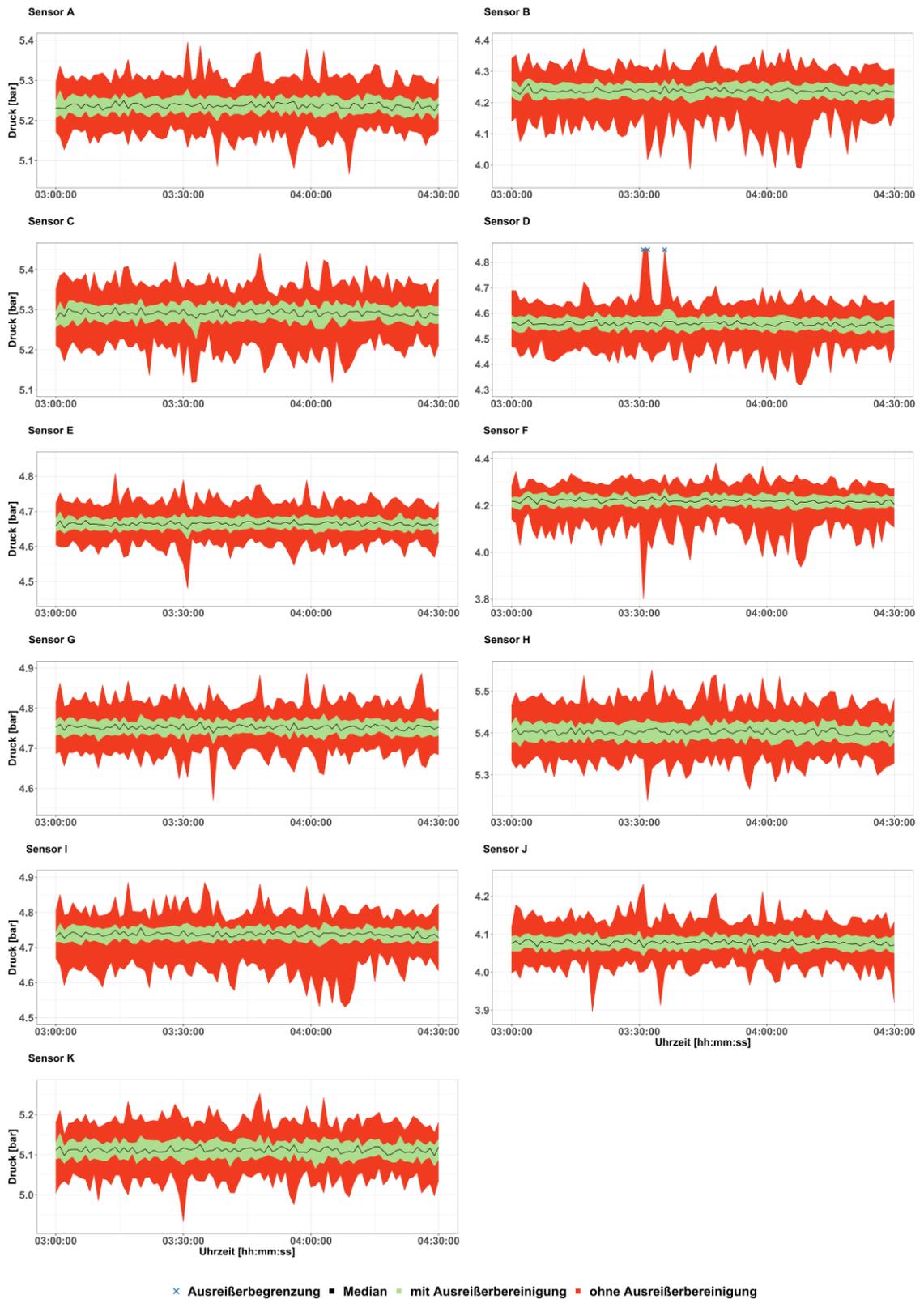
Tagesgänge Sensoren 60 min Median



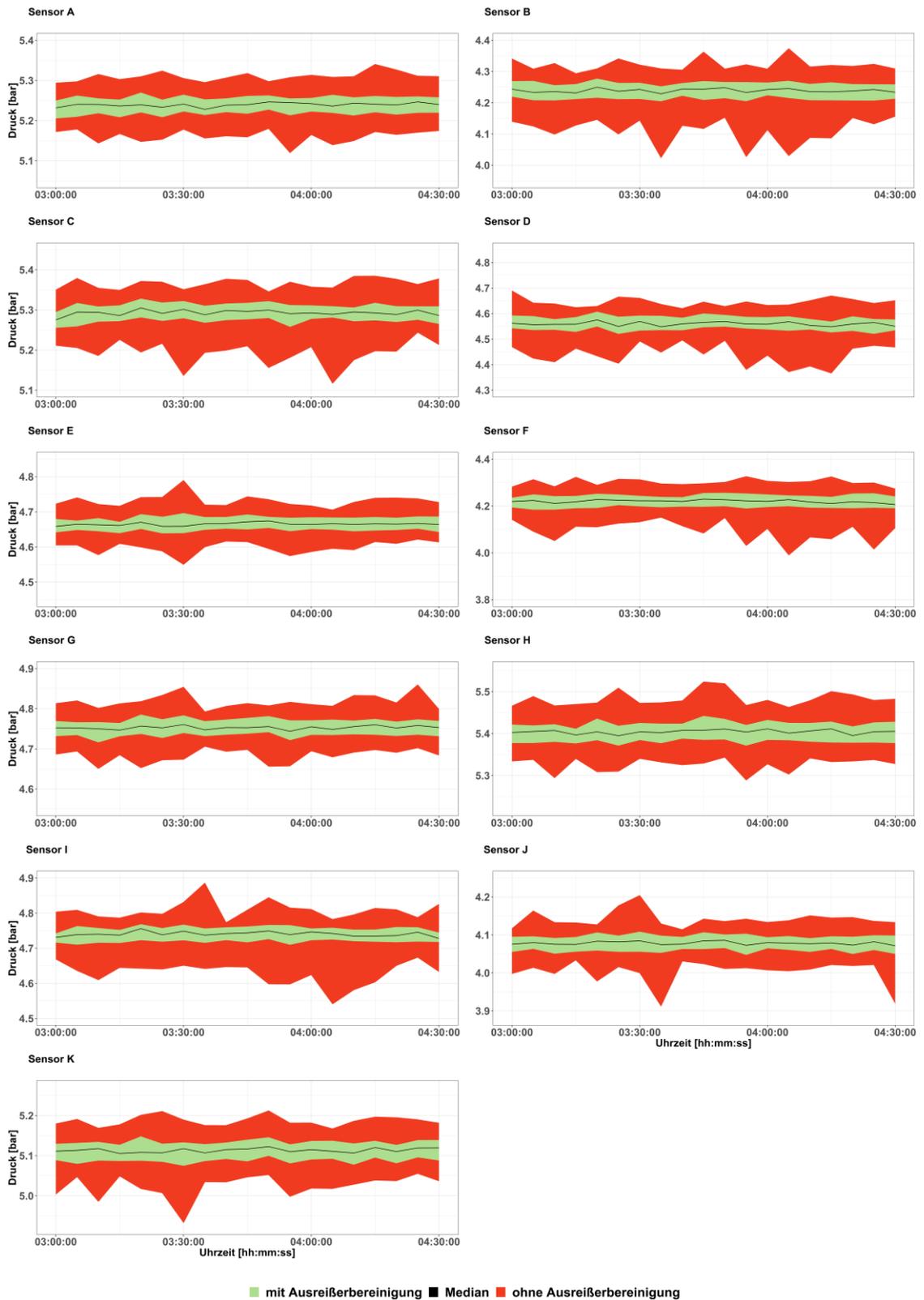
## Tagesgänge Sensoren 60 min Mittelwert



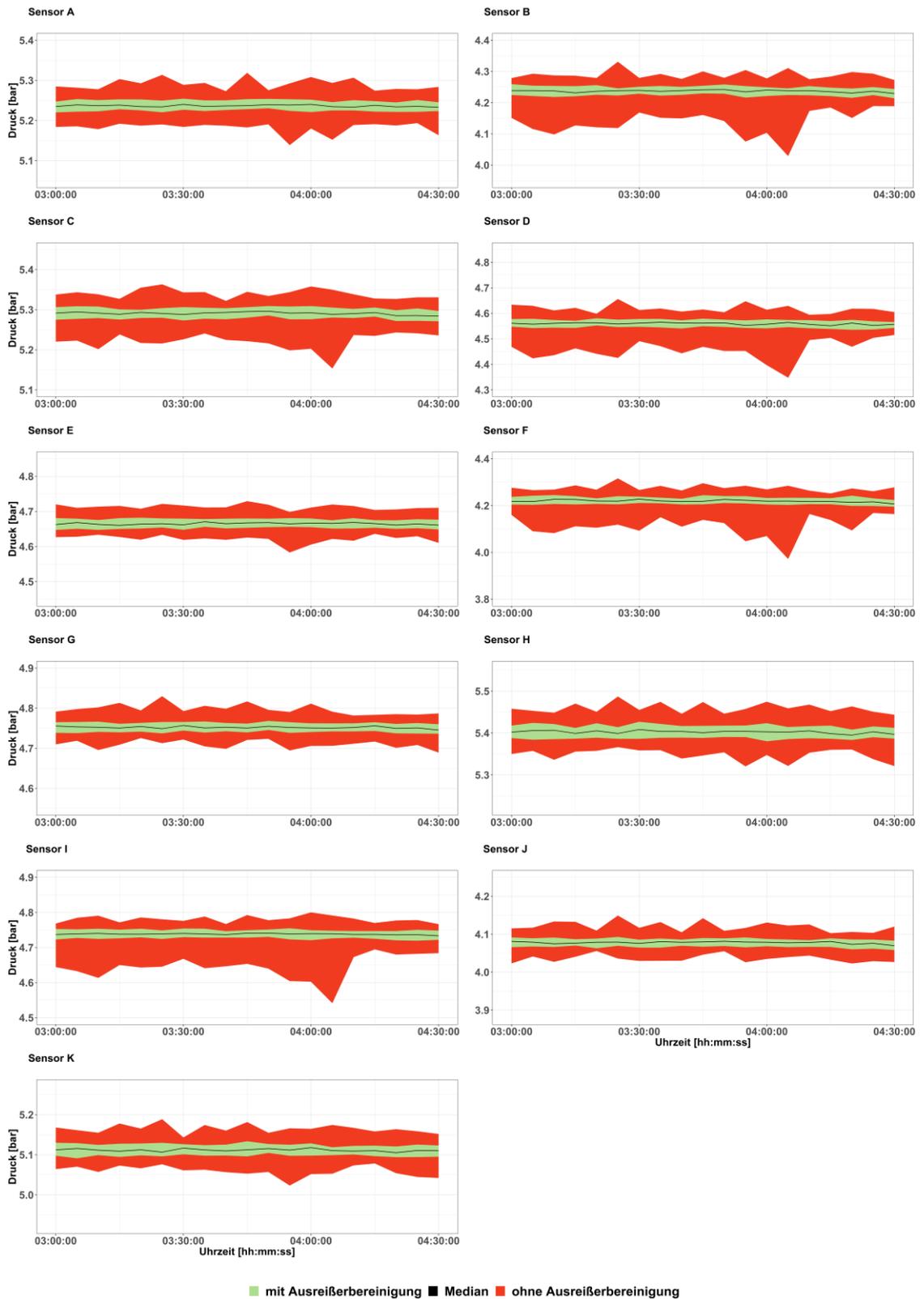
Nachtstunden Sensoren 1 min Einzelimpuls



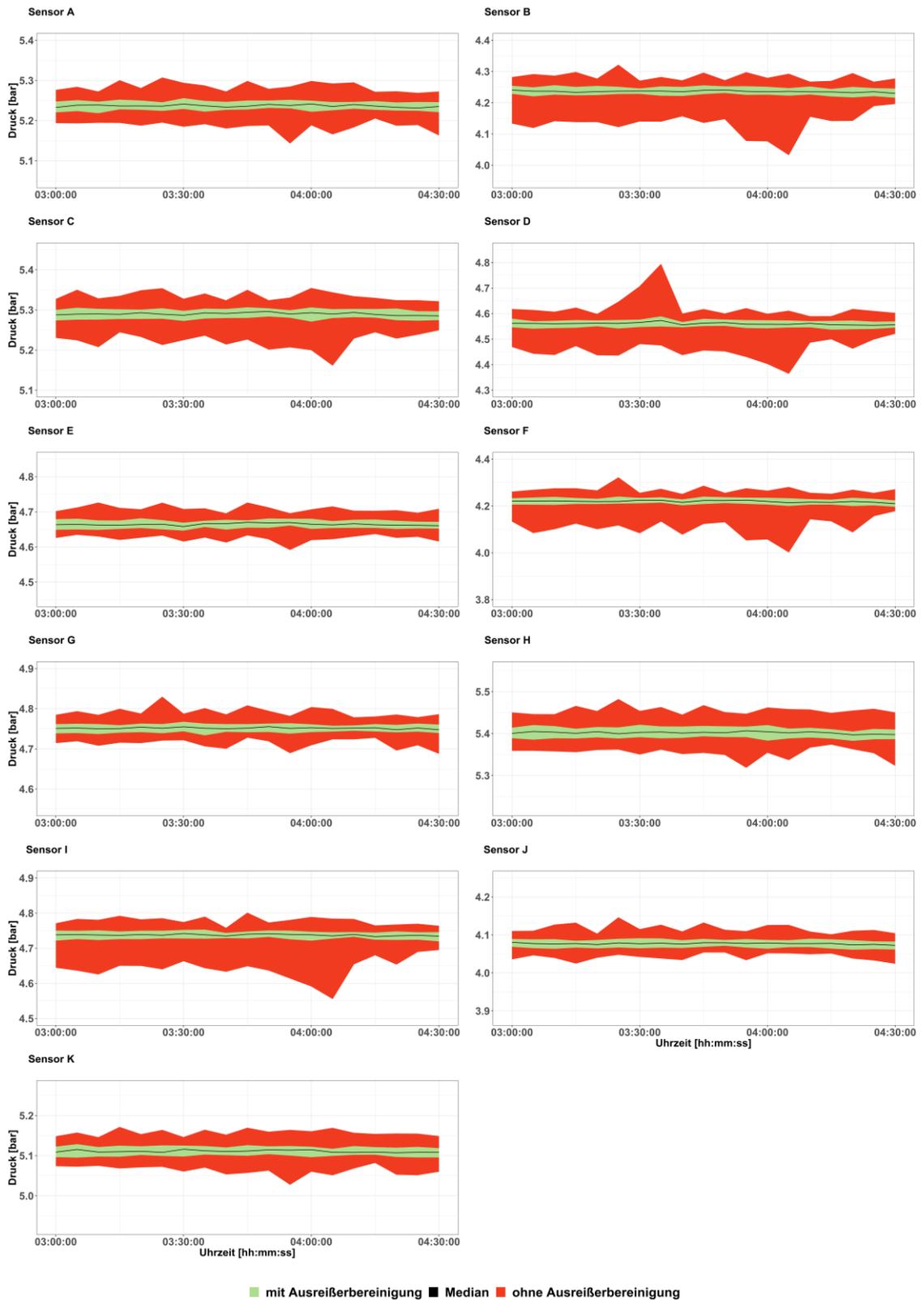
## Nachtstunden Sensoren 5 min Einzelimpuls



Nachtstunden Sensoren 5 min Median

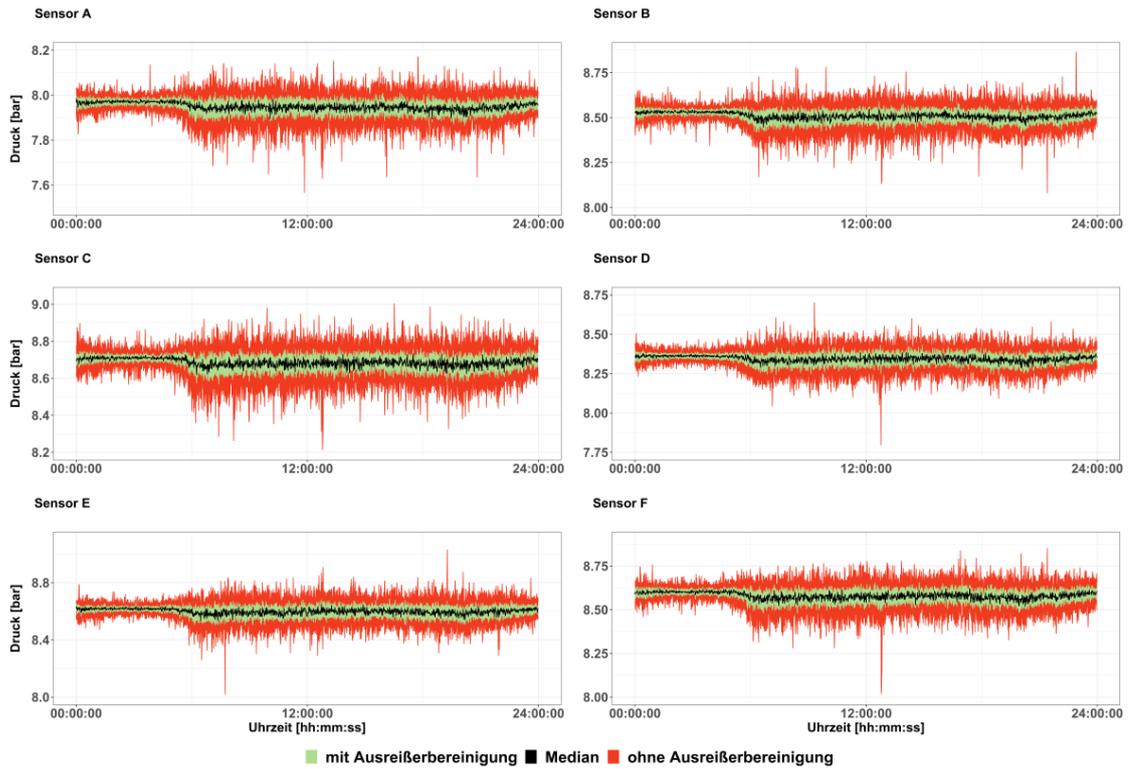


## Nachtstunden Sensoren 5 min Mittelwert

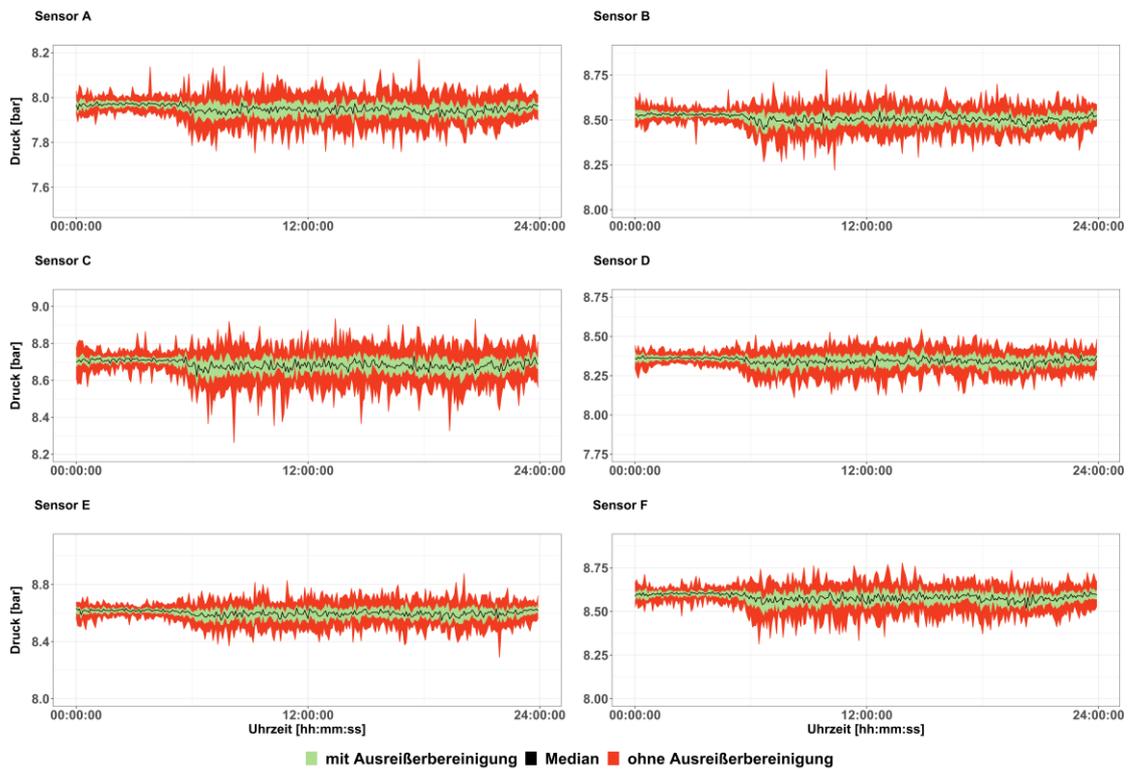


## Anhang C

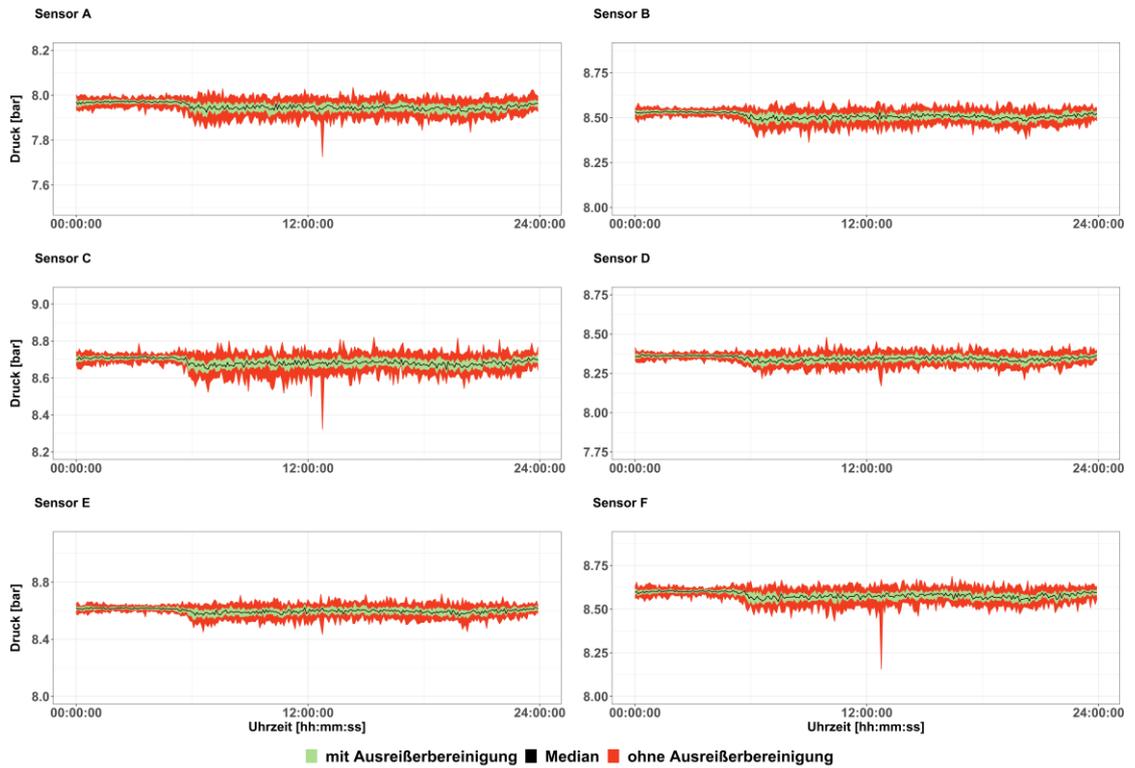
Tagesgänge Sensoren 1 min Einzelimpuls



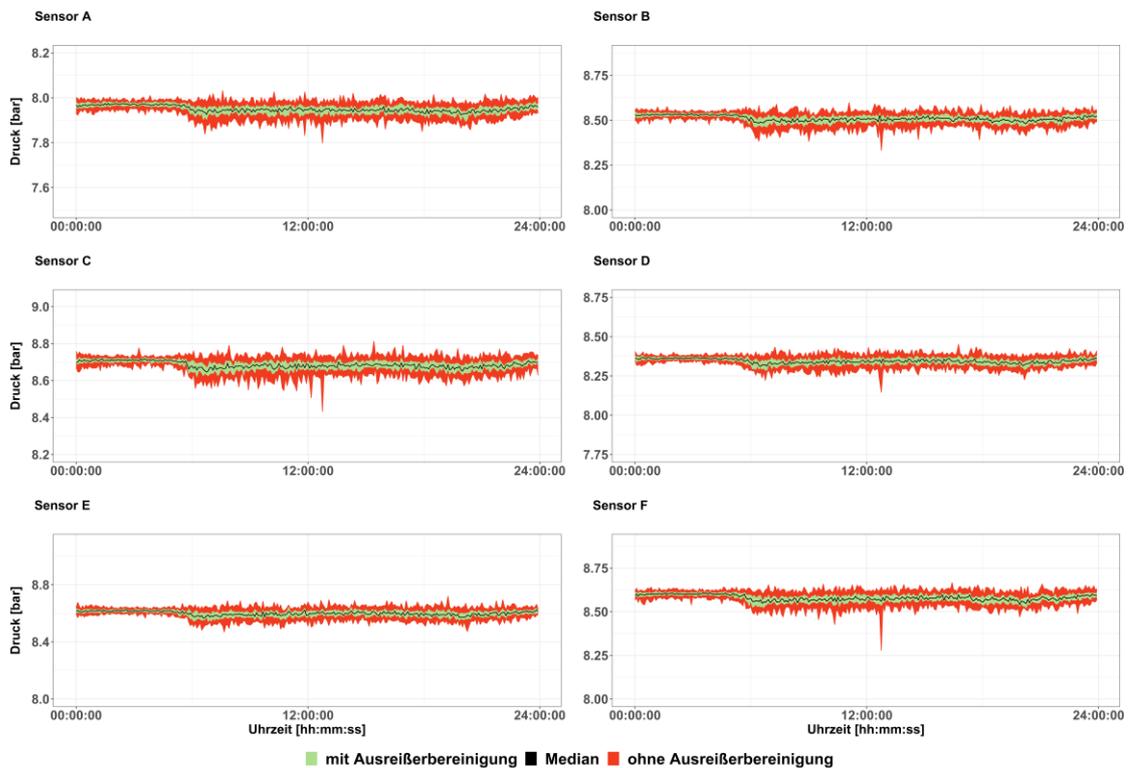
Tagesgänge Sensoren 5 min Einzelimpuls



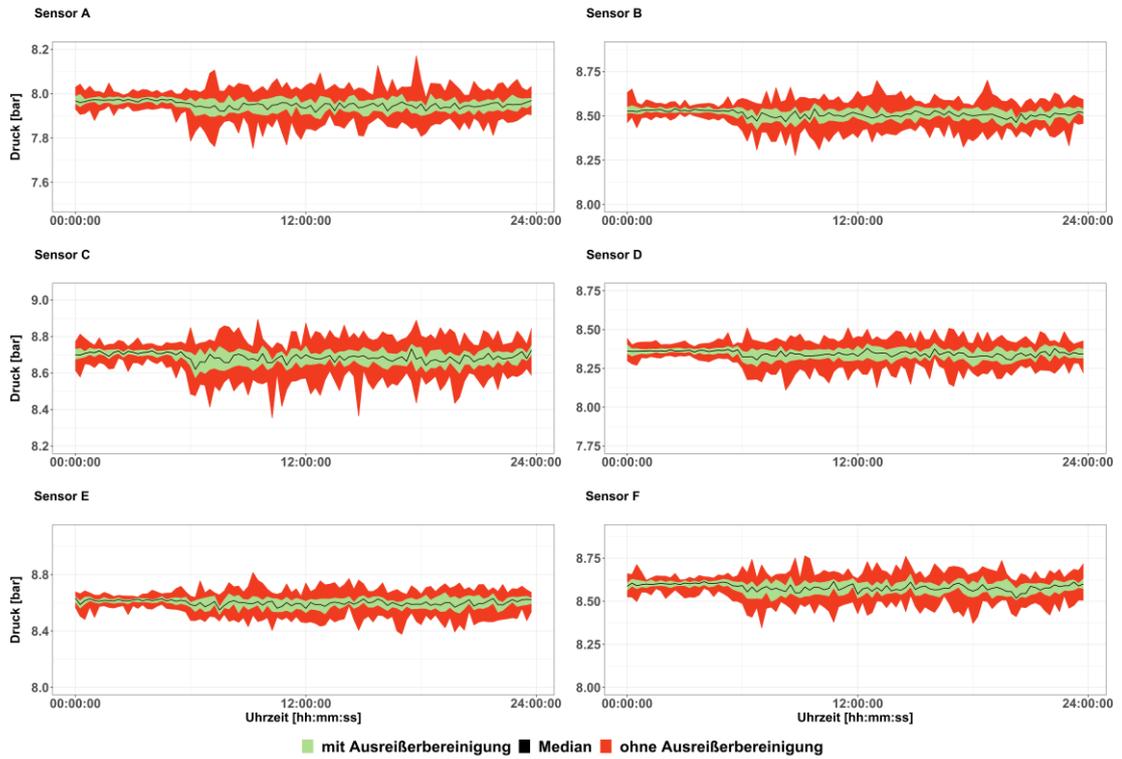
## Tagesgänge Sensoren 5 min Median



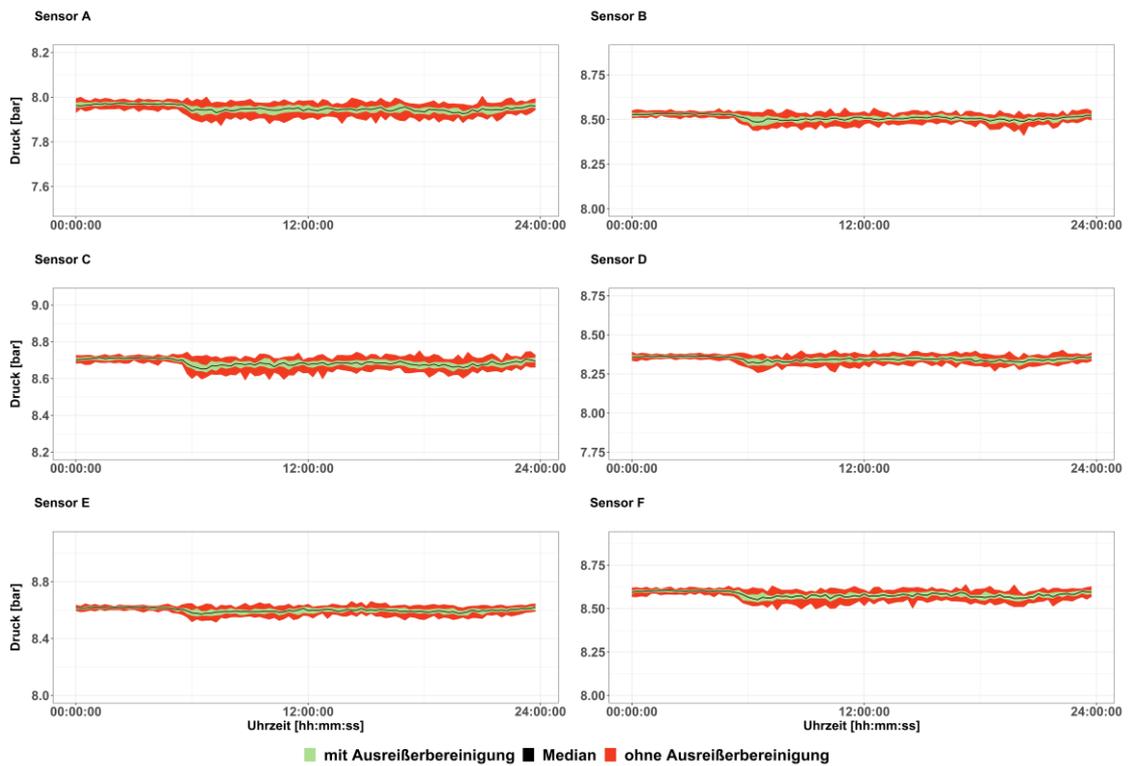
## Tagesgänge Sensoren 5 min Mittelwert



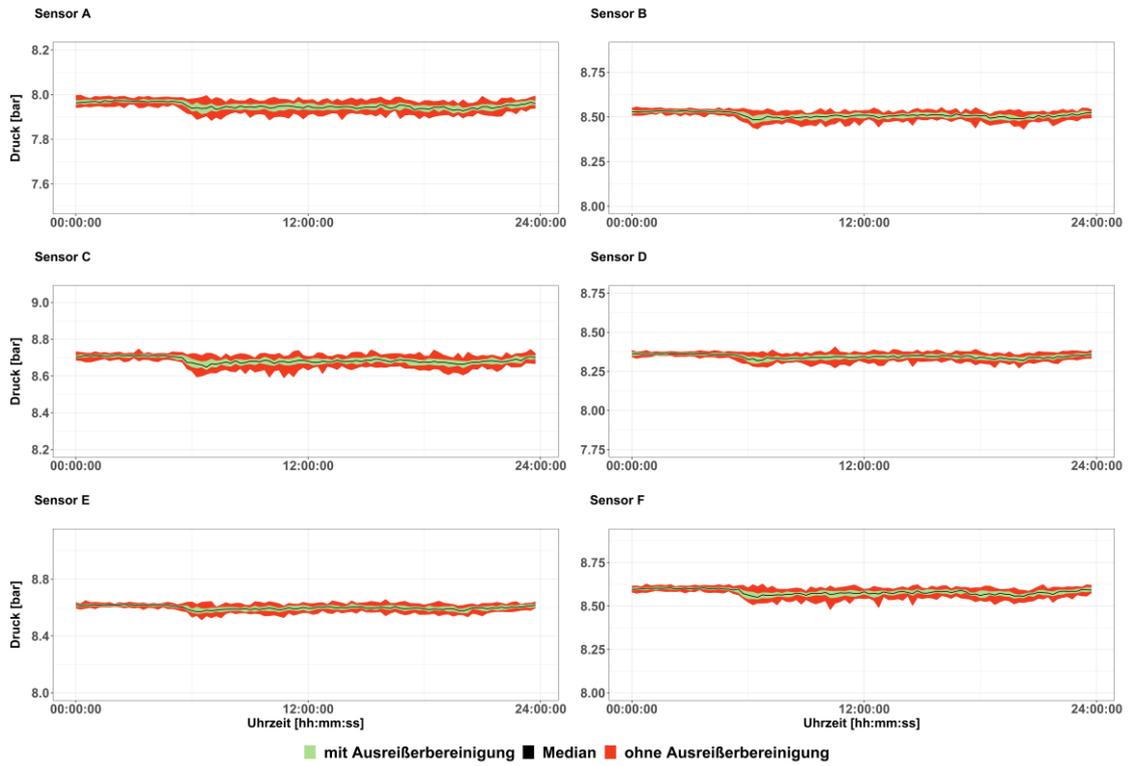
Tagesgänge Sensoren 15 min Einzelimpuls



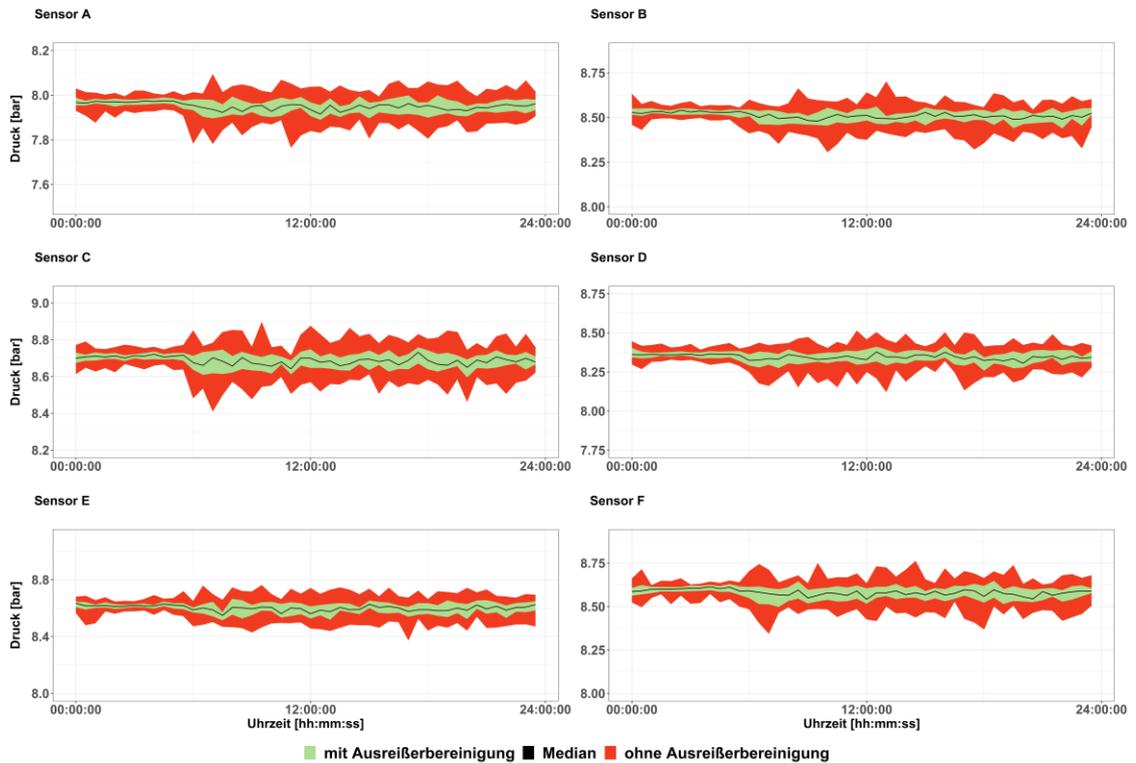
Tagesgänge Sensoren 15 min Median



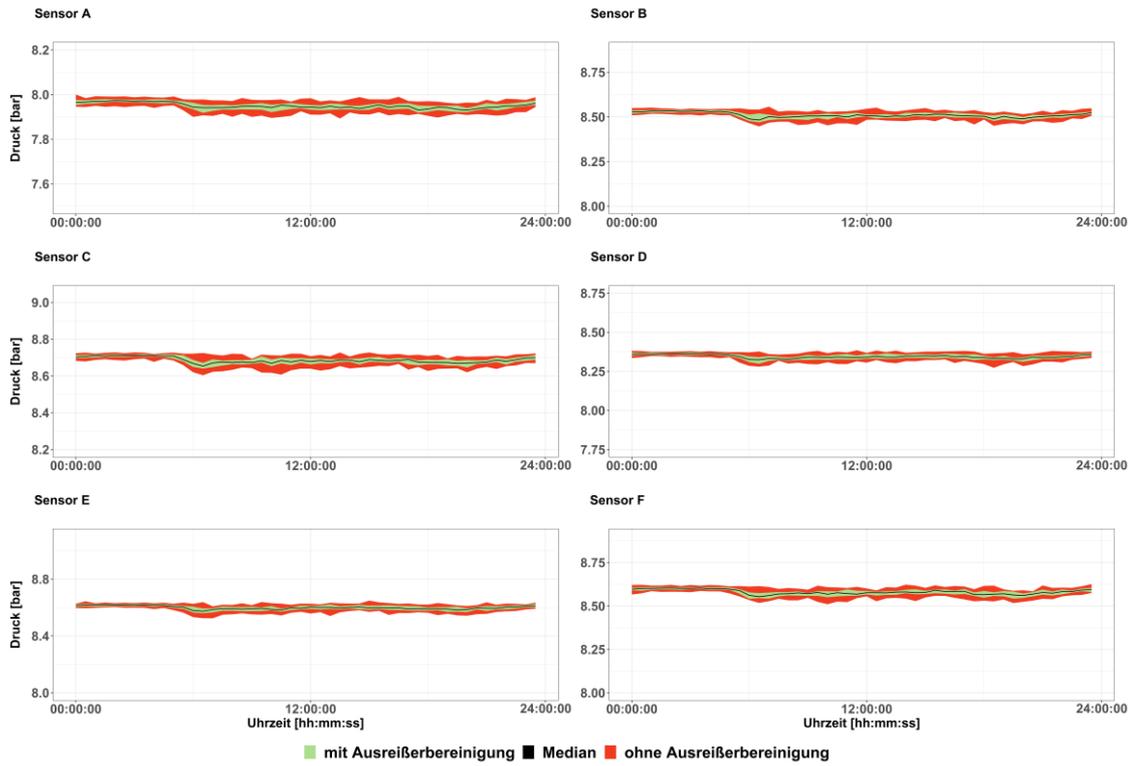
Tagesgänge Sensoren 15 min Mittelwert



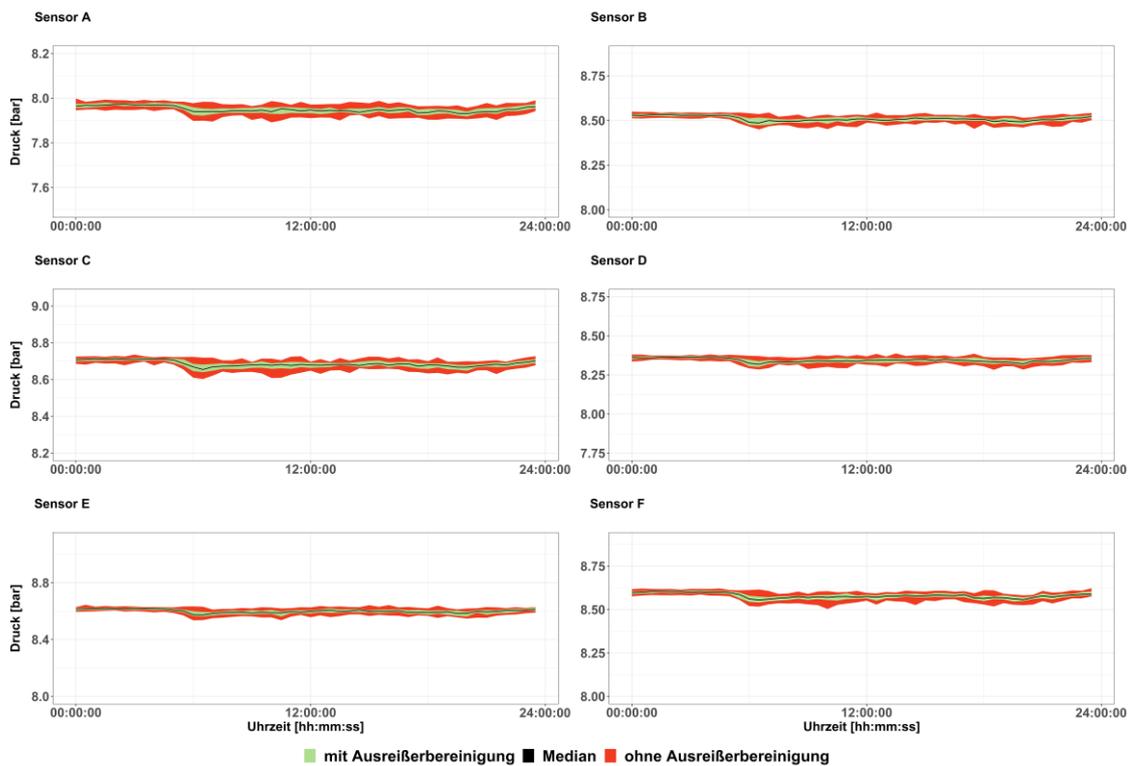
Tagesgänge Sensoren 30 min Einzelimpuls



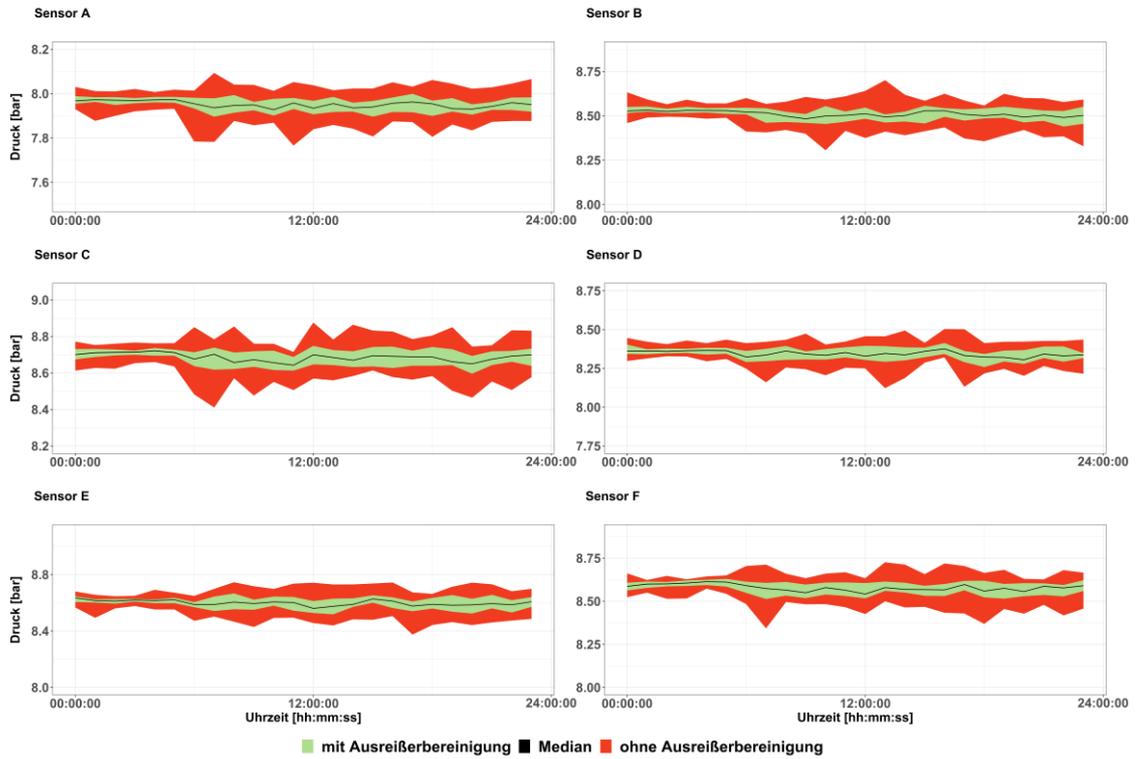
Tagesgänge Sensoren 30 min Median



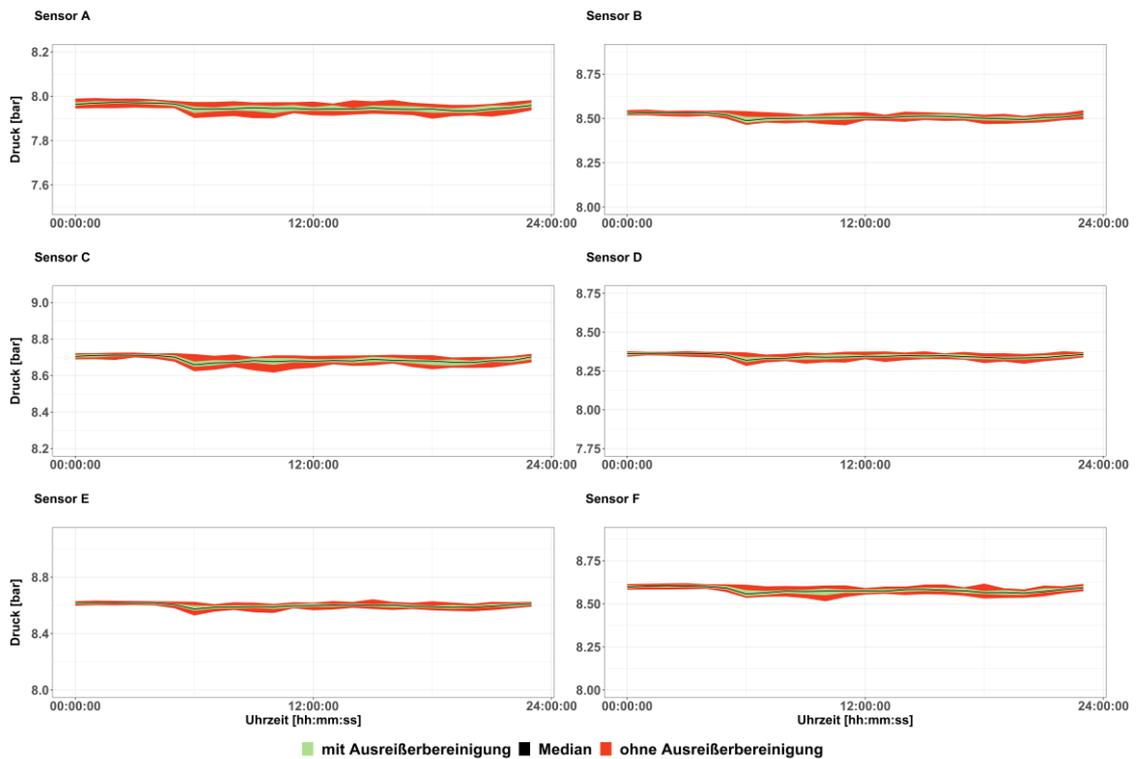
Tagesgänge Sensoren 30 min Mittelwert



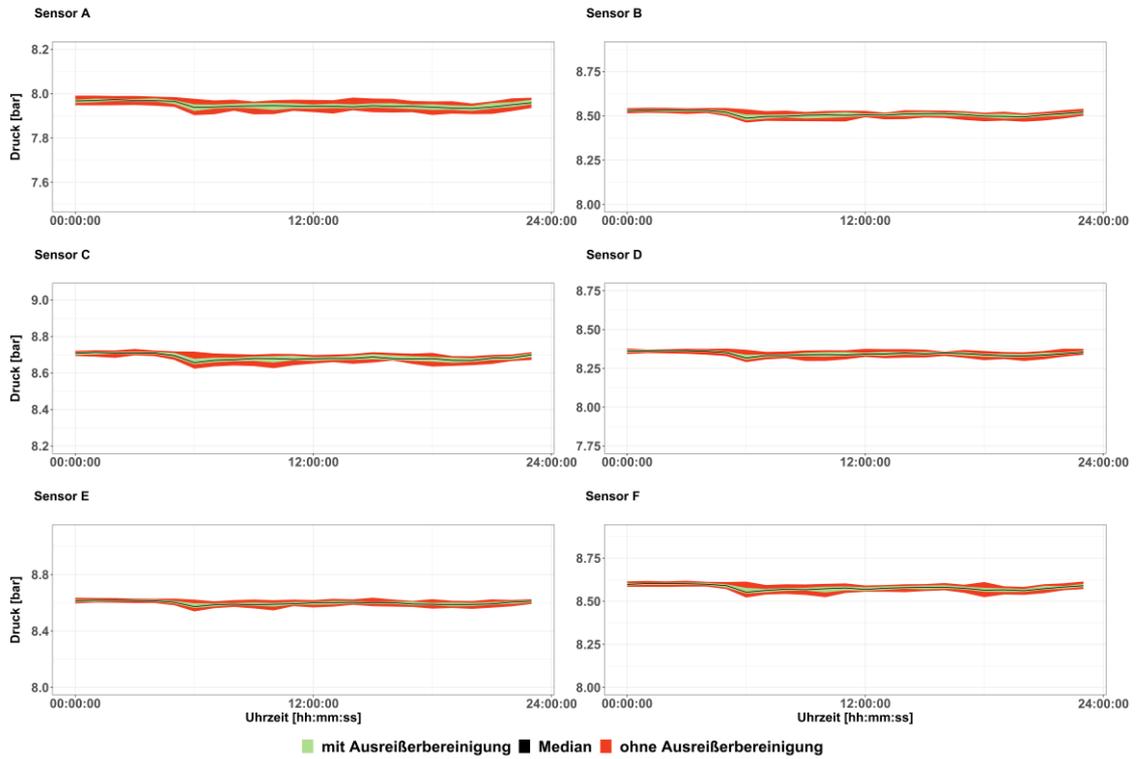
## Tagesgänge Sensoren 60 min Einzelimpuls



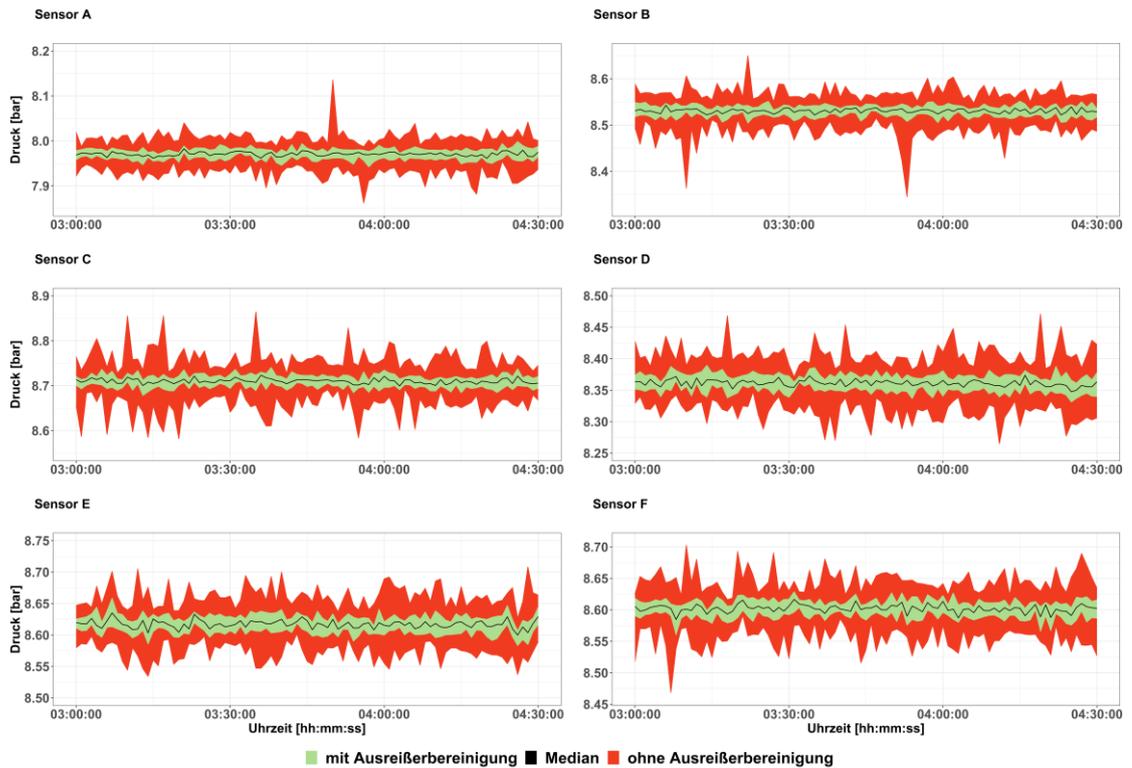
## Tagesgänge Sensoren 60 min Median



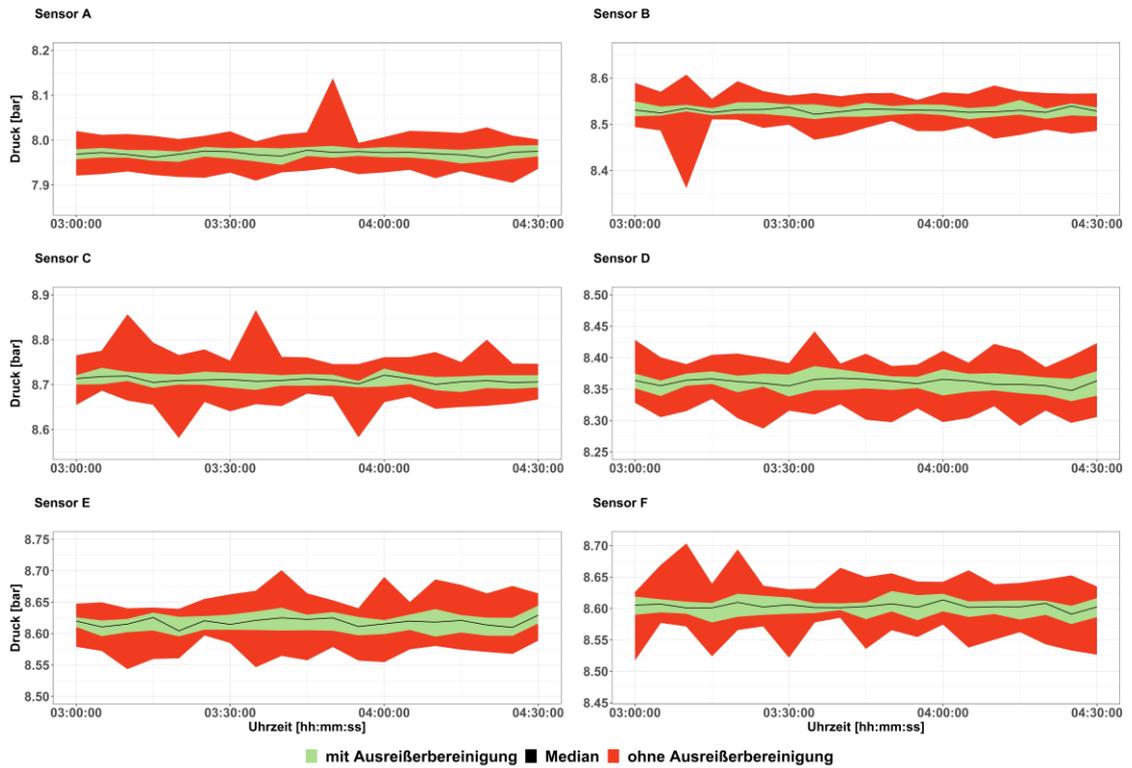
Tagesgänge Sensoren 60 min Mittelwert



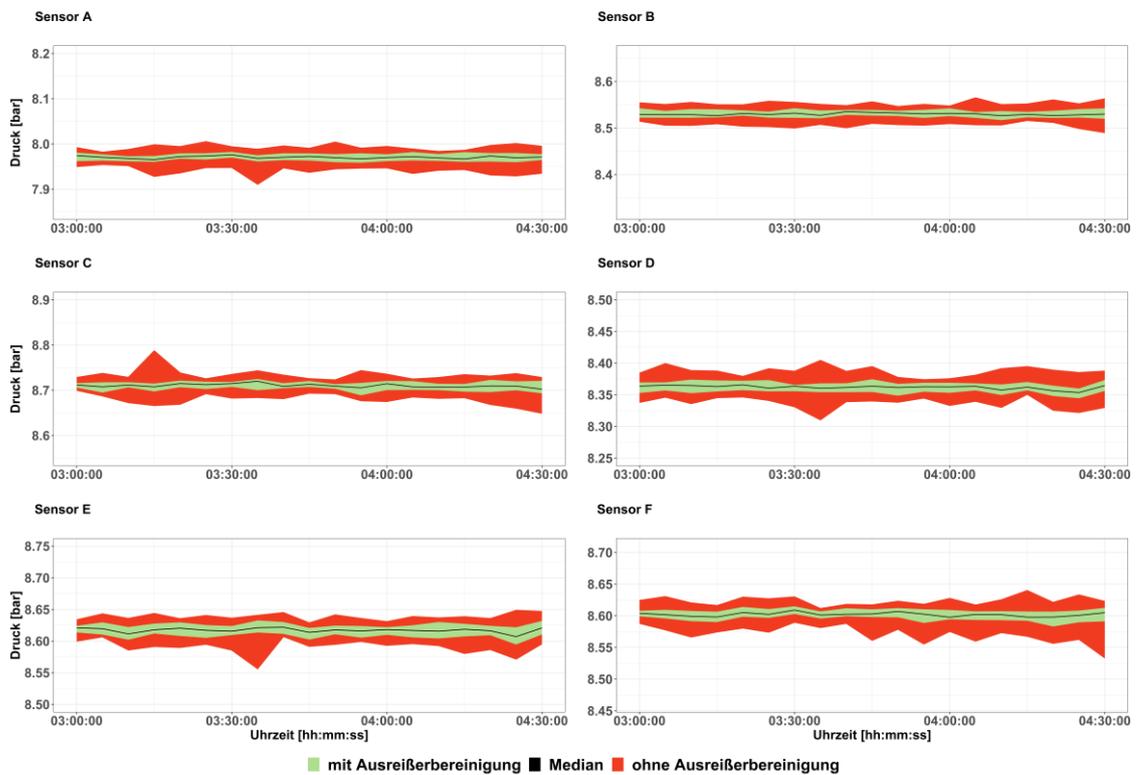
Nachtstunden Sensoren 1 min Einzelimpuls



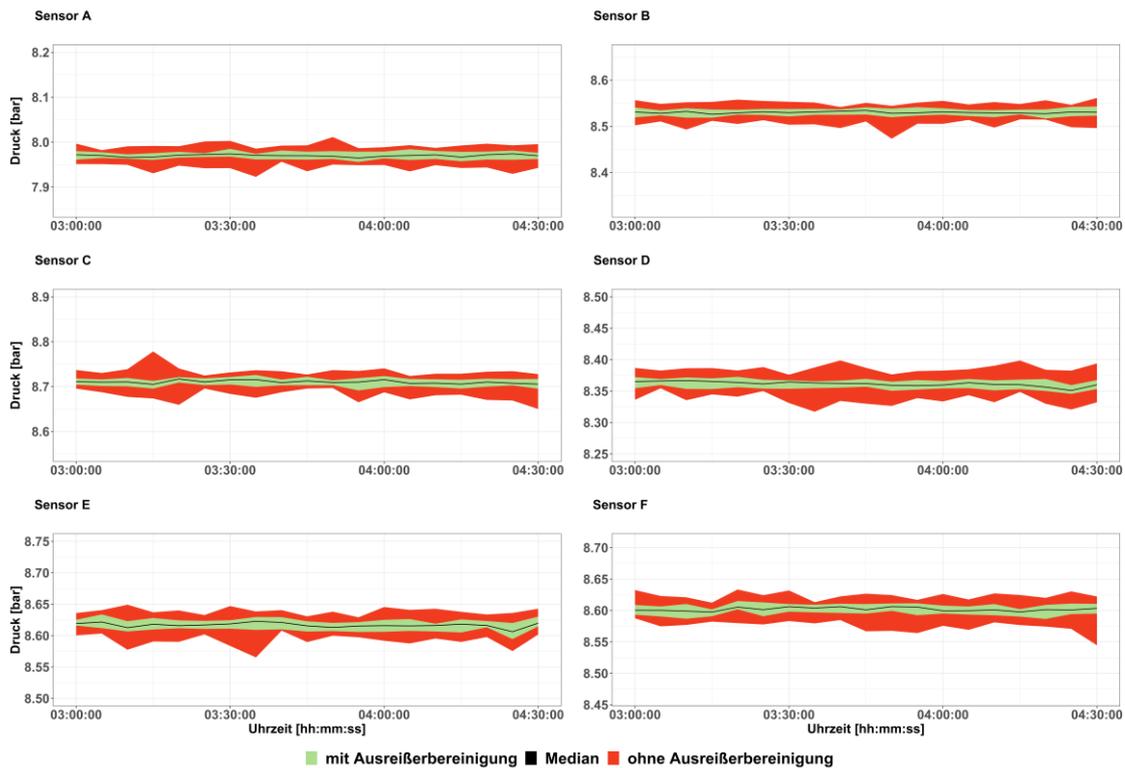
## Nachtstunden Sensoren 5 min Einzelimpuls



## Nachtstunden Sensoren 5 min Median

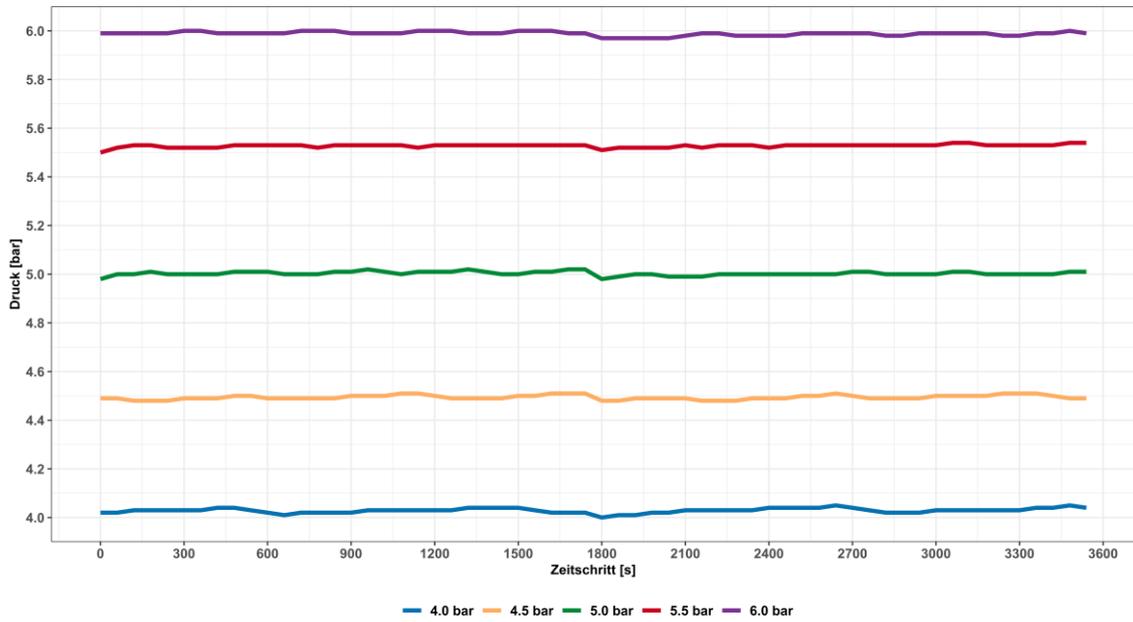


Nachtstunden Sensoren 5 min Mittelwert

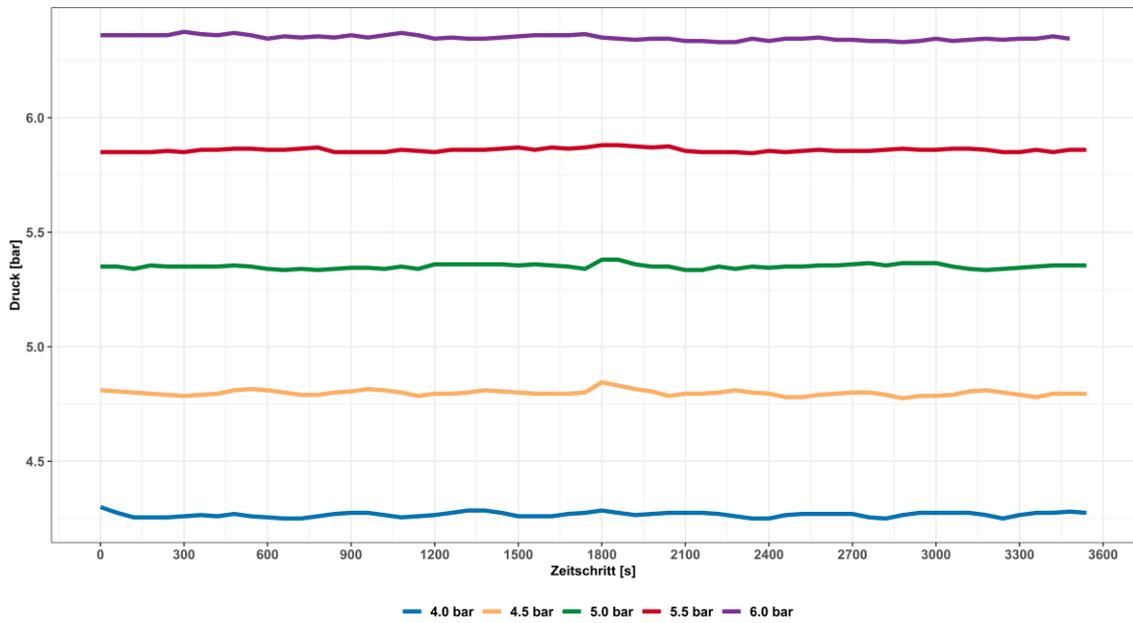


# Anhang D

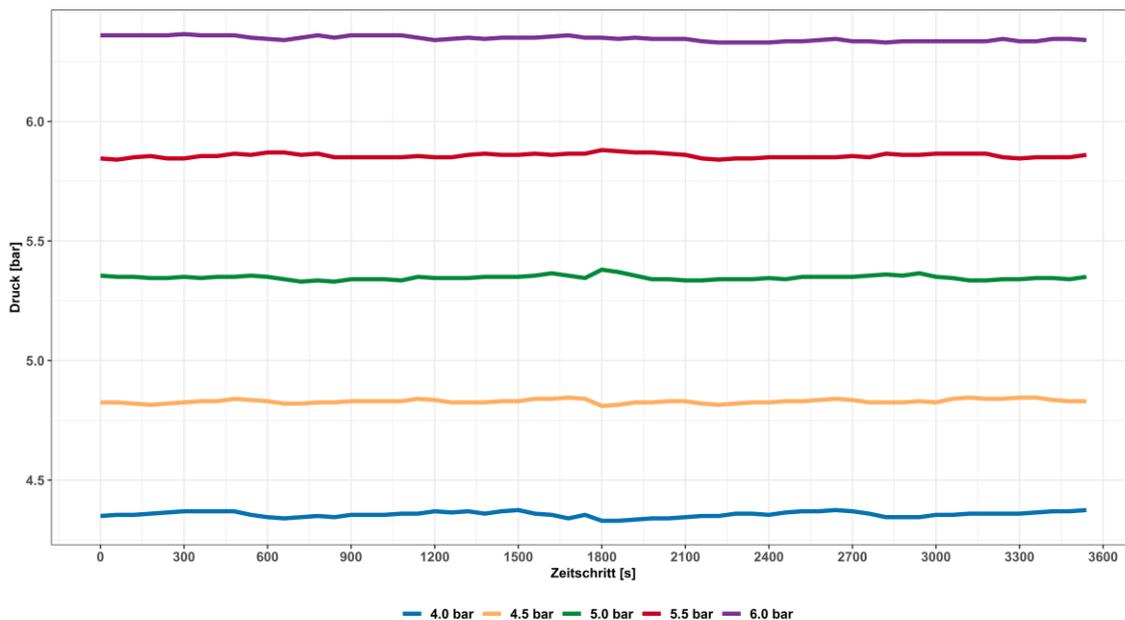
Referenzsensor Gems Typ 3100 Series



Drucksensor Honeywell Typ PX2



Drucksensor Honeywell Typ PX3



Drucksensor Danfoss Typ MBS 2050

