

Sachbericht

Anlage zum Verwendungsnachweis Bundesförderung für das Pilotprogramm
Einsparzähler

1 Energetische Ausgangsbasis und Baseline

Bitte führen Sie aus, wie Sie bei Ihren Endkunden die energetische Ausgangsbasis bestimmen. Gehen Sie dabei insbesondere darauf ein, über welchen Zeitraum Sie die Baseline bilden, welche relevanten Variablen (Einflussfaktoren und Nutzen) Sie hierbei identifiziert haben, wie Sie diese (messtechnisch) erfassen und mit welchem Verfahren Sie den Einfluss dieser Größe quantifizieren (beispielsweise mittels linearer Regression).

Die energetische Ausgangsbasis ist wegen der Heterogenität von Lüftungsanlagen und der unterschiedlichen (Wärme-)Energieträger je Endkunde projektspezifisch zu definieren. In Kapitel 13 (siehe unten) sind alle Projekte aufgelistet, für die eine Baseline-Messung, oftmals mit mobilem Messequipment, stattgefunden hat. Planmäßig wurden mit dem ersten Verwendungsnachweis noch keine Energieeinsparungen für die Leistungskomponente geltend gemacht, auch wenn das erste Projekt schon im Mai 2019 und damit im letzten Berichtszeitraum (ZVN1) umgesetzt wurde. In diesem Berichtszeitraum (ZVN2) kamen zwei weitere Endkundenprojekte mit Geltendmachung der Leistungskomponente hinzu.

Bei den übrigen Projekten kam es leider – über die Baseline-Messung hinaus – noch nicht zur Umsetzung von Effizienzmaßnahmen.

Wegen der komplexen Endkunden-spezifischen Modellbildung für die Baseline beschränken wir uns in den nachfolgenden Ausführungen darauf, die Baseline für diejenigen Endkundenprojekte zu beschreiben, für welche wir in diesem Zwischenverwendungsnachweis Einsparungen für Leistungskomponente geltend machen. Dies betrifft das Schnellrestaurant PLZ-94_S1 (Neubau).

1.1 Schnellrestaurant Nr. PLZ-94_S1 (PLZ Gebiet 94, Bayern)

Beim Schnellrestaurant in PLZ-94_S1 handelt es sich um ein im Juli 2019 neu eröffnetes Restaurant einer Fast-Food-Kette. Im Auftrag des Franchisenehmers rüsteten wir hier am 19. Dezember 2019 ein Monitoring-System für die Lüftungsanlage nach. Um aufwändige Abstimmungen zur Datenübergabe mit dem Steuerungslieferanten der Lüftungsanlage zu vermeiden, sahen wir hier Messtechnik vor, die es nicht nur ermöglichte, den Energieverbrauch der Lüftung und der insgesamt drei Wärmepumpen zur Raumlufthandhabung zu erfassen, sondern darüber hinaus wesentliche Temperaturen, um das Betriebsverhalten der Anlage bewerten zu können.

Das einsparrelevante technische System besteht aus einer kombinierten Zu- und Abluft-Anlage mit Wärmerückgewinnung. Die Zuluft kann über zwei Kältemaschinen, welche auch im Wärmepumpenbetrieb heizen können, wunschgemäß temperiert werden. Da die Zulufttemperatur für die Küche mit der hohen Wärmeentwicklung tendenziell für den Gästebereich zu kühl ist und andererseits aber auch nicht unabhängig von der Küche temperiert werden kann, dient für den Gästebereich eine zusätzliche Multisplit-Wärmepumpe (und -Kältemaschine) über drei Decken-Umluft-Kassetten der Raumlufthandhabung. Die Umluftkassetten werden durch das Restaurant-Personal per Fernbedienung händisch ein- und ausgeschaltet. Ebenso kann das Restaurant-Personal die gewünschte Solltemperatur einstellen.

Das Restaurant ist von 11:00 bis 22:00 geöffnet. An den Öffnungszeiten hat sich auch während der Corona-Beschränkungen 2020 nichts geändert.

Kurze Zeit nach der Inbetriebnahme des Monitorings fiel uns auf, dass sowohl die Lüftungsanlage als auch die Umluft-Kassetten im 24 Stunden-Betrieb liefen, siehe Screenshot der ersten Betriebswochen:

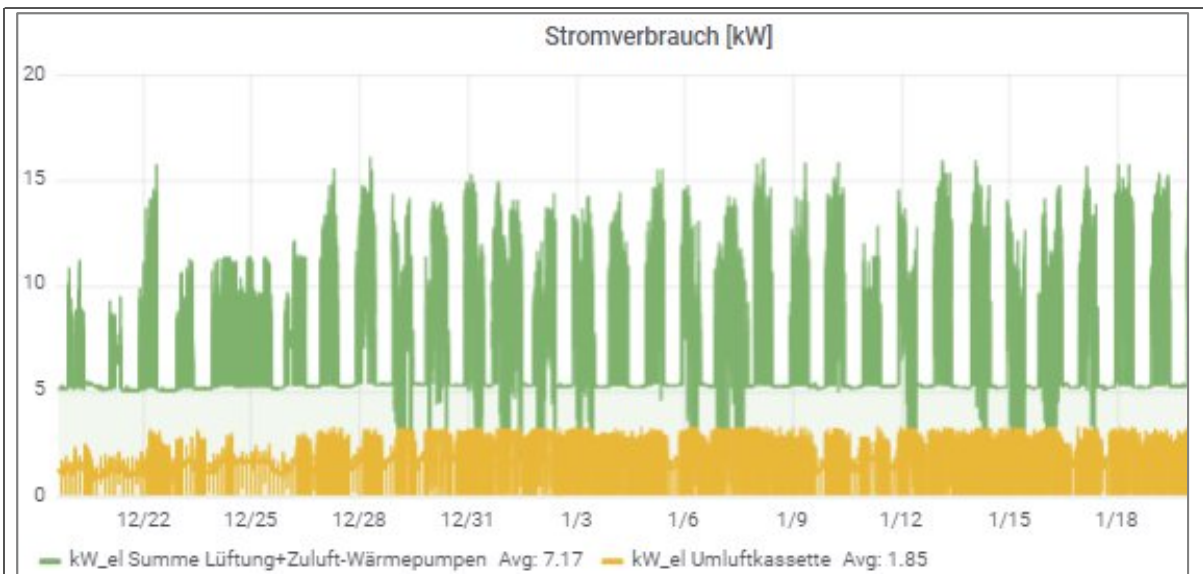


Abbildung 1: durchgehender Betrieb von Lüftung und Wärmetechnik während der Anfangszeit nach Monitoring-Inbetriebnahme. Die grüne Linie zeigt den Summen-Elektroenergieverbrauch von Zuluft-Ventilator, Abluftventilator und den beiden Zuluft-Wärmepumpen. Die gelbe Linie zeigt den Strombedarf für die Split-Wärmepumpe zur Temperierung des Gästebereichs.

Dieser durchgehende Lüftungsbetrieb ist technisch nicht erforderlich. Nur in geringem Umfang sind Vor- und Nachlaufzeiten über die Gäste-Öffnungszeiten hinaus erforderlich (siehe dazu auch die Abbildung in Kapitel 6). Folglich haben wir den Restaurantbetreiber über diese Energieeinsparmöglichkeit informiert, was dieser dann auch beim Betrieb der Anlage umsetzte, wie die nachfolgende Abbildung zeigt.

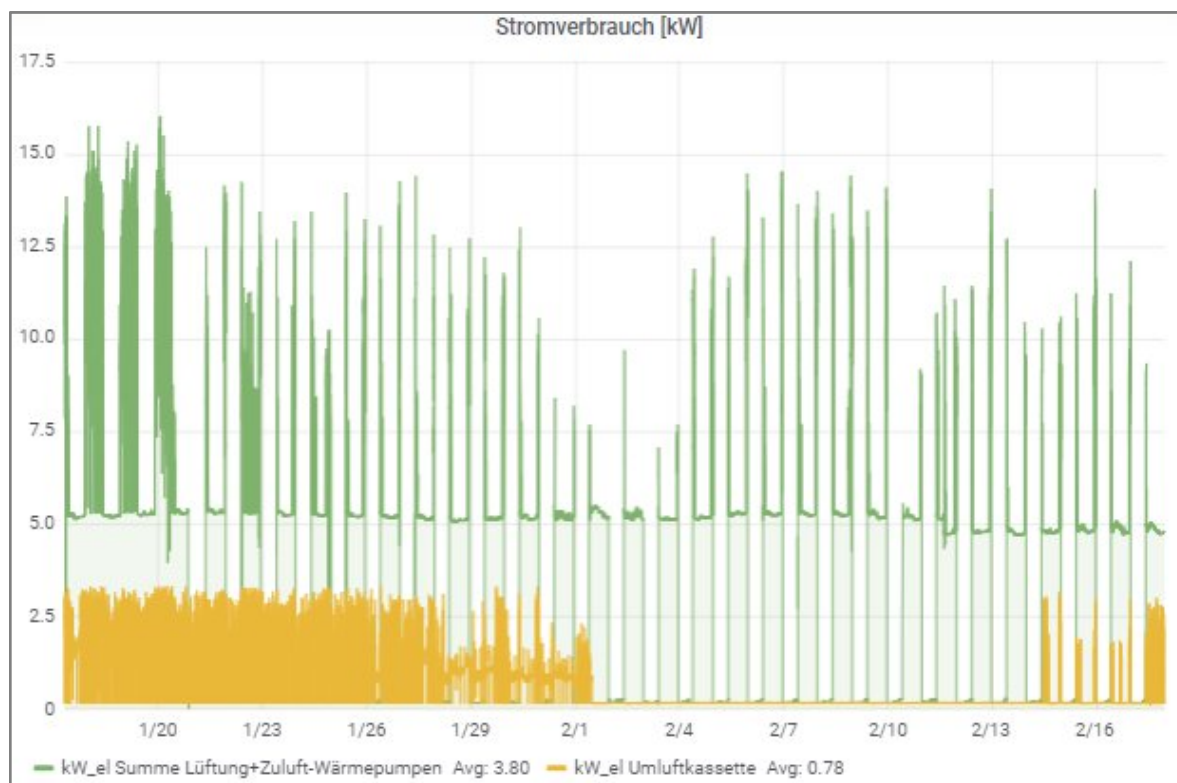


Abbildung 2: sukzessive Anpassung des Betriebs von Lüftungsanlage und Decken-Umluft-Kassetten an die Erfordernisse

Wie Abbildung 2 zeigt, wurde zunächst am 20.01. der Nachtbetrieb der Lüftungsanlage abgestellt, am 01.02. wurden sodann die Deckenkassetten komplett abgestellt, bevor diese am 14.02. ebenfalls den „Nur-Tag-Betrieb“ wieder aufnahmen:

Der in Abbildung 1 dargestellte 24 Stunden-Betrieb vom 19.12.2019 bis zum 20.01.2020 diente zur Generierung des Referenz-Energieverbrauchs (= Baseline), da sich, ausgehend davon, nun Energieeinsparungen ergaben. Nun stellt sich also die Frage, welches die relevanten Einflussgrößen auf den Betrieb sind, um die Baseline adäquat zu modellieren.

In der nachfolgenden Abbildung sind die Umgebungs- und die Zulufttemperaturen über den Baseline-Zeitraum dargestellt:

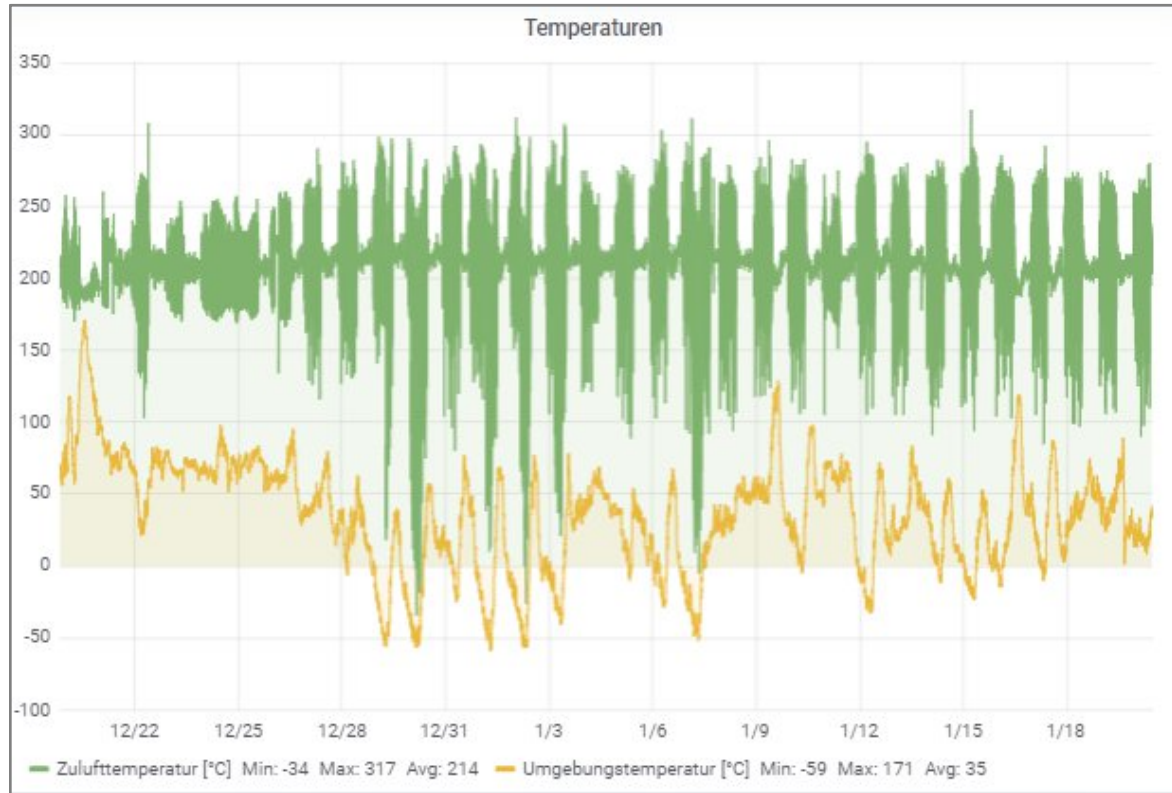


Abbildung 3: Zulufttemperatur (grün) und Umgebungstemperatur (gelb) über den Baseline-Zeitraum

Beim Blick auf die gemessenen Temperaturen in Abbildung 3 fällt auf, dass – abgesehen von regelungstechnischen Schwingungen einer suboptimalen Regler-Einstellung – die Zulufttemperatur unabhängig von der Umgebungstemperatur ist.

Ebenfalls fällt weiter oben in Abbildung 1 auf, dass es Intervalle mit konstanten Verbräuchen (von ca. 5 kW) gibt und solche, wo diese Verbräuche deutlich abweichen. Um den Ursachen hierfür auf den Grund zu gehen, lohnt ein Blick in die Messdaten einzelner Tage:

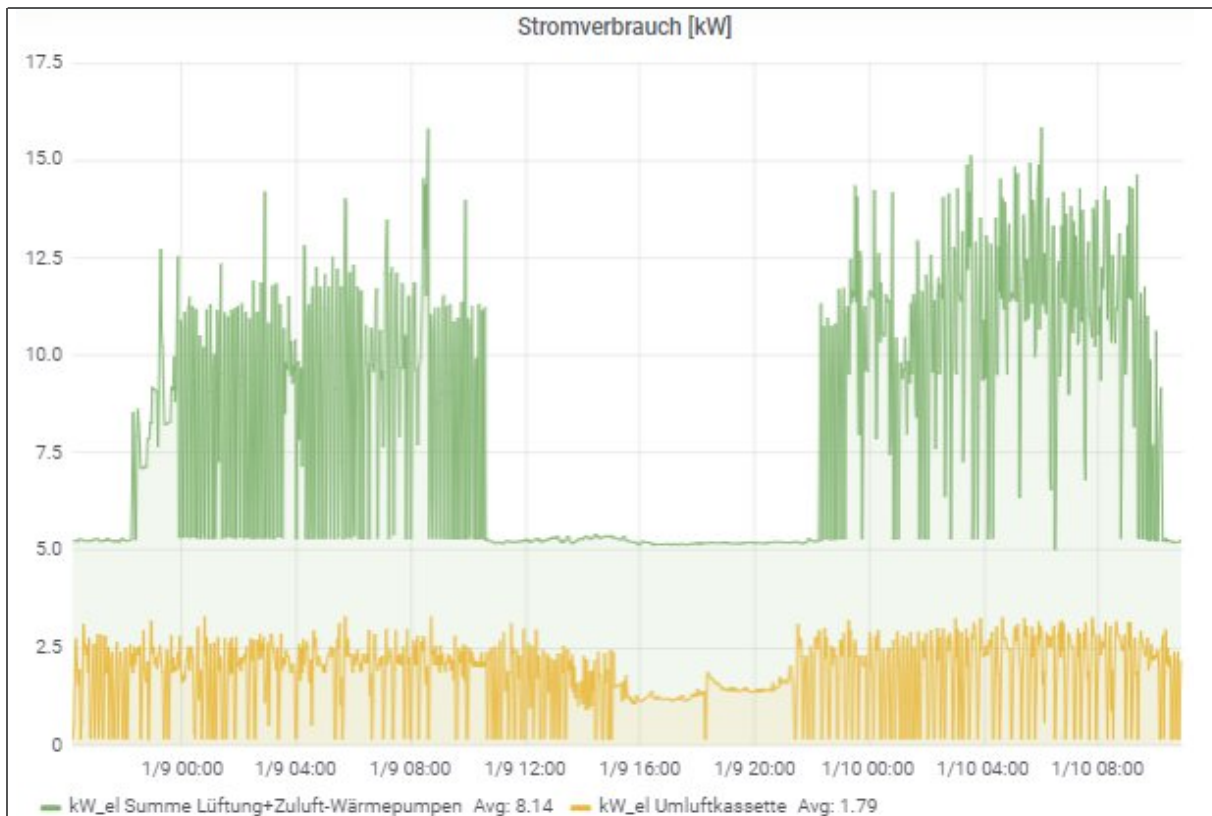


Abbildung 4: eine Grundlast von gut 5 kW wird nachts um höhere Leistungen überlagert.

Aus der vorangehenden Abbildung wird deutlich, dass nachts die Summenstromverbräuche (grüne Linie) aus Ventilatoren und Zuluft-Wärmepumpen steigen. Dies hat den Hintergrund, dass tagsüber die hohe Wärmeentwicklung der Küche über die Wärmerückgewinnung (Abluft erwärmt Zuluft) ausreicht, um die Soll-Zulufttemperatur zu erreichen. Nachts, wenn die Küchenabwärme nicht zur Verfügung steht, muss die Wärmepumpe die notwendige Wärmeleistung aufbringen, um die Zulufttemperatur konstant zu halten.

Aufgrund des unterschiedlichen Tag-Nachtverhaltens wurde nun eine separate Modellierung des Tagbetriebs sowie des Nachtbetriebs gewählt, und zwar jeweils unterschieden nach Summenverbrauch von Ventilatoren und Zuluftwärmepumpen (im Weiteren genannt „Lüftungsgeräte“) und andererseits Umluftkassetten, in Summe also vier Modelle. Da die Wärmeleistung bei konstantem Zuluft-Volumenstrom proportional zur Temperaturerhöhung ist ($Q = m \times c_p \times \Delta T$), liegt es nahe, für den Wärmebedarf bzw. den Elektroenergiebedarf der Wärmepumpen ein lineares Modell anzusetzen.

Aus den Abbildungen Abbildung 1, Abbildung 2 und Abbildung 4 kann abgelesen werden, dass die Leistungsspitzen des Nachtbetriebs sowie des Vor- und Nachlaufbetriebs nicht exakt zu den gleichen Uhrzeiten anfallen. Meist aber dauert der Grundlast-dominierte Tagbetrieb von 11:00 bis 22:00, weswegen entsprechend die Übergangszeiten vom Tagbetrieb zum Nachtbetrieb gewählt wurden. Nachfolgend werden die vier Modelle 1.) Lüftungsgeräte Nachtbetrieb 2.) Lüftungsgeräte Tagbetrieb 3.) Umluftkassette Nachtbetrieb und 4.) Umluftkassette Tagbetrieb dargestellt.

1.) Lüftungsgeräte Nachtbetrieb (23:00 – 10:00)

Die nachfolgende Grafik stellt den nächtlichen Leistungsbedarf der Lüftungsgeräte (2 Ventilatoren + 2 Zuluftwärmepumpen) für den ersten Monat, während dem der 24 Stunden-Betrieb sowohl des

Lüftungsgeräts als auch der Umluftkassetten vorlag, dar, und zwar in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur:

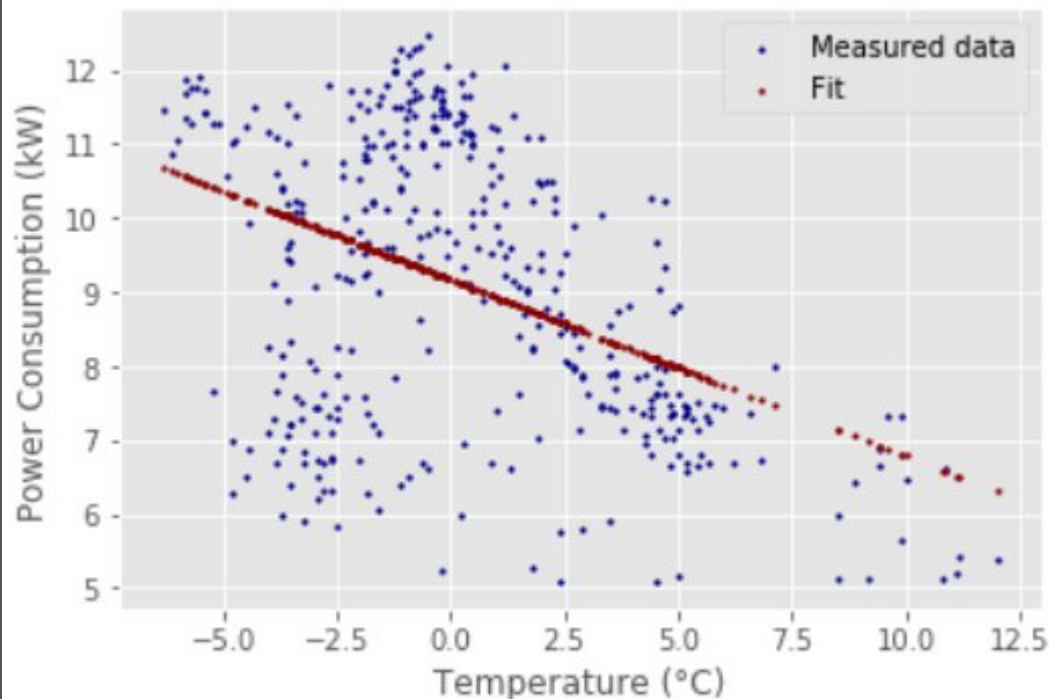


Abbildung 5: nächtlicher Leistungsbedarf der Lüftungsgeräte im Zeitraum 19.12.2019-20.01.2020 jeweils von 23:00 bis 10:00, in blau als Messwerte (Stundenmittelwerte), in rot als Regressionsgerade. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,19

Vor dem Hintergrund der Tatsache, dass im Messdaten-Zeitraum der vorangehenden Abbildung nur sehr vereinzelt Temperaturen oberhalb von 5°C auftraten und gleichzeitig das Bestimmtheitsmaß nicht extrem hoch ist, wurden weitere Betriebsperioden mit 24h-Betrieb gesucht, um gewagte Extrapolationen zu vermeiden und um die Realitätsnähe des Baseline-Modells zu verbessern.

Ein erneuter 24-Stundenbetrieb der Lüftungsanlage lag einen ganzen Monat vom 6.10.2020 bis zum 6.11.2020 vor. Die entsprechenden Nachtbetriebsdaten sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

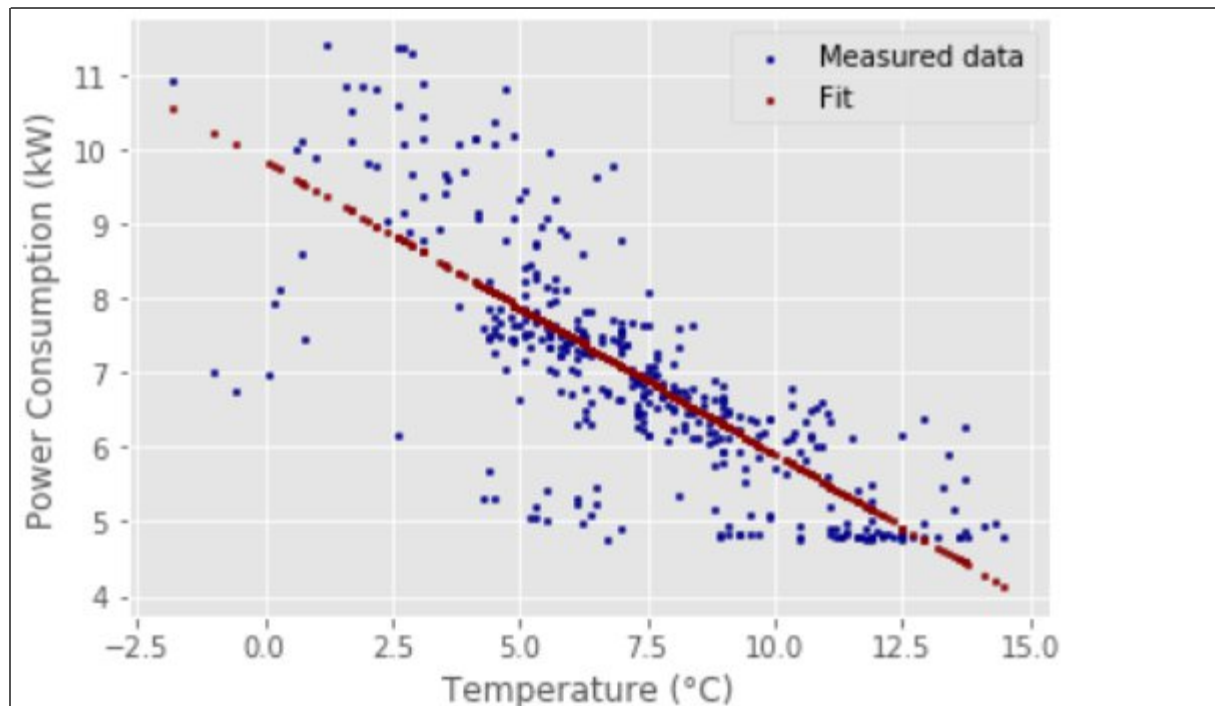


Abbildung 6: nächtlicher Leistungsbedarf der Lüftungsgeräte im Zeitraum 06.10.2020 bis 06.11.2020 jeweils von 23:00 bis 10:00, in blau als Messwerte (Stundenmittelwerte), in rot als Regressionsgerade. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,60

Da kein Nachtbetrieb bei Umgebungstemperaturen oberhalb von 14°C gemessen wurde, wurde – für alle darüber liegenden Nachtbetriebstemperaturen, im Vorgriff auf den weiter unten dargestellten Tagbetrieb, der Tagbetrieb angenommen, siehe nachfolgende Abbildung.

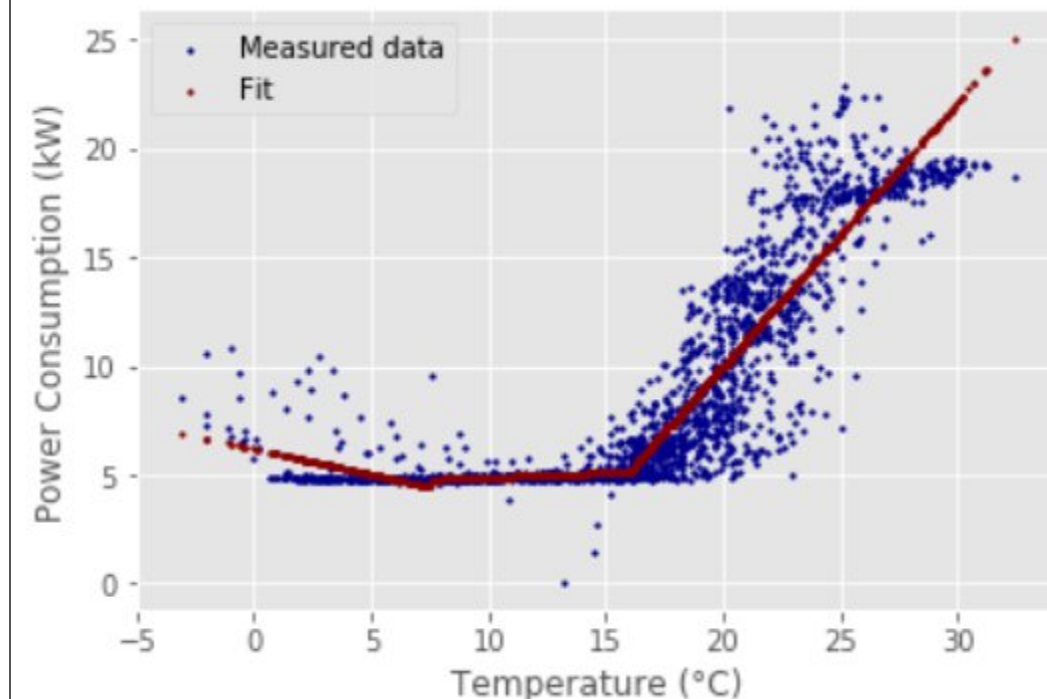


Abbildung 7: Elektrischer Leistungsbedarf der Lüftungsgeräte im Zeitraum 01.03.2020 bis 30.08.2020 jeweils von 11:00 bis 22:00, in blau als Messwerte (Stundenmittelwerte), in rot als Regressionsgeraden für die unterschiedlichen Temperaturbereiche. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden R^2 beträgt 0,84

Somit ergibt sich, je nach Temperaturbereich das folgende zusammengesetzte Modell für den Nachtbetrieb der Lüftungsgeräte im gesamten Temperaturbereich, Geradengleichungen finden sich

unterhalb der nachfolgenden Abbildung.

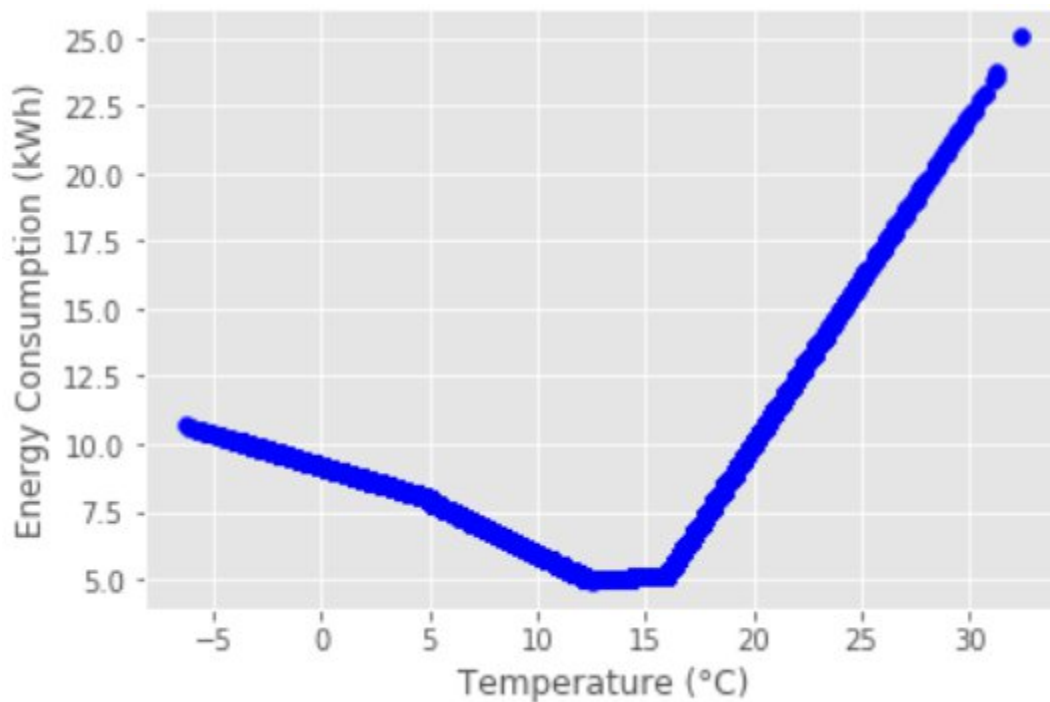


Abbildung 8: Energieverbrauchsmodell für die Lüftungsanlage im Nachtbetrieb als Kombination der Modelle der vorangehenden Abbildungen für die unterschiedlichen Temperaturbereiche

Die Geradengleichungen, die der Abbildung 8 zugrunde liegen sind die folgenden:

für $T \leq 5^{\circ}\text{C}$

$$P [\text{kW}] = T [^{\circ}\text{C}] \cdot -0.23863913 + 9.17107608$$

für $T > 5^{\circ}\text{C} \ \& \ T \leq 12.5^{\circ}\text{C}$

$$P [\text{kW}] = T [^{\circ}\text{C}] \cdot -0.39427811 + 9.85020618$$

für $T > 12.5^{\circ}\text{C} \ \& \ T \leq 16^{\circ}\text{C}$

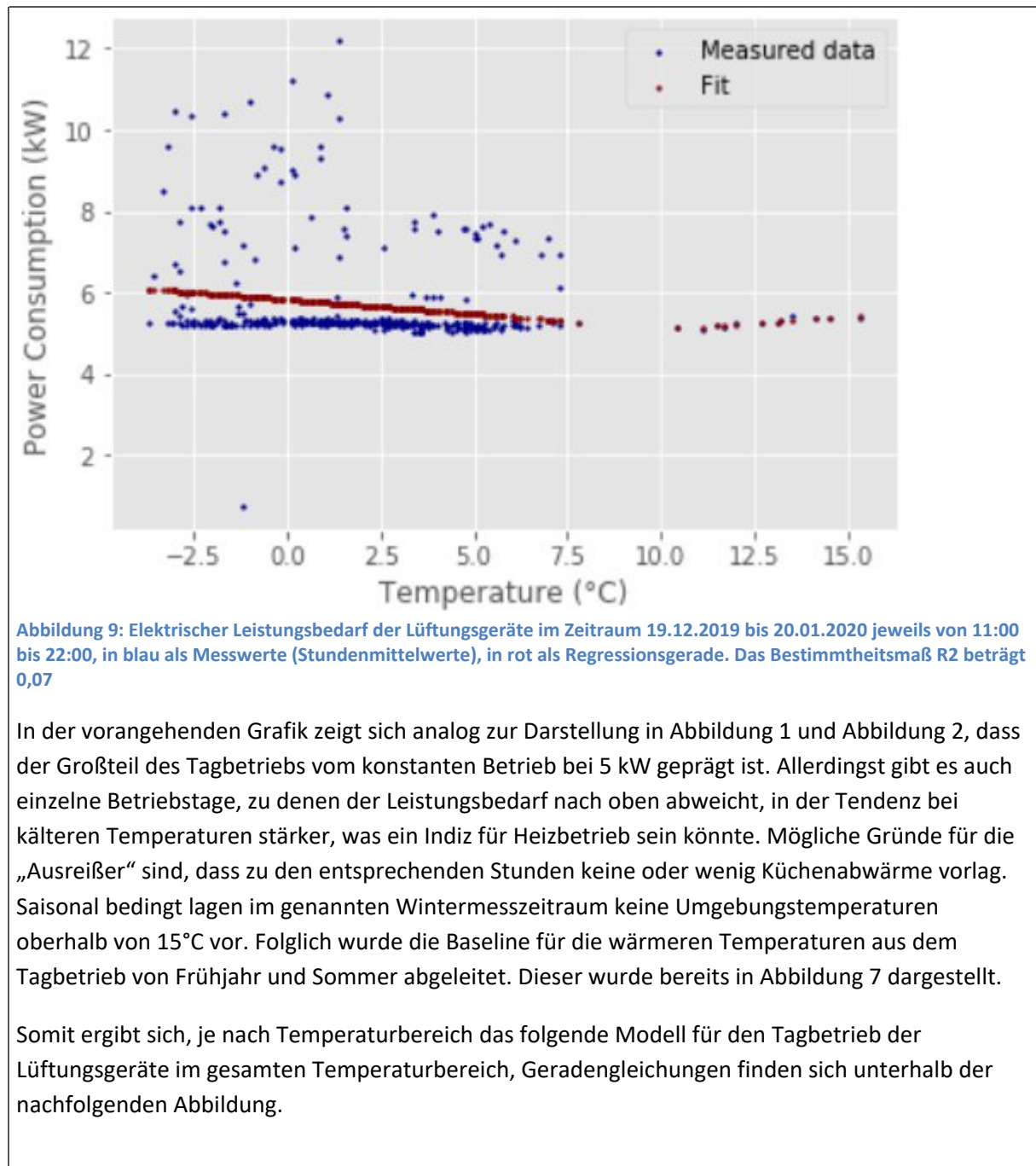
$$P [\text{kW}] = T [^{\circ}\text{C}] \cdot 0.04127798 + 4.46546785$$

für $T > 16^{\circ}\text{C}$

$$P [\text{kW}] = T [^{\circ}\text{C}] \cdot 1.21373606 - 14.27296416$$

2.) Lüftungsgeräte Tagbetrieb (11:00 – 22:00)

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Tagbetrieb während der ersten Betriebsperiode Dez'19/Jan'20.



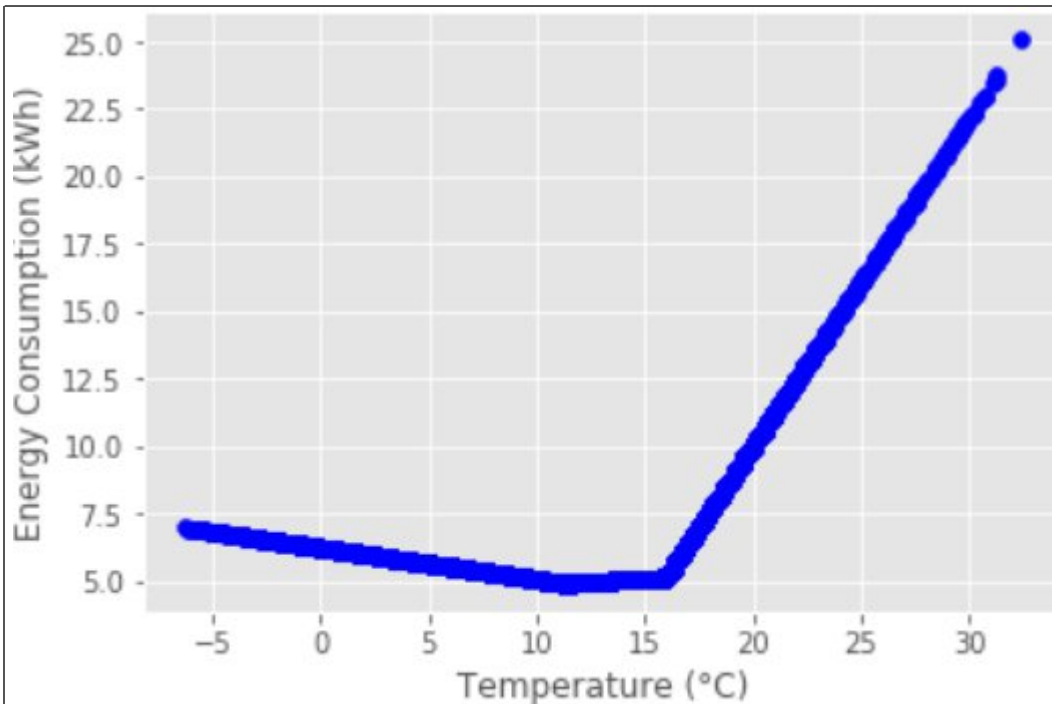


Abbildung 10: elektrisches Energieverbrauchsmodell für den Tagbetrieb der Lüftungsgeräte

Gleichung für $T \leq 11.5^{\circ}\text{C}$

$$P [\text{kW}] = T [^{\circ}\text{C}] * -0.11694214 + 6.23266522$$

Für $T > 11.5^{\circ}\text{C}$ & $T \leq 16^{\circ}\text{C}$

$$P [\text{kW}] = T [^{\circ}\text{C}] * 0.04127798 + 4.46546785$$

Für $T > 16^{\circ}\text{C}$

$$P [\text{kW}] = T [^{\circ}\text{C}] * 1.21373606 - 14.27296416$$

3.) Umluftkassetten Nachtbetrieb (23:00 - 10:00)

Die nachfolgende Abbildung zeigt den nächtlichen Stromverbrauch der drei Umluftkassetten incl. der Wärmepumpen-Außeneinheit (Split-Kühler/-Heizung), während des initialen Messzeitraums vom 19.12.2019 bis zum 20.01.2020.

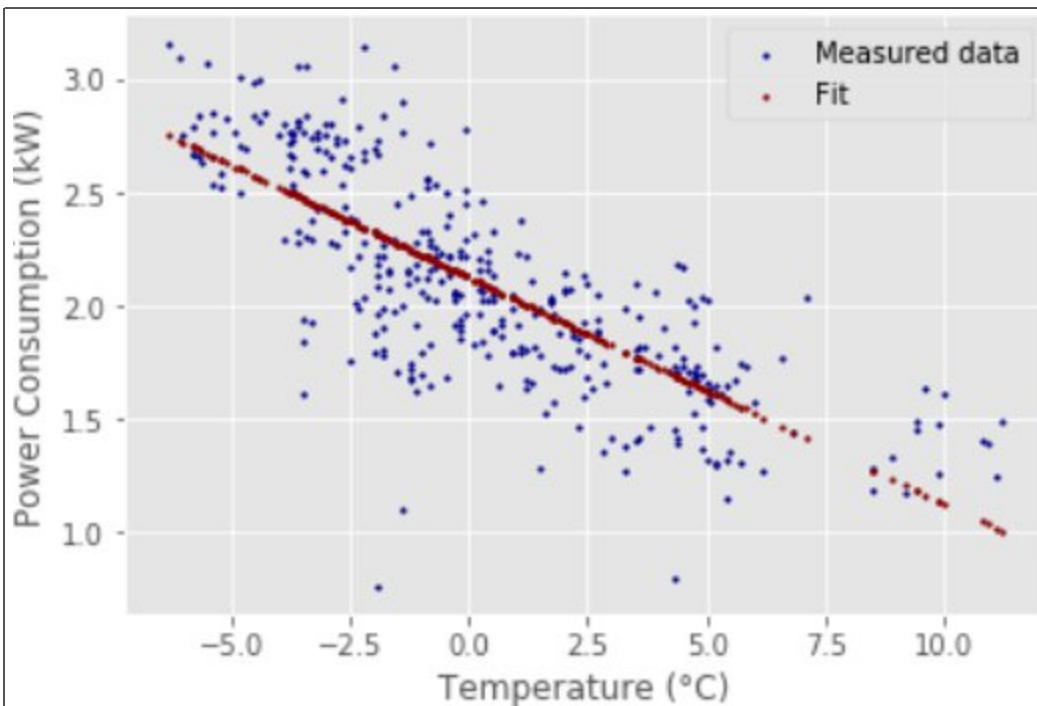


Abbildung 11: Elektrischer Leistungsbedarf der Umluftkassette(n) im Zeitraum 19.12.2019 bis 20.01.2020 jeweils von 23:00 bis 10:00, in blau als Messwerte (Stundenmittelwerte), in rot als Regressionsgerade. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,59

Analog zu den Daten der zuvor dargestellten Lüftungsgeräte lagen auch bei den Umluftkassetten im Dez'19-Jan'20-Messzeitraum keine Umgebungstemperaturen $> 12^\circ\text{C}$ vor. Allerdings war das Bestimmtheitsmaß höher, weswegen die Verwendung der Geradengleichung bis 12°C vertretbar ist.

Zur Quantifizierung des Nachtbetriebs wurde eine einzige Sommernacht vom 4. auf den 5. August 2020 identifiziert, während der die Umluftkassetten, aber auch die Lüftungsanlage, erneut durchliefen. Der Temperaturabhängige elektrische Leistungsbedarf ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

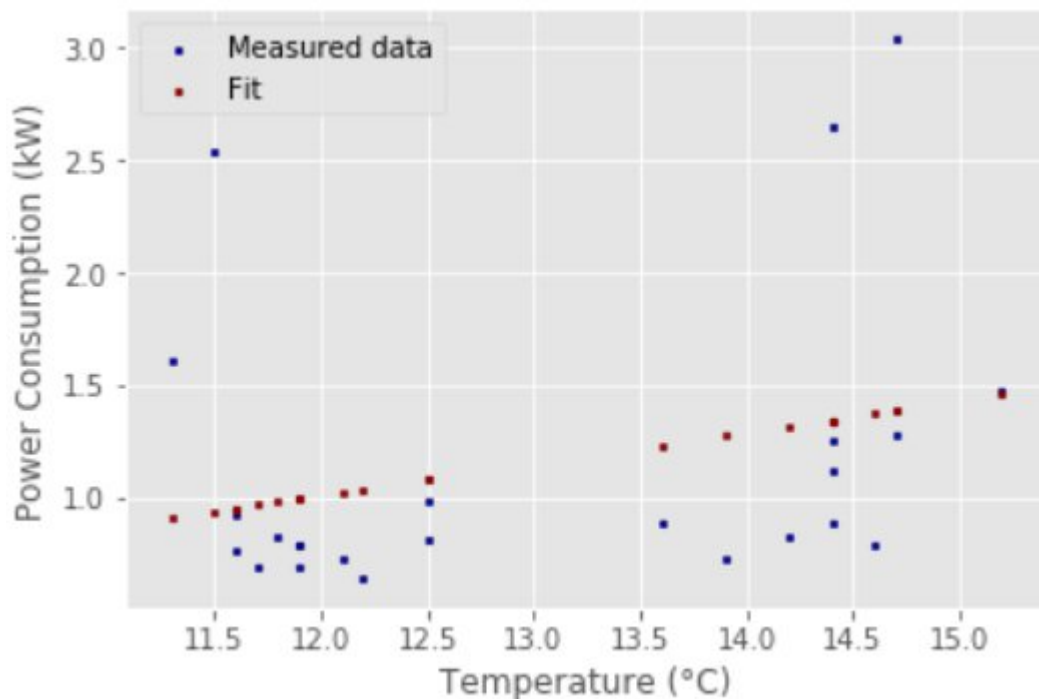


Abbildung 12: Elektrischer Leistungsbedarf der Umluftkassette(n) in der Nacht vom 4.8.2020 auf den 5.8.2020 von 23:00 bis 10:00, in blau als Messwerte, in rot als Regressionsgerade. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,08

Die beiden Modelle der vorangehenden beiden Grafiken ergeben sodann das Leistungsbedarfsmodell über den gesamten Umgebungstemperaturbereich, gemäß folgender Abbildung.

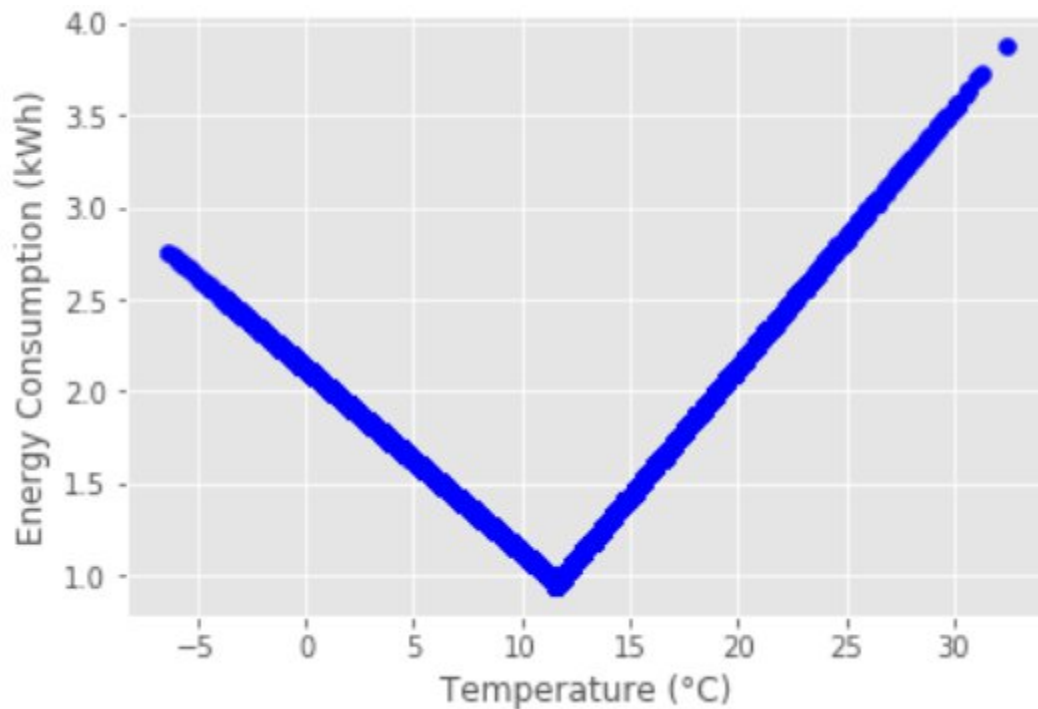


Abbildung 13: Modell für den elektrischen Leistungsbedarf der Umluftkassetten, im Nachtbetrieb (23:00 – 11:00)

Die Geradengleichung aus der vorangehenden Abbildung sind die Folgenden:

Gleichung für $T_{\text{Umg}} \leq 11.5^{\circ}\text{C}$

$$P [\text{kW}] = T [^{\circ}\text{C}] * -0.09975668 + 2.12348421$$

für $T_{\text{Umg}} > 11.5^{\circ}\text{C}$

$$P [\text{kW}] = T [^{\circ}\text{C}] * 0.14060183 - 0.68093784$$

4.) Umluftkassetten Tagbetrieb (11:00-22:00)

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Stromverbrauch der drei Umluftkassetten incl. der Wärmepumpen-Außeneinheit (Split-Kühler/-Heizung), während des initialen Messzeitraums vom 19.12.2019 bis zum 20.01.2020 während der Tagbetriebszeiten (11:00 – 22:00).

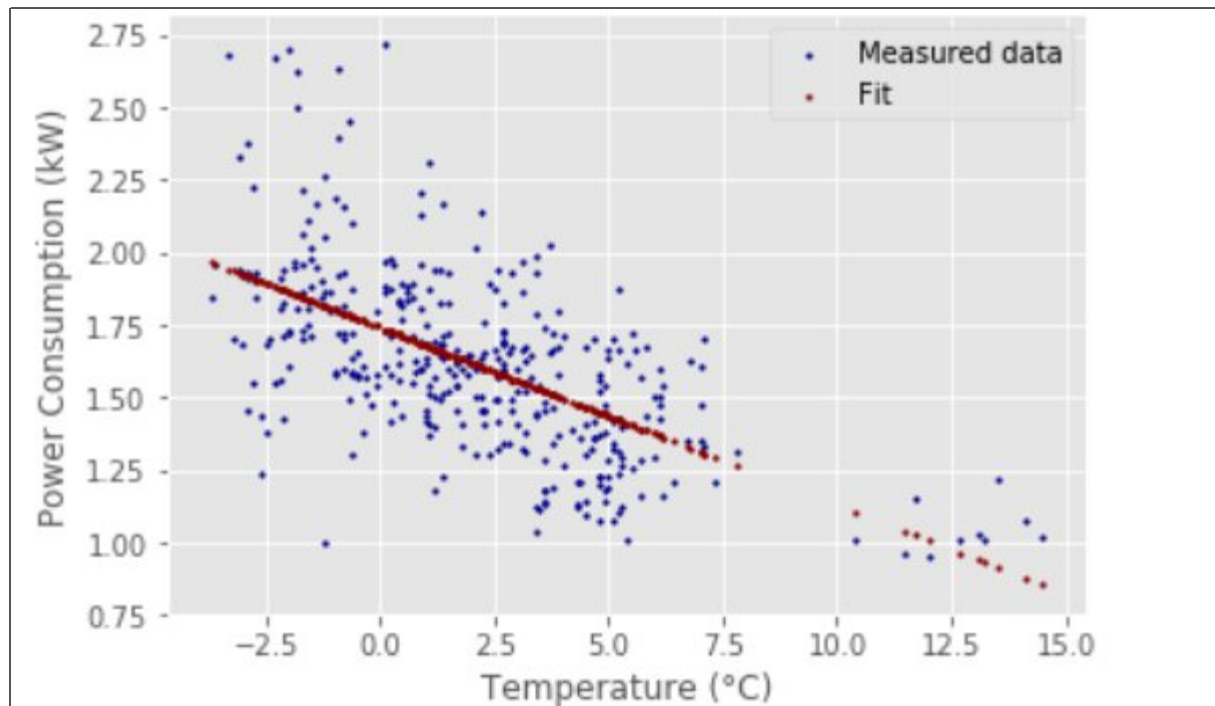


Abbildung 14: Elektrischer Leistungsbedarf der Umluftkassette(n) im Zeitraum 19.12.2019 bis 20.01.2020 jeweils von 11:00 bis 22:00, in blau als Messwerte (Stundenmittelwerte), in rot als Regressionsgerade. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,37

Vor dem Hintergrund der Tatsache, dass im Messdaten-Zeitraum der vorangehenden Abbildung nur sehr vereinzelt Temperaturen oberhalb von 5°C auftraten und gleichzeitig das Bestimmtheitsmaß nicht extrem hoch ist, wurde zur Modellierung der Baseline oberhalb von 5°C der Messzeitraum 1.3.2020 bis 30.8.2020 gewählt, welcher in der nachfolgenden Abbildung dargestellt ist.

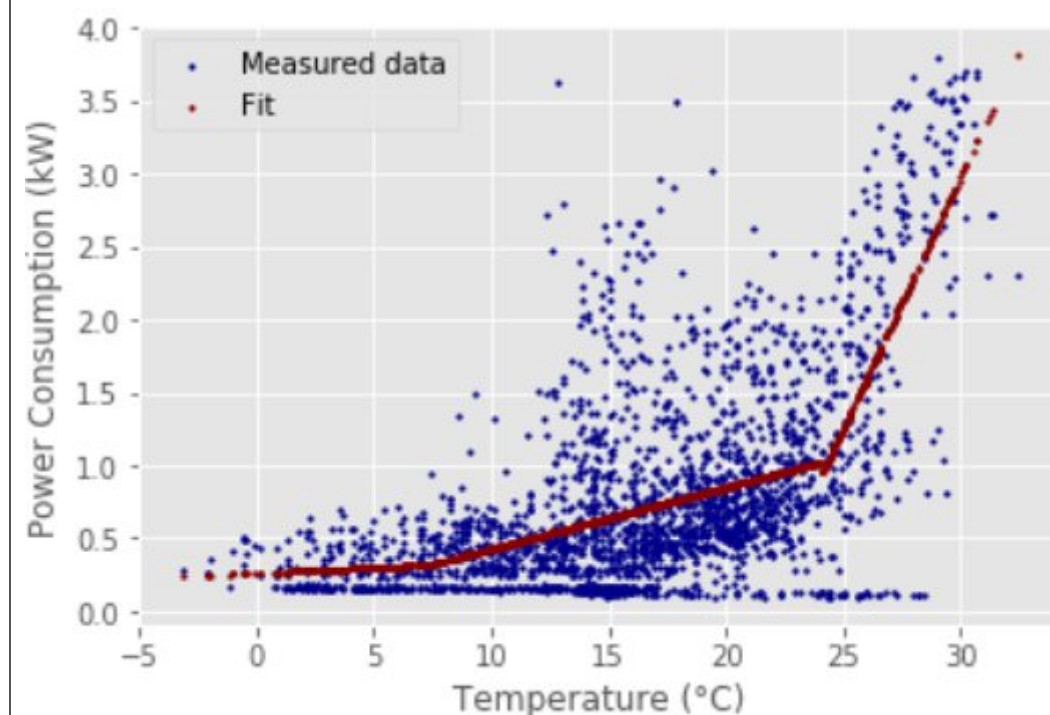


Abbildung 15: Elektrischer Leistungsbedarf der Umluftkassette(n) im Zeitraum 1.3.2020 bis 30.8.2020 jeweils von 11:00 bis 22:00, in blau als Messwerte (Stundenmittelwerte), in rot als Regressionsgerade. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt

0,45

Während dieses Zeitraums Frühjahr/Sommer waren wir allerdings bereits mehrfach mit dem Lüftungsbauer und dem Restaurant-Betreiber in Kontakt und wiesen auf den häufigen und aus unserer Sicht oftmals unnötigen Betrieb der Umluft-Kassetten hin, was sich dann bereits deutlich positiv in den Verbräuchen niederschlägt. Insofern unterschätzt die Baseline für den Temperaturbereich oberhalb von 5°C vermutlich die Baseline und damit die ausgewiesenen Einsparungen, da davon auszugehen ist, dass ohne das Monitoring der Betrieb der Umluftkassetten häufiger gewesen wäre.

Die Modelle der vorangehenden beiden Grafiken ergeben sodann das Leistungsbedarfsmodell der Umluftkassetten im Tagbetrieb über den gesamten Umgebungstemperaturbereich, gemäß folgender Abbildung, Geradengleichungen siehe unterhalb der Abbildung.

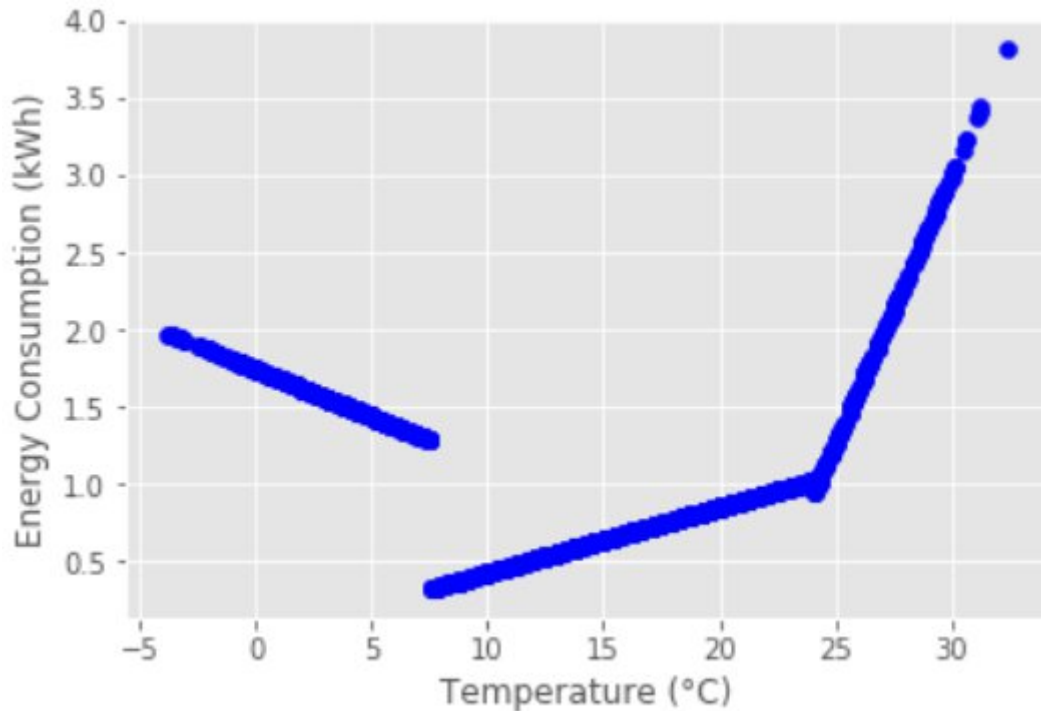


Abbildung 16: Energieverbrauchsmodell des Tagbetriebs der Umluftkassetten

Gleichung für $T_{\text{Umg}} \leq 7.5^\circ\text{C}$

$$P [\text{kW}] = T [^\circ\text{C}] * -0.06105502 + 1.74064577$$

$T > 7.5^\circ\text{C} \ \& \ T \leq 24^\circ\text{C}$

$$P [\text{kW}] = T [^\circ\text{C}] * 0.04230626 + 0.00547394$$

$T > 24^\circ\text{C}$

$$P [\text{kW}] = T [^\circ\text{C}] * 0.34475723 - 7.35524908$$

Der „Sprung“ bzw. die Unstetigkeit des Modells bei $7,5^\circ\text{C}$ bestätigt die oben genannte These, dass die Baseline für die Temperaturen oberhalb $7,5^\circ\text{C}$ vermutlich etwas zu gering sein dürfte.

Validierung des Baseline-Modells

Das Baseline-Modell soll nun anhand des ersten Mess-Monats validiert werden. Die nachfolgende Tabelle zeigt, dass das Baseline-Modell die Energieverbräuche um 3,3% überschätzt.

Tabelle 1: Vergleich von Baseline-Modell zur Vorhersage der Messdaten, welche die Grundlage zur Erzeugung des

Baseline-Modells waren

	Gemessen			Baseline (Modell)			Ab- wei- chung
	Umluft- kassetten [kWh]	Luftungs- geräte [kWh]	Summe [kWh]	Umluft- kassetten [kWh]	Luftungs- geräte [kWh]	Summe [kWh]	
Summe (19.12.19-20.1.20)	1443	5729	7172	1457	5949	7406	-3,3%

Die prognostizierten Werte lagen im Mittel um 3,3% über den Messdaten. Ein Grund hierfür war, dass das Simulationsmodell (Baseline) mit Stundenwetterdaten des DWD rechnet. Diese stündliche Diskreditierung unterschlägt die letzte halbe Betriebsstunde zwischen 23:00 und 23:30.

Folglich wurden zur Ermittlung der Baseline alle oben genannten Geradengleichungen noch um 3,3% reduziert, selbstverständlich auch für die nachfolgende Einsparperiode.

Erreichte Einsparung in PLZ-94_S1

Unter Anwendung des vorangehend beschriebenen Energieverbrauchsmodells (incl. der 3,3% Korrektur, die sich aus der Modellvalidierung ergab) wurden für das Schnell-Restaurant in PLZ-94_S1 für den Einsparzeitraum ab 20.01.2020 im Berichtszeitraum folgende Einsparungen erzielt.

	Gemessen			Baseline (Modell)			Einsparung		
	Umluft- kassetten [kWh]	Luftungs- geräte [kWh]	Summe [kWh]	Umluft- kassetten [kWh]	Luftungs- geräte [kWh]	Summe [kWh]	kWh	relativ	€ bei 17 ct/kWh
20.-31.12.2019	339	1'162	1'501	483	1'958	2'441	940	39%	160 €
Feb 20	163	2'892	3'055	1'047	4'721	5'769	2'714	47%	461 €
März 20	182	2'973	3'155	1'030	4'928	5'958	2'803	47%	477 €
Apr 20	230	3'098	3'328	743	4'597	5'340	2'012	38%	342 €
Mai 20	219	3'125	3'344	713	4'540	5'252	1'908	36%	324 €
Jun 20	780	4'160	4'940	785	5'209	5'995	1'055	18%	179 €
Jul 20	902	5'434	6'336	959	6'552	7'511	1'175	16%	200 €
Aug 20	1'107	5'922	7'029	1'069	7'182	8'251	1'222	15%	208 €
Sep 20	669	3'883	4'552	764	5'028	5'793	1'241	21%	211 €
Total	4'591	32'649	37'240	7'594	44'716	52'310	15'070	29%	2'562 €

In der Summe konnten also 15.070 kWh eingespart werden. Dies entspricht einer Einsparung um 29% bzw. um 2.562 € bei einem Strompreis von 17 ct/kWh (=15 ct + 2 ct open source Zuschlag).