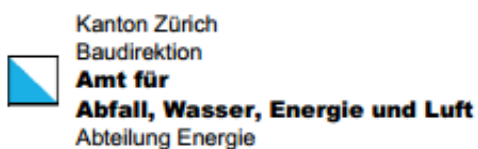


Büro-/Wohngebäude Neuwiesenstrasse 8, Uster
MINERGIE-A-Standard und mit
Hybrid-Kollektoren für die solare Warmwassererwärmung
Bericht zum Messprojekt



Projektdauer: 16 Monate: März 2014 – Juli 2015
Autoren: Werner Hässig, Sara Wyss, Jan Staubli
Datum: 20. Juli 2015; revidiert 30. September 2015

Zusammenfassung

Als erstes Gebäude der Schweiz, welches Büros (ca. 20 Arbeitsplätze) und Wohnungen (7 von unterschiedlicher Grösse) umfasst, hat dieser Neubau den MINERGIE-A-Standard erreicht (gilt als Pilotanlage für die MINERGIE-Zertifizierung). Die Überseeische Missions-Gemeinschaft ist Bauherrin des Neubaus, welcher sich im Zentrum der Stadt Uster, nur etwa 200 m vom Bahnhof befindet und städtebaulich hohen Anforderungen zu genügen hatte.

Das Grundstück ist für tiefe Erdsonden nicht geeignet und somit musste ein Konzept mit elf lediglich 80 m tiefen Erdsonden gewählt werden. Das innovative Energiekonzept sieht vor, dass das Erdsondenfeld im Winter heizt und im Sommer kühlt. Die Raumkühlung erfolgt über die Rohre der Fussbodenheizung direkt mit der Erdsonde (freecooling). – Eine grössere PV-Anlage (24 kWp) produziert den gesamten, für die Haustechnik (Heizung, Lüftung, Kühlung und Hilfsenergien) notwendigen Strombedarf. Eine zweite, kleinere Solaranlage wird erstmals mit kombinierten Wärme-Strom-Kollektoren (PVT) zur Warmwasservorwärmung sowie zur Stromproduktion eingesetzt. – Als weitere Besonderheit wird bei diesem Gebäude eine neuartige Einrichtung zur Ionisierung der Zuluft eingebaut („Leitfähige Luft®“). Ferner verfügt dieses Gebäude über eine leistungsfähige Steckdose für ein Elektromobil. Das E-Mobil wird über die Plattform sharoo.com auch öffentlich nutzbar gemacht.

Hauptziel der vorliegenden Studienarbeit war die Optimierung und Verifizierung der gesteckten Erwartungen in die Gebäudetechnik. Das Ingenieur- und Planungsbüro hässig sustech gmbh, welches ebenfalls an der Neuwiesenstrasse 8 domiziliert ist, leitete die Untersuchungen. Namhaft mitgewirkt haben insbesondere Studenten der Fachhochschule Rapperswil unter der Leitung von Professor Wemhöner.

Die wichtigsten Ergebnisse in Kürze. Der Anspruch eines Nullheizenergiehauses wurde erfüllt. Die erste Jahresbilanz weist einen Stromüberschuss von knapp 10 kWh/m² (geplant: 5) auf. Der Minergie-A-Standard wurde somit bereits im ersten Jahr (trotz noch ausstehender Optimierungen) erfüllt.

Die PVT-Anlage hat abgesehen von einigen Anfangsstörungen die Erwartungen soweit erfüllt. Interessant ist, dass durch die Wärmeentnahme im PVT-Modul tatsächlich die Stromproduktion gesteigert wird. Die Wärme direkt für die Warmwasservorwärmung zu nutzen macht technisch Sinn, falls die Dimensionierung knapp gehalten wird (wie hier geschehen: 7 m² PVT auf 7 Wohnungen). Finanziell lohnt sich der Aufwand jedoch nicht. Die Kühlung der PV-Module ist sicher der wichtigste Vorteil gegenüber getrennten Systemen. Ohne Wärmeeinspeisung in ein Erdsondenfeld (oder eine andere Form für die Verwendung von Niedrigtemperaturwärme in grossen Mengen) machen jedoch PVT-Module gegenüber getrennten Systemen kaum Sinn.

Das Raumklima ist hervorragend. Dank der CO₂-geregelten Lüftung wird die Luft auch im Winter nicht zu trocken und dank dem Free-cooling blieben die Räume auch ohne „air conditioning“ angenehm kühl.

Einmal mehr zeigte sich, dass im Rahmen einer Optimierungsphase alle wichtigen Energieverbraucher überwacht werden sollen. Es stellte sich heraus, dass die elektrisch Begleitheizung ohne Regelung ständig vor sich hin heizte und damit einen grossen unnötigen Stromverbrauch verursachte. Die nun aktivierte Steuerung lässt rund 60% Einsparungen erwarten.

Insgesamt kann diesem Gebäude grosse Nachhaltigkeit attestiert werden.

Inhalt

Zusammenfassung	2
Inhalt	3
1 Einleitung.....	4
1.1 Ausgangslage.....	4
1.2 Absicht	5
1.3 Abkürzungen.....	5
2 Ziele.....	6
2.1 Warmwasservorwärmung mit PVT-Kollektoren.....	6
2.2 Stromverbrauchsmessungen	6
2.3 Kennzahlen.....	6
3 Vorgehen.....	7
4 Beschreibung des Gebäudes	8
4.1 Minergie-A.....	8
4.2 Nutzung.....	8
4.3 Gebäudetechnik	9
5 Ergebnisse	13
5.1 PVT-Anlage.....	13
5.2 Stromverbrauchsmessungen Büronutzung	19
5.3 Kennzahlen PVT-Anlage	23
5.4 Kennzahlen Gebäude	25
5.5 Erfolgskontrolle Komfort und Nutzung	32
6 Optimierungen.....	35
6.1 PVT-Anlage.....	35
6.2 Begleitheizung	36
6.3 Wärmepumpe	38
6.4 Legionellen Schaltung	40
6.5 Stromverbrauch.....	41
6.6 Elektroauto	43
7 Wichtigste Erkenntnisse	46
7.1 PVT.....	46
7.2 Gebäude	47
8 Danksagungen	49
9 Symbole und Formeln	50
Anhang 1 – Messkonzept.....	52
Anhang 2 – Simulation mit MATLAB/Simulink.....	57

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Überseeische Missions-Gemeinschaft ist Bauherrin des Neubaus mit Büros und Wohnungen an der Neuwiesenstrasse 8 in Uster. Dieses Gebäude sollte eine hohe energetische Qualität wie auch Nutzungsqualität erreichen. Als erstes Gebäude der Schweiz, welches Büros (ca. 20 Arbeitsplätze und Wohnungen (7 von unterschiedlicher Grösse) umfasst, hat dieser Neubau den MINERGIE-A-Standard erreicht (gilt als Pilotanlage für die MINERGIE-Zertifizierung).

Das Gebäude befindet sich im Zentrum der Stadt Uster, nur etwa 200 m vom Bahnhof und hatte städtebaulich hohen Anforderungen zu genügen. Im Erdgeschoss ist das auf energieeffiziente Gebäudetechnik spezialisierte Ingenieur- und Planungsbüro hässig sustech gmbh eingemietet.

Den MINERGIE-A-Standard für Nullheizenergiehäuser gab es in der Schweiz bisher erst für Wohnbauten (EFH und MFH). Die Weiterentwicklung für Verwaltungsgebäude ist jedoch in vollem Gange, wobei aber Erfahrungswerte für die Überprüfung des Nachweisverfahrens und Messdaten eines realen Gebäudes gewünscht sind, um den neuen MINERGIE-A-Standard für Verwaltungsgebäude praxistauglich zu machen. Die MINERGIE® Agentur Bau (Institut Energie am Bau der Fachhochschule Nordwestschweiz) arbeitet an der Zertifizierung von MINERGIE-A-Verwaltungsgebäuden und ist sehr an Mess- und Erfahrungswerten des Projektgebäudes interessiert. Mit dem Projekt konnte also die Fertigstellung der MINERGIE-A-Zertifizierung für Verwaltungsgebäude unterstützt werden, womit ein weiterer Anreiz für Bauherren von Bürogebäuden geschaffen wurde, ihr Gebäude als Nullwärmeenergiehäuser zu bauen. Eine Übersicht zu allen Beteiligten findet sich im Kapitel 8.

Das Grundstück ist für tiefe Erdsonden nicht geeignet und somit musste ein Konzept mit elf lediglich 80 m tiefen Erdsonden gewählt werden. Das innovative Energiekonzept sieht vor, dass das Erdsondenfeld im Winter heizt und im Sommer kühlt. Die Raumkühlung erfolgt über die Rohre der Fussbodenheizung. Die aus den Räumen abgeführte Wärme wird in die Erdsonden verteilt und damit wird das Erdreich für den nächsten Winter regeneriert. – Eine grössere PV-Anlage (24 kWp) produziert den gesamten, für die Haustechnik (Heizung, Lüftung, Kühlung und Hilfsenergien) notwendigen Strombedarf. Eine zweite, kleinere Solaranlage ist mit kombinierten Wärme-Strom-Kollektoren (PVT) auf dem Südostdach eingebaut. Diese neuartigen PVT-Kollektoren (auch Hybridkollektoren genannt) werden zur Warmwasservorwärmung sowie zur Stromproduktion eingesetzt. Mit diesem Konzept kann eine sehr gute energetische Gesamtbilanz erreicht werden. – Als weitere Besonderheit wurde bei diesem Gebäude im Büroteil und in einer grossen Wohnung eine neuartige Einrichtung zur Ionisierung der Zuluft eingebaut (sogenannte „Leitfähige Luft®“). Diese Installation behandelt die Luft so, dass diese viel natürlicher wirkt und dadurch von den Nutzern sehr geschätzt wird. Untersuchungen zeigten bereits, dass die Luftmengen dadurch reduziert werden können, die Nutzer die Fenster weniger öffnen und die Arbeitsleistungen steigen.

Das Elektromobil der hässig sustech gmbh, welches ebenfalls an der Neuwiesenstrasse 8 platziert ist und Strom vom Gebäude bezieht, wurde ebenfalls in die Messungen einbezogen.



Abbildung 1, Karte von Uster

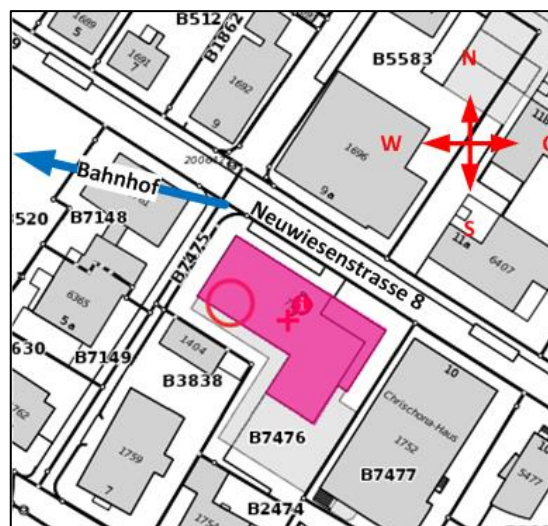


Abbildung 2, Situationsplan Messobjekt

1.2 Absicht

In Zusammenarbeit mit der Hochschule für Technik Rapperswil (HSR) wurde ein Messprojekt am Büro-/Wohngebäude im MINERGIE-A-Standard durchgeführt. Der Fokus des Messprojektes lag bei der PVT-Anlage und dem Eigennutzungsanteil des Solarstroms in einer Büronutzung. Der MINERGIE-A Standard wurde ebenfalls überprüft.

In einer ersten Phase bearbeiteten zwei Studenten von der HSR mit hässig sustech zusammen das Messprojekt bis Mitte Juni 2014 (gilt als Bachelorarbeit). Im Herbst 2014 wurde das Projekt von zwei weiteren Studenten betreut. Während dieser Zeit wurden auch bereits verschiedene Optimierungsmassnahmen umgesetzt. Im Frühjahr 2015 betreute ein weiterer Student das Messprojekt. Dabei wurden weitere Optimierungsmassnahmen umgesetzt und eine Jahresauswertung erstellt.

Während der gesamten Zeit standen die Messungen unter der Leitung von hässig sustech, unterstützt von der Bauherrschaft (ÜMG) und Professor Carsten Wemhöner von der Fachhochschule Rapperswil (HSR).

1.3 Abkürzungen

AWEL	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich
COP	Coefficient of performance (Wirkungsgrad)
EDR	Eigendeckungsrate
EVR	Eigenverbrauchsrate
HSG	hässig sustech gmbh
JAZ	Jahresarbeitszahl
PV	Photovoltaik Kollektor
PVT	Photovoltaik Anlage kombiniert mit einer thermischen Solaranlage
SD	Solarer Deckungsgrad
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SNG	Systemnutzungsgrad
WNG	Wärmenutzungsgrad
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser

Tabelle 1, Liste aller verwendeten Abkürzungen

2 Ziele

2.1 Warmwasservorwärmung mit PVT-Kollektoren

- Aussage zum Strom-und Wärme-Ertragspotential von PVT-Kollektoren im Vergleich zu konventionellen Solaranlagen gleiche Fläche (thermisch und PV).
- Prüfen ob sich durch die Abführung der Wärme durch den thermischen Teil der Stromertrag gesteigert werden kann.
- Bewertung des gewählten Systemkonzeptes mit Hinweisen zu Dimensionierung und zu allfälligem Optimierungspotential.
- Verhalten der PVT-Anlage in Bezug auf den Ertrag von thermischer- und elektrischer Energie im Vergleich zu einer Simulation.

2.2 Stromverbrauchsmessungen

- Datenerhebung zur Abschätzung des Eigenverbrauchsanteils am produzierten PV-Strom bei Büronutzung.
- Vorschläge zu planerischen Massnahmen zur Beeinflussung des Stromverbrauchs in Büros: planerische Überlegungen, umgesetzte Massnahmen wie z.B. spezielle Installationen, Erfahrungen und Empfehlungen.
- Visualisierung des Stromverbrauchs der Büronutzung und der Gebäudetechnik.

2.3 Kennzahlen

- Jahresertrag der PVT-Anlage
- solarer Deckungsgrad der PVT-Anlage
- Jahresertrag PV-Anlage
- Jahresverbrauch Gebäudetechnik
- Jahresarbeitszahl Wärmepumpe
- Wärmenutzungsgrad
- Systemnutzungsgrad Wärme und Kühlung
- Minergie-Kennzahl-Wärme
- Erfolgskontrolle zu Komfort und Nutzung im Büro und Cafeteria (Raumlufthtemperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂, Personenpräsenz)

3 Vorgehen

Das Messprojekt wurde nach folgendem Vorgehen gegliedert:

1. Klären der Aufgabe, Erarbeiten eines Terminplans, Fixierung von Meilensteinen
2. Erstellung eines Pflichtenhefts, Definition der gewünschten Kennzahlen
3. Erarbeitung eines Messkonzeptes, Installation und Inbetriebnahme der Messgeräte (eine Übersicht aller Messpunkte befindet sich im Anhang 1 – Messkonze)
4. Simulation der PVT Module und des Gebäudes
5. Auswertung der Messungen und Vergleich der Daten mit simulierten Werte
6. Erarbeiten, Umsetzen und Bewerten von Optimierungspotenzial
7. Dokumentation der Ergebnisse und Erarbeitung von Optimierungsvorschlägen

4 Beschreibung des Gebäudes

4.1 Minergie-A

Ein MINERGIE-A Gebäude muss gemäss Definition des MINERGIE-A Standards den gesamten Elektrizitätsbedarf für die Heizung, Warmwasser, die Lüftung, die Kühlung und alle Hilfsenergien selber erzeugen. Dazu werden in den meisten Fällen Photovoltaik-Anlagen (PV) verwendet.

Die zentrale Anforderung an ein MINERGIE-A Haus ist die Einhaltung der MINERGIE-Kennzahl Wärme. Diese sollte Null oder negativ sein. Damit wird sichergestellt, dass die für die Gebäudetechnik benötigte Energie vom Gebäude selber bereitgestellt wird.

Zu einem MINERGIE-A Haus gehören energieeffiziente Geräte und Beleuchtungen. Dementsprechend müssen Haushaltsgeräte der obersten Effizienzklassen (A+, A++ oder A+++) verwendet und bei der Beleuchtung MINERGIE konforme Leuchten eingesetzt werden.

Seit dem Jahr 2014 ist es möglich, Gebäude der Kategorie III (Verwaltungen) und IV (Schulen) nach MINERGIE-A zu zertifizieren. Im Rahmen dieser Arbeit wird einer der ersten Neubauten mit Verwaltungs- und Wohnbereich im MINERGIE-A Standard untersucht. (MINERGIE, 2014)

4.2 Nutzung

Das Erdgeschoss und ein Teil des Untergeschosses werden von den Firmen HSG und ÜMG benutzt. Im restlichen Teil des Hauses hat es Wohnungen in denen zum Zeitpunkt der Untersuchung rund 16 Personen wohnen.

- **Untergeschoss**
 - Keller, Technikraum, Elektrozentrale, Hauswartsraum, Velo- und Kinderwagen Raum, Waschküche, Trockenraum, Tiefgarage, Serverraum und zwei Lager-räume
- **Erdgeschoss**
 - Büro HSG (ca. 92 m²)
 - Büro ÜMG (ca. 92 m²)
 - Cafeteria, Sitzungsräume, WC, Dusche und Druckerraum zur gemeinsamen Nutzung (182 m²)
- **1. Obergeschoss**
 - 4.5 Zimmer Wohnung (134.5 m²)
 - 3.5 Zimmer Wohnung (98.2 m²)
 - 2.5 Zimmer Wohnungen (65.2m²)
 - 2.5 Zimmer Wohnungen (52.7 m²)
- **2. Obergeschoss**
 - 5.5 Zimmer Wohnung inklusiv Terrasse (207.7 m²)
 - 4.5 Zimmerwohnung (110.2 m²)
 - Studio (40 m²)
- **Dachgeschoss**
 - Dachstock der 2. Obergeschoss Wohnung. Im Dachstock der 5.5 Zimmer Wohnung sind die Wechselrichter der PV- und PVT-Anlage und eine Komfortlüftung untergebracht.

Von der kompletten Energiebezugsfläche von 1205 m² gehören 366 m² zur Zone Büro und 839 m² zur Zone Wohnen. (Kunz, 2014) (Schellenberg, 2013)

4.3 Gebäudetechnik

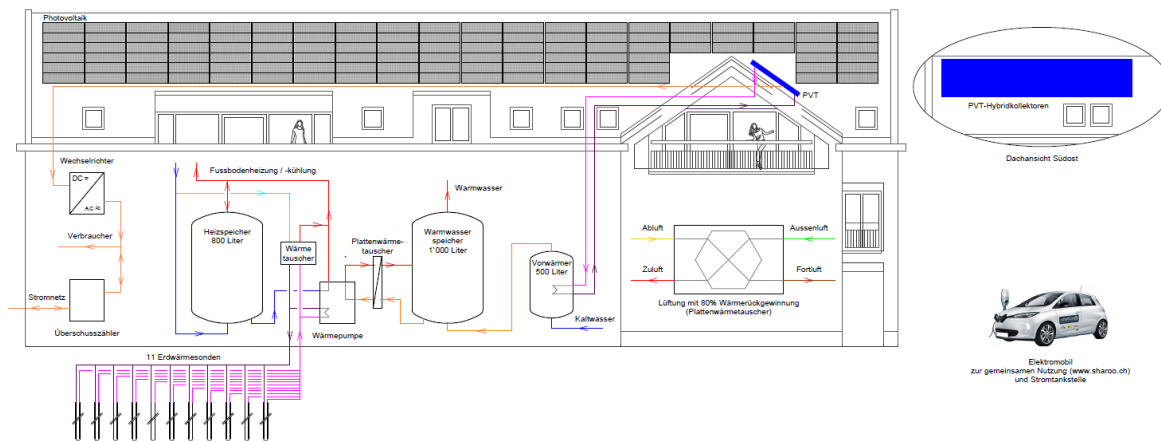


Abbildung 3, Übersicht der Gebäudetechnik

Die Gebäudetechnik besteht aus folgenden Komponenten:

- PV-Anlage
- PVT-Anlage
- WP mit Erdwärmesonden
- Komfortlüftung
- Speicher: Heizwärme-Puffer-Speicher, Vorwärmer, WW-Speicher
- Heizstab
- Begleitheizung

Nachfolgend sind die einzelnen Komponenten genauer beschrieben.

4.3.1 Photovoltaik-Anlage

Auf der grösseren Dachfläche des Gebäudes ist eine PV-Anlage mit Hochleistungsmodulen zur Gewinnung elektrischer Energie montiert. Dieses Dach ist in Richtung S-SW ausgerichtet und hat einen Neigungswinkel von 35°. Die Anlage besteht aus zwei Teilgeneratoren mit 51 bzw. 52 Modulen. Es wurden PV-Module der Firma SunPower des Typs SPR-230NE-BLK Arres verwendet. Die installierte Gesamtfläche beträgt 128 m² und die Leistung beträgt 24 kWp. Mit einem Wirkungsgrad von 18.6 % stellen diese Module den aktuellsten Stand der Technik dar. Mit der installierten Fläche kann ein Jahresertrag von ungefähr 24'000 kWh elektrischer Energie erzielt werden. (Sun Power Corporation, 2011)

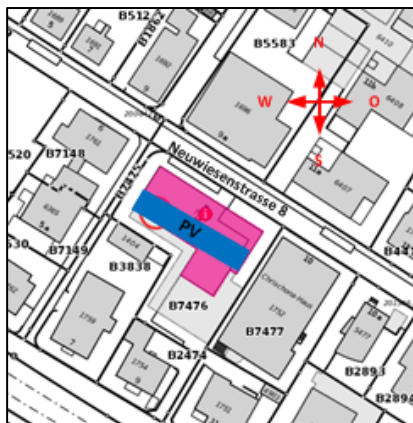


Abbildung 4, Situationsplan PV-Anlage



Abbildung 5, PV-Anlage im Dach integriert

4.3.2 PVT-Anlage

Die Idee der Erzeugung von Wärme und Strom im gleichen Kollektor wird schon länger verfolgt. Bislang sind jedoch in der Schweiz so genannte Hybrid- oder PVT-Kollektoren noch wenig verbreitet. Die Hersteller versprechen durch die Tatsache, dass die Wärme durch den thermischen Kollektor abgeführt wird, eine elektrische Ertragssteigerung von bis zu 40%. Nun wurden auf die kleinere Dachfläche des MINERGIE-A Gebäudes solche Module der Firma Solimpeks installiert.

Geplant war, 5 Kollektoren des Typs Volther Powertherm zu montieren. Das entspricht einer installierten Fläche von 7.1 m². Gemäss Herstellerangaben können mit diesen Kollektoren bis zu 130 W/m² elektrische und 610 W/m² thermische Leistung erreicht werden.

Im Verlauf dieser Arbeit hat sich herausgestellt, dass irrtümlicherweise die falschen PVT-Kollektoren installiert worden sind. Es wurden Kollektoren vom Modell Volther Powervolt montiert, diese haben die gleiche Abmessung, sind aber auf eine höhere Stromproduktion ausgelegt (140 W/m² elektrisch und 324 W/m² thermisch). Nach Absprache mit dem Bauherrn wurde entschieden, dass die Kollektoren nicht getauscht werden. Alle Resultate und Auswertungen beziehen sich demnach auf den Powervolt Kollektor. (Solimpeks Solar GmbH, 2012)

Folgende Werte waren in der Soltop Steuerung der PVT-Anlage eingestellt:

- Relais (Pumpe) auf Auto
- Antifrogen L (25%) (Keimatz, 2014)
- Durchfluss 6l/min (Mittelwert)
- Betriebsart High flow
- Zeitschritt Logging 1x pro min



Abbildung 6, Situationsplan PVT-Anlage



Abbildung 7, Einbau der PVT-Anlage

4.3.3 Wärmepumpe mit Erdwärmesonden

Das Herzstück der gesamten Gebäudetechnik stellt die Wärmepumpe dar. Diese liefert die benötigte Wärmeenergie für Heizung und Warmwasser. Das Gebäude verfügt über eine Geothermie Wärmepumpe der Firma CTA. Die genaue Typenbezeichnung lautet: CTA Optiheat OH 32 e. Diese bezieht Erdwärme über 11,8 m tiefe Erdwärmesonden und transferiert diese auf ein höheres Temperaturniveau. Die Wärmepumpe liefert eine Heizleistung von 33.1/30.5 kW (W35/W50). Dabei erreicht sie einen COP von 4.6/3.0. Je nach Betrieb wird der 1'000 l WW-Speicher oder der 800 l Puffer-Speicher "geladen". (CTA AG, 2011)

Im Sommer werden die Räume mittels Fussbodenrohre gekühlt. Ein einfacher Wärmetauscher ermöglicht dieses Free-Cooling. Gleichzeitig verspricht man sich eine bessere Regeneration des Erdreichs.



Abbildung 8, CTA Wärmepumpe Optiheat OH 32e

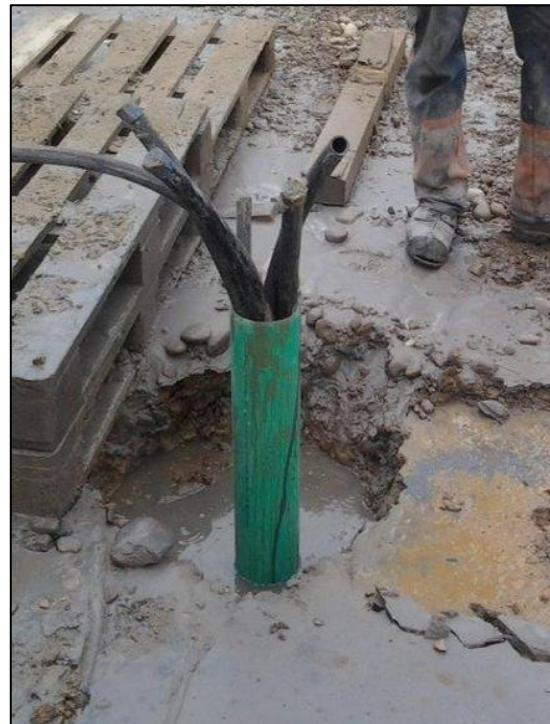


Abbildung 9, Erdwärmesonden, Austritt Bohrung

4.3.4 Komfortlüftung

Alle bis auf eine Lüftung im Dachgeschoss befinden sich alle Lüftungen im Keller. Jedes der Geräte hat eine eingebaute Wärmerückgewinnung. Grundsätzlich wird die Luft in den Wohn- und Schlafräumen eingeblasen und in den Nasszellen abgezogen.

Wohnungen:

2 x Comfoair 550E; je mit Enthalpietauscher, 360 m³/h resp. 340 m³/h Luftmenge

Büro:

Minair HRmural 800 TAC 4

- CO₂-Steuerung, 600 m³/h Luftmenge, mit Fernbedieneinheit im Büro

Cafeteria/ Konferenz:

Minair HRmural 800 TAC 4

- CO₂-Steuerung, 600 m³/h Luftmenge, mit Fernbedieneinheit in Cafeteria

4.3.5 Speicher

Heizung:

Ein 800 l Pufferspeicher dient dazu, die Laufzeit der WP zu verlängern, was eine direkte Auswirkung auf die Lebensdauer und den COP der WP hat.

Warmwasser:

In einem 500 l Vorwärmer wird das Kaltwasser mithilfe der PVT-Anlage erwärmt, bevor es in den 1000 l grossen Warmwasser-Speicher übergeht. Das Wasser wird hier auf eine Temperatur von 55 °C erwärmt, die zwei Speicher sind für das komplette Gebäude.

4.3.6 Heizstab

Der Heizstab hat eine Leistung von ungefähr 10 kW und wird für den Legionellenschutz gebraucht. Für diesen wird eine Temperatur von über 60 °C benötigt. Die WP ist nur für eine maximale Temperatur von 55 °C ausgelegt.

Falls die WP mal ausfallen würde, könnte mit dem Heizstab auch die komplette WW-Erwärmung gemacht werden. Es wird dazu einfach mehr Energie benötigt.

4.3.7 Begleitheizung

Die Begleitheizung hat eine Leistung von ungefähr einem kW und wird benötigt um die SIA-Normen einzuhalten. Diese besagen, dass zu jeder Tageszeit innerhalb von 10 Sekunden 40 °C an der Entnahmestelle erreicht werden müssen. (SIA385/1, 2011)

Es gibt zwei Begleitheizbänder: Ein 90 m langes und ein 30 m langes. Zusammen versorgen sie vier Steigzonen, wobei das kürzere Begleitheizband jene Steigzone bedient, in welcher auch tagsüber Wasser verbraucht wird (Büro-Sanitäranlagen). Es werden von beiden Bändern ungefähr gleich viele Wohnungen versorgt.

4.3.8 Der Heizwärmebedarf und die Wärmedämmung des Gebäudes

Heizwärmebedarf:

Projektwert Heizwärmebedarf komplettes Gebäude $Q_h = 85 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}} \triangleq 23.6 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$

Grenzwert Heizwärmebedarf komplettes Gebäude $Q_{h,li} = 158 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}} \triangleq 43.9 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$

U-Werte:

Als U-Wert (früher k-Wert) wird der Wärmedurchgangskoeffizient einer ebenen Wand bezeichnet. Dieser gibt an, wie gross der Wärmestrom durch die Wand pro m² und K ist. Je tiefer der U-Wert, desto besser ist die Wärmedämmung. In der Tabelle unten alle U-Werte von Gebäude.

Büro, Bezeichnungen	U-Wert in W/(m ² *K)
Äquivalenter Boden	2.5
Boden EG	0.13
Wand, Keller	0.16
Aussenwand	0.15
Fenster (Durchschnitt aller Fenster)	0.97

Tabelle 2, U-Werte vom Teil Büro

Wohnen, Bezeichnungen	U-Wert in W/(m ² *K)
Boden, Aussen und Einfahrt	0.18
Dach, inkl. Luke	0.18
Aussenwand	0.15
Fenster (Durchschnitt aller Fenster)	1.00

Tabelle 3, U-Werte von Teil Wohnen

5 Ergebnisse

5.1 PVT-Anlage

Erste Test-Messungen der PVT-Anlagen ergaben, dass der thermische Ertrag kleiner ist als der Hersteller vorgibt. Es stellte sich heraus, dass die Anlage vom Installateur auf dem Dach falsch angeschlossen wurde. Dieser Fehler wurde umgehend behoben. Von Zeit zu Zeit bereitete der Kartenleser der Steuerung Probleme, welche der Hersteller nur teilweise beheben konnte. Dadurch entstanden grössere Datenlücken, die fehlenden Werte wurden nachträglich so gut als möglich abgeschätzt und interpoliert.

5.1.1 Bewertung der PVT-Anlage

Die folgenden Grafiken in diesem Kapitel zeigen die Auswertung der ersten Messperiode vom 22. April bis 20. Mai 2014.

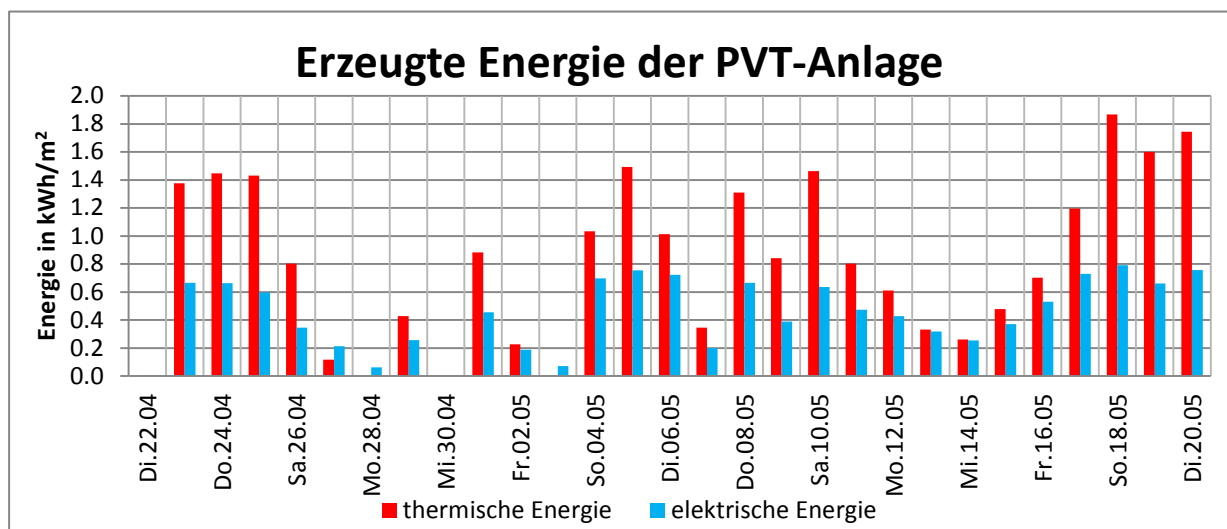


Abbildung 10, Energieerträge der PVT-Anlage über die Messperiode. Die thermische Energie ist rot dargestellt, die elektrische Energie blau. Es ist die Flächenbezogene Energiemenge in kWh/m² dargestellt.

Die Energieerträge der einzelnen Tage während der Messperiode sind oben aufgezeichnet. Es fällt auf, dass am 28. April, am 30. April und am 03. Mai keine thermische und kaum elektrische Energie produziert worden ist. Der Vergleich mit dem Verlauf der Globalstrahlung erklärt die Produktionsausfälle. An diesen drei Tagen wurden Einstrahlungstagesummen von unter 1 kWh/m² gemessen. Die Höchstwerte lagen an einem guten Tag über 7 kWh/m².

Es wurde untersucht, inwiefern der WW-Verbrauch mit der erzeugten thermischen Energie korreliert. Die Untersuchung hat ergeben, dass die Menge an verbrauchtem WW keinen messbaren Einfluss auf die erzeugte thermische Energie hat. Diese ist viel stärker von der Globalstrahlung abhängig.

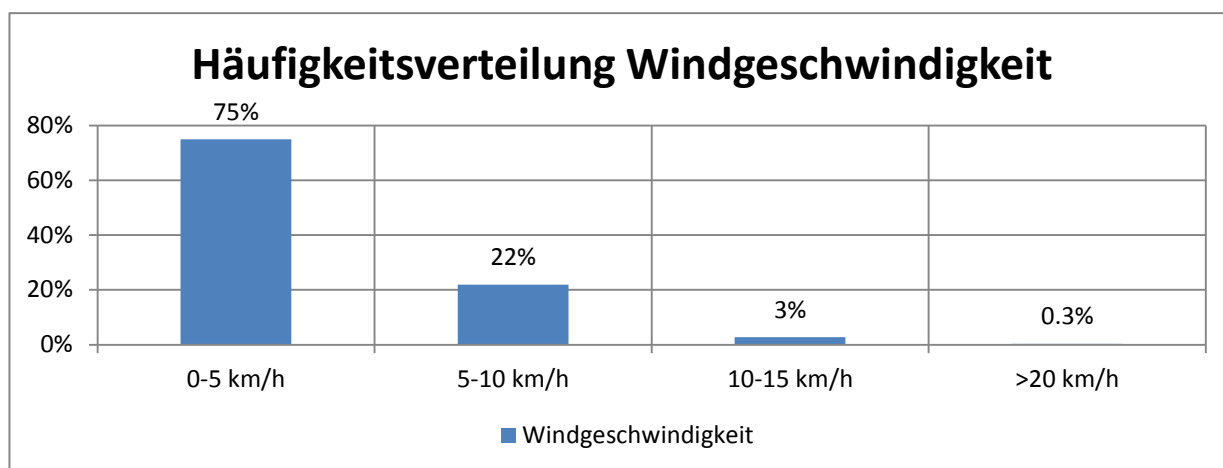


Abbildung 11, Prozentuale Verteilung der Windgeschwindigkeiten, welche auf dem Dach in der PVT-Kollektor Ebene aufgetreten sind.

Die Aufzeichnung der Windstärke in der Kollektorebene hat ergeben, dass es auf dem Dach praktisch windstill ist. In der gesamten Messperiode sind kaum Windgeschwindigkeiten über 10 km/h aufgetreten. Die Wärmeverluste durch Wind können bei den PVT-Kollektoren demzufolge nur gering gewesen sein.

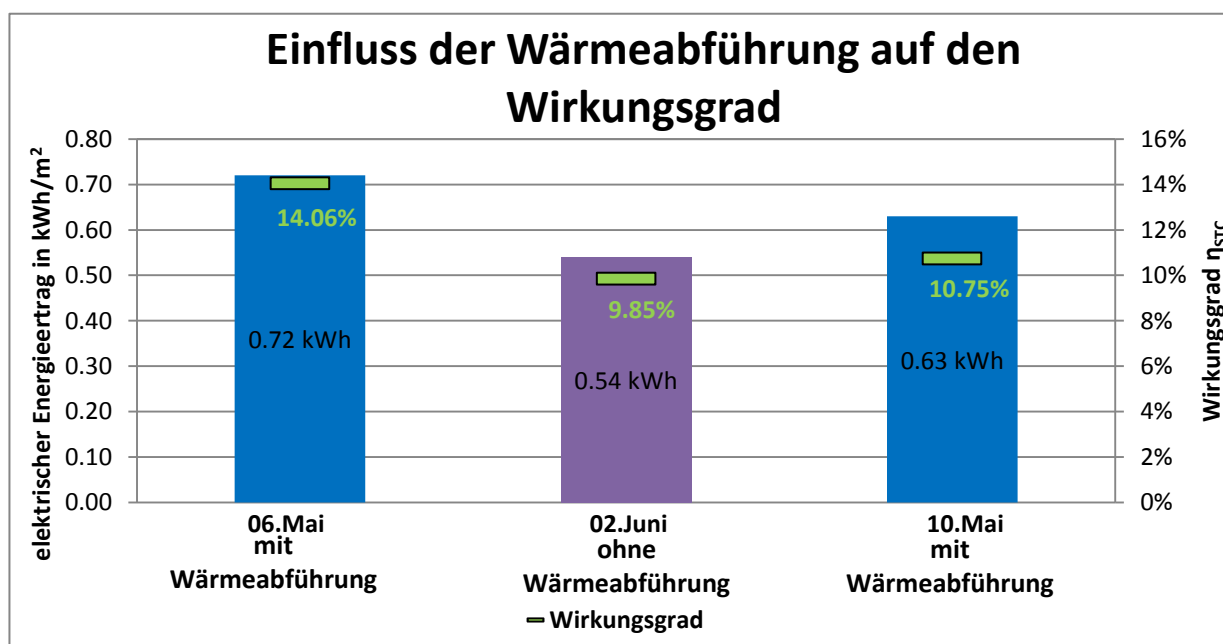


Abbildung 12, Der violette Balken zeigt den elektrischen Energieertrag vom 02. Juni an. Zum Vergleich sind die elektrischen Energieerträge von verschiedenen Tagen aufgetragen (blau). In grün sind die Wirkungsgrade angegeben.

Der Vergleich hat gezeigt, dass die elektrische Leistung stark mit der Kollektortemperatur zusammenhängt. Auch der Einfluss der thermischen Wärmeabfuhr konnte bestätigt werden. So wurde am 06. Mai (mit Wärmeabfuhr) trotz relativ geringer Einstrahlungswerte (5.12 kWh/m^2) ein hoher Energieertrag (0.72 kWh/m^2) erzielt. An diesem Tag wurde ein Wirkungsgrad von 14.06 % erreicht, was für dieses PVT-Module einen hohen Wert darstellt (Maximaler Wirkungsgrad bei 1000 W/m^2 ist 14.88%). Am 02. Juni (ohne Wärmeabfuhr) wurde ein deutlich geringerer Energieertrag erzielt, obwohl an diesem Tag die Einstrahlung ungefähr gleich gewesen ist. Ein Vergleich der Kollektortemperaturen (Abbildung 13) hat gezeigt, dass bei ausgeschalteter Solarkreispumpe deutlich höhere Temperaturen auftreten als an allen anderen Tagen. Der

Wirkungsgrad hat am 02. Juni lediglich 9.85% betragen.

Am 10. Mai (mit Wärmeabfuhr) wurde bei einer Einstrahlung von 5.86 kWh/m^2 ein Ertrag von 0.63 kWh/m^2 elektrischer Energie erzielt, was einem Wirkungsgrad von 10.75 % entspricht. Die Abnahme der Wirkungsgrade mit höheren Einstrahlungen bestätigt die Annahme, dass bei höherer Einstrahlung die elektrischen Energieerträge eher niedriger ausfallen.

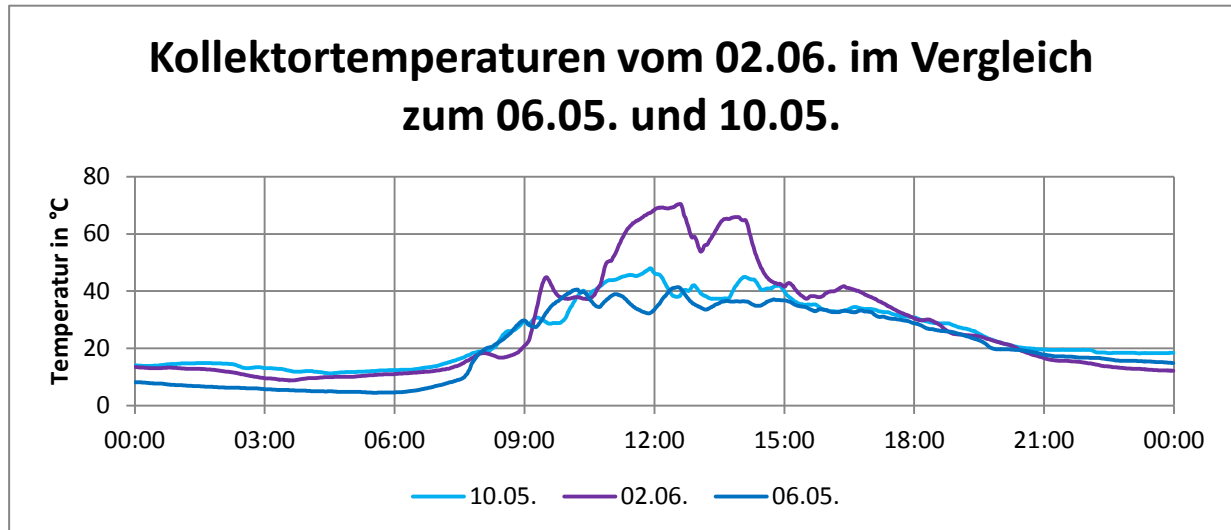


Abbildung 13, Kollektortemperaturen vom 02. Juni (ohne thermische Energieproduktion, violett), dem 6. Mai (mit thermischer Energieproduktion, dunkelblau) und dem 10. Mai (mit thermischer Energieproduktion, hellblau)

Die Betrachtung der Kollektortemperaturen erklärt den positiven Einfluss der Wärmeabfuhr auf den elektrischen Energieertrag. Obwohl am 10. Mai ungefähr die gleiche Einstrahlung herrschte wie am 02. Juni, erreichte die Kollektortemperatur am 02. Juni einen Höchstwert von 70 °C . Am 10. Mai lag der maximale Wert der Kollektortemperatur bei 50 °C . Auch am 06. Mai lagen die Temperaturen in selben Bereich wie am 10. Mai. Die höhere Temperatur im Kollektor durch die fehlende Wärmeabfuhr ist klar ersichtlich. Damit konnte gezeigt werden, dass die thermische Energieproduktion zu einer Temperaturreduktion von bis zu 20 K führen kann. Somit wird das Hersteller-Versprechen eingehalten.

5.1.2 Simulation der PVT-Anlage

Es wurde eine Simulation mit den genau gleichen Komponenten der bestehenden PVT-Anlage durchgeführt. Diese Simulation wurde mit den Messwerten verglichen. Als Grundlage für die Simulation wurden die aufgezeichneten Wetterdaten verwendet.

Dadurch konnte die Genauigkeit des Simulationsmodells beurteilt werden. Dazu wurde der Verlauf der thermischen und elektrischen Leistung mit den realen Messdaten verglichen.

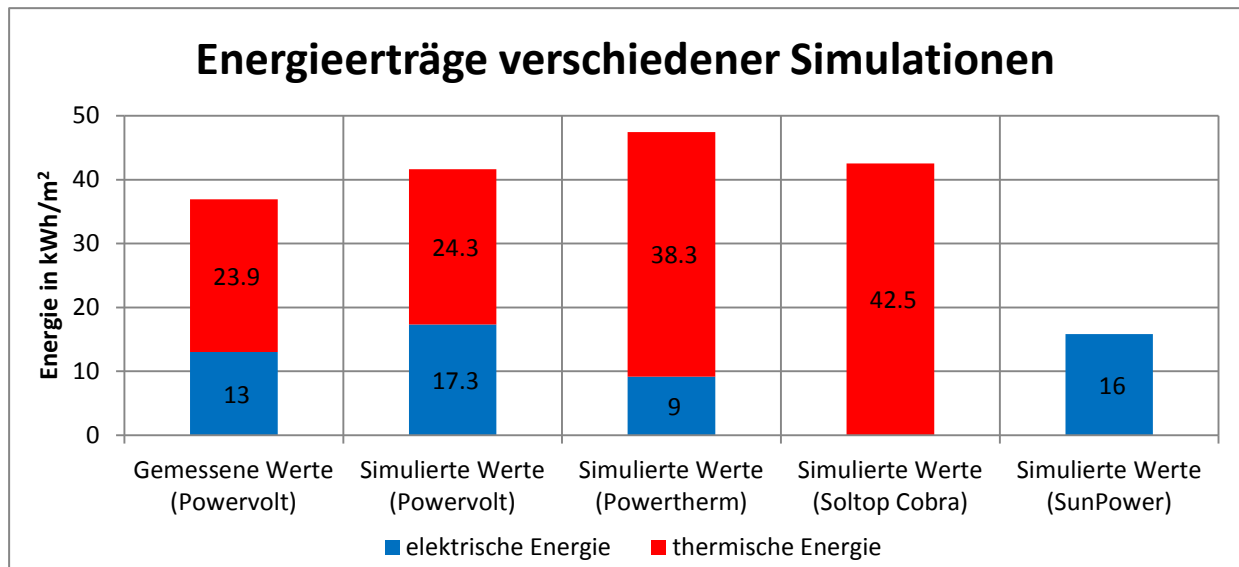


Abbildung 14, Vergleich der Energieerträge von verschiedenen Simulationen und realen Messwerten. Die thermische Simulation wurde mit dem Kollektormodul Soltop Cobra Evo 2.8 V von der Firma Soltop durchgeführt. Für die Simulation der PV-Anlage wurde das PV-Modul SPR-230NE-BLK Arres von Sun Power verwendet. Es wurde bei allen Simulationen mit einer Kollektorfläche von 7.1 m², einer Ausrichtung nach O-
SO und einem Neigungswinkel des Dachs von 35 ° gerechnet.

Da bei der Montage der PVT-Kollektoren fälschlicherweise Powervolt anstelle von Powertherm Kollektoren installiert wurden, wurde zusätzlich eine Simulation mit Powertherm-Kollektoren durchgeführt. Dabei wurden die Energieerträge verglichen.

Um zu beurteilen, ob herkömmliche Solarthermie-Anlagen oder PV-Anlagen bessere Erträge geliefert hätten, wurde eine Simulation mit herkömmlichen Anlagen aufgrund der gemessenen Wetterdaten durchgeführt.

Anschliessend wurden alle Daten mit den effektiv gemessenen Energieerträgen verglichen.

Es hat sich herausgestellt, dass ungefähr 98 % der simulierten thermischen Energie und 88 % der simulierten elektrischen Energie erreicht werden.

Wenn anstelle der Powervolt-Kollektoren die Powertherm-Kollektoren installiert gewesen wären, hätte ein um 58 % (+14 kWh/m²) höherer thermischer Ertrag erreicht werden können. Allerdings wäre der elektrische Ertrag um ca. 30 % (-4 kWh/m²) geringer gewesen.

Die herkömmliche thermische Anlage hätte ca. 75 % (+18.6 kWh/m²) mehr thermische Energie geliefert, die PV-Anlage ca. 23 % (+3 kWh/m²) mehr elektrische Energie.

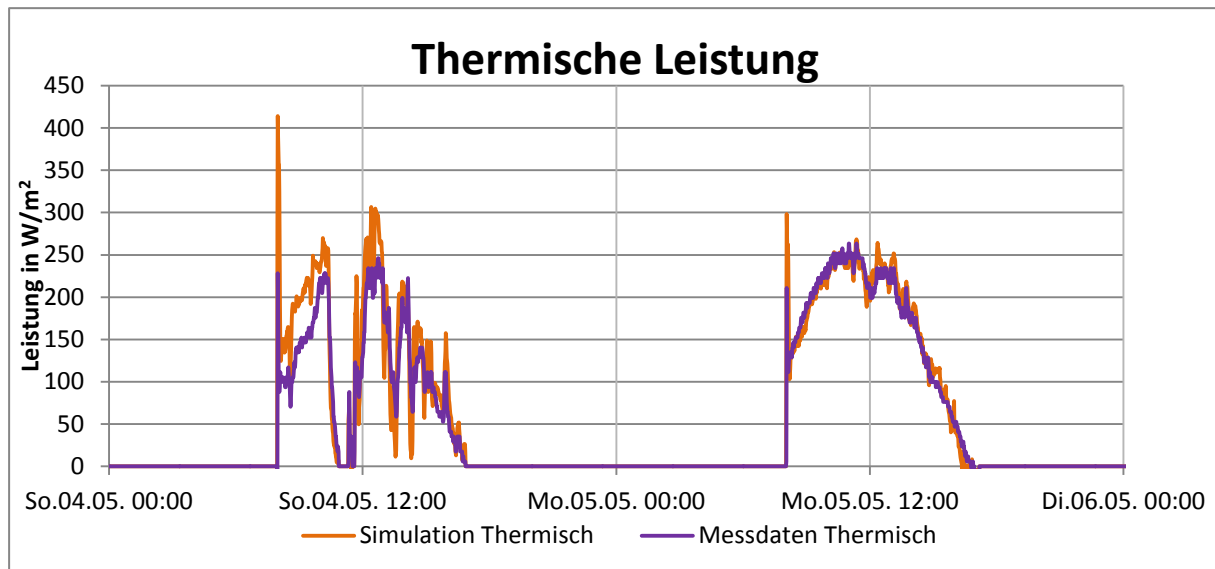


Abbildung 15, Verlauf der simulierten thermischen Leistungen im Vergleich mit den realen Messwerten. Stellvertretend für die gesamte Messperiode sind oben der 04. und der 05. Mai dargestellt. Die violette Kurve stellt die gemessenen Werte dar, die orange die mittels Simulation berechneten Werte.

Um die thermische Leistung genau simulieren zu können, wurden die real gemessenen Massenströme verwendet. Damit konnte erreicht werden, dass die Pumpe immer zu den gleichen Zeitpunkten läuft wie in an der realen Anlage. Die Ergebnisse zeigen, dass die Berechnung der thermischen Leistungen zuverlässig läuft und sich gut mit den realen Messwerten deckt. Die durchschnittliche Abweichung der Simulationswerte von den realen Messwerten lag bei 1.6 %.

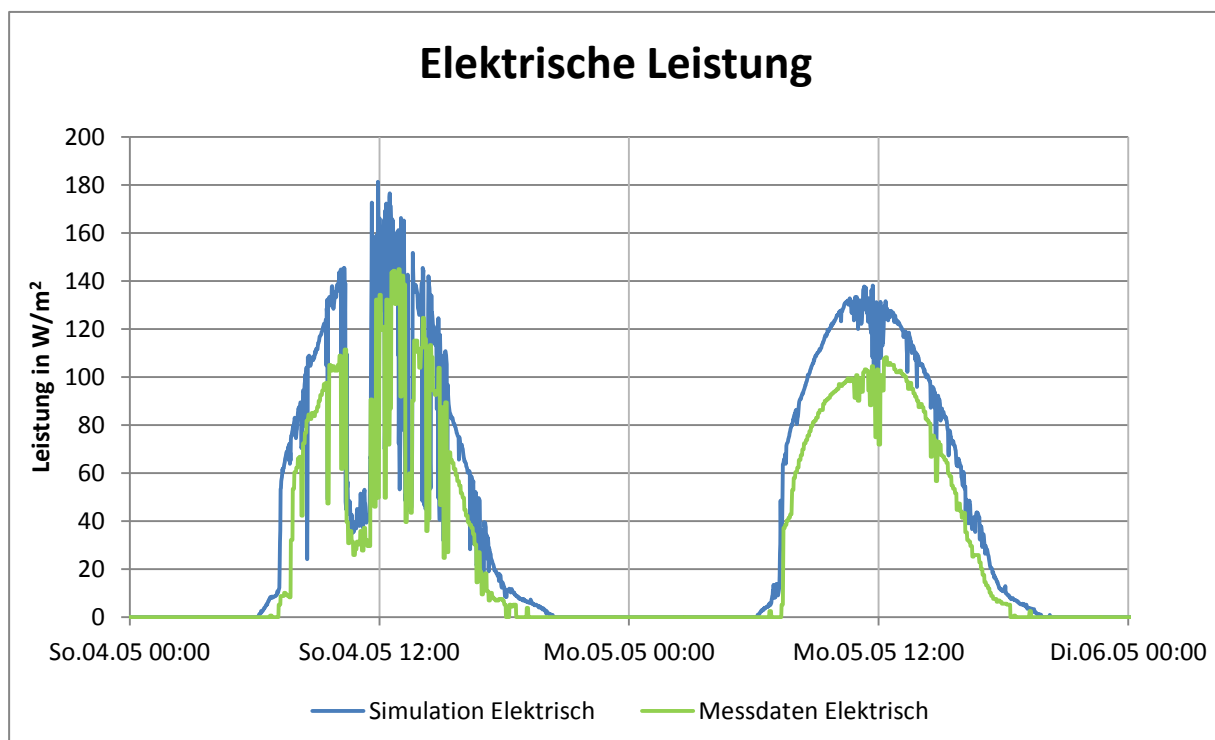


Abbildung 16, Verlauf der simulierten elektrischen Leistungen im Vergleich mit den realen Messwerten. Stellvertretend für die gesamte Messperiode sind oben der 04. und der 05. Mai dargestellt. Die grüne Kurve stellt die gemessenen Werte dar, die blaue die mittels Simulation berechneten Werte.

Oben dargestellt ist der Verlauf der simulierten und der effektiven elektrischen Leistungen der PVT-Kollektoren. Die Messwerte liegen um ca. 14 % tiefer, als die mit der Simulation berechneten.

ten Werte. Wenn in der Simulation für den Wirkungsgrad des Wechselrichters 80 % verwendet wird, anstelle der im Datenblatt angegebenen 94.3 %, dann stimmen die Werte überein. Um diese Annahme zu überprüfen wurde der Wechselrichter gemessen. Die Ergebnisse sind aus dem nächsten Kapitel zu entnehmen.

Wechselrichter PVT-Anlage

Weil die Messungen der elektrischen Seite rund 14% tiefere Erträge liefert als die berechneten Werte aus der Simulation wurde überprüft ob die Angaben zum Wechselrichter der Realität entsprechen. Für dies wurden mit einem für diesen Zweck vorgesehen Messgerät während zwei Wochen Messungen am Wechselrichter durchgeführt. Die Messperiode welche ausgewertet wurde dauerte vom 18.05.15 bis 01.06.15.

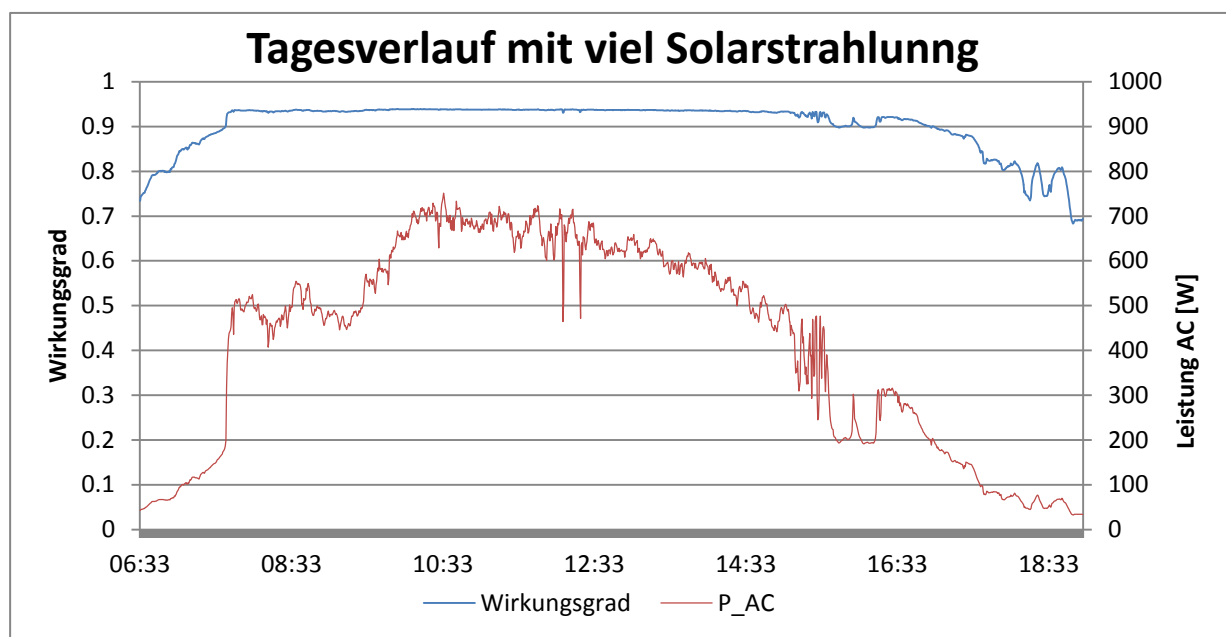


Abbildung 17, Tagesverlauf vom 31.05.2015 mit dem Wirkungsgrad des Wechselrichters und der Leistung an einem Tag mit hoher Sonneneinstrahlung

Wider Erwarten zeigte sich, dass der Wechselrichter über lange Zeit bei einem Wirkungsgrad von über 0.9 arbeitete. Die Peaks welche in der Ausgangsleistung ersichtlich sind, werden vom Wechselrichter nicht übernommen. Das heisst, der Wechselrichter kann mit Schwankungen bei der Solareinstrahlung gut umgehen und hält seinen Wirkungsgrad hoch. Weiter ist erkennbar, dass die PVT-Anlage nach SOO ausgerichtet ist, da die grösste Leistung bereits vor dem Mittag erzielt wird. Zu den Zeiten in welchen der Wirkungsgrad des Wechselrichters unter die 90 %-Marke fällt, ist auch ersichtlich dass die Leistung deutlich geringer ist, weshalb der niedrigere Wirkungsgrad für die Gesamtproduktion nicht ins Gewicht fällt. Im Durchschnitt arbeitete der Wechselrichter an diesem Tag mit einem Wirkungsgrad von 0.90.

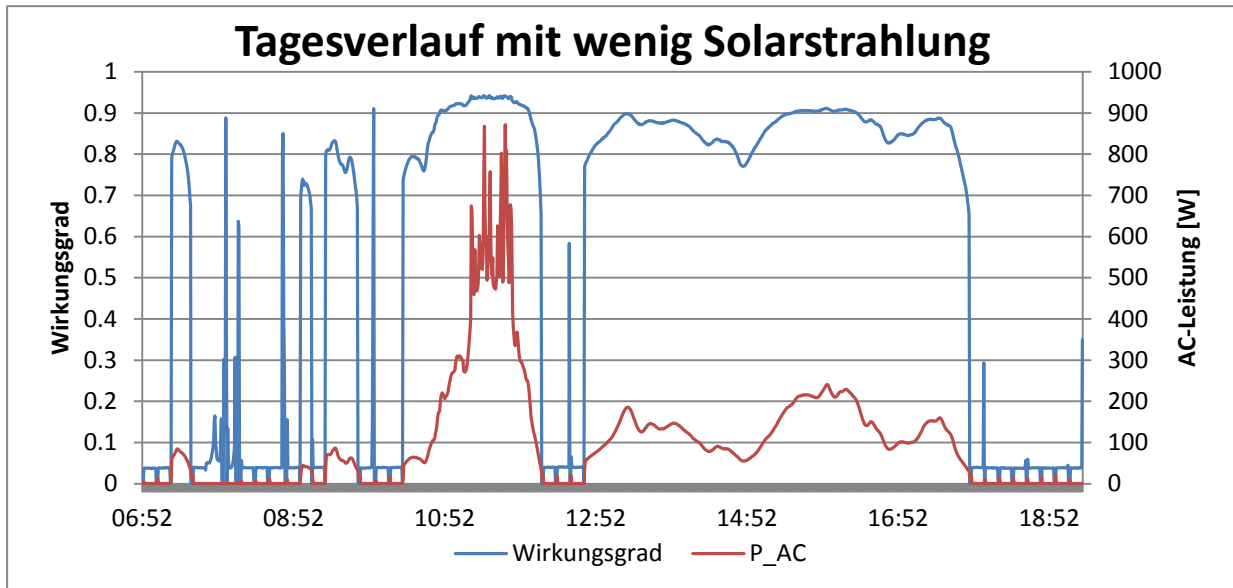


Abbildung 18, Tagesverlauf vom 26.05.2015 mit dem Wirkungsgrad des Wechselrichters und der Leistung an einem Tag mit wenig Sonneneinstrahlung

An Tagen mit geringer Sonneneinstrahlung zeigt sich ein anderes Bild. Solange die Ausgangsleistung unter 100 W bleibt, ist auch der Wirkungsgrad des Wechselrichters niedrig. Es ist auch gut ersichtlich, dass der Wechselrichter die Peaks bei der Leistung nicht ausgleichen kann (gut erkennbar zwischen 13:00 und 17:00). Sobald die Leistung über 500 W steigt, arbeitet der Wechselrichter mit einem sehr guten Wirkungsgrad. Die Peaks in der Leistung beeinträchtigen den Wirkungsgrad nicht massgeblich, er bleibt auf einem Niveau von über 0.9. Aufgrund der häufigen Zeitabschnitte in welchen der Wirkungsgrad unter 0.1 fällt, beträgt der mittlere Wirkungsgrad an diesem Tag 0.55 (Werte zwischen 0.944 und 0.099).

Aufgrund der ausgewerteten Messdaten kann das Einhalten der Angaben des Herstellers bezüglich des Wirkungsgrads bestätigt werden. Es wurden Wirkungsgrade bis 94.3 % gemessen. An sonnigen Sommertagen (ende Mai) ist der Wirkungsgrad während ca. 8 h auf einem Niveau von 93.5 %. So lange die Ausgangsleistung unter ca. 500 W liegt, arbeitet der Wechselrichter mit einem deutlich niedrigeren Wirkungsgrad. Bei der Simulation wurde davon ausgegangen, dass der Wechselrichter einen konstanten Wirkungsgrad von 94.3% hat. Wie die Messungen zeigten ist diese Annahme aber falsch.

5.2 Stromverbrauchsmessungen Büronutzung

5.2.1 Eigenstromanteil bei Büronutzung

Eine interessante Frage bei MINERGIE-A® mit Büronutzung ist, wie sich die Büronutzung auf die Eigenverbrauchsrate (EVR) und Eigendeckungsrate (EDR) auswirkt. Da der Strom tagsüber produziert wird und auch tagsüber bezogen wird (anders als bei Wohnhäusern, wo der Stromverbrauch morgens und abends anfällt wenn die PV-Anlage nicht produziert), wird eine hohe Gleichzeitigkeit zwischen Produktion und Verbrauch erwartet.

In der Jahresbilanz wird die Anforderung, dass mehr Strom produziert werden muss als verbraucht wird, erfüllt, also über 100% EDR. Je kleiner man jedoch das Bilanzierungsintervall wählt, umso kleiner wird auch die EVR und EDR, da Lastspitzen auftreten können welche nicht (oder nur zu einem geringeren Anteil) im gleichen Zeitraum von der PV-Produktion gedeckt werden können. Somit besteht die Möglichkeit, dass sich die Produktion und Verbrauch innerhalb eines Intervalls ausgleichen. Die EVR/EDR-Werte werden so besser als die Realität.

Damit ein direkter Vergleich von einer Büronutzung zu einer Wohnnutzung gemacht werden

kann, wurde in den folgenden Ergebnissen nur ein Teil der Produktion und des Verbrauchs mit eingerechnet.

Berechnung für den Anteil der Gebäudetechnik anhand der EBF:

- EBF Total: 1205 m²
- EBF Zone Büronutzung: 366 m²

Die Zone Büronutzung macht einen Anteil von 30% der totalen EBF aus (1205 m²/366 m²). Entsprechend wird 30% vom Verbrauch der Gebäudetechnik der Zone Büronutzung angerechnet. Somit ergibt sich ein Verbrauch für die Gebäudetechnik und die Büronutzung (inkl. Elektroauto) von **22'473 kWh** für die Messperiode vom 1. Mai 2014 bis 30. April 2015.

Berechnung für den Anteil der PV-Anlage anhand des Verbrauchs:

Bei der Berechnung für die Produktion wird angenommen, dass die PVA übers Jahr gesehen gleich viel produziert, wie das Büro mit dem Anteil der Gebäudetechnik verbraucht. Für dies muss die PVA eine Leistung von 21.7 kWp haben (Produktion liegt dann bei 22'435 kWh).

In der Praxis wird es schwer sein, eine 21.7 kWp PVA auf ein Bürogebäude mit einer EBF von 366 m² zu montieren. Diese Betrachtungsweise erlaubt aber ein direkter Vergleich zu einem Gebäude mit Wohnnutzung.

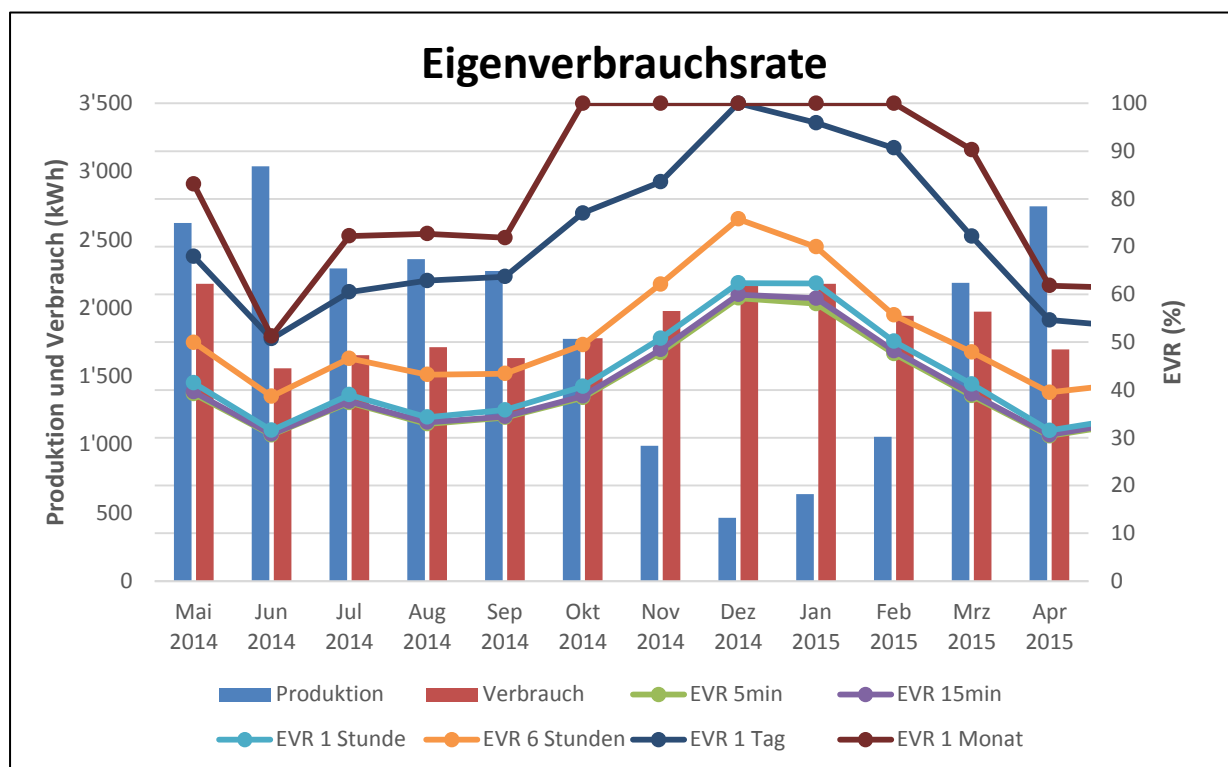


Abbildung 19, Eigenverbrauchsrate (EVR) über verschiedene Bilanzierungsintervalle, der 5min EVR (grün) befindet sich unter der 15min EVR (violett); Fallbeispiel Büronutzung inkl. Gebäudetechnik 366 m² und 21.7 kWp PVA

Das Bilanzierungsintervall von 1 Stunde ist annähernd deckungsgleich mit dem 15min und 5min Bilanzierungsintervall. Das Bilanzierungsintervall über 6 Stunden ist konstant rund 10% höher, der 1 Tages und Monats Bilanzierungsintervall variiert sehr stark und ist demnach nicht aussagekräftig für die EVR. Im Juni war der Verbrauch sehr tief und die Produktion sehr hoch, entsprechend lag die EVR nur bei 30%. Umgekehrt verhält es sich im Dezember und Januar mit den höchsten Verbräuchen und kleinsten Produktion, dort lag die EVR bei fast 60%, über den Tag gesehen sogar bei 95 bis 100%.

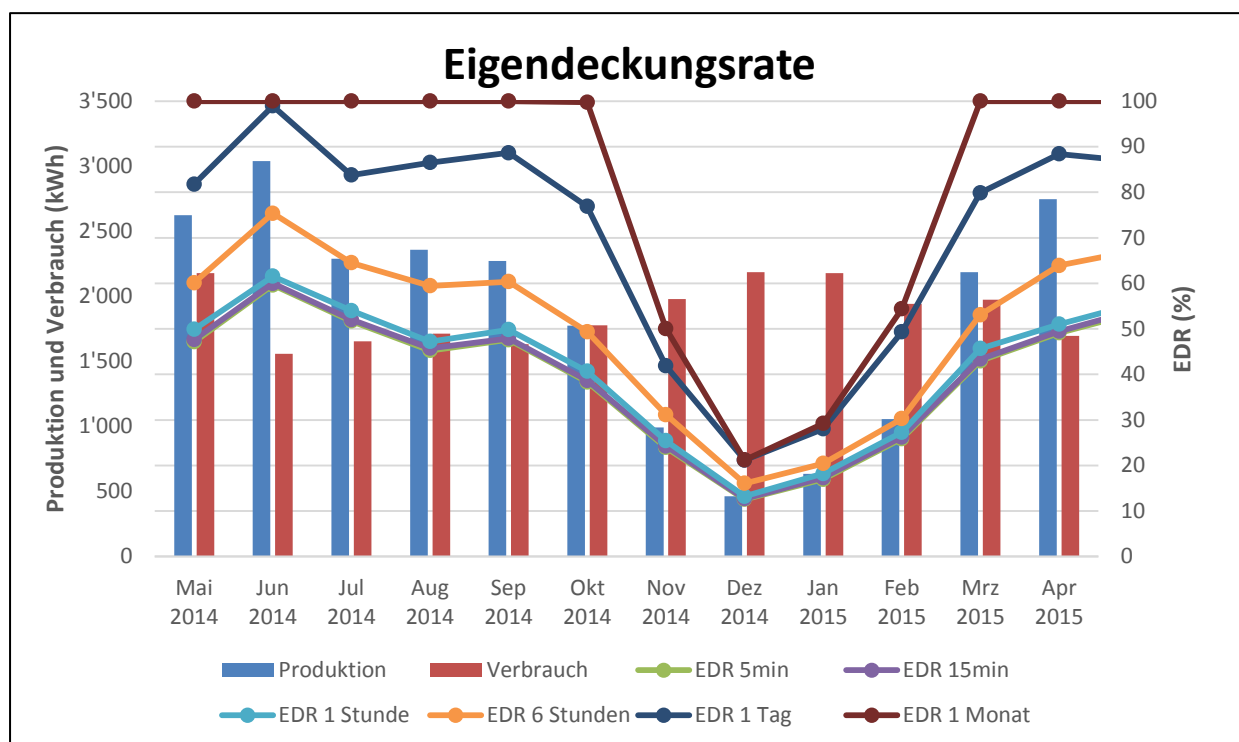


Abbildung 20, Eigendeckungsrate (EDR) über verschiedene Bilanzierungsintervalle, der 5min EDR (grün) befindet sich unter der 15min EDR (violett); Fallbeispiel Büronutzung inkl. Gebäudetechnik 366 m² und 21.7 kWp PVA

Mit den Bilanzierungsintervallen 5min bis 1 Stunde verhält es sich gleich wie die EVR in Abbildung 19. Über die Sommermonate April bis September, beträgt die EDR rund 50%. Während den Wintermonaten sinkt die Produktion um ein vielfaches und der Verbrauch steigt etwas an. Entsprechend sinkt die EDR auf unter 30%. In den Wintermonaten hat der Bilanzierungsintervall keinen grossen Einfluss mehr auf die EDR.

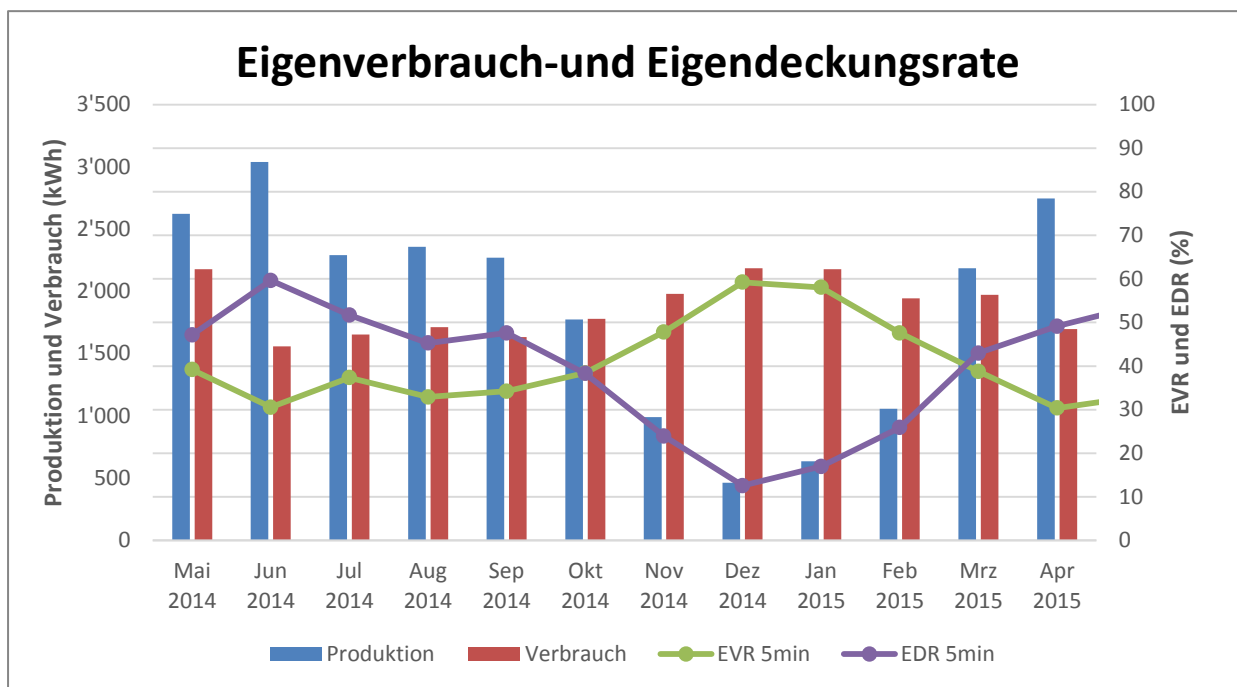


Abbildung 21, Eigenverbrauchsrate (EVR) und Eigendeckungsrate (EDR) über das Bilanzierungsintervall von 5min; Fallbeispiel Büronutzung inkl. Gebäudetechnik 366 m² und 21.7 kWp PVA

In der obigen Abbildung sind die EVR und EDR abgebildet. Einer der beiden Werte ist stets höher oder tiefer als der andere. Ausser im Oktober dort waren die Produktion und der Verbrauch beinahe gleich gross. Steigt die Produktion erhöht sich die EDR, steigt der Verbrauch erhöht sich die EVR. Für eine Optimierung der EDR und EVR ist die PVA-Grösse im Verhältnis zum Stromverbrauch entscheidend.

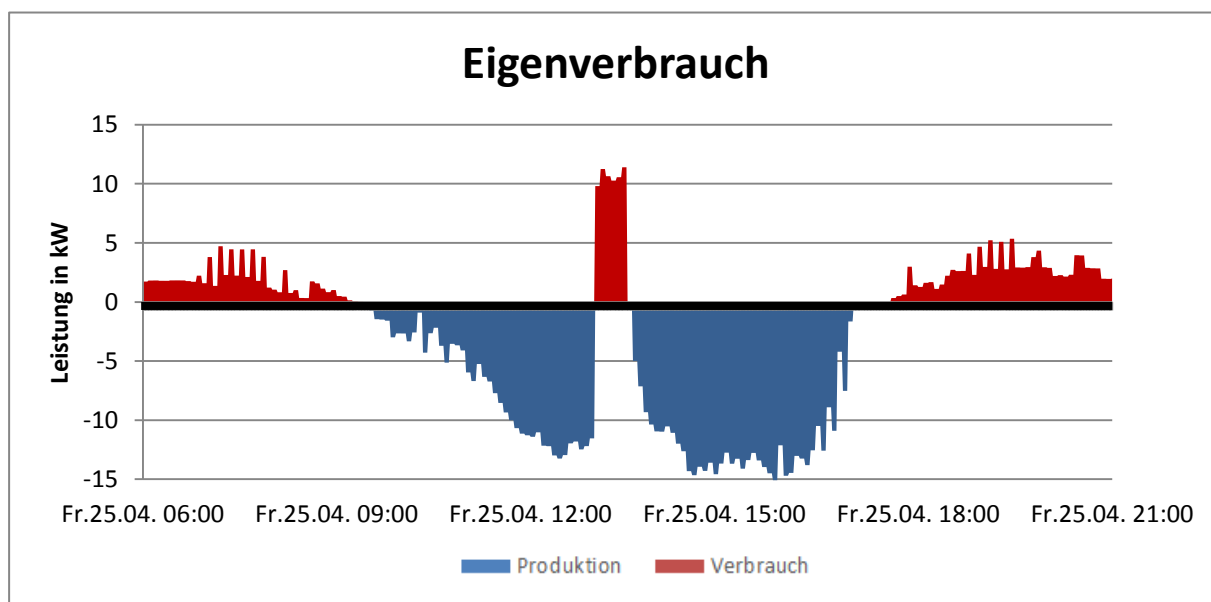


Abbildung 22, Der Eigenverbrauch zeigt die Differenz von Produktion und Verbrauch; rot: zeigt jenen Verbrauch, der von der PV-Anlage nicht gedeckt werden konnte und vom Netz bezogen wurde; blau: zeigt jene Produktion die ins Netz eingespeist wurde.

Es zeigt sich, dass an einem schönen Tag im Frühling deutlich mehr Strom produziert wird als verbraucht wurde. Die Anlage hat an diesem Tag 308 kWh (100 %) produziert, der totale Stromverbrauch war 101 kWh (33 %). Somit wurde an diesem Tag ein Überschuss von 207 kWh

(67 %) produziert.

Der Peak nach dem Mittag entsteht beim Laden des Elektroautos, während 75 min bezieht das Elektroauto bis zu 21 kW. Total brauchte es 13 kWh bis der Akku wieder geladen war. Dies entspricht 60% einer Volladung (22 kWh). Mit einer intelligenten Ladung könnte dieser Peak gebrochen werden indem über eine länger Zeit mit einer geringern Leistung geladen wird, mehr dazu im Kapitel 6.6.

5.2.2 Kennzahlen Eigenstromanteil bei Büronutzung

In der Tabelle 4, sind die Mittelwerte über 1 Jahr der verschiedenen Bilanzierungsintervalle von EVR und EDR aus dem Kapitel 5.2.1 dargestellt.

	5min	15min	1h	6h	1 Tag	1 Monat	1 Jahr
EVR in %	37.2	37.5	39.1	47.1	66.6	77.2	100
EDR in %	37.1	37.5	39.0	47.0	66.5	77.1	100

Tabelle 4, Mittelwerte über die verschiedenen Bilanzierungsintervalle der Eigenverbrauchsrate (EVR) und Eigendeckungsrate (EDR)

Grob betrachtet liegt die EDR und EVR bei diesem Fallbeispiel bei rund 40%. Die Werte erreichen bei Wohnbauten in der Regel nicht mehr als 30%. Somit kann gesagt werden dass die EVR und EDR in einem Bürogebäude rund 10% höher ausfällt als bei einem Wohngebäude. Erstaunlicherweise ist die EVR und EDR bei allen Intervallen gleich gross. Dies hängt wahrscheinlich damit zusammen, dass in diesem Fallbeispiel der Verbrauch und die Produktion übers Jahr genau gleich hoch sind.

5.3 Kennzahlen PVT-Anlage

Aufgrund fehlender Messdaten konnte vom SD und dem η_{KN} keine Jahresauswertung gemacht werden. Beim Jahresertrag wurden die fehlenden Messdaten anhand von vergleichbaren Monaten aufgerechnet. Entsprechend sind diese Zahlen mit Vorsicht zu geniessen.

5.3.1 Jahresertrag

Der Jahresertrag der PVT-Anlage beträgt auf der thermischen Seite 1300 kWh und auf der elektrischen Seite 700 kWh. Zusammen ist der Ertrag 2000 kWh oder 280 kWh/m² Absorberfläche, respektive 1.7 kWh/m² Energiebezugsfläche.

Es ist zu berücksichtigen dass auf der thermischen Seite erhebliche Messlücken entstanden sind, entsprechend sind die Zahlen mit Vorsicht zu geniessen.

5.3.2 Solarer Deckungsgrad Warmwasser

Der Solare Deckungsgrad (SD) beschreibt den Anteil der solaren Energie am Warmwasser.

$$SD = \frac{Q_{WW} - Q_{Zu}}{Q_{WW}}$$

Monat	SD
Mai	0.14
Juni	0.27
Juli	0.09
August	0.18
September	0.24 ¹
Oktober	0.15 ²
November	0.06
Total	0.16

Tabelle 5, Auswertung SD

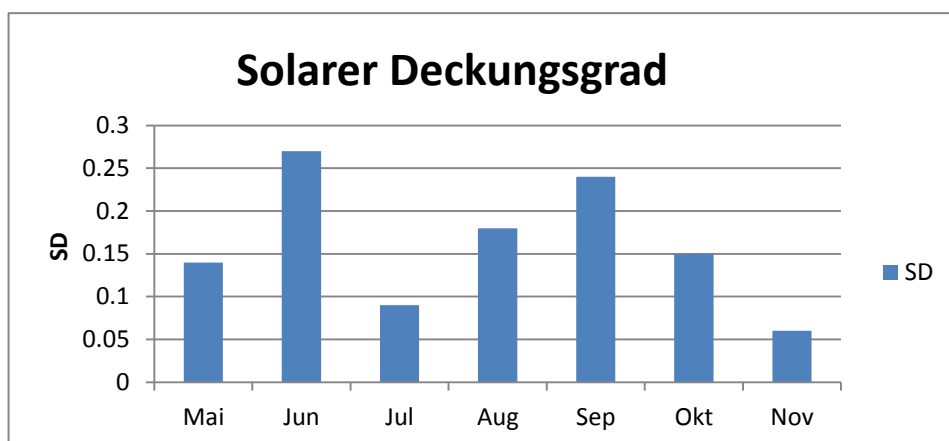


Abbildung 23, Solarer Deckungsgrad Mai bis November 2014

¹ Messlücke: Datenlogger Labview vom 20.09.2014-01.10.2014

² Messlücke: Datenlogger Labview vom 20.09.2014-07.10.2014 und vom 25.10.14-31.10.14

Die Begleitheizung wurde in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Der SD würde sonst negative Werte annehmen.

Für Systeme mit solarer Vorerwärmung wird der SD bei verglasten Flachkollektoren auf unter 30% ausgelegt. Da es sich hier um eine PVT-Anlage handelt, dürfen die Systeme fairerweise nicht 1:1 verglichen werden. Der SD erreicht im Juni knapp 30%. Im Juli ist der SD mit 9% erstaunlicherweise sehr klein. Erstaunlich, weil der Juli mit 184 kWh produzierter thermischer Energie, einer der besten solaren Erträge aufweist.

Eine mögliche Erklärung ist, dass der Anteil von der WP erzeugte Energie zu hoch ist. Ein weiterer Grund dafür könnte sein, dass die WP, auch ohne oder geringem Warmwasserbedarf, aufgrund des Zeitprogrammes eine minimale Einschalthäufigkeit aufweist. Auch muss eine minimale Laufzeit von 10 Minuten eingehalten werden. Dies führt zu einer Überproduktion von Wärmeenergie der WP. Mit einem Ferienprogramm, welches im Regler programmiert werden kann, könnte dieses Problem umgangen werden.

Je kürzer die Tage werden, desto geringer wird der SD. Im Winterbetrieb muss mit viel kleineren Werten (gegen 0) gerechnet werden.

5.4 Kennzahlen Gebäude

Aufgrund fehlender Messdaten und dem zeitlich beschränkten Budget des Studenten konnte vom SNG und dem SNG_K keine Jahresauswertung gemacht werden.

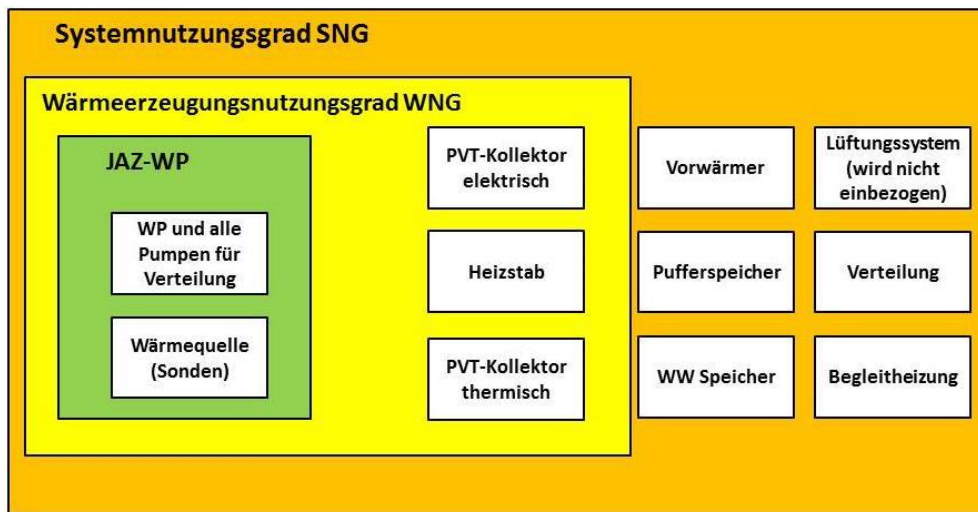


Abbildung 24, Um die verschiedenen Größen definieren zu können wurden verschiedenen Bilanzgrenzen gezogen.

Neben den oben abgebildeten Kennzahlen wurde die Minergie-Kennzahl-Wärme ermittelt.

5.4.1 Jahresertrag PV-Anlage

Die PV-Anlage lieferte während der ganzen Messperiode vom Mai 2014 bis April 2015 24'500 kWh oder 20 kWh/m² EBF.

5.4.2 Jahresverbrauch Gebäudetechnik

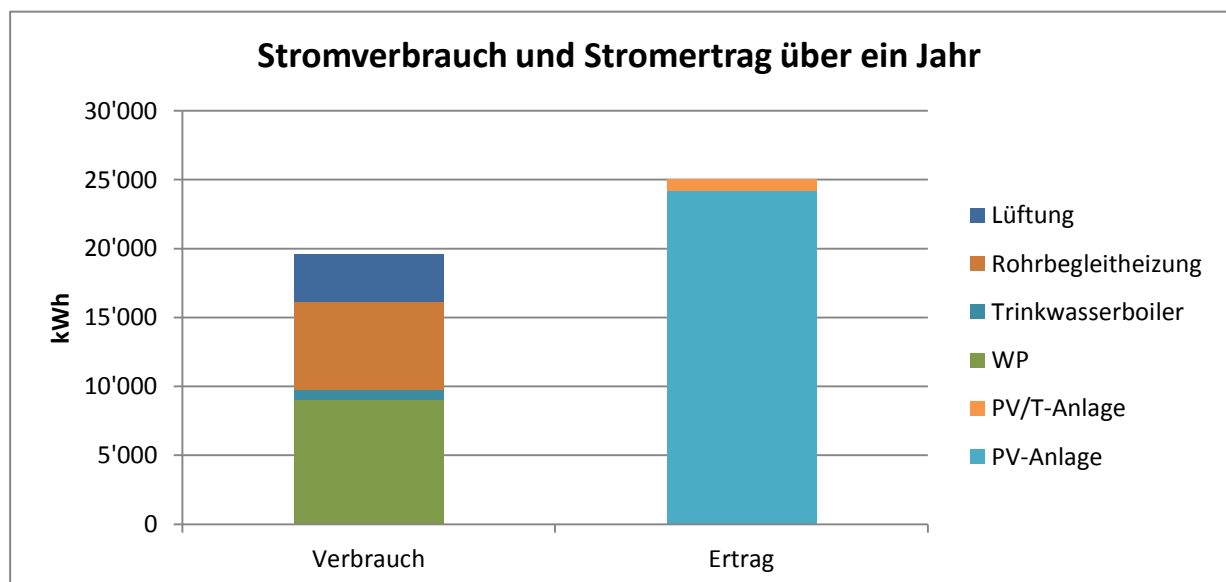


Abbildung 25, Stromverbrauch Gebäudetechnik und Stromertrag (23.04.14 - 22.04.15)

Gesamthaft benötigten die Gebäudetechnik 19'000 kWh Energie. Aus der PV- und PV/T-Produktion resultierte ein Gewinn von 25'000 kWh. Es ist ersichtlich, dass die Begleitheizung einen beachtlichen Anteil (von 32 %) am Stromverbrauch ausmacht. Rechnet man mit dem

durchschnittlichen Verbrauch nach den Optimierungen am Begleitheizband, sinkt der Stromverbrauch um ca. 4'500 kWh. Im Kapitel 6.2 wird weiter darauf eingegangen.

5.4.3 Jahresarbeitszahl Wärmepumpe

Die Jahresarbeitszahl (JAZ) wird zur Bewertung der energetischen Effizienz der Wärmepumpe verwendet. Sie gibt Auskunft über das Verhältnis der gewonnen Wärmeenergie zur aufgewendeten elektrischen Energie über das ganze Jahr hinweg betrachtet.

Die Formel für die Berechnung der JAZ ist wie folgt definiert:

$$JAZ_{WP-hww} = \frac{Q_{WP-hww}}{E_{WP}}$$

Monat	JAZ
Mai	3.81
Juni	3.19
Juli	3.12
August	3.13
September	3.10
Oktober	3.25 ¹
November	3.68 ²
Dezember	4.39
Januar	4.25
Februar	4.30
März	3.17
April	3.76 ³
Total	3.56

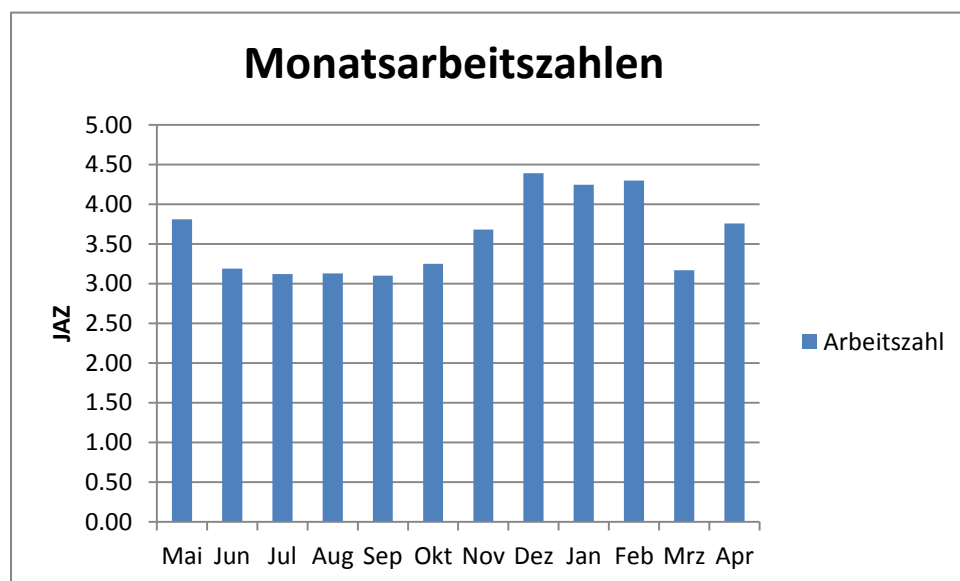


Abbildung 26, Monatsarbeitszahlen Mai 2014 bis April 2015

Tabelle 6, Auswertung JAZ

¹ Messlücke: Datenlogger CTA vom 25.10.14-27.10.14

² Der Durchflusszähler FQIR138 funktionierte nicht durchgehend. Bei Ausfall wurde mit einem konstanten Massenstrom gerechnet, welcher aus vorhergehenden Daten ermittelt wurde

³ Für den April 15 bestehen keine Daten vom Datenlogger CTA. Daher wurden die Werte für Q_{WP-hww} aus den Monaten Mai und März gemittelt.

Die WP erreicht mit einer Jahresarbeitszahl von 3.56, Werte die mit konventionellen Sole/Wasser-Wärme-pumpen mit Erdwärmesonden vergleichbar sind.

Der Grund für die tieferen Arbeitszahlen in den Sommermonaten ist die Warmwasserproduktion. Je kleiner der zu überwindende Temperaturhub zwischen der Erdoberflächtemperatur und der heizseitigen Vorlauftemperatur ist, desto effizienter arbeitet die WP. Dies wäre im Heizbetrieb der Fall, da das vorhandene Wärmeabgabesystem, die Fussbodenheizung, eine Vorlauftemperatur von lediglich 35 °C benötigt. Da das Warmwasser von der Wärmepumpe auf 55 °C erwärmt wird, werden schlechtere Arbeitszahlen erreicht. Die solare Vorwärmung des Warmwassers kann als weiteren Grund für die tiefen Arbeitszahlen in den Sommermonaten gesehen werden. Das vorgewärmte Warmwasser erreicht zu Spitzenzeiten Werte von 40 °C. Die Wärmepumpe wird also lediglich für die Nachwärmung benötigt, arbeitet dabei in einem Bereich mit schlechtem COP und weist daher sehr kurze Laufzeiten auf. Dies wirkt sich negativ auf die Arbeitszahl aus. Die kälteren Monate weisen aus den oben genannten Gründen auch eine bessere Arbeitszahl auf. Abschliessende Aussagen zur JAZ der WP können noch nicht gemacht werden, da innerhalb der Messperiode noch verschiedene Anpassungen gemacht wurden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die JAZ im zweiten Betriebsjahr deutlich höher ausfallen wird.

5.4.4 Wärmenutzungsgrad

Der Wärmenutzungsgrad (WNG) beschreibt das Verhältnis der von allen Wärmeerzeugern produzierten Wärme zur aufgewandten, elektrischen Energie. Laut Bilanzgrenzen darf der gewonnene elektrische Ertrag der PVT Anlage davon abgezogen werden. Die Begleitheizung wird in dieser Definition weggelassen.

Die Formel für die Berechnung des WNG ist wie folgt definiert:

$$WNG = \frac{Q_{WP-HWW} + Q_{Sol} + Q_{ZH}}{E_{WP} + E_{Sol} + E_{ZH} - E_{PVT}}$$

Monat	WNG
Mai	4.88
Juni	9.12
Juli	6.36
August	3.66 ¹
September	3.14 ²
Oktober	3.79 ³
November	3.65 ⁴
Dezember	4.29 ⁵
Januar	3.03 ⁶
Februar	4.30 ⁶
März	3.43 ⁶
April	5.25 ⁷
Total	3.99

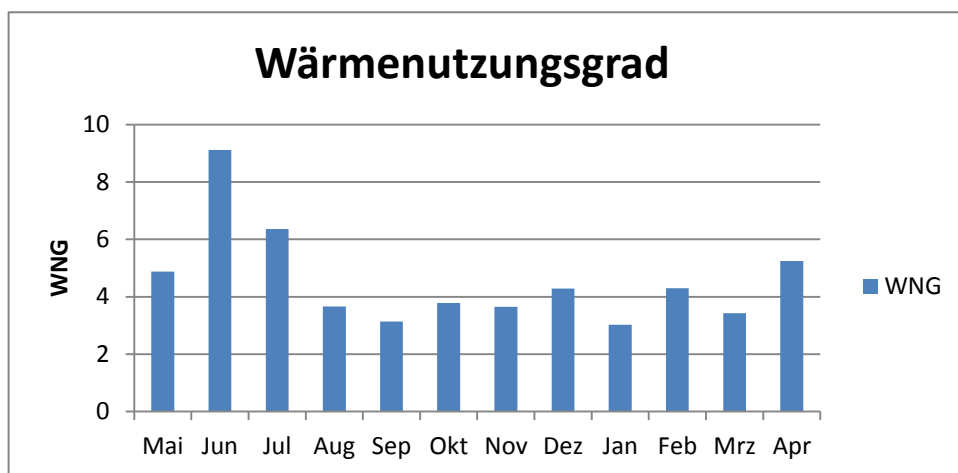


Abbildung 27, Wärmenutzungsgrad Mai 2014 bis April 2015

Tabelle 7, Auswertung WNG

¹Messlücke Datenlogger Soltop (PVT): 04.08.2014-19.09.2014

²Messlücke Datenlogger Soltop (PVT): 04.08.2014-19.09.2014 und Labview: 19.09.2014-07.10.2014

³Messlücke Datenlogger CTA: 25.10.14-27.10.14

⁴Messlücke Datenlogger Soltop (PVT): 14.11.2014-01.12.2014

⁵Messlücke Datenlogger Soltop (PVT): 01.12.2014-18.12.2014

⁶Messlücke Datenlogger Soltop (PVT): 16.01.2015-26.03.2015

⁷Wert wurde interpoliert, s. Auswertung JAZ

Für Q_{Sol} wurden aufgrund der Messausfälle für die Monate Dezember bis März Werte angenommen. Es stellte sich heraus, dass der Einfluss auf das Endergebnis sehr gering ist. Das Ergebnis von einem WNG 3.99 wurde aus dem Total der Werte berechnet. Das Ergebnis ist sehr zufriedenstellend. Es bedeutet, dass ungefähr vier Mal mehr Wärmeenergie erzeugt werden konnte, als elektrische Energie dafür aufgewendet werden musste. Es ist zu beachten, dass in der Auswertung über das gesamte Jahr die Begleitheizung nicht mit einbezogen wurde. Diese hat einen grossen Einfluss auf den WNG. Mit den optimierten Einstellungen am Begleitheizband wird erwartet, dass auch unter Berücksichtigung desselben ein guter WNG erreicht werden kann.

Um den Einfluss des Begleitheizbandes auf den WNG deutlich zu machen, wurden die Monate Dezember 2014 bis März 2015 einmal ohne und einmal mit Begleitheizung berechnet. Der WNG veränderte sich dadurch deutlich wie in der nebenstehenden Tabelle ersichtlich ist.

	WNG 12.2014 bis 03.2015
Ohne Begleitheizung	3.88
Mit Begleitheizung	3.05

Tabelle 8, Auswirkung Begleitheizband auf den WNG

5.4.5 Systemnutzungsgrad Wärme

Der Systemnutzungsgrad (SNG) ist das Verhältnis der Nutzwärme für Warmwasser und Raumheizung zur gesamten, für die Produktion benötigte elektrische Energie (inkl. Begleitheizung). Auch hier darf nach den Bilanzgrenzen die produzierte elektrische Energie der PVT-Anlage subtrahiert werden.

$$SNG = \frac{Q_{WW} + Q_H}{E_{WP} + E_{Sol} + E_{ZH} - E_{PVT}}$$

Der SNG konnte aufgrund technischer Probleme und aus Zeitgründen nicht für das ganze Jahr berechnet werden. Eine aussagekräftige Interpretation zum SNG über ein Jahr ist nicht möglich.

Monat	SNG
Mai	1.4
Juni	1.1
Juli	0.7
August	1 ¹
September	0.9 ²
Oktober	1 ³
November	2 ⁴
Dezember	2.1 ³
Total	1.3

Tabelle 9, Auswertung SNG

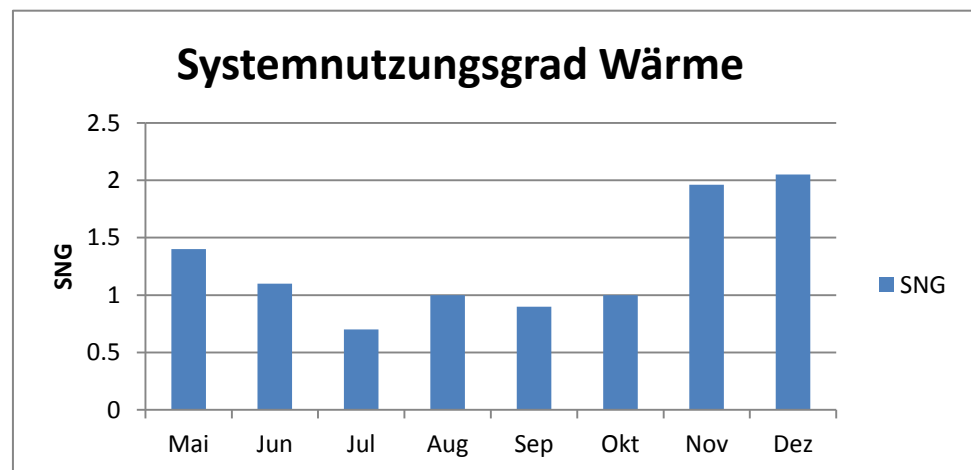


Abbildung 28, Systemnutzungsgrad Wärme Mai bis Dezember 2014

¹ Messlücke: Datenlogger Soltop (PVT) vom 04.08.2014-19.09.2014; ESol wurde geschätzt

² Messlücke: Datenlogger Labview vom 20.09.2014-01.10.2014

³ Messlücke: Datenlogger Labview vom 20.09.2014-07.10.2014 und vom 25.10.14-31.10.14

⁴ Messlücke: Datenlogger Soltop (PVT) vom 14.11.2014-18.12.2014; ESol wurde geschätzt

Die Auswertung vom Mai bis Dezember zeigt das der SNG während der Heizperiode rund doppelt so hoch ist wie in während den Sommermonaten. Im Juli und September fällt der SNG unter eins, das heisst die Speicher und verteil Verluste überwiegen der effizienten Produktion durch die WP und der PVT-Anlage. Der Hauptgrund ist hier die Begleitheizung und der schlechte JAZ der WP wie bereits im Kapitel 5.4.1 erläutert.

Um den Einfluss des Begleitheizbandes auf den SNG deutlich zu machen, wurde im Mai einmal ohne und einmal mit Begleitheizung gerechnet. Der SNG veränderte sich dadurch deutlich wie in der nebenstehenden Tabelle ersichtlich ist.

	SNG Mai 2014
Ohne Begleitheizung	4
Mit Begleitheizung	1.4

Tabelle 10, Auswirkung Begleitheizband auf den SNG

5.4.6 Systemnutzungsgrad Kühlung

Um die Effizienz des passiven Kühlbetriebs zu beschreiben, wird das Verhältnis von der über die Bodenheizung abgeführten Kühlenergie mit der dazu aufgewendeten Pumpenenergie für die Wärmequelle und Wärmeverteilung gebildet. Dieser Wert wird als Systemnutzungsgrad Kühlung (SNG_K) bezeichnet.

$$SNG_K = \frac{Q_K}{E_{Pumpen}}$$

Monat	SNG _K
Mai	14
Juni	17
Juli	17
August	17 ¹
September	21 ²
Total	17

Tabelle 11, Auswertung SNG_K

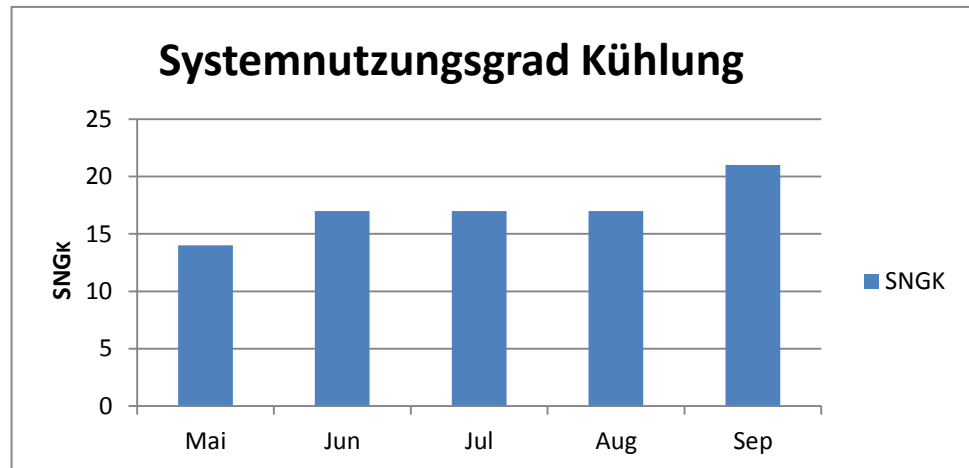


Abbildung 29, Systemnutzungsgrad Kühlung vom Mai bis September 2014

¹ Messlücke: Datenlogger MBSheet vom 03.06.14-7.10.14 & 25.10.14-27.10.14 & 26.11.14-27.11.14

² Messlücke: Datenlogger Labview vom 20.09.2014-01.10.2014

Die Pumpenleistung wird vom gleichen Energiezähler erfasst wie die Wärmepumpenleistung. Für die Berechnung der Pumpenenergie wird eine durchschnittliche Pumpenleistung von 0.6kW verwendet.

Der Systemnutzungsgrad „Kühlen“ ist aufgrund der konstanten Pumpenleistung nur davon abhängig, wie viel Wärme aus dem Gebäude abgeführt werden kann. Der Nutzungsgrad über den ganzen Sommer hinweg beträgt 17. Dieser Wert ist Vergleichbar mit anderen Anlagen welche in der Regel einen Systemnutzungsgrad Kühlung zwischen 10 bis 30 erreichen. Darin nicht berücksichtigt ist der positive Nebeneffekt, dass die WP einen besseren COP erreicht. Dieser Nebeneffekt wird im folgenden Abschnitt genau erläutert.

COP Steigerung dank Kühlbetrieb

Um den Kühlbetrieb und das Verhalten der Anlage zu charakterisieren, wurde der Monat analysiert, in dem am meisten gekühlt wurde. Mit einer abgeführten Wärmenergie von 2100 kWh war dies der Monat Juni. Dies entspricht in etwa 40% der ganzen Messperiode. Die Auswertung der Sommerperiode zeigt, dass mehr als 5.5 MWh Wärmenergie aus dem Gebäude abgeführt werden konnten.

Im Juni wurden insgesamt 229 Stunden gekühlt. Dies entspricht in etwa 32% der Stunden vom ganzen Monat. Im Mittel wurde mit einer Leistung von 9.3 kW gekühlt, wobei temporär eine maximale Kühlleistung von 14.7 kW erreicht wurde. Die mittlere Kühlleistung entspricht einer spezifischen Kühlleistung von 7.7 W/m²_{EBF}. Die maximale Kühlleistung wurde nach einer Periode erreicht, in der für eine längere Zeit nicht gekühlt wurde, er entspricht einer spezifischen Kühlleistung von 12.2 W/m²_{EBF}.

Laut Theorie sollte die Wärmepumpe im gleichzeitigen Kühlbetrieb effizienter Warmwasser produzieren. Dieser Effekt konnte anhand der Messdaten nachgewiesen werden:

Die Sole-Vorlauftemperatur erreichte im Kühlbetrieb eine gemittelte Vorlauftemperatur von 14°C. Dies entspricht einer mittleren Temperaturerhöhung von 1.7 K im Parallelbetrieb. Diese Temperaturerhöhung hat zur Folge, dass mehr Wärmenergie vom Solekreislauf für die Wärme-

pumpe zur Verfügung steht.

Diese Energie ist wie folgt definiert:

$$Q_{Sole} = V_{Sole} * \rho_{Sole} * cp_{Sole} * (T_{Sole-VL} - T_{Sole-RL})$$

Die Temperaturdifferenz ($T_{Sole-VL} - T_{Sole-RL}$) wurde durch die Temperaturerhöhung im Vorlauf positiv beeinflusst. Gemittelt ist sie im Parallelbetrieb um 0.5 K höher als im Normalbetrieb. Bei konstantem Volumenstrom im Solekreislauf entspricht dies einer erhöhten Wärmeleistung von 20%, die an die Wärmepumpe abgegeben wird.

Im gleichzeitigen Kühlbetrieb erreichte die Wärmepumpe eine Arbeitszahl von 3.7. Die Leistungszahl konnte im Parallelbetrieb also etwas verbessert werden.

	COP
Ohne Kühlen	3.5
Mit Kühlen	3.7

Tabelle 12, gemittelte COP's der WP im Juni

5.4.7 MINERGIE-Kennzahl-Wärme

Zur Berechnung der MINERGIE-Kennzahl-Wärme wurde der Strombedarf für Heizung, Warmwasser und Lüften mit dem Gewichtungsfaktor g multipliziert. Davon wurde die erzeugte elektrische Energie, welche mit dem Gewichtungsfaktor multipliziert wurde, abgezogen. Danach wurde noch durch die Energiebezugsfläche (1205 m²) dividiert. Der Wert für den Gewichtungsfaktor wurde stammt aus dem Reglement für MINERGIE-A.

$$(E_{LK} + E_{WP} + E_{Sol} + E_{ZH}) * g - (E_{PV} + E_{PVT}) * g \leq MINERGIE - A - Grenzwert \left(0 \frac{kWh}{m^2} \right)$$

Monat	MINERGIE- Kennzahl-Wärme in kWh/m²
Mai	-2.91
Juni	-3.76
Juli	-2.18
August	-2.47 ¹
September	-2.40 ¹
Oktober	-1.23
November	0.58
Dezember	3.00 ²
Januar	3.11 ²
Februar	2.15 ²
März	-0.94
April	-2.66
Total	-9.70

Tabelle 13, Auswertung der MINERGIE®-Kennzahl Wärme

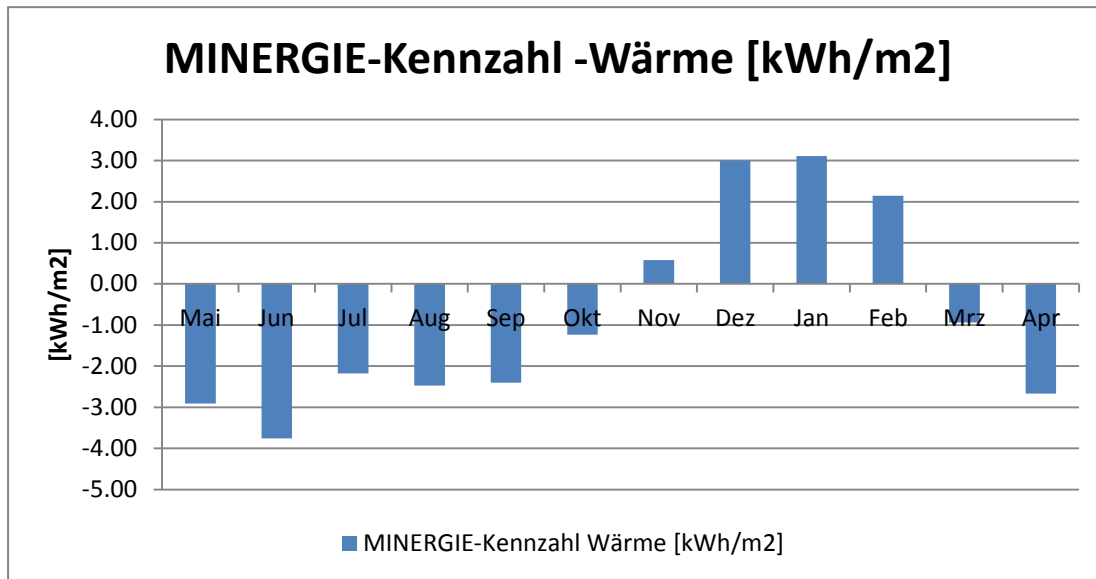


Abbildung 30, MINERGIE®-Kennzahl Wärme für alle Monate während des ersten Betriebsjahres in [kWh/m²]

¹ Die Zählerstände für die Komfortlüftungen wurden monatlich abgelesen und von Hand erfasst. Die Monate August und September wurden in der Betriebskontrolle nicht einzeln erfasst. In diesem Fall wurde der Energieverbrauch gleichmässig auf die zwei Monate verteilt. Der Zählerstand hatte sich im Monat Mai kaum verändert. Hier scheint ein Messfehler vorzuliegen. Es wurde mit den vorhandenen Werten gerechnet.

² Da die Messungen von Soltop in der Zeit von Dezember 14 bis Mitte Februar 15 nicht zuverlässig liefen, wurde für die 3 Monate Dezember, Januar und Februar dieselben Werte angenommen, berechnet aus den Daten zwischen dem 19.12.14 und dem 13.01.15. Dies wird als möglich erachtet, da die Sonneneinstrahlung zu dieser Jahreszeit vergleichsweise sehr gering war und die Resultate dadurch nicht zu stark verfälscht wurden.

Die MINERGIE-Kennzahl-Wärme erfüllt mit einem Jahreswert von -9.7 kWh/m^2 deutlich die Anforderungen an MINERGIE-A. Die Kennzahl unterschreitet sogar den Planungswert von -7.3 kWh/m^2 . Ein negativer Wert bedeutet, dass mehr Energie durch die PV-Anlage erzeugt als für die Wärmeerzeugung verbraucht wird. Die Kennzahl multipliziert mit der EBF ergibt der Energieüberschuss des produzierten Stroms bezüglich der für Wärme aufgewendeten Energie. In der Monatsauswertung sieht man gut, dass in den Wintermonaten von November bis Februar die Vorgabe nicht eingehalten wird. Dafür verantwortlich ist der hohe Energieverbrauch der Wärmepumpe bei gleichzeitig niedrigem Ertrag durch die PV-Anlage. Durch die guten Werte in den Sommermonaten werden diese jedoch kompensiert. Es ist davon auszugehen, dass der Wert noch weiter sinkt, sobald sich die Optimierungen an der Begleitheizung bemerkbar machen. Die Begleitheizung hat einen grossen Einfluss auf die MINERGIE-Kennzahl Wärme (rund 15%). Das bewertete Jahr ist klimatisch nicht besonders erwähnenswert, die Wintermonate waren jedoch etwas überdurchschnittlich mild.

5.5 Erfolgskontrolle Komfort und Nutzung

Diese Messungen wurden gemacht, damit sichergestellt ist, dass während der Messperiode die Komfortansprüche an die Büroräume erfüllt werden. Während der Messung wurde darauf geachtet, dass die Fenster geschlossen sind.

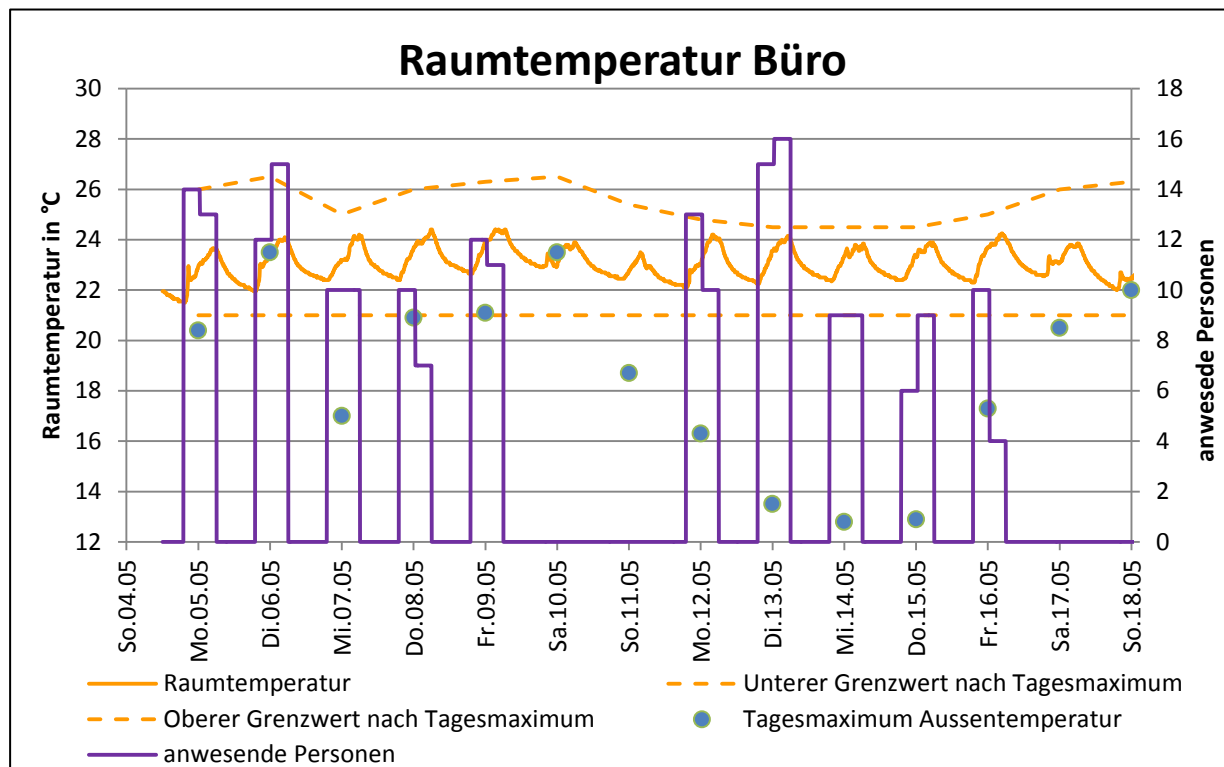


Abbildung 31, Die violette Linie zeigt die Anzahl anwesender Personen zwischen 07:00-12:30 bzw. 12:30-18:00. Die blauen Punkte geben das jeweilige Tagesmaximum der AT am entsprechenden Tag an. Diese wird benötigt, um die Grenzwerte (orange gestrichelte Linie) zu bestimmen. Der untere bzw. obere Grenzwert für die Raumtemperatur in einem Einzel-, Gruppenbüro ist im Sommer 22-26,5°C bzw. im Winter 21-24,5°C. Die orange ausgezogene Linie zeigt den Verlauf der Raumtemperatur.

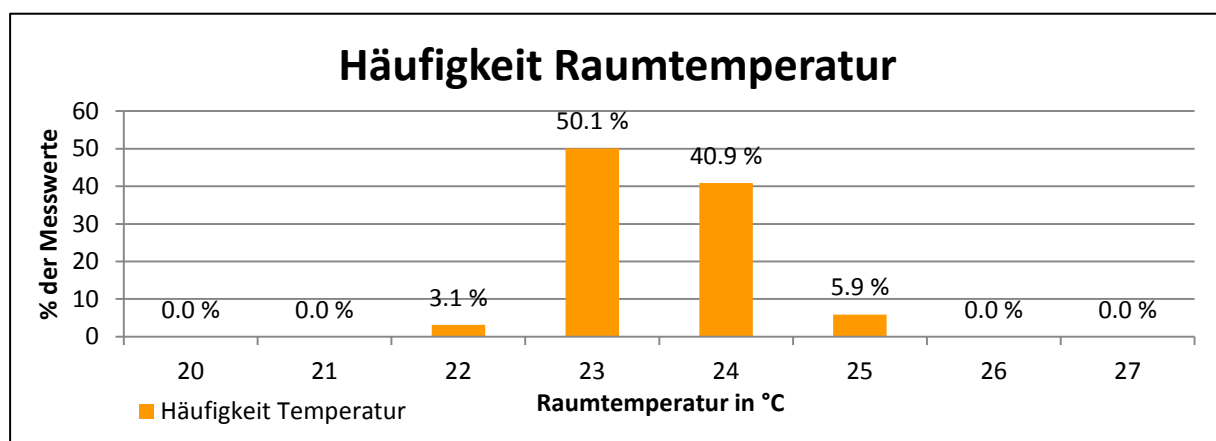


Abbildung 32, Der Balken zeigt die Häufigkeit der jeweiligen Raumtemperatur.

Die Raumtemperatur betrug in der Messperiode zu 90 % zwischen 23 und 24 °C. Die Grenzwerte wurden immer eingehalten. Die Temperatur verändert sich bei vielen anwesenden Personen nur geringfügig. Daraus lässt sich schliessen, dass die Lüftung und die Heizung korrekt laufen.

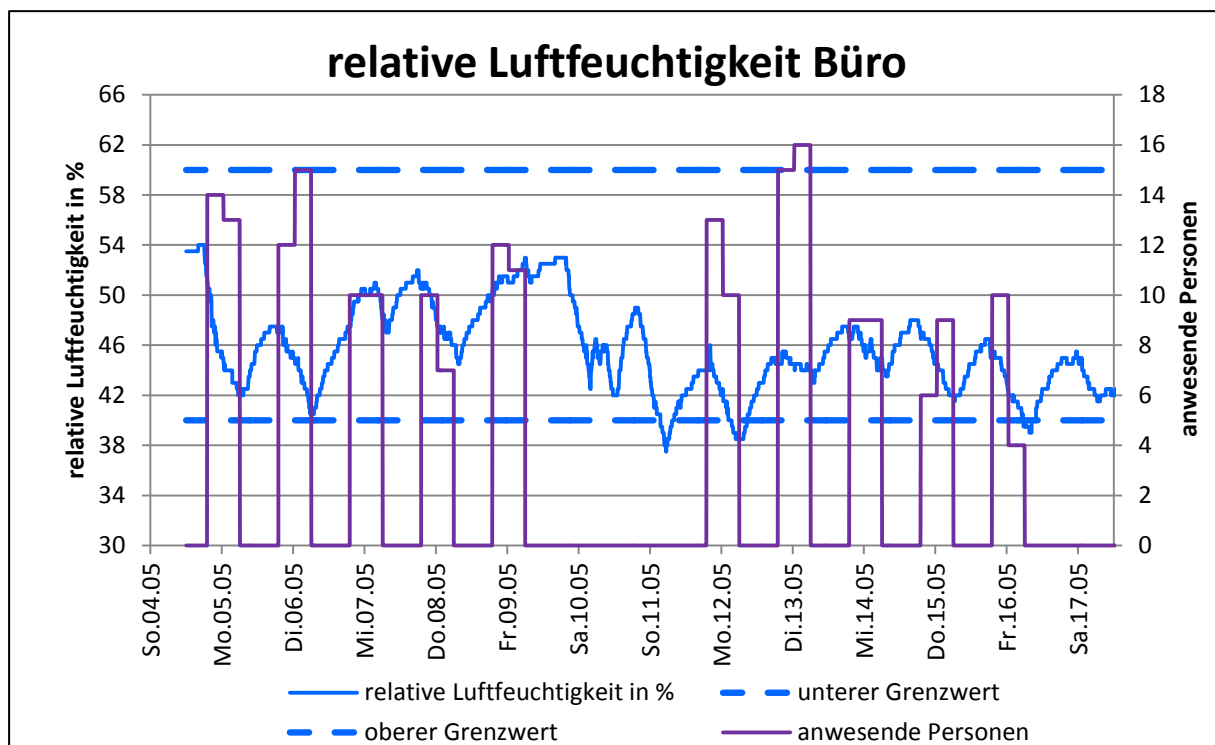


Abbildung 33, Die violette Linie zeigt die Anzahl anwesender Personen zwischen 07:00-12:30 bzw. 12:30-18:00. Die gestrichelten blauen Linien entsprechen dem unteren bzw. oberen Grenzwert für die relative Luftfeuchte in einem Einzel-, Gruppenbüro (Sommer 40-60%, Winter 30-50%). Weil die durchschnittliche AT während der gesamten Messperiode immer über 12°C war, wurde der Sommer Grenzwert eingesetzt. Die blaue Linie zeigt den Verlauf der relativen Luftfeuchte über die gemessenen zwei Wochen.

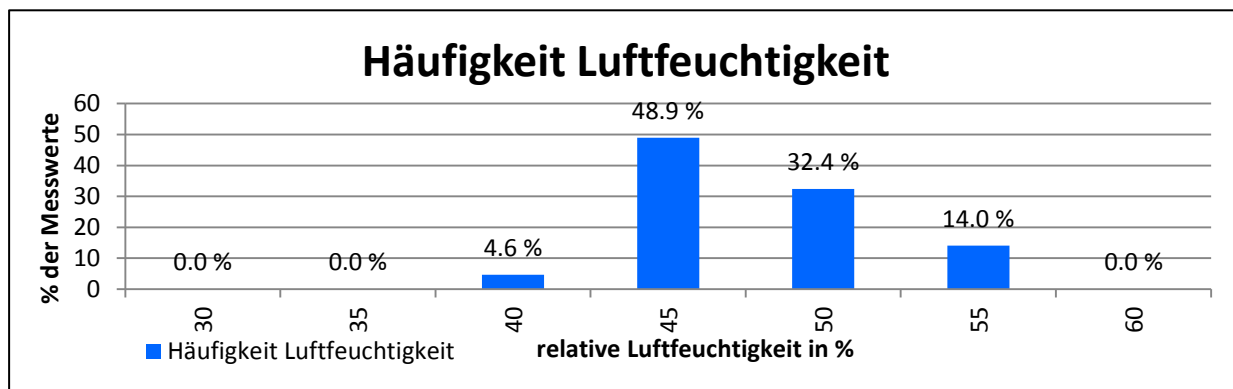


Abbildung 34, Der Balken zeigt die Häufigkeit der jeweiligen relativen Luftfeuchtigkeit.

Der Grenzwert zur relativen Luftfeuchtigkeit wurde nahezu immer eingehalten. Es ist kein Zusammenhang zwischen der Anzahl anwesender Personen und der Luftfeuchtigkeit zu erkennen. Gut zu sehen ist, dass die relative Luftfeuchte vom Sonntag 11. Mai bis zum Samstag 17. Mai tiefer ist als in der Woche vorher. Dies lässt sich mit der Schlechtwetterperiode in der gleichen Zeit erklären, siehe Abbildung 35. Man sieht, dass das Tagesmaximum der Aussentemperatur während dieser Zeit tiefer war als in der Woche vorher.

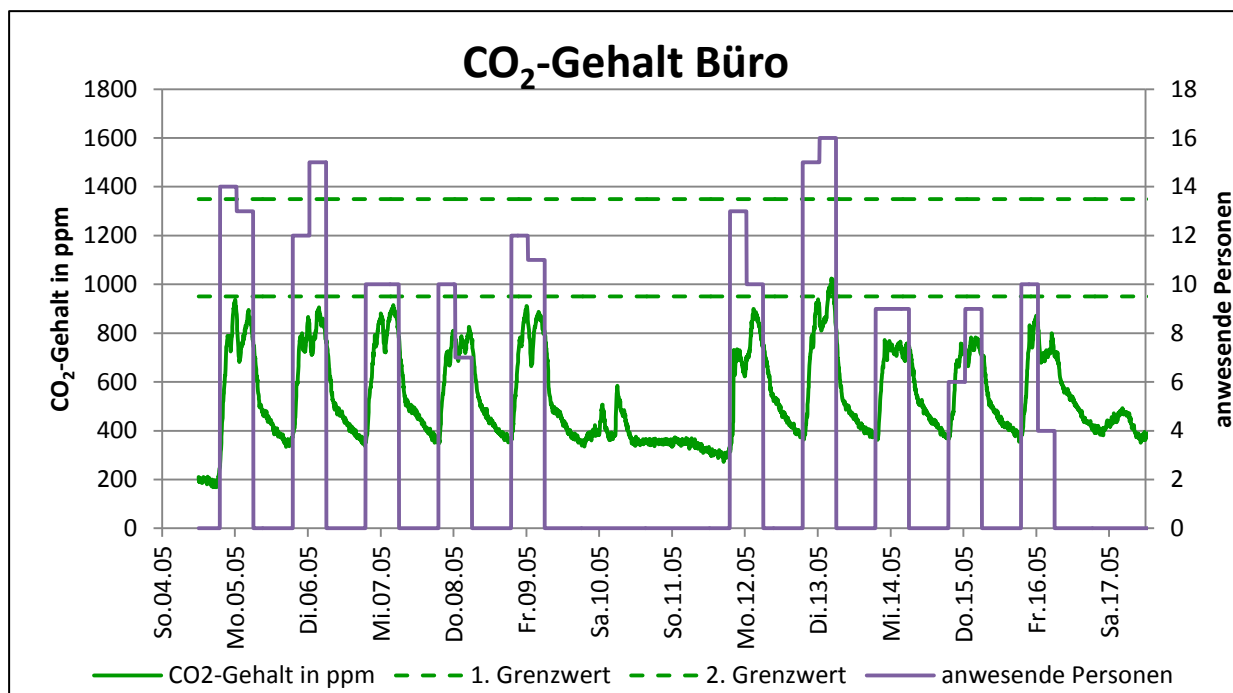


Abbildung 35, Die violette Linie zeigt die Anzahl anwesender Personen zwischen 07:00-12:30 bzw. 12:30-18:00. Die gestrichelten grünen Linien entsprechen dem Grenzwert für den CO₂-Gehalt für eine hohe Luftqualität (<950 ppm) bzw. einer mittleren Luftqualität (<1350 ppm) diese Werte gelten in einem Einzel-, Gruppenbüro. In unserem Fall würde die mittlere Luftqualität mit einem CO₂-Pegel von 950 bis 1350 ppm ausreichen. Die grüne Linie zeigt den Verlauf des CO₂-Gehalts über die gemessenen zwei Wochen.

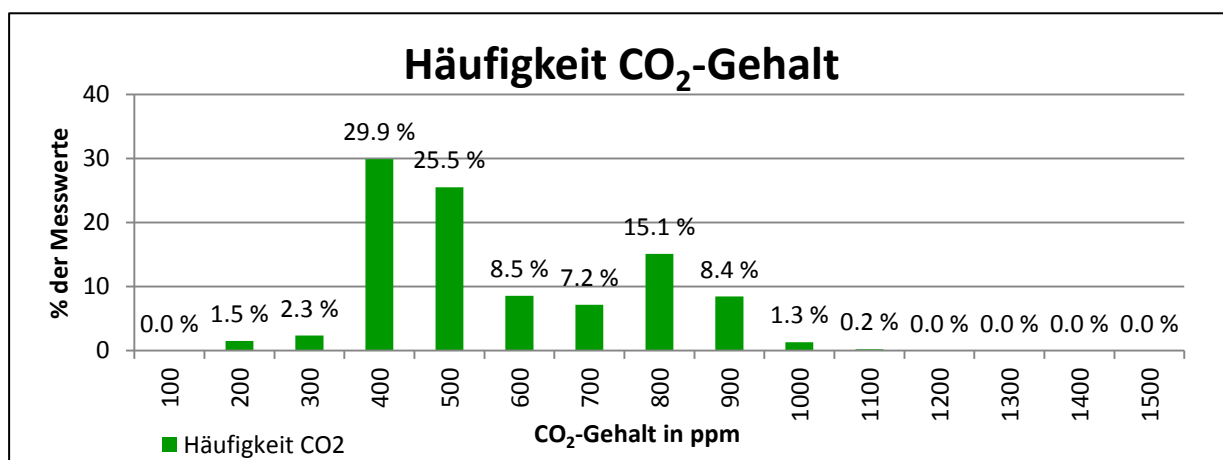


Abbildung 36, Der Balken zeigt die Häufigkeit der jeweiligen CO₂-Gehalte.

Der CO₂-Gehalt ist in über 95% der Fälle unter dem Grenzwert für hohe Luftqualität (950 ppm). Laut SIA würde es ausreichen, den Grenzwert für mittlere Luftqualität einzuhalten. Diese guten Werte müssten sich positiv auf die Produktivität der Mitarbeiter auswirken. Gut zu sehen ist, dass der CO₂-Gehalt mit den anwesenden Personen korreliert. Am Dienstag, 13. Mai waren am meisten Personen anwesend und der CO₂-Gehalt war am höchsten. An den arbeitsfreien Tagen ist der Wert mit rund 400 ppm so gut wie draussen an der frischen Luft (430 ppm). Nach Aussagen von Mitarbeitern ist die Luft in den Büroräumlichkeiten nicht immer optimal, im Speziellen am Montagmorgen. Inzwischen wird die Lüftung am Morgen früher eingeschaltet, was das Problem beheben könnte.

6 Optimierungen

6.1 PVT-Anlage

Ist-Situation

Die PVT-Anlage weist eine Fläche von 7.1 m² auf, mit einem Vorwärmer von 500l.

Ziel

Anhand von Simulation ermitteln ob die PVT-Anlage optimiert werden kann.

Massnahmen

Anhand der Wetterdaten der Messperiode wurden Simulationen mit verschiedenen Dachflächen durchgeführt. Als Referenzsimulation wurden die Daten der vorhergehenden Simulation mit einer Dachfläche von 7.1 m² verwendet. Anschliessend wurden Simulationen mit 10, 14 und 20 m² durchgeführt.

Resultat

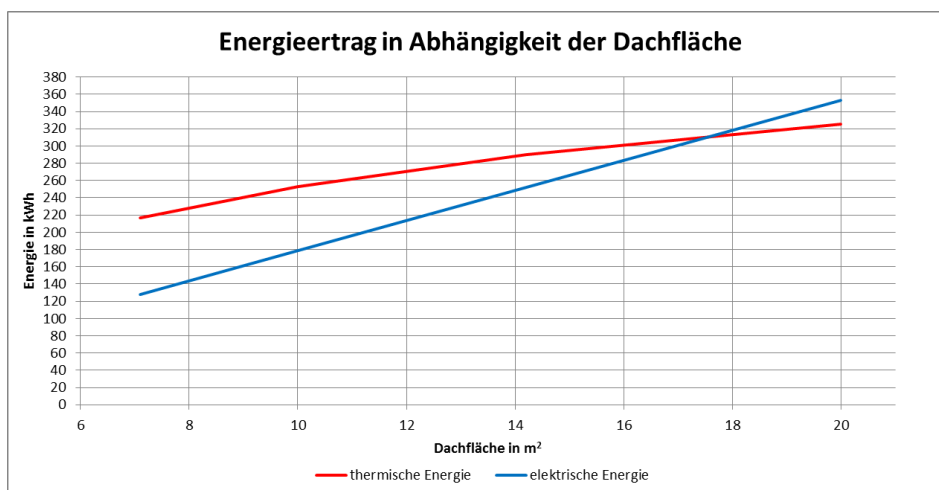


Abbildung 37, Energieertrag in Abhängigkeit der Dachfläche.

Wie erwartet steigt der elektrische Energieertrag linear zu der verfügbaren Dachfläche.

Da das Volumen des Vorwärmers (500 l) und der WW-Verbrauch jedoch gleich geblieben sind, steigt die thermische Leistung nicht linear, sondern flacht bei grösseren Dachflächen ab. Dies ist auch im flächenbezogenen Energieertrag sichtbar. Wenn grössere Dachflächen angestrebt werden (ab 20 m²) sollte ein grösserer Solarer Speicher verwendet werden (800 – 1000 l). Eine solche Anlage würde nur dann Sinn machen, wenn auch ein höherer WW-Bedarf zu erwarten ist.

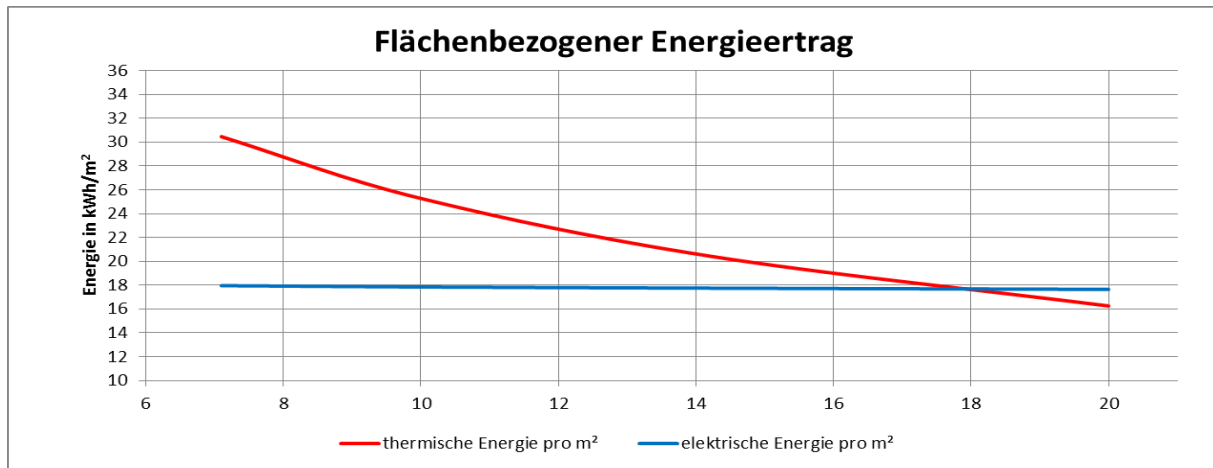


Abbildung 38, Flächenbezogener Energieertrag

Mit steigender Dachfläche nimmt der thermische Energieertrag pro m² stetig ab, während der Energieertrag auf der elektrischen Seite nahezu gleich bleibt. Damit der Energieertrag pro m² auch auf thermischer Seite gleichbleibt, müsste das Volumen des Vorwärmers vergrößert werden. Ein höherer WW-Verbrauch würde ebenfalls zu einem höheren Energieertrag führen.

Fazit

Die Anlage wurde mit 7.1 m² korrekt dimensioniert, eine grössere Anlage würde nur bei einem höheren WW-Verbrauch Sinn machen.

6.2 Begleitheizung

Ist-Situation

Es hat sich herausgestellt, dass die Begleitheizbänder rund 50 % des Stromverbrauchs der für den MINERGIE®-Nachweis relevanten Haustechnik ausmachen. Was sehr erstaunt, weil die eingebaute Begleitheizung als „Selbstregelnde Heizbänder für Begleitheizung“ angepriesen wurde und immer noch wird. Die Messung hat jedoch gezeigt, dass konstant 24h am Tag und 7 Tage die Woche mehr oder weniger konstant 1 kW Leistung anliegt. Entsprechen wurde bei den Optimierungen diesem Punkt am meisten Aufmerksamkeit geschenkt.

Ziel

Das Ziel ist, den Stromverbrauch des Heizbandes zu minimieren, ohne dass die Bewohner dabei Komforteinbussen hinnehmen müssen.

Massnahmen

Massnahme 1:

Als erste Massnahme wurde eine Steuerung für das Begleitheizband eingebaut, eine solche war bei der Planung bereits vorgesehen, wurde aber vom Installateur vergessen einzubauen.

In der Steuerung wurde eine Haltetemperatur von 40 °C eingestellt. Dadurch konnte der Energieverbrauch von 21 kWh/Tag auf 16 kWh/ Tag gesenkt werden, was einer Energieeinsparung von ca. 24 % entspricht. Es hat sich gezeigt, dass die Bewohner eine WW-Temperatur von 40 °C nicht als Komforteinbussen ansehen. Eine Haltetemperatur von 40 °C ist aus hygienischer Sicht unbedenklich, vom Hersteller wird dennoch eine Haltetemperatur von 50-55 °C empfohlen.

Massnahme 2:

Anhand der Durchflussmessung beim Warmwasseranschluss wurde anhand von fünf zufällig ausgewählten Werktagen und einem Wochenende das Nutzerverhalten ausgewertet. Da sich die einzelnen Tage teilweise stark in ihrem Profil unterschieden, wurde der durchschnittliche Verbrauch ausgewertet. Mit diesen Erkenntnissen wurde die Zeitschaltuhr in der Steuerung manuell angepasst wie in der Abbildung unten aufgezeigt.

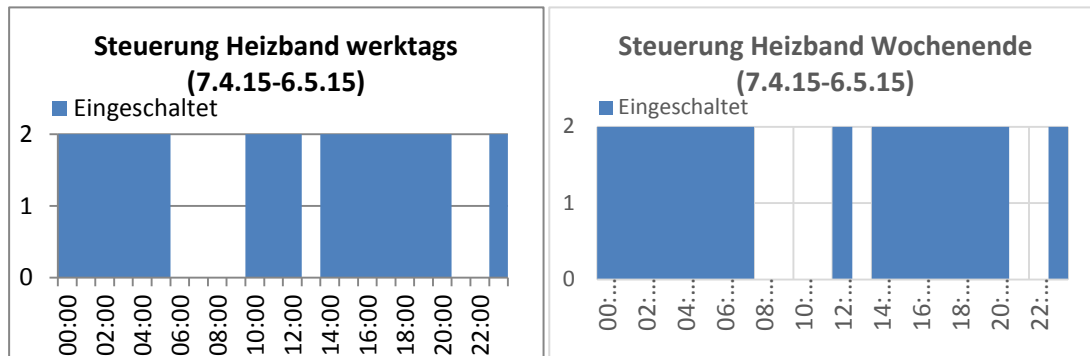


Abbildung 39, Einstellungen der Steuerung für beide Heizbänder werktags und an Wochenenden, wobei 0 = Aus, 1 = Sparbetrieb (37 °C) und 2 = Temperatur halten (40 °C) ist.

Es gab innerhalb des Monats, in welchem diese Einstellungen aktiv waren, keinerlei Beschwerden von den Bewohnern des Hauses. Mit den neuen Einstellungen wurde eine weitere Energieeinsparung von 25 % gegenüber der Massnahme 1 erreicht. Der Energieverbrauch für beide Begleitheizbänder zusammen betrug nun noch 12 kWh pro Tag.

Massnahme 3:

Um weitere Einsparmöglichkeiten zu eruieren, wurde die Überlegung gemacht, dass das Wärmespeicherpotenzial von Wasser ausgenutzt werden könnte. Mittels MATLAB/Simulink wurden mit der Carnot-Toolbox Simulationen an einer Rohrleitung durchgeführt. Genauere Angaben zu dieser Berechnung befinden sich im .

Die Simulationen ergaben folgende Resultate:

Kurze Leitung:

Für die 30 m lange Leitung ergab sich eine Auskühlzeit von 55 auf 40 °C von 3.6 h. Um sicher zu gehen, wird eine Zeit von **< 3 h** angenommen.

Lange Leitung:

Für die 90 m lange Leitung ergab sich eine Auskühlzeit von 55 auf 40 °C von 6.3 h. Um sicher zu gehen, wird eine Zeit von **< 6 h** angenommen.

Anhand von dieser Resultaten wurden beide Steuerung individuell angepasst mit dem Ergebnis die Steuerung für

Resultat

	Energiever- brauch pro Woche in kWh	Verbesse- rung in %	Verbesse- rung gesamt in %	Energiever- brauch pro Jahr in kWh	Kosten pro Jahr in CHF*	Einsparungen in CHF/a
ohne Steuerung	147	0	0	7644	1170.-	0.-
Massnahme 1	112	24	24	5824	891.-	279.-
Massnahme 2	84	25	43	4368	668.-	502.-
Massnahme 3	60	29	59	3120	477.-	693.-
*Preis pro kWh	0.153 CHF					
HT=19.3Rp/kWh	71h/Woche	Energie Uster				
NT=12.4Rp/kWh	97h/Woche	Energie Uster				

Tabelle 14, Gesamtauswertung Begleitheizung

Der Energieverbrauch konnte um rund 60% gesenkt werden, was einer Einsparung von rund 700.- CHF pro Jahr entspricht.

Fazit

Der Energieverbrauch der Rohrbegleitheizung kann mit Hilfe einer Zeit-und Temperatur-Steuerung drastisch gesenkt werden. **Die Anschaffung einer Steuerung und ein angepasstes Laufzeit-Programm werden für jedes installierte Begleitheizband empfohlen.** Es gibt vorinstal-lierte Programme von HWAT-ECO für verschiedene Gebäudetypen, abhängig von der Nut-zung. Diese sind jedoch noch weit entfernt vom Optimum. Eine Optimierung könnte sich aus ökologischer und ökonomischer Sicht lohnen. Noch besser wäre eine temperaturgesteuerte Regelung die aber nur in der Werbung erhältlich ist.

Wichtig: Es wurde festgestellt, dass sich die Uhrzeit auf den Steuergeräten der beiden Heiz-bänder schon nach ca. einem Monat um 5 Minuten unterscheiden. Daher ist es notwendig, regelmässig die Uhren richtig einzustellen, da es sonst zu erheblichen Verschiebungen zwis-chen dem eingestellten Programm und den tatsächlichen Bedürfnissen kommt.

Neben einem Einbau einer Steuerung muss bereits während der Planung mit dem Hersteller Kontakt aufgenommen werden, dieser hilft einem bei der richtigen Dimensionierung und An-ordnung der Begleitheizbänder und gibt Typs zur korrekten Dimensionierung der Wärmedäm-mung an den Warmwasserleitungen in Kombination mit einem Begleitheizband.

6.3 Wärmepumpe

Ist-Situation

Messungen zu Beginn zeigten, dass die Laufzeit der Wärmepumpe zum grössten Teil zwischen 15 und 20 min betrug. Testberichte zeigen, dass WP mit höheren Laufzeiten pro Start eine mar-kant höhere Lebensdauer aufweisen und der Wirkungsgrad (COP) steigt. Sinnvoll wären Lauf-zeiten im Bereich von 30 – 40 min.

Zudem waren die Einschaltzeiten der Wärmepumpe nicht optimal. Als Beispiel das Warmwas-ser, welches regelmässig um Mitternacht für den nächsten Tag produziert wurde. Was einer-seits die Speicherverluste erhöht und keine Gleichzeitigkeit mit dem produzierten Strom der PV-Anlage zulassen.

Des Weiteren hat sich herausgestellt, dass der Warmwasserspeicher 1.5 Mal zu gross dimensio-niert ist, für die Bedürfnisse der jetzigen Bewohner.

Ziel

Die Laufzeiten der Wärmepumpe zu erhöhen und die Einschaltzeiten zu optimieren. Dies bei gleich bleibendem Komfort für die Bewohner. Zudem soll der Warmwasserspeicher besser ausgenutzt werden.

Massnahmen

Die Laufzeiten und Einschaltzeiten wurden von einem Mitarbeiter des Wärmepumpenherstellers in Zusammenarbeit mit Jan Staubli folgendermassen eingestellt:

Warmwasser:

- Hysterese (Temperatur Unterschied zwischen normalen Erwärmung und Zwangserwärmung)
 - Alt: 4°C
 - Neu: 5°C
- Ab dieser Temperatur Wird das Warmwasser erwärmt wenn die Freigabe da ist
 - Alt: 47°C
 - Neu: 45°C
- Auf diese Temperatur Wird das WW erwärmt
 - Alt: 50°C
 - Neu: 53°C
- Freigabe Wärmepumpe für Warmwasser:
 - Mo. bis Fr. 04:00 bis 06:00 Uhr (Niedertarif)
 - Sa. und So. 13:00 bis 14:00 Uhr (Niedertarif)
- Zwangserwärmung
 - Wenn Warmwasser unter 40°C fällt zu jeder Tageszeit und Wochentag

Heizung:

- Temperatur Unterschied im Pufferspeicher
 - Alt: $\Delta T = 4^\circ\text{C} \rightarrow \pm 2^\circ\text{C}$
 - Neu: $\Delta T = 6^\circ\text{C} \rightarrow \pm 3^\circ\text{C}$
- minimale Einschaltzeit des Verdampfers
 - Alt: 30min
 - Neu: 60min
- Nachtabenkung
 - Alt: 18°C
 - Neu: 19.5°C

Wichtig: Die Einstellungen der Wärmepumpe dürfen auf keinen Fall ohne einen Experten verändert werden. Zu viele Parameter die voneinander abhängig sind greifen ineinander.

Für die bessere Ausnutzung des Warmwassers hätte die Waschmaschine in der Waschküche mit einem Warmwasseranschluss ausgerüstet werden können. Für dies hätte neben der Umrüstung der Waschmaschine eine neue Warmwasserleitung vom Lavabo zur Waschmaschine gezogen werden müssen. Der Totale Aufwand wäre unter 1000.- CHF gewesen. Diese Massnahmen wurde noch nicht umgesetzt.

Resultat

Weil die Optimierungen erst gegen Ende der einjährigen Messperiode ausgeführt wurden, gibt es noch keine Resultate. Bezüglich des Komforts sind bis heute keinerlei Reklamationen eingegangen, was daraus schliessen lässt das zumindest beim Warmwasser die Optimierungen so belassen werden können.

Fazit

Die Standard Einstellungen der Wärmepumpe war in unserem Fall alles andere als optimal, es empfiehlt sich darum, in jedem Fall die Einstellungen der Wärmepumpe kritisch zu hinterfragen. Ohne eine Messeinrichtung wird es im Normalfall jedoch sehr schwer die Laufzeiten zu kontrollieren. Die Einschaltzeiten können jedoch auch ohne eine Messeinrichtung kontrolliert werden.

6.4 Legionellen Schaltung

Ist-Situation

Die Legionellen Schaltung lief jeweils zwei Mal die Woche in der Nacht vom Freitag auf den Samstag und von Samstag auf den Sonntag. Aus energetischer Sicht macht es keinen Sinn, diese Aufheizungen in zwei aufeinanderfolgenden Nächten zu machen. Wenn zweimal dann verteilt über die Woche. Zeitlich erfolgt die Schaltung nach dem die Wärmepumpe das Warmwasser auf rund 55°C erhitzt hat, dies ist wünschenswert weil der Heizstab so nur einen minimale Temperatur Unterschied überbrücken muss.

Ziel

Für die Legionellen Schaltung wurde folgende Ziele definiert:

- Die Legionellen Schaltung soll dem neuen Programm der Wärmepumpe angepasst werden
- Nur noch eine Legionellen Schaltung pro Woche
- Wenn möglich soll die Legionellen Schaltung erfolgen wenn Strom aus der PV-Anlage verfügbar ist und wenn nicht während des Niedertarifs

Massnahmen

Die Legionellen Schaltung wurde auf den Samstag ca. 14:00 (kurz nach der Wärmepumpe) umprogrammiert. Somit konnte alle Ziele erfüllt werden, den am Samstag um 14:00 ist bei schönem Wetter genügend Strom aus der PV-Anlage verfügbar und wenn nicht, läuft bereits der Niedertarif.

Resultat

Weil die Optimierung erst gegen Ende der einjährigen Messperiode ausgeführt wurde, gibt es noch keine Resultate. Es kann aber davon ausgegangen werden dass sich der Energie Verbrauch der Legionellen Schaltung halbiert und sich der Eigenstromanteil leicht erhöht hat.

Fazit

Mit einem einfachen umprogrammieren der Legionellen Steuerung lässt sich der Stromverbrauch halbieren und der Eigenstromanteil erhöhen.

Wichtig: Laut dem Bundesamt für Gesundheit (BAG), wird eine Erwärmung auf über 60 °C einmal am Tag empfohlen, wenn das Wasser über 24 h Verweilzeit im System hat. In unserem Fall beträgt die durchschnittliche Verweilzeit 36 h, entsprechend müsste die Legionellen Schaltung täglich erfolgen. Am Ende entscheidet dies aber der Vermieter, welcher auch die Verantwortung trägt.

6.5 Stromverbrauch

Ist-Situation

In der Nacht und am Wochenende sollte das Büro wenig bis keinen Strom brauchen. Die folgende Abbildung zeigt ein etwas anderes Bild.

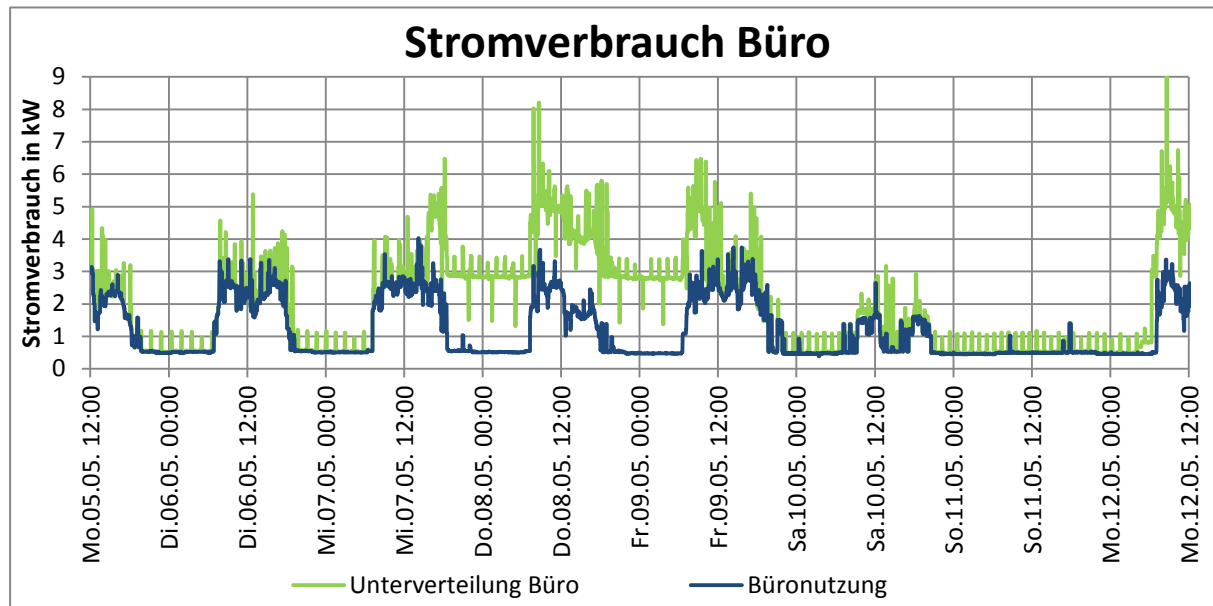


Abbildung 40, Die blaue Linie zeigt die wichtigsten Verbraucher der Büronutzung (Beleuchtung Büro + Cafeteria, Steckdosen Büro, Steckdosen Klimagerät + Server). Die grüne Linie zeigte die Unterverteilung vom Büro. Diese setzt sich aus der blauen Linie und diverser anderer Verbraucher zusammen, auf welche im Rahmen dieser Arbeit nicht detailliert eingegangen wird.

Ausser in der Nacht vom Donnerstag und Freitag sinkt der Stromverbrauch ausserhalb der Bürozeiten deutlich unter 1 kW. Am Wochenende ist der Verbrauch deutlich tiefer als unter der Woche.

Ungewöhnlich ist der hohe Gesamtstromverbrauch (grün) vom Büro in der Nacht vom Donnerstag und Freitag.

Ziel

Den Stromverbrauch so weit als möglich zu senken und herausfinden welche Verbraucher über die Nacht permanent Strom benötigen.

Massnahmen

Die Beleuchtung der Büroräumlichkeiten und der Cafeteria ist in hohem Mass automatisiert. Lichtschalter sucht man vergeblich; sämtliche Beleuchtung (mit Ausnahme der LED-Beleuchtung am Arbeitsplatz) wird über Bewegungssensoren und Helligkeitssensoren gesteuert. Es sind drei Möglichkeiten denkbar um den Stromverbrauch weiter zu senken, jedoch wird auch hier das Potential als gering eingestuft:

1. Die Helligkeitssensoren nach unten anpassen, damit die Grundbeleuchtung erst reagiert wenn nicht genügend Licht durch die Fenster rein kommt. Diese Massnahmen wurde bereits umgesetzt.
2. Mit konventionellen Lichtschaltern (ON/OFF) am Eingang könnte der automatische Betriebsmodus unterbrochen werden. Es wurde aber darauf verzichtet, weil dies ein zu

grosser Aufwand gewesen wäre für den nachträglichen Einbau.

3. Mit einer Visualisierung des Stromverbrauchs, kann der Nutzer motiviert werden möglichst wenig Strom zu benutzen. Weil der Nutzer nur ein Teil beeinflussen kann wurde die Visualisierung in „nicht beeinflussbar“ und „beeinflussbar“ aufgeteilt. Zudem werden der Ertrag der PV-Anlage und das Wetter Visualisiert, dies in erste Linie um das Interesse der Nutzer zu gewinnen damit sich diese die Visualisierung jede Woche anschauen.

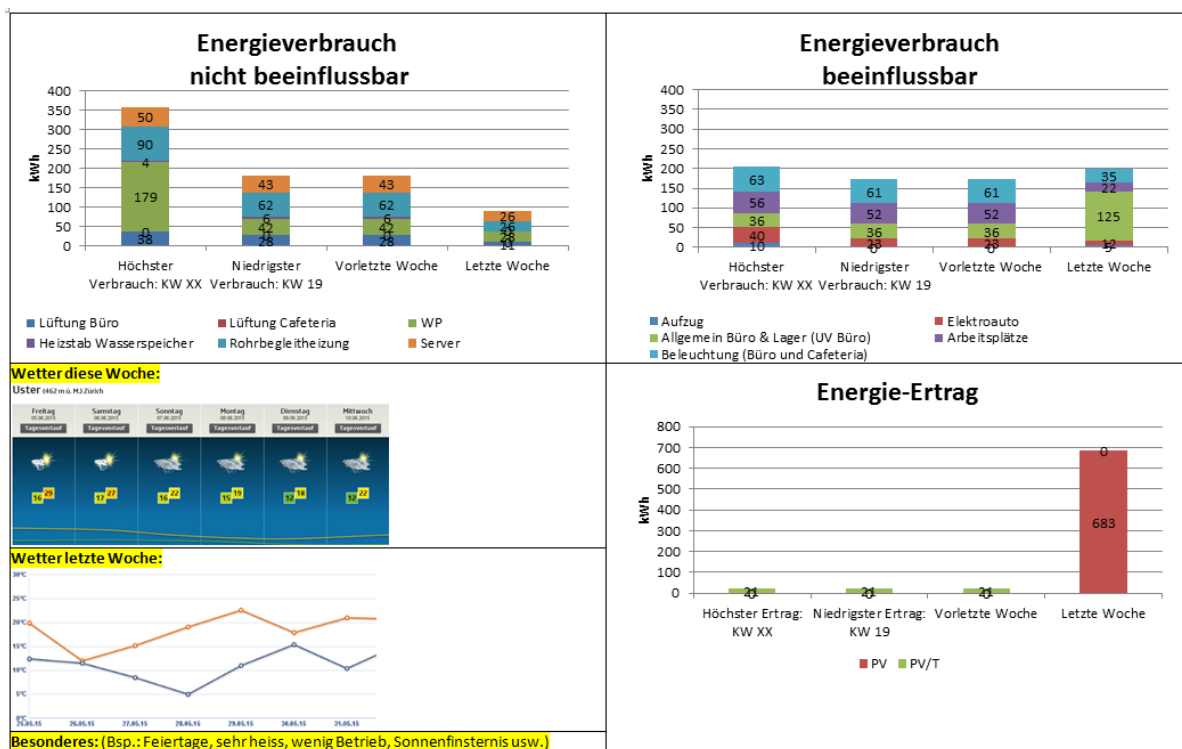


Abbildung 41, Beispiel der Visualisierung welche jede Woche erstellt, gedruckt und in der Cafeteria angeschlagen wird, die Angaben in der oberen Abbildung dienen nur als Beispiel und sind nicht korrekt.

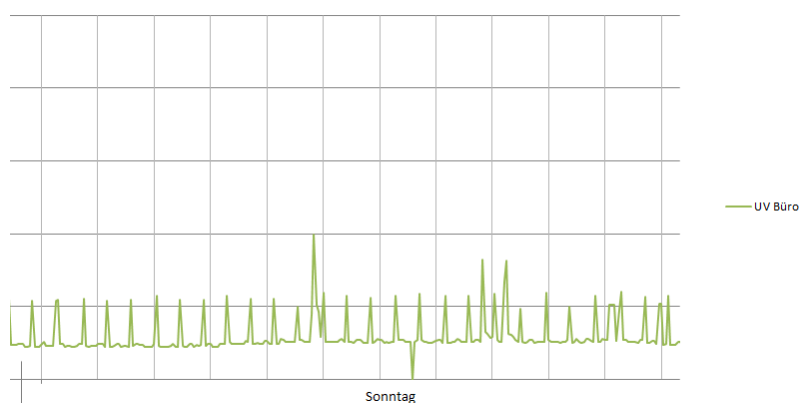


Abbildung 42, Stromverbrauch der Unterverteilung Büro an einem Sonntag (vertikale Rasterung: 1kW)

In der detaillierten Analyse der einzelnen Verbraucher wurde festgestellt, dass beim Unterverteiler Büro alle 50-60 Minuten eine Leistungsspitze von ca. 0.6kW während 5-10 Minuten auftritt. Es stellte sich heraus, dass hierfür der Lufttrockner im Archiv der HSG verantwortlich ist. Er ist zurzeit auf eine relative Luftfeuchtigkeit von 40% eingestellt.

Während eines Jahres benötigt der Lufttrockner in diesem Betriebsmodus ca. 870kWh, was etwa 7% des gesamten Verbrauchs des UV Büro entspricht. Das Potential für Einsparungen ist somit eher gering, kann aber mit folgenden zwei Möglichkeiten erreicht werden:

1. Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit auf (z.B.) 50 oder 55%
2. Mithilfe einer Zeitschaltuhr: Betrieb nur auf einige Stunden pro Tag beschränken. (um eine Verbesserung zu erreichen dürfte der Trockner maximal 4h pro Tag betrieben werden)

Beide Massnahmen vom Luftbefeuchter wurden nicht umgesetzt.

Resultat

Weil die Optimierung erst gegen Ende der einjährigen Messperiode ausgeführt wurde, gibt es noch keine Resultate. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass sich der Energie Verbrauch für die Grundbeleuchtung gesenkt hat.

Fazit

Beim Stromverbrauch gab es zu Beginn nicht viel zu optimieren, entsprechend wurden nur wenige Massnahmen umgesetzt. Geplant ist in Zukunft eine Visualisierung des Stromverbrauchs zu erstellen, dank dieser könnten die Nutzer weiter sensibilisiert werden.

6.6 Elektroauto

Ist-Situation

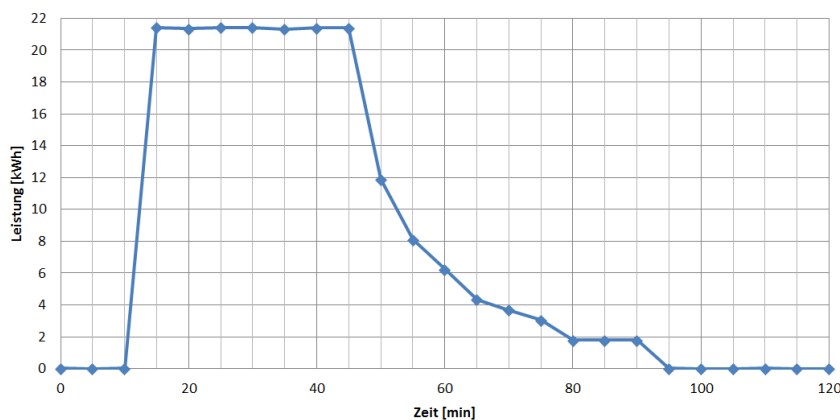


Abbildung 43, Ladevorgang Renault ZOE

Der Ladevorgang sieht beim Renault ZOE wie folgt aus: Bis 80% der Kapazität kann mit der vollen Leistung von 22kW geladen werden, anschliessend regelt das BMS den Ladestrom ab um die Batterie möglichst schonend bis auf 100% ihrer Kapazität zu laden.

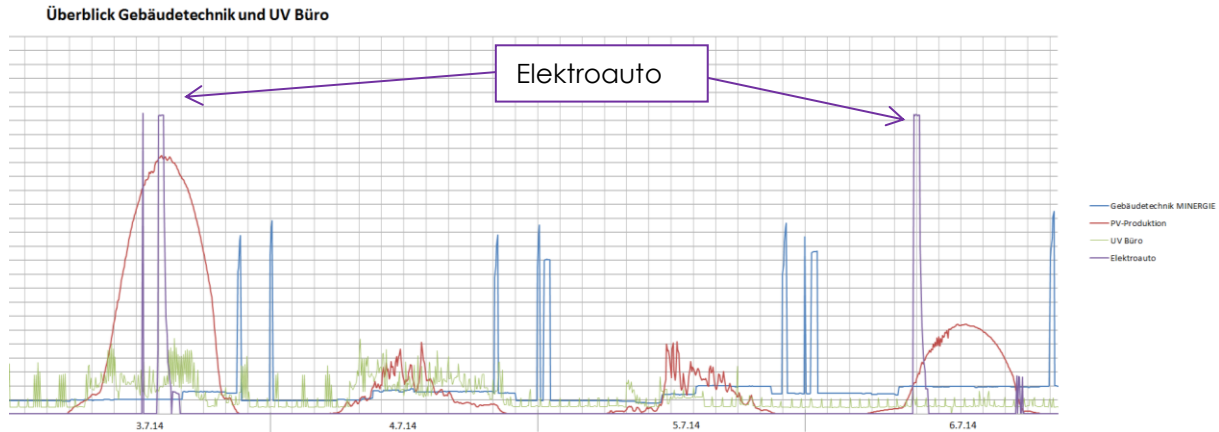


Abbildung 44, Verbrauch von UV Büro, Gebäudetechnik und Elektromobilität

Die Peak-Leistung des Elektroautos übersteigt die Leistung der PV-Anlage auch bei optimalen Verhältnissen.

Ziel

Die Ladeleistung zu reduzieren, damit das Elektroauto möglichst viel Strom aus der der PV-Anlage bezieht. Des Weiteren soll das Elektroauto als Puffer dienen, um den Eigenverbrauchsanteil zu erhöhen.

Massnahmen

Massnahme 1:

Für eine schnelle Verbesserung, könnte ein Ladekabel mit einer maximalen Ladeleistung von 11kW angeschafft werden. Kostenpunkt: 460.- CHF, bei m-way beziehbar. Das Laden dauert mit dem Kabel entsprechend doppelt so lange und stellt keine wirklich sinnvolle Alternative dar. Es muss eine Möglichkeit gefunden werden, wie die Ladeleistung automatisch dem PV-Ertrag bzw. dem Bedürfnis des Nutzers angepasst wird. Diese Massnahme wurde nicht umgesetzt.

Massnahme 2:

Es gebe im Rahmen eines Pilotprojektes ein System zur intelligenten, PV-orientierten Laderegulation des Elektroautos. Es handelt sich um das Produkt **Maxem** von der niederländischen Firma **Cohere** (www.cohere.eu). Das Gerät überwacht den aktuellen Ertrag der PV-Anlage und den Ladezustand des Elektroautos und regelt entsprechend die Ladeleistung. Über eine Applikation kann der Benutzer den Zeitpunkt der Abfahrt definieren, sodass allenfalls mit zusätzlichem Strom aus dem Netz geladen wird. Diese Massnahme wurde nicht umgesetzt.

Die Einbindung der Elektromobilität zur Nutzung als Puffer macht mit dem bestehenden Fahrzeug keinen Sinn, da die Kapazität zu klein ist. Hinzu kommt, dass das Fahrzeug nicht permanent angeschlossen ist, was in der Simulation nicht berücksichtigt wurde. Bei einer Flotte von zwei bis drei Fahrzeugen sieht die Situation bereits anders aus. Denn sobald immer mindestens ein Fahrzeug anwesend ist kann ein Grossteil der Energie in der Batterie zwischengespeichert und wieder rückgeführt werden.

Resultat

Weil bis heute keine der Massnahmen umgesetzt wurden, liegen keine Resultate vor.

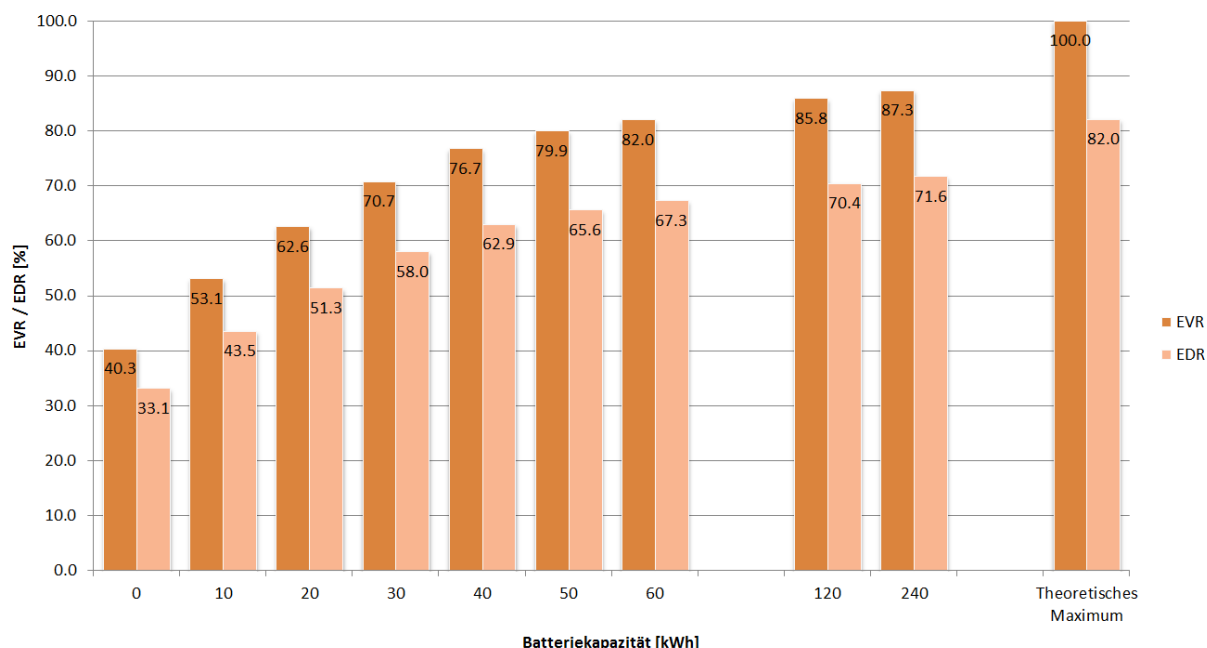


Abbildung 45, Einfluss der Batteriekapazität auf Eigenverbrauchsrate und Eigendeckungsrate, anhand einer Simulation. Die Zeitschritte betragen 15 min und der Zeitraum beträgt ein Jahr.

Die 22kWh Batterie des Renault ZOE ermöglicht eine Erhöhung des Eigenverbrauchs von 40 auf 63% und eine Erhöhung der Eigendeckung von 33 auf 51%. Das Problem ist, dass in diesem Betriebszustand die Batterie des Fahrzeuges am morgen jeweils zu 90% entladen ist.

Da das Gebäude eine durchschnittliche Grundlast von ca 88kWh/Tag hat und die Eigendeckungsrate aktuell bei ca. einem Drittel liegt, müsste theoretisch jeden Tag eine Energiemenge von ca 60kWh bereitgestellt werden. Die Grafik zeigt deutlich auf, dass man mit EVR und EDR in diesem Fall bereits nahe am Optimum liegt, denn trotz Vervierfachung der Speicherkapazität auf 240kWh können die Werte nurnoch minim angehoben werden.

Wichtig: Nicht berücksichtigt in der Simulation wurden die Abwesenheiten des Autos. Hierzu liegen leider keine konkreten Werte vor. Der Einfachheit halber wurde also das Fahrzeug als stationärer Speicher betrachtet. Die Schrittweite der Abbildung oben liegt bei 15 min würde diese weiter verkürzt, würden sich die Eigenverbrauchsrate und die Eigendeckungsrate verschlechtern.

Fazit

Es gibt Systeme für eine intelligente Ladung, in jedem Fall verursachen diese aber Mehrkosten. Ob diese Mehrkosten dank dem höheren Eigenstromanteil kompensiert werden können muss sich erst noch zeigen. Wenn ein System zur Ladung eingebaut werden soll, ist es von Vorteil dieses schon bei der Planung zu berücksichtigen.

Das Elektroauto als Puffer zu benutzen macht nur Sinn wenn zu jedem Zeitpunkt mindestens ein Auto an der Ladestation hängt. Dies kann mit einem Auto nicht gewährleistet werden.

7 Wichtigste Erkenntnisse

7.1 PVT

Die Auswertungen und Simulationen haben gezeigt, dass eine PVT-Anlage ungefähr gleich viel Energie erzeugt wie eine herkömmliche thermische Anlage. Die Nachteile für den Einbau von PVT-Kollektoren gegenüber getrennten Systemen überwiegen tendenziell. Insbesondere sprechen folgende Punkte gegen eine PVT-Anlage:

- Die PVT-Anlage dient hier nur als Vorwärmung für das WW, entsprechend muss die WP das WW auf ein höheres Temperatur-Niveau bringen und dies auch im Sommer. Entsprechend ist der SD der PVT-Anlage tief. Hinzu kommt, dass eine WP auf dem Temperatur Niveau einen schlechten COP hat welchen die PVT-Anlage nicht abdecken kann. Diese zwei Systeme ergänzen sich daher eher schlecht.
- Getrennte Systeme ermöglichen grössere Flexibilität bei der Typenwahl, wie auch bei Erneuerungen.
- Die Kosten für diese Anlage waren hoch, entsprechend ist die Amortisationszeit bei weitem über 20 Jahre. Mögliche Gründe, warum die Amortisationszeit so lange ausfällt:
 - Weil die PVT-Anlage Pilotprojektcharakter hat, fielen die Planungskosten sehr überproportional aus.
 - Die PVT-Anlage durfte nur ein Fördermittel beanspruchen.
 - Die Ausrichtung des Daches ist nicht optimal, besser wäre Richtung Süden.
 - Weil der thermische Teil der Anlage die Kollektorfläche bestimmt, ist der elektrische Teil auch entsprechend klein. Die Gesamtkosten für den elektrischen Teil sind somit überproportional hoch.
 - Der thermische Teil konkurrenziert sich mit der WP, die auf diesem Temperatur Niveau einen sehr guten COP hätte. Entsprechend sind die eingesparten kWh nicht viel wert.
 - Es müssen zwei komplette System gebaut werden (elektrisch und thermisch/hydraulisch, was ein hoher Aufwand bedeutet)

Es hat sich bestätigt, dass durch die Abführung der Wärme der elektrische Ertrag gesteigert werden kann. Eine Ertragsteigerung von 40% wie es der Hersteller verspricht konnte jedoch nicht bestätigt werden.

Das Problem ist das diese Ertragsteigerung durch den schlechteren Wirkungsgrad der PVT-Kollektoren (14.9%) im Gegensatz zu durchschnittlichen reinen PV-Modulen (rund 18%) zum grössten Teil wieder wettgemacht wird. Bedenkt man den immensen Mehraufwand durch die Abführung der Wärme ist eine solche Anlage zumindest in dieser Grösse nicht lohnenswert.

Simulationen zeigten, dass der thermische Teil der Anlage korrekt dimensioniert wurde. Eine grössere Fläche an Kollektoren würde nur Sinn machen, wenn mehr WW verbraucht würde, oder die Niedrigtemperaturwärme sonst Verwendung findet.

Die Simulation konnte die PVT-Anlage sehr gut abbilden, die gemessenen Werte korrelieren beinahe perfekt mit der Simulation. Bei der Simulation muss darauf geachtet werden, dass die Angaben vom Wechselrichter korrekt eingegeben werden. Wenn die Simulation den durchschnittlichen Wirkungsgrad nicht selbst ermittelt, muss dieser zuvor selbst ermittelt werden. Auf keinen Fall darf angenommen werden, dass der Wechselrichter während der ganzen Zeit mit dem maximalen Wirkungsgrad arbeitet.

Zusammengefasst: PVT-Kollektoren machen nur Sinn, wenn diese erstens noch kostengünstiger werden und zweitens die Niedrigtemperaturwärme immer vollumfänglich sinnvoll verwendet werden kann (z.B. in Erdsondenfeld oder bei entsprechend grossem Vorwärmbedarf von Warmwasser).

7.2 Gebäude

Eigenverbrauchsrate und Eigendeckungsgrad

Je nachdem wie das Bilanzierungsintervall gewählt wird, variiert die Eigenverbrauchsrate (EVR) und der Eigendeckungsgrad (EDR) über ein Jahr gesehen zwischen 37% bei (5 min) und 77% (1 Monat). Das Bürogebäude erreicht mit rund 40% somit bessere Werte als ein Wohngebäude (unter 30%), immer mit der Bedingung, dass die PVA genau auf den Verbrauch angepasst wurde. Ziel einer Folge-Arbeit ist, dass die EVR erhöht wird indem die Wohnungen ihren Strom ebenfalls aus der PVA beziehen.

Kühlbetrieb

Der Kühlbetrieb mit dem free cooling funktioniert sehr gut, die Temperaturen im Büro waren auch während den Hitzewochen in der KW 26 und 27 im Jahr 2015 immer sehr angenehm (maximal 25°C). Daneben sorgte die Kühlung für eine Steigerung des COP für die Warmwasserproduktion von ca. 5%.

Minergie-Kennzahl

Die Minergie-Kennzahl-Wärme wird mit -9.7 kWh/m² deutlich unterschritten obwohl die Optimierungsmassnahmen der Gebäudetechnik erst gegen Ende der einjährigen Messperiode umgesetzt wurden.

Komfort und Nutzung

Der Komfort und die Nutzung in den Büroräumen waren in allen Belangen überdurchschnittlich gut, dies zeigten nicht nur die Messungen sondern auch Gespräche mit den Benutzern. Dies spricht für die CO₂-gesteuerte Komfortlüftung, die Ionisierungsanlage, die Bodenheizung und das free-cooling.

Begleitheizung

Es stellte sich heraus, dass die Begleitheizung rund ein Drittel der gesamten Energie der Gebäudetechnik verbrauchte. Nach den Optimierungen konnte der Verbrauch um rund 60% gesenkt werden, dies entspricht 4'500 kWh elektrischer Energie oder rund 700.- CHF pro Jahr. Wir empfehlen folgende Punkte zu beachten bei der Planung und Inbetriebnahme einer Begleitheizung:

- Neben einer Begleitheizung gibt es alternative Warmhaltesysteme von Warmwasser, diese sollten bereits in der Planungsphase geprüft werden
- Wird eine Begleitheizung gewählt sollte der Hersteller bei der Planung mit einbezogen werden, dieser kann Hinweise zur korrekten Verlegung und Dimensionierung geben
- In jedem Fall sollte bei einer Begleitheizung eine Steuerung eingebaut werden
- Die Standard-Einstellung der Steuerung ist in der Regel weit vom Optimum entfernt. Es lohnt sich hier Zeit zu investieren für eine individuelle Einstellung. Zudem sollte die eingestellte Uhrzeit zweimal im Jahr überprüft und gegebenenfalls angepasst werden
- Bei einer grösseren Überbauung empfiehlt es sich die Begleitheizung über einen Stromzähler laufen zu lassen. Dank diesem können individuelle Optimierungen kontrolliert und die Stromkosten der Warmwassererzeugung angerechnet werden

Die Werbung verspricht ein selbstregulierendes Heizband, unsere Messungen zeigten jedoch, dass das Heizband über Monate konstant mit rund 10 W/m lief. Hier besteht auf Seiten des Herstellers sicher Handlungsbedarf.

Wärmepumpe

Messungen zeigten, dass die Laufzeiten der Wärmepumpe zum grössten Teil zwischen 15 und 20 min betrug und die Einschaltzeiten mit dem Standardprogramm nicht optimal waren. Die Einstellungen der Wärmepumpe sind jeweils kritisch zu hinterfragen und gegebenenfalls mit dem Hersteller der Wärmepumpe anzupassen. Damit die Laufzeiten jedoch überhaupt erfasst werden können, braucht es in der Regel eine entsprechende Hard- und Software. Bei grösseren Anlagen empfiehlt es sich darum eine solche schon bei der Planung zu berücksichtigen.

Legionellen Schaltung

Wenn die Legionellen-Schaltung mehrmals pro Woche anspricht, sollte diese regelmässig über die Woche verteilt sein. Dies war bei uns nicht der Fall, entsprechend wurde in einem ersten Schritt die Schaltung angepasst. Weil in einem MFH regelmässig Wasser bezogen wird, gibt es nur kurze Zeiten mit stehendem Wasser. Der Vermieter hat darum entschieden die Schaltung auf einmal die Woche zu reduzieren. Die Schaltung erfolgt nun jeden Samstag um ca. 14:00 Uhr nachdem die Wärmepumpe das Wasser auf 55°C erhitzt hat. Dies hat den grossen Vorteil, dass bei schönem Wetter Strom aus der PV-Anlage bezogen werden kann. Bei schlechtem Wetter wird zumindest Niedertarif Strom bezogen.

Stromverbrauch

Mithilfe einer Visualisierung, soll der Nutzer motiviert werden Strom zu sparen. Den grössten Teil kann er aber selbst nicht beeinflussen weil die Beleuchtung schon weitgehend automatisiert wurde und viele Verbraucher nicht nutzerabhängig sind, wie der Server und die Gebäudetechnik.

Elektroauto

Weil der Ladestrom auch an einem schönen Tag höher ist als die PV-Anlage liefern kann, sollte der Ladestrom vom Elektroauto angepasst werden. Dies wäre möglich mit einer entsprechenden Ladestation, umgesetzt wurde diese Massnahme bis heute nicht.

8 Danksagungen

Dieses Messprojekt konnte nur realisiert werden dank der Unterstützung verschiedener Partner.

Wir bedanken uns an dieser Stelle ganz herzlich für die gute Zusammenarbeit.

Die wichtigsten Partner/Beteiligten seien hier kurz erwähnt:

- Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft vom Kanton Zürich (AWEL)
- Energie Uster AG (EnU)
- Überseeische Missionsgemeinschaft (ÜMG) als Bauherr
- Hochschule für Technik Rapperswil (HSR) mit Prof. Carsten Wemhöner und den Studenten Dominik Hotz, Jan Staubli, Simon Aldebert, Tobias Hug und Jonas Höfel
- Optec AG, Herr David Fratto
- FHNW, Minergie-A-Zertifizierung Stelle, Herr Bastian Burger
- Verein Minergie, Herr Christian Röthemund
- Soluki Engineering, Herr Rafael Wasescha
- Ammann und Schmid AG, Herr David Ehrat
- Gerber Media, Herr Gerber

9 Symbole und Formeln

Symbole	Bezeichnung	Formel/ Grösse	Einheit
Q_{WP-HWW}	Von der Wärmepumpe (WP) erzeugte Wärmeenergie für Heizen (H) und Warmwasser (WW).	$V_{WP-Zirkulation} * cp_W * (T_{WP-VL} - T_{WP-RL})$	kWh
Q_{WP-WW}	Von der WP erzeugte Wärmeenergie für WW.	$V_{WP-Zirkulation} * cp_W * (T_{WP-VL} - T_{WP-RL}) * t_{St-WP-H/WW(a)}$	kWh
Q_{WP-H}	Von der WP erzeugte Wärmeenergie für den H-betrieb.	$V_{WP-Zirkulation} * cp_W * (T_{WP-VL} - T_{WP-RL}) * t_{St-WP-H/WW(a)}$	kWh
Q_{Sol}	Von der PVT-Anlage erzeugte thermische Energie.	$V_{PVT-Zirkulation(b)} * cp_{PVT} * (T_{PVT-VL} - T_{PVT-RL})$	kWh
Q_{ZH}	Von Zusatzheizsystemen abgegebene thermische Energie. (Begleitheizung und Heizstab für WW-Speicher)	$Q_{ZH} = E_{ZH}$	kWh
Q_{Zu}	Konventionelle Energie für Zusatzheizung des WW-Kreislaufs	$E_{Begleitheizung} + E_{Heizstab} + Q_{WP-WW} = E_{ZH} + Q_{WP-WW}$	kWh
Q_{WW}	Nutzenergie WW	$V_{Kaltwasser} * cp_W * (T_{WW-Ausgang} - T_{Kaltwasser})$	kWh
Q_H	Nutzenergie H	$V_{WP-H} * cp_W * (T_{WP-VL-H} - T_{WP-RL-H})$	kWh
E_{Sol}	Energieaufwand der Umwälzpumpe (UWP) des Solarkollkors und der Soltop Steuerung.	$E_{PVT-UWP} = 45 W(c) \quad E_{PVT-Steuer} = 5 W(c)$ $E_{Sol} = t_{L-PVT-UWP} * (E_{PVT-UWP} + E_{PVT-Steuer})$	kWh
E_{WP}	Für die WP aufgewendete elektrische Energie. Beinhaltet den Energieaufwand für Verdichter, Kondensator, Steuerung, alle Pumpen, Regelung und Abtaueinrichtung.	—	kWh
E_{ZH}	Energieaufwand für Zusatzheizsysteme (Begleitheizung und Heizstab für WW-Speicher).	$E_{Begleitheizung} + E_{Heizstab}$	kWh
E_{PVT}	Erzeugte elektrische Energie der PVT-Anlage	—	kWh
E_{PV}	Erzeugte elektrische Energie der PV-Anlage	—	kWh
E_{LK}	Energieaufwand für Lüftung und Klima	—	kWh
G_{Solar}	Jahressumme der Globalstrahlung	—	$\frac{kWh}{m^2}$
A_K	Kollektorfläche	PVT-Kollektor: $7.1 m^2$ PV-Kollektor: $128 m^2$	m^2

g	Gewichtungsfaktor gemäss MINERGIE-A Nutzungsreglement	$g = 2$ (MINERGIE, 2014)	–
cp_w	Spezifische Wärmekapazität Wasser	$1.162 \frac{Wh}{kg \cdot K}$ bei 14.5°C (VDI-Gesellschaft, 2013)	$\frac{Wh}{Kg \cdot K}$
cp_{PVT}	Spezifische Wärmekapazität Antifrogen L (25%)	$1.10 \frac{Wh}{kg \cdot K}$ bei 30°C (Abderhalden, 2004)	$\frac{Wh}{Kg \cdot K}$
$cp_{PVT,2}$	Spezifische Wärmekapazität Antifrogen L (38%)	$1.05 \frac{Wh}{kg \cdot K}$ bei 30°C (Abderhalden, 2004)	$\frac{Wh}{Kg \cdot K}$
ρ_w	Dichte Wasser	$1.00 \frac{g}{cm^3}$ bei 4°C (VDI-Gesellschaft, 2013)	$\frac{g}{cm^3}$
ρ_{PVT}	Dichte Antifrogen L (25%)	$1.02 \frac{g}{cm^3}$ bei 30°C (Abderhalden, 2004)	$\frac{g}{cm^3}$

Tabelle 15, Hier werden alle für die Berechnungen nötigen Symbole, Formeln, Grössen mit den dazugehörigen Einheiten aufgelistet. Es wird immer mit Watt gerechnet, sollte eine Angabe in Joule angegeben sein wird diese in Watt umgerechnet. In der Tabelle 16 und Tabelle 18 ist beschrieben, welche Messstelle zu welchem Formelzeichen gehört.

- (a) $t_{St-WP-H/WW}$ dieser Index steht für die Stellung (ST) des 3-Weg Ventils (ST 0 = H, ST 1 = WW)
- (b) Der Volumenstrom der PVT-Anlage wird nicht aufgezeichnet, darum wurde dieser anhand der total erzeugten thermischen Energie (Q_{sol}) zurückgerechnet.
- (c) Die 45 Watt der Solarkreispumpe ist eine Annahme des Herstellers, die 5 Watt der Soltop Steuerung ist eine eigene Annahmen.

Anhang 1 – Messkonzept

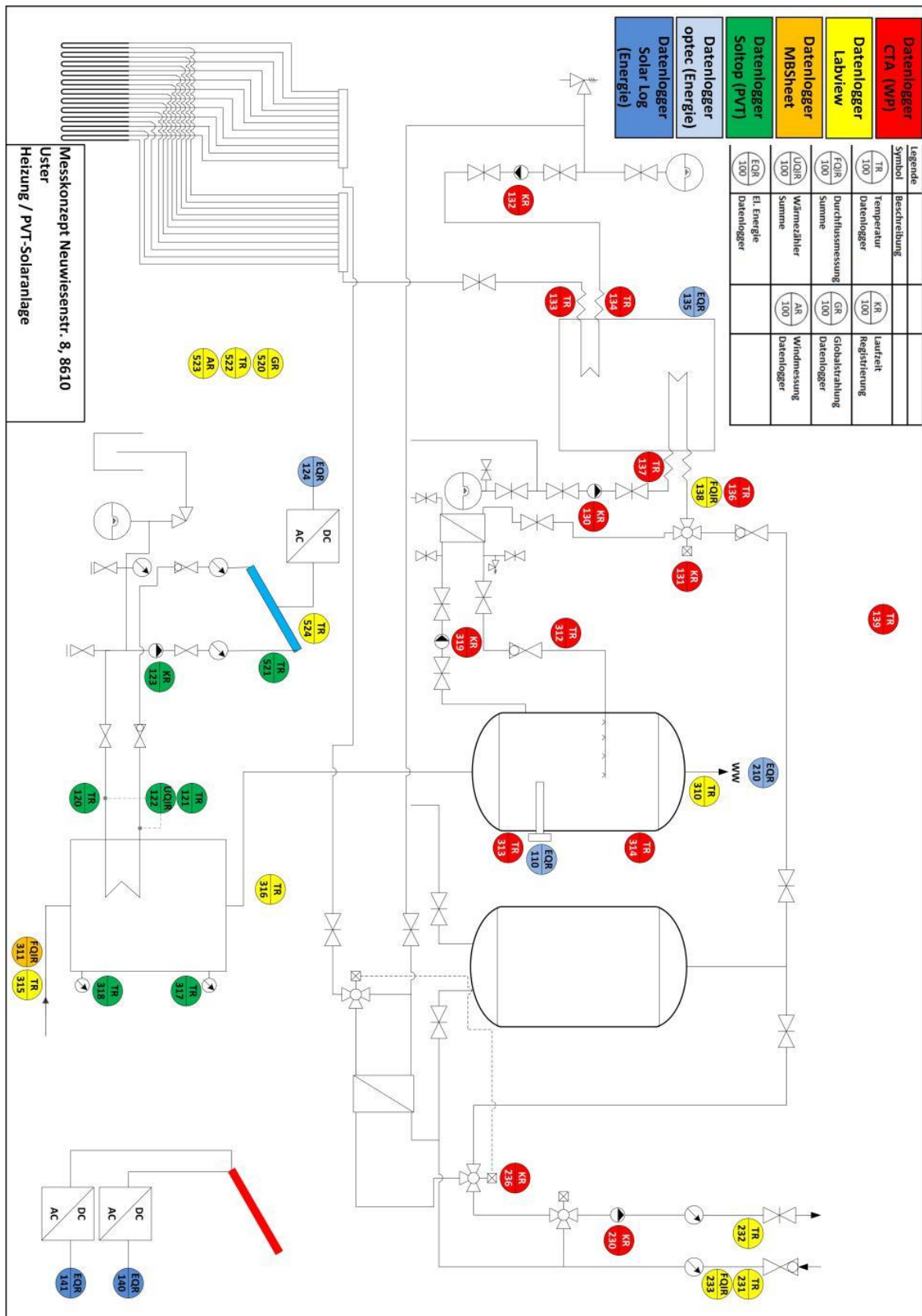


Abbildung 46, Messschema PVT-Anlage, PV-Anlage, WP und Energiemessungen

Messt. Nr.	Symbol	Einheit	Messgrösse	Messprinzip
EQR 110	E _{Heizstab}	kWh	Elektroeinsatz WW-Speicher	EEZ
TR 120	TPVT-VL	°C	Temperatur VL Kollektor	PT 1000
TR 121	TPVT-RL	°C	Temperatur RL Kollektor	PT 1000
UQIR 122	QPVT	kWh	Thermische Leistung PVT-Kollektor	WMZ
KR 123	t _L -PVT-UWP	h	Laufzeit PVT-Kollektorkreispumpe	Status
EQR 124	EPVT	kWh	Erzeugte elektrische. Energie PVT	EEZ
KR 130	t _{WP} -UWP-WW	h	Laufzeit WP-UWP, Kreis WW, WP Seite	Status
KR 131	t _{ST} -WP-H/WW	h	ST des 3-Weg Ventils nach der WP für H oder WW	Status
KR 132	t _{WP} -UWP-Sonde	h	Laufzeit WP-UWP-Erdwärmesonde	Status
TR 133	TSonde-VL	°C	Temperatur VL Erdwärmesonde	NTC 10K
TR 134	TSonde-RL	°C	Temperatur RL Erdwärmesonde	NTC 10K
EQIR 135	EWP	kWh	elektrischer Energiebezug WP	EEZ
TR 136	TWP-VL	°C	Temperatur WP-VL	NTC 10K
TR 137	TWP-RL	°C	Temperatur WP-RL	NTC 10K
FQIR 138	VWP-Zirkulation	l	Durchfluss WP-Zirkulation H und WW	MZ
TR 139	TAussen	°C	Temperatur Aussen Nordseite	NTC 1K
EQR 140	EPV_140	kWh	Erzeugte elektrische Energie PV	EEZ
EQR 141	EPV_141	kWh	Erzeugte elektrische Energie PV	EEZ
EQR 210	EBegleitheizung	kWh	elektrischer Energiebezug Begleitheizung	EEZ
KR 230	t _{WP} -UWP-H	H	Laufzeit WP-UWP Heizkreis	Status
TR 231	TWP-VL-H	°C	Temperatur WP-VL Zirkulation H	Thermoelement
TR 232	TWP-RL-H	°C	Temperatur WP-RL Zirkulation H	Thermoelement
FQIR 233	VWP-H	l	Durchfluss WP-Zirkulation H	MZ
KR 236	t _{ST} -WP-H/Kühlen	h	ST WP-H/Kühlen	Status
TR 310	TWW-Ausgang	°C	Temperatur WW Ausgang	Thermoelement
FQIR 311	VKaltwasser	l	Durchfluss Kaltwasser	MZ
TR 312	TWW-Speicher-VL	°C	Temperatur WW-Speicher VL	NTC 10K
TR 313	TWW-Speicher-unten	°C	Temperatur WW-Speicher unten	NTC 10K
TR 314	TWW-Speicher-oben	°C	Temperatur WW-Speicher oben	NTC 10K
TR 315	TKaltwasser	°C	Temperatur Kaltwasser	Thermoelement
TR 316	TAusgang-Vorwärmer	°C	Temperatur Ausgang Vorwärmer	PT 1000
TR 317	TVorwärmer oben	°C	Temperatur Vorwärmer oben	PT 1000
TR 318	TVorwärmer-unten	°C	Temperatur Vorwärmer unten	PT 1000
KR 319	t _{WW} -UWP	H	Laufzeit WW-UWP	Status
GR 520	G	W/m ²	Globalstrahlung	Pyranometer
TR 521	TKollektor	°C	Temperatur Kollektor	PT 1000
TR 522	TDach	°C	Temperatur auf Dach unter Ziegel	Thermoelement
AR 523	v	m/s	Windgeschwindigkeit	Anemometer

TR 524	TOberfläche-Kollektor	°C	Temperatur Oberfläche Kollektor	Thermoelement
100: Wärme und-Energieerzeuger/Verbraucher 400: Gebäude		200: Wärmeverteilung und - übergabe 500: Wetter		300: Trinkwasser

Tabelle 16, Messstellenliste PVT-Anlage, PV-Anlage, WP und Energiemessung

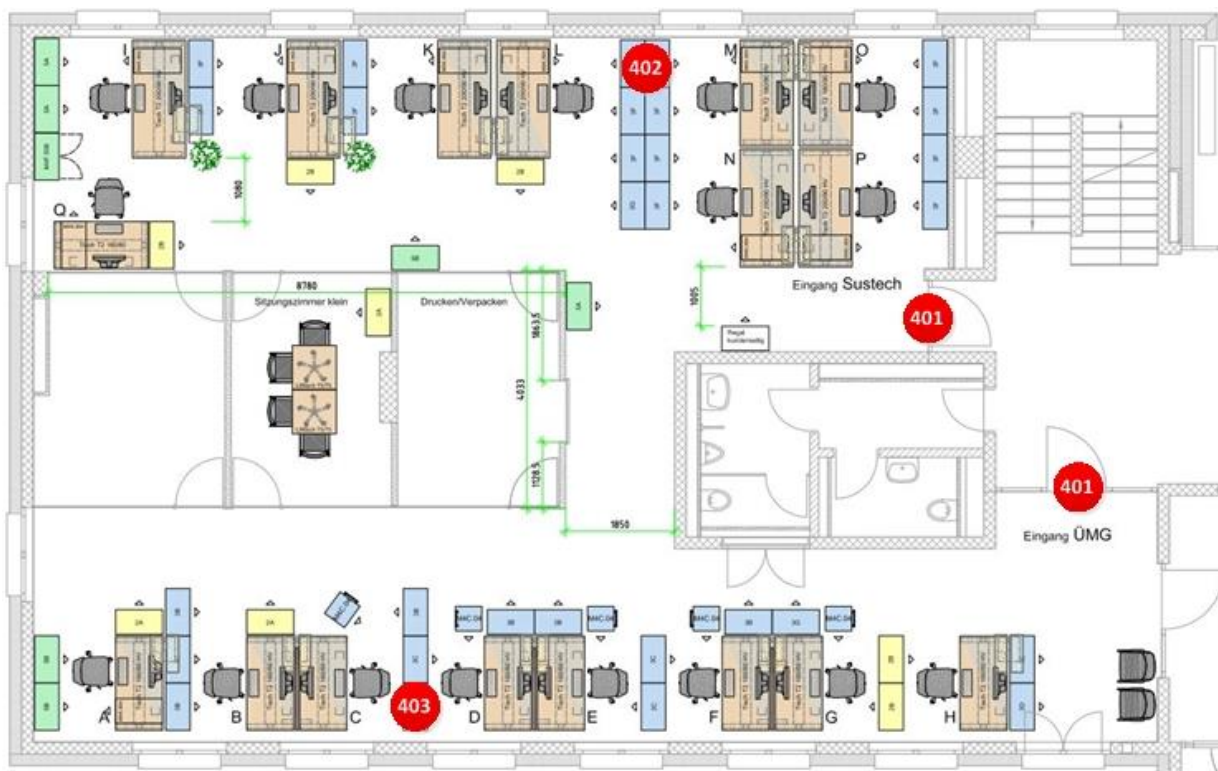


Abbildung 47, Messschema Komfortmessung und Personenpräsenz

Messt. Nr.	Symbol	Einheit	Messgrösse	Messprinzip
401	A _{Personen}	h	Personenpräsenz	Anwesenheitsliste
402/403	R _{Feuchte}	%	Luftfeuchtigkeit	Feuchtemessung
402/403	CO ₂	ppm	CO ₂	CO ₂ Sonde
402/403	T _{Raumtemp}	C°	Raumtemperatur	Temperaturfühler

Tabelle 17, Messstellenliste Komfortmessung und Personenpräsenz

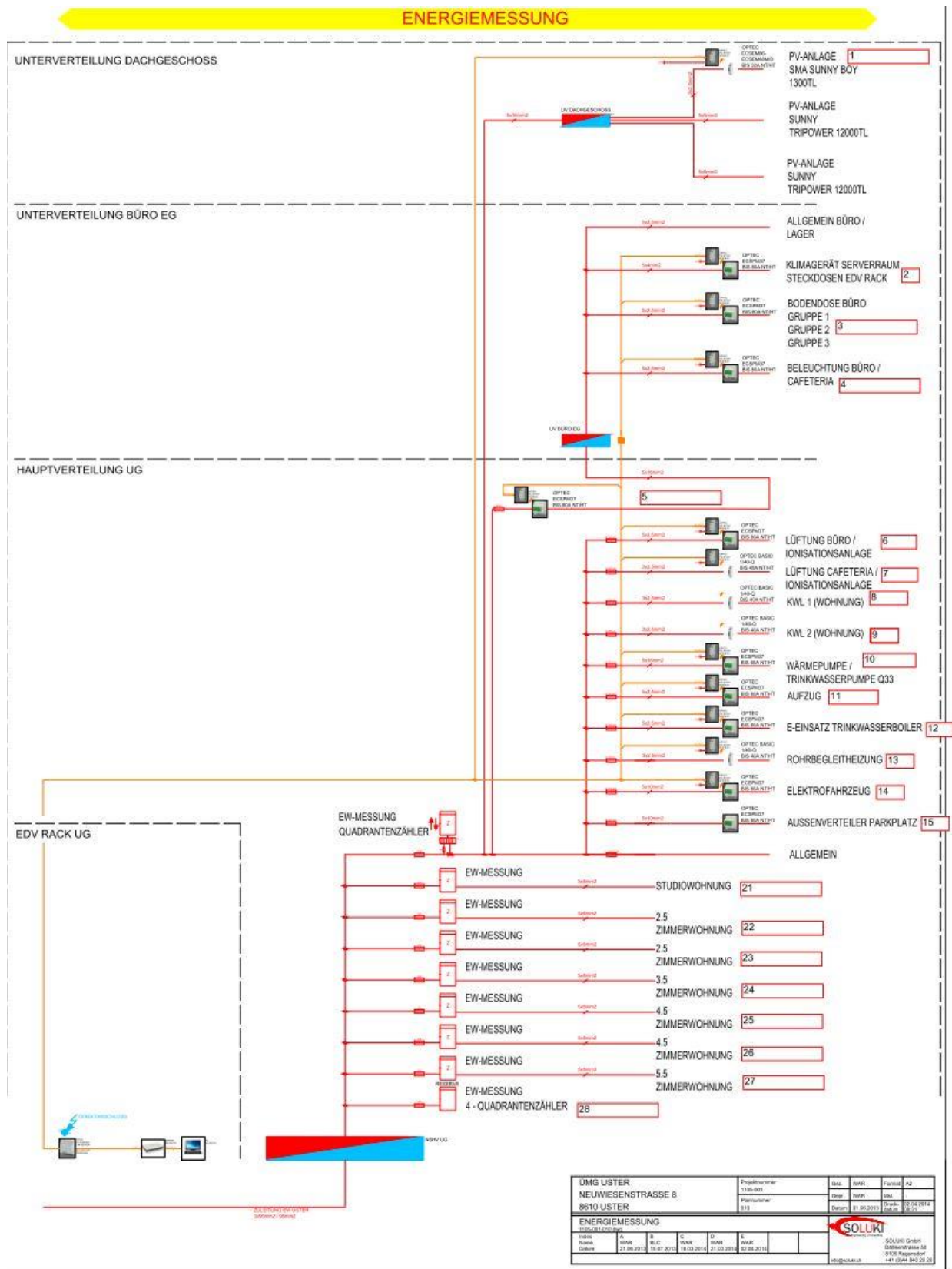


Abbildung 48, Messschema Energiemessung

Gruppen Energiemes- sung und Messt. Nr.	Symbol	Einheit	Messgrösse	Messprinzip
1 / EQR 124	E _{PVT}	kWh	Erzeugte elektrische Energie PVT	EEZ
2	E _{EDV_2}	kWh	T25 Steckdosen, EDV-Rack (Server, Klimagerät)	EEZ
3	E _{Boden_3}	kWh	Bodendosen Büro EG	EEZ
4	E _{Bel_4}	kWh	Beleuchtung Büro und Cafeteria	EEZ
5	E _{UV_5}	kWh	Unterverteiler Büro EG	EEZ
6	E _{Lüftung_Büro_6}	kWh	Lüftung Büro, Ionisationsanlage	EEZ
7	E _{Lüftung_Cafet_7}	kWh	Lüftung Cafeteria, Ionisationsanlage	EEZ
8	E _{KWL1_8}	kWh	KWL 1 (kein Logging)	EEZ
9	E _{KWL2_9}	kWh	KWL 2 (kein Logging)	EEZ
10	E _{WP_10}	kWh	WP	EEZ
11	E _{Aufzug_11}	kWh	Personenaufzug	EEZ
12 / EQR 110	E _{Heizstab}	kWh	Elektroeinsatz WW-Speicher	EEZ
13 / EQR 210	E _{Begleitheizung}	kWh	elektrischer Energiebezug Begleitheizung	EEZ
14	E _{Fahrzeug_14}	kWh	Elektrofahrzeug	EEZ
15	E _{Parkplatz_15}	kWh	Aussenverteiler Parkplatz	EEZ
21	E _{Whg_21}	kWh	Studiowohnung, 2.OG (kein Logging)	EEZ
22	E _{Whg_22}	kWh	2.5 Zimmer, mitte rechts, 1.OG (kein Logging)	EEZ
23	E _{Whg_23}	kWh	2.5 Zimmer, rechts, 1.OG (kein Logging)	EEZ
24	E _{Whg_24}	kWh	3.5 Zimmer, mitte links, 1.OG (kein Logging)	EEZ
25	E _{Whg_25}	kWh	4.5 Zimmer, links, 1.OG (kein Logging)	EEZ
26	E _{Whg_26}	kWh	4.5 Zimmer, 2.OG (kein Logging)	EEZ
27	E _{Whg_27}	kWh	5.5 Zimmer, 1.OG (kein Logging)	EEZ
28	E _{Whg_28}	kWh	Reserve (kein Logging)	EEZ

Tabelle 18, Messstellenliste Energiemessung

Anhang 2 – Simulation mit MATLAB/Simulink

Anhand des Leitungsdurchmessers, der Leitungslänge, dem Isolationsmaterial und der Isolationsdicke sollte berechnet werden, wie lange das Wasser in der Leitung benötigt, um von 55 °C auf 40 °C abzukühlen wenn kein Wasser nach fliesst. Da das Wasser mit 55 °C vom Boiler in die Leitung gespeist wird, wird diese Temperatur als Ausgangsniveau gewählt. Des Weiteren ist diese Annahme abhängig vom Leitungsvolumen: Erst wenn das komplette Leitungsvolumen innerhalb „kurzer“ Zeit ausgetauscht wurde, kann davon ausgegangen werden, dass in den Leitungen die Temperatur 55 °C beträgt. Der zentrale Boiler versorgt beide Haushälften gleichermassen, die Rohrleitungen unterscheiden sich jedoch deutlich in ihrer Länge. Es wurde für beide Haushälften eine separate Simulation durchgeführt. Da auch zwei Steuerungen für die Heizbänder vorhanden sind, können problemlos verschiedene Programme eingestellt werden.

Für die Simulationen wurden verschiedene Angaben benötigt, teils wurden Annahmen getroffen. Dabei wurde jedoch stets darauf geachtet, eher schlechtere Werte zu wählen um einen gewissen Sicherheitsfaktor zu erhalten. Der Komfort der Bewohner soll nicht beeinflusst werden.

Für die Simulation und die Umsetzung relevante Werte:

Angabe	Längere Leitung	Kürzere Leitung	Erläuterungen
Länge	90 m	30 m	Die genaue Rohrleitungslänge ist nicht bekannt, das Begleitheizband ist jedoch 90 bzw. 30 m lang. Da das Begleitheizband stets länger als die Rohrleitung ist und die Wärmeverluste mit der Länge zunehmen, ist der Sicherheitszuschlag bei dieser Angabe schon inbegriffen.
Durchmesser (innen)	0.033 m	0.02	Die Angaben für die Aussendurchmesser wurden den Sanitär-Plänen entnommen. Mittels des Montagehandbuchs von Geberit wurden die Innendurchmesser ermittelt. Die Isolationsdicke wurde der MuKEn entnommen.
Isolationsdicke	50 mm	50 mm	
Isolationsmaterial	Steinwolle		Wurde vor Ort ermittelt.
Wärmeleitfähigkeit Steinwolle	$0.041 \frac{W}{mK}$		Literaturdaten liefern Werte zwischen 0.035 und $0.041 \frac{W}{mK}$. Daher wurde der höchste Wert gewählt um auf der sicheren Seite zu sein.
Rohrvolumen	72 l	9.4 l	
Umgebungstemperatur	17 °C		Für die Temperatur wurde eine Annahme getroffen, welche mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht unterschritten wird.
Temperatur im Speicher	55 °C		Die Temperatur im Speicher ist nicht zu jedem Zeitpunkt 55 °C, sie schwankt zwischen 50 °C und 60 °C. Meistens beträgt die Temperatur jedoch 55 °C oder etwas mehr.

Wärme- kapazität Mepla-Rohre	$795 \frac{J}{m \cdot K}$	$538 \frac{J}{m \cdot K}$	Die Angaben wurden dem Montagehandbuch für Mepla Systeme von Geberit entnommen.
--	---------------------------	---------------------------	---

Tabelle 19, Für die Simulation und die Umsetzung der Optimierungen am Begleitheizband relevante Werte

Tabelle 19, Für die Simulation und die Umsetzung der Optimierungen am Begleitheizband relevante Werte könnte noch um weitere Angaben, welche man für die Simulation verwenden kann, ergänzt werden, das Ergebnis wird durch diese jedoch kaum beeinflusst. Sie werden deshalb hier nicht erwähnt. Die Simulationsdatei für die kürzere und die längere Leitung liegen der hässig sustech gmbh vor.

