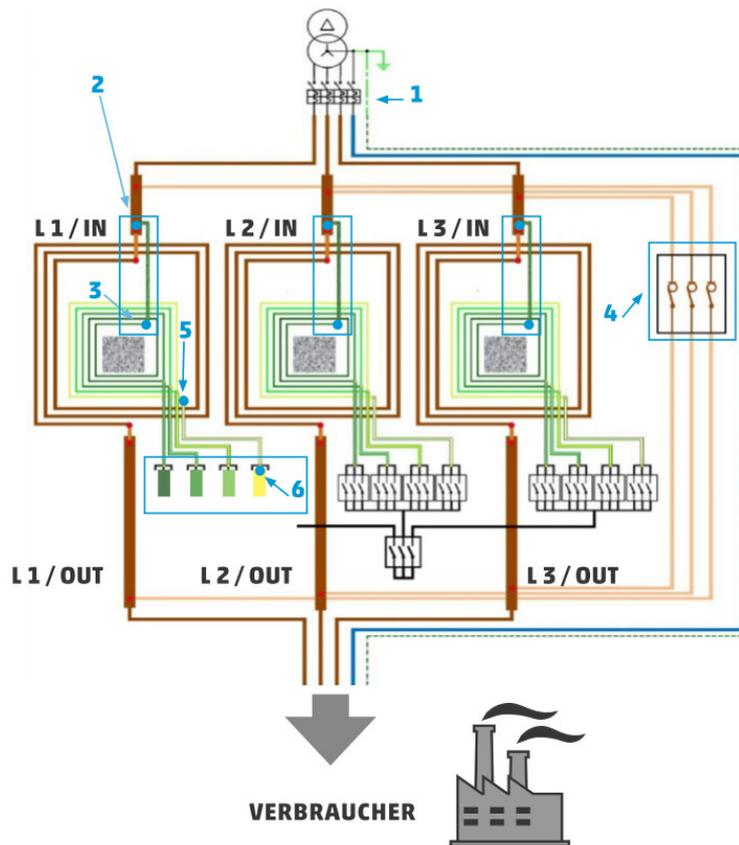




KURZ - VERSION

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

1	Einleitung	3
2	Vergleichende Intervallmessung	3
3	Modellierung des Messverfahrens	3
4	Hardware und Messwerterfassung	4
5	Ergebnisse	4
6	Erwartungswert, Standardabweichung und Stationarität	4
7	Simulation	5
8	Auswertung realer Messungen	7
9	Quantifizierung der Einsparungen	9
10	Zusammenfassung	9

Abbildungsverzeichnis

1	Diskrete Leistungsmessung und Intervall-Prinzip des Livarsa-Messverfahrens	3
2	Schaltprinzip zur Untersuchung der Messdaten	5
3	Kumulative Verteilungsfunktionen über alle Tage und Messaufzeichnungen bei einer Intervalldauer von 5 min. - alle Datensätze	7
4	Kumulative Verteilungsfunktionen aller Standardabweichungen über alle Tage und Messaufzeichnungen Intervalldauern von 1, 5, 10 und 15 min. - alle Datensätze . . .	8
5	Simulation zwei Arbeitstage mit -4,5% Savings - 1.-2.12.2017 bei Nr. 15	9
6	Reale 12-Stunden-Messung mit aktivem EPplus-System	10
7	Lastprofil der 12-Stunden-Messung mit aktivem EPplus-System	11
8	Auswertung einer Beispielmessung	11

Tabellenverzeichnis

1	Liste der Konfidenz-Niveaus in Prozent für einen Monat	6
---	--	---

Anmerkung

Für weiterführende Details sei auf die vollständige Version 1.4 vom 11. August 2019 verwiesen.

1 Einleitung

Bei zentral installierten Energieeffizienzmaßnahmen 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 geringe Einsparungen nachzuweisen und auch zu quantifizieren.

2 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 Energieeffizienzmaßnahme unterscheiden sich dabei nur geringfügig, so dass beide Messreihen stark miteinander korrelieren. Wird nun eine Energieeinsparung durch den Einsatz einer Energieeffizienzmaßnahme erzielt, so kann diese über die Energiedichte der aufeinanderfolgenden Intervalle nachgewiesen und quantifiziert werden.

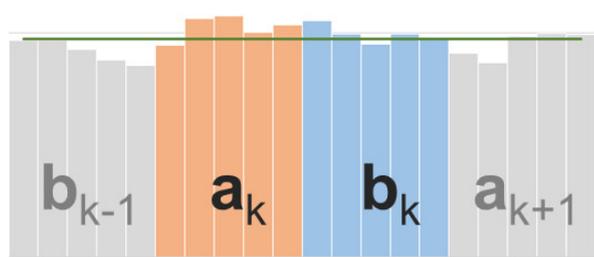


Abbildung 1: Diskrete Leistungsmessung und Intervall-Prinzip des Livarsa-Messverfahrens

3 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. (?) 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 aufeinanderfolgenden Intervallen sogar identisch ist. Durch die aufeinanderfolgenden Messintervalle und deren Vergleich auf Basis der Energiedichte, die sich je Intervall aus den aufgezeichneten Leistungsmessdaten nach:

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

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

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

$$E_{a_k} > E'_{b_k} \text{ und } E_a > E'_b \Rightarrow e_b \cdot E_a = E'_b, \quad (2)$$

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. Die Einsparung in Prozent ergibt sich nach

$$\eta_b = \frac{E_a - E_b}{E_a} \cdot 100 \text{ (in Prozent \%)}. \quad (3)$$

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 1 dargestellte Intervallfolge bestehend aus abwechselnd A und B lässt sich somit wieder aus

$$F_{ab}(n) = \begin{cases} F_a(n) & , \text{ wenn } n \text{ ungerade} \\ F_b(n) & , \text{ wenn } n \text{ gerade} \end{cases} \text{ mit } n = 1, 2, \dots \quad (4)$$

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

4 Hardware und Messwernerfassung

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.

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.

6 Erwartungswert, Standardabweichung und Stationarität

Es wurden für alle Messreihen und jeweils für alle Tage die Verteilungsfunktion in kumulativer Darstellung ausgewertet. In Abbildung 3 ist die so entstandene Kurvenschar dargestellt. Es ist deutlich

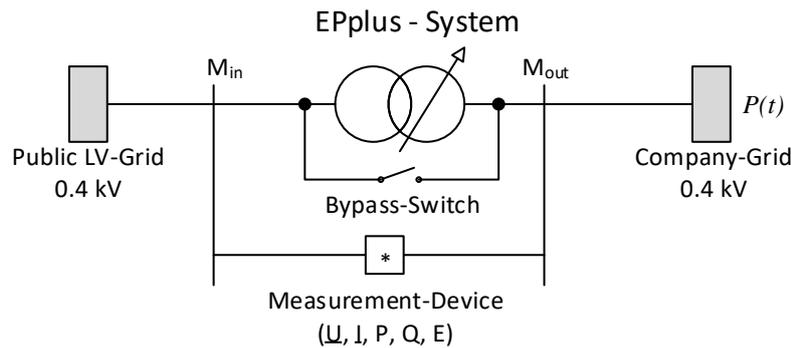


Abbildung 2: Schaltprinzip zur Untersuchung der Messdaten

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 für alle aufgezeichneten Tageswerte aufweist. Es wurde nachgewiesen, dass die Hypothese der Gleichheit der Erwartungswerte beider Intervalle a und b zutreffend ist. 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 100 kW sind üblich. Dies führt, je nach Lastprofil, zu großen Streuungen bei gleichbleibendem Erwartungswert. Die Standardabweichung der einzelnen Tageswerte ist in Abbildung 4 dargestellt. Man sieht, dass sich diese nur gering voneinander unterscheiden. In Tabelle 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 Messintervallreihen entsprechend der Modellierung stationär verhalten. Es wurden in keinem der Messintervallreihen 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 Einsparung verfälschen würden. 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.

7 Simulation

Als Beispiel sind zwei Arbeitstage des Datensatzes Nr. 15 mit einer simulierten Einsparung von im Mittel 4,5% in Abbildung 5 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 entsprechenden Intervall mit dem entsprechenden Niveau der Einsparung beobachten. Alle Vielfa-

Nr.	Industrie Typ	Konfidenz-Intervall		
		80%	90%	95%
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 1: Liste der Konfidenz-Niveaus in Prozent für einen Monat

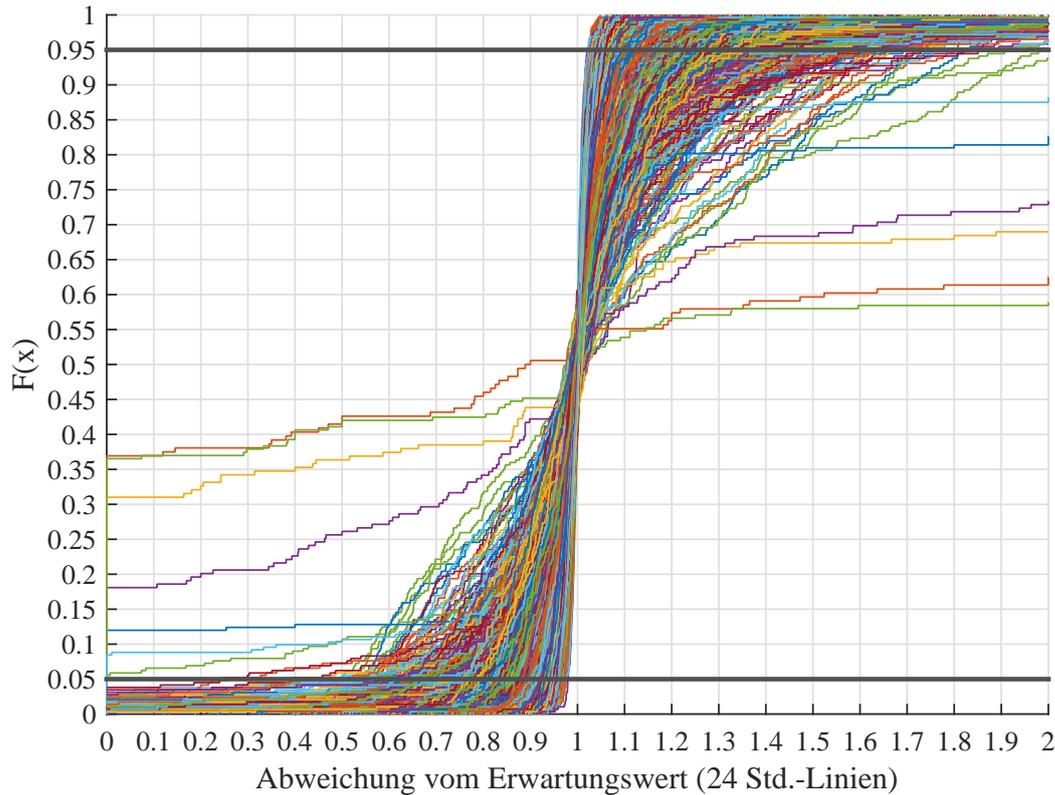


Abbildung 3: Kumulative Verteilungsfunktionen über alle Tage und Messaufzeichnungen bei einer Intervaldauer von 5 min. - alle Datensätze

chen des Referenzintervalls zeigen ebenfalls einen reduzierten Anteil der Einsparung. Im Beispiel sind dies fünf Minuten und dazu die Intervalle 15, 25 usw. Im Anhang der Hauptstudie 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%.

8 Auswertung realer Messungen

Von der Livarsa GmbH wurden ebenfalls reale Messungen mit zugeschaltetem EPplus-System, die nach dem beschriebenen Verfahren aufgezeichnet wurden, bereitgestellt. An einem Beispiel für die Messaufzeichnung eines Spezialisten für Antriebslösungen, kann bei Auswertung entsprechend Abbildung 7 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 $\mu_a = 26.112kW$ und für die bei eingeschalteter Energieeffizienz einrichtung aufgezeichnete Intervallreihe b ein Wert von $\mu_b = 24.853kW$. 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 6 dargestellte Diagramm. Hierin zeigt die graue Linie das

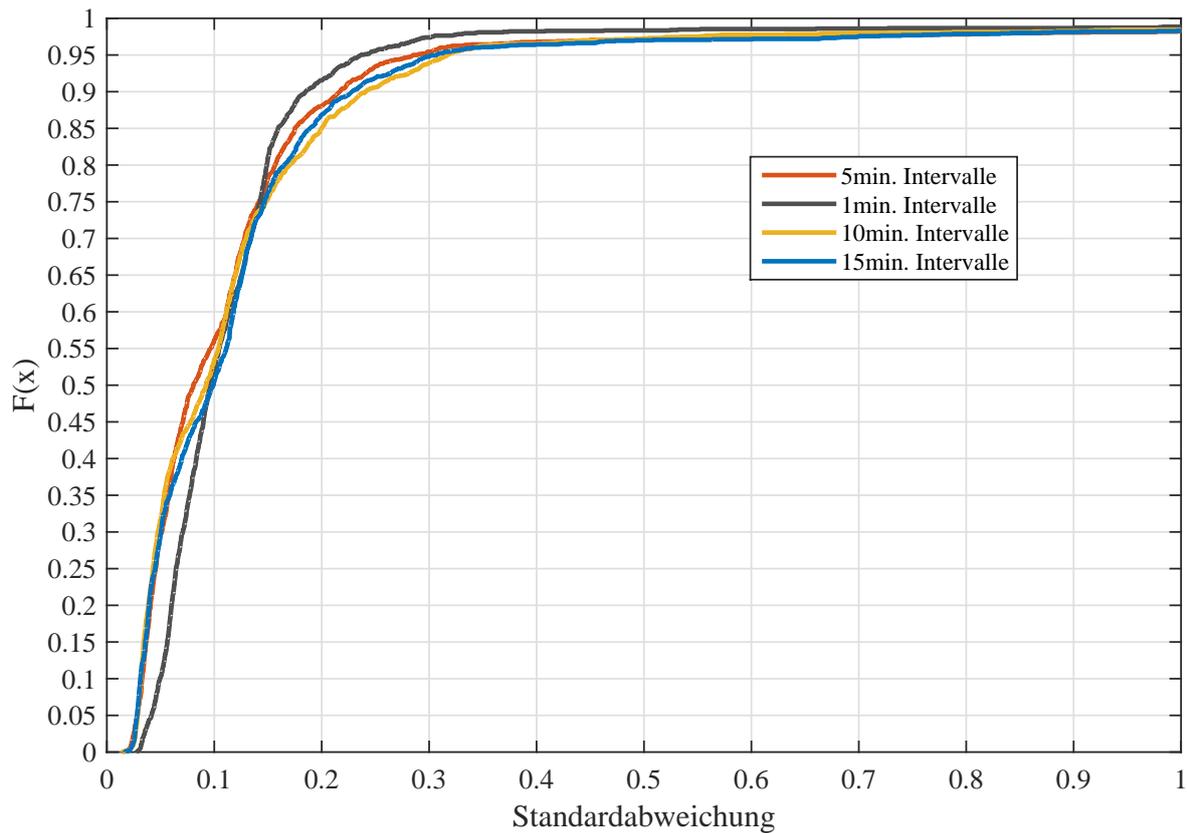


Abbildung 4: Kumulative Verteilungsfunktionen aller Standardabweichungen über alle Tage und Messaufzeichnungen Intervalldauern von 1, 5, 10 und 15 min. - alle Datensätze

Regressionsmodell für den Referenzfall - es finden keine Schaltungen der Energieeffizienzeinrichtung statt. Die orange 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 Regressionsfunktionen 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 ??, 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 $\sum E_a - \sum E_b = 100,75 kWh$, 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 ¹ R^2 , weist 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

$$R_{korr}^2 = 1 - \frac{\sum (b_i - \tilde{\beta}_1 \cdot a_i)^2}{\sum b_i^2}. \quad (5)$$

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

Die in Abbildung 7 dargestellten Messreihen zeigen einen deutlichen Unterschied im Lastprofil-Verlauf. 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

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

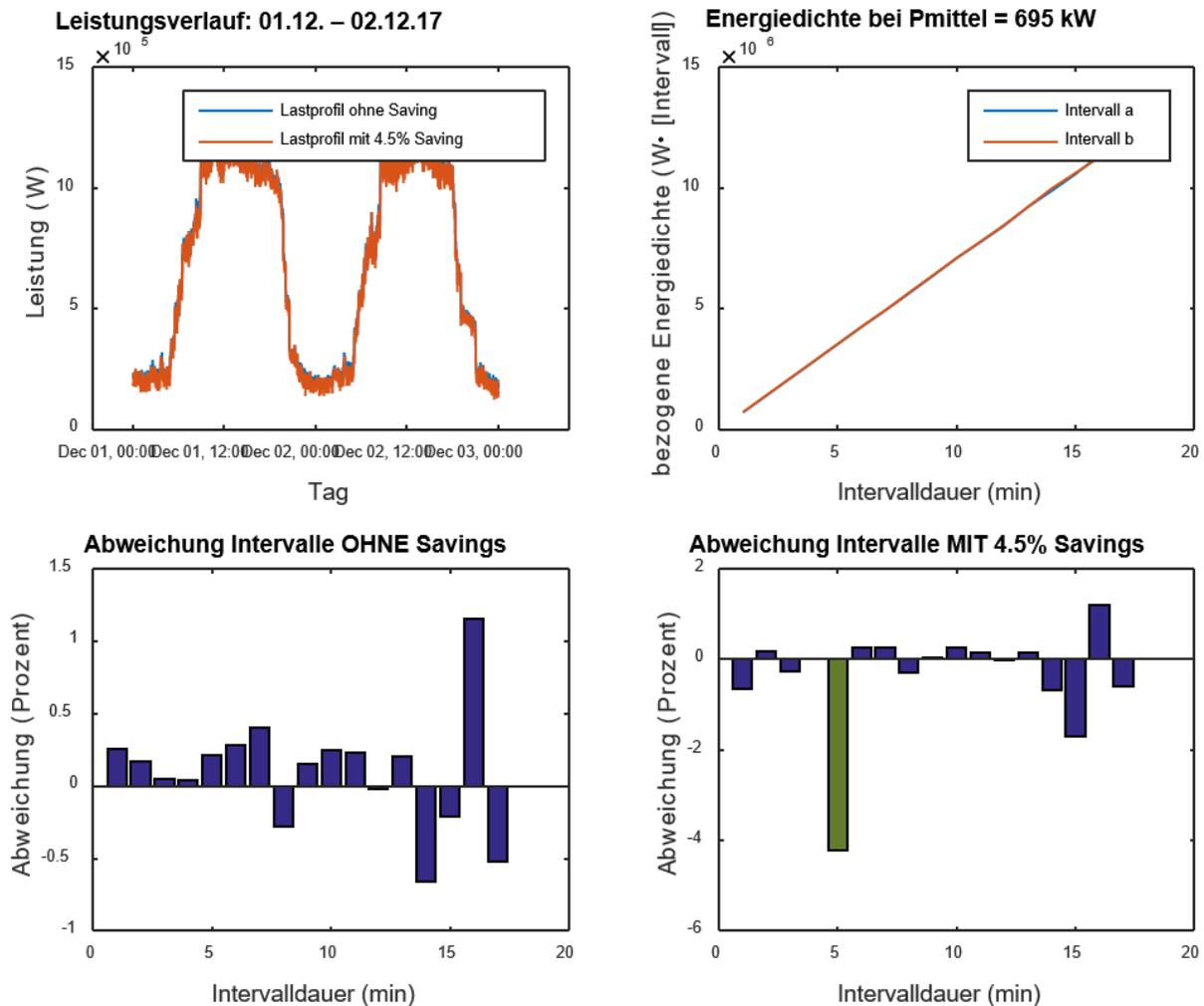


Abbildung 5: Simulation zwei Arbeitstage mit -4,5% Savings - 1.-2.12.2017 bei Nr. 15

Intervalle a verläuft. Beide Messreihen zeigen aber auch sehr ähnliche Tendenzen im Verlauf, was für den hohen Korrelationskoeffizienten spricht. Somit sind die Messungen erwartungsgemäß, eine Reduzierung des Energieverbrauchs ist nachweisbar.

9 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.

10 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 8) zeigen die orange Linie den Fall ohne Energieeffizienz Einrichtung und keiner Einsparung und die blaue Linie bei Zuschal-

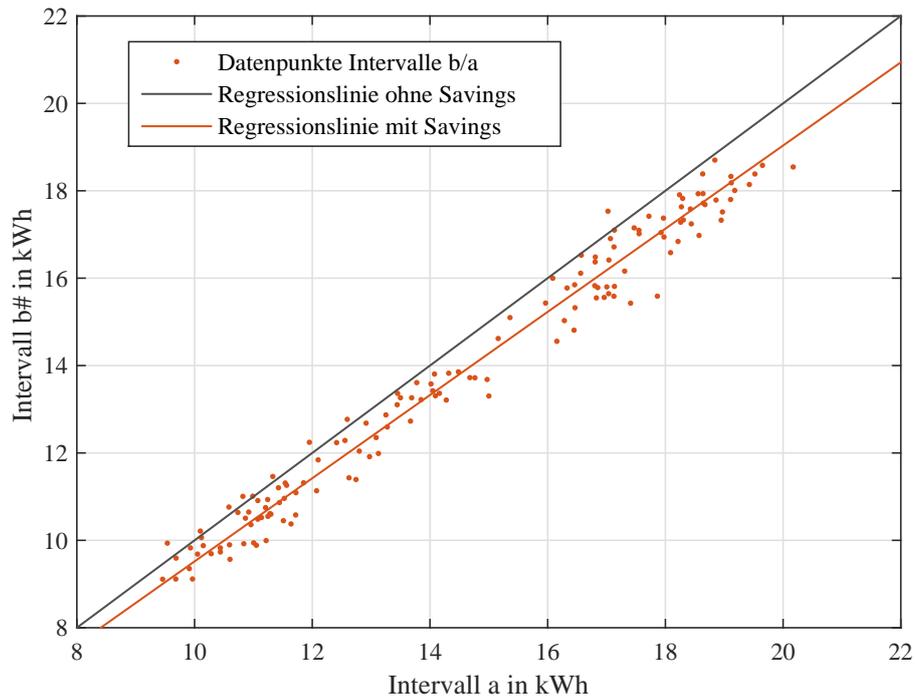


Abbildung 6: Reale 12-Stunden-Messung mit aktivem EPplus-System

tung mit einer Einsparung von 4,91% bei einer statistischen Sicherheit von 97,6%. Die Annahme, dass aufeinanderfolgende (5 min.) Intervalle im Mittel die gleiche Energiedichte 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 in der angewendeten Form grundsätzlich geeignet eine Reduzierung des Energieverbrauchs nachzuweisen und zu quantifizieren. Je mehr Messwerte die Analysen umfassen, desto geringer wird der Fehler.

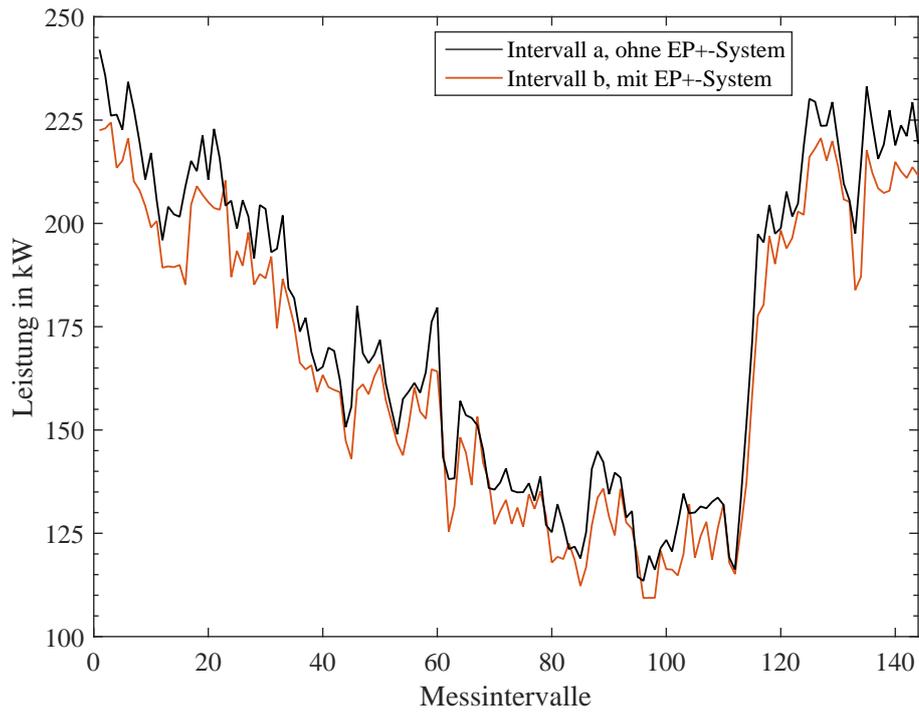


Abbildung 7: Lastprofil der 12-Stunden-Messung mit aktivem EPplus-System

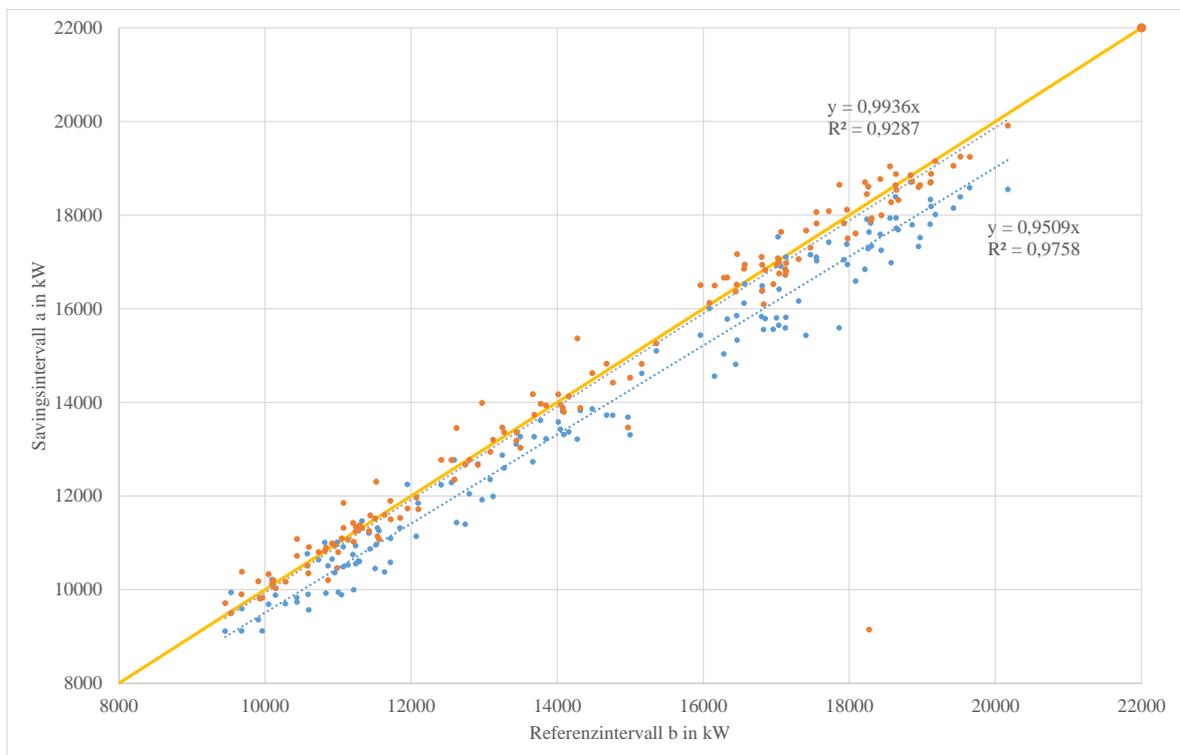


Abbildung 8: Auswertung einer Beispielmessung