



Abschlussbericht

Digitales Energiekonzept für kommunale Liegenschaften in der Gemeinde Baar-Ebenhausen

Digitales Energiekonzept für kommunale Liegenschaften in der Gemeinde Baar-Ebenhausen

Auftraggeber:

Gemeinde Baar-Ebenhausen
Münchner Str. 55
85107 Baar-Ebenhausen

Auftragnehmer

Institut für Energietechnik IfE GmbH
an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden
Kaiser-Wilhelm-Ring 23a
92224 Amberg

Gefördert durch das

Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Energie und Technologie

Bearbeitungszeitraum:

Januar 2019 bis Februar 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung.....	5
2	Erfassung des energetischen Ist-Zustands.....	7
2.1	Grundschule Baar-Ebenhausen	7
2.1.1	Energiebedarf im Bestand.....	10
2.1.2	Messgeräteinfrastruktur.....	11
2.2	Kindertagesstätte Regenbogen	13
2.2.1	Energiebedarf im Bestand.....	16
2.2.2	Messgeräteinfrastruktur.....	17
2.3	Sportheim.....	19
2.3.1	Energiebedarf im Bestand.....	21
2.3.2	Messgeräteinfrastruktur.....	22
3	Softwareabbild der Liegenschaften	24
3.1	Funktionen und Begrifflichkeiten der Software.....	24
3.2	Softwareabbild Grundschule	27
3.3	Softwareabbild Kindertagesstätte Regenbogen.....	37
3.4	Softwareabbild Sportheim	40
4	Prüfung von Maßnahmen mit Maßnahmenkatalog	42
4.1	Grundschule - Optimierung Pelletkessel.....	42
4.2	Grundschule - Beleuchtungskonzept.....	47
4.2.1	Berechnungsgrundlagen, Begriffsdefinitionen und Möglichkeiten beim Beleuchtungstausch.....	47
4.2.2	Aufnahme Ist-Zustand.....	51
4.2.3	Beleuchtungstausch-Varianten.....	53
4.2.3.1	LED-Retrofit	53
4.2.3.2	LED-Leuchtentausch.....	53
4.2.4	Zusammenfassung und Fazit Beleuchtungskonzept.....	54
4.3	Grundschule - Potenzialstudie Photovoltaik	55
4.3.1	Rahmenbedingungen.....	55

4.3.2	Elektrisches Lastprofil der Liegenschaft	56
4.3.3	Potenzialabschätzung und Vordimensionierung	57
4.3.4	Variantenbetrachtung und Simulationsergebnisse.....	60
4.3.5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	62
4.3.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	65
4.4	Kita Regenbogen - Potenzialstudie Photovoltaik	67
4.4.1	Rahmenbedingungen, PV-Anlage im Bestand.....	67
4.4.2	Elektrisches Lastprofil der Liegenschaft	69
4.4.3	Potenzialabschätzung und Vordimensionierung	70
4.4.4	Variantenbetrachtung und Simulationsergebnisse.....	74
4.4.5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	76
4.4.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	80
4.5	Sportheim - Potenzialstudie Photovoltaik	81
4.5.1	Rahmenbedingungen	81
4.5.2	Elektrisches Lastprofil der Liegenschaft	83
4.5.3	Potenzialabschätzung und Vordimensionierung	84
4.5.4	Variantenbetrachtung und Simulationsergebnisse.....	87
4.5.5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	89
4.5.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	92
5	Zusammenfassung.....	93
6	Abbildungsverzeichnis.....	94
7	Tabellenverzeichnis.....	98

1 Zielsetzung

Ziel des digitalen Energiekonzepts ist die Ausarbeitung konkreter Maßnahmen zur Energieeinsparung und Effizienzsteigerung sowie dem Ausbau erneuerbarer Energien und/oder Kraft-Wärme-(Kälte)-Kopplung in den folgenden kommunalen Gebäuden der Gemeinde Baar-Ebenhausen:

- Grundschule Baar-Ebenhausen
- Kindertagesstätte Regenbogen
- Sportheim

Eine wichtige Grundlage zur Identifikation von Energieeinsparpotenzialen ist die detaillierte Kenntnis des lokalen Verbrauchs über längere Zeiträume - genau an dieser Stelle setzt das digitale Energiekonzept mittels einer digitalen Plattform zur kontinuierlichen Datensammlung und -auswertung an.

So werden Zählerstände oder Messdaten von Messgeräten vor Ort erfasst, zentral gespeichert und analysiert. Als Werkzeug zur Bewältigung dieser Aufgabe dient dabei eine, auf das Energiemanagement spezialisierte Softwareplattform. Zeitintensive Prozesse wie z.B. das Zusammentragen von Verbrauchsinformationen und deren Dokumentation können durch Nutzung der Software optimiert und freigewordene Ressourcen für eine vertiefte Datenanalyse genutzt werden, um Einsparpotenziale zu identifizieren und Maßnahmen zu ergreifen.

Die Konzepterarbeitung erfolgt in drei sachlogischen Schritten:

- **Erfassung des energetischen Ist-Zustands**
 - Übersicht der energetischen und messtechnischen Infrastruktur vor Ort im Bestand
 - Ggf. Empfehlungen zum Ausbau des vorhandenen Messgerätebestands
- **Abbildung der Liegenschaften in der Software**
 - Integration in Software und Beginn der Datensammlung
 - Implementierung von Analyse- und Auswertemethoden

- **Ausarbeitung und Prüfung von Maßnahmen**
 - Auswertung der gesammelten Daten
 - Identifikation von Optimierungspotenzialen
 - Ableitung und Ausarbeitung von sinnvollen Maßnahmen zur Energieeinsparung, Effizienzsteigerung und dem Ausbau Erneuerbarer Energien und/oder Kraft-Wärme-(Kälte)-Kopplung
 - Umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und ökologische Bilanzierung der identifizierten Maßnahmen

Fortwährende Pflege des Energiemonitorings und Analyse der gesammelten Daten ist Schlüsselkomponente zum erfolgreichen Betrieb, denn mögliche Energieeinsparungen zu identifizieren ist keine einmalige Aufgabe. Aus diesem Grund erfolgt der gesamte Prozess des digitalen Energiemonitorings in Abstimmung mit den Akteuren vor Ort sowie Einarbeitung dieser in den Umgang mit der Software.

2 Erfassung des energetischen Ist-Zustands

Im ersten Schritt der Konzepterarbeitung erfolgt eine umfassende Bestandsaufnahme und Analyse der Liegenschaften.

2.1 Grundschule Baar-Ebenhausen

Die Grundschule im Ortsteil Ebenhausen setzt sich aus mehreren Gebäudeteilen zusammen (siehe Abbildung 1):

- Hauptgebäude (BJ 1963)
- Neubau (BJ 1987)
- Turnhalle (mit Erweiterungsbau)
- Hausmeisterwohnung
- Verbindungsbau
- Schulmensa (Neubau, in Umsetzung)

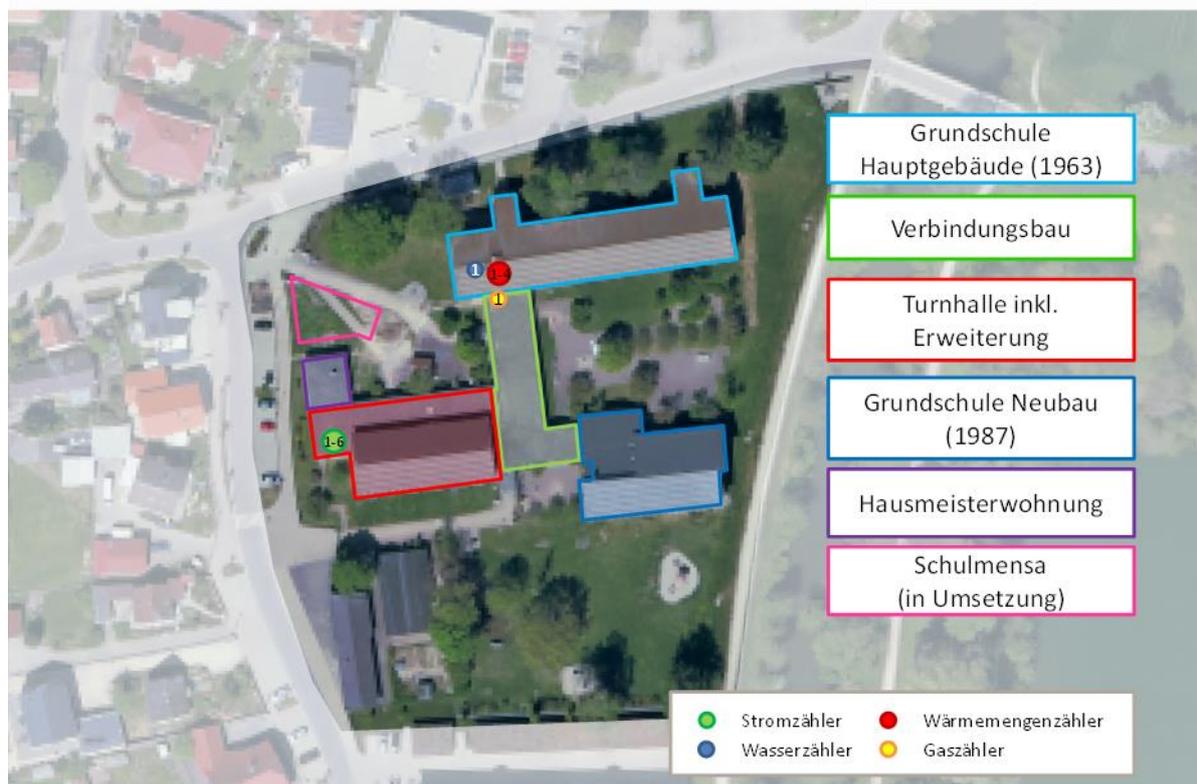


Abbildung 1: Übersichtsskizze der Grundschule Baar-Ebenhausen, Luftbild Datenquelle: Bayerische Vermessungsverwaltung - www.geodaten-bayern.de

Die einzelnen Gebäudeteile der Grundschule werden über die Heizzentrale im Hauptgebäude mit Wärme versorgt. In den Gebäudeteilen Neubau sowie in der Turnhalle sind weitere Unterverteiler vorhanden. Ende 2017 kam es zum Aus- und Umbau der Heizzentrale. Gegenwärtig ist ein Pelletkessel (135 kW, Pelletlager nordöstlich vom Hauptgebäude) und ein NT-Gaskessel (455 kW) installiert (Typenschilder: vgl. Abbildung 2).

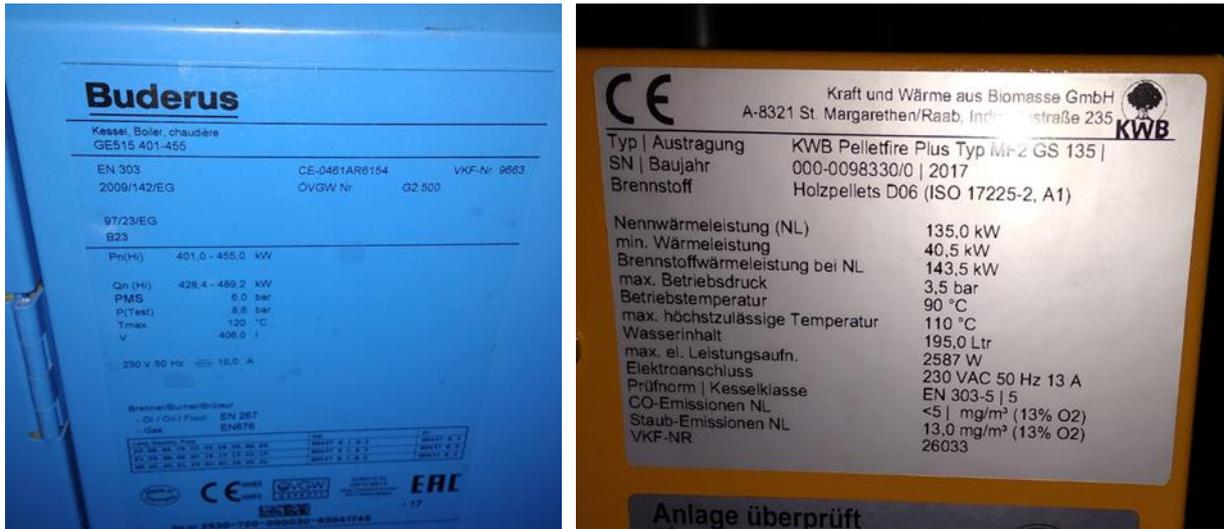


Abbildung 2: Typenschilder der Wärmeerzeuger der Heizzentrale in der Grundschule, links: Erdgaskessel, rechts: Pelletkessel

Mit der Heizungssanierung wurden auch Wärmemengenzähler für Erzeugung und Verbrauch integriert (Positionierung der WMZ vgl. Abbildung 3, rechts). Die Ansteuerung der Heizzentrale erfolgt über eine zentrale Steuerung in der Heizzentrale.

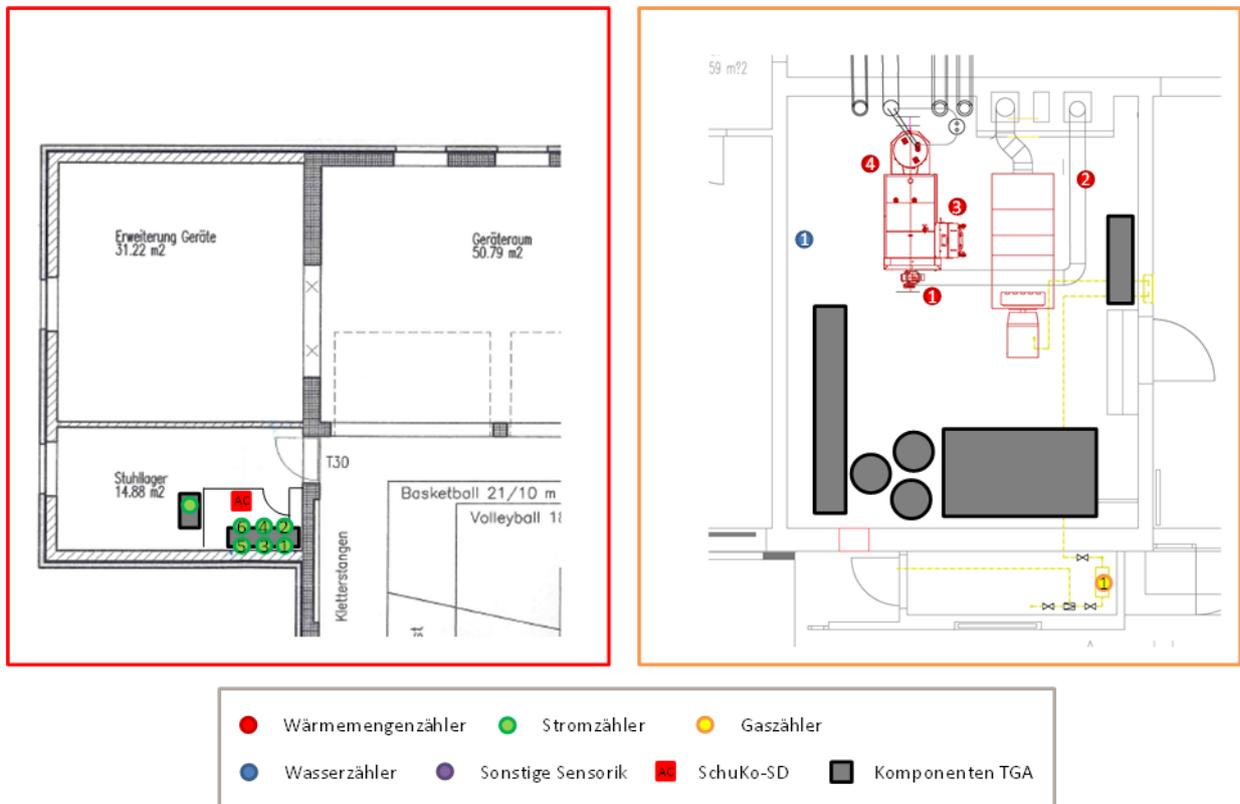


Abbildung 3: Detailskizze Messtechnikbestand der Grundschule Baar-Ebenhausen. Auszüge der Bauteilzeichnungen der Turnhalle (links) und dem Hauptgebäude (rechts) der Grundschule.

Über die Heizzentrale wird neben der Grundschule auch ein Nahwärmeversorgungsnetz mit Wärme gespeist. An diesem NW-Netz sind folgende Gebäude angeschlossen, die sich in nördlicher Richtung der Grundschule befinden (vgl. Abbildung 4):

- Feuerwehr (75 kW, 90/70)
- Bauhof (45 kW, 90/70)
- Vorgesehen: Gesundheitszentrum (24 kW, 70/50)
- Vorgesehen: Schulsport (voraussichtlich ca. 80 kW, 80/60)

An den jeweiligen Übergabestellen sind Wärmemengenzähler vorgesehen.



Abbildung 4: Nahwärmeverbund - Heizzentrale in Grundschule (grün) speist das Nahwärmenetz (weiß). Angeschlossene Verbraucher: Gesundheitszentrum (orange), Feuerwehr (rot) und Bauhof (blau). Anschluss für Schulsport vorbereitet (nördlichster Punkt Nahwärmenetz), Luftbild Datenquelle: Bayerische Vermessungsverwaltung - www.geodaten-bayern.de

Im Erweiterungsbau der Turnhalle befindet sich der Stromanschluss (siehe Abbildung 3, links). Der gesamte Stromverbrauch wird über insgesamt sechs Stromzähler erfasst, wobei für den eigentlichen Stromverbrauch der Grundschule lediglich drei (zzgl. ein Stromzähler für die Hausmeisterwohnung) relevant sind. Die Süd-Dachflächen der Grundschule sind vermietet. Die installierten PV-Generatoren befinden sich nicht im Besitz der Gemeinde.

2.1.1 Energiebedarf im Bestand

Referenzjahr 2020

Wärmebedarf (Nutzwärme): ca. **315.000 kWh_{th}/a**

Beheizbare Nettogrundfläche: 3.476 m²

→ Spezifischer Wärmebedarf: 90,6 kWh_{th}/(m²_{NGFE} a)

Referenzwert (nach VDI 3807:2014 Blatt 2) – BWZ 418200: Grundschulen/HS/RS

- Mittelwert: 186 kWh_{th}/(m²_{NGFE} a)
 - Mittelwert = Modalwert; Wert eines Wertekollektivs, der mit der größten Häufigkeit vorkommt
- Richtwert: 101 kWh_{th}/(m²_{NGFE} a)
 - Richtwert = anzustrebender Wert bei der Durchführung von Energieeinsparmaßnahmen

→ Wärmebedarf **im Bestand besser als Referenzwert** vergleichbarer Gebäudeart

Strombedarf: ca. **33.755 kWh_{el}/a**

→ Flächenspezifischer Strombedarf: 9,7 kWh_{el}/(m²_{NGFE} a)

Referenzwert (nach VDI 3807:2014 Blatt 2) – BWZ 418200: Grundschulen/HS/RS

- Mittelwert: 10 kWh_{el}/(m²_{NGFE} a)
- Richtwert: 6 kWh_{el}/(m²_{NGFE} a)

→ Im Bestand noch **unterhalb** des Referenz-Mittelwerts; Richtwert **überschritten**

2.1.2 Messgeräteinfrastruktur

Abbildung 5 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Medienverteilung in der Grundschule Baar-Ebenhausen. Insgesamt existieren ein Wasserzähler, sechs Stromzähler, vier Wärmemengenzähler und ein Erdgaszähler.

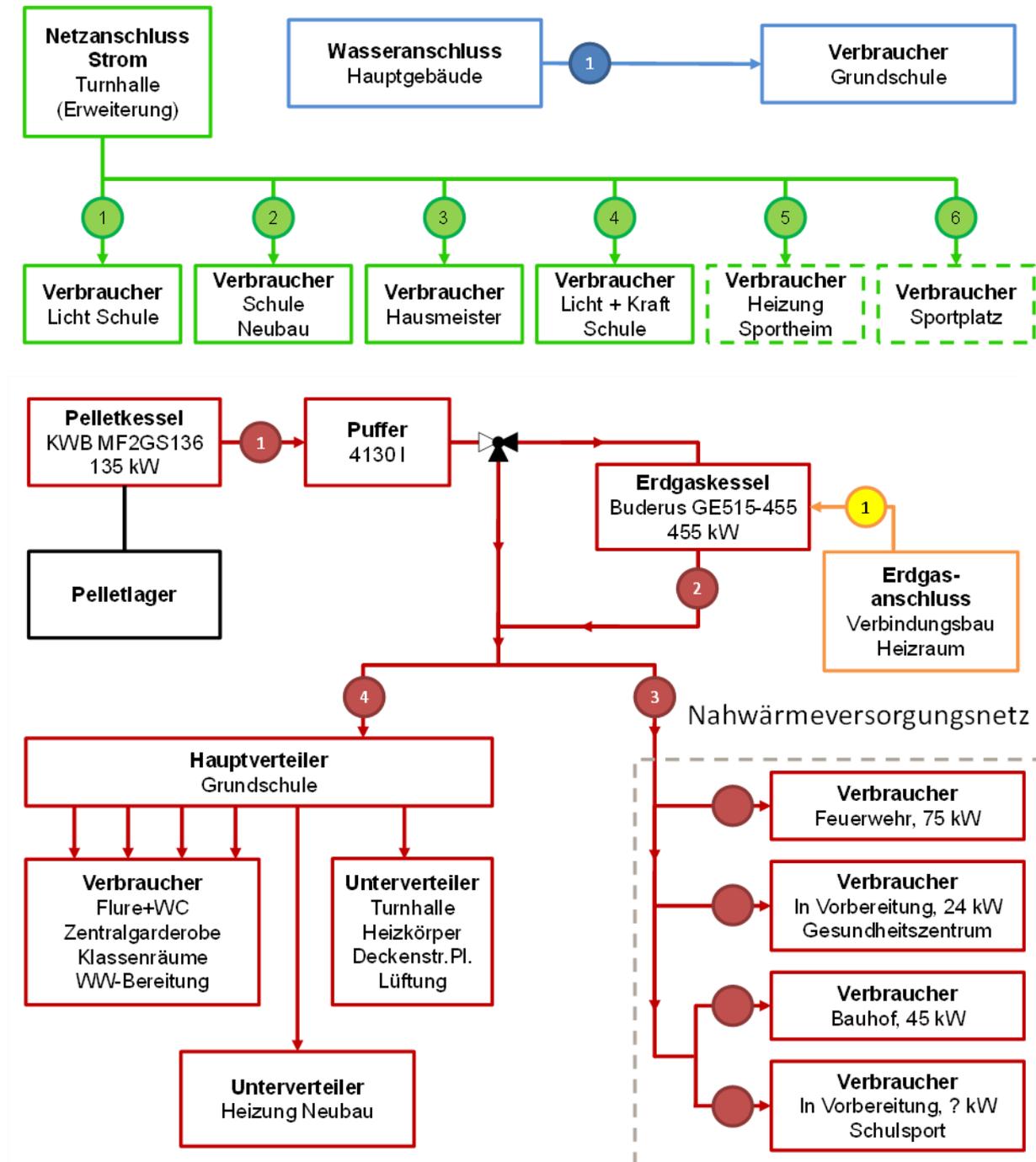


Abbildung 5: Vereinfachte Skizze der Medienverteilung für Strom (grün), Gas (orange), Wärme (rot) und Wasser (blau) sowie Messgeräte (Kreise) der Grundschule Baar-Ebenhausen

Stromzähler

Der Anschlusspunkt an das Stromnetz sowie der Zählerschrank der Grundschule befinden sich im Erweiterungsbau der Turnhalle. Im Zählerschrank sind insgesamt sechs Stromzähler vorhanden, wobei Zähler 5 und 6 („Heizung Sportheim“ und „Sportplatz“) keinen, für die Grundschule relevanten Stromverbrauch erfassen bzw. teilweise sogar stillgelegt sind.

Relevante Zähler für die Grundschule sind die Zähler 1 bis 4, wobei Zähler Nr. 3 der Hausmeisterwohnung zugeschrieben wird und separat abgerechnet wird. Der eigentliche Stromverbrauch der Grundschule entspricht damit der Summe der, über die Zähler 1, 2 und 4 erfassten Strommengen („Licht Schule“, „Schule Neubau“ und „Licht + Kraft Schule“). Gegenwärtig handelt es sich bei den Stromzählern um klassische Ferrariszähler. Zwischenzeitlich wurde der Stromzähler der Hausmeisterwohnung durch eine moderne Messeinrichtung ausgetauscht.

Wasserzähler

Der gesamte Wasserverbrauch der Grundschule (inkl. Neubau und Turnhalle etc.) wird über einen gemeinsamen Hauptzähler erfasst (befindet sich in der Heizzentrale). Weitere Unterzähler sind nicht vorhanden.

Erdgaszähler

Der Erdgasanschluss der Grundschule befindet sich in einem Nebenraum der Heizzentrale, welcher nur über eine Außentür begangen werden kann. Der Erdgasanschluss wird ausschließlich vom Erdgaskessel der Heizzentrale genutzt und der entsprechende Erdgasverbrauch wird über einen Hauptzähler erfasst (Balgengaszähler, G40).

Wärmemengenzähler

Im Zuge der Umbaumaßnahmen der Heizzentrale wurden vier Wärmemengenzähler installiert. Alle Wärmemengenzähler können über die zentrale Steuerung ausgelesen werden:

- WMZ #1: Wärmebereitstellung Pelletkessel
- WMZ #2: Wärmebereitstellung Erdgaskessel
- WMZ #3: Wärmeverbrauch Nahwärmenetz (gesamt)
- WMZ #4: Wärmeverbrauch Grundschule (gesamt)

Wärmemengenunterzähler für die Grundschule sind nicht vorhanden.

2.2 Kindertagesstätte Regenbogen

Die Kita Regenbogen setzt sich aus Kindergarten mit Kinderkrippe zusammen und befindet sich im Ortsteil Baar. Abbildung 6 zeigt die beiden Gebäudeteile sowie die räumliche Verteilung der vorhandenen Messtechnik.

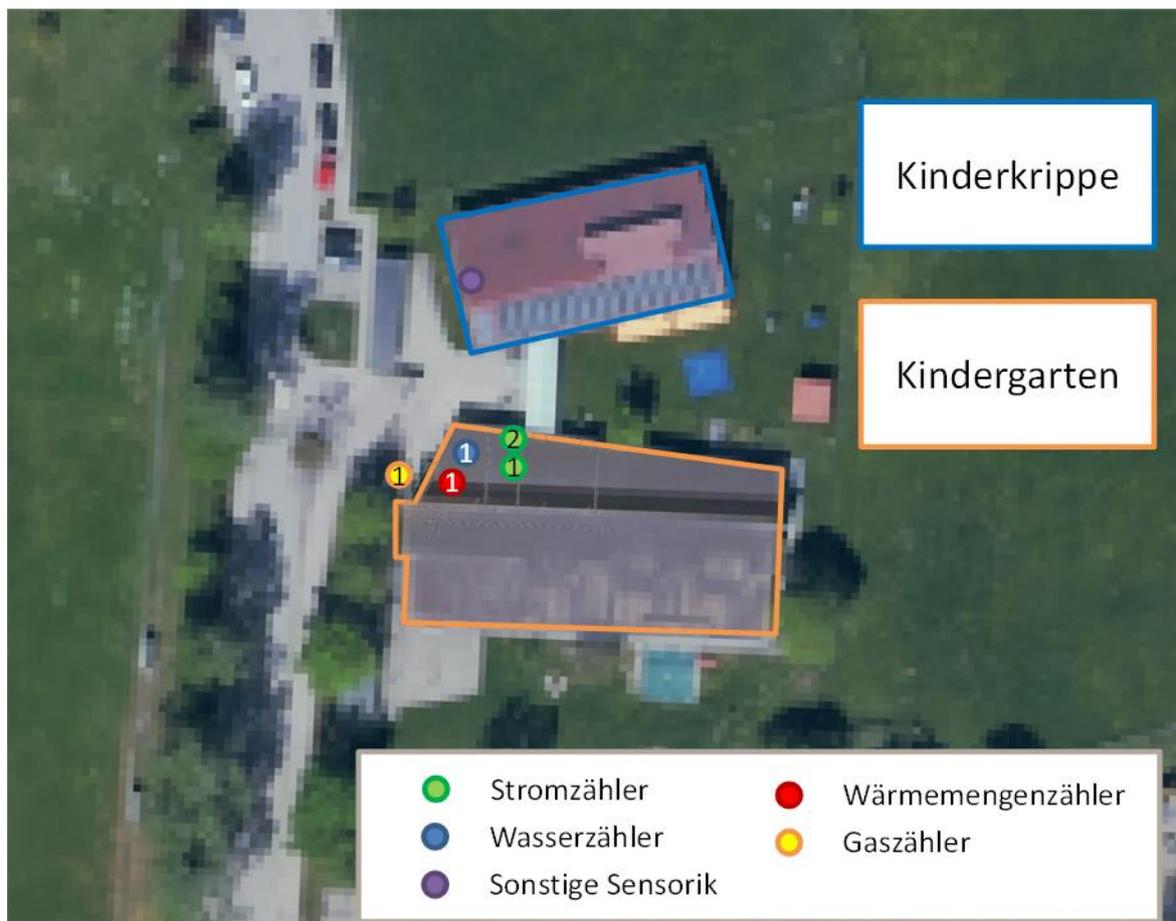


Abbildung 6: Übersichtskizze Kita Regenbogen, Luftbild Datenquelle: Bayerische Vermessungsverwaltung - www.geodaten-bayern.de

Zwischen den beiden Gebäudeteilen Kindergarten und Kinderkrippe besteht ein Wärmeverbund, bei dem die Fußbodenheizung der Kinderkrippe mit Wärme aus der Heizzentrale im UG des Kindergartens versorgt wird.

Auf dem Dach der Kinderkrippe befindet sich eine im Jahr 2011 in Betrieb genommene PV-Anlage (Netzeinspeisung ohne Eigenstromnutzung). Der PV-Generator besteht aus 75 Module zu je 180 Wp, was einer Generator-Nennleistung von 13,5 kW_p entspricht. Gegenwärtig ist der PV-Generator an insgesamt drei, jeweils einphasige Wechselrichter (Hersteller: Effekta Regeltechnik GmbH, Typ: ES 5000, P_{AC} = 4.600 W) angeschlossen. In der Vergangenheit und auch gegenwärtig traten vermehrt Störung und auch Wechselrichterdefekt auf. Zuletzt wurde die Anlage vermutlich aufgrund von Überspannung (Blitzeinschlag) abgeschaltet.



Abbildung 9: Solarthermie-Kollektoren und PV-Generator auf dem Süddach der Kinderkrippe

2.2.1 Energiebedarf im Bestand

Datengrundlage: durchschnittlicher Bedarf der letzten 3 Jahre

Wärmebedarf (Nutzwärme): ca. **133.000 kWh_{th}/a**

Beheizbare Nettogrundfläche: Summe Kita → 1.253 m²

- Kindergarten: 964 m²
- Kinderkrippe: 289 m²

→ Spezifischer Wärmebedarf Kita: ca. 106 kWh_{th}/(m²_{NGFE} a)

Referenzwert (nach VDI 3807:2014 Blatt 2) - BWZ 440000: Kindertagesstätten

- Mittelwert: 134 kWh_{th}/(m²_{NGFE} a)
 - Mittelwert = Modalwert; Wert eines Wertekollektivs, der mit der größten Häufigkeit vorkommt
- Richtwert: 87 kWh_{th}/(m²_{NGFE} a)
 - Richtwert = anzustrebender Wert bei der Durchführung von Energieeinsparmaßnahmen

→ Wärmebedarf **im Bestand besser als Mittelwert** vergleichbarer Gebäude, Referenzwert **überschritten**

Strombedarf: ca. **16.600 kWh_{el}/a**

→ Flächenspezifischer Strombedarf: 13,25 kWh_{el}/(m²_{NGFE} a)

Referenzwert (nach VDI 3807:2014 Blatt 2) - BWZ 440000: Kindertagesstätten

- Mittelwert: 23 kWh_{el}/(m²_{NGFE} a)
- Richtwert: 12 kWh_{el}/(m²_{NGFE} a)

→ Im Bestand **weit unterhalb** des Referenz-Mittelwerts; Richtwert **geringfügig überschritten**

2.2.2 Messgeräteinfrastruktur

Abbildung 10 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Medienverteilung in der Kita Regenbogen. Insgesamt existieren ein Wasserzähler, zwei Stromzähler, zwei Wärmemengenzähler und ein Erdgaszähler. Wärmemengenzähler „1“ wurde im Rahmen des Projektes seitens der Gemeinde nachgerüstet, um die Wärmeerzeugung der Gastherme direkt erfassen zu können. Bisher konnte lediglich der Erdgasverbrauch als Referenzwert für den Wärmebedarf herangezogen werden. Eine regelmäßige Erfassung des Erdgasverbrauchs wäre aufgrund der exponierten Lage (außerhalb der Gebäude in einem Anschlusskasten) nur mit erhöhtem Aufwand möglich gewesen.

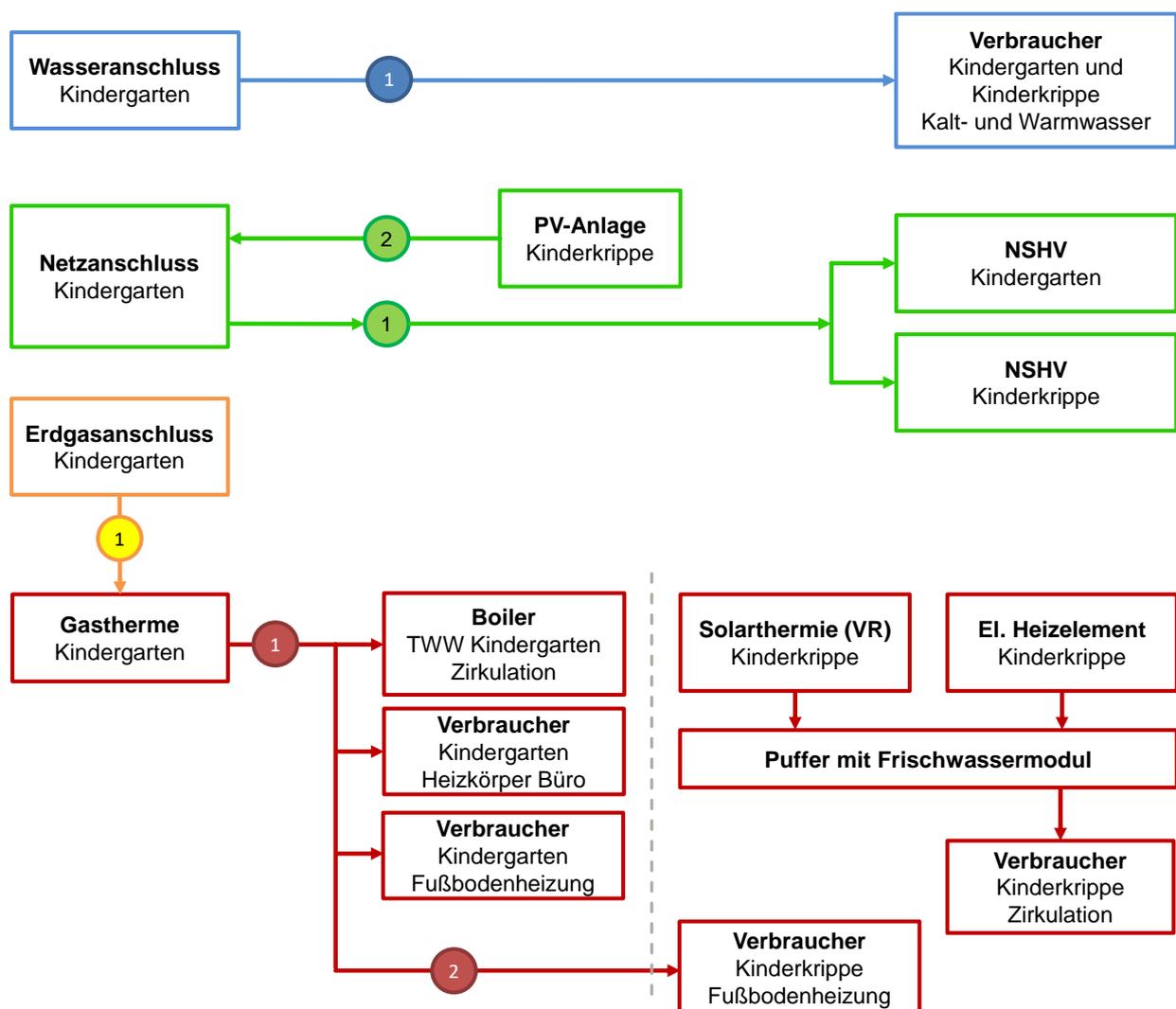


Abbildung 10: Vereinfachte Skizze der Medienverteilung für Strom (grün), Gas (orange), Wärme (rot) und Wasser (blau) sowie Messgeräte (Kreise) der Kindertagesstätte Regenbogen in Baar-Ebenhausen

Stromzähler

Der gesamte Stromverbrauch der Kita (= Kindergarten + Kinderkrippe) wird über einen gemeinsamen Hauptzähler erfasst. Ein Unterzähler, z.B. für die Kinderkrippe ist nicht vorhanden.

Im Zählerschrank der Kita ist neben dem Hauptzähler ein Zähler für den, von der PV-Anlage in das Netz eingespeisten Strom vorhanden. Bei der PV-Anlage handelt es sich um einen „Volleinspeiser“, d.h. der gesamte PV-Strom wird ohne Eigenstromnutzung vollständig in das Netz eingespeist.

Wasserzähler

Der gesamte Wasserverbrauch der Kita wird über einen Hauptzähler erfasst (befindet sich in der Heizzentrale). Weitere Unterzähler sind nicht vorhanden. Wieviel Wasser letztendlich vom Kindergarten bzw. der Kinderkrippe benötigt wird, ist damit nicht bekannt.

Erdgaszähler

Der Erdgasanschluss der Grundschule befindet sich westlich, außerhalb des Kindergartengebäudes in einem Anschlusskasten, in dem auch der Erdgaszähler (Balgengaszähler, G6) untergebracht ist. Einziger Erdgasverbraucher ist die Gastherme im Heizungskeller.

Wärmemengenzähler

Im ursprünglichen Bestand, d.h. vor Beginn des Projekts, war lediglich ein Wärmemengenzähler vorhanden (Wärmezähler „2“ in Abbildung 10) welcher den Wärmeverbrauch der Fußbodenheizung der Kinderkrippe erfasst. Der Zähler wurde seitens der Gemeinde erneuert.

Der Empfehlung, einen weiteren Wärmemengenzähler für Erfassung der gesamten bereitgestellten Wärme durch die Gastherme (WMZ „1“ Abbildung 10) zu installieren wurde seitens der Gemeinde Baar-Ebenhausen nachgekommen. Mit dem neuen Wärmemengenzähler ist es außerdem möglich Temperaturen, Volumenströme und momentane Heizleistung exemplarisch auszulesen und im Rahmen vom Projekt zu nutzen.

Die Heizzentrale des Sportheims befindet sich im UG vom Gebäudeteil „Eingang und Wohnung“ (vgl. Abbildung 11). Die Wärmebereitstellung erfolgt über einen Gasbrennwertkessel (FWL 224,4 kW), welcher die Hauptverteilung im Heizungsraum speist. Zu den angeschlossenen Verbrauchern zählt neben Heizkreisen (z.B. für Turnhalle und Nebenräume, Gaststätte, Kegelbahn etc.) und der Brauchwasserbereitung auch das Heizregister der Lüftungsanlage für die Dusch- und Umkleieräume. Abbildung 12 zeigt eine vereinfachte und zusammenfassende Darstellung der Funktionsschemata von Heizung, Lüftung und Sanitär des Sportheims.

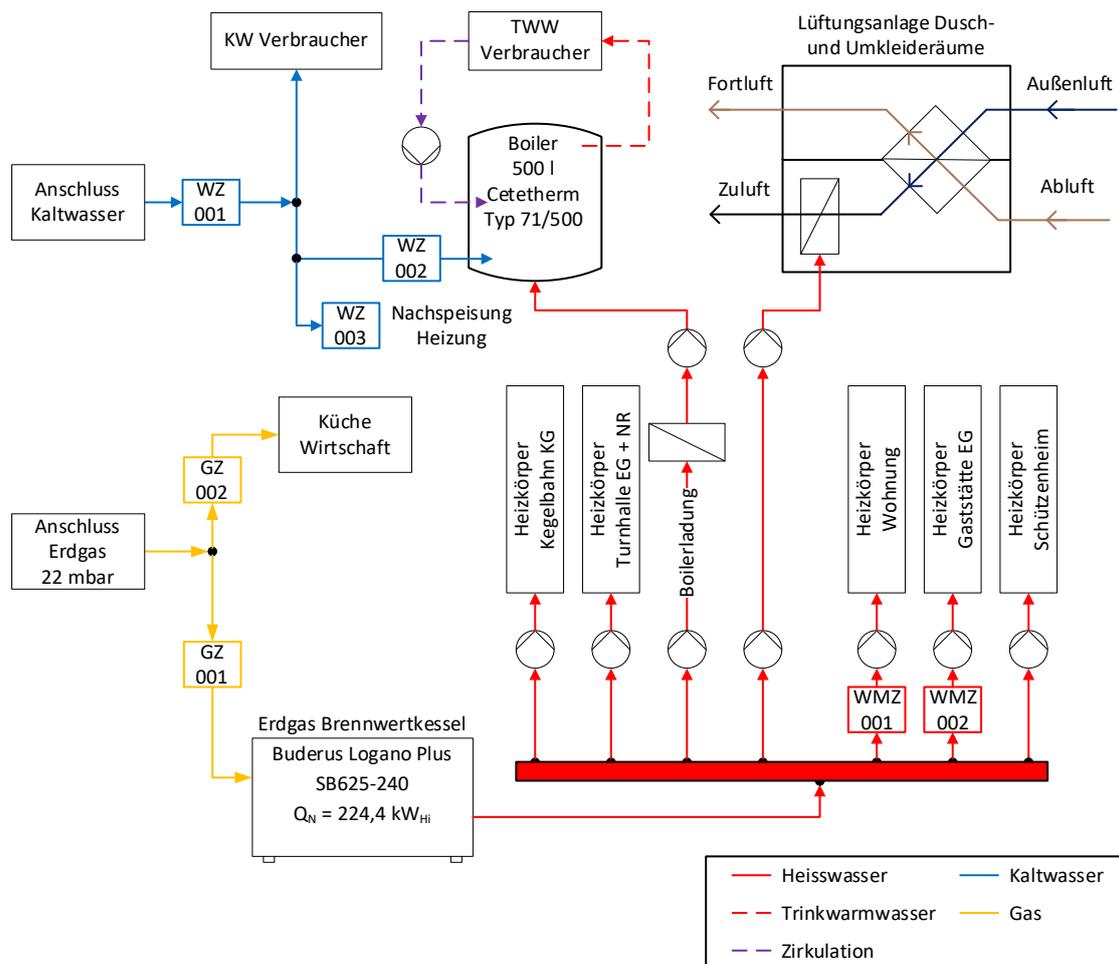


Abbildung 12: vereinfachte, zusammenfassende Darstellung der Funktionsschemata Heizung, Lüftung und Sanitär im Sportheim Baar-Ebenhausen.

2.3.1 Energiebedarf im Bestand

Datengrundlage: durchschnittlicher Bedarf der letzten 3 Jahre

Wärmebedarf (Nutzwärme): ca. **217.000 kWh_{th}/a**

Beheizbare Nettogrundfläche: 1.763 m²

→ Spezifischer Wärmebedarf: ca. 123 kWh_{th}/(m²_{NGFE} a) (inklusive Wirtschaft und Wohnung)

Referenzwert (nach VDI 3807:2014 Blatt 2) - BWZ 533000: Sportheime

- Mittelwert: 173 kWh_{th}/(m²_{NGFE} a)
 - Mittelwert = Modalwert; Wert eines Wertekollektivs, der mit der größten Häufigkeit vorkommt
- Richtwert: 47 kWh_{th}/(m²_{NGFE} a)
 - Richtwert = anzustrebender Wert bei der Durchführung von Energieeinsparmaßnahmen

→ Wärmebedarf **im Bestand besser als Mittelwert** vergleichbarer Gebäude, Referenzwert **überschritten**

Strombedarf: ca. **48.500 kWh_{el}/a** (exklusive Wirtschaft und Wohnung)

→ Flächenspezifischer Strombedarf: 27,5 kWh_{el}/(m²_{NGFE} a)

Referenzwert (nach VDI 3807:2014 Blatt 2) - BWZ 533000: Kindertagesstätten

- Mittelwert: 17 kWh_{el}/(m²_{NGFE} a)
- Richtwert: 7 kWh_{el}/(m²_{NGFE} a)

→ Referenz-Mittelwert und Richtwert **überschritten**

2.3.2 Messgeräteinfrastruktur

Abbildung 13 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Medienverteilung im Sportheim Baar-Ebenhausen. Insgesamt existieren drei Wasserzähler, vier Stromzähler, zwei Wärmemengenzähler und zwei Erdgaszähler.

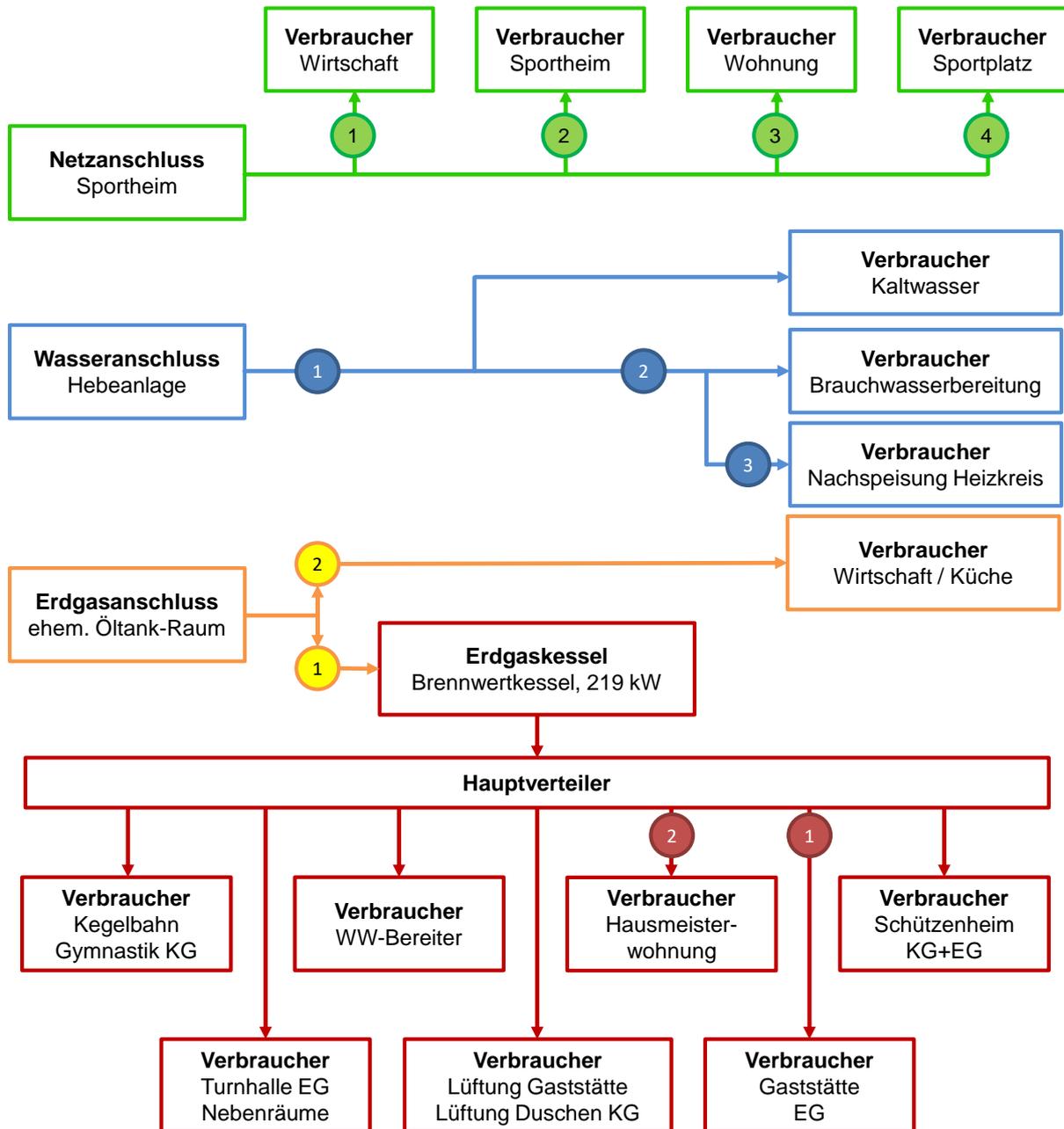


Abbildung 13: Vereinfachte Skizze der Medienverteilung für Strom (grün), Gas (orange), Wärme (rot) und Wasser (blau) sowie Messgeräte (Kreise) im Sportheim Baar-Ebenhausen

Stromzähler

Der gesamte Stromverbrauch des Sportheims entspricht der Summe aus Zähler „2“ und Zähler „4“ („Sportheim“ und „Sportplatz“). Die Stromzähler „Wirtschaft“ und „Wohnung“ erfassen den Verbrauch der jeweils vermieteten Gebäudeteile und zählen damit nicht zum eigentlichen Stromverbrauch des Sportheims. Alle Zähler im Bestand sind klassische Ferrariszähler.

Wasserzähler

Der gesamte Wasserverbrauch des Sportheims (inkl. Wohnung und Wirtschaft) wird über einen Hauptzähler erfasst. Weitere Unterzähler existieren für die Nachspeisung der Heizanlage sowie zur Nachspeisung der Trinkwarmwasserbereitung.

Erdgaszähler

Der Erdgasanschluss des Sportheims befindet sich im ehemaligen Öltank-Raum (gegenüber der Heizzentrale, dort ist auch die Lüftungsanlage untergebracht). Insgesamt sind zwei Erdgaszähler vorhanden, wobei Erdgaszähler „1“ den Verbrauch des Erdgaskessels zu Heizzwecken erfasst und Zähler „2“ den Erdgasverbrauch der Küche in der Wirtschaft aufzeichnet. Der Erdgaszähler des Kessels wurde während der Projektlaufzeit getauscht („Eichtausch“) sowie eine Volumenimpulsschnittstelle bereitgestellt.

Wärmemengenzähler

Zu Abrechnungszwecken waren im Bestand bereits zwei Wärmemengenzähler für die Heizkreise „Wirtschaft“ und „Wohnung“ vorhanden.

3 Softwareabbild der Liegenschaften

Basierend auf den, in der Bestandsaufnahme gesammelten Informationen erfolgt die Abbildung der Liegenschaften in der Software. Dabei handelt es sich um eine datenbankbasierte Software aus dem Bereich des Energiemanagements deren wichtigsten Funktion und Begrifflichkeiten zunächst auszugsweise beschrieben werden und darauf aufbauend näher auf die Abbildung der jeweiligen Liegenschaft und der gewonnenen Erkenntnisse eingegangen wird.

3.1 Funktionen und Begrifflichkeiten der Software

Die Software „Interwatt“ bietet eine datenbankbasierte Auswertung von Energie- bzw. Ressourceneinsätzen in beliebigen Objekten, fokussierend auf Anforderungen mit dem Ursprung aus dem Energiemanagement.

Die Systematik zur Abbildung von Zugehörigkeit, Abhängigkeiten und generellen Informationen eines Messgerätes erfolgt über eine, von der Software fest definierte Hierarchie:

- Ebene 1: Organisationseinheiten
- Ebene 2: Energieliegenschaft
- Ebene 3: Zähler
- Ebene 4: Zählwerke

In Worten: Ein Zähler kann über mehrere Zählwerke verfügen (z.B. zweitarif-Stromzähler), dieser Zähler gehört zu einer Energieliegenschaft (z.B. Grundschule), die wiederum zu einer Organisationseinheit gehört (z.B. Gemeinde Baar-Ebenhausen).

Auf der obersten Ebene der Organisationseinheiten erfolgt die übergeordnete Verwaltung von Grundlegenden Informationen und Parametern, wie beispielsweise

- Personen (d.h. Benutzer der Software) sowie deren Rechte (z.B. Schreibrechte für neue Zählerstände)
- Anlagen von Tarifen und Medien (z.B. Erdgas oder Grünstrom, hinterlegen von CO₂-Äquivalenten, Preisen und sonstigen Informationen)
- Verwaltung von Wetterstationen

Für die einzelnen Energieliegenschaften, die einer Organisationseinheit untergeordnet sind, erfolgt unter anderem

- das Anlegen von „Energiefaktoren“ (z.B. beheizte Fläche, Anzahl der Personen)
- die Definition der Verbrauchszuordnung (z.B. zur Abbildung von Unterzählerstrukturen, und der allgemeinen Verbrauchszuordnung in der Liegenschaft) sowie der Energienutzung

Eine Energieliegenschaft kann aus verschiedenen „Einheiten“ bestehen und in der Software entsprechend abgebildet werden (z.B. besteht die Energieliegenschaft „Grundschule“ aus den Einheiten „Hauptgebäude“, „Neubau“ und „Turnhalle“)

Außerdem können sog. „Zeitabschnitte“ definiert werden: Würde eine Energieliegenschaft oder eine Einheit beispielsweise um einen Anbau im Jahr 2015 erweitert werden, kann dieser Zeitpunkt in der Software eingetragen werden und Berechnungsansätze, Energiefaktoren etc. für bestimmte Zeitbereiche angepasst werden. Damit besteht die Möglichkeit einen „vorher / nachher“ Vergleich gut abbilden zu können.

Auf Ebene 3 werden Messgeräte verwaltet und parametrierbar, wie z.B. ein Stromzähler als Unterzähler mit zwei Tarifen (zwei Zählwerk für HT und NT). Auf Basis dieser Einstellung werden zuletzt auf Ebene 4 die eigentlichen Zählwerke eingerichtet, in denen je nach Konfiguration Zählerstände oder auch absolute Verbräuche jeweils mit Zeitstempel eingetragen und gespeichert werden. Hier werden also die eigentlichen Grundinformationen gespeichert, die über die jeweils übergeordneten Ebenen genutzt und „verarbeitet“ werden.

Daten der Zählwerke können zum einen händisch gepflegt werden, z.B. Eingabe eines Zählerstands über eine separate Handy App durch einen Hausmeister oder Dateiimport größerer Zählerstandlisten, zum anderen aber auch vollautomatisiert über diverse Schnittstellen gespeist werden (z.B. Datenexport seitens Messstellenbetreiber einer registrierenden Leistungsmessung über MSCONS, E-Mail-Versand oder auch Datenlogger mit kompatiblen Schnittstellen).

Neben der Aufgabe der zentralen Datensammlung in der Datenbank bietet die Software eine umfangreiche Auswahl an Analyse- und Auswertewerkzeuge:

- Freie Auswertung von beliebigen Zählern, Energieliegenschaften, ganzen Organisationseinheiten in verschiedenen zeitlichen Auflösungen (z.B. Jahres-, Monats-, Tagesbasiert) in Form von Säulen/Liniendiagrammen sowie überlagerte Darstellungen
- Darstellung von Erzeugung und Verbrauch als Energieflussbild (Sankey-Diagramm)
- Erstellung von Auswerte- / Diagrammvorlagen
- Automatisierte Berichterstellung anhand von parametrierbaren Berichtsvorlagen

Um z.B. den Heizenergieverbrauch von Jahr zu Jahr witterungsbereinigt darzustellen werden Informationen zur Außentemperatur benötigt. Für die Gemeinde Baar-Ebenhausen ist deshalb die Wetterstation „Ingolstadt (Flugplatz)“ des Deutschen Wetterdiensts (DWD) in der Software hinterlegt (mittlere Außentemperatur auf Tagesbasis). Auf dieser Datengrundlage werden Gradtagszahlen automatisiert und witterstationsbezogen berechnet. In der Software können diese Informationen u.a. auch visualisiert werden (vgl. Abbildung 14).

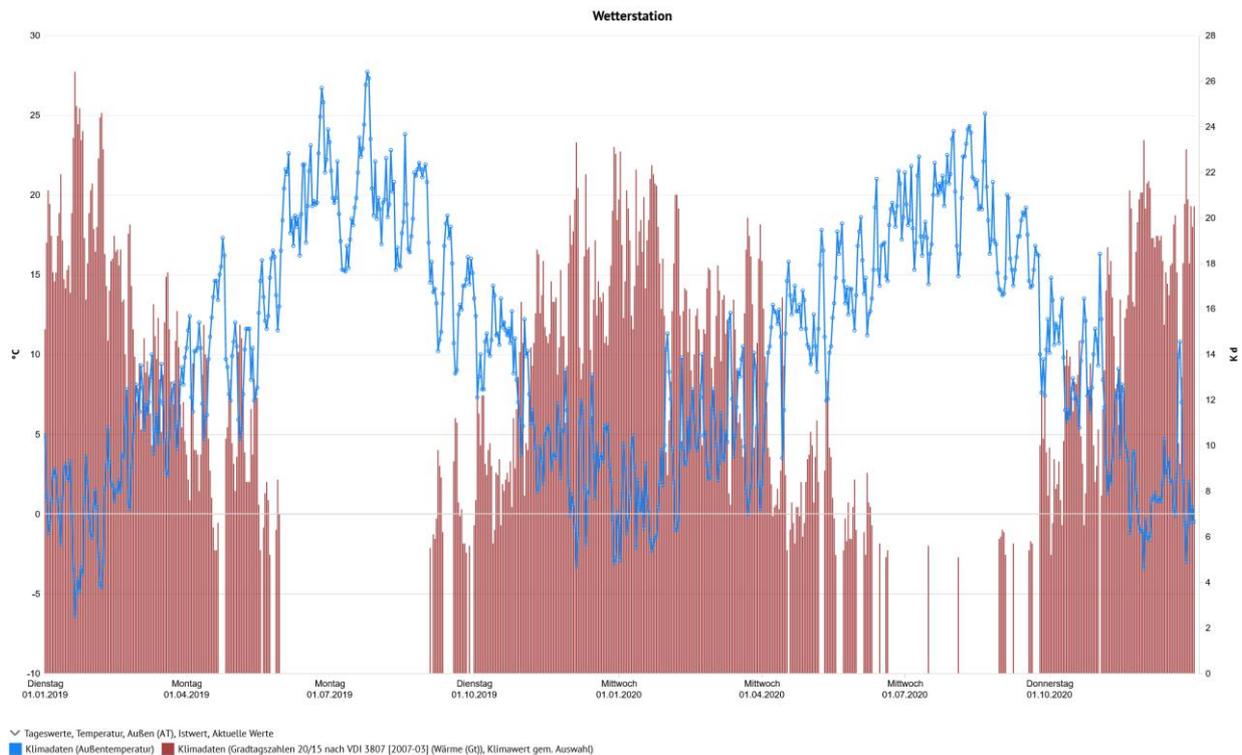


Abbildung 14: Gradtagszahlen und mittlere Außentemperatur als Zeitreihendiagramm basierend auf Klimadaten des Deutschen Wetterdiensts der Wetterstation "Ingolstadt (Flugplatz)"

Personal der Gemeinde Baar-Ebenhausen wurde im Umgang mit der Software entsprechend geschult. Ziel ist es, die Software sowie die Datenbank (Zählerstände ablesen) weiter zu pflegen, um davon auch in Zukunft profitieren zu können.

3.2 Softwareabbild Grundschule

Da über die Heizzentrale der Grundschule auch ein Nahwärmenetz mit Wärme gespeist wird, ist die Energieliegenschaft „Grundschule + Nahwärmenetz“ angelegt worden, die aus den Einheiten „Grundschule“ und „Nahwärmenetz“ besteht (vgl. Abbildung 15).

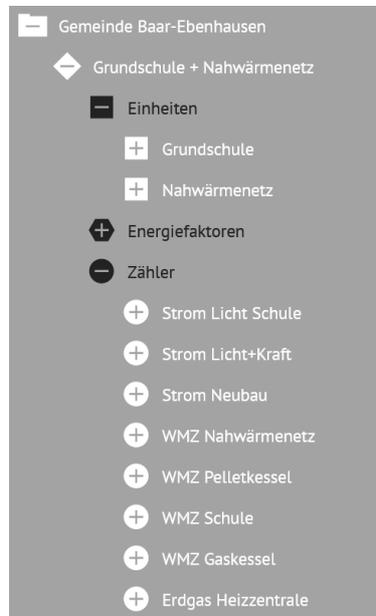


Abbildung 15: Softwareabbild der Grundschule als Einheit der Energieliegenschaft "Grundschule + Nahwärmenetz"

Beide Einheiten könnten in weitere Einheiten untergliedert werden (z.B: Einheit „Grundschule“ mit Sub-Einheiten „Hauptgebäude“, „Neubau“ und „Turnhalle“), dies wurde aber im Rahmen dieses Projekts ausgeklammert (hierzu wären idealerweise eigene Wärmemengenzähler für die jeweiligen Sub-Einheiten denkbar, die Wärmeverteilung kann in der Software auch anteilig, beispielsweise anhand der jeweiligen Grundfläche der Sub-Einheiten erfolgen).

Abbildung 15 zeigt außerdem die getroffene Auswahl relevanter Messgeräte. Insgesamt wurden drei Stromzähler, vier Wärmemengenzähler sowie ein Erdgaszähler aufgenommen. Die Zuweisung der Zähler erfolgt softwareseitig in der sog. „Verbrauchszuweisung“. Für die Einheit „Nahwärmenetz“ gestaltet sich diese Verbrauchszuordnung vergleichsweise einfach, da hierfür lediglich der Wärmemengenzähler „WMZ Nahwärmenetz“ zugewiesen wurde. Prinzipiell könnte dieser Sub-Einheit auch ein Stromverbrauch zugewiesen werden (z.B. Strom für Umwälzpumpen des Nahwärmenetzes).

Die Zuweisung der vorhandenen Zähler in der „Verbrauchszuweisung“ erfolgt in Form einer Matrix (vgl. Abbildung 16). In den Zeilen der Matrix können Zähler den jeweiligen Energieeinsatzbereichen („Wärme (Gt)“ und „Strom“ in Abbildung 16) zugefügt werden. In den Spalten der Matrix sind die angelegten Einheiten („Grundschule“ = BE_GS, „Nahwärmenetz“ = BE_NWN) bzw. die übergeordnete Energieliegenschaft („Grundschule + Nahwärmenetz“ = BE_GSNW) eingetragen. Über die Vergabe von Faktoren können Zähler der jeweiligen Einheit oder Energieliegenschaft zugewiesen werden.

Für die Grundschule (BE_GS) entspricht die Matrix:

- Wärmeverbrauch = 1 * WMZ Schule (+ 0 * WMZ Nahwärmenetz)
- Stromverbrauch = 1 * Strom Licht Schule + 1 * Strom Licht+Kraft + 1 * Strom Neubau

Die Spalte „Summe“ dient zur Validierung der eingetragenen Faktoren. Außerdem entspricht der summierte Verbrauch der einzelnen Einheiten (BE_GS und BE_NWN) dem gesamtverbrauch der Energieliegenschaft (BE_GSNW).

▼ Wärme (Gt): 2/8

	BE_GSNW	BE_GS	BE_NWN	SUMME
WMZ Nahwärmenetz			1,000	1,000 ✓
WMZ Schule		1,000		1,000 ✓

▼ Strom: 3/8

	BE_GSNW	BE_GS	BE_NWN	SUMME
Strom Licht Schule		1,000		1,000 ✓
Strom Licht+Kraft		1,000		1,000 ✓
Strom Neubau		1,000		1,000 ✓

Abbildung 16: Softwareabbild "Grundschule + Nahwärmenetz" (BE_GSNW), Verbrauchszuordnung (Einsatzbereich) von Zählern erfassten Energiemengen zu den Einheiten „Grundschule“ (BE_GS) und „Nahwärmenetz“ (BE_NWN) mittels Matrix.

Die Wärmemengenzähler des Pellet- und Gaskessels sind im Energieeinsatzbereich „Wärme-Erzeugung“ hinterlegt worden und werden ausschließlich der Energieliegenschaft zugewiesen.

▼ Wärme-Erzeugung: 2/8

	BE_GSNW	SUMME
WMZ Pelletkessel	1,000	1,000 
WMZ Gaskessel	1,000	1,000 

Abbildung 17: Softwareabbild "Grundschule + Nahwärmenetz" (BE_GSNW), Verbrauchszuordnung für den Energieeinsatzbereich „Wärme-Erzeugung“.

Für eine erste Übersicht der Energieströme ermöglicht die Software eine Darstellung als parametrierbares Sankey-Diagramm (vgl. Abbildung 18). So können Energieflüsse in unterschiedlichen Zeitbezügen (z.B. Jahr, Monat, Tag) für die Energieliegenschaft in Summe oder auch deren einzelne Einheiten dargestellt werden.

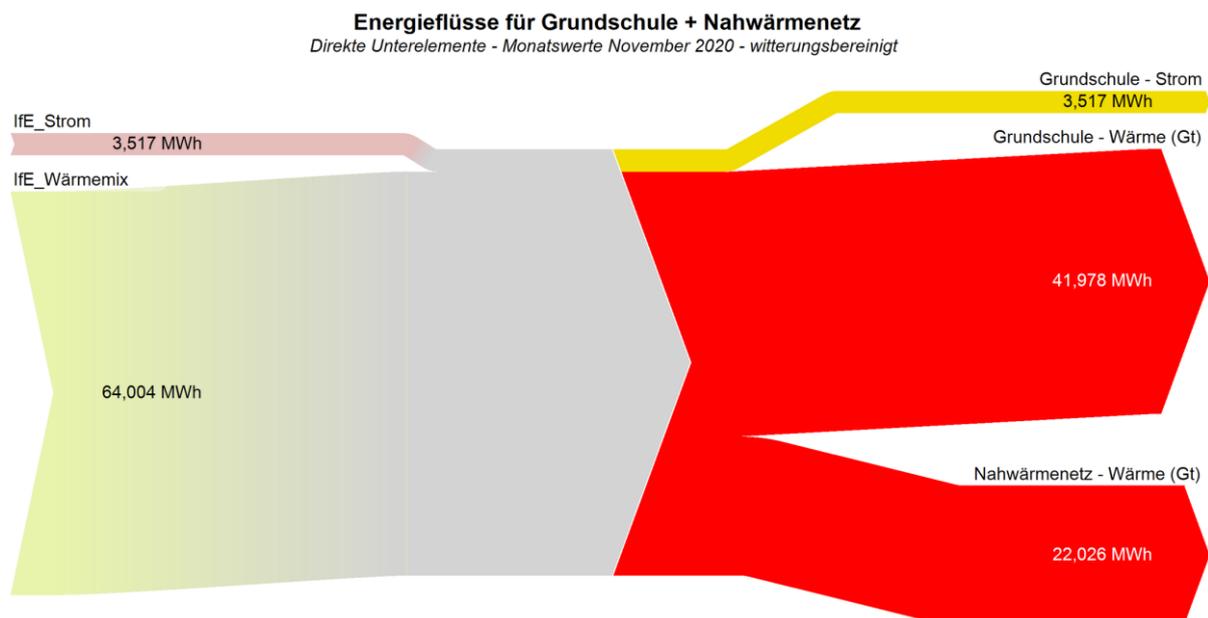


Abbildung 18: Sankey-Diagramm (Energieflussdiagramm) für die Energieliegenschaft "Grundschule + Nahwärmenetz", exemplarisch für November 2020

Aus Abbildung 18 geht hervor, dass vom verbrauchten Wärmemix mit ca. 64 MWh (bestehend aus Wärme des Pelletkessels und Wärme des Gaskessels) im November 2020 mit rund 42 MWh ein Großteil der Wärme von der Grundschule verbraucht wurde. Nur etwa 34 % des gesamten Wärmeverbrauchs (ca. 22 MWh) wurden in das Nahwärmenetz gespeist.

Weiter ermöglicht die Software das Anlegen von individuellen Auswertungen, die auch als Vorlage gespeichert und z.B. über verschiedene Zeitbereiche fortlaufend analysiert werden können. So wurde unter anderem der Wärmemix der Heizzentrale in Form eines Balkendiagramms, überlagert mit einem Liniendiagramm (Anteil Pelletkessel am Wärmemix) in Abbildung 19 visualisiert.

Die vorhandene Datengrundlage (Zählerstände) ist über den Zeitbereich hinweg dargestellt. Im März 2020 wurden beispielsweise insgesamt rund 55.000 kWh Wärme bereitgestellt, wobei davon nur rund 2.800 kWh auf den Erdgaskessel zurückzuführen sind. Damit sind ca. 95 % der Wärmebereitstellung auf den Pelletkessel zurückzuführen. Dieser Anteil ist im Diagramm als überlagertes Liniendiagramm abgebildet und gilt als wichtiger Indikator für die Verfügbarkeit und Performanz des Pelletkessels. Aufgrund von ökologischen Gesichtspunkten (CO₂-Bilanz Pellets Vs. Erdgas) und auch aus wirtschaftlicher Sichtweise muss es die Zielsetzung sein, den Anteil des Pelletkessels am Wärmemix zu maximieren und damit den Erdgaskessel nur als Spitzenlastkessel zu betreiben.

Insbesondere in den Sommermonaten geht dieser Anteil auf ca. 55 bis 60 % zurück, was vermutlich bedingt durch verbraucherseitig geringe Heizlasten und damit einer diskontinuierlichen Betriebsweise des Pelletkessels ist. Auffällig ist außerdem ein drastischer Einbruch des Pelletkessels am Wärmemix im Dezember 2020 auf unter 50 %.

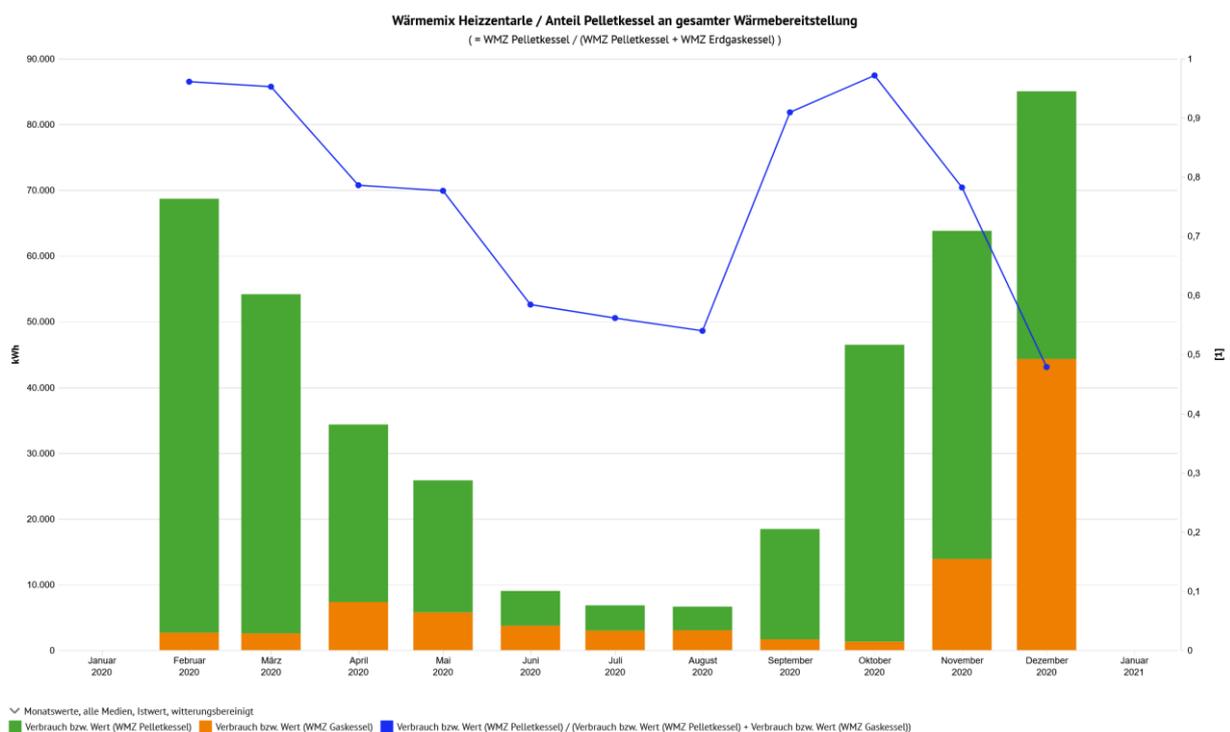


Abbildung 19: Auswertevorlage "Wärmemix Heizzentrale" für die Energieliegenschaft "Grundschule + Nahwärmenetz", Darstellung der bereitgestellten Wärme in kWh des Pellet- (grün) bzw. Erdgaskessels (orange) als gestapelte Säulen und Anteil des Pelletkessels an der gesamten Wärmebereitstellung als Linie (blau).

Der Zeitbereich kann (bei entsprechender Datengrundlage) auch in höherer Auflösung mit der gleichen Auswertevorlage erfolgen. Dies wurde entsprechend für den Zeitbereich 01.11.2020 bis 01.01.2021 auf Tagesbasis durchgeführt. In diesem Diagramm sind zusätzlich sog. „Kalenderereignisse“ als graue Bereiche dargestellt, die z.B. Feiertage (Weihnachten) und auch Wochenenden kennzeichnen.

Im dargestellten Zeitbereich wurde bis 09.11.20 zunächst ausschließlich der Pelletkessel betrieben bzw. konnte dieser den Wärmebedarf der Verbraucher zu 100 % decken. Bis zum 27.11.20 kam zusätzlich der Erdgaskessel zum Einsatz, woraufhin der Wärmeanteil des Pelletkessels am Gesamtwärmemix auf ca. 65 bis 70 % reduziert wurde. Am Sonntag, den 29.11.20 konnte dagegen wiederum der gesamte Wärmebedarf über den Pelletkessel gedeckt werden. Von Samstag 12.12.20 bis Mittwoch 16.12.20 wurde keine Wärme vom Pelletkessel bereitgestellt - hier lag vermutlich ein Defekt der Anlage vor. Sämtliche Wärme wurde in dieser Zeit über den Erdgaskessel bereitgestellt. Nachdem der Kessel am 16.12.20 wieder in Betrieb genommen wurde, zeigt sich ein übermäßiger Anteil des Erdgaskessels an der gesamten Wärmebereitstellung, obwohl die Heizlast insbesondere zum Jahresende hin reduziert war.

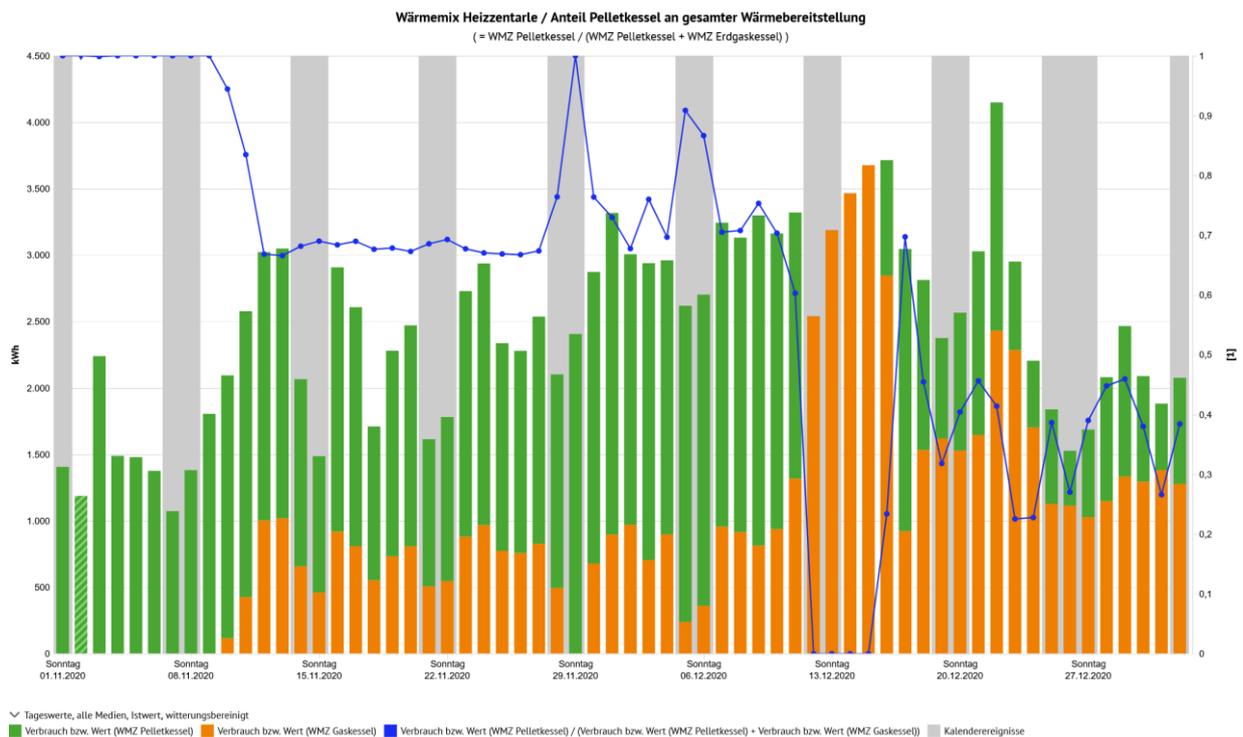


Abbildung 20: Auswertevorlage "Wärmemix Heizzentrale" für die Energieliegenschaft "Grundschule + Nahwärmenetz", Zeitbereich 01.11.20 bis 01.01.21 in Tagesauflösung.

Analog zur Wärmebereitstellung ist eine Auswertevorlage zur Analyse des Wärmebedarfs, d.h. der Wärmeverbraucher „Grundschule“ und „Nahwärmenetz“ angelegt worden (vgl. Abbildung 21).

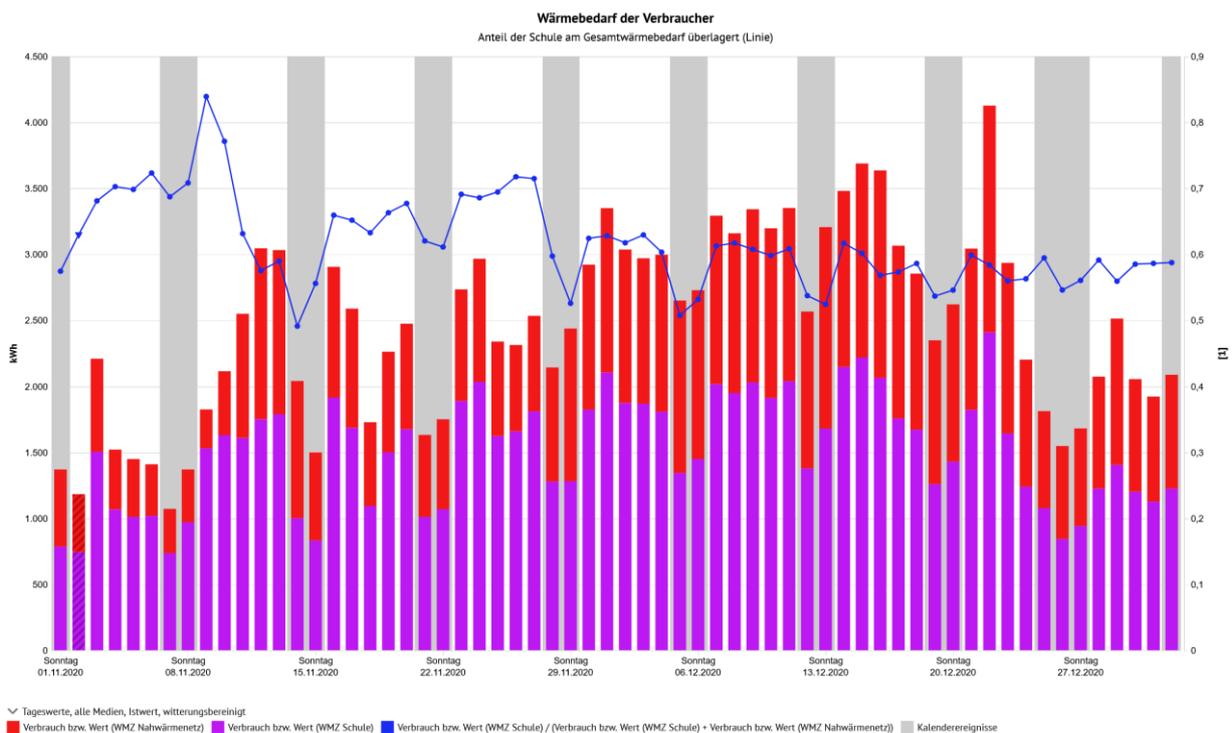
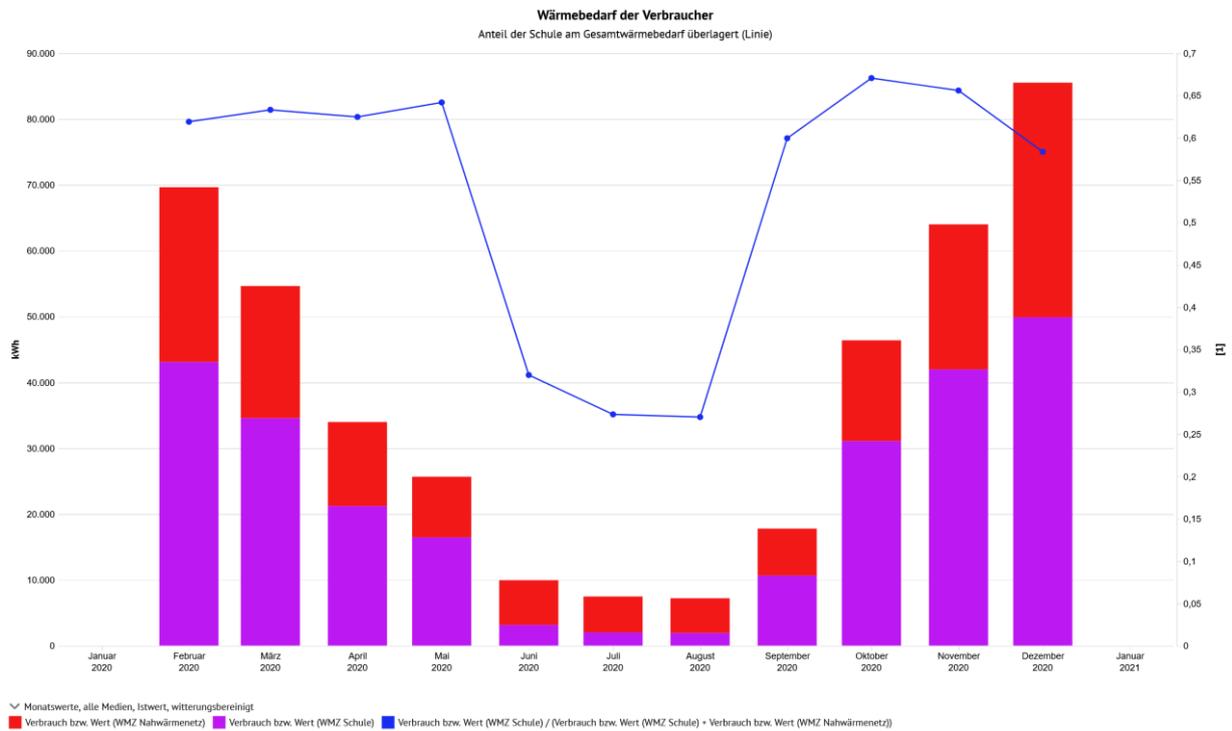


Abbildung 21: Auswertevorlage "Wärmebedarf der Verbraucher" für die Energieliegenschaft "Grundschule + Nahwärmenetz", Darstellung des absoluten Wärmebedarfs in kWh der Grundschule (violett) und Nahwärmenetz (rot) als gestapelte Säulen und Anteil des Grundschule am gesamten Wärmebedarf als überlagerte Linie (blau). oben: Zeitbasis Monat, unten: Zeitbasis: Tag (01.11.20 bis 01.01.21)

Neben dem absoluten Wärmebedarf als gestapelte Säulen ist der Anteil der Schule am Gesamtwärmebedarf als Liniendiagramm überlagert in Abbildung 21 dargestellt.

In der monatsbasierten Übersichtsdarstellung (vgl. Abbildung 21 oben) ist der Wärmebedarf über das Jahr hinweg ersichtlich - erhöhter Wärmebedarf im Winter und Übergangsjahreszeiten, geringer Wärmebedarf im Sommer. Dabei überwiegt im Winter und in den Übergangsjahreszeiten der Wärmebedarf der Schule mit ca. 60 bis 65 % vom Gesamtwärmebedarf den Wärmebedarf des Nahwärmenetzes. Letzter übertrifft in den Sommermonaten den Wärmebedarf der Schule (eventuell auf Wärmeverluste des Netzes zurückzuführen) - hier sind lediglich ca. 25 bis 30 % des Gesamtwärmebedarfs auf die Schule zurückzuführen (vermutlich Trinkwarmwasserbereitung).

Aus der tagesbasierten Detailansicht geht hervor, dass die Schule an Wochenenden wärmeseitig „heruntergefahren“ wird und deshalb der tägliche Wärmebedarf gegenüber Wochentagen reduziert ist. Gleiches gilt für Ferienzeiten. Der Wärmebedarf des Nahwärmenetzes hingegen ist vor allem im Dezember unabhängig der Tagesart vergleichsweise konstant. Dennoch überwiegt - wenn auch nur um wenige Prozentpunkte - der Wärmebedarf der Schule den Wärmebedarf des Nahwärmenetzes. Anhand der Zeitreihen ist auch eine Zunahme des Wärmebedarfs seitens Nahwärmenetz zu erkennen. Am 22.12.20 wurde im Vergleich zu den anderen Tagen im dargestellten Betrachtungszeitraum der höchste tägliche Wärmebedarf registriert.

Eine weitere Detailstufe bei der Betrachtung des Wärmebedarfs bzw. der Heizlast ist in Abbildung 22 dargestellt. Der Wärmebedarf der Grundschule sowie des Nahwärmenetzes sind als Zeitreihen (ohne „Stapelung“) über den Zeitbereich vom 15.12.20 bis 01.01.21 in Stundenauflösung aufgetragen. Die Angabe in kWh (Wärmebedarf) entspricht bei der gewählten zeitlichen Auflösung von einer Stunde gleichzeitig der mittleren Heizlast. Hier wird nochmals deutlich, dass die Heizlast am Wochenende und an Feiertagen in der Grundschule stark reduziert ist (Absenkung der Heizung, Kalenderprogramm der Heizungssteuerung). Weiterhin ist auch der Eingriff der Nachtabenkung zu erkennen (reduzierte Heizlast ab ca. 19 Uhr). Abhängig von der Außentemperatur (und natürlich der vorgegeben Mindesttemperatur bzw. Thermostatstellung der Heizkörper im Gebäude) kommt es auch nachts und in den frühen Morgenstunden zum erneuten Aufheizen des Gebäudes. Eventuell könnte hier noch Optimierungspotenzial liegen.

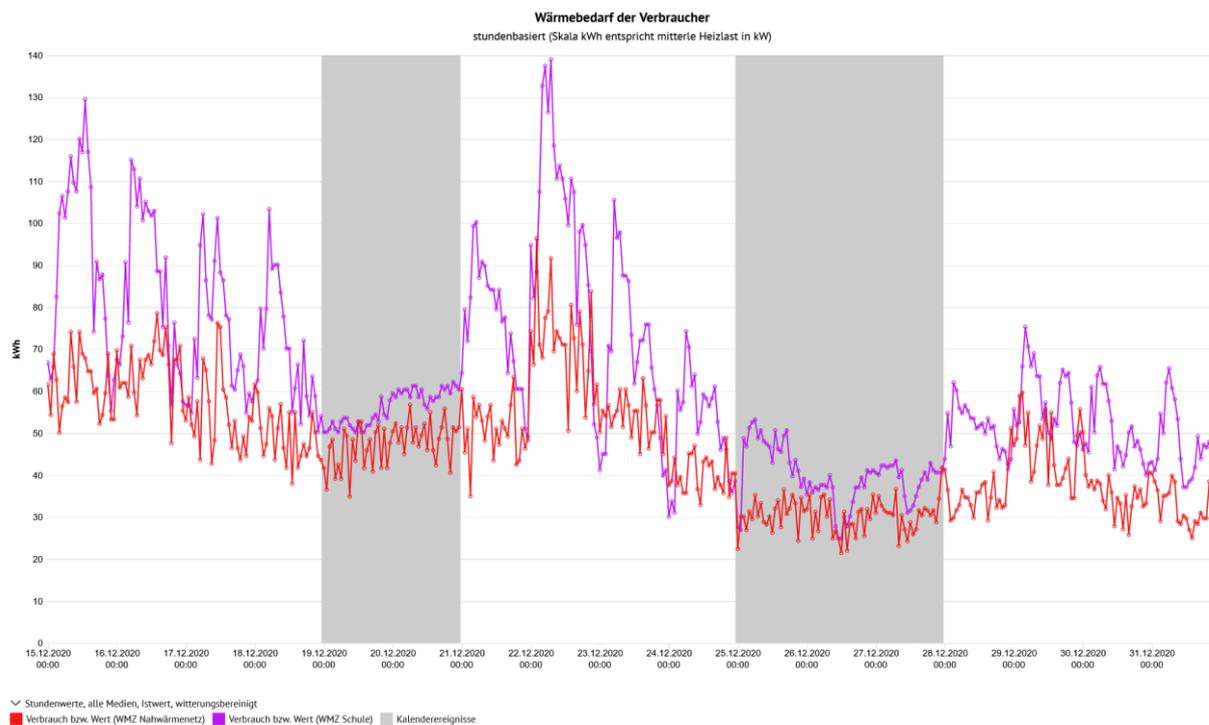


Abbildung 22: stundenbasierter Wärmebedarf in der Grundschule (violett) sowie des Nahwärmenetzes (rot) vom 15.12.20 bis 01.01.21, keine Stapelung der Zeitreihen

Die Heizlast des Nahwärmenetzes (hervorgerufen durch die angebotenen Verbraucher) verhält sich im Gegensatz zur Schule hinsichtlich Lastspitzen weniger ausgeprägt. Lediglich am 22. und 23.12.20 ist ein Anstieg der Heizlast zu erkennen.

Abseits des Wärmebedarfs ist ein wesentlicher Energiebedarf elektrischer Energie in der Grundschule vorhanden. Analog zur Wärmebereitstellung wurden auch für Strom entsprechende Auswertevorlagen entwickelt und darauf basierend näher untersucht.

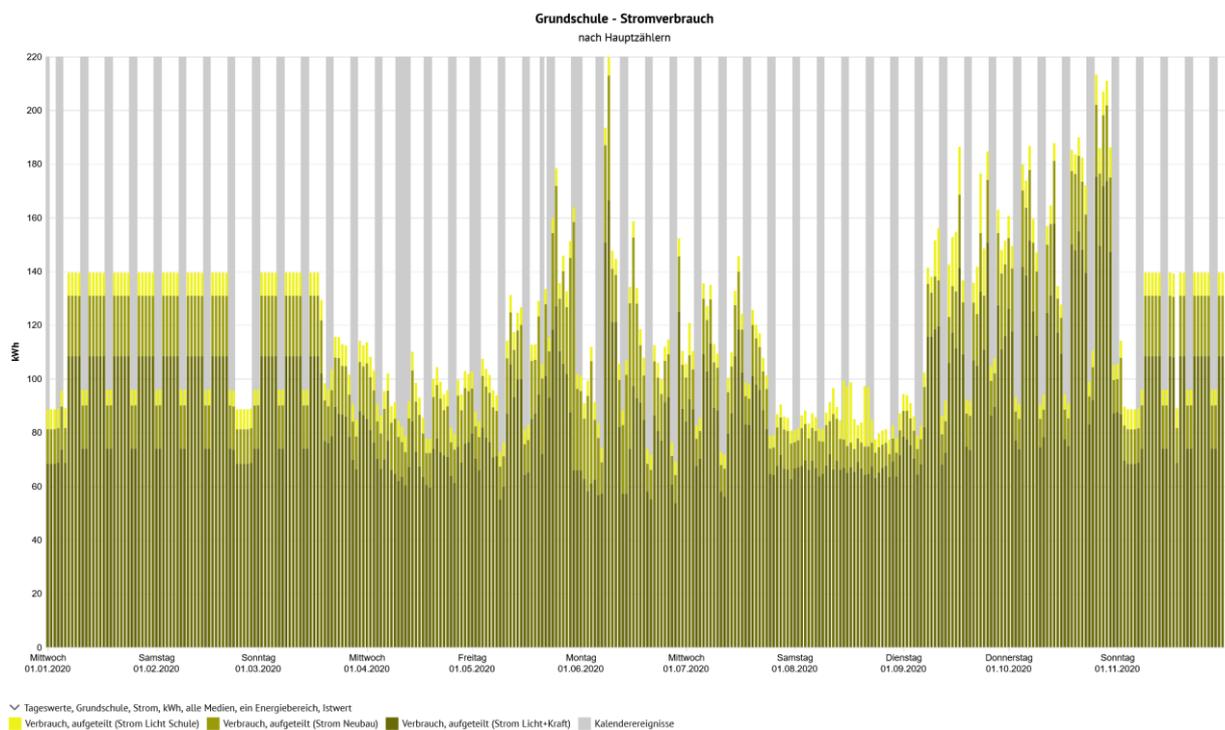
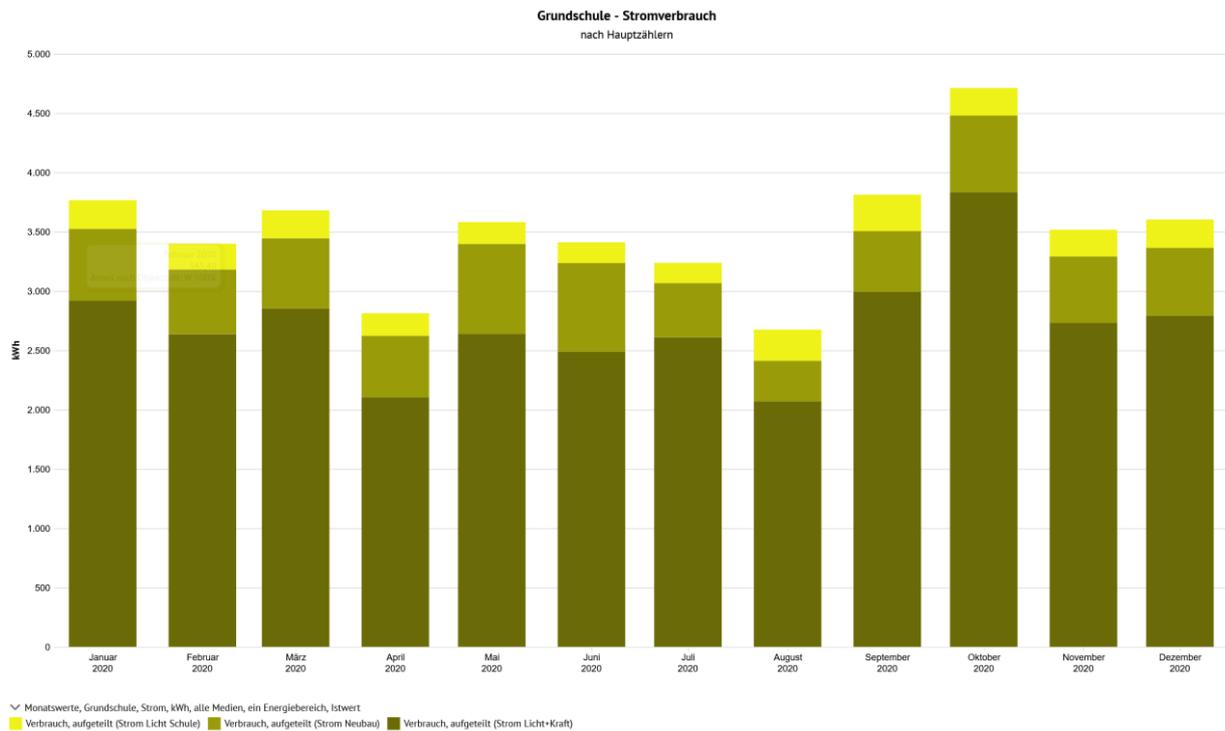


Abbildung 23: Auswertevorlage "Grundschule - Stromverbrauch" für die Einheit „Grundschule“, Gesamtstromverbrauch entspricht der Summe der Hauptzähler „Licht Schule“, „Neubau“ und „Licht+Kraft“, Darstellung auf Monatsbasis (oben) und tagesbasiert (unten).

Abbildung 23 zeigt den elektrischen Energiebedarf auf Monatsbasis (oben) sowie tagesbasiert (unten, grau hinterlegt: Wochenenden und Feiertage). Im Rahmen des Projekts wurden die Stromzähler über längere Zeiträume hinweg digital erfasst. Basierend auf den Messwerten wurden Zeitreihen außerhalb des Messzeitraums anhand einer Kategorisierung (Saison und Tagesart (Wochentag, Ferien, Wochenende)) abgeleitet, normiert und anhand Langzeit-Verbrauchsdaten entsprechend skaliert. Dieses Vorgehen ist beispielsweise von 01.01.2020 bis ca. 15.03.20 im Datensatz ersichtlich.

Mit Aufsummierung der Verbrauchsinformationen der einzelnen Stromzähler und Sortierung der Werte kann mit der Software die sog. Jahresdauerlinie dargestellt werden (vgl. Abbildung 24). Eine daraus erhaltene Information betrifft die Grundlast der Liegenschaft - also jene elektrische Last die ganzjährig (8760 h/a) vorliegt. Diese beträgt ca. 2,5 kW, was einem Jahresstrombedarf von 21.900 kWh alleine zur Deckung der Grundlast entspricht. Grundlastverbraucher (z.B. Stand-By von Kopiergeräten oder EDV im Allgemeinen) gilt es auf das absolut benötigte Minimum zu reduzieren. Mit vergleichsweise einfachen Mitteln (z.B. Zwischenstecker mit Schalter) und entsprechend sensibilisierten Personal können so bereits große Einsparungen erreicht werden.

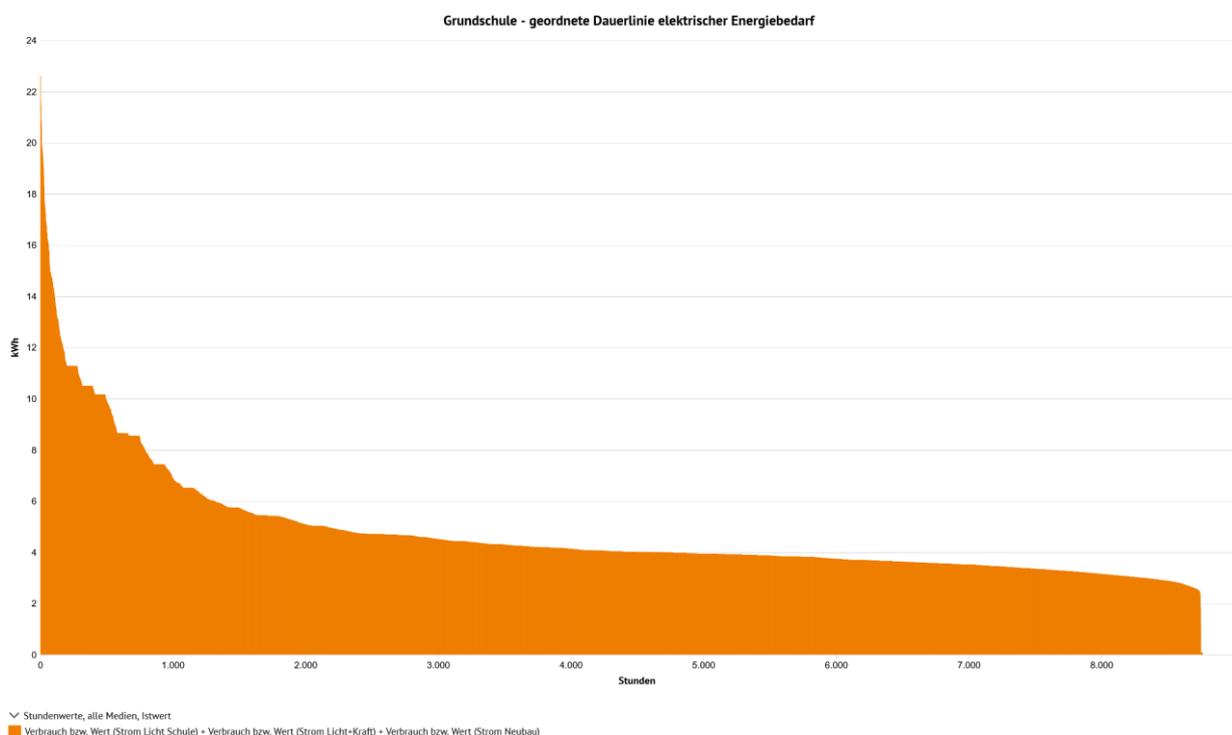


Abbildung 24: Jahresdauerlinie elektrischer Energiebedarf (gesamt) der Grundschule, stundenbasiert (Energiebedarf in kWh entspricht damit mittlerer elektrischer Last in kW)

3.3 Softwareabbild Kindertagesstätte Regenbogen

Die Kindertagesstätte ist als Energieliegenschaft mit den Einheiten „Kindergarten“ und „Kinderkrippe“ in der Software abgebildet worden (siehe Abbildung 25).

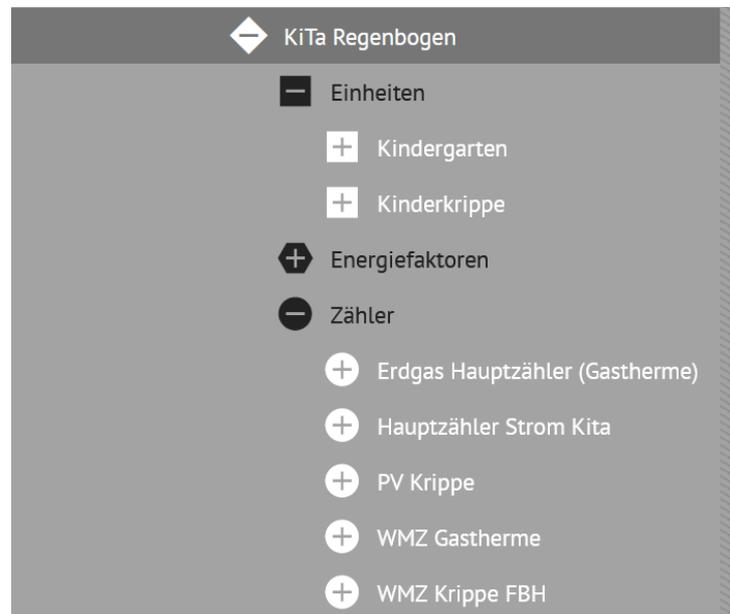


Abbildung 25: Softwareabbild der Kindertagesstätte Regenbogen als Energieliegenschaft mit den Einheiten „Kindergarten“ und „Kinderkrippe“

Für die Energieliegenschaften wurden der Erdgaszähler, zwei Stromzähler sowie zwei Wärmemengenzähler als Datengrundlage hinterlegt. Ebenso wurde für die beiden Einheiten jeweils die beheizbare Nettogrundfläche hinterlegt (Kindergarten: 964 m², Kinderkrippe: 289 m²).

Zähler werden in der Matrix der Verbrauchszuordnung den jeweiligen Einheiten bzw. der gesamten Energieliegenschaft zugewiesen (vgl. Abbildung 26).

▼ Wärme (Gt): 2/5

	BE_KITA	KIGA	KIKR	SUMME
WMZ Gastherme		1,000		1,000 
WMZ Krippe FBH		-1,000	1,000	0,000 

▼ Strom: 1/5

	BE_KITA	KIGA	KIKR	SUMME
Hauptzähler Strom Kita	1,000			1,000 

Abbildung 26: Softwareabbild "Kita Regenbogen" Verbrauchszuordnung (Einsatzbereich)

Über die Verbrauchszuordnung ist z.B. auch die Wärmemengenzähler Hierarchie abgebildet. „WMZ Krippe FBH“ ist ein Unterzähler von „WMZ Gastherme“. Sämtlicher Verbrauch der über „WMZ Krippe FBH“ erfasst wird ist der Kinderkrippe zugewiesen. Der Wärmebedarf des Kindergartens entspricht der Differenz aus der erfassten Wärmemenge von „WMZ Gastherme“ (= gesamter Wärmebedarf der Kindertagesstätte) und der Wärmemenge von „WMZ Krippe FBH“. Diese Bilanzierung ist über die Faktoren „1,000“ und „-1,000“ definiert. Anmerkung: Der Stromzähler der PV-Anlage ist dem Erzeugungsbereich zugewiesen (nicht dargestellt).

Die Software bietet einen Abgleich von spezifischen Verbrauchskennwerten wie z.B. dem spezifischen Wärmebedarf pro Quadratmeter beheizter Nettogrundfläche und Jahr. Die Vergleichskennwerte sind in einer Datenbank hinterlegt und werden softwareintern unter dem Begriff „Klassifikationssystem“ geführt. Ein solches Klassifikationssystem liegt auch in Anlehnung an die VDI 3807 vor.

Der für Kindertagesstätten hinterlegte Verbrauchskennwert im Klassifikationssystem der Software beträgt $110 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (vgl. Abbildung 27, Linie in pink). Nach VDI 3807:2014 (Details siehe Abschnitt 2.2.1) beträgt der „Mittelwert“ $134 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ und der „Referenzwert“ $87 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Das arithmetische Mittel dieser Werte entspricht $110,5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, was dem in der Software hinterlegten Kennwert entspricht.

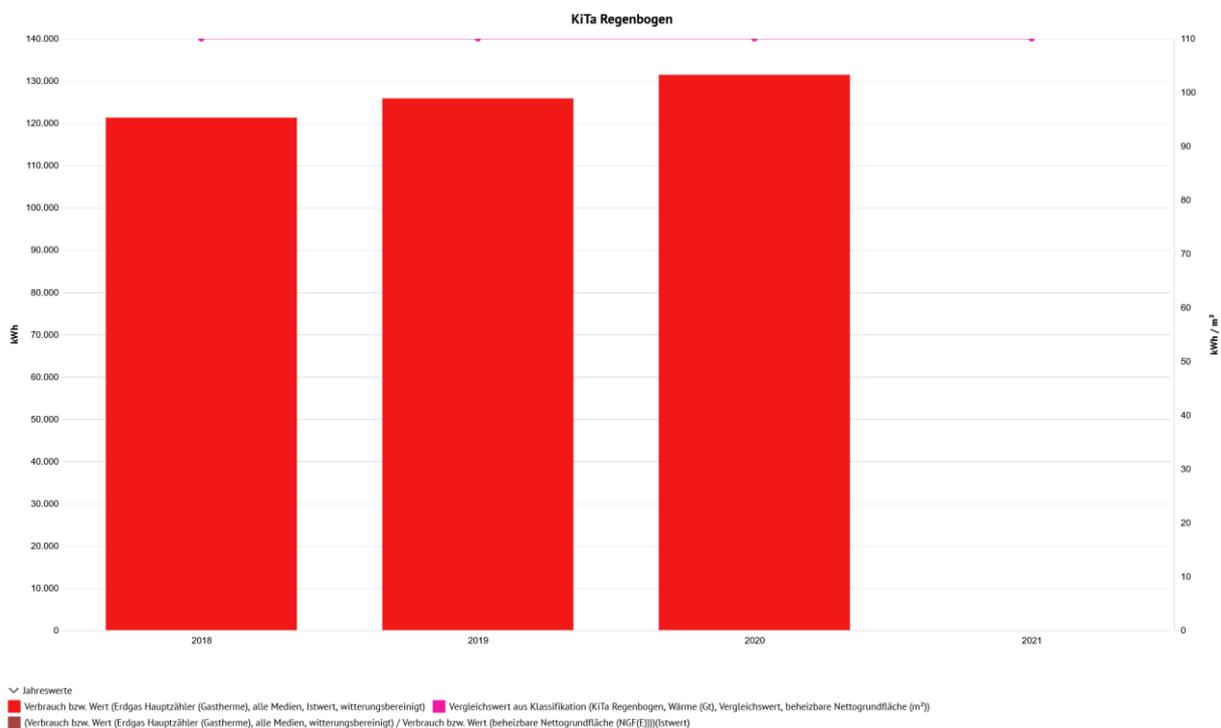


Abbildung 27: Auswertevorlage zum spezifischen Wärmebedarf der Kindertagesstätte

Der spezifische Wärmebedarf der Kindertagesstätte (also Kindergarten und Kinderkrippe in Summe) liegt unter dem Referenzwert, weshalb von einem insgesamt guten energetischen Zustand der Gebäude ausgegangen wird.

Im Rahmen des Projekts wurde der neue Wärmemengenzähler der Gastherme über einen längeren Zeitraum in hoher zeitlicher Auflösung erfasst und die entsprechenden Messwerte in die Software bzw. deren Datenbank importiert. In der Software können auch vergleichsweise komplexe Darstellungen implementiert werden (siehe beispielsweise Tagesdiagramm, 15-Minutenbasiert in Abbildung 28).

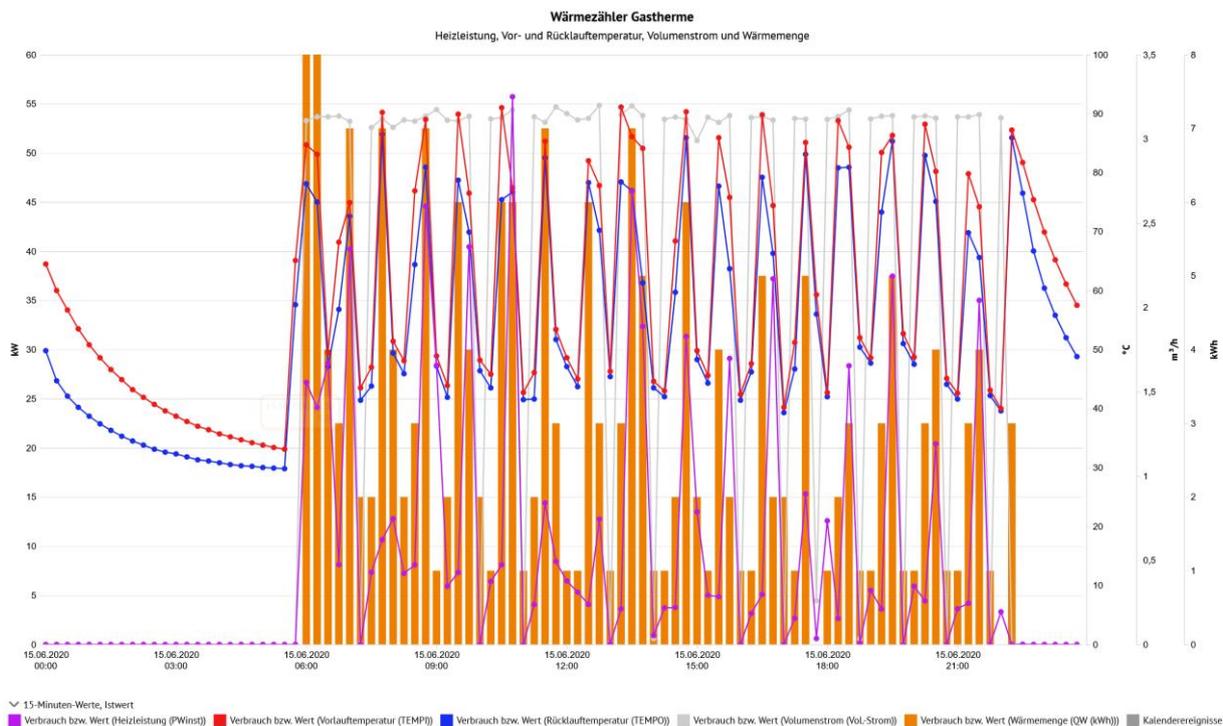


Abbildung 28: Auswertevorlage Wärmemengenzähler Gastherme, Detailbetrachtung in 15-Minuten-Auflösung der Vor- und Rücklauftemperatur (rot und blau), Heizleistung (violett), Volumenstrom (grau) und Wärmemenge (Säulen, orange), Datenauszug: 15.06.20

Da im Heizsystem kein Pufferspeicher für die Wärmeerzeugung vorhanden ist, reagiert die Gastherme entsprechend direkt auf den akuten Wärmebedarf bzw. Heizlast der angebotenen Heizkreise. Bis etwa 6 Uhr morgens greift die Nachtabenkung bzw. der generelle Absenkbetrieb der Verbraucherseite, weshalb die Gastherme in dieser Zeit nicht in Betrieb geht.

Von etwa 6 bis 7:30 besteht erhöhter Wärmebedarf, da das Gebäude wieder aus dem Absenkbetrieb in den „Normalbetrieb“ übergeht. Es gilt zu beachten, dass es sich um einen Datenauszug für den 15.06.2020 handelt - tendenziell sollte Mitte Juni nur ein reduzierter Wärmebedarf bestehen, nämlich zur Trinkwarmwasserbereitung. Dennoch kann es sein, dass die Fußbodenheizung weiterhin in Betrieb ist, um kühle Fußbodentemperaturen zu vermeiden und so für die Kinder ein angemessenes Raumklima zu schaffen.

3.4 Softwareabbild Sportheim

Im Gegensatz zur Kita oder Grundschule ist das Sportheim zunächst nicht in einzelne Einheiten unterteilt worden (vgl. Abbildung 29). Die in der Software abgebildeten Zähler (zwei Stromzähler und Erdgaszähler des Kessels) sind in der Verbrauchsmatrix entsprechend der Energieliegenschaft im vollen Umfang zugeordnet.

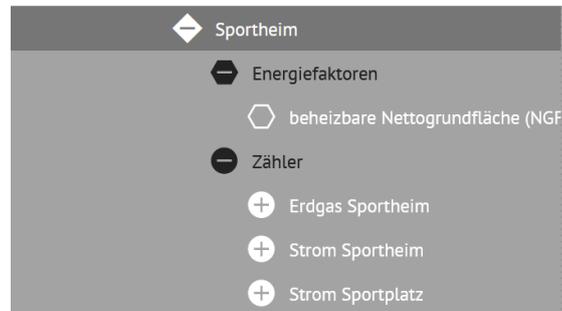


Abbildung 29: Softwareabbild des Sportheims als Energieliegenschaft

Eine erste Übersicht kann wiederum anhand des Energieflussdiagrammes in Abbildung 30 visualisiert werden.

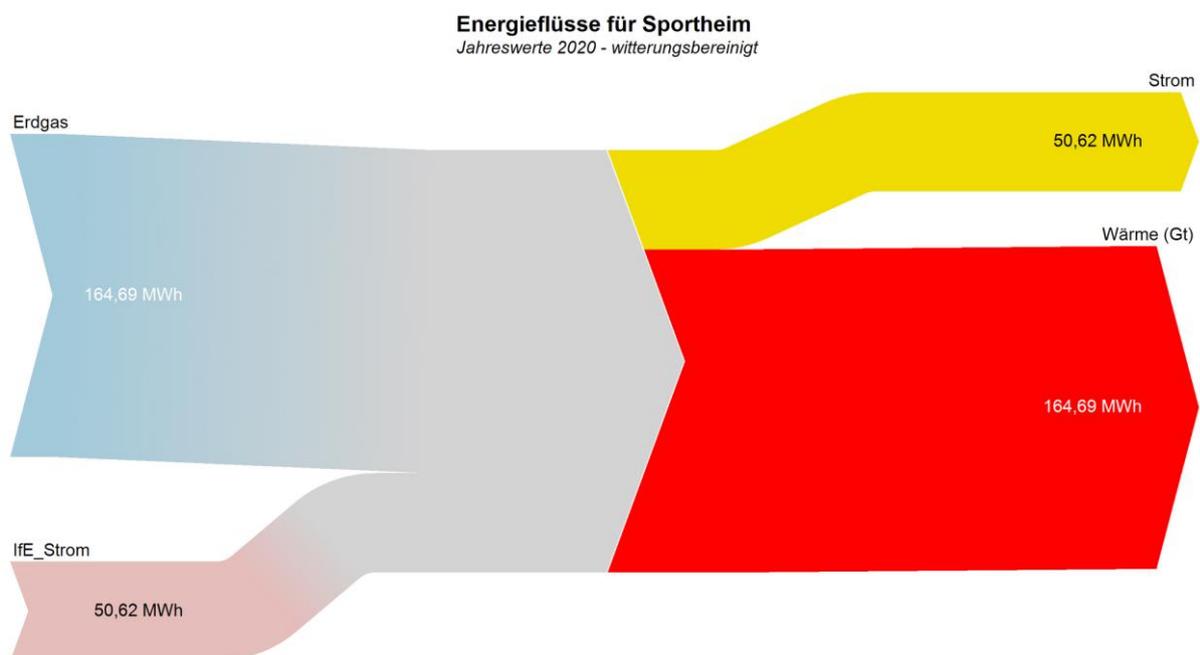


Abbildung 30: Sankey-Diagramm für das Jahr 2020 des Sportheims Baar-Ebenhausen (Jahresbilanz)

Weitere Auswertungen sind durchgeführt worden (vgl. Abbildung 31). An dieser Stelle ist anzumerken, dass der Erdgasverbrauch über die Software einer Witterungsbereinigung (Gradtagszahlen) unterzogen wurde. Der teils nur in größeren Zeitabständen vorhandene Erdgasverbrauch (abgelesene Zählerstände) wird anhand der Gradtagszahlen tagesweise skaliert. Der Realverbrauch kann sich hiervon wesentlich unterscheiden.

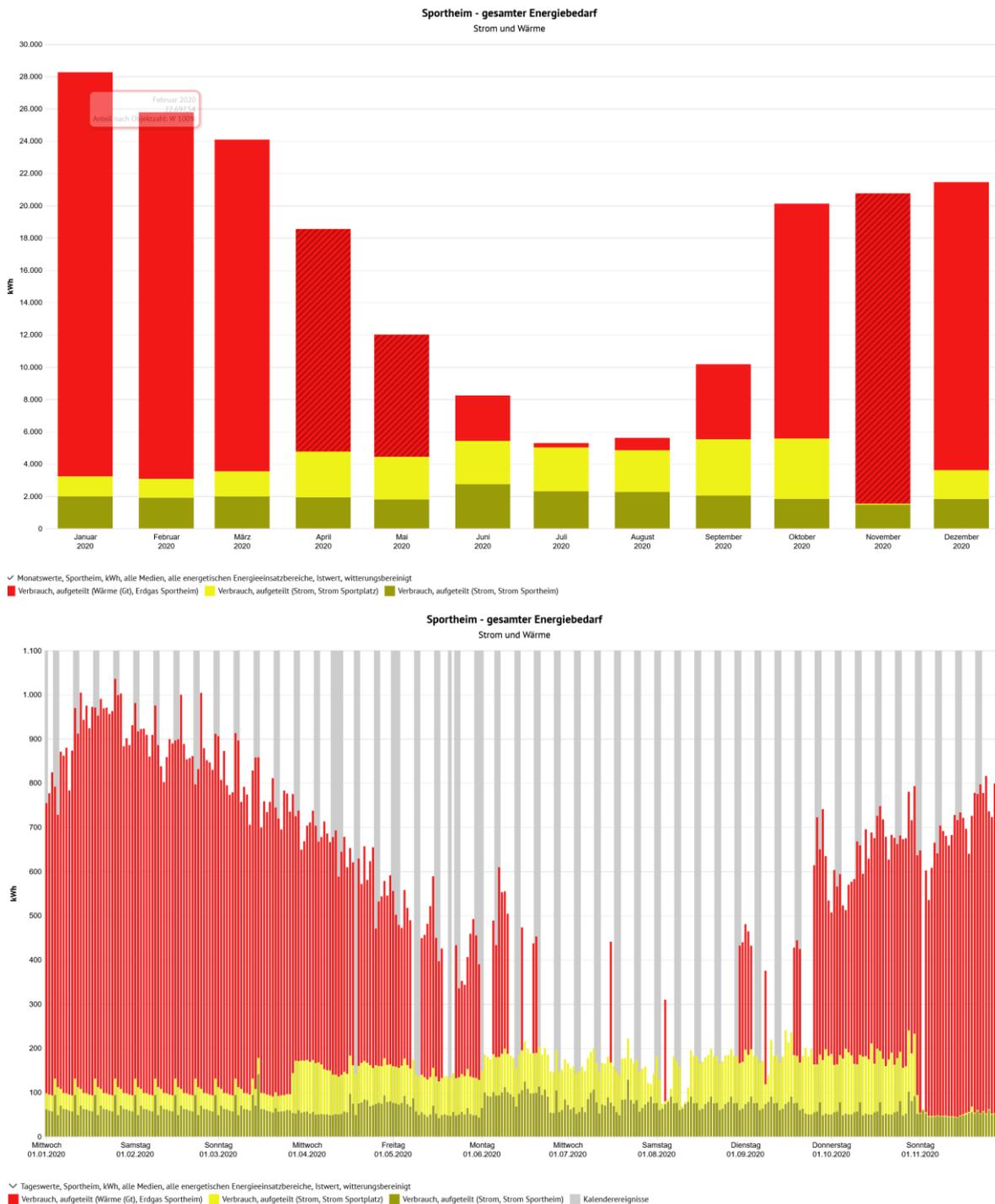


Abbildung 31: Auswertevorlage zum gesamten Energiebedarf im Sportheim (Wärme und Strom), monatsbasiert (oben) und tagesbasiert (unten)

4 Prüfung von Maßnahmen mit Maßnahmenkatalog

Für die zu betrachtenden Liegenschaften wurden diverse Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz sowie dem Ausbau erneuerbarer Energien geprüft und ausgearbeitet. Folgend werden diese Maßnahmen für die jeweiligen Liegenschaften näher beschrieben.

4.1 Grundschule - Optimierung Pelletkessel

Im Rahmen des Projekts wurden die Wärmemengenzähler der Heizzentrale seit 23.01.2020 kontinuierlich im Minutentakt erfasst. Während der Projektlaufzeit kam es gelegentlich zu Ausfällen von Aggregaten (siehe z.B. Abbildung 20 und Details im Abschnitt 3.2).

Im Zuge der Datenanalyse wurden Auffälligkeiten beim Pelletkessel festgestellt. Als erstes Indiz brachten die Auswertevorlagen einen erhöhten Anteil des Erdgaskessels an der gesamten Wärmebereitstellung im Winter 20/21 zum Vorschein, obwohl der Anteil im Winter 19/20 noch wesentlich geringer ausfiel. Genauere Untersuchungen wurden deshalb eingeleitet. An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, dass die Heizlast im Winter 19/20 im Vergleich zum Winter 20/21 deutlich höher lag (vgl. Abbildung 32) - dass der Erdgaskessel also verstärkt zum Einsatz kommt erscheint zunächst plausibel.

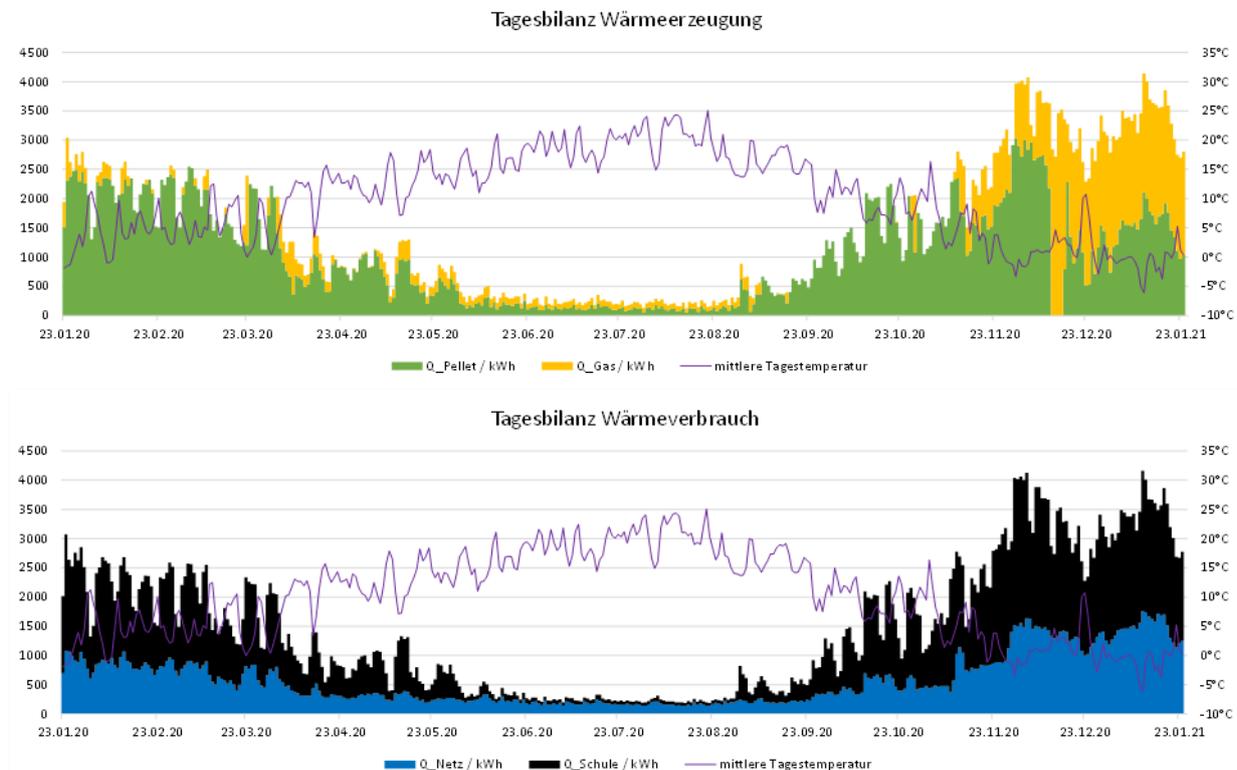


Abbildung 32: Wärmeerzeugung (oben) und Wärmeverbrauch (unten) der Heizzentrale Grundschule, mittlere Tagestemperatur überlagert als Liniendiagramm (violett)

Zunächst ist die hydraulische Einbindung des Pellet- sowie des Erdgaskessels entscheidend. Der Pelletkessel speist in einen Puffer (ca. 4,1 m³) und ist damit nur indirekt mit der Verbraucherseite verbunden. Mit dem Pufferspeicher kann u.a. eine gewisse Mindestbetriebszeit für den Pelletkessel sichergestellt werden. Der Erdgaskessel hingegen ist (im Normalfall, d.h. Schaltung 2 in Abbildung 33 „Spitzenlastkessel erforderlich“) hydraulisch so eingebunden, dass der Rücklauf zum Erdgaskessel aus dem oberen Bereich des Puffers entnommen wird und vom Erdgaskessel lediglich weiter erwärmt wird, sollte das gewünscht (in der Steuerung hinterlegte) Temperaturniveau aus dem Puffer nicht ausreichen.

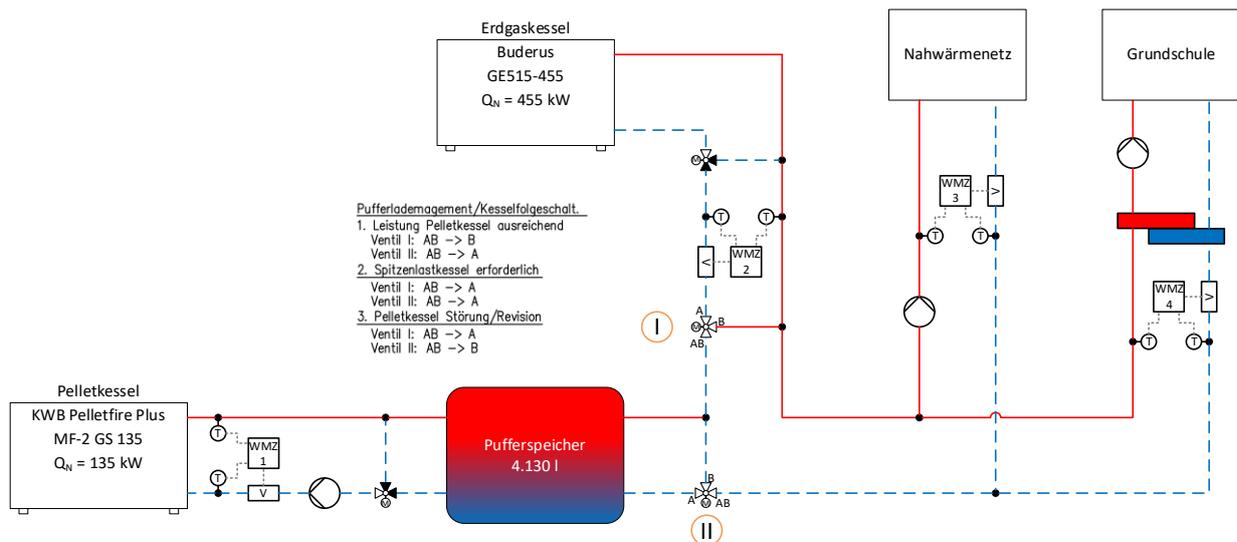


Abbildung 33: vereinfachtes Funktionsschema der Heizzentrale in der Grundschule und Positionierung der Messstellen (WMZ 1 bis 4)

Über Stellventile (I und II in Abbildung 33) kann die hydraulische Einbindung der Wärmeerzeuger so gestaltet werden, dass der Erdgaskessel bei ausreichender Wärmebereitstellung für die Verbraucherseite durch den Pelletkessel vollständig in den Bypass geschaltet wird (Schaltung 1). Damit wird das heiße Wasser aus dem Pufferspeicher (gespeist durch den Pelletkessel) nicht unnötig über den Erdgaskessel geführt und so Wärmeverluste vermieden.

Sollte aufgrund der Heizlast seitens der Verbraucher der Pelletkessel nicht mehr ausreichen, kommt es zum oben beschriebenen „Normalfall“ (Schaltung 2). Zuletzt kann der Puffer (und damit indirekt der Pelletkessel) hydraulisch in den Bypass geschaltet werden (Schaltung 3), sollte es zu einem Ausfall des Pelletkessels kommen. In diesem Fall wird der Rücklauf, kommend von der Verbraucherseite direkt über den Erdgaskessel geführt und von diesem entsprechend Soll-Temperatur erhitzt.

Bei den, im Winter 20/21 beschriebenen Auffälligkeiten lag die hydraulische Schaltung „Spitzenlastkessel erforderlich“ vor - der Pelletkessel übernimmt die Deckung der Grundlast, Lastspitzen werden vom Erdgaskessel abgefangen.

Abbildung 34 zeigt ein Zeitreihendiagramm ausgewählter Messgrößen der Wärmemengenzähler (ergänzt um eine Berechnete Werte von T_RL_Verbraucher_Misch) vom 21.01.2021.

Die Heizleistung des Pelletkessel (in grün) sowie die Heizleistung des Erdgaskessels (in gelb) sind als Indikatoren des Betriebszustands des jeweiligen Wärmeerzeugers dargestellt. Überlagert sind verschiedene Temperatur-Messwerte abgebildet.

T_RL_Verbraucher_Misch entspricht der verbraucherseitigen Mischtemperatur des Rücklaufs und ist auf Grundlage von Messwerten der Verbraucher-Wärmemengenzähler „Grundschule“ und „Nahwärmenetz“ berechnet worden. Aufgabe der Wärmeerzeuger ist es nun, dieses Temperaturniveau wieder zu erhöhen („Soll-Temperatur Vorlauf zu den Verbrauchern“).

Die Rücklauftemperatur des Pelletkessels entspricht zunächst in guter Näherung des verbraucherseitigen Rücklaufs (Rücklauf wird über die hydraulische Schaltung in den Puffer gespeist). Der Pelletkessel erhöht durch Wärmezufuhr dieses Temperaturniveau (auf T_VL_Pellet in rot) und speist dieses zurück in den Puffer. Von dort wird aus dem oberen Bereich des Puffers das erwärmte Wasser entnommen und über den Erdgaskessel geführt (T_RL_Gas). Entspricht das Temperaturniveau nicht der eingestellten Soll-Temperatur (Vorlauf zu den Verbrauchern) wird zusätzlich benötigte Wärme über den Erdgaskessel zugeführt. Zuletzt liegt ein hohes Temperaturniveau vor (T_VL_Gas), das an die Verbraucher weitergegeben wird.

Aus den Zeitreihen in Abbildung 34 ist ersichtlich, dass der Pelletkessel über den exemplarischen Tag hinweg neunmal zugeschaltet und wieder abgeschaltet wird. Der Erdgaskessel hingegen ist nahezu durchgängig in Betrieb, bzw. taktet (Zackiger Verlauf der Temperatur T_VL_Gas, entspricht an diesem Tag ca. 85 An- und Abschaltvorgängen).

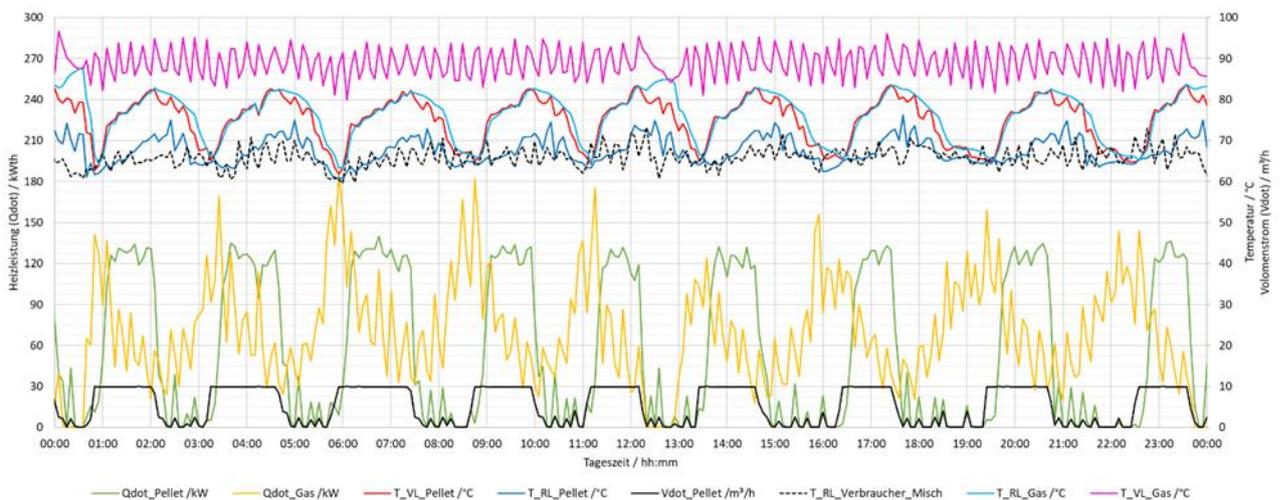


Abbildung 34: Zeitreihendiagramm, Messdaten vom 21.01.2021 der Wärmemengenzähler der Heizzentrale Baar-Ebenhausen, Mischtemperatur des Rücklaufs verbraucherseitig bilanziert (T_RL_Verbraucher_Misch)

Auffällig sind vergleichsweise regelmäßige Abschaltvorgänge des Pelletkessels über den Tagesverlauf hinweg, welche nach Aussagen des Herstellers und Planers zum einen auf die regelmäßige Reinigung und zum anderen auf die Befüllung (Nachsaugen von Pellets) zurückzuführen sind - in beiden Fällen wird die Anlage heruntergefahren. Um zusätzliche Abschaltungen zu vermeiden wird bei jedem Reinigungsvorgang (alle 6 Betriebsstunden) der Kessel Zwangs befüllt.

Weitere Abschaltungen des Pelletkessels können - wie zunächst vermutet - aufgrund des Erreichens oder Überschreitens eines bestimmten Temperaturniveaus im Pufferspeicher hervorgerufen werden.

Pro Tag werden ca. 6 bis 7 technisch notwendige Abschaltvorgänge, bedingt durch Reinigung und Befüllung, erwartet. Weitere Abschaltungen sind temperaturbedingt zu erwarten.

Im exemplarischen Zeitreihendiagramm vom 21.01.21 (vgl. Abbildung 34) werden höhere Vorlauftemperaturen als ca. 82 C nur selten erreicht, bis es zum Herunterfahren des Kessels kommt.

Ist der Pelletkessel in Betrieb, so beträgt der Volumenstrom (nach einer kurzen Anfahrphase) nahezu konstant 10 m³/h. Zur übersichtlicheren und zusammenfassenden Darstellung der Zeitreihen zeigt Abbildung 35 die Dauerlinien von Vor- und Rücklaufemperatur, der Temperaturdifferenz sowie dem vorliegenden Volumenstrom des Wärmemengenzählers „Pelletkessel“. Deutlich erkennbar ist der Volumenstromssockel von 10 m³/h über mehr als 3.500 h im gesamten Betrachtungszeitraum.

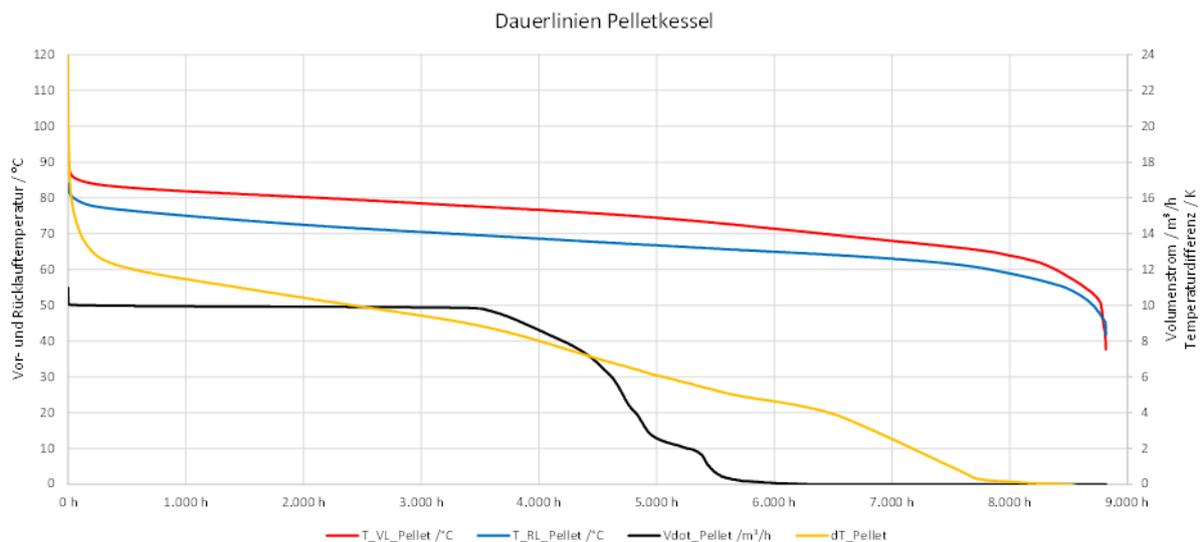


Abbildung 35: geordnete Dauerlinien der Wärmemengenzähler Messdaten (WMZ Pelletkessel), Vorlaufemperatur (rot), Rücklaufemperatur (blau), Temperaturdifferenz (gelb), Volumenstrom (schwarz)

Der hohe Volumenstrom kann zwei Effekte mit sich bringen:

- Durchspülung des Pufferspeichers, u.U. auch Zerstörung von Temperaturschichtungen (gesamtes Puffervolumen von $4,13 \text{ m}^3$ wird in einer Stunde theoretisch rund 2,4-mal durch die Pumpe umgewälzt, sollte die Rücklaufanhebung im Bypass sein - d.h. der Volumenstrom im Kesselkreislauf mit $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ist gleich dem Volumenstrom zwischen Kessel und Puffer) → unwahrscheinlich, da Rücklaufanhebung aktiv
- Vorlauftemperatur kann bei voller Nennleistung des Pelletkessels (135 kW) nur maximal $12,5 \text{ K}$ wärmer als der zugeführte Rücklauf sein (sofern keine Rücklaufanhebung aktiv ist)

Dem Funktionsschema (Bestandsunterlagen, seitens der Gemeinde bereitgestellt) inklusive Angaben zur Auslegung zufolge, sollte die Vor- bzw. Rücklauftemperatur $90/70^\circ\text{C}$ betragen. Dies entspricht einer Temperaturdifferenz von 20 K . Zusammen mit der Nennleistung von 135 kW des Kessels müsste der Volumenstrom $5,8 \text{ m}^3/\text{h}$ betragen - also etwas mehr als die Hälfte des gegenwärtigen Zustands.

Mit einer Reduzierung des Volumenstroms auf $5,8 \text{ m}^3/\text{h}$ (bei $T_{\text{RL}} = 70^\circ\text{C}$) werden seitens Pelletkessel höhere Vorlauftemperaturen erwartet - der Erdgaskessel könnte dann bei entsprechender niedriger Heizlast der Verbraucher ($Q_{\text{Verbraucher}} < 135 \text{ kW} \rightarrow$ entspricht Q_{N} Pelletkessel) vollständig entfallen.

Selbstverständlich richtet sich der einzustellende Volumenstrom nach der vorliegenden Rücklauftemperatur und muss entsprechend angepasst werden (Rücklaufanhebung). Die bisher vorliegenden $10 \text{ m}^3/\text{h}$ wären lediglich bei Rücklauftemperaturen von ca. $77,5 \text{ C}$ notwendig, damit eine (beispielhafte) Soll-Temperatur des Vorlaufs von 90 C nicht überschritten wird.

Insgesamt könnten durch die Anpassung des Volumenstroms im „Pelletkessel-Kreislauf“ längere Laufzeiten sowie ein kontinuierlicherer Betrieb des Pelletkessels und letztendlich eine Erhöhung des Anteils von „Pelletwärme“ am Wärmemix resultieren. Dies geht mit einer wirtschaftlicheren und ökologischeren Betriebsweise der Heizzentrale einher.

Die Einstellung des Volumenstroms von $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ist Ergebnis einer bereits erfolgten, intensiven Einstellung der Anlage. Bei niedrigeren Volumenströmen und den vorliegenden bzw. gewünschten Temperaturniveaus kann es z.B. beim Reinigen kurzzeitig zu sehr hohen Heizleistungen kommen (aufbrechen des Glutbetts) und dadurch zur Überschreitung von eingestellten Grenztemperaturniveaus welche zuletzt eine Störmeldung des Kessels hervorrufen. Mit den gegenwärtigen Einstellungen der Anlage ist laut Kessel-Hersteller ein störungsfreier Betrieb der Anlage gewährleistet. **Seitens Kessel-Hersteller wird deshalb empfohlen, diese Einstellung so beizubehalten.**

4.2 Grundschule - Beleuchtungskonzept

Basierend auf der Bestandsaufnahme sowie durch Gespräche und Abstimmung mit der Gemeinde Baar-Ebenhausen wurde im Rahmen des Projekts ein Beleuchtungskonzept für die Grundschule Baar-Ebenhausen erarbeitet.

Für die zu betrachtenden Gebäudeteile (Hauptgebäude, Neubau sowie Nebenräume der Sporthalle) wurden zunächst im Rahmen einer Begehung der Liegenschaft Informationen zur Beleuchtung aufgenommen. Insgesamt besteht Handlungsbedarf, da zwar teilweise schon entsprechend modernisiert wurde, dennoch ein Großteil der installierten Beleuchtungstechnik nicht auf dem Stand der Technik ist.

Für die Betrachtungen im Beleuchtungskonzept wurden zwei Varianten näher untersucht:

- Variante 1: Retrofit-Leuchtmittel
- Variante 2: LED-Leuchten

Ausgewählte Räumlichkeiten wurden softwaregestützt modelliert und mit LED-basierten Leuchten/-mitteln simuliert.

Neben einer Investitionskostenprognose werden im Zuge der Konzeptionierung vor allem auch Einsparmöglichkeiten bzgl. elektrischer Energie sowie CO₂-Reduktionen aufgezeigt.

4.2.1 Berechnungsgrundlagen, Begriffsdefinitionen und Möglichkeiten beim Beleuchtungstausch

Für die Berechnungen der Einsparpotenziale werden Referenzwerte der Benutzungsstunden pro Jahr nach VDI 3807 zugrunde gelegt (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Benutzungsstunden pro Jahr (Beleuchtung) nach VDI 3807

Flur/Treppenhaus	Klassenräume (Ganztagsschule)	Klassenräume (Nachmittagsbetreuung)	Nebenräume	Lager/Technik
650 h/a	650 h/a	400 h/a	250 h/a	200 h/a

Die Auslegung der Beleuchtung erfolgt durch eine Beleuchtungssimulation eines exemplarischen Raumes, gestützt durch die Software „DiaLux evo“. Den Simulationen liegen folgende Normen zur Ermittlung der Beleuchtungsstärken zugrunde:

- DIN EN 12464-1: Beleuchtung von Arbeitsstätten
- DIN EN 12193: Sportstättenbeleuchtung

Begriffsdefinitionen

Zur Kategorisierung die „technischen Lampen“ betreffend wird auf Abbildung 36 verwiesen.

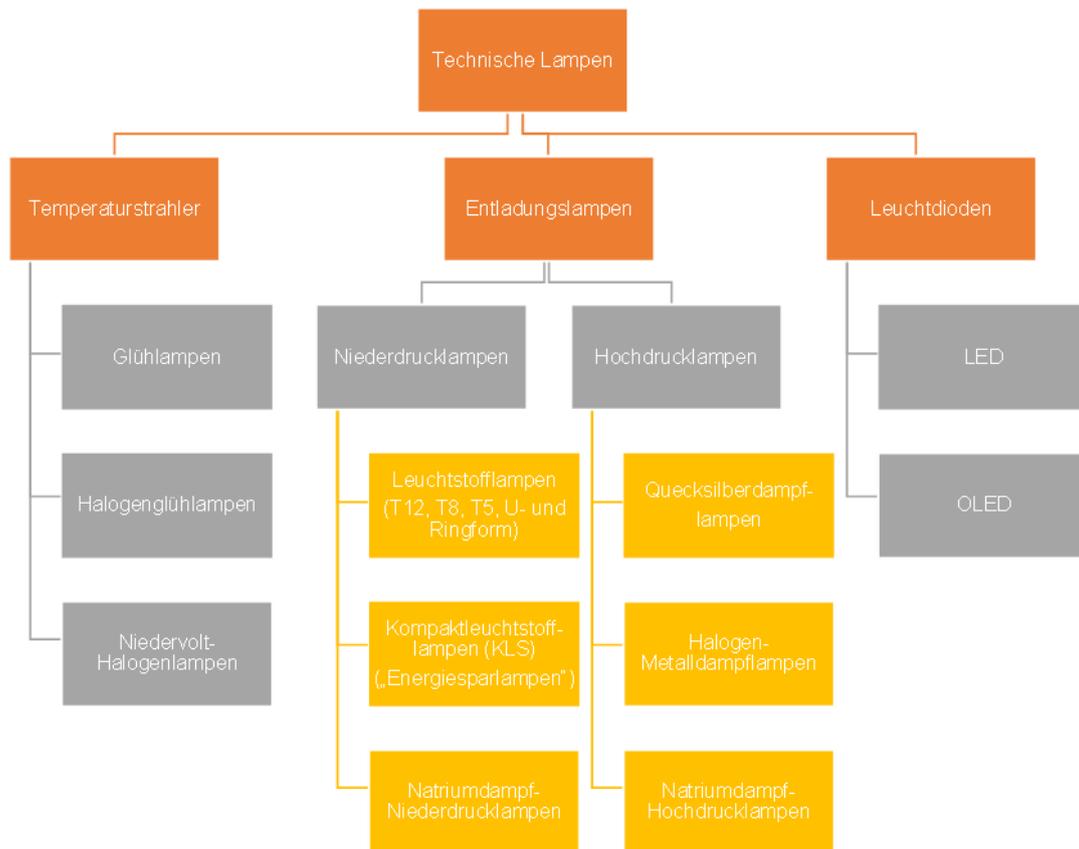


Abbildung 36: Definitionen und Kategorisierung Technischer Lampen

Weitere Begrifflichkeiten:

- Lampe = Leuchtmittel
 - Quelle zur Erzeugung optischer Strahlung
- Leuchte
 - Gerät zur Aufnahme der Leuchtmittel (Lampe)
 - Verteilt, filtert und wandelt das erzeugte Licht
 - Dient zu Befestigung und zum Schutz der Leuchtmittel
 - Enthält die Anschlussverdrahtung, Vorschaltgeräte, etc.
- Lichtstrom (Lumen, lm)
 - Gesamte von einer Lampe abgegebene Lichtleistung unabhängig der Richtung
- Beleuchtungsstärke (Lux)
 - Lichtstrom pro Fläche, 1 Lux = 1 lm/m²

- Farbtemperatur (Kelvin, K)
 - Lichtfarbe einer Lampe
 - Unterscheidung nach DIN 5035
 - Tageslichtweiß: > 5.300 K
 - Neutralweiß 3.300 bis 5.300 K
 - Warmweiß < 3.300 K
- Farbwiedergabe
 - Eigenschaft einer Lichtquelle, die beleuchteten Gegenstände in „natürlichen“ Farben erscheinen zu lassen
 - Maximalwert: Ra = 100
 - Je kleiner der Zahlenwert, desto größer die Farbabweichung
 - Sonnenlicht Ra = 100
 - Glühbirne Ra ≈ 100
 - Leuchtstoffröhre Ra ≈ 70 – 80
 - LED Ra ≈ 70 – 95
 - NAV (Gelblicht) Ra ≈ 25
- Lichtausbeute: $\frac{\text{Lichstrom}}{\text{Leistungsaufnahme}}$ in $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$
- Unterscheidung Effizienz des Leuchtmittels ↔ Effizienz der Leuchte
 - Leistungsbedarf durch Vorschaltgeräte
 - Streuverluste durch ungerichtetes Licht

Möglichkeiten des Beleuchtungstausches

A) Retrofit Leuchtmittel

- (LED-)Austauschleuchtmittel wird in bestehende Leuchten eingebaut
- Vorhandene Vorschaltgeräte bleiben i.d.R. weiterhin in Betrieb (Verlustleistung fällt weiterhin an). Alternativ kann meist auch das Vorschaltgerät entfernt werden, bringt aber erhöhten Installationsaufwand mit sich und der Aufbau der Leuchte wird verändert (Haftungsfragen müssen geklärt werden, z.B. Typprüfung, Typenschild, elektromagnetische Verträglichkeit, Konformitätsbewertung, ...)
- Vorteil: geringe Investitionskosten
- Nachteil: meist geringere Einsparmöglichkeiten, keine Förderung, ausreichende Beleuchtungsstärke muss geprüft werden

B) Leuchtentausch

- Komplette Leuchte wird durch eine LED-Leuchte ersetzt
- Beleuchtungsmisstände können behoben werden und Anzahl/Anordnung der Leuchten kann optimiert werden
- Erhöhte Investitionskosten, dafür aber förderfähig

4.2.2 Aufnahme Ist-Zustand

Im Rahmen einer Begehung der Liegenschaft wurden die im Bestand vorhandenen Leuchten und Leuchtmittel aufgenommen, Abbildung 37 zeigt zwei exemplarische Räume und deren Beleuchtung im Bestand.



Abbildung 37: exemplarische Beleuchtung im Bestand der Grundschule, links: Eingangsbereich im Neubau, rechts: Beleuchtung im Klassenzimmer

Insgesamt wurden in den zu betrachtenden Gebäudeteilen 464 Leuchten und 686 Leuchtmittel gezählt (vgl. Tabelle 2). Die installierte Leistung entspricht in Summe 36.300 W.

Tabelle 2: Bestandsaufnahme Beleuchtung Grundschule nach Art des Leuchtmittels zugehörige Anzahl und installierte Leistung (Summe)

Art des Leuchtmittels	Anzahl	Installierte Leistung
Leuchtstoffröhre	361	23.500 W
Kompaktleuchtstofflampe	193	5.570 W
Glühbirne	63	3.700 W
Halogen	18	2.700 W
LED-Retrofit (Bestand)	51	875 W
Gesamt	686	36.300 W

Anhand der nach VDI 3807 definierten Jahresbenutzungsstunden (vgl. Tabelle 1 im Abschnitt 4.2.1) und entsprechender Zuweisung der jeweiligen Leuchtmittel wurde der jährliche Strombedarf für die Beleuchtung auf 18.260 kWh/a ermittelt (Details siehe Tabelle 3).

Dies entspricht einem jährlichen CO₂-Ausstoß von ca. **10,1 t**. Mit Stromkosten zu ca. 18 Ct/kWh betragen die jährlichen Ausgaben rund **3.280 €/a**.

Tabelle 3: Berechnung des erwarteten elektrischen Energiebedarfs im Bestand

Ort	Benutzungsstunden	Installierte Leistung	Elektrischer Energiebedarf (gerundet)
Flur/Treppenhaus	650 h/a	8.700 W	5.600 kWh/a
Klassenräume Ganztagsschule	650 h/a	14.000 W	9.100 kWh/a
Klassenräume Nachmittagsbetreuung	400 h/a	2.200 W	880 kWh/a
Nebenträume	250 h/a	8.500 W	2.100 kWh/a
Lager/Technik	200 h/a	2.900 W	580 kWh/a
Gesamt		36.300 W	18.260 kWh/a

4.2.3 Beleuchtungstausch-Varianten

Basierend auf den Ergebnissen der Bestandsaufnahme erfolgt im nächsten Schritt die Variantenbetrachtung zum Beleuchtungstausch.

4.2.3.1 LED-Retrofit

Leuchtmittel im Bestand werden „1:1“ gegen LED-Leuchtmittel ausgetauscht. Vorhandene Vorschaltgeräte bleiben erhalten.

- Erwartete Investitionskosten ≈ 11.000 €
- Stromeinsparung pro Jahr ≈ 10.100 kWh
- Kosteneinsparung pro Jahr ≈ 1.750 €/a
- Statische Amortisationszeit ≈ 7 Jahre
 - Keine Förderung möglich
- CO₂-Ausstoß nach Umrüstung ≈ 4,5 t/a
 - Entspricht einer Reduzierung um 55 % gegenüber Bestand

4.2.3.2 LED-Leuchtentausch

Mittels einer Modellierung und softwaregestützten Simulation (DiaLux evo, vgl. Abbildung 38) wurden Klassenzimmer sowie ein Mehrzweckraum entsprechend untersucht und die benötigten Leuchten identifiziert. In weiteren Räumen erfolgte die Auslegung der LED-Beleuchtung anhand spezifischer Kennwerte.

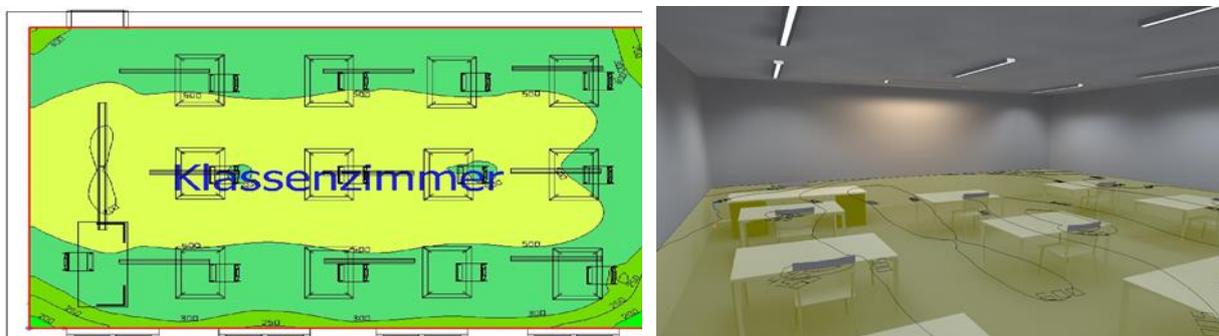


Abbildung 38: Screenshots der softwaregestützten Simulation zur Auslegung der LED-Beleuchtung, Software DiaLux evo

Die erwartete Gesamtleistung nach einem LED-Leuchtentausch beträgt rund 10.500 Watt bzw. einem jährlichen Strombedarf der Beleuchtung von ca. 5.500 kWh/a. Der CO₂-Ausstoß entspricht damit etwa 3,1 t/a.

- Erwartete Investitionskosten ≈ 93.000 €
- Stromeinsparung pro Jahr ≈ 12.700 kWh
- Kosteneinsparung pro Jahr ≈ 2.200 €/a
- Statische Amortisationszeit ohne Förderung: > 40 Jahre
- Mit Beantragung von Fördermitteln bis Ende 2021: ca. 25 Jahre
 - Danach: ca. 30 Jahre
- CO₂-Ausstoß nach Umrüstung ≈ 3,1 t/a
 - Entspricht einer Reduzierung um **70 %** gegenüber Bestand

4.2.4 Zusammenfassung und Fazit Beleuchtungskonzept

Zwei Varianten für eine neue Beleuchtungslösung wurden erarbeitet

- Variante 1: LED-Retrofit-Leuchtmittel
- Variante 2: LED-Leuchten

Ergebnisse (tabellarische Zusammenfassung in

Tabelle 4)

- Empfehlung: Retrofit (Variante 1) als guter Kompromiss aus Energie- bzw. CO₂-Einsparpotenzial. Um 55 % reduzierte Emissionen und Stromverbrauch zu erwarten. Gleichzeitig mit ca. 7 Jahren statischer Amortisationszeit auch wirtschaftlich interessant.
- Vollständiger Austausch der Bestandsbeleuchtung gegen LED-Leuchten (Variante 2) zwar höchste Reduktion von Emissionen und Stromverbrauch (jeweils um ca. 70 %), jedoch aufgrund hoher Investitionskosten mit statischen Amortisationszeiten von über 25 Jahren (inkl. Förderung) verbunden und damit nicht wirtschaftlich.

Tabelle 4: Beleuchtungskonzept für die Grundschule Baar-Ebenhausen - Zusammenfassung und Variantenabgleich gegenüber Bestand

Grundschule		Ist-Zustand	LED-Retrofit	LED-Leuchten
Leistung gesamt	[W]	36.300	16.000	10.500
Stromverbrauch	[kWh/a]	18.260	8.100	5.500
Stromkosten	[€/a]	3.200	1.500	1.000
CO ₂ -Ausstoß	[t/a]	10,1	4,5	3,1
Investitionskosten	[€]	-	11.000	93.000

4.3 Grundschule - Potenzialstudie Photovoltaik

Im Rahmen des Projekts und basierend auf den gesammelten Informationen bzgl. des Strombedarfs der Liegenschaft (hochauflösende Messdatenerfassung relevanter Stromzähler) wurde eine Potenzialstudie zur Photovoltaik am Standort erarbeitet. Dabei wurden

- die technischen Rahmenbedingungen und Möglichkeiten analysiert,
- der zu erwartende solare Deckungsgrad und Eigenverbrauchsquote auf Grundlage von Anlagensimulationen prognostiziert sowie
- der ökologische Nutzen und Wirtschaftlichkeit untersucht.

4.3.1 Rahmenbedingungen

Der Gebäudebestand der Grundschule ist in Hauptgebäude, Neubau, Turnhalle und Zwischenbau gegliedert. Die Schulmensa wird gegenwärtig umgesetzt. Auf das neue Gebäude wird eine PV-Anlage mit 9 kW_p und Überschusseinspeisung (= Eigenstromnutzung) installiert. Der Anschluss an das Stromnetz erfolgt über den bestehenden Netzanschlusspunkt der Grundschule und wird zukünftig über Stromzähler separat erfasst.

Auf den Süddachflächen (Hauptgebäude, Turnhalle und Neubau) befinden sich bereits PV-Anlagen, die aber von einem Dritten betrieben werden (vermietete Dachflächen). Einzig mögliche Belegungsfläche für eine neue PV-Anlage ist damit das Flachdach des Zwischenbaus, der Umkleiden der Turnhalle sowie der Hausmeisterwohnung (siehe Abbildung 39).



Abbildung 39: potenzielle PV-Belegungsflächen auf dem Flachdach der Grundschule, Luftbild Datenquelle: Bayerische Vermessungsverwaltung - www.geodaten-bayern.de

Große Teile des Flachdachs sind aufgrund von Verschattung durch die umliegenden Gebäude, insbesondere der Turnhalle und Neubau nicht für die Nutzung als PV-Installationsfläche geeignet. Es wird angenommen, dass die Statik des Flachdachs für die Installation eines PV-Generators ausreicht.

4.3.2 Elektrisches Lastprofil der Liegenschaft

Der Strombedarf der Grundschule wird im Bestand über insgesamt drei Hauptzähler gemessen, die im Rahmen des Projekts kontinuierlich erfasst worden sind und damit das elektrische Lastprofil vorliegt (siehe Lastprofil als Heatmap in Abbildung 40). Der, für die Simulationen hinterlegte Lastgang entspricht einem jährlichen Strombedarf von rund **33.700 kWh**.

Die Hausmeisterwohnung verfügt über einen eigenen Stromzähler und ist vor dem Hintergrund der Eigenstromnutzung des PV-Stroms und der Thematik „Drittmengenabgrenzung“ nicht in die Betrachtungen einbezogen. Ebenso wurde der zukünftige Strombedarf der Schulmensa nicht mit einbezogen, da diese über eine separate Messung erfasst wird.



Abbildung 40: elektrisches Lastprofil der Grundschule Baar-Ebenhausen (Carpet-Plot / Heatmap)

Die Darstellung des elektrischen Lastprofils in Form einer Heatmap, wie in Abbildung 40 dargestellt, dient der Visualisierung von auftretenden Lastspitzen bzw. Zeiten erhöhten elektrischen Energiebedarfs über den Tagesverlauf hinweg. In X-Richtung sind jeweils die Tage des Referenzjahres aufgetragen, in Y-Richtung die Uhrzeit der Tage. Abhängig der Höhe der vorliegenden elektrischen Last zur jeweiligen Uhrzeit an einem Tag wird der Zeitbereich mit einer, der vorliegenden Last entsprechenden Farbe gekennzeichnet (siehe Skala rechts der Heatmap).

Hohe elektrische Lasten, also auch erhöhter elektrischer Energiebedarf entsprechen gelben und roten Farbtönen. Aus dem Carpet-Plot geht hervor, dass der erhöhte elektrische Energiebedarf zwischen 7 und 13 Uhr vorliegt (typische Schulzeiten). Dies ist am Wochenende und in den Ferienzeiten aber nicht der Fall, hier entspricht der elektrische Energiebedarf eher der Grundlast. Da der elektrische Energiebedarf hauptsächlich tagsüber auftritt liegen damit bereits gute Voraussetzungen zur direkten Eigenstromnutzung vor, da es zu diesen Tageszeiten zur Überlagerung von möglicher PV-Stromerzeugung und erhöhten Strombedarf der Liegenschaft kommt.

4.3.3 Potenzialabschätzung und Vordimensionierung

Vor der Ausarbeitung geeigneter Anlagenvarianten wurde zunächst das Potenzial von PV-Anlagen hinsichtlich der Eigenverbrauchsquote und dem solaren Deckungsgrad untersucht.

- **Eigenverbrauchsquote (EVQ):** Welcher Anteil des erzeugten PV-Stroms kann selbst genutzt werden
 - Wirtschaftliche Aspekte im Vordergrund (PV-Stromgestehungskosten i.d.R. günstiger als Strom aus dem Netz)
- **Solarer Deckungsgrad (SDG):** welcher Anteil des Strombedarfs der Liegenschaft wird über PV-Strom gedeckt
 - Ökologische Aspekte im Vordergrund („Erneuerbare Energien anstatt Netzstrom“)

Zur Berechnung der Liegenschaftsindividuellen EVQ und SDG werden das elektrische Lastprofil sowie der zu erwartende PV-Ertrag am Standort grundlegend benötigt. Das elektrische Lastprofil ist bereits bekannt - zur Ermittlung des zu erwartenden PV-Ertrags am Standort, ist eine entsprechende Simulation notwendig.

Auf Grundlage von Luftbildern, bereitgestellten Bestandsplänen sowie gesammelten Informationen vor Ort wurde ein entsprechendes 3D-Modell der Liegenschaft sowie der verschattungsrelevanten Umgebung erstellt.

Das Modell wurde in der Simulationssoftware (PV*Sol premium 2020) hinterlegt. Als Referenzmodule für die Simulation wurden monokristalline PV-Module mit 340 W_p gewählt. Die Montage der Module auf dem Flachdach erfolgt über eine Aufständering.



Abbildung 41: 3D-Gebäudemodell inklusive exemplarische PV-Anlage der Grundschule Baar-Ebenhausen

Zunächst wurde das PV-Ertragsprofil einer exemplarischen PV-Anlage mittels Simulationssoftware berechnet und im Anschluss normiert. Das normierte PV-Ertragsprofil dient als Datengrundlage für ein Analysetool zur Potenzialabschätzung, in das auch das elektrische Lastprofil der Liegenschaft hinterlegt wird. Im Analysetool kann die PV-Anlagengröße, d.h. die Generatorleistung in kW_p frei eingestellt werden. Außerdem kann bei den Berechnungen im Analysetool ein Batteriespeicher berücksichtigt werden, dessen Speicherkapazität wiederum frei definierbar ist.

Das Ergebnis des Analysetools sind Kennfelder zur Eigenverbrauchsquote und dem solaren Deckungsgrad der Liegenschaft, welche in Abbildung 42 dargestellt sind. Anhand dieser Kennfelder ist bereits eine Vordimensionierung sinnvoller bzw. geeigneter Anlagengrößen möglich, um die nachgelagerte und zeitaufwändige Detailsimulation in der Simulationssoftware vorab einzugrenzen.

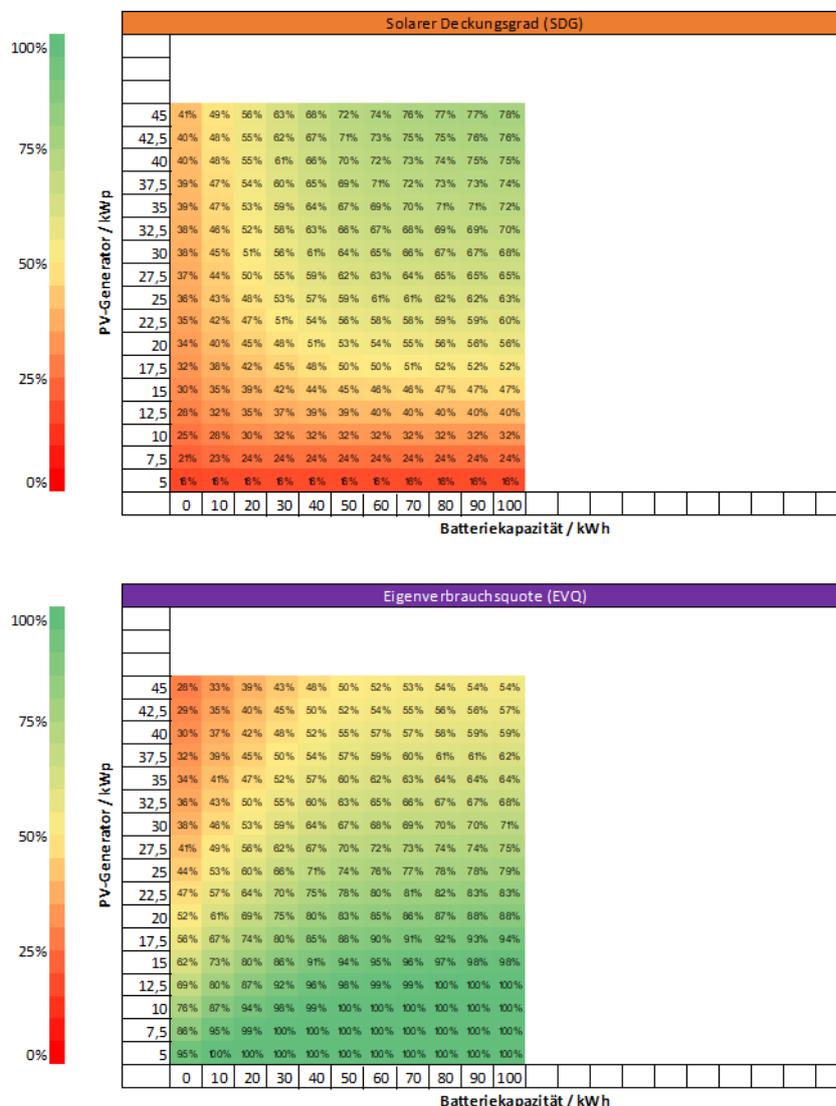


Abbildung 42: Potenzialanalyse Solarer Deckungsgrad (oben) und Eigenverbrauchsquote (unten) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung und Batteriekapazität, Grundschule Baar-Ebenhausen

Ergebnisse Potenzialanalyse:

- Solarer Deckungsgrad
 - Je größer der PV-Generator (und Speicher) ausfällt, desto höher ist der SDG
 - Maximal ca. 41 % SDG (@ 45 kW_p) bei direkter Eigenstromnutzung
 - Maximal ca. 78 % SDG mit Speicher (45 kW_p & 100 kWh Speicherkapazität)
- Eigenverbrauchsquote
 - Gegenläufig zum SDG
 - Vollständige Nutzung des PV-Stromertrags (entspricht 100 % EVQ) nur angenähert (95 %) bei 5 kW_p möglich.
 - Niedrige EVQ als Indikator für Überdimensionierung
- Energiespeicher können zeitliche Unterschiede bei Erzeugung und Verbrauch kompensieren, sind aber mit hohen Kosten verbunden
 - Signifikante Erhöhung von SDG und EVQ
 - Wirtschaftlichkeit i.d.R. nicht gegeben
- Kompromiss: SDG ≈ EVQ bei ca. 30 kW_p
 - Technisch ausgewogene Anlagengröße
 - auch aus wirtschaftlicher Sicht gute Anlagengröße (Befreiung der EEG-Umlage für Eigenverbrauch)

4.3.4 Variantenbetrachtung und Simulationsergebnisse

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Potenzialanalyse sowie der Gegebenheiten vor Ort wurden insgesamt vier Varianten (vgl. Abbildung 43) im Detail betrachtet:

- Variante 1: „Vollbelegung Süd“ - Süd-Ausrichtung, 28,6 kW_p
- Variante 2: „Vollbelegung“ - Ost-West-Ausrichtung: 50,3 kW_p
- Variante 3: „30 kWp Ost-West“ - Ost-West.-Ausrichtung, 29,9 kW_p
- Variante 4: „Ergänzung Mensa“ - Süd-Ausrichtung, ca. 21 kW_p



Abbildung 43: PV-Simulationsmodelle der Varianten 1 bis 4, Grundschule Baar-Ebenhausen

Hintergrund zu Variante 4 „Ergänzung Mensa“

Auf dem Flachdach der neuen Schulmensa wird eine PV-Anlage mit etwa 9 kW_p installiert werden. Nach dem EEG 2021 muss für Anlagen bis 30 kW_p (und bis zu 30.000 kWh/a Eigenverbrauch) **keine** EEG-Umlage für den Eigenverbrauch bezahlt werden. Dies hat erhebliche wirtschaftliche Vorteile - die Grenze von 30 kW_p sollte deshalb nicht überschritten werden, da ab dieser Grenze 40 % der EEG-Umlage für den Eigenverbrauch bezahlt werden müssen.

Weiter gilt zu beachten: Wenn eine neue PV-Anlage auf dem Flachdach der Grundschule errichtet wird und diese innerhalb von 12 Monaten nach Inbetriebnahme der „Mensa-PV-Anlage“ in Betrieb genommen wird, müssen die Anlagenleistungen aufsummiert werden. Um die Grenze von 30 kW_p nicht zu überschreiten wurden $(30 - 9) \text{ kW}_p = 21 \text{ kW}_p$ für Variante 4 gewählt.

Simulationsergebnisse (Zusammenfassung in Tabelle 5)

Tabelle 5: Simulationsergebnisse der PV-Anlagenvarianten, Grundschule Baar-Ebenhausen

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Anlagenleistung in kW _p	28,6	50,3	29,9	21,1
Spezifischer Jahresertrag in kWh/kW _p	1.140	1.010	1.001	1.125
Ertragsminderung durch Abschattung in %/a	3	3	3	3
Stromertrag in kWh/a	32.400	50.900	30.000	23.800
Eigenverbrauch in kWh/a	12.600	14.200	12.500	11.700
Netzeinspeisung in kWh/a	19.800	36.700	17.500	12.100
Eigenverbrauchsquote in %	39	28	42	49
Solarer Deckungsgrad in %	37	42	37	35
Vermiedene CO ₂ -Emissionen in t/a	15	24	14	14

Variante 1:

- sehr hoher spezifischer Ertrag möglich (Verschattung beachten!)
- 39 % des Solarstroms können direkt genutzt werden (= 12.600 kWh/a)
- Vergleichbar hoher solarer Deckungsgrad (37 %)
- Platz ist begrenzt durch Abschattung → Detailplanung erforderlich, um installierbare Leistung abschließend zu bestimmen.

Variante 2:

- Vollbelegung des Flachdachs (bei Berücksichtigung der Verschattung)
- Spezifischer Ertrag aufgrund der Ausrichtung der Module nach Ost-West reduziert gegenüber Varianten in Süd-Ausrichtung
- Niedrige Eigenverbrauchsquote, dafür maximaler solarer Deckungsgrad und maximale vermiedene CO₂-Emissionen im Variantenvergleich

Variante 3:

- reduzierter Flächenbedarf durch Aufständigung der Module in Ost-West-Richtung auf Kosten des spezifischen Ertrags (ca. 130 kWh/m² reduzierter Ertrag gegenüber Varianten in Süd-Ausrichtung)
- Eigenverbrauch absolut mit 12.500 kWh/a vergleichbar mit Variante 1, obwohl Jahresstromertrag um 2.400 kWh/a geringer ausfällt. Solarer Deckungsgrad damit auch vergleichbar

Variante 4

- Hoher spezifischer Ertrag möglich
- Ausreichend verschattungsfreie Flächen verfügbar (vgl. hierzu Anmerkungen zu Variante 1)
- Eigenverbrauchsquote bei 49 %, entspricht absolut 11.700 kWh/a und damit nur rund 900 kWh/a weniger direkter Eigenverbrauch als Variante 1.
- Solarer Deckungsgrad ähnlich zu Variante 1 und 3, damit auch vergleichbare CO₂-Emissionen

4.3.5 WirtschaftlichkeitsbetrachtungGrundlegende Annahmen und Rahmenbedingungen

Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der zuvor simulierten Anlagenvarianten wurden marktübliche Durchschnittskosten angesetzt. Der spezifische Invest in € pro kW-Anlagenleistung sinkt mit steigender Anlagengröße aufgrund von Skalierungseffekten. Weitere Kosten können durch zusätzlich benötigte Gerüste, speziellen Anforderungen an den Blitzschutz etc. entstehen.

Die jährlichen Betriebskosten sowie Kosten für Versicherung und Verwaltung orientieren sich jeweils an der Anlagengröße.

Bei einer vollständigen Fremdfinanzierung der Maßnahmen wird ein Zinssatz von 1,0 % zugrunde gelegt. Der Betrachtungszeitraum beträgt 20 Jahre - unabhängig davon ob eigen- oder fremdfinanziert. Sämtliche Kosten in € netto.

Einnahmen durch Netzeinspeisung (Einspeisevergütung)

Für eingespeisten Solarstrom kann über 20 Jahre hinweg eine Vergütung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz in Anspruch genommen werden. Die Fördersätze werden quartalsweise anhand des vorangegangenen, deutschlandweiten Zubaus von PV-Anlagen bestimmt („Degression“). Dies hat bei anhaltendem Ausbau zur Folge, dass die Einspeisevergütung von Monat zu Monat sukzessive verringert wird. Der anzusetzende Fördersatz richtet sich dabei nach dem Datum der Inbetriebnahme der Anlage. Für Anlagen, die im April 2021 in Betrieb genommen werden, beträgt der Vergütungssatz 7,81 Ct/kWh (bis 10 kW), 7,59 Ct/kWh (bis 40 kW) und 5,95 Ct/kWh (bis 100 kW).

Je nach Anlagengröße wird eine Mischvergütung gebildet. Für die betrachteten Varianten beträgt diese bei einer angenommenen Inbetriebnahme im April 2021:

- 21,1 kW_p: 7,69 Ct/kWh
- 29,9 kW_p: 7,67 Ct/kWh
- 50,3 kW_p: 7,3 Ct/kWh

Einnahmen durch Stromeigennutzung

Vermiedene Strombezugskosten (ca. 17 Ct./kWh) können als Einnahme gegengerechnet werden. Diese liegen deutlich höher als die Einspeisevergütung, was einem wirtschaftlichen Vorteil durch direkte Nutzung des PV-Stroms („Eigenstromnutzung“) entspricht. Fixkosten (Messstellenbetrieb etc.) sind in den Strombezugskosten nicht enthalten, da diese durch Solarstrom nicht substituiert werden.

Für jede kWh-Eigenverbrauch muss die EEG-Umlage anteilig zu 40 % entrichtet werden

- EEG-Umlage in 2021: 6,5 Ct/kWh → 40 % entspricht 2,6 Ct/kWh
- Ausnahme: Anlagen bis höchstens 30 kW_p und bis max. 30.000 kWh/a **Eigenverbrauch** sind von der EEG-Umlage vollständig befreit
- Sollte ein dritter Letztverbraucher (z.B. Mieter) mit PV-Strom beliefert werden, müssen diese Strommengen messtechnisch erfasst und die volle EEG-Umlage entrichtet werden („Drittmengenabgrenzung“).

Etwaige Preissteigerungen für Netzstrom wurden nicht berücksichtigt, ein möglicherweise steigender Strompreis beeinflusst die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage mit Eigenstromnutzung aber positiv. Sinkende Strombezugskosten entsprechend negativ.

Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Annahme: Inbetriebnahme im April 2021 (Vergütungssatz Netzeinspeisung)

Bedingt durch die Montage der Module über eine Aufständering auf dem Flachdach sind gegenüber einer Aufdach-Montage entsprechend höhere Investitionskosten berücksichtigt.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 6: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der PV-Anlagenvarianten, Grundschule Baar-Ebenhausen

Variante	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Name	28,6 kWp Süd	50 kWp Ost-West	30 kWp Ost-West	21 kWp Süd
Anlagenleistung	28,6 kWp	50,3 kWp	29,9 kWp	21,1 kWp
Investitionskosten	39.000 €	61.000 €	40.000 €	30.000 €
laufende Kosten	550 €	850 €	550 €	400 €
Eigenfinanzierung Amortisationszeit	12 a	16 a	14 a	12 a
Eigenfinanzierung Überschuss nach 20a	22.000 €	16.000 €	16.000 €	19.000 €
Fremdfinanzierung Überschuss nach 20a	18.000 €	9.500 €	11.500 €	16.000 €

➔ Vergleichbares wirtschaftliches Ergebnis der Varianten 1 und 4

- Süd-Ausrichtung des PV-Generators sollte für die Grundschule generell bevorzugt werden
- Amortisationszeit der Varianten beträgt jeweils ca. 12 Jahre
- Unterschiede bei Überschusseinnahmen nach 20a, Variante 1 um ca. 3.000 € (bei EF) bzw. 2.000 € (bei FF) im Vorteil gegenüber Variante 4

➔ Varianten 2 und 3 gegenüber Süd-Varianten (1 und 4) im Nachteil

- Reduzierter Ertrag und kaum Vorteile bei der Eigenstromnutzung gegenüber Süd-ausgerichteten PV-Modulen
- Insgesamt geringere Überschüsse (kumuliert nach 20 Jahren Betrachtungszeitraum)
 - Erhöhte Amortisationszeit von 14 bis 16 Jahren.

4.3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Liegenschaft für Solaranlage gut geeignet

- hohe spezifische Erträge sind erreichbar, Verschattung durch Turnhalle und Neubau beachten!
- Statik des Flachdachs noch zu prüfen

Direkte Eigenstromnutzung (= PV-Anlage mit Überschusseinspeisung ohne Stromspeicher) bietet größten wirtschaftlichen Vorteil

- Anpassungen in der Elektroverteilung notwendig (Zusammenfassung der Abgänge „Licht + Kraft Schule“, „Neubau“ und „Heizung“, um Eigenstromnutzung zu maximieren).

Wirtschaftlichkeit eines Stromspeichers gegenwärtig nicht gegeben.

- Nachrüstung zu einem späteren Zeitpunkt möglich

Variante 1 oder Variante 4 als guter Kompromiss wirtschaftlicher und ökologischer Aspekte

- Hohe Eigenverbrauchsquoten bei gleichzeitig akzeptablen solaren Deckungsgrad
- Schärfung der Wirtschaftlichkeit anhand konkreter Angebote empfohlen
- Letztendliche Anlagengröße durch Flächenangebot limitiert
- in keinem Fall 30 kWp überschreiten.
 - PV-Anlage der Mensa ggf. berücksichtigen (falls innerhalb von 12 Monaten nach Inbetriebnahme der Mensa-PV-Anlage eine weitere PV-Anlage für die Grundschule umgesetzt und in Betrieb genommen wird, müssen die Leistungen beider Anlagen aufsummiert werden)

Nach Ost-West ausgerichtete PV-Generatoren wirtschaftlich im Nachteil

- Reduzierter Ertrag und kaum Vorteile bei der direkten Eigenstromnutzung führen zu einer insgesamt schlechteren Wirtschaftlichkeit der Variante 2 und 3
- Vorteil: erhöhte installierbare Leistung durch geringe Modulabstände

Tabelle 7: Zusammenfassung der Ergebnisse der PV-Anlagenvarianten, Grundschule Baar-Ebenhausen

		V1: 28,6 kW _p Süd	V2: 50,3 kW _p Ost-West	V3: 30 kW _p Ost-West	V4: 21 kW _p Süd
Leistung PV-Generator	kW _p	28,6	50,3	29,9	21,1
Erwarteter Jahresertrag	kWh/a	32.400	50.900	30.000	23.800
spez. Ertrag	kWh/kW _p	1.140	1.010	1.000	1.125
Strombedarf	kWh	33.700	33.700	33.700	33.700
Stromeigennutzung	%	39	28	42	49
	kWh	12.600	14.200	12.500	11.700
Solarer Deckungsgrad	%	37	42	37	35
Investitionskosten	€	39.000	61.000	40.000	30.000
Jährliche Kosten	€/a	550	850	550	400
Amortisationszeit bei Eigenfinanzierung	a	12	16	14	12
Überschusseinnahmen nach 20a bei Eigenfinanzierung	€	22.000	16.000	16.000	19.000
Überschusseinnahmen nach 20a bei Fremdfinanzierung	€	18.000	9.500	11.500	16.000

4.4 Kita Regenbogen - Potenzialstudie Photovoltaik

Im Rahmen des Projekts und basierend auf den gesammelten Informationen bzgl. des Strombedarfs der Liegenschaft (hochauflösende Messdatenerfassung relevanter Stromzähler) wurde eine Potenzialstudie zur Photovoltaik am Standort erarbeitet. Dabei wurden

- die technischen Rahmenbedingungen und Möglichkeiten analysiert,
- der zu erwartende solare Deckungsgrad und Eigenverbrauchsquote auf Grundlage von Anlagensimulationen prognostiziert sowie
- der ökologische Nutzen und Wirtschaftlichkeit untersucht.

4.4.1 Rahmenbedingungen, PV-Anlage im Bestand

Der Gebäudebestand der Kindertagesstätte ist in Kindergarten und Kinderkrippe gegliedert. Beide Gebäude sind in einem energetischen Verbund (Wärme, Strom, Wasser).

Auf dem Gebäude der Kinderkrippe ist bereits eine PV-Anlage installiert. Die Anlage wurde im ersten Halbjahr 2010 in Betrieb genommen und verfügt über eine Generatorleistung von 13,5 kW_p. Nach Ende des Förderzeitraums im Jahr 2030 könnte die Bestandsanlage, die gegenwärtig vollständig in das Netz einspeist, in die Überschusseinspeisung umfunktioniert werden, um PV-Strom direkt selbst zu nutzen.

Akut besteht Handlungsbedarf, die PV-Anlage im Bestand zu reparieren. In der Vergangenheit kam es bereits zum Austausch defekter Wechselrichter - während der Projektlaufzeit wurde der Überspannungsschutz ausgelöst und alle Wechselrichter vom Netz getrennt. Auf Empfehlung lässt die Gemeinde einen Austausch der bisherigen Wechselrichter prüfen. Ursprünglich war der 13,5 kW_p PV-Generator an insgesamt drei, jeweils einphasige Wechselrichter angeschlossen. Es soll geprüft werden, ob die drei Wechselrichter im Bestand durch einen einzigen, dreiphasigen Wechselrichter ersetzt werden können. Voraussichtlich geht dieser Austausch auch mit einer neuen Verschaltung der Module (Strings) einher, da die Stringspannung im Bestand im Bereich von 250 V_{DC,MPP} liegt und moderne Wechselrichter tendenziell für höhere DC-Spannungsniveaus um etwa 600 V_{DC,MPP} ausgelegt sind. Zusätzlich wird empfohlen den Blitzschutz und die Überspannungsschutzeinrichtungen zu prüfen und ggf. anzupassen.

Die nach Süden gerichteten Dachflächen des Kindergartens kommt als potenzielle Belegungsfläche für eine weitere PV-Anlage in Frage. Das Dach ist „zweigeteilt“ - im unteren Teil des Daches (roter Bereich in Abbildung 44, rechts) sind diverse Aussparungen vorhanden. Der obere Dachteil (orange in Abbildung 44) dagegen, bietet eine vergleichsweise freie Belegungsfläche. Zusätzlich ist das Gebäude von Bäumen umgeben, deren Schattenwurf tendenziell die untere Dachfläche betrifft.



Abbildung 44: potenzielle PV-Belegungsflächen auf dem Süddach des Kindergartens, Luftbild Datenquelle: Bayerische Vermessungsverwaltung - www.geodaten-bayern.de

4.4.2 Elektrisches Lastprofil der Liegenschaft

Der Strombedarf der Kita wird im Bestand über einen Hauptzähler gemessen, der im Rahmen des Projekts kontinuierlich erfasst worden sind und damit das elektrische Lastprofil vorliegt (siehe Lastprofil als Heatmap in Abbildung 45). Der, für die Simulationen hinterlegte Lastgang entspricht einem jährlichen Strombedarf von rund **15.200 kWh**.

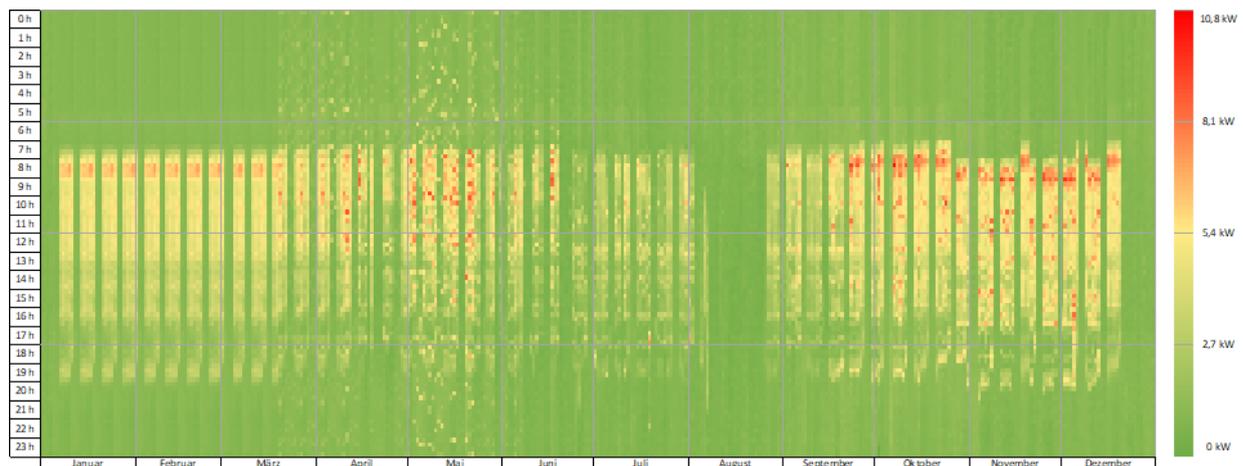


Abbildung 45: elektrisches Lastprofil der Kita Regenbogen (Carpet-Plot / Heatmap)

Die Darstellung des elektrischen Lastprofils in Form einer Heatmap, wie in Abbildung 45 dargestellt, dient der Visualisierung von auftretenden Lastspitzen bzw. Zeiten erhöhten elektrischen Energiebedarfs über den Tagesverlauf hinweg. In X-Richtung sind jeweils die Tage des Referenzjahres aufgetragen, in Y-Richtung die Uhrzeit der Tage. Abhängig der Höhe der vorliegenden elektrischen Last zur jeweiligen Uhrzeit an einem Tag wird der Zeitbereich mit einer, der vorliegenden Last entsprechenden Farbe gekennzeichnet (siehe Skala rechts der Heatmap).

Hohe elektrische Lasten, also auch erhöhter elektrischer Energiebedarf entsprechen gelben und roten Farbtönen. Aus dem Carpet-Plot geht hervor, dass der erhöhte elektrische Energiebedarf zwischen 7 und 16 Uhr vorliegt. An Wochenenden, Feiertagen und in den Ferienzeiten (Feriengruppen zu Ostern und Pfingsten; gemeinsame Sommer- und Weihnachtsferien) ist dies aber nicht der Fall. Hier entspricht der elektrische Energiebedarf eher der Grundlast. Da der elektrische Energiebedarf hauptsächlich tagsüber auftritt liegen damit bereits gute Voraussetzungen zur direkten Eigenstromnutzung vor, da es zu diesen Tageszeiten zur Überlagerung von möglicher PV-Stromerzeugung und erhöhten Strombedarf der Liegenschaft kommt.

4.4.3 Potenzialabschätzung und Vordimensionierung

Vor der Ausarbeitung geeigneter Anlagenvarianten wurde zunächst das Potenzial von PV-Anlagen hinsichtlich der Eigenverbrauchsquote und dem solaren Deckungsgrad untersucht.

- **Eigenverbrauchsquote (EVQ):** Welcher Anteil des erzeugten PV-Stroms kann selbst genutzt werden
 - Wirtschaftliche Aspekte im Vordergrund (PV-Stromgestehungskosten i.d.R. günstiger als Strom aus dem Netz)
- **Solarer Deckungsgrad (SDG):** welcher Anteil des Strombedarfs der Liegenschaft wird über PV-Strom gedeckt
 - Ökologische Aspekte im Vordergrund („Erneuerbare Energien anstatt Netzstrom“)

Zur Berechnung der Liegenschaftsindividuellen EVQ und SDG werden das elektrische Lastprofil sowie der zu erwartende PV-Ertrag am Standort grundlegend benötigt. Das elektrische Lastprofil ist bereits bekannt - zur Ermittlung des zu erwartenden PV-Ertrags am Standort, ist eine entsprechende Simulation notwendig.

Auf Grundlage von Luftbildern, bereitgestellten Bestandsplänen sowie gesammelten Informationen vor Ort wurde ein entsprechendes 3D-Modell der Liegenschaft sowie der verschattungsrelevanten Umgebung erstellt.

Das Modell wurde in der Simulationssoftware (PV*Sol premium 2020) hinterlegt. Als Referenzmodule für die Simulation wurden monokristalline PV-Module mit 340 W_p gewählt, welche via Aufdach-Montagesystem befestigt werden.



Abbildung 46: 3D-Gebäudemodell inklusive exemplarische PV-Anlage der Kita Regenbogen

Zunächst wurde das PV-Ertragsprofil einer exemplarischen PV-Anlage mittels Simulationssoftware berechnet und im Anschluss normiert. Das normierte PV-Ertragsprofil dient als Datengrundlage für ein Analysetool zur Potenzialabschätzung, in das auch das elektrische Lastprofil der Liegenschaft hinterlegt wird. Im Analysetool kann die PV-Anlagengröße, d.h. die Generatorleistung in kW_p frei eingestellt werden. Außerdem kann bei den Berechnungen im Analysetool ein Batteriespeicher berücksichtigt werden, dessen Speicherkapazität wiederum frei definierbar ist.

Das Ergebnis des Analysetools sind Kennfelder zur Eigenverbrauchsquote und dem solaren Deckungsgrad der Liegenschaft, welche in Abbildung 47 dargestellt sind. Anhand dieser Kennfelder ist bereits eine Vordimensionierung sinnvoller bzw. geeigneter Anlagengrößen möglich, um die nachgelagerte und zeitaufwändige Detailsimulation in der Simulationssoftware vorab einzugrenzen.

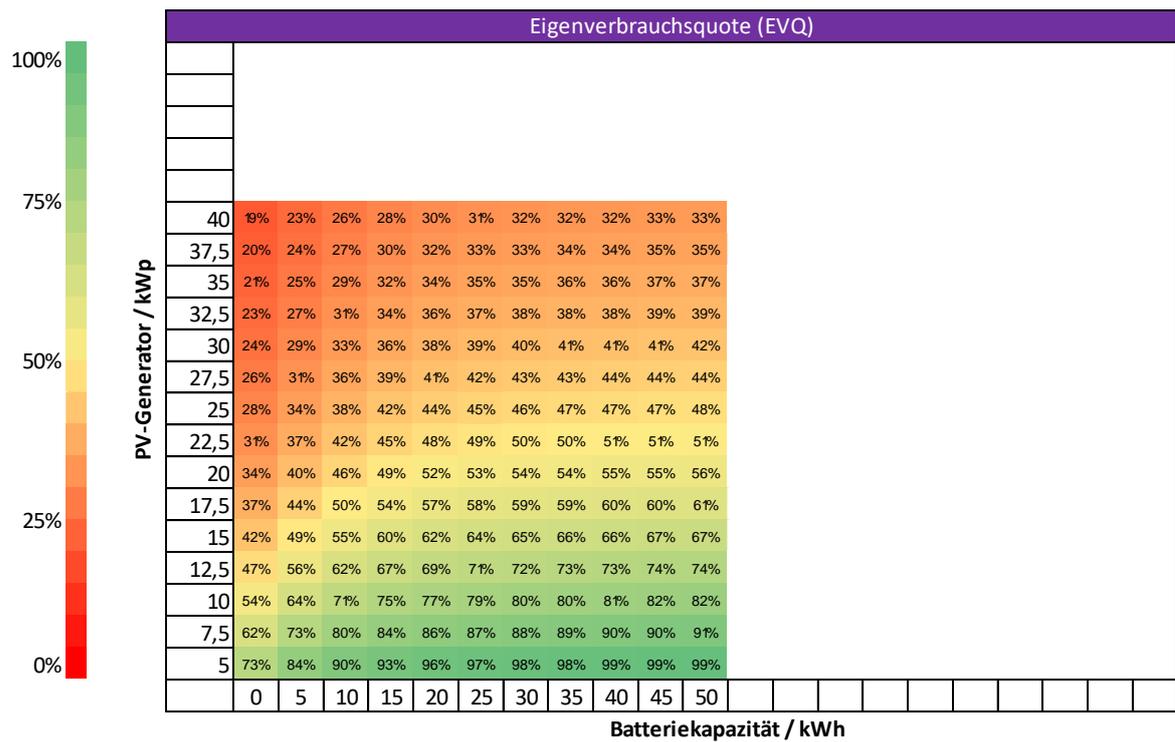
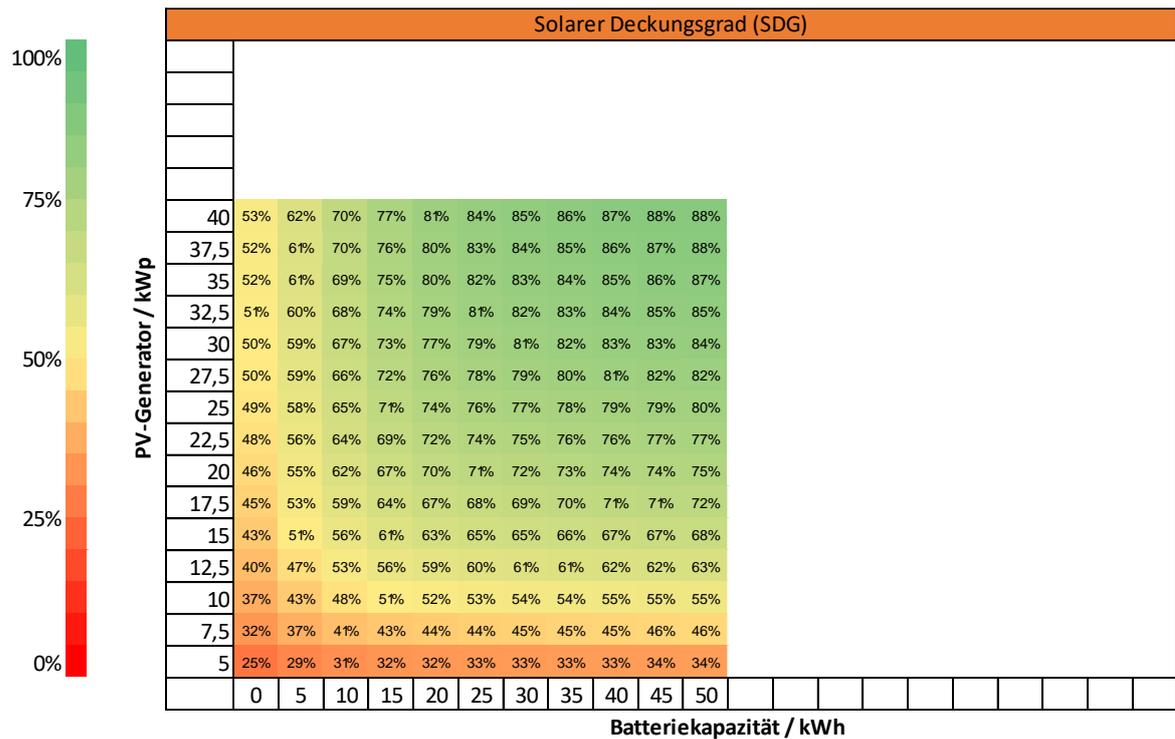


Abbildung 47: Potenzialanalyse Solarer Deckungsgrad (oben) und Eigenverbrauchsquote (unten) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung und Batteriekapazität, Kita Regenbogen

Ergebnisse Potenzialanalyse:

- Solarer Deckungsgrad
 - Je größer der PV-Generator (und Speicher) ausfällt, desto höher ist der SDG
 - Maximal ca. 53 % SDG (@ 40 kW_p) bei direkter Eigenstromnutzung
 - Maximal ca. 88 % SDG mit Speicher (40 kW_p & 45 kWh Speicherkapazität)
- Eigenverbrauchsquote
 - Gegenläufig zum SDG. Vollständige Nutzung des PV-Stromertrags bei direkter Eigenstromnutzung (d.h. ohne Speicher) nicht möglich, eventuell bei < 5 kW_p Anlagenleistung erreichbar.
 - Niedrige EVQ als Indikator für Überdimensionierung
- Energiespeicher können zeitliche Unterschiede bei Erzeugung und Verbrauch kompensieren, sind aber mit hohen Kosten verbunden
 - Signifikante Erhöhung von SDG und EVQ
 - Wirtschaftlichkeit i.d.R. nicht gegeben
- Kompromiss: SDG ≈ EVQ bei ca. 15 kW_p
 - Technisch ausgewogene Anlagengröße

4.4.4 Variantenbetrachtung und Simulationsergebnisse

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Potenzialanalyse sowie der Gegebenheiten vor Ort wurden insgesamt drei Varianten (vgl. Abbildung 48) im Detail betrachtet:

- Variante 1: „Vollbelegung“ - Süd-Ausrichtung, 30 kW_p
- Variante 2: „technisch ausgewogen“ - Süd-Ausrichtung: 15 kW_p
- Variante 3: „Zwischenlösung“ - Süd-Ausrichtung, 10 kW_p

Variante 3 wurde vor dem Hintergrund einer eventuellen Umstellung der Bestandsanlage der Kinderkrippe hin zur Überschusseinspeisung gewählt. Sollte die Anlage ab 2030 mit Eigenstromnutzung betrieben werden und auf dem Dach des Kindergartens ebenfalls eine PV-Anlage installiert worden sein, würden beide PV-Anlagen denselben Verbraucher (Kindertagesstätte gesamt) beliefern und damit in „Konkurrenz“ stehen. Dies hat im Wesentlichen wirtschaftliche Auswirkungen, da der direkte Eigenverbrauch von PV-Strom mit den größten Einnahmen verbunden ist. Sollten die beiden Anlagen ab 2030 nun „in Konkurrenz“ stehen, würde sich der Eigenverbrauchsanteil der neuen PV-Anlage reduzieren. Dies hat Auswirkungen auf die Amortisationszeit (länger) und erzielbare kumulierte Überschüsse (niedriger).



Abbildung 48: PV-Simulationsmodelle der Varianten 1 bis 3, Kita Regenbogen

Simulationsergebnisse (Zusammenfassung in Tabelle 8)

Tabelle 8: Simulationsergebnisse der PV-Anlagenvarianten, Kita Regenbogen

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Anlagenleistung in kW _p	29,9	15	9,5
Spezifischer Jahresertrag in kWh/kW _p	1.100	1.110	1.110
Ertragsminderung durch Abschattung in %/a	3	1	1
Stromertrag in kWh/a	33.000	16.700	10.500
Eigenverbrauch in kWh/a	7.800	6.900	5.800
Netzeinspeisung in kWh/a	25.200	9.800	4.700
Eigenverbrauchsquote in %	24	41	55
Solarer Deckungsgrad in %	51	45	38
Vermiedene CO ₂ -Emissionen in t/a	15	10	5

Variante 1:

- hoher spezifischer Ertrag möglich (Verschattung durch Bäume beachten!)
- 24 % des Solarstroms können direkt genutzt werden (= 7.800 kWh/a)
- höchster solarer Deckungsgrad im Variantenvergleich (51 %) und damit auch höchste vermeidbare CO₂-Emissionen von 15 t/a

Variante 2:

- hoher spezifischer Ertrag, Verschattung durch umliegende Bäume kann aufgrund des vergleichsweise geringen Flächenbedarfs des PV-Generators und damit „freie“ Positionierung auf dem Dach vermieden werden
- Eigenverbrauch und solarer Deckungsgrad ausgewogen (41 % bzw. 45 %)
- ca. 10 t CO₂-Emissionen können jährlich vermieden werden

Variante 3:

- hoher spezifischer Ertrag, Verschattung durch umliegende Bäume unproblematisch (analog zu Variante 2)
- Erhöhte Eigenverbrauchsquote (55 %), absolut gesehen aber rund 1.100 kWh/a weniger direkter Eigenverbrauch als Variante 2

4.4.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Grundlegende Annahmen und Rahmenbedingungen

Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der zuvor simulierten Anlagenvarianten wurden marktübliche Durchschnittskosten angesetzt. Der spezifische Invest in € pro kW-Anlagenleistung sinkt mit steigender Anlagengröße aufgrund von Skalierungseffekten. Weitere Kosten können durch zusätzlich benötigte Gerüste, speziellen Anforderungen an den Blitzschutz etc. entstehen.

Die jährlichen Betriebskosten sowie Kosten für Versicherung und Verwaltung orientieren sich jeweils an der Anlagengröße.

Bei einer vollständigen Fremdfinanzierung der Maßnahmen wird ein Zinssatz von 1,0 % zugrunde gelegt. Der Betrachtungszeitraum beträgt 20 Jahre - unabhängig davon ob eigen- oder fremdfinanziert. Sämtliche Kosten in € netto.

Einnahmen durch Netzeinspeisung (Einspeisevergütung)

Für eingespeisten Solarstrom kann über 20 Jahre hinweg eine Vergütung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz in Anspruch genommen werden. Die Fördersätze werden quartalsweise anhand des vorangegangenen, deutschlandweiten Zubaus von PV-Anlagen bestimmt („Degression“). Dies hat bei anhaltendem Ausbau zur Folge, dass die Einspeisevergütung von Monat zu Monat sukzessive verringert wird. Der anzusetzende Fördersatz richtet sich dabei nach dem Datum der Inbetriebnahme der Anlage. Für Anlagen, die im April 2021 in Betrieb genommen werden, beträgt der Vergütungssatz 7,81 Ct/kWh (bis 10 kW), 7,59 Ct/kWh (bis 40 kW) und 5,95 Ct/kWh (bis 100 kW).

Je nach Anlagengröße wird eine Mischvergütung gebildet. Für die betrachteten Varianten beträgt diese bei einer angenommenen Inbetriebnahme im April 2021:

- 9,5 kW_p: 7,81 Ct/kWh
- 15 kW_p: 7,74 Ct/kWh
- 29,9 kW_p: 7,67 Ct/kWh

Einnahmen durch Stromeigennutzung

Vermiedene Strombezugskosten (ca. 17 Ct/kWh) können als Einnahme gegengerechnet werden. Diese liegen deutlich höher als die Einspeisevergütung, was einem wirtschaftlichen Vorteil durch direkte Nutzung des PV-Stroms („Eigenstromnutzung“) entspricht. Fixkosten (Messstellenbetrieb etc.) sind in den Strombezugskosten nicht enthalten, da diese durch Solarstrom nicht substituiert werden.

Für jede kWh-Eigenverbrauch muss die EEG-Umlage anteilig zu 40 % entrichtet werden

- EEG-Umlage in 2021: 6,5 Ct/kWh → 40 % entspricht 2,6 Ct/kWh
- Ausnahme: Anlagen bis höchstens 30 kWp und bis max. 30.000 kWh/a **Eigenverbrauch** sind von der EEG-Umlage vollständig befreit
- Sollte ein dritter Letztverbraucher (z.B. Mieter) mit PV-Strom beliefert werden, müssen diese Strommengen messtechnisch erfasst und die volle EEG-Umlage entrichtet werden („Drittmengenabgrenzung“).

Etwaige Preissteigerungen für Netzstrom wurden nicht berücksichtigt, ein möglicherweise steigender Strompreis beeinflusst die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage mit Eigenstromnutzung aber positiv. Sinkende Strombezugskosten entsprechend negativ.

Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Annahme: Inbetriebnahme im April 2021 (Vergütungssatz Netzeinspeisung)

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 9: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der PV-Anlagenvarianten, Kita Regenbogen

Variante	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Name	29,9 kWp Süd	15 kWp Süd	10 kWp Süd
Anlagenleistung	29,9 kWp	15,0 kWp	9,5 kWp
Investitionskosten	37.000 €	20.000 €	13.000 €
laufende Kosten	500 €	250 €	150 €
Eigenfinanzierung Amortisationszeit	14 a	12 a	11 a
Eigenfinanzierung Überschuss nach 20a	16.000 €	12.500 €	10.500 €
Fremdfinanzierung Überschuss nach 20a	12.500 €	10.500 €	9.000 €

- Variante 1 mit höchsten Investitionskosten verbunden
 - kumulierte Überschüsse nach 20a: 16.000 € bei Eigenfinanzierung bzw. 12.500 € bei Fremdfinanzierung
 - im direkten Variantenvergleich höchster absoluter Gewinn aber längste Amortisationszeit (14 a)
 - Bei Umstellung der Bestandsanlage auf dem Dach der Kinderkrippe ist mit niedrigeren Überschüssen zu rechnen!
 - Anlage in Bezug auf den gegenwärtigen Strombedarf bereits überdimensioniert
 - Zusammen mit PV-Anlage der Krippe (Umfunktionieren zur Überschusseinspeisung in 2030): ca. 43 kW_p

- Variante 2 als „Mittelweg“
 - Amortisationszeit von ca. 12 Jahren
 - sollte die Anlage noch in 2021 in Betrieb gehen, wäre bis 2030 (Umfunktionieren der Bestandsanlage der Krippe) ein Großteil der neuen Anlage bereits refinanziert.

- Variante 3 mit kleinster Anlagenleistung im Variantenvergleich
 - Im Variantenvergleich mit 11 Jahren die kürzeste Amortisationszeit → gute Investitionssicherheit

- Alle betrachteten Varianten mit insgesamt guter Wirtschaftlichkeit

- Größter Hebel der Wirtschaftlichkeit ist der Strompreis für den Netzbezug und der Strombedarf der Liegenschaft
 - Umfunktionieren der Bestands-PV-Anlage der Kinderkrippe zur Eigenstromnutzung kann zu einer Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit der neuen PV-Anlage führen
 - Mit zunehmenden Strombedarf und höheren Kosten für den Strombezug aus dem Netz kann dies aber auch kompensiert werden.
 - Regulatorische Änderungen und neue Vermarktungsmöglichkeiten für PV-Strom in Zukunft zu erwarten
 - Keine fundierte Abschätzung möglich

4.4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Liegenschaft für Solaranlage gut geeignet

- hohe spezifische Erträge sind erreichbar, Verschattung durch Bäume zu beachten (ggf. kürzen)

Direkte Eigenstromnutzung (= PV-Anlage mit Überschusseinspeisung ohne Stromspeicher) bietet größten wirtschaftlichen Vorteil

Wirtschaftlichkeit eines Stromspeichers gegenwärtig nicht gegeben.

- Nachrüstung zu einem späteren Zeitpunkt möglich (wenn Speichersysteme bis dahin kostengünstiger sind)

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

- Technisch ausgewogene Anlagenleistung bei ca. 15 kW_p (= Variante 2)
 - akzeptabler Eigenverbrauchsanteil und solarer Deckungsgrad (41 % / 45 %)
- Variante 3 (ca. 10 kW_p) mit tendenziell kürzester Amortisationszeit von ca. 11 Jahren
- Einholung von Angeboten zur Schärfung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu empfehlen

Tabelle 10: Zusammenfassung der Ergebnisse der PV-Anlagenvarianten, Kita Regenbogen

		V1: 30 kW _p Süd	V2: 15 kW _p Süd	V3: 10 kW _p Süd
Leistung PV-Generator	kW _p	29,9	15	9,5
Erwarteter Jahresertrag	kWh/a	33.000	16.700	10.500
spez. Ertrag	kWh/kW _p	1.100	1.110	1.110
Strombedarf	kWh	15.200	15.200	15.200
Stromeigennutzung	%	24	41	55
Solarer Deckungsgrad	%	51	45	38
Investitionskosten	€	37.000	20.000	13.000
Jährliche Kosten	€/a	500	250	150
Amortisationszeit bei Eigenfinanzierung	a	13	12	11
Überschusseinnahmen nach 20a bei Eigenfinanzierung	€	16.000	12.500	10.500
Überschusseinnahmen nach 20a bei Fremdfinanzierung	€	12.500	10.500	9.000

4.5 Sportheim - Potenzialstudie Photovoltaik

Im Rahmen des Projekts und basierend auf den gesammelten Informationen bzgl. des Strombedarfs der Liegenschaft (hochauflösende Messdatenerfassung relevanter Stromzähler) wurde eine Potenzialstudie zur Photovoltaik am Standort erarbeitet. Dabei wurden

- die technischen Rahmenbedingungen und Möglichkeiten analysiert,
- der zu erwartende solare Deckungsgrad und Eigenverbrauchsquote auf Grundlage von Anlagensimulationen prognostiziert sowie
- der ökologische Nutzen und Wirtschaftlichkeit untersucht.

4.5.1 Rahmenbedingungen

Das Sportheim in Baar-Ebenhausen besteht aus mehreren Gebäudeteilen und bietet Dachflächen in Ost- und West-Ausrichtung sowie ein Flachdach (Sporthalle) als potenzielle Belegungsflächen für PV-Generatoren. Gegenwärtig ist noch keine PV-Anlage vorhanden.

Vorwiegend sind nach Ost und West um ca. 20° geneigte Dachflächen vorhanden (z.B. Satteldach der Wirtschaft und Eingang/Wohnung). Das Flachdach der Sporthalle ist nahezu südausgerichtet und verfügt über drei Oberlichter (im süd-östlichen Bereich des Flachdachs). Es wird davon ausgegangen, dass die Statik des Flachdachs für die Installation einer PV-Anlage ausreicht.

Die einzelnen Gebäudeteile sind teilweise ineinander verschachtelt und weisen unterschiedliche Höhen auf, sodass es zur gegenseitigen Verschattung von Dachflächen kommen kann. Ebenso ist durch umliegende Bäume eine weitere Verschattungsquelle vorhanden (siehe Abbildung 49). Weitere Verschattungsquellen sind durch Schornsteine vorhanden.

Teile der Liegenschaft sind vermietet. Dazu gehören die Wirtschaft mit Küche sowie eine Wohnung im OG des Eingangs.



Abbildung 49: Gebäudeteile des Sportheims (oben) und Ansicht der Liegenschaft vom Tennisplatz aus (unten), Luftbild Datenquelle: Bayerische Vermessungsverwaltung - www.geodaten-bayern.de

4.5.2 Elektrisches Lastprofil der Liegenschaft

Der Strombedarf des Sportheims wird über zwei Hauptzähler gemessen, die im Rahmen des Projekts kontinuierlich erfasst worden sind und damit das elektrische Lastprofil vorliegt (siehe Lastprofil als Heatmap in Abbildung 50). Der, für die Simulationen hinterlegte Lastgang entspricht einem jährlichen Strombedarf von rund **53.200 kWh**.

Von der Betrachtung ausgeschlossen ist der Strombedarf der Wohnung sowie der Wirtschaft mit Küche. Da aufgrund des Mietverhältnisses der Strombedarf dieser Verbraucher (Dritte Letztverbraucher) bei einer Eigenstromnutzung von PV-Strom die EEG-Umlage im vollen Umfang bezahlt werden muss, sind diese beiden Verbraucher ausgeschlossen worden.

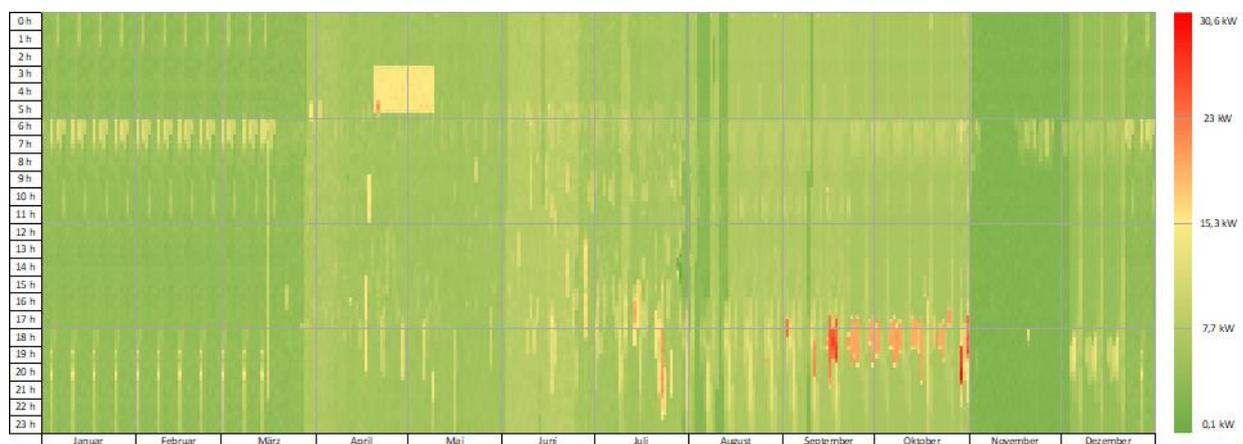


Abbildung 50: elektrisches Lastprofil des Sportheims Baar-Ebenhausen (Carpet-Plot / Heatmap)

Die Darstellung des elektrischen Lastprofils in Form einer Heatmap, wie in Abbildung 50 dargestellt, dient der Visualisierung von auftretenden Lastspitzen bzw. Zeiten erhöhten elektrischen Energiebedarfs über den Tagesverlauf hinweg. In X-Richtung sind jeweils die Tage des Referenzjahres aufgetragen, in Y-Richtung die Uhrzeit der Tage. Abhängig der Höhe der vorliegenden elektrischen Last zur jeweiligen Uhrzeit an einem Tag wird der Zeitbereich mit einer, der vorliegenden Last entsprechenden Farbe gekennzeichnet (siehe Skala rechts der Heatmap).

Hohe elektrische Lasten, also auch erhöhter elektrischer Energiebedarf entsprechen gelben und roten Farbtönen. Aus dem Carpet-Plot geht hervor, dass der erhöhte elektrische Energiebedarf zwischen 16 und 22 Uhr vorliegt. Da der erhöhte elektrische Energiebedarf hauptsächlich in den Abendstunden vorliegt, kann ein nach Westen orientierter PV-Generator sinnvoll sein, um die PV-Stromerzeugung und direkte Eigenstromnutzung in diesem Zeitfenster zu verlängern (gegenüber einem nach Süden orientierten Generator).

4.5.3 Potenzialabschätzung und Vordimensionierung

Vor der Ausarbeitung geeigneter Anlagenvarianten wurde zunächst das Potenzial von PV-Anlagen hinsichtlich der Eigenverbrauchsquote und dem solaren Deckungsgrad untersucht.

- **Eigenverbrauchsquote (EVQ):** Welcher Anteil des erzeugten PV-Stroms kann selbst genutzt werden
 - Wirtschaftliche Aspekte im Vordergrund (PV-Stromgestehungskosten i.d.R. günstiger als Strom aus dem Netz)
- **Solarer Deckungsgrad (SDG):** welcher Anteil des Strombedarfs der Liegenschaft wird über PV-Strom gedeckt
 - Ökologische Aspekte im Vordergrund („Erneuerbare Energien anstatt Netzstrom“)

Zur Berechnung der Liegenschaftsindividuellen EVQ und SDG werden das elektrische Lastprofil sowie der zu erwartende PV-Ertrag am Standort grundlegend benötigt. Das elektrische Lastprofil ist bereits bekannt - zur Ermittlung des zu erwartenden PV-Ertrags am Standort, ist eine entsprechende Simulation notwendig.

Auf Grundlage von Luftbildern, bereitgestellten Bestandsplänen sowie gesammelten Informationen vor Ort wurde ein entsprechendes 3D-Modell der Liegenschaft sowie der verschattungsrelevanten Umgebung erstellt.

Das Modell wurde in der Simulationssoftware (PV*Sol premium 2020) hinterlegt. Als Referenzmodule für die Simulation wurden monokristalline PV-Module mit 340 W_p gewählt, welche via Aufdach-Montagesystem (Ost-West-Dächer) bzw. Aufständering (Flachdach) befestigt werden.



Abbildung 51: 3D-Gebäudemodell inklusive exemplarische PV-Anlage, Sportheim Baar-Ebenhausen

Zunächst wurde das PV-Ertragsprofil einer exemplarischen PV-Anlage mittels Simulationssoftware berechnet und im Anschluss normiert. Das normierte PV-Ertragsprofil dient als Datengrundlage für ein Analysetool zur Potenzialabschätzung, in das auch das elektrische Lastprofil der Liegenschaft hinterlegt wird. Im Analysetool kann die PV-Anlagengröße, d.h. die Generatorleistung in kW_p frei eingestellt werden. Außerdem kann bei den Berechnungen im Analysetool ein Batteriespeicher berücksichtigt werden, dessen Speicherkapazität wiederum frei definierbar ist.

Das Ergebnis des Analysetools sind Kennfelder zur Eigenverbrauchsquote und dem solaren Deckungsgrad der Liegenschaft, welche in Abbildung 52 dargestellt sind. Anhand dieser Kennfelder ist bereits eine Vordimensionierung sinnvoller bzw. geeigneter Anlagengrößen möglich, um die nachgelagerte und zeitaufwändige Detailsimulation in der Simulationssoftware vorab einzugrenzen.

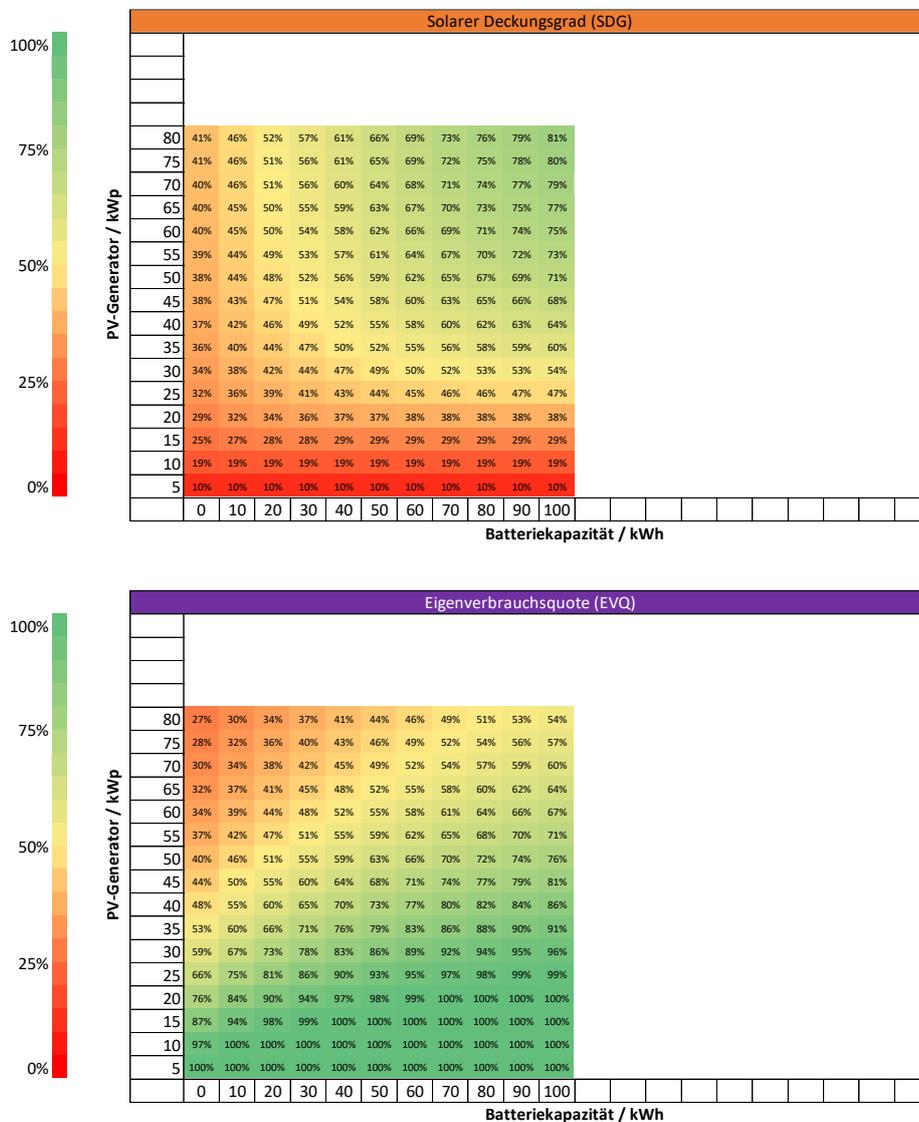


Abbildung 52: Potenzialanalyse Solarer Deckungsgrad (oben) und Eigenverbrauchsquote (unten) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung und Batteriekapazität, Sportheim Baar-Ebenhausen

Ergebnisse Potenzialanalyse:

- Solarer Deckungsgrad
 - Je größer der PV-Generator (und Speicher) ausfällt, desto höher ist der SDG
 - Maximal ca. 41 % SDG (@ 80 kW_p) bei direkter Eigenstromnutzung
 - Maximal ca. 81 % SDG mit Speicher (80 kW_p & 100 kWh Speicherkapazität)
- Eigenverbrauchsquote
 - Gegenläufig zum SDG. Vollständige Nutzung des PV-Stromertrags (entspricht 100 % EVQ) nur bei kleiner Anlagengröße möglich.
 - Niedrige EVQ als Indikator für Überdimensionierung
- Energiespeicher können zeitliche Unterschiede bei Erzeugung und Verbrauch kompensieren, sind aber mit hohen Kosten verbunden
 - Signifikante Erhöhung von SDG und EVQ
 - Wirtschaftlichkeit i.d.R. nicht gegeben
- Kompromiss: SDG ≈ EVQ → zwischen 50 und 55 kW_p
 - technischer Kompromiss! Wirtschaftlichkeit wird von weiteren Aspekten beeinflusst (regulatorisch, fördertechnisch, ...)

4.5.4 Variantenbetrachtung und Simulationsergebnisse

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Potenzialanalyse sowie der Gegebenheiten vor Ort wurden insgesamt drei Varianten (vgl. Abbildung 53) im Detail betrachtet:

- **Variante 1:** Süd-Ausrichtung, 29,9 kW_p
- **Variante 2:** Ost-West-Ausrichtung: 29,9 kW_p
- **Variante 3:** „Vollbelegung“ - Süd und Ost-West-Ausrichtung: 97,9 kW_p

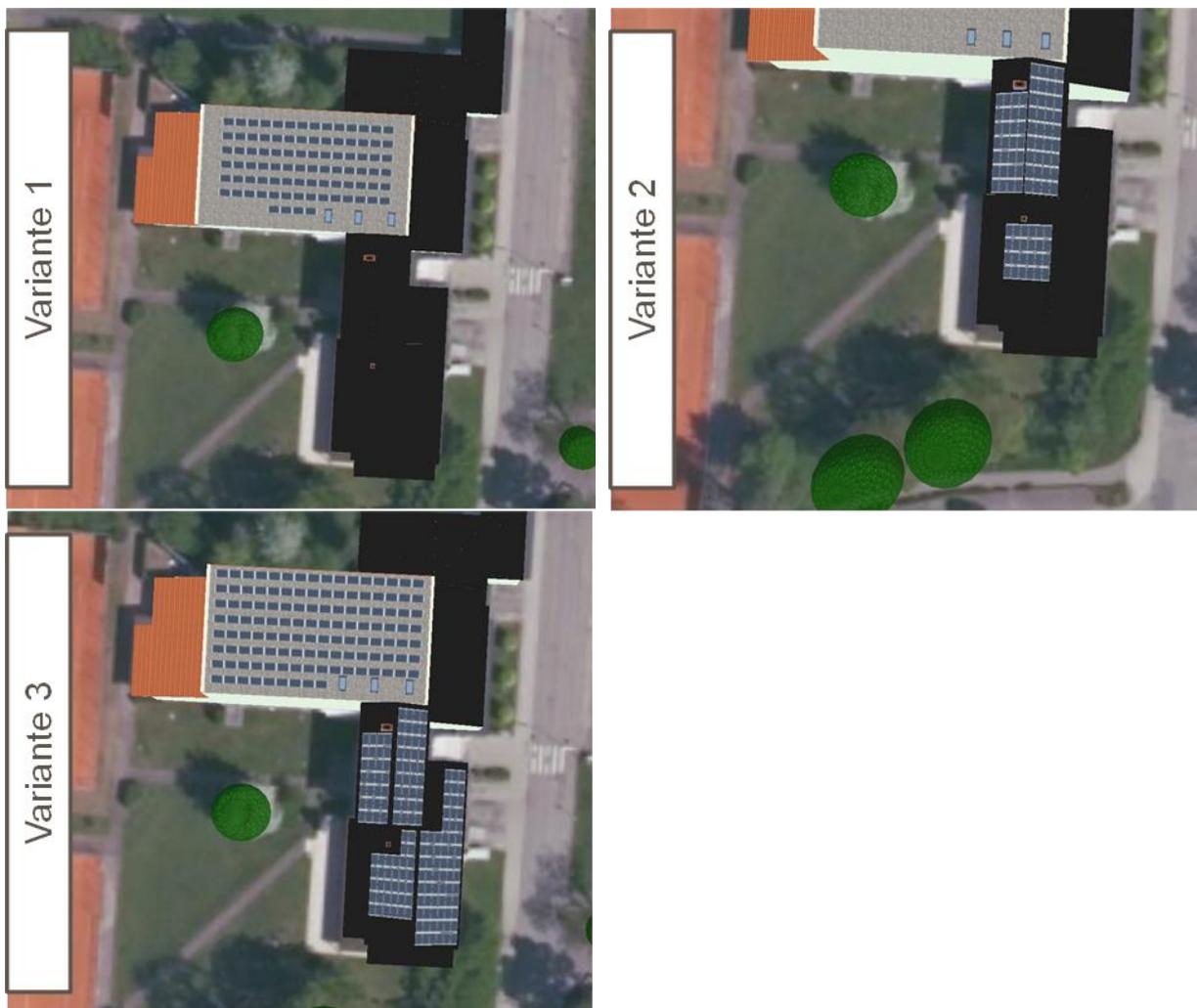


Abbildung 53: PV-Simulationsmodelle der Varianten 1 bis 3, Sportheim Baar-Ebenhausen

Simulationsergebnisse (Zusammenfassung in Tabelle 11)

Tabelle 11: Simulationsergebnisse der PV-Anlagenvarianten, Sportheim

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Anlagenleistung in kW _p	29,9	29,9	97,9
Spezifischer Jahresertrag in kWh/kW _p	1.140	1.000	1.060
Ertragsminderung durch Abschattung in %/a	1	2	2
Stromertrag in kWh/a	34.000	30.000	104.000
Eigenverbrauch in kWh/a	17.800	18.000	22.000
Netzeinspeisung in kWh/a	16.200	12.000	82.000
Eigenverbrauchsquote in %	52	60	21
Solarer Deckungsgrad in %	33	34	41
Vermiedene CO ₂ -Emissionen in t/a	16	14	48

Variante 1:

- hoher spezifischer Ertrag möglich, nahezu verschattungsfrei
- 52 % des Solarstroms können direkt genutzt werden (= 17.800 kWh/a)
- 33 % des jährlichen Strombedarf können mit PV-Strom gedeckt werden

Variante 2:

- Noch guter spezifischer Ertrag erreichbar (bedingt durch Ost-West-Ausrichtung)
- Verschattungsrelevante Objekte zu beachten (Schornsteine, Bäume)
- 60 % Eigenverbrauchsquote
- Obwohl der Ertrag gegenüber Variante 1 (identische Anlagenleistung aber Südausrichtung) um ca. 12 % bzw. 4.000 kWh/a geringer ist, bleibt der solare Deckungsgrad sowie der absolute Eigenverbrauch nahezu gleich - tendenziell sogar besser. Dies ist bedingt durch das vorliegende Lastprofil (erhöhter Verbrauch in den Abendstunden) und den PV-Generatoren in Richtung West, die in den Abendstunden gegenüber einem nach Süden ausgerichteten PV-Generator mehr Ertrag erzielen können (Sonnenstand).

Variante 3:

- Entspricht einer Vollbelegung der verfügbaren Dachflächen des Sportheims
 - Anmerkung: ab 100 kW_p muss der PV-Strom über einen Direktvermarkter verkauft werden. Die klassische „Einspeisevergütung“ kann hier nicht mehr in Anspruch genommen werden. Für die Direktvermarktung (Dienstleister) entstehen zusätzliche Kosten.
- Aufgrund der gemischten Orientierung aus nach Süden, Osten und Westen orientierten PV-Modulen resultiert ein spezifischer Ertrag von ca. 1.060 kWh/kWp.
- Ca. 21 % des Solarstroms können direkt genutzt werden (EVQ), der solare Deckungsgrad beträgt 41 %.
- Jahresstromertrag der PV-Anlage von 104.000 kWh/a entspricht jährlich ca. 48 t vermiedenen CO₂-Emissionen
- Anlage für den Eigenverbrauch überdimensioniert, ggf. aber wirtschaftlich interessant
 - Trotz einer mehr als Verdreifachung der PV-Anlagenleistung können nur rund 4.000 kWh/a mehr direkter Eigenverbrauch gegenüber den Variante 1 und 2 erreicht werden

4.5.5 WirtschaftlichkeitsbetrachtungGrundlegende Annahmen und Rahmenbedingungen

Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der zuvor simulierten Anlagenvarianten wurden marktübliche Durchschnittskosten angesetzt. Der spezifische Invest in € pro kW-Anlagenleistung sinkt mit steigender Anlagengröße aufgrund von Skalierungseffekten. Weitere Kosten können durch zusätzlich benötigte Gerüste, speziellen Anforderungen an den Blitzschutz etc. entstehen.

Die jährlichen Betriebskosten sowie Kosten für Versicherung und Verwaltung orientieren sich jeweils an der Anlagengröße.

Bei einer vollständigen Fremdfinanzierung der Maßnahmen wird ein Zinssatz von 1,0 % zugrunde gelegt. Der Betrachtungszeitraum beträgt 20 Jahre - unabhängig davon ob eigen- oder fremdfinanziert. Sämtliche Kosten in € netto.

Einnahmen durch Netzeinspeisung (Einspeisevergütung)

Für eingespeisten Solarstrom kann über 20 Jahre hinweg eine Vergütung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz in Anspruch genommen werden. Die Fördersätze werden quartalsweise anhand des vorangegangenen, deutschlandweiten Zubaus von PV-Anlagen bestimmt („Degression“). Dies hat bei anhaltendem Ausbau zur Folge, dass die Einspeisevergütung von Monat zu Monat sukzessive verringert wird. Der anzusetzende Fördersatz richtet sich dabei nach dem Datum der Inbetriebnahme der Anlage. Für Anlagen, die im April 2021 in Betrieb genommen werden, beträgt der Vergütungssatz 7,81 Ct/kWh (bis 10 kW), 7,59 Ct/kWh (bis 40 kW) und 5,95 Ct/kWh (bis 100 kW).

Je nach Anlagengröße wird eine Mischvergütung gebildet. Für die betrachteten Varianten beträgt diese bei einer angenommenen Inbetriebnahme im April 2021:

- 29,9 kW_p: 7,67 Ct/kWh
- 97,9,3 kW_p: 6,64 Ct/kWh

Einnahmen durch Stromeigennutzung

Vermiedene Strombezugskosten (ca. 17 Ct/kWh) können als Einnahme gegengerechnet werden. Diese liegen deutlich höher als die Einspeisevergütung, was einem wirtschaftlichen Vorteil durch direkte Nutzung des PV-Stroms („Eigenstromnutzung“) entspricht. Fixkosten (Messstellenbetrieb etc.) sind in den Strombezugskosten nicht enthalten, da diese durch Solarstrom nicht substituiert werden.

Für jede kWh-Eigenverbrauch muss die EEG-Umlage anteilig zu 40 % entrichtet werden

- EEG-Umlage in 2021: 6,5 Ct/kWh → 40% entspricht 2,6 Ct/kWh
- Ausnahme: Anlagen bis höchstens 30 kW_p und bis max. 30.000 kWh/a **Eigenverbrauch** sind von der EEG-Umlage vollständig befreit
- Sollte ein dritter Letztverbraucher (z.B. Mieter) mit PV-Strom beliefert werden, müssen diese Strommengen messtechnisch erfasst und die volle EEG-Umlage entrichtet werden („Drittmengenabgrenzung“).

Etwaige Preissteigerungen für Netzstrom wurden nicht berücksichtigt, ein möglicherweise steigender Strompreis beeinflusst die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage mit Eigenstromnutzung aber positiv. Sinkende Strombezugskosten entsprechend negativ.

Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Annahme: Inbetriebnahme im April 2021 (Vergütungssatz Netzeinspeisung).

Bedingt durch die Montage der Module über eine Aufständering auf dem Flachdach sind gegenüber einer Aufdach-Montage entsprechend höhere Investitionskosten berücksichtigt.

In Tabelle 12 sind die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 12: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der PV-Anlagenvarianten, Sportheim

Variante	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Name	30 kWp Süd	30 kWp Ost-West	98 kWp (S-O-W)
Anlagenleistung	29,9 kWp	29,9 kWp	97,9 kWp
Investitionskosten	40.000 €	37.000 €	106.000 €
laufende Kosten	550 €	500 €	1.500 €
Eigenfinanzierung Amortisationszeit	11 a	11 a	15 a
Eigenfinanzierung Überschuss nach 20a	30.000 €	29.000 €	33.500 €
Fremdfinanzierung Überschuss nach 20a	25.500 €	25.500 €	22.000 €

Vergleichbares wirtschaftliches Ergebnis der Varianten 1 und 2

- erhöhter Invest beim PV-Generator auf dem Flachdach zu erwarten (Aufständering, Zugänglichkeit)
- Amortisationszeit (Invest): ca. 11 Jahre
- Überschusseinnahmen nach 20a ca. 29.000 bzw. 30.000 € bei Eigenfinanzierung, ca. 25.500 € bei Fremdfinanzierung
 - Insgesamt gute Rendite

Variante 3 mit höchsten Einnahmen (kumuliert nach 20a) bei Eigenfinanzierung

- Bei Fremdfinanzierung vergleichbare kumulierte Einnahmen mit Varianten 1 und 2, obwohl Investition um Faktor ca. 2,5 bis 3 höher → schlechtere Rendite
 - Grund: hoher Anteil des PV-Ertrags wird in das Netz eingespeist (wirtschaftlich im Nachteil gegenüber direkter Eigenstromnutzung, d.h. vermiedene Kosten durch Strom aus dem Netz).

4.5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Liegenschaft für Solaranlage gut geeignet

- hohe spezifische Erträge sind erreichbar
- Statik Sporthallen-Flachdachs noch zu prüfen

Direkte Eigenstromnutzung (= PV-Anlage mit Überschusseinspeisung ohne Stromspeicher) bietet größten wirtschaftlichen Vorteil

- Anpassungen in der Elektroverteilung notwendig (Zusammenfassung der Abgänge „Sportheim“ und „Sportplatz“, um Eigenstromnutzung zu maximieren).

Variante 1 oder Variante 2 als guter Kompromiss wirtschaftlicher und ökologischer Aspekte

- Hohe Eigenverbrauchsquoten bei gleichzeitig akzeptablen solaren Deckungsgrad
- Schärfung der Wirtschaftlichkeit anhand konkreter Angebote

Wirtschaftlichkeit eines Stromspeichers gegenwärtig nicht gegeben.

- Nachrüstung zu einem späteren Zeitpunkt möglich

Tabelle 13: Zusammenfassung der Ergebnisse der PV-Anlagenvarianten, Sportheim Baar-Ebenhausen

		V1: 30 kW _p Süd	V2: 30 kW _p Ost-West	V3: 98 kW _p Süd-Ost-West
Leistung PV-Generator	kW _p	29,9	29,9	97,9
Erwarteter Jahresertrag	kWh/a	34.000	30.000	104.000
spez. Ertrag	kWh/kW _p	1.140	1.000	1.060
Strombedarf	kWh	53.200	53.200	53.200
Stromeigennutzung	%	52	60	21
	kWh	17.800	18.000	22.000
Solarer Deckungsgrad	%	33	34	41
Investitionskosten	€	40.000	36.000	106.000
Jährliche Kosten	€/a	550	500	1.500
Amortisationszeit bei Eigenfinanzierung	a	11	11	15
Überschusseinnahmen nach 20a bei Eigenfinanzierung	€	30.000	29.000	33.500
Überschusseinnahmen nach 20a bei Fremdfinanzierung	€	25.500	25.500	22.000

5 Zusammenfassung

Im Rahmen des digitalen Energiekonzepts für die Gemeinde Baar-Ebenhausen wurden die Grundschule, die Kindertagesstätte Regenbogen sowie das Sportheim zunächst im Bestand analysiert. Neben Betrachtung der vorhandenen energetischen Infrastruktur und sonstigen Gegebenheiten vor Ort ist auch die Messgeräteinfrastruktur analysiert und Handlungsempfehlungen für sinnvolle Erweiterungen ausgearbeitet worden.

Basierend auf der Bestandsanalyse sind die Liegenschaften in einer Energiemanagement-Software digital abgebildet worden. Zählerinfrastrukturen und deren Hierarchie sind so in der Software hinterlegt, sodass aufwändige Bilanzierungsansätze und Witterungsbereinigungen automatisiert und in zeitlich variablen Schritten erfolgen können. Personal der Gemeinde Baar-Ebenhausen wurde im Umgang mit der Software geschult. Anhand der implementierten Analyse- und Auswertemethoden zeigte sich u.a. Optimierungspotenzial zur Erhöhung des regenerativen Wärmeanteils in der Heizzentrale der Grundschule.

Mit der digitalen Datengrundlage wurden nachgelagert verschiedene Detailmaßnahmen näher untersucht. Dazu zählen

- Handlungsempfehlung zur Optimierung der Betriebsweise des Pelletkessels in der Heizzentrale der Grundschule und Nahwärmenetzes
 - Erhöhung des regenerativen Wärmeanteils vom Wärmemix der Heizzentrale und damit CO₂-Emissionsreduktion
- Ausarbeitung eines Beleuchtungskonzeptes für die Grundschule
 - Retrofit-Leuchtmitteltausch als zielführende Variante, Reduzierung des elektrischen Energiebedarfs der Beleuchtung um ca. 55 %, bei gleichzeitig akzeptabler Wirtschaftlichkeit
- PV-Potenzialstudien für alle Liegenschaften
 - Technische Dimensionierung und Potenzialanalyse hinsichtlich Eigenverbrauchsquote und solaren Deckungsgrad
 - Detailsimulation ausgewählter Anlagenvarianten
 - Ökologische und wirtschaftliche Bewertung der Varianten
- PV-Anlagen in allen Liegenschaften ökologisch und wirtschaftlich sinnvoll

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtsskizze der Grundschule Baar-Ebenhausen, Luftbild Datenquelle: Bayerische Vermessungsverwaltung - www.geodaten-bayern.de	7
Abbildung 2: Typenschilder der Wärmeerzeuger der Heizzentrale in der Grundschule, links: Erdgaskessel, rechts: Pelletkessel	8
Abbildung 3: Detailskizze Messtechnikbestand der Grundschule Baar-Ebenhausen. Auszüge der Bauteilzeichnungen der Turnhalle (links) und dem Hauptgebäude (rechts) der Grundschule.....	8
Abbildung 4: Nahwärmeverbund - Heizzentrale in Grundschule (grün) speist das Nahwärmenetz (weiß). Angeschlossene Verbraucher: Gesundheitszentrum (orange), Feuerwehr (rot) und Bauhof (blau). Anschluss für Schulsport vorbereitet (nördlichster Punkt Nahwärmenetz), Luftbild Datenquelle: Bayerische Vermessungsverwaltung - www.geodaten-bayern.de	9
Abbildung 5: Vereinfachte Skizze der Medienverteilung für Strom (grün), Gas (orange), Wärme (rot) und Wasser (blau) sowie Messgeräte (Kreise) der Grundschule Baar-Ebenhausen	11
Abbildung 6: Übersichtsskizze Kita Regenbogen, Luftbild Datenquelle: Bayerische Vermessungsverwaltung - www.geodaten-bayern.de	13
Abbildung 7: Heizzentrale im UG des Kindergartens (links) und solarthermische Brauchwarmwasserbereitung im OG der Kinderkrippe mit Pufferspeicher und elektrischen Heizelement (rechts)	14
Abbildung 8: schematische Darstellung des Heizsystems der Kita Regenbogen mit Heizzentrale im UG des Kindergartens und dezentraler, solarthermischer Trinkwarmwasserbereitung im OG der Kinderkrippe	14
Abbildung 9: Solarthermie-Kollektoren und PV-Generator auf dem Süddach der Kinderkrippe	15
Abbildung 10: Vereinfachte Skizze der Medienverteilung für Strom (grün), Gas (orange), Wärme (rot) und Wasser (blau) sowie Messgeräte (Kreise) der Kindertagesstätte Regenbogen in Baar-Ebenhausen	17
Abbildung 11: Übersichtsskizze Sportheim, Luftbild Datenquelle: Bayerische Vermessungsverwaltung - www.geodaten-bayern.de	19
Abbildung 12: vereinfachte, zusammenfassende Darstellung der Funktionsschemata Heizung, Lüftung und Sanitär im Sportheim Baar-Ebenhausen.....	20
Abbildung 13: Vereinfachte Skizze der Medienverteilung für Strom (grün), Gas (orange), Wärme (rot) und Wasser (blau) sowie Messgeräte (Kreise) im Sportheim Baar-Ebenhausen.....	22

Abbildung 14: Gradtagszahlen und mittlere Außentemperatur als Zeitreihendiagramm basierend auf Klimadaten des Deutschen Wetterdiensts der Wetterstation "Ingolstadt (Flugplatz)" .26	
Abbildung 15: Softwareabbild der Grundschule als Einheit der Energieliegenschaft "Grundschule + Nahwärmenetz".....27	
Abbildung 16: Softwareabbild "Grundschule + Nahwärmenetz" (BE_GSNW), Verbrauchszuordnung (Einsatzbereich) von Zählern erfassten Energiemengen zu den Einheiten „Grundschule“ (BE_GS) und „Nahwärmenetz“ (BE_NWN) mittels Matrix.28	
Abbildung 17: Softwareabbild "Grundschule + Nahwärmenetz" (BE_GSNW), Verbrauchszuordnung für den Energieeinsatzbereich „Wärme-Erzeugung“29	
Abbildung 18: Sankey-Diagramm (Energieflussdiagramm) für die Energieliegenschaft "Grundschule + Nahwärmenetz", exemplarisch für November 2020.....29	
Abbildung 19: Auswertevorlage "Wärmemix Heizzentrale" für die Energieliegenschaft "Grundschule + Nahwärmenetz", Darstellung der bereitgestellten Wärme in kWh des Pellet- (grün) bzw. Erdgaskessels (orange) als gestapelte Säulen und Anteil des Pelletkessels an der gesamten Wärmebereitstellung als Linie (blau).30	
Abbildung 20: Auswertevorlage "Wärmemix Heizzentrale" für die Energieliegenschaft "Grundschule + Nahwärmenetz", Zeitbereich 01.11.20 bis 01.01.21 in Tagesauflösung.....31	
Abbildung 21: Auswertevorlage "Wärmebedarf der Verbraucher" für die Energieliegenschaft "Grundschule + Nahwärmenetz", Darstellung des absoluten Wärmebedarfs in kWh der Grundschule (violett) und Nahwärmenetz (rot) als gestapelte Säulen und Anteil der Grundschule am gesamten Wärmebedarf als überlagerte Linie (blau). oben: Zeitbasis Monat, unten: Zeitbasis: Tag (01.11.20 bis 01.01.21).....32	
Abbildung 22: stundenbasierter Wärmebedarf in der Grundschule (violett) sowie des Nahwärmenetzes (rot) vom 15.12.20 bis 01.01.21, keine Stapelung der Zeitreihen34	
Abbildung 23: Auswertevorlage "Grundschule - Stromverbrauch" für die Einheit „Grundschule“, Gesamtstromverbrauch entspricht der Summe der Hauptzähler „Licht Schule“, „Neubau“ und „Licht+Kraft“, Darstellung auf Monatsbasis (oben) und tagesbasiert (unten).....35	
Abbildung 24: Jahresdauerlinie elektrischer Energiebedarf (gesamt) der Grundschule, stundenbasiert (Energiebedarf in kWh entspricht damit mittlerer elektrischer Last in kW)36	
Abbildung 25: Softwareabbild der Kindertagesstätte Regenbogen als Energieliegenschaft mit den Einheiten „Kindergarten“ und „Kinderkrippe“.....37	
Abbildung 26: Softwareabbild "Kita Regenbogen" Verbrauchszuordnung (Einsatzbereich)37	
Abbildung 27: Auswertevorlage zum spezifischen Wärmebedarf der Kindertagesstätte38	

Abbildung 28: Auswertevorlage Wärmemengenzähler Gastherme, Detailbetrachtung in 15-Minuten-Auflösung der Vor- und Rücklauf­temperatur (rot und blau), Heizleistung (violett), Volumenstrom (grau) und Wärmemenge (Säulen, orange), Datenauszug: 15.06.20	39
Abbildung 29: Softwareabbild des Sportheims als Energieliegenschaft.....	40
Abbildung 30: Sankey-Diagramm für das Jahr 2020 des Sportheims Baar-Ebenhausen (Jahresbilanz).....	40
Abbildung 31: Auswertevorlage zum gesamten Energiebedarf im Sportheim (Wärme und Strom), monatsbasiert (oben) und tagesbasiert (unten).....	41
Abbildung 32: Wärmeezeugung (oben) und Wärmeverbrauch (unten) der Heizzentrale Grundschule, mittlere Tagestemperatur überlagert als Liniendiagramm (violett)	42
Abbildung 33: vereinfachtes Funktionsschema der Heizzentrale in der Grundschule und Positionierung der Messstellen (WMZ 1 bis 4).....	43
Abbildung 34: Zeitreihendiagramm, Messdaten vom 21.01.2021 der Wärmemengenzähler der Heizzentrale Baar-Ebenhausen, Mischtemperatur des Rücklaufs verbraucherseitig bilanziert (T_RL_Verbraucher_Misch)	44
Abbildung 35: geordnete Dauerlinien der Wärmemengenzähler Messdaten (WMZ Pelletkessel), Vorlauf­temperatur (rot), Rücklauf­temperatur (blau), Temperaturdifferenz (gelb), Volumenstrom (schwarz).....	45
Abbildung 36: Definitionen und Kategorisierung Technischer Lampen	48
Abbildung 37: exemplarische Beleuchtung im Bestand der Grundschule, links: Eingangsbereich im Neubau, rechts: Beleuchtung im Klassenzimmer.....	51
Abbildung 38: Screenshots der softwaregestützten Simulation zur Auslegung der LED-Beleuchtung, Software DiaLux evo.....	53
Abbildung 39: potenzielle PV-Belegungsflächen auf dem Flachdach der Grundschule, Luftbild Datenquelle: Bayerische Vermessungsverwaltung - www.geodaten-bayern.de	55
Abbildung 40: elektrisches Lastprofil der Grundschule Baar-Ebenhausen (Carpet-Plot / Heatmap)	56
Abbildung 41: 3D-Gebäudemodell inklusive exemplarische PV-Anlage der Grundschule Baar-Ebenhausen.....	57
Abbildung 42: Potenzialanalyse Solarer Deckungsgrad (oben) und Eigenverbrauchsquote (unten) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung und Batteriekapazität, Grundschule Baar-Ebenhausen	58

Abbildung 43: PV-Simulationsmodelle der Varianten 1 bis 4, Grundschule Baar-Ebenhausen	60
Abbildung 44: potenzielle PV-Belegungsflächen auf dem Süddach des Kindergartens, Luftbild Datenquelle: Bayerische Vermessungsverwaltung - www.geodaten-bayern.de	68
Abbildung 45: elektrisches Lastprofil der Kita Regenbogen (Carpet-Plot / Heatmap).....	69
Abbildung 46: 3D-Gebäudemodell inklusive exemplarische PV-Anlage der Kita Regenbogen	71
Abbildung 47: Potenzialanalyse Solarer Deckungsgrad (oben) und Eigenverbrauchsquote (unten) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung und Batteriekapazität, Kita Regenbogen	72
Abbildung 48: PV-Simulationsmodelle der Varianten 1 bis 3, Kita Regenbogen	74
Abbildung 49: Gebäudeteile des Sportheims (oben) und Ansicht der Liegenschaft vom Tennisplatz aus (unten), Luftbild Datenquelle: Bayerische Vermessungsverwaltung - www.geodaten-bayern.de	82
Abbildung 50: elektrisches Lastprofil des Sportheims Baar-Ebenhausen (Carpet-Plot / Heatmap)	83
Abbildung 51: 3D-Gebäudemodell inklusive exemplarische PV-Anlage, Sportheim Baar- Ebenhausen.....	84
Abbildung 52: Potenzialanalyse Solarer Deckungsgrad (oben) und Eigenverbrauchsquote (unten) in Abhängigkeit der PV-Generatorleistung und Batteriekapazität, Sportheim Baar- Ebenhausen.....	85
Abbildung 53: PV-Simulationsmodelle der Varianten 1 bis 3, Sportheim Baar-Ebenhausen...	87

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Benutzungsstunden pro Jahr (Beleuchtung) nach VDI 3807	47
Tabelle 2: Bestandsaufnahme Beleuchtung Grundschule nach Art des Leuchtmittels zugehörige Anzahl und installierte Leistung (Summe).....	51
Tabelle 3: Berechnung des erwarteten elektrischen Energiebedarfs im Bestand.....	52
Tabelle 4: Beleuchtungskonzept für die Grundschule Baar-Ebenhausen - Zusammenfassung und Variantenabgleich gegenüber Bestand	54
Tabelle 5: Simulationsergebnisse der PV-Anlagenvarianten, Grundschule Baar-Ebenhausen	61
Tabelle 6: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der PV-Anlagenvarianten, Grundschule Baar-Ebenhausen	64
Tabelle 7: Zusammenfassung der Ergebnisse der PV-Anlagenvarianten, Grundschule Baar-Ebenhausen	66
Tabelle 8: Simulationsergebnisse der PV-Anlagenvarianten, Kita Regenbogen	75
Tabelle 9: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der PV-Anlagenvarianten, Kita Regenbogen.....	78
Tabelle 10: Zusammenfassung der Ergebnisse der PV-Anlagenvarianten, Kita Regenbogen	80
Tabelle 11: Simulationsergebnisse der PV-Anlagenvarianten, Sportheim.....	88
Tabelle 12: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der PV-Anlagenvarianten, Sportheim	91
Tabelle 13: Zusammenfassung der Ergebnisse der PV-Anlagenvarianten, Sportheim Baar-Ebenhausen	92