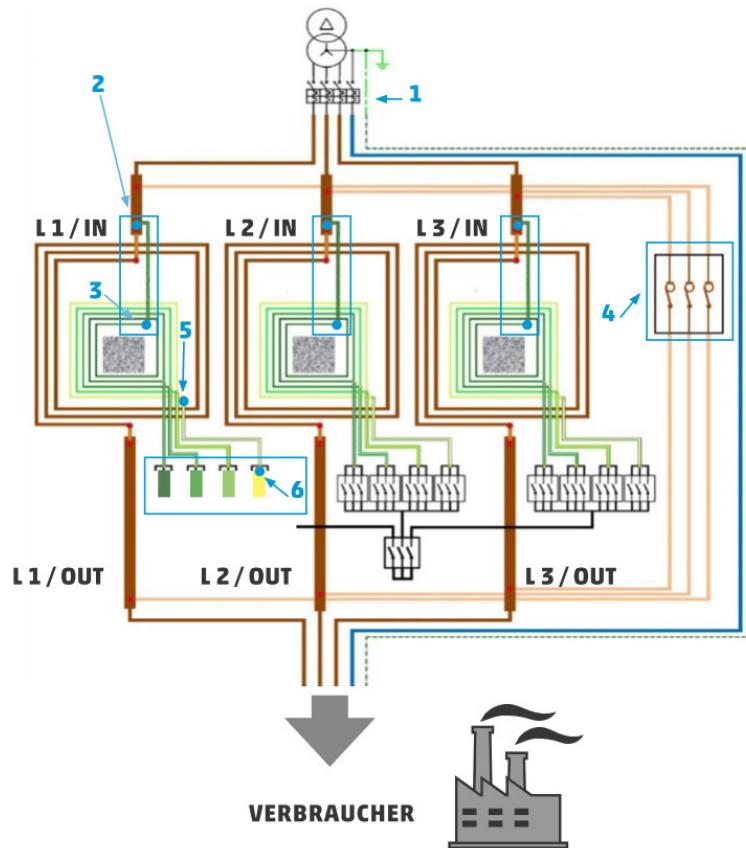


VERSION 1.4

# Analyse des Messverfahrens zum Nachweis der Energieeffizienzsteigerung beim Einsatz einer zentralen Energieeffizienzeinrichtung



Auftraggeber: Livarsa GmbH, Zell am Harmersbach



Maschinenbau und  
Verfahrenstechnik

Prof. Dr.-Ing. Jörg BAUSCH  
unterstützt durch Jonas RUDOLPH & Jannik STRITT

11. August 2019

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1 Zielsetzung . . . . .	5
1.2 Spezifikation / Vorgehensweise . . . . .	5
1.3 Technologie des EPplus-Systems entsprechend [Livarsa, 2019] . . . . .	6
<b>2 Messverfahren des EPplus-Systems</b>	<b>7</b>
2.1 Originaltext der Livarsa GmbH . . . . .	8
2.2 Einordnung des Messverfahrens . . . . .	8
2.2.1 Besondere Eigenschaften und stochastische Aspekte des Messverfahrens . . . . .	9
2.2.2 Modellierung des Messverfahrens . . . . .	12
2.2.3 Ergodizität und Stationarität und deren Bedeutung für das Livarsa-Messverfahren . . . . .	13
2.2.4 Notwendige Bedingungen . . . . .	14
2.3 Umfang und Eigenschaften der Messaufzeichnungen . . . . .	15
<b>3 Untersuchungsmethode</b>	<b>17</b>
3.1 Eigenschaften der verfügbaren Messdaten . . . . .	17
3.1.1 Datenfehler und Qualität der Messdaten . . . . .	17
3.1.2 Erzeugung der Lastkurven aus den Messdaten . . . . .	18
3.2 Methodenwahl . . . . .	19
3.2.1 Histogramme und Energiedichte aufeinanderfolgender Intervalle . . . . .	19
3.2.2 Nachweis der Stationarität . . . . .	19
3.2.3 Unterschiedliche Intervalldauern . . . . .	19
<b>4 Analyse vorhandener Messreihen</b>	<b>20</b>
4.1 Lastprofil, Energiedichten und Intervallunterschiede . . . . .	20
4.2 Histogramme und Nachweis der Stationarität . . . . .	21
4.2.1 Histogramm-Analyse . . . . .	21
4.2.2 Nachweis der Stationarität . . . . .	24
<b>5 Ergebnisse</b>	<b>25</b>
5.1 Erwartungswert, Standardabweichung und Stationarität . . . . .	25
5.2 Simulation . . . . .	28
5.3 Auswertung realer Messungen . . . . .	29
<b>6 Zusammenfassung</b>	<b>31</b>
<b>7 Kurzform (Artikel): Ein Messverfahren für zentrale Energieeffizienzeinrichtungen</b>	<b>32</b>
7.1 Vergleichende Intervallmessung . . . . .	32
7.2 Hardware und Messwerterfassung . . . . .	33
7.3 Quantifizierung der Einsparungen . . . . .	33
7.4 Zusammenfassung . . . . .	33

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>35</b>
<b>A Projektpartner und Kontakte</b>	<b>36</b>
A.1 Auftraggeber . . . . .	36
A.2 Projektleitung / Auftragnehmer . . . . .	36
A.3 Förderer/Partner . . . . .	36
<b>B Datenaufzeichnungen</b>	<b>37</b>
<b>C Auswertungen</b>	<b>39</b>
<b>D Simulation der Einsparung</b>	<b>70</b>
<b>E Methode zum Nachweis der Stationarität</b>	<b>73</b>
<b>F Simulation zum Einfluss periodischer Signale und Verschiebung der Abtastung</b>	<b>76</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Schaltprinzip EPplus-System, Quelle:Livarsa GmbH . . . . .	6
2.1	Intervallmessverfahren, Quelle:Livarsa GmbH . . . . .	7
2.2	Messwertreihe der zufälligen 5-Minuten-Intervalle a und b aus den Messaufzeichnungen 14119 über 12 Monate - Hersteller von Dreh- und Verzahnungsteilen . . . . .	10
2.3	Diskrete Leistungsmessung und Intervall-Prinzip des Livarsa-Messverfahrens . . . . .	12
2.4	Schaltprinzip zur Untersuchung der Messdaten . . . . .	14
3.1	Beispiel einer Lastkurve eines Herstellers von Dreh- und Verzahnungsteilen über einen Zeitraum von 12 Monaten . . . . .	18
4.1	Auswertung der Abweichungen der Energiedichte bei unterschiedlichen Intervalldauern, hier von 1 min bis 24 Std. - Messreihe Nr. 5 . . . . .	21
4.2	Auswertung der Abweichungen der Energiedichte bei unterschiedlichen Intervalldauern, hier von 1 min bis 15 min. - Messreihe Nr. 11 . . . . .	22
4.3	Histogramme der Differenz der Energiedichte a) und des relativen Energiedichte b) von 5 min. Intervallen - Datensatz Nr. 15 . . . . .	23
4.4	Kumulative Verteilungsdichtefunktion für die relativen Abweichungen der Energiedichte über 12 Monate - Datensatz Nr. 15 . . . . .	23
4.5	Testergebnis der Stationarität des Verhältnisses der Energiedichten bei unterschiedlichen Intervalldauern, hier von 1 min bis 15 min. - Datensatz Nr. 11 . . . . .	24
5.1	Kumulative Verteilungsfunktionen über alle Tage und Messaufzeichnungen bei einer Intervalldauer von 5 min. - alle Datensätze . . . . .	25
5.2	Kumulative Verteilungsfunktionen aller Standardabweichungen über alle Tage und Messaufzeichnungen Intervalldauern von 1, 5, 10 und 15 min. - alle Datensätze . . . . .	26
5.3	Simulation zwei Arbeitstage mit -4,5% Savings - 1.-2.12.2017 bei Nr. 15 . . . . .	28
5.4	Reale 12-Stunden-Messung mit aktivem EPplus-System . . . . .	29
5.5	Lastprofil der 12-Stunden-Messung mit aktivem EPplus-System . . . . .	30
7.1	Diskrete Leistungsmessung und Intervall-Prinzip des Livarsa-Messverfahrens . . . . .	32
7.2	Schaltprinzip zur Untersuchung der Messdaten . . . . .	33
7.3	Auswertung einer Beispilmessung . . . . .	34
B.1	Messaufzeichnung (Auszug) . . . . .	38

# **Tabellenverzeichnis**

2.1	Liste aller verfügbaren Datensätze mit Aufzeichnungsdauern zwischen 5 und 17 Monaten . . . . .	15
5.1	Liste der Konfidenz-Niveaus in Prozent für einen Monat . . . . .	27

# **Kapitel 1**

## **Einleitung**

Auf Basis der Beauftragung durch die Livarsa GmbH aus Zell am Harmersbach (im Folgenden Auftraggeber genannt) vom August 2018 ist die vorliegende Studie der Hochschule Offenburg (im Folgenden HSO genannt) entsprechend ihrem Angebot vom Juli 2018 erarbeitet worden. Die Untersuchungen wurde von Prof. Dr.-Ing. Jörg Bausch der Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik geleitet und wurde durch die Studenten Jonas Rudolph und Jannik Stritt unterstützt. Die Projektlaufzeit betrug sechs Monate vom 01. September 2018 bis einschließlich 28. Februar 2019. Das Projekt wurde zusätzlich mit öffentlichen Mitteln durch innoEFF, Klimapartner Oberrhein gefördert.

### **1.1 Zielsetzung**

In diesem Projekt soll das Messverfahren, mit der die Energieeffizienzsteigerung der EPplus - Anlage der Livarsa GmbH aktuell nachgewiesen wird, untersucht und wissenschaftlich bewertet werden.

Genaue Messungen von Energieeinsparungen aus industriellen Energieeffizienzmaßnahmen kann die Unsicherheit über die Wirksamkeit der Projekte reduzieren und so Schätzungen und Vorhersagen verbessern. Hierbei ist die einfachste Methode zur Messung der Energieeinsparungen bei der Nachrüstung, der direkte Vergleich des Energieverbrauchs in der Vor- und Nachrüstphase [Kissock and Eger, 2008]. Dieses Prinzip ist in abgewandelter Form bei dem vorliegenden Messverfahren in direkter Weise umgesetzt worden. Wie auch bei Akinsooto et al. [2014] beschrieben; Energieeinsparungen werden nicht gemessen, sie werden berechnet. Zwischen zwei bekannten Energiewerten wird hierzu die Differenz zwischen dem zuvor ermittelten Baseline-Energieverbrauch und dem tatsächlichen, nach Installation der Energieeffizienzeinrichtung, aufgezeichneten Energieverbrauch ermittelt.

### **1.2 Spezifikation / Vorgehensweise**

Die HSO wird das von der Livarsa GmbH eingesetzte Messverfahren in Verbindung mit dem EPplus-System auf zunächst theoretischer Basis analysieren und anhand bestehender Messungen und Publikationen verifizieren. Auf Basis dieser Ergebnisse wird das Messverfahren wissenschaftlich bewertet. Die Untersuchung basiert auf realen Messungen<sup>1</sup> von Leistungen, Spannungen und Strömen in industriellen Niederspannungsnetzen in Kombination theoretischer wissenschaftlicher Erkenntnisse.

---

<sup>1</sup>die von der Livarsa GmbH bereitgestellt wurden

### 1.3 Technologie des EPplus-Systems entsprechend [Livarsa, 2019]

Die Livarsa GmbH vertreibt ein elektrisches Produkt zur Energieeffizienzsteigerung von Betriebsmitteln und Industrienetzen der 230V Niederspannungsebene. Die Livarsa GmbH in Grenchen in der Schweiz ist die Muttergesellschaft des Auftraggebers. Basis des EPplus-Systems ist ein Transformator (vgl. Abbildung 1.1), dessen Wicklungen in vakuumimprägnierter Technologie ausgeführt werden und der entsprechend Abbildung 1.1 ausgeführt und am Netzzugang installiert wird. Der Transformator verfügt über ansteuerbare Wicklungen (Nr. 6), einen Bypass-Schalter und einen Sternpunktenschütz (Nr.6). Beim Einschalten des Systems wird der BYPASS-Schalter geöffnet. Gleichzeitig wird der Sternpunktenschütz geschlossen und es entsteht ein neuer fluktuierender Sternpunkt. Die gesamte Leistung fließt nun über U/In durch die Wicklung (braun) zu U/Out (Verbraucher). Hierbei entsteht zwischen den beiden Wicklungen ein Magnetfeld. Je nachdem welches Windungsverhältnis auf der Wicklung (grün) eingeschaltet ist (gesteuert mit den Schützen 1- 4), verändert sich die Distanz zwischen der braunen und grünen Wicklung. Dadurch wird ein Induktionsstrom zwischen 4% - 9% des aktuellen Verbrauchstroms auf die Wicklung (grün) übertragen. Da der Sternpunktenschütz geschlossen ist (ausgangsseitig 0 Punkt), fließt der Induktionsstrom als Rückkopplungsstrom über die Kabelverbindung direkt zum Knotenpunkt zurück [Livarsa, 2019].

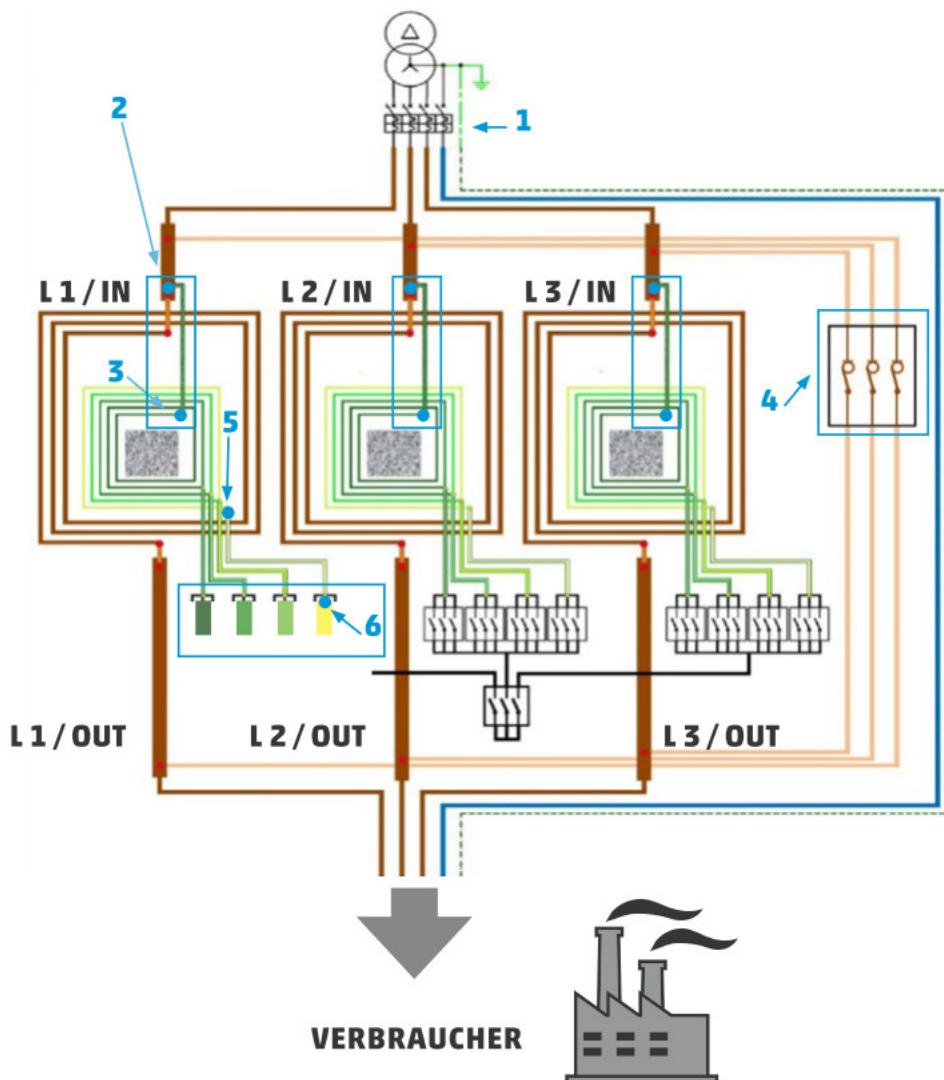


Abbildung 1.1: Schaltprinzip EPplus-System, Quelle:Livarsa GmbH

Die Energieeffizienzsteigerung ist nicht Gegenstand der Untersuchungen. Die Untersuchungen bleiben ausschließlich auf das Messverfahren beschränkt.

# Kapitel 2

## Messverfahren des EPplus-Systems

Das von der Livarsa GmbH verwendete Messverfahren zum Nachweis der Energieeffizienzsteigerung beruht auf dem Vergleich von Energieverbräuchen innerhalb zeitgleichen und direkt aufeinanderfolgenden Intervallen. Hierzu wurden seitens der Livarsa GmbH 5-Minuten-Intervalle auf Basis empirischer Methoden und Erfahrungen als geeignet definiert. Zur Ermittlung der Effizienzsteigerung und zum Nachweis der Energieeinsparung wird hierzu für jeweils fünf Minuten das Industriennetz direkt und ohne Einsatz des EPplus-Systems betrieben. Danach wird das System am Netzzugang eingefügt und für weitere fünf Minuten zugeschaltet. Während beider Intervalle wird der Energieverbrauch gemessen, sowie weitere charakteristische Parameter aufgezeichnet. Hierzu gehören Spannung, Strom, Wirk- und Blindleistung sowie der Leistungsfaktor die alle zeitgleich aufgezeichnet werden. Typischerweise werden die Messwerte im Abstand von jeweils einer Minute aufgezeichnet. Höhere Messwertauflösungen sind ebenfalls möglich.

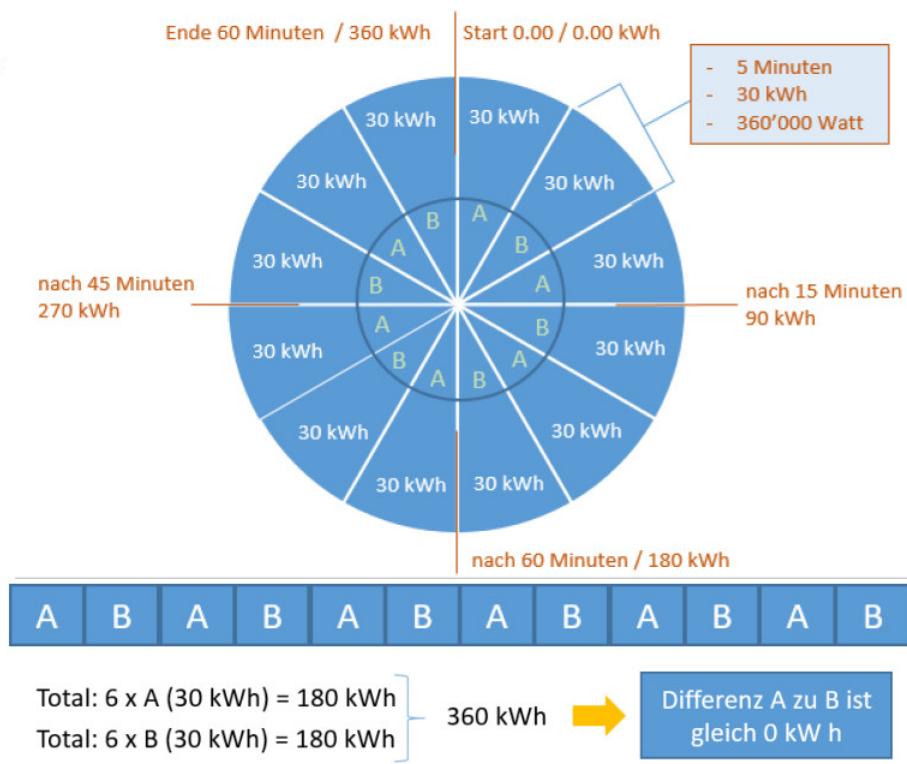


Abbildung 2.1: Intervallmessverfahren, Quelle:Livarsa GmbH

## 2.1 Originaltext der Livarsa GmbH

**ENERGIEVERBRAUCH-VERGLEICHSMESSUNG MIT UND OHNE EPplus-System** Alle bisherigen Effizienzsteigerungsmassnahmen in der Elektrotechnik haben sich auf die einzelnen elektrischen Verbraucher und Querschnittstechnologien bezogen und nicht auf ein gesamtes elektrisches Verbrauchernetz. Da sich bisher niemand mit diesem Thema, wie eine Effizienzsteigerung in einem gesamten elektrischen Verbrauchernetz (nach dem Mittelspannungstransformator) erzielt und gemessen werden kann auseinandergesetzt hatte, musste ein neues Messverfahren entwickelt werden. Mit den vorhandenen Kenntnissen und in Zusammenarbeit mit Universitäten wurde das nachfolgend beschriebene Messverfahren entwickelt und durch eine unabhängige Zertifizierungsgesellschaft validiert.

Die Herausforderung war groß, da in einem gesamten elektrischen Netz der Verbrauch zu keinem Zeitpunkt gleich ist und laufend Verbraucher zu- und weggeschaltet werden. Die Auswertung und Analyse unzähliger Lastgang und Energiedaten in vielen Unternehmen aus unterschiedlichsten Branchen wurden durchgeführt und haben neue Erkenntnisse gebracht Grundlage für die Genauigkeit für die Energievergleichsmessung ist ein zuverlässiges und hochauflösendes Messequipment. Das EPplus-System kann während dem laufenden Betrieb, jederzeit EIN und AUS geschaltet werden. Die Messung erfolgt über einen Zeitraum von 24 Stunden, wobei das EPplus-System alle 300 Sekunden EIN und AUS geschaltet wird. Insgesamt ergibt das 144 Zeitabschnitte von 300 Sekunden SAVING (EIN) und 144 Zeitabschnitte von 300 Sekunden in BYPASS (AUS) Status ist. Damit die Messgenauigkeit bei der Vergleichsmessung gewährleistet werden kann, wird die Energiemessung während dem Statuswechsel (20 Sekunden) und beim Schaltzyklus (2 Sekunden) nicht mit einbezogen. Die Energiemessung für diese Zeit wird separat ausgewiesen. Die insgesamt 288 Schaltungen über einen Zeitraum von 24 Stunden werden nach der Inbetriebnahme und zu einem beliebigen Zeitpunkt programmiert. Die gleichen Energieverbrauch-Vergleichsmessungen werden ebenfalls unter den gleichen Bedingungen und ohne Schaltungen über einen Zeitraum von mindestens 21 Tagen ausgeführt. Gleiche Bedingungen heißt, dass auch hier sekundengenaue Zeitabschnitte gegenübergestellt werden. Nur durch die hundertprozentige Vergleichbarkeit der Energieverbrauchsmessungen kann die Genauigkeit der Effizienzsteigerung gewährleistet und nachgewiesen werden.

## 2.2 Einordnung des Messverfahrens

Da das EPplus - System direkt am 400V-Netzzugang installiert wird, kann dieses auch nur auf den gesamten Verbrauch der angeschlossenen Verbraucher wirken. Alle aufgezeichneten Messwerte der Anlage beziehen sich auf den gesamten Strombezug des angeschlossenen Betriebs. Hierzu gehören alle an das Netz angeschlossenen Einzelverbraucher in Summe. Eine Aufteilung oder Abkopplung der einzelnen Verbraucher vom System ist nicht möglich. Damit ist eine Identifikation der Energieeffizienzsteigerung einzelner Verbraucher ausgeschlossen. Es wird stets der gesamte Verbrauch aller Messpunkte aufgezeichnet. Weiterhin sind die Zeitpunkte bekannt zu denen das EPplus-System eingeschaltet wird und die Zeitspanne des Betriebs der Anlage. Diese Tatsache ermöglicht den direkten zeitlichen Zusammenhang und den Effekt des EPplus-Systems aus den Messaufzeichnungen zu extrahieren.

In der Literatur findet sich bei Jiříčka and Mezera [2015] ein vergleichbarer Ansatz, welcher ebenfalls in Kombination mit einem speziellen Transformator zu Energieeinsparungen führt. Bei Jiříčka and Mezera [2015] wurde die Spannung ausschließlich durch Änderung der Wicklungsverhältnisse<sup>1</sup> reduziert. Diese Maßnahme führt entsprechend Jiříčka and Mezera [2015] zu einer messbaren Reduzierung der aufgenommenen Leistung und damit zu einem reduzierten Energiebezug.

---

<sup>1</sup>Anmerkung: Eine damit einhergehende reduzierte Versorgungsspannung führt nur dann zu einem reduzierten Energiebezug, wenn die angeschlossenen Verbraucher dadurch auch eine reduzierte Leitung aufnehmen. Bei elek-

Es wurde der naheliegende Nachweis erbracht, dass beim Ein- und Ausschalten der Energieeffizienzeinrichtung der reduzierte Leistungsbedarf direkt messbar ist. Auch in Heo and Zavala [2012] findet sich eine Berechnungsmethode auf welche der vorliegende Ansatz zurückgeführt werden kann. Die in [Heo and Zavala, 2012] beschriebene Methode bildet ebenfalls ein Vergleich gleichlanger, aufeinanderfolgender und repräsentativer Beobachtungsintervalle in denen die bezogene Energie ermittelt und miteinander verglichen wird. Zur Definition und Ermittlung der Energiewerte aus Strom-, Spannungs- und Leistungsdaten sei beispielsweise auf [Kories and Schmidt-Walter, 2004] verwiesen.

## 2.2.1 Besondere Eigenschaften und stochastische Aspekte des Messverfahrens

Eine Energieeffizienzeinrichtung, die den gesamten Verbrauch eines Unternehmens beeinflusst und die zudem aktiv zu jedem Zeitpunkt gesteuert werden kann, ist bei der Analyse und Bestimmung von Energieeinsparungsmessungen mehr die Ausnahme als die Regel. Bei Jiříčka and Mezera [2015] wurde das Prinzip bereits beschrieben. Der Aufbau und die Möglichkeit der aktiven Steuerung der Energieeffizienzeinrichtung erleichtern die Ermittlung der Einsparung erheblich. Es kann damit direkt auf die in der Literatur und Normung vorgeschlagenen Vergleichsmessungen, wie sie in der Norm und Messbeschreibungen in [ISO17741, 2006] und [ASHRAE, 2002] zu finden sind, auf einfache Weise zurückgeführt werden.

### Eigenschaften der Zeitreihen a und b

Aufwendige Modelle, die Trends, Dynamik, Periodizitäten und beispielsweise saisonale Effekte berücksichtigen, sind unter bestimmten statistischen Bedingungen vernachlässigbar bzw. durch die angepasste Formen der Datenanalyse bereits impliziert. Hierzu müssen die Zeitreihen im zu- und ausgeschalteten Zustand (in der Literatur als pre-retrofit und post-retrofit, vgl. [Heo and Zavala, 2012] bezeichnet) untersucht und deren Eigenschaften mit Hilfe statistischer Methoden verifiziert werden. Bei kurzen Intervallen (typischerweise im Bereich von Minuten), die über einen langen Zeitraum aufgezeichnet wurden (typischerweise Tage, Wochen, Monate) steht dabei zu erwarten, dass beide Zeitreihen stark miteinander korrelieren. Vor allem dann, wenn Tages-, Monats- oder gar Jahresaufzeichnungen, die deutlich länger als die betrachteten einzelnen Intervalle (z.B. 5-Minuten wie hier vorgeschlagen) analysiert werden.

Zeichnet man die Energiedichten der beiden Intervalle a und b ohne Zuschalten der Energieeffizienzeinrichtung in einem rechtwinkligen Koordinatensystem auf, so muss sich bei der gemachten Annahme eine ideale Gerade mit Steigung eins ergeben. In Abbildung 2.2 ist diese Darstellung gezeigt. Darin ist eine deutliche Abhängigkeit der Energiedichte der aufeinanderfolgenden Intervalle a und b mit gleichgroßen korrespondierenden Energiedichten zu beobachten. Die Diagonale im Bild zeigt den idealen Zustand, entsprechend der Annahme und wenn jeweils aufeinanderfolgende Intervalle a und b die exakt gleiche Energiedichten aufweisen würden. Bei der Annahme der Livarsa GmbH ergäbe sich für jedes Wertepaar a/b ein Punkt auf der Diagonalen. Da zusätzlich noch die Annahme getroffen wurde, dass die Energiedichte über den Betrachtungszeitraum konstant sei, ergäbe sich sogar nur ein Punkt, der der mittleren Energie entspräche. Wie sich zeigen wird, ist dies nicht so, jedoch ohne das sich daraus Einschränkungen für das Messverfahren und dessen Aussagekraft ergeben.

---

trischen Antrieben beispielsweise, würde sich bei konstanter Wellenleistung und reduzierter Spannung der Strom entsprechend erhöhen. Dies könnte auch zu größeren Verlustleistungen entsprechend  $P_V = R \cdot I^2$  führen.

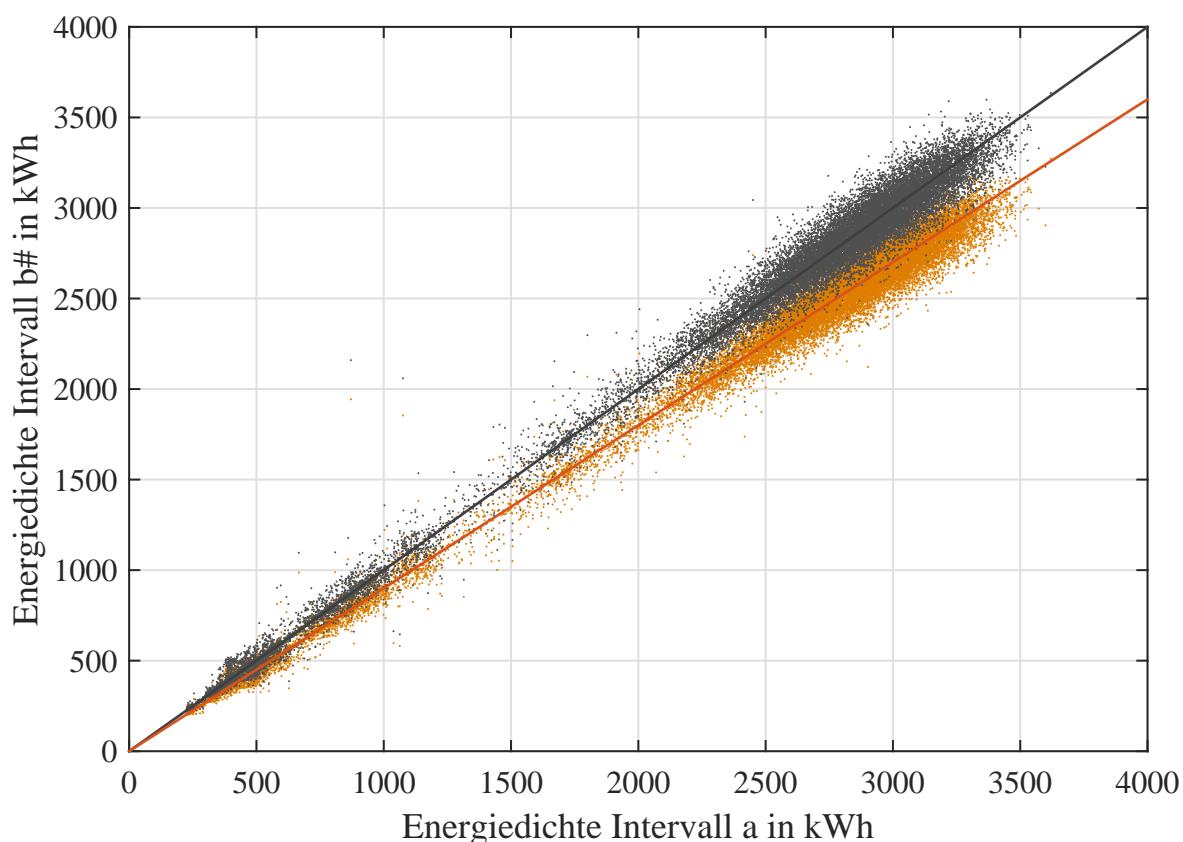


Abbildung 2.2: Messwertreihe der zufälligen 5-Minuten-Intervalle a und b aus den Messaufzeichnungen 14119 über 12 Monate - Hersteller von Dreh- und Verzahnungsteilen

### Korrelationsfunktion und Invarianz des Korrelationskoeffizienten gegenüber multiplikativen Skalierungen (Puente León and Kiencke [2012])

Zwei Zufallsvariablen  $a$  und  $b$  sind unkorreliert, wenn für deren Erwartungswerte gilt:

$$E\{ab\} = E\{a\} \cdot E\{b\} \text{ bzw. } C_{ab} = 0 \quad (2.1)$$

Hierbei sind  $E\{\cdot\}$  ein Erwartungswert, wie z.B. der Mittelwert und  $C$  die Kovarianz. Die stochastische Unabhängigkeit schließt immer die Unkorreliertheit mit ein. Die Umkehrung gilt nur, falls beide Zufallsvariablen normalverteilt sind, da hier die höheren Momente der Statistik 1. Ordnung nur vom ersten und zweiten Moment abhängig sind. In allen anderen Fällen können zwei Zufallsvariablen zwar unkorreliert, aber stochastisch abhängig sein.

Für die Beurteilung der stochastischen Abhängigkeit ist die Kovarianz  $C_{ab}$  als Vergleichsmaß nicht beim vorliegenden Messverfahren geeignet. Mit ihr ist zwar eine Aussage über die lineare Abhängigkeit möglich, nicht aber, wenn entgegen der Annahme unterschiedliche Energiedichten innerhalb der beiden Messreihen vorhanden sind. Dies ist beim Zuschalten der Energieeffizienzeinrichtung jedoch der Fall. Die Messwerte der zweiten Reihe werden durch die zu erwartende Energieeinsparung skaliert und verändern somit auch die Kovarianz, die damit ihre Aussagekraft verliert.

Bei der Betrachtung der vorliegenden Messreihen (ohne Zuschaltung) spielt dies keine Rolle, da beide Reihen identische Energiedichten voraussetzen. Doch schon bei der Simulation einer Einsparung (Abbildung 2.2 orange Punktwolke, mit simulierten 10% Einsparung) könnte der Kovarianzwert nicht mehr als Vergleichsmaß herangezogen werden. Dies gilt auch dann, wenn die mittlere Leistung einer der beiden Intervall-Serien reduziert wird.

Daher wird für diese Betrachtungen der Korrelationskoeffizient entsprechend:

$$\rho_{ab} = \frac{C_{ab}}{\sigma_a \cdot \sigma_b} = \frac{E\{(a - \bar{a})(b - \bar{b})\}}{\sqrt{E\{(a - \bar{a})^2\} E\{(b - \bar{b})^2\}}} \leq \pm 1 \quad (2.2)$$

herangezogen. So bedeutet für  $\rho = 0$ , dass die zwei Zeitreihen unkorreliert, bzw. stochastisch unabhängige Prozesse sind. Bei einem Wert  $\rho = 1$  besteht zwischen den zwei Prozessen eine lineare Bindung, die in der Form einer Geraden entsprechend:

$$b = e_a \cdot a + x \quad (2.3)$$

dargestellt werden kann (Abbildung 2.2 - schwarze Linie). Der in Abbildung 2.2 ausgewertete Fall zeigt bei Betrachtung über 12 Monate einen Wert von  $\rho_{ab} = 0,9963$  und damit eine starke Abhängigkeit der Wertepaare  $[a_i, b_i]$ , wie sie auch in Abbildung 2.2 leicht erkennbar ist. Auch bei der orangefarbenen Punktwolke von Abbildung 2.2, die eine simulierte Energieeinsparung von 10% zeigt ist der Korrelationskoeffizient ebenfalls  $\rho_{ab} = 0,9963$ . Diese starke Abhängigkeit und die Invarianz gegenüber Skalierungen beider Messintervallreihen konnte bei allen Messaufzeichnungen nachgewiesen werden.

Eine für diese Untersuchung entscheidende Eigenschaft der Korrelationsfunktion ist die Invarianz gegenüber multiplikativen Skalierungen, wie sie auch durch eine reduzierte mittlere Leistung hervorgerufen wird (vgl. [Puente León and Kiencke, 2012], pg.122-126). Hieraus folgt, dass der Korrelationskoeffizient beider Messreihen in seinem Wert bei multiplikativer Änderung der Energiedichten erhalten bleibt. Für die weiteren Untersuchungen der Messintervalle wird diese Eigenschaft vorausgesetzt und bei Simulationen von Energieeinsparungen auch angewendet.

### Signalklasse und Leistungssignaleigenschaft

Die Messreihen werden aus diskreten Leistungs-Messaufzeichnungen, die im Minutentakt aufgezeichnet wurden extrahiert. Nach Definition des Messverfahrens, sind die zwei Messreihen  $a(t)$  und  $b(t)$  jeweils als Leistungssignale (vgl. hierzu [Puente León and Kiencke, 2012] Definition 6.23 pg. 259) aufzufassen. Entsprechend der in der Verfahrensbeschreibung gemachten Aussage handelt es sich bei den beiden Messreihen nicht um Energiesignale im wissenschaftlichen Sinne, da eine Konvergenz des Energiesignals entsprechend

$$\int_{-\infty}^{\infty} |a(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |b(t)|^2 dt = \infty \quad (2.4)$$

nicht existiert. Bei den Signalen handelt es sich jedoch um Energiedichten, die eine mittlere Leistung im jeweiligen Betrachtungszeitraum aufweisen. Daher existiert für beide Messreihen der Grenzwert:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} |a(t)|^2 dt < \infty \quad \text{und} \quad \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} |b(t)|^2 dt < \infty \quad (2.5)$$

und somit auch für alle Betrachtungsintervalle  $a_k(t) + b_k(t)$ , die miteinander verglichen werden. Es gilt

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} |a(t) + b(t)|^2 dt < \infty \quad (2.6)$$

Somit handelt es sich nicht nur bei beiden betrachteten Zeitreihen  $a(t)$  und  $b(t)$  um Leistungssignale, auch die Summe beider Intervalle  $a(t) + b(t)$  ist ebenfalls ein Leistungssignal.

Ferner wird angenommen, dass sich der Wert über die Messdauer nicht ändert. Hierbei ist die

Dauer zweier aufeinanderfolgender Messintervalle zu verstehen. Die Messwerte werden zeit-diskret aufgezeichnet<sup>2</sup> und zu Intervallen unterschiedlicher Dauer zusammengefasst - beim eingesetzten Messverfahren sind dies je zwei aufeinanderfolgende 5-Minuten-Intervalle, die zusammen eine Betrachtungsintervalldauer von 10-Minuten ergeben. In Abbildung 2.3 ist dieses Prinzip bildlich

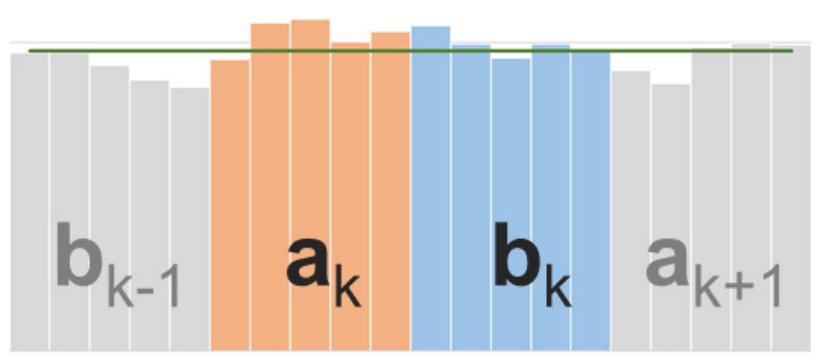


Abbildung 2.3: Diskrete Leistungsmessung und Intervall-Prinzip des Livarsa-Messverfahrens

dargestellt. Wie in [Puente León and Kiencke, 2012] bemerkt, lassen sich durch Messung (in der Korrelationsmesstechnik) immer nur Schätzwerte bestimmen.

## 2.2.2 Modellierung des Messverfahrens

Spiegelt man das Livarsa-Messverfahren an Bedingungen, die für stochastische Messverfahren angewandt werden, so erkennt man, dass es sich beim vorgestellten Verfahren um einen Vergleich zweier Funktionen mit angenommener Erhaltungstendenz (vgl. [Profos, 1997] pg.56) handelt. Im allgemeinen erwartet man, dass die Erhaltungstendenz einer Messreihe bei kleinen Zeitverschiebungen groß ist und bei größer werdenden Zeitverschiebungen entsprechend kleiner wird und abnimmt. Hier wird initial angenommen, dass die Energiedichte in jeweils zwei aufeinanderfolgender Intervalle sogar identisch ist. Durch die aufeinander folgenden Messintervalle und deren Vergleich auf Basis der Energiedichte, die sich je Intervall aus den aufgezeichneten Leistungsmessdaten nach:

$$E_{a_k} = \sum_{i=k}^n P_{a(i+k)}; E_{b_k} = \sum_{i=n+1}^m P_{b(i+n+1)}, \text{ mit } k-n, m-n+1 = \text{Messintervall in Minuten} \quad (2.7)$$

$$\Rightarrow E_k = E_{a_k} + E_{b_k}$$

ergeben, entstehen so zwei Zeitreihen, die nach Annahme sogar identisch sein sollen. Es gelte somit:

$$E_{a_k} = E_{b_k} \text{ und } E_a = E_b.$$

Im weiteren soll nun jeweils für die Dauer des zweiten Intervalls ( $b_k$ ) eine Energieeffizienzeinrichtung zugeschaltet werden. Angenommen wird, dass diese über die Intervalldauer  $n$  eine konstante Einsparung ermöglicht, es gelte

$$E_{a_k} > E'_{b_k} \text{ und } E_a > E'_b \Rightarrow e_b \cdot E_a = E'_b, \quad (2.8)$$

wobei  $e_b$  der von Livarsa verwendete Energieeffizienzfaktor ist. Der Faktor  $e_b$  wird im Folgenden auch dazu verwendet, einen stochastischen Prozess zwischen zwei Zeitintervallreihen zu bilden.

<sup>2</sup>Hinweis: Bei Referenzmessungen zum Nachweis der Energieeffizienzsteigerung wird im Sekundentakt, bei Langzeitmessungen im Minutentakt aufgezeichnet. Die zur Analyse und Bewertung verwendeten Messdaten lagen alle im Minutentakt vor.

Die Einsparung in Prozent ergibt sich nach

$$\eta_b = \frac{E_a - E_b}{E_a} \cdot 100 \text{ (in Prozent \%)} . \quad (2.9)$$

Aus den vorigen Gleichungen und der Definition des Messverfahrens kann dabei eines der Messintervalle, wir definieren hier ohne Beschränkung der Allgemeinheit das Intervall a als Referenzintervall, und die Folge der Intervalle a als Musterfunktion  $F_a$  aufgefasst werden. Die zu messende Funktion  $F_b$ , wird aus der Folge der Intervalle b definiert. Wie auch die Musterfunktion  $F_a$ , so kann auch die Funktion  $F_b$  der Messwerte als Musterfunktion für den gesamten Messprozess aufgefasst werden. Weiterhin wird entsprechend der Definition des Verfahrens die Grundgesamtheit der Messung in zwei gleichlange, gegeneinander und um die Intervalldauer verschobene Messreihen aufgeteilt. Die in Abbildung 2.1 dargestellte Intervallfolge bestehend aus abwechselnd A und B lässt sich somit wieder aus

$$F_{ab}(n) = \begin{cases} F_a(n) & , \text{ wenn } n \text{ ungerade} \\ F_b(n) & , \text{ wenn } n \text{ gerade} \end{cases} \text{ mit } n = 1, 2, \dots \quad (2.10)$$

rekonstruieren. Wobei im Folgenden  $F_a(n)$  und  $F_b(n)$  als Musterfunktionen für die Untersuchung der Hypothese herangezogen werden.

### 2.2.3 Ergodizität und Stationarität und deren Bedeutung für das Livarsa-Messverfahren

Die zwei Wertereihen  $F_a(n, i)$  und  $F_b(n, i)$ , wobei der Index  $i$  die Intervalldauer in Minuten wiedergibt, seien Musterfunktionen des selben stochastischen Prozesses, der sich aus dem Lastprofil eines Verbrauchers ergibt. Wie bereits erwähnt handelt es sich hierbei um Leistungssignale. Wenn der vorliegende stochastische Prozess ergodisch ist, also wenn Schar- und Zeitmittelwert übereinstimmen, dann sind an einer einzigen Funktion die Eigenschaften des Prozesses bestimmbar [Puente León and Kiencke, 2012]. In der Folge und unter Berücksichtigung der Eigenschaften für stark korrelierende Funktionen ist somit auch eine Quantifizierung der mittleren Leistungen möglich. Da nicht alle Schar- und Zeitmittelwerte einfach zu bestimmen sind wird zunächst angenommen und die Hypothese aufgestellt, dass es sich bei den Messreihen des Livarsa-Messverfahrens um einen ergodischen Prozess handelt. Für die unter Kapitel 2.1 gemachten Aussagen und die bildlich dargestellte Verfahrensweise (siehe Abbildung 2.1) ist leicht einsehbar, dass es sich um einen ergodischen Prozess handelt. Egal welchen Tag man betrachtet und ein darin beliebiges Intervall bestimmt, der mittlere Energiewert wird unabhängig ob Schar- oder Zeitmittelwert bestimmt würde entsprechend dem Beispiel jeweils  $30 \text{ kWh}$  betragen. Diese Vereinfachung vernachlässigt jedoch vollständig die Dynamik innerhalb eines Betrachtungszykluses. Bei Betrachtung der zahlreichen zeitlichen Verläufe an Lastprofilen (vgl. beispielhaft Abbildung 3.1) fällt einerseits auf, dass sich viele Muster wiederholen, andererseits ist aber auch leicht zu erkennen, dass die Energiedichten der Intervalle entgegen der Annahme nicht die gleichen Werte aufweisen. Daraus lässt sich schließen:

**Den Intervallfolgen (A, B) liegt kein ergodischer Zufallsprozess zugrunde.**

Im weiteren werden die Differenzen aufeinanderfolgender Messintervalle von beliebiger Länge/Dauer gebildet. Nach Annahme ist deren Differenz stets null, so dass gilt:

$$E_{diff} = \sum E_A - \sum E_B = 0 \quad (2.11)$$

Dieser Wert kann als Erwartungswert für beliebige Folgen bzw. Teilstücke aus den Messaufzeichnungen aufgefasst werden, der sich aus den Erwartungswerten der beiden Teilstücke für die Intervallfolgen  $E_A$  und  $E_B$  ergibt. Somit müssen auch der Mittelwerte  $\mu_A$  und  $\mu_B$  beider Messreihen

identisch sein. Daher gilt:

$$\overline{\sum E_A} - \overline{\sum E_B} = \mu_A - \mu_B = 0 \Rightarrow \mu_A = \mu_B \quad (2.12)$$

Wenn nun beide Erwartungswerte identisch sind, so gilt für das Verhältnis

$$\frac{\sum E_B}{\sum E_A} = \frac{\mu_B}{\mu_A} = 1 \quad (2.13)$$

beider Messreihen stets die Identität. Aus dieser einfachen Beziehung lässt sich nun ein Prozess angeben, dieser sei definiert durch:

$$M(a, i) = \frac{E(a + i, i)}{E(a, i)}, \quad (2.14)$$

wobei  $E$  die Energiewerte nach Gleichung 2.7 sind. Wenn die Hypothese stimmt, dann ist dieser Prozess auch unter anderem stationär und ergodisch. Daher wird angenommen, dass der Prozess - entsprechend seiner Definition - für beide Messreihen  $A$  und  $B$  stets den selben Mittelwert liefert und zwar für zeitlich direkt aufeinanderfolgende Intervalle, wie auch zu jedem beliebigen aber festen (Tages-)Zeitpunkt. Wenn der Prozess  $M(a, i)$  ergodisch ist, dann lässt sich auch die Stationarität von  $M(a, i)$  nachweisen. Im weiteren wird hierzu eine aus der Literatur bekannte Methode [S. Bendat and G. Piersol, 1989] angewendet.

## 2.2.4 Notwendige Bedingungen

Im Rahmen dieser Untersuchung wird nicht weiter auf das Verfahren und die Technologie der Energieeffizienzeinrichtung eingegangen. Der Fokus liegt ausschließlich auf der Untersuchung und Analyse des Messverfahrens.

Für die Untersuchung des Messverfahrens wird vorausgesetzt, dass die Schaltzeitpunkte der Energieeffizienzeinrichtung bekannt und kontrollierbar in Schaltzeitpunkt und Zuschaltdauer sind. Hierdurch muss gewährleistet sein, dass zwei Zeitreihen erzeugt werden, die den Bedingungen von Kapitel 2.2.1 genügen. Weiterhin wird angenommen, dass der Bypass-Switch ideal ist und somit bei eingeschaltetem Bypass die Messwerte vor ( $M_{in}$ ) und nach ( $M_{out}$ ) der Anlage identisch sind.

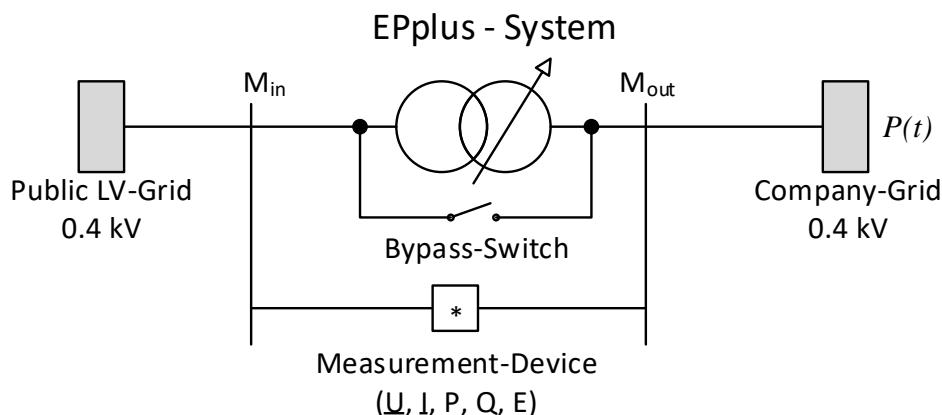


Abbildung 2.4: Schaltprinzip zur Untersuchung der Messdaten

Lfd.Nr.	Typ	Strom in A	Monate
1	Hersteller von Drehteilen	1250	17
2	Hersteller von Kunststoffspritzgussteilen	1400	8
3	Hersteller von Drehteilen	1400	8
4	Pharmaunternehmen	1400	6
5	Brauerei (Bier)	800	12
6	Spezialist für Antriebslösungen	500	7
7	Hersteller von Versandtaschen	1000	8
8	Hersteller diamantierter Oberflächen	1000	7
9	Restaurantbetrieb	400	12
10	Einzelhandel Einkaufsmarkt	320	12
11	Hersteller von Kalt- und Warmumformungsteilen	2500	12
12	Hersteller von Präzisionsteilen aus Kunststoff	2000	12
13	Hersteller von Drehteilen	1800	12
14	Medizintechnik	1250	12
15	Warenhaus	2500	12
16	Hersteller von Drehteilen	600	15
17	Hersteller von Drehteilen	600	12
18	Warenhaus Großhandel	1250	12
19	Hersteller von Dreh- und Frästeilen	2000	5
20	Warenhaus	1400	12
21	Hersteller von Dreh- und Verzahnungsteilen	1600	12
22	Testdaten	1400	1
23	Testdaten	1000	1

Tabelle 2.1: Liste aller verfügbaren Datensätze mit Aufzeichnungsdauern zwischen 5 und 17 Monaten

## 2.3 Umfang und Eigenschaften der Messaufzeichnungen

Von der Livarsa GmbH wurden zur Untersuchung des Messverfahrens umfangreiche Messdaten von insgesamt 23<sup>3</sup> unterschiedlichen Gewerbebetrieben unterschiedlichster Branchen zur Verfügung gestellt. Der Datenumfang umfasst 21 Unternehmensdatensätze mit unterschiedlich vielen Monatsaufzeichnungen, über einen Zeitraum zwischen 5 und 17 Monaten. Die Aufzeichnungen enthalten 225 Monatsdatensätze die im Minutentakt aufgezeichnet wurden. Die Liste aller verfügbaren Datensätze ist unter Angabe der Branche in Tabelle 2.1 dargestellt. Enthalten sind jeweils die folgenden Daten:

Spannungen:  $V_{L1-N}$ ;  $V_{L2-N}$ ;  $V_{L3-N}$

Ströme:  $A_{L1}$ ;  $A_{L2}$ ;  $A_{L3}$ ;

Wirkleistung:  $W_{tot}$

Scheinleistungen:  $VA_{L1}$ ;  $VA_{L2}$ ;  $VA_{L3}$ ;  $VA_{tot}$

Blindleistungen:  $VAR_{L1}$ ;  $VAR_{L2}$ ;  $VAR_{L3}$ ;  $VAR_{tot}$

Energie:  $Energy(kWh)$

Eine initiale Datenanalyse hat an einigen wenigen Stellen Diskontinuitäten gezeigt. Diese sind in Form von ausgebliebenen Messpunkten oder der Verdopplung von Messpunkten aufgetreten. Grundsätzlich können solche fehlerhaften Messaufzeichnungen Auswirkung auf die statistischen Eigenschaften der Messreihen haben. Eine, in diesem Bericht nicht weiter diskutierte, algorithmi-

<sup>3</sup>Zu Projektbeginn wurden zwei beispielhafte Datensätze mit je einer Aufzeichnungsdauer über einen Monat im Minutentakt bereitgestellt.

sche Analyse der Diskontinuitäten der verfügbaren Messreihen hat gezeigt, dass deren Ausprägung wenig Einfluss auf die statistischen Eigenschaften, wie beispielsweise Korrelationskoeffizient oder auch Mittelwert haben. Eine beispielhafte Tabelle der Messdaten findet sich im Anhang dieser Studie (vgl. Anhang B).

# Kapitel 3

## Untersuchungsmethode

Wie bereits Eingangs angemerkt (vgl. Kapitel 1.1) werden Energieeinsparungen nicht gemessen, sondern zwischen zwei bekannten Energiewerten [Akinsooto et al., 2014] berechnet. Jeder gemessene Energiebezug, ob als Lastprofil oder direkt gemessener Energie, enthält zunächst keine Information darüber, ob es sich hierbei um einen normalen oder reduzierten Verbrauch handelt. Erst in Relation zu bekannten Größen kann auf eine Einsparung geschlossen und auch eine solche identifiziert und quantifiziert werden. Zur Ermittlung einer Energieeinsparung gibt es verschiedene Methoden, die auf unterschiedlichen Ansätzen beruhen. Allen ist jedoch gemein, dass ein gemessener Wert mit einem bereits bekannten Wert verglichen wird. In der Literatur und vor allem auch in der Normung [ISO17741, 2006, ASHRAE, 2002] werden hierfür unterschiedliche Verfahren angegeben. So finden sich in bei ASHRAE [2002] vier Methoden, von denen auch drei in ähnlicher Weise in ISO17741 [2006] zu finden sind. Die Unterschiede der in ASHRAE [2002] aufgeführten Methoden sind in Akinsooto et al. [2014] untersucht und näher diskutiert worden. Die Ergebnisse und Diskussionsansätze in Akinsooto et al. [2014] und die Analysen in Heo and Zavala [2012] dienen als Basis für die Untersuchung des Livarsa-Messverfahrens.

### 3.1 Eigenschaften der verfügbaren Messdaten

Die Messdaten stehen als monatlich aufgezeichnete EXCEL-Dateien zur Verfügung, die Messaufzeichnungen liegen in minuteweisen Messpunkten vor.

Es sind zwei unterschiedliche Formate der Daten vorhanden, zum einen gibt es Aufzeichnungen mit über alle drei Phasen aufsummierten Leistungs- und Energiewerten und zum anderen phasenweise (L1, L2, L3) aufgezeichnete Leistungswerte, die zur Analyse zu einem gesamten Leistungswert aufaddiert wurden.

$$P_{ges}(t) = P_{L1}(t) + P_{L2}(t) + P_{L3}(t) \quad (3.1)$$

Für die Auswertung wurden die zeitlichen Datenreihen der Leistungen in Watt [ $W$ ], die jeweils als ganze Zahl aufgezeichnet sind mit der korrespondierenden Zeitinformation herangezogen. Zur Verifikation wurden die Leistungswerte mit den entsprechenden Energiewerten abgeglichen. Die Energiewerte liegen in Kilowattstunden [ $kWh$ ] vor.

#### 3.1.1 Datenfehler und Qualität der Messdaten

Die Messdaten sind nicht frei von Fehlern. Die Datensätze weisen teilweise Dopplungen und Lücken in den Aufzeichnungen auf. Diese sind jedoch so gering, dass sie bei der Analyse vernachlässigt wurden (vgl. auch 2.3). Eine Lücke und auch eine Doppelung in der Zeitachse kann zur Verfälschung maximal eines Messintervalls führen.

- **Doppelte Werte:** Durch Stichproben konnten typische Werte für doppelte Datensätze in der Größenordnung von einem Intervall auf 50.000 aufgezeichnete Intervalle festgestellt werden. Doppelte Werte waren in den initialen zwei Datensätzen (Unternehmen Nr. 8 und Nr. 22) nicht zu finden.
- **Datenlücken:** Durch Stichproben konnten bei einigen Datensätzen Datenlücken im Bereich von ein bis drei Prozent der Aufzeichnungsintervalle festgestellt werden. Dabei war die aufgetretene Aufzeichnungslücke bei zwei bis drei Messpunkten pro 10.000 Messaufzeichnungen größer als 2 Minuten. Wenn Datenlücken vorhanden waren, dann handelte es sich nur um einzelne Messwerte.

In der Folge wurden der Einfluss der Diskontinuitäten bei den Analysen vernachlässigt. Der Umgang bzw. deren algorithmische Behandlung ist zum Zeitpunkt der Berichterstellung nicht bekannt.

### 3.1.2 Erzeugung der Lastkurven aus den Messdaten

Die Messdaten liegen in aufeinanderfolgenden Monatsdateien vor, die zunächst für jeden Datensatz/Unternehmen zu einer Lastkurve zusammengefügt wurden. Die Zeitwerte werden hierzu als Abszisse und die Leistungswerte als Ordinate dargestellt. Die folgende Abbildung 3.1 zeigt das Beispiel einer Jahresaufzeichnung eines Betriebs zur Herstellung von Drehteilen (Nr. 21, 01.12.2017 00:00 - 01.12.2018 00:00)

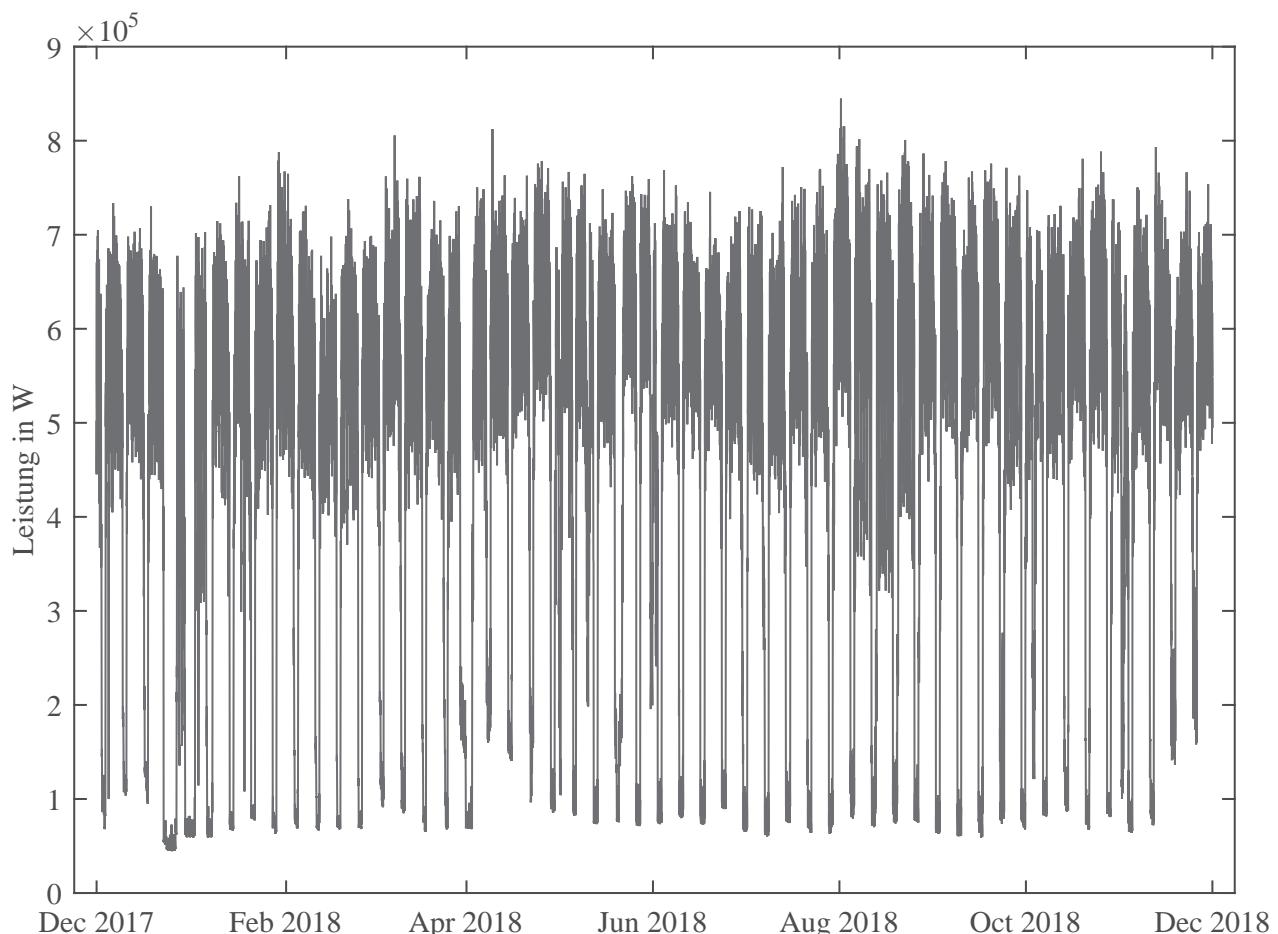


Abbildung 3.1: Beispiel einer Lastkurve eines Herstellers von Dreh- und Verzahnungsteilen über einen Zeitraum von 12 Monaten

Die Abbildung zeigt deutlich die Lastsprünge, die über 12 Monate auftreten. Es sind Minima und Maxima im Lastprofil auszumachen und auch Wiederholungsmuster zeigen sich im Verlauf. Bei genauer Betrachtung lassen sich täglich, wöchentliche und auch saisonal auftretende Muster erkennen. In Abbildung 5.3 ist der Verlauf zweier aufeinanderfolgender Arbeitstage dargestellt.

## 3.2 Methodenwahl

Wie einleitend in diesem Kapitel beschrieben, gibt es in der Literatur bereits einige Methoden mit denen Energieeinsparungen nachgewiesen und quantifiziert werden können. Mit der in Kapitel 2.2.4 beschriebenen notwendigen Voraussetzung für das von der Livarsa GmbH eingesetzten Verfahren entspricht dies der Vergleichsmethodik, wie sie unter anderem in [Heo and Zavala, 2012] oder [Kissock and Eger, 2008] und vor allem bei [Jiřička and Mezera, 2015] beschrieben ist, und im übrigen auch als wirksam nachgewiesen wurde. Vor allem zeigen die Untersuchungen bei Jiřička and Mezera [2015] unter vergleichbaren Bedingungen, dass mit der Möglichkeit einer steuerbaren Energieeffizienzeinrichtung<sup>1</sup>, sowie sie in Abbildung 2.4 dargestellt ist, aus den Lastprofilen die Einsparungen direkt ermittelt werden können. Gleichermaßen ergibt sich auch aus den Überlegungen in Kapitel 2, wenn die Eigenschaften entsprechend erfüllt sind.

### 3.2.1 Histogramme und Energiedichte aufeinanderfolgender Intervalle

Zur Beurteilung der Abweichungen und der Konfidenzintervalle der Varianzen werden die Abweichungen zu den Referenzintervallen in Prozent in Histogrammen dargestellt. Weiterhin wird damit die Hypothese überprüft, ob die Energiedichte aufeinanderfolgender Intervalle identisch ist. Der Erwartungswert entsprechend des Modells in Gleichung 2.13 ist eins, die um den Erwartungswert reduzierte Abweichung ergibt in diesem Fall null (vgl. Auswertungen in Anhang C).

### 3.2.2 Nachweis der Stationarität

Für den Nachweis der Stationarität wird der Algorithmus von [S. Bendat and G. Piersol, 1989] auf das statistische Modell entsprechend Gleichung 2.14 angewendet. Als stationär wird der Zufallsprozess  $M(a, i)$  entsprechend Gleichung 2.14 angenommen und die Messreihen bestehend aus den Energiedichten der Intervalle a und b dahingehend untersucht.

### 3.2.3 Unterschiedliche Intervalldauern

Die Intervalldauer wird nicht, wie von der Livarsa GmbH vorgeschlagen, auf einen festen Wert (5 Minuten) fixiert. Es werden stattdessen Intervalldauern von einer Minute bis zu einem Tag untersucht.

---

<sup>1</sup>Steuerbar ist in diesem Zusammenhang stets mit der Möglichkeit verbunden die Einrichtung elektrisch aus dem Netz zu nehmen bzw. durch einen Bypass-Schaltung diese zu umgehen.

# Kapitel 4

## Analyse vorhandener Messreihen

Basierend auf den in Kapitel 2.2 getroffenen Aussagen wurden die vorliegenden Messreihen untersucht. Zunächst wurden für jede Messreihe über den gesamten Aufzeichnungszeitraum die Energiedichten mit unterschiedlicher Länge berechnet und diese grafisch und statistisch ausgewertet. Zusätzlich wurden Tests auf Stationarität, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben durchgeführt (detaillierte Ergebnisse können dem Anhang C entnommen werden). Abschließend wurden für einzelne Messreihen Simulationen durchgeführt, die den Einfluß einer Energieeffizienzeinrichtung zeigen und das Verfahren entsprechend auf simulierte Messreihen anwenden.

### 4.1 Lastprofil, Energiedichten und Intervallunterschiede

In Abbildung 4.1 ist die initiale Auswertung, die für alle Messreihen durchgeführt wurde, dargestellt. Die obere Grafik zeigt im oberen Diagramm den Verlauf der Wirkleistungswerte aller Phasen entsprechend Gleichung 3.1. Die Auflösung beträgt, wie bei allen Messreihen eine Minute.

Links unten ist die mittlere bezogene Energie innerhalb unterschiedlich langer Intervalldauern, für jeweils die Intervalle a und b dargestellt. Nach Annahme und Voraussetzung muss der Energiewert linear mit Vergrößerung der Intervalldauer zunehmen. Dabei dürfen sich die beiden Verläufe von Intervall a und b nicht unterscheiden. Wie man sieht, trifft dies im Beispiel nicht für alle Intervalldauern zu. Unterhalb von 250 min. ist kaum ein Unterschied auszumachen. So zeigen sich jedoch im Bereich ab 500 min. deutliche Abweichungen zwischen den zwei Verläufen. Gerade im Bereich um 720min., also einem halben Tag, sind diese besonders auffällig. Bei Betrachtung der Lastprofile zeigt sich, dass dies die Unterschiede zwischen Tag- und Nachtbetrieb sind. Diese Unterschiede sind erwartungsgemäß größer.

Bei identischen Werten zwischen Intervall a und b ergibt sich auch ein identischer Erwartungswert  $\mu_a = \mu_b$  für beide Messreihen, so dass Gleichung 2.12 erfüllt ist. Rechts unten ist das prozentuale Verhältnis der mittleren bezogenen Energie beider Intervalle a und b dargestellt. Die Darstellung entspricht dem nach Gleichung 2.14 definierten Modell. Der Wert lässt sich für unterschiedliche Intervalldauern ( $i$  in der Modellgleichung) ablesen. Zur einfacheren Beurteilung sind für 3% und 6%-Abweichungen Hilfslinien hinzugefügt. Hierbei sind deutliche Abweichungen im Bereich von 700 min. zu erkennen. Dies entspricht ungefähr einem halben Tag und konnte bei allen Aufzeichnungen beobachtet werden. Wie auch zuvor, so zeigen sich unterhalb von 250 min. kaum Abweichungen, diese liegen alle deutlich unter 3% und konnten ebenfalls bei allen Messaufzeichnungen festgestellt werden. Im Beispiel in Abbildung 4.2 sind fünf Wochen inklusive einer Ferienwoche eines Betriebs zur Herstellung von Umformteilen gezeigt. Das Lastprofil zeigt deutliche Schwankungen innerhalb der Arbeitswoche von bis zu 100kW. Betrachtet man nun die Abweichungen entsprechend, so ergeben sich bis 15 min. Intervalldauer Abweichungen von unter  $\pm 0,2\%$ . Diese Größenordnung konnte bei allen Messreihen nachgewiesen werden.

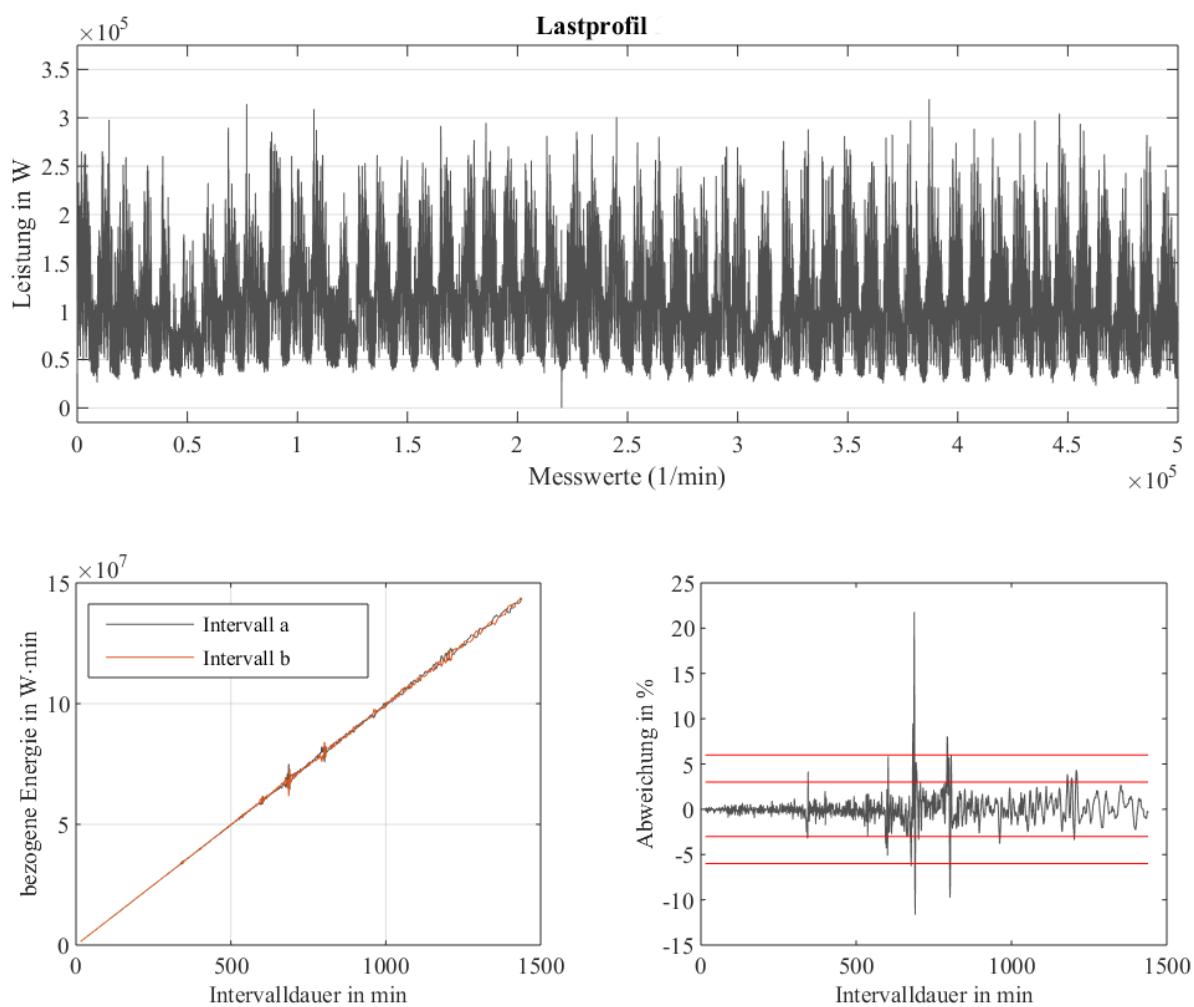


Abbildung 4.1: Auswertung der Abweichungen der Energiedichte bei unterschiedlichen Intervalldauern, hier von 1 min bis 24 Std. - Messreihe Nr. 5

## 4.2 Histogramme und Nachweis der Stationarität

Aus den ersten Auswertungen, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, waren schon grundlegende Eigenschaften der Messreihen bestimmbar geworden. Um weitere Aussagen zu den statistischen Eigenschaften treffen zu können, wurden zunächst die Verteilungsfunktionen der Intervallunterschiede bestimmt und diese Funktion im weiteren auf Stationarität untersucht. Die Untersuchungen mit Hilfe der Histogramme und den kumulativen Verteilungsdichtefunktionen wurde nur an den Messreihen mit 5-Minuten-Intervalldauern durchgeführt.

### 4.2.1 Histogramm-Analyse

Die Histogramm-Analyse erfolgte initial auf zwei unterschiedliche Arten:

1. Durch Differenzbildung der Energiedichten aufeinanderfolgender Intervalle  $E_{k_{diff}} = E_{a_k} - E_{b_k}$  entsprechend Gleichung 2.11 und wie in Abbildung 4.3a dargestellt.
2. entsprechend dem von der Livarsa GmbH eingesetzten Verfahren gemäß Gleichung 2.14. Ein Ergebnis ist in Abbildung 4.3b dargestellt.

Die in Abbildung 4.3 dargestellten Kurven entsprechen einer an die Messreihe angepassten Normalverteilung. Wie man dem Beispiel entnehmen kann, zeigen die subtraktiven Differenzen (Abb.

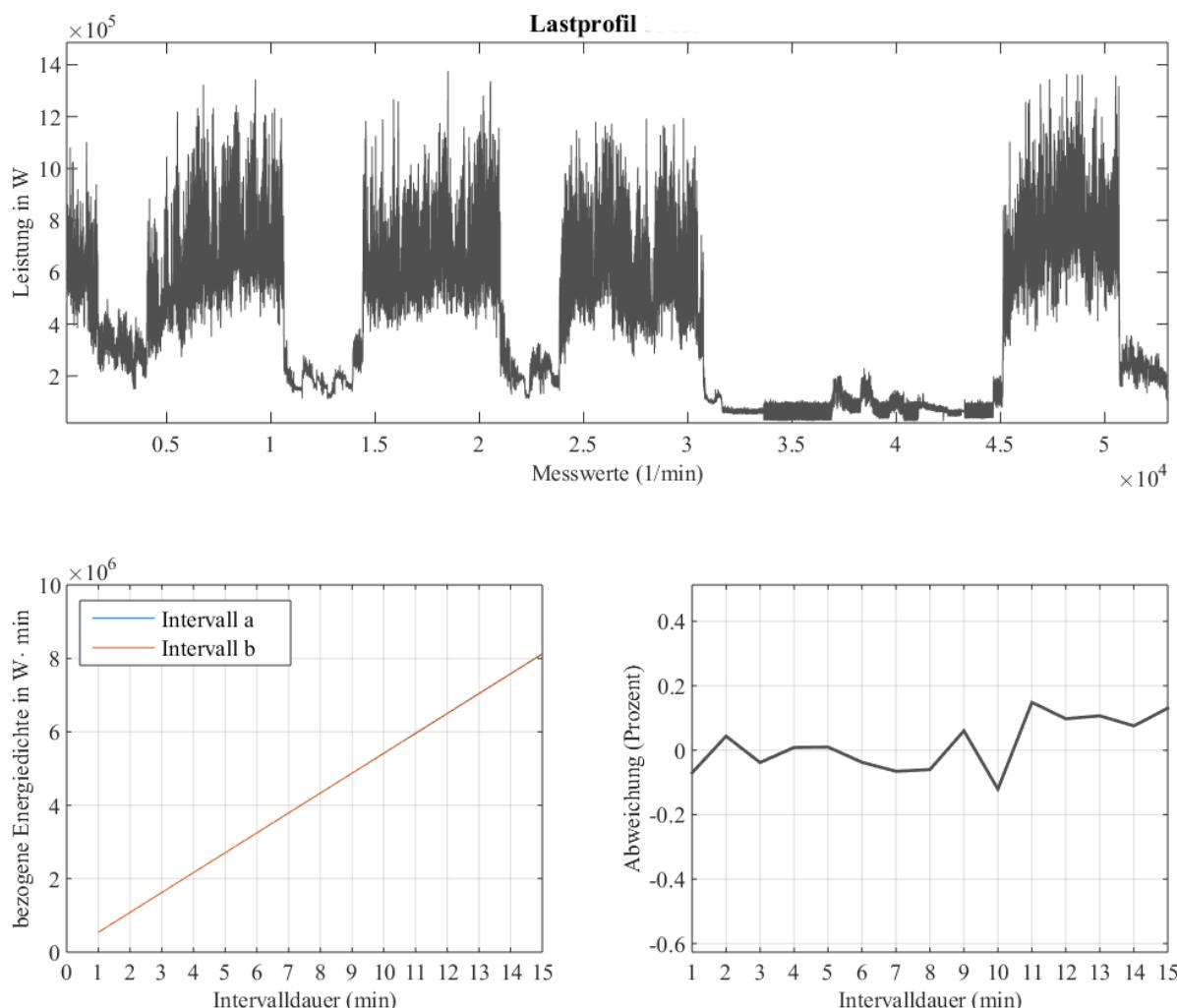


Abbildung 4.2: Auswertung der Abweichungen der Energiedichte bei unterschiedlichen Intervalldauern, hier von 1 min bis 15 min. - Messreihe Nr. 11

4.3a) eine nahezu perfekte Normalverteilung. Hingegen zeigen die nach dem Modell (entsprechend Gleichung 2.14) gebildeten Differenzen eine von der Normalverteilung abweichende Verteilungsfunktion<sup>1</sup>. Diese ist in der Literatur als q-Gaus-Verteilung (engl. q-gaussian distribution function, vgl. auch [Tsallis, 2009]) bekannt. Im Unterschied zur Normalverteilung zeigen diese Verteilungen eine geringere Streuung bei größerer relativer Häufigkeit um den Erwartungswert herum. Zu dessen Nachbildung muss die Verteilungsdichtefunktion der Normalverteilung um einen weiteren Parameter erweitert werden. Da diese Art der Modellierung für die Beurteilung des Messverfahrens keine entscheidende Bedeutung hat, wurde darauf bei der Analyse verzichtet. Für die Messwerte und das Messverfahren bedeutet dies, dass die Verteilungsdichtefunktion eine geringere Streuung als eine entsprechende Normalverteilung aufweist. Auf die Messreihen wurde nur die Histogramm-Analyse entsprechend Abbildung 4.3b durchgeführt.

### Kummulative Verteilungsdichtefunktion

Eine weitere Möglichkeit um auch die statistische Sicherheit direkt beurteilen zu können ist die Darstellung der Messwert in einer kumulativen Darstellung. Hierbei werden die Messwert aufsteigend sortiert und entsprechend ihrer Grundgesamtheit zwischen 0 und 1 dargestellt. Der Vor-

<sup>1</sup>Zur leichteren Beurteilung der Symmetrie der Verteilungsfunktion wurde der Erwartungswert  $\mu_a/\mu_b = 1$  subtrahiert

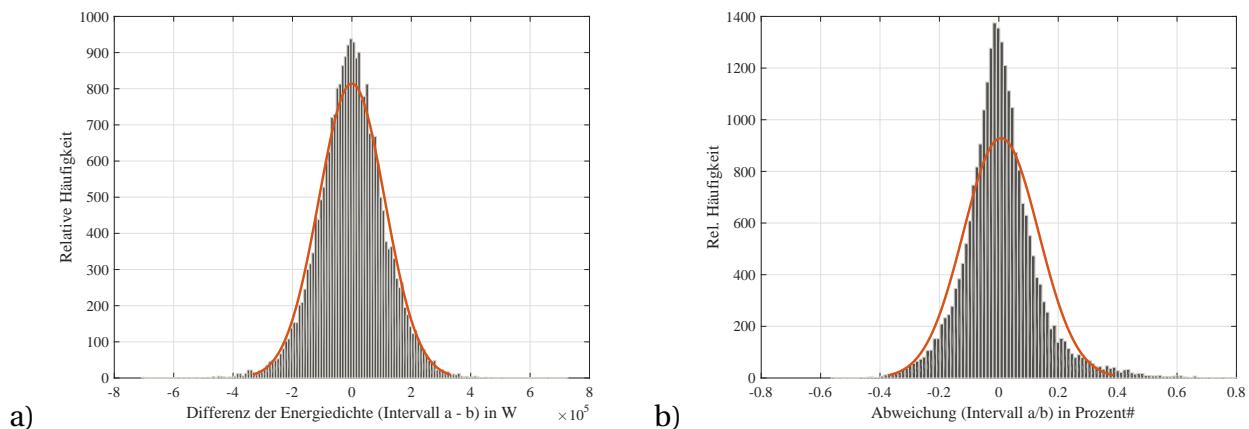


Abbildung 4.3: Histogramme der Differenz der Energiedichte a) und des relativen Energiedichte b) von 5 min. Intervallen - Datensatz Nr. 15

teil einer solchen Darstellung ist die Möglichkeit, die statistische Sicherheit für bestimmte Abweichungen direkt ablesen zu können. Diese Darstellung ist in ihrer Art stark mit der Histogrammdarstellung verwandt. Im Beispiel der Abbildung 4.4 sind die gleichen Werte wie in Abbildung 4.3b

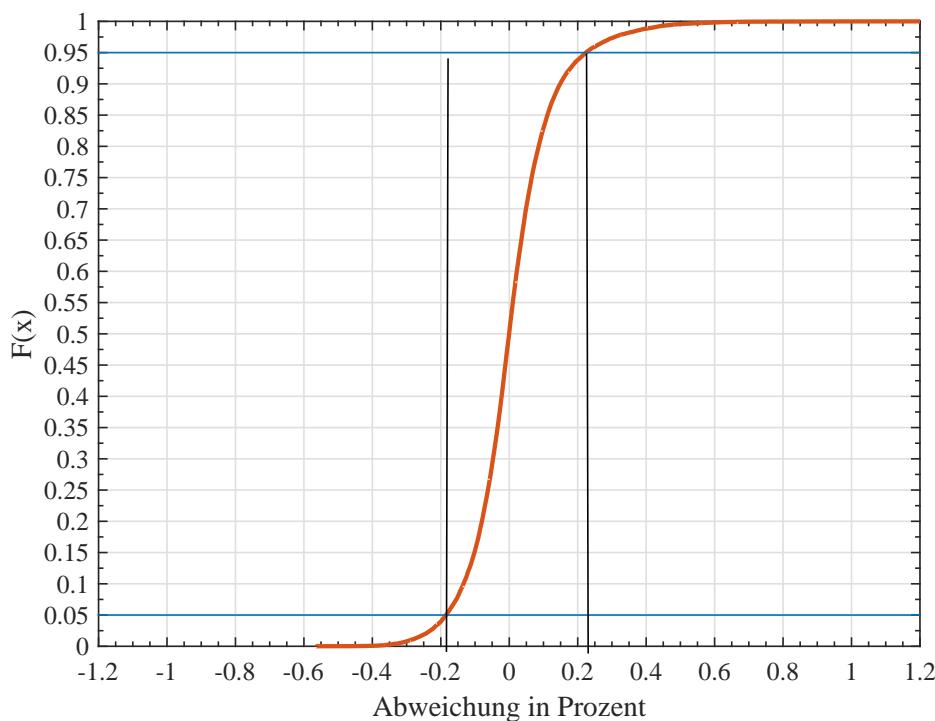


Abbildung 4.4: Kumulative Verteilungsdichtefunktion für die relativen Abweichungen der Energiedichte über 12 Monate - Datensatz Nr. 15

dargestellt. Im Unterschied zur Histogrammdarstellung kann der Wert für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert innerhalb eines Intervalls um den Erwartungswert herum liegt, direkt abgelesen werden. Im Beispiel ist das Wahrscheinlichkeitsintervall mit einer statistischen Sicherheit von 95% markiert. Man erkennt, dass 95% der Werte eine Abweichung vom Erwartungswert 0 von -0,19% bis +0,22% aufweisen.

#### 4.2.2 Nachweis der Stationarität

Um die Hypothese zu erhärten und abzusichern, wurden alle Messaufzeichnungen zusätzlich mit dem Verfahren von S. Bendat and G. Piersol [1989] auf Stationarität untersucht. Der Test wurde hierbei für Intervalldauern von 1 min. bis 24 Std. durchgeführt. Als Signifikanz-Niveau wurde ein Schwellwert von 95% gewählt. Neben der numerischen Auswertung erfolgte auch eine grafische Darstellung der Ergebnisse für unterschiedliche Intervalldauern. In Abbildung 4.5 ist das Ergebnis für den Datensatz Nr. 11 gezeigt. Im Anhang C sind alle Auswertungen enthalten.

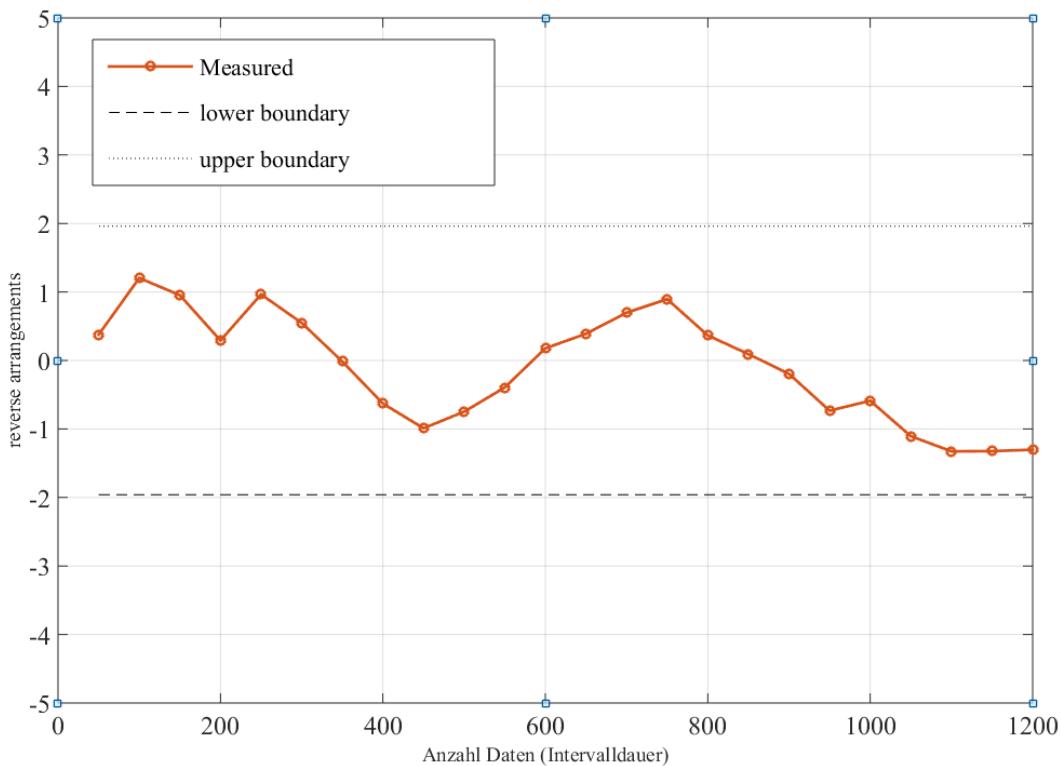


Abbildung 4.5: Testergebnis der Stationarität des Verhältnisses der Energiedichten bei unterschiedlichen Intervalldauern, hier von 1 min bis 15 min. - Datensatz Nr. 11

# Kapitel 5

## Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass das vorgeschlagene Messverfahren der Livarsa GmbH zur Energieeffizienzmessung eingesetzt werden kann. Mit dem Verfahren ist auch eine Quantifizierung der Energieeinsparung, unter Berücksichtigung der festgestellten Ungenauigkeiten, möglich. Die detaillierten Auswertungen zu den einzelnen Messreihen können, dem Anhang C entnommen werden.

### 5.1 Erwartungswert, Standardabweichung und Stationarität

Es wurden für alle Messreihen und jeweils für alle Tage die Verteilungsfunktion in kumulativer Darstellung ausgewertet. In Abbildung 5.1 ist die so entstandene Kurvenschar dargestellt. Es ist

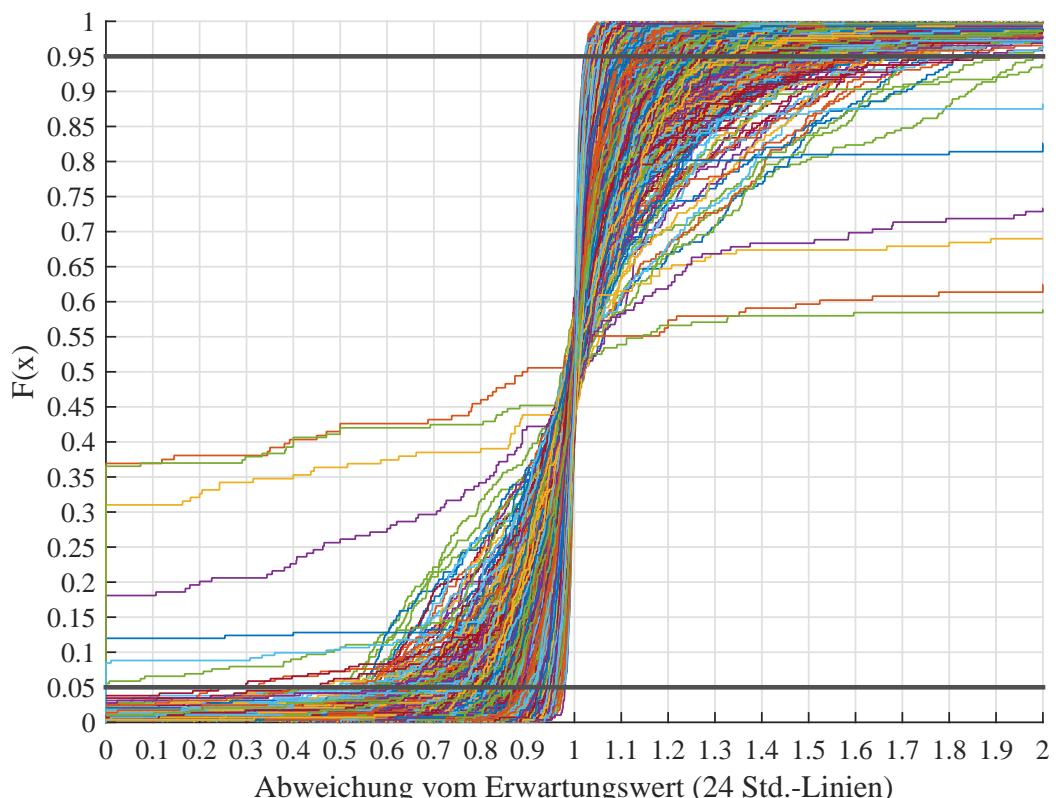


Abbildung 5.1: Kumulative Verteilungsfunktionen über alle Tage und Messaufzeichnungen bei einer Intervalldauer von 5 min. - alle Datensätze

deutlich zu erkennen, dass das Messverfahren der Livarsa GmbH, das entsprechend den Angaben modelliert wurde über alle verfügbaren Messreihen auch den erwarteten Mittelwert von eins, entsprechend der Modellierung nach Gleichung 2.14 für alle aufgezeichneten Tageswerte aufweist. Es wurde nachgewiesen, dass die Hypothese der Gleichheit der Erwartungswerte beider Intervalle a und b zutreffend ist (vgl. Gleichung 2.13). Wenngleich sich die Energiedichten aufeinanderfolgender Intervalle a und b nur gering unterscheiden und auch der Mittelwert beider Intervallreihen a und b identisch ist, so unterscheiden sich die Energiedichten je nach Lastzustand des Unternehmens erheblich - Schwankungen im Tagesverlauf von mehreren 100kW sind üblich. Dies führt, je nach Lastprofil, zu großen Streuungen bei gleichbleibendem Erwartungswert. Die Standardabweichung der einzelnen Tageswerte ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Man sieht, dass sich die-

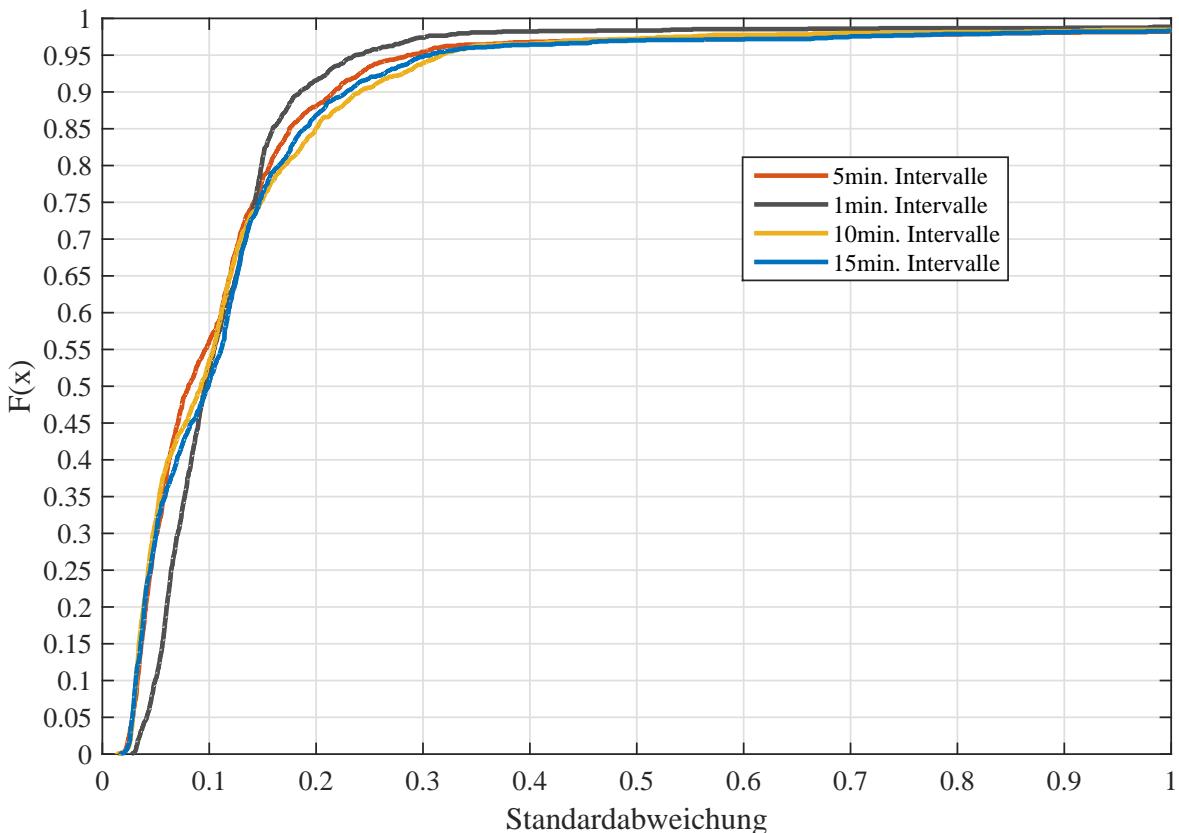


Abbildung 5.2: Kumulative Verteilungsfunktionen aller Standardabweichungen über alle Tage und Messaufzeichnungen Intervalldauern von 1, 5, 10 und 15 min. - alle Datensätze

se nur gering voneinander unterscheiden. In Tabelle 5.1 sind für die einzelnen Unternehmen die Konfidenz-Niveaus aufgelistet, die bei Betrachtung eines Monats gefunden wurden. Hierbei beschreibt der Konfidenz-Wert mit dem entsprechenden Konfidenzintervall (80%, 90% und 95%) die maximale Abweichung vom Erwartungswert in Prozent. So sind beispielsweise bei Betrieb Nr. 1 bei 90% aller Intervallunterschiede eines Monats die Abweichungen kleiner oder gleich  $\pm 1,362\%$  und bei 95%-Konfidenz beträgt der entsprechende Wert  $\pm 1,64\%$ . Wählt man spezielle Tage aus, die sehr konstante charakteristische Verläufe aufweisen, so lassen sich die Genauigkeiten noch deutlich verbessern und sogar in den Promille-Bereich reduzieren. Hierzu ist jedoch eine vorherige Analyse notwendig.

Grundsätzlich kann auf Basis der Ergebnisse angenommen werden, dass sich die Messintervall-Reihen nach dem Modell 2.14 stationär verhalten. Es wurden in keinem der Messintervall-Reihen periodische Signalanteile gefunden, die zu fehlerhaften und sich wiederholenden Abweichungen führen würden. In der Folge könnten periodische Signaleinteile im Bereich der Messintervalldauer derartige Abweichungen zu Messungenauigkeiten führen, die eine Quantifizierung der Einspa-

Nr.	Industrie Typ	80%	90%	95%
			Konfidenz-Intervall	
1	Hersteller von Drehteilen	1,05	1,362	1,64
2	Hersteller von Kunststoffspritzgussteilen	1,15	1,51	1,8
3	Hersteller von Drehteilen	1,8	2,38	2,9
4	Pharmaunternehmen	2,56	3,4	3,9
5	Brauerei	3,1	4,5	5,7
6	Spezialist von Antriebslösungen	1,5	2,67	4,4
7	Hersteller von Versandtaschen	1,29	1,78	2,36
8	Hersteller diamantierter Oberflächen	0,69	0,95	1,2
9	Restaurantbetrieb	2,5	3,29	3,97
10	Einkaufsmarkt	3,6	5,23	6,79
11	Hersteller von Kalt- und Warmumformungsteilen	2,826	4,121	5,361
12	Hersteller von Präzisionsteilen aus Kunststoff	1,086	1,538	1,98
13	Hersteller von Drehteilen	1,42	1,86	2,23
14	Medizintechnik	2,4	4,15	6,71
15	Warenhaus	0,914	1,375	1,825
16	Hersteller von Drehteilen	0,96	1,5	2,2
17	Hersteller von Drehteilen	1,3	2,2	3,56
18	Warenhaus-Großhandel	2,2	3,2	4,39
19	Hersteller von Dreh- und Frästeilen	1,19	1,75	2,68
20	Warenhaus	1,09	1,493	1,95
21	Hersteller von Dreh- und Verzahnungsteilen	0,82	1,16	1,49

Tabelle 5.1: Liste der Konfidenz-Niveaus in Prozent für einen Monat

nung verfälschen würden (das Ergebnis einer beispielhaften Simulation findet sich in Anhang F). Grundsätzlich gilt, dass je länger die Messung durchgeführt wird, desto mehr nimmt die statistische Sicherheit zu und entsprechend der statistische Fehler ab. Über die gesamte Dauer der Messaufzeichnungen liegen die Abweichungen der Mittelwerte der beiden Intervalle a und b unter einem Promille.

## 5.2 Simulation

Als Beispiel sind zwei Arbeitstage des Datensatzes Nr. 15 mit einer simulierten Einsparung von im Mittel 4,5% in Abbildung 5.3 dargestellt. Der Wert der Abweichung beträgt  $-4,22\%$  und entspricht damit dem um den positiven Fehler von  $0,28\%$  der mittleren Abweichung reduzierten Wert der Einsparung der zwei betrachteten Tage. Dieses Verhalten lässt sich bei allen Einsparungen im

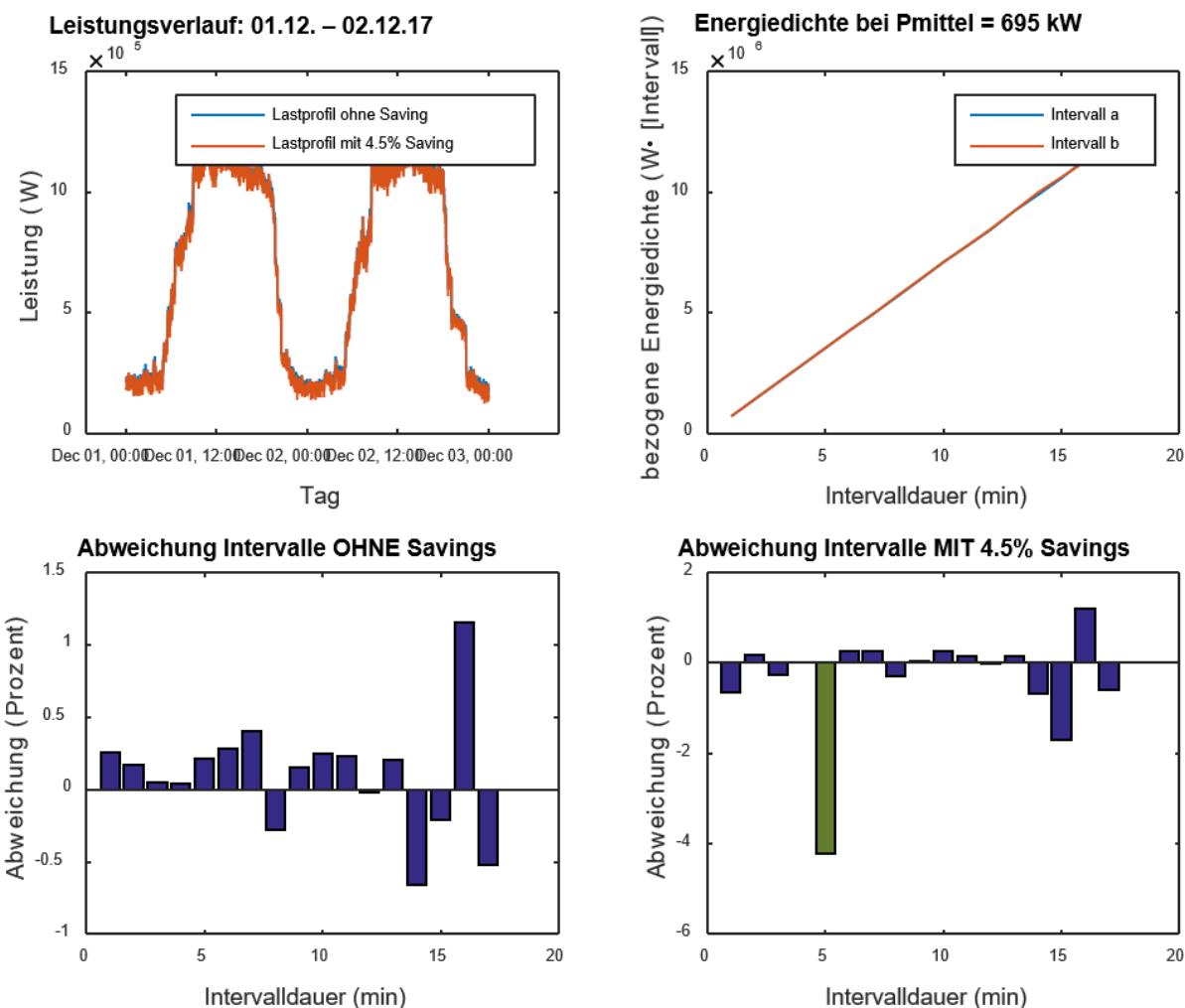


Abbildung 5.3: Simulation zwei Arbeitstage mit  $-4,5\%$  Savings - 1.-2.12.2017 bei Nr. 15

entsprechenden Intervall mit dem entsprechenden Niveau der Einsparung beobachten. Alle Vielfachen des Referenzintervalls zeigen ebenfalls einen reduzierten Anteil der Einsparung. Im Beispiel sind dies fünf Minuten und dazu die Intervalle 15, 25 usw. Im Anhang D sind hierzu Beispiele aufgeführt. Dieses Verhalten kann bei realen Messungen als Vergleichs- und Kontrollwert herangezogen werden. Bei definierten 5-Minuten-Intervallen korrespondiert die Einsparung im 15-Minuten-Intervall mit 50% des Wertes. Würde die Einsparung bei 5-Minuten-Intervallen also 10% betragen, so zeigt das 15-Minuten-Intervall eine Reduzierung von 5%.

### 5.3 Auswertung realer Messungen

Von der Livarsa GmbH wurden ebenfalls reale Messungen mit zugeschaltetem EPplus-System, die nach dem in Kapitel 2 beschriebenen Verfahren aufgezeichnet wurden, bereitgestellt. An einem Beispiel für die Messaufzeichnung des Betriebs mit der Nr. 6, ein Spezialist für Antriebslösungen, kann bei Auswertung entsprechend Abbildung 2.2 ein Korrelationskoeffizient von  $\rho_{ab} = 0,988$  ermittelt werden. Somit korrelieren beide Lastprofile stark miteinander. Die Mittelwerte der Leistungen unterscheiden sich erwartungsgemäß um einen signifikanten Betrag. Für die Intervallreihe  $a$  ergibt sich ein Mittelwert der Leistung von  $\mu_a = 26.112\text{kW}$  und für die bei eingeschalteter Energieeffizienzeinrichtung aufgezeichnete Intervallreihe  $b$  ein Wert von  $\mu_b = 24.853\text{kW}$ . Somit ergibt sich ein Verhältnis von

$$\frac{\mu_b}{\mu_a} = 0,9581,$$

was einer mittleren Reduzierung der Leistung und auch der Einsparung des Energieverbrauchs von 4,82% entspricht. Führt man über den Messwerten eine Regressionsanalyse mit linearem Modell aus, erhält man das in Abbildung 5.4 dargestellte Diagramm. Hierin zeigt die graue Linie das Regressionsmodell für den Referenzfall - es finden keine Schaltungen der Energieeffizienzeinrichtung statt. Die orangefarbene Linie zeigt hingegen das Modell für die aufgezeichnete Messreihe (Punktwolke) mit eingeschalteter Energieeffizienzeinrichtung. Wegen des linearen Zusammenhangs ist die Wahl eines linearen Modells entsprechend  $y = \beta_0 - \beta_1 \cdot x$  gerechtfertigt. Beide Regressionsfunk-

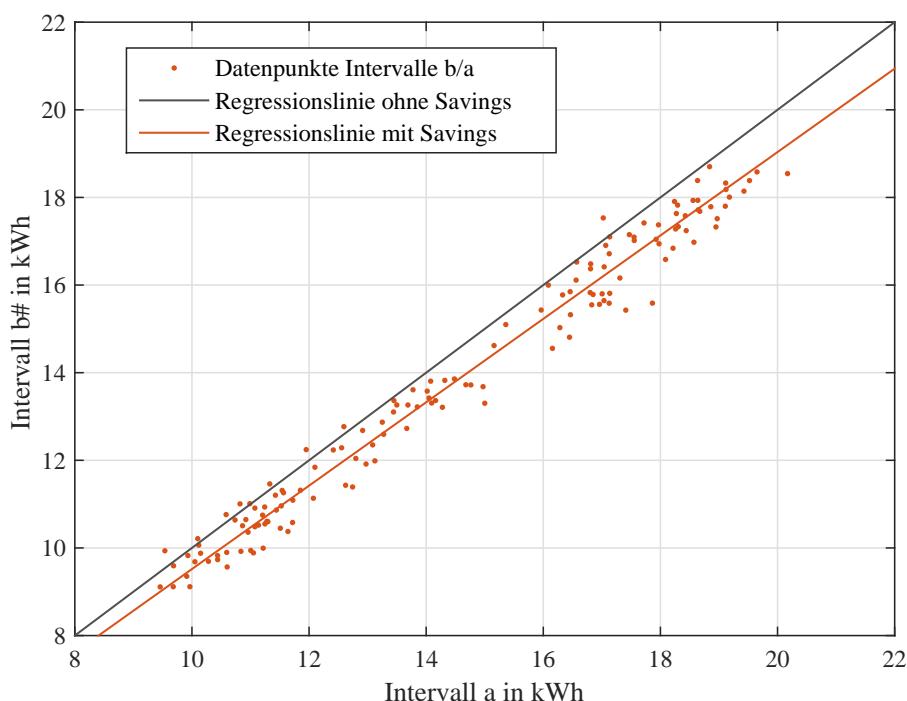


Abbildung 5.4: Reale 12-Stunden-Messung mit aktivem EPplus-System

tionen haben ihren Ursprung im Nullpunkt des Diagramms und unterscheiden sich nur in ihrer Steigung. Deren Verhältnis zueinander wiederum ist ebenfalls ein Indikator für die Einsparung und ergibt so einen Wert, entsprechend dem linearen Modell nach Gleichung 2.3, von 4,911%. Werden beide Messwertreihen mit ihren Leistungswerten zu Energiewerten kumuliert, so ergibt sich ebenfalls ein Wert für die Einsparung von 4,82%. Bei direkter Subtraktion der Energiewerte der Messreihen ohne Schaltzyklus-Korrektur erhält man eine Differenz von  $\sum E_a - \sum E_b = 100,75\text{kWh}$ , diese entspricht ebenfalls 4,82% des Referenzverbrauchs der Intervalle a (BYPASS-Betrieb). Man erhält somit die lineare Regressionsgerade für den SAVINGS-Fall entsprechend  $b = 0,951 \cdot a$ . Das

Bestimmtheitsmaß<sup>1</sup>  $R^2$ , weißt für diesen Fall ebenfalls einen hohen Wert von  $R^2 = 97,577\%$  auf. Für das korrigierte Bestimmtheitsmaß für lineare Regressionen durch den Ursprung, welche bei diesem Verfahren vorliegt, ergibt sich sogar ein noch höherer Wert von  $R_{korr}^2 = 99,892\%$  mit

$$R_{korr}^2 = 1 - \frac{\sum(b_i - \tilde{\beta}_1 \cdot a_i)^2}{\sum b_i^2}. \quad (5.1)$$

Damit lassen sich auch die Abweichungen zwischen Modell- und Messwerten erklären.

Die in Abbildung 5.5 dargestellten Messreihen zeigen einen deutlichen Unterschied im Lastprofil-Verlauf. Das Lastprofil zeigt dabei, entsprechend der Annahme aus Kapitel 2, dass innerhalb eines Messintervalls die Leistung konstant ist, den Verlauf der mittleren Leistungen der Messintervalle beider Reihen. Es ist leicht zu erkennen, dass sich die beiden Messreihen unterscheiden und die Messreihe der Intervalle b mit eingeschaltetem EPplus-System überwiegend unterhalb der Messreihe der Intervalle a verläuft. Beide Messreihen zeigen aber auch sehr ähnliche Tendenzen im Verlauf, was für den hohen Korrelationskoeffizienten spricht und diesen erklärt. Somit sind die Messungen erwartungsgemäß, eine Reduzierung des Energieverbrauchs ist nachweisbar.

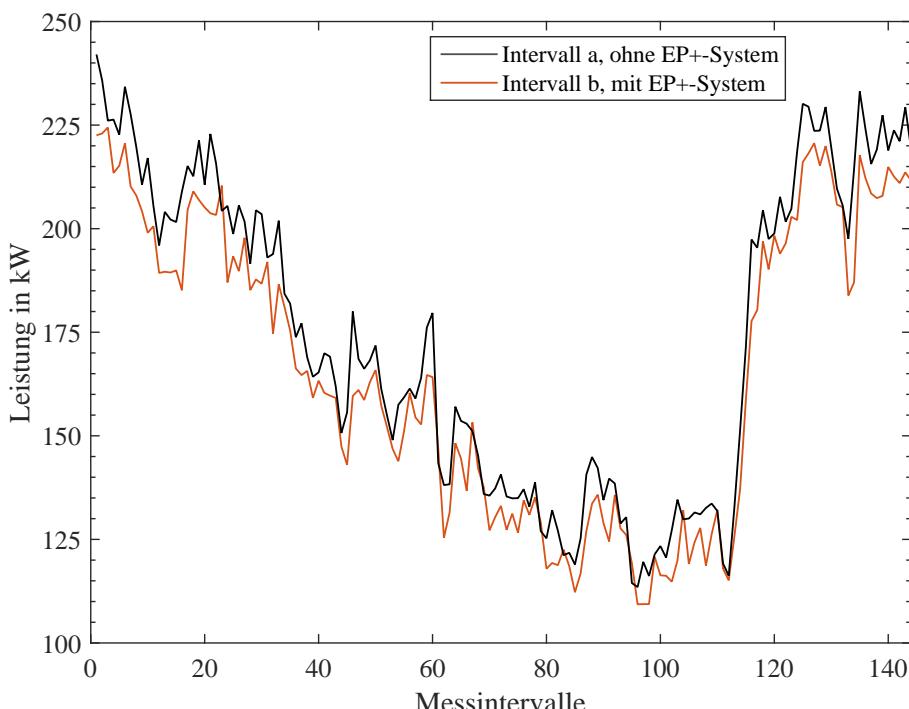


Abbildung 5.5: Lastprofil der 12-Stunden-Messung mit aktivem EPplus-System

<sup>1</sup>Das Bestimmtheitsmaß gibt hier an, wie viel Streuung in den vorliegenden Daten durch das eingesetzte lineare Modell, welches durch den Ursprung verläuft, erklärt werden können.

# Kapitel 6

## Zusammenfassung

- Die Annahme, dass aufeinanderfolgende (5 min.) Intervalle im Mittel die gleiche Energie-dichte aufweisen konnte bestätigt werden. Es fanden sich keine Trends oder Periodizitäten in den Abweichungen, die zu signifikanten Abweichungen bei den Erwartungswerten führten.
- Das Verfahren ist grundsätzlich geeignet eine Reduzierung des Energieverbrauchs nachzuweisen und zu quantifizieren. Je mehr Messwerte die Analysen umfassen, desto geringer wird der Fehler.
- Bei einer zu erwartenden Einsparung von 3 – 6% kann bei zu kurzen Messdauern der Fehler im Bereich der Einsparung oder sogar darüber liegen. Gegebenenfalls ist die Messdauer entsprechend zu verlängern und/oder die durch Wiederholung zu verbessern. Eine lineare Regression kann zur Absicherung und Kontrolle der Ergebnisse vorteilhaft eingesetzt werden.
- Periodische Signale, die eine Periodendauer im Bereich der Messintervalldauer aufweisen führen zur Verfälschung des Ergebnisses. In keiner der untersuchten Messreihen konnten solche periodischen Signalanteile nachgewiesen werden. In Anhang F ist in einer Simulation gezeigt, wie sich diese auf die Messintervallanalyse auswirken.

### Verbesserungsmöglichkeiten:

- Ein Vorteil wäre der Einsatz von variierenden Intervalldauern. Dadurch würde sich eine bessere Streuung der Abweichungen ergeben und sich somit die Genauigkeit tendenziell verbessern lassen.
- Um bei Messungen den relativen Fehler besser quantifizieren zu können, wäre eine Interpolation zweier aufeinanderfolgender Intervalle  $a_i$  und  $a_{i+1}$  hilfreich, um damit den Erwartungswert für das Intervall  $b_i$  ohne Savings zu berechnen und somit eine Aussage über die zu erwartende Unsicherheit des Einsparungswertes treffen zu können.
- Um die Genauigkeit weiter zu erhöhen, können auch offensichtliche Fehlmessungen aus den berücksichtigten Datensätzen entfernt werden. Dies kann durch Verwendung eines Schwellwertes geschehen.
- Der grundsätzliche Einsatz eines Fehlerminimierungs-Verfahrens wie beispielsweise die Methode der kleinsten Quadrate bei linearer Funktion kann die Quantisierung des Energieeinsparungswertes verbessern.

# Kapitel 7

## Kurzform (Artikel): Ein Messverfahren für zentrale Energieeffizienzeinrichtungen

Bei zentral installierten Energieeffizienzeinrichtungen stellt sich immer wieder die Frage nach einem verlässlichen Messverfahren zur Bestimmung der erreichten Einsparung nach Installation der Anlage. Häufig liegen die zu erwartenden Einsparungen von zentral installierten Anlagen bei nur wenigen Prozent. So liegen typische Werte im Bereich 3 – 8% und sind je nach Dynamik der Lastprofile industrieller Verbraucher geringer als die Schwankungsbreite der Energieverbräuche. Beobachtet man die Lastprofile über Tage, Wochen und Monate hinweg, so kann man feststellen, dass die Schwankungen von bestimmten Wochentagen, saisonalen Effekten, Ferienzeiten, Jahreszeiten und weiteren Faktoren abhängen. Diese Schwankungen führen bei Langzeitmessungen zu Abweichungen, die sich auf die Genauigkeit und damit auch auf die Aussagekraft der Einsparungswerte auswirken. Mit dem vorgestellten Messverfahren ist es möglich, selbst gering Einsparungen nachzuweisen und auch zu quantifizieren.

### 7.1 Vergleichende Intervallmessung

Die Messung der Einsparung erfolgt im direkten Vergleich aufeinanderfolgender Messintervalle gleicher Aufzeichnungsdauer (z.B. 5min.), die über einen ausreichend langen Zeitraum (z.B. 72 Std.) erfasst werden. Hierbei wird jeweils für ein Messintervall die Anlage zu und dann wieder abgeschaltet. Dadurch entstehen zwei Zeitreihen des gleichen Verbrauchers, einmal ohne und einmal mit Zuschaltung der Anlage. Die Energiedichten aufeinanderfolgender Intervalle ohne Energieeffizienzeinrichtung unterscheiden sich dabei nur gering, so dass beide Messreihen stark miteinander korrelieren. Wird nun eine Energieeinsparung durch den Einsatz einer Energieeffizienzeinrichtung erzielt, so kann diese über die Energiedichte der aufeinanderfolgenden Intervalle nachgewiesen und quantifiziert werden.

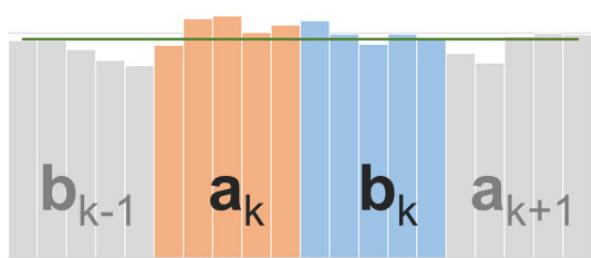


Abbildung 7.1: Diskrete Leistungsmessung und Intervall-Prinzip des Livarsa-Messverfahrens

## 7.2 Hardware und Messwerterfassung

Um eine derartige Messung durchführen zu können, bedarf es eines steuerbaren BYPASS-Schalters (siehe Abbildung 2), der entsprechend der gewählten Intervalldauer gesteuert wird. Zusätzlich wird eine Leistungsmesser oder Energiezähler benötigt. Die Messwerte werden für die gewählte Intervalldauer aufgezeichnet und danach der Bypass-Schaltvorgang initiiert und für die gleiche Zeitdauer nochmals eine zweite Messung durchgeführt.

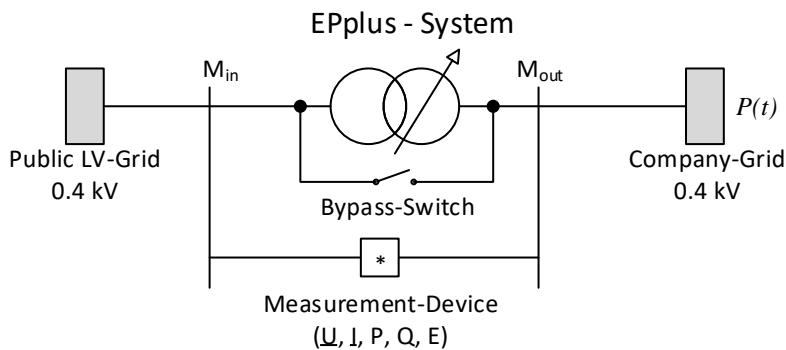


Abbildung 7.2: Schaltprinzip zur Untersuchung der Messdaten

## 7.3 Quantifizierung der Einsparungen

Wird durch Einsatz der Anlage eine Einsparung erreicht, so zeigen sich im Lastprofil der Messreihe mit und ohne zugeschalteter Anlage unterschiedliche Verläufe der Lastprofile und Energieverbräuche. Die Differenz beider Verläufe zeigt die Einsparung. Modelliert man nun die Einsparung durch eine lineare Regression und berechnet deren Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ), so kann sogar ein Fehlertoleranzwert angegeben werden.

## 7.4 Zusammenfassung

Das Messverfahren wurde in umfangreichen Simulationen und Analysen von mehr als 200 Monatsaufzeichnungen unterschiedlicher Unternehmen getestet und auch auf theoretischer Basis untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass sich, selbst bei großer Dynamik im Lastprofil, Einsparungen quantifizieren und nachweisen lassen. Im Beispiel (Abbildung 3) zeigen die orange Linie den Fall ohne Energieeffizienzeinrichtung und keiner Einsparung und die blaue Linie bei Zuschaltung mit einer Einsparung von 4,91% bei einer statistischen Sicherheit von 97,6%.

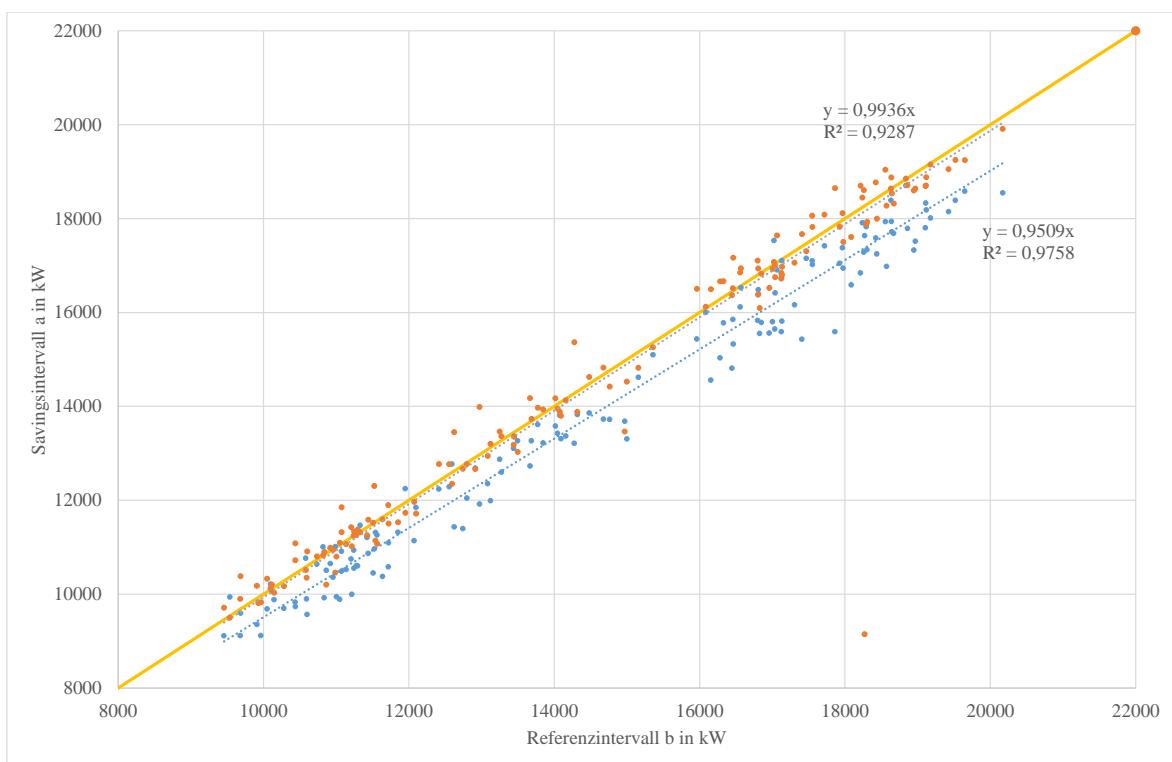


Abbildung 7.3: Auswertung einer Beispieldmessung

# Literaturverzeichnis

- O. Akinsooto, D. de Canha, and J. H. C. Pretorius. Energy savings reporting and uncertainty in measurement amp; verification. In *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pages 1–5, Sep. 2014. doi: 10.1109/AUPEC.2014.6966529.
- ASHRAE. *ASHRAE Guideline 14: Measurement of Energy and Demand Savings*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., ASHRAE Customer Service, 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329-2305, 2002.
- Y. Heo and V. M. Zavala. Gaussian process modeling for measurement and verification of building energy savings. *Energy and Buildings*, 53:7 – 18, 2012. ISSN 0378-7788. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.024>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881200312X>.
- ISO17741. *ISO 17741:2006: General technical rules for measurement, calculation and verification of energy savings of projects*. pub-ISO, pub-ISO:adr, 2006.
- J. Jiřička and D. Mezera. Electric power savers - operating measurements of practical installations. In *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, pages 331–334, May 2015. doi: 10.1109/EPE.2015.7161085.
- J. K. Kissock and C. Eger. Measuring industrial energy savings. *Applied Energy*, 85(5):347 – 361, 2008. ISSN 0306-2619. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.06.020>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261907001195>.
- R. R. Kories and H. Schmidt-Walter. *Taschenbuch der Elektrotechnik - Grundlagen und Elektronik*. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 6. aufl. edition, 2004. ISBN 3-8171-1734-5.
- Livarsa. Das EPplus-System, Technische Kurzbeschreibung, 2019. URL <https://www.livarsa.ch/wp-content/uploads/>.
- P. H. Profos, editor. *Grundlagen der Meßtechnik: mit 46 Tabellen*. Oldenbourg, München ; Wien, 5., überarb. aufl. edition, 1997. ISBN 978-3-486-24148-8.
- F. Puente León and U. Kiencke. *Messtechnik*. Springer, Berlin, Heidelberg, Berlin AND Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-30073-8. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30074-5>.
- J. S. Bendat and A. G. Piersol. *Random Data - Analysis And Measurement Procedures*. Wiley, 4th edition, 1989. ISBN 978-0-470-24877-5.
- C. Tsallis. Nonadditive entropy and nonextensive statistical mechanics-an overview after 20 years. *Braz. J. Phys.* 39, 2009.

# **Anhang A**

## **Projektpartner und Kontakte**

### **A.1 Auftraggeber**

#### **LIVARSA GmbH Deutschland**

Mario Ditella  
Grün 1  
D-77736 Zell am Harmersbach  
Telefon: +49 (0) 7835 634 37 92  
E-Mail: mario.ditella@livarsa.de

LIVARSA GmbH  
Salvi Donato  
Leuzigenstrasse 22  
CH-2540 Grenchen  
Telefon: +41 (0) 32 517 95 05  
salvi.donato@livarsa.ch

### **A.2 Projektleitung / Auftragnehmer**

#### **Hochschule Offenburg**

Prof. Dr.-Ing. Jörg Bausch, Fakultät M+V  
Badstraße 24  
77652 Offenburg  
Tel.: +49 (0)781 205-4827  
FAX: +49 (0)781 205-45 4827  
Email: joerg.bausch@hs-offenburg.de

### **A.3 Förderer/Partner**

**innoEFF - Innovations- und Effizienzcluster**  
c/o Klimapartner Oberrhein  
Dr. Fabian Burggraf  
Hanferstr. 6  
79108 Freiburg im Breisgau  
Telefon: 0761/151098-21  
E-Mail: fabian.burggraf@klimaschutz-oberrhein.de

## **Anhang B**

### **Datenaufzeichnungen**

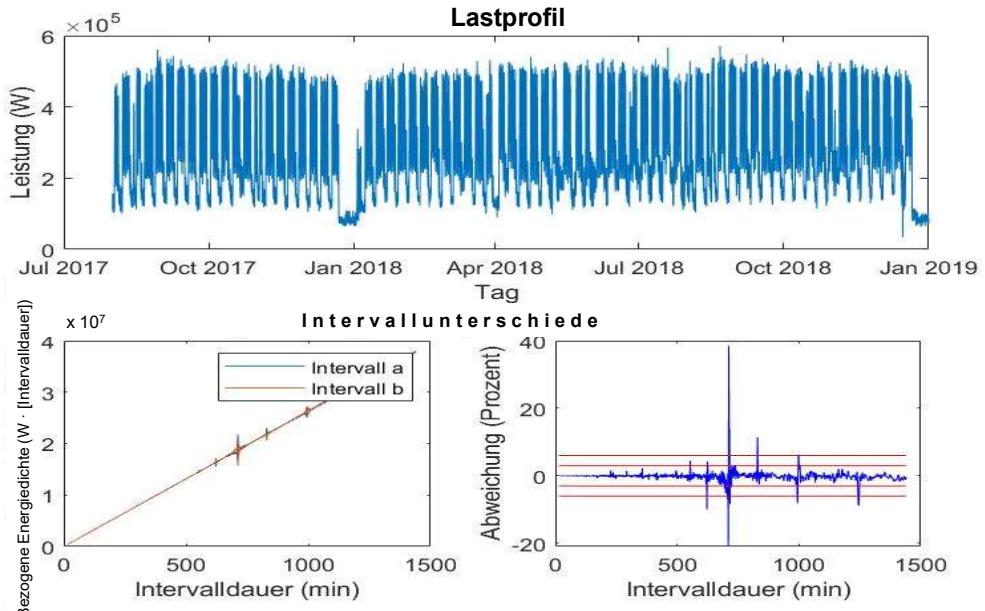
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	Data	State	V L1-N (V)	V L2-N (V)	V L3-N (V)	A-L2 (A)	A-L3 (A)	A-L1 (A)	W tot (W)	VA L1 (VA)	VA L2 (VA)	VA L3 (VA)	VA tot (VA)	VAR L1 (VAR)	VAR L2 (VAR)	VAR L3 (VAR)	VAR tot (VAR)	Energy (kWh)
2	01/01/2018 00:00:00	226.4	226.5	227.1	100	113.6	114.8	74400	25840	22880	26080	74400	5680	6080	6080	18000	15834933.8	
3	01/01/2018 00:31:00	226.3	226.4	227	99.6	114.4	116	74400	25920	22560	26380	74800	5160	6200	6080	17600	15834934.9	
4	01/01/2018 00:32:00	226.3	226.3	226.9	99.6	116	115.2	74800	26200	22560	26160	74800	5720	6080	5920	17600	15834936.2	
5	01/01/2018 00:33:00	226.4	226.5	227	100.4	127.6	114.8	75600	29080	22760	26080	77600	5680	6400	5720	17600	15834937.4	
6	01/01/2018 00:34:00	226.6	226.8	227.2	100	125.6	115.2	75600	28840	22880	26200	77200	5600	6080	5720	17200	15834938.7	
7	01/01/2018 00:35:00	227	227.1	227.6	100	129.2	114.8	76000	29240	22640	26160	78000	5800	6080	6080	17600	15834940.0	
8	01/01/2018 00:36:00	226.8	227	227.5	115.6	134.8	130.8	84800	30680	26280	29680	86400	5840	6400	6120	18400	15834941.4	
9	01/01/2018 00:37:00	226.7	226.9	227.4	100.8	119.2	115.6	74400	27240	22880	26520	76400	5840	5960	6240	18000	15834942.7	
10	01/01/2018 00:38:00	226.9	227	227.5	99.6	118.4	114.4	73200	26880	22640	26040	75200	5280	6240	6240	17600	15834944	
11	01/01/2018 00:39:00	226.9	227	227.6	100.4	117.6	114	73600	26880	22800	2560	75600	5800	6120	5720	17600	15834945.3	
12	01/01/2018 00:40:00	226.9	227	227.6	100	117.2	115.2	73200	26720	22720	26160	75200	5800	6120	6080	18000	15834946.5	
13	01/01/2018 00:41:00	227	227.1	227.6	100	129.6	114	76400	29680	22720	25960	78000	5520	5960	5880	17200	15834947.8	
14	01/01/2018 00:42:00	227	227.1	227.7	100	135.2	115.6	75200	29640	22720	26720	78000	9360	5960	6880	22000	15834949	
15	01/01/2018 00:43:00	227	227.2	227.6	100.8	118.8	114	73600	27270	22920	26040	75600	5960	6080	6080	18000	15834950.3	
16	01/01/2018 00:44:00	226.9	227	227.6	100.4	137.2	130	86400	31040	27560	29800	88000	8040	6240	5920	20000	15834951.7	
17	01/01/2018 00:45:00	226.8	227	227.2	121.2	135.2	130	82000	30120	27000	29000	86000	8680	8880	8880	26000	15834952.1	
18	01/01/2018 00:46:00	226.9	227	227.6	104.4	120	113.6	74800	27160	24000	26040	76800	6000	6120	6080	18000	15834954.4	
19	01/01/2018 00:47:00	226.8	227	227.6	100.8	120	114	75600	26960	22880	2560	75600	5800	6120	5880	17600	15834956.2	
20	01/01/2018 00:48:00	227	227.1	227.7	100.8	121.2	114	74400	27440	23080	27400	76000	5480	6160	6080	17600	15834956.9	
21	01/01/2018 00:49:00	226.9	227	227.2	100.4	125.6	114.4	75600	28800	22920	26080	77600	5640	6240	6240	18000	15834958.2	
22	01/01/2018 00:50:00	227.1	227.3	227.9	102.8	123.2	116	75600	28200	23400	26440	77600	5920	6200	6440	18400	15834959.5	
23	01/01/2018 00:51:00	227.1	227.3	227.9	102.8	127.2	115.2	76400	28920	23400	26280	78400	5840	6200	5920	18000	15834960.8	
24	01/01/2018 00:52:00	227.3	227.5	228	121.2	134.4	131.2	86000	30400	27600	2920	87600	5800	6440	6320	18400	15834962.2	
25	01/01/2018 00:53:00	227.3	227.3	227.9	124.8	136	135.2	88000	30720	28400	30840	89600	6400	6520	6160	21200	15834963.7	
26	01/01/2018 00:54:00	227.2	227.4	228	108.4	118.4	115.6	76000	26920	24960	26360	78000	6000	6080	6280	18400	15834964.9	
27	01/01/2018 00:55:00	227.2	227.5	228	103.8	131.6	113.6	77600	29640	2520	23880	78800	5520	6360	6560	17600	15834965.3	
28	01/01/2018 00:56:00	227.2	227.5	228	103.6	129.2	113.2	77200	29360	23960	2540	78800	5680	6120	6240	18400	15834967.6	
29	01/01/2018 00:57:00	227.1	227.3	227.9	100.8	124.8	116.8	77200	28280	23040	26280	77200	5760	6280	6240	18400	15834968.8	
30	01/01/2018 00:58:00	227.1	227.2	227.8	100.4	116	113.2	73200	26720	22840	25800	75200	5800	5960	6040	17600	15834970.1	
31	01/01/2018 00:59:00	227.3	227.5	228	100.4	116	113.2	73800	26480	22760	25840	74800	5600	6120	6040	17600	15834971.3	
32	01/01/2018 00:30:00	227.1	227.4	227.9	116.4	142	128.8	88400	28440	26480	28280	88000	6000	6280	6080	18400	15834972.6	
33	01/01/2018 00:31:00	227.3	227.5	227.9	116.4	129.6	128.8	83200	29580	26520	2960	85200	5960	6280	6080	18400	15834974	
34	01/01/2018 00:32:00	227.1	227.3	227.8	100.8	118.4	113.6	76600	27000	22920	2580	75600	0	5840	5880	11600	15834975.3	
35	01/01/2018 00:33:00	227.1	227.3	227.8	100.8	123.6	113.2	74400	27720	22920	25880	76400	6440	6000	5880	18000	15834976.6	
36	01/01/2018 00:34:00	227.3	227.4	228	101.2	123.2	114.4	74800	28120	23040	26560	76800	6320	6280	6240	18000	15834977.9	
37	01/01/2018 00:35:00	227.1	227.3	227.8	100.4	123.2	113.2	74800	28000	22920	25880	76800	5560	6000	5560	17600	15834979.1	
38	01/01/2018 00:36:00	227	227.1	227.7	100.8	114.4	115.6	72800	26000	22920	26080	74800	6040	6000	5560	17600	15834980.4	
39	01/01/2018 00:37:00	227	227.1	227.7	101.2	114.8	113.6	72800	23000	25880	23040	74800	5400	6280	6040	17600	15834981.6	
40	01/01/2018 00:38:00	227.1	227.1	227.6	100.4	120.4	117.2	74000	26480	22840	2620	76000	5600	6440	6080	17600	15834982.9	
41	01/01/2018 00:39:00	227	227.1	227.7	101.2	123.6	130	84000	29880	26560	2920	8560	5920	6080	5920	18000	15834984.3	
42	01/01/2018 00:40:00	227.2	227.2	227.8	100.4	124	115.2	74800	26240	22840	26280	76800	6120	6240	6440	18000	15834985.7	
43	01/01/2018 00:41:00	227	227.1	227.7	100.4	122.8	114.4	74400	27720	22840	26040	76400	5920	6240	5880	18000	15834987	
44	01/01/2018 00:42:00	227.3	227.3	227.8	100.8	123.2	114.4	74800	28040	22920	26080	76800	5920	6440	6840	18000	15834988.2	
45	01/01/2018 00:43:00	227.1	227.4	228	101.2	116	114.4	75600	26480	23120	26120	76800	6000	6360	6120	18400	15834989.6	
46	01/01/2018 00:44:00	227.4	227.5	227.9	101.2	124	114.4	74000	27760	22760	26000	76400	8320	6120	5880	20400	15834990.7	
47	01/01/2018 00:45:00	227.6	227.7	228.2	101.2	116	115.2	72800	26040	23080	2620	7600	5520	6560	6440	18400	15834992	
48	01/01/2018 00:46:00	227.6	227.7	228.1	100.8	114.8	114	72800	2640	22860	26040	76800	6080	6440	5880	18400	15834993.2	
49	01/01/2018 00:47:00	227.5	227.7	228.1	117.6	138.4	130.4	87200	31520	23020	26800	88000	6120	6480	3800	18000	15834994.6	
50	01/01/2018 00:48:00	227.5	227.6	228.1	103.2	126	117.2	76800	28520	23120	26560	78400	6000	6360	6120	18400	15834995	
51	01/01/2018 00:49:00	227.7	227.7	228.2	100.4	122.4	114.4	74800	28080	22880	26040	76800	5760	6400	6080	18000	15834997.2	
52	01/01/2018 00:50:00	227.5	227.6	228	100.4	114	118.8	74000	27040	22760	25880	76000	5440	6120	5520	17200	15834998.5	

Abbildung B.1: Messaufzeichnung (Auszug)

## **Anhang C**

### **Auswertungen**

## Nr. 1, Hersteller von Drehteilen

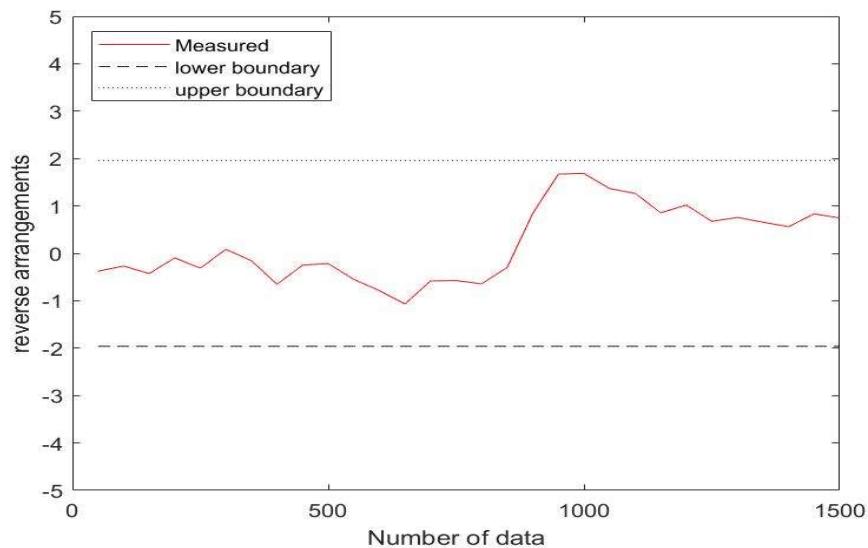


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

1

## Nr. 1

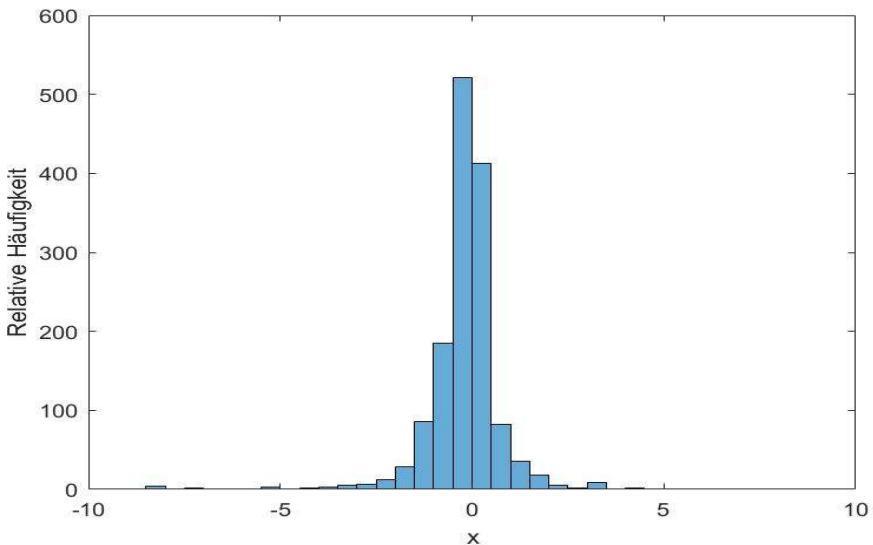


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

2

## Histogramm: Nr. 1

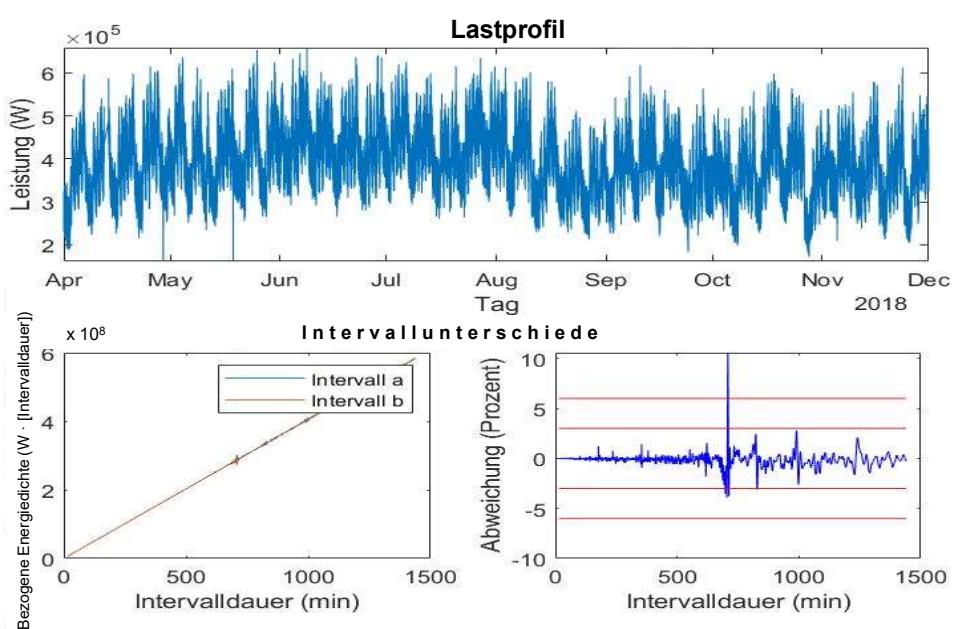


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

3

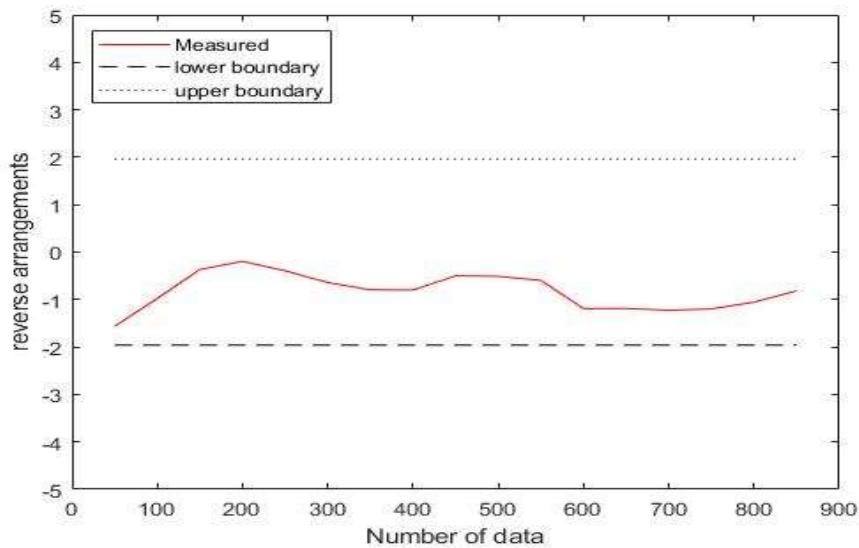
## Nr. 2 Hersteller von Kunststoffspritzgussteilen



10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

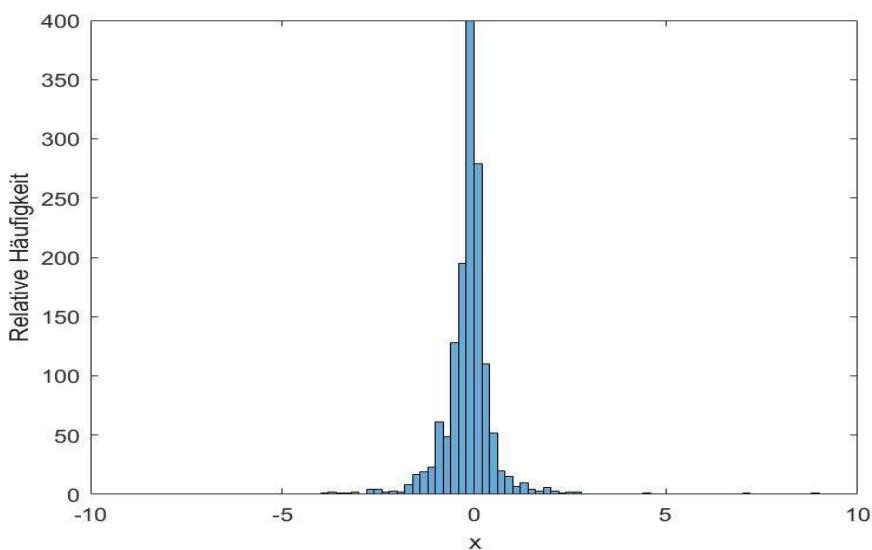
4

**Nr. 2**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

5

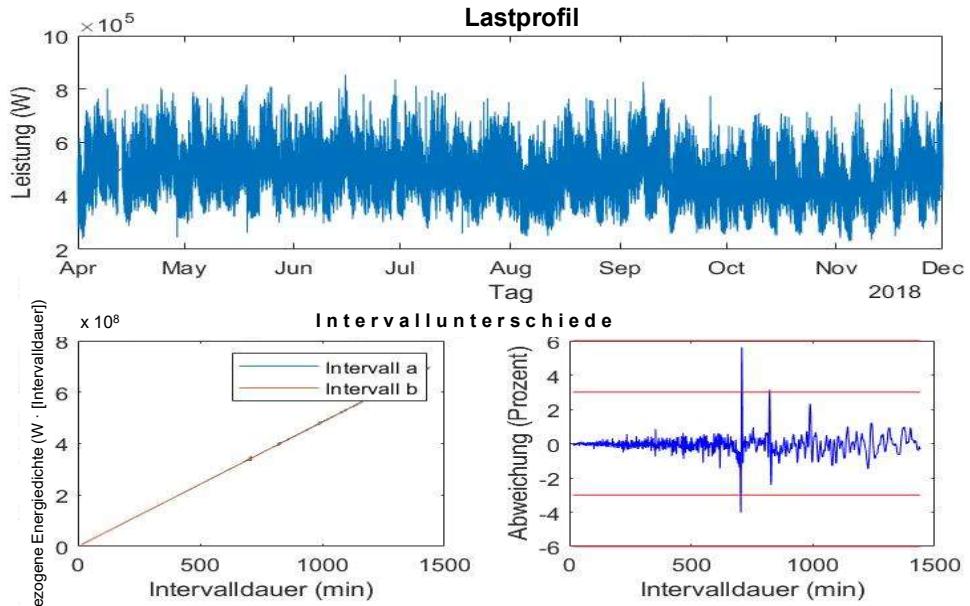
**Nr. 2**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

6

### Nr. 3, Hersteller von Drehteilen

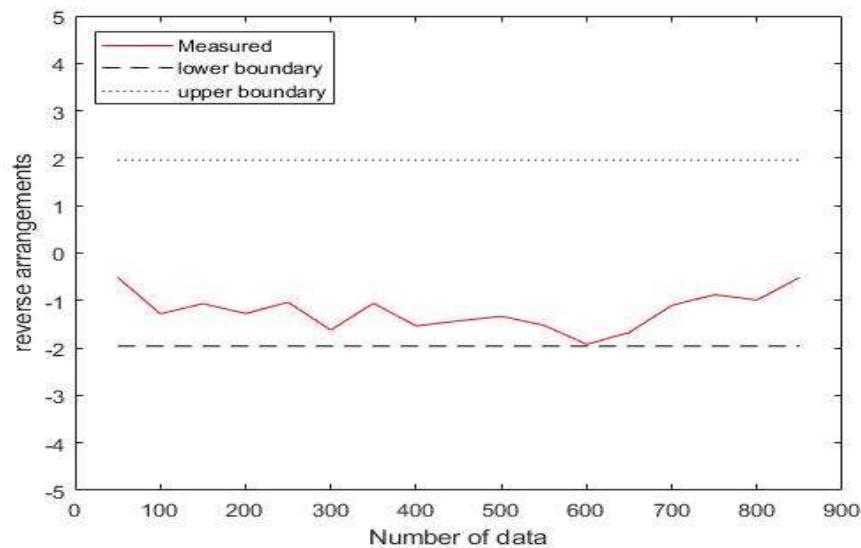


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

7

### Nr. 3

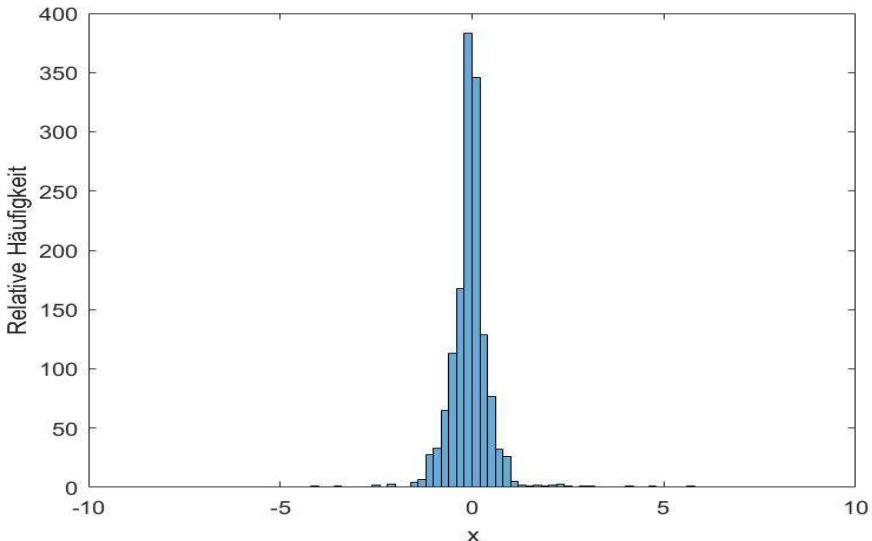


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

8

## Histogramm: Nr. 3

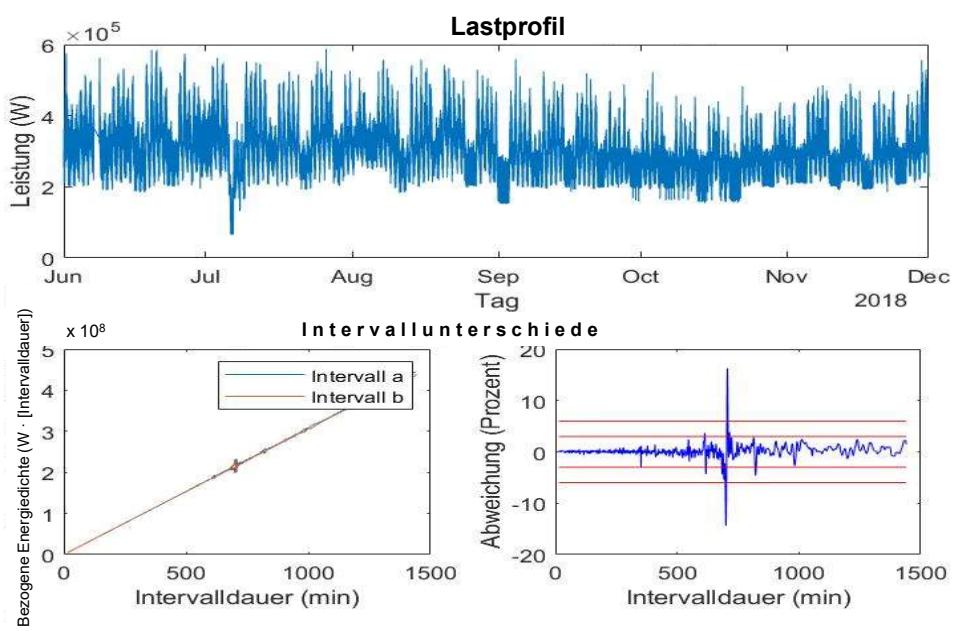


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

9

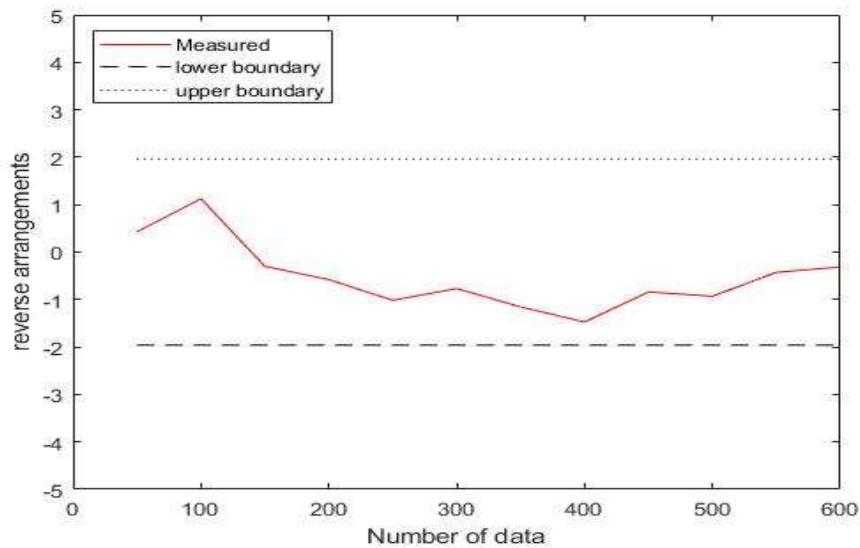
## Nr.4, Pharmaunternehmen



10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

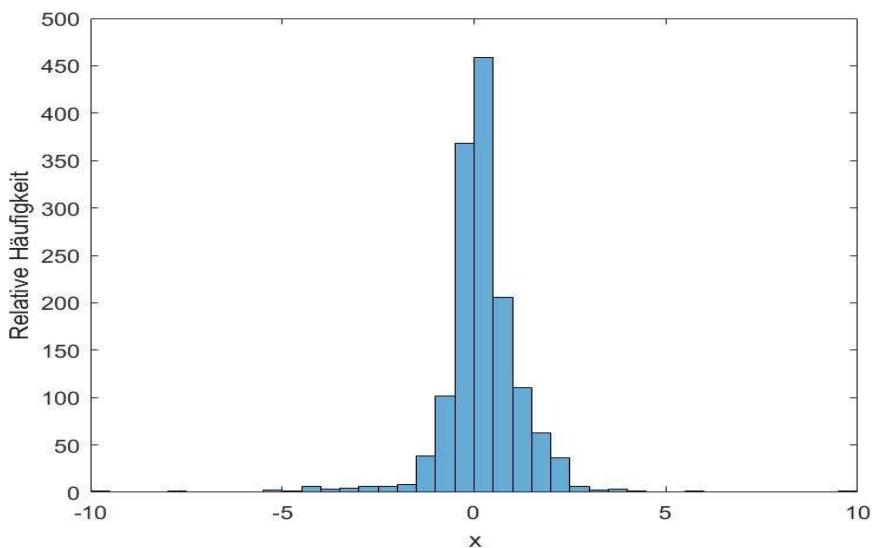
10

**Nr.4**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

11

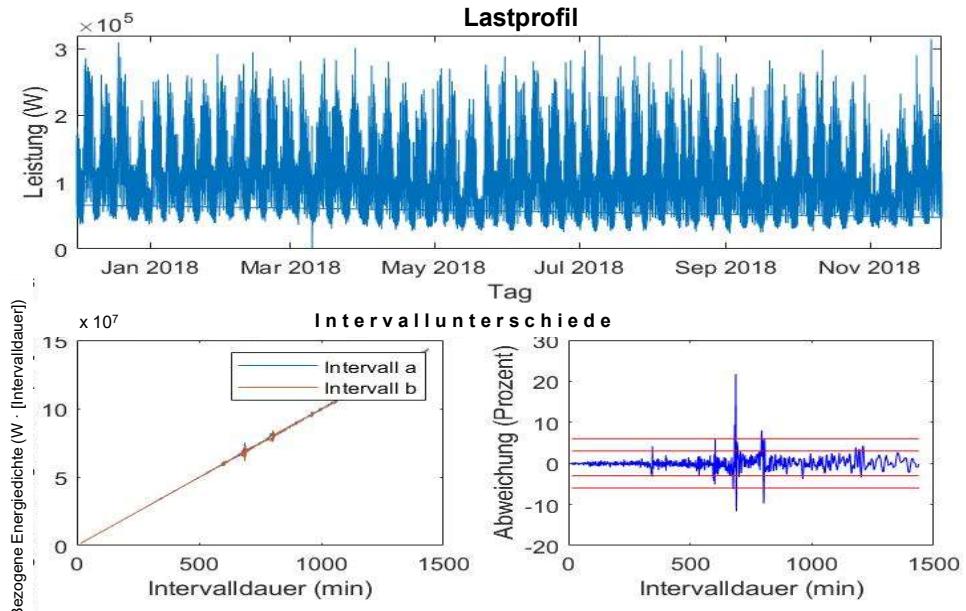
**Histogramm: Nr.4**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

12

## Nr. 5, Brauerei (Bier)

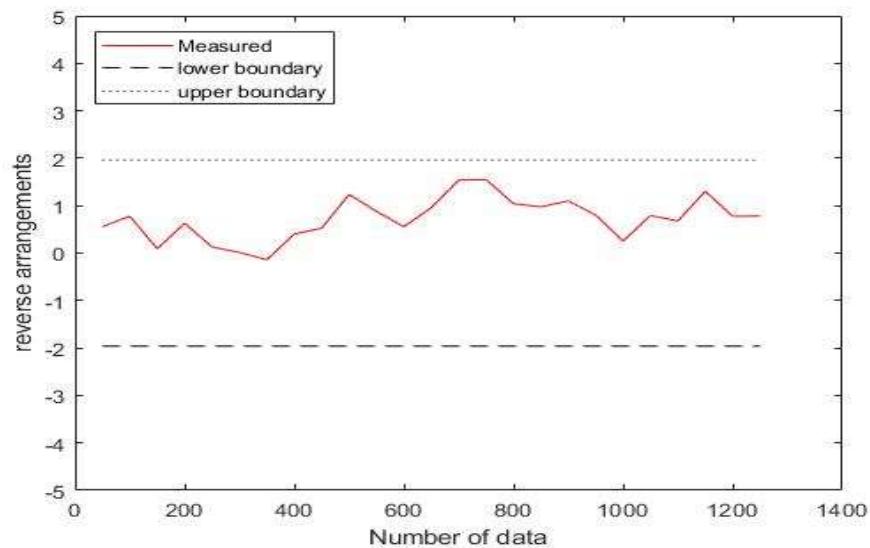


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

13

## Nr. 5

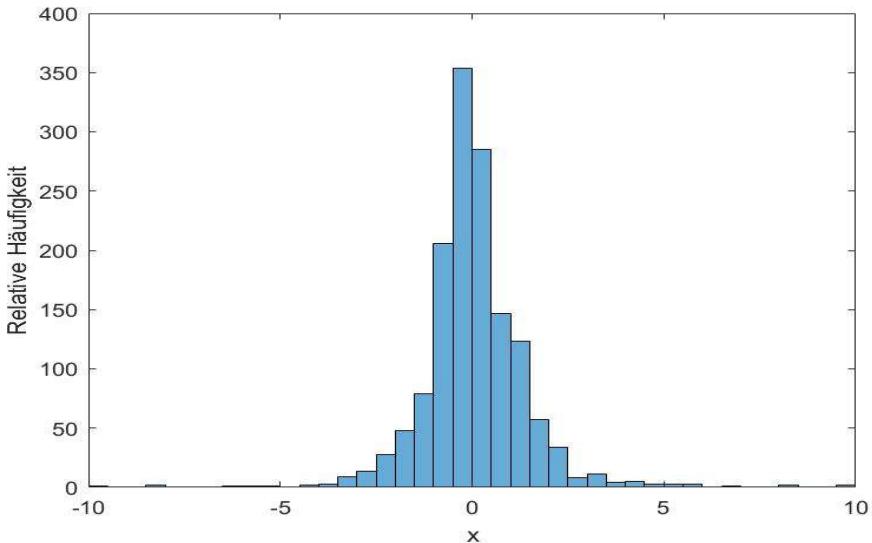


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

14

## Histogramm: Nr. 5

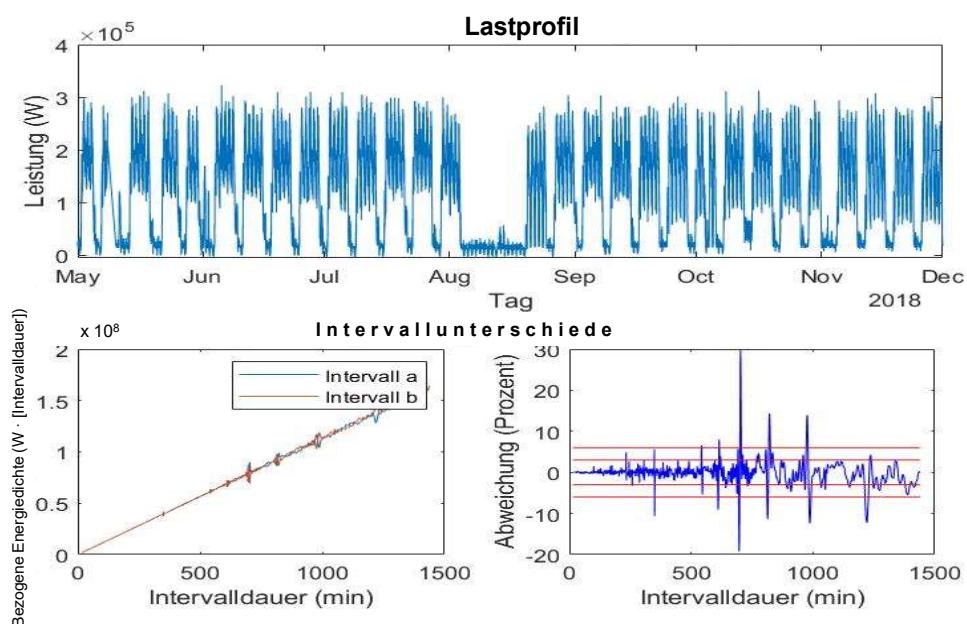


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

15

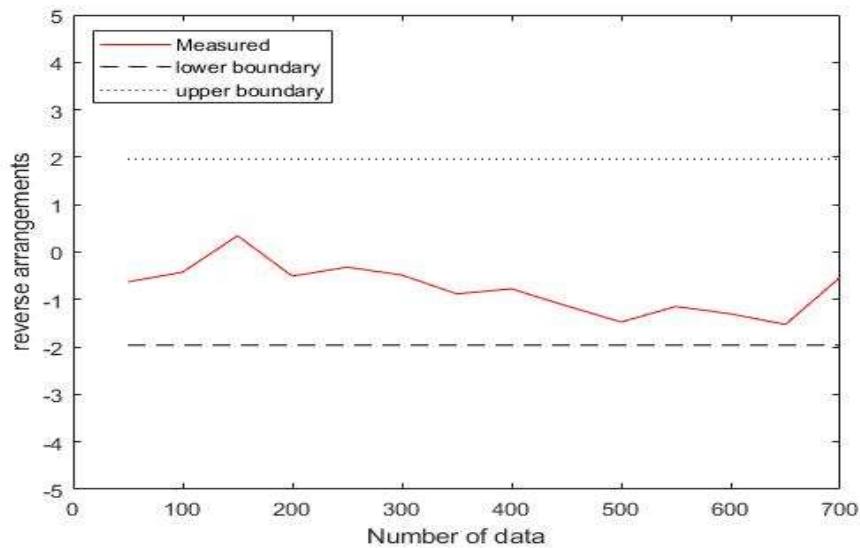
## Nr. 6, Spezialist für Antriebslösungen



10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

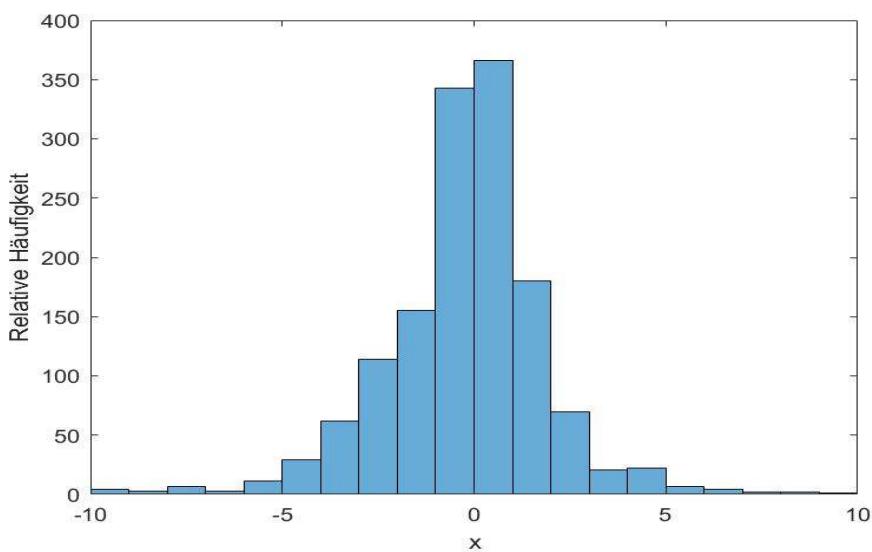
16

**Nr. 6**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

17

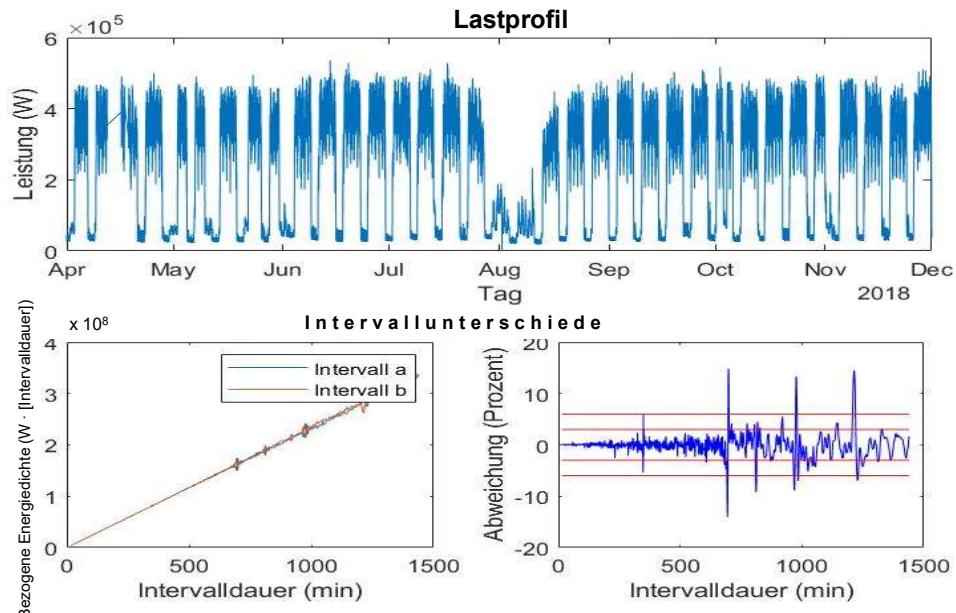
**Histogramm: Nr. 6**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

18

## Nr. 7, Hersteller von Versandtaschen

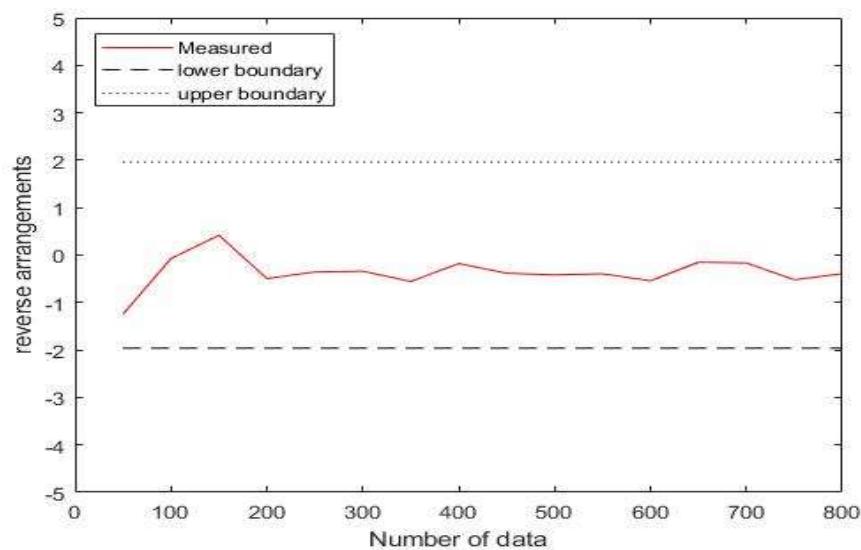


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

19

## Nr. 7

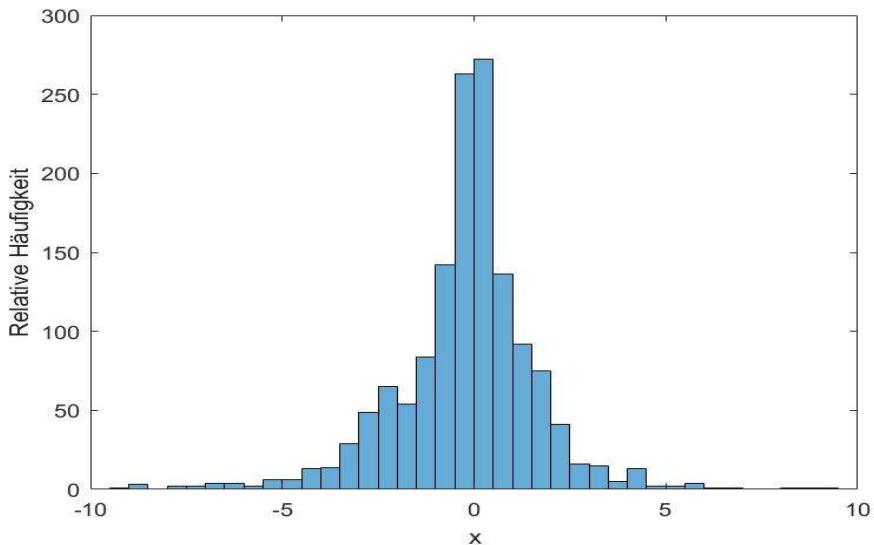


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

20

## Histogramm: Nr. 7

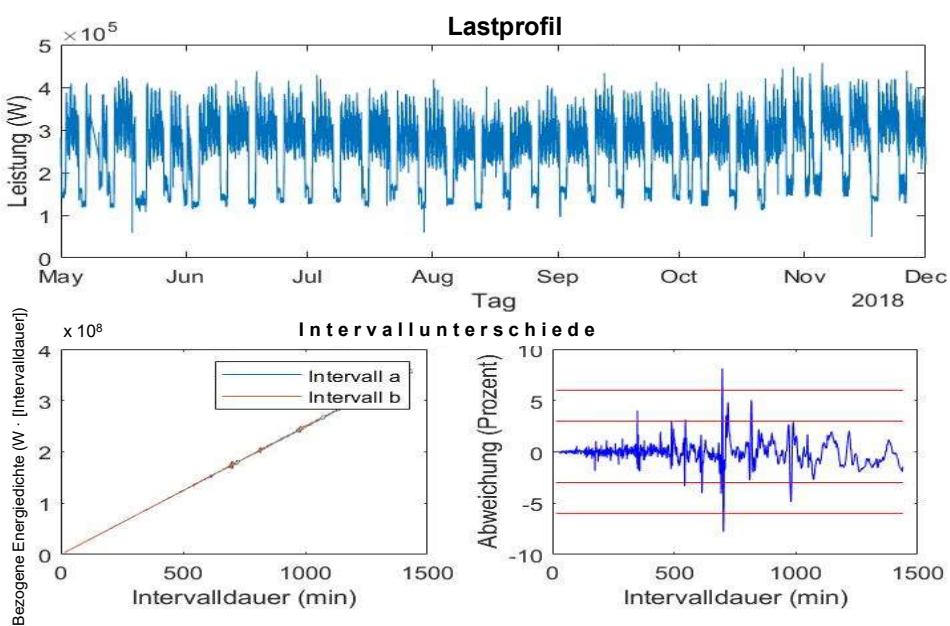


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

21

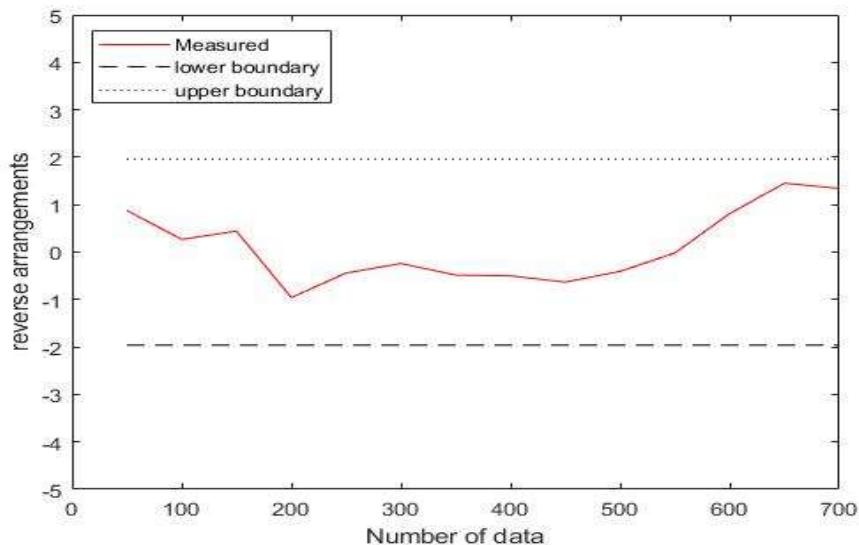
## Nr. 8, Hersteller diamantiert Oberflächen



10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

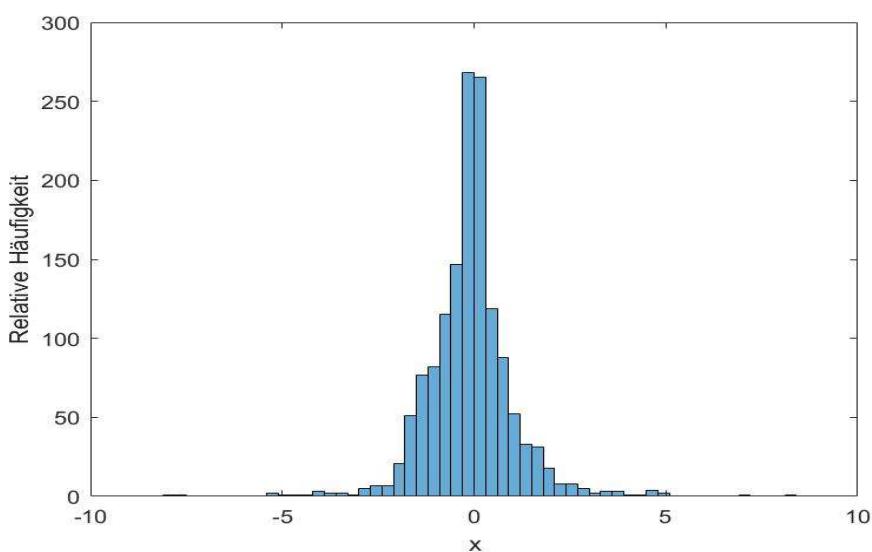
22

**Nr. 8**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

23

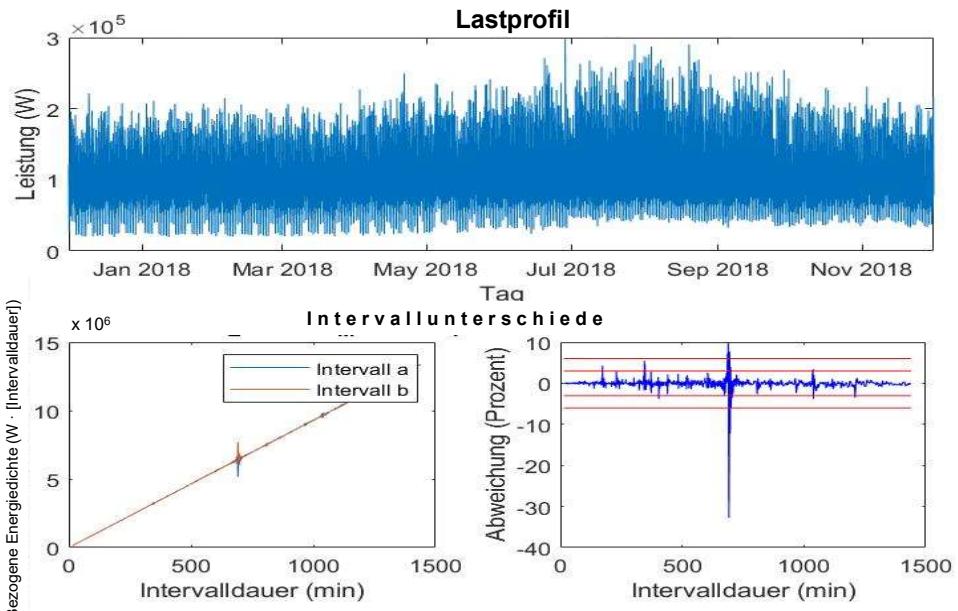
**Histogramm: Nr. 8**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

24

## Nr. 9, Restaurantbetrieb

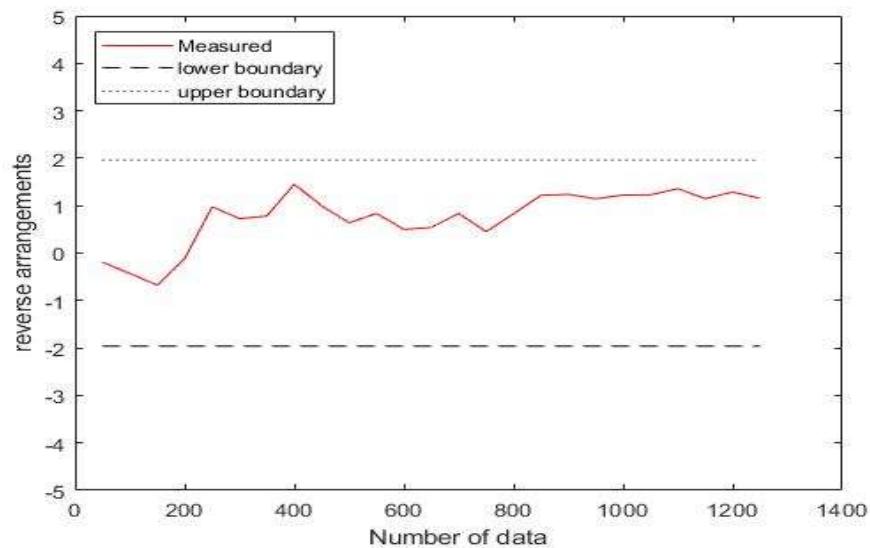


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

25

## Nr. 9

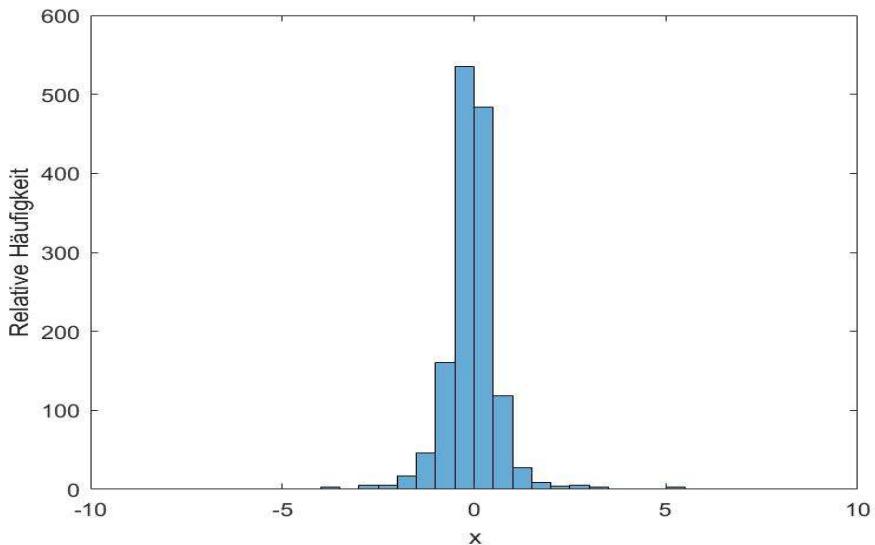


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

26

## Histogramm: Nr. 9

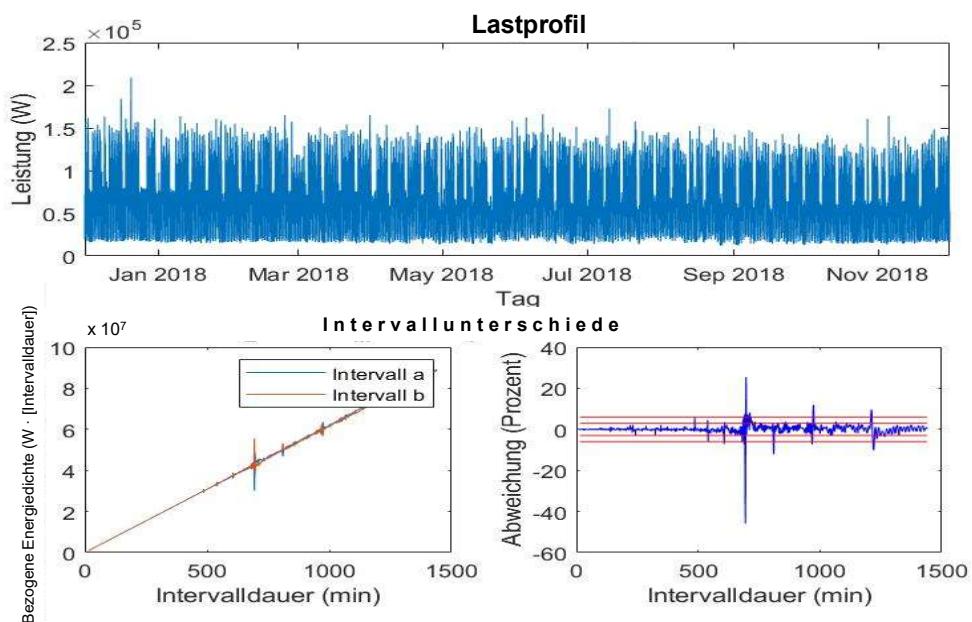


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

27

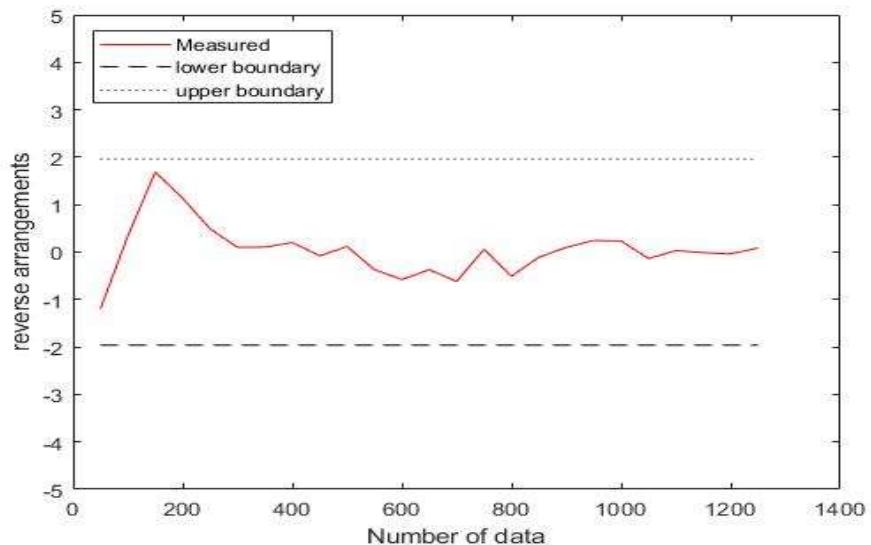
## Nr. 10, Einzelhandel Einkaufsmarkt



10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

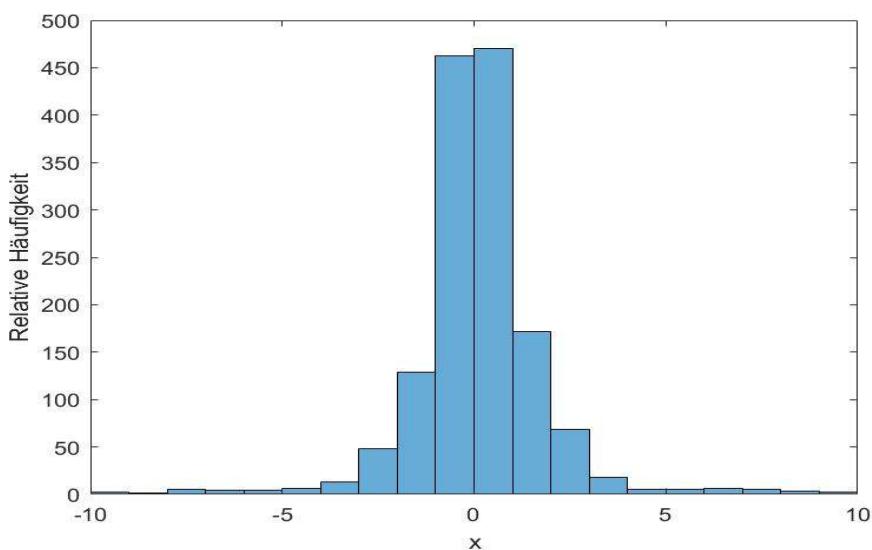
28

**Nr. 10**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

29

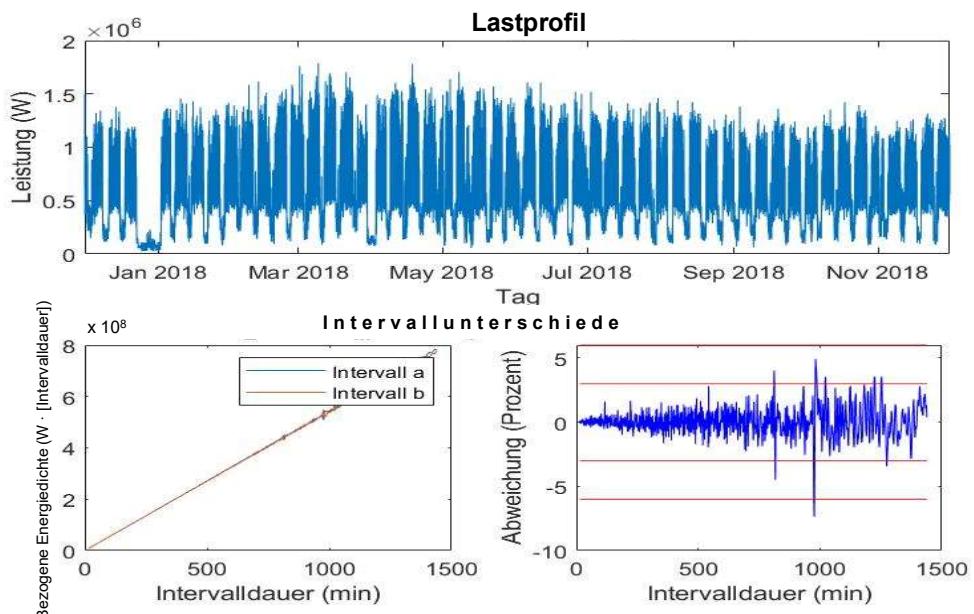
**Histogramm: Nr. 10**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

30

## Nr. 11, Hersteller von Kalt- und Warmumformungsteilen

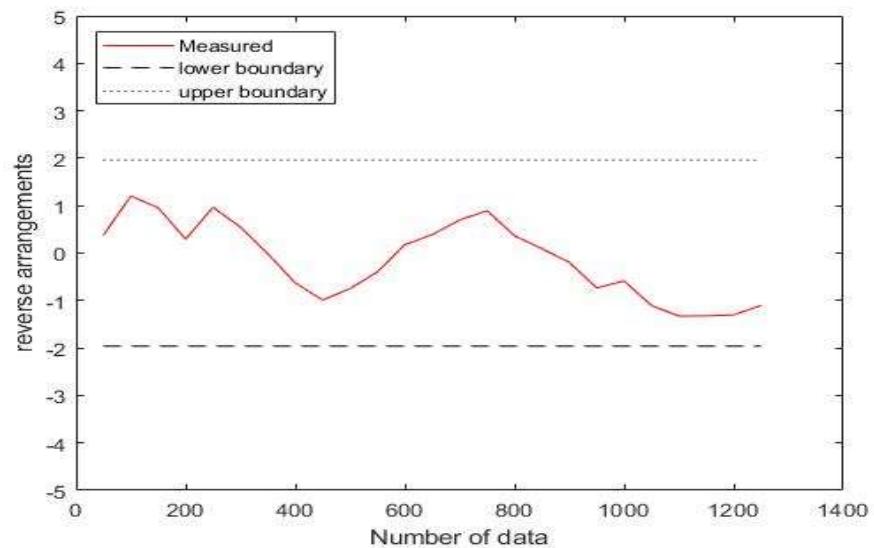


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

31

## Nr. 11

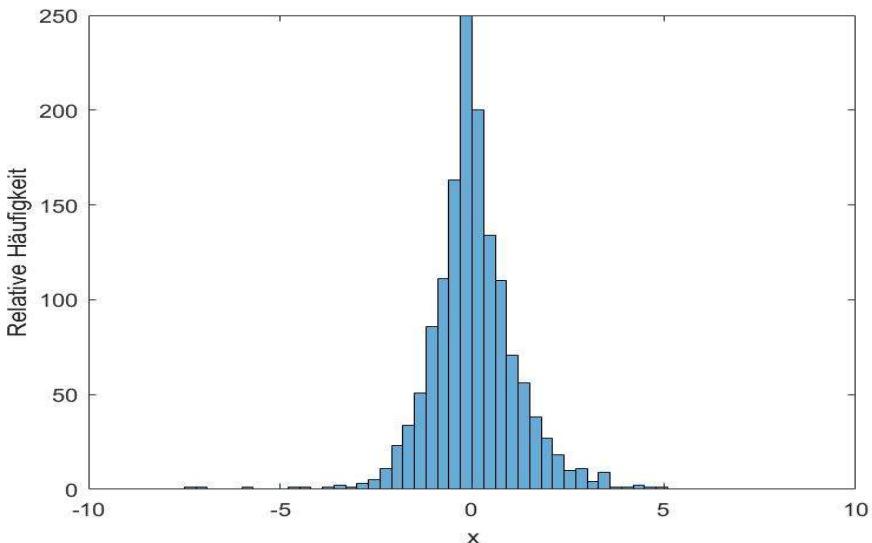


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

32

## Histogramm: Nr. 11

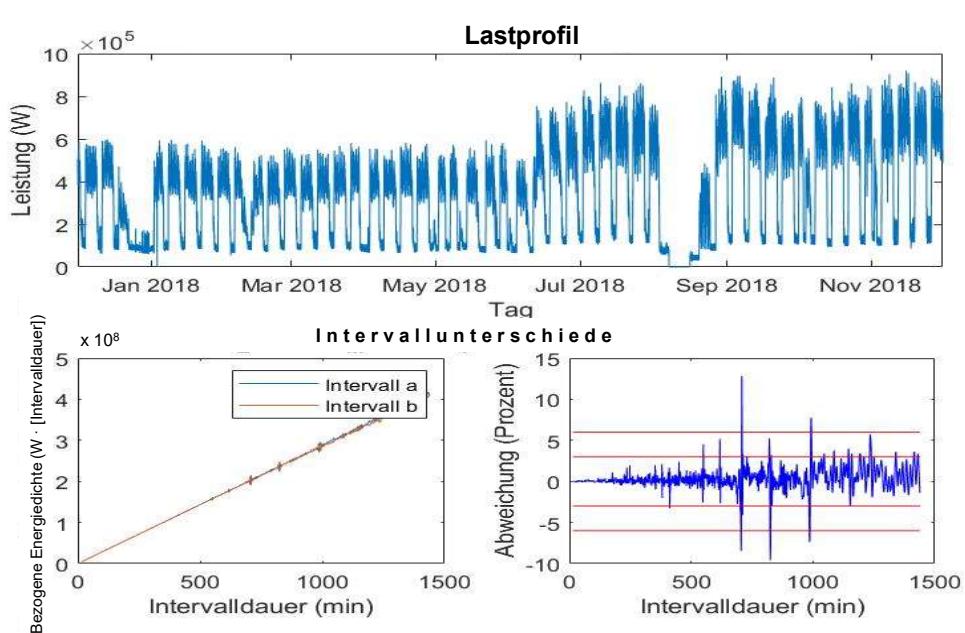


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

33

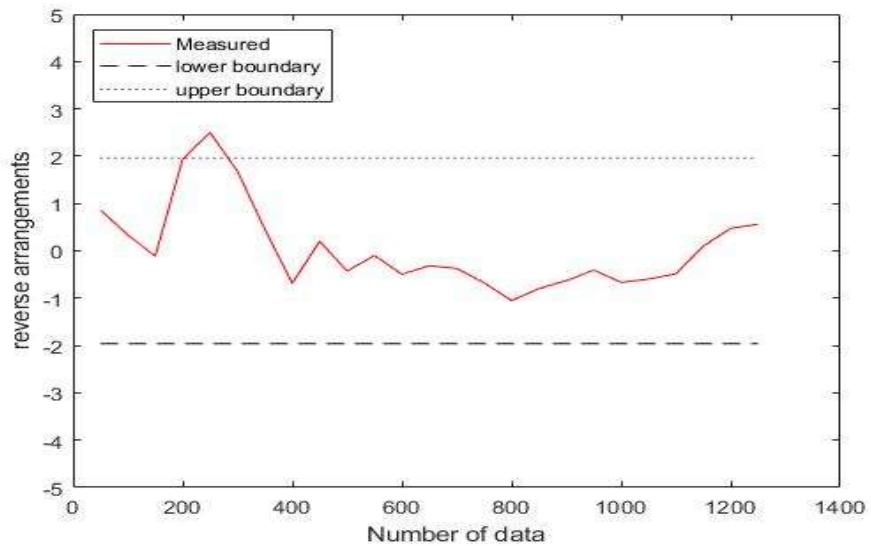
## Nr. 12, Hersteller von Präzisionsteilen aus Kunststoff



10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

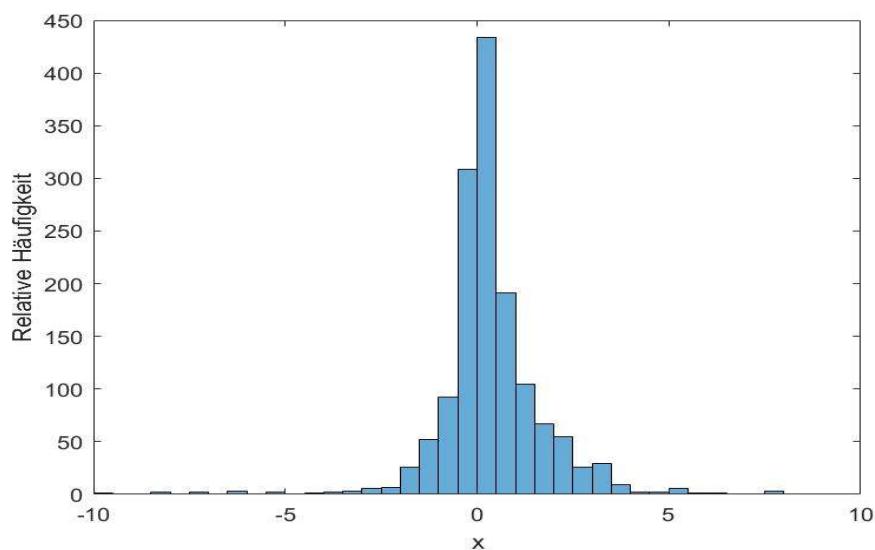
34

**Nr. 12**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

35

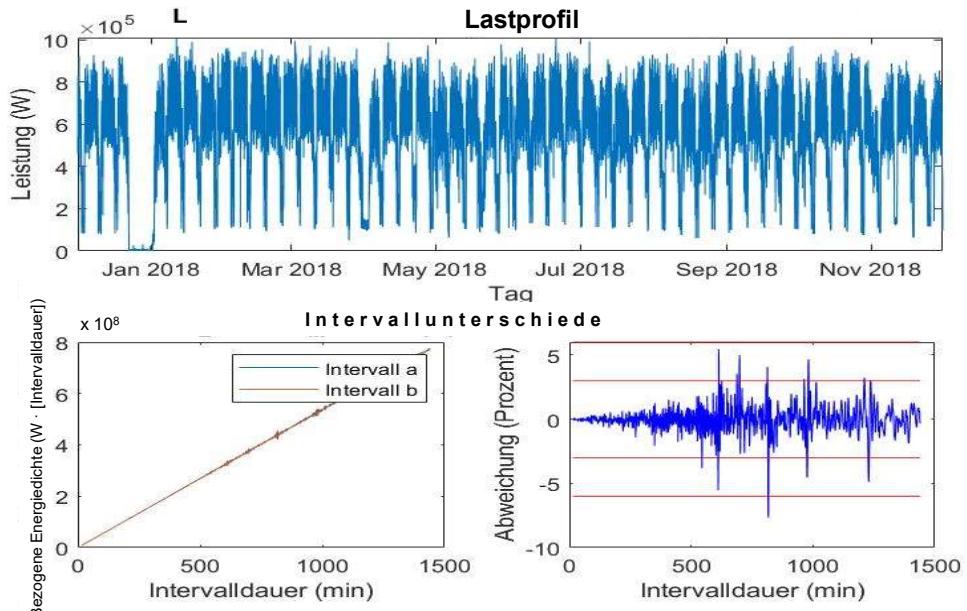
**Histogramm: Nr. 12**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

36

## Nr. 13, Hersteller von Drehteilen

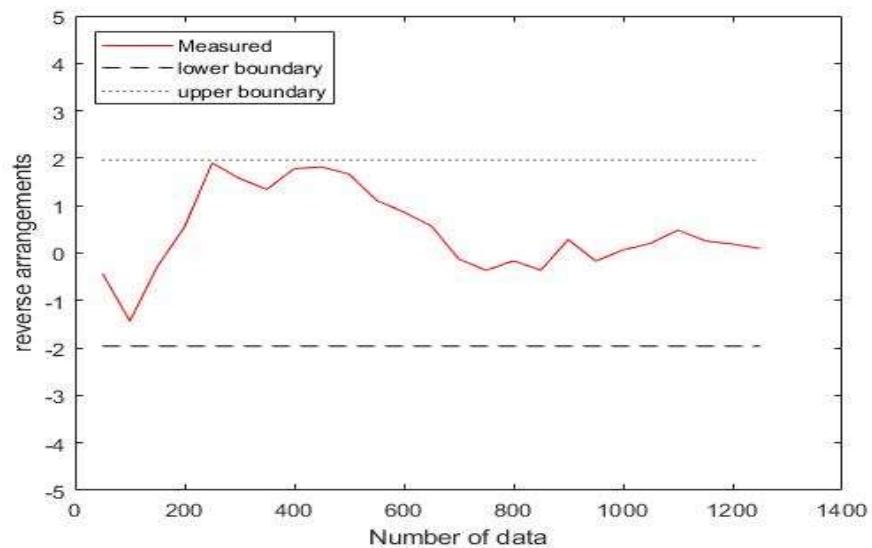


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

37

## Nr. 13

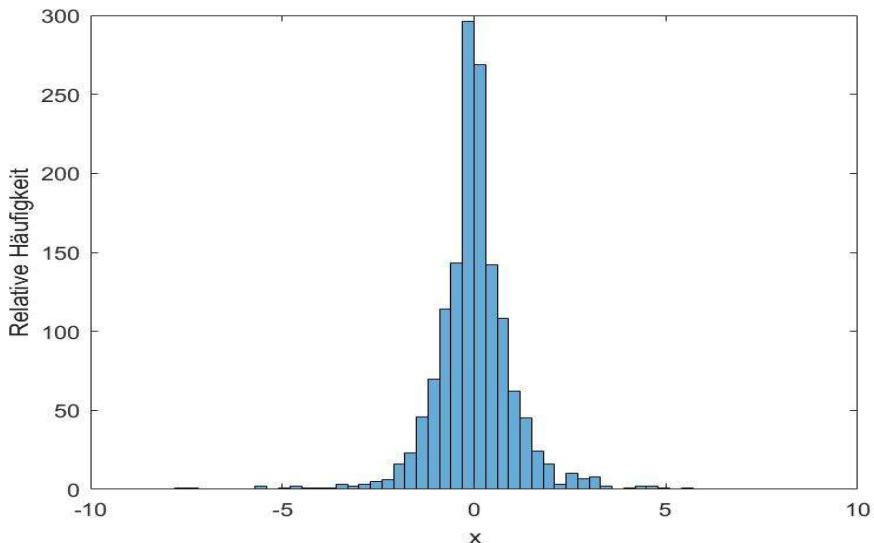


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

38

## Histogramm: Nr. 13

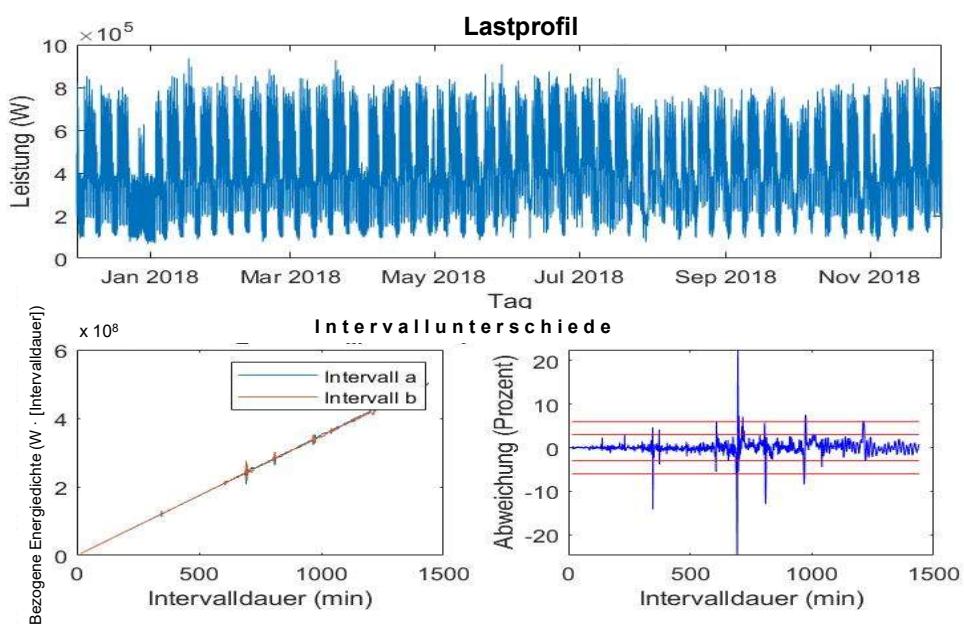


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

39

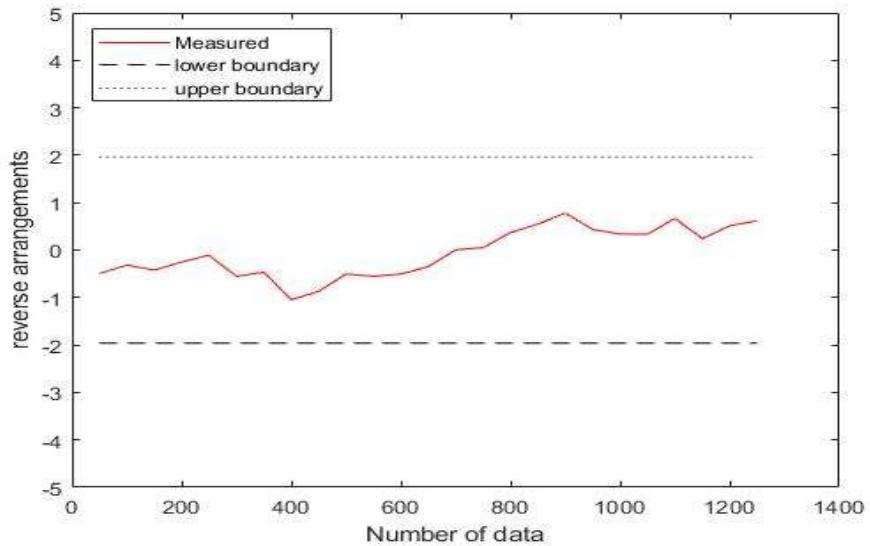
## Nr. 14, Medizintechnik



10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

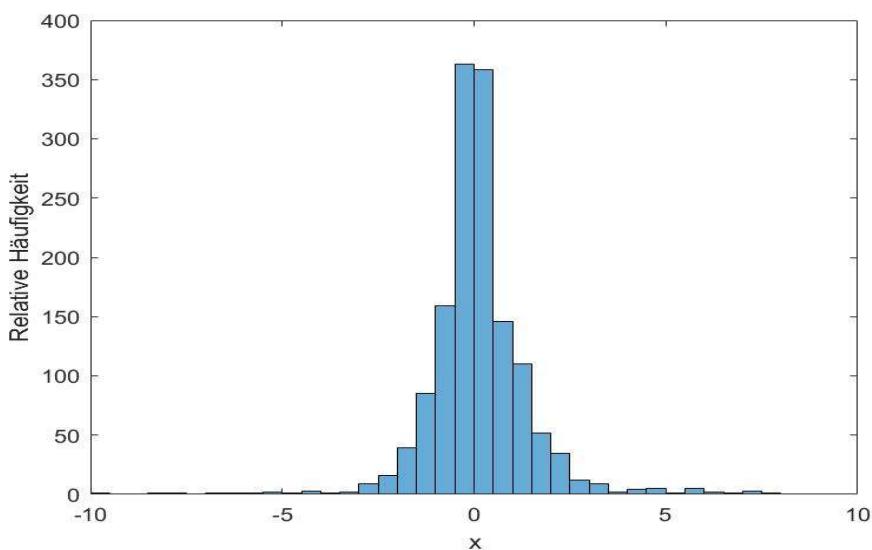
40

**Nr. 14**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

41

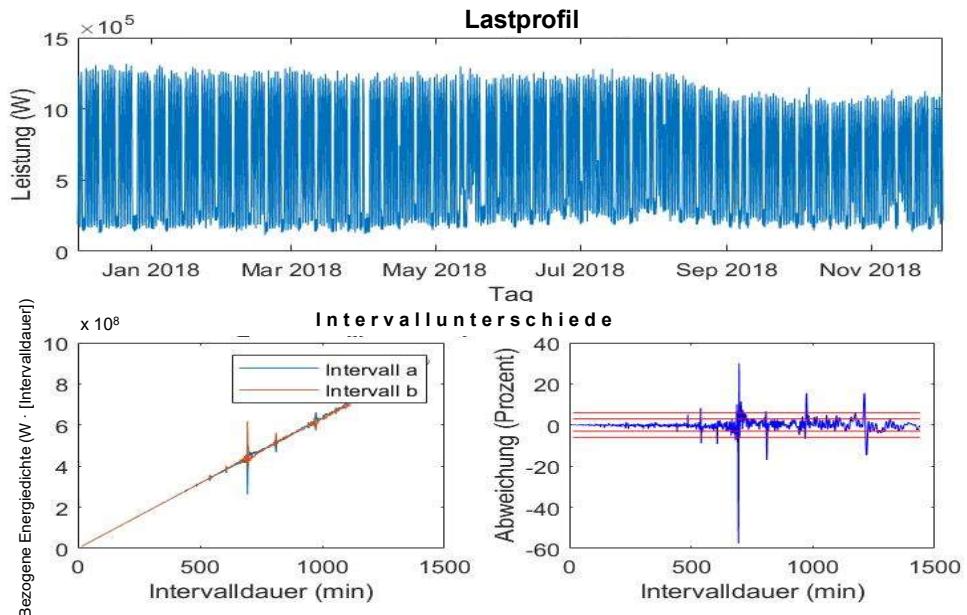
**Histogramm: Nr. 14**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

42

## Nr. 15, Warenhaus

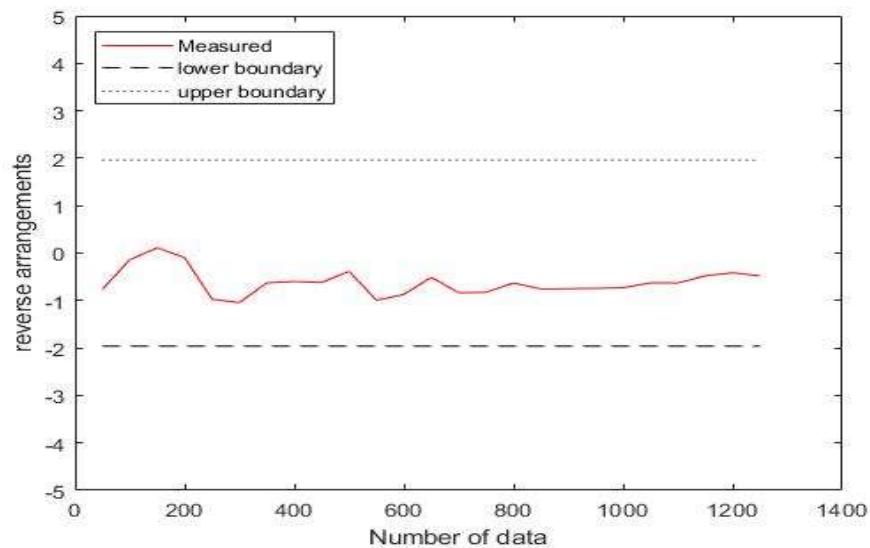


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

43

## Nr. 15

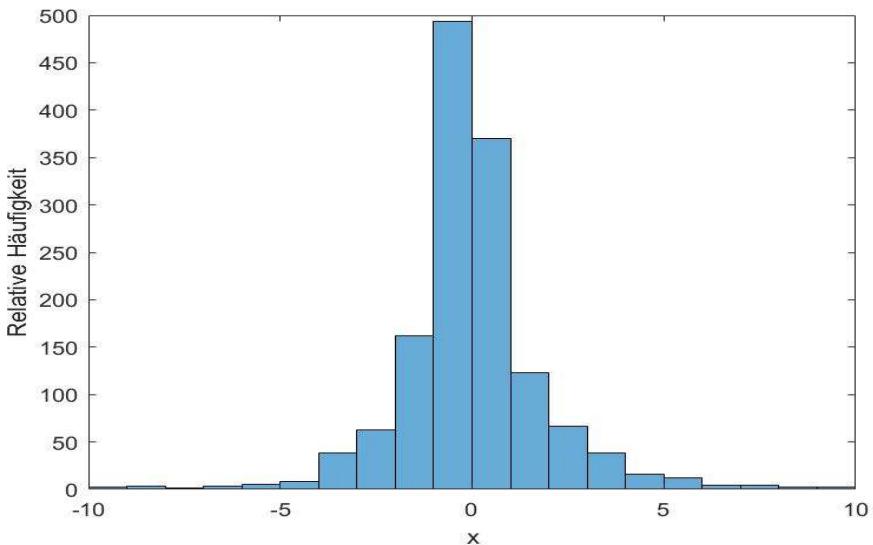


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

44

## Histogramm: Nr. 15

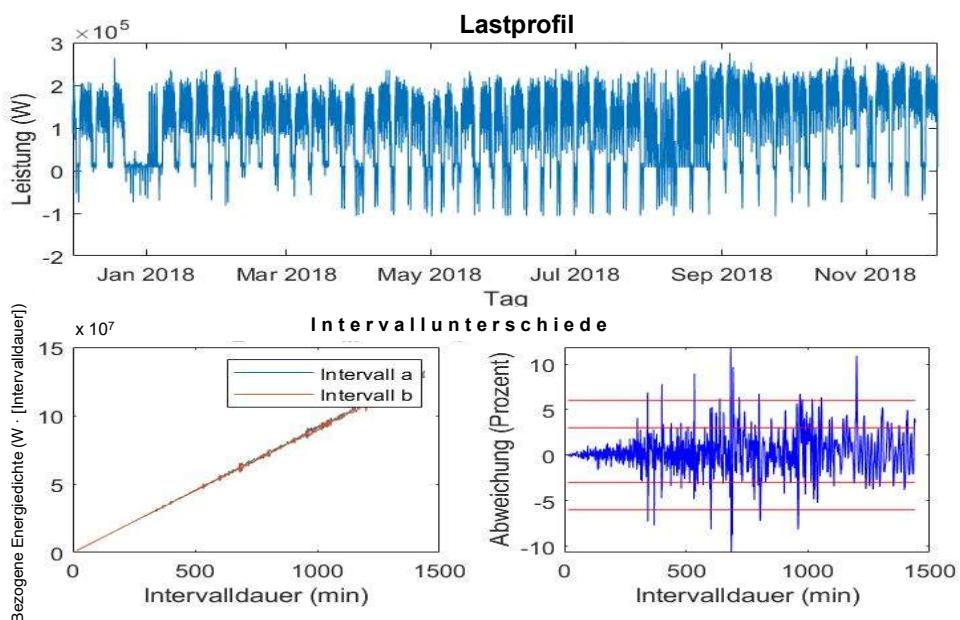


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

45

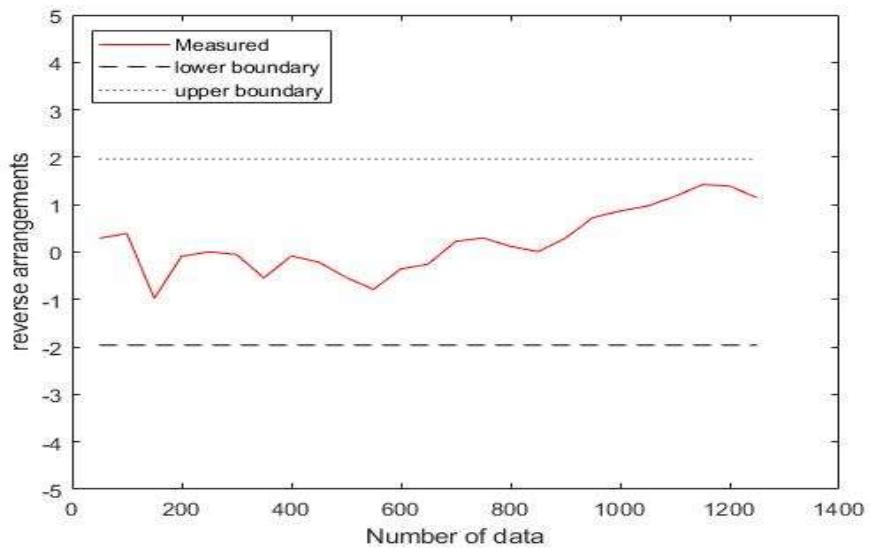
## Nr. 17, Hersteller von Drehteilen



10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

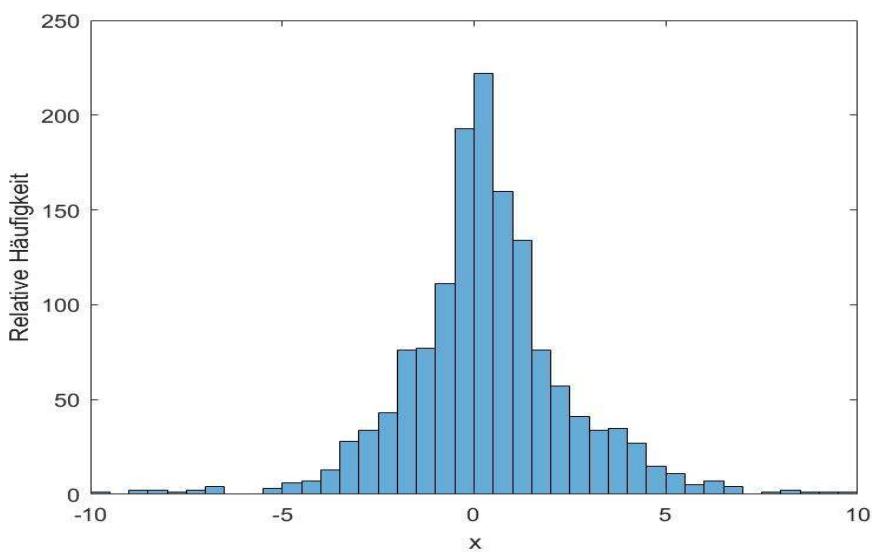
46

**Nr. 17**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

47

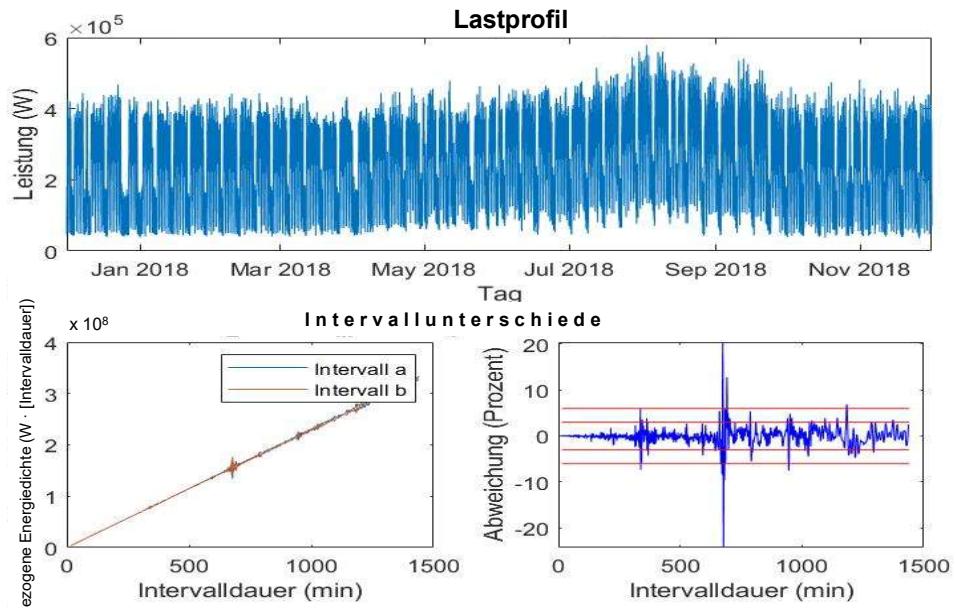
**Histogramm: Nr. 17**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

48

## Nr. 18, Warenhaus Großhandel

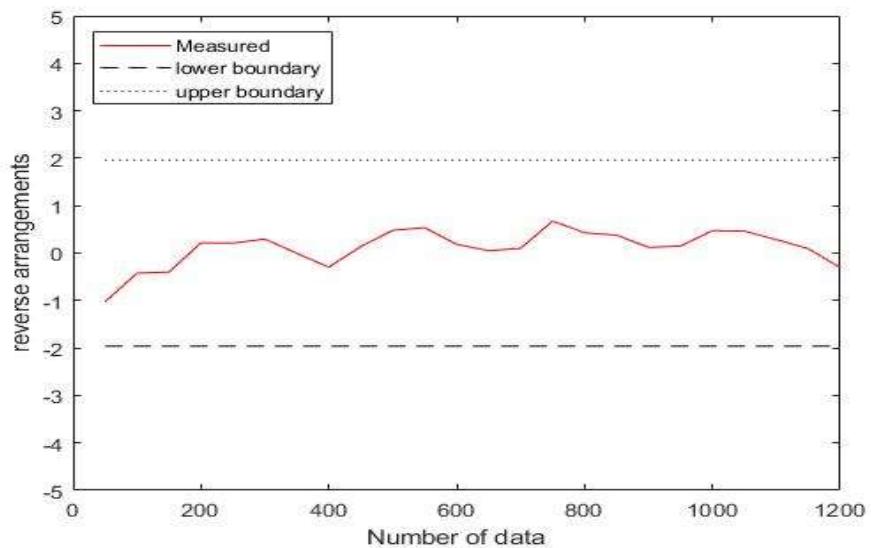


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

49

## Nr. 18

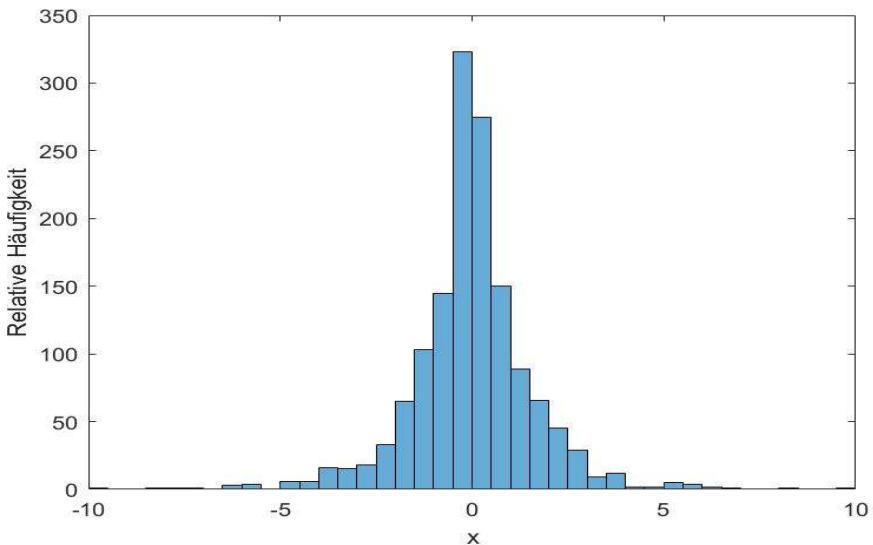


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

50

## Histogramm: Nr. 18

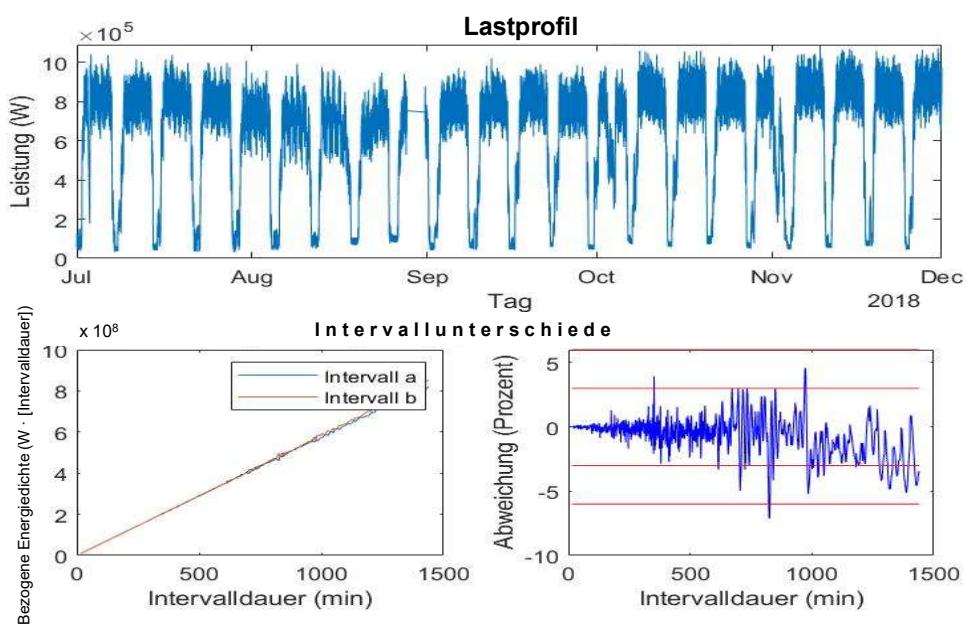


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

51

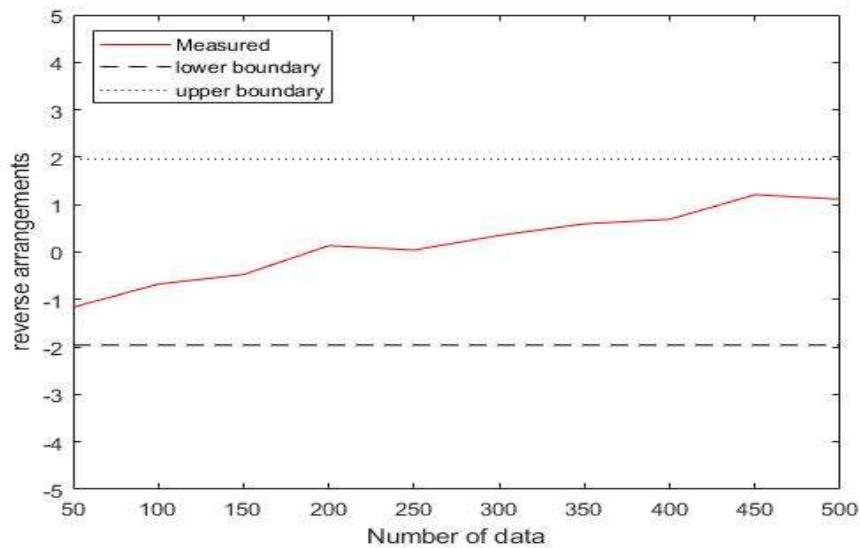
## Nr. 19, Hersteller von Dreh- und Frästeilen



10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

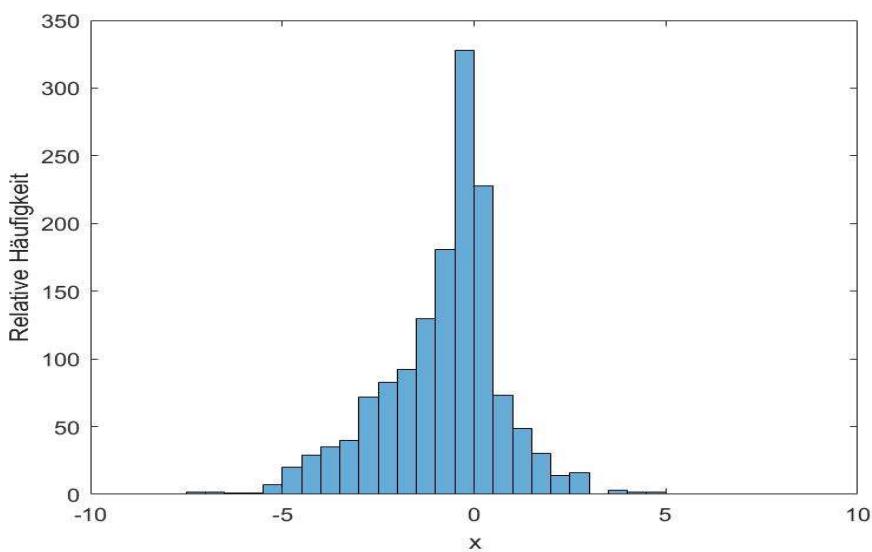
52

**Nr. 19**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

53

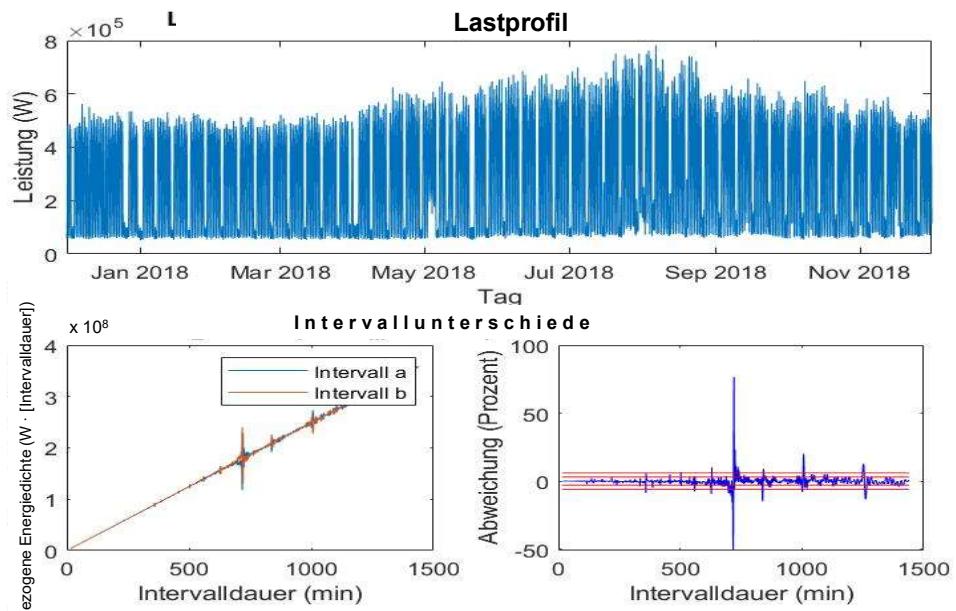
**Histogramm: Nr. 19**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

54

## Nr. 20, Warenhaus

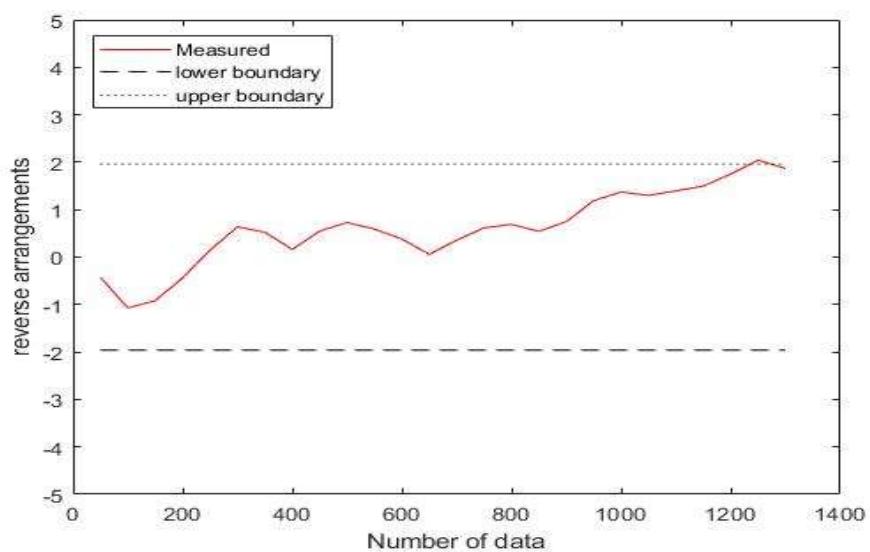


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

55

## Nr. 20

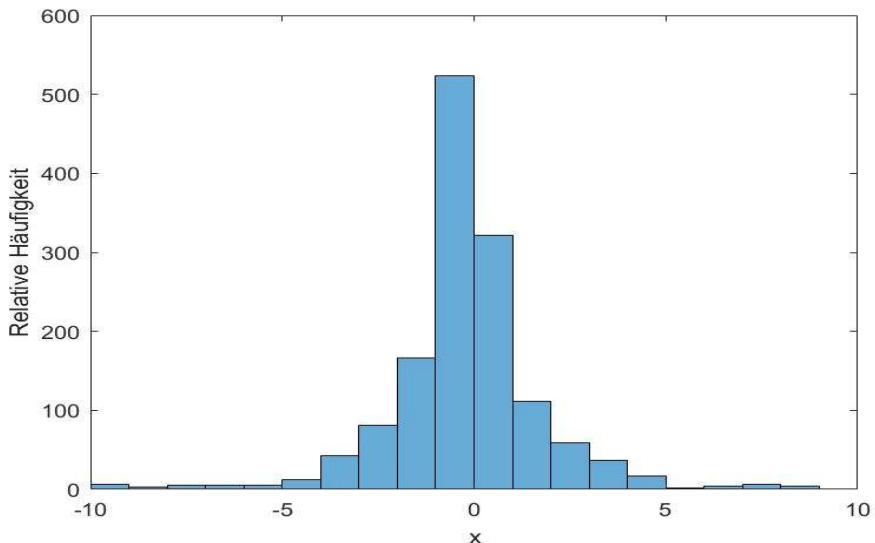


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

56

## Histogramm: Nr. 20

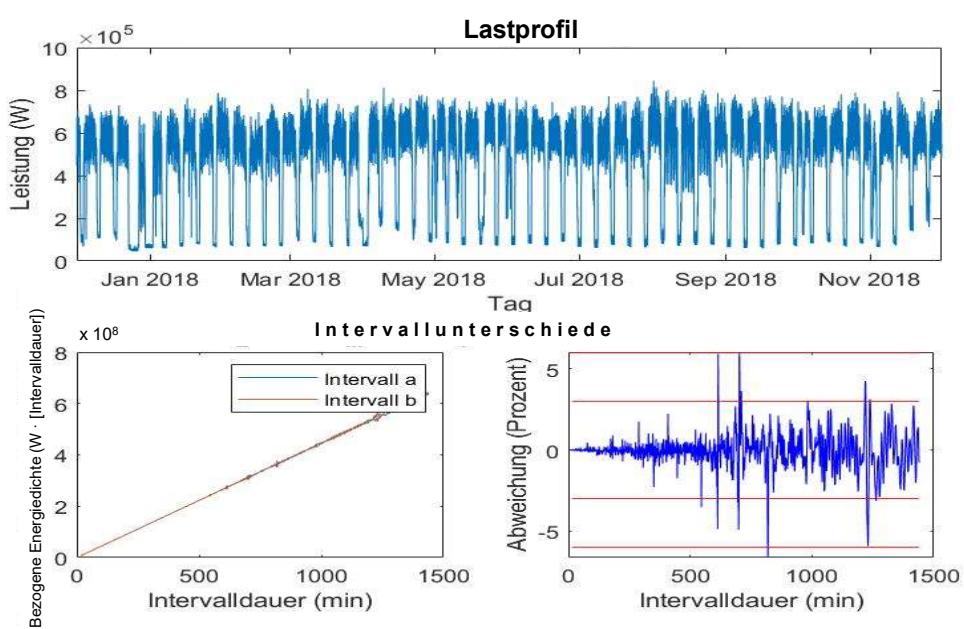


10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

57

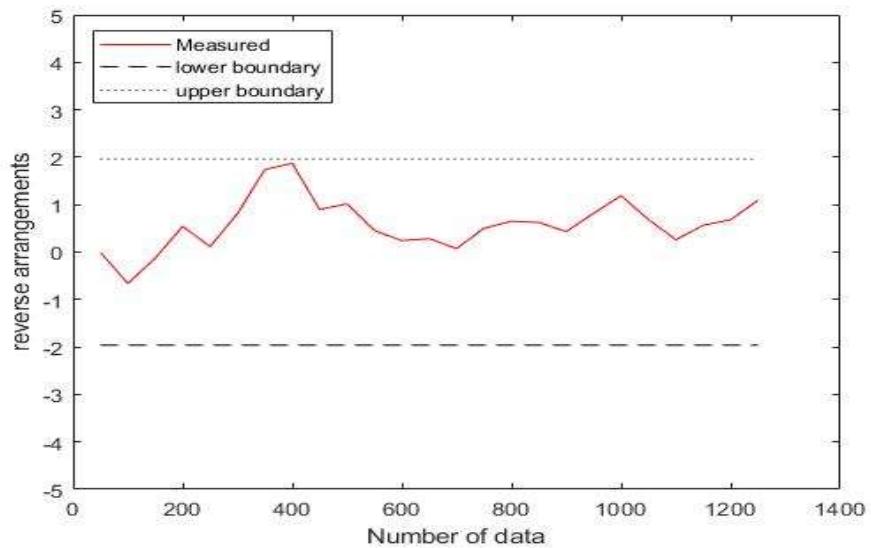
## Nr. 21, Hersteller von Dreh- und Verzahnungsteilen



10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

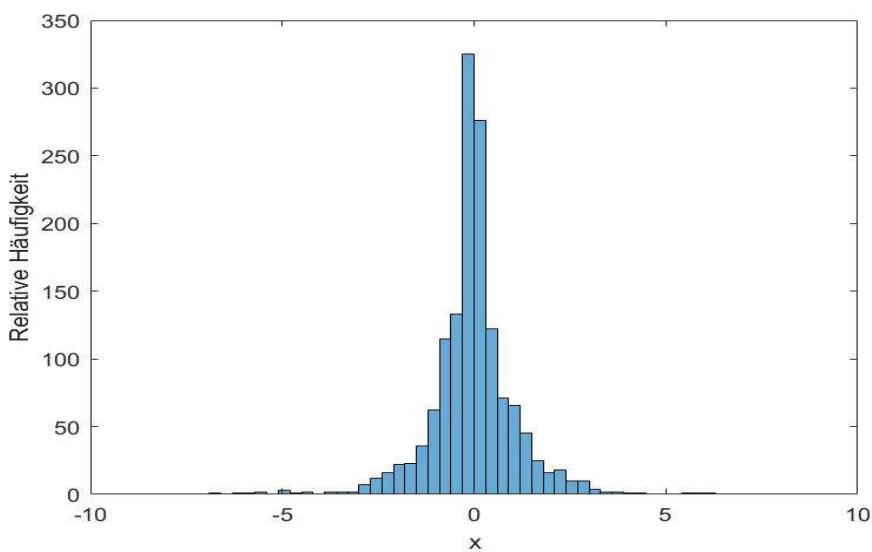
58

**Nr. 21**

10. Juni 2019

Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

59

**Histogramm: Nr. 21**

10. Juni 2019

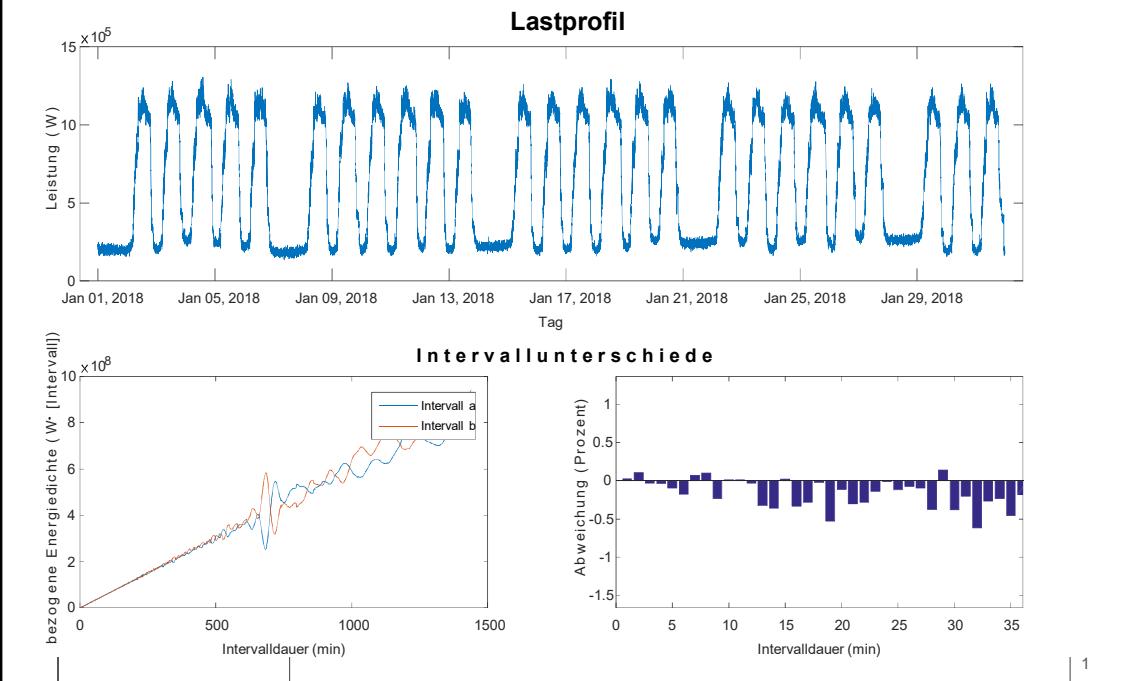
Mustertext, z.B. Dozent, Veranstaltung, etc.

60

## **Anhang D**

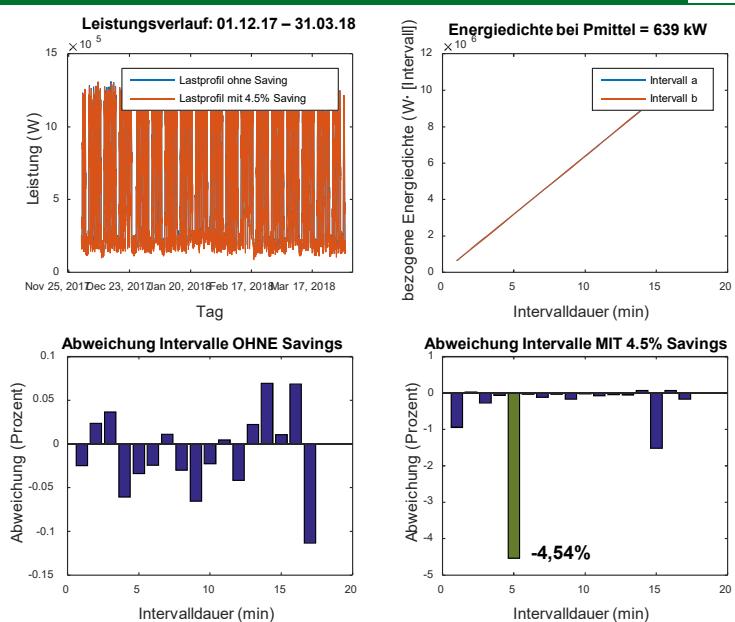
### **Simulation der Einsparung**

## Analyse: Nr. 15, Warenhaus



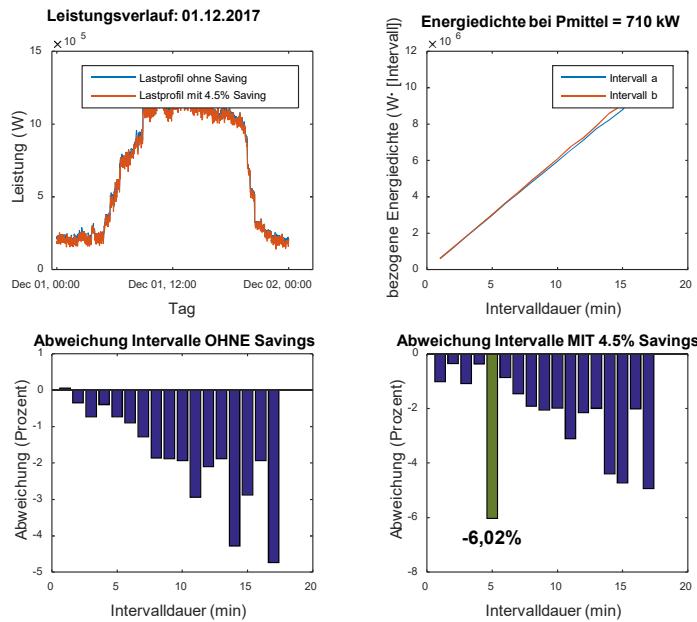
1

## Simulation einer Energieeinsparung von -4,5% für den Datensatz: Nr. 15, Warenhaus



6

## Nr. 15: Tagesauswertung (01.12.2017) mit -4,5% Savings

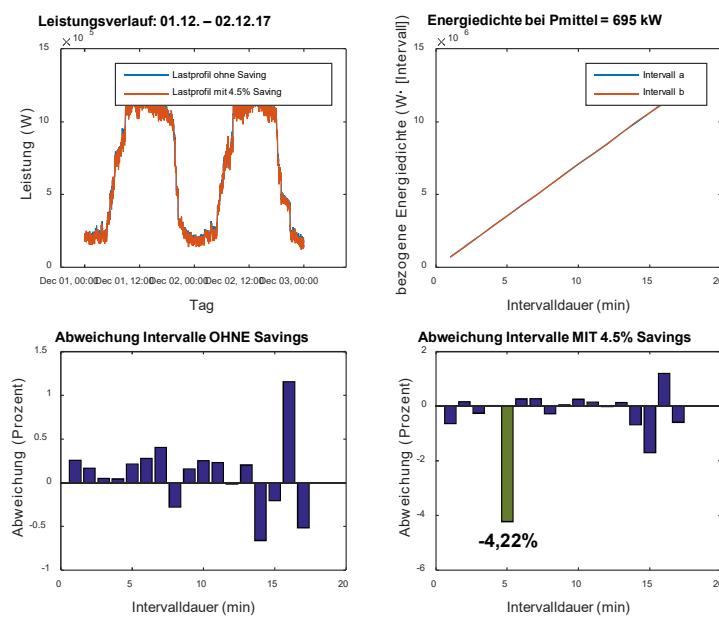


10. Juni 2019

Prof. Dr.-Ing. Jörg Bausch, Fakultät M+V

7

## Nr. 15: Zwei-Tage-Auswertung (01.12.-02.12.2017) mit -4,5% Savings



10. Juni 2019

Prof. Dr.-Ing. Jörg Bausch, Fakultät M+V

8

## **Anhang E**

### **Methode zum Nachweis der Stationarität**

## Prüfung der Stationarität der Abweichung aufeinanderfolgender Intervalle

**Methode nach Julius S. Bendat, Allan G. Piersol, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 4th Edition, p. 99; ISBN: 978-0-470-24877-5**

Consider a sequence of  $N$  observations of a random variable  $x$ , where the observations are denoted by  $x_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ . Now, count the number of times that  $x_i > x_j$  for  $i < j$ . Each such inequality is called a reverse arrangement. The total number of reverse arrangements is denoted by  $A$ .

A general definition for  $A$  is as follows. From the set of observations  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , define

$$h_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i > x_j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.51)$$

Then

$$A = \sum_{i=1}^{N-1} A_i \quad (4.52)$$

where

$$A_i = \sum_{j=i+1}^N h_{ij} \quad (4.53)$$

## Prüfung der Stationarität der Abweichung aufeinanderfolgender Intervalle

**Methode nach Julius S. Bendat, Allan G. Piersol, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 4th Edition, p. 99; ISBN: 978-0-470-24877-5**

For example,

$$A_1 = \sum_{j=2}^N h_{1j} \quad A_2 = \sum_{j=3}^N h_{2j} \quad A_3 = \sum_{j=4}^N h_{3j} \quad \text{etc.}$$

To help clarify the meaning of reverse arrangements, consider the following sequence of  $N=8$  observations:

$$x_1 = 5, \quad x_2 = 3, \quad x_3 = 8, \quad x_4 = 9, \quad x_5 = 4, \quad x_6 = 1, \quad x_7 = 7, \quad x_8 = 5$$

In the above sequence  $x_1 > x_2$ ,  $x_1 > x_5$ , and  $x_1 > x_6$ , which gives  $A_1 = 3$  reverse arrangements for  $x_1$ . Now, choosing  $x_2$  and comparing it against subsequent observations (i.e., for  $i = 2$  and  $i < j = 3, 4, \dots, 8$ ), one notes  $x_2 > x_6$  only, so that the number of reverse arrangements for  $x_2$  is  $A_2 = 1$ . Continuing on, it is seen that  $A_3 = 4$ ,  $A_4 = 4$ ,  $A_5 = 1$ ,  $A_6 = 0$ , and  $A_7 = 1$ . The total number of reverse arrangements is, therefore,

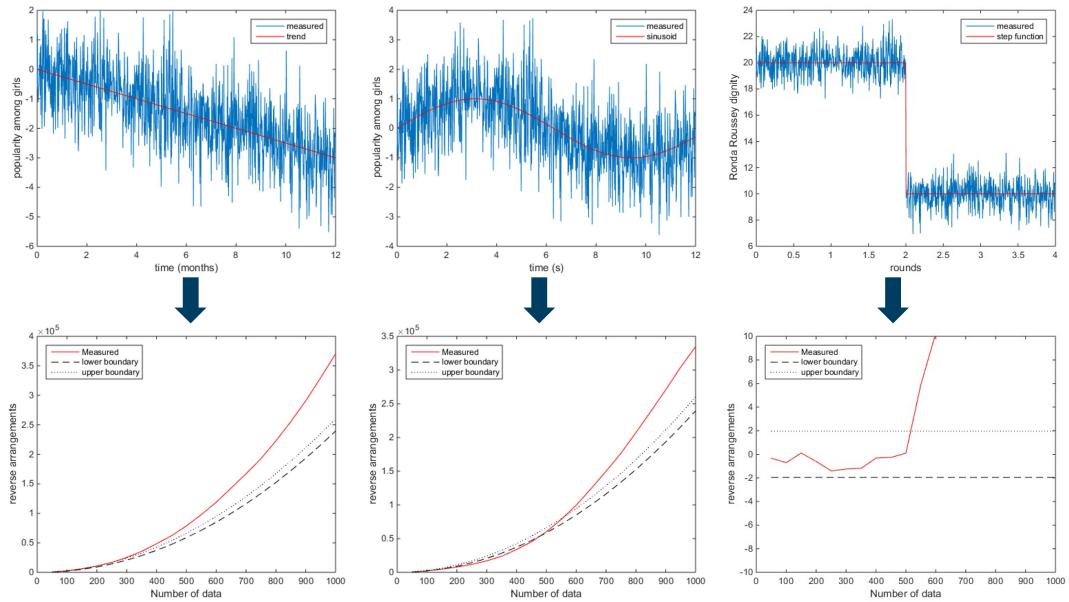
$$A = A_1 + A_2 + \dots + A_7 = 3 + 1 + 4 + 4 + 1 + 0 + 1 = 14$$

If the sequence of  $N$  observations is independent observations of the same random variable, then the number of reverse arrangements is a random variable  $A$ , with a mean variable and a variance as follows [Ref. 4]:

$$\mu_A = \frac{N(N-1)}{4} \quad (4.54)$$

$$\sigma_A^2 = \frac{2N^3 + 3N^2 - 5N}{72} = \frac{N(2N+5)(N-1)}{72} \quad (4.55)$$

## Auswirkungen von Trends, Periodizitäten und Unstetigkeiten auf den Test nach Bendat/Piersol



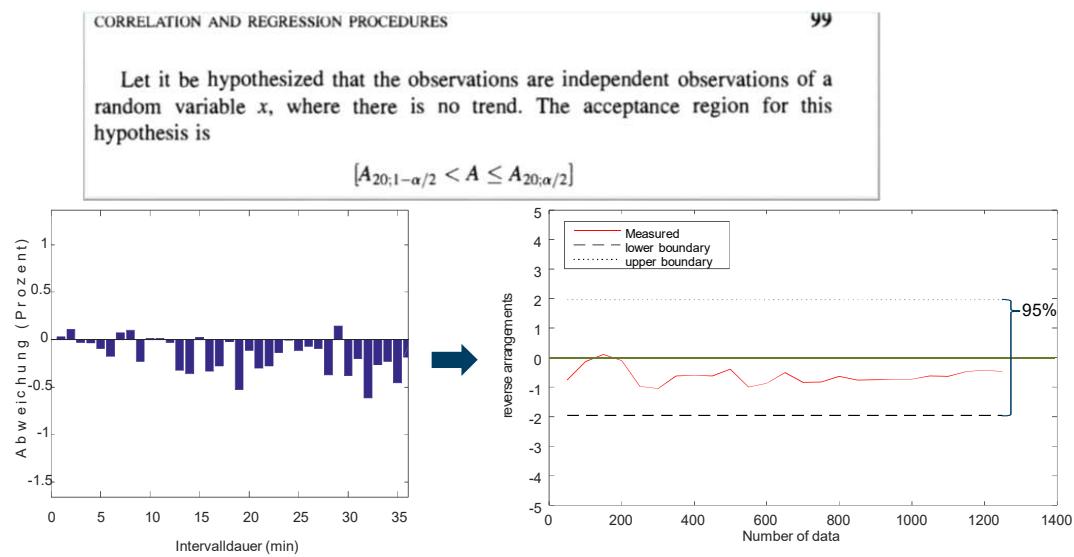
27. Mai 2019

Prof. Dr.-Ing. Jörg Bausch, Fakultät M+V

25

## Signifikanztest mit 95% Signifikanzlevel: Voraussetzung

**Methode nach Julius S. Bendat, Allan G. Piersol, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 4th Edition, p. 99; ISBN: 978-0-470-24877-5**



27. Mai 2019

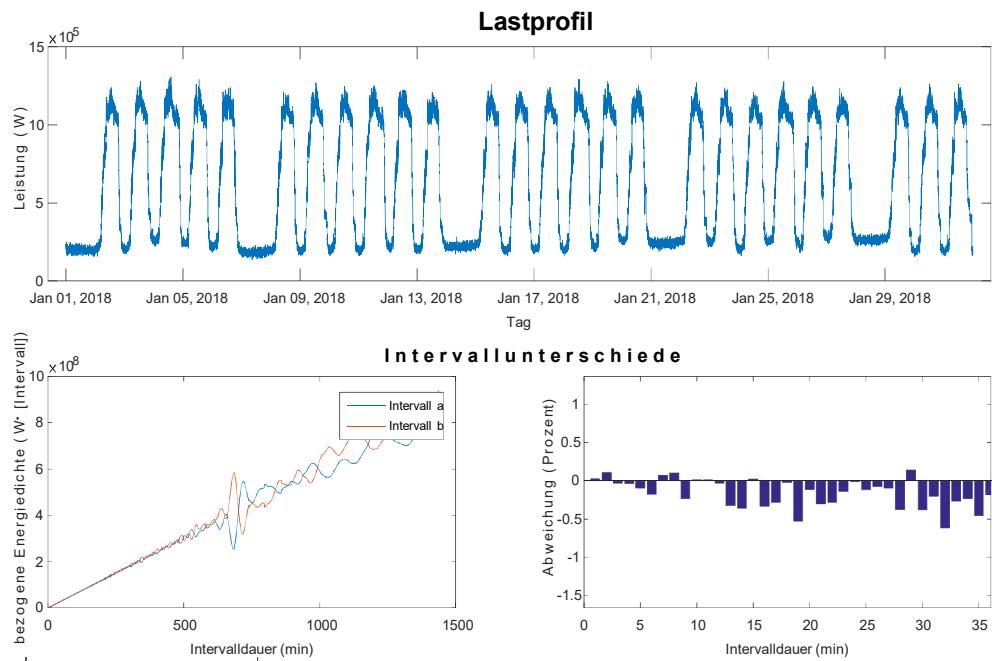
Prof. Dr.-Ing. Jörg Bausch, Fakultät M+V

26

## **Anhang F**

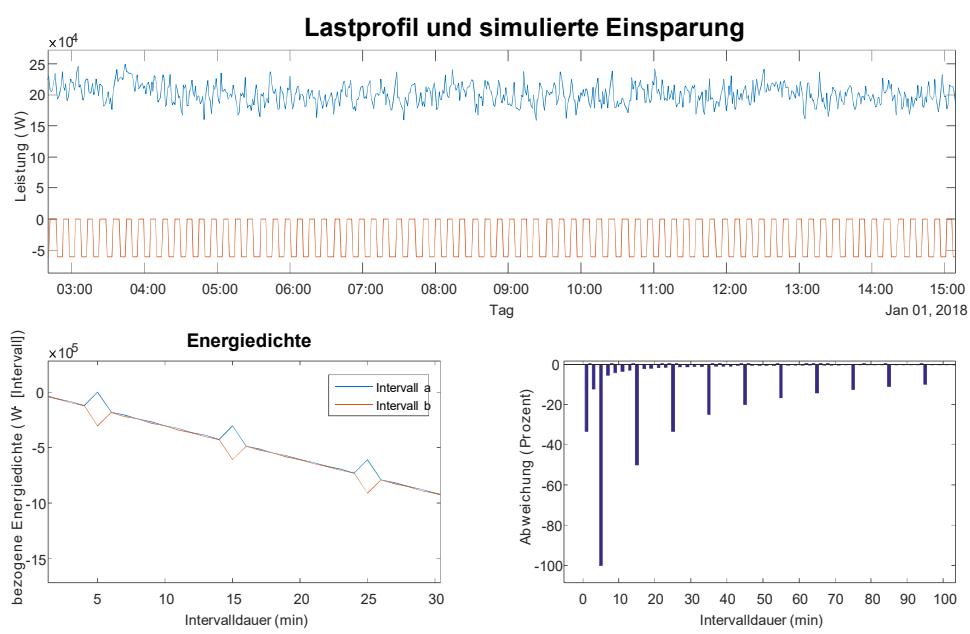
### **Simulation zum Einfluss periodischer Signale und Verschiebung der Abtastung**

## Analyse: Nr. 15, Warenhaus



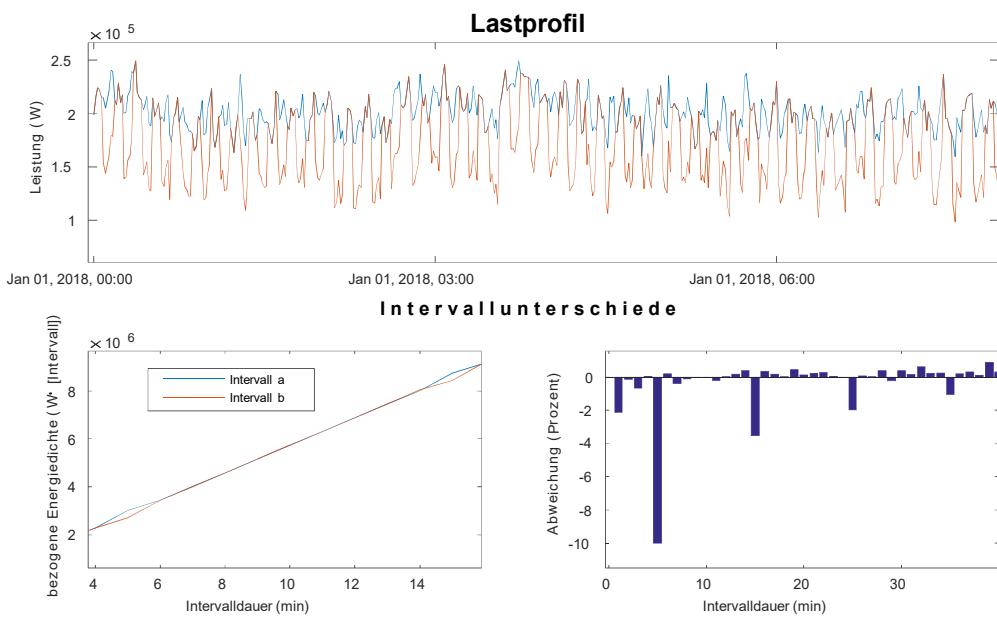
1

## Simulation: Erzeugung des reduzierten Signals mit -10% der mittleren Monatsleistung von Nr. 15, Warenhaus



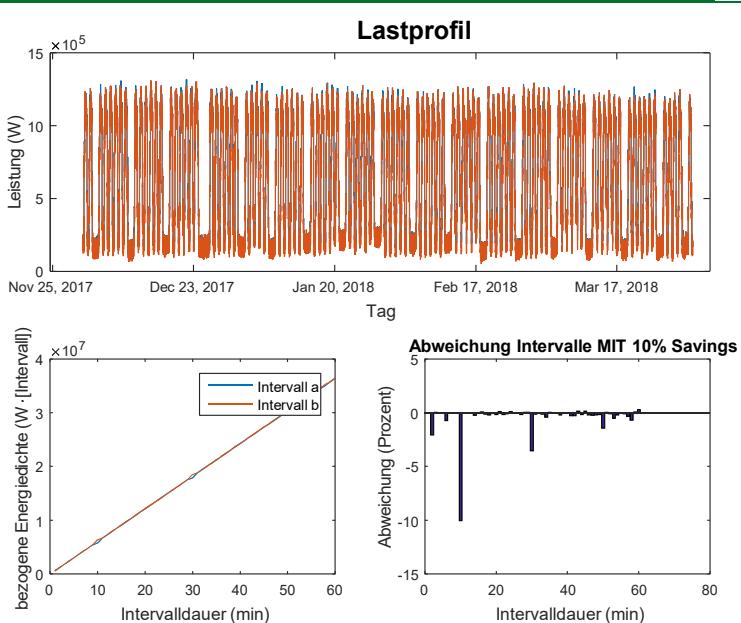
2

## Simulation einer Energieeinsparung von 10% für den Datensatz Nr. 15, Warenhaus



3

## Simulation: Nr. 15, Warenhaus 10% Saving 10 min. Intervall mit genauer Abtastung



4

## Simulation: Nr. 15, Warenhaus 10% Saving mit 10 min. Intervall und 5 min. Versatz

