

F 2941

Cornelia Jacobsen, Christina Hutter,
Hans Erhorn, Gerd Hauser, Manfred Hegger

Untersuchung der Maßnahmen- kombinationen mit denen unter verschiedenen Standort- und Nutzungsvoraussetzungen eine Plusenergieschule realisiert werden kann

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9439-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



Untersuchung der Maßnahmenkombinationen mit denen unter verschiedenen Standort- und Nutzungsvoraussetzungen eine Plusenergie- schule realisiert werden kann

Förderung



Der Forschungsbericht wird mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.
(Aktenzeichen: II 3-F20-13-1-003 / SWD -10.08.18.7-13.40)
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Fachliche Betreuung: Dipl.-Ing. Helga Kühnhenrich

Arbeitsgruppen- mitglieder

Dipl.-Ing. Hans Erhorn, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Prof. Gerd Hauser, TU München
Prof. Manfred Hegger, TU Darmstadt

Bearbeitung

Dipl. Ing. (FH) Cornelia Jacobsen (Projektleitung)
Dipl. Ing. Christina Hutter

Ingenieurbüro Hausladen GmbH
Feldkirchener Str. 7a
85551 Kirchheim

Endbericht

aufgestellt

15.12.2014

Inhalt

1.0	Einleitung	4
2.0	Begriffsbestimmung Plusenergiegebäude	5
2.1	BMVBS-Modellvorhaben Effizienzhaus-Plus	5
2.2	EnEff:Schule	5
2.3	Weitere Definitionen und Konzepte	6
3.0	Recherche Pilotprojekte	8
3.1	Vorgehensweise	8
3.2	Auswertung	8
3.3	Fazit	11
4.0	Nutzerstrombedarf	12
4.1	Literaturrecherche	12
4.2	Verbraucheranalyse Nutzerstrom	12
5.0	Auswahl der Beispielschulen	15
6.0	Potenziale zur Nutzung Erneuerbarer Energien	16
6.1	Vorgehensweise	16
6.2	Solarenergie - Photovoltaik	16
6.3	Solarenergie - Solarthermie	19
6.4	Geothermie	20
6.5	Biomasse	27
6.6	Fernwärme	32
6.7	Windkraft	33
6.8	Zusammenfassung	39
7.0	Vorgehensweise bei der Berechnung der Beispielschulen	40
7.1	Berechnungsmethodik	40
7.2	Berechnung des Gebäudeenergiebedarfs	45
7.3	Berechnung des Nutzerstrombedarfs	49
7.4	Berechnung des Stromertrags für Photovoltaik	49
7.5	Angepasste Berechnung	51
7.6	Exkurs Klimadaten	52
8.0	Beispielschule FOS/BOS Erding	56
8.1	Kurzbeschreibung	56
8.2	Gebäudeenergiebedarf für die untersuchten Varianten	59
8.3	Nutzerstrombedarf	61
8.4	Energieerzeugung	62
8.5	Auswertung	63
9.0	Beispielschule Realschule Memmingen	66
9.1	Kurzbeschreibung	66
9.2	Gebäudeenergiebedarf für die untersuchten Varianten	70
9.3	Nutzerstrombedarf	71
9.4	Energieerzeugung	72
9.5	Auswertung	73
10.0	Beispielschule Grundschule Prüfening	75
10.1	Kurzbeschreibung	75
10.2	Gebäudeenergiebedarf für die untersuchten Varianten	78
10.3	Nutzerstrombedarf	80
10.4	Energieerzeugung	80
10.5	Auswertung	82
11.0	Plusenergiestandard Schulen	84
11.1	Erreichbarkeit Beispielschulen	84
11.2	Überprüfung Definition Plusenergieschule	91
11.3	Graue Energie	92



12.0	Investitionsmehrkosten Plusenergiestandard	95
12.1	Vorgehensweise	95
12.2	Ergebnisse	97
12.3	Fazit	100
13.0	Vergleichsanalyse von Bedarf und Verbrauch	101
13.1	Allgemeines	101
13.2	Bedarfs-Verbrauchs-Vergleich FOS/BOS Erding	107
13.3	Bedarfs-Verbrauchs-Vergleich RS Memmingen	112
13.4	Bedarfs-Verbrauchs-Vergleich GS Prüfening	114
13.5	Fazit	117
14.0	Eigennutzungsanteil von PV-Strom bei Plusenergieschulen	118
14.1	Photovoltaik in Deutschland	118
14.2	Lastmanagement	119
14.3	Literaturrecherche Eigennutzungsanteil	121
14.4	Lastganganalyse am Beispiel der FOS/BOS Erding	120
14.5	Auswertung des Monitorings der Grundschule Prüfening	133
14.6	Fazit	134
15.0	Zusammenfassung	135
16.0	Verzeichnisse	139
16.1	Literaturverzeichnis	139
16.2	Abbildungsverzeichnis	143
16.3	Tabellenverzeichnis	145
17.0	Anlagen	

1.0 Einleitung

Gebäude in Deutschland sind für einen hohen Anteil des Energieverbrauchs von ca. 40 % verantwortlich. Aus diesem Grund setzen die politischen Ziele zur Reduktion von Treibhausgasemissionen, zur Energieeffizienzsteigerung und zur Erhöhung des Anteils von erneuerbaren Energien als einen Schwerpunkt im Gebäudebereich an.

Die EU-Gebäuderichtlinie 2010 (Directive 2010/31/EC) schreibt verschärfte Richtlinien zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden vor: alle neuen Gebäude in der EU ab 2021 sollen nahezu auf dem Niveau von Null-Energie-Häusern (nearly zero-energy-buildings) gebaut werden. Neubauten, die von Behörden als Eigentümer genutzt werden, müssen diese Anforderung sogar bereits zwei Jahre früher erfüllen. Bis zum Jahr 2015 müssen die Mitgliedstaaten darlegen, wie sie diese Vorgaben erreichen wollen.

Schulen können als Vorreiter-Projekte der Umsetzung der energetischen Ziele angesehen werden, da sie durch ihre Vorbildfunktion bei Schülern und Eltern als Multiplikatoren wirken.

Ziel dieses Projektes ist es, die Machbarkeit von Plusenergieschulen zu untersuchen. Vom ehemaligen Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung wurde im Rahmen des Förderprogramms „Effizienzhaus Plus“ bereits eine Definition für den Plusenergiestandard entwickelt und mittels Modellvorhaben im Wohnungsbau nachgewiesen. Für Nichtwohngebäude gibt es derzeit noch keine Grundsatzuntersuchung zum Plusenergiestandard.

Daher soll in einer Machbarkeitsstudie die Erreichbarkeit des Plusenergiestandards für Bildungsbauten geprüft werden. Hierfür werden anhand einer allgemeinen Recherche wesentliche Energiekennwerte und -konzepte von bereits realisierten energieeffizienten Schulen zusammengefasst. Darauf aufbauend werden drei realisierte Beispielschulen ausgewählt, an denen exemplarisch die Möglichkeiten und unterschiedlichen Wege zur Erreichbarkeit des Plusenergiestandards aufgezeigt werden. Hierbei wird überprüft, welche Maßnahmen an Gebäudehülle, Gebäudetechnik, Reduktion des Nutzerstrombedarfs und Nutzung erneuerbarer Energien erforderlich sind, um einen Plusenergiestandard zu erreichen. Abhängig von der Größe der Schule und des Grundstücks, der Art der Nutzung und der jeweiligen Standortpotentiale zur Nutzung erneuerbarer Energien bieten sich unterschiedliche Wege zur Einhaltung des Standards an. Darauf aufbauend erfolgt eine Abschätzung der Investitionsmehrkosten für den Plusenergiestandard.

Schließlich wird der berechnete Energiebedarf mit dem gemessenen Energieverbrauch von einigen realisierten Beispielschulen verglichen. Durch diese Gegenüberstellung von Energiebedarf und -verbrauch soll die Standarddefinition analysiert und ihre Übertragbarkeit auf die spezifischen Anforderungen von Schulen untersucht werden.

Der Bau von Plusenergiegebäuden und -schulen hat durch (Photovoltaik-)Stromerzeugungsanlagen auch Auswirkungen auf das öffentliche Stromnetz. Wie sich der Stromlastgang einer Plusenergieschule durch die Photovoltaik-Anlage verändert, wird auf Basis eines gemessenen Stromlastgangs einer Schule und von synthetisierten PV-Lastgängen untersucht.

2.0 Begriffsbestimmung Plusenergiegebäude

Unter dem Begriff „Plusenergiehaus“ findet sich auf Wikipedia folgende Beschreibung:

"Ein Plusenergiehaus ist ... ein Haus, dessen jährliche Energiebilanz positiv ist: es gewinnt mehr Energie, als es von außen ... bezieht. Die benötigte Energie für Heizung und Warmwasser wird im oder am Haus selbst gewonnen, meist durch thermische Solaranlagen und Photovoltaikanlagen. Da keine allgemein akzeptierte Definition oder Norm für das Plusenergiehaus existiert, bleibt unklar ob auch der Elektrizitätsbedarf für Beleuchtung, Haushaltsstrom etc. zu bilanzieren, also auszugleichen ist. Nicht berücksichtigt wird weiterhin der Primärenergiebedarf, der für Herstellung, Transport, Lagerung, Verkauf und Entsorgung der Baustoffe zur Erstellung des Hauses benötigt wird, die sogenannte graue Energie." (Quelle: Wikipedia)

Ein Plusenergiegebäude ist demnach ein Gebäude das übers Jahr gesehen mehr Energie erwirtschaftet als es verbraucht.

Im Folgenden werden bestehende Definitionen von Plusenergiegebäuden beschrieben. Aufbauend auf diesen wird eine Definition von Plusenergieschulen entwickelt, welche in Kapitel 7.1 beschrieben ist.

2.1 BMVBS-Modellvorhaben Effizienzhaus-Plus

Vom ehemaligen Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) wurden Wohngebäude gefördert, die den Effizienzhaus-Plus-Standard erreichen. Die Definition des Effizienzhaus-Plus-Standards ist zu finden in der Anlage 1: „Wohnhäuser mit Plus-Energie Niveau – Definition und Berechnungsmethodik“ [bvi14].

Das Plus-Energie-Haus-Niveau nach der Bekanntmachung des BMVBS über die Vorgabe von Zuwendungen für Modellprojekte im „Plus-Energie-Haus-Standard“ ist erreicht, wenn sowohl ein negativer Jahres-Primärenergiebedarf als auch ein negativer Jahres-Endenergiebedarf vorliegen.

Als Bewertungsmethode wird die EnEV 2009 auf Basis der DIN V 18599 herangezogen. Zusätzlich müssen die Bedarfswerte für die Wohnungsbeleuchtung und für die Haushaltsgeräte und -prozesse in der Berechnung mitberücksichtigt werden. Für den Nutzerstrom ist ein pauschaler Wert von 20 kWh/m²a, jedoch maximal 2.500 kWh/a je Wohneinheit anzunehmen.

Als Bilanzgrenze gilt das Grundstück. Für die Klimadaten ist mit dem Standardklima Deutschland zu rechnen.

Als Primärenergiefaktoren sind die Werte für den nicht erneuerbaren Anteil nach Tabelle A.1 - Primärenergiefaktoren der DIN V 18599-1:2011-12 zu verwenden. Für ins Netz eingespeisten Strom ist der Primärenergiefaktor für den Verdrängungsstrommix anzusetzen.

Eine Nebenanforderung wird an die Stromeffizienz gestellt: Es sind ausschließlich Geräte des höchsten Energielabels und intelligente Zähler zu verwenden.

Des Weiteren ist der Eigennutzungsanteil des generierten Stroms auf Basis von Monatsbilanzen auszuweisen.

2.2 EnEff:Schule

Die Definition „Plusenergieschule“ im Rahmen des Forschungsprojektes EnEff:Schule erfolgte in Anlehnung an die des BMVBS-Modellvorhabens „Effizienzhaus-Plus“ [rei13]:

„Die Plusenergieschule ist hiernach ein Niedrigstenergiegebäude, das mehr erneuerbare Energien innerhalb eines Bilanzraums erschließt als es für den Gebäude- und Schulbetrieb benötigt. Die Bewertungsmethode setzt auf die Energieeinsparverordnung (EnEV) auf und wird um den Nutzerstrom (Energiebedarf für die Lehrgeräte und sonstigen Schuleinrichtungen) erweitert. Ferner werden die netzeingespeisten, innerhalb der Bilanzgrenzen erzeugten, regenerativen Energieüberschüsse berücksichtigt. Die Bilanzgrenze wird hierbei auf das gesamte Schulgrundstück erweitert.“

Des Weiteren wird erläutert, dass sowohl der Endenergie- als auch der Primärenergiebedarf der Schule aufsummiert über alle Verbraucher und Erzeuger jährlich ein negatives Ergebnis aufweisen müssen. Sofern sich die Bilanzierung der Verbraucher auf die Bilanzierung nach EnEV (also ohne

Nutzerstrom) beschränkt, werden im Rahmen des Forschungsprojektes diese Schulgebäude als Net-to-Plusenergieschulen bezeichnet.

Diese Definition wurde beim 2. Kongress Zukunftsraum Schule 2011 dargestellt [erh11].

Bewertung von Plusenergieschulen (Methode)

Bewertungsindikator: Jahres-Primärenergie- und Jahresendenergiebedarfssumme

Bewertungsgröße: jeweils negative Jahres-Energiebedarfssumme ($\Sigma Q_{p,e} < 0$ kWh/(m²a))

Bewertungsmethode: erweiterter EnEV Nachweis mittels End-/Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 (Energetische Bewertung von Gebäuden); Ausgabe 12/2011, zuzüglich normiertem Geräte- und Prozessendenergiebedarf und abzüglich netzeingespeister, innerhalb der Bilanzgrenze erzeugter, regenerativer Energieüberschüsse

Bilanzgrenze: Grundstücksgrenze (Eigentümereinflussgrenze)

Nachweisstandort: Potsdam (künftiges mittleres deutsches (EnEV) Klima)

Auszuweisende Zusatzinformationen:

- Der Eigennutzungsgrad der auf dem Grundstück gewonnenen erneuerbaren Energien (selbstgenutzte Energie / geerntete Energie)

Nebenanforderung:

- Gebäude ist durchgängig mit Geräten des höchst möglichen Energieeffizienzlabels und intelligenten Zählern auszustatten

Abbildung 1: Bewertung von Plusenergieschulen [erh11]

In [erh11] wird ferner ein Vorschlag für einen standardisierten Wert für Gerätestrom und sonstige Prozessenergie von 8 kWh/m²a für Plusenergieschulen angegeben.

2.3 Weitere Definitionen und Konzepte

Nullenergiegebäude, Klima- oder CO₂-neutrale Gebäude

Hierbei handelt es sich um nicht klar definierte Begriffe. Im Gegensatz zu Plusenergiegebäuden muss bei diesen Gebäuden bilanziell der Verbrauch durch Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien gedeckt, jedoch nicht übertroffen werden. Welche Bedarfe die jeweilige Bilanzierung umfasst, wird unterschiedlich interpretiert. Mindestens werden jedoch die nach EnEV erfassten Bedarfe erfasst. Eine Arbeit zur Bilanzierung und Umsetzung von klimaneutralen Gebäuden ist unter [mus11] zu finden.

Zu beachten ist bei Klima- oder CO₂-neutrale Gebäude auch die Basis der Bilanzierung und die zugrunde gelegten Faktoren. Üblich ist beispielsweise die Bilanzierung von CO₂-Emissionen aber ebenso die von CO₂-Äquivalenten.

Aktivhaus

Der Begriff „Aktivhaus“ wird weitestgehend identisch zum Plusenergiehaus verwendet. Ein Grundlakenwerk zum Aktivhaus ist [heg13].

Des Weiteren hat sich im Jahr 2013 der Verein „AktivhausPlus e.V.“, der sich als Wissens- und Kompetenznetzwerk versteht, gegründet. Der angestrebte AktivhausPlus-Standard dieses Netzwerkes beschränkt sich nicht nur darauf, den Energieverbrauch zu minimieren und den verbleibenden Bedarf möglichst autark und aus regenerativen Energien zu decken, sondern bezieht die Nutzqualität sowie die Mobilität konzeptionell mit ein.

Niedrigstenergiegebäude (nearly zero-energy-buildings)

Die EU-Gebäuderichtlinie 2010 (Directive 2010/31/EC) schreibt vor, dass alle neuen Gebäude in der EU ab 2021 nahezu auf dem Niveau von Null-Energie-Häusern (nearly zero-energy-buildings) gebaut werden. Das geforderte „Nearly zero-energy-building“ wird im Deutschen als Niedrigstenergiegebäude übersetzt. Neubauten, die von Behörden als Eigentümer genutzt werden, müssen diese Anforderung sogar bereits zwei Jahre früher erfüllen. Der minimale Energiebedarf der Niedrigstenergiegebäude muss hierbei zu einem wesentlichen Teil aus erneuerbaren Energien gedeckt werden. Eine offizielle Definition von Niedrigstenergiegebäuden im Sinne der EU-Gebäuderichtlinie steht jedoch noch aus. Auf europäischer Ebene diskutiert [eco11] die Grundlagen von nearly zero-energy-buildings.

Definition des Plusenergiequartiers Oberursel (PEQ)

Im Rahmen des vom BMWi geförderten Forschungsprojektes „PlusEnergieQuartier Oberursel- Erarbeitung und Planung eines Konzeptes für ein prototypisches Plusenergiequartier auf einem Grundstück in Oberursel“ wurde eine erweiterte Definition für Plusenergiequartiere entwickelt [peq13].

Neben der Anforderung einer über ein Jahr bilanzierten positiven Primärenergiebilanz wird zusätzlich auch ein Eigenversorgungsgrad von mindestens 50 % gefordert. Dieser ist über ein Jahr anhand von Last- und Leistungsprofilen in Viertelstunden-Auflösung zu ermitteln. Die Anforderung an den Eigenversorgungsgrad soll gewährleisten, dass Versorgungskonzepte ausscheiden, bei denen durch die PV-Stromerzeugung eine hohe Belastung externer Netze erfolgt und die Leistung dieser gedrosselt werden muss.

Auf die Anforderungsgröße Endenergie wird wegen der starken Einschränkung der Versorgungskonzepte verzichtet. Um dennoch für den Einsatz energiesparender und effizienzsteigerender Maßnahmen zu sorgen, muss als Nebenanforderung eine 25-prozentige Unterschreitung des Nutzenergiebedarfs gegenüber dem EnEV-Referenzgebäude erfüllt werden.

Um nicht nachhaltige Entwicklungen beim Einsatz von Biomasse zu verhindern, werden für den Fall des Einsatzes des Energieträgers Biomasse als Nebenbedingung die regionale Bereitstellung gefordert.

Ferner wird in dem Forschungsbericht die Umsetzung eines ganzheitlichen Betrachtungsansatzes diskutiert.

3.0 Recherche Pilotprojekte

3.1 Vorgehensweise

Im Rahmen einer Literatur- und Internetrecherche werden bereits realisierte modellhafte Schulgebäude zusammengestellt, die einen außergewöhnlich hohen energetischen Anspruch erfüllen bzw. als Plusenergiegebäude errichtet wurden. Recherchiert wurde nach den Begriffen „Plusenergieschule“, „Nullenergieschule“, „Niedrigenergieschule“, „Passivhausschule“, „CO₂-neutrale-Schule“ sowie auf den Projektdatenbanken EnEff:Schule [eff13], der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) [dbu13], der Deutschen Energie-Agentur (dena) [den13] sowie der Datenbank für Passivhaus-Projekte [phd13].

Da eine Vielzahl von energieeffizienten Schulen recherchiert werden konnten, musste eine Auswahl getroffen werden. Bei der Auswahl der Beispielschulen liegt der Schwerpunkt auf Neubauten des letzten Jahrzehnts sowie standortsbezogen auf Deutschland. Bei EnEff:Schule-Projekte und Plusenergieschulen werden auch Sanierungen einbezogen. Auch konnten nur Schulen erfasst werden, deren Energiekennwerte, Dämmstandard und Anlagentechnik ausreichend dokumentiert waren.

Für die ausgewählten Niedrigstenergieschulen werden folgende Daten erfasst:

- Grundriss
- Anzahl Schüler
- Nettogrundfläche (NGF) nach EnEV bzw. Energiebezugsfläche (EBF) nach PHPP
- A/Ve-Verhältnis
- Fensterflächenanteil
- Spez. Transmissionswärmeverlust H_T' bzw. U-Werte der Hüllflächen
- Luftdichtheit n_{50}
- Spezifischer Nutzenergiebedarf
- Spezifischer Endenergiebedarf
- Spezifischer Nutzerstrombedarf
- Spezifischer Primärenergiebedarf
- Spezifischer Primärenergieerzeugung

- Art der Stromerzeugung
- Art der Wärmerzeugung
- Lüftungskonzept
- Umsetzung von Tageslicht-, Kunstlichtversorgung, Sonnen- und Blendschutz in den Klassenzimmern
- Gebäudeleittechnik (GLT)
- Spezifische Kosten der Kostengruppen 300 und 400

3.2 Auswertung

Die erfassten Daten der Recherche sind im Anhang in Tabelle A-1: Energetische Kenndaten von Niedrigenergieschulen übersichtlich dargestellt.

Leere Felder in der Tabelle bedeuten, dass keine Angabe verfügbar war. Falls nicht exakt der geforderte Wert verfügbar war, jedoch eine vergleichbare Größe angegeben war, ist dies als Kommentar in Klammern angemerkt. Für die Passivhäuser wurde anstatt der Nettogrundfläche die angegebene Energiebezugsfläche erfasst, welche dann auch die Bezugsgröße für die spezifischen Angaben bildet. Es sei darauf hingewiesen, dass bei den Angaben und deren Qualität gewisse Ungewissheiten bestehen.

Nachfolgend sollen die recherchierten Daten ausgewertet werden.

Bei der Datenaufnahme wurde festgestellt, dass keine Daten zum Fensterflächenanteil ermittelt werden konnten. Ausnahme bilden hier die FOS/BOS Erding mit 37 % und die Realschule Dachau-Augustensfeld mit ca. 25 %. Auch konnten keine Werte zu den tatsächlichen Verbräuchen (vgl. hierzu Kap. 13.0) und nur einmal Daten zum Nutzerstrombedarf ermittelt werden. Letztere werden im Kap. 4.0 beschrieben. Diese Spalten werden daher in der Tabelle A-1 nicht aufgeführt.

- Grundrisse, Schüleranzahl und Nettogrundfläche

Die Grundrisse weisen eine hohe Vielfalt auf. Die Schulen weisen rechteckige (z.T. mit Innenhof), lineare, kammförmige, L- und U-förmige Grundrisse, sowie Kombinationen daraus auf. Die Schüleranzahl variiert von 166 bis 1.700. Im Mittel gibt es 575 Schüler je erfasster Schule. Die Angaben zur Nettogrundfläche bzw. EBF reichen von 770 (Erweiterungsbau Realschule Neusäß) bis rund 11.000 m² (Realschule und Gymnasium Neckargmünd), im Mittel rund 4.600 m². Je Schüler liegt die Nettogrundfläche bei den Neubauten zwischen 5,6 (Science College Overbach) und 11 m² (Valentin-Senger Grundschule Frankfurt, Gymnasium Diedorf). Beim Gymnasium Diedorf ist in der Nettogrundfläche Sporthalle und Mensa miteingerechnet. Für die Valentin-Senger Grundschule waren diesbezüglich keine Angaben erhältlich.

- A/V-Verhältnis, Dämmstandard und Luftdichtheit (Auswertung der Neubauten)

Die energieeffizient geplanten Schulen weisen hohe Kompaktheit auf, was an den A/V-Verhältnissen deutlich wird, welche zwischen 0,25 und 0,44 1/m liegen.

Um den Dämmstandard einzuschätzen zu können, sind die spezifischen Transmissionswärmeverluste H_T' , bei dem ein mittlerer U-Wert über die thermische Hüllfläche zuzüglich Wärmebrückenverlustkoeffizienten gebildet wird, bzw. bei den Passivhäusern die U-Werte erfasst.

Bei den Neubauten konnten nur vier Werte für H_T' ermittelt werden. Der geringste spezifische Transmissionswärmeverlust, den die Plusenergieschule Hohen Neuendorf aufweist, liegt bei 0,20 W/m²K, gefolgt vom Science College Overbach und der FOS/BOS Erding mit 0,23 bzw. 0,24 W/m²K.

Die U-Werte für die Außenwände der Passivhäuser liegen zwischen 0,11 und 0,17 W/m²K, der Dächer zwischen 0,09 und 0,15 W/m²K, die U-Werte für den unteren Gebäudeabschluss (Bodenplatte, Kellerdecke) bei bis zu 0,19 W/m²K. Die Uw-Werte der Fenster erreichen 0,75 bis 1,0 W/m²K.

Somit haben diese Neubauten einen äußerst hohen Dämmstandard.

Alle Schulen weisen eine hohe Luftdichtheit mit Drucktestergebnissen n_{50} von kleiner gleich 0,6 h⁻¹ auf. Ein Gebäude erreichte 0,09 h⁻¹ (Montessori-Schule Aufkirchen), ein Weiteres 0,10 h⁻¹.

- Nutz-, End- und Primärenergiebedarf (Auswertungsschwerpunkt Neubauten)

Der Nutzenergiebedarf Q_b berechnet nach DIN V 18599 umfasst die Bedarfe für Heizung, ggf. Kühlung, Warmwasser, Beleuchtung. An dieser Größe ist nur bedingt die Energieeffizienz eines Gebäudes ablesbar, da der Nutzenergiebedarf Heizung um Wärmeeinträge durch Wärmeverluste von Rohrleitungen reduziert wird.

Beim Nutzenergiebedarf wurden Werte zwischen 32 (Grundschule Hohen Neuendorf) und 183 kWh/m²a recherchiert. Beim äußerst hohen Wert von 183 kWh/m²a der Singbergschule Wölfersheim trägt der Nutzenergiebedarf zur Warmwasserbereitung 128 kWh/m²a bei. Da die EnEV-Berechnungsdokumentation verfügbar war, konnte analysiert werden, dass der Trinkwarmwasserbedarf nicht korrekt ermittelt wurde. (Der Trinkwarmwasserbedarf von 0,5 kWh pro Person und Tag wurde in allen fünf Zonen angesetzt und ist somit um einen Faktor 5 zu hoch). Bei der weiteren Analyse der Bedarfe bleibt die Singbergschule Wölfersheim daher unberücksichtigt.

Bei den nach PHPP berechneten Gebäuden erfolgt die Angabe des Jahresheizwärmebedarfs anstatt des Nutzenergiebedarfs. Diese Größe erfasst in einer Gesamtbilanz (keine Zonierung der Flächen) Transmissionswärme-, Lüftungswärmeverluste, solare und interne Gewinne. Wärmegewinne durch Rohrleitungsverluste werden hier nicht berücksichtigt. Der Heizwärmebedarf der recherchierten Schulen lag zwischen 11 und 15 kWh/m²a, im Mittel bei 14 kWh/m²a.

Der Endenergiebedarf, der den tatsächlichen berechneten Energiebezug für Heizung, ggf. Kühlung, Warmwasser, Beleuchtung angibt, addiert die Bedarfe für Wärme und Strom ohne eine Bewertung der Energieträger.

Bei den recherchierten Endenergiebedarfen liegen die Werte zwischen 18 (Uhllandschule Stuttgart), 23 (Science College Overbach) und 72 kWh/m²a (Sanierung Gymnasium Rostock).

Bei den mit PHPP berechneten Schulen liegt keine dem Endenergiebedarf vergleichbare Angabe vor.

Der Primärenergiebedarf der Schulen, der nach EnEV berechnet wurde, setzt sich aus den primärenergetisch bewerteten Endenergiebedarfen nach DIN V 18599 zusammen. Die Werte liegen zwischen 24 (Grundschule Hohen Neuendorf) und 111 kWh/m²a (Grundschule Gronau). Bei der Grundschule Gronau gab es eine Angabe des derzeitigen Primärenergiebedarfs von 111 kWh/m²a bei Fernwärmeversorgung, und eine Angabe bei der zukünftig geplanten Wärmeversorgung mit dem Energieträger Holz von 33 kWh/m²a. Dies deutet darauf hin, dass der Primärenergiefaktor der Fernwärmeversorgung an diesem Standort vergleichsweise hoch ist.

Beim Primärenergiebedarf der mit PHPP berechneten Schulen muss beachtet werden, dass dieser zusätzlich den primärenergetisch bewerteten Nutzerstrombedarf beinhaltet. Recherchiert wurden Primärenergiebedarfe zwischen 58 (Realschule und Gymnasium Neckargmünd) und 112 kWh/m²a (Realschule Dachau).

- Art der Energieerzeugung und spezifische Primärenergieerzeugung

Der Schwerpunkt bei der Primärenergieerzeugung liegt auf Photovoltaik-Anlagen. Die höchste installierte Leistung lag bei 172 kW_P (Grundschule Gronau) gefolgt von 167 kW_P (Uhlandschule Stuttgart) und 90 kW_P (Herman-Nohl-Schule Osnabrück). Die spezifische errechnete primärenergetisch bewertete Stromerzeugung dieser Anlagen lag bei 106, 74 bzw. 64 kWh/m²a.

Ferner werden zur Stromerzeugung in zwei Schulen Windkraftanlagen (Gymnasium Rostock, St. Franziskus-Grundschule Halle), ein Pellet-BHKW (Grundschule Hohen Neuendorf), ein Biogas-BHKW (Gymnasium Marktoberdorf), zwei Gas-BHKW (Aufkirchen und bei der Grundschule Hamm über ein Contracting mit den Stadtwerken) und eine Organic Rankine Cycle (ORC)-Anlage (Gymnasium Rostock) eingesetzt.

- Anlagentechnik

Zur Wärmeerzeugung werden hauptsächlich Wärmepumpen unterschiedlichster Antriebsweisen eingesetzt: elektrisch und gasmotorisch sowie über Gas-Absorption. Als Wärmequellen dienen Grundwasser, Erdsonden und Luft. In diesem Zusammenhang sei noch ergänzt, dass bei einer nicht in die Übersicht aufgenommenen Sanierung der Best-Practice-Beispiele (EnEff:Schule) eine Abwasserwärmenutzung in Verbindung mit zwei Gas-Absorptions-Wärmepumpen und einem Erdgas-Spitzenlastkessel eingesetzt wurden ([eff13]). Des Weiteren werden Fernwärme bzw. Nahwärme von Nachbargebäuden (zweimal Fernwärmerücklauf vom Nachbargebäude) und Pelletkessel eingesetzt. Oft unterstützen solarthermische Anlagen die Warmwasserbereitung.

Bei den Lüftungskonzepten sind vor allem über zentrale RLT-Anlagen mechanisch belüftete Gebäude zu finden, aber auch dezentrale RLT-Anlagen werden eingesetzt. Bei vielen Gebäuden wird der Frischluftbedarf komplett über die RLT gedeckt (alle Passivhäuser), zweimal sind auch Konzepte mit mechanischer Grundlüftung in Kombination mit Fensterlüftung realisiert, die einmal motorisch betrieben wird. Nur die CO₂-neutrale Grundschule Hamburg wird natürlich belüftet.

- Tageslicht, Kunstlicht und Sonnenschutz (Klassenzimmer)

Zur Optimierung der Tageslichtversorgung sind lichtlenkende Lamellen, Oberlichter und verglaste Abtrennungswände zwischen Flur und Klassenzimmer zu finden.

Für die künstliche Beleuchtung werden überwiegend Leuchtstofflampen mit Tageslicht- und Präsenzsteuerung eingesetzt.

Der sommerliche Wärmeschutz wird über Markisen, außenliegende Jalousien, Lamellen im Scheibenzwischenraum und in Forschungsprojekten vereinzelt auch über eine elektrochrome Verglasung gewährleistet.

- Kosten

Die angegebenen Kosten der Neubauten für die Kostengruppen 300 und 400 reichen von 880 (Grundschule Freiberg) bis 2.400 €/m² (Realschule und Gymnasium Neckargmünd). Die Bauten in Hohen Neuendorf, Nordhorn und Düsseldorf liegen zwischen 1.300 und 1.450 €/m². Drei Schulen kommen auf Kosten (KG 300 und 400) von 1.700 bis 1.850 €/m². Neben der Schule in Neckargmünd

liegt auch die Valentin-Senger Grundschule Frankfurt mit 2.236 €/m² über 2.000 € je m² für die KG 300 und 400.

- Sonstiges

Bei allen EnEff:Schule-Projekten und weiteren der aufgeführten Schulen wird nach Inbetriebnahme ein Monitoring mit Betriebsoptimierung durchgeführt. Hier sind bereits jetzt einige praxisnahe Ergebnisse verfügbar, die beispielsweise bei den Kongressen "Zukunftsraum Schule" vorgestellt wurden.

Bei den aufgeführten Schulen sind z.B. folgende Punkte erwähnt:

- Energetische Kennwerte auch durch hohen außerschulischen Stromverbrauch der Sporthalle schwer zu erreichen
- Ausfälle bei den CO₂-Sensoren für die Regelung der RLT (Probleme bei einigen der Schulen)
- Absenkung der Zulufttemperatur zur Optimierung der Effizienz der Wärmepumpe

3.3 Fazit

Mittlerweile wurde eine Vielzahl von energieeffizienten Schulen in Deutschland gebaut. Energetische Ziele bei der Umsetzung waren beispielsweise Passivhausstandard, Minimierung des Primärenergiebedarfs, 3-Liter-Schulen, aber auch Plusenergiestandard und vereinzelt CO₂-Neutralität.

Die energieeffizient geplanten Schulen weisen bei einer großen Bandbreite an Größe, Grundrisse und Kubatur hohe Kompaktheit und einen äußerst hohen Dämmstandard auf.

Bei der Wärmeerzeugung werden vor allem Wärmepumpen, aber auch Fernwärme und Pelletkessel eingesetzt. Es sind fast ausschließlich mechanisch belüftete Gebäude zu finden. Der Schwerpunkt bei der Energieerzeugung liegt auf Photovoltaik-Anlagen.

4.0 Nutzerstrombedarf

4.1 Literaturrecherche

In Kap. 2.2 ist auf [erh11] verwiesen, der für die Berechnung von Plusenergieschulen einen standardisierten Wert für Gerätestrom und sonstige Prozessenergie von Schulen von 8 kWh/m²a vorgeschlagen hat. Dieser Wert soll anhand einer Literaturrecherche überprüft werden.

Für die Uhllandschule Stuttgart wird ein Nutzerstrombedarf von 9,8 kWh/m²a für das Hauptgebäude und von 10,4 kWh/m²a für den Erweiterungsbau angegeben. Bei der Uhllandschule handelt es sich um eine Grund- und Werkrealschule [eff13].

Da die Literaturrecherche nur diesen einen Wert für den Nutzerstrombedarf ergab, wird nachfolgend der Schwerpunkt auf die Recherche von Gesamtstromverbräuchen von Schulen gelegt, aus welchen der Anteil am Nutzerstrombedarf abgeschätzt werden soll. Im Gesamtstromverbrauch sind neben dem Nutzerstrom auch der Strom für Beleuchtung und Hilfsstrom der Anlagentechnik enthalten.

In [bmV09] sind für die Vergleichswerte von Schulen nach EnEV 2009 für allgemeinbildende Schulen 10 kWh/m²_{NGFA}, für berufsbildende Schulen 20 und für Sonderschulen 15 kWh/m²_{NGFA} angegeben.

Die Auswertung von Lastganglinien von 43 Schulen [rat13], [rat12] ergab, dass der Strombedarf der untersuchten Schulen zwischen 9 und 35 kWh pro m² BGF lag. Für eine Auswertung hinsichtlich Schultypen war die Stichprobe zu klein.

Umgerechnet auf die Nettogrundfläche entspräche dies 10 bis 39 kWh pro m² (Umrechnungsfaktor 0,89 nach [bmV09]). Im Mittel ergibt sich bei dieser Untersuchung ein Stromverbrauch von 20 kWh/m²_{NGFA}.

Die Stromverbräuche von 185 Schulen wurden in [klu01] ausgewertet. Es ergab sich eine Streubreite von 1 bis 123 kWh/m²a, bei einem Mittelwert von 26 kWh/m²a. Als Bezugsfläche ist die „gesamte Grundfläche“, die auch nicht und niedrig beheizte Bereiche enthält, angegeben.

Die Stadt Aachen hat ebenfalls den Stromverbrauch ihrer 73 Schulen ausgewertet. Im Mittel lag der auf die BGF bezogene Wert bei 13 kWh/m²_{BGF} (entsprechend ca. 15 kWh/m²_{NGFA}), bei einer Streuung zwischen 6 und 27 kWh/m²_{BGF} [ekz07].

Für das Gymnasium Marktoberdorf ist ein Stromverbrauch inklusive Beleuchtung vor der Sanierung von 8,1 (Atriumsbau) bzw. 9,8 kWh/m²a (Erweiterungsbau) angegeben [rei13].

Die oben genannten Daten zeigen die hohe Bandbreite des Stromverbrauchs. Die Höhe des Stromverbrauchs in Bestandsschulen hängt von vielen Faktoren ab, wie Nutzungszeiten, Ausstattung und Effizienz der technischen Anlagen. Auch kann der Stromverbrauch von Sondernutzungen wie beispielsweise Küchen und Schwimmbäder darin enthalten sein. Angaben zu Anlagentechnik und Besonderheiten liegen bei den ermittelten Stromverbräuchen aus der Literatur nicht vor, so dass es nicht möglich ist, daraus Einschätzungen zum Nutzerstrom abzuleiten.

Außerdem stellt sich die Frage, wie sich der Stromverbrauch in Niedrigstenergieschulen im Vergleich zu Bestandsschulen verändert. Es ist beispielsweise davon auszugehen, dass die meisten der untersuchten Bestandsschulen über keine RLT-Anlagen verfügen. Auch könnte es sein, dass die an (Neu-)Schulen eingesetzte Technik (PCs, digitale Whiteboards) zunimmt. Andererseits kann der Stromverbrauch durch den Einsatz von energieeffizienter Beleuchtung, Anlagentechnik und Regelungstechnik reduziert werden.

Derzeit sehen wir keine Möglichkeit, aus den vorhandenen Daten einen Nutzerstrombedarf für Neubauten abzuleiten. Der für die Uhllandschule ermittelte Nutzerstrombedarf von rund 10 kWh/m²a gibt jedoch einen Anhaltswert.

4.2 Verbraucheranalyse Nutzerstrom

Da aus der Literaturrecherche keine Aussagen zu typischen Nutzerstromverbräuchen ableitbar sind, werden nachfolgend typische Verbraucher von Schulen zusammengestellt. Soll für eine Schule der Nutzerstrom abgeschätzt werden, kann diese Auflistung als Ausgangspunkt für die Abschätzung des Nutzerstrombedarfs dienen.

Klassenzimmer

Nachfolgende Verbraucher in Klassenzimmer sind üblich:

- Tafelbeleuchtung
- Beamer, Overheadprojektor
- Steckdosen zur Nutzung für Abspielgeräte, Computer, Fernseher
- Ggf. Whiteboards
- Ggf. Strom für Antrieb, Steuerung von Sonnenschutz, Notraffsystemen

Des Weiteren gibt es Fachräume mit Sonderverbrauchern sowie Informatikräume mit Computerausstattung.

Verwaltung

In Verwaltungsräumen wie Sekretariat und Büros für Schulleitung sind nachfolgende Nutzerstromverbraucher üblich.

- Computer
- Drucker
- Kopierer
- Steckdosen für Sonstiges

Nebenflächen

In Verkehrsflächen wird Strom für Aufzüge, Sicherheitsbeleuchtung, welche nicht in der Berechnung nach DIN V 18599 enthalten ist, sowie Strom für Getränkeautomaten benötigt.

Turnhalle

Mögliche Verbraucher von Nutzerstrom in Turnhallen sind:

- Elektroakustische Anlage mit Player, Verstärker, Lautsprechersystem
- Uhrenanlage, Spielanzeige
- Sicherheitsbeleuchtung

Küche

Typische Verbraucher in Koch-Küchen sind:

- Kochfeld, Herd
- Heißluft-Dämpfer
- Geschirrspülautomaten
- Beheizte Tellerspender und Speisenverteilwagen
- Kühlräume und -zellen
- Tiefkühlschränke

Sanitär

Hauptverbraucher in Sanitärbereichen ist die dezentral elektrische Warmwasserbereitung. Hier kommen elektrische Durchlauferhitzer zum Einsatz.

Die Größenordnung dieses nicht im EnEV-Nachweis erfassten Bedarfs kann wie folgt abgeschätzt werden. Geht man von 2-maligem Händewaschen pro Schüler und Tag, und einem Verbrauch von 1,5 l je Händewaschen mit 35°C (Temperaturdifferenz 25 K) aus, so werden 88 Wh pro Person und Tag benötigt. Bei der für Klassenzimmer angesetzten Belegung von 3 m² je Person, ergäbe sich hieraus ein auf die Klassenräume bezogener Bedarf von 29 Wh/m²d.



Auch sei darauf hingewiesen, dass an vielen Schulen nur Kaltwasser in den WCs zur Verfügung steht. Des Weiteren können auch Händetrockner zu zusätzlichem Stromverbrauch in Sanitärräumen führen.

Sonstiges

Eine Vielzahl weiterer elektrischer Verbraucher an Schulen ist möglich. Hierzu zählt beispielsweise die Außenbeleuchtung, RWA-Anlage, Dachgullyheizungen, Türantriebe und anderes mehr.

Aus dieser Übersicht lässt sich ableiten, dass ein pauschaler Ansatz des Nutzerstrombedarfs zu relativieren ist, da dieser von der Flächenzusammensetzung, den Nutzungszeiten, Sonderzonen und der technischen Ausstattung abhängt. Weitere Forschungsarbeiten zum Nutzerstromverbrauch von Schulen sind notwendig.

5.0 Auswahl der Beispielschulen

Die Auswahl der Beispielschulen soll eine möglichst weite Bandbreite hinsichtlich Schultyp, Größe, Kubatur und Fensterflächenanteil darstellen. Die Freigabe zur Verwendung von Schuldaten für dieses Projekt gestaltete sich jedoch schwierig.

Schließlich wurden die Bauherrn-Freigaben für drei Beispielschulen mit anspruchsvollen energetischen Standards erhalten. Eine Übersicht über die ausgewählten Beispielschulen gibt Tabelle 1.

	Schule	Beschreibung	Grundriss	NGF [m ²]	Fensterflächen- Anteil	A/V [1/m]
1	FOS/BOS Erding	Berufs- und Fachober- schule mit Küche	2-flügelig mit Verbin- dungstrakt	7.640	37%	0,26
2	Realschule Memmingen	Realschule mit (Anliefe- rungs-)Kantine	rechteckig mit Innen- hof	7.845	51%	0,35
3	Grundschule Prüfening	Grundschule mit 2 Turn- hallen	Rechteckig mit Dach- terrassen	5.224	47%	0,31

Tabelle 1: Übersicht über die ausgewählten Beispielschulen

Durch diese Auswahl ergibt sich eine gute Abdeckung von verschiedenen Schultypen (Grundschule, Realschule, Fachoberschule), Grundrissen, Fensterflächenanteilen und Kompaktheit. Auch sind bei der Auswahl eine Schule mit Küche und Cafeteria sowie eine Schule mit im Gebäude integrierten Turnhallen vorhanden, so dass auch bei den Sonderflächen eine gute Bandbreite abgedeckt wird.

Die Zielsetzung bei der Planung der FOS/BOS Erding war Passivhaus-Standard und ein sehr niedriger Primärenergie-Verbrauch, bei der Realschule Memmingen die Umsetzung des KfW-40-Standards und eines innovativen Energiekonzepts und bei der Grundschule Prüfening sollte ein Niedrigenergie-Standard mit niedrigem Primärenergiebedarf umgesetzt werden.

Eine Beschreibung der Schulen findet sich in den Kapiteln 8.1 (FOS/BOS Erding) 9.1 (Realschule Memmingen) und 10.1 (Grundschule Prüfening) als Basis für die Berechnung der Beispielschulen. Ferner erfolgt ein Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich für die Beispielschulen, in welchem auch die Anlagentechnik beschrieben wird (s. Kapitel 13.0).

Da die Beispielschulen zufälligerweise alle in Bayern liegen, wurde festgelegt, im Rahmen dieser Studie die Auswertungen mit Standortrelevanz nicht nur für den tatsächlichen Standort, sondern für zwei weitere Standorte zu untersuchen (vgl. Kapitel 6.0 Potenziale zur Nutzung Erneuerbarer Energien, Kapitel 8.0 bis 11.0 bei Berechnungen mit freien Randbedingungen). Hierfür wurden wegen der im Vergleich zu den bayrischen Standorten (kalte Winter) anderen klimatischen Verhältnisse Hamburg (milde Winter, kalte Sommer) und Freiburg (milde Winter, warme Sommer) ausgewählt.

6.0 Potenziale zur Nutzung Erneuerbarer Energien

Es scheint unumstritten, dass die Energieversorgung der Zukunft aus einem breiten Mix an Erzeugungstechniken weitestgehend auf Basis Erneuerbarer Energien bestehen wird. Unter Berücksichtigung der standortspezifischen Gegebenheiten, wie beispielsweise die bereits vorhandene Energieinfrastruktur und die vor Ort zur Verfügung stehenden Energiepotenzialen, müssen an die lokalen Gegebenheiten angepasste Versorgungskonzepte erarbeitet werden.

An Schulen können Erneuerbare Energien in Form von Solarstrahlung, Windenergie, Biomasse und Geothermie genutzt werden. Grundsätzlich lassen sich diese Energien zur Erzeugung von Wärme (Solarthermie, Biomasse-Kessel, Geothermie) und Strom (Photovoltaik, Windkraft) sowie Kombinationen (Biomasse-BHKW, Tiefengeothermie mit Strom- und Fernwärmeerzeugung) unterscheiden. Für die Realisierung von Plusenergieschulen ist, um den notwendigen Stromverbrauch decken zu können, der Einsatz von Stromerzeugungsanlagen notwendig. Aber auch die Wärmeerzeugung sollte weitestgehend auf Basis von Erneuerbaren Energien erfolgen, um den Primärenergiebedarf möglichst gering zu halten.

6.1 Vorgehensweise

Da in der Fachliteratur detaillierte Technikbeschreibungen zu erneuerbaren Energien zu finden sind, beschränkt sich diese Studie auf eine kurze Beschreibung unter Angabe von Kenndaten von für Schulen geeigneten Systemen. Anschließend erfolgt die Potenzialanalyse, welche einerseits die Standorte der Beispielschulen sowie die Standorte Hamburg und Freiburg untersucht, andererseits auch die Möglichkeiten der baulichen Umsetzung an den Beispielschulen betrachtet.

6.2 Solarenergie - Photovoltaik

Bei der Nutzung von Solarenergie unterscheidet man zwischen photovoltaischer Nutzung zur Stromerzeugung und solarthermischer Nutzung zur Wärmeerzeugung.

Bei der Photovoltaik erfolgt eine direkte Umwandlung von Licht in elektrischen Strom durch den sogenannten photovoltaischen Effekt. Solarzellen bestehen aus zwei unterschiedlich dotierten Halbleiterschichten. Als Halbleiter werden beispielsweise monokristallines Silizium, polykristallines Silizium (Si), amorphes Silizium (a-Si) oder Kupfer-Indium-(Gallium-)Diselenid (CIS/CIGS) verwendet.

Der erzeugte Gleichstrom wird mit Hilfe eines Wechselrichters in den in Deutschland üblichen Wechselstrom umgewandelt. Bei netzgekoppelten Anlagen lässt sich der erzeugte Strom entweder direkt nutzen, oder in das öffentliche Stromnetz einspeisen (vgl. Kap.14.0).

6.2.1 Technische Grundlagen

Mono- und polykristalline Solarzellen besitzen einen hohen Wirkungsgrad. Dünnschicht Solarzellen (a-Si, CIS/CIGS) haben einen geringeren Wirkungsgrad, jedoch eine vergleichsweise gute Ausbeute bei diffusum Licht und sind kostengünstiger.

Der höchste Ertrag lässt sich in Deutschland bei einer festen Aufständigung der Photovoltaikmodule bei einem Aufstellwinkel von ca. 30 bis 35° erreichen. Je nach Zell- bzw. Modultyp benötigt eine Anlage mit 1 kWp Leistung eine Fläche von 6 bis 25 m².

Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über typische technische Kenndaten unterschiedlicher PV-Module.

	Monokristalline PV-Module	Polykristalline PV-Module	CIS-Dünnschicht PV-Module ()	a-Si Dünnschicht PV-Module
elektrischer Wirkungsgrad	15 – 20 %	13 – 17 %	8 – 14 %	6 – 8 %
Modulfläche je kWp	6 – 9 m ²	7 – 10 m ²	10 – 12 m ²	14 – 25 m ²

Tabelle 2: Wirkungsgrad-Übersicht gängiger Photovoltaik-Modularten (Quellen: www.solarstromerzeugung.de, Herstellerrecherchen)

Eine weitere wichtige Kenngröße ist das Performance Ratio (PR), welches das Verhältnis zwischen dem tatsächlichen (Wechselstrom-)Ertrag und dem nominalen Ertrag unter Standard-Testbedingungen einer Anlage angibt. Der tatsächliche Ertrag liegt auch bei unverschatteten Anlagen

durch Erwärmung, niedrigere Einstrahlung, Leitungs- und Wechselrichterverluste unter dem nominalen Ertrag. Das Performance Ratio hängt vom Modultyp und der Belüftung ab und liegt üblicherweise zwischen 70 und 90 %.

In den letzten Jahren sind die Photovoltaik Preise für Photovoltaikanlagen stark gefallen auf mittlerweile unter 1.700 € pro kWp für eine komplett installierte Photovoltaikanlage mit kristallinen Modulen.

Die Integration der PV-Module kann bei Flachdächern durch aufgeständerte Modulmontage oder durch das Verlegen einer Spezialfolie mit Dünnschichtsolarzellen auf der Flachdachabdichtung und bei geneigten oder Shed-Dächern durch Indachmontage erfolgen. Möglich ist ferner eine Integration in Außenbereichen (z.B. auf Carports) oder eine Integration in unverschattete Fassadenflächen. Die Integration von Photovoltaik in die Gebäudehülle wird als „Gebäudeintegrierte Photovoltaik“ (GIPV) bezeichnet. Neben der Basisfunktion der Stromerzeugung können diese PV-Komponenten komplette Gebäudeteile ersetzen (z.B. Pfosten-Riegel-Fassade, Sonnenschutz, semitransparente Dachverglasung).

Nachfolgende Abbildungen zeigen Beispiele für Photovoltaik am Gebäude.



Abbildung 2: Aufdachmontage in Zick-Zack-Aufstellung (Quelle: www.solarworld.de)



Abbildung 3: Feststehender PV-Sonnenschutz (Quelle: www.baunetzwissen.de)

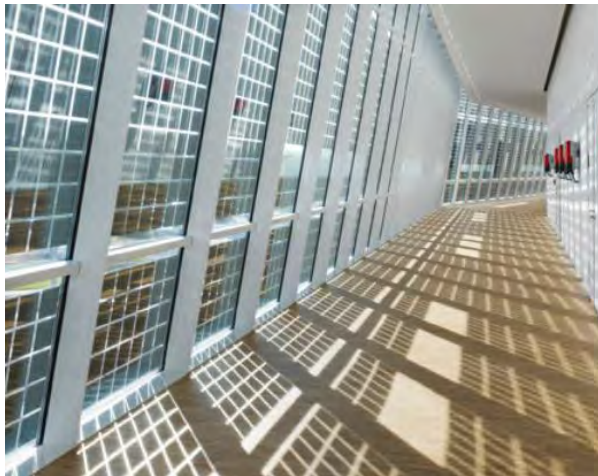


Abbildung 4: Semi-transparente PV-Module in der Fassade (Quelle: www.baunetzwissen.de)



Abbildung 5: Semi-transparente PV-Verglasung als Dachoberlicht (Quelle: <http://www.onyx-solar.com>)

6.2.2 Potenzialanalyse

Der Ertrag von PV-Modulen hängt vom lokalen Klima des Standorts ab. Je nach Standort kann die solare Einstrahlung stark variieren. Zur ersten Einschätzung der Potenziale in Deutschland kann eine Karte mit Angaben der mittleren Globalstrahlung dienen (vgl. hierzu Kapitel 7.6.2 Klimadaten für die Berechnung der Stromerzeugung, Abbildung 23).

Eine Untersuchung zur Ermittlung des zur Verfügung stehenden Solarenergiepotentials und der Verschattungssituation ist für jeden Standort separat durchzuführen. Hierbei werden sämtliche zur Verfügung stehende Flächen, deren Exposition, Verschattung, Abzugsflächen für notwendige Begehung, Wartung, für andere technische Installation und Anlagen sowie gegebenenfalls gegenseitige Verschattung berücksichtigt. Bei Plusenergieschulen ist eine ertragsoptimierte Planung der PV-Anlagen essentiell.

Für die Beispielschulen und Standorte ist die Solare Einstrahlung in Kapitel 7.4 errechnet und in den Kapiteln 8.4, 9.4 und 10.4 sind die möglichen Erträge ausführlich beschrieben und berechnet. In nachfolgender Tabelle sind die Ergebnisse nochmal zusammengestellt.

	PV [Wp/m _{NGF} ²]	PV-Jahresertrag [kWh/m _{NGF} ²]			
		Potsdam	Standort	Hamburg	Freiburg
FOS/BOS Erding - Dach	35	27	31	26	29
FOS/BOS Erding - Dach + Sonstige Flächen	37	29	33	28	31
RS Memmingen - Dach	29	23	25	22	24
RS Memmingen - Dach + Sonstige Flächen	31	25	27	23	26
GS Prüfening - Dach	42	33	34	31	34
GS Prüfening - Dach + Sonstige Flächen	47	36	38	34	38

Tabelle 3: Ergebnisübersicht der Photovoltaik-Potenziale der Beispielschulgebäude und –standorte

Für auf dem Flachdach aufgeständerte Module liegt die installierbare Leistung zwischen 29 und 42 Wp je Quadratmeter Nettogrundfläche, der zu erwartende Jahresertrag zwischen 22 und 34 kWh/m_{NGF}². Bei Belegung weiterer für die PV-Nutzung geeigneter Fassaden bzw. Glasflächen kann die spezifische installierte Leistung um weitere 2 bis 5 Wp je Quadratmeter Nettogrundfläche erhöht werden. Dieses Potenzial bezieht sich nur auf am Gebäude integrierbarer PV. Das Potenzial ließe sich noch erweitern, indem auch das Außengelände genutzt würde. Beispielsweise könnten unverschattete Parkplätze mittels Solar-Carports mit PV-Modulen überdacht werden.

Dernach bietet die Photovoltaik ein großes Potenzial für die Energieerzeugung auf Basis erneuerbarer Energiequellen von Plusenergieschulen. Auch eine Auswertung in der Fachliteratur ergab, dass klimaneutrale Gebäude immer eine PV-Anlage aufwiesen: kleine Wohngebäude hatten durchschnittlich 40 Wp je Quadratmeter Wohnfläche installiert, Verwaltungsgebäude 32 Wp/m_{NGF} [mus11].

6.2.3 Fazit

Mit Photovoltaik-Module, die sich gut zur Dachflächennutzung aber auch zur weiteren Einbindung in die Gebäudehülle (Fassade, Verglasung) eignen, lassen sich Wirkungsgrade von bis zu 20 % erzielen. Insgesamt betrachtet bietet die Photovoltaik ein großes Potenzial für die Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energiequellen von Plusenergieschulen. Bei den Beispielschulen lassen sich auf den Dachflächen zwischen 29 und 42 Wp je Quadratmeter Nettogrundfläche installieren.

6.3 Solarenergie - Solarthermie

6.3.1 Technische Grundlagen

Bei der Solarthermie findet eine direkte Umwandlung von Licht in Wärme statt. Die kurzwellige Strahlung des Lichtes wird beim Auftreffen auf ein geeignetes Absorbermaterial in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt. An den Solarkollektoren sind wasserführende Leitungen angeschweißt, um die Wärme vom Absorber zur Wärmezentrale mit Solarpufferspeicher zu führen.

Je besser das Gehäuse gedämmt ist, desto höher ist der Wirkungsgrad des Kollektors. Da eine bessere Dämmung des Kollektorgehäuses auch höhere Kosten verursacht, werden je nach benötigtem Temperaturniveau, unterschiedliche Kollektorarten eingesetzt. Im Temperaturbereich für die Erzeugung von Warmwasser bis 80°C sind Flachkollektoren am besten geeignet, von 80 bis 120°C doppelt abgedeckte Flachkollektoren und im Bereich von 120 bis 170°C werden Vakuumröhrenkollektoren angewendet. Tabelle 4 gibt Kenndaten von Flach- und Vakuumröhrenkollektoren für die Warmwasserbereitung von Schulen an. Der Jahresertrag und der Jahresnutzungsgrad sind bezogen auf die Bruttofläche angegeben, bezogen auf die Absorberfläche würde der Vakuumröhrenkollektor die höchsten Werte aufweisen.

	Einfach abgedeckter Flachkollektor	Doppelt abgedeckter Flachkollektor	Vakuum-Röhrenkollektor
Jahresertrag bezogen auf Bruttofläche bei WW-Bereitung in Schulen (Deckungsanteil 50%)	320 kWh/m ²	400 kWh/m ²	320 kWh/m ²
Jahresnutzungsgrad bezogen auf Bruttofläche	30 %	40 %	30 %
Spezifische Kosten	300 €/m ²	330 €/m ²	600 €/m ²

Tabelle 4: Kenndaten von Flach- und Vakuumröhrenkollektoren für die Warmwasserbereitung

Solarthermisch erzeugte Wärme kann bei der Trinkwarmwasserbereitung und zur Heizungsunterstützung eingesetzt werden. Die Eignung für Plusenergieschulen ist wegen der Ferienzeiten im Sommer, in welchen der höchste Ertrag liegt, nur bedingt gegeben. Diese Problematik könnte gegebenenfalls mittels eines saisonalen Speichers gelöst werden. Ein saisonaler Speicher ist jedoch mit hohen Wärmeverlusten behaftet, platz- und kostenintensiv, so dass die saisonale Zwischenspeicherung sicher nur in Sonderfälle in Betracht gezogen werden kann.

Zu prüfen wäre der Einsatz von Solarkollektoren in Schulen bei zentraler Warmwasserbereitung für Küche, Duschen von Sporthallen und insbesondere bei einem Schwimmbad.

6.3.2 Potenzialanalyse

Analog der Photovoltaik-Solarenergienutzung ist das generelle Solareinstrahlungsangebot in Deutschland Abbildung 23 zu entnehmen. Grundsätzlich sind für die Installation von Solarkollektoren die gleichen Flächen wie bei der Photovoltaik geeignet, so dass hier eine Flächenkonkurrenz besteht.

Da für die (Solar-)Flächennutzung von Plusenergieschulen die Energiebilanz entscheidend ist, soll eine diesbezügliche Abschätzung zwischen solarthermischer und photovoltaischer Nutzung durchgeführt werden: Auf eine optimal ausgerichteten Fläche von einem Quadratmeter trifft am Standort Potsdam eine jährliche Einstrahlung von 1.226 kWh. Mit einer solarthermischen Anlage bei 40 % Nutzungsgrad lassen sich 490 kWh Wärme (für Warmwasserbereitstellung bei 50 % Deckungsanteil) bzw. bei einer PV-Anlage mit einem Gesamtwirkungsgrad von 17 % 208 kWh Strom erzeugen. Endenergetisch wäre demnach eine teilweise Flächennutzung mit Solarkollektoren sinnvoll.

Für eine primärenergetische Bewertung muss die Einsparung für die solarthermisch erzeugte Wärme in Abhängigkeit der Anlagentechnik des Gebäudes primärenergetisch bewertet werden: Die erzeugten 490 kWh Wärme könnten beispielsweise bei einer Wärmeerzeugung mit Erdgas-Brennwertkessel 509 kWh Primärenergie, bei einer Wärmepumpe (COP 4,4) 270 und bei einem Pelletkessel 115 kWh Primärenergie ersetzen.

Für die erzeugten 208 kWh Strom ergibt sich bei einem Primärenergiefaktor von 2,4 eine Primärenergie-Gutschrift von 500 kWh. Daraus lässt sich ableiten, dass eine solarthermische Teilflächennutzung bei einer Wärmeerzeugung mit hohem Ressourcenverbrauch (Erdgaskessel) primärenergetisch sinnvoll ist. Liegt eine ressourcenschonende Wärmeerzeugung (Wärmepumpe, Pelletkessel) wie bei einer Plusenergieschule vor, so schneidet die photovoltaische Nutzung primärenergetisch betrachtet deutlich besser ab.

Eine Lösung für die Flächenkonkurrenz zwischen solarthermischer und photovoltaischer Nutzung könnten Hybridkollektoren sein, die gleichzeitig Strom und Wärme erzeugen. Diese sind derzeit allerdings hinsichtlich der Effizienz im Vergleich zur getrennten Erzeugung noch nicht konkurrenzfähig.

6.3.3 Fazit

Eine solarthermische Anlage kommt in Schulen nur bei zentraler Warmwasserbereitung und unter weiteren günstigen Nutzungsbedingungen in Frage. Zwischen solarthermischer und photovoltaischer Nutzung besteht eine Flächenkonkurrenz. Bei einer primärenergetischen Bewertung schneidet die photovoltaische Flächennutzung bei ressourcenschonender Wärmeerzeugung (Wärmepumpe, Pelletkessel) deutlich besser ab, so dass sich der Einsatz der Solarthermie bei Plusenergieschulen auf besondere Anwendungsfälle (z.B. Schule mit Schwimmhalle) beschränkt.

6.4 Geothermie

Man unterscheidet oberflächennahe Geothermie (bis 400 m Tiefe) und Tiefen-Geothermie (bis zu 5.000 m Tiefe). Nachfolgende Potenzialuntersuchung beschränkt sich auf die oberflächennahe Geothermie.

6.4.1 Technische Grundlagen

Das Erdreich bietet ein erhebliches Energiepotenzial für die oberflächennahe Geothermie, welches sich beispielsweise über Erdwärmesonden, Grundwasserbrunnen, oder erdberührende Betonteile (Energiepfähle) erschließen lässt.

Wegen des für die Gebäudebeheizung zu niedrigen Temperaturniveaus kann oberflächennahe Geothermie nur in Verbindung mit einer Wärmepumpe genutzt werden. Eine Wärmepumpe entzieht dem Grundwasser oder Erdreich Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau und gibt sie auf einem höheren Temperaturniveau an ein Heizsystem ab.

Die Effizienz einer Wärmepumpe wird über die Arbeitszahl angegeben. Diese beschreibt das Verhältnis zwischen der erzeugten Wärme und dem Strombedarf für Wärmepumpe und Erdwärmeförderung. Die Jahresarbeitszahl (JAZ) elektrisch angetriebener Wärmepumpen ist für die Heizwärmebereitstellung in Verbindung mit einem Niedertemperaturheizsystem (Flächenheizung) besonders hoch und

liegt bei Erdsonden bei ca. 4 bis 4,5, bei Grundwassernutzung bei ca. 4,5 bis 5,5. Die Effizienz bei der Wärmequelle Grundwasser ist somit höher, als bei Sole-Wärmepumpen. Jedoch ist die Verfügbarkeit von nutzbarem Grundwasser für ganz Deutschland betrachtet gering. Für die Erdwärmenutzung über einen Erdsonden-Solekreislauf ist die Verfügbarkeit deutlich größer.

Ergänzt sei, dass die Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen mit Wärmequelle Außenluft deutlich geringer und daher nicht für die monovalente Versorgung von Plusenergieschulen geeignet ist.

Nachfolgend soll kurz auf die technischen Rahmenbedingungen der Grundwasser- und Erdreichnutzung für Heizzwecke eingegangen werden.

Grundwasser

Bei der energetischen Nutzung von Grundwasser wird dieses mittels Saugbrunnen entnommen, über einen Wärmetauscher geleitet und dann über einen Schluckbrunnen dem Grundwasserleiter zurückgeführt. Durch dieses Prinzip kann das Grundwasser, das über das gesamte Jahr eine relative konstante Temperatur von ca. 7 bis 12 °C aufweist, für Heizzwecke indirekt über eine Wärmepumpe oder direkt für Kühlzwecke verwendet werden, sofern der Grundwasserleiter des Standortes ausreichend stark ist. Die Ergiebigkeit des Grundwassers ist abhängig von den Gesteinsschichten, Tiefe und Fließgeschwindigkeit. Die standortspezifischen geologischen Verhältnisse wie die Durchlässigkeit des Untergrundes sowie die Fließrichtung und -geschwindigkeit müssen eruiert und die maximal mögliche Fördermenge über einen Pumpversuch bestimmt werden. Auch muss das Grundwasser chemisch analysiert werden, um die Verträglichkeit mit dem Verdampfer der Wärmepumpe zu prüfen. Energetisch ist wegen des Energiebedarfs für die Grundwasserförderung eine geringe Grundwassertiefe vorteilhaft.

Die Nutzung von Grundwasser muss in der Regel vom zuständigen Wasserwirtschaftsamt genehmigt werden.

Für die Auslegung werden bei einer angenommen Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe von 5 pro Kilowatt Heizleistung eine geförderte Grundwassermenge von 0,04 l/s benötigt. Ab einer Fördermenge von 10 l/s reicht in der Regel ein Förderbrunnen nicht mehr aus, so dass zwei Förder- und Schluckbrunnen gebaut werden müssen.

Erdreich

Über ein Wärmeträgermedium bestehend aus Wasser und Frostschutzmittel, welches als Sole bezeichnet wird, kann die Erdwärme zur Wärmepumpe transportiert werden. Um die Wärme dem Erdreich zu entziehen, werden im Nichtwohnbereich vor allem Erdsonden eingesetzt. Erdkollektoren sind bei Nichtwohngebäuden wegen den begrenzten, unversiegelten Freiflächen in der Regel nicht geeignet. Falls aus statischen Gründen Pfahlfundamente erforderlich sind, können diese als Energiepfähle genutzt werden.

Erdsonden werden vertikal in den Boden gebohrt. In das Bohrloch werden Rohrpaare eingeführt, die jeweils am unteren Ende mit einem U-förmigen Teil verbunden werden. Der verbleibende Hohlraum im Bohrloch wird mit einem Material mit einer guten Wärmeleitung verfüllt.

Sonderformen sind mitteltiefe Sonden und CO₂-Sonden, welche beide eine höhere Arbeitszahl der Wärmepumpe ermöglichen. Mitteltiefe Sonden reichen in eine Tiefe von ca. 1000 m, in welcher mit einer Temperatur von 40 bis 50°C zu rechnen ist. CO₂-Sonden sind mit Kohlendioxid unter Druck von ca. 40 bar befüllt. Das CO₂ wird durch die Erdwärme verdampft und am Sondenkopf im Kondensator durch die Wärmeabgabe verflüssigt. Das verflüssigte CO₂ fließt wieder an den Sondenwänden ab und wird erneut verdampft.

Wie auch bei Grundwasser liegt ein Vorteil der Nutzung von Erdwärme darin, dass das Gebäude im Sommer über die Erdwärme auch gekühlt werden kann. Die Kühlung bietet einen weiteren Nutzen, indem im Sommer durch die Gebäudekühlung das während der Heizperiode ausgekühlte Erdreich wieder erwärmt wird. Erdwärme kann auf Dauer nur optimal genutzt werden, wenn der saisonale Ausgleich der Erdreichtemperaturen gelingt. So kann die langfristige Auskühlung des Erdreiches durch die Gebäudebeheizung verhindert werden.

In den meisten Regionen Deutschlands ist für Bohrungen bis zu 100 m Tiefe das Wasserwirtschaftsamt zuständig. Tiefergehende Bohrungen müssen zusätzlich von dem zuständigen Bergbauamt genehmigt werden. Die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes eines Standorts wird über einen Thermal

Response Test bestimmt, wofür einer (Test-)Erdwärmesonde eine konstante Wärmemenge zugeführt und die Austrittstemperatur des Wassers einige Tage lang gemessen wird.

Für den Wärmeentzug über Erdsonden kann bei normalen geologischen Bedingungen von einer mittleren Sondenleistung von 40 bis 50 W je Meter Sondenlänge ausgegangen werden. Mit Kosten von 70 bis 90 €/m ist je nach Beschaffenheit des Erdreichs zu rechnen.

Damit die Sonden sich gegenseitig nicht beeinflussen, muss ein Mindestabstand zwischen den Sonden eingehalten werden, der je nach Erdreich zwischen 5 und 10 m liegt. Auch bei Erdsonden ist es vorteilhaft, wenn die Oberfläche über den Erdsonden nicht versiegelt ist.

Abwärme

Grundsätzlich kann, sofern lokal verfügbar, auch Abwärme als Wärmequelle für eine Wärmepumpe genutzt werden. In Frage kämen hier Abwärme von Kompressionskältemaschinen, die wohl selten in Schulinähe anfällt, oder große Abwasserkanäle.

6.4.2 Potenzialanalyse Standorte

Allgemeine Aussagen über die Potenziale der Nutzung von Erdwärme sind nicht möglich, da für jeden Standort die lokalen Gegebenheiten, wie Grundwasser- bzw. Erdreichbeschaffenheit sowie die Aussicht auf eine Genehmigung, eruiert werden müssen.

Nachfolgend soll für die untersuchten Standorte anhand verfügbaren Kartenmaterials eine Einschätzung erfolgen. Da es sich um eine rein theoretische Analyse handelt, wurden keine Anfragen bezüglich der Genehmigungsfähigkeit bei den zuständigen Wasserwirtschaftsämtern durchgeführt.

Grundwasser

Da die Realschule Memmingen und die Grundschule Prüfening Grundwasser-Wärmepumpen einsetzen, sind diese beiden Standorte für die thermische Nutzung von Grundwasser geeignet.

Am Standort der FOS/BOS Erding wird Grundwasser zur Kühlung eingesetzt. Auch hier wären die örtlichen Gegebenheiten für eine Grundwassernutzung zur Wärmebereitstellung günstig, wie nachfolgende Abbildung zeigt.

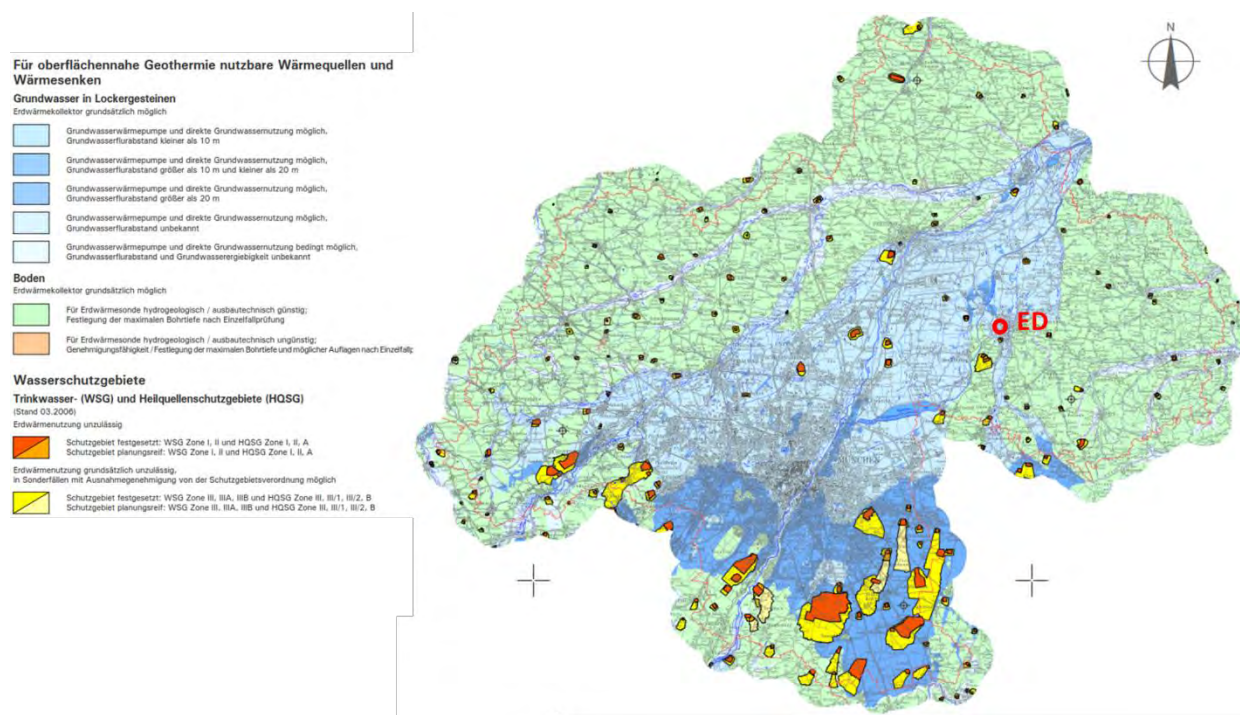


Abbildung 6: Übersichtskarte Oberflächennahe Geothermie für München mit umliegenden Landkreisen
(Quelle: <http://geothermie.geologie.bayern.de>)

Erding („ED“ rot gekennzeichnet) liegt im hellblauen Bereich „Grundwasserwärmepumpe und direkte Grundwassernutzung möglich, Grundwasserflurabstand kleiner als 10 m“. Am Standort der FOS/BOS Erding liegt das Grundwasser nur 3 bis 10 m unter der Geländeoberkante. Eine geringe Grundwassertiefe ist günstig, da der Energiebedarf von der Förderpumpe mit der Tiefe korreliert. Nachteilig kann sein, dass die Wassertemperatur im Winter abfällt.

Auch in Freiburg gibt es Gebäude mit Grundwasser-Wärmepumpen, wie beispielsweise das Freiburger Rathaus, das Grundwasser in 17 m Tiefe bei einer Temperatur von 12°C nutzt.

Grundsätzlich ist auch in Hamburg eine thermische Grundwassernutzung möglich, sofern das Gebäude nicht in einem der Hamburger Wasserschutzgebiete liegt.

Erdsonden

Falls keine Grundwasser-Nutzung möglich, sollte die Umsetzbarkeit einer Erdsondenanlage geprüft werden. Im Vergleich zur thermischen Grundwassernutzung weist diese jedoch eine geringe Effizienz und höhere Investitionskosten auf.

Wie nachfolgende Grafik zeigt, liegen die Schulstandort Erding, Memmingen und Regensburg alle in Regionen, in denen der Bau einer Erdsondenanlage voraussichtlich nicht möglich wäre.

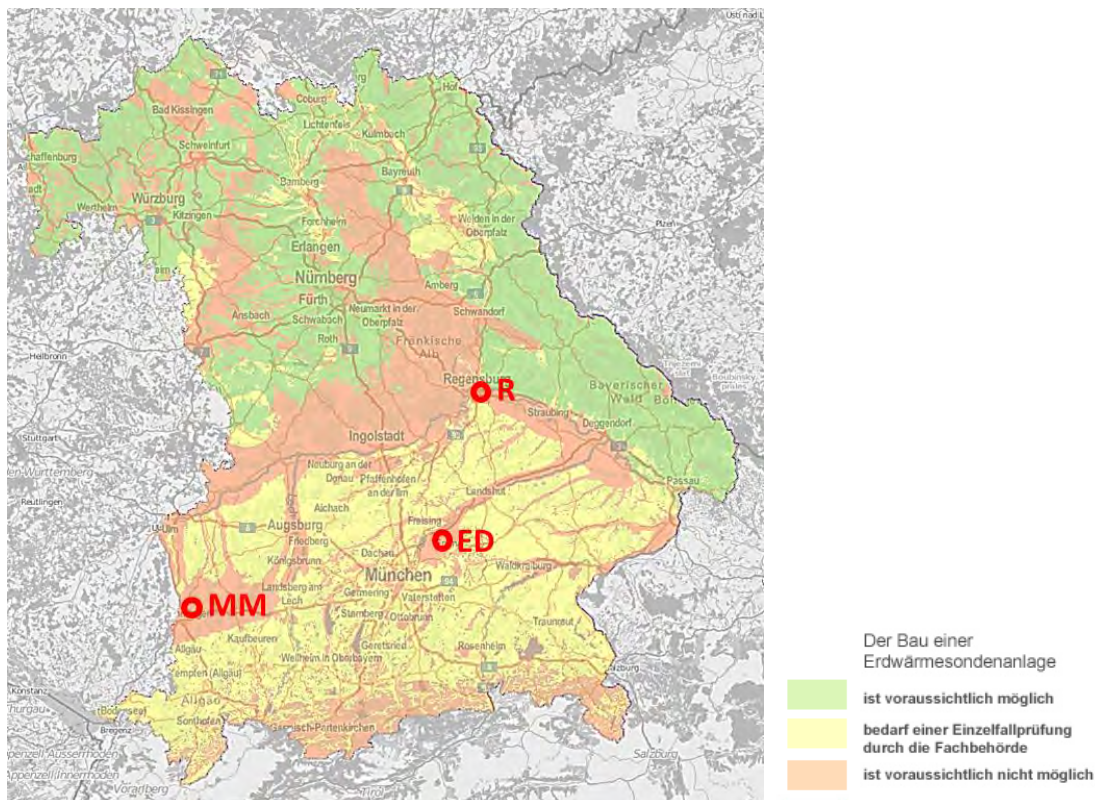


Abbildung 7: Übersichtskarte Bayern - Potenziale zum Bau von Erdsondenanlagen
(Quelle: Energie-Atlas Bayern)

In Freiburg sind die geologischen Verhältnisse auch für die Erdwärmenutzung über Erdsonden günstig, wie Abbildung 8 zeigt (s. Kennzeichnung „FR“). Freiburg liegt im bis zu einer Tiefe von 200 m hydrologisch günstigen Bereich B1.

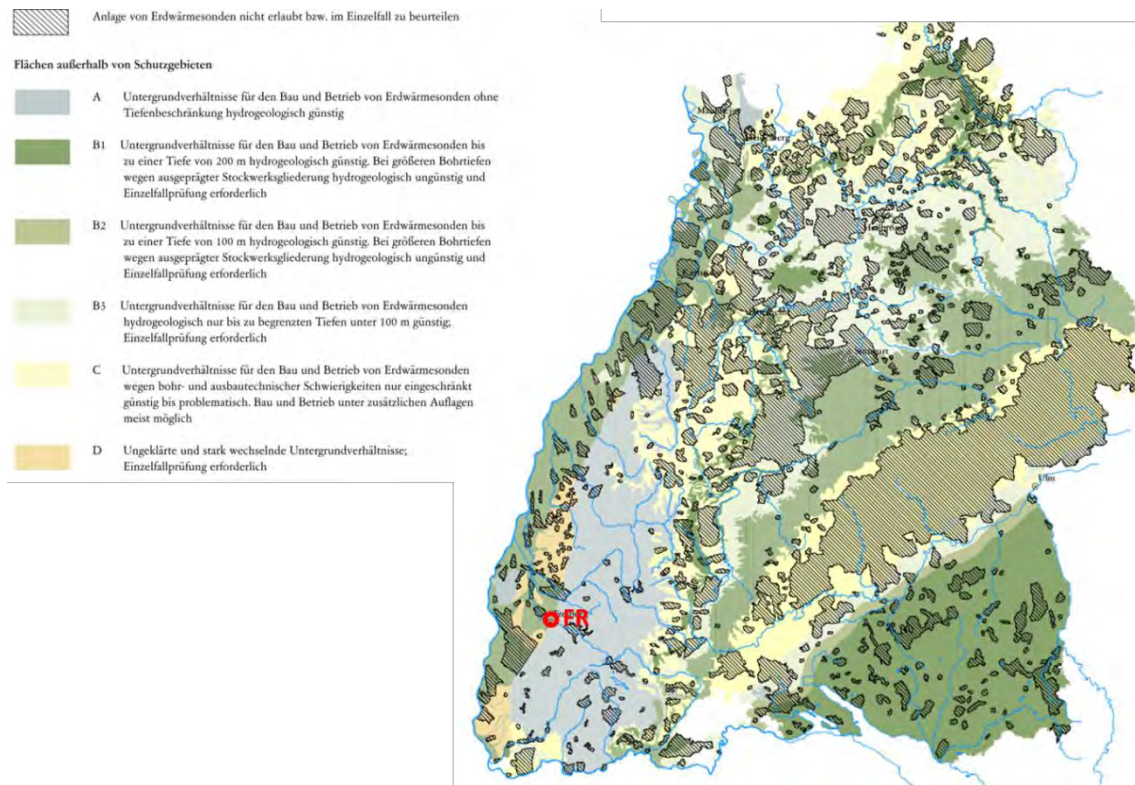


Abbildung 8: Hydrogeologische Kriterien zur Anlage von Erdwärmesonden in Baden-Württemberg [ubw05]

In Hamburg sind in einigen Bereichen wegen Wasserschutzgebieten keine Erdwärmesonden zulässig (vgl. Abbildung 9). Ansonsten sind in vielen Bereichen Bohrungen bis 100 m Tiefe in der Regel zulässig (vgl. hellgrüne Flächen).

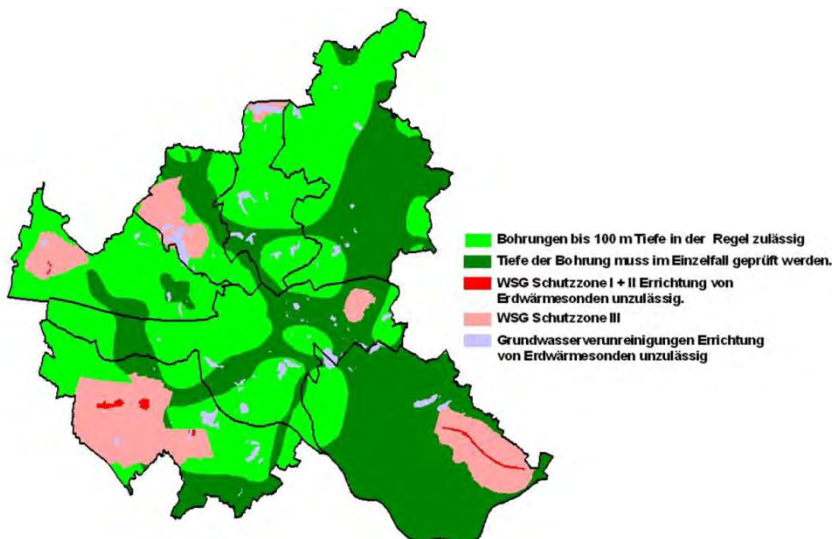


Abbildung 9: Hamburg - Bereiche mit Einschränkungen für die Errichtung von Erdwärmesonden (Quelle: GLA Hamburg)

6.4.3 Potenzialanalyse Beispielschulen

Die Errichtung von Brunnen für die Grundwassernutzung ist normalerweise problemlos auf einem Schulgelände integrierbar (z.B. Innenhof der Realschule Memmingen, Pausenhof der Grundschule Prüfening und der FOS/BOS Erding).

Nachfolgend soll daher auf Basis einer Berechnung der für einen monovalenten Betrieb benötigten Erdsondenlängen untersucht werden, ob diese theoretisch auf den konkreten Schulgeländen untergebracht werden könnten.

FOS/BOS Erding

Für die Umsetzung als Plusenergieschule ergäbe sich eine abgeschätzte Heizleistung von bis zu 280 kW (vgl. Tabelle 46). Für die Abschätzung wird eine Jahresarbeitszahl der Sole-Wärmepumpe von 4,4 angenommen. Geht man von einer Leistung von 50 W pro Sondenmeter aus, so ist eine Erdsondenlänge von 4.300 m notwendig. Bei einer beispielsweise angesetzten Sondentiefe von 100 m, wären daher 43 Sonden erforderlich.

Auf dem Grundstück der FOS/BOS Erding würden sich die gepflasterten Bereiche des Parkplatzes, des Pausenhofs sowie die Lichtgräben eignen. Wie Abbildung 10 zu entnehmen ist, wäre es problemlos möglich, 43 Sonden mit einem Mindestabstand von 7 m unterzubringen.

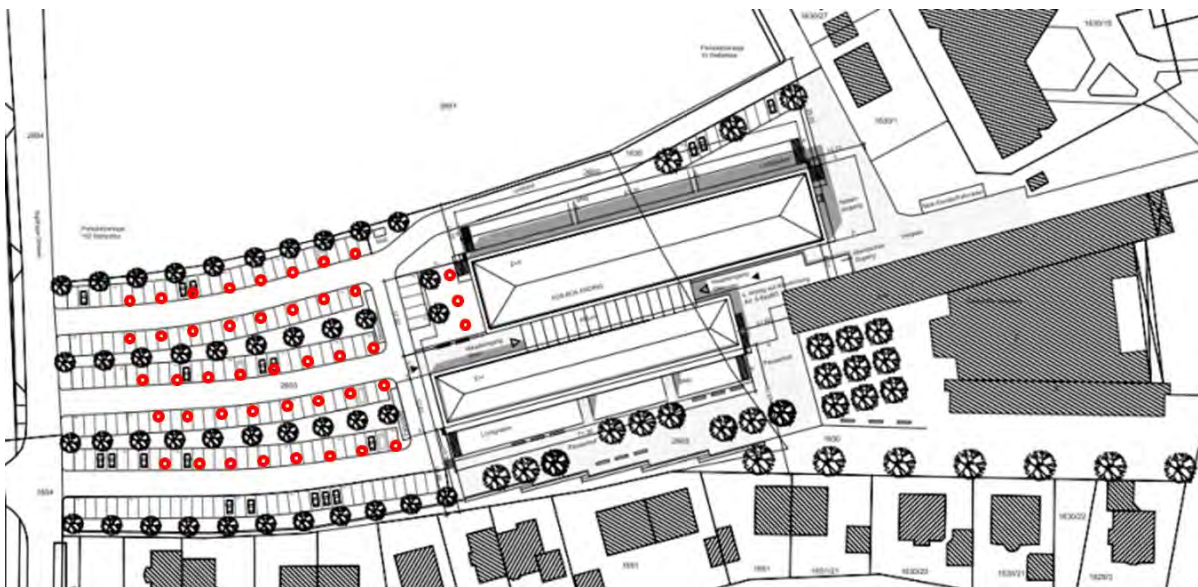


Abbildung 10: Mögliche Unterbringung von Erdsonden auf dem Gelände der FOS/BOS Erding (Quelle Lageplan: kplan AG)

Würde die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs nur eine Leistung von 40 W/m ermöglichen, so wären 54 Sonden je 100 m nötig. Auch diese wären unter Einbeziehung des Pausenhofs problemlos auf dem Gelände unterzubringen.

Realschule Memmingen

Für die Realschule Memmingen ergibt sich zufälligerweise eine maximale Heizleistung analog der FOS/BOS Erding, so dass auch hier eine Anzahl von 43 Erdsonden untergebracht werden müssten. Obwohl die Freiflächen begrenzt sind, finden sich ausreichend gepflasterte Flächen im Innenhof und dem umliegenden Außenbereich, unter denen die Anlage mit 43 Sonden gebaut werden könnte (vgl. Abbildung 11).

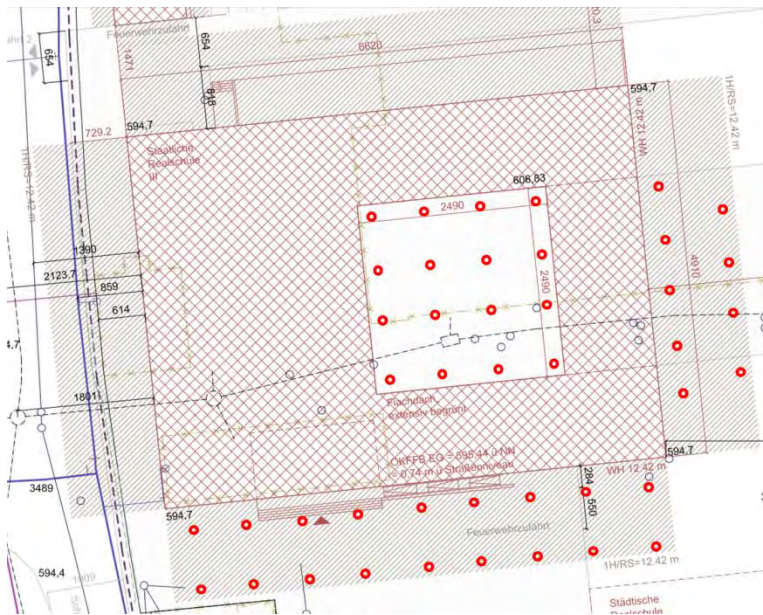


Abbildung 11: Mögliche Unterbringung von Erdsonden auf dem Gelände der Realschule Memmingen (Quelle: Amtlicher Lageplan)

Grundschule Prüfening

Für die Umsetzung als Plusenergieschule ergäbe sich bei der Grundschule Prüfening eine Heizleistung von bis zu 245 kW, was unter den zugrunde gelegten Randbedingungen eine Erdsondenlänge von 3.800 m bzw. 38 Sonden mit 100 m Tiefe erforderlich machen würde.

Auf dem Gelände der Grundschule Prüfering könnte diese Sondenanzahl untergebracht werden, wie Abbildung 12 zeigt. Allerdings ist die Verteilung durch die Baumbepflanzung schwierig. Insbesondere tiefwurzelnende Bäume sollten nicht in der unmittelbaren Nähe von Erdsonden gepflanzt werden oder mit einem Wurzelschutz versehen werden, damit die Wurzeln die Erdsondenleitungen nicht beschädigen können.

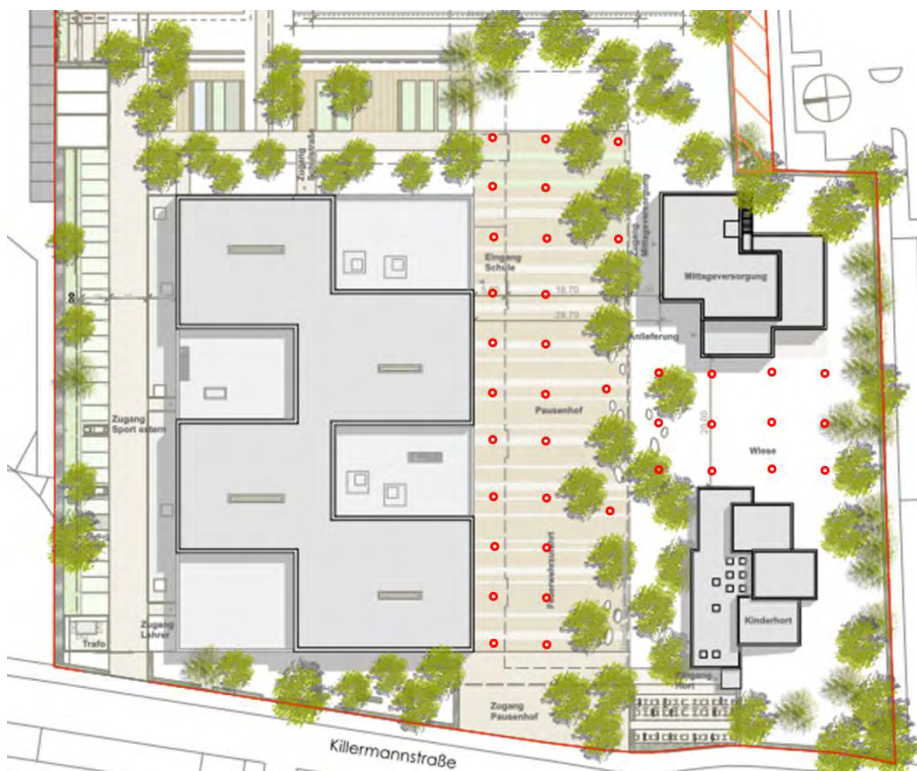


Abbildung 12: Mögliche Unterbringung von auf dem Gelände der Grundschule Prüfening (Quelle Lageplan: twoo architekten GmbH)

6.4.4 Fazit

Für die Nutzung der Geothermie bei Plusenergieschulen kommen als gängige Technologien die Errichtung von Grundwasserbrunnen und Erdsondenanlagen in Frage. Grundsätzlich ist eine Grundwasser-Nutzung, wenn diese gute Bedingungen bietet, wegen der höheren Effizienz und niedrigeren Investitionskosten einer Erdsondenanlage vorzuziehen. Bei einer Erdsondenanlage könnte die Effizienz der Wärmepumpe durch den Einsatz innovativer Techniken, wie mitteltiefe Sonden und CO₂-Sonden gesteigert werden.

Allgemeine Aussagen über die Potenziale in Deutschland sind nicht möglich, da für jeden Standort die lokalen Gegebenheiten, wie Grundwasser- bzw. Erdreichbeschaffenheit sowie die Aussicht auf eine Genehmigung, eruiert werden müssen.

Obwohl die grundsätzliche Verfügbarkeit von Grundwasser zur thermischen Nutzung geringer ist als der Erdwärmenutzung über Erdsonden, scheint diese für alle untersuchten Standorte möglich zu sein. Auf den Schulgeländen der Beispielschulen wären ferner genug geeignete Flächen zur Unterbringung der Erdsonden vorhanden.

6.5 Biomasse

Biomasse als nachwachsender Rohstoff weist bei der thermischen Verwertung eine nahezu CO₂-neutrale Bilanz auf und kann daher als klima- und ressourcenschonender Energieträger angesehen werden. Für die Energieversorgung von Gebäuden lässt sich Biomasse in Form von Holpellets, Hackschnitzeln, Scheitholz und gegebenenfalls auch in Form von aus Biomasse erzeugtem Gas oder Pflanzenöl einsetzen. Durch auf die Holzverbrennung und jeweilige Holzform optimierte Heizkessel lässt sich Wärme für Heizung und Trinkwarmwasser bereitstellen. Aus Biogas und Pflanzenöl könnte auch in einem Kraft-Wärme-Kopplung-Prozess Strom und Wärme erzeugt werden.

6.5.1 Technische Grundlagen

Für die Wärmebereitstellung an Schulen könnten Pellet- und Hackschnitzelkessel zum Einsatz kommen. Des Weiteren wäre der Einsatz einer innovativen Technik denkbar, bei der das Holz nicht direkt verbrannt wird, sondern vorher vergast und das Holzgas anschließend in einem BHKW eingesetzt wird.

Pelletkessel

Holpellets besitzen eine Energiedichte von rund 4,8 kWh/kg bei 10 % Wassergehalt und eine Schüttdichte von ca. 650 kg/m³. Holpellets werden in Deutschland hauptsächlich aus Sägespänen, aber auch Rund- oder Waldrestholz hergestellt.

In einem Pelletkessel werden diese Holpellets verbrannt. Bei den Pelletkesseln handelt es sich um Holzkessel, welche durch eine Beschickungsanlage einen vollautomatischen Betrieb ermöglichen. Dies ist beispielsweise bei Scheitholz nicht möglich. Da bei der Verbrennung im Gegensatz zu Gas- oder Heizölkesseln jedoch Asche zurück bleibt, muss ein Aschebehälter vorgesehen werden. Je nachdem wie groß dieser Behälter ist, bzw. in welcher Art und Weise die Asche abtransportiert wird, richtet sich die Zeitspanne, in der ein Pelletkessel ohne Betreuung genutzt werden kann.

Im kleinen Leistungssegment bis 100 kW gibt es Pellet-Brennwertkessel, welche eine eingebaute Möglichkeit der Brennwertnutzung bieten. Bei größeren Leistungsklassen muss eine Brennwertnutzung über Rauchgaswärmetauscher extern zugebaut werden. Auf diese Weise lässt sich aus derselben Menge Brennstoff bei ausreichend niedrigem Heizungsrücklauf ca. 10 % mehr Wärme nutzen. Der Wirkungsgrad eines Pelletkessels wird im Regelfall auf den Volllastbetrieb optimiert. Bei einer alleinigen Wärmeversorgung durch Pelletkessel, sollte daher die Gesamtleistung auf mindestens zwei Kessel aufgeteilt werden, um die Betriebsstunden im Teillastbereich zu reduzieren. Zusätzlich sollte ein Pufferspeicher vorgesehen werden.

Die Effizienz eines Pelletkessels über ein Betriebsjahr wird durch den Jahresnutzungsgrad angegeben. Dieser beschreibt das Verhältnis aus erzeugter Wärme, die an das Heizsystem abgegeben wird

und dem Energieinhalt des Brennstoffes, welcher dem Pelletkessel zugeführt wird. Der Jahresnutzungsgrad bezogen auf den unteren Heizwert liegt mit 82 % bis 90 % unter dem von Gasbrennwertkesseln.

Die Feinstaubbelastung durch die Verbrennung der fossilen Brennstoffe Öl oder Gas ist geringer als bei der Verbrennung von Holzpellets. Pelletkessel werden nur zugelassen, wenn sie die Feinstaub-Grenzwerte der 1. Bundes-Immissionsschutz-Verordnung einhalten.

Die spezifischen Investitionskosten liegen für Kessel in der Leistungsklasse 100 bis 200 kW bei ca. 220 €/kW Pelletkessel. Zusätzlich fallen Investitionskosten für Schornstein und Pellettank an. Derzeit liegt der Pelletpreis bei rund 5 ct/kWh.

Holzhackschnitzelkessel

Hackschnitzel haben einen Brennwert von etwa 4,0 kWh/kg bei einem Wassergehalt von 20 %. Hackschnitzel werden je nach Schüttdichte verschiedenen Klassen zu geordnet, z.B. entspricht S 200 (mittlere Schüttdichte) 160-250 kg/m³. Die Holzhackschnitzel werden üblicherweise aus Waldrestholz oder Schwachholz hergestellt, also Hölzern, die nicht stofflich verwertbar sind. Hackschnitzel sind wegen ihrer geringen Schüttdichte ein regionales Produkt.

Bei Holzhackschnitzeln ist auf den Feuchtigkeitsgehalt in Bezug auf die Lagerfähigkeit und die Kompatibilität zum Kessel zu achten. Die Funktionsweise ist ähnlich dem Pelletkessel. Auch beim Holzhackschnitzelkessel lassen sich ähnlich wie bei Pelletkesseln externe Rauchgaswärmetauscher nutzen. Ferner ist eine automatische Beschickung möglich. Diese ist jedoch im Vergleich zu Pelletkesseln störungsanfälliger. Wegen diesem Nachteil verbunden mit höherem Wartungsaufwand und größerem Lagerplatzbedarf ist der Einsatz in Schulen schwieriger umzusetzen als ein Pelletkessel. Bei lokal vorhandenem Hackschnitzelpotenzial könnte ein Contractingvertrag zur Wärmelieferung auf Basis einer Hackschnitzelanlage ein sinnvolles Konzept darstellen.

Der Jahresnutzungsgrad liegt bei ca. 82 % bezogen auf den unteren Heizwert.

Die Investitionskosten für einen Holzhackschnitzelkessel liegen bei rund 210 €/kW, der Holzhackschnitzelpreis bei ca. 3,0 - 3,3 ct/kWh.

Gas aus Biomasse

Im Gegensatz zu fester Biomasse eignet sich Biogas auch für den Einsatz in einem BHKW zur gleichzeitigen Wärme- und Stromproduktion. Gas aus Biomasse lässt sich entweder durch einen vorgelagerten Holzvergaser aus Holz (Holzgas) erzeugen oder in einem Vergärungsprozess in einer Biogasanlage erzeugen (Biogas). Biogas lässt sich ähnlich dem Ökostrom durch einen Liefervertrag mit einem Biogas-Anbieter übers Erdgasnetz beziehen.

Holzvergaser

Bei der Holzvergasungstechnologie wird, durch Unterdrückung der Entzündung, feste Biomasse bei ungefähr 800 °C in ein energiereiches Gas umgewandelt. Dieses kann in einer KWK-Anlage zur Wärme- und Stromproduktion eingesetzt werden. Ein Teil der erzeugten Wärme muss jedoch für den Holzvergasungsprozess eingesetzt werden.

Die Hackschnitzel für den Vergasungsprozess benötigen eine Restfeuchtigkeit von maximal 15 %.

Wegen der hohen Investitionskosten sollten Holzvergasungsanlagen kontinuierlich laufen. Daher würde man die Anlage nur so groß dimensionieren, dass die Grundlast abgedeckt wird und einen zusätzlichen Mittel- und Spitzenlastkessel installieren.

Da der Betrieb einer solchen Anlage bedienungs- und wartungsintensiv ist, kann ein Einsatz dieser innovativen Technologie nur unter bestimmten Voraussetzungen umgesetzt werden (z.B. technisch ausgebildeter Hausmeister, Hackschnitzelbezug aus naheliegender, nachhaltiger Forstwirtschaft, großer Schulkomplex mit Wärmebedarf auch im Sommer).

Biomethan aus dem Erdgasnetz

Biomethan ist in der Regel aufbereitetes Biogas, welches in Biogasanlagen durch Zersetzen von organischem Material (z.B. Energiepflanzen, Gülle) unter Sauerstoffausschluss entsteht. In den Anfängen der Biogaserzeugung wurden landwirtschaftliche Reststoffe wie Mist und Gülle zur Biogaserzeugung

gung verwendet. Seit 2000 wird jedoch zunehmend auf landwirtschaftlichen Flächen angebautes Substrat verwendet. Mittlerweile überwiegt im in Deutschland eingesetzten Substrat der Anteil an Energiepflanzen.

Das erzeugte Biogas kann am Standort der Biogasanlage direkt in einer KWK-Anlage genutzt oder in das Erdgasnetz eingespeist werden. Durch einen Vertrag mit einem Biogasanbieter kann dieses Biogas dann bilanziell an einer Schule aus dem Erdgasnetz entnommen werden. Wenn kein räumlicher Zusammenhang zur Erzeugung besteht, muss die primärenergetische Bewertung dieses Energieträgers nach EnEV Anlage 2 Punkt 2.1.1 jedoch analog Erdgas erfolgen. Nur über den Ansatz einer Nah- bzw. Fernwärme könnte unter bestimmten Voraussetzungen eine primärenergetische Bewertung des Biomethans von 0,5 erfolgen (vgl. Tabelle A.1 DIN V 18599-1 : 2011).

6.5.2 Potenzialanalyse Standorte

Zunächst soll das Potenzial der Ressource Holz in Deutschland betrachtet werden. Abbildung 13 gibt einen Überblick über die Verteilung von Waldflächen in Deutschland.

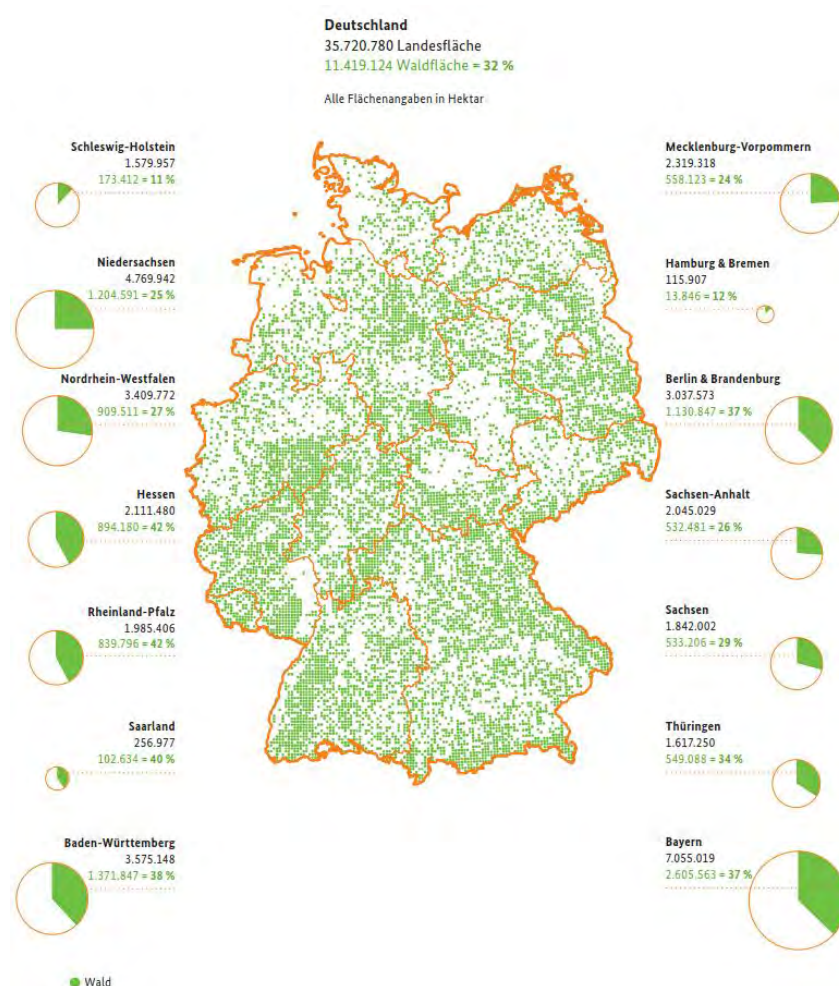


Abbildung 13: Waldverteilung in Deutschland [bwi14]

Ein Drittel der Fläche Deutschlands ist bewaldet, wobei die Hälfte des Waldes in Privateigentum ist. Die Waldverteilung ist recht unterschiedlich: Während in Schleswig-Holstein, Berlin und Hamburg nur 11 bzw. 12 % der Fläche mit Wald bedeckt ist, sind es in Rheinland-Pfalz, Hessen und dem Saarland 40 % und mehr.

Die Waldfläche ist laut [bwi14] zwischen 2002 und 2012 nahezu konstant geblieben. Dass die Waldfläche nicht abnimmt und nachhaltig bewirtschaftet werden muss, ist im Bundeswaldgesetz (BWaldG) festgeschrieben. Auch sind regelmäßige Walderhebungen vorgeschrieben, die sogenannten Bundeswaldinventuren, die alle 10 Jahre durchgeführt werden müssen. Kürzlich wurden die Ergebnisse der Bundeswaldinventur 3 vorgelegt, für welche die Datenerhebung zwischen 2011 und 2012 erfolgte.

Es wurde weniger Holz genutzt als nachgewachsen ist: Holznutzung und natürliches Absterben von Bäumen machten nur 87 % des Zuwachses aus, die übrigen 13 % verbleiben als Lebend-Holzvorrat im Wald [bwi14].

Nachfolgende Grafik zeigt die Produktionskapazitäten, die Produktion, den Verbrauch von Pellets in Deutschland. Mit Zunahme der Anzahl von Pelletkessel und –kaminöfen von unter 100.000 im Jahr 2006 bis 320.000 im Jahr 2013 [dpi14] wurden auch die Produktionskapazitäten stetig erhöht.

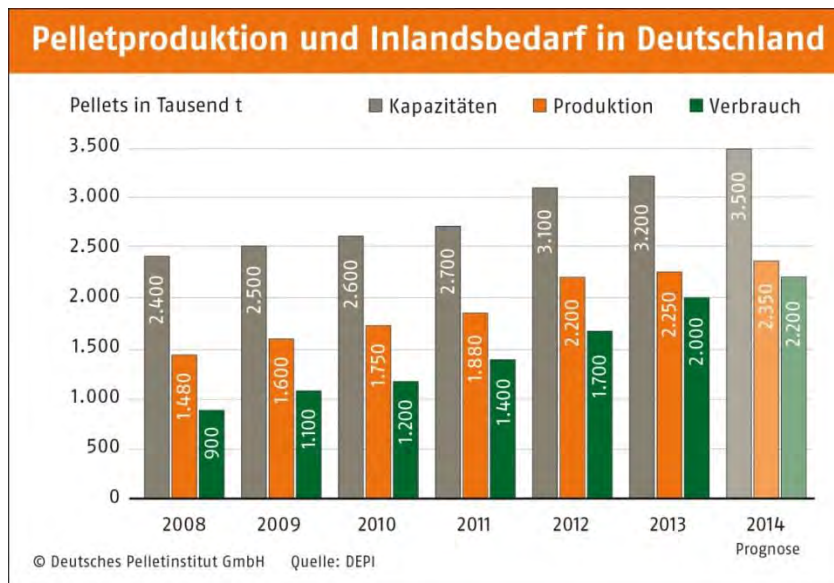


Abbildung 14: Pelletproduktion und Inlandsbedarf in Deutschland [dpi14]

Nach Angabe des Deutschen Energieholz- und Pellet-Verbands gibt es in Deutschland 40 unabhängige Pelletproduzenten mit 55 Produktionsstätten. Die Pelletproduktion ist fest ausschließlich für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen bestimmt [dep14].

Deutschland ist seit Jahren ein (Netto-)Pellet-Exportland. Laut Deutschem Pelletinstitut erfolgt wegen der großen Produktionskapazitäten in Deutschland kaum Import von Pellets [dpi14].

Wenn der Blick auf Europa erweitert wird, ergibt sich jedoch ein gänzlich anderes Bild. Laut [pel14] „...haben hohe Kosten für Pellets in Deutschland und Europa zu einem starken Anstieg von Pelletimporten geführt, vor allem aus Nordamerika... Zwar werden die meisten importierten Pellets in Kraftwerken verbrannt, im Verbrauchermarkt werden aber zunehmend mehr importierte Pellets angeboten.“

In den Jahren von 2006 bis 2012 hat sich in der EU sowohl die Pelletproduktion von 3,5 auf 10 Mio. Tonnen als auch der Pelletverbrauch von 4,6 auf 14,3 Mio. Tonnen verdreifacht. Der Import hat sich im selben Zeitraum auf 4,4 Mio. Tonnen verfünffacht. Die USA und Kanada haben mit 26 bzw. 17 % die größten Import-Marktanteile am europäischen Pelletmarkt [ihb13].

Die Verwendung von Hackschnitzeln und Pellets kann nur dann als nachhaltig angesehen werden, wenn ausschließlich lokale Holz-Reststoffe aus nachhaltiger Forstwirtschaft verwendet werden. Auf Basis des zurzeit zur Verfügung stehenden Datenmaterials ist es jedoch abschließend nicht möglich, Aussagen über zukünftige Potenziale der heimischen Pellet- und Hackschnitzelerzeugung in Deutschland zu machen. Zukünftige Nutzungsmöglichkeiten werden derzeit aufbauend auf den Daten der Bundeswaldinventur 3 mit einem Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodell ermittelt. Die Ergebnisse werden jedoch erst im Jahr 2015 zur Verfügung stehen. Auf Basis dieser Ergebnisse kann voraussichtlich beurteilt werden, ob auch bei einer weiter zunehmenden Installation von Holz-Heizkesseln eine heimische Bereitstellung und nachhaltige Waldbewirtschaftung gewährleistet werden kann bzw. wann eine Grenze bei der thermischen Holznutzung erreicht wird.

Eine weitere Thematik ist, dass es bis vor kurzem üblich war, Totholz und Holzabfälle wie Baumkronen und Wurzeln im Wald verrotten zu lassen und so dem Boden wieder Nährstoffe zurückzuführen. Mittlerweile werden diese jedoch oft für die Herstellung von Pellets komplett genutzt. Es wird diskutiert, ob dies Auswirkungen auf die Artenvielfalt haben könnte.

Es gibt zertifizierte Pellets z.B. nach ENplus auf Grundlage der EN 14961-2 und der prEN 15234. Hierbei werden die Produktions- und Lieferketten bewertet und Qualitätskontrollen durchgeführt. Nachfolgende Abbildung zeigt die Standorte von ENplus zertifizierten Pelletwerken in Deutschland.



Abbildung 15: ENplus zertifizierte Pelletwerke in Deutschland [dpi14]

Die ENplus-Zertifizierung umfasst keine Bewertung der nachhaltigen Forstwirtschaft und Regionalität.

Auch der "Blaue Engel" kann Hackschnitzel- und Holzpelletprodukten verliehen werden. Hier werden u.a. Anforderungen an die Transportwege, die Trocknung und Feinstaubemission bei der Herstellung gestellt. Außerdem müssen die Holzprodukte aus nachhaltiger Forstwirtschaft stammen.

6.5.3 Potenzialanalyse Beispielschulen

Grundsätzlich wäre eine Wärmebereitstellung auf Basis von Holzpellets in Kombination mit einem Pelletkessel bei allen Beispielschulen möglich. Bei der Planung muss zusätzlich zum Kessel das Pelletlager und ein Schornstein dimensioniert und eingeplant werden. Auch muss die Anlieferungslogistik bei der Planung berücksichtigt werden.

6.5.4 Fazit

Mit dem Einsatz einer Holzheizung zur Heizungs- und Warmwasserbereitstellung lässt sich der Primärenergiebedarf im Vergleich zu Erdgas- oder Heizölkesseln erheblich reduzieren.

Insbesondere eine Pelletheizung ist in einer Schule gut umsetzbar. Bei lokaler Verfügbarkeit von Hackschnitzeln ist auch eine Hackschnitzelheizung denkbar. Die Umsetzbarkeit muss jedoch wegen des höheren Wartungsaufwandes und Platzbedarfs geprüft werden. Der Einsatz eines Holzvergaser-BHKWs ist im Betrieb zeitaufwendig und nur unter besonderen Voraussetzungen an einer Schule umsetzbar.

Nach Angaben des Deutschen Pelletinstituts sind in Deutschland die Produktionskapazitäten gesichert. Auf der anderen Seite nehmen Pellet-Importe nach Europa aus Kanada, USA und weiteren Ländern massiv zu.

Bei einer Verwendung von Pellets als Energieträger für eine Plusenergieschule sollte gewährleistet sein, dass für die Pelletherstellung ausschließlich lokale Holz-Reststoffe aus nachhaltiger Forstwirtschaft verwendet werden.

6.6 Fernwärme

6.6.1 Technische Grundlagen

Der Einsatz Erneuerbarer Energien kann auch über eine Fernwärme- oder Nahwärmeversorgung, also eine Wärmelieferung über ein gedämmtes Rohrnetz, realisiert werden. Als Nahwärme wird die Wärmelieferung bezeichnet, wenn sie über ein relativ kurzes Leitungsnetz verteilt wird.

In der Regel handelt es sich bei einer Fernwärmeversorgung wegen des hohen Anteils an Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) und durch die Nutzung von industrieller Abwärme und Müllverbrennung um eine primärenergiesparende Wärmeversorgung. Jedoch ist Fernwärme per se nicht eine umweltfreundliche und ressourcenschonende Energieversorgung. Es kommt auf die jeweils eingesetzten Energieträger und die Art der Wärmeerzeugung an.

In Deutschland beträgt der Fernwärme-Anteil an der Wärmeversorgung etwa 13 %. Der Anteil an eingesetzten Erneuerbaren Energien in Fernwärmenetzen lag 2008 bei rund 9 %, wobei hier auch der Einsatz von Müll in Verbrennungsanlagen den Erneuerbaren Energien zugeordnet wird. Mehr als 90 % der Fernwärme basierte auf fossilen Brennstoffen wie Erdgas und Kohle [paa13].

Für die zukünftige Entwicklung bieten Fernwärmenetze jedoch ein großes Potenzial, erneuerbare Energien zu integrieren. Ein Einsatz von Erneuerbaren Energien kann beispielsweise in Form von Biomasse (Hackschnitzel, Biogas oder Biomethan) oder (Tiefen-)Geothermie erfolgen. Auch ein solarthermischer Beitrag, wobei hier das Problem der saisonalen Gegenläufigkeit besteht, oder eine elektrische Zusatzbeheizung über „Überschuss“-Strom aus Windkraft- bzw. PV-Strom wären denkbar [paa13].

Für die primärenergetische Bewertung einer Fernwärmeversorgung können die Berechnungsmethodik der DIN V 18599-1 Anlage A.4 oder die Festlegungen des AGFW-Arbeitsblattes FW 309-1:2010-0 herangezogen werden. In nachfolgender Tabelle werden einige Fernwärme-Primärenergiefaktoren von Großstädten zusammengestellt, die aus der veröffentlichten Liste der AGFW entnommen sind [agf14].

	Anzahl an gelisteten FW-Versorgungen	Primärenergiefaktoren der Fernwärme
Berlin	10	0 – 0,73
Bremen	6	0,1 – 0,86
Dresden	7	0 – 1,2
Frankfurt	1	0,37
Hamburg	27	0 – 1,25
Köln	3	0 – 0,78
Mannheim	4	0 – 0,66
München	1	0,11

Tabelle 5: Beispiele für Primärenergiefaktoren von Fernwärme [agf14]

6.6.2 Potenzialanalyse Standorte

Fernwärmenetze finden sich vor allem in städtischen Bereichen. Große Wärmenetze sind beispielsweise in Berlin, Mannheim und Hamburg zu finden. Grundsätzlich ist eine Fernwärmeversorgung auf Gebiete beschränkt, die eine hohe Wärmedichte vorweisen. Da viele Schulen in urbaner Umgebung liegen ist davon auszugehen, dass Potenziale zur Fernwärmeversorgung zur Verfügung stehen. Dies ist vom jeweiligen Standort abhängig. Für eine Plusenergieschule ist ferner wichtig, dass die Fernwärme über einen niedrigen Primärenergiefaktor verfügt.

Ist kein Fernwärmenetz vorhanden, aber lokal Potenzial für ein Biogas-BHKW, ein Biomasse-Kraftwerk oder ein Geothermiewerk, so ist zu prüfen, ob in der Umgebung ein gewisses Wärmeabnahmepotenzial Sommer wie Winter besteht und eine Nahwärmeversorgung realisiert werden kann.

An den Standorten der Beispielschulen Memmingen und Regensburg-Prüfening ist kein Fernwärmenetz vorhanden. Die FOS/BOS Erding jedoch verfügt über einen Fernwärmeanschluss mit einem Pri-

märenergiefaktor von 0,84 der STEAG GmbH. Neben fossilen Energieträgern wird hier auch Geothermie eingesetzt.

Im Beispielstandort Hamburg gibt es eine Vielzahl von Fernwärmeversorgungen (vgl. Tabelle 5). In Abhängigkeit des Versorgungsgebiets kann der anzusetzende Primärenergiefaktor in Hamburg für eine Plusenergieschule geeignet sein (z.B. $f_p = 0$ bzw. 0,2) oder auch nicht (z.B. $f_p = 1,1$ bzw. 1,25). Je nach Standort der Schule kann es jedoch auch in Hamburg sein, dass kein Fernwärmeanschluss möglich ist.

In Freiburg verfügt nur der westliche Stadtteil Landwasser über eine bei der AGFW gelistete Fernwärmeversorgung der badenova Wärmeplus GmbH & Co KG mit einem geeigneten Primärenergiefaktor von 0,23. Des Weiteren gibt es Heizkraftwerke in Freiburg Weingarten und Vauban.

6.6.3 Potenzialanalyse Beispielschulen

Sofern eine Fernwärmeversorgung möglich ist, muss das Leitungsnetz bis zum Gebäude erweitert werden und im Gebäude über eine Fernwärmeübergabestation übertragen werden. Die Installation einer Fernwärmeübergabestation ist unabhängig vom jeweiligen Schulgebäude immer möglich, da es sich um eine sehr platzsparende Versorgungsvariante handelt.

6.6.4 Fazit

Die Fernwärmeversorgung bietet die Vorteile, dass sich die zentralen Wärmeerzeugungsanlagen leichter an technische Entwicklungen anpassen lassen und mit der Wärmeerzeugung im großen Maßstab höhere Effizienz erreicht werden kann. Da Schulen oft in urbanen Gebieten mit hoher Wärmedichte liegen, gibt es Potenzial für eine Fernwärmeversorgung. Nachteilig sind die zusätzlichen Verteilungsverluste im Fernwärmenetz. Für eine Plusenergieschule ist ferner wichtig, dass die Fernwärme über einen niedrigen Primärenergiefaktor verfügt.

6.7 Windkraft

6.7.1 Technische Grundlagen

Die Windenergienutzung ist eine sehr klimafreundliche Stromenergieerzeugungsvariante. In Deutschland handelt es sich bei der Windenergie inzwischen um eine der wichtigsten erneuerbaren Energiequellen zur Stromerzeugung. Bei Windkraftanlagen wird mit Hilfe der Auftriebskraft der Flügel die Strömungsenergie in Rotationsenergie umgewandelt. Dabei wird ein Generator angetrieben, welcher die mechanische Energie in elektrische Energie umwandelt.

Da an Schulstandorten eine Aufstellung von großen Windkraftanlagen (Megawattbereich) nicht möglich ist, bieten sich sogenannte Kleinwindkraftanlagen (KWKA) im Leistungsbereich 1 bis 30 kW an. Insbesondere Mikrowindkraftanlagen bis 5 kW gekoppelt ans Stromnetz sind denkbar.

Kleinwindkraftanlagen werden je nach Achslage in zwei verschiedene Bauweisen, nämlich horizontale und vertikale Windkraftanlagen, unterschieden.

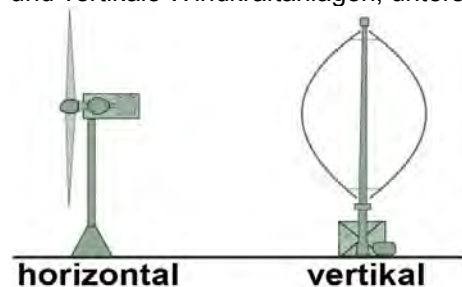


Abbildung 16: Horizontal- und vertikalachsige Windkraftanlagen (Quelle: kleinwindkraft.wordpress.com/technische-faktoren/)

Vertikalachsige Windkraftanlagen bieten neben geringerer Geräuschbelastung und geringerem Schattenwurf den Vorteil des windrichtungsunabhängigen Betriebs. Ein Nachführen der Anlage ist somit nicht notwendig. Nachteilig ist jedoch die geringere Effizienz.

Abbildung 17 zeigt schematisch die technischen Komponenten einer horizontalachsigen Windkraftanlage.

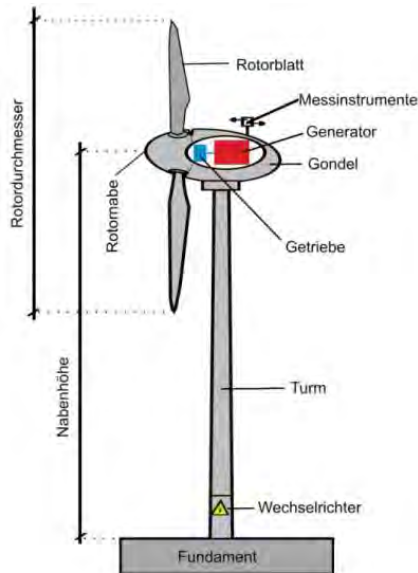


Abbildung 17: Komponenten einer horizontalachsigen Windkraftanlage [car13]

Unterhalb einer Mindestgeschwindigkeit, der sogenannten Anlaufwindgeschwindigkeit, steht eine Windkraftanlage still. Beim Erreichen der zulässigen Maximalgeschwindigkeit (Abschaltwindgeschwindigkeit) wird der Anlagenbetrieb vorübergehend eingestellt, um Schäden an der Anlage vorzubeugen.

Bei Windgeschwindigkeiten zwischen der Anlauf- und Abschaltwindgeschwindigkeit produziert die Windkraftanlage in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit Strom.

In nachfolgender Grafik wird der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und -leistung dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Leistung des Windes, welche die Grundlage für die Stromerzeugung mit einer Windkraftanlage darstellt, überproportional mit der Windgeschwindigkeit zunimmt.

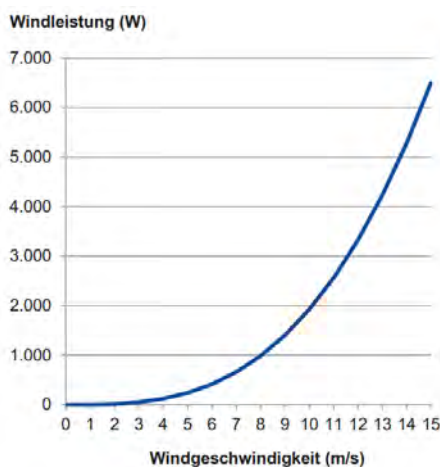


Abbildung 18: Zunahme der Windleistung mit der Windgeschwindigkeit [car13]

In Tabelle 6 sind beispielhaft technische Daten von drei Kleinwindkraftanlagen zusammengestellt.

Firma und Modell	Nennleistung [kW] (bei Normalwind)	Achs- lage	Anlauf- geschw. [m/s]	Durchmesser Rotor [m²]	Mast- höhe [m]
Antaris 2.5	2,5 (11 m/s)	H	2,5	3	7 - 24
Silent Future-Tec 4,2	4,2 (11,3 m/s)	V	3	4	z.B. 19
Easy Wind 6	6 (11,5 m/s)	H	3	6	7 - 19

Tabelle 6: Beispielhafte technische Daten von Kleinwindkraftanlagen

Für die Genehmigung von Kleinwindkraftanlagen bestehen auf Bundesebene keine einheitlichen Regelungen. So unterscheidet sich das Genehmigungsverfahren je nach Bundesland und zugehörigem Landesbauordnungsrecht. Zu beachten ist, dass die Genehmigung für die Errichtung von Kleinwindanlagen in Wohngebieten schwieriger ist als in Gewerbegebieten, Mischgebieten oder im ländlichen Raum. Bei der Genehmigung werden unter anderem die Auswirkungen von Lärm, Schatten- und Eiswurf beurteilt.

Die spezifischen Investitionskosten von Kleinwindkraftanlagen können sich zwischen 3.000 €/kW bis 9.000 €/kW bewegen. Je nach Standorteignung und Anlagengröße ergeben sich für Kleinwindkraftanlagen bis 30 kW Stromgestehungskosten zwischen 15 und 30 ct/kWh auf [car13]. Die Wirtschaftlichkeit einer Kleinwindkraftanlage muss für die lokalen Gegebenheiten geprüft werden. Großen Einfluss haben die mittlere Windgeschwindigkeit des Standorts sowie der Eigennutzungsanteil. Für ins öffentliche Stromnetz eingespeisten Strom gibt es nach dem EEG 2014 nur eine geringe Vergütung, die vom Jahr der Inbetriebnahme abhängt. Derzeit liegt für Windkraftanlagen bis 50 kW die für 20 Jahre festgeschriebene Vergütung bei 8,5 ct/kWh. Die im EEG festgeschriebene Degression wird quartalsweise angepasst und hängt vom Zubau an Windkraftanlagen ab. Wenn die Kleinwindkraftanlage eine installierte Leistung von höchstens 10 kW hat und höchstens 10.000 kWh Strom pro Kalenderjahr selbst verbraucht werden, muss keine EEG-Umlage auf den eigen genutzten Strom gezahlt werden.

Ein Vorteil von Kleinwindkraftanlagen besteht darin, dass die ökologische Stromerzeugung gut sichtbar gezeigt wird.

6.7.2 Potenzialanalyse Standorte

Das Strömungsverhalten des Windes und damit der Ertrag einer Anlage werden vom Standort und der Landschaft (Oberflächenrauigkeit) beeinflusst, z.B. von Oberflächenhindernissen wie Wäldern und Gebäuden. Des Weiteren gilt, je höher der Rotor der Windkraftanlage gegenüber der Umgebung ist, desto größer die Windgeschwindigkeit.

Hinsichtlich der Wahl eines gut geeigneten Anlagentyps und der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist in der Regel eine Windmessung erforderlich, um genauen Aufschluss über die standortspezifischen Windverhältnisse zu erhalten. Der Messzeitraum sollte mindestens 3 Monate bis ein Jahr betragen. Die Messdaten werden dann in Relation zu mehrjährigen Messreihen gesetzt und bereinigt. Geeignet sind Standorte, für die sich in Nabenhöhe eine Jahresdurchschnittswindgeschwindigkeit von deutlich mehr als 3 m/s ergibt.

In nachfolgender Grafik des Deutschen Wetterdienstes sind die Jahresmittelwerte der Windgeschwindigkeiten für Deutschland für 10 m über Grund für den Bezugszeitraum 1981 bis 2000 angegeben. Ferner wurden in der Karte die als Untersuchungsgegenstand festgelegten Standorte markiert.

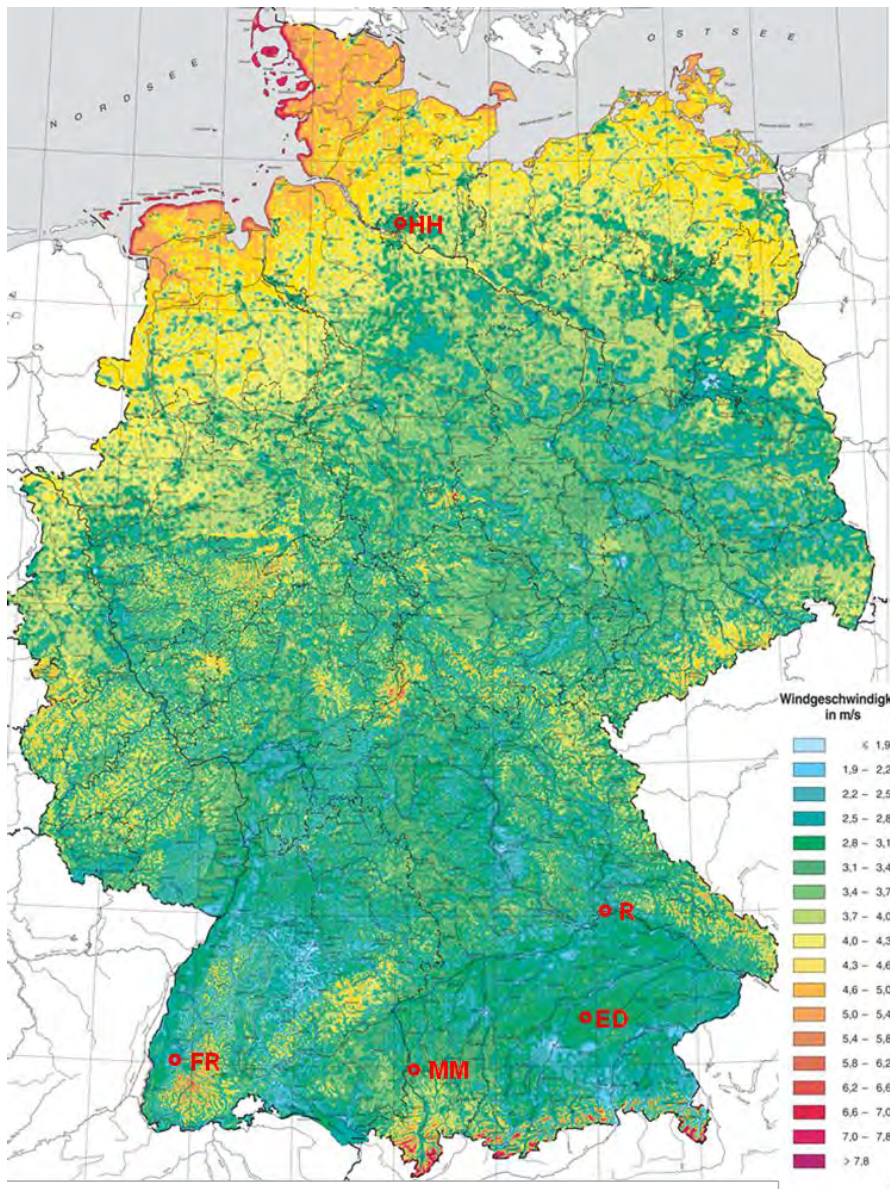


Abbildung 19: Windkarte Deutschland (10 m)1981-2000 (Quelle: DWD)

Für die Standorte Erding, Memmingen, Regensburg sowie Freiburg liegen die mittleren Windgeschwindigkeiten auch aufgrund der städtischen Lagen deutlich unter 3 m/s. Diese sind daher nicht für eine Aufstellung von Windrädern geeignet.

In Hamburg und Umgebung gibt es jedoch windreiche Standorte mit mittleren Windgeschwindigkeiten von bis zu 4 m/s.

Aus diesem Grund soll anhand einer Beispielertragsrechnung für den Standort Hamburg das Potenzial der Windkraft eingeschätzt werden. In Abbildung 20 ist der Bereich Hamburg aus der vorangestellten Grafik vergrößert dargestellt. So lassen sich die hellgrünen und gelben Flächen mit Jahresmittelwerten der Windgeschwindigkeiten von 3,7 bis 4,3 m/s besser erkennen.

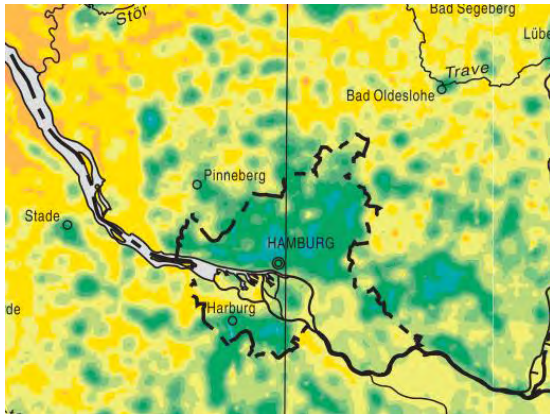


Abbildung 20: Ausschnitt Region Hamburg aus Windkarte Deutschland (10 m)1981-2000 (Quelle: DWD)

Für die Anlage Silent Future-Tec [sft14] wird für den Standort Hamburg auf Basis von Meteonorm-Daten [met12] für Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe in Halbstundenwerten eine beispielhafte Abschätzung durchgeführt. Aus den Meteonorm-Daten ergab sich hierbei eine mittlere Jahres-Windgeschwindigkeit von 3,9 m/s.

Für die Berechnung werden die Leistungsdaten der Windkraftanlage Silent Future-Tec in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit für die Normal- und die Schwachwindversion hinterlegt. Die Normalversion läuft bei einer Windgeschwindigkeit von 3,0 m/s an, die Schwachwindversion ab 2,5 m/s. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 angegeben.

	Silent Future-Tec Schwachwindversion	Silent Future-Tec Normalversion
Maximale Leistung	4,2 kW	4,2 kW
Jahresertrag	5.026 kWh	3.384 kWh
Volllaststunden	1.197	806

Tabelle 7: Beispielhafte Abschätzung des Jahresertrages für die Vertikalanlage SFTV 4,2 mit Standort Hamburg für die Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund

Es zeigt sich, dass für die zugrunde gelegten Winddaten die Schwachwindversion mit rund 5.000 kWh/a den höheren Ertrag liefert. Umgerechnet entspricht dies rund 1.200 Volllaststunden.

6.7.3 Potenzialanalyse Beispielschulen

Eine Aufstellung einer oder mehrerer Kleinwindanlagen auf den Schulgeländen der Beispielschulen ist wegen innerstädtischen Lage und anderweitiger Nutzung der Freiflächen kaum umsetzbar.

Als Beispiel sei die FOS/BOS Erding herausgegriffen, bei der ein Standort im nördlichen Bereich des Parkplatzes in Frage käme (vgl. nachfolgende Abbildung mit Kennzeichnung des Parkplatzes).



Abbildung 21: Umgebung der FOS/BOS Erding (Quelle: google maps)

Wichtig wären ungestörte Flächen aus der westlichen Hauptwindrichtung. Westlich des Parkplatzes steht jedoch ein großes Gebäude. Als Faustformel bei Windstörungen gilt, einen Abstand von 20-mal der Höhe des Hindernisses einzuhalten. Schätzt man die Höhe des Gebäudes mit 20 m ab, so wäre ein Abstand von 400 m erforderlich. Der Abstand beträgt jedoch nur ca. 80 m.

Des Weiteren ist eine Aufstellung auf den Dächern der Beispielschulen denkbar. Dies wäre insbesondere bei mehrstöckigen, die Umgebungsbebauung überragenden Schulen zu prüfen, was jedoch bei den Beispielschulen nicht gegeben ist. Im Falle einer Dachinstallation wären auf eine geeignete Gebäudestatik zu achten und eine schalltechnische Entkopplung vorzusehen. Jedoch ergäbe sich bei einer Dachinstallation eine Flächen-Konkurrenzsituation zur Photovoltaik-Anlage.

Auch eine Auswertung von klimaneutralen Gebäuden ergab [mus11], dass die gebäudenähe Windkraftnutzung wenig Potentiale bietet, so dass fast alle Nullenergiegebäude Solarstromanlagen zur Stromerzeugung nutzen.

6.7.4 Fazit

Eine Windkraftnutzung auf Schulgeländen käme nur bei verfügbaren Freiflächen oder als Dachanlage im kleinen Leistungsbereich (1 bis 10 kW) in Frage. Zu Problemen können Schatten- und Eiswurf sowie Lärm führen. In den innerstädtischen Bereichen der Beispielschulen sind die Windgeschwindigkeiten nicht ausreichend und die Umgebungsbebauung würde zu störenden Windturbulenzen führen, so dass hier kein Potenzial für eine Windkraftnutzung besteht. Auch sind die Stromerträge relativ gering, wie eine Abschätzung für den windgünstigen Standort Hamburg mit 5.000 kWh/a für eine Kleinwindkraftanlage mit 4,2 kW zeigt.

6.8 Zusammenfassung

In nachfolgender Tabelle erfolgt eine zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse der Potenzialanalyse für den Einsatz Erneuerbarer Energien in Plusenergieschulen.

	Verfügbarkeit	Einsetzbarkeit an Schulen	Platzbedarf	Eignung für Plusenergieschule
Solarenergie - Solarthermie	überall in Deutschland nutzbar, aber Süd-Nord-Gefälle bezüglich Einstrahlung	Dach/Fassade	Flächenkonkurrenz zu PV	bei zentraler Warmwasserbereitung
Solarenergie - Photovoltaik	überall in Deutschland nutzbar, aber Süd-Nord-Gefälle bezüglich Einstrahlung	Dach/Fassade	i.d.R. gesamte Dachfläche	geeignet erforderlich für Plus
Geothermie - Grundwasser-WP	lokal zu prüfen/ genehmigungspflichtig	bei Niedertemperaturheizung	gering	geeignet
Geothermie - Erdsonden-WP	lokal zu prüfen/ genehmigungspflichtig	bei Niedertemperaturheizung	ausreichend unversiegelte Außenflächen	geeignet
Biomasse - Pelletkessel	überall nutzbar, jedoch unterschiedliche Versorgungsdichte mit Pelletwerken	ohne Einschränkung	Pelletlager/ Anlieferung	geeignet
Biomasse - Hackschnitzelkessel	bei lokaler Verfügbarkeit nutzbar	ohne Einschränkung	Hackschnitzellager/ Anlieferung	geeignet
Fernwärme mit KWK/Ern. Energie	bei Verfügbarkeit eines Fernwärmenetzes nutzbar	ohne Einschränkung	gering	bei niedrigem Primärenergiefaktor
Windkraft - KWKA	geringe Windgeschwindigkeiten in urbanen Gebieten/ genehmigungspflichtig	bei hoher durchschnittlicher Windgeschwindigkeit	freistehende Außenflächen, ggf. Dach	gegeben, jedoch Beitrag gering

Tabelle 8: Auswertung der Potenziale Erneuerbarer Energien für den Einsatz an Plusenergieschulen

7.0 Vorgehensweise bei der Berechnung der Beispielschulen

Ziel der Untersuchung der drei Beispielschulen ist eine Analyse, ob und unter welchen Bedingungen ein Plusenergieschulen-Standard erreichbar ist. Nachfolgend wird die Berechnungsmethodik vorgestellt.

7.1 Berechnungsmethodik

7.1.1 Diskussion und Festlegung

Bezugnehmend auf die in Kapitel 2.0 aufgezeigten Definitionen wird nachfolgend ein Vorschlag einer Berechnungsmethodik erarbeitet. Diese bildet sodann die Grundlage für die durchgeführten Berechnungen.

Nachfolgende Punkte sind für eine Definition eines Plusenergiestandards festzulegen. Auf weiterführende Literatur sei verwiesen z.B. [peq13], [eco11], [mus11]. In die Aufbereitung fließen insbesondere die Arbeiten von [eco11], die sich mit den Grundlagen von „nearly zero-energy-buildings“ beschäftigt, und [peq13], welche eine Definition für Plusenergiequartiere erarbeitet haben, ein.

Bilanzierungsebene

Bei der Bilanzierungsebene ist festzulegen, welche energetische Größe bewertet werden soll, um den Plusenergiestandard nachzuweisen. Bilanziert werden könnten beispielsweise Energie, Leistung, Ressourcenverbrauch oder Emissionen. Die Ebene der Energiebewertung kann Nutz-, End- oder Primärenergie sein. Auch ist zu klären, wie unterschiedliche Energieträger gewichtet, wie diese miteinander verrechnet werden können und, ob nur die Nutzungsphase oder auch die Herstellungsphase bewertet wird.

Wie auch bei der Definition des BMVBS-Effizienzhaus-Plus wird die Primärenergie als geeignet für die Bewertung des Plusenergiestandards eingestuft. Über die Bewertung des Endenergiebedarfs durch Primärenergiefaktoren kann der Ressourcenverbrauch geeignet abgebildet und die Energieträger vergleichbar gemacht werden. Zudem ist sie als für den EnEV-Nachweis zu ermittelnde Größe geläufig.

Nachteilig ist, dass Primärenergiefaktoren festgelegt werden müssen. Die Festlegung erfolgt durch Berechnung der für die Erzeugung des Energieträgers benötigten Energie. Unter Umständen muss jedoch auch eine Wertung erfolgen (z.B. Energieinhalt von radioaktivem Material bei Atomenergie). Die Festlegung von Primärenergiefaktoren kann jedoch auch als Option für Steuerungszwecke genutzt werden.

Bei der Definition des BMVBS-Effizienzhaus-Plus wird neben einem negativen Jahresprimärenergiebedarf auch ein negativer Jahresendenergiebedarf gefordert. Die Verwendung dieser Größe für die Bilanzierung des Plusenergiestandards bietet den scheinbaren Vorteil, dass der Bezug und die Erzeugung aller Energieträger ausgeglichen sein müssen. Letztendlich muss dann aber jede benötigte Kilowattstunde Fernwärme durch eine Kilowattstunde erzeugten Strom kompensiert werden. Es kann jedoch sein, dass für die Erzeugung der Fernwärme kaum Ressourcen verbraucht wurden und für die Erzeugung der Kilowattstunde Strom ein Mehrfaches der Energieträger Kohle oder Erdgas eingesetzt werden musste. So schreibt auch [mus11], dass die Endenergie zwar die am einfachsten zu verstehende ist, jedoch das große Manko aufweist, dass die Qualität der verschiedenen Energieträger vollkommen außer Acht gelassen wird.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass sich die Anforderung an den Endenergiebedarf auf die einsetzbare Anlagentechnik für die Wärmeerzeugung auswirkt. In den realisierten Effizienzhaus-Plus-Wohngebäuden wurden bis auf wenige Ausnahmen nur Wärmepumpen zur Wärmeerzeugung eingesetzt. Die elektrisch angetriebene Wärmepumpe schneidet endenergetisch im Vergleich zu anderen Energieträgern sehr gut ab. Bei üblichen Bilanzierungsverfahren wird die Umweltwärme (Erdreich, Grundwasser, Abwasser) nicht bewertet, welche beim Einsatz einer Wärmepumpe genutzt wird. Im Gegensatz dazu würde Fernwärme, die in einer Geothermie-Anlage erzeugt wird, auf Endenergiebas-

is zu 100 % angesetzt. Auf Endenergieebene ist die bezogene Fernwärme relevant, egal, ob sie mit Erdwärme oder in einem Heizwerk erzeugt wurde.

Um die Bewertung des Versorgungskonzeptes technologieoffen zu gestalten, wird als Bilanzierungsgegeneben von Plusenergieschulen nur die Primärenergiebilanz festgelegt und keine Anforderung an die Endenergiebilanz gestellt.

Es bleibt jedoch zu diskutieren, ob, um einem geringem Dämmstandard und einer ineffizienten Anlagentechnik bei Verwendung eines Energieträgers mit sehr geringem Primärenergiefaktor vorzubeugen, noch eine diesbezügliche Nebenanforderung gestellt wird.

Bilanzierungsumfang

Für die Definition des Bilanzierungsumfangs muss geklärt werden, was die Bilanzierung alles umfasst. Dies könnte die Konditionierung des Gebäudes, der Warmwasserbedarf, der Beleuchtungsstrom, Hilfsenergien und auch der Nutzerstrombedarf sein. Neben der Betriebsphase könnte auch die Errichtung und die Entsorgung des Gebäudes (graue Energie) einbezogen werden.

Entsprechend der Methodik gängiger Definitionen wird als Bilanzierungsumfang von Plusenergieschulen der gesamte Bedarf einschließlich des Nutzerstrombedarfs erfasst.

Obwohl die Erfassung von grauer Energie für die Errichtung und die Entsorgung des Gebäudes als ganzheitlicher Betrachtungsansatz als sinnvoll anzusehen ist, soll diese in Analogie zu gängigen Definitionen nicht in die Bedarfsermittlung einfließen. Auch ist der zusätzliche Bilanzierungsaufwand für den ganzheitlichen Betrachtungsansatz sehr hoch. Diese kann jedoch im Rahmen anderer Bilanzierungswerkzeuge (z.B. DGNB) erfasst werden.

Für die Primärenergiebilanz muss daher der Primärenergiebedarf Q_P für das Gebäude, der den Bedarf für Heizwärme, Warmwasser, Lüftung und Beleuchtung enthält, zuzüglich dem primärenergetisch bewerteten Nutzerstrombedarf $Q_{P,N}$ und der primärenergetisch bewerteten Energieerzeugung $Q_{P,EE}$ für eingespeisten und selbstgenutzten Strom bestimmt werden.

Bilanzgrenze

Des Weiteren muss der Verlauf der Bilanzgrenze festgelegt werden. Diese könnte entlang der thermischen Hüllfläche (analog EnEV-Nachweis) oder des gesamten Gebäudes oder des Grundstücks verlaufen.

Eine Plusenergieschule kann sich jedoch nicht nur auf die thermische Hülle beziehen, da sich auch im Betrieb der Schule ein „Plus“ ergeben soll. Es wird vorgeschlagen, das Gebäude und die dazugehörigen Außenanlagen als Bilanzgrenze zu wählen. Falls sich auf einem Grundstück mehrere Gebäude befinden, kann sich die Bilanzierung entweder nur auf ein Gebäude oder auf alle Gebäude beziehen. Als zugehöriger Strombedarf der Außenanlagen ist beispielsweise Strom zu verstehen, der beim Stromzähler der Schule mit erfasst wird. Für eine zu bilanzierende Schule ist daher die zugrunde gelegte Bilanzgrenze genau zu beschreiben.

Bilanzzeitraum

Beim Bilanzzeitraum ist festzulegen, auf welchen zeitlichen Rahmen sich die Bilanz bezieht.

Es wird vorgeschlagen, analog dem EnEV-Nachweis, als zeitliche Bilanzgrenze ein Jahr zu verwenden.

Dies bedeutet auch, dass eine Plusenergieschule nicht zu jedem Zeitpunkt ein „Plus“ erreichen muss, sondern nur bilanziell auf ein Jahr bezogen.

Bilanzwerkzeug

Ferner ist festzulegen, wie bzw. nach welcher Methode zu bilanzieren ist. Mögliche Methoden sind Verordnung, Normen oder thermische Simulationen. Zusätzlich sind die Randbedingungen (z.B. Klima, Nutzungsprofile) für die Berechnung festzulegen.

Für jeden Schulneubau muss ein EnEV-Nachweis und die dazugehörige Berechnung nach DIN V 18599, bei der der Energiebedarf für Heizwärme, Warmwasser, Lüftung und Beleuchtung berechnet wird, durchgeführt werden. Um die Berechnung nachvollziehbar zu machen und auch den Arbeitsauf-

wand für die Berechnung zu minimieren, wird daher vorgeschlagen die Berechnung analog dem EnEV-Nachweis auf Basis der DIN V 18599 als Mehrzonenmodell durchzuführen.

Zusätzlich muss bei einem Plusenergiegebäude der Nutzerstrombedarf ermittelt werden. Da es hierfür kein genormtes Verfahren gibt, wird vorgeschlagen analog der Vorgehensweise beim BMVBS-Effizienzhaus-Plus diesen auf Basis von pauschalen, auf die Nettogrundfläche bezogenen spezifischen Werten zu berechnen.

Die Berechnung von erzeugtem Strom soll nach der Methodik der DIN V 18599-9 erfolgen.

Primärenergiefaktoren

Bei der Festlegung der für die Berechnung der Primärenergie zugrunde zu legenden Faktoren soll auf eine normative Grundlage zurückgegriffen werden. Um die Bilanzierung nachvollziehbar zu machen, werden die Primärenergiefaktoren für den nicht erneuerbaren Anteil analog denen zum EnEV-Nachweis des Gebäudes angesetzt.

Nachfolgend soll kurz auf die Schwierigkeit bei der Festlegung des Primärenergiefaktors für Strom eingegangen werden. Dieser unterliegt einer ständigen Anpassung, da sich die Zusammensetzung des Kraftwerksparks in Deutschland verändert. Tabelle 9 zeigt die nach EnEV bzw. DIN V 18599 anzusetzenden Primärenergiefaktoren für Strom.

	DIN V 18599 :2007-2	EnEV2009	EnEV2013 (DIN V 18599:2011-12)	EnEV2013 ab 1/2016	DIN V 18599: Ber. 2013-5
Strom-Mix (nicht erneuerbarer Anteil)	2,7	2,6	2,4	1,8	2,0
Verdrängungsstrommix (nicht erneuerbarer Anteil)	-	-	2,8	2,8 (KWK)	2,5

Tabelle 9: Übersicht über die nach DIN V 18599 Version 2007 und 2011 sowie EnEV 2009 und 2013 anzusetzenden Primärenergiefaktoren für Strom

Die EnEV 2013 verweist für die anzusetzenden Primärenergiefaktoren auf die DIN V 18599-1: 2011-12. Für die Tabelle A.1 – Primärenergiefaktoren gibt es mittlerweile eine Berichtigung DIN V 18599-1 Ber 1:2013-05, die jedoch nicht für die EnEV-Berechnung und somit nicht für die vorliegende Definition relevant ist. Demnach ist für eine Schule, für welche die EnEV 2013 greift, für den Strombezug ein Primärenergiefaktor von 2,4, ab dem 1. Januar 2016 von 1,8 anzusetzen.

Nach EnEV gibt es jedoch keine Vorgabe für die primärenergetische Bewertung von eingespeistem PV-Strom, da dieser nicht berücksichtigt wird. Der ansetzbare, selbstgenutzte PV-Strom (ermittelt über Monatsbilanzverfahren) reduziert hier den Strombezug und entspricht somit dem Strom-Mix. Nach der Definition des BMVBS-Effizienzhaus-Plus wird ebenfalls über ein Monatsbilanzverfahren der selbstgenutzte PV-Strom vom Strombedarf, der jedoch auch den Nutzerstrom miteinbezieht, abgezogen. Der überschüssige PV-Strom wird beim BMVBS-Effizienzhaus-Plus mit dem Verdrängungsstrom-Mix bewertet. Diese Bewertung führt jedoch dazu, dass der netzeingespeiste Strom mit einem Primärenergiefaktor von 2,8 höher bewertet wird als der Selbstgenutzte, der Strom mit einem Primärenergiefaktor von 2,4 ersetzt. Diese Bewertung erscheint fraglich, da nicht sichergestellt ist, dass mit dem eingespeisten PV-Strom immer konventionelle Kraftwerke ersetzt werden. Im Gegensatz hierzu wird nach [peq13] der eigengenutzte Stromertrag mit dem Primärenergiefaktor für Verdrängungsstrom, die Einspeisung von Strom in das öffentliche Netz dagegen nur mit dem Primärenergiefaktor für den allgemeinen Strommix gewichtet.

Im Rahmen dieser Untersuchung wird sowohl der selbstgenutzte als auch der eingespeiste Strom mit 2,4 entsprechend dem nicht erneuerbaren Anteil des allgemeinen Strommixes angesetzt. Für die nachfolgenden Berechnungen der Beispielschulen werden die Primärenergiefaktoren nach EnEV 2013 verwendet.

Bilanzbedingungen

Mittels Berechnung mit standardisierten Randbedingungen (Standardklima, Standard-Nutzungsprofile) wird die energetische Qualität vergleichbar. Für das tatsächliche Erreichen eines Energieüberschusses während der Nutzung sind jedoch die lokalen Gegebenheiten ausschlaggebend. Aus diesem

Grund werden eine „Standardisierte Berechnung“ als auch eine „Berechnung mit freien Randbedingungen“ durchgeführt, wobei beide ein „Plus“ erreichen müssen. Hierdurch kann geprüft werden, ob der „Plusenergiestandard“ in beiden Fällen erreicht wird und wie stark die standardisierten und die angepassten Bedarfswerte voneinander abweichen.

Für die standardisierte Bedarfsberechnung soll analog EnEV-Berechnung das Standardklima Deutschland angesetzt werden. Für das Klima zur Berechnung der Stromerzeugung werden die Wetterdaten des Standardklima-Standortes Potsdam angesetzt.

Da es bei Windkraftanlagen nicht zielführend wäre, ein Standardklima zu verwenden, werden für das Klima zur Berechnung der Windkrafterzeugung lokale Wetterdaten angesetzt. Für die Klimadaten der Wind-Erzeugung sind auch lokale Messungen zulässig, da auf Basis der gemessenen Zeiträume Prognosen für die langfristigen Erträge aus Windkraft abgeleitet werden können.

Die Nutzungsrandbedingungen für die Zonen bei der standardisierten Berechnung sind gemäß Tabelle 4 DIN V 18599-10 anzusetzen. Der Nutzerstrombedarf wird standardisiert mit 8 kWh/a je Quadratmeter Nettogrundfläche für Grundschulen und 10 kWh/m²a für sonstige Schulen berechnet (vgl. Kapitel 4.0).

Bei der Berechnung mit freien Randbedingungen, der an die Schule angepassten Berechnung, sollen für die Bedarfsberechnung die Wetterdaten nach der jeweiligen Region der DIN V 18599-10:2011-12 ausgewählt werden.

Für die Berechnung der Stromerzeugung werden lokale Wetterdaten verwendet. Da die Globalstrahlungsdaten für die Ermittlung des PV-Ertrags auch vom Zeitraum der Messdaten abhängt, muss ein vergleichbarer Messzeitraum festgelegt werden (vgl. Kapitel 7.6).

In nachfolgender Tabelle wird eine Zusammenfassung über die zu verwendenden Klimadaten gegeben.

	Datenbasis	Standardisierte Berechnung	angepasste Berechnung mit freien Randbedingungen
Bedarfsberechnung	DIN V 18599-10	Referenzklima EnEV	Klimaregion Standort Schule
Erzeugung	z.B. Meteornorm (Basis 1991 bis 2011)	Standort Potsdam	Standort Schule

Tabelle 10: Übersicht über die zu verwendenden Klimadaten

Die Nutzungsprofile können an die realen Bedingungen (z.B. Nutzungszeiten, interne Wärmegewinne, Luftmengen) angepasst werden. Ebenso kann der tatsächlich zu erwartende Nutzerstrombedarf angesetzt werden. Insbesondere sind hier nicht schultypische Zonen wie z.B. Küche und Turnhalle zu beachten, die andere Nutzerstrombedarfe aufweisen. Daher wird bei Vorhandensein solcher Sonderzonen eine aufgesplittete Berechnung vorgeschlagen. Hierbei wird der Nutzerstrombedarf für Sonderzonen separat und der allgemeine Nutzerstrombedarf über den standardisierten Ansatz mit der Nettogrundfläche der restlichen Zonen berechnet.

Plusenergiestandard

Abschließend ist noch zu klären, welche Zielmarke für eine Plusenergieschule zu erreichen ist und wie viel „Plus“ das Gebäude mindestens erreichen muss.

Analog zur Definition des BMVBS-Effizienzhaus-Plus wird vorgeschlagen, dass der Plusenergiestandard erreicht wird, sobald ein "Plus" erreicht wird, unabhängig von der Höhe des erzeugten Überschusses.

Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass für ein gegebenenfalls zu erreichendes "Plus" keine zusätzlichen Energieerzeugungsanlagen benötigt werden. Jedoch ist bei nur geringfügigem Überschuss die Abgrenzung zum Nullenergiegebäude nicht eindeutig.

Nebenbedingungen

Über Nebenanforderungen und –bedingungen können weitere Anforderungen oder die Angabe von Werten gefordert werden.



Da keine Anforderung an die Endenergiebilanz gestellt wird, soll ein Mindestmaß an die energetische Qualität der Gebäudehülle über den mittleren Transmissionswärmeverlust gestellt werden. Dieser muss den mittleren Transmissionswärmeverlust an das EnEV-Referenzgebäude um mindestens 30 % unterschreiten. Dies entspricht einem sehr guten Dämmstandard und entspricht der nach Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz für öffentliche Gebäude als Ersatzmaßnahme geforderten Unterschreitung. Eine Mindestanforderung an den Eigennutzungsanteil des erzeugten Stroms erscheint zusätzlich sinnvoll, um die Belastung externer Netze einzubeziehen.

7.1.2 Definition Plusenergiestandard

In Tabelle 11 sind die oben beschriebenen Festlegungen zusammengefasst. Diese sind einerseits die Grundlage für die Berechnung der Beispielschulen, stellen aber auch den im Rahmen dieser Studie erarbeiteten Vorschlag für die Definition von Plusenergieschulen dar, der anhand der Ergebnisse der Beispielschul-Berechnungen noch überprüft wird (vgl. Kapitel 11.2).

Bilanzebene	Primärenergie
Bilanzumfang	Bedarf und Erzeugung während Nutzung (keine graue Energie) - Q_P Primärenergiebedarf Gebäude nach EnEV / DIN V 18599 - $Q_{P,N}$ Primärenergetisch bewerteter Nutzerstrombedarf - $Q_{P,prod}$ Primärenergetisch bewertete Energieerzeugung
Bilanzgrenze	Schulgebäude (incl. zugehörigen Außenanlagen) alternativ: Schulgrundstück
Bilanzzeitraum	Jahresbilanz
Bilanzwerkzeug	Bedarfsermittlung für Heizung, Trinkwarmwasser, Lüftung, Beleuchtung nach DIN V 18599 (Mehrzonenmodell) Stromerzeugung nach Methodik der DIN V 18599-9
Primärenergiefaktoren	Festlegung analog für die Schule anzuwendender EnEV Primärenergiefaktoren bei Anwendung der EnEV 2013: f_P Holz: 0,2 f_P Strombezug: 2,4 bzw. 1,8 (allg. Strommix) gemäß EnEV f_P erzeugter KWK-Strom: 2,8 (Verdrängungsstrommix) f_P erzeugter Strom aus PV und Windkraft: 2,4 bzw. 1,8 (analog allg. Strommix) f_P Fernwärme: nach Tabelle A.1 DIN V 18599-1 oder nach AGFW-Liste der veröffentlichten f_P -Bescheinigungen oder durch Berechnung von einem unabhängigen Sachverständigen nach dem Berechnungsverfahren der DIN V 18599
Bilanzbedingungen	I. Standardisierte Berechnung - Klima Bedarfsberechnung: Standardklima Deutschland nach EnEV 2013 - Klima PV-Erzeugung: Standort Potsdam - Klima Wind-Erzeugung: lokale Wetterdaten/Messungen - Nutzungsprofile gemäß Tabelle 4 DIN V 18599-10 - Nutzerstrombedarf: 8 kWh/m²a für Grundschulen, 10 kWh/m²a für sonstige Schulen II. Berechnung mit freien Randbedingungen (an die Schule angepasst) - Klima Bedarfsberechnung: Wetterdaten nach Region der DIN V 18599-10:2011-12 - Klima PV-Erzeugung: lokale Wetterdaten (z.B. Meteonorm) - Klima Wind-Erzeugung: lokale Wetterdaten/Messungen - Angepasste Nutzungsprofile - Angepasster Nutzerstrombedarf
Plusenergiestandard	Primärenergiejahresbilanz in kWh/m²a bzw. kWh/a: $Q_P + Q_{P,N} - Q_{P,prod} < 0$

Tabelle 11: Berechnungsmethodik Plusenergieschulen

7.2 Berechnung des Gebäudeenergiebedarfs

7.2.1 Basisvariante

Für die Eingabe wird nachfolgend eine Basisvariante festgelegt, welche die Grundlage für alle Berechnungen der Beispielschulen bildet.

Allgemeine Randbedingungen und Dämmstandard

Flächenermittlung und Nutzungsprofile

- Die Flächenermittlung, Zonierung und Nutzungsprofile werden aus den zur Verfügung gestellten EnEV-Nachweisen der Beispielschulen übernommen.
- Die Nutzungs- und Betriebszeiten der verwendeten Nutzungsprofile nach DIN V 18599-10 werden an die Hauptnutzung Klassenzimmer (Nutzungsprofil 8 „Klassenzimmer (Schule)“ angepasst, sofern die Übernahme der Nutzungs- und Betriebszeiten eine sinnvolle Annahme darstellt. Bei den Beispielschulen wurden alle Nutzungsprofile abgesehen von Büro- und Sporthallennutzungen angepasst.
Anmerkung: Nicht ganz schlüssig ist, dass in der nach DIN V 18599-10 bei einer Anpassung der Nutzungs- und Betriebszeiten nicht auch eine Vorgehensweise zur Anpassung der internen Wärmequelle beschrieben ist. Bei einer Veränderung der täglichen Nutzungs- und Betriebszeiten wäre die logische Konsequenz, auch die in Wh/m^2 pro Tag angegebenen internen Wärmequellen zu ändern. Da eine Änderung der internen Wärmequellen nach DIN V 18599-10 nicht vorgesehen ist, werden diese nicht angepasst.

Opake Bauteile

- U-Werte 40 % unter Referenzgebäude-Ausführung nach Anlage 2, Tabelle 1 der EnEV 2009 bzw. 2013:

U-Wert Dach	0,12 $\text{W/m}^2\text{K}$
U-Wert Außenwand/ Decke an Außenluft	0,17 $\text{W/m}^2\text{K}$
U-Wert Bodenplatte/ Kellerwand	0,21 $\text{W/m}^2\text{K}$
U-Wert Außentür	1,08 $\text{W/m}^2\text{K}$

Transparente Bauteile

- Fenster, Vorhangfassade (Dreischeibenverglasung):

U_w -Wert	0,9 $\text{W/m}^2\text{K}$
U_g -Wert	0,6 $\text{W/m}^2\text{K}$
U_f -Wert	1,2 $\text{W/m}^2\text{K}$
g-Wert	0,50
τ_{D65}	0,68
Rahmenanteil	20 %

- Glasdach, horizontale Fenster (Dreischeibenverglasung):

U_w -Wert	1,1 $\text{W/m}^2\text{K}$
U_g -Wert	0,8 $\text{W/m}^2\text{K}$
U_f -Wert	1,2 $\text{W/m}^2\text{K}$
g-Wert	0,50
τ_{D65}	0,68
Rahmenanteil	20 %

Anmerkung: Durch den horizontalen Einbau verschlechtert sich der U-Wert der Dreischeibenverglasung.

- Sonnenschutz: außenliegende Jalousien, variabel, automatisch betrieben
- Verschattungsfaktor F_s 0,9
- Verbauungsindex I_v 0,9

Wärmebrücken:

- Detaillierter Nachweis der Wärmebrücken: ΔU_{WB} 0,02 W/(m²K)
Bei einem Quervergleich der Relevanz der ermittelten Wärmebrücken von Passivhaus-Schulen [phi06], konnte festgestellt, dass viele Schulen wärmebrückenfreie Konstruktionen umsetzen konnten. Aus diesem Grund wurde der Wärmebrückenzuschlag so gering angesetzt.

Luftdichtheit

- Durchführung eines Blower-Door-Tests: Drucktestergebnis n_{50} 0,4 1/h (pauschaler Ansatz)

Trinkwarmwasser

- Dezentral, elektrische Trinkwarmwasser-Bereitung für WCs
Der Warmwasserbedarf für Handwaschbecken, Putzräume, Teeküchen wird gemäß DIN V 18599-10 Tabelle 6 Fußnote b vernachlässigt. (Dieser Strombedarf ist beim Nutzerstrombedarf berücksichtigt.)
- Zentrale Trinkwarmwasser-Bereitung über Wärmeerzeuger für Küchen und Sporthallen-Duschen: Ansatz wie im EnEV-Nachweis
- Leitungslängen nach DIN V 18599-8:2011-12: Berechnung Verteil- und Steige- und Anbindeleitungen nach 6.2.1.2.3 Tabelle 8 für den Netztyp I (Für die Leitungslängenermittlung der zentralen Warmwasserversorgung der Küche wird als $A_{NGF, Sanitär}$ die Fläche der Küche angesetzt. Für die Duschen der Sporthallen wird als $A_{NGF, Sanitär}$ die Fläche der Sanitärbereiche der Sporthalle angesetzt)

RLT

- Klassenzimmer: Auslegung der RLT-Anlage auf 24 m³ pro Person entsprechend 8 m³/m²h
Die Herleitung erfolgte auf Basis des Ansatzes, dass die Menge in einer Zeiteinheit anfallende CO₂-Menge zuzüglich der in der Außenluft vorhandenen Kohlendioxidkonzentration gleich dem Schadstoffgehalt der Raumluft ist.
Die Auslegung erfolgte über den mindestens erforderlichen Luftwechsel für eine CO₂-Obergrenze von 1.000 ppm (Pettenkofer-Zahl) bei mittlerer Belegung von 3 m² je Person, einer CO₂-Emission der sitzenden Schüler von 15 l/h und einer CO₂-Konzentration der Außenluft von 400 ppm. (Anmerkung: Der Mindestaußenluftvolumenstrom von Klassenzimmern beträgt nach DIN V 18599-10 10 m³/m²h), teilweise Deckung des Außenluftvolumenstroms, Konstantvolumenanlage (KVS)
- Sonstige Zonen: RLT-Anlage zur vollständigen Deckung des Mindestaußenluftvolumenstroms
- Keine Befeuchtung, Wärmerückgewinnung ohne Feuchte- und Stoffaustausch
- RLT mit WRG 75 %, WRG Küche 65 % mit Nachheiz-, ohne Kühlfunktion
- Leistungsaufnahme Ventilatoren: EnEV-Standardwerte Gesamtwirkungsgrad Ventilator, Motor, Antrieb im eingebauten Zustand: 0,6, spezifische Leistungsaufnahme nach EnEV 2009 Referenzgebäude-Ausführung nach Anlage 2, Tabelle 1, Zeile 5.3 (Zuluftventilator 1,5 kW/(m³/s), Abluftventilator 1,0 kW/(m³/s)) entsprechend einer Totaldruckerhöhung Zuluftventilator 900 Pa, Abluftventilator 600 Pa
- Aufstellung RLT innerhalb thermischer Hülle
- Anbindeleitung Wärmeerzeuger an Heizregister nach zweifacher tatsächlicher Entfernung bzw. EnEV-Nachweis-Angabe

Beleuchtung

- Zonenweise Eingabe der tageslichtversorgten Bereiche nach EnEV-Nachweis-Angabe
- Berechnung nach Tabellenverfahren
- direkte Beleuchtung

Nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die in der Basisvariante angesetzten Lampenarten und Kontrollsysteme je Nutzungsprofil.

Für Klassenzimmer, Büros und sonstige Aufenthaltsräume einer Plusenergieschule wird das bestmögliche tageslichtabhängige Kontrollsystem gewählt. Bei den Verkehrsflächen wird wegen fensternahen Bereichen, die gut tageslichtversorgt sind sowie fensterfernen Bereichen, die Kunstlichtbedarf bei Präsenz haben, ein automatisch stufenweise ein- und ausschaltendes, tageslichtabhängiges Kontrollsystem, angesetzt.

Nutzungsprofil	Lampenart Kunstlicht	Art des Präsenz-Kontrollsystems	Art des tageslicht-abhängigen Kontrollsystems
1 Einzelbüro 2 Gruppenbüro 3 Großraumbüro 8 Klassenzimmer 17 Sonstige Aufenthaltsräume	stabförmige Leuchtstofflampen, elektronisches Vorschaltgerät	automatisch	automatisch gedimmt, abschaltend, nicht wiedereinschaltend
14 Küchen NWG 15 Küche Vorbereitung 20 Lager, Technik, Archiv 31 Sporthalle	stabförmige Leuchtstofflampen, elektronisches Vorschaltgerät	automatisch	manuell
16 WC und Sanitärräume NWG	Kompaktleuchtstofflampe, integriertes Vorschaltgerät	automatisch	manuell
18 Nebenflächen 19 Verkehrsflächen	Kompaktleuchtstofflampe, integriertes Vorschaltgerät	automatisch	automatisch stufenweise ein-/ausschaltend

Tabelle 12: Basisvariante Übersicht über Lampenart und Kontrollsystem in Abhängigkeit des Nutzungsprofils

Die Basisvariante wird für jede Beispielschule mit Varianten bezüglich Dämmstandard und Technischer Gebäudeausrüstung (vgl. 7.2.2) sowie jeweils für drei Versorgungskonzepte (vgl. Kap. 7.2.3) berechnet.

7.2.2 Varianten Dämmstandard und TGA

Es werden nachfolgende Varianten bezüglich Dämmstandard und Technischer Gebäudeausrüstung untersucht.

- V1 Verbesserte Gebäudehülle
opake Bauteile U-Werte 50 % unter EnEV (entspricht ungefähr Passivhaus-Standard)
Fenster U_w 0,8 W/m²K; Fenster horizontal U_w 1,0 W/m²K; Wärmebrücken ΔU_{WB} 0,01 W/(m²K)
- V2 Verbesserte RLT-Stromeffizienz
Ventilatorleistung: Zuluftventilator 1,0 kW/(m³/s), Abluftventilator 0,8 kW/(m³/s)) entsprechend einer Totaldruckerhöhung von 600 Pa (Zuluftventilator) und von 480 Pa (Abluftventilator). Dies entspricht Kategorie SFP 3 (0,75 bis 1,25 kW/(m³/s)).
- V3 Grundlüftung (Klassenräume)
In der Zone mit Nutzungsprofil „8 Klassenzimmer (Schulen)“ wird mit einfachem Luftwechsel in Verbindung mit Fensterlüftung belüftet. Der Zuluft- bzw. Abluftvolumenstrom wird mit 3 m³/(h*m²) angesetzt.
- V4 Natürliche Lüftung
RLT-Anlage entfällt, bei innenliegenden Räumen (z.B. innenliegende WCs/Sanitärräume)
Abluftanlage, für (Koch-)Küchen wegen des erforderlichen hohen Luftwechsels Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung von 45 % (Kreislaufverbundsystem)

7.2.3 Varianten Versorgungskonzepte

Bei der Anlagentechnik gibt es für die Wärmeerzeugung drei Variantenrechnungen bei den Versorgungskonzepten, nämlich Wärmepumpe, Pelletkessel und Fernwärme. Die angesetzten Randbedingungen für die Berechnung werden nachfolgend angegeben.

1. Wärmeerzeuger: Wärmepumpe

- monovalente Wärmepumpe, COP-Standardwerte aus Tabelle A.3 DIN V 18599-5:2007-02 um - 0,5 korrigiert, um Sole-Umwälzpumpe in Abhängigkeit des Heizbedarfs zu berücksichtigen, (Sole-Umwälzpumpe 0 kW), Heizgrenztemperatur 10 °C (Passivhäuser)
- Fußbodenheizung VL/RL 35°/30°, Verlegeabstand 20 cm
- Verteilung Heizkreispumpe: optimierte Dimensionierung, Druckdifferenz konstant, hydraulischer Abgleich
- Übergabe an alle Zonen, PI-Regler, Mindestdämmung nach DIN EN 1264
- Leitungslängen nach DIN V 18599-5:2011-12: Berechnung Verteil- und Strangleitungen nach 6.3.1.2.2 für den Netztyp II, keine Anbindeleitungen für Fußbodenheizungen
- Dämmstandard Leitungen nach EnEV-Standardwert

2. Wärmeerzeuger: Pelletkessel

- Biomassekessel, Kesselklasse 3 (entsprechend einem Nutzungsgrad von 82 % bei Nennleistung und 86 % bei Teillast), VL/RL Kessel 70/55
- Radiatoren VL/RL 55/45
- Heizkreispumpe und Übergabe analog 1. Wärmepumpe, zusätzlich Anbindeleitungen gemäß DIN V 18599-5:2011-12

3. Wärmeerzeugung über Fernwärme

- Anlagentechnik Heizung: Wärmeerzeugung Fernwärme
Primärenergiefaktor $f_p=0$ (Annahme einer hocheffizienten Fernwärmeversorgung, eine Recherche der bei der AGFW gelisteten Fernwärmeversorgungen hat gezeigt, dass bereits einige Versorger diesen Wert erreichen), VL/RL, Primärtemperatur 105 °C (Warmwasser, niedrige Temperatur), Dämmklasse 4/5
- Verteilung und Übergabe analog 2. Pelletkessel

7.3 Berechnung des Nutzerstrombedarfs

In Kapitel 4.0 sind die Ergebnisse der Recherche zum Nutzerstrombedarf von Schulen dargestellt. Darauf aufbauend wurden Standardwerte für die Definition von Plusenergieschulen abgeschätzt (s. Tabelle 11 Kapitel 7.1).

In nachfolgender Tabelle sind die auf die Nettogrundfläche bezogenen spezifischen Nutzerstrombedarfe angegeben.

	Spezifischer Nutzerstrombedarf [kWh/m²a]
Grundschule	8
Sonstige Schulen	10

Tabelle 13: Werte für den spezifischen Nutzerstrombedarf (standardisierte Berechnung)

7.4 Berechnung des Stromertrags für Photovoltaik

Für jede Schule werden anhand der Gebäudekubatur die verfügbaren Flächen für Dach- und fassadenintegrierte Photovoltaik ermittelt.

Bei der darauf aufbauenden Ermittlung der belegbaren Flächen bleiben ein Abstand zur Attika und andere Dachaufbauten und -nutzungen (z.B. Aufzugsüberfahrten, Dachterrasse) unberücksichtigt. Für die Abstände zur verschattenden Attika ergeben sich hierbei Werte zwischen 1,15 m und 0,8 m. Das sich je nach Neigung ergebende Verhältnis aus PV-Fläche und belegbarer Dachfläche, bei der Wartungsgänge und Abstände zwischen den Modulen in Abhängigkeit des Neigungswinkels berücksichtigt werden, ist in Tabelle 14 prozentual angegeben.

Die Berechnung der Stromerzeugung erfolgt analog der in DIN V 18599-9:2011-12 Kapitel 5.3 beschriebenen Vorgehensweise. Für den Systemsleistungsfaktor f_{perf} werden die Standardwerte nach den in Anhang B angesetzt. Der flächenbezogene Peakleistungskoeffizient K_{pk} wird auf Basis der Recherchen zu PV-Modulen festgelegt (vgl. Kapitel 6.2). Die Werte für den Systemsleistungsfaktor und Peakleistungskoeffizienten sind ebenfalls Tabelle 14 zu entnehmen.

	PV-Fläche pro belegbare Dachfläche	Peakleistungskoeffizient $\text{kWp/m}_{\text{Modul}}^2$	Systemsleistungsfaktor f_{perf}
Dach Süd 30 °	32 %	0,17	0,8
Dach Ost/West10° (Zick-Zack)	81 %	0,17	0,75
Dachbahn	100 %	0,047	0,75
Semitransparente PV-Verglasung	100 %	0,045	0,8
PV-Fassade	100 %	0,045	0,8

Tabelle 14: Kennwerte für die Ermittlung des PV-Ertrags

Da erste Berechnungen ergaben, dass die Beispielschulen, den Plusenergiestandard bei 30° geeigneten südorientierten PV-Modulen nicht erreichen können (vgl. Werte für die PV-Fläche pro belegbare Dachfläche Tabelle 14), wurde diese Variante für die Berechnung der Beispielschulen nicht weiter verfolgt.

Der Ertrag der PV-Anlage ist proportional der Bestrahlungsenergie. Diese ist abhängig vom Standort, dem Neigungswinkel und der Orientierung. Für die Erzeugung werden die Jahreswerte für die Gesamtstrahlung, die sich aus direkter und diffuser Strahlung zusammensetzt, für verschiedene Standorte mit Meteonorm [met12] berechnet. Nachfolgende Tabelle gibt die berechneten Jahreswerte für die Global- und Gesamtstrahlung für verschiedene Orte, Ausrichtungen und Orientierungen an. Für den Standort Erding werden zusätzlich die Auswirkungen einer Verschiebung des Azimutwinkels ermittelt, also einer Abweichung von der exakten Ausrichtung nach der entsprechenden Himmelsrichtung. Der Azimutwinkel von -16° entspricht dem Abweichungswinkel der Südfassade von der exakten Südausrichtung.

	Global- strahlung [kWh/m²a]	30°S Ges.- Strahlung [kWh/m²a]	90°S Ges.- Strahlung [kWh/m²a]	10°O Ges.- Strahlung [kWh/m²a]	90°O Ges.- Strahlung [kWh/m²a]	10°W Ges.- Strahlung [kWh/m²a]	90°W Ges.- Strahlung [kWh/m²a]
Potsdam	1.056	1.226	887	1.050	705	1.051	709
Erding	1.182	1.379	986	1.182	793	1.171	763
Erding (-16°)	1.182	1.374	989	1.154	707	1.199	838
Memmingen	1.141	1.319	941	1.139	765	1.132	746
Regensburg	1.094	1.257	892	1.089	720	1.089	722
Hamburg	995	1.179	883	990	663	991	669
Freiburg	1.105	1.262	879	1.101	718	1.099	713

Tabelle 15: Jahreswerte für die Solare Einstrahlung in Abhängigkeit von Orientierung und Neigung berechnet nach Meteonorm

Die Azimutverschiebung um -16° hat keine Auswirkungen auf die 10°-ost-west-orientierten Module, da dem verminderten Einstrahlungswerten der west-orientierten Module ein erhöhter Ertrag der ost-orientierten Module gegenübersteht. Bei den 30°-süd-orientierten Modulen ergibt sich durch die Verschiebung ein sehr geringer Abschlag von 0,3%. Da die Azimutverschiebung keine nennenswerte Auswirkung auf den Ertrag der untersuchten Varianten hat, wird diese vernachlässigt.

Folgende beiden Varianten werden für jede Beispielschule ermittelt:

- EE0 Belegung opaker Dachflächen mit PV - flächenoptimierte Ost-West-Ausrichtung (Zick-Zack), 10° aufgeständert
- EE1 EE0 und zusätzlicher PV-Einbau in weitere geeignete Flächen wie Südfassaden, große Dachverglasungen u.ä.

Die Gebäudegeometrie und Nutzungen der Dachflächen der Beispielschulen wurden bei der Ermittlung der belegbaren Flächen nicht verändert. Nicht berücksichtigt wurden Ost-, -West-, oder Nordfassaden, Flächen mit Verschattung sowie kleinflächige Bereiche.

7.5 Angepasste Berechnung

Gebäudeenergiebedarf nach DIN V 18599

Zusätzlich zur Basisvariante, der Standardwerte nach EnEV zugrunde gelegt sind, wird eine – soweit möglich - an das tatsächliche Gebäude angepasste Berechnung mit freien Randbedingungen durchgeführt, um die sich hierdurch ergebenden Abweichungen zu einem tatsächlich realisierten Gebäude einschätzen zu können. Hintergrund dieser Vorgehensweise ist, dass hierdurch sichergestellt werden soll, dass das realisierte Gebäude in der Nutzungsphase auch tatsächlich einen Energieüberschuss erzeugen kann. Auch soll überprüft werden, ob die Berechnung mit angepassten Randbedingungen bei der Definition von Plusenergieschulen berücksichtigt werden sollte. Nachfolgend wird die Vorgehensweise bei der angepassten Berechnung der Beispielschulen beschrieben.

Für die Energiebedarfsberechnung mit freien Randbedingungen erfolgt eine Anpassung an das lokale Klima. Grundlage für die Anpassung des Standardklimas an die meteorologischen Wetterdaten des Schulstandortes sind lokale Klimadaten. Für die Berechnung mit freien Randbedingungen werden als Klimadaten für das lokale Klima die entsprechenden Klimaregionen der DIN 18599-10 (Version 2011) verwendet (vgl. Berechnungsmethodik Tabelle 11). Im Kapitel 7.6 wird die Problematik der Verwendung unterschiedlicher Klimadatensätze erläutert.

Im Rahmen dieser Studie soll untersucht werden, wie sich der Bedarf des Gebäudes bei Variation der Klimadaten (Schulstandorte, Beispielstandorte Hamburg und Freiburg) auswirkt. Grundlage der Berechnung sind hierbei die Meteorologischen Daten im Anhang E der DIN V 18599-10:2011 sowie die Klimaregion 13 für alle Standorte der Beispielschulen, die Klimaregion 3 für Hamburg und die Klimaregion 12 für Freiburg.

Auch auf den Strombedarf für Kunstlicht hat der Standort durch die Verschiebung des Sonnenauf- und -untergangs einen Einfluss. Dies kann über die Eingabe der geografischen Breite für den jeweiligen Standort berücksichtigt werden. Da sich herausgestellt hat, dass dieser Einfluss bei Schulen mit Nutzungszeiten zwischen 8 und 15 Uhr sehr gering ist, wurde dieser Effekt bei der Untersuchung vernachlässigt.

Des Weiteren wird in Abhängigkeit des Schultyps eingeschätzt, ob eine Anpassung der Nutzungs- und Betriebszeiten notwendig ist und gegebenenfalls durchgeführt. Die in der DIN V 18599-10 vorgegebenen Nutzungs- und Betriebszeiten sollen im Hinblick auf die täglichen Zeiten überprüft und bei relevanten Abweichungen angepasst werden.

Bei der Literaturlauswertung von energieeffizienten Schulen (vgl. Anhang Tabelle A-1) wurde festgestellt, dass die zur vollständigen Belüftung der Klassenräume ausgelegten RLT-Anlagen auf 15 bis 22 m³/h pro Person dimensioniert wurden und damit deutlich unter dem Ansatz des Nutzungsprofils Nr. 8 Klassenzimmer von 30 m³/h liegen. Auch eine Berechnung des erforderlichen Luftwechsels, um die CO₂-Konzentration unter 1000 ppm zu halten, ergab einen niedrigeren Luftwechsel (vgl. 7.2.1 Abschnitt RLT). Daher erfolgt für die Zone Klassenzimmer eine Anpassung des flächenbezogenen Außenluftvolumenstroms von 10 m³/m²h auf 8 m³/m²h. Letzter Wert wurde schon für die Auslegung der RLT-Anlage für die Basisvariante angesetzt.

Nutzerstrombedarf

Für die angepasste Berechnung soll grundsätzlich der Ansatz des spezifischen Nutzerstrombedarfs überprüft werden und gegebenenfalls angepasst werden. So kann dieser beispielsweise bei einer Schule mit sehr hoher technischer Ausstattung erhöht bzw. bei einer Schule mit geringem Strombedarf oder nur kurzen Nutzungszeiten verringert werden.

Bei der Berechnung der Beispielschulen werden analog der standardisierten Berechnung die spezifischen Werte für den Schultyp mit der entsprechenden Nettogrundfläche multipliziert. Jedoch werden die Sonderzonen Turnhalle und (Koch-)Küche separat erfasst und mit spezifischen Nutzerstromwerten bewertet.

Die spezifischen Nutzerstromwerte sind in nachfolgender Tabelle angegeben. Der Wert für die Turnhallen wurde abgeschätzt. Für die Küche der FOS/BOS Erding wird der Küchennutzerstrom von 30.773 kWh, der im Jahr 2013 im Rahmen eines Monitorings gemessen wurde [zae14], angesetzt und in der Tabelle spezifisch auf die Nettogrundfläche der Küche von 66,5 m² umgerechnet.

	Spezifischer Nutzerstrombedarf [kWh/m²a]
Grundschule	8
Sonstige Schulen	10
Zone Sporthalle	2
Zone Küche	463

Tabelle 16: Angesetzte Werte für den spezifischen Nutzerstrombedarf (angepasste Berechnung)

Stromerzeugung

Bei der angepassten Berechnung wird die Berechnung der Stromerzeugung auf die lokalen Einstrahlungswerte angepasst. Alternativ kann der auf Basis einer PV-Auslegungs-Software für die Anlage prognostizierte Ertrag verwendet werden.

Im Rahmen dieser Studie wird die Stromerzeugung auf Basis lokaler Einstrahlungswerte, die mittels Meteonorm ermittelt werden, angesetzt.

7.6 Exkurs Klimadaten

7.6.1 Klimadaten für die Bedarfsberechnung

Die verwendeten Klimadaten haben einen relevanten Einfluss auf die Energiebedarfsberechnung, daher werden in diesem Kapitel einige Informationen zu dieser Thematik gegeben. Während die Klimadaten für die EnEV-konforme Berechnung mit dem Referenzklima des Standardklimas Deutschlands in der DIN V 18599-10 festgelegt sind, bietet sich eine Auswahl für die angepasste Berechnung mit freien Randbedingungen an.

In die Berechnung der DIN V 18599 fließen Monatswerte für die Außentemperatur und für die mittlere Strahlungsintensität unterschieden nach Orientierung und Neigungswinkel ein. Die Außenlufttemperatur dient der Ermittlung von dem Temperaturunterschied zwischen innen und außen (Gradtagszahlen) und damit u.a. der Berechnung der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste. Die Strahlungsdaten dienen primär der Berechnung der solaren Gewinne. Außerdem werden ggf. Erträge von Solarthermie- oder Photovoltaikanlagen auf Basis der Strahlungsdaten berechnet.

Grundsätzlich stehen für die Auswahl von Klimadaten unterschiedliche Quellen zur Verfügung, die auf Messungen von Wetterdaten beruhen. Nachfolgend sind gängige Klimadaten, die die nötigen Werte für die Berechnung nach DIN V 18599 beinhalten, unter Angabe des jeweiligen Bezugszeitraums der zugrunde gelegten Wetterdaten aufgeführt:

- DIN 4108-6:2003
Es werden Wetterdaten für 15 Klimaregionen in Deutschland aufgeführt. Diese basieren auf Wetterdaten der sogenannten 30-jährigen (Klima-)Normalperiode 1961 bis 1990. Die Daten beruhen auf Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes und sind auch Basis für das Standardklima der EnEV 2009, welches Tabelle 7 DIN V 18599-10:2007 bzw. Tabelle D.5 DIN 4108-6:2003 zu entnehmen ist.
- Testreferenzjahre / DIN V 18599-10:2011
Die sogenannten Testreferenzjahre sind Daten des Deutschen Wetterdienstes in Form von Stundenwerten. Die Testreferenzjahre TRY 2010/2011 basieren auf Wetterdaten der Jahre

1988 bis 2007 und sind die Basis für die Klimadaten der DIN V 18599-10:2011 für das Referenzklima und 15 Referenzregionen) und damit auch Basis für das Standardklima der EnEV 2013.

Hinweis: Die Gesamtstrahlungsdaten nach Himmelsrichtungen, die beispielsweise relevant für die Berechnung der solaren Gewinne über transparente Bauteile sind, weisen mehr Einstrahlung für ostorientierte als für westorientierte Flächen auf. Eine Untersuchung der Ursache ergab, dass dies nur zu einem geringeren Anteil an den Wetterverhältnissen liegt (z.B. mehr Bewölkung in den Nachmittagsstunden), sondern durch eine zeitliche Verschiebung zwischen wahrer Ortszeit und MEZ verursacht wird [lam14].

- **Meteonorm**

Die Computersoftware Meteonorm 7.1 enthält weltweite Klimadaten in Form von Monatswerten. Die Zeitperiode für die zugrunde gelegten Wetterdaten sind die Jahre von 1991 bis 2010 für die Globalstrahlung, von 2000 bis 2009 für die Temperatur. Aus diesen werden die Monatswerte eines durchschnittlichen Jahres gebildet.

Nachfolgende Tabelle zeigt die Unterschiede für die Jahresmittel-Außenlufttemperatur und die Globalstrahlung der nach EnEV 2009 und 2013 zu verwendenden Referenzklimas.

	Quelle	Zeitraum Basis-Wetterdaten	mittlere jährl. Außen- lufttemperatur [°C]	Globalstrahlung [kWh/m²a]
EnEV 2009	DIN V 18599-10:2007	1961 - 1990	8,9	1.120
EnEV 2013	DIN V 18599-10:2011	1988 - 2007	9,5	1.072

Tabelle 17: Vergleich des Referenzklimas Deutschland nach EnEV 2009 und 2013

Für die angepasste Berechnung sollen lokale Klimadaten verwendet werden. Für den Standort der FOS/BOS in Erding soll ein Vergleich der Klimadaten und die Auswirkungen auf die Bedarfsermittlung für oben genannte Quellen durchgeführt werden. Folgende Datensätze könnten für Erding verwendet werden:

- nach DIN V4108-6 : 2003 : Klimaregion 14
- nach DIN V 18599-10 : 2011 Klimaregion 13
- Datensätze von Meteonorm für die Station München Flughafen, die 14 km von Erding entfernt liegt.

	Quelle	Zeitraum Basis-Wetterdaten	mittlere jährl. Außen- lufttemperatur [°C]	Globalstrahlung [kWh/m²a]
Klimaregion 14	DIN V4108-6 : 2003	1961 - 1990	7,5	1.123
Klimaregion 13	DIN V 18599-10 : 2011	1988 - 2007	8,6	1.074
München Flughafen	Meteonorm	2000 – 2009 (Temp.) 1991 – 2010 (Einstr.)	9,2	1.180

Tabelle 18: Vergleich von Klimadaten für den Standort Erding

Für die lokalen Daten ergeben sich große Unterschiede bei der Außenlufttemperatur. Eine Erklärung für die starke Streuung bei der Außenlufttemperatur liegt an der in den letzten Jahrzehnten steigenden Temperatur und damit an dem Zeitraum für die den Klimadaten zugrunde liegenden Messdaten. Eine Auswertung der Meteonorm-Daten für den Standort München Flughafen ist auch für die Normalperiode von 1961 bis 1990 möglich und ergäbe hier eine Jahresmittel-Außenlufttemperatur von 7,8°C. Diese liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie die Jahresmittel-Außenlufttemperatur der DIN V4108-6 : 2003 für die Klimaregion 14 von 7,5°C. Der zeitliche Effekt ist auch bei dem EnEV-Referenzklima für 2009 und 2013 erkennbar.

Anhand nachfolgender Abbildung wird dieser Effekt grafisch durch die Linien für die 10- und 30-Jahre-Mittelwerte der Lufttemperatur deutlich.

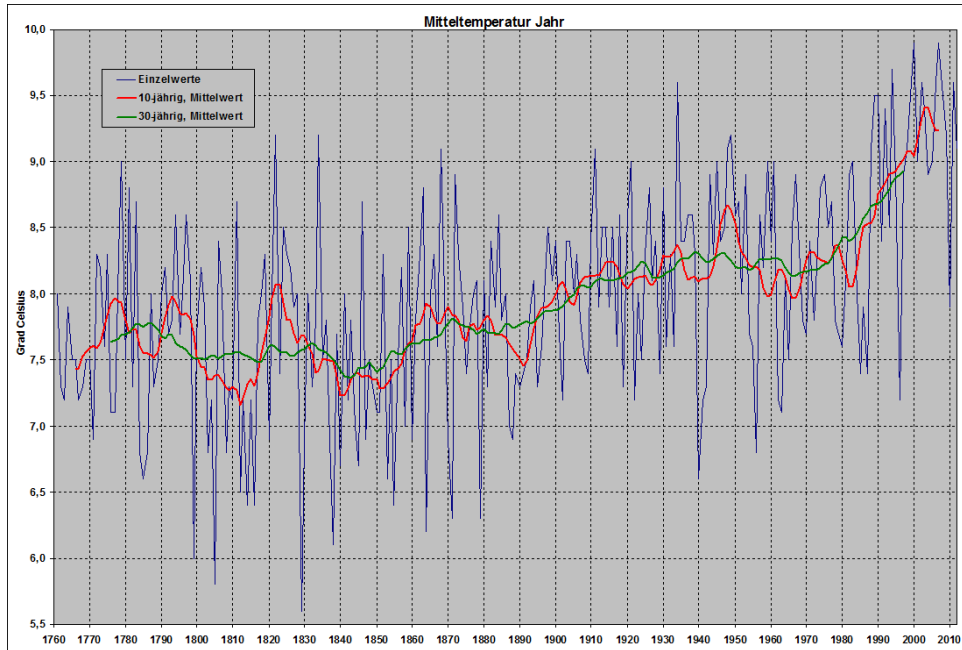


Abbildung 22: Zeitreihe der Lufttemperatur in Deutschland [wik14]

Hieran wird erkennbar, dass die verwendeten lokalen Klimadaten und insbesondere auch der Zeitraum, auf den sich die Wetterdaten beziehen, einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der angepassten Variante haben.

Wie in Kapitel 7.1 beschrieben, werden daher, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, für die Methodik die zu verwendenden Klimadaten für die Berechnungen festgeschrieben: für die standardisierte Bedarfsberechnung das Standardklima Deutschland nach EnEV und für die angepasste Bedarfsberechnung die regionalen Wetterdaten nach der DIN V 18599-10:2011.

7.6.2 Klimadaten für die Berechnung der Stromerzeugung

PV-Stromerzeugung

Bei der Berechnung der Erzeugung von PV-Strom sind die Klimadaten für die solare Einstrahlung eine wesentliche Einflussgröße. Je nach Standort kann die solare Einstrahlung stark variieren, wie aus nachfolgender Grafik des Deutschen Wetterdienstes hervorgeht.

Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland Mittlere Jahressummen, Zeitraum: 1981 - 2010

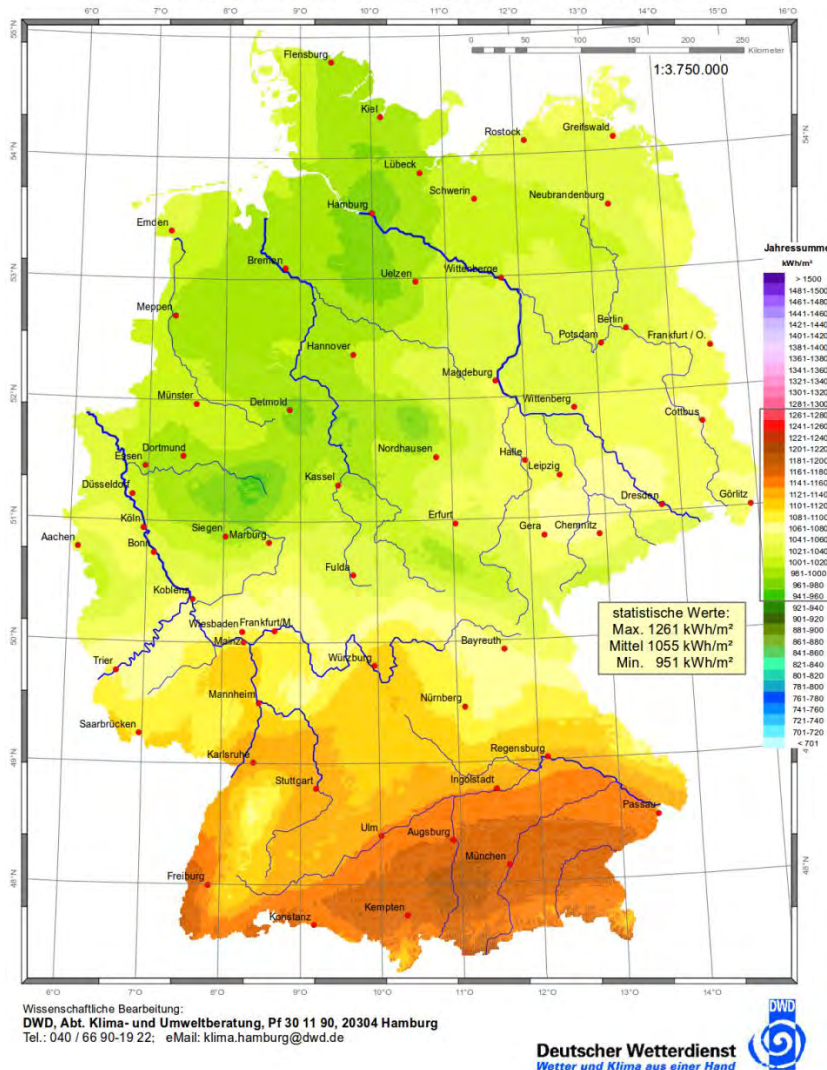


Abbildung 23: Mittlere Globalstrahlung im Zeitraum 1981 bis 2010 (Quelle: <http://www.dwd.de>)

Grundsätzlich können die Klimadatenquellen analog der Beschreibung der Klimadaten für die Bedarfsberechnung als Basis dienen. Bei der Verwendung von Strahlungsdaten der DIN V 18599-10: 2011 (bzw. der DIN V 4108-6) ist allerdings zu beachten, dass die solare Einstrahlung von Potsdam nur bedingt für jeden Standort in Deutschland repräsentativ ist. Hinzu kommt, dass die Einstrahlungswerte nur als Monatssummen für fünf Neigungswinkel (0°, 30°, 45°, 60° und 90°) vorliegen und damit beispielsweise der Ertrag von mit 10° nach Osten und Westen („Zickzack“) aufgestellten PV-Modulen nicht korrekt ermittelt werden kann.

Wegen dieser Defizite wird im Rahmen dieser Studie auf die Meteororm-Daten zurückgegriffen, aus denen für jede Ausrichtung und Neigung Stundenwerte der eintreffenden Gesamtstrahlung erzeugt werden können. Die Abweichungen zum Referenzklima nach EnEV sind gering. Die Abweichung bei der Globalstrahlung und Südausrichtung beispielsweise beträgt unter 2 %, bei Ost- und Westausrichtung wegen des angesprochen Fehlers der DIN V 18599-10: 2011 etwas höher.

8.0 Beispielschule FOS/BOS Erding

8.1 Kurzbeschreibung

In nachfolgender Tabelle sind die Kenndaten der FOS/BOS Erding, die in die Berechnung als Beispielschule einfließen, angegeben.

FOS/BOS Erding	
Schultyp	Fach- und Berufsoberschule
Standort	Erding, Oberbayern
Schüleranzahl	750
Grundriss	2-flügelig mit Verbindungstrakt (charakteristische Länge/Breite: 81 m/36 m)
NGF (nach EnEV) [m ²]	7.640
A/V [1/m]	0,26
Fensterflächen-Anteil	37 %
Zonierung	6 Zonen
1_Klassenzimmer	NGF: 3.007 m ² Nutzungsprofil: 8 Klassenzimmer (Schulen)
2_Verkehrsflächen	NGF: 2.897 m ² Nutzungsprofil: 19 Verkehrsflächen
3_WC/Sanitär	NGF: 252 m ² Nutzungsprofil 16 WC und Sanitärräume in NWG
4_Lager/Technik	NGF: 512 m ² Nutzungsprofil: 20 Lager, Technik, Archiv
5_Sonstige Aufenthaltsräume	NGF: 906 m ² Nutzungsprofil: 17 Sonstige Aufenthaltsräume
6_Küche	NGF: 67 m ² Nutzungsprofil: 14 Küchen in NWG
Bereiche mit Warmwasserbedarf	Dezentral elektrische Handwaschbecken in Sanitärbereichen, Küche (Bedarf nach EnEV-Nachweis 18.750 kWh/a)

Tabelle 19: Kenndaten der FOS/BOS Erding

Um einen Eindruck des Gebäudes zu erlangen, sind nachfolgend einige Fotos der FOS/BOS Erding abgebildet.

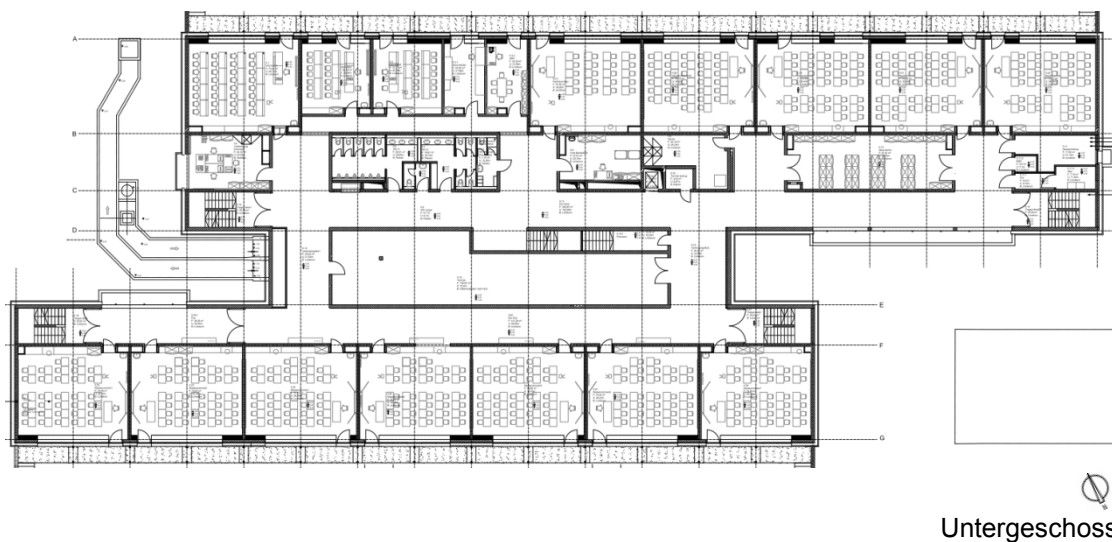


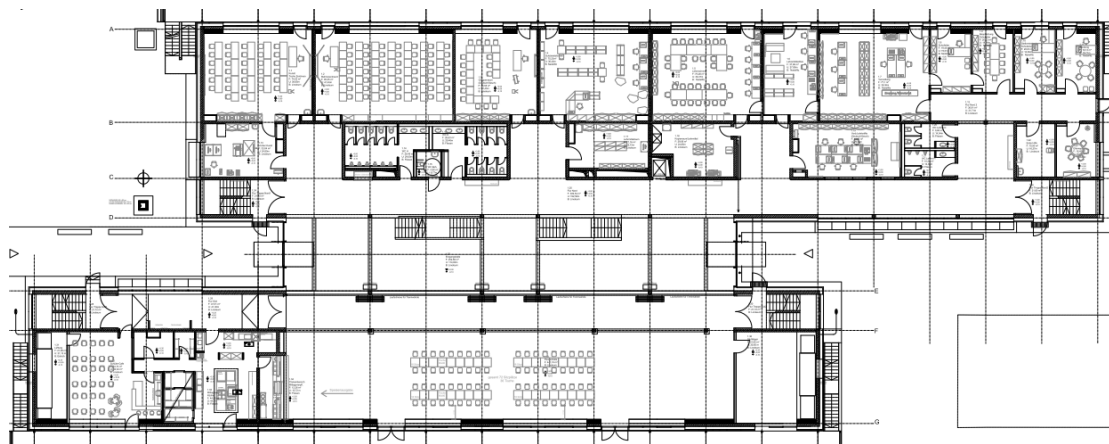
© Peter Wanker / kplan AG



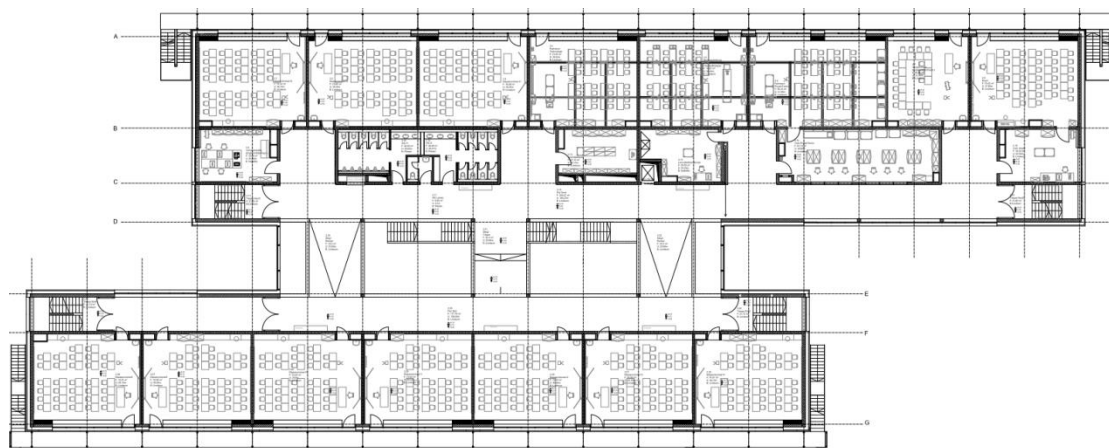
Abbildung 24: Fotos der Südansicht, des Treppenhauses und eines Klassenzimmers der FOS/BOS Erding (Quelle: P. Wankerl, kplan AG)

Abbildung 25 zeigt die Grundrisse und einen Schnitt der FOS/BOS Erding. Der 2-geschossige Südflügel und der 3-geschossige Nordflügel sind über die Aula als Verbindungstrakt verbunden. Im unterkellerten Gebäude sind auch im Untergeschoss Klassenzimmer untergebracht, welche durch eine abgegrabene Böschung auch mit Tageslicht versorgt werden.

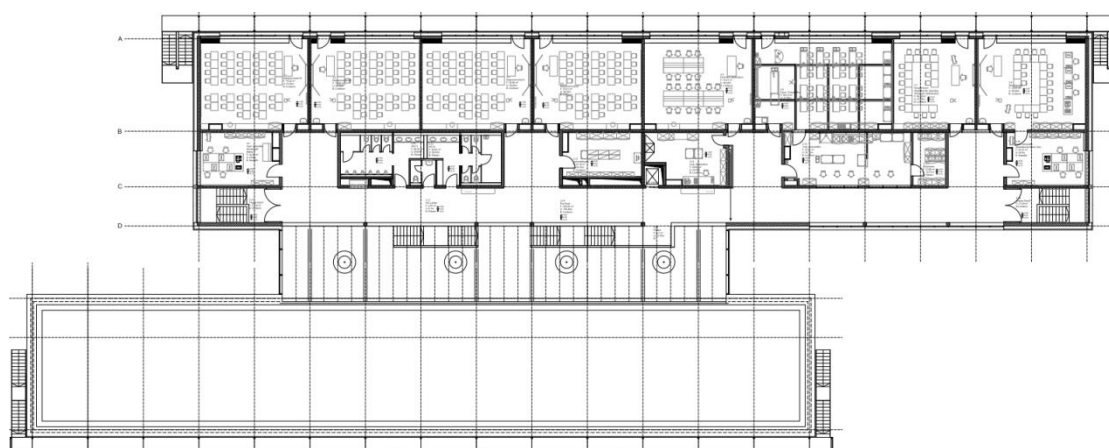




Erdgeschoss



1. Obergeschoss



2. Obergeschoss

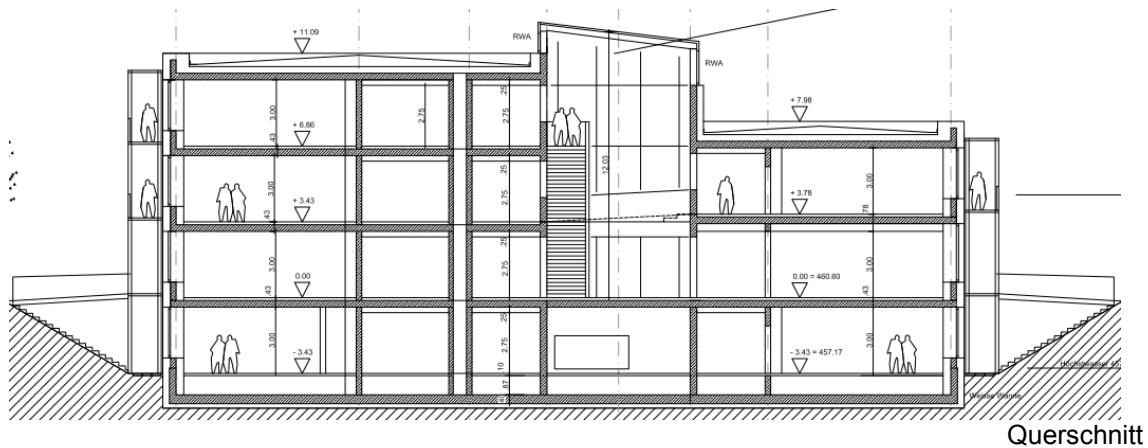


Abbildung 25: Grundrisse und Schnitt der FOS/BOS Erding (Quelle: kplan AG)

8.2 Gebäudeenergiebedarf für die untersuchten Varianten

Standardisierte Berechnung

Nach der in Kapitel 6.0 beschriebenen Berechnungsmethodik und den Randbedingungen wurde das Gebäude der FOS/BOS Erding berechnet. In Tabelle 20 sind die endenergetischen Ergebnisse je Variante nach Energieträgern zusammengefasst und in spezifische Primärenergiebedarfswerte umgerechnet. In der letzten Spalte ist die prozentuale Veränderung im Vergleich zum Primärenergiebedarf der Variante V0 angegeben.

Für den Dämmstandard der Basisvariante ergibt sich eine Unterschreitung des Transmissionswärmeverlusts H_T' des EnEV-Referenzgebäudes um 33 %, für die Variante V1 (Verbesserte Gebäudehülle) von 44 %.

In der Anlage Tabelle A-2 sind die Ergebnisse der Bedarfsberechnung auf Endenergiebasis aufgesplittet nach Heizung, Warmwasser, Belüftung und Beleuchtung detailliert wiedergegeben.

Projekt: FOS/BOS Erding		Endenergiebedarf nach Energieträgern			Endenergie	Primärenergie	Veränd. ggü Basis
Standardisierte Berechnung		Strom	Pellet	Fernwärme			
		[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	%
Primärenergiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Wärmepumpe							
V0	Basisvariante	18,3			18,3	43,9	
V1	Verbesserte Gebäudehülle	17,3			17,3	41,6	-5%
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	16,5			16,5	39,6	-10%
V3	Grundlüftung	18,3			18,3	43,9	0%
V4	Natürliche Belüftung	17,1			17,1	41,0	-7%
Primärenergiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Pelletkessel							
V0	Basisvariante	9,4	46,5		55,9	31,9	
V1	Verbesserte Gebäudehülle	9,4	41,2		50,7	30,8	-3%
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	7,7	46,5		54,1	27,7	-13%
V3	Grundlüftung	7,0	59,4		66,5	28,7	-10%
V4	Natürliche Belüftung	4,1	68,9		73,0	23,7	-26%
Primärenergiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Fernwärme (fp=0)							
V0	Basisvariante	9,4		37,2	46,5	22,6	
V1	Verbesserte Gebäudehülle	9,4		33,0	42,3	22,5	0%
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	7,6		37,2	44,8	18,3	-19%
V3	Grundlüftung	7,0		47,6	54,6	16,7	-26%
V4	Natürliche Belüftung	4,1		54,7	58,8	9,9	-56%

Tabelle 20: Standardisierte Berechnung – Endenergie- und Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 (Gebäude FOS/BOS Erding)

Der spezifische Primärenergiebedarf liegt für die Basisvariante bei 44 kWh/m²a für das Versorgungskonzept „Wärmepumpe“, bei 32 kWh/m²a für das Versorgungskonzept „Pelletkessel“ und bei 23 kWh/m²a für das Versorgungskonzept „Fernwärme“.

Bei der Primärenergiebedarfsberechnung für das Versorgungskonzept mit Wärmepumpe zeigt sich, dass der nochmals verbesserte Dämmstandard (V1) den Bedarf nur wenig (-5 %) reduziert. Beim Versorgungskonzept Pelletkessel bringt diese Variante aufgrund des niedrigen Primärenergiefaktors von Holz noch weniger (-3 %), bei der Fernwärme wegen des Primärenergiefaktors von „0“ gar nichts mehr.

Die verbesserte Stromeffizienz (V2) bei den Ventilatoren für die RLT verringert sich der Primärenergiebedarf zwischen 10 und 19 %.

Die Variante V3 „Grundlüftung“ bringt bei der Wärmepumpenversorgung keinen Vorteil, beim Pelletkessel sinkt der Primärenergiebedarf um 10 % und bei der Fernwärme um 26 %.

Die Variante V4 „Natürliche Belüftung“ bringt den größten Effekt beim Versorgungskonzept „Fernwärme“ mit einer Reduktion von über 50 %.

Hinweis: Für die standardisierte Berechnung wurde mit dem Standardklima Deutschland nach EnEV 2009 gerechnet. Da zukünftig geplante Schulen nach EnEV 2013 und somit mit den Klimadaten nach DIN V 18599-10 : 2011 berechnet werden, wurde eine Beispiel-Berechnung mit dem EnEV 2013-Referenzklima durchgeführt. Für die 12 Varianten ergab sich eine Verringerung der Endenergie für Heizung von 2 bis 3 %.

Angepasste Berechnung

Für die Auswertung der angepassten Berechnung werden die Klimadaten der DIN V 18599-10 : 2011 für Erding (Region 13), Hamburg (Region 3) und Freiburg (Region 12) verwendet.

Eine Auswertung der Belegzeiten, welche im Rahmen des Monitorings aufgezeichnet wurden, ergab eine gute Übereinstimmung mit den Nutzungszeiten der Nutzungsprofile, so dass keine Anpassung erforderlich ist.

Wie in Kapitel 7.5 beschrieben erfolgt jedoch eine Anpassung des Luftwechsels für die Zone Klassenzimmer von $10 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ auf $8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$.

Die detaillierten Ergebnisse der Endenergiebedarfsberechnungen aufgeteilt nach Gewerk sind im Anhang in Tabelle A-3 bis Tabelle A-5 zu finden.

Nachfolgend sind die End- und Primärenergieergebnisse für die drei Standorte zusammengestellt.

Projekt: FOS/BOS Erding		Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]
Angepasste Berechnung		Standort Erding		Standort Hamburg		Standort Freiburg	
Energiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Wärmepumpe							
V0	Basisvariante	17,9	42,9	17,2	41,4	16,2	38,8
V1	Verbesserte Gebäudehülle	16,9	40,5	16,4	39,2	15,4	36,9
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	16,1	38,6	15,5	37,1	14,4	34,5
V3	Grundlüftung	17,7	42,4	16,8	40,2	15,4	37,0
V4	Natürliche Belüftung	16,9	40,4	15,6	37,5	13,9	33,5
Energiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Pelletkessel							
V0	Basisvariante	53,7	31,5	50,1	30,8	44,2	29,6
V1	Verbesserte Gebäudehülle	48,2	30,4	45,1	29,7	39,9	28,7
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	51,9	27,2	48,4	26,5	42,4	25,3
V3	Grundlüftung	63,0	28,0	58,1	27,0	50,6	25,5
V4	Natürliche Belüftung	71,6	23,4	65,6	22,2	56,0	20,2
Energiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Fernwärme (fp=0)							
V0	Basisvariante	44,7	22,6	42,0	22,6	37,3	22,5
V1	Verbesserte Gebäudehülle	40,4	22,5	38,1	22,5	33,8	22,5
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	42,9	18,3	40,2	18,3	35,5	18,3
V3	Grundlüftung	51,8	16,8	48,0	16,8	42,0	16,7
V4	Natürliche Belüftung	57,6	10,0	52,7	9,9	45,3	9,9

Tabelle 21: Angepasste Berechnung - Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 für die Standorte Erding, Hamburg, Freiburg (Gebäude FOS/BOS Erding)

Die Variation unterschiedlicher lokaler Klimadaten zeigt nicht vernachlässigbare Auswirkungen auf den Energiebedarf. Wie wegen des milden Klimas zu erwarten war, sind die Bedarfswerte für den Standort Freiburg am geringsten. Beim Versorgungskonzept mit Wärmepumpe sind die Primär- und Endenergiebedarfswerte für Freiburg im Schnitt 8 % geringer als für den Standort Hamburg und 13 % geringer als für den Standort Erding.

8.3 Nutzerstrombedarf

Die Fach- und Berufsoberschule Erding wird mit $10 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$ für die Nettogrundfläche entsprechend einem Primärenergiebedarf von $24 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$ angesetzt (vgl. Tabelle 13).

Bei der angepassten Berechnung wird der Nutzerstrombedarf für die Zone Küche separat mit $463 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$ hinzugerechnet (s. Tabelle 16). Es ergibt sich ein spezifischer Endenergiebedarf von $13,9 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$, entsprechend einem Primärenergiebedarf von $33,5 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$.

8.4 Energieerzeugung

Wie in Kapitel 7.4 beschrieben, beschränkt sich die Ermittlung der Energieerzeugung auf die Photovoltaik.

In einem ersten Schritt wird analysiert, welche Flächen für eine Photovoltaiknutzung bei dem Gebäude der FOS/BOS Erding geeignet wären. In Abbildung 26 ist eine Dachaufsicht und die Südfassade abgebildet. Orange eingefärbte Flächen können für die Dachbelegung mit PV-Modulen genutzt werden (Basiserzeugungsvariante EE0). Hellorange sind weitere Flächen gekennzeichnet, die sich zur PV-Nutzung eignen. Letztere bilden zusammen mit der Variante EE0 die Variante EE1. Als weitere Flächen wurden das opake Atriumsdach, das mit einer PV-Dachbahn belegt werden könnte, und die Balkonbrüstungen sowie -überdachung analysiert. An letztere könnten semitransparente PV-Verglasungen angebracht werden.

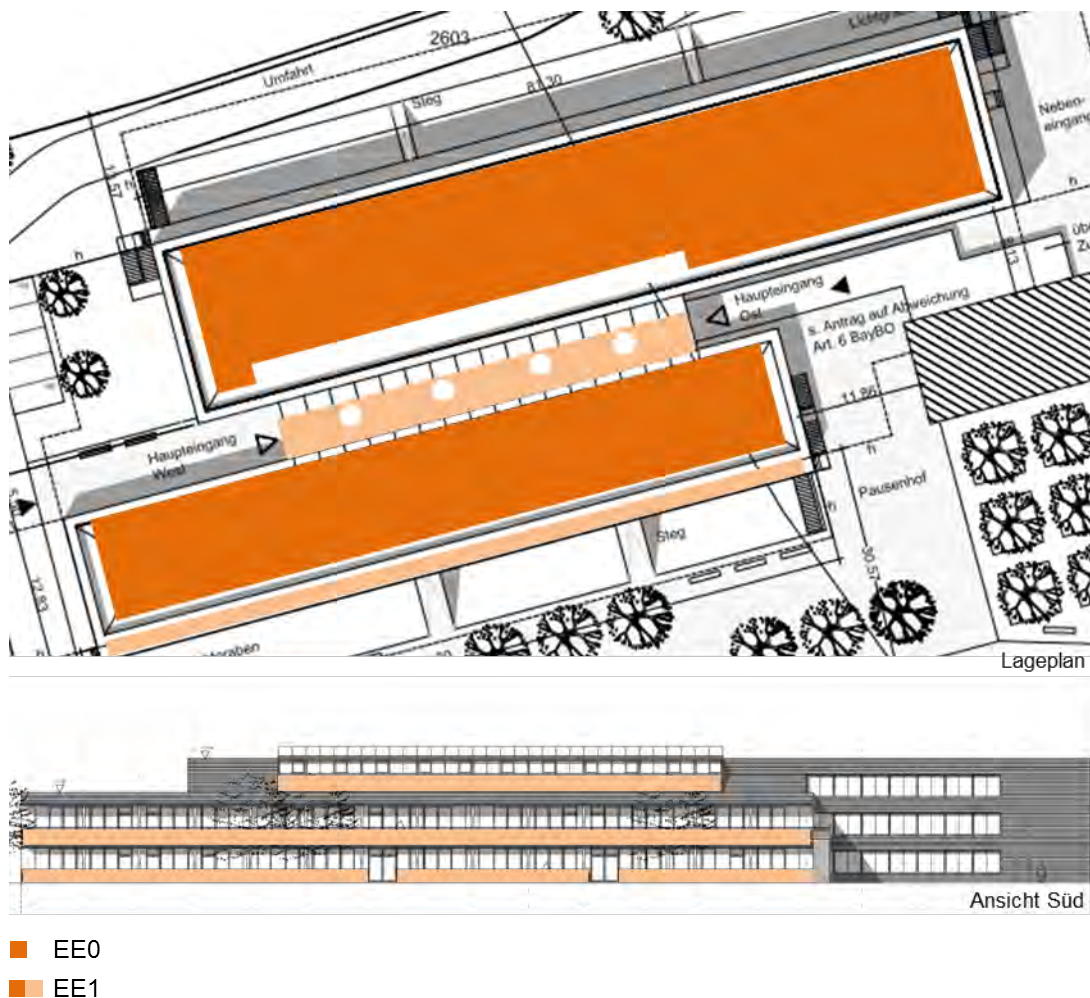


Abbildung 26: Photovoltaik-Flächenoptionen bei der FOS/BOS Erding (Pläne: kplan AG)

Die Brutto-Dachflächen des Nord- und Südflügels betragen insgesamt 2.157 m². In nachfolgender Tabelle ist die belegbare Fläche abzüglich der Abstände zur Attika, die sich ergebende PV-Modulfläche und -Leistung sowie die Jahresstromerzeugung für die zu untersuchenden Standorte angegeben. Berechnet wurde eine Dachbelegung mit 30° aufgeständerten nach Süden orientierte Module und nach Osten und Westen in 10° aufgeständerte Module („Zickzack“).

	Belegbare Fläche [m²]	PV-Modulfläche [m²]	PV-Leistung [kWp]	PV-Erzeugung [kWh/a]			
				Potsdam	Erding	Hamburg	Freiburg
Dach Süd 30°	1.897	614	104	102.326	115.059	98.362	105.279
Dach Ost/West 10° (EE0)	1.925	1.555	264	208.339	233.267	196.365	218.023
Atriumdach (EE1)	173	173	8	6.438	7.209	6.067	6.740
Fluchtbalkon (EE1)	305	305	14	10.370	11.563	10.113	10.504

Tabelle 22: Belegbare Fläche, Modulfläche, PV-Leistung und -Erzeugung für die Standorte Potsdam, Erding, Hamburg, Freiburg

Wie schon in Kapitel 7.4 beschreiben, wird die PV-Variante mit 30°-Süd-Orientierung nicht weiterverfolgt, da für das Erreichen des Plusenergiestandards der Ertrag zu gering ist. In Tabelle 23 sind die Ergebnisse der Energieerzeugung als End- und Primärenergie für die Standorte Potsdam (standardisierte Berechnung), Erding, Hamburg, Freiburg dargestellt.

Projekt: FOS/BOS Erding		Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]
standardisierte+angepasste Berechnung		Potsdam (Standard)		Standort Erding		Standort Hamburg		Standort Freiburg	
Energieerzeugung									
EE0	PV Dach 10° Ost/West	27,3	65,4	30,5	73,3	25,7	61,7	28,5	68,5
EE1	PV Dach 10° Ost/West + Sonstiges	29,5	70,7	33,0	79,2	27,8	66,8	30,8	73,9

Tabelle 23: Spezifische End- und Primärenergie der Stromerzeugung für die Standorte Potsdam, Erding, Hamburg, Freiburg

Für EE0 ergibt sich für Potsdam ein auf die Nettogrundfläche bezogener Ertrag von 27 kWh/m²a und für EE1 von 30 kWh/m²a. Für den Standort Erding wird ein höherer Ertrag von 31 kWh/m²a und für EE1 von 33 kWh/m²a. Die Erträge für einen Standort in Freiburg sind um 8 %, in Hamburg um 15 % geringer als in Erding.

8.5 Auswertung

In nachfolgenden Tabellen wird errechnet, wieviel Ertrag nötig wäre, um den Plusenergiestandard zu erreichen. Farblich ist gekennzeichnet, welche Varianten in Kombination mit den errechneten PV-Erträgen für die FOS/BOS Erding den Plusenergiestandard erreichen. Der Standard wird erreicht, sobald sich eine positive Energiebilanz ergibt. Die Auswertung erfolgt sowohl auf Endenergieebene (s. Tabelle 24) als auch Primärenergieebene (s. Tabelle 25).

Endenergiebilanz		Notwendiger PV-Ertrag [kWh/m _{NGF} ² a]			
		Standardisierte Berechnung	Angepasste Berechnung		
			Erding	Hamburg	Freiburg
Versorgungskonzept Wärmepumpe					
V0	Basisvariante	28,3	31,8	31,2	30,1
V1	Verbesserte Gebäudehülle	27,3	30,8	30,3	29,3
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	26,5	30,0	29,4	28,3
V3	Grundlüftung	28,3	31,6	30,7	29,3
V4	Natürliche Belüftung	27,1	30,8	29,6	27,9
Versorgungskonzept Pelletkessel					
V0	Basisvariante	65,9	67,6	64,1	58,1
V1	Verbesserte Gebäudehülle	60,7	62,1	59,1	53,9
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	64,1	65,8	62,3	56,4
V3	Grundlüftung	76,5	76,9	72,0	64,5
V4	Natürliche Belüftung	83,0	85,6	79,5	70,0
Versorgungskonzept Fernwärme					
V0	Basisvariante	56,5	58,6	56,0	51,2
V1	Verbesserte Gebäudehülle	52,3	54,3	52,0	47,8
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	54,8	56,8	54,2	49,4
V3	Grundlüftung	64,6	65,7	61,9	55,9
V4	Natürliche Belüftung	68,8	71,6	66,7	59,2

- Plusenergiestandard erreicht mit EE0 (Dachbelegung)
- Plusenergiestandard erreicht mit EE1 (Dachbelegung + zusätzliche Flächen)
- Plusenergiestandard nicht erreicht

Tabelle 24: Auswertung der Varianten - Plusenergiestandard auf Endenergieebene (FOS/BOS Erding)

Es zeigt sich, dass bei den Versorgungskonzepten mit Pelletkessel und Fernwärme kein „Plus“ auf Endenergieebene erreicht wird. Auf Endenergieebene können ausschließlich Varianten mit Wärmepumpen ein „Plus“ erreichen. Bei der angepassten Berechnung jedoch schafft es das Gebäude mit Standort Hamburg aufgrund der geringeren solaren Einstrahlung nicht.

In nachfolgender Tabelle wird das Erreichen des „Plusenergieschule-Standards“ auf Primärenergieebene dargestellt.

Primärenergiebilanz		Notwendiger PV-Ertrag [kWh/m _{NGF} ²a]			
		Standardisierte Berechnung	Angepasste Berechnung		
			Erding	Hamburg	Freiburg
Versorgungskonzept Wärmepumpe					
V0	Basisvariante	67,9	76,3	74,8	72,3
V1	Verbesserte Gebäudehülle	65,6	74,0	72,7	70,4
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	63,6	72,1	70,6	68,0
V3	Grundlüftung	67,9	75,9	73,7	70,4
V4	Natürliche Belüftung	65,0	73,9	71,0	66,9
Versorgungskonzept Pelletkessel					
V0	Basisvariante	55,9	65,0	64,2	63,0
V1	Verbesserte Gebäudehülle	54,8	63,8	63,2	62,1
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	51,7	60,7	60,0	58,7
V3	Grundlüftung	52,7	61,5	60,5	58,9
V4	Natürliche Belüftung	47,7	56,9	55,7	53,7
Versorgungskonzept Fernwärme					
V0	Basisvariante	46,6	56,0	56,0	56,0
V1	Verbesserte Gebäudehülle	46,5	56,0	56,0	56,0
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	42,3	51,8	51,8	51,7
V3	Grundlüftung	40,7	50,2	50,2	50,2
V4	Natürliche Belüftung	33,9	43,4	43,4	43,3

- ☒ Plusenergiestandard erreicht mit EE0 (Dachbelegung)
- ☒ Plusenergiestandard erreicht mit EE1 (Dachbelegung + zusätzliche Flächen)
- ☐ Plusenergiestandard nicht erreicht

Tabelle 25: Auswertung der Varianten - Plusenergiestandard auf Primärenergieebene (FOS/BOS Erding)

Mit Ausnahme der angepassten Wärmepumpen-Variante mit Standort Hamburg erreichen bei der primärenergetisch bewerteten Bilanz alle Varianten mit EE1 ein „Plus“. Bei der Fernwärmeversorgung kann der Plusenergiestandard für alle Varianten alleinig durch die Dach-PV-Belegung (EE0) erreicht werden.

9.0 Beispielschule Realschule Memmingen

9.1 Kurzbeschreibung

Nachfolgender Tabelle können die Kenndaten der Realschule Memmingen, die in die Berechnung als Beispielschule einfließen, entnommen werden.

Realschule Memmingen	
Schultyp	Realschule
Standort	Memmingen, Schwaben (Bayern)
Schüleranzahl	355 [eff13] bzw. 718 (Schul-Homepage)
Grundriss	Rechteckig mit Innenhof (Länge/Breite: 66 m/49 m; charakteristische Länge/Breite: 173 m/15 m)
NGF (nach EnEV) [m ²]	7.845
A/V [1/m]	0,35
Fensterflächen-Anteil	51 %
Zonierung	8 Zonen
1_Klassenzimmer	NGF: 3.165 m ² Nutzungsprofil: 8 Klassenzimmer (Schulen)
2a_Nebenflächen	NGF: 2.429 m ² Nutzungsprofil: 18 Nebenflächen
2b_Verkehrsflächen	NGF: 785m ² Nutzungsprofil: 19 Verkehrsflächen (a)
3_WC/Sanitär	NGF: 265 m ² Nutzungsprofil 16 WC und Sanitärräume in NWG
4_Lager/Technik	NGF: 531 m ² Nutzungsprofil: 20 Lager, Technik, Archiv
5a_Einzelbüro	NGF: 205 m ² Nutzungsprofil: 1 Einzelbüro
5b_Großraumbüro	NGF: 212 m ² Nutzungsprofil: 3 Großraumbüro
6_Küche (Vorbereitung)	NGF: 253 m ² Nutzungsprofil: 15 Küche – Vorbereitung, Lager
Bereiche mit Warmwasserbedarf	Lehrküche, Kantine (nach EnEV-Nachweis kein TWW-Bedarf)

Tabelle 26: Kenndaten der Realschule Memmingen

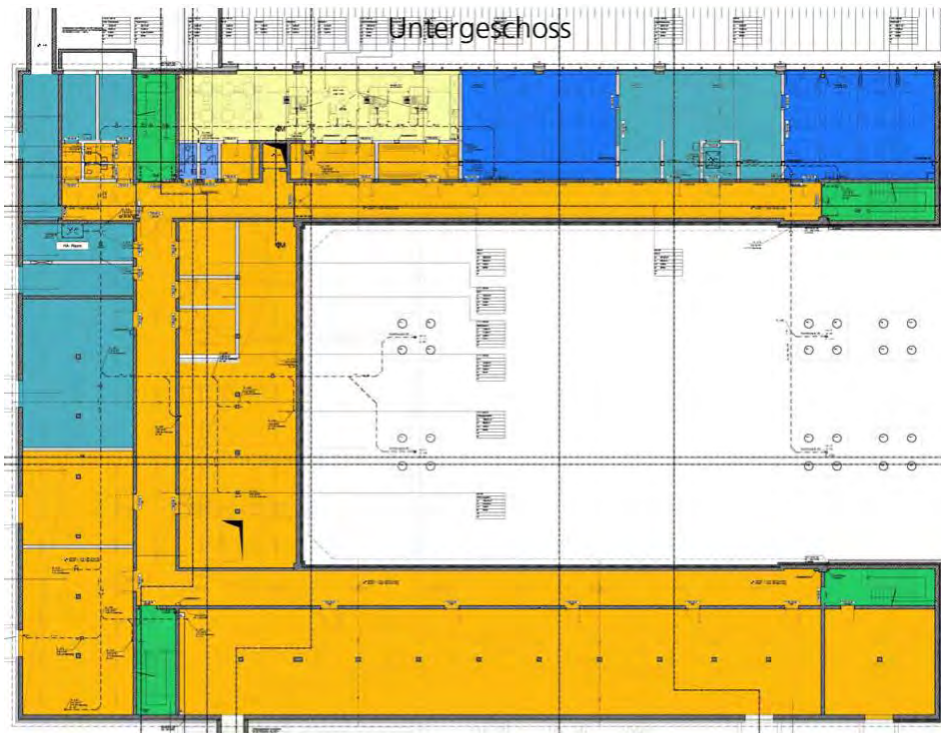
Um einen Eindruck des Gebäudes zu gewinnen, sind nachfolgend einige Fassaden-Fotos der Realschule Memmingen abgebildet.





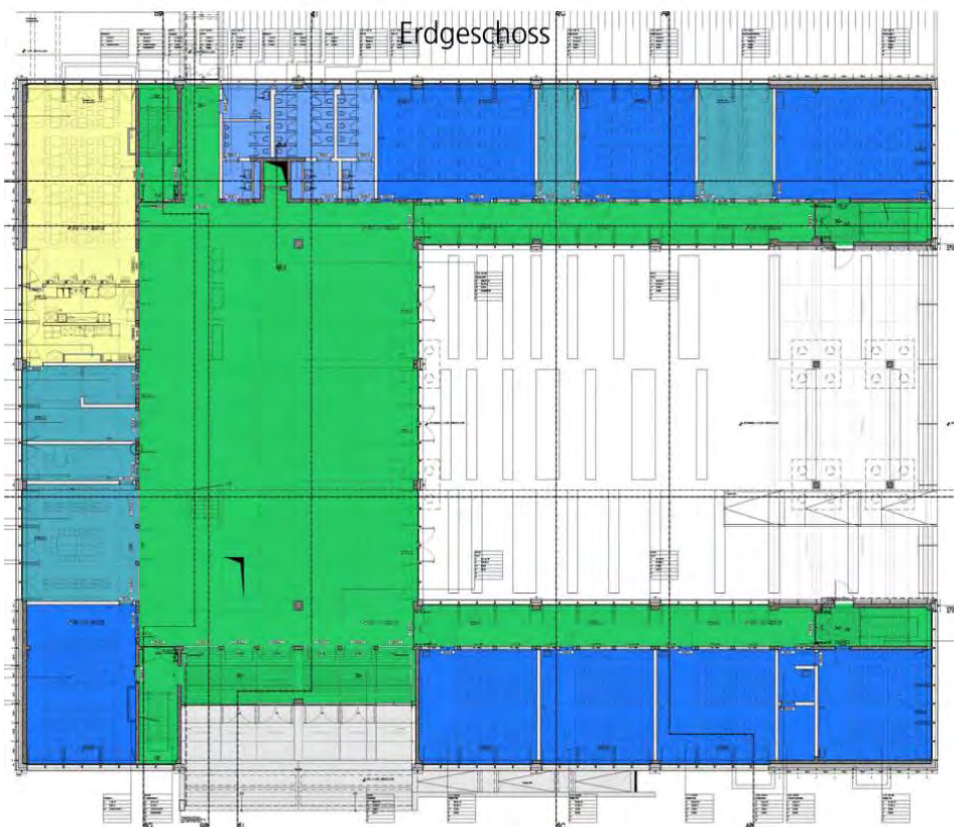
Abbildung 27: Fotos der Nord-, Südwest- und Westansicht der Realschule Memmingen (Quelle: IBP)

Abbildung 28 zeigt die Grundrisse mit Zonierung und einen Schnitt der Realschule Memmingen. Der 3-geschossige rechteckige Bau mit Innenhof ist unterkellert. Im Untergeschoss und Erdgeschoss fehlt die Verbindung im Osten, so dass diese Grundrisse U-förmig sind.



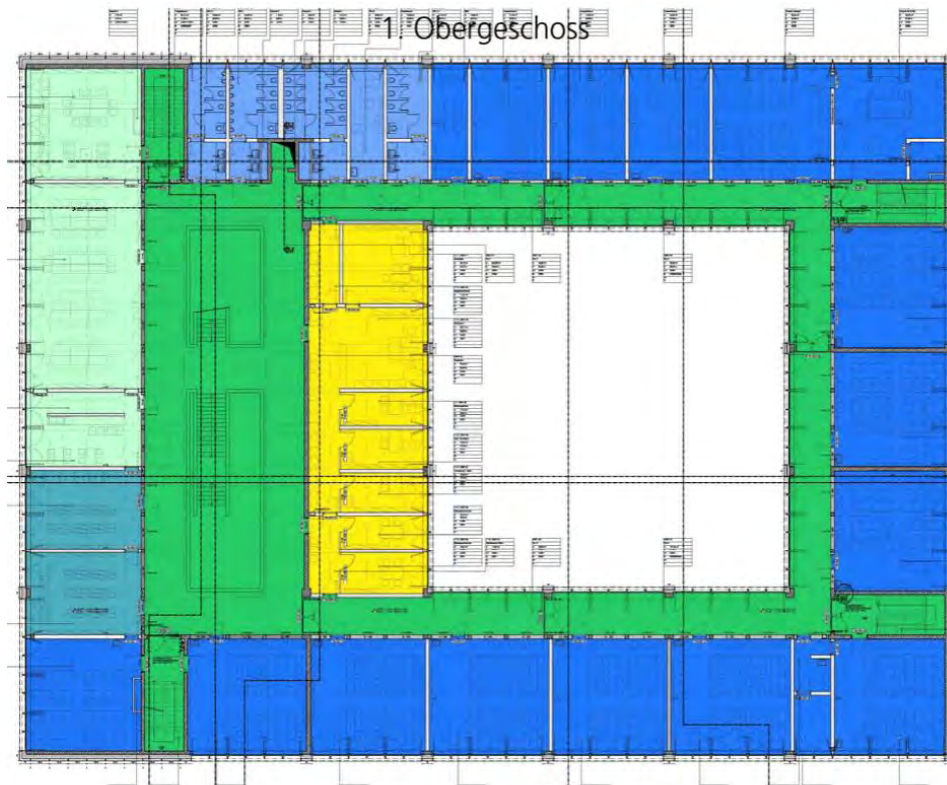
Untergeschoss

- 08. Klassenzimmer
- 15. Küche - Vorbereitung
- 16. WC
- 18. Nebenflächen
- 19. Verkehrsflächen
- 20. Lager



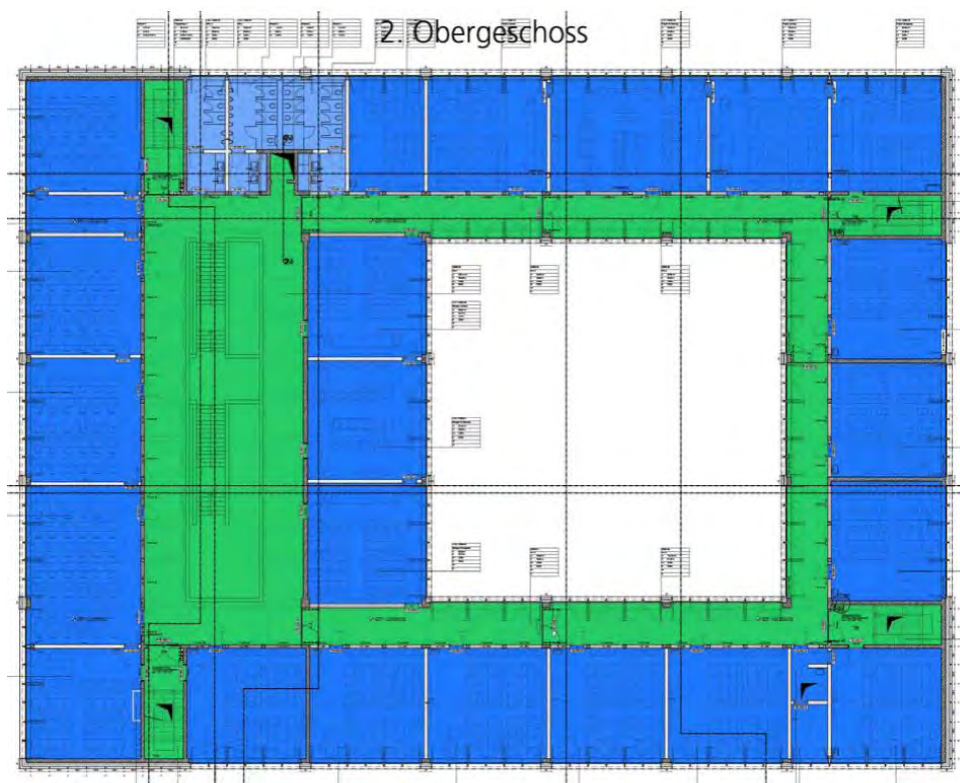
Erdgeschoss

- 08. Klassenzimmer
- 15. Küche - Vorbereitung
- 16. WC
- 19. Verkehrsflächen
- 20. Lager



1. Obergeschoss

- 01. Einzelbüro
- 03. Großraumbüro
- 08. Klassenzimmer
- 16. WC
- 19. Verkehrsflächen
- 20. Lager



2. Obergeschoss

- 08. Klassenzimmer
- 16. WC
- 19. Verkehrsflächen

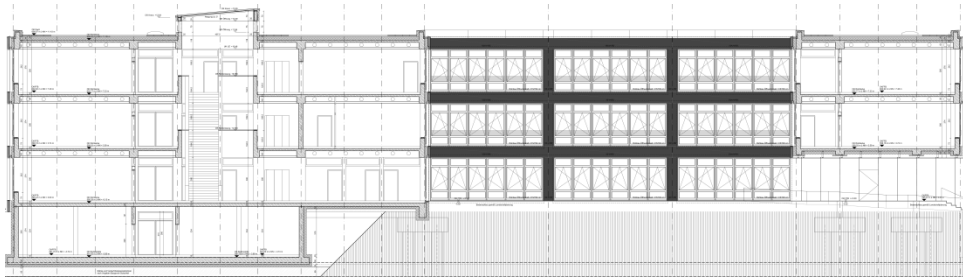


Abbildung 28: Grundrisse Unter-, Erdgeschoss, 1. OG und 2. OG mit Zonierung sowie Schnitt der Realschule Memmingen (Plan: schulz & schulz architekten gmbh, Zonierung: IBP)

9.2 Gebäudeenergiebedarf für die untersuchten Varianten

Standardisierte Berechnung

Analog der Berechnung der FOS/BOS Erding wird das Gebäude der Realschule Memmingen berechnet. In der Tabelle A-6 im Anhang sind die Ergebnisse der Bedarfsberechnung auf Endenergiebasis unterteilt nach Heizung, Warmwasser, Belüftung und Beleuchtung angegeben.

Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle auf Endenergiebasis je Variante nach Energieträgern zusammengefasst und in spezifische Primärenergiebedarfswerte umgerechnet.

Projekt: Realschule Memmingen		Endenergiebedarf nach Energieträgern			Endenergie	Primärenergie	Veränd. ggü Q _{P_0}
Standardisierte Berechnung		Strom	Pellet	Fernwärme			
		[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	%
Primärenergiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Wärmepumpe							
V0	Basisvariante	16,8			16,8	40,2	
V1	Verbesserte Gebäudehülle	15,6			15,6	37,5	-7%
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	15,1			15,1	36,3	-10%
V3	Grundlüftung	16,8			16,8	40,3	0%
V4	Natürliche Belüftung	14,8			14,8	35,5	-12%
Primärenergiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Pelletkessel							
V0	Basisvariante	8,8	45,9		54,7	30,2	
V1	Verbesserte Gebäudehülle	8,8	40,0		48,7	29,0	-4%
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	7,1	45,9		53,0	26,3	-13%
V3	Grundlüftung	6,3	59,0		65,3	26,9	-11%
V4	Natürliche Belüftung	2,9	52,8		55,7	17,6	-42%
Primärenergiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Fernwärme (fp=0)							
V0	Basisvariante	8,7		36,1	44,9	21,0	
V1	Verbesserte Gebäudehülle	8,7		31,3	40,0	20,9	0%
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	7,1		36,1	43,2	17,0	-19%
V3	Grundlüftung	6,3		46,8	53,1	15,0	-28%
V4	Natürliche Belüftung	2,9		52,8	55,7	7,1	-66%

Tabelle 27: Standardisierte Berechnung - Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 (Gebäude Realschule Memmingen)

Für den Dämmstandard der Basisvariante ergibt sich eine Unterschreitung des Transmissionswärmeverlusts H_T' des EnEV-Referenzgebäudes um 32 %, für die Variante V1 (Verbesserte Gebäudehülle) von 42 %.

Der spezifische Primärenergiebedarf liegt für die Basisvariante bei 40 kWh/m²a für das Versorgungskonzept „Wärmepumpe“, bei 30 kWh/m²a für das Versorgungskonzept „Pelletkessel“ und bei 21 kWh/m²a für das Versorgungskonzept „Fernwärme“.

Bei der Primärenergiebedarfsberechnung für das Versorgungskonzept mit Wärmepumpe zeigt sich, dass der nochmals verbesserte Dämmstandard (V1) den Bedarf wie auch bei der FOS/BOS Erding nur wenig (- 7 %) reduziert. Beim Versorgungskonzept Pelletkessel bringt diese Variante aufgrund des niedrigen Primärenergiefaktors von Holz noch weniger (-4 %), bei der Fernwärme wegen des Primärenergiefaktors von 0 gar nichts mehr.

Die verbesserte Stromeffizienz (V2) bei den Ventilatoren für die RLT verringert sich der Primärenergiebedarf zwischen 10 und 19 %.

Die Varianten „Grundlüftung“ und „Natürliche Belüftung“ bringen den größten Effekt bei dem Versorgungskonzept „Fernwärme“ mit einer Reduktion von 28 bzw. 66 %.

Angepasste Berechnung

Da auch für eine Realschule davon ausgegangen werden kann, dass die Nutzungszeiten der Hauptnutzung von 8 bis 15 Uhr realistisch sind, erfolgt hier keine Anpassung. Wie schon bei der FOS/BOS Erding werden lediglich die Klimadaten und die Luftmengen der Zone Klassenzimmer angepasst. Die detaillierten Ergebnisse der Endenergiebedarfsberechnungen aufgeteilt nach Gewerk sind im Anhang in Tabelle A-7 bis Tabelle A-9 zu finden.

Nachfolgend sind die End- und Primärenergieergebnisse für die drei Standorte zusammengestellt.

Projekt: RS Memmingen		Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]
Angepasste Berechnung		Standort Memmingen		Standort Hamburg		Standort Freiburg	
Energiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Wärmepumpe							
V0	Basisvariante	16,3	39,1	15,7	37,6	14,4	34,5
V1	Verbesserte Gebäudehülle	15,1	36,3	14,6	35,1	13,5	32,3
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	14,6	35,1	14,0	33,7	12,7	30,5
V3	Grundlüftung	16,1	38,7	15,2	36,6	13,6	32,6
V4	Natürliche Belüftung	14,6	35,0	13,4	32,1	11,4	27,4
Energiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Pelletkessel							
V0	Basisvariante	51,9	29,7	48,8	29,0	41,7	27,5
V1	Verbesserte Gebäudehülle	45,7	28,4	43,2	27,9	36,9	26,5
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	50,3	25,7	47,1	25,1	40,0	23,6
V3	Grundlüftung	61,7	26,1	57,0	25,2	48,2	23,4
V4	Natürliche Belüftung	54,7	17,4	49,8	16,4	41,3	14,6
Energiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Fernwärme (fp=0)							
V0	Basisvariante	42,8	20,9	40,3	20,9	34,6	20,9
V1	Verbesserte Gebäudehülle	37,8	20,9	35,8	20,9	30,6	20,8
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	41,2	17,0	38,7	17,0	32,9	16,9
V3	Grundlüftung	50,3	15,0	46,5	15,0	39,4	14,9
V4	Natürliche Belüftung	54,7	7,0	49,8	7,0	41,3	6,9

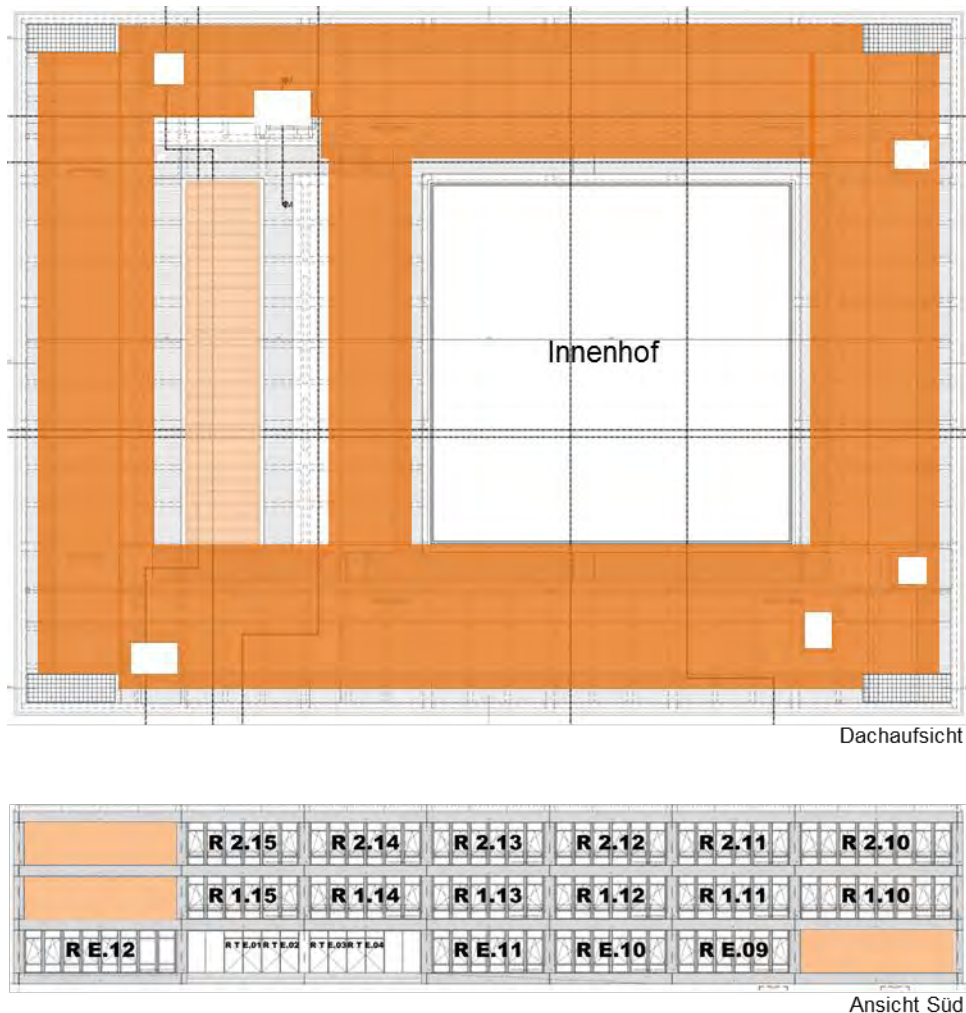
Tabelle 28: Angepasste Berechnung - Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 für die Standorte Erding, Hamburg, Freiburg (Gebäude Realschule Memmingen)

9.3 Nutzerstrombedarf

Der Nutzerstrombedarf für die standardisierte und die angepasste Berechnung bei der RS Memmingen wird mit 10 kWh/m²a bezogen auf die Nettogrundfläche angesetzt. Dies entspricht einem spezifischen Primärenergiebedarf von 24 kWh/m²a.

9.4 Energieerzeugung

Nachfolgend wird ermittelt, wieviel Flächen für Photovoltaiknutzung bei der Realschule Memmingen zur Verfügung stehen und diese in Abbildung 29 veranschaulicht. Orange gekennzeichnet sind wiederum die Variante EE0 belegbaren Dachflächen. In Hellorange markiert sind weitere für PV nutzbare Flächen. Dies ist ein semitransparentes Oberlicht (s. Dachaufsicht) und opake Flächen an der Südfassade (s. Ansicht Süd).



- EE0
- EE1

Abbildung 29: Photovoltaik-Flächenoptionen bei der Realschule Memmingen (Pläne: schulz & schulz architekten gmbh)

Tabelle 29 gibt die mit PV belegbare Fläche, die resultierende PV-Modulfläche und -leistung sowie den Jahresertrag für die Standorte Potsdam, Memmingen, Hamburg und Freiburg an.

	Belegbare Fläche [m²]	PV-Modulfläche [m²]	PV-Leistung [kWp]	PV-Erzeugung [kWh/a]			
				Potsdam	Memmingen	Hamburg	Freiburg
Dach Ost/West 10° (EE0)	1.679	1.356	231	181.699	196.273	171.256	190.144
Oberlicht (EE1)	87	87	4	3.093	3.342	2.915	3.238
Fassade (EE1)	95	95	12	8.380	8.889	8.349	8.307

Tabelle 29: Belegbare Fläche, Modulfläche, PV-Leistung und -Erzeugung für die Standorte Potsdam, Memmingen, Hamburg, Freiburg

In Tabelle 30 sind die Ergebnisse der Energieerzeugung spezifisch als End- und Primärenergie für die Realschule Memmingen dargestellt.

Projekt: RS Memmingen		Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]
standardisierte+angepasste Berechnung		Potsdam (Standard)		Standort Memmingen		Standort Hamburg		Standort Freiburg	
Energieerzeugung									
EE0	PV Dach 10° Ost/West	23,2	55,6	25,0	60,0	21,8	52,4	24,2	58,2
EE1	PV Dach 10° Ost/West + Sonstiges	24,6	59,1	26,6	63,8	23,3	55,8	25,7	61,7

Tabelle 30: Spezifische End- und Primärenergie der Stromerzeugung für die Standorte Potsdam, Memmingen, Hamburg, Freiburg

Für EE0 ergibt sich für den Standort Memmingen ein auf die Nettogrundfläche bezogener Stromertrag (Endenergie) von 25 kWh/m²a und für EE1 von 27 kWh/m²a.

9.5 Auswertung

In nachfolgenden Tabellen wird ausgewertet, welche Varianten in Kombination mit den errechneten PV-Erträgen für die Realschule Memmingen den Plusenergiestandard erreichen. Die Auswertung erfolgt wiederum sowohl auf End- als auch auf Primärenergieebene (s. Tabelle 31 und Tabelle 32).

Endenergiebilanz		Notwendiger PV-Ertrag [kWh/m _{NGF} ²a]			
		Standardisierte Berechnung	Angepasste Berechnung		
			Memmingen	Hamburg	Freiburg
Versorgungskonzept Wärmepumpe					
V0	Basisvariante	26,8	26,3	25,7	24,4
V1	Verbesserte Gebäudehülle	25,6	25,1	24,6	23,5
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	25,1	24,6	24,0	22,7
V3	Grundlüftung	26,8	26,1	25,2	23,6
V4	Natürliche Belüftung	24,8	24,6	23,4	21,4
Versorgungskonzept Pelletkessel					
V0	Basisvariante	64,7	61,9	58,8	51,7
V1	Verbesserte Gebäudehülle	58,7	55,7	53,2	46,9
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	63,0	60,3	57,1	50,0
V3	Grundlüftung	75,3	71,7	67,0	58,2
V4	Natürliche Belüftung	65,7	64,7	59,8	51,3
Versorgungskonzept Fernwärme					
V0	Basisvariante	54,9	52,8	50,3	44,6
V1	Verbesserte Gebäudehülle	50,0	47,8	45,8	40,6
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	53,2	51,2	48,7	42,9
V3	Grundlüftung	63,1	60,3	56,5	49,4
V4	Natürliche Belüftung	65,7	64,7	59,8	51,3

- Plusenergiestandard erreicht mit EE0 (Dachbelegung)
- Plusenergiestandard erreicht mit EE1 (Dachbelegung + zusätzliche Flächen)
- Plusenergiestandard nicht erreicht

Tabelle 31: Auswertung der Varianten - Plusenergiestandard auf Endenergieebene (Realschule Memmingen)

Wiederum kann keine Variante mit den Versorgungskonzepten Pelletkessel und Fernwärme auf Endenergieebene kein „Plus“ erzielen, aber auch die standardisierte Berechnung und die angepasste Berechnung Standort Hamburg erreichen knapp kein Plus.

In Tabelle 32 wird das Erreichen des „Plusenergieschule-Standards“ auf Primärenergieebene ausgewertet.

Primärenergiebilanz		Notwendiger PV-Ertrag [kWh/m _{NGF} ² a]			
		Standardisierte Berechnung	Angepasste Berechnung		
			Memmingen	Hamburg	Freiburg
Versorgungskonzept Wärmepumpe					
V0	Basisvariante	64,2	63,1	61,6	58,5
V1	Verbesserte Gebäudehülle	61,5	60,3	59,1	56,3
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	60,3	59,1	57,7	54,5
V3	Grundlüftung	64,3	62,7	60,6	56,6
V4	Natürliche Belüftung	59,5	59,0	56,1	51,4
Versorgungskonzept Pelletkessel					
V0	Basisvariante	54,2	53,7	53,0	51,5
V1	Verbesserte Gebäudehülle	53,0	52,4	51,9	50,5
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	50,3	49,7	49,1	47,6
V3	Grundlüftung	50,9	50,1	49,2	47,4
V4	Natürliche Belüftung	41,6	41,4	40,4	38,6
Versorgungskonzept Fernwärme					
V0	Basisvariante	45,0	44,9	44,9	44,9
V1	Verbesserte Gebäudehülle	44,9	44,9	44,9	44,8
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	41,0	41,0	41,0	40,9
V3	Grundlüftung	39,0	39,0	39,0	38,9
V4	Natürliche Belüftung	31,1	31,0	31,0	30,9

- Plusenergiestandard erreicht mit EE0 (Dachbelegung)
- Plusenergiestandard erreicht mit EE1 (Dachbelegung + zusätzliche Flächen)
- Plusenergiestandard nicht erreicht

Tabelle 32: Auswertung der Varianten - Plusenergiestandard auf Primärenergieebene (Realschule Memmingen)

Mit Ausnahme der standardisierten und der angepassten WP-Variante mit Standort Hamburg erreichen bei der primärenergetisch bewerteten Bilanz alle Varianten mit EE1 ein „Plus“.

10.0 Beispielschule Grundschule Prüfening

10.1 Kurzbeschreibung

Tabelle 33 gibt die Kenndaten der Grundschule Prüfening an.

Regensburg-Prüfening	
Schultyp	Grundschule mit zwei Turnhallen
Standort	Regensburg-Prüfening, Oberpfalz (Bayern)
Schüleranzahl	385
Grundriss	Rechteckiger Grundriss (charakteristische Länge/Breite: 77 m/44 m)
NGF (nach EnEV) [m ²]	5.224
A/V [1/m]	0,31
Fensterflächen-Anteil	47 %
Zonierung	10 Zonen
1_Turnhalle	NGF: 810 m ² Nutzungsprofil: 31 Turnhalle
2_WC und Sanitärräume	NGF: 95 m ² Nutzungsprofil: 16 WC und Sanitärräume in NWG
3_Nebenflächen	NGF: 2.033 m ² Nutzungsprofil: 18 Nebenflächen
4_Gruppenbüro	NGF: 180 m ² Nutzungsprofil: 2 Gruppenbüro
5_Sonstige Aufenthaltsräume	NGF: 670 m ² Nutzungsprofil: 17 Sonstige Aufenthaltsräume
6_Klassenzimmer	NGF: 984 m ² Nutzungsprofil: 8 Klassenzimmer
7_Sanitärräume UG	NGF: 195 m ² Nutzungsprofil: 16 WC und Sanitärräume in NWG
8_Konditionsraum UG	NGF: 35 m ² Nutzungsprofil: 17 Sonstige Aufenthaltsräume
9_Nebenflächen UG	NGF: 175 m ² Nutzungsprofil: 18 Nebenflächen
10_Bibliothek	NGF: 47 m ² Nutzungsprofil: 17 Sonstige Aufenthaltsräume
Bereiche mit Warmwasserbedarf	Handwaschbecken in Sanitärbereichen, Duschen bei Turnhalle (Bedarf nach EnEV-Nachweis 6.100 kWh/a)

Tabelle 33: Kenndaten der Grundschule Prüfening

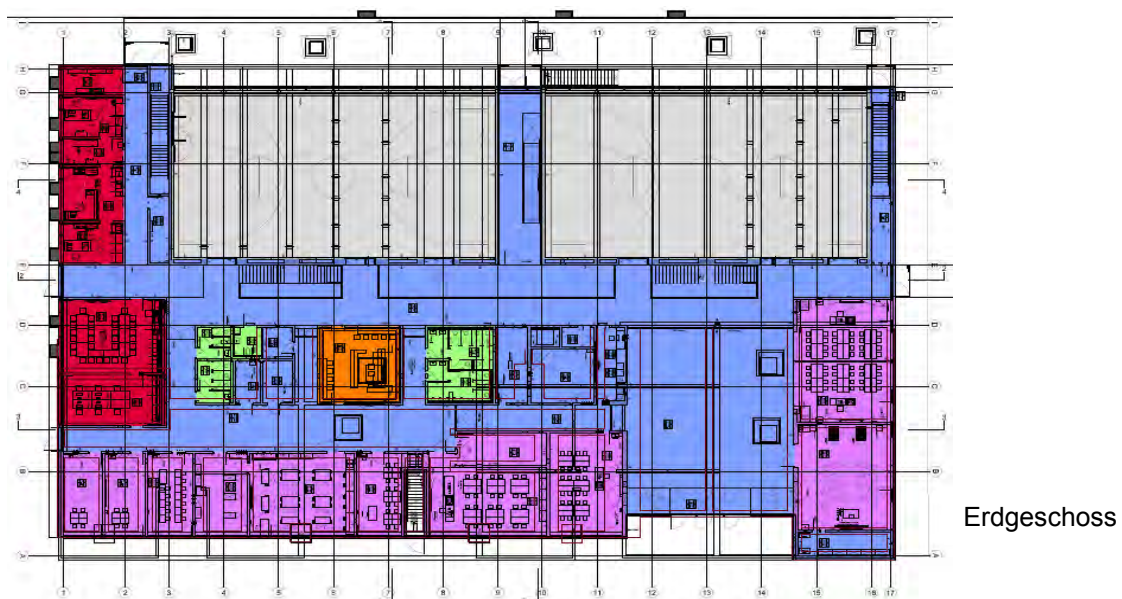
Um einen Eindruck des Gebäudes zu erlangen, sind in Abbildung 30 einige Fotos der Grundschule Prüfening abgebildet.



Abbildung 30: Fotos der Süd- und Westansicht sowie einer Dachterrasse der Grundschule Prüfening (Quelle: <http://www.schulen.regensburg.de/pruefening>)

Abbildung 31 zeigt die Grundrisse mit Zonierung und einen Schnitt der Grundschule Prüfening. Der Grundriss des Obergeschosses besteht aus vier versetzten Rechtecken, so dass sich vier Dachter-

rassen als nutzbare Freiflächen ausbilden. Im Untergeschoss sind zwei Turnhallen mit den entsprechenden Nebenräumen untergebracht.



- Zone 1: Turnhalle
- Zone 2: WC und Sanitärräume EG/OG
- Zone 3: Nebenflächen
- Zone 4: Gruppenbüros
- Zone 5: Sonstige Aufenthaltsräume
- Zone 6: Klassenzimmer
- Zone 7: Sanitärräume UG
- Zone 8: Konditionsraum UG
- Zone 9: Nebenflächen mit Lüftung ohne WRG
- Zone 10: Bibliothek

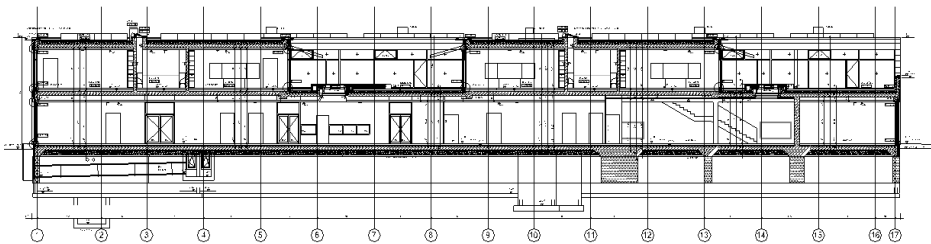


Abbildung 31: Grundrisse des Unter-, Erd- und Obergeschosses mit Zonierung und Schnitt der Grundschule Prüfening (Plan: two architekten GmbH)

10.2 Gebäudeenergiebedarf für die untersuchten Varianten

Standardisierte Berechnung

In der Anlage Tabelle A-10 sind die Ergebnisse der Bedarfsberechnung auf Endenergiebasis aufgesplittet nach Heizung, Warmwasser, Belüftung und Beleuchtung detailliert wiedergegeben. Diese Werte sind in nachfolgender Tabelle nach Energieträgern zusammengefasst und in spezifische Primärenergiebedarfswerte umgerechnet. In der letzten Spalte ist die prozentuale Veränderung im Vergleich zum Primärenergiebedarf der Variante V0 angegeben.

Projekt: Grundschule Prüfening		Endenergiebedarf nach Energieträgern			Endenergie	Primärenergie	Veränd. ggü Q _{P_0}
Standardisierte Berechnung		Strom	Pellet	Fernwärme			
		[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	[kWh/(m²a)]	%
Primärenergiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Wärmepumpe							
V0	Basisvariante	22,7			22,7	54,6	
V1	Verbesserte Gebäudehülle	21,2			21,2	50,9	-7%
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	21,0			21,0	50,5	-8%
V3	Grundlüftung	22,7			22,7	54,6	0%
V4	Natürliche Belüftung	20,7			20,7	49,7	-9%
Primärenergiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Pelletkessel							
V0	Basisvariante	11,0	77,1		88,1	41,9	
V1	Verbesserte Gebäudehülle	11,0	68,6		79,6	40,1	-4%
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	9,3	77,1		86,4	37,7	-10%
V3	Grundlüftung	9,9	83,3		93,1	40,3	-4%
V4	Natürliche Belüftung	5,0	93,7		98,7	30,6	-27%
Primärenergiebedarf nach EnEV: Versorgungskonzept Fernwärme (fp=0)							
V0	Basisvariante	10,9		59,9	70,8	26,2	
V1	Verbesserte Gebäudehülle	10,9		53,4	64,3	26,2	0%
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	9,2		59,9	69,1	22,1	-16%
V3	Grundlüftung	9,8		64,8	74,6	23,5	-11%
V4	Natürliche Belüftung	4,9		75,4	80,3	11,7	-56%

Tabelle 34: Standardisierte Berechnung - Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 (Gebäude Grundschule Prüfening)

Wie auch bei der FOS/BOS Erding ergibt sich für die Basisvariante eine Unterschreitung des Transmissionswärmeverlusts H_T' des EnEV-Referenzgebäudes um 33 %, für die Variante V1 (Verbesserte Gebäudehülle) von 44 %.

Angepasste Berechnung

Bei der Grundschule Prüfening werden neben den Klimadaten und den Luftmengen der Klassenzimmer auch die Nutzungszeiten angepasst. Wie für Grundschulen üblich wird von einer Nutzungszeit zwischen 8 und 13 Uhr ausgegangen.

Die detaillierten Ergebnisse der Endenergiebedarfsberechnungen aufgeteilt nach Gewerk sind im Anhang in Tabelle A-11 bis Tabelle A-13 zu finden.

Nachfolgend sind die End- und Primärenergieergebnisse für die drei Standorte zusammengestellt.

Projekt: GS Prüfening		Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]
Angepasste Berechnung		Standort Regensburg		Standort Hamburg		Standort Freiburg	
Energiebedarf nach EnEV: VeGSorgungskonzept Wärmepumpe							
V0	Basisvariante	21,3	51,2	20,4	48,9	18,8	45,0
V1	Verbesserte Gebäudehülle	19,7	47,4	18,9	45,5	17,5	42,1
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	19,9	47,7	18,9	45,4	17,3	41,5
V3	Grundlüftung	21,2	51,0	20,2	48,4	18,4	44,3
V4	Natürliche Belüftung	19,5	46,8	18,1	43,4	15,9	38,2
Energiebedarf nach EnEV: VeGSorgungskonzept Pelletkessel							
V0	Basisvariante	85,5	38,3	80,6	37,3	71,3	35,4
V1	Verbesserte Gebäudehülle	76,6	36,5	72,5	35,7	64,3	34,0
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	84,1	34,8	79,1	33,8	69,9	31,9
V3	Grundlüftung	88,8	37,0	83,3	35,9	73,4	33,8
V4	Natürliche Belüftung	93,7	28,6	86,5	27,1	74,6	24,7
Energiebedarf nach EnEV: VeGSorgungskonzept Fernwärme (fp=0)							
V0	Basisvariante	68,2	22,9	64,4	22,9	57,4	22,8
V1	Verbesserte Gebäudehülle	61,4	22,9	58,2	22,9	52,1	22,8
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	66,7	19,4	62,9	19,4	55,9	19,3
V3	Grundlüftung	70,7	20,7	66,4	20,7	58,9	20,7
V4	Natürliche Belüftung	75,8	10,5	70,3	10,5	61,0	10,4

Tabelle 35: Angepasste Berechnung - Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 für die Standorte Erding, Hamburg, Freiburg (Gebäude Grundschule Prüfening)

Wegen der geringeren Betriebszeit (7 Stunden anstatt 9 Stunden) ergibt sich im Vergleich zur standardisierten Berechnung ein geringerer Strombedarf für die Lüftungsanlage und die Beleuchtung.

10.3 Nutzerstrombedarf

Die Grundschule Prüfening wird mit 8 kWh/m²a für die Nettogrundfläche entsprechend einem Primärenergiebedarf von 19,2 kWh/m²a angesetzt.

Bei der angepassten Berechnung wird der Nutzerstrombedarf für die Zone Turnhalle separat mit 2 kWh/m²a angesetzt. Es ergibt sich ein spezifischer Endenergiebedarf von 7,1 kWh/m²a, entsprechend einem Primärenergiebedarf von 17 kWh/m²a.

10.4 Energieerzeugung

Welche Flächen für eine Photovoltaiknutzung bei dem Gebäude der Grundschule Prüfening geeignet wären, zeigt nachfolgende Abbildung.

Wiederum sind die für die Belegung mit PV-Modulen geeigneten Dachflächen orange gekennzeichnet, hellorange weitere geeignete Flächen an der Südfassade.



- EE0
- EE1

Abbildung 32: Photovoltaik-Flächenoptionen bei der Grundschule Prüfening (Pläne: kplan AG)

Die Brutto-Dachflächen ohne Flächen der Dachterrassen betragen insgesamt 1.896 m², woraus sich eine belegbare Dachfläche von 1.587 m² ergibt.
Nachfolgender Tabelle sind Kennwerte der PV-Produktion der Grundschule Prüfening zu entnehmen.

	Belegbare Fläche [m ²]	PV-Modulfläche [m ²]	PV-Leistung [kWp]	PV-Erzeugung [kWh/a]			
				Potsdam	Regensburg	Hamburg	Freiburg
Dach Ost/West 10° (EE0)	1.587	1.282	218	171.738	177.956	161.868	179.721
Fassade (EE1)	205	205	26	18.218	18.329	18.151	18.058

Tabelle 36: Belegbare Fläche, Modulfläche, PV-Leistung und -Erzeugung für die Standorte Potsdam, Regensburg, Hamburg, Freiburg

In Tabelle 37 sind die Ergebnisse der Energieerzeugung als End- und Primärenergie für die Standorte Regensburg, Hamburg, Freiburg dargestellt.

Projekt: GS Prüfung		Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]	Endenergie [kWh/(m²a)]	Primärenergie [kWh/(m²a)]
standardisierte+angepasste Berechnung		Potsdam (Standard)		Standort Regensburg		Standort Hamburg		Standort Freiburg	
Energieerzeugung									
EE0	PV Dach 10° Ost/West	32,9	78,9	34,1	81,8	31,0	74,4	34,4	82,6
EE1	PV Dach 10° Ost/West + Sonstiges	36,4	87,3	37,6	90,2	34,5	82,7	37,9	90,9

Tabelle 37: Spezifische End- und Primärenergie der Stromerzeugung für die Standorte Potsdam, Regensburg, Hamburg, Freiburg

Für EE0 ergibt sich für den Standort Potsdam ein auf die Nettogrundfläche bezogener Ertrag von 33 kWh/m²a und für EE1 von 36 kWh/m²a, für Regensburg von 34 kWh/m²a und für EE1 von 38 kWh/m²a.

10.5 Auswertung

In nachfolgenden Tabellen wird farblich ausgewertet, welche Varianten in Kombination mit den errechneten PV-Erträgen für die Grundschule Prüfening den Plusenergiestandard auf Endenergie- und Primärenergieebene erreichen.

Endenergiebilanz		Notwendiger PV-Ertrag [kWh/m _{NGF} ·a]			
		Standardisierte Berechnung	Angepasste Berechnung		
			Regensburg	Hamburg	Freiburg
Versorgungskonzept Wärmepumpe					
V0	Basisvariante	30,7	28,4	27,4	25,8
V1	Verbesserte Gebäudehülle	29,2	26,8	26,0	24,6
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	29,0	26,9	26,0	24,4
V3	Grundlüftung	30,7	28,3	27,2	25,5
V4	Natürliche Belüftung	28,7	26,6	25,1	23,0
Versorgungskonzept Pelletkessel					
V0	Basisvariante	96,1	92,6	87,6	78,4
V1	Verbesserte Gebäudehülle	87,6	83,7	79,6	71,4
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	94,4	91,1	86,2	77,0
V3	Grundlüftung	101,1	95,9	90,4	80,5
V4	Natürliche Belüftung	106,7	100,8	93,5	81,7
Versorgungskonzept Fernwärme					
V0	Basisvariante	78,8	75,3	71,4	64,5
V1	Verbesserte Gebäudehülle	72,3	68,5	65,2	59,1
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	77,1	73,8	70,0	63,0
V3	Grundlüftung	82,6	77,7	73,5	66,0
V4	Natürliche Belüftung	88,3	82,9	77,4	68,1

- Plusenergiestandard erreicht mit EE0 (Dachbelegung)
- Plusenergiestandard erreicht mit EE1 (Dachbelegung + zusätzliche Flächen)
- Plusenergiestandard nicht erreicht

Tabelle 38: Auswertung der Varianten - Plusenergiestandard auf Endenergieebene

Bei den Versorgungskonzepten mit Pelletkessel und Fernwärme kann kein „Plus“ auf Endenergieebene erreicht werden, allerdings erreichen alle Wärmepumpen-Varianten nur mit PV-Dachbelegung (EE0) das „Plus“.

Primärenergiebilanz		Notwendiger PV-Ertrag [kWh/m _{NGF} ² a]			
		Standardisierte Berechnung	Angepasste Berechnung		
			Regensburg	Hamburg	Freiburg
Versorgungskonzept Wärmepumpe					
V0	Basisvariante	73,8	68,1	65,9	62,0
V1	Verbesserte Gebäudehülle	70,1	64,4	62,4	59,1
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	69,7	64,6	62,4	58,5
V3	Grundlüftung	73,8	67,9	65,4	61,2
V4	Natürliche Belüftung	68,9	63,8	60,3	55,2
Versorgungskonzept Pelletkessel					
V0	Basisvariante	61,1	55,3	54,3	52,4
V1	Verbesserte Gebäudehülle	59,3	53,5	52,6	50,9
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	56,9	51,8	50,8	48,9
V3	Grundlüftung	59,5	53,9	52,8	50,8
V4	Natürliche Belüftung	49,8	45,6	44,1	41,7
Versorgungskonzept Fernwärme					
V0	Basisvariante	45,4	39,9	39,9	39,8
V1	Verbesserte Gebäudehülle	45,4	39,8	39,8	39,8
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	41,3	36,4	36,4	36,3
V3	Grundlüftung	42,7	37,7	37,7	37,6
V4	Natürliche Belüftung	30,9	27,5	27,5	27,4

- ☒ Plusenergiestandard erreicht mit EE0 (Dachbelegung)
- ☒ Plusenergiestandard erreicht mit EE1 (Dachbelegung + zusätzliche Flächen)
- ☐ Plusenergiestandard nicht erreicht

Tabelle 39: Auswertung der Varianten - Plusenergiestandard auf Primärenergieebene

Bei der primärenergetisch bewerteten Bilanz erreichen alle Varianten ein „Plus“.

11.0 Plusenergiestandard Schulen

Nachfolgend soll die Erreichbarkeit des Plusenergiestandards der Beispielschulen analysiert, die gewählte Definition des Plusenergiestandards überprüft und schließlich eine Abschätzung der Erreichbarkeit unter Berücksichtigung von grauer Energie erfolgen.

11.1 Erreichbarkeit Beispielschulen

Die Erreichbarkeit des Plusenergiestandards der Beispielschulen wird nachfolgend für die standardisierte Berechnung und die Berechnung mit freien Randbedingungen ausgewertet.

11.1.1 Standardisierte Berechnung

Basisvariante

Die für die Berechnung der Beispielschulen festgelegte Basisvariante weist einen hohen energetischen Standard und eine energetisch effiziente Anlagentechnik auf. Bei einer Auswertung nach EnEV 2009 ergibt sich eine Unterschreitung des Transmissionswärmeverlusts in Bezug auf das Referenzgebäude von 32 bis 33 %, für den Primärenergiebedarf eine Unterschreitung von 53 bis 56 % bei der Wärmepumpenversorgung, von 67 bis 69 % bei der Versorgung mit Pelletkessel und von 76 bis 80 % bei der Fernwärmeversorgung. Weitere Gebäudekennzahlen sind in Tabelle 40 zusammengestellt.

	FOS/BOS Erding	RS Memmingen	GS Prüfening
Nettogrundfläche [m ²]	7.640	7.845	5.224
thermisch konditioniertes Volumen [m ³]	35.956	29.874	33.255
Hüllfläche [m ²]	9.499	10.407	10.179
A/V-Verhältnis [1/m]	0,26	0,35	0,31
Fensterflächenanteil [%]	37%	51%	47%
Basisvariante Kennwerte Wärmebilanz			
Transmissionswärmeverlust [W/m ² K]	0,26	0,32	0,24
Heizwärmebedarf [kWh/m ²]	27	31	43
Transmissionswärmeverluste [kWh/m ²]	31	40	45
Lüftungswärmeverluste [kWh/m ²]	20	20	27
Solare Wärmegewinne [kWh/m ²]	13	18	16
Interne Wärmegewinne [kWh/m ²]	11	11	12
Kennwerte Dach (f. PV-Anlage)			
Dachfläche brutto (n. EnEV-NW) [m ²]	2.581	2.625	3.517
Dachfläche belegbar [m ²]	1.925	1.679	1.587
belegbare/brutto Dachfläche [%]	75%	64%	45%
spez. belegbare Dachfläche [m ² /m ² _{NGF}]	0,25	0,21	0,30

Tabelle 40: Kennzahlen der Beispielgebäude (Basisvariante)

Nachfolgende Grafik zeigt den Primärenergiebedarf und die -erzeugung für die Basisvarianten bei Bedarf und Erzeugung für unterschiedliche Versorgungsvarianten. Die festgelegte Basisvariante hat sich als gute Ausgangsbasis für die Umsetzung der Schulen im Plusenergiestandard herausgestellt.

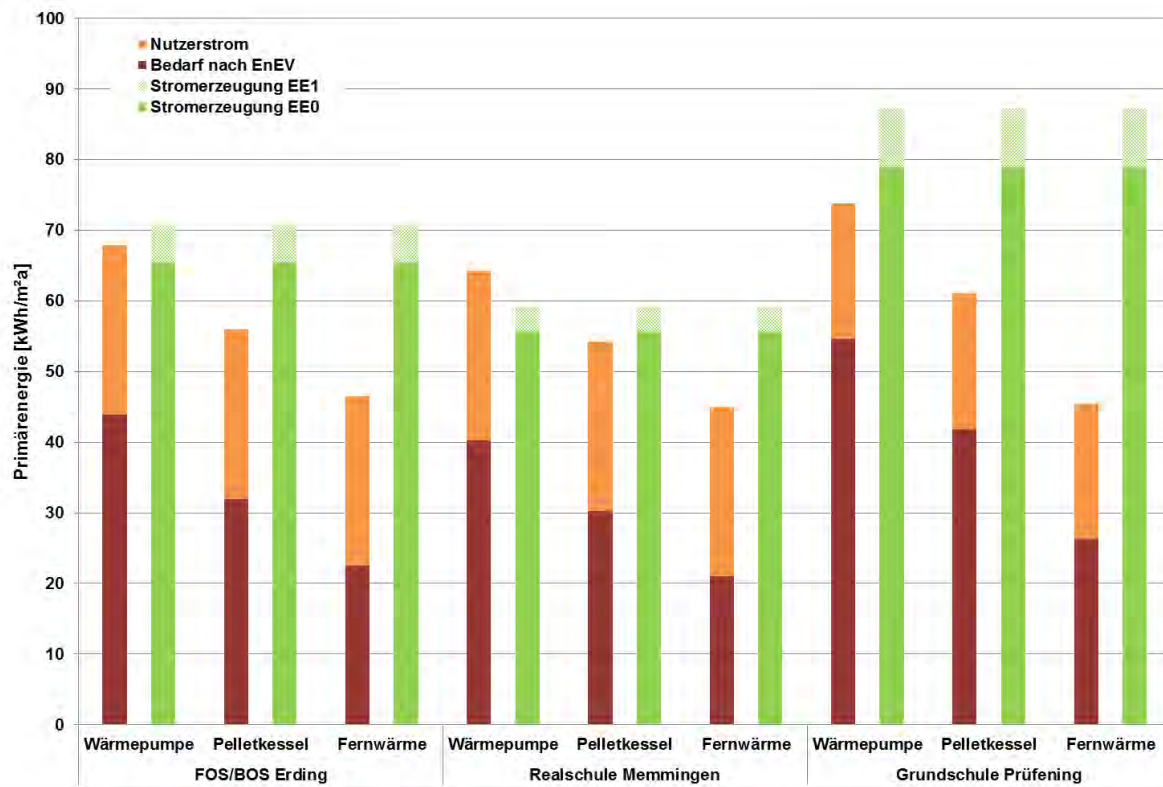


Abbildung 33: Primärenergetische Auswertung der Basisvarianten

Für die Auswertung der Basisvarianten lassen sich folgende Aussagen zur Erreichbarkeit des Plusenergiestandards ableiten:

- Bei den untersuchten Versorgungskonzepten weist die Fernwärme den niedrigsten und die Wärmepumpe den höchsten Primärenergiebedarf auf.
- Bei der Versorgung mit Pelletkessel und Fernwärme können alle drei Beispielschulen eine positive Primärenergiebilanz erzielen. Analysiert man, bis zu welchem Primärenergiefaktor der Fernwärme sich eine positive Primärenergiebilanz mit EE0 erzielen lässt, so würde bei der FOS/BOS Erding und GS Prüfening ein Primärenergiefaktor von 0,5 ausreichen, bei der RS Memmingen von 0,2.
- Die Stromerzeugung durch Belegung der Dachflächen mit PV (EE0) ist bei der WP-Variante FOS/BOS Erding nicht ausreichend, jedoch durch Belegung zusätzlicher Flächen (EE1). Hingegen erreicht die WP-Variante RS Memmingen auch mit EE1 kein Plus.
- Insgesamt lässt sich feststellen, dass durch die Belegung zusätzlicher Flächen (EE1) der Stromerzeugungsertrag nicht mehr wesentlich gesteigert werden kann. Dies liegt beispielsweise an wenig weiteren geeigneten Flächen, geringeren Wirkungsgraden der Systeme und ungünstiger Neigung.
- Trotz des hohen spezifischen Bedarfs erzielt die GS Prüfening das größte Plus. Dies hängt mit der größeren mit PV belegbaren Dachfläche bezogen auf die Nettogrundfläche zusammen. Durch die vier Vollgeschosse ist dieses Verhältnis bei der RS Memmingen am ungünstigsten.

Die Berechnung erfolgte noch nach EnEV 2009 in Verbindung mit DIN V 18599 Version 2007- 2. Es war vorgesehen, die EnEV 2009-Berechnungen zu einem geeigneten Bearbeitungszeitpunkt auf die EnEV 2013 in Verbindung mit DIN V 18599 Version 2011-12 umzustellen. Bedingt durch Verzögerung bei der Software-Umsetzung konnte dies nicht mehr im Rahmen dieses Projektes umgesetzt werden. Ergänzend sollen die Auswirkungen einer Berechnung nach EnEV 2013 nachfolgend diskutiert werden:

- Die Primärenergiefaktoren der EnEV 2013 sind in dieser Untersuchung bereits berücksichtigt (vgl. Tabelle 11).

- Die Verwendung der neuen Daten für das Standardklima Deutschland würde den Heizwärmebedarf leicht absenken (ca. 2 bis 3 %).
- Über die Auswirkungen von Anpassungen von Anlagenkennwerten kann keine generelle Aussage gemacht werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich bei der untersuchten Anlagentechnik keine oder nur geringfügige Änderungen ergeben würden.

Nach der neuen EnEV 2013 werden ab dem 1.1.2016 verschärfte Anforderungen gestellt. Neben einer geforderten Unterschreitung des Primärenergiebedarfs von 25 % und einer Verschärfung der Höchstwerte der maximalen Wärmedurchgangskoeffizienten, welche beide von den Basisvarianten eingehalten werden würde, erfolgt eine Anpassung des Primärenergiefaktors von Strom (EnEV 2013 Anlage 2 bzw. Anlage 1 Absatz 2.1.1, vgl. auch Tabelle 9).

Bei einer Absenkung des Strom-Primärenergiefaktors von 2,4 auf 1,8 würden sich die in Abbildung 34 gezeigten Verschiebungen ergeben.

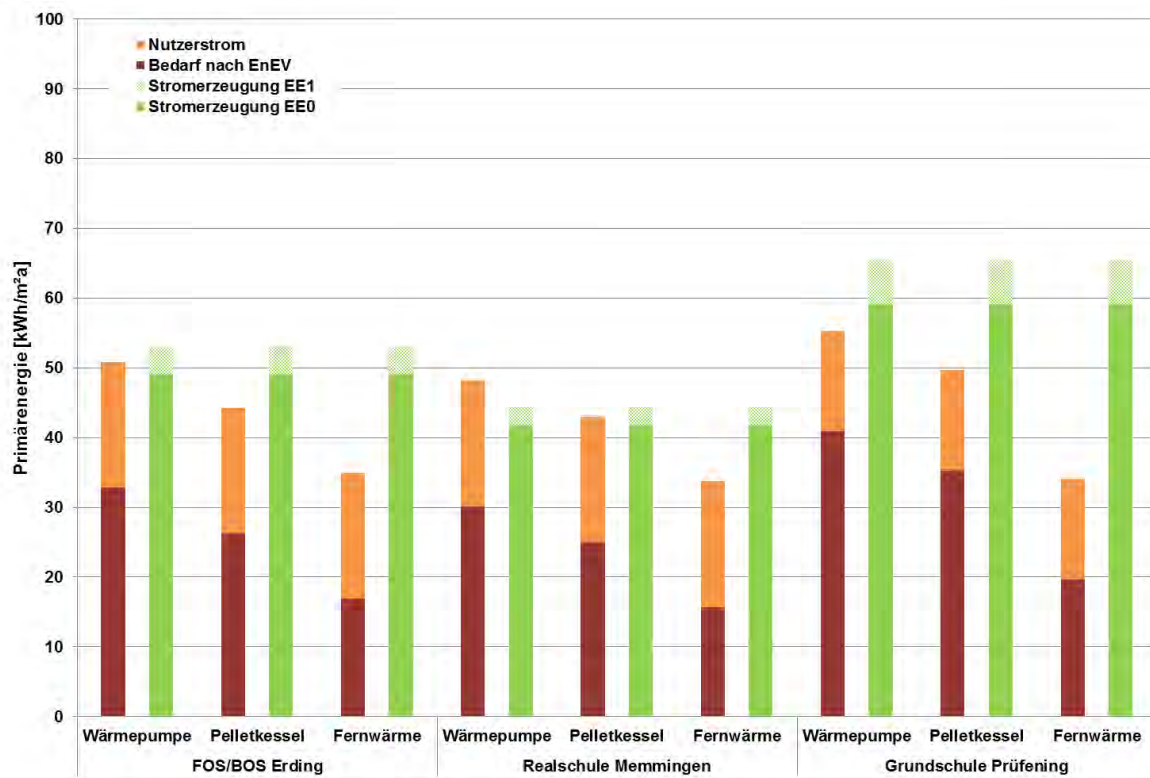


Abbildung 34: Primärenergetische Auswertung der Basisvarianten mit den Primärenergiefaktoren nach EnEV ab 1. Januar 2016

Sowohl der Primärenergiebedarf als auch die Primärenergieerzeugung sinken. An der Auswertung welche Variante den Plusenergiestandard erreicht, ändert sich jedoch kaum etwas.

Für die Diskussion der Bilanzebene soll auch eine Auswertung der Basisvarianten auf Endenergieebene durchgeführt werden (s. nachfolgende Grafik)

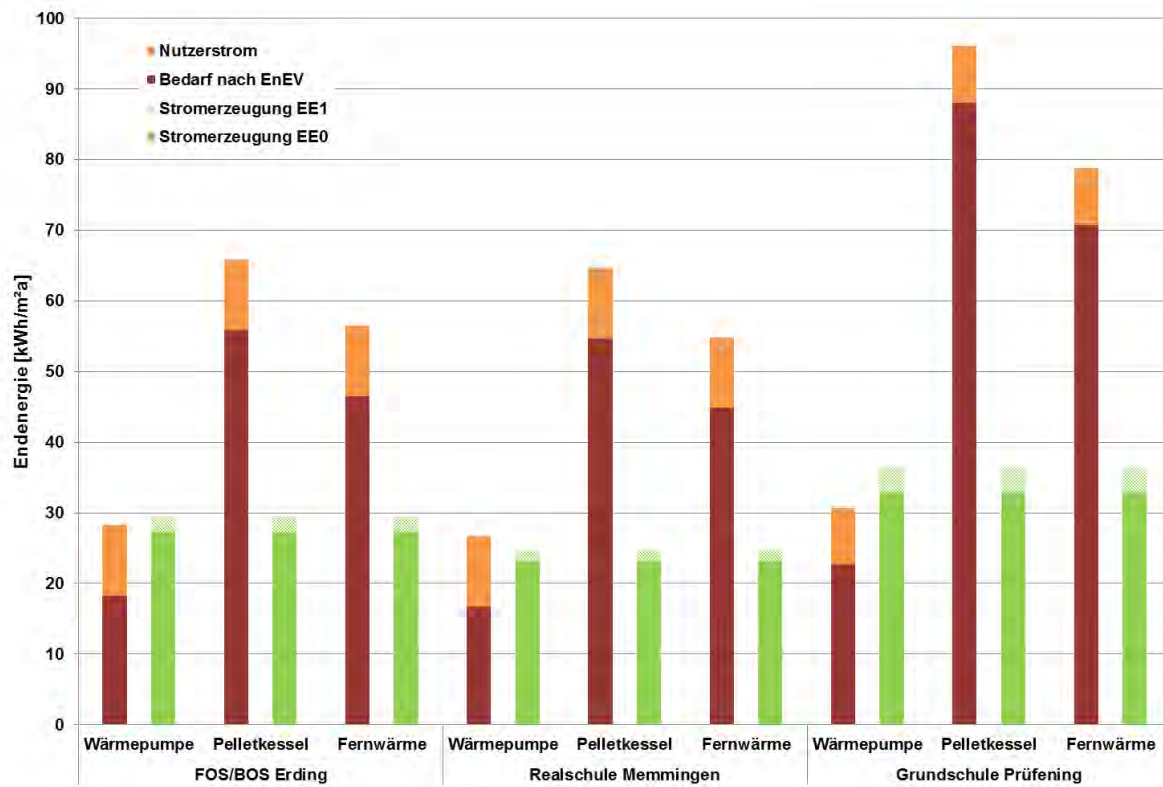


Abbildung 35: Endenergetische Auswertung der Basisvarianten

In der Endenergiebilanz erreichen beim Wärmepumpen-Versorgungskonzept analog zur Primärenergieauswertung die GS Prüfening (mit EE0) und die FOS/BOS Erding (mit zusätzlich EE1) ein „Plus“, die Realschule Memmingen knapp nicht.

Es wird deutlich, dass eine positive Bilanz auf Endenergieebene für alle Beispielschulen nur für das Versorgungskonzept mit Wärmepumpe erreichbar sein kann: Bei der Fernwärmevariante der FOS/BOS Erding beispielsweise müsste das 1,9-fache bezogen auf EE0 + EE1 erzeugt werden, um den Plusenergiestandard zu erreichen, bei der Pelletkesselvariante das 2,2-fache. Aus der Variantenrechnung lässt sich ableiten, dass der Bedarf nach EnEV bei Variantenkombination nur noch maximal um 11 % abgesenkt werden kann. Um den Plusenergiestandard zu erreichen, reicht daher eine alleinige PV-Belegung des Gebäudes auch bei optimaler Bedarfsreduktion bei weitem nicht aus. Auch eine PV-Belegung von Außenflächen (z.B. Carports) liegt mit einem weiteren Modulflächenbedarf von ca. 1.400 m² in einer für die Umsetzung unrealistisch hohen Größenordnung.

Variantenrechnungen

Folgende Erkenntnisse sind aus den Variantenrechnungen zu gewinnen (vgl. hierzu Tabelle 20, Tabelle 27 und Tabelle 34):

- Verbesserungen am Dämmstandard (V1) haben bei der Primärenergieeinsparung umso weniger Effekt je niedriger der Primärenergiefaktor der Wärmeversorgung ist. Beim Versorgungskonzept Wärmepumpe können bei dieser Variante 5 bis 7 % an Primärenergie eingespart werden.
- Durch hohe Stromeffizienz der Ventilatoren der RLT-Anlage (V2) können relevante Einsparungen in Höhe von 8 % (WP) bis zu 19 % (FW) erzielt werden.
- Die Planung einer Grundlüftung anstatt der vollständigen Belüftung der Klassenzimmer hat beim Versorgungskonzept Wärmepumpe keine Auswirkungen, da sich die Einsparungen beim Lüftungsstrom durch die höheren Lüftungswärmeverluste kompensieren. Da die Lüftungswärmeverluste beim Versorgungskonzept mit Fernwärme durch den mit „Null“ angesetzten Primärenergiefaktor hingegen nicht ins Gewicht fallen, kann hier eine Einsparung bis zu 30 % erzielt werden.



- Mit der Variante „natürliche Lüftung“ des Gebäudes (V4) lassen sich insbesondere beim Versorgungskonzept Fernwärme sehr hohe Einsparungen erreichen.
- Um ein „Plus“ zu erzielen, müssen gegebenenfalls Varianten miteinander kombiniert werden. Bei der Realschule Memmingen könnte beispielsweise beim Versorgungskonzept Wärmepumpe (vgl. Abbildung 33) durch eine Umsetzung der Varianten V1 und V2 in Kombination mit EE1 eine positive Bilanz erreicht werden.

Bei der Festlegung des Lüftungskonzeptes einer Schule ist zu beachten, dass hier nicht nur die energetischen Aspekte eine Rolle spielen, sondern das Lüftungskonzept beispielsweise auch von den Raumtiefen, der Belegungsdichte, der Außenluftqualität, dem Konzept des sommerlichen Wärmeschutzes, den Schallemissionen und dem Wartungsaufwand abhängt. Auf Basis dieser Rahmenbedingungen und der gewünschten Raumlufthqualität wird das Lüftungskonzept für das Gebäude entwickelt und die Entscheidung getroffen, welches Lüftungskonzept umgesetzt werden soll (z.B. vollständige Belüftung, Grundlüftung, Natürliche Lüftung).

11.1.2 Berechnung mit freien Randbedingungen

Die in der Berechnungsmethodik 7.1 geforderte Anpassung der Berechnung an das geplante Gebäude ergibt die in nachfolgenden Abbildungen gezeigten Ergebnisse.

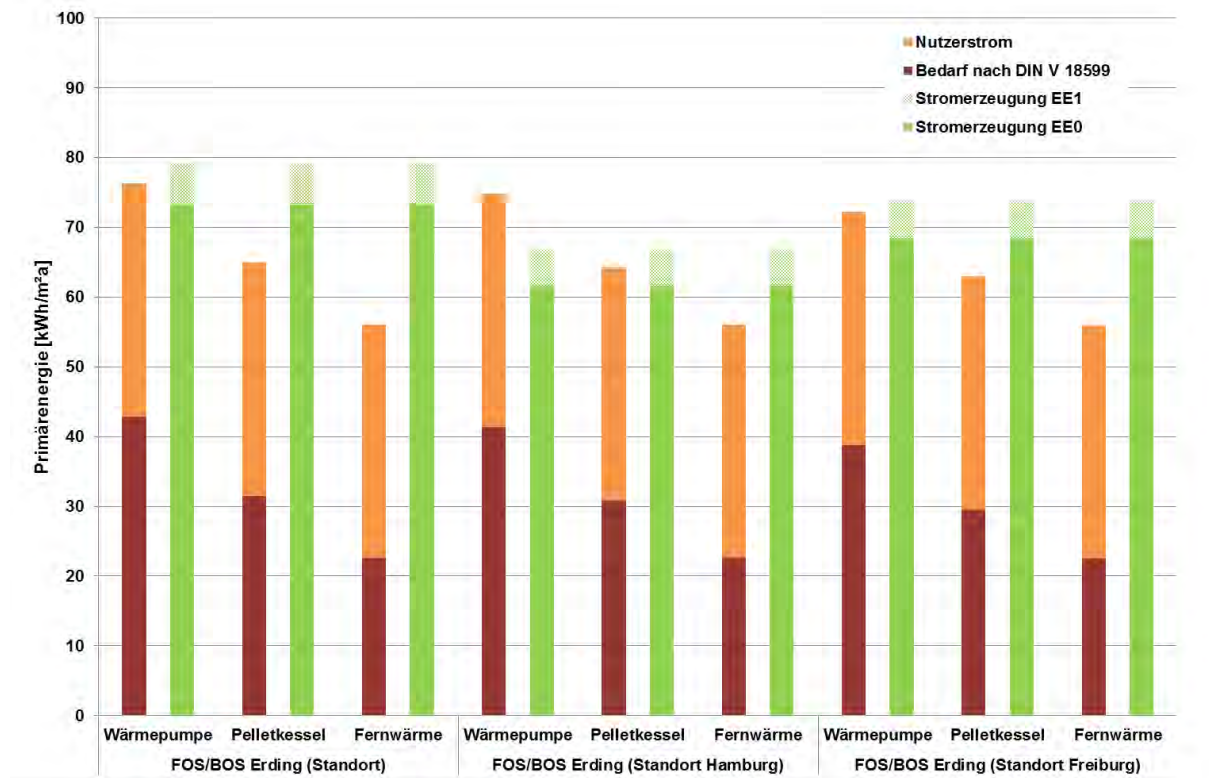


Abbildung 36: FOS/BOS Erding - Primärenergetische Auswertung der angepassten Berechnungen

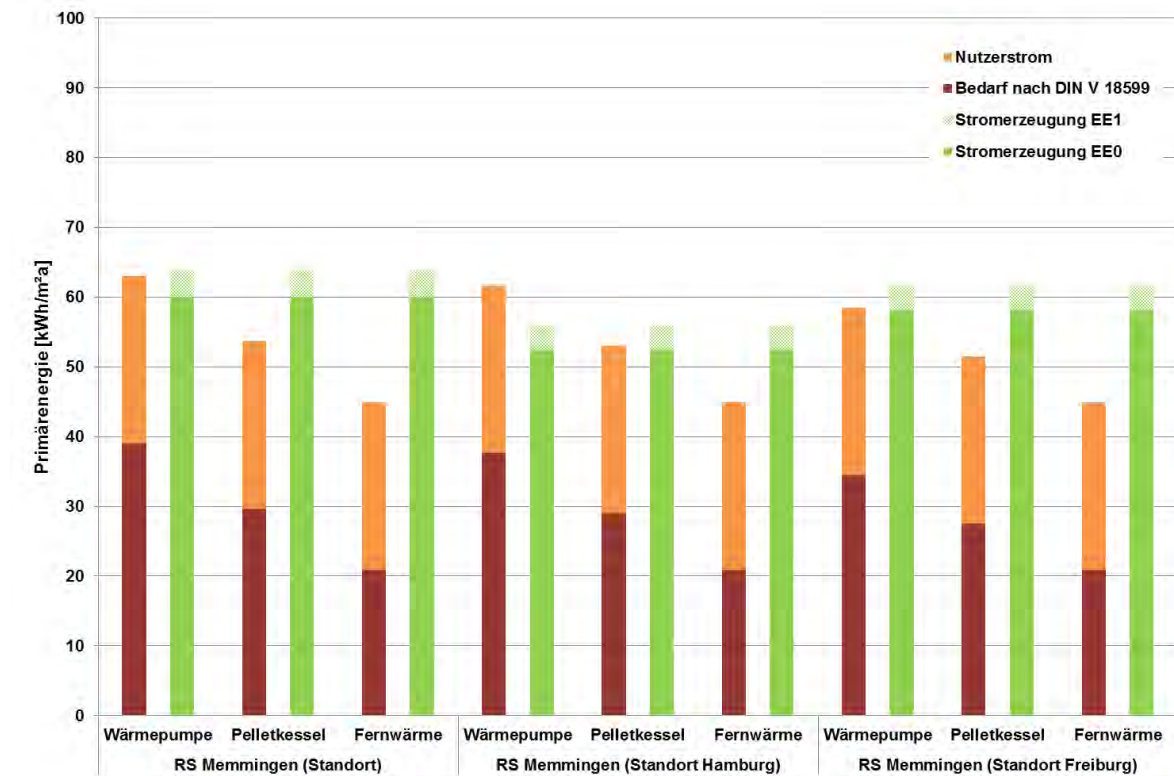


Abbildung 37: Realschule Memmingen - Primärenergetische Auswertung der angepassten Berechnungen

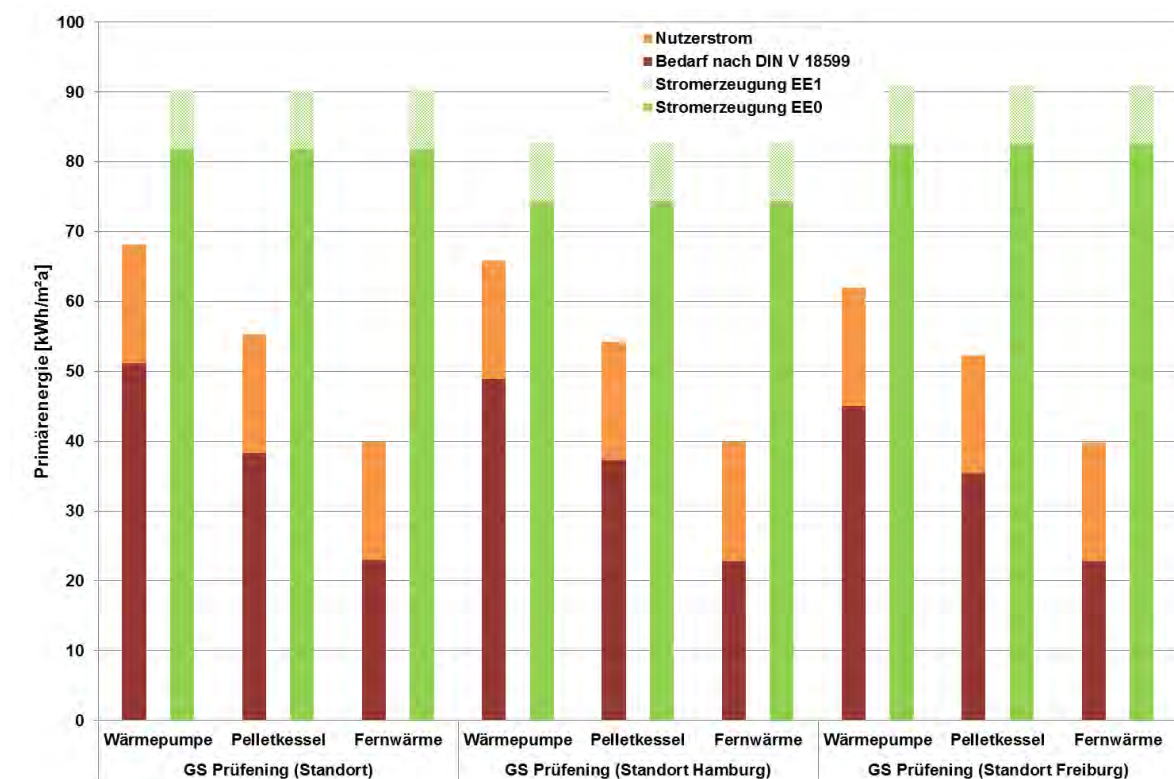


Abbildung 38: Grundschule Prüfening - Primärenergetische Auswertung der angepassten Berechnungen

Es lässt sich feststellen, dass es Standorte gibt, für die das Erreichen des angepassten Plusenergie-standards leichter möglich ist (z.B. Freiburg) als für andere (z.B. Hamburg).

Im Vergleich zur Standardberechnung erhöht sich der PV-Ertrag für den Standort Erding um 12 %, für Memmingen um 8 %, für Regensburg um knapp 4 %, für Freiburg um knapp 5 % und verringert sich für Hamburg um 6 %.

Der Heizwärmebedarf sinkt im Vergleich zur Klimaregion 13 (Standorte der Beispielschulen) für Hamburg um rund 9 %, für Freiburg um ca. 24 %.

Verschiebungen im Vergleich zur standardisierten Berechnung gibt es auch beim Anteil des Nutzerstrombedarfs, der durch die Küchennutzung bei der FOS/BOS Erding stark ansteigt, hingegen bei der GS Prüfening wegen des geringeren Strombedarfs in den Turnhallen, abnimmt.

11.2 Überprüfung Definition Plusenergieschule

Bezugnehmend auf die in Kapitel 7.1 vorgeschlagene Berechnungsmethodik wird nachfolgend anhand der Ergebnisse die Eignung der Methodik diskutiert.

Als Bilanzierungsebene von Plusenergieschulen wurde die Primärenergiebilanz festgelegt und auf eine Bilanzierung auf Endenergieebene wegen des fehlenden Bezugs zum Ressourcenverbrauch verzichtet. Die Ergebnisse auf Endenergieebene haben gezeigt, dass es hier nur für das Versorgungskonzept mit Wärmepumpe möglich ist, einen Plusenergiestandard zu erreichen.

Als Nachteil der Bilanzierungsebene Primärenergie hat sich jedoch herausgestellt, dass die Umsetzung des Plusenergiestandards bei sehr geringen Primärenergiefaktoren verhältnismäßig leicht umzusetzen ist. Zu befürchten ist, dass dies Auswirkungen auf die umgesetzte energetische Effizienz der Gebäudehülle und Wärmeversorgung haben könnte. Aus diesem Grund ist es wichtig, bei der gewählten Bilanzierungsebene Primärenergiebilanz über Nebenanforderungen eine hohe energetische Qualität der Gebäudehülle und der Anlagentechnik (Belüftung, Beleuchtung) sowie einen geringen Nutzerstrombedarf zu gewährleisten.

Eine hohe energetische Qualität der Gebäudehülle kann über einen geforderten mittleren Transmissionswärmeverlust, der das EnEV-Referenzgebäude um mindestens 30 % unterschreiten muss, erreicht werden. Um auch die Effizienz der Anlagentechnik zu berücksichtigen, ist es sinnvoll zusätzliche Vorgaben für eine effiziente Beleuchtung (z.B. maximale Beleuchtungsleistung von 2 W/100 lx, Präsenzmelder in allen Bereichen, tageslichtabhängige Kunstlichtsteuerung in den Klassenzimmern) und eine Begrenzung der Ventilatorleistung bei mechanischer Belüftung (z.B. mindestens SFP 3) zu machen sowie ein Konzept zur Minimierung des Nutzerstromverbrauchs und ein Monitoring zu fordern.

Der Ansatz der Primärenergiefaktoren nach EnEV in Verbindung mit der DIN V 18599 scheint für die Nachvollziehbarkeit als alternativlos. Ob in der primärenergetischen Bewertung unterschieden werden sollte, ob der erzeugte PV- und Windstrom selbstgenutzt oder eingespeist wird, wurde in dieser Studie nicht untersucht. Grundsätzlich wäre ein für selbstgenutzten Strom höher angesetzter Primärenergiefaktor eine Option, um die Nichtbelastung des externen Stromnetzes positiv zu bewerten.

Auch ist die Festlegung des Primärenergiefaktors von Biomasse auf den Wert 0,2 für die Bewertung des Ressourcenverbrauchs zu pauschal, da regional erzeugte Biomasse mit geringem Energieeinsatz für die Bereitstellung gleichgesetzt wird mit Biomasse, die weit transportiert und ggf. nicht nachhaltig hergestellt wurde. Als weitere Nebenanforderung sollte daher gestellt werden, dass thermisch verwertete Biomasse nachhaltig und regional hergestellt sein muss. Als regional könnte, analog [peq13], der Pelletbezug von Herstellern aus einem Umkreis von 250 km eingestuft werden.

Die vorgeschlagene zweifache Berechnung mit standardisierten und freien Randbedingungen, hat gezeigt, dass je nach regionalen Klimadaten, die Erreichbarkeit bei der Berechnung mit freien Randbedingungen leichter oder schwieriger sein kann. Für die Vergleichbarkeit der energetischen Qualität von Gebäuden ist die standardisierte Berechnung sinnvoll. Um sicherzustellen, dass der Plusenergiestandard auch tatsächlich erreicht werden kann, sollte jedoch auch die angepasste Berechnung eine positive Bilanz aufweisen. Bei der Anpassung der Nutzungsprofile muss jedoch sichergestellt werden, dass sinnvolle Randbedingungen gewählt werden.

Bei der standardisierten Berechnung hat sich die Festlegung der zugrunde zu legenden Wetterdaten für die Stromerzeugung als besonders zwiespältig herausgestellt. Soll analog EnEV-Berechnung das Standardklima Deutschland (Potsdam) angesetzt werden oder mit lokalen Wetterdaten gerechnet werden? Auch hier spricht die Vergleichbarkeit der Gebäude für die standardisierte Berechnung und das Erreichen eines „Plus“ im realen Betrieb für lokale Klimadaten.

Insbesondere bei der Ertragsberechnung von Windkraftanlagen ist in Frage zu stellen, ob die Verwendung von Winddaten des Referenzstandortes Potsdam zielführend ist. Die in der DIN V 18599-10:2011- Tabelle E.2 angegebenen Jahreswerte für die mittlere Windgeschwindigkeiten der Referenzorte (in 10 m Höhe über Grund) zeigen eine extrem starke Streuung und liegen zwischen 0,9 und 8,7 m/s. Da demnach die Ertragsunterschiede von Windkraftanlagen je nach Windstandort immens sein können, wird weiterhin für die Berechnung der Windkrafterzeugung empfohlen, lokale Wetterdaten anzusetzen.

Bei der Festlegung des anzusetzenden Nutzerstrombedarfs für die standardisierte Berechnung bestand die Problematik, dass eine Festlegung wegen der fehlenden diesbezüglichen Datenbasis schwierig ist (vgl. 4.0). Auch bei der Vergleichsanalyse von Bedarf und Verbrauch der Beispielschulen (vgl. Kapitel 13.0) konnte der Nutzerstromverbrauch nicht ermittelt werden, da dieser nicht vom Beleuchtungsstrom getrennt erfasst wurde. Da die dennoch durchgeführten Abschätzungen zum Nutzerstromverbrauch der drei Beispielschulen nicht belastbar genug sind, erfolgt hier keine Anpassung der Werte. Die Durchführung weiterer Forschungsarbeiten in diesem Bereich wird empfohlen. Sobald hier fundierte Ergebnisse vorliegen, sollten die vorgeschlagenen spezifischen Werte überprüft werden.

Eine Mindestanforderung an den Eigennutzungsanteil des erzeugten Stroms erscheint zusätzlich sinnvoll. Jedoch ist eine Lastganganalyse in hoher zeitlicher Auflösung zu aufwendig und andererseits eine Ermittlung auf Basis einer Monatsbilanz zu ungenau. So ergibt sich bei der Lastganganalyse für die Variante V0-WP in 10-Minuten-Auflösung ein Eigennutzungsanteil von 37 % (vgl. Tabelle 64), bei einer ergänzend durchgeführten Monatsbilanz-Auswertung ein Eigennutzungsanteil von 62 %. Daher wird vorgeschlagen, bei einem Monitoring den tatsächlichen Eigennutzungsanteil eines Jahres auszuwerten.

Insgesamt wird die den Berechnungen zugrunde gelegte Berechnungsmethodik (s. Tabelle 11) als für den Nachweis von Plusenergieschulen geeignet eingestuft und als Definition vorgeschlagen. Die oben diskutierten Ergänzungen sollten als Nebenanforderungen in der Definition ergänzt werden. Die vorgeschlagenen Nebenanforderungen sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

Nebenanforderungen	Gebäudehülle - Unterschreitung H_T des EnEV-Referenzgebäudes um mindestens 30 % Beleuchtung - maximale Beleuchtungsleistung: 2 W/100 lx - Präsenzmelder in allen Bereichen - tageslichtabhängige Kunstlichtsteuerung in den Klassenzimmern Nutzerstrom - Erstellung eines Konzepts zur Minimierung des Nutzerstromverbrauchs Betriebsphase - Durchführung eines Monitorings mit Erfassung der wichtigsten Verbraucher und des Eigennutzungsanteils Bei RLT-Anlage - Ventilatorleistung mindestens SFP 3 Bei Biomasseheizung - Einsatz regionaler Produkte aus nachhaltiger Forstwirtschaft
--------------------	---

Tabelle 41: Vorschläge für Nebenanforderungen an Plusenergieschulen

11.3 Graue Energie

In nachfolgendem Abschnitt soll abgeschätzt werden, wie sich die Primärenergiebilanz verändert, wenn der Bilanzumfang sich nicht nur auf die Nutzung beziehen würde, sondern die Herstellung und Entsorgung des Gebäudes mit einbeziehen würde.

Für eine Vertiefung des Themas Nachhaltigkeit von Bildungsbauten wird auf [bmu14] verwiesen.

Energieaufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung von Plusenergieschulen

Im Rahmen des DBU geförderten Projektes FOS/BOS Erding wurde von der Fa. Ascona eine Lebenszykluskostenanalyse und Ökobilanz erstellt [fos14].

Als Basis für die Ökobilanz wurde für das Gebäude und die Anlagentechnik eine Massenbilanz erstellt, die in nachfolgender Tabelle wiedergegeben wird.

FOS/BOS Erding	Niedrigstenergiegebäude kg
Gesamt Phase Herstellung	13.653.749
1 Mineralisches Material	11.367.090
2 Pflanzliches material	131.946
3 Metall	682.304
4 Kunststoffe fossil	27.150
5 Abdichtungen, Schutzschichten	175.186
6 Bodenbeläge, Estriche	784.829
7 Dämmstoffe	111.713
8 Putz, Ausbauplatten, Fassade	301.765
9 Beschichtungen	22.143
10 Technischer Ausbau	12.939
11 Transluzente Bauteile	36.682

Tabelle 42: Massenbilanz der FOS/BOS Erding [fos14]

Tabelle 43 enthält die Ergebnisse der Ökobilanz für die nicht erneuerbare Primärenergie (PE) und die Primärenergie gesamt, die für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung (KG 300+400) des Gebäudes der FOS/BOS Erding berechnet wurden.

FOS/BOS Erding	Primärenergie gesamt [kWh]	Primärenergie nicht erneuerbar [kWh]	Spez. PE nicht erneuerbar [kWh/m ² _{NGF}]
Herstellung	13.609.943	11.498.044	1.497
Instandhaltung	4.716.979	3.917.127	510
Entsorgung	-5.747.408	-5.215.476	-679
Summe Gebäude	12.579.514	10.199.695	1.328

Tabelle 43: Primärenergie für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung des Gebäudes FOS/BOS Erding [fos14]

Zu diesem Primärenergieeinsatz käme bei einer Plusenergieschule noch die Primärenergie für die Herstellung der PV-Anlage.

Ausgehend von einem sich für die Basisvariante mit Wärmepumpenversorgung ergebenden Primärenergiebedarf von 68 kWh/m²a, müsste, um in Erding diesen Primärenergieertrag erzielen zu können, eine PV-Anlage bei Zick-Zack 10° Ost/West-Ausrichtung von 274 kWp installiert werden.

Einer Zusammenstellung von [hel10] ist zu entnehmen, dass für die Herstellung von monokristallinen PV-Modulen ein Primärenergieaufwand von knapp 6.000 kWh/kWp erforderlich ist. Dies wird als Basis für die Abschätzung der Primärenergieaufwendungen für die PV-Anlage verwendet, wobei Instandhaltung und Entsorgung vernachlässigt werden. Daraus ergäben sich weitere Primärenergieaufwendungen für die PV-Anlage von 214 kWh/m²_{NGF}.

Auch wurden Vortagsfolien, aus denen der Primärenergieaufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung für die DGNB-goldzertifizierte Plusenergieschule Hohen Neuendorf grob ablesbar ist, zur Verfügung gestellt [kön14]. In der Primärenergiebilanz, die das Gebäude und die Anlagentechnik umfasst, ist auch eine 55 kWp PV-Anlage enthalten.

Grundschule Hohen Neuendorf	Primärenergie nicht erneuerbar [kWh]	Spez. PE nicht erneuerbar [kWh/m²NGF]
Herstellung	10.500.000	1.600
Instandhaltung	5.700.000	868
Entsorgung	-5.200.000	-792
Summe Gebäude	11.000.000	1.676

Tabelle 44: Primärenergiebilanz für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Plusenergieschule Hohen Neuendorf [kön14]

Plusenergiebilanz im Lebenszyklus

In Anlehnung an die Berechnung der Ökobilanz des DGNB-Zertifizierungssystems wird für das Beispielgebäude der FOS/BOS Erding eine primärenergetische Abschätzung zur Lebenszyklusanalyse für einen Zeitraum von 50 Jahren durchgeführt.

Würde man die Bilanz um die graue Energie erweitern, müsste man neben dem Bedarf auch den Energieaufwand für die graue Energie des Gebäudes und der darin noch nicht enthaltenen PV-Anlage berücksichtigen. Auf ein Jahr der angesetzten 50-jährigen Lebensdauer bezogen, ergibt sich für das Gebäude ein zusätzlicher Primärenergieaufwand von 27 kWh/m²a, für die PV-Anlage von 4 kWh/m²a. Um diesen Aufwand auch noch decken zu können, müsste die PV-Stromerzeugung um 50 % erhöht werden (s. Tabelle 45).

Primärenergiebilanz FOS/BOS Erding	Plusenergiegebäude nach Berechnungsmethodik	Plusenergiegebäude bezogen auf Nutzung u. Graue Energie
Betrieb (incl. Nutzerstrom) [kWh/m²a]	68	68
Herstellung, Instandhaltung, Entsorgung Gebäude [kWh/m²a]	27	27
Herstellung PV-Anlage [kWh/m²a]	4	6
PV-Anlage kWp	274	407
Erzeugung (Potsdam) [kWh/m²a]	68	101
Bilanz [kWh/m²a] ohne Berücksichtigung Grauer Energie	0	-33
Bilanz [kWh/m²a] unter Berücksichtigung Grauer Energie	31	0

Tabelle 45: Primärenergiebilanz unter Berücksichtigung von Grauer Energie am Beispiel FOS/BOS Erding (Basisvariante, Erzeugung Standort Potsdam)

Hieran wird deutlich, dass die Einbeziehung von Grauer Energie die Erreichbarkeit des Plusenergiestandard stark erschweren würde.

Die um 50 % höhere Stromproduktion hätte auch Auswirkungen auf den Eigennutzungsanteil und die Wirtschaftlichkeit, die sich verringern würden (vgl. Kapitel 14.4.2 und 12.2).

12.0 Investitionsmehrkosten Plusenergiestandard

12.1 Vorgehensweise

Für die unterschiedlichen Varianten und Versorgungskonzepte zur Einhaltung des Plusenergiestandards (vgl. hierzu Kapitel 7.0 bis 11.0) werden die Investitionsmehrkosten abgeschätzt. Als Vergleichsbasis wird ein Referenzgebäudestandard nach EnEV festgelegt. Auf dieser Basis können die Mehrkosten für die Realisierung von Plusenergieschulen ermittelt werden.

12.1.1 Referenzgebäudestandard

Der als Vergleichsbasis angesetzte Referenzgebäudestandard wird nachfolgend erläutert.

Wärmeerzeugung

Für das Referenzgebäude wird analog Anlage 2 EnEV 2013 Tabelle 1 Zeile 3.1. ein Versorgungskonzept mit Gas-Brennwertkessel angenommen.

EEWärmeG / Dämmstandard

Gemäß EEWärmeG mit letzter Änderung vom 22.12.2011 sind Eigentümer von Neubauten verpflichtet, den Wärme- (und Kälte-) Energiebedarf in einem gewissen Umfang aus erneuerbaren Energien zu decken. Das EEWärmeG wird beispielsweise erfüllt, wenn der Wärme- und Kältebedarf zu mindestens 15 % aus solarer Strahlungsenergie (d.h. Solarthermie) gedeckt wird. Die PV-Anlage einer Plusenergieschule trägt nicht zur Erfüllung des EEWärmeG bei. Durch diese wird lediglich der Primärenergiebedarf abgesenkt. Die Wärmerückgewinnung einer Lüftungsanlage, die Nutzung von Umweltwärme bei Einsatz einer Wärmepumpe und Fernwärme aus Kraftwärmekopplungsanlagen können bei Erfüllung bestimmter Voraussetzungen angerechnet werden. Statt des Einsatzes dieser Maßnahmen kann das EEWärmeG bei öffentlichen Gebäuden, zu denen Schulen großteils zählen, durch eine Unterschreitung des Transmissionswärmetransferkoeffizienten des Referenzgebäudes um mindestens 30 % erfüllt werden.

Das Vergleichsgebäude wird daher so gedämmt, dass sich eine Unterschreitung des Transmissionswärmetransferkoeffizienten des Referenzgebäudes um 30 % ergibt. Diese verbesserte Gebäudehülle wird als Ersatzmaßnahme gewählt, um das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz zu erfüllen. Diese Unterschreitung entspricht dem Dämmstandard V0, der Beispielschulen aus Kapitel 7.1.

RLT

Es wird eine natürliche Belüftung (analog der Variante V4) angesetzt. Hierbei wird der Luftwechsel von innenliegenden Räumen (z.B. innenliegende WCs/Sanitärräume) über eine Abluftanlage erzeugt, bei (Koch-)Küchen über eine Zu- und Abluftanlage mit Kreislaufverbundsystem.

Beleuchtung

Als Referenzstandard bei der Beleuchtung wird für alle Aufenthaltsbereiche eine manuelle Bedienung der Beleuchtung angesetzt, d.h. keine tageslicht- und präsenzabhängige Kunstlichtsteuerung. Für Nebenflächen (Verkehrsflächen, Lager) werden wie bei Neubauten üblich Präsenzmelder angenommen.

PV

Das Referenzgebäude verfügt über keine Photovoltaikanlage.

Alle anderen Randbedingungen werden für das EnEV-Referenzgebäude analog den Randbedingungen der Beispielschulen Kapitel 7.1 und 7.2 angesetzt.

12.1.2 Methodik

Für die Beispielschulen und die untersuchten Varianten werden die Investitionsmehrkosten für das Erreichen des Plusenergiestandards ermittelt. Für Auslegungen wird die standardisierte Berechnung der Beispielschulen verwendet.

Die Mehrkosten werden „netto“, d.h. ohne die gesetzliche Mehrwertsteuer angegeben.

Mehrkosten Wärmeerzeugung

Da einige Kostenparameter für den Wärmeerzeuger von der Heizlast des Gebäudes abhängen, wird diese in einem ersten Schritt für die Varianten ermittelt. Da Heizlastberechnungen für diesen Zweck zu aufwendig wären, wird die Heizlast der Varianten über den vom Erzeuger zu deckenden Nutzenergiebedarf aus den standardisierten Berechnungen und angesetzten 1.500 Volllaststunden abgeschätzt. Die sich ergebenden Heizlasten sind Tabelle 46 zu entnehmen. Da beim Nutzenergiebedarf auch das zentral zu erzeugende Trinkwarmwasser berücksichtigt wird, ergeben sich für FOS/BOS Erding trotz des geringeren spezifischen Heizwärmebedarfs und die Realschule Memmingen, die über keine zentrale TWW-Erzeugung verfügt, ähnliche spezifische Werte für die Heizlast. Beim Referenz-Wärmeerzeuger Gaskessel werden Kosten für Gasbrennwertkessel, Gas-Hausanschluss, Baukostenzuschuss, Gasdruckregelstrecke und Schornstein berücksichtigt.

Beim Versorgungskonzept Wärmepumpe wird sowohl eine Erdsonden- als auch eine Grundwasser-Wärmepumpe untersucht. Durch den besseren COP der Grundwasser-Wärmepumpe aufgrund der höheren Quelltemperatur fällt die PV-Anlage etwas kleiner aus. Kosten werden für eine modulierende Wärmepumpe, Erdwärmesonden bzw. Saug- und Schluckbrunnen sowie die Umwälz- bzw. Brunnenpumpe berücksichtigt. Bei der Entzugsleistung der Sonden sind 50 Watt je Meter Sonde und Kosten von 70 € je Meter Sonde zugrunde gelegt. Wie bei den Investitionskosten für Erdsonden auch, haben die lokalen Gegebenheiten für eine Grundwasser-Wärmepumpe großen Einfluss. Die Kosten wurden mit 32.000 € für einen Saug- und Schluckbrunnen abgeschätzt. Ab einer Heizlast über 200 kW wurde angesetzt, dass eine zweite Brunnenanlage erforderlich ist. Unberücksichtigt bleiben Mehrkosten für die Fußbodenheizung im Vergleich zu den Radiatoren.

Für die Wärmeerzeugung mit Pelletkessel wurden neben dem Kessel ein Pelletlager mit Pelletbeschickungsvorrichtung, ein technischer Speicher und ein Schornstein berücksichtigt. Das Pelletlager wurde auf 2 Wochen Pelletvorrat bei Volllast ausgelegt bei Kosten von 1.500 € je Tonne Pellet-Platzbedarf. Der Speicher ist nach 1. BImSchV für Biomassekessel vorgeschrieben und auf 20 Liter je Kilowatt Leistung auszulegen. Die Kosten werden mit 1000 €/m³ Speicher angesetzt. Bauliche Kosten bleiben unberücksichtigt.

Bei der Fernwärmeversorgung fallen Kosten für den Fernwärmeanschluss, einen Baukostenzuschuss und die Fernwärmeübergabestation an. Die Kosten des Fernwärmeanschluss setzen sich aus einem Grundbetrag und einem längenabhängiger Meterpreis zusammen. Die Fernwärme-Preise wurden auf Basis von Preislisten der Stadtwerke München ermittelt.

Für alle Beispielschulen wird von einer benötigten Rohrleitungslänge für Gas- bzw. Fernwärmeanschluss von 20 m auf privatem Gelände ausgegangen.

Mehrkosten verbesserter Dämmstandard

Für die Variante V1 (Verbesserte Gebäudehülle) werden die Mehrkosten auf Basis der nach Bauteilen aufgesplitteten Flächenermittlung der Gebäude berechnet. Die spezifischen Mehrkosten für den erhöhten Dämmstandard der unterschiedlichen Bauteile werden internen Kostentabellen entnommen.

Mehrkosten RLT

Für die Varianten V0 (Mechanische Be- und Entlüftung), V2 (Verbesserte RLT-Stromeffizienz), V3 (Grundlüftung der Klassenzimmer) werden die Mehrkosten für eine zentrale RLT-Anlage im Vergleich zur natürlichen Belüftung ermittelt. Basis hierfür sind die Volumenströme für die einzelnen Zonen, die mit spezifischen Kosten für die unterschiedlichen Varianten multipliziert werden. Die spezifischen Kosten wurden auf Basis von Auswertungen realisierter Projekte ermittelt. Die unterschiedliche Raumluftqualität je nach Lüftungskonzept wird hierbei nicht bewertet.

Mehrkosten Beleuchtung

Im Vergleich zum Referenzgebäude ergeben sich Mehrkosten für die in allen Zonen angesetzte automatische präsenzabhängige Kunstlichtsteuerung und die in manchen Zonen angesetzte zusätzliche tageslichtabhängige Kunstlichtsteuerung (vgl. Tabelle 12). Es entstehen Mehrinvestitionen für Präsenzmelder, dimmbare Vorschaltgeräte, Helligkeitssensoren und Verkabelung. Die Kosten wurden aus realisierten Projekten übernommen.

Mehrkosten PV

Die Höhe des erforderlichen Jahresertrags an Primärenergie wird gleich dem Primärenergie-Bedarf gesetzt, was die Grenzsituation zum Erreichen des Plusenergiestandards darstellt. Auf dieser Basis wird die erforderliche Stromerzeugung sowie die hierfür bei der standardisierten Berechnung benötigte Leistung der PV-Anlage ermittelt. Die Kosten für die PV-Anlage wird mit 1.640 € je kWp angesetzt. Dies entspricht den derzeit üblichen Kosten für auf einem Flachdach aufgeständerte PV-Module. Falls die PV-Module in Fassade oder Verglasungen integriert werden müssen, da die Dachfläche nicht ausreicht, ist mit höheren Kosten zu rechnen. Die erforderliche zu installierende PV-Leistung ist in Tabelle 46 angegeben.

In nachfolgender Tabelle sind die Randbedingungen der Berechnung der Investitionsmehrkosten für den Plusenergiestandard zusammengestellt.

Standardisierte Berechnung		Dämm- standard	Lüftung	Beleuchtung	Wärme- erzeuger	FOS/BOS Erd. Heizlast [W/m²]	RS Mem. Heizlast [W/m²]	GS Prüfenig Heizlast [W/m²]	FOS/BOS Erd. PV-Anlage [kWp]	RS Mem. PV-Anlage [kWp]	GS Prüfenig PV-Anlage [kWp]
R0	EnEV-Referenz	V0	natürlich / Abluft	manuell/ NF: präsenzabh.	Gaskessel	37	36	47	keine	keine	keine
Versorgungskonzept Wärmepump (Erdsonde)											
V0	Basisvariante	V0	mechanisch	tageslicht- und präsenzabhängig	WP	25	25	35	274	266	204
V1	Verbesserte Gebäudehülle	V1	mechanisch	tageslicht- und präsenzabhängig	WP	22	21	30	265	255	194
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	V0	mechanisch verb.	tageslicht- und präsenzabhängig	WP	25	25	35	257	250	192
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	V0	mechanisch Grundlüftung	tageslicht- und präsenzabhängig	WP	32	32	38	274	267	204
V4	Natürliche Belüftung	V0	natürlich / Abluft	tageslicht- und präsenzabhängig	WP	37	36	47	263	247	190
Versorgungskonzept Wärmepump (Grundwasser)											
V0	Basisvariante	V0	mechanisch	tageslicht- und präsenzabhängig	WP	25	25	35	267	258	196
V1	Verbesserte Gebäudehülle	V1	mechanisch	tageslicht- und präsenzabhängig	WP	22	21	30	258	248	187
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	V0	mechanisch verb.	tageslicht- und präsenzabhängig	WP	25	25	35	250	242	185
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	V0	mechanisch Grundlüftung	tageslicht- und präsenzabhängig	WP	32	32	38	265	256	196
V4	Natürliche Belüftung	V0	natürlich / Abluft	tageslicht- und präsenzabhängig	WP	37	36	47	251	235	180
Versorgungskonzept Pelletkessel											
V0	Basisvariante	V0	mechanisch	tageslicht- und präsenzabhängig	PK	25	25	35	226	225	169
V1	Verbesserte Gebäudehülle	V1	mechanisch	tageslicht- und präsenzabhängig	PK	22	21	30	221	220	164
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	V0	mechanisch verb.	tageslicht- und präsenzabhängig	PK	25	25	35	209	209	157
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	V0	mechanisch Grundlüftung	tageslicht- und präsenzabhängig	PK	32	32	38	213	211	164
V4	Natürliche Belüftung	V0	natürlich / Abluft	tageslicht- und präsenzabhängig	PK	37	36	47	193	173	138
Versorgungskonzept Fernwärme											
V0	Basisvariante	V0	mechanisch	tageslicht- und präsenzabhängig	FW	25	25	35	188	187	125
V1	Verbesserte Gebäudehülle	V1	mechanisch	tageslicht- und präsenzabhängig	FW	22	21	30	188	186	125
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	V0	mechanisch verb.	tageslicht- und präsenzabhängig	FW	25	25	35	171	170	114
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	V0	mechanisch Grundlüftung	tageslicht- und präsenzabhängig	FW	32	32	38	165	162	118
V4	Natürliche Belüftung	V0	natürlich / Abluft	tageslicht- und präsenzabhängig	FW	37	36	47	137	129	85

Tabelle 46: Randbedingungen für die Berechnung der Investitionsmehrkosten

12.2 Ergebnisse

In unten stehenden Tabellen sind die sich ergebenden Investitionsmehrkosten für die Beispielschulen bezogen auf die Nettogrundfläche angegeben.

Projekt: FOS/BOS Erding		Spezifische Investitionsmehrkosten (netto) [€/m²]					
Standardisierte Berechnung		Dämmstandard	Lüftung	Wärmeerzeuger	Beleuchtung	PV-Anlage	Summe
R0	EnEV-Referenz						
Versorgungskonzept Wärmepumpe		(Erdsonde)					
V0	Basisvariante	0	76	35	11	59	181
V1	Verbesserte Gebäudehülle	26	76	31	11	57	202
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	0	83	35	11	55	184
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	0	41	46	11	59	157
V4	Natürliche Belüftung	0	0	53	11	56	120
Versorgungskonzept Wärmepumpe		(Grundwasser)					
V0	Basisvariante	0	76	4	11	57	149
V1	Verbesserte Gebäudehülle	26	76	4	11	55	173
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	0	83	4	11	54	151
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	0	41	9	11	57	118
V4	Natürliche Belüftung	0	0	9	11	54	74
Versorgungskonzept Pelletkessel							
V0	Basisvariante	0	76	3	11	48	139
V1	Verbesserte Gebäudehülle	26	76	2	11	48	164
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	0	83	3	11	45	142
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	0	41	6	11	46	104
V4	Natürliche Belüftung	0	0	8	11	41	61
Versorgungskonzept Fernwärme							
V0	Basisvariante	0	76	-4	11	40	124
V1	Verbesserte Gebäudehülle	26	76	-4	11	40	150
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	0	83	-4	11	37	127
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	0	41	-3	11	35	85
V4	Natürliche Belüftung	0	0	-3	11	29	38

Tabelle 47: Spezifische Investitionsmehrkosten (FOS/BOS Erding)

Realschule Memmingen		Spezifische Investitionsmehrkosten (netto) [€/m²]					
Standardisierte Berechnung		Dämmstandard	Lüftung	Wärmeerzeuger	Beleuchtung	PV-Anlage	Summe
R0	EnEV-Referenz						
Versorgungskonzept Wärmepumpe		(Erdsonde)					
V0	Basisvariante	0	79	34	11	56	179
V1	Verbesserte Gebäudehülle	36	79	30	11	53	208
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	0	83	34	11	52	180
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	0	42	45	11	56	154
V4	Natürliche Belüftung	0	0	51	11	52	114
Versorgungskonzept Wärmepumpe		(Grundwasser)					
V0	Basisvariante	0	79	4	11	54	147
V1	Verbesserte Gebäudehülle	36	79	4	11	52	181
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	0	83	4	11	51	149
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	0	42	9	11	54	115
V4	Natürliche Belüftung	0	0	9	11	49	69
Versorgungskonzept Pelletkessel							
V0	Basisvariante	0	79	3	11	47	140
V1	Verbesserte Gebäudehülle	36	79	2	11	46	173
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	0	83	3	11	44	141
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	0	42	6	11	44	103
V4	Natürliche Belüftung	0	0	8	11	36	55
Versorgungskonzept Fernwärme							
V0	Basisvariante	0	79	-4	11	39	125
V1	Verbesserte Gebäudehülle	36	79	-4	11	39	161
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	0	83	-4	11	36	126
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	0	42	-3	11	34	84
V4	Natürliche Belüftung	0	0	-3	11	27	35

Tabelle 48: Spezifische Investitionsmehrkosten (Realschule Memmingen)

Grundschule Prüfening		Spezifische Investitionsmehrkosten (netto) [€/m²]					
Standardisierte Berechnung		Dämmstandard	Lüftung	Wärmeerzeuger	Beleuchtung	PV-Anlage	Summe
R0	EnEV-Referenz						
Versorgungskonzept Wärmepumpe (Erdsonde)							
V0	Basisvariante	0	50	51	10	64	175
V1	Verbesserte Gebäudehülle	34	50	44	10	61	199
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	0	53	51	10	60	175
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	0	33	68	10	64	174
V4	Natürliche Belüftung	0	0	77	10	60	146
Versorgungskonzept Wärmepumpe (Grundwasser)							
V0	Basisvariante	0	50	6	10	62	127
V1	Verbesserte Gebäudehülle	34	50	6	10	59	159
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	0	53	6	10	58	127
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	0	33	13	10	61	117
V4	Natürliche Belüftung	0	0	13	10	57	80
Versorgungskonzept Pelletkessel							
V0	Basisvariante	0	50	5	10	53	117
V1	Verbesserte Gebäudehülle	34	50	3	10	51	148
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	0	53	5	10	49	117
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	0	33	9	10	52	104
V4	Natürliche Belüftung	0	0	12	10	43	65
Versorgungskonzept Fernwärme							
V0	Basisvariante	0	50	-5	10	39	94
V1	Verbesserte Gebäudehülle	34	50	-6	10	39	128
V2	Verbesserte RLT-Stromeffizienz	0	53	-5	10	36	93
V3	Grundlüftung (Klassenzimmer)	0	33	-4	10	37	75
V4	Natürliche Belüftung	0	0	-4	10	27	33

Tabelle 49: Spezifische Investitionsmehrkosten (Grundschule Prüfening)

Der nochmal verbesserte Dämmstandard führt zu Mehrkosten zwischen 26 und 36 € je Quadratmeter Nettogrundfläche. Die Höhe der Mehrkosten für den verbesserten Dämmstandard steht im Zusammenhang mit dem Fensterflächenanteil, da die spezifischen Kosten für die besseren Fenster höher sind als die für eine dickere Dämmung.

Wie zu erwarten war, zeigt sich, dass eine mechanische Be- und Entlüftung des Schulgebäudes mit rund 50 bis 80 €/m² sehr kostenintensiv ist. Die Kosten für eine verbesserte Stromeffizienz der Ventilatoren würden zu weiteren Mehrkosten von ca. 3 bis 4 €/m² führen. Deutlich günstiger ist eine Be- und Entlüftung des Schulgebäudes bei einer Grundlüftung der Klassenzimmer. Die natürliche Belüftung (V4) führt zu keinen Mehrinvestitionen, da diese Variante der Referenzvariante entspricht.

Bei der Wärmeerzeugung ergeben sich für die Wärmepumpen mit Erdsonden die höchsten Mehrinvestitionen von 30 bis 77 €/m². Durch die höhere spezifische Heizlast bei der Grundschule Prüfening sind hier die Mehrkosten wegen der -spezifisch betrachtet- größten Erdsondenanzahl am höchsten. Versorgungskonzepte mit Grundwasser-Wärmepumpe und Pelletkessel führen zu moderateren Mehrkosten zwischen 2 und 13 €/m². Die Investitionsmehrkosten für einen Fernwärmeanschluss liegen unter denen für eine Versorgung mit Gaskessel und sind daher negativ.

Für die aufwendigere Steuerung der Beleuchtung liegen die Mehrkosten bei 10 bis 11 €/m².

In Abhängigkeit der zu installierenden Leistung schwanken die Mehrkosten für die PV-Anlage zwischen rund 30 bis 60 €/m².

Die sich ergebenden Investitionsmehrkosten sind in nachfolgender Abbildung im Vergleich grafisch dargestellt.

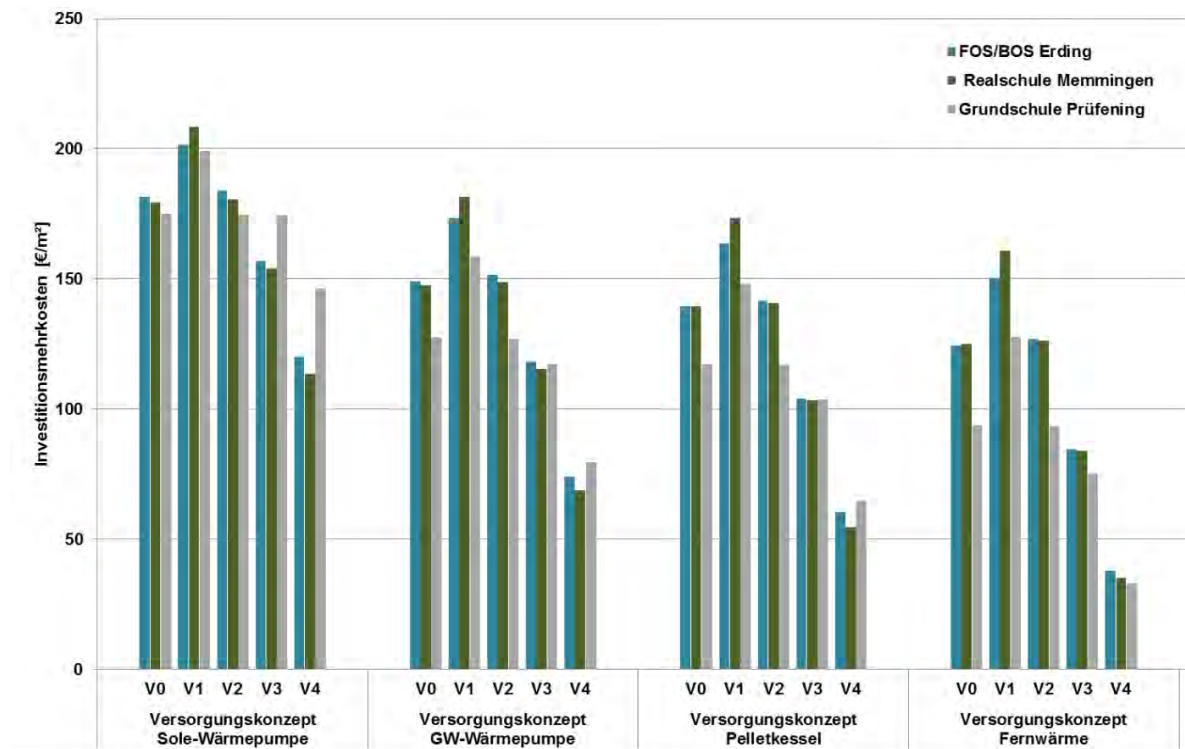


Abbildung 39: Spezifische Investitionsmehrkosten Plusenergiestandard der Beispielschulen

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Varianten mit geringem Primärenergiebedarf (z.B. V4 mit Fernwärme) aufgrund des Wegfalls der Kosten für die RLT-Anlage sowie der kleineren zu installierenden Leistung für die PV-Anlage zu den geringsten Investitionsmehrkosten von 30 bis 38 €/m² führen. Die höchsten Investitionsmehrkosten weisen die Varianten mit verbesserter Dämmung und Sole-Wärmepumpe von bis zu über 200 €/m² auf.

12.3 Fazit

In Bezug auf die Referenzvariante ergeben sich für das Erreichen des Plusenergiestandards Investitionsmehrkosten je nach gewählter Anlagentechnik von 30 bis zu über 200 € je Quadratmeter Nettogrundfläche. RLT-Anlagen zur vollständigen Be- und Entlüftung, ein Wärmeversorgungskonzept mit Erdsonden-Wärmepumpe und ein noch weiter verbesserter Dämmstandard sind am kostenintensivsten.

13.0 Vergleichsanalyse von Bedarf und Verbrauch

13.1 Allgemeines

Die Ermittlung des Energiebedarfs für ein Gebäude erfolgt im Rahmen des EnEV-Nachweises nach der Berechnungsmethodik der DIN V 18599. Das Verfahren arbeitet mit Kennwerten, die unter Umständen von der gebauten Realität abweichen können. Von [osc09] wurden Unterschiede zwischen Bedarf und Verbrauch analysiert. Diese werden nachfolgend kurz zusammengefasst.

- **Nutzereinfluss**
Für die Berechnung des Energiebedarfes wird ein von der Realität abweichendes Nutzerverhalten unterstellt. Dies betrifft beispielsweise die Randbedingungen für Rauminnentemperatur, Luftwechsel, räumliche und zeitliche Beheizung und Warmwasserbedarf.
- **Witterungseinfluss**
Für die Bedarfsberechnung nach EnEV wird ein Referenzklima für Deutschland verwendet, die lokalen klimatischen Verhältnisse bleiben unberücksichtigt.
Den Verbrauchsdaten jedoch liegen die Witterungsverhältnisse konkreter Zeiträume zugrunde. Die sich daraus ergebenden Unterschiede können durch eine Klimakorrektur der Verbrauchswerte beseitigt werden.
- **Bauliche und anlagentechnische Mängel**
Hierzu zählen beispielsweise Baufeuchte, nicht berücksichtigte Wärmebrücken, feuchte Dämmung, ein fehlender hydraulischer Abgleich, anlagentechnische Fehleinstellungen, u.ä..
- **Unterschiedliche Bilanzgrenzen**
Verbrauchswerte für die einzelnen Energieträger erhält man in der Regel für ein gesamtes Objekt. In der Bedarfsberechnung werden aber Verbräuche wie Prozesswärme, Kochgas oder Strom für Computer und Außenbeleuchtung etc. nicht mit bilanziert. Dieser Anteil im Energieverbrauch muss entsprechend bei der Gegenüberstellung von Energiebedarf und Verbrauch berücksichtigt werden.
- **Systematische Abweichungen**
Abweichungen zwischen Energiebedarf und Energieverbrauch können auch systematisch sein, d.h. die Berechnungsvorschriften führen zu systematischen Abweichungen, die bei einer Auswertung von ausreichend großen Stichproben erkennbar werden.

13.1.1 Vorgehensweise beim Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich

Die grundsätzliche Vorgehensweise bei einem Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich ist in der DIN V 18599 Bbl 1:2010-01 „Beiblatt 1: Bedarfs-/Verbrauchsabgleich“ beschrieben. Nachfolgende Tabelle aus der DIN V 18599 Bbl 1 gibt einen Überblick über die Vorgehensweise.

Schritt	Vorgehensweise	Kapitel
1	Erhebung von Verbrauchsdaten Ziel dieses Schrittes ist die Bestimmung der Energiemengen für alle Energieträger in Kilowattstunden innerhalb eines beliebigen Messzeitraums.	3.1 und 3.2
2	Korrektur der Verbrauchsdaten Ergebnis sind — soweit möglich — zeit-, standort- und witterungskorrigierte Verbrauchskennwerte für jeden Energieträger.	3.3 bis 3.5
3	Erstellung einer ersten Bedarfsbilanz nach DIN V 18599 Die Energiebilanz ist die Basis der weiteren Modifikationen. Es kann sich beispielsweise um eine Bilanz für einen öffentlich-rechtlichen Nachweis handeln. Die Eingabedaten dieser ersten Bilanz werden mit Sorgfalt gewählt, jedoch keinem gesonderten Abgleich unterzogen.	
4	Überprüfung der Zonierung und der geometrischen Daten Ziel ist eine sinnvolle Aufteilung des Gebäudes in Zonen entsprechend der vorliegenden Nutzung, Vereinfachungen und Zusammenfassungen, welche im Falle öffentlich-rechtlicher Nachweise (EnEV) möglich wären, sind nur zu verwenden, sofern diese inhaltlich begründet sind. Flächen- und Geometrieangaben sind mit der erforderlichen Sorgfalt zu überprüfen.	4.3 und 4.4
5	Überprüfung der Nutzungsranddaten und Modifikation der Nutzungsprofile Ausgehend von Standardnutzungen sind die Nutzungsrandbedingungen an den realen — zu den Verbrauchsdaten passenden — Fall anzupassen.	4.5
6	Modifikation der Bedarfsbilanz mit Ausweisung der Detailenergiemengen Die angepassten Nutzungs-, Geometrie- und Zonenranddaten werden in die Bilanz übertragen. Anschließend werden Endenergien für die einzelnen Energieträger berechnet. Es erfolgt die Aufteilung der Endenergien und Hilfsenergien auf die Gewerke (Beleuchtung, Heizung, Warmwasserbereitung, Kühlung, Klimatisierung, Lüftung usw.) sowie die einzelnen Prozessbereiche (Nutzenergie, technische Verluste, regenerative Energien). Die Aufteilung der Bilanz nach Energieträger, Gewerk und Prozessbereich gibt die Bearbeitungsreihenfolge bei der Überprüfung der Eingabeparameter vor.	4.1 und 4.2
7	Modifikation der Parameter der einzelnen Gewerke Die empfohlene Bearbeitungsreihenfolge der Gewerke ergibt sich aus der Energiebilanz und der Sensitivität der Eingabedaten. In einem ersten Schritt werden für alle Gewerke die Eingabegrößen mit sehr hohem Bilanzanteil überprüft. Es folgen die nächsten Schritte mit den Eingabegrößen mit hohem Bilanzanteil usw.	4.6 bis 4.13
8	Permanenter Vergleich der Bedarfs- und korrigierten Verbrauchswerte Die berechneten Kennwerte werden während der Modifikation der Eingabedaten permanent mit den korrigierten Verbrauchsdaten verglichen. Eine Übereinstimmung beider Kennwerte deutet für den Fall auf eine realitätsnahe Energiebilanz hin, in dem die berechneten und gemessenen Kennwerte die gleichen Energieanwendungen enthalten.	

Tabelle 50: Beschreibung der Vorgehensweise beim Bedarfs-/Verbrauchsabgleich nach DIN V 18599 Bbl 1:2010

Die ersten beiden Schritte betreffen die Erhebung und die Korrektur von Verbrauchswerten. In den entsprechenden Kapiteln der DIN V 18599 Bbl 1 wird auf die VDI 3807 verwiesen, in der die Ermittlung von Verbrauchskennwerten beschrieben und die Methodik konkretisiert wird.

Die Schritte 3 bis 6 beschreiben die Erstellung der Bedarfsbilanz und die schrittweise Modifikation an das genutzte Gebäude. Diese Modifikation ist nach der Berechnungsmethodik der DIN V 18599 möglich und für das Energiemanagement eines konkreten Gebäudes sinnvoll.

Um Unterschiede herausarbeiten zu können, ist für die vorliegende Untersuchung jedoch ein Vergleich mit der EnEV-konformen Bilanzierung von Interesse. Aus diesem Grund werden bei den Beispielschulen keine Modifikationen der EnEV-Berechnungen durchgeführt.

13.1.2 Analysen zur Bedarfsermittlung von Schulen

Wie oben beschrieben, gibt es für die Berechnung nach EnEV zu verwendende Standard-Randbedingungen für Klima, Nutzungsprofile (Zeiten, Luftmengen) und Warmwasser. Auch ist die Verwendung von Standardwerten, beispielsweise für Beleuchtung und Leitungslängen möglich. Im nachfolgenden Kapitel wird eine kurze Übersicht und Beschreibung einiger bei der Durchsicht der EnEV-Nachweise der Beispielschulen aufgefallenen Unterschiede und Besonderheiten gegeben. Wenn nicht anders angegeben, werden diese bezogen auf die EnEV 2013 bzw. die DIN V 18599:2011 beschrieben.

Lüftung: Mindestaußenluftvolumenstrom

Für die Zone Klassenzimmer scheint der anzusetzende Mindestaußenluftvolumenstrom von 30 m³/h je Person bzw. entsprechend flächenbezogen bei einer mittleren Personenbelegung von 3 m² je Person von 10 m³/m²h sehr hoch. Bei der Literaturrecherche (vgl. Tabelle A-1) wurde eine maximale Auslegung der RLT-Anlage auf 22 m³/h je Person angegeben.

Bei einer vollständigen Deckung des Außenluftvolumenstroms entspricht ein Luftvolumenstrom von 10 m³/m²h einem Luftwechsel von gut 3 1/h (Randbedingungen: Klassenzimmer 75 m², lichte Raumhöhe 3 m). Dieser Ansatz würde bei Umsetzung aufgrund der großen Lüftungskanalquerschnitte zu hohen Kosten führen, Probleme mit Zuglufterscheinungen wären wahrscheinlich.

Damit der Strombedarf für die Lüftung bei abweichender Planung mit geringerem Luftwechsel nicht unrealistisch hoch ist, könnte eine Berechnung als „Teilweise Deckung des Außenluftvolumenstroms“ erfolgen. Der restliche Frischluftbedarf in Bezug auf den Mindestaußenluftvolumenstrom würde dann als Fensterlüftung in die Bedarfsberechnung eingehen.

Trinkwarmwasserbedarf

Generell kann in Schulen der Warmwasserbedarf an Handwaschbecken in den Sanitärbereichen, in Putzräumen, wobei moderne Putzmittel wegen der darin enthaltenen Alkohole normalerweise in kaltes Wasser gegeben werden, und an Spülen von Tee- und Lehrküchen bestehen.

Zusätzlich ist, falls die Schule über eine Mensa verfügt, auch in der Küche ein Warmwasserbedarf vorhanden. Handelt es sich um eine Schule mit integrierter Turnhalle oder Schwimmbad gibt es ferner Warmwasserbedarf für Duschen.

In Pkt. 2.1.2 der EnEV 2013 wird vorgeschrieben, dass als Randbedingungen zur Berechnung des Jahres-Primärenergiebedarfs die in den Tabellen 5 bis 9 der DIN V 18599-10 : 2011-12 aufgeführten Nutzungsrandbedingungen und Klimadaten zu verwenden sind. Demnach ist für den Ansatz des Trinkwarmwasser-Wärmebedarfs Tabelle 7 der DIN V 18599-10 : 2011-12 anzuwenden, in der für 22 unterschiedliche Nutzungen der Nutzenergiebedarf für Trinkwarmwasser nutzungsbezogen und teilweise auch flächenbezogen angegeben ist.

Von den in Tabelle 7 der DIN V 18599-10 aufgeführten Nutzungen können für Schulen die in nachfolgender Tabelle angegebenen Nutzungen mit den entsprechenden Werten relevant sein.

	nutzungsbezogen	flächenbezogen	Bezugsfläche
Schule ohne Duschen	0,4 kWh/d je Person	130 Wh/m ² d	A _{NGF} Klassenräume
Schule mit Duschen	1,5 kWh/d je Person	500 Wh/m ² d	A _{NGF} Klassenräume
Sportanlage mit Dusche	1,8 kWh/d je Person		
Gewerbeküchen, Kantine	0,4 kWh je Menü		

Tabelle 51: Nutzenergiebedarf Trinkwarmwasser nach Tabelle 7 DIN V 18599-10 für schulrelevante Nutzungen

Nach EnEV 2013 Anlage 2 Pkt. 2.1.2 d) ist festgelegt, dass der Primärenergiebedarf für Warmwasser zu bilanzieren ist, wenn der durchschnittliche tägliche Nutzenergiebedarf für Warmwasser wenigstens 0,2 kWh pro Person und Tag beträgt.

Dies bedeutet auch, dass ein geringerer Warmwasserbedarf bei einer Berechnung nach EnEV nicht angesetzt werden darf. Explizit werden in Tabelle 7 DIN V 18599-10 als Beispiel für Gebäude mit einem Nutzenergiebedarf für Warmwasser von weniger als 0,2 kWh pro Person und Tag Schulen mit einzelnen Trinkwarmwasser-Zapfstellen (Handwaschbecken, Teeküche, Getränkeausgabe, Putzraum) erwähnt.

In der DIN V 18599-10 wird nicht erläutert, welchen Schultypen der Nutzenergiebedarf Trinkwarmwasser „Schule ohne Duschen“ bzw. „Schule mit Duschen“ zu zuordnen ist. So kann sich eine Vielzahl von Fragestellungen ergeben. Beispiele hierfür sind:

- Soll der Ersteller eines EnEV-Nachweises vorab immer abschätzen, ob der Nutzenergiebedarf Warmwasser gegebenenfalls unter als 0,2 kWh pro Person und Tag liegt. Wie ist hierbei die Personenzahl anzusetzen? Entspricht dies bei einer Schule der Schüleranzahl?
- Ist das Profil „Schule ohne Duschen“ beispielsweise für eine Schule ohne Turnhalle mit dezentraler WW-Bereitung und Küche zu verwenden? Oder ist in diesem Fall kein TWW-Bedarf für die Schule, aber die Küche nach der Nutzung „Gewerbeküchen, Kantine“ anzusetzen? Wie geht man vor, wenn der für die Küche errechnete TWW-Bedarf unter den 0,2 kWh pro Person und Tag der Schule liegt?
- Kann man bei einer Schule mit Turnhalle das Nutzungsprofil „Schule mit Duschen“ ansetzen und den TWW-Energiebedarf für eine vorhandene Mensa-Küche unbeachtet lassen?

Bei der Beispielschule der FOS/BOS Erding beispielsweise würde der Ansatz über „Schule ohne Duschen“ nach DIN V 18599-10:2011 zu einem Nutzenergiebedarf Trinkwarmwasser von 60.000 kWh/a (nutzungsbezogen über Schüleranzahl) bzw. 78.200 kWh (flächenbezogen) führen.

Wählt man den Ansatz, die dezentrale TWW-Bereitung der Schule nicht anzusetzen und die Küche separat zu bilanzieren, kommt man unter Annahme, dass alle Schüler essen gehen, ebenfalls auf 60.000 kWh/a. Legt man jedoch die Annahme zugrunde, dass nur 1/3 der Schüler essen gehen, so ergeben sich nur 20.000 kWh/a.

Bei Schulen mit integrierten Turnhallen und den in den Sanitärbereichen der Turnhallen befindlichen Duschen, bietet sich ein Ansatz des TWW-Bedarfs nach der Nutzung „Schule mit Duschen“ an. Bei der Verwendung dieses Profils stellt sich jedoch die Frage, warum bei einem flächenbezogenen Ansatz die Nettogrundfläche der Klassenzimmer als Bezug gilt und nicht die Fläche der Turnhalle oder der Sanitärräume mit Duschen.

Je nachdem wie der Nachweis-Ersteller mit den unklaren Vorschriften beim Nutzenergiebedarf Trinkwarmwasser umgeht, kommt es durch Vernachlässigung bzw. den hoch einzuschätzenden Ansatz nach Tabelle 7 der DIN V 18599-10 zu erheblichen Unterschieden beim Energiebedarf für die Warmwasserbereitung.

Durch die unterschiedlichen möglichen TWW-Ansätze beim Energienachweis, entstehen normalerweise bei dezentraler TWW-Bereitung keine Vor- oder Nachteile für die Einhaltung der EnEV.

Auswirkungen hat ein hoher Wert für den Nutzenergiebedarf Trinkwarmwasser jedoch bei zentraler Warmwasserbereitung, da beim Referenzgebäude eine Solaranlage angesetzt wird, bei der Erfüllung des EEWärmeG, sowie auf die Erreichbarkeit des Plusenergiestandards bei EnEV-konformer Berechnung.

Beleuchtung

Interne Erfahrungen bei der Erstellung von Energieausweisen von Schulen führten bei der Beleuchtungsberechnung nach DIN V 18599 – Teil 4 zu der Einschätzung, dass die Standardwerte für die spezifische elektrische Beleuchtungsleistung nach Tabellenverfahren bei der tatsächlichen Fachplanung teilweise schwer zu erreichen sind.

Aus diesem Grund wurde eine Gegenüberstellung der sich für die FOS/BOS Erding ergebenden Beleuchtungsleistung nach Tabellenverfahren und der als ambitioniert einzustufenden Fachplanungswerte erstellt, die in nachfolgender Tabelle dargestellt ist.

Annahmen für die Berechnung der spezifischen elektrischen Bewertungsleistung nach Tabellenverfahren der DIN V 18599-4 und -10 : 2011-12 waren eine direkte Beleuchtung, Kompaktleuchtstofflampen mit externem EVG bei Verkehrs- und Sanitärflächen, ansonsten stabförmige Leuchtstofflampen mit EVG.

	Klassen- zimmer	Fach- räume	Gruppen- räume	Vorbe- reitung	Büro Schulleiter	Sekretariat/ Empfang	Lehrer- zimmer
Fachplanung							
installierte Leistung nach Fachplanung [W/m²]	7,9	10,9	6,7	6,2	8,2	7,6	7,9
Faktor k_{BG}	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Systemleistung für Beleuchtung W/m²	8,7	12,0	7,4	6,8	9,0	8,4	8,7
Wartungswert der Beleuchtungsstärke E_m [lx] nach DIN EN 12464-1:2011-08	300	500	300	500	500	500	300
Tabellenverfahren (EnEV)							
Nutzungsprofil nach DIN V 18599-10	Nr. 8	Nr. 8	Nr. 8	Nr. 17	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 17
spez. el. Bewertungsleistung $p_{j,lx}$ [W/(m² lx)]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Wartungswert der Bewertungsleistung E_m [lx] nach DIN V 18599 -10:2011-12	300	300	300	300	500	500	300
Minderungsfaktor zur Berücksichtigung des Bereichs der Sehaufgabe k_A	0,97	0,97	0,97	0,93	0,84	0,84	0,93
Anpassungsfaktor Lampe für nicht stabförmige Leuchtstofflampen k_L	1	1	1	1	1	1	1
Wartungsfaktor der Beleuchtung nach EnEV	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
Raumindex k	2	2	2	1,25	0,9	1,25	1,25
Anpassungsfaktor Raum k_R	0,6	0,6	0,6	0,69	0,83	0,69	0,69
spez. el. Bewertungsleistung p_j [W/m²]	7,3	7,3	7,3	8,1	14,6	12,2	8,1
prozentuale Überschreitung (+) bzw. Unterschreitung (-) des Wertes nach Tabellenverfahren [%]	16%	39%	0%	-19%	-62%	-46%	7%

	Technik- raum	Stuhl- lager	Archiv	Treppe	Eingang+ Aula	Flur	Sanitär
Fachplanung							
installierte Leistung nach Fachplanung [W/m²]	5,3	3,8	5,8	6,6	3,3	4,4	6,5
Faktor k_{BG}	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Systemleistung für Beleuchtung W/m²	5,8	4,2	6,4	7,3	3,6	4,8	7,2
Wartungswert der Beleuchtungsstärke E_m [lx] nach DIN EN 12464-1:2011-08	100	100	200	150	200	100	200
Tabellenverfahren (EnEV)							
Nutzungsprofil nach DIN V 18599-10	Nr. 20	Nr. 20	Nr. 20	Nr. 19	Nr. 19	Nr. 19	Nr. 16
spez. el. Bewertungsleistung $p_{j,lx}$ [W/(m² lx)]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Wartungswert der Bewertungsleistung E_m [lx] nach DIN V 18599 -10:2011-12	100	100	100	100	100	100	200
Minderungsfaktor zur Berücksichtigung des Bereichs der Sehaufgabe k_A	1	1	1	1	1	1	1
Anpassungsfaktor Lampe für nicht stabförmige Leuchtstofflampen k_L	1	1	1	1,2	1,2	1,2	1,2
Wartungsfaktor der Beleuchtung nach EnEV	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
Raumindex k	1,5	1,5	1,5	0,8	0,8	0,8	0,8
Anpassungsfaktor Raum k_R	0,64	0,64	0,64	0,88	0,88	0,88	0,88
spez. el. Bewertungsleistung p_j [W/m²]	2,7	2,7	2,7	4,4	4,4	4,4	8,9
prozentuale Überschreitung (+) bzw. Unterschreitung (-) des Wertes nach Tabellenverfahren [%]	54%	36%	58%	39%	-22%	8%	-24%

Tabelle 52: Vergleich der Bewertungsleistung und der installierten Leistung für die Beleuchtung FOS/BOS Erding

Bei der FOS/BOS Erding konnten bei der Beleuchtungsplanung der Klassenzimmer, Fachräume sowie Nebenflächen wie Technikräume, Lager, Archiv die Werte des Tabellenverfahrens nicht erreicht werden. Zum Teil überschreiten sie diese sogar deutlich. In den Verwaltungs- und Sanitärbereichen hingegen wurden die Werte des Tabellenverfahrens teilweise stark unterschritten.

In diesem Zusammenhang wären weitere Untersuchungen anzuregen, ob die sich nach Tabellenverfahren ergebenden Beleuchtungsleistungen beispielsweise für Klassenräume zu erreichen sind. Die Praxis von erstellten Nachweisen zeigt jedoch oft, dass sowohl im Vor- als auch im Endabzug die Beleuchtungsleistung nach dem Tabellenverfahren angesetzt wird und somit in der Regel kein Abgleich erfolgt.

Länge der Rohrleitungen

Bei der Eingabe der Leitungslängen des Heizungs- und Trinkwarmwasserrohrnetzes kann mit den Standardwerten nach DIN V 18599-5 bzw. DIN V 18599-8 gerechnet werden, sofern keine detaillierte Rohrnetzplanung vorliegt. Falls Standardwerte angesetzt werden, ist es essentiell, dass die charakteristische Länge des Gebäudes richtig eingegeben wird, da diese als Berechnungsbasis herangezogen wird. Die charakteristische Länge des Gebäudes entspricht nicht der Länge des Gebäudes, sondern muss nach DIN V 18599-1 bestimmt werden.

Da insbesondere die Höhe der Rohrleitungswärmeverluste für die Warmwasser-Zirkulationsleitungen die Bedarfsermittlung wesentlich beeinflussen kann, ist es für eine genaue Bedarfsermittlung wichtig, diese Leitungslängen auf Basis der Rohrnetzplanung zu ermitteln.

Bei Heizungsleitungen sind nur die Leitungen relevant, die in unbeheizten Bereichen verlegt sind.

Leitungen, die innerhalb der thermischen Hülle liegen, spielen für die Rohrleitungswärmeverluste hingegen keine Rolle, da diese indirekt der Raumheizung dienen, was auch bei der Berechnung berücksichtigt wird.

Dichtheitsprüfung

Wurde ein Drucktest (vgl. hierzu DIN V 18599-2 Kap. 6.3.1) durchgeführt, so kann das gemessene Prüfergebnis der Berechnung der Infiltrationsverluste zugrunde gelegt werden. Bei der FOS/BOS Erding mit einem sehr guten Drucktestergebnis von 0,17 l/h wurde dies beim EnEV-Nachweis so umgesetzt. Wäre der nach Anlage 4 der EnEV 2007 geforderte Mindestwert bei raumluftechnischen Anlagen von 1,5 l/h angesetzt worden, wäre der Endenergiebedarf um 19 % höher.

Nutzungsprofile der Zonen

Es ist nach DIN V 18599-10 Tabelle 5 möglich, die Nutzungszeiten der Nutzungsprofile, bei denen es sinnvoll erscheint, an die Hauptnutzung anzupassen. Dies scheint insbesondere für Sanitär-, Neben-, Technik- und Verkehrsflächen, aber gegebenenfalls auch für Küchennutzungen sinnvoll. Je nachdem, ob von dieser Option gebraucht gemacht wird oder nicht, ergeben sich starke Abweichungen im Bedarf. Ein Beispiel hierfür wird bei der Bedarfsberechnung der FOS/BOS Erding in Tabelle 54 gegeben. Nach Anpassung hierfür geeigneter Zonen an die Nutzungszeiten der Hauptnutzung, sank der Endenergiebedarf um 14 %.

Auf Basis des Monitorings durch das ZAE Bayern [ZAE14], bei dem auch die Belegung von über 60 Zimmern in Minutenwerten über Präsenzmelder gemessen wurden, sollen einzelne Nutzungsprofile der DIN V 18599-10 hinsichtlich der tatsächlichen Nutzungszeiten überprüft werden:

- Klassenzimmer
Nutzungsprofil Nr. 8 Klassenzimmer: tägliche Nutzungszeit von 8 bis 15 Uhr (entsprechend 7 Stunden) bei 200 Nutzungstagen. Für diese Nutzungszeit wird noch eine relative Abwesenheit bei Belüftung und Beleuchtung von 25 % berücksichtigt.

Die Auswertung der Belegung der 22 Klassenräume ergibt für einen Schultag eine durchschnittliche Belegung von 6 h. Eine tagesweise Betrachtung am Beispiel des Klassenzimmers 10 am 21.1.2013 (Montag) zeigt eine Belegung von 7.18 bis 13:34, 13:41 bis 15:17 und von 17.09 bis 17.38, einer Belegung von 6,7 h entspricht.

Daraus lässt sich ableiten, dass die im Nutzungsprofil Klassenzimmer zugrunde gelegten Nutzungszeiten mit den Belegungszeiten der FOS/BOS Erding übereinstimmen.

Eine Ausnahme bilden hierbei die Nutzungstage, die in Bayern im Jahr 2013 nur bei 186 Tagen im Gegensatz zu den 200 Tagen der Nutzungsrandbedingungen lagen. Eine Berechnung mit nur 186 Nutzungstagen ergab eine Reduktion des Endenergiebedarfs um 2 bis 4 %. Da die Anzahl der Schultage je nach Bundesland und Schuljahr variiert - eine kurze Recherche ergab für verschiedene Bundesländer und Jahre 184 bis 196 Schultage -, ist der Ansatz mit 200 Schultagen jedoch als sinnvoll einzustufen.

- Verwaltung
Die Auswertung einer Beispielschulwoche (21.1 bis 25.1.2013) ergibt für die Räume Schulleitung und Verwaltung eine durchschnittliche Belegung von 11 h, so dass es sich als richtig

erweist, die Nutzungsprofile Nr.1 bis Nr. 3 mit Büronutzung nicht an die Hauptnutzungszeit der Klassenzimmer anzupassen.

- **Küche**
Nutzungsprofil Nr. 14 Küchen in Nichtwohngebäuden: tägliche Nutzungszeit von 10 bis 23 Uhr bei 300 Nutzungstagen.
Eine Betrachtung der Belegungszeiten war im Fall der Küche nicht möglich, da die Belegung der Küche nicht im Monitoring erfasst wurde. Anstatt den Belegungszeiten wurden die Laufzeiten des Wärmemengenzählers der Küchen-RLT-Anlage in einer kalten Winterwoche (Beispielwoche 21.1 bis 25.1.2013) ausgewertet. Der tägliche Wärmeverbrauch des RLT-Heizregisters für die Küche an Schultagen startet zwischen 6:18 und 7:10 und endet zwischen 14:20 und 15:18. Am Wochenende gab es keinen Wärmeverbrauch des Küchen-RLT-Heizregisters. Geht man davon aus, dass die Wärmeabgabe des RLT-Heizregisters mit der Belegung gleichzusetzen ist, ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den Nutzungszeiten der Hauptnutzung. Somit ist bei der FOS/BOS Erding die Anpassung der Nutzungszeiten der Küche an die Hauptnutzung sinnvoll.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Belegungszeiten gut mit den Nutzungszeiten der DIN V 18599-10 übereinstimmen.

13.1.3 Anmerkungen zur Verbrauchsermittlung von Schulen

Bei Schulen sind für einen Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich die jeweiligen Bilanzgrenzen zu beachten. Die gemessenen Stromverbräuche umfassen in der Regel auch die Verbräuche außerhalb des Gebäudes, wie beispielsweise Strom für Außenanlagen- und Parkplatzbeleuchtung.

Ein Vergleich mit der Bedarfsberechnung ist nur möglich, wenn zusätzlich der Stromverbrauch von Unterversorgungen beispielsweise für die Belüftung und die Hilfsenergien getrennt erfasst wird.

Eine separate Erfassung des Beleuchtungsstroms ist technisch sehr aufwendig, so dass dieser Verbrauch in der Regel zusammen mit dem Nutzer und sonstigem Verbrauch erfasst wird. Für die Höhe des Nutzerstroms liegen zudem keine Erfahrungswerte vor (vgl. Kapitel 4.0), so dass hier eine Einschätzung schwierig ist.

Insbesondere wichtig wäre bei der Verbrauchsmessung eine separate Erfassung von Sonderzonen wie Küche und Sporthallen. Bei Küchen kann der Stromanteil, der als Prozessenergie nicht in der Bedarfsermittlung erfasst wird, immens hoch sein (vgl. Kapitel 13.2.4). Für den Energieverbrauch von Sporthallen spielt die externe Nutzung durch Sportvereine am Nachmittag und Abend durch den Verbrauch von Warmwasser und Strom für Beleuchtung und Belüftung eine entscheidende Rolle.

13.2 Bedarfs-Verbrauchs-Vergleich FOS/BOS Erding

Um die Analysen zum Verbrauchs-Bedarfs-Abgleich verstehen zu können, erfolgt zuerst eine kurze Einführung in die umgesetzte Anlagentechnik der FOS/BOS Erding.

13.2.1 Kurzbeschreibung Anlagentechnik

Heizung

- Wärmeerzeugung über Fernwärme
(Anschluss an Fernwärme-Rücklauf der benachbarten Gastro-Berufsschule, zur Sicherheit auch umschaltbar auf den Fernwärme-Vorlauf)

Trinkwarmwasser

- Dezentral, elektrische Trinkwarmwasser-Bereitung in Küche und Sanitärbereichen
- In der Küche wird ein Speicherladesystem unter Nutzung der Abwärme der Kleinkälteanlage der Küche eingesetzt. Über diese Abwärmenutzung wird das Warmwasser vorgewärmt und der Strombedarf für die Warmwasserbereitung minimiert.

Kühlung

- Kühlung des Serverraums und Kühldecken in den Informatikräumen über Grundwasserförderbrunnen (Grundwassertemperatur im Sommer 10 - 12°C)

RLT

- Be- und Entlüftung des gesamten Gebäudes
- RLT-Anlage mit 80 % Wärmerückgewinnung (Küche 69 %)
Auslegung auf 20 m³/h pro Schüler, 15.000 m³/h
- Einbringung über Quellaftprinzip, Steuerung über CO₂-Sensoren, kurzes Abluftrohrnetz durch Überströmung und Absaugung im Atrium, mechanisch unterstützte Nachtlüftung durch separate Dach-Ventilatoren

Beleuchtung

- Die installierte Beleuchtungsleistung ist in Tabelle 52 angegeben.
- Kunstlicht in Klassenzimmern: drei Lichtbänder werden tageslicht- und präsenzabhängig mit Dimmung gesteuert.

13.2.2 Bedarfsberechnung

In nachfolgender Tabelle ist der spezifische Endenergiebedarf aus dem EnEV-Nachweis der FOS/BOS Erding aufgeführt.

Endenergie	Fernwärme kWh/m²a	Strom kWh/m²a
Heizung	31,3	0,3
Trinkwarmwasser	0	2,5
Beleuchtung	0	5,1
Belüftung	0	10,8
Kühlung	0	0,9
Gesamt	31,3	19,6

Tabelle 53: Endenergiebedarf nach EnEV 2007-Nachweis der FOS/BOS Erding

Da eine ausführliche Dokumentation der Eingabedaten zur Verfügung stand, wurden diese überprüft. Die Eingaben und Berechnungen sind nachvollziehbar. Nachfolgend sind einige Anmerkungen zusammengestellt:

- Bei der EnEV-Berechnung in Verbindung mit der DIN V 18599 : 2007 war die Eingabe einer Kühlung mit Grundwasser nicht möglich. Dies wäre bei der Berechnung nach EnEV 2013 in Verbindung mit der DIN V 18599 von 2011 möglich. Die Grundwasserkühlung wurde als Kompressionskälte eingegeben.
- Die Abwärmenutzung der Kleinkälteanlage bei der Warmwasserbereitung in der Küche kann nach DIN V 18599 nicht abgebildet werden und ist daher nicht berücksichtigt.
- Die charakteristische Länge und Breite des Gebäudes wurden nicht nach den Vorgaben der DIN V 18599 – Teil 1 berechnet. Dies hat Auswirkungen auf die Berechnung der Standard-Leitungslängen und damit auf die Wärmeverluste.
- Der Wärmerückgewinnungsgrad der RLT-Anlage beträgt mit Ausnahme der Küche tatsächlich 80 %. Nach DIN V 18599 ist nur eine Berechnung mit maximalem Wärmerückgewinnungsgrad von 75 % möglich (s. DIN V 18599-3:2011-12 Tabelle 4 bzw. Kapitel 7.4)
- Es wurden die geplanten RLT-Anlagen-Volumenströme eingegeben, die nach der Planung zur vollständigen Deckung des Frischluftbedarfs ausreichen sollten. Gleichzeitig wurde daher die Lüftungsanlage als zur vollständigen Deckung der Belüftung eingegeben. Es ist davon auszugehen, dass das Berechnungsprogramm, sobald der eingegebene Volumenstrom unter dem Mindestaußenluftvolumenstrom des jeweiligen Nutzungsprofils liegt, die eingegebenen Volumenstrom-Werte nicht in die Berechnung einbezieht.
- Bei der Verkehrsfläche, die als Überstromzone konzipiert ist, wurde der Zu- und Abluftvolumenstrom der Klassenzimmer versehentlich ein zweites Mal eingegeben. Dieser wird berücksichtigt, da er weit über dem Mindestaußenluftvolumenstrom Nutzungsprofils liegt.

- Von der Möglichkeit der Anpassung von Nutzungszeiten an die Hauptnutzung wurde nicht Gebrauch gemacht.
- Die Möglichkeit der Zusammenfassung der Zonen Verkehrsflächen und Lager, Technik, Archiv zu Nebenflächen wurde nicht angewendet.

Für die Richtigkeit des EnEV-Nachweises sind diese Unterschiede nicht relevant und haben keine Bedeutung für die im Energieausweis ausgewiesene Unterschreitung im Vergleich zum Referenzgebäude. Relevant sind diese aber für den absoluten Endenergiebedarf. Diese sind jedoch relevant, falls die Endenergieberechnung der EnEV-Berechnung für Bedarfsabschätzung zugrunde gelegt wird.

Für die FOS/BOS Erding wurden die Eingabedaten erneut in ein EnEV-Berechnungsprogramm eingegeben und die Auswirkungen von verschiedenen Änderungen untersucht. Nachfolgende Tabelle gibt in den Zeilen nachfolgende Berechnungen an:

- **Nachweis**
entspricht dem spezifischen Endenergiebedarf aus dem EnEV-Nachweis.
- **Eingabe analog Nachweis**
gibt den Endenergiebedarf nach erneuter Eingabe analog den Eingaben des EnEV-Nachweises im Rahmen dieser Studie an.
- **Eingabe mit Anpassungen**
hier werden folgende Korrekturen bei der Eingabe der Lüftungsvolumenströme vorgenommen: Eingabe der RLT-Anlage als zur teilweisen Belüftung, keine Volumenstromeingabe bei den Verkehrsflächen.
- **Eingabe ang. Nutzungszeiten**
ausgehend von der „Eingabe mit Anpassungen“ werden zusätzlich die Nutzungszeiten an die Hauptnutzungszeiten für die zulässigen Zonen nach DIN V 18599-10:2007 angepasst.

Bei der Eingabe wurde, weil die Grundwasserkühlung nicht abgebildet werden kann, keine Kühlung eingeben. Aus diesem Grund wurde der im EnEV-Nachweis errechnete Bedarf übernommen und mit grauer Schrift gekennzeichnet, jedoch bei der Summenbildung berücksichtigt.

Endenergie	Heizung [kWh/m²a]	Warmwasser [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Kühlung [kWh/m²a]	Gesamt [kWh/m²a]
<i>Nachweis</i>	31,6	2,5	5,1	10,8	0,9	50,9
<i>Eingabe analog Nachweis</i>	34,6	2,5	5,2	10,8	0,9	54,0
<i>Eingabe mit Anpassungen</i>	41,6	2,5	5,2	5,5	0,9	55,7
<i>Eingabe ang. Nutzungszeiten</i>	38,7	2,5	3,5	3,5	0,9	49,0

Tabelle 54: Variantenrechnungen Endenergiebedarf nach EnEV der FOS/BOS Erding

Die Ursache für den Unterschied zwischen dem Nachweis und der erneuten Berechnung „Eingabe analog Nachweis“ konnte nicht geklärt werden. Berechnungsfehler in den Programmen oder Ähnliches könnten die Ursache sein.

13.2.3 Verbrauchsdaten (Monitoring)

Die Verbrauchsdaten wurden dankenswerter Weise vom Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern) mit Erlaubnis des Landkreises Erding und der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) zur Verfügung gestellt. Das ZAE Bayern war von der DBU mit einer zweijährigen Monitoring und Optimierungsphase nach Inbetriebnahme der FOS/BOS Erding beauftragt [zae14].

Eine manuelle Zählerauslesung erfolgte am 13.06.2013 und 13.06.2014, so dass durch Differenzbildung die Jahresverbräuche ermittelt werden können.

Endenergie	Fernwärme kWh/m²a	Strom kWh/m²a
Heizung	9,0	0,2
Trinkwarmwasser (Küche)		0,1
Beleuchtung		nicht sep. erfasst
Belüftung		3,4
Kühlung		0,4
Beleuchtung/Sonstiges/Nutzerstrom		19,2
Gesamt	9,0	23,3

Tabelle 55: Auswertung der Monitoringdaten der FOS/BOS Erding (Zeitraum 13.6.2013 bis 13.6.2014)

Im Stromverbrauch für die Belüftung sind die Stromverbräuche für alle RLT-Anlagen sowie der Stromverbrauch für die Dachventilatoren erfasst.

Der Jahresstromverbrauch „Beleuchtung/Sonstiges/Nutzerstrom“ enthält alle übrigen Stromverbräuche auf dem Gelände der FOS/BOS Erding, also neben dem Nutzer- und Beleuchtungsstrom auch den Energieverbrauch auf dem Außengelände.

13.2.4 Vergleich

Für die Witterungsbereinigung verweist die DIN V 18599 Bbl 1 „Bedarfs-/Verbrauchsabgleich“ auf die VDI 3807, welche unter Punkt 5.3 die Vorgehensweise zur Bereinigung der Verbrauchswerte beschreibt. In diesem Zusammenhang sollen einige Hinweise gegeben werden:

- Der bereinigte Heizenergieverbrauch ergibt sich aus dem Produkt aus Außentemperaturabhängigen Heizenergie und dem Verhältnis der Gradtage des langjährigen Mittels und den Gradtagen. Die Gradtagszahlen wurden [iwu14], [dwd14] entnommen.
- Zwischen 25.4 und 11.10 2013 war die Heizwärmeabnahme nahezu null. Daraus kann abgeleitet werden, dass der gesamte Fernwärmeverbrauch zur außentemperaturabhängigen Heizenergie zuzuordnen ist. Entsprechend dem Anlagenkonzept ist tatsächlich kein außentemperaturabhängiger Anteil (z.B. zur TWW-Bereitung) vorhanden.
- Für die Witterungsbereinigung der Kühlung nach DIN V 18599 Bbl. 1 ist generell zu berücksichtigen, dass die Zahl der Kühlgrad- bzw. Kühlenthalpiestunden einer größeren regionalen und jährlichen Streuung unterliegt als die Zahl der Heizgradstunden. Für den Energieverbrauch zur Gebäudekühlung erfolgt aber in der Regel keine Witterungsbereinigung. Aus diesem Grund wird auch hier auf die aufwendige Witterungsbereinigung des Kühlenergieverbrauchs verzichtet.

Nachfolgende Tabelle zeigt eine Gegenüberstellung der Bedarfs- und Verbrauchswerte aufgeteilt nach Fernwärme und Strom. Als Bedarfswerte werden die in Tabelle 54 angegebenen Werte mit angepassten Nutzungszeiten verwendet.

Fernwärme (Endenergie)	Heizung Fernwärme [kWh/m²a]
Bedarfsberechnung (EnEV konform)	38,4
witterungsbereinigter Heizwärmeverbrauch 2013/2014	9,6

Strom (Endenergie)	Heizung Hilfsstrom [kWh/m²a]	Warmwasser [kWh/m²a]	Kühlung [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	Beleuchtung, Sonstiges, Nutzerstrom [kWh/m²a]
Bedarfsberechnung (EnEV konform)	0,3	2,5	0,9	3,5	3,5	
gemessener Jahresverbrauch 2013/2014 (incl. Nutzerstrom)	0,2	0,1	0,4	3,4		19,2

Tabelle 56: Vergleich von Bedarfsberechnung und Verbrauchswerten der FOS/BOS Erding

Die Unterschiede sollen nachfolgend, soweit möglich, untersucht werden.

Heizwärme

- Der witterungsbereinigte, gemessene Fernwärmeverbrauch liegt mit $9,6 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ deutlich unter dem Fernwärmebedarf von $38 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Wie in Kapitel 13.1.2 beschrieben, ist der anzusetzende Mindest-Auslegungsvolumenstrom der Klassenzimmer und damit die Lüftungswärmeverluste im Vergleich zur Auslegung der RLT-Anlage (bei vollständiger Belüftung) zu hoch. Bei einer Vergleichs-Bedarfsberechnung mit freien Randbedingungen wurde mit den tatsächlichen Volumenströmen gerechnet. Auf diese Weise erhält man einen Endenergiebedarf für die Fernwärme von $27 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Auch dieser Wert liegt noch deutlich über dem gemessenen Verbrauch. Ein weiterer Grund des zu hohen Bedarfs ist die zu gering angesetzte Wärmerückgewinnung der RLT-Anlagen sein (75 % anstatt 80 %), da nach DIN V 18599 mit maximal 75 % angesetzt werden kann. Eine Abschätzung ergab, dass die hierdurch entstehende Abweichung maximal $2 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ beträgt.
- Der Hilfsstromverbrauch für die Heizung liegt ein Drittel unter dem Bedarf.

Trinkwarmwasser

- Der Energieverbrauch für die Warmwasserbereitung in der Küche liegt bei nur 4 % des Energiebedarfs nach EnEV-Nachweis. Die starke Abweichung ist auch darauf zurückzuführen, dass die Nutzung der Abwärme der Kleinkälteanlage beim Nachweis nicht berücksichtigt werden können.
- Der Energiebedarf für die dezentrale, elektrische Trinkwarmwasser-Bereitung in den Sanitärbereichen wurde bei der Bedarfsberechnung nicht angesetzt und beim Monitoring nicht separat erfasst.

Kühlung

- Auch bei der Kühlung liegt der Verbrauch bei nur 42 % des ermittelten Bedarfs. Dies steht im Zusammenhang mit der bei der Bedarfsermittlung angesetzten Kompressionskälte. Tatsächlich erfolgt die Kühlung über Grundwasser neben der Zuluftkühlung nur für den Serverraum und Kühldecken in den Informatikräumen. Der Verbrauch entspricht der Stromaufnahme der Grundwasserpumpe sowie kleineren Verbrauchern für die Verteilung (Pumpen, MSR) für die direkte Kühlung.

RLT

- Der Strombedarf der angepassten Berechnung stimmt nahezu mit dem Verbrauch überein (Abweichung kleiner 1 %). Dies wird durch die Berechnung mit der tatsächlichen Auslegung bei nur teilweiser Deckung Mindest-Auslegungsvolumenstroms der Klassenzimmer ermöglicht. Die Auslegung der RLT-Anlagen (ohne RLT innenliegende Räume, Küche, Event) auf $20 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Schüler für die gesamte Schule ($15.000 \text{ m}^3/\text{h}$) ist deutlich geringer als die für die Bedarfsermittlung angesetzten Mindest-Auslegungsvolumenströme (z.B. für die Zone Klassenzimmer von $30 \text{ m}^3/\text{h}$), mit welchen gerechnet werden muss.
- Im Laufe des Monitorings [zae13] hat sich herausgestellt, dass die Auslegung zu knapp bemessen war. Die für die Auslegung angesetzte Schülerzahl war zu gering (projektiert 750 Schüler im Vergleich zu 922 Schüler im Schuljahr 2013/14). Auch sollte für die Bestimmung der erforderlichen Luftmengen, das Lehrpersonal mit berücksichtigt werden (ca. 70 Personen). Im September 2012 wurden die RLT-Anlagen auf eine Förderleistung von $22.500 \text{ m}^3/\text{h}$ umgebaut. Bei der Bedarfsermittlung nach EnEV ergibt sich ein für die Schule ohne Zone Küche ein Mindest-Auslegungsvolumenstrom von $40.000 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Für die Berechnung der Stromeffizienz der RLT-Anlagen wurden bei der EnEV-Berechnung die von dem TGA-Planer ermittelten Druckverluste eingegeben. Dies deutet darauf hin, dass die Stromaufnahme der Ventilatoren bei der Bedarfsberechnung realistisch abgebildet wird.

Beleuchtung, Nutzerstrom, Sonstiges

- Beim Monitoring wurde nicht der Stromverbrauch für die Beleuchtung des Gebäudes erfasst. Die Verbräuche für Beleuchtung, Nutzerstrom und Sonstiges sind daher zusammengefasst. Unter Sonstigem sind Verbräuche für die Anlagentechnik zu verstehen, die nicht bei der Bedarfsermittlung berücksichtigt wurden, beispielsweise Strom für die Warmwasserbereitung an dezentral elektrischen Zapfstellen und Beleuchtungsstrom für die Außenbeleuchtung.
- Beachtet man diese Hinweise sowie die Unsicherheiten bei der EnEV-Bedarfsberechnung für die Beleuchtung, so lässt sich durch Differenzbildung aus der Verbrauchsmessung für Beleuchtung, Nutzerstrom, Sonstiges und dem Beleuchtungsstrombedarf des EnEV-

Nachweises eine Einschätzung für den Stromverbrauch der Nutzer und für Sonstiges ermitteln. Dieser läge bei 15,7 kWh/m²a und demnach deutlich höher als die abgeschätzten 8 kWh/m²a für den Nutzerstrom.

- Der Nutzerstrom für die Küche betrug im Jahr 2013 30.773 kWh, auf Nettogrundfläche der Schule bezogen, sind dies 4 kWh/m². Rechnet man diesen wiederum aus der Verbrauchsmessung für Beleuchtung, Nutzerstrom, Sonstiges heraus, so ergäben sich 11,7 kWh/m²a für den Nutzerstrom.

13.3 Bedarfs-Verbrauchs-Vergleich RS Memmingen

Zuerst wird als Basis für den Abgleich eine kurze Einführung in die beim Gebäude der Realschule Memmingen umgesetzte Anlagentechnik gegeben.

13.3.1 Kurzbeschreibung Anlagentechnik

Die nachfolgende Beschreibung der Anlagentechnik basiert auf [lys10].

Heizung

- Die Wärmeversorgung des Schulgebäudes erfolgt bivalent mit 4 Gasabsorptions- Grundwasserwärmepumpen und einem Gasbrennwertkessel und zwei Wärmespeichern. Das Grundwasser wird aus einem Saugbrunnen entnommen und nach dem Wärmeentzug dem Schluckbrunnen wieder zugeführt. Die Gasabsorptionswärmepumpen sind mit einem Abgaswärmetauscher zur Brennwertnutzung ausgestattet. Die Abdeckung der Lastspitzen erfolgt über einen Gas-Brennwertkessel.

Trinkwarmwasser

- Zur Versorgung der Verteilküche, der Lehrküche und der angrenzenden Sanitärbereiche ist ein zentraler Warmwasserbereiter mit einem innenliegenden Wärmetauscher und einem Inhalt von 200 Litern installiert worden, der durch den Gas-Brennwertkessel beheizt wird. Die Warmwasserversorgung in den Putzräumen erfolgt durch dezentrale Übertischspeicher.

Kühlung

- Für den Serverraum wurde ein Kaltwassernetz mit einer Kälteversorgung aus dem Grundwasser vorgesehen.

RLT

- Die Lüftungszentrale mit insgesamt zwei RLT-Anlagen zur mechanische Be- und Entlüftung des Schulgebäudes befindet sich wie die Heizzentrale im Untergeschoss. Die Außenluft für die Belüftung des Gebäudes wird über einen Erdreichwärmetauscher angesaugt und somit vorkonditioniert. Über Warmwasser-Lufterhitzer, versorgt aus dem Pufferspeicher, erfolgt die bedarfsgerechte Zulufttemperierung. Spezialräume, wie Chemiarbeitsräume, die Lehrküche und der Werkraum, verfügen über eine Abluftanlage, die nach Bedarf über einen Volumenstromregler ausgeschaltet werden kann. Die erforderliche Zuluft für die Spezialräume strömt über die Raumluftauslässe nach. Die innenliegenden WC-Räume werden über einen Dachabluftventilator entlüftet.

Beleuchtung

- Das verwendete EIB-System (Europäischer Installationsbus), ermöglicht unter anderem einen bedarfsgerechten Einsatz der künstlichen Beleuchtung. Solange Bewegungen im Raum erkannt werden, bleibt die Beleuchtung eingeschaltet, wenn das Tageslicht nicht ausreicht. Wird der Raum verlassen, so schaltet die Beleuchtung nach Ablauf der eingestellten Nachlaufzeit automatisch ab. Auch beim Überschreiten einer programmierten Helligkeitsgrenze wird die Beleuchtung abgeschaltet. Die Funktion der Konstantlichtregelung regelt die Intensität des Kunstlichtes in Abhängigkeit vom Tageslichtanteil in einem Raum und hält die Helligkeit konstant.
- Klassenräume, Lehrzimmer und Sekretariat sind mit Leuchtstofflampen mit elektronischem Vorschaltgerät ausgestattet. In den Sanitärräumen sind runde Kompaktleuchtstofflampen mit elektronischen Vorschaltgeräten als Downlights in der Decke eingebaut. Der Eingangsbe-

reich des Gebäudes, die Flure und alle Nebenräume verfügen über stabförmige Leuchtstofflampen.

13.3.2 Bedarfsberechnung

In nachfolgender Tabelle ist der spezifische Endenergiebedarf der Realschule Memmingen angegeben [lys10]. Aufgrund dessen, dass zum Berechnungszeitpunkt eine Gasabsorptionswärmepumpe in der Berechnung nach DIN 18599 nicht abgebildet werden konnte, wurde diese über andere Anlagentechnik mit benutzerdefinierten Angaben modelliert. Aus diesem Grund sind der in nachfolgender Tabelle angegebene Bedarf und das Aufsplitten des Endenergiebedarfs für die Heizung auf Gas und Strombedarf nur unter Beachtung dieses Hinweises zu verwenden.

Bei der Bedarfsermittlung wurde der Trinkwarmwasserbedarf vernachlässigt.

Endenergie	Gesamt kWh/m²a	Strom kWh/m²a	Gas kWh/m²a
Heizung	49,5	0,2	49,3
Trinkwarmwasser	0,0	0,0	0,0
Beleuchtung	4,3	4,3	
Belüftung	2,8	2,8	
Kühlung	0,0	0,0	
Gesamt	56,6	7,3	49,3

Tabelle 57: Endenergiebedarf der Realschule Memmingen nach [lys10].

13.3.3 Verbrauchsdaten

In Tabelle 58 sind die zur Verfügung gestellten Verbrauchswerte der Realschule Memmingen aufgeführt [lys14]. Der Gasanteil für die Trinkwarmwasserbereitung, der bei der Bedarfsermittlung vernachlässigt ist, wurde nicht getrennt erfasst und ist hier im Gasverbrauch enthalten.

Zusätzlich wurde der Gasverbrauch witterungsbereinigt. Da der Gasanteil für die Trinkwarmwasserbereitung nicht herausgerechnet werden kann und anzunehmen ist, dass der Gasverbrauch hauptsächlich der Heizung zuzuordnen ist, wurde der Gasverbrauch komplett witterungsbereinigt. Auf einen möglicherweise hierbei entstehenden Fehler sei hingewiesen.

Verbrauchswerte	Strom kWh/m²a	Gas kWh/m²a	Gas -witterungsbereinigt- kWh/m²a
2010	18,1	25,6	22,6
2011	17,7	17,7	18,4
2012	19,0	20,8	20,9

Tabelle 58: Verbrauchswerte der Realschule Memmingen für die Jahre 2010 bis 2012.

13.3.4 Vergleich

Da die Verbräuche nur als Gesamtwerte für Strom und Gas vorliegen, kann der Vergleich zwischen Bedarf und Verbrauch, wie in nachfolgender Tabelle angegeben, nur auf dieser Basis erfolgen.

Gasbezug (Endenergie)	Gas-WP, -Kessel [kWh/m²a]
Bedarfsberechnung	49,3
gemittelter, witterungsbereinigter Gasverbrauch 2010-2012	20,6

Strom (Endenergie)	Heizung Hilfsstrom [kWh/m²a]	Warmwasser [kWh/m²a]	Kühlung [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	Stromver- brauch [kWh/m²a]
Bedarfsberechnung	0,2	0,0	0,0	2,8	4,3	
gemittelter Jahresverbrauch 2010-2012 (incl. Nutzerstrom)						18,3

Tabelle 59: Vergleich von Bedarfsberechnung und Verbrauchswerten der Realschule Memmingen

Bildet man einen Mittelwert über die witterungsbereinigten Gasverbräuche der Jahre 2010 bis 2012, so ergibt sich ein Gasverbrauch von 20,6 kWh/m²a. Dies ist nur 42 % des für die Schule ermittelten Gasbedarfs von 49,3 kWh/m²a.

Legt man die Annahme zugrunde, dass der Strombedarf für Heizung, Lüftung und Beleuchtung in der richtigen Größenordnung liegt, so ergeben sich für den Nutzerstrom und sonstigen nicht beim Bedarf angesetzten Stromverbrauch (z.B. Warmwasserbereitung, Serverkühlung) 11 kWh/m²a.

13.4 Bedarfs-Verbrauchs-Vergleich GS Prüfening

Um die nachfolgenden Analysen besser verstehen zu können, erfolgt zunächst eine kurze Erläuterung der Anlagentechnik der Grundschule Prüfening.

13.4.1 Kurzbeschreibung Anlagentechnik

Heizung

- Das Gebäude wird in der Grundlast über zwei elektrisch betriebene Grundwasserwärmepumpen versorgt.
- Zur Nachheizung dient ein Gasbrennwertkessel.
- Die Übergabe erfolgt über Fußbodenheizung.

Trinkwarmwasser

- Zentrale Versorgung erfolgt über einen Gasbrennwertkessel mit Warmwasserspeicher und Zirkulation

Kühlung

- In den Nebenflächen, Büros, sonstigen Aufenthaltsräumen und der Bibliothek kann das vorhandene Grundwasser in den Sommermonaten zu einer Temperierung des Gebäudes genutzt werden. Die Flächen der Fußbodenheizung werden bei Bedarf über das Grundwasser gekühlt. Für den Kühlbetrieb ist lediglich der Betriebsstrom der Förderpumpen notwendig.
- Für die übrigen Zonen Sporthallen, Sanitärräumen, der Konditionsraum und die Flure und Nebenflächen im Untergeschoss ist keine Kühlung vorgesehen.
- Zusätzlich wird ein Splitgerät zur Kühlung des EDV-Raums eingesetzt.

RLT

- Turnhallen und Sanitärräume UG: Da die Turnhallen an drei Seiten eingebaut sind, ist eine natürliche Querlüftung nicht möglich. Deshalb wird die Zuluft in der Turnhalle eingeblasen und so eine Grundlüftung der Turnhalle mit ca. 0,7-fachem Luftwechsel erzielt. Die WCs im UG werden zusätzlich direkt zu- und entlüftet. Die Zu- und Abluftanlage verfügt über eine Heizfunktion und eine Wärmerückgewinnung von 64 %. Die Ventilatorleistung für den Zuluftventilator beträgt 1,1 kW, für den Abluftventilator 0,82 kW.
- Die sich in den Turnhallen zusätzlich befindenden Abluftanlagen werden nur während Veranstaltungen oder zur Nachtauskühlung manuell eingeschaltet.

- Einige der innen liegenden Räume der Nebenflächen im UG werden mechanisch belüftet. Aufgrund der weiten Entfernungen wurde hier keine Wärmerückgewinnung vorgesehen.
- Sanitärräume im EG und OG, Nebenflächen und Bibliothek werden über eine Zu- und Abluftanlage mit einer Wärmerückgewinnung von 69% versorgt.

Beleuchtung

- Die Beleuchtung erfolgt direkt über stabförmige Leuchtstofflampen mit elektronischen Vorschaltgeräten (EVG). Ausnahme bilden hierbei Nebenflächen und Sanitärräume, welche bei Bedarf über kompakte Leuchtstofflampen mit elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) beleuchtet werden.
- Die Steuerung der Leuchtstofflampen in den Turnhallen, Nebenflächen und Klassenzimmer erfolgt tageslichtabhängig. Die tageslichtabhängige Steuerung der übrigen Zonen erfolgt manuell.
- Die Sanitärräume verfügen über Präsenzmelder.

13.4.2 Bedarfsberechnung

Nachfolgend werden wichtige Aspekte der Bedarfsberechnung für den EnEV-Nachweis zusammengestellt:

- Bei der Zonierung wurden Technik und Verkehrsflächen zu Nebenflächen zusammengefasst, was nach DIN V 18599-10 erlaubt ist.
- Der Warmwasserbedarf wurde für den EnEV-Nachweis in Abstimmung mit dem Nutzer mit 6.100 kWh/a angesetzt. Die Verteilungsverluste der Zirkulation wurden für die Sanitärbereiche bei den Turnhallen ermittelt.
- Das Splitgerät im EDV Raum (EG 36) wurde bei der Berechnung vernachlässigt.
- RLT: Anlagen, die nur zeitweise manuell in Betrieb genommen werden, sind in der EnEV-Berechnung nicht berücksichtigt.
- Die direkte Kühlung über Grundwasser ist in der DIN V 18599 von 2007 nicht enthalten. Daher wurden die Daten gemäß EnEV 2009, Anlage 2, Kapitel 2.1.5 so eingegeben, dass sich der zu erwartende Energiebedarf für die Kühlung korrekt errechnet.

In nachfolgender Tabelle ist der spezifische Endenergiebedarf aus dem EnEV-Nachweis der Grundschule Prüfening aufgeführt.

	Strom kWh/m²a	Gas kWh/m²a
Heizung	21,0	
Trinkwarmwasser		1,9
Beleuchtung	5,8	
Belüftung	2,2	
Kühlung	0,5	
Gesamt	31,4	

Tabelle 60: Endenergiebedarf nach EnEV 2009-Nachweis der Grundschule Prüfening

13.4.3 Verbrauchsdaten

Von der Energieagentur Regensburg wird ein Monitoring durchgeführt. Die Monatsberichte des Monitorings wurden uns dankenswerter Weise für den Zeitraum November 2013 bis Oktober 2014 von der Stadt Regensburg zur Verfügung gestellt [ear14]. Bei den Verbrauchsdaten ist zu beachten, dass die Werte aus der Monitoringphase stammen, in der noch Optimierungspotenziale analysiert und Optimierungen durchgeführt werden.

Endenergie	Gas kWh/m²a	Strom kWh/m²a
Heizung (2 WP, Spitzenlast-Gaskessel)	1,4	6,2
Heizung (Hilfsstrom)		0,8
Trinkwarmwasser (Sanitär Turnhallen)	9,2	k. A.
Beleuchtung		nicht sep. erfasst
Belüftung		2,1
Kühlung		0,3
Beleuchtung/Sonstiges/Nutzerstrom		11,2
Gesamt	10,6	20,4

Tabelle 61: Auswertung der Monitoringdaten der Grundschule Prüfenig im Zeitraum November 2013 bis Oktober 2014

Beim Trinkwarmwasserverbrauch konnte über das Monitoring festgestellt werden, dass über 90 % des Energieverbrauchs Erzeuger-, Speicher- und vor allem Zirkulationsverluste sind. Bei dem Gebäude werden alle Warmwasserzapfstellen (Sanitär-, Putz- und Kunsträume) zentral mit Zirkulation versorgt. Von der erzeugten 37.500 kWh/a Warmwasser wurden für die Trinkwarmwasserbereitstellung lediglich 2.220 kWh/a tatsächlich gezapft.

13.4.4 Vergleich

In Tabelle 62 erfolgt eine Gegenüberstellung der EnEV-Bedarfs- und der Verbrauchswerte 2013/14. Der Strom und Gasverbrauch wird für die Heizung witterungsbereinigt angegeben.

Strom- und Gasbezug (Endenergie)	Heizung WP-Strom [kWh/m²a]	Heizung Gaskessel [kWh/m²a]	Warmwasser Gaskessel [kWh/m²a]
Bedarfsberechnung (EnEV-Nachweis)	19,3	1,8	1,9
Gasverbrauch 2013/2014 (Heizung witterungsbereinigt)	6,8	1,5	9,2

Strom (Endenergie)	Heizung Hilfsstrom [kWh/m²a]	Kühlung [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	Beleuchtung, Sonstiges, Nutzerstrom [kWh/m²a]
Bedarfsberechnung (EnEV-Nachweis)	1,8	0,5	2,2	5,8	
gemessener Jahresverbrauch 2013/2014 (incl. Nutzerstrom)	0,8	0,4	2,1		11,2

Tabelle 62: Vergleich von Bedarfsberechnung und Verbrauchswerten der Grundschule Prüfenig

Nachfolgend werden die Unterschiede zwischen Bedarf und Verbrauch analysiert.

Heizung

- Der witterungsbereinigte, gemessene Endenergieverbrauch für den Wärmepumpenstrom liegt mit 6,8 kWh/m²a deutlich unter dem ermittelten Bedarf von 19,3 kWh/m²a.
- Der Gasverbrauch für die Heizung liegt in derselben Größenordnung wie der Bedarf nach EnEV-Nachweis.
- Der errechnete Hilfsstrombedarf ist gut doppelt so hoch wie der Verbrauch.

Trinkwarmwasser

- Der abgeschätzte Bedarf von 6.100 kWh/a, der im EnEV-Nachweis angesetzt wurde, liegt mit 2.220 kWh/a deutlich über dem gezapften Verbrauch.
- Der Verbrauch inklusive Verluste jedoch liegt beim 4,8-fachen des Bedarfs nach EnEV-Nachweis von 1,9 kWh/m²a. Die große Abweichung zwischen Bedarf und Verbrauch steht im Zusammenhang mit den hohen Verlusten durch die Zirkulation. Die Leitungslängen der Zirkulation wurden nämlich bei der Bedarfsermittlung wegen der Annahme, dass sich der Warmwasserverbrauch auf die Duschen der Turnhallen bezieht, mit Standardwerten nur für

die Fläche der den Turnhallen zugehörigen Sanitärbereiche angesetzt. Tatsächlich sind jedoch Warmwasserzapfstellen in der gesamten Grundschule verteilt und mit Zirkulationsleitungen angebunden. Eine auf das Gebäude bezogene Ermittlung der Standardleitungslängen hätte um das 20-fache längere Leitungslängen ergeben. Die starke Abweichung zwischen Verbrauch und Bedarf ist daher auf eine nicht korrekte Eingabe im EnEV-Nachweis zurückzuführen.

- Die hohen Verluste machen deutlich, dass die Vorteile einer zentralen Warmwasserversorgung einer Schule mit den Nachteilen der höheren Leitungsverluste gut abzuwägen sind.

Kühlung

- Die Grundwasserpumpe verbrauchte während der Kühlperiode 0,4 kWh/m²a, welcher im Nachweis mit 0,5 kWh/m²a berechnet wurde.

RLT

- Der Stromverbrauch für die Belüftung mit 2,1 kWh/m²a stimmt gut mit dem Bedarf von 2,2 kWh/m²a überein. Der geringe Unterschied könnte mit den in der Grundschule geringeren Nutzungszeiten im Vergleich zum Nutzungsprofil der DIN V 18599 erklärt werden.

Beleuchtung, Nutzerstrom, Sonstiges

- Leider erfolgt während des Monitorings wegen des enormen Aufwands keine Messung des Beleuchtungsstroms.
- Bei der Verbrauchsauswertung sind daher als restlicher Stromverbrauch die Verbräuche für Beleuchtung, Nutzerstrom, Sonstiges zusammengefasst.
- Legt man wiederum die Annahme zugrunde, dass der Strombedarf für Beleuchtung in der richtigen Größenordnung liegt, so ergeben sich für den Nutzerstrom und sonstigen nicht beim Bedarf angesetzten Stromverbrauch 5,4 kWh/m²a.

13.5 Fazit

Bei der Bedarfsermittlung nach EnEV bieten sich abgesehen vom anzusetzenden Standardklima Spielräume zur Anpassung der Randbedingungen an das reale Gebäude. Für die Bedarfsermittlung von Plusenergieschulen müssen diese Optionen genutzt werden, um möglichst genaue Endenergiebedarfe zu erhalten.

Bei den drei Beispielschulen waren die berechneten Bedarfswerte für die Heizung im Vergleich zum Verbrauch zu hoch. Die Auswertung der Beispielschulen lässt vermuten, dass der nach Nutzungsrandbedingung für Klassenzimmer anzusetzende Mindestaußenluftwechsel und damit die berechneten Lüftungswärmeverluste zu hoch sind. Dies allein reicht jedoch nicht aus, um die große Diskrepanz zu erklären.

Bei der Auswertung der Bedarfsermittlung haben sich Unklarheiten für einen korrekten Ansatz des Nutzenergiebedarfs für das Trinkwarmwasser nach EnEV für Schulen gezeigt.

Für den Lüftungsstrom ergibt sich bei einer Bedarfsberechnung mit an die Hauptnutzung angepassten Nutzungszeiten und Eingabe der geplanten Volumenströme eine gute Übereinstimmung zwischen Bedarf und Verbrauch.

Da der Beleuchtungsstrom nicht separat erfasst wurde, konnte dieser sowie der Nutzerstrombedarf nicht ausgewertet werden. Unter den Annahmen, dass der Beleuchtungsstrom dem Bedarfswert entspricht und Bilanzierungsverschiebungen den Verbrauch nicht wesentlich erhöhen (z.B. elektrische Trinkwassererwärmung) wurden Abschätzungen zum Nutzerstromverbrauch vorgenommen. Es ergaben sich spezifische Werte von 16 (FOS/BOS), 11 (RS) und 5 (GS) kWh/m²a. Bei der FOS/BOS Erding spielt der Nutzerstrom für die Küche eine entscheidende Rolle. Ohne diesen ergibt sich ein Nutzerstromverbrauch von 12 kWh/m²a. Für fundierte Analysen wären separate Messungen von Nutzerstromverbräuchen und Beleuchtungsstrom nötig.

Auch wären weitere Auswertungen von Schulen, bei denen ein Monitoring durchgeführt wurde, wünschenswert, um den Nutzerstrombedarf an Schulen besser einschätzen zu können und um zu prüfen, ob die gefundenen Abweichungen nicht nur die untersuchten Beispielschulen, sondern auch weitere Schulen betreffen.

14.0 Eigennutzungsanteil von PV-Strom bei Plusenergieschulen

Obwohl in der Jahresbilanz von Plusenergieschulen mehr Strom erzeugt als verbraucht wird, kann sich eine Plusenergieschule nicht selbst mit Strom versorgen. Da der Zeitpunkt der Photovoltaik-Stromerzeugung oft nicht mit dem Strombedarf übereinstimmt, muss Strom in das öffentliche Netz eingespeist bzw. aus dem Netz bezogen werden.

Mit dem Hintergrund der Entlastung von Stromnetzen und der Wirtschaftlichkeit von Schul-PV-Anlagen muss der Anspruch sein, einen möglichst hohen Eigennutzungsanteil des erzeugten Stroms zu erreichen.

Aus diesem Grund ergeben sich für Plusenergieschulen folgende Fragestellungen:

- Wie hoch liegt der Eigennutzungsanteil von Plusenergieschulen?
- Wie ist das Verhältnis von erzeugtem Strom zu bezogenem Strom?
- Gibt es Reduktionsmöglichkeiten von PV-Erzeugungsspitzen?
- Welche Möglichkeiten des Lastmanagements zur Erhöhung des Eigennutzungsanteils sind denkbar?
- Welche Größe wäre gegebenenfalls für eine Definition einer Plusenergieschule als Nebenanforderung geeignet?

Nachfolgend wird kurz auf die derzeitige energiepolitische Situation eingegangen und ein Überblick über in der Fachliteratur aufgeführte Eigennutzungsanteile gegeben.

Um konkrete Aussagen zu Schulen treffen zu können, werden anschließend theoretische Analysen zum Eigennutzungsanteil auf Basis eines gemessenen Strom- und Globalstrahlungslastgangs durchgeführt sowie ein Monitoring einer Schule mit PV-Anlage ausgewertet.

14.1 Photovoltaik in Deutschland

PV-Ausbau und Kraftwerkspark

Ende 2013 war in Deutschland eine Photovoltaik-Anlagenleistung von 36 GW installiert. Im Jahr 2013 deckte die PV-Stromerzeugung mit 30 TWh 5 % des Bruttostromverbrauchs in Deutschland. An sonnigen Werktagen kann die Photovoltaik zeitweise bis zu 35 %, an sonnigen Sonn- und Feiertagen bis zu 50 % des deutschen Stromverbrauchs abdecken [ise14].

An diesen Zahlen wird deutlich, dass die PV-Stromerzeugung in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung großen Schwankungen unterliegt. Dies hat einerseits Auswirkungen auf die Stromnetze und den übrigen Kraftwerkspark, die den PV-Strom aufnehmen bzw. ausgleichen müssen, andererseits auf die Strompreise an den Strombörsen.

Dass die erneuerbaren Energien weiter ausgebaut werden, sehen die Ziele der Bundesregierung vor: sie sollen 40 bis 45 Prozent der Stromerzeugung im Jahr 2025 übernehmen (im Jahr 2013 waren es 25 %), und 55 bis 60 Prozent im Jahr 2035. Jährlicher Zielkorridor für den Zubau von PV sind hierbei mindestens 2,4 und höchstens 2,6 Gigawatt (vgl. § 31 EEG 2014).

Durch den steten Zubau an nicht regelbaren Erneuerbaren Energien (PV, Wind) werden zukünftige Probleme bei der Versorgungssicherheit und Netzstabilität derzeit viel und kontrovers diskutiert.

Laut [ise14] passt das Erzeugungsprofil von PV-Strom jedoch generell gut zu dem Lastprofil des Stromnetzes. Auch bei dem geplanten Ausbau der PV wird in den nächsten Jahren der gesamte Strombedarf jederzeit über dem PV-Stromangebot liegen. Allerdings nehmen die Konflikte mit trägen Kraftwerken (Kernkraft, Braunkohle) zu. Diese noch ungelösten Konflikte können kurzzeitig zu deutlicher Überproduktion und hohem Stromexport bei geringen bis negativen Börsenstrompreisen führen, wie nachfolgende Grafik zeigt.

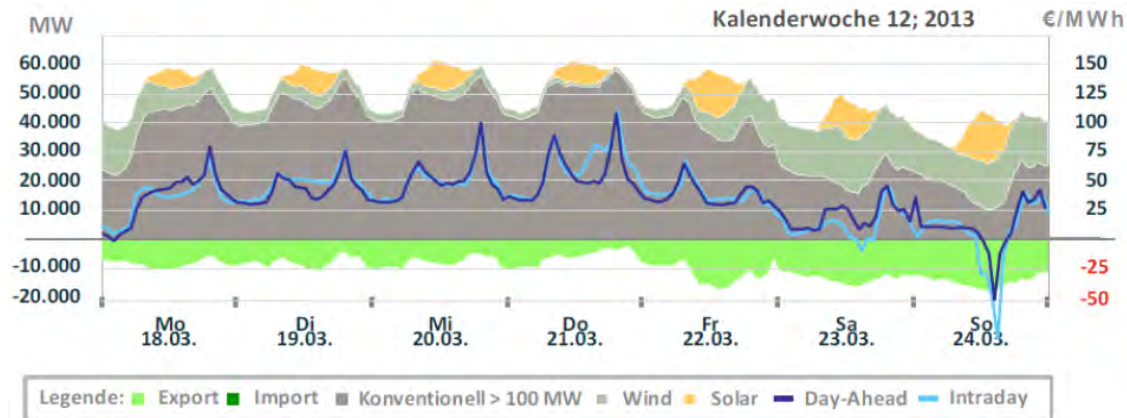


Abbildung 40: Beispiel für den Wochenverlauf von konventioneller und regenerativer Stromerzeugung und Börsenpreisen [ise14]

Für eine Verstetigung der PV-Stromerzeugung muss eine Vielzahl von Maßnahmen in einander greifen, beispielsweise eine Produktionsverstetigung des PV-Stroms durch vermehrte Ost/West-Ausrichtung oder Anlagen mit Nachführung, Energieeffizienz-Steigerung zur Senkung des Stromverbrauchs mit besonderem Fokus auf den nächtlichen Verbrauch, Möglichkeiten zur Nachfragesteuerung eines Teils des Stromverbrauchs an die Verfügbarkeit von PV-Strom, Kraftwerke mit speicherbaren Energieträgern (z.B. Pumpspeicherkraftwerke) und PV-Anlagen mit netzdienlichen Batteriespeichern.

EEG 2014

Die Einspeisevergütung für mittels Photovoltaik erzeugten Strom ist im Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) geregelt und wird für Neuanlagen in Abhängigkeit der zugebauten PV-Leistung stetig angepasst. Unter den Rahmenbedingungen des EEG 2014 könnte die Einspeisevergütung bei einer Inbetriebnahme einer PV-Anlage im Dezember 2014 beispielsweise bei knapp 11 ct/kWh liegen.

Die wesentlichen Neuerungen des EEG 2014 werden nachfolgend kurz zusammengefasst [bsw14].

Neu eingeführt wurde die Verpflichtung zur Zahlung eines Teils der EEG-Umlage für selbst erzeugten und genutzten Strom. Wer selbst erzeugten Solarstrom aus einer neuen Solarstromanlage selbst verbraucht, muss bis Ende 2015 30 % der EEG-Umlage, bis Ende 2016 dann 35 % und danach 40 % der jeweils gültigen Ökostrom-Umlage auf die Eigenversorgung mit Solarstrom entrichten. Für 2014 sind das rund 1,9 Cent je Kilowattstunde (kWh). Ab 2017 gelten 40 % auch für Photovoltaik-Anlagen, die zwischen August 2014 und Dezember 2016 errichtet wurden. Nur Photovoltaik-Anlagen mit einer Leistung von maximal zehn Kilowatt sind von der Abgabe ausgenommen.

Die Bundesregierung führte mit dem EEG 2014 zudem die „verpflichtende Direktvermarktung“ ein. Betreiber neuer Solarstromanlagen mit 500 Kilowatt installierter Leistung (kWp) oder mehr (ab 2016 bereits ab 100 kWp) brauchen demnach einen Direktvermarkter, sofern sie ihren überschüssigen Solarstrom nicht selbst verkaufen wollen. Da die erzielbaren Erlöse an der Strombörse die Kosten einer Solarstromanlage allein nicht decken können, erhalten Photovoltaik-Betreiber zusätzlich eine Marktprämie. Für den Mehraufwand durch die Direktvermarktung erhält der Betreiber einen Aufschlag in Höhe von 0,4 Cent pro Kilowattstunde auf die Marktprämie. Voraussetzung ist jedoch, dass die Anlage fernsteuerbar ist.

Für Neuanlagen ab 500 Kilowatt, die ab dem 1.1.2016 ans Netz gehen, ist zu beachten, dass für sie der Förderanspruch für den Zeitraum entfällt, in dem an mindestens sechs aufeinanderfolgenden Stunden ohne Unterbrechung negative Börsenstrompreise auftreten. Dieser Fall ist in der Vergangenheit fast noch nie vorgekommen.

Im EEG 2014 beibehalten ist weiterhin für Anlagen größer 100 kWp, dass der Netzbetreiber jederzeit die Ist-Einspeisung abrufen und die Einspeiseleistung bei Netzüberlastung ferngesteuert reduzieren kann.

Weil die Entwicklung der Einspeisevergütung bzw. Marktprämie unsicher ist, ist für die Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen der Anteil des eigengenutzten PV-Stroms entscheidend, da die Gesteungskosten für Photovoltaikstrom mittlerweile deutlich unter den Strombezugskosten liegen. Wegen dieser hohen Relevanz des Eigennutzungsanteils soll im Rahmen dieser Studie eine Analyse zum Eigennutzungsanteil durchgeführt werden.

14.2 Lastmanagement

Durch Lastgangverschiebung auf Basis von Lastmanagement und Stromspeichern lassen sich Lastspitzen reduzieren und der Eigennutzungsanteil erhöhen, indem die zeitliche Diskrepanz zwischen Erzeugung und Bedarf angeglichen wird.

[fuc12] gibt eine gute Zusammenfassung über Einsatzbereiche, den Entwicklungsstand, technische Leistungsdaten und die Kosten verfügbarer Stromspeicher. Nachfolgende Grafik zeigt einen Überblick über Energiespeicher-Technologien kategorisiert nach ihren Arbeitsweisen und typischen Anwendungs-Intervallen. Die Zeitskala ermöglicht einen Zeitenvergleich für Auf- und Entladung.

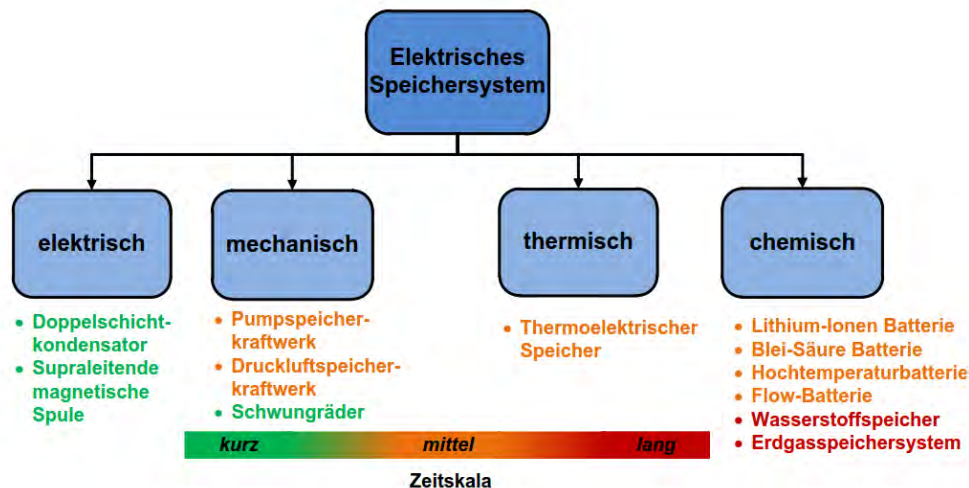


Abbildung 41: Klassifizierung von Energiespeichertechnologien mit Beispielen [fuc12]

Mit Blei- und Lithium-Ionen-Batterien stehen marktreife Stromzwischenpeicher zur Verfügung. Bleibatterien weisen Vorteile durch geringere Investitionskosten gegenüber Lithium-Ionen-Batterien auf, sind aber wegen der niedrigeren Zyklenfestigkeit und der geringeren Energiedichte weniger als Tageszwischenpeicher geeignet. Weitere Batterietechnologien für diesen Einsatzbereich befinden sich in der Entwicklung.

Eine Zukunftsoption könnte auch sein, Elektromobile als Energiespeicher gegebenenfalls auch mit anschließender Netzeinspeisung zu nutzen. Derzeit bestehen jedoch weder Betriebskonzepte noch eine geeignete Infrastruktur, um eine Rückspeisung der Energie zu ermöglichen.

Für Plusenergieschulen könnte die Stromzwischen-speicherung von PV-Strom während des Tages interessant sein, um mit dem gespeicherten Solarstrom den Nachtstrombezug zu decken. Das Beladen und Entladen von Batterien ist jedoch komplex und hängt von der Regelungsstrategie bzw. dem Energiemanagementsystem ab. Soll nicht nur der Eigennutzungsanteil erhöht, sondern auch Bedarfs- und Einspeisespitzen reduziert werden, ist eine intelligente Regelung erforderlich, die eine möglichst gleichmäßige Beladung der Batterie über die Periode der PV-Stromerzeugung ermöglicht. Für die Umsetzung ist ein Energiemanagementsystem erforderlich, das auch Wetterprognosen in die Regelung einbezieht.

Auf Einfamilienhausebene wird eine derartige intelligente Steuerzentrale beispielsweise von der Firma SMA unter dem Produktnamen „Sunny Home Manager“ angeboten [sma14]. Dieser steuert nicht nur auf Basis der Momentanwerte von Verbrauch und Erzeugung, sondern erstellt eine intelligente und laufend aktualisierte Planung, die sowohl eine Erzeugungs- als auch eine Verbrauchsprognose berücksichtigt. Die Verbrauchsprognose basiert auf einem selbstlernenden Algorithmus, der das Verbrauchsverhalten des Haushalts fortlaufend analysiert. Die standortbezogene Erzeugungsprognose

wird auf Basis von Live-Erzeugungsdaten von Photovoltaik-Anlagen in Deutschland erstellt, die über komplexe Rechenmodelle mit Wetterprognosen verknüpft werden.

Ein Hemmnis für die Umsetzung eines „netzfrendlichen“ Lastmanagementsystems ist, dass es hierfür (noch) keinerlei finanzielle Anreize gibt. Zukünftig könnte man sich auch vorstellen, dass Netzbetreiber ein Lastmanagementsystem beispielsweise mit zeitvariablen Stromtarifen unterstützen.

Ein anderer Ansatz für die Umsetzung eines „netzfrendlichen“ Lastmanagementsystems wurde beim KfW-Programm Erneuerbare Energien „Speicher“ (Programmnummer 275) gewählt. Bei den geförderten Batteriespeichern, die der Zwischenspeicherung von kleinen Photovoltaikanlagen (installierte Leistung nicht größer als 30 kWp) dienen, darf die Leistungsabgabe am Netzanschlusspunkt maximal 60 % der installierten Leistung der Photovoltaikanlage betragen.

Falls ein strombasiertes Versorgungskonzept eingesetzt wird, könnte dieses auch zum Lastmanagement genutzt werden, in dem das Heizsystem (z.B. die Wärmepumpe) zu Zeiten hohen Stromertrags betrieben wird und das Gebäude als Wärmespeicher genutzt wird.

14.3 Literaturrecherche Eigennutzungsanteil

Aus einer Literaturrecherche zum Eigennutzungsanteil von PV-Anlagen, die im Rahmen des Forschungsprojektes „PlusEnergieQuartier Oberursel“ durchgeführt wurde, lassen sich folgende Punkte ableiten [peq13]:

- Bislang beschränken sich Forschungsarbeiten zu Eigennutzungsanteilen auf Analysen zu Ein- und Zweifamilienhäusern.
- Untersuchungen zur Eigenverbrauchsquote beispielsweise in Abhängigkeit der PV-Orientierung fehlen.
- Die meisten Untersuchungen geben einen Eigennutzungsanteil ohne Speicher für folgende Randbedingungen an: installierte PV-Leistung von 5 kWp und einen 4-Personenhaushalt bzw. entsprechendem Strombedarf von 4.500 bzw. 4.700 kWh/a. Für diesen Fall schwankt der Eigennutzungsanteil zwischen 22 und 30 %.
- Die zeitliche Auflösung variiert in den Untersuchungen zum Eigennutzungsanteil zwischen einer Sekunde, einer Minute und 15 Minuten. Je höher die zeitliche Auflösung, umso genauer und umso niedriger ist der ermittelte Eigennutzungsanteil, da so auch kurzzeitige Lastspitzen, die von der PV-Leistung nicht abgedeckt werden können, in die Ermittlung einfließen können.
- Nicht nur die zeitliche Auflösung bei der Ermittlung des Eigennutzungsanteils ist wichtig, sondern auch die Abtastrate des Energiemanagementsystems, das die Eigennutzung bzw. Netzeinspeisung des produzierten Stromes regelt.

Zum Eigennutzungsanteil von Schulen liegen keine oder nur abschätzende Analysen vor. An einem konkreten Beispiel sollen daher erste Einschätzungen zu dieser Thematik erarbeitet werden.

14.4 Lastganganalyse am Beispiel der FOS/BOS Erding

Für die Ermittlung des Eigennutzungsanteils ist eine Jahres- oder eine Monatsbilanz nicht ausreichend, da diese nicht den Zeitpunkt des Verbrauchs bzw. der Stromerzeugung berücksichtigt. Es muss eine Lastganganalyse des Verbrauchs und der Erzeugung in hoher zeitlicher Auflösung durchgeführt werden, um Aussagen zum Eigennutzungsanteil ableiten zu können.

Eigennutzungsanteil und Autarkiegrad lassen sich wie folgt beschreiben.

Der Eigennutzungsanteil ist der Anteil der eigengenutzten Energie bezogen auf den erzeugten Energieertrag. Je höher der Eigenverbrauch ist, umso höher sind die eingesparten Stromkosten und umso niedriger ist die Belastung externer Stromnetze.

Der Autarkiegrad ist der Anteil der eigengenutzten Energie, bezogen auf den Gesamtstrombedarf. Der Autarkiegrad ist ein Maß für die Unabhängigkeit vom öffentlichen Stromnetz. Letzterer wird in der vorliegenden Studie nicht ausgewertet, da die Unabhängigkeit vom öffentlichen Stromnetz in diesem Zusammenhang keine relevante Größe darstellt.

14.4.1 Methodik

Um diese Analyse zu ermöglichen, wurde vom ZAE Bayern der Stromverbrauchslastgang der FOS/BOS Erding für das Jahr 2013 in minütlicher Auflösung zur Verfügung gestellt [zae14]. Auch wurde die Globalstrahlung gemessen, die ebenfalls in 1-Minuten-Werten aufgezeichnet ist. Aus dieser kann ein theoretischer PV-Erzeugungslastgang für unterschiedliche Ausrichtungen errechnet werden. Ferner wird die in minütlicher Auflösung aufgezeichnete Fernwärmeabnahme in die Auswertung einbezogen.

Es sei auf folgende Besonderheiten der Monitoringdaten [zae14] hingewiesen:

- Die aufgezeichneten Monitoringdaten weisen einige Datenausfälle auf. Ca. alle 4 bis 5 Tage erfolgt ein Ausfall zwischen 0 und 2 Uhr nachts.
- Ansonsten gibt es einige kurzzeitige Ausfälle, aber auch vier längerfristige und zwar vom 7.3.13 (1:54) bis 19.3.13 (12:01), vom 7.4.13 (1:25) bis 10.4.13 (11:09), 22.6.13 (11:09) bis 25.6.13 (2:01) sowie vom 30.6.13 (12:10) bis 6.7.13 (2:01).
- Die Globalstrahlungsmessung weist durch den Schattenwurf eines Mastes, der zeitweise zwischen 12 und 13 Uhr die Globalstrahlungsmessstation auf dem Dach der FOS/BOS Erding trifft, einen systematischen Fehler auf.
- Auch wurde eine Leistungsaufnahme der Fernwärme außerhalb der Heizperiode in regelmäßigen Abständen (ca. alle 2 bis 4 Tage) verzeichnet, die zwar im Lastprofil auffallend ist, jedoch einen vernachlässigbar geringen Energieinhalt von kleiner 1 % aufweist.

Für den Umgang mit den Ausfällen wurde folgende Vorgehensweise festgelegt:

Die Ausfälle zwischen 0 und 2 Uhr nachts werden mit einem Excel-Makro geschlossen, das für den Ausfall-Zeitraum einen Mittelwert aus den voran- und nachfolgenden Leistungen ansetzt. Da der Lastgang nachts sehr gleichmäßig ist, kann davon ausgegangen werden, dass der so modifizierte Lastgang realistisch ist.

Die restlichen Datenausfälle konnten nicht korrigiert werden. Zu Zeiten mit Datenlücken werden jedoch Strombedarf und –erzeugung nicht berücksichtigt. Es konnte festgestellt werden, dass das Fehlen beider Werte bei den vorliegenden Datenausfällen auf die Ermittlung des Eigennutzungsanteils keine Auswirkung hat. Dies hat den Hintergrund, dass für den Eigennutzungsanteil nur das Verhältnis aus Verbrauch und Erzeugung relevant ist.

Wegen des Schattenwurfes wird die Globalstrahlungsmessung nur für vorabschätzende Untersuchungen verwendet. Stattdessen wird für die Auswertung eine Globalstrahlungsmessung in 10-Minutenauflösung von Eichenried [ifu14], das ca. 10 km von Erding entfernt liegt, der Lastganganalyse zugrunde gelegt.

Die Leistungsabnahme von Fernwärme außerhalb der Heizperiode wird nicht von der GLT angefordert, sondern wird vermutlich durch eine Pumpe oder ein Ventil verursacht, welche durch eine interne Steuerung eine regelmäßige Spülung veranlasst. Da diesen Spitzen kein Bedarf zugrunde liegt und nicht repräsentativ sind, werden diese Spitzen aus dem Fernwärme-Lastgang bereinigt.

Vorgehensweise bei der Erstellung der Stromverbrauchslastgänge

Der Stromverbrauchslastgang der FOS/BOS Erding entspricht dem Stromlastgang einer Schule mit Fernwärmeversorgung, mechanischer Lüftungsanlage und dezentral elektrischer Warmwasserbereitung.

Da Variationsrechnungen hinsichtlich des Einflusses der Art der Wärmeerzeugung (Vergleich Fernwärme mit Wärmepumpe) und der Lüftungsanlage analog der Berechnung als Beispielschule durchgeführt werden sollen, wird ein Basislastgang synthetisiert, bei dem der Stromverbrauch der Lüftungsanlage heraus gerechnet wird. Dies wird umgesetzt, indem der Stromverbrauchslastgang der Lüftungsanlagen über die Messung der Volumenströme der RLT-Anlagen in Minutenwerten und der maximalen Stromaufnahmen der Anlagen erzeugt und vom ursprünglichen Lastgang abgezogen wird.

Der Einfluss der Art der Wärmeerzeugung kann untersucht werden, indem ein Stromerzeugungslastgang für eine Wärmeversorgung mit Wärmepumpe erzeugt wird. Dieser wird auf Basis der gemessenen Fernwärmeabnahme synthetisiert werden. Für die Wärmeerzeugung über Wärmepumpe wird eine Jahresarbeitszahl von 4,4 angenommen.

Auf diese Weise stehen drei (Teil-)Lastgänge zur Verfügung, aus deren Summe sich der Lastgang verschiedener Varianten bilden lässt:

- Stromlastgang allgemein („sonstiger Strom“)
- Lüftungs-Stromlastgang
- Wärmepumpen-Stromlastgang

Diese Lastgänge werden skaliert, so dass ein Bezug auf die Bedarfsberechnung nach 8.2 erfolgen kann. Für die Ermittlung des Eigennutzungsanteils werden auf dieser Basis für die Beispielschule FOS/BOS Erding folgende Varianten im Kapitel Auswertung untersucht:

- V0-WP (Basisvariante mit Wärmepumpe)
- V4-WP (Variante "Natürliche Lüftung" mit Wärmepumpe)
- V0-FW (Basisvariante mit Fernwärme)
- V4-FW (Variante "Natürliche Lüftung" mit Fernwärme).

Wegen des Fehlens der zentralen Warmwasserbereitung im Wärmebedarfs-Lastgang wird der Trinkwarmwasserbedarf beim Bedarf nicht berücksichtigt und somit von einer dezentral elektrischen Versorgung wie im tatsächlichen Gebäude vorhanden ausgegangen.

Um einen Eindruck der so synthetisierten Lastgänge zu gewinnen, werden für die Variante V0-WP (Basisvariante mit Wärmepumpe) in den nachfolgenden Grafiken der monatsweise Strombedarf sowie der Lastgang einer Sommer- und einer Winterwoche dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass bei der Monatsauswertung die Flächen aufeinander gestapelt sind, bei den Lastgängen jedoch hintereinander liegen. Bei der Monatsauswertung wurde ferner wegen der Datenausfälle eine Korrektur der Werte vorgenommen.

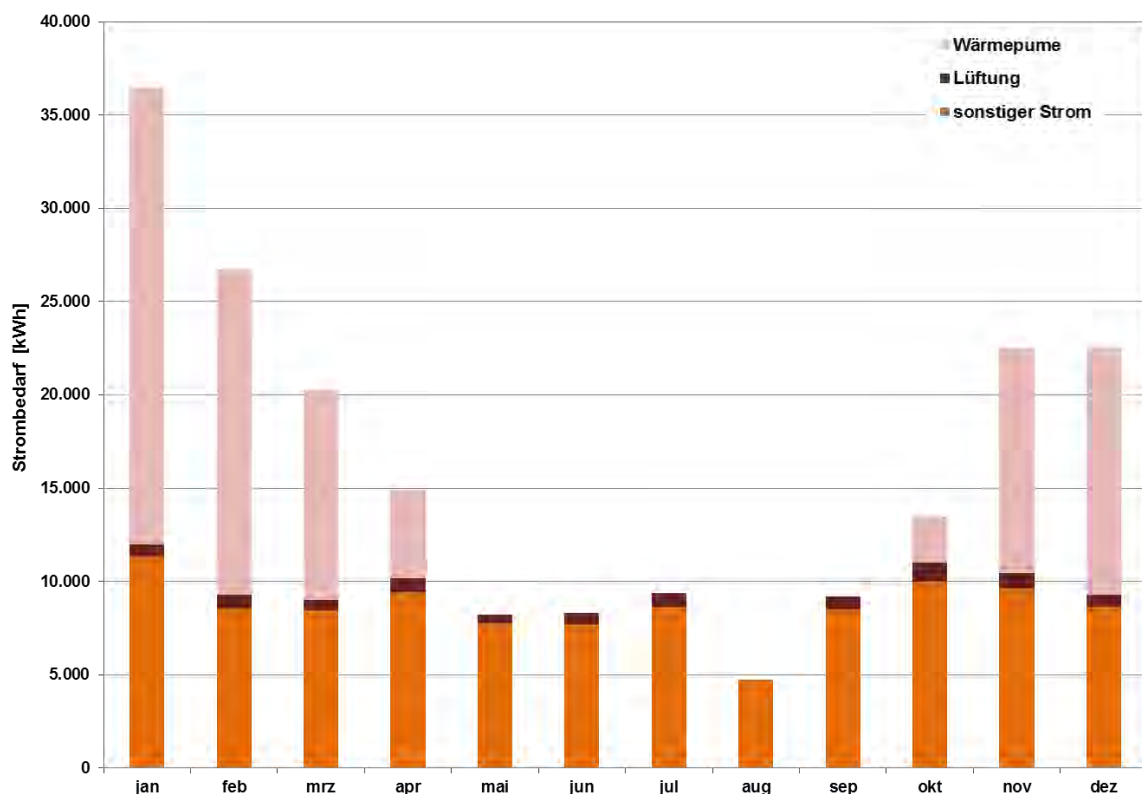


Abbildung 42: Monatsweiser Strombedarf (Variante V0-WP)

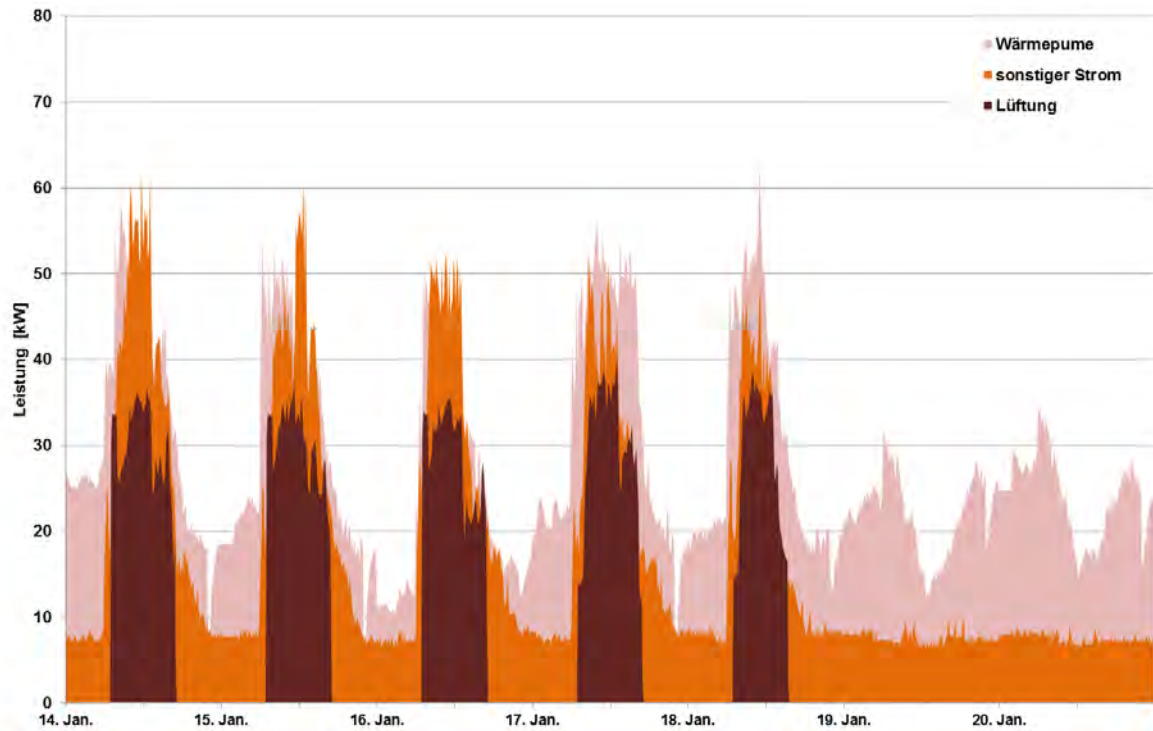


Abbildung 43: Strombedarfslastgang – Winterwoche (Variante V0-WP)

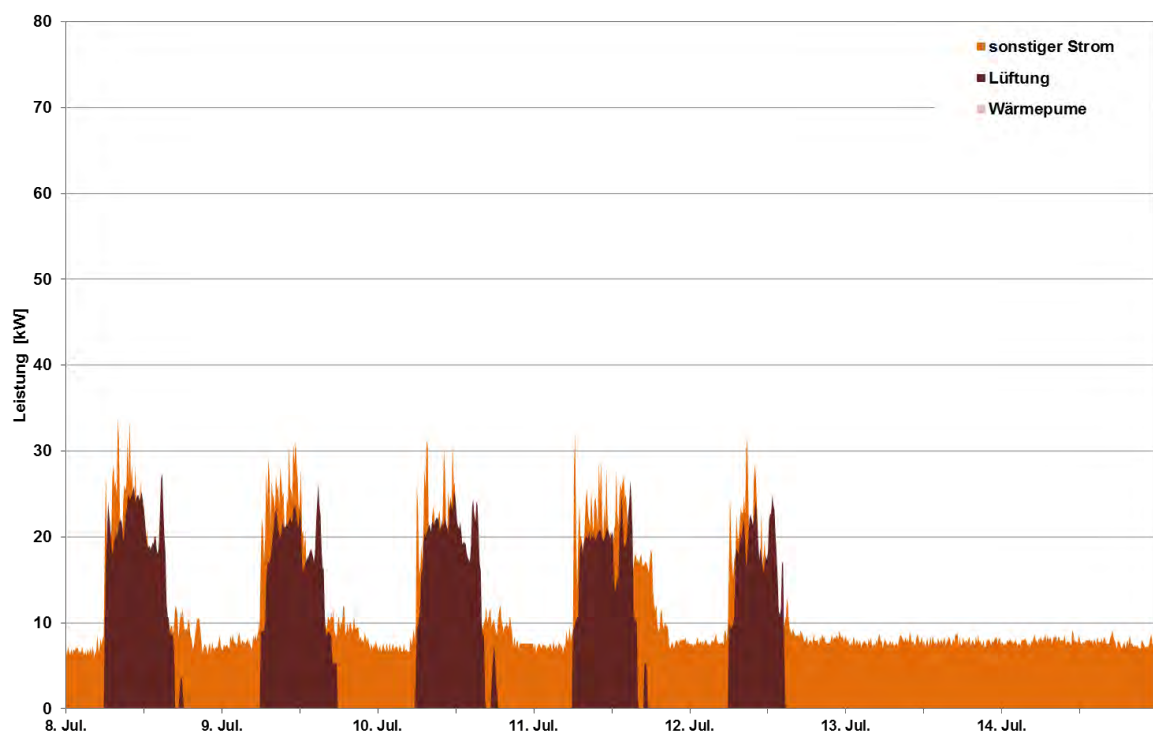


Abbildung 44: Strombedarfslastgang- Sommerwoche (Variante V0-WP)

Dass das Leistungsniveau für Sonstigen Strom und Lüftung im Vergleich zur Winterwoche geringer ist, könnte mit dem Schultyp der Fach- und Berufsoberschule zusammenhängen. Vermutlich sinkt die Schülerzahl nach dem Abitur im Mai stark ab. Der geringere Bedarf für die Lüftungsanlagen könnte auch mit Fensterlüftung im Sommer in Verbindung mit CO₂-geregelten Lüftungsvolumenströmen in Verbindung stehen.

Vorgehensweise bei der Erstellung der PV-Stromerzeugungsprofile

Im Gegensatz zum Stromverbrauchslastgang muss der PV-Stromerzeugungslastgang auf Basis der Wetterdaten und der technischen Daten eines typischen PV-Moduls (vgl. Tabelle 63) erzeugt werden:

Technische Daten PV-Module	
Leistung	173 W _p /m ²
Wirkungsgrad	17,3 %
Temperaturfaktor Leistung	-0,42 %/K
Degradation und Toleranz (Mittelwert über 20 Jahre)	8,2 %
Verschmutzung/Schnee	2,0 %
Kabelverluste	2,0 %
Wechselrichterverluste	2,0 %
Mismatch	2,0 %
MPP-Anpassung	1,0 %

Tabelle 63: Technische Daten und angesetzte Verluste der PV-Module für die Simulation der Erzeugerlastgänge

Es wird für die Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der PV-Module in jedem Zeitschritt ein variabler Leistungsfaktor ermittelt. Dabei wird zunächst die Modultemperatur mit idealer Hinterlüftung abhängig von der Außentemperatur und der Einstrahlung berechnet. Für die mit 10° aufgestellten Module wird zusätzlich mit einem pauschalen Zuschlag von 5 K berücksichtigt, dass diese nur mäßig hinterlüftet sind. Aus der Summe aus allen Verlusten und dem Temperatur-Leistungsfaktor wird der dynamische Systemleistungsfaktor ermittelt.

Anschließend wird für jede Modulfläche und jeden Zeitschritt im Jahr das Produkt aus der auf diese geeignete Fläche eintreffenden Solarstrahlung, der Modul-Nennleistung und dem Systemleistungsfaktor gebildet, um den Lastgang des Stromertrags zu erhalten.

Für die Ermittlung des Eigennutzungsanteils wird die Höhe des Jahres-PV-Ertrags immer gleich dem Bedarf gesetzt, so dass die Grenzsituation zum Plusenergiegebäude abgebildet wird.

Festlegungen auf Basis von Voruntersuchungen

In einer Voruntersuchung wurden anhand des Lastgangs der FOS/BOS Erding und der synthetisierten PV-Lastgänge folgende Erkenntnisse und Schlussfolgerungen gewonnen:

- Die Auswirkung auf den Eigennutzungsanteil einer Lastganganalyse bei 1-minütiger im Vergleich zu 10-minütiger Auflösung liegt bei unter einem Prozentpunkt. Da die höhere Genauigkeit der Lastganganalyse in 1-minütiger Auflösung wegen des hohen Berechnungs- und Zeitaufwandes nicht im Verhältnis stehen, erfolgen nachfolgende Analysen in 10-minütiger Auflösung.
- Um den Fehler mit dem Mast zu vermeiden, wurde für die weitergehende Analyse der auf Basis von [Ifu14] erzeugte PV-Lastgang verwendet und skaliert.
- Auch die Variation der PV-Ausrichtung (30° Süd im Vergleich zu 10° Ost/West) hat nur geringe Auswirkungen von unter einem Prozentpunkt auf den Eigennutzungsanteil. Da eine in Süd-Richtung orientierte Dachbelegung nicht für das Erreichen des Plusenergiestandards ausreicht, werden die Lastganganalysen analog der Berechnung des Stromertrags für die Beispielschulen für eine PV-Anlage mit 10° Neigung und Ost-West-Orientierung durchgeführt.

14.4.2 Ergebnisse

Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen für die Variante V0-WP den Strombedarf, die PV-Erzeugung sowie den ins öffentliche Stromnetz eingespeisten PV-Strom für eine Winter- und eine Sommerwoche.

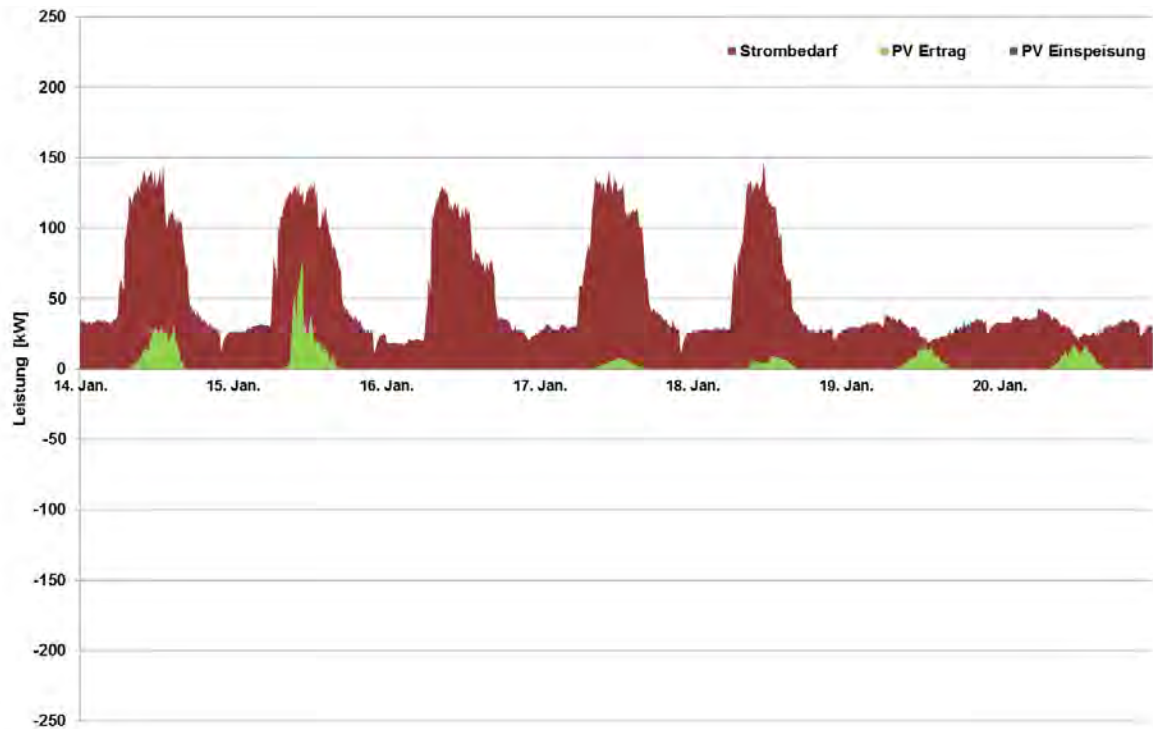


Abbildung 45: Lastganganalyse – Winterwoche (Variante V0-WP)

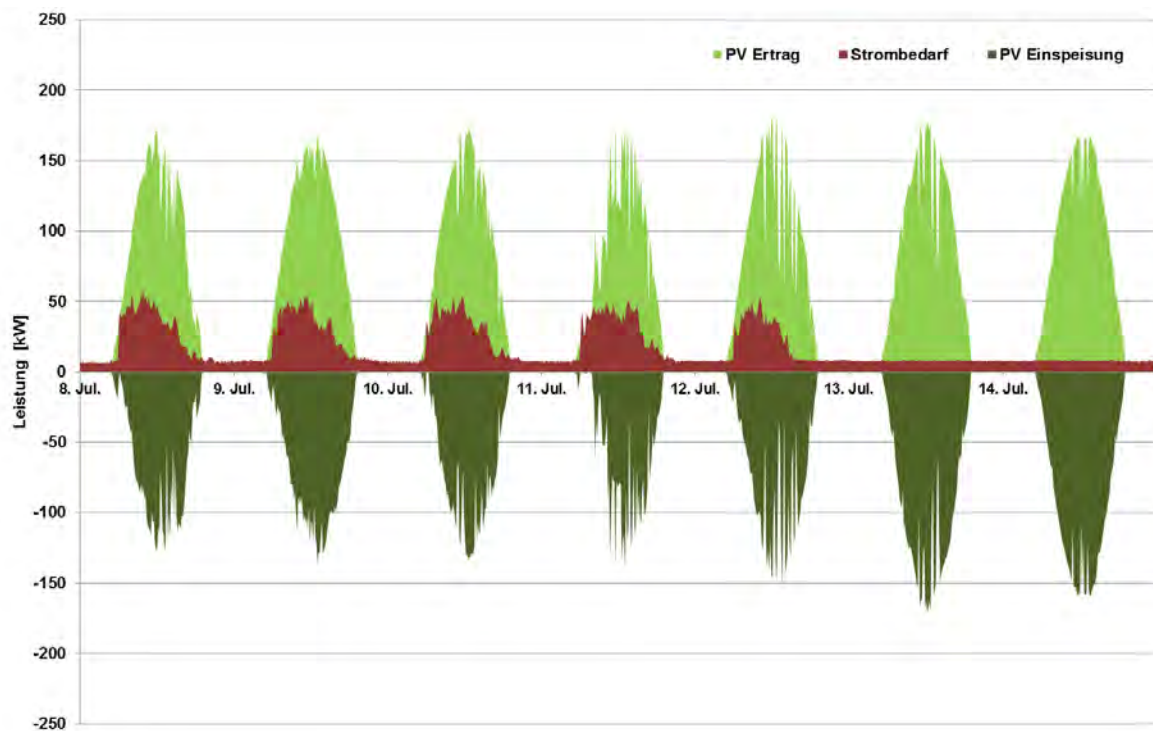


Abbildung 46: Lastganganalyse – Sommerwoche (Variante V0-WP)

In der gezeigten Winterwoche kann der erzeugte PV-Strom komplett selbst genutzt werden. Es wird nichts ins öffentliche Stromnetz eingespeist. Im Sommer ist der Strombedarf durch den Wegfall des Wärmepumpenstrombedarfs deutlich geringer. Andererseits ist der Stromertrag um ein Vielfaches

höher, so dass der Großteil des erzeugten Stromes ins öffentliche Stromnetz eingespeist werden muss.

Abbildung 47 zeigt eine monatsweise Lastganganalyse für die Variante V0-WP. Der erzeugte Strom ist aufgesplittet in Strom, der selbstgenutzt und der eingespeist wird, dargestellt. Für jeden Monat wird auch der sich ergebende Eigennutzungsanteil errechnet (s. Sekundärachse).

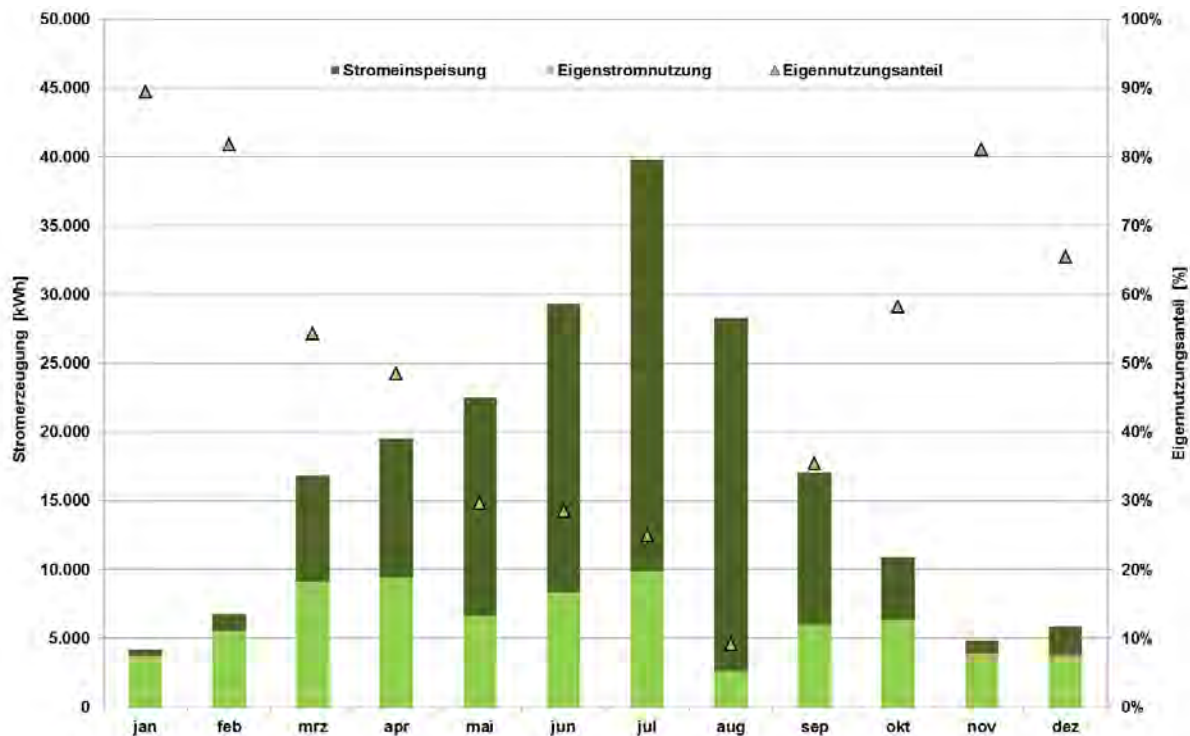


Abbildung 47: Monatsweise Lastganganalyse der PV-Stromerzeugung (Variante V0-WP)

Im Jahresdurchschnitt ergibt sich ein Eigennutzungsanteil von knapp 37 %. Trotz des geringen PV-Stromertrags im Januar und im Dezember kann aufgrund des geringen Strombedarfs in den Weihnachtsferien nicht alles selbst genutzt werden. Der Eigennutzungsanteil liegt im Januar mit rund 90 % jedoch am höchsten. Im August sinkt der Eigennutzungsanteil auf nur 9 %, da den ganzen August 2013 Sommerferien waren.

Würde man den Eigennutzungsanteil für die Variante V0-WP nicht mittels Lastganganalyse, sondern über Monatswerte zu Bedarf und Erzeugung ermitteln, so käme man auf einen Eigennutzungsanteil von 62 %. Da eine Lastganganalyse aufwendig ist, wird eine monatsweise Bilanzierung beispielsweise als Angabe beim Effizienzhaus Plus (vgl. Kapitel 2.1) gefordert.

In nachfolgender Tabelle sind die sich ergebenden Eigennutzungsanteile für die untersuchten Varianten angegeben.

FOS/BOS Erding	Eigennutzungsanteil
V0-WP	37%
V4-WP	32%
V0-FW	41%
V4-FW	40%

Tabelle 64: Lastganganalyse - Eigennutzungsanteil der untersuchten Varianten

Den niedrigsten Eigennutzungsanteil weist die Variante V4-WP auf. Hintergrund ist, dass der hohe Strombedarf im Winter nicht durch die PV-Anlage gedeckt werden kann. Durch die natürliche Lüftung fällt auch der im Jahresverlauf gleichmäßig verteilte Lüfterstrom weg, der in guter zeitlicher Relation mit der PV-Erzeugung liegt.

Bei der Versorgungsvariante mit Fernwärme spielt die Belüftung eine untergeordnete Rolle, da dieser einen ähnlichen Lastgang wie der Nutzerstrom aufweist. Verglichen mit Einfamilienhäusern mit maximal 30 % liegt der Eigennutzungsanteil der Varianten V0-WP, V0-FW und V4-FW deutlich höher.

In einer weiteren Analyse soll der Eigennutzungsanteil dieser Varianten in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Ertrag zu Bedarf untersucht werden (s. Abbildung 48). Für die in dieser Lastganganalyse untersuchten Varianten strombetriebene Wärmepumpe und Fernwärme mit einem Primärenergiefaktor von 0 muss dieses Verhältnis für das Ziel Plusenergieschule größer 1 sein. Bei einer Plusenergieschule mit Pelletheizung müsste auch noch die Primärenergie der Pellets abgedeckt werden und das Verhältnis würde größer werden.

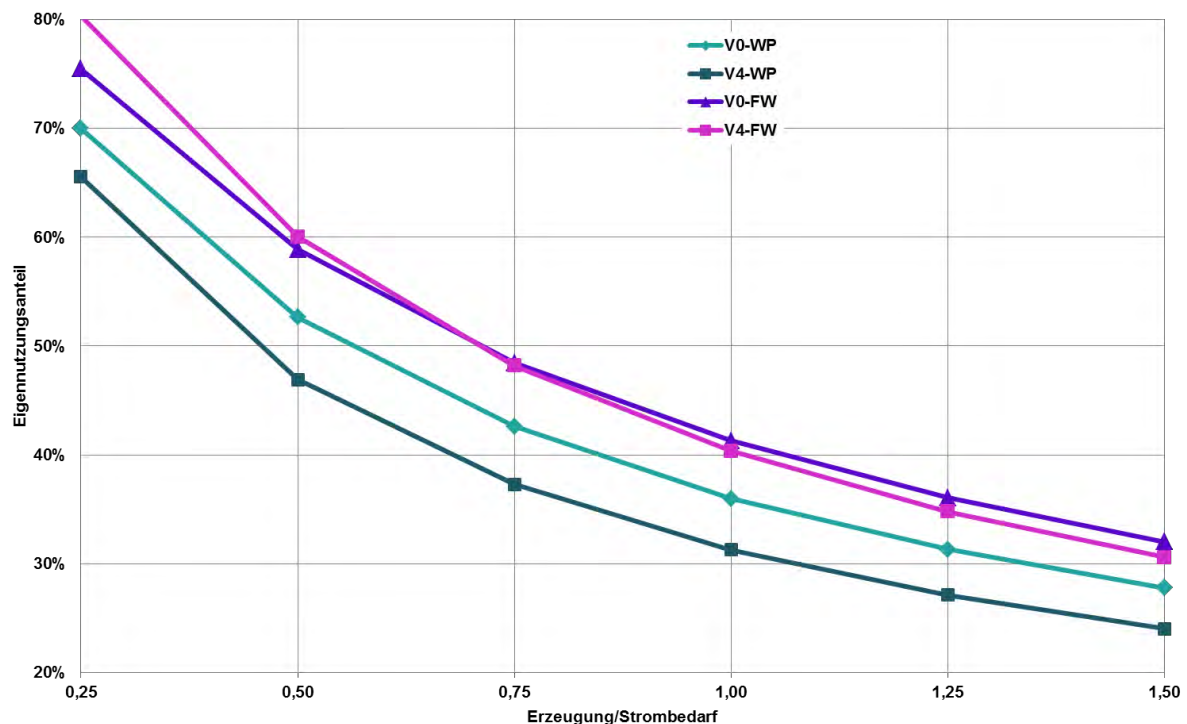


Abbildung 48: Eigennutzungsanteil in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Erzeugung und Bedarf

Wie zu erwarten ist, hängt der Eigennutzungsanteil stark vom Verhältnis aus Erzeugung zu Bedarf ab. Je höher dieses Verhältnis ist, desto niedriger wird der Eigennutzungsanteil. Bei der Variante V0-WP und einem Verhältnis aus Erzeugung zu Bedarf von 0,5 liegt der Eigennutzungsanteil bei 53 %, bei 1,25 bei 32 %.

Nachfolgend sollen die Auswirkungen eines möglichen Lastmanagements durch Strom- und Wärmespeicher auf den Eigennutzungsanteil untersucht werden.

Stromspeicher

Mit der Untersuchung von Stromspeichern sollen die Auswirkungen eines Einsatzes von Batterien auf den Eigennutzungsanteil untersucht werden. Die Abschätzung erfolgt mittels Lastganganalyse unter folgenden Randbedingungen:

- Die Auslegung des Stromspeichers erfolgt auf Basis des Stromverbrauchs während einer Sommernacht. Auf diese Weise könnte PV-Strom während des Tages eingespeichert werden und mit dem gespeicherten Solarstrom den Nachtstrombezug decken. Die Auslegung erfolgt auf eine nutzbare Speicherkapazität von 100 kWh. Bezogen auf die Leistung der PV-Anlage dieser Variante ergibt sich eine spezifische Speicherkapazität von rund 370 Wh/kWp bzw. auf die Nettogrundfläche von 13 Wh/m². Eine Lithium-Ionen-Batterie dieser Größenord-

nung hätte einen hohen Platzbedarf von ca. 3 bis 5 m³. Es wäre mit Kosten von 1.000 bis 1.400 € je Kilowattstunde Speicherkapazität bei Lithium-Ionen-Batterien zu rechnen.

- Der Speicher-Wirkungsgrad der Batterie wird mit 90 %, der Gleichrichter- und der Wechselrichter-Wirkungsgrad mit je 95 % angesetzt. Diese Verluste werden als Strombedarf gezählt, so dass der Strombedarf insgesamt ansteigt.
- Die Batterie wird geladen, wenn die PV-Anlage Strom liefert, Strom ins Netz eingespeist werden müsste und der Stromspeicher noch nicht voll ist.

Nachfolgende Abbildung zeigt die Auswirkung des Stromspeichers auf den Eigennutzungsanteil für die Variante V0-WP (Basisvariante mit Wärmepumpe). Bei einem ausgeglichenen Verhältnis von Erzeugung und Bedarf ergeben sich für den Stromspeicher 222 Vollzyklen in einem Jahr.

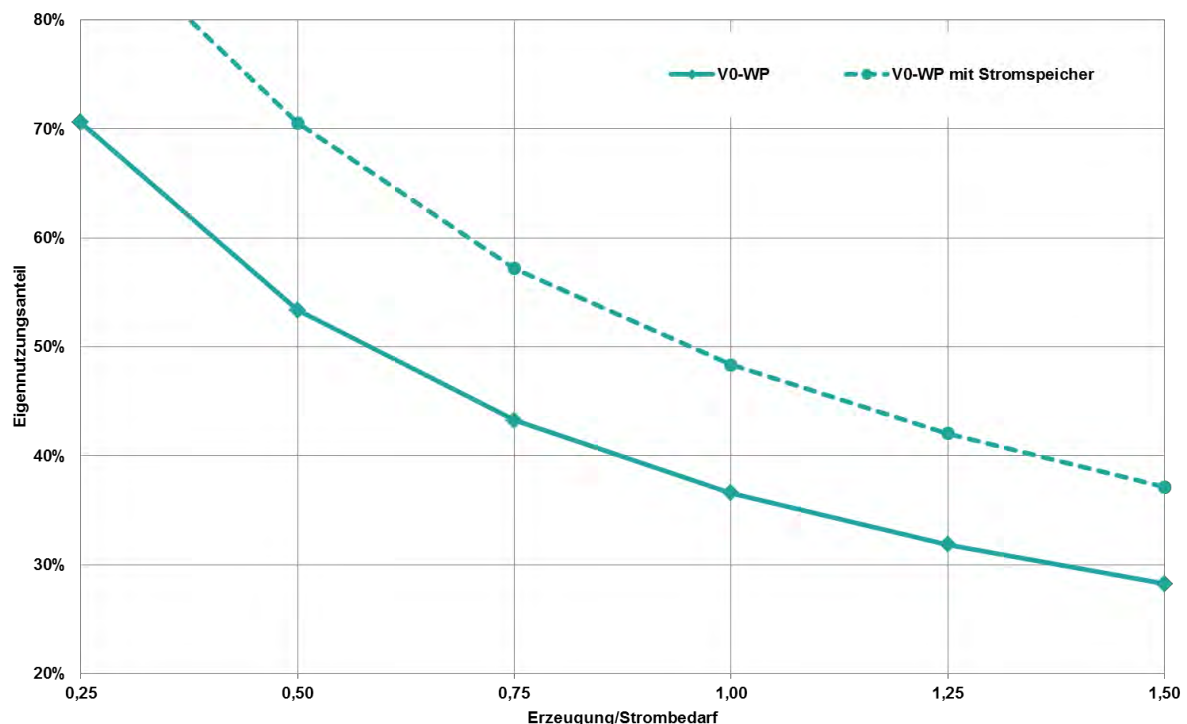


Abbildung 49: Eigennutzungsanteil in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Erzeugung und Bedarf mit und ohne Stromspeicher (Variante V0-WP)

Durch den Einsatz einer Batterie von 100 kWh zur Stromzwischen-speicherung lässt sich der Eigennutzungsanteil deutlich erhöhen. Bei einem Verhältnis von Erzeugung zu Bedarf von 1 erhöht sich der Eigennutzungsanteil um knapp 12 Prozentpunkte.

Es ist jedoch zu beachten, dass wegen der Verluste der Batterie eine solche Schule tatsächlich kein „Plus“ mehr aufweist. Auf der anderen Seite müssten Überlegungen angestrengt werden, ob in einer Plusenergiegebäude-Definition, Batteriespeicher gegebenenfalls - z.B. über anzupassende Primärenergiefaktoren für nicht zu Zeiten von PV-Überproduktion eingespeisten Strom- positiv bewertet werden.

Gebäude als Wärmespeicher

Mit der Untersuchung von Wärmespeichern soll eingeschätzt werden, wie sich die Speicherfähigkeit des Gebäudes auf den Eigennutzungsanteil auswirkt, wenn die Wärmepumpe im Sinne eines Lastmanagements gesteuert wird.

Die abschätzende Lastganganalyse erfolgt unter folgenden Randbedingungen:

- Die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes wird auf Basis der Untersuchung von [sch14] abgeschätzt. Unter der Annahme, dass das Gebäude bis zu einem oberen Grenzwert von 24°C zur Wärmespeicherung beheizt werden kann, ergibt sich eine Wärmespeicherfähigkeit

von rund 60 Wh/m² für ein Gebäude mit hohem Dämmstandard. Überträgt man diesen Wert auf die FOS/BOS Erding ergeben sich 458 kWh als Wärmespeicher.

- Die Wärmespeicherung wird nur während der Heizperiode genutzt, wenn die PV-Anlage Strom liefert, die Wärmepumpe noch Kapazität hat und der Wärmespeicher noch nicht voll ist.
- Die Wärmepumpe mit einer Leistung von 360 kW kann nur bis zu einer minimalen Teillast von 12,5 % ihrer Leistung modulieren. Die Mindestlaufzeit beträgt 20 Minuten.
- Die mit der Aufheizung des Gebäudes zum Lastmanagement einhergehenden Auswirkungen auf den Komfort und ansteigende Wärmeverluste werden in dieser Untersuchung nicht einbezogen.

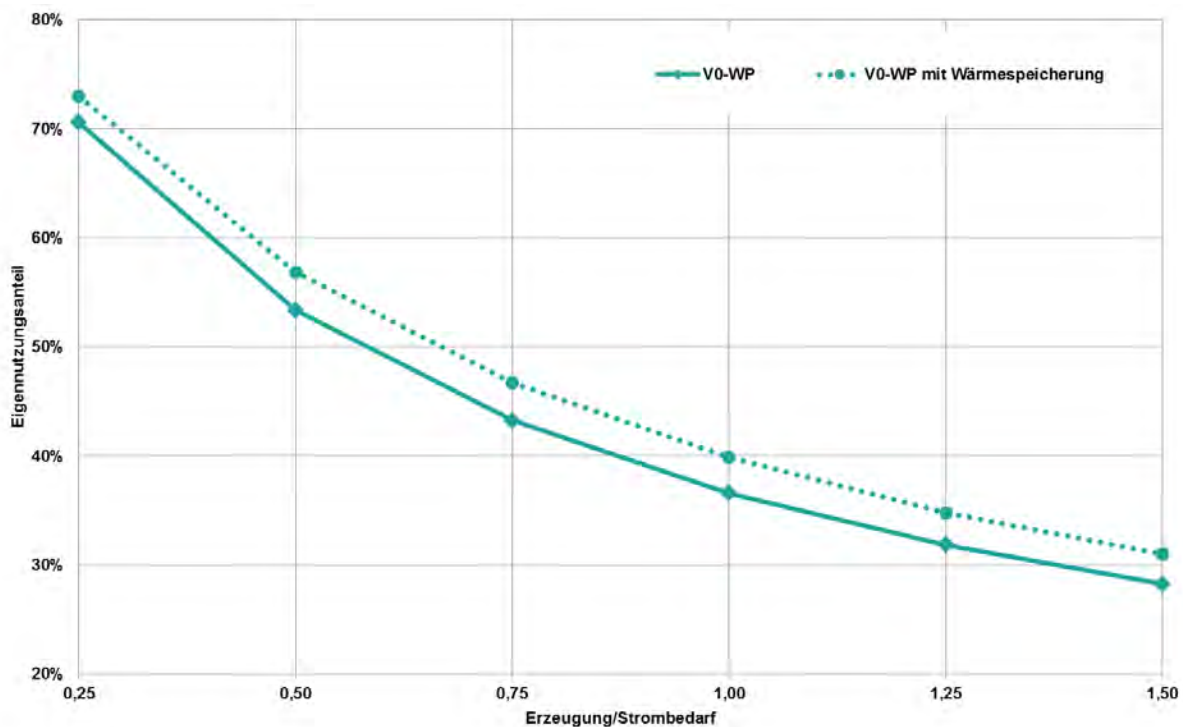


Abbildung 50: Eigennutzungsanteil in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Erzeugung und Bedarf mit und ohne Wärmespeicherung (Variante V0-WP)

Da der Wärmespeicher nur im Winter genutzt werden kann, fällt der Effekt im Vergleich zum Stromspeicher geringer aus. Der Eigennutzungsanteil könnte durch Lastmanagement und Nutzung des Gebäudes zur Wärmespeicherung im Mittel um 3 Prozentpunkte gesteigert werden. Bei einer im Verhältnis zum Strombedarf kleinen PV-Anlage kann die Wärmespeicherung nur noch geringfügig genutzt werden, da im Winter schon nahezu der gesamte PV-Strom selbst genutzt wird. Die Steigerung durch den Wärmespeicher beträgt daher beim Verhältnis 0,25 nur noch gut 2 Prozentpunkte.

Diese Abschätzung zu den Auswirkungen eines Lastmanagements, bei dem das Gebäude als Wärmespeicher in Kombination mit einer elektrischen Wärmepumpe genutzt wird, kann nur als erste Einschätzung dieser Möglichkeit dienen. Ob an einer Schule Raumtemperaturen bis zu 24 °C die Behaglichkeit zu sehr einschränken würde oder wie das Ablüften der gespeicherten Wärme verhindert werden kann, wird hier nicht weiter bewertet.

In einem nächsten Schritt sollen auch noch die Auswirkungen einer Plusenergieschule mit der derselben Schule ohne PV-Anlage auf das öffentliche Netz untersucht werden. Eine Auswertung der Lastganganalyse als Dauerlinie ist in nachfolgender Grafik dargestellt.

Nachfolgende Auswertungen können nur erste Hinweise auf diese Thematik geben und sollten durch weitere Untersuchungen verifiziert werden.

Angemerkt sei ferner, dass die Dauerlinien wegen der schon erwähnten Datenausfälle beim Monitoring nicht den vollen Zeitraum eines Jahres von 8.760 Stunden umfassen. Auf die Ergebnisse hat dies jedoch keinen Einfluss.

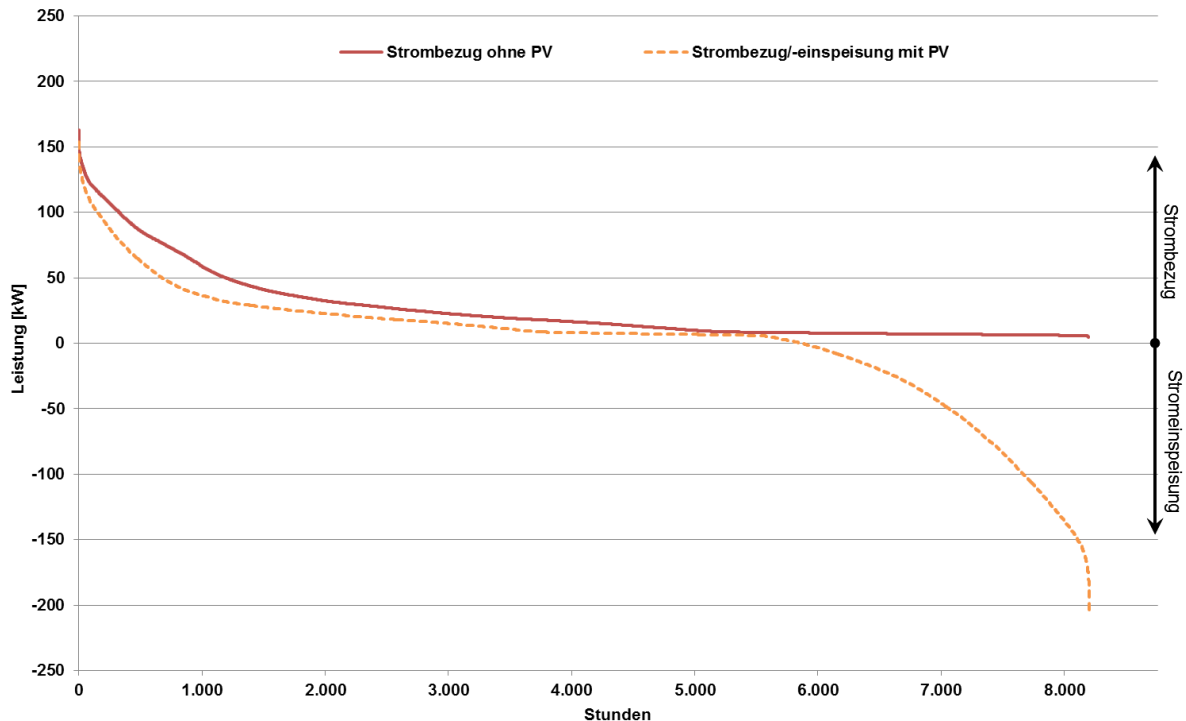


Abbildung 51: Dauerlinie der Leistung am Netzanschlusspunkt mit und ohne PV-Anlage (Variante V0-WP)

Ohne PV-Anlage zeigt die Dauerlinie einen maximalen Strombezug von 162 kW. Mit PV-Anlage zur Umsetzung des Plusenergiestandards liegt die Lastspitze bei 154 kW. Dies ist nur ein sehr geringer Unterschied, der dadurch zu erklären ist, dass manche Lastspitzen zu Zeiten geringer PV-Produktion (z.B. durch Bewölkung) sind.

Daraus lässt sich ableiten, dass der Netzbetreiber durch die PV-Anlage trotz des hohen Eigennutzungsanteils von 37 % keine Vorteile bei den Lastspitzen hat und die gleiche Bezugsleistung vorhalten muss, wie bei einer Schule ohne PV-Anlage.

Jedoch gibt es Spitzen bei der PV-Einspeisung von bis zu 210 kW (entsprechend 77 % der installierten PV-Leistung), die gegebenenfalls das öffentliche Netz „belasten“. Die Vorgaben des EEGs geben dem Netzbetreiber allerdings für Anlagen größer 100 kWp die Möglichkeit, jederzeit die Ist-Einspeisung abzurufen und die Einspeiseleistung bei Netzüberlastung ferngesteuert zu reduzieren. Für die entgangene Einspeisevergütung muss der Netzbetreiber den Anlagenbetreiber nach EEG § 12 jedoch entschädigen.

Würden im Rahmen eines Lastmanagementsystems beispielsweise Einspeiseleistungen über 160 kW gekappt, so dass nur maximal 60 % der installierten PV-Leistung eingespeist werden würde, so beträfe dies nur 40 h im Jahr.

Die Auswirkungen des Stromspeichers (vgl. Erläuterungen bei Abbildung 49) auf die Dauerlinie ist in nachfolgender Grafik dargestellt.

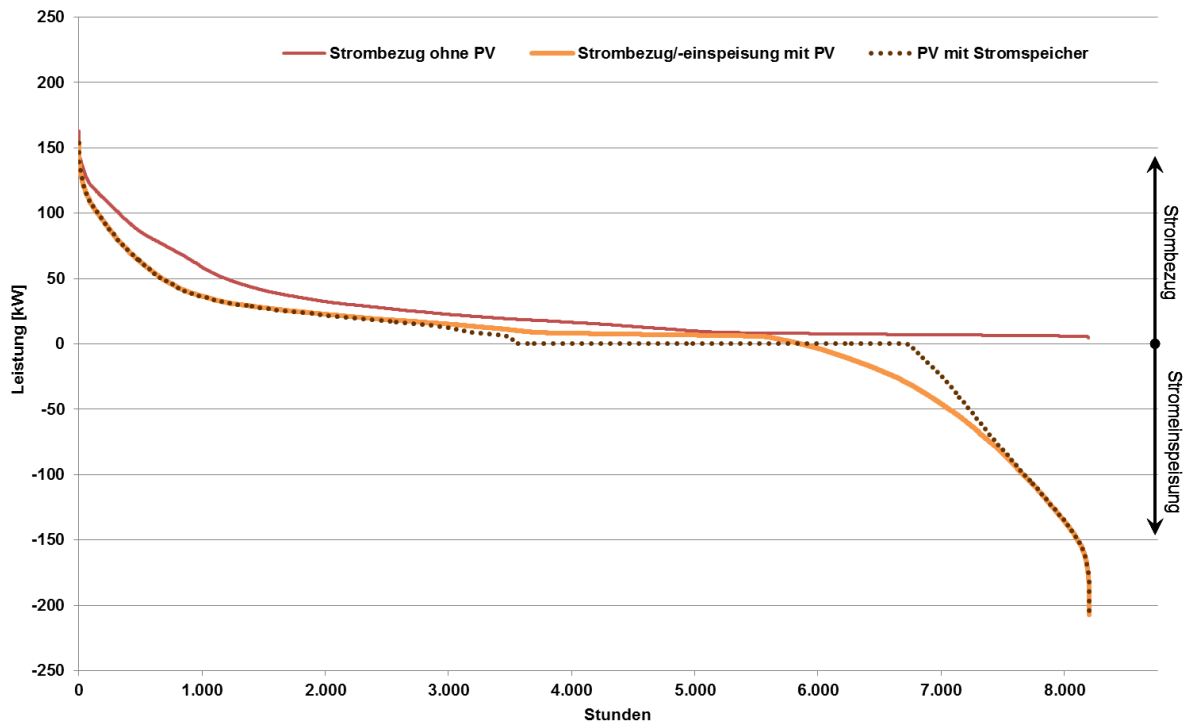


Abbildung 52: Dauerlinie der Leistung am Netzanschlusspunkt mit PV-Anlage und Stromspeicher (Variante V0-WP)

Es wird ersichtlich, dass durch den Stromspeicher in einem weiten Zeitfenster weder Strom bezogen noch eingespeist wird. Auf die Lastspitzen hat der Stromspeicher jedoch keine Auswirkungen. Grundsätzlich bestünde jedoch durch intelligentes Lastmanagement die Möglichkeit, mit einem Stromspeicher auch die Spitzen zu reduzieren.

Zum Vergleich hierzu werden die Dauerlinien mit und ohne PV-Anlage auch für die Variante V4-FW gezeigt, die ohne WP-Strom und Lüftungsstrom den geringsten Bedarf aufweist und für die somit auch die kleinste PV-Anlage für das Erreichen des Plusenergiestandards benötigt wird.

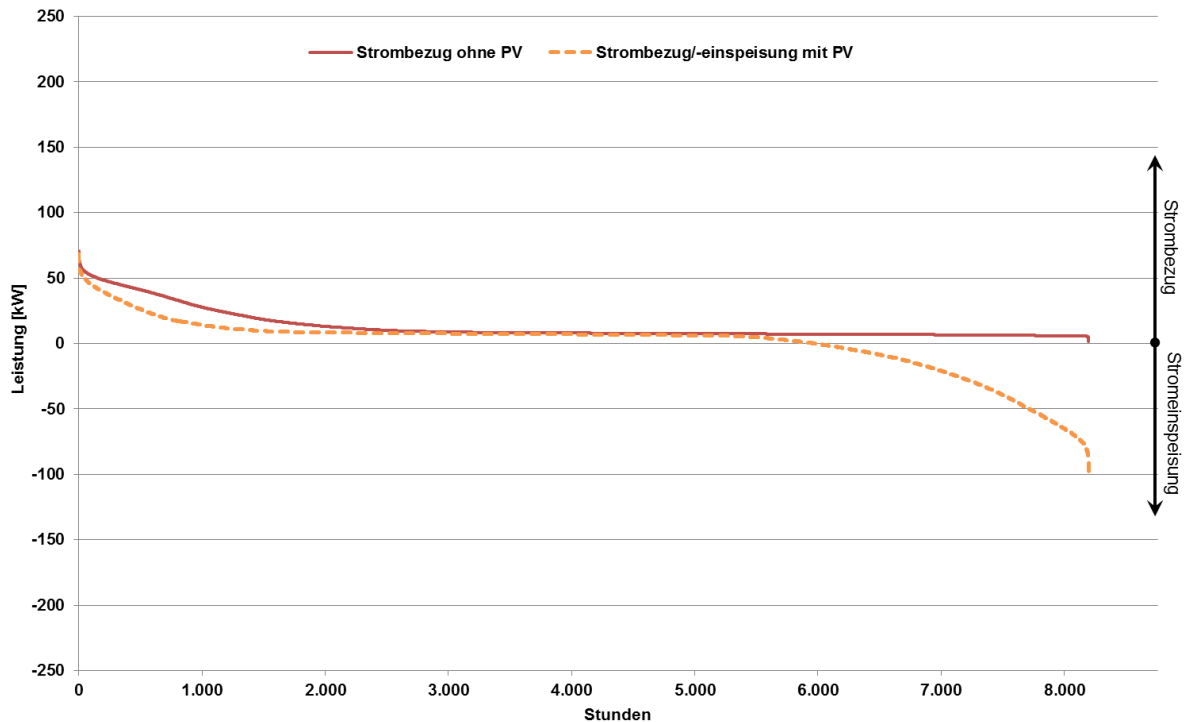


Abbildung 53: Dauerlinie der Leistung am Netzanschlusspunkt mit und ohne PV-Anlage (Variante V4-FW)

Hier liegen die Bezugsspitzen mit und ohne PV-Anlage nur noch bei 70 bzw. 68 kW. Durch die kleinere PV-Anlage ist auch die Einspeisespitze mit rund 100 kW im Vergleich zur Variante V0-WP deutlich geringer.

14.5 Auswertung des Monitorings der Grundschule Prüfening

Auf dem Dach des obersten Geschosses der Grundschule Prüfening wurde eine Photovoltaikanlage mit 61 kW Peak in Südausrichtung installiert. Von dieser wurden im Zeitraum von Anfang November 2013 bis Ende Oktober 2014 57.400 kWh PV-Strom erzeugt, wovon 27.820 kWh in der Schule als Eigenstrom genutzt werden konnten. Dies entspricht einem Eigennutzungsanteil von 48 %. Hierbei lag das Verhältnis aus PV-Stromerzeugung zu Stromverbrauch bei 0,53.

Fügt man dieses Ergebnis für den Eigennutzungsanteil in die Abbildung 48 der Ergebnisse der Lastganganalyse der FOS/BOS Erding ein, so erhält man nachfolgende Abbildung.

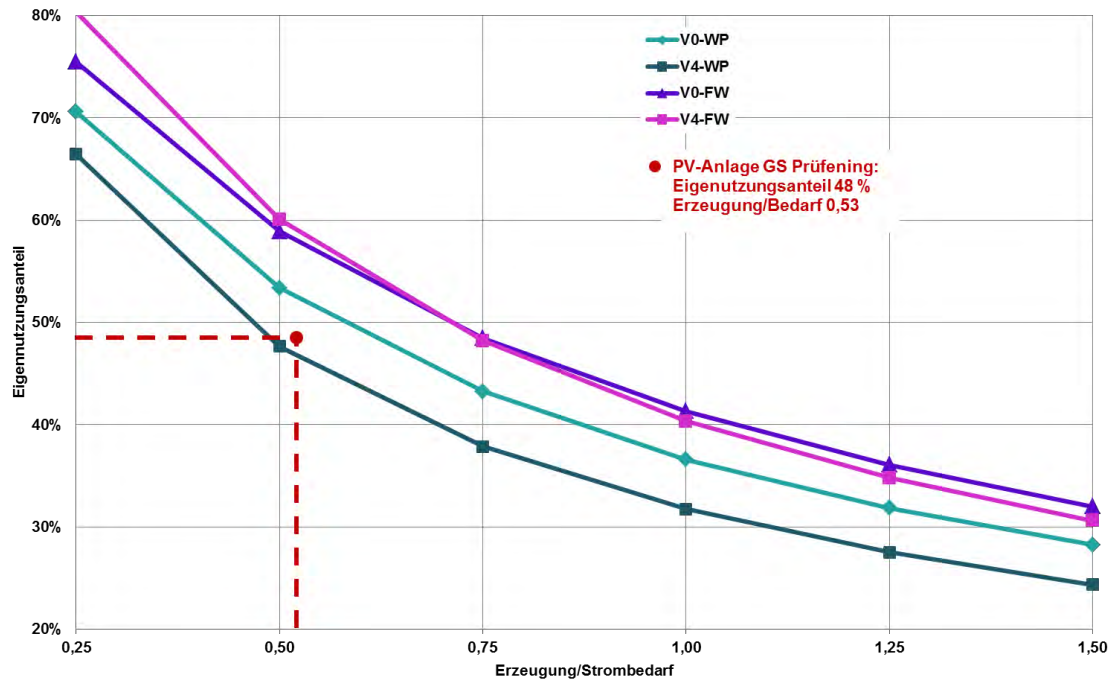


Abbildung 54: Eigennutzungsanteil GS Prüfening in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Erzeugung und Bedarf

Es lässt sich feststellen, dass der Eigennutzungsanteil für die mit Grundwasser-Wärmepumpe versorgte Grundschule Prüfening zwischen den Werten für die natürlich und mechanisch belüfteten Wärmepumpen-Varianten der FOS-BOS Erding liegt. Da die Grundschule Prüfening teilweise mechanisch belüftet wird (Turnhallen, Sanitär-, Nebenflächen), zeigt sich eine gute Übereinstimmung des gemessenen Wertes mit den Ergebnissen für den Eigennutzungsanteil der Lastganganalyse.

14.6 Fazit

Die durchgeführte Lastganganalyse auf Basis eines gemessenen Jahres-Strom- und Wärmelastgangs und eines synthetisierten PV-Erzeugungslastgangs zeigt, dass der Eigennutzungsanteil mit 32 bis 41 % durch die gute Korrelation von Strombedarf und PV-Stromerzeugung über dem von Einfamilienhäusern liegt. Die Höhe des Eigennutzungsanteils von Plusenergieschulen hängt hierbei auch vom Versorgungskonzept ab. Bei der Wärmepumpen-Variante mit natürlicher Lüftung ist der Eigennutzungsanteil um 8 Prozentpunkte unter dem der Fernwärme-Variante mit 40 %. Dies liegt daran, dass der hohe Strombezug bei der Wärmepumpen-Variante im Winter zu Zeiten geringer Solarstromausbeute liegt. Bei der Wärmepumpen-Variante mit mechanischer Lüftung wird dieser Effekt durch den im Jahresverlauf gleichmäßig verteilten Lüfterstrom abgeschwächt. Hier liegt der Eigennutzungsanteil der Wärmepumpen-Variante nur 4 Prozentpunkte unter dem der entsprechenden Fernwärme-Variante. Allein einen hohen Eigennutzungsanteil anzustreben, ist für die Netzfrendlichkeit einer Plusenergieschule nicht die entscheidende Größe. Es hat sich gezeigt, dass ein hoher jährlicher Eigennutzungsanteil nur einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Bezugs- und Einspeisespitzen hat. Eine Reduktion von Einspeisespitzen könnte beispielsweise über ein intelligentes Lastmanagement auch in Verbindung mit einem Stromspeicher gelingen.

PV-Anlagen von Schulen sind in der Regel an ein Niederspannungsnetz angeschlossen. Eine dezentrale Einspeisung ist für das Niederspannungsnetz nur problematisch, wenn zu wenig Last-Abnehmer oder eine hohe PV-Anlagendichte vorliegen. Jedoch muss durch die Regelung des Kraftwerksparks auf die PV-Stromeinspeisung und die Abnahme des Strombezugs durch Eigenstromnutzung reagiert und die Netzstabilität auf Hochspannungsebene gewährleistet werden.

Bei dem angestrebten weiteren Ausbau der PV-Leistung ist eine Reduktion von Einspeisespitzen essentiell, um negative Auswirkungen auf die Stromnetze und den Kraftwerkspark möglichst vermeiden zu können.



15.0 Zusammenfassung

Nach EU-Gebäuderichtlinie ist zukünftig für alle Neubauten die Anforderung eines Energiebedarfs von nahezu Null-Energie-Häusern zu erfüllen. Der geringe restliche Bedarf ist zu einem ganz wesentlichen Anteil durch Energie aus erneuerbaren Quellen zu decken. Plusenergieschulen übertreffen diese Anforderung sogar. Als Pilotprojekte haben Plusenergieschulen als Multiplikatoren eine wichtige Vorreiterrolle und stellen einen wichtigen Baustein zur Umsetzung der energiepolitischen Ziele dar.

Eine durchgeführte Literaturrecherche bezüglich Niedrigenergieschulen zeigt, dass bereits eine Vielzahl von Schulen energieeffizient gebaut bzw. saniert wurde. Energetische Ziele bei der Umsetzung dieser Schulen waren Passivhausstandard, Minimierung des Primärenergiebedarfs, 3-Liter-Schulen, CO₂-Neutralität, aber auch Plusenergiestandard. Die energieeffizient geplanten Schulen weisen bei einer großen Bandbreite an Größen, Grundrissformen und Kubaturen hohe Kompaktheit und einen hohen Dämmstandard auf. Bei der Wärmeerzeugung werden vor allem Wärmepumpen, aber auch Fernwärme und Pelletkessel eingesetzt. Es sind fast ausschließlich mechanisch belüftete Gebäude zu finden. Der Schwerpunkt bei der Energieerzeugung liegt auf Photovoltaik-Anlagen.

Ergebnis einer Potenzialanalyse bezüglich der Nutzungsmöglichkeiten Erneuerbarer Energien an Plusenergieschulen war, dass Photovoltaik-Module, die sich zur Dachflächennutzung aber auch zur weiteren Einbindung in die Gebäudehülle eignen, ein großes Potenzial für die Stromerzeugung bieten. Kleinwindkraftanlagen auf dem Schulgelände können auch bei günstigen lokalen Voraussetzungen wegen der geringen Erträge nur ergänzend eingesetzt werden. Für die Wärmeerzeugung eignen sich Geothermie, Biomasse und gegebenenfalls Fernwärme. Ob eine Erdwärmenutzung in Frage kommt, kann nur durch Untersuchung der lokalen geologischen Gegebenheiten in Erfahrung gebracht werden. Bei einer Verwendung von Holzpellets als Energieträger für eine Plusenergieschule sollte gewährleistet sein, dass ausschließlich lokale Holz-Reststoffe aus nachhaltiger Forstwirtschaft eingesetzt werden. Besteht die Möglichkeit eines Fernwärmeanschlusses, so ist für eine zu realisierende Plusenergieschule ein niedriger Primärenergiefaktor wichtig.

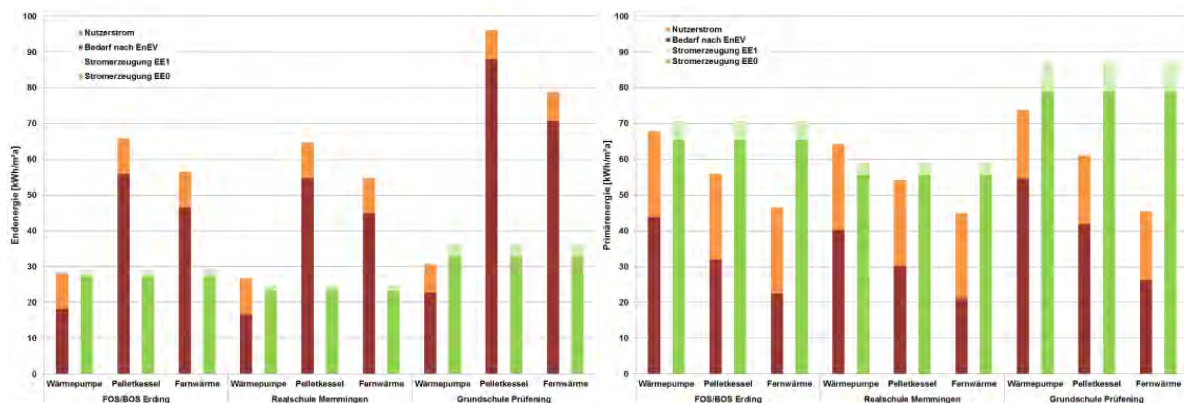
Als Untersuchungsschwerpunkt wurde anhand von Beispielschulen die Umsetzbarkeit von Plusenergieschulen geprüft. In einem ersten Schritt wurde eine Berechnungsmethodik für Plusenergieschulen entwickelt, welche den Energiebedarf für Heizung, Lüftung, Warmwasserbereitung und Beleuchtung, den Nutzerstrombedarf sowie die Stromerzeugung umfasst. Die erarbeitete Berechnungsmethodik wird als Definition für den Plusenergiestandard von Schulen vorgeschlagen:

Definition Plusenergieschule	
Bilanzebene	Primärenergie
Bilanzumfang	Bedarf und Erzeugung während Nutzung (keine graue Energie) - Q_P Primärenergiebedarf Gebäude nach EnEV / DIN V 18599 - $Q_{P,N}$ Primärenergetisch bewerteter Nutzerstrombedarf - $Q_{P,prod}$ Primärenergetisch bewertete Energieerzeugung
Bilanzgrenze	Schulgebäude (incl. zugehörigen Außenanlagen) alternativ: Schulgrundstück
Bilanzzeitraum	Jahresbilanz
Bilanzwerkzeug	Bedarfsermittlung für Heizung, Trinkwarmwasser, Lüftung, Beleuchtung nach DIN V 18599 (Mehrzonenmodell) Stromerzeugung nach Methodik der DIN V 18599-9
Primärenergiefaktoren	Festlegung analog für die Schule anzuwendender EnEV Primärenergiefaktoren bei Anwendung der EnEV 2013: f_P Holz: 0,2 f_P Strombezug: 2,4 bzw. 1,8 (allg. Strommix) gemäß EnEV f_P erzeugter KWK-Strom: 2,8 (Verdrängungsstrommix) f_P erzeugter Strom aus PV und Windkraft: 2,4 bzw. 1,8 (analog allg. Strommix) f_P Fernwärme: nach Tabelle A.1 DIN V 18599-1 oder nach AGFW-Liste der veröffentlichten f_P -Bescheinigungen oder durch Berechnung von einem unabhängigen Sachverständigen nach dem Berechnungsverfahren der DIN V 18599
Bilanzbedingungen	I. Standardisierte Berechnung - Klima Bedarfsberechnung: Standardklima Deutschland nach EnEV 2013 - Klima PV-Erzeugung: Standort Potsdam - Klima Wind-Erzeugung: lokale Wetterdaten/Messungen - Nutzungsprofile gemäß Tabelle 4 DIN V 18599-10 - Nutzerstrombedarf: 8 kWh/m²a für Grundschulen, 10 kWh/m²a für sonstige Schulen II. Berechnung mit freien Randbedingungen (an die Schule angepasst) - Klima Bedarfsberechnung: Wetterdaten nach Region der DIN V 18599-10:2011-12 - Klima PV-Erzeugung: lokale Wetterdaten (z.B. Meteonorm) - Klima Wind-Erzeugung: lokale Wetterdaten/Messungen - Angepasste Nutzungsprofile - Angepasster Nutzerstrombedarf
Plusenergiestandard	Primärenergiejahresbilanz in kWh/m ² a bzw. kWh/a: $Q_P + Q_{P,N} - Q_{P,prod} < 0$
Nebenanforderungen	Gebäudehülle - Unterschreitung H_T' des EnEV-Referenzgebäudes um mindestens 30 % Beleuchtung - maximale Beleuchtungsleistung: 2 W/100 lx - Präsenzmelder in allen Bereichen - tageslichtabhängige Kunstlichtsteuerung in den Klassenzimmern Nutzerstrom - Erstellung eines Konzepts zur Minimierung des Nutzerstromverbrauchs Betriebsphase - Durchführung eines Monitorings Bei RLT-Anlage - Ventilatorleistung mindestens SFP 3 Bei Biomasseheizung - Einsatz regionaler Produkte aus nachhaltiger Forstwirtschaft

Die Berechnungsmethodik wurde exemplarisch an drei Beispielschulen angewendet. Hierfür wurden die Gebäudekubaturen der realisierten Schulen FOS/BOS Erding, Realschule Memmingen, Grundschule Prüfening verwendet und Randbedingungen für die Berechnung (Dämmstandard, Anlagentechnik, Nutzerstrombedarf, Energieerzeugung, Variantenrechnungen) festgelegt. Als Versorgungskonzepte wurden Wärmepumpe, Pelletkessel und eine Fernwärme (mit $f_P=0$) sowie für die Energieerzeugung eine auf dem Schuldach aufgeständerte Photovoltaikanlage und zusätzlich in die Fassade integrierte PV-Flächen untersucht.

Nach Definition wurde sowohl eine Berechnung mit Standardrandbedingungen (z.B. Standardklima, Nutzungsrandbedingungen nach DIN V 18599) als auch eine mit den lokalen Randbedingungen (z.B. Standortklima, an die geplante Schule angepasste Nutzungsrandbedingungen) durchgeführt. Die Berechnungen haben gezeigt, dass es hierbei zu stark abweichenden Ergebnissen kommen kann. Beispielsweise ist für eine Schule mit Standort Hamburg durch die geringere solare Einstrahlung das Erreichen eines "Plus" bei der Berechnung mit lokal angepassten Randbedingungen schwieriger als für eine Schule in Freiburg. Daher wird gemäß Definition gefordert, sowohl ein Plus bei der standardisierten Berechnung zu erzielen, um die Vergleichbarkeit des Plusenergiestandards zu gewährleisten, als auch bei der Berechnung mit den tatsächlichen Randbedingungen, um das Erreichen des "Plus" bei der Nutzung sicherzustellen.

Bei der Definition des Effizienzhaus-Plus-Standards für das BMVBS-Förderprogramm von Wohngebäuden wird die Anforderung gestellt, dass sowohl ein negativer Jahres-Primärenergiebedarf als auch ein negativer Jahres-Endenergiebedarf vorliegen muss. Bei der Berechnung der Beispielschulen hat sich herausgestellt, dass auf Endenergiebasis nur ein „Plus“ für das Versorgungskonzept Wärmepumpe erreichbar ist, jedoch nicht für die Versorgungskonzepte Pelletkessel und Fernwärme. Nachfolgende Grafik zeigt die Ergebnisse der endenergetischen im Vergleich zur primärenergetischen Bilanzierung bei Berechnung mit Standardrandbedingungen für die drei untersuchten Beispielschulen bei Variation des Wärmeversorgungskonzepts.



Vergleich endenergetische und primärenergetische Bilanzierung der Beispielschulen

Um einen technologieoffenen Ansatz zu gewährleisten, der den nicht erneuerbaren Ressourcenbedarf abbildet, beschränkt sich daher der erarbeitete Vorschlag für eine Definition auf den Nachweis eines negativen Jahres-Primärenergiebedarfs. Bei dieser Vorgehensweise ist es allerdings für die Versorgungskonzepte Pelletkessel und Fernwärme mit geringem Primärenergiefaktor vergleichsweise leicht, den Plusenergiestandard zu erreichen. Daher müssen über Nebenanforderungen eine energetisch hochwertige Gebäudehülle und effiziente Anlagentechnik eingefordert werden (s. Definition Plusenergieschule - Nebenanforderungen).

Die Berechnungen haben gezeigt, dass der Plusenergiestandard für alle drei Beispielschulen prinzipiell erreichbar ist. Allerdings ist bei höherer Geschossanzahl das Verhältnis von mit PV-Modulen belegbarer Dachfläche zum Energiebedarf ungünstig, so dass weitere Maßnahmen, wie z.B. PV-Belegung von Fassaden, verbesserte Effizienz der Anlagentechnik, erforderlich werden. Für die Umsetzung von Plusenergieschulen haben sich nachfolgende Punkte als empfehlenswert herausgestellt:

- Ein hoher Dämmstandard entsprechend einer H_T' Unterschreitung des EnEV-Referenzgebäudes um 30 bis 35 % sollte angestrebt werden. Weitere Maßnahmen zur Verbesserung des Dämmstandards haben nur noch geringe Auswirkungen. Bezogen auf den gesamten Bedarf inklusive Nutzerstrom können mit einem weiter verbesserten Dämmstandard (Passivhaus-Standard) bei den Beispielschulen nur noch Einsparungen von maximal 5 % erzielt werden.
- Effiziente Anlagentechnik für Wärmeerzeugung, Beleuchtung und gegebenenfalls Belüftung ist eine Grundvoraussetzung. Die Wärmeerzeugung muss zum Großteil auf Basis erneuerbarer Energieträger erfolgen.

- Die erforderliche Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ist durch eine Photovoltaikanlage abdeckbar. Wegen begrenzter Dachflächen sollten Photovoltaikanlagen mit hohem Wirkungsgrad (größer gleich 17 %) eingesetzt werden. Empfehlenswert ist eine flächenoptimierte Zick-Zack-Aufstellung der PV-Anlage z.B. in 10° Ost/West-Ausrichtung.
Bei der Energieerzeugung basierend auf einer Dach-Photovoltaikanlage ist die mit PV belegbare Dachfläche bezogen auf die Nettogrundfläche entscheidend. Das Verhältnis aus belegbarer Dachfläche und Nettogrundfläche sollte 0,3 nicht unterschreiten. Dies gelingt umso besser, je geringer die Geschossanzahl ist.

Die Investitionsmehrkosten für das Erreichen des Plusenergiestandards hängen stark von der gewählten Anlagentechnik ab. In Bezug auf die Referenzvariante ergeben sich Investitionsmehrkosten je nach gewählter Anlagentechnik von 30 bis zu über 200 € je Quadratmeter Nettogrundfläche. RLT-Anlagen zur vollständigen Be- und Entlüftung, ein Wärmeversorgungskonzept mit Erdsonden-Wärmepumpe und ein noch weiter verbesserter Dämmstandard sind hierbei am kostenintensivsten.

Zusätzlich wurde ein Vergleich des gemessenen Energieverbrauchs der Beispielschulen mit dem berechneten Energiebedarf der vorliegenden Energieausweise durchgeführt. Basis war hier nicht der fiktive Plusenergiestandard sondern das tatsächlich realisierte Schulgebäude. Der Bedarfs-Verbrauchsabgleich ergab einen deutlich geringeren Heizenergieverbrauch im Vergleich zum berechneten Bedarf. Eine Ursache für den zu hohen Bedarf ist nach den vorliegenden Erkenntnissen die Nutzungsrandbedingung des nach DIN V 18599-10 anzusetzenden Mindestaußenluftwechsels für die Zone Klassenzimmer. Dieser liegt im Vergleich zu den Daten von recherchierten Niedrigenergieschulen zu hoch. Aber dies allein kann die Diskrepanz nicht erklären. Die Ursachen hierfür sollten in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden. Unklarheiten bestehen beim für den EnEV-Nachweis anzusetzenden Nutzenergiebedarf für Trinkwarmwasser. Auch aus diesem Grund ist hier ein Abgleich schwierig. Da die Beleuchtung bei den Stromverbrauchsmessungen nicht separat erfasst wurde, konnte der Strombedarf für Beleuchtung und Nutzerstrom nicht ausgewertet werden.

Als weiterer Schwerpunkt dieser Studie wurde eine Lastganganalyse auf Basis eines Jahres-Strom- und Wärmelastgangs der FOS/BOS Erding und eines auf Basis von Globalstrahlungsmessungen synthetisierten PV-Erzeugungslastgangs durchgeführt. Untersucht wurde einerseits der Eigennutzungsanteil des produzierten PV-Stroms, der für die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage entscheidend ist, andererseits die Bezugs- und Einspeisespitzen, um die Auswirkung auf das öffentliche Netz einschätzen zu können.

Es hat sich gezeigt, dass der Eigennutzungsanteil einer Plusenergieschule trotz der Ferienzeiten mit 32 bis 41 % durch die im Tagesverlauf gute Korrelation von Strombedarf und PV-Stromerzeugung über dem von Einfamilienhäusern liegt. Die Höhe des Eigennutzungsanteils von Plusenergieschulen hängt hierbei auch vom Versorgungskonzept ab. Bei der Wärmepumpen-Variante ist der Eigennutzungsanteil je nach Lüftungskonzept 4 bis 8 Prozentpunkte unter dem der Fernwärme-Varianten. Dies liegt daran, dass der hohe Strombezug bei der Wärmepumpen-Variante im Winter zu Zeiten geringer Solarstromausbeute liegt.

Allein einen hohen Eigennutzungsanteil anzustreben, ist für die Netzfrendlichkeit einer Plusenergieschule nicht die entscheidende Größe. Vielmehr hat ein hoher jährlicher Eigennutzungsanteil nur einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Bezugs- und Einspeisespitzen. Eine Reduktion von Einspeisespitzen könnte beispielsweise über ein intelligentes Lastmanagement auch in Verbindung mit einem Stromspeicher gelingen. Die Reduktion von Bezugs- und Einspeisespitzen ist insbesondere bei dem angestrebten weiteren Ausbau der PV-Leistung essentiell, um negative Auswirkungen auf die Stromnetze und den Kraftwerkspark möglichst vermeiden zu können. In diesem Bereich sollten weitere Forschungsprojekte angeregt werden.

16.0 Verzeichnisse

16.1 Literaturverzeichnis

- [agf14] AGFW: Liste der f P -Bescheinigungen nach FW 309-1 nach Städten sortiert unter <https://www.agfw.de/> (Stand November 2014)
- [bmV09] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchswerte im NWG-Bestand vom 30. Juli 2009
- [bmu14] Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Nachhaltige Unterrichtsgebäude, Berlin 2014
- [bsw14] Bundesverband Solarwirtschaft e.V.: EEG-Reform - Das ändert sich ab August für Solarstrom-Erzeuger unter www.solarwirtschaft.de/presse-mediathek/pressemeldungen/pressemeldungen-im-detail/news/eeg-reform-das-aendert-sich-ab-august-fuer-solarstrom-erzeuger.html (Stand August 2014)
- [bvi14] BMVBS - Förderprogramm-Richtlinie des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung über die Vergabe von Zuwendungen für Modellprojekte im Effizienzhaus Plus-Standard im Jahre 2012 unter www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/B/forschungsinitiative-zukunft-bau-foerderrichtlinie-modelle-ehp-standard.html?nn=75494 (Stand Februar 2014)
- [bwi14] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.): Der Wald in Deutschland - Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur, Berlin 2014
- [car13] C.A.R.M.E.N. e.V. (Hrsg.): Kleinwindkraftanlagen – Hintergrundinformationen und Handlungsempfehlungen für die Landwirtschaft, C.A.R.M.E.N.-Publikation 2013
- [dbu13] Recherche auf der Projektdatenbank der DBU unter <http://www.dbu.de/341.html> (Stand November 2013)
Gymnasium Diedorf: AZ 29892, St. Franziskus-Grundschule Halle: AZ 28080, Schulzentrum Mitte Nordhorn: AZ 24515; Riedbergschule Frankfurt: AZ 20708, Justus-von Liebig-Schule Waldshut: AZ: 17802,
- [den13] Recherche auf der Projektdatenbank der dena unter <http://www.energieeffizienz-online.info> (Stand Dezember 2013)
Grundschule Gronau ID 1367; Realschule und Gymnasium Neckargmünd ID 307, Herman-Nohl-Schule Osnabrück ID 195, Realschule Dachau-Augustensfeld ID 1280, Wilhelm-Busch-Grundschule Hamm ID 1422, Singbergschule im Wetteraukreis ID 1637, Schule SeeCampus Niederlausitz ID 1282
- [dep14] Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband unter <http://www.depv.de/de/presse/pressemitteilungen/> (Stand November 2014)
- [dpi14] Deutschen Pelletinstituts unter <http://www.depi.de/de/infothek/> (Stand November 2014)
- [dwd14] Deutscher Wetterdienst (DWD): Aktuelle Klimafaktoren für alle Postleitzahlen unter <http://www.dwd.de/klimafaktoren> (Stand November 2014)
- [fuc12] Fuchs, Lunz, et al.: Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antrieb, RWTH Aachen 2012
- [ear14] Energieagentur Regensburg: Energiemonitoring Monatsberichte für die Grundschule Prüfening im Auftrag der Stadt Regensburg, November 2013 bis Oktober 2014
- [eco11] Atanasiu (Projektkoordinator) in Zusammenarbeit mit Ecofys Germany GmbH und Danish Building Research Institute: Principles For Nearly Zero-Energy Buildings, BPIE 2011

- [eff13] Recherche auf der Projektdatenbank von EnEff:Schule unter <http://www.eneff-schule.de/index.php/Demonstrationsobjekte/Demonstrationsobjekte-Allgemein/demonstrationsobjekte.html> unter den Links zu (Stand Dezember 2013)
- [ekz07] Gebäudemanagement der Stadt Aachen, Energiemanagement Energiekennzahlenbericht Schulen 2007
- [eno13] Nullenergiegebäude - Karte internationaler Projekte u.a. "educational building" unter <http://www.enob.info/de/nullenergie-plusenergie-klimaneutrale-gebaeude-im-stromnetz-20/nullenergiegebaeude-karte-internationaler-projekte/> (Stand Dezember 2013)
- [erh11] Erhorn, Vortragsfolien zum Workshop: Wege zur Plusenergieschule, 2. Kongress "Zukunftsraum Schule", Stuttgart, 22.u. 23.11.2011
- [eur13] The European Portal For Energy Efficiency In Buildings unter <http://www.school-of-the-future.eu/> (Stand Dezember 2013)
- [fos14] König: Fachoberschule und Berufsoberschule in Erding – „wie gebaut“, Projektzusammenstellung und Ergebnisse, Karlsfeld 2014
- [geb11] Information der danfoss GmbH: „Hochmoderne Lüftungsanlage für Passivhaus-Schule in Freiberg“ in Moderne Gebäudetechnik, Sonderausgabe 2011
- [gsh13] Grundschule Klein Flottbeker Weg in Hamburg - CO2-neutrales Gebäude in Holz- und Massivbauweiseunter http://www.baunetzwissen.de/objektartikel/Nachhaltig-Bauen-Grundschule-in-Hamburg_3116735.html (Stand Dezember 2013)
- [hal13] Artikel „Eine der modernsten Schulen Deutschlands unter “<http://www.mz-web.de/halle-saalekreis/st--franziskus-grundschule-in-halle-eine-der-modernsten-schulen-deutschlands,20640778,24353438.html> (Stand November 2013)
- [heg13] Hegger, Fafflok, et al.: Aktivhaus –Das Grundlagenwerk, Callwey 2013
- [hel10] Held: Photovoltaik aus Sicht der Ökobilanz, Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) Vortragsfolien, Vortrag gehalten Bauzentrum München, Dezember 2010
- [ibp10] Leitfaden: Besseres Lernen in energieeffizienten Schulen
Hrsg.: Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2010
- [ihb13] IHB - Netzwerk der Holzindustrie: Europas Abhängigkeit von Pelletimporten steigt, IHB-Nachrichten vom 1.11.2013 www.ihb.de
- [ise14] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, zusammengestellt von Dr. Harry Wirth, Fassung vom 28.5.2014, www.pv-fakten.de
- [iwu14] Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU): Berechnungsblatt zur Bestimmung der tatsächlichen der Gradtagzahl (GTZ) für 42 deutsche Wetterstationen (Daten des Deutschen Wetterdienstes) unter <http://www.iwu.de/downloads/fachinfos/energiebilanzen/#c203> (Stand August 2014)
- [jac11] Jacobsen, Hutter et al.: Neubau der Fach- und Berufsoberschule in Erding: Nachhaltiges Passivhaus mit extrem niedrigem Gesamt-Primärenergiebedarf, Schlussbericht, Kirchheim, März 2014
- [klu01] Kluttig, Dirscherl, et al. : Energieverbräuche von Bildungsgebäuden in Deutschland, gi-Gesundheits-Ingenieur 122 (2001), H. 5, S. 221-233
- [kön14] König: Schule Hohen Neuendorf - Konzeptvergleich, Vortragsfolien zugesendet September 2014

- [lam14] Lam, Hiller: Schwierigkeiten bei der Verwendung der TRY Daten 2011 für Deutschland in der thermischen Simulation, BauSIM2014, Fifth German-Austrian IBPSA Conference RWTH Aachen University, S. 395 – 401, 2014
- [lfu14] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Globalstrahlungs- und Lufttemperaturmessung 2013 in 10-Minutenwerten für die Messstation Eichenried (LK Erding)
- [lys10] Lysow, Reiß: Entwicklung eines innovativen Energiekonzepts für die Staatliche Realschule mit Sporthalle in Memmingen sowie begleitende Beratung bei der Planung und Umsetzung des Konzepts, IBP-Bericht WB149/2010
- [lys14] Interne Übersicht der Verbrauchswerte der Realschule Memmingen für 2010 bis 2012, Mail von Frau Lyslow vom 24.07.2014
- [mar11] Marszal, Heiselberg: Zero Energy Building definition - a literature review, Denmark, 2011
- [met12] Meteonorm, Global Meteorological Database, Version 7, 2012
- [mus11] Musall, Voss: Ziel Klimaneutrale Gebäude – von der Bilanzierung zur Umsetzung, HLH Bd. 62 Nr. 12, 2011
- [paa13] Paar, Herbert et al.: Transformationsstrategien von fossiler zentraler Fernwärmeversorgung zu Netzen mit höheren Anteilen erneuerbarer Energien, ifeu, GEF Ingenieur AG, AGFW, Endbericht, Februar 2013
- [pel14] www.pelleteinkauf.de/Import.shtml (Stand November 2014)
- [peq13] PlusEnergieQuartier Oberursel, Erarbeitung und Planung eines Konzeptes für ein prototypisches Plusenergiequartier auf einem Grundstück in Oberursel, Pilotprojekt im Rahmen der Förderinitiative Energieeffiziente Stadt, gefördert durch das BMWi, Schlussbericht, Oktober 2014
- [phd13] Recherche auf der Passivhaus-Datenbank unter www.passivhausprojekte.de, (Stand Dezember 2013)
Realschule Poing ID 3803, Gymnasium Buchloe ID 380, Grundschule Frankfurt/M. (Berg-Enkheim) ID 2548, Lore-Lorentz-Berufskolleg Düsseldorf ID 2188, Karl-Günzel-Schule Freiberg ID 2104, Grundschule Dresden-Loschwitz ID 1991, Herman-Nohl-Schule Osnabrück ID 2066, Valentin-Senger Grundschule Frankfurt/M. (Bornheim) ID 1955, Schule SeeCampus Niederlausitz ID 2002, Schule mit Hausmeisterwohnung Köln ID 1021, Erweiterungsbau Realschule Neusäß ID 1231, Erweiterungsbau Haupt- und Realschule Baddeckenstedt ID 0626, Erweiterungsbau Ganztagsbetreuung Aichtal ID 0076
- [phi06] Passivhausinstitut: Passivhaus-Schulen, Protokollband Nr. 33, Darmstadt 2006
- [phs06] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser: Passivhaus-Schulen, Protokollband Nr. 33, Juli 2006
- [osc09] Oschatz: Erarbeitung eines Leitfadens zum Abgleich Energiebedarf – Energieverbrauch, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2009
- [owl13] Artikel „Plus-Energie-Schule – Hochschule bekommt 300.000 Euro für wissenschaftliche Begleitung der Sanierung des Felix-Fechenbach-Berufskollegs“ vom 27.07.2013 unter <http://www.hs-owl.de/hsnews/news/newdetail/news/plus-energie-schule-hochschule-bekommt-300000-euro-fuer-wissenschaftliche-begleitung-der-sanier/884.html> (Stand Dezember 2013)
- [rat12] Rath: Analyse von Lastganglinien an Schulen - Phase I, Untersuchungsbericht, 2012



- [rat13] Rath: Analyse von elektrischen Lastganglinien – Spezifische Kennzahlen von 43 Schulen Vortragsfolien zum Workshop: Energieeffiziente Schule, 3. Kongress "Zukunftsraum Schule", Stuttgart, 13.11.2013
- [rei13] Reiß, Erhorn, Geiger, et al.: Energieeffiziente Schulen – EnEff:Schule, Fraunhofer IRB Verlag 2013
- [sch14] Schneegans, Klimke, Riemer: Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme, TU München, Juni 2014
- [sft14] Technische Daten der Kleinwindanlage Silent Future-Tec unter <http://www.silentfuturetec.at/index.php/windenergie/produkte> (Stand Oktober 2014)
- [sma14] Sunny Home Manager- Die Schaltzentrale für intelligentes Energiemanagement unter <http://www.sma.de/produkte/monitoring-control/sunny-home-manager.html> (Stand Oktober 2014)
- [ubw05] Umweltministerium Baden-Württemberg (Hrsg.), Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, Mai 2005
- [wik14] Grafik „Zeitreihe der Lufttemperatur in Deutschland“ unter http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Temperaturreihe_Deutschland,_Jahr,_30-10.PNG#mediaviewer/File:Temperaturreihe_Deutschland,_Jahr,_30-10.PNG (Stand August 2014)
- [zae13] Kuckelkorn, Volz: Neubau der Fach- und Berufsoberschule in Erding, Dokumentation des Projektverlaufs zur Monitoringphase zum Projektstand bis 31.12.2012, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., März 2013
- [zae14] Monitoringdaten der FOS/BOS Erding, zur Verfügung gestellt vom Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., Messungen und Auswertungen bis August 2014
- [zwp13] Projektdaten zur Emma-Schule Seligenstadt unter <http://www.zwp.de/index.php?id=371&type=98&L=0> (Stand Dezember 2013)
- [zuk13] Tagungsunterlagen der Kongresse "Zukunftsraum Schule" der Jahre 2011, 2012 und 2013 unter <http://www.zukunftsraum-schule.de> (Stand Dezember 2013)

16.2 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Bewertung von Plusenergieschulen [erh11]
Abbildung 2: Aufdachmontage in Zick-Zack-Aufstellung (Quelle: www.solarworld.de)
Abbildung 3: Feststehender PV-Sonnenschutz (Quelle: www.baunetzwissen.de)
Abbildung 4: Semi-transparente PV-Module in der Fassade (Quelle: www.baunetzwissen.de)
Abbildung 5: Semi-transparente PV-Verglasung als Dachoberlicht (Quelle: <http://www.onyxsolar.com>)
Abbildung 6: Übersichtskarte Oberflächennahe Geothermie für München mit umliegenden Landkreisen (Quelle: <http://geothermie.geologie.bayern.de>)
Abbildung 7: Übersichtskarte Bayern - Potenziale zum Bau von Erdsondenanlagen (Quelle: Energie-Atlas Bayern)
Abbildung 8: Hydrogeologische Kriterien zur Anlage von Erdwärmesonden in Baden-Württemberg [ubw05]
Abbildung 9: Hamburg - Bereiche mit Einschränkungen für die Errichtung von Erdwärmesonden (Quelle: GLA Hamburg)
Abbildung 10: Mögliche Unterbringung von Erdsonden auf dem Gelände der FOS/BOS Erding (Quelle Lageplan: kplan AG)
Abbildung 11: Mögliche Unterbringung von Erdsonden auf dem Gelände der Realschule Memmingen (Quelle: Amtlicher Lageplan)
Abbildung 12: Mögliche Unterbringung von auf dem Gelände der Grundschule Prüfening (Quelle Lageplan: twoo architekten GmbH)
Abbildung 13: Waldverteilung in Deutschland [bwi14]
Abbildung 14: Pelletproduktion und Inlandsbedarf in Deutschland [dpi14]
Abbildung 15: ENplus zertifizierte Pelletwerke in Deutschland [dpi14]
Abbildung 16: Horizontal- und vertikalachsige Windkraftanlagen (Quelle: kleinwindkraft.wordpress.com/technische-faktoren/)
Abbildung 17: Komponenten einer horizontalachsigen Windkraftanlage [car13]
Abbildung 18: Zunahme der Windleistung mit der Windgeschwindigkeit [car13]
Abbildung 19: Windkarte Deutschland (10 m)1981-2000 (Quelle: DWD)
Abbildung 20: Ausschnitt Region Hamburg aus Windkarte Deutschland (10 m)1981-2000 (Quelle: DWD)
Abbildung 21: Umgebung der FOS/BOS Erding (Quelle: google maps)
Abbildung 22: Zeitreihe der Lufttemperatur in Deutschland [wik14]
Abbildung 23: Mittlere Globalstrahlung im Zeitraum 1981 bis 2010 (Quelle: <http://www.dwd.de>)
Abbildung 24: Fotos der Südansicht, des Treppenhauses und eines Kassenzimmers der FOS/BOS Erding (Quelle: P. Wankel, kplan AG)
Abbildung 25: Grundrisse und Schnitt der FOS/BOS Erding (Quelle: kplan AG)
Abbildung 26: Photovoltaik-Flächenoptionen bei der FOS/BOS Erding (Pläne: kplan AG)
Abbildung 27: Fotos der Nord-, Südwest- und Westansicht der Realschule Memmingen (Quelle: IBP)
Abbildung 28: Grundrisse Unter-, Erdgeschoss, 1. OG und 2. OG mit Zonierung sowie Schnitt der Realschule Memmingen (Plan: schulz & schulz architekten gmbh, Zonierung: IBP)
Abbildung 29: Photovoltaik-Flächenoptionen bei der Realschule Memmingen (Pläne: schulz & schulz architekten gmbh)
Abbildung 30: Fotos der Süd- und Westansicht sowie einer Dachterrasse der Grundschule Prüfening (Quelle: <http://www.schulen.regensburg.de/pruefening>)
Abbildung 31: Grundrisse des Unter-, Erd- und Obergeschosses mit Zonierung und Schnitt der Grundschule Prüfening (Plan: twoo architekten GmbH)
Abbildung 32: Photovoltaik-Flächenoptionen bei der Grundschule Prüfening (Pläne: kplan AG)
Abbildung 33: Primärenergetische Auswertung der Basisvarianten
Abbildung 34: Primärenergetische Auswertung der Basisvarianten mit den Primärenergiefaktoren nach EnEV ab 1. Januar 2016
Abbildung 35: Endenergetische Auswertung der Basisvarianten
Abbildung 36: FOS/BOS Erding - Primärenergetische Auswertung der angepassten Berechnungen
Abbildung 37: Realschule Memmingen - Primärenergetische Auswertung der angepassten Berechnungen
Abbildung 38: Grundschule Prüfening - Primärenergetische Auswertung der angepassten Berechnungen
Abbildung 39: Spezifische Investitionsmehrkosten Plusenergiestandard der Beispielschulen

- Abbildung 40: Beispiel für den Wochenverlauf von konventioneller und regenerativer Stromerzeugung und Börsenpreisen [ise14]
- Abbildung 41: Klassifizierung von Energiespeichertechnologien mit Beispielen [fuc12]
- Abbildung 42: Monatsweiser Strombedarf (Variante V0-WP)
- Abbildung 43: Strombedarfslastgang – Winterwoche (Variante V0-WP)
- Abbildung 44: Strombedarfslastgang- Sommerwoche (Variante V0-WP)
- Abbildung 45: Lastganganalyse – Winterwoche (Variante V0-WP)
- Abbildung 46: Lastganganalyse – Sommerwoche (Variante V0-WP)
- Abbildung 47: Monatsweise Lastganganalyse der PV-Stromerzeugung (Variante V0-WP)
- Abbildung 48: Eigennutzungsanteil in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Erzeugung und Bedarf
- Abbildung 49: Eigennutzungsanteil in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Erzeugung und Bedarf mit und ohne Stromspeicher (Variante V0-WP)
- Abbildung 50: Eigennutzungsanteil in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Erzeugung und Bedarf mit und ohne Wärmespeicherung (Variante V0-WP)
- Abbildung 51: Dauerlinie der Leistung am Netzanschlusspunkt mit und ohne PV-Anlage (Variante V0-WP)
- Abbildung 52: Dauerlinie der Leistung am Netzanschlusspunkt mit PV-Anlage und Stromspeicher (Variante V0-WP)
- Abbildung 53: Dauerlinie der Leistung am Netzanschlusspunkt mit und ohne PV-Anlage (Variante V4-FW)
- Abbildung 54: Eigennutzungsanteil GS Prüfering in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Erzeugung und Bedarf

16.3 Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Übersicht über die ausgewählten Beispielschulen
- Tabelle 2: Wirkungsgrad-Übersicht gängiger Photovoltaik-Modularten (Quellen: www.solarstromerzeugung.de, Herstellerrecherchen)
- Tabelle 3: Ergebnisübersicht der Photovoltaik-Potenziale der Beispielschulgebäude und –standorte
- Tabelle 4: Kenndaten von Flach- und Vakuumröhrenkollektoren für die Warmwasserbereitung
- Tabelle 5: Beispiele für Primärenergiefaktoren von Fernwärme [agf14]
- Tabelle 6: Beispielhafte technische Daten von Kleinwindkraftanlagen
- Tabelle 7: Beispielhafte Abschätzung des Jahresertrages für die Vertikalanlage SFTV 4,2 mit Standort Hamburg für die Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund
- Tabelle 8: Auswertung der Potenziale Erneuerbarer Energien für den Einsatz an Plusenergieschulen
- Tabelle 9: Übersicht über die nach DIN V 18599 Version 2007 und 2011 sowie EnEV 2009 und 2013 anzusetzenden Primärenergiefaktoren für Strom
- Tabelle 10: Übersicht über die zu verwendenden Klimadaten
- Tabelle 11: Berechnungsmethodik Plusenergieschulen
- Tabelle 12: Basisvariante Übersicht über Lampenart und Kontrollsystem in Abhängigkeit des Nutzungsprofils
- Tabelle 13: Werte für den spezifischen Nutzerstrombedarf (standardisierte Berechnung)
- Tabelle 14: Kennwerte für die Ermittlung des PV-Ertrags
- Tabelle 15: Jahreswerte für die Solare Einstrahlung in Abhängigkeit von Orientierung und Neigung berechnet nach Meteonorm
- Tabelle 16: Angesetzte Werte für den spezifischen Nutzerstrombedarf (angepasste Berechnung)
- Tabelle 17: Vergleich des Referenzklimas Deutschland nach EnEV 2009 und 2013
- Tabelle 18: Vergleich von Klimadaten für den Standort Erding
- Tabelle 19: Kenndaten der FOS/BOS Erding
- Tabelle 20: Standardisierte Berechnung - Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 (Gebäude FOS/BOS Erding)
- Tabelle 21: Angepasste Berechnung - Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 für die Standorte Erding, Hamburg, Freiburg (Gebäude FOS/BOS Erding)
- Tabelle 22: Belegbare Fläche, Modulfläche, PV-Leistung und -Erzeugung für die Standorte Potsdam, Erding, Hamburg, Freiburg
- Tabelle 23: Spezifische End- und Primärenergie der Stromerzeugung für die Standorte Potsdam, Erding, Hamburg, Freiburg
- Tabelle 24: Auswertung der Varianten - Plusenergiestandard auf Endenergieebene (FOS/BOS Erding)
- Tabelle 25: Auswertung der Varianten - Plusenergiestandard auf Primärenergieebene (FOS/BOS Erding)
- Tabelle 26: Kenndaten der Realschule Memmingen
- Tabelle 27: Standardisierte Berechnung - Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 (Gebäude Realschule Memmingen)
- Tabelle 28: Angepasste Berechnung - Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 für die Standorte Erding, Hamburg, Freiburg (Gebäude Realschule Memmingen)
- Tabelle 29: Belegbare Fläche, Modulfläche, PV-Leistung und -Erzeugung für die Standorte Potsdam, Memmingen, Hamburg, Freiburg
- Tabelle 30: Spezifische End- und Primärenergie der Stromerzeugung für die Standorte Potsdam, Memmingen, Hamburg, Freiburg
- Tabelle 31: Auswertung der Varianten - Plusenergiestandard auf Endenergieebene (Realschule Memmingen)
- Tabelle 32: Auswertung der Varianten - Plusenergiestandard auf Primärenergieebene (Realschule Memmingen)
- Tabelle 33: Kenndaten der Grundschule Prüfening
- Tabelle 34: Standardisierte Berechnung - Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 (Gebäude Grundschule Prüfening)
- Tabelle 35: Angepasste Berechnung - Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf nach DIN V 18599 für die Standorte Erding, Hamburg, Freiburg (Gebäude Grundschule Prüfening)
- Tabelle 36: Belegbare Fläche, Modulfläche, PV-Leistung und -Erzeugung für die Standorte Potsdam, Regensburg, Hamburg, Freiburg
- Tabelle 37: Spezifische End- und Primärenergie der Stromerzeugung für das die Standorte Regensburg, Hamburg, Freiburg



- Tabelle 38: Auswertung der Varianten - Plusenergiestandard auf Endenergieebene
Tabelle 39: Auswertung der Varianten - Plusenergiestandard auf Primärenergieebene
Tabelle 40: Kennzahlen der Beispielgebäude (Basisvariante)
Tabelle 41: Vorschläge für Nebenanforderungen an Plusenergieschulen
Tabelle 42: Massenbilanz der FOS/BOS Erding [fos14]
Tabelle 43: Primärenergie für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung des Gebäudes FOS/BOS Erding [fos14]
Tabelle 44: Primärenergiebilanz für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Plusenergieschule Hohen Neuendorf [kön14]
Tabelle 45: Primärenergiebilanz unter Berücksichtigung von Grauer Energie am Beispiel FOS/BOS Erding (Basisvariante, Erzeugung Standort Potsdam)
Tabelle 46: Randbedingungen für die Berechnung der Investitionsmehrkosten
Tabelle 47: Spezifische Investitionsmehrkosten (FOS/BOS Erding)
Tabelle 48: Spezifische Investitionsmehrkosten (Realschule Memmingen)
Tabelle 49: Spezifische Investitionsmehrkosten (Grundschule Prüfening)
Tabelle 50: Beschreibung der Vorgehensweise beim Bedarfs-/Verbrauchsabgleich nach DIN V 18599 Bbl 1:2010
Tabelle 51: Nutzenergiebedarf Trinkwarmwasser nach Tabelle 7 DIN V 18599-10 für schulrelevante Nutzungen
Tabelle 52: Vergleich der Bewertungsleistung und der installierten Leistung für die Beleuchtung FOS/BOS Erding
Tabelle 53: Endenergiebedarf nach EnEV 2007-Nachweis der FOS/BOS Erding
Tabelle 54: Variantenrechnungen Endenergiebedarf nach EnEV der FOS/BOS Erding
Tabelle 55: Auswertung der Monitoringdaten der FOS/BOS Erding (Zeitraum 13.6.2013 bis 13.6.2014)
Tabelle 56: Vergleich von Bedarfsberechnung und Verbrauchswerten der FOS/BOS Erding
Tabelle 57: Endenergiebedarf der Realschule Memmingen nach [lys10].
Tabelle 58: Verbrauchswerte der Realschule Memmingen für die Jahre 2010 bis 2012.
Tabelle 59: Vergleich von Bedarfsberechnung und Verbrauchswerten der Realschule Memmingen
Tabelle 60: Endenergiebedarf nach EnEV 2009-Nachweis der Grundschule Prüfening
Tabelle 61: Auswertung der Monitoringdaten der Grundschule Prüfening im Zeitraum November 2013 bis Oktober 2014
Tabelle 62: Vergleich von Bedarfsberechnung und Verbrauchswerten der Grundschule Prüfening
Tabelle 63: Technische Daten und angesetzte Verluste der PV-Module für die Simulation der Erzeugerlastgänge
Tabelle 64: Lastganganalyse - Eigennutzungsanteil der untersuchten Varianten



17.0 Anlagen

Anlage 1

Tabelle A-1: Energetische Kenndaten von Niedrigenergieschulen (4 Seiten)

In der Tabelle verwendete Abkürzungen

SH	Sporthalle
HG	Hauptgebäude
EB	Erweiterungsbau
k. A.	keine Angabe
TWW	Trinkwarmwasserbereitung
Hzg	Heizung
WRG	Wärmerückgewinnung

Anlage 1: Tabelle Energetische Kenndaten von Niedrigenergieschulen (Seite 1 von 4)

Schule	Foto	Grundriss	Beschreibung	Bau-/ Sanierungsjahr	Anzahl Schüler	NOF Nutzgrund- fläche (thm. Hülle) [m²]	ANZ, Ver- hältnis [m²]	Spez. Transmis- sionskoeffizient K _T [W/m²K]	Luftdichtheit n ₅₀ -Wert [1/n]	Spez. Nutz- energiebedarf [kWh/m²a]	Spez. Erd- energiebedarf [kWh/m²a]	Spez. Primär- energiebedarf [kWh/m²a]	Spez. Primär- energiebedarf [kWh/m²a]
Plusenergieschulen (EnEff-Schule)													
Grundschule Hohen Neuendorf			Neubau Grundschule mit Turnhalle	2009-2011	540	4.845 (Schule) 1.319 (SH)	0,39	0,20	0,54	32	4,3	24	24
Uhlirichschule Stuttgart (Grundschule und Werkrealschule)			Sanierung (Bj. 1954 Hauptgebäude 2004 sep. Erweiterungsbau)	2012-2014	450	2.720	0,44	Wand: 0,11-0,14 Dach: 0,11-0,15 Fenster: 0,80 (U _g)	<1 (geplant)	17,2 (HG) 65,6 (EB)	incl. Nutzerstrom 14,0 (EB) 35,2 (EB)	incl. Nutzerstrom 14,0 (EB) 91,6 (EB)	74
Gymnasium Rostock-Reuthehagen			Sanierung (Bj. 1960/81) und Erweiterung (Gym. und Grundschul)	2009-2011	234	3.422	0,4	0,45		90	72	55	55
St. Franziskus-Grundschule, Halle a.d. Saale			Neubau (Ziel Plusenergie)	2012-2014	166			Holzständerfenster mit 4-fach Verglasung					
3.4.1er-Haus-Schulen (EnEff-Schule)													
Science College Overbach			Neubau	2008-2009	330	1.860	0,39	0,23	0,46	60	23	63	
Friedrich-Frobel-Schule Olfersdorf (Kulturdenkmal)			Sanierung	2009-2011	180	4.439	0,25	0,42		43	41	50	
Max-Sternbeck-Gymnasium Cottbus			Sanierung	2010-2012	500	8.048 (Schule) 1.481 (SH)	0,35 (Schule) 0,45 (SH)	0,28 (Schule) 0,23 (SH)	0,32	26 (Schule) 88 (SH)	37	45 (Schule) 95 (SH)	
Gymnasium Marktoberdorf (Angaben für Altkommun)			Sanierung	2011-2013	1.061	8.910	0,25	0,57		32	39	87	11
Best-Practice-Beispiele (EnEff-Schule) (Auswahl)													
Gebhard-Müller-Schule Bismarck (RIG)			Neubau	2001-2004	1.700	10.650	0,3	0,43	0,34			81,7 (Primärenergie- verbrauch)	
Realschule Memmingen (mit 3-bett und 1-fach Sportplatz)			Neubau (Ziel KfV 40-Haus)	2008-2010	355	7.945 (Schule) 3.301 (SH)	0,35 (Schule) 0,32 (SH)					44	
DBU geförderte Schulebauten (Auswahl)													
FOSBOS Erding			Neubau, 3-geschos. Nordflügel und 2-geschos. Südflügel mit Altkomm. verbunden, Ziel: PH- Standard mit niedrigem PE- Verbrauch	2009-2011	750	7.840	0,26	0,24	0,17	47	51	83	
Gymnasium Dierdorf			Neubau (Ziel Plusenergie) 2-gesch. 1-Flügel-Gebäude mit Mensa, Verwaltung etc., 1. Sportplatz	2012-2015	930	10.060							
Erweiterungsbau Schulzentrum Mitte Nordhorn			Neubau (Erweiterung) Ziel: Passivhausstandard, hohe Luftqualität	2006-2008	600	1.594		Wand: 0,130/0,15 Dach: 0,10 BPKD: 0,18 Fenster: 0,91/2 (U _g) (Holzbauteile)	0,60	Heizwärme nach PHPP- 2 mit EBF		56 (nach PHPP)	
Weitere erfasste und DBU geförderte Schulen - Beifachschule Waldschul (s. Passivhaus), - Reiberg-Schule (s. Passivhaus) - Grundschule Halle (s. EnEff-Schule)													
Beispiele für Niedrigenergieschulen													
CO ₂ -neutrale Grundschule Hamburg			Neubau GS (1 BA), 2. Trakt, 3-fach Sportplatz (2 BA)	2010-2013		6.243							
Grundschule Gernau			GS nach ISO 50001-Standard mit 100m²	2010-2012	336	2.953 (EBF)	0,37	BS: 39 cm Schaumglas Isolier- Dach /w/ AW: > 30 cm Schalldämmung aus recyc. Zellulose	0,40	Heizwärme nach PHPP- 15		111 (Nutzwärme) bzw. 33 (Heizwärme)	106



Anlage 1: Tabelle Energetische Kenndaten von Niedrigenergieschulen (Seite 2 von 4)

Schule	Art der Stromerzeugung	Art der Wärmeerzeugung	Art der Belüftung	Art Tageslicht-, Kunstlichtversorgung, Sonnenschutz in Klassenzimmern	GLT	Kosten (netto)	Quelle
Plusenergieschulen (ENER-Schulen)							
Grundschule Hohen Neuendorf	PV (55 kW _p), Pellet-BHKW (1,5 kW _e)	Hg ₂ a. TWW, Pelletkessel 220 kW, Pellet-BHKW 10 kW _e , Übergabe: Heizkörper	Grundlüftung durch eine RLT in Schließkörper mit WRG (je Person 8 l/s 6 m³/h, 52,2-12 m³/h), zusätzlich niedrigst gestaute Fensterbelüftung (Vorräumen- und Nachlüftung) RLT in therm. Hülle (Dachraum)	- Abtrennung der Klassenzimmer zum Flur verglast → beidseitige - Abtrennung der Klassenzimmer zum Flur verglast - Leuchtdioden-Neobeleuchtung (ab. von Raumleuchte) - taubstille Verglasung Südfenster, Verbleibmarken: z.T. elektrochrome Verglasung	vorhanden	KG 300: 1.025 €/m² KG 400: 317 €/m²	[ref13]
Unileidschule Stuttgart (Grundschule und Vorklassische)	PV (167 kW _p)	Hg ₂ (VL 37°C, EB 45°C) Erdsonden-Wärmepumpen Übergabe: Nipparöhrchen- und Wandlöhnerheizung	dezentrale individuelle Lüftungsgerate mit Wärme- und Feuchtheitzabwärmung (Auslegung auf 800m³/h je Klassenzimmer, o. Zuluftschleimring) CO ₂ -gesteuerter Betrieb, nur bei Außentemperaturen < 15°C und CO ₂ > 1.500 ppm: ansonsten Fensterlüftung und CO ₂ -Anpeil: Nachtlüftung (Fenster), mehrschichtige Fensterlüftung	- Langleuchtdiodenlampen, Tageslicht- und präsentgesteuert (2 unterschiedliche Regelungskonzepte sollen in der Monitoringphase unterschiedliche Regelungskonzepte sein) - taubstille Verglasung Südfenster, Verbleibmarken: z.T. elektrochrome Verglasung	geplant	KG 300: 1.702 (HG) / 20 (EB) KG 400: 848 (HG) / 293 (EB) Angaben in €/m²	[ref13]
Gymnasium Rosbach-Reutenhagen	PV (75 kW _p), 3 Kleinwindräder, ORC-Anlage (2,5 kW _e)	Fernwärme, ORC-Anlage Übergabe: Steckdosenheizung, Desinfektionsplatten, Zuluft-Fluss, WC-Wärmer durch Umluftheizung beheizt	4 zentrale RLT mit WRG, Auslegung 16 m³/h pro Person Zuluftverteilung über isolierte Verteilungssysteme, Steuerung über Temp. und Feuchtemessoren Sommer: Abluft über RWAs	- teilw. Oberlichter, 2 OG Dachoberlichter, lichtlenkende Lamellen/Bleche im SZR - Leuchtdiodenlampen, präsentgesteuert (vom Nutzer übersteuert)	vorhanden		[ref13]
St. Franziskus-Grundschule, Halle a.d. Saale	PV, 3 Kleinwindräder	Nutzung Fernwärmenetzlauf des benachbarten Gymnasiums, Wärmelagertank, Erdkessel, Solarthermie (Pisaade)	zentrale RLT mit WRG	Leuchtdioden, dynamisches Kunstlicht	vorhanden	8,5 Mio. €	[ref13], [doc13]
3-Liter-Haus-Schulen (ENER-Schulen)							
Science College Overbach		Erdsonden-Wärmepumpe (monovalent), COP 4,2, VL 25 °C Übergabe: Betonwärmepumpe	RLT mit Wärme- und Feuchtheitzabwärmung auf Dach (7.500 m³/h)	- Oberlicht-Heizkörper für Belichtung Altimu, angrenzende Kfz (Abtrennung der Klassenzimmer zum Flur verglast) - Leuchtdiodenlampen, präsent- und präsentgesteuert		Fenster mit Verglasung 2.500 €/m²	[ref13]
Frederich-Friedrich-Schule Oberdorf (Kulturzentrum)		Gas-Absorptions-Wärmepumpe mit Erdsonden, Gas-Übergabe: Heizkörper Kühlung über Erdsonden (Kopplernormen-Kühlschleife im DG)	Abtrennung mechanisch über vorhandene Abluftkanäle, Grundlüftung über Zuluftkanäle mit WRG, 200 m³/h je Klassenzimmer	- für Lichtlenkung Lamellen-Bleichen im Scheinwerferrahmen - Leuchtdioden-LED - z.T. elektrochrome Verglasung	vorhanden	1.200 €/m² 2. innovative Maßnahmen: 1.900.000 €	[ref13]
Max-Steenbeck-Gymnasium Coburg		Fernwärme, im Winter Vorwärmung und im Sommer Energieabfuhr zur Nachheizung, SH, TWW them. Solaranlage, Zwischenspeicherung von Überschüssen in Erdwärmespeicher	zentrale RLT mit WRG auf Dach, Nachkühlung im Sommer Auslegung: Klassenzimmer 20 m³/h je Person, Zuluftreglung über CO ₂ -Sensoren	- Abluft mit Lichtlenkfunktion an Ost-/Westfassade	vorhanden	(geplant) KG 300: 546 €/m² KG 400: 235 €/m²	[ref13]
Gymnasium Marktbreit (Angaben für Altimu)	PV, BHKW	Bogas-BHKW und Fernwärmeanschluss (Biomasse KWK), Heizkörper	dezentrale RLT für Klassenzimmer mit Heizkörper (Auslegung nach Kat. II der DIN 12521 pro Person 7 l/s < 0,7 l/s pro m² → 750 bis 1.100 m³/h, Nennleistung Ventilator 0,43 kW, Automatenbetrieb CO ₂ -Messung und Feuchtesensoren), andere Räume über 4 zentrale RLT (Auslegung über DIN 12521 D-G)	- tagsüber ab, geringe außenliegende Abluft ohne Lichtlenkfunktion - schall- und dämmende Lichtbänder (10 W/m²)		Altimu: KG 300: 404 €/m² KG 400: 239 €/m²	[ref13]
Best-Practice-Beispiele (ENER-Schulen) (Auswahl)							
Georg-Wehrhahn-Schule Bismarck (RÜ)		Grundwasser-Wärmepumpe, Spitzenlast, Holzpellet-Kessel Übergabe: Betonwärmepumpe, Fußbodenheizung	3 zentrale RLT mit WRG, durchschnittlicher Luftwechsel 0,45 1/h max. 0,7 1/h	teilweise Außenabluft mit Lichtlenkfunktion			[ref13]
Realschule Memmingen (mit 3. und 1. Fach Sportplatz)		Gas-Absorptions-Wärmepumpe (Grundwasser), Gas-Übergabe: Heizkörper Kühlung über GW	2 zentrale RLT mit WRG (Volumenstromregler)	- Beleuchtung mit Präsenzmelder - Außenliegende Abluft	Heizung und Lüftung des Schulraums und Abluft an EIB- Bussystem		[ref13]
DBU geförderte Schulneubauten (Auswahl)							
FO-BIOS Erding		Fernwärme, Anschluss an Rücklauf der benachbarten Gastro-Benutzungs (Benutzungs), Holzpellet an Innenwand (über Qualifikationskessel) (Grundwasseranwendung im Sommer 10 - 12 °C)	RLT mit WRG (Auslegung 20 m³/h pro Schüler, 15.000 m³/h) Quellidpumpen, Steuerung über CO ₂ -Sensoren, kurze Abluftrohr mit Umluftreinigung und Abzug im Altimu, mechanische unterstützte Nachkühlung durch sep. Dach-Ventilatoren	- über RLT steuerbarer außenliegender Lamellen-Sonnenschutz - Dach-Off-Winkel gesteuert abhängig von Sonneneinstrahlung - Konstant in Klassenzimmern: drei Lichtbänder werden tagsüber, und präsentabhängig mit Dimmung gesteuert	vorhanden		[doc13], [jeh11]
Gymnasium Diederich	PV-Anlage	Holzpelletkessel	RLT mit WRG, ggf. Kühlung durch Verdunstungskälte			KG 300: 17.380.000 € KG 400: 7.470.000 €	[doc13]
Erweiterungsbau Schulzentrum Mitte Nordhorn		Nahwärme von nebenstehender Realschule (Qualifikationskessel), Holzpellet an Innenwand (über Qualifikationskessel) WW dezentral	zentrale RLT mit WRG (Auslegung 22 m³/h je Person; 22.000 m³/h), Quellidpumpen, Nachkühlung	Beleuchtung - 110 W/m² Steuerung, präsentabhängig, Bewegungssensoren - außenliegender Sonnenschutz (elektrische Steuerung), Glasdach		KG 300-400: 1.450 €/m²	[doc13]
Walden an der DBU geförderte Schulen - Bar							
Beispiele für Niedrigenergieschulen							
CO ₂ -neutrale Grundschule Hamburg		Pelletheizung, Solarthermieanlage	Klassenzimmer natürlich belüftet mit CO ₂ -Anpeil, SH und imliegenden Rame Lüftungslage mit WRG, Sommer-Öffnungslüftung mit Wärmeschutzgittern zur Nachkühlung				[jeh13]
Grundschule Ottau	PV-Anlage 172,1 kWp Erlang ca. 120 MWh/a (Dämmlichtmodule ersetzen konventionelle Beleuchtung)	z. Zt. Nahwärme von angrenzendem Schulzentrum zukünftig: Holzheizung	RLT mit WRG mit CO ₂ -abhängiger Volumenstromregelung, solarabhängiger Erreichbarkeitsausbau zur Vorwärmung bzw. Kühlung	- Ost-Tageslichtversorgung - Kunstlicht präsentgesteuert, Einsatz von LEDs			[jeh13]



Anlage 1: Tabelle Energetische Kenndaten von Niedrigenergieschulen (Seite 3 von 4)

Schule	Foto	Grundriss	Beschreibung	Bau-/ Sanierungsjahr	Anzahl Schüler	NGF Nettogrund- fläche (therm. Hülle) [m²]	AV-Ver- hältnis [m²]	Spez. Transmis- sionswärmeverlust FT [W/m²K]	Luftdichtheit n ₅₀ -Wert [1/n]	Spez. Nutz- energiebedarf [kWh/m² _{netto}]	Spez. End- energiebedarf [kWh/m² _{netto}]	Spez. Primär- energiebedarf [kWh/m² _{netto}]	Spez. Primär- energieerzeugung [kWh/m² _{netto}]
Karl-Götz-Schule (GS) Freiberg			Neubau (Ziel PH-Standard)	2010-2011	250	2.316 (EBF)		Wand: 0,08 Dach: 0,09 Fenster: 0,79 (U _g) BPKD: 0,13	0,21	Heizwärme nach PHPP: 15		112 (PHPP)	
Grundschule Dresden-Lochwitz			Neubau mit SH (Ziel PH-Standard)	2008-2010	225	2777 (EBF)		Wand: 0,14 Dach: 0,15 Fenster: 0,11 BPKD: 0,11 Fenster: 0,86 (U _g)	0,3	Heizwärme nach PHPP: 11		109 (PHPP)	
Lore-Lorentz-Berufskolleg Düsseldorf			Neubau (Ziel PH-Standard)	2009		2.700		Wand: 0,16 Dach: 0,09 BPKD: 0,15 Fenster: 0,92 (U _g)	0,13	Heizwärme nach PHPP: 15		38 (o. Angabe Berechnungs- methode)	
Emma Schule Seligenstadt		U-förmiger GR	Neubau dreistöckige GS mit SH (Ziel CO2-neutrale PH-Schule)	2008-2010	300	5.200 (BGF)							
Wilhelm-Busch-Grundschule Hamm		L-förmiger GR	Neubau (PH-Bauweise, KWK- Cofiring)	2009-2010		2.619							
Singbergerschule Wolfersheim im Welteraarkreis		L-förmiger GR	Neubau (Ziel PH) und 2. Baustufe	2009-2011		1 BA 1.226 2 BA 882		1. BA 0,20 2. BA 0,21	0,5	1. BA 183 2. BA 32		1. BA 157 2. BA 85 Strom 31 Strom 16	
Realschule mit SH Dachau-Augstenfeld			Neubau (Ziel PH-Standard bei optimalen Lernbedingungen)	2009-2011	(31 M.Z., 36ach SH)	13.323	0,25	Wand: 0,12 Dach: 0,11 BPKD: 0,12 Fenster: 0,7 (U _g)				112 (PHPP)	
Herman-Nohl-Schule (Förderschule) Osnabrück		Zwei Gebäudeteile über Aula verbunden	Neubau (Ziel PH-Bauweise)	2008-2010		3.260 (EBF)		Wand: 0,10 Dach: 0,10 BPKD: 0,20 Fenster: 0,31 (U _g)	0,4 - 0,56	Heizwärme nach PHPP: 13		93 (PHPP)	6,1
Felix-Fechenbach-Berufskolleg Detmold			Sanierung (Ziel Plusenergie)	2003									
Weitere Beispiele für zertifizierte Passivhaus- Schulen						EBF		U-Werte		Spez. Heizwärmebedarf (n. PHPP)		Spez. Primär-energiebedarf (n. PHPP)	
Realschule Peing mit angrenzender 3-ach SH			Neubau	2012		8.960		Wand: 0,14 Dach: 0,15 BPKD: 0,13 Fenster: 0,8 (U _g)	0,37	14		75	
Gymnasium Buchloe mit angrenzender 3-ach SH			Neubau	2012		8.129		Wand: 0,10 Dach: 0,10 BPKD: 0,12 Fenster: 0,8 (U _g)	0,26	14		88	
2-jährige Grundschule Frankfurt/M. (Bergen Eckheim)			Neubau	2012		1.757		Wand: 0,14 Dach: 0,15 BPKD: 0,15 Fenster: 0,74 (U _g)	0,50	14		80	
Valentin-Sieger Grundschule Frankfurt/M. (in Bornheim)			Neubau	2011	250	2.759		Wand: 0,13 Dach: 0,095 BPKD: 0,13 Fenster: 0,97 (U _g)	0,14	11		99	
Schule "SteCampus Niederlausitz"			Neubau	2010	880	9.694		Wand: 0,12 Dach: 0,11 BPKD: 0,14 Fenster: 0,96 (U _g)	0,10	14		107	
Realschule und Gymnasium Neckargründ			Neubau	2008	1.400	10.836		Wand: 0,14 Dach: 0,15 BPKD: 0,22 Fenster: 0,75 (U _g)	0,49	15		58	
Schule mit Hausmeisterwohnung Köln			Neubau	2006		2.530		Wand: 0,14 Dach: 0,12 BPKD: 0,15 Fenster: 0,79 (U _g)	0,22	14		63	
Justus-von-Liebig-Schule Weiskorf (Berufsschule)			Neubau	Fertigst. 2003	700	5.720	0,29	Wand (Innen): 0,21 Dach: 0,13 BPKD: 0,25 Fenster: 1,9 (U _g)					
Erweiterungsbau Realschule Neuss			Neubau	2007		774		Wand (Innen): 0,11 Dach: 0,08 BPKD: 0,11 Fenster: 0,91 (U _g)	0,40	11		84	
Erweiterungsbau Haupt- und Realschule Büdingen			Neubau	2003				Wand (Innen): 0,13 Dach: 0,10 BPKD: 0,13 Fenster: 0,83 (U _g)	0,30	15		81	
Erweiterungsbau Waldorfschule Bremen			Neubau	2000		1.016		Wand (WDS): 0,13 Dach: 0,11 BPKD: 0,14 Fenster: 0,92 (U _g)	0,51	15		102	
Grundschule mit Kita Riedberg (Frankfurt/M.)			Neubau	2003-2004	400-125 (Kita)	5.542	0,35	Wand (Innen): 0,17 Dach: 0,11 BPKD: 0,21 Fenster: 0,8 (U _g)	0,46	15		59	2,6
Montessori-Schule Aufkirchen/Oberding		(geschwengener GR)	Neubau	2004		3.276		Wand: 0,12 Dach: 0,11 BPKD: 0,15 Fenster: 0,75 (U _g)	0,09	12		113	



Abbildung 1: Machbarkeitsuntersuchung von Nutzungsmöglichkeiten (Lüftung + PV + WT)

Schule	Art der Stromerzeugung	Art der Wärmeerzeugung	Art der Belüftung	Art Tageslicht-, Kunstlichtversorgung, Sonnenschutz in Klassenzimmern	GLT	Kosten (netto)	Quelle
Karl-Günzel-Schule (GS) Freiberg		bivalente Luft-Wasser-Wärmepumpenanlage / Fernwärmespezialist	dezentrale Lüftungsgeräte mit WRG (Auslegung: 15-20 m³/h pro Person)			KG 300+400: 880 €/m²	[jeh11]
Grundschule Dresden-Loschwitz	PV-Anlage	monovalente Wasser-Wasser-Wärmepumpe (60 kWh) WW; zentral über WP mit Speicher-Lade-System	RLT mit WRG mit CO2-gelüfter Volumenstromregelung (Heiz- und Kühlregister für Zuluft, freie Kühlung über Grundwasser), Nachlüftung			8,2 Mio. € Gesamtkosten	[jhd13]
Lore-Lorentz-Berufsschule Düsseldorf		Erdsonden-Wärmepumpe (6 Erdsonden à 90m) Beheizung über Zuluft und Betonkernenerpierung WW dezentral	RLT mit WRG (Relations-WT).			5,3 Mio. € Gesamtkosten KG 300+400: 1.408 €/m² (brutto)	[jhd13]
Emma Schule Seligenstadt	Dach (Röhren-PV "Solyndra") 43 kWp Glasfassade 15 kWp	Grundwasser-Wärmepumpe, Kühlung über GW Übergabe: Fußbodenheizung Solarthermie unterstützt WW-Bereitstellung für SH	zentrale RLT mit WRG (auf Dach).	- Beleuchtung mit Präsenzmelder, Tageslicht abh.			[zwp13]
Wilhelm-Busch-Grundschule Hamm		Contracting (SH Hamm) Gas-BHKW mit BHK-Kessel	3 RLT mit WRG, Vorwärmung bzw. -kühlung über Erdsonden, Nachlüftung	- Beleuchtung mit Präsenzmelder, Tageslicht abh.	Kontaktschalter an Präsenzmelder und RLT gekoppelt		[den13]
Singbergsschule Wöllersheim im Neckarraum		Nachwärmung (fossil) Zuluftbeheizung	zentrale RLT mit WRG				[den13]
Realschule mit SH Diebau-Augustenberg	PV auf Dach (60 kWp) durch GLT fast 100% Eigenenergie	Niedrigste Grundwasser-Wärmepumpe (hoher Grundwasserspiegel) von 2 m unter GOK Gasbrennwertkessel (Spezialist), Zuluftbeheizung	zentrale RLT (Relations-WT) mit WRG und Beheizung mit 3-Zonen Lüftungsbau, Vorwärmung, -kühlung über Erdsonden, keine Fensterlüftung wegen hoher Lüftungsleistung, Nachlüftung	- tagesschlach. Jalousiensteuerung - Kunstlichtsteuerung	GLT für bedarfsgerechte Steuerung von Lüftung, Heizung, Jalousien	Kostenschätzung: 27 Mio. €	[den13]
Herman-Noth-Schule (Förderschule) Osnabrück	PV auf Parkplatz 80 kWp (80.000 kWh/a)	Brennwertkessel	2 zentrale RLT mit WRG, freie Nachlüftung	- Spiegelreflektoren mit TS-Lampen, EIB-Bussystem-Steuerung mittels Präsenzmeldern und Lichtfühlern - Sonnenschutz	vorhanden		[den13], [jhd13]
Felix-Friedrich-Berufsschule Detmold	integriertes PV-Dach			- tagesschlach. Beleuchtungssystem		Gesamtkosten 7,8 Mio. €	[jwd13]
Weitere Beispiele für zertifizierte Passivhaus-Schulen							
Realschule Pong mit angrenzender 3-fach SH		Fernwärme, Radiatoren bzw. über Zuluftregister (SH), TWW; zentral über FW für SH und Küche, ansonsten dezentral elektrisch	Zentrale Lüftungsgeräte mit WRG, z.T. Kühlung der Zuluft über WT und Brunnensystem				[jhd13]
Gymnasium Buchloe mit angrenzender 3-fach SH		el. Wärmepumpe, Fußbodenheizung (SH) bzw. Heiz- und Kühlboiler (Klassenzimmer, EDV, Büro), TWW; zentral über WP und thermische Solaranlage (40 m²) für SH und Küche, ansonsten dezentral elektrisch	Dezentrale Lüftungsgeräte mit WRG für Klassenzimmer und 6 weitere zentrale Lüftungsgeräte mit WRG				[jhd13]
2-zügige Grundschule Frankfurth (Bergin Enkheim)		Gaskessel (Nahwärme aus Bestandgebäude), Radiatoren, TWW; zentral für Küche, ansonsten Kaltwasser	2 zentrale Lüftungsgeräte mit WRG (im UG)				[jhd13]
Adelstein-Sanger Grundschule Frankfurth (in Bornheim)		Gasbrennwertkessel, TWW; zentral	2 zentrale Lüftungsgeräte mit WRG			KG 300+400: 2.236 €/m²	[jhd13]
Schule "SecCampus Niederlausitz"		Grundlast: Gasbrennwertkessel, Solarlast: Gasbrennwertkessel, Verteilung über Radiatoren, thermische Solaranlage (32 m²)	6 zentrale Lüftungsgeräte mit WRG, Auslegung: 44.000 m³/h			KG 300+400: 1.700 €/m²	[den13], [jhd13]
Realschule und Gymnasium Neckargrund	1.000 m² PV auf Dach	Grundlast: Erdsonden-Wärmepumpe, Spezialist: Holzpelletkessel, Verteilung über Flächenheizungen, TWW; zentral	9 zentrale Lüftungsgeräte mit WRG		modernste GLT	KG 300+400: 2.411 €/m² (gesamt 26 Mio. €)	[den13]
Schule mit Hausmeisterwohnung Köln		Gasbrennwertkessel, Verteilung über Radiatoren, Hausmeisterwohnung: Wärmepumpenkompatgerät TWW; dezentral elektrisch	zentrale Lüftungsgeräte mit WRG				[jhd13]
Justus-von-Liebig-Schule Waldshut (Berufsschule)	Glas-Gew.-Modul in OL 4,5 kW Dach-PV: 15 kW	Fernwärme von BHKW, Verteilung über Zuluft	8 zentrale Geräte: Zu-/Abfuhr mit Wärmerückgewinnung, Quellsystem, Mini-EWT mechanische Nachlüftung, adiabate Kühlung	außenliegender Sonnenschutz		KG 300+400: 1.845 €/m²	[jhd6]
Erweiterungsbau Realschule Nersaß		Heizung: Anschluss an vorhandenen NT-Gaskessel Warmwasser, kein Bedarf	Zu-/Abfuhranlage mit Wärmerückgewinnung	teilbare Außenjalousien mit Lichtlenkfunktion		Mehrkosten für PH: 136 €/m²	[jhd13]
Erweiterungsbau Haupt- und Realschule Baddeckendorf		Heizung: Anschluss an vorhandenen NT-Gaskessel, WW-Heizregister in Zuluft Warmwasser: K.A.	zentrale Zu-/Abfuhranlage mit Wärmerückgewinnung				[jhd13]
Erweiterungsbau Waldenrutsche Bremen		Heizung: Brennwertkessel Warmwasser: wie Hg. + Solarthermie, zentral	zentrale Zu-/Abfuhranlage mit Wärmerückgewinnung Sole-Erdwärmehaube				[jhd6]
Grundschule mit Kita (Biedberg Frankfurth)	PV	Heizung: Holzpelletkessel, Heizkörper Warmwasser: wie Hg. + entfernte Zaphallen dezentral elektrisch	6 Lüftungszentralen (RLT mit WRG), Auslegung 16,4 m³/h pro Person Plattenwärmeübertrager mit adiabater Kühlung.	- Dachlichtkuppeln mit zusätzlicher horizontaler 3-fach-Verglasung	vorhanden	KG 300+400: 1.850 €/m²	[jhd6]
Montessori-Schule Aulken/Oberding		Heizung: BHKW, Gasbrennwertkessel Warmwasser: wie Hg.	zentrale Zu-/Abfuhranlage mit Wärmerückgewinnung				[jhd6]

Anlage 2: Endenergiebedarfsberechnung FOS/BOS Erding

FOS/BOS Erding	Heizung (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Heizung [kWh/m²a]	Warmwasser (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Warmwasser [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	gesamt [kWh/m²a]
V0-WP	7,30	0,43	1,33	0,01	6,35	2,85	18,3
V1-WP	6,38	0,39	1,33	0,01	6,35	2,85	17,3
V2-WP	7,30	0,43	1,33	0,01	4,57	2,85	16,5
V3-WP	9,68	0,54	1,33	0,01	3,89	2,85	18,3
V4-WP	11,22	0,66	1,33	0,01	1,01	2,85	17,1
V0-PK	43,50	0,21	2,96	0,01	6,35	2,85	55,9
V1-PK	38,30	0,20	2,94	0,01	6,35	2,85	50,7
V2-PK	43,50	0,21	2,96	0,01	4,57	2,85	54,1
V3-PK	56,48	0,25	2,97	0,01	3,89	2,85	66,5
V4-PK	65,95	0,26	2,91	0,01	1,01	2,85	73,0
V0-FW	34,34	0,18	2,81	0,01	6,35	2,85	46,5
V1-FW	30,15	0,17	2,81	0,01	6,35	2,85	42,3
V2-FW	34,34	0,18	2,81	0,01	4,57	2,85	44,8
V3-FW	44,83	0,22	2,81	0,01	3,89	2,85	54,6
V4-FW	51,87	0,27	2,81	0,01	1,01	2,85	58,8

Tabelle A-2: Standardisierte Berechnung

FOS/BOS Erding	Heizung (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Heizung [kWh/m²a]	Warmwasser (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Warmwasser [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	gesamt [kWh/m²a]
V0-WP	6,89	0,41	1,33	0,01	6,35	2,88	17,9
V1-WP	5,95	0,36	1,33	0,01	6,35	2,88	16,9
V2-WP	6,89	0,41	1,33	0,01	4,57	2,88	16,1
V3-WP	9,07	0,50	1,33	0,01	3,89	2,88	17,7
V4-WP	10,99	0,63	1,33	0,01	1,01	2,88	16,9
V0-PK	41,28	0,21	2,94	0,01	6,35	2,88	53,7
V1-PK	35,81	0,19	2,92	0,01	6,35	2,88	48,2
V2-PK	41,28	0,21	2,94	0,01	4,57	2,88	51,9
V3-PK	53,03	0,23	2,95	0,01	3,89	2,88	63,0
V4-PK	64,60	0,25	2,89	0,01	1,01	2,88	71,6
V0-FW	32,46	0,17	2,81	0,01	6,35	2,88	44,7
V1-FW	28,16	0,16	2,81	0,01	6,35	2,88	40,4
V2-FW	32,46	0,17	2,81	0,01	4,57	2,88	42,9
V3-FW	41,98	0,21	2,81	0,01	3,89	2,88	51,8
V4-FW	50,65	0,26	2,81	0,01	1,01	2,88	57,6

Tabelle A-3: Angepasste Berechnung (Erding - Klimazone 13)

FOS/BOS Erdding	Heizung (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Heizung [kWh/m²a]	Warmwasser (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Warmwasser [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	gesamt [kWh/m²a]
V0-WP	6,28	0,40	1,33	0,01	6,35	2,88	17,2
V1-WP	5,43	0,36	1,33	0,01	6,35	2,88	16,4
V2-WP	6,28	0,40	1,33	0,01	4,57	2,88	15,5
V3-WP	8,17	0,49	1,33	0,01	3,89	2,88	16,8
V4-WP	9,82	0,61	1,33	0,01	1,01	2,88	15,6
V0-PK	37,76	0,20	2,94	0,01	6,35	2,88	50,1
V1-PK	32,80	0,18	2,92	0,01	6,35	2,88	45,1
V2-PK	37,76	0,20	2,94	0,01	4,57	2,88	48,4
V3-PK	48,11	0,22	2,95	0,01	3,89	2,88	58,1
V4-PK	58,56	0,24	2,90	0,01	1,01	2,88	65,6
V0-FW	29,80	0,17	2,81	0,01	6,35	2,88	42,0
V1-FW	25,90	0,15	2,81	0,01	6,35	2,88	38,1
V2-FW	29,80	0,17	2,81	0,01	4,57	2,88	40,2
V3-FW	38,18	0,21	2,81	0,01	3,89	2,88	48,0
V4-FW	45,78	0,25	2,81	0,01	1,01	2,88	52,7

Tabelle A-4: Angepasste Berechnung (Hamburg - Klimazone 3)

FOS/BOS Erdding	Heizung (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Heizung [kWh/m²a]	Warmwasser (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Warmwasser [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	gesamt [kWh/m²a]
V0-WP	5,26	0,35	1,33	0,01	6,35	2,88	16,2
V1-WP	4,51	0,32	1,33	0,01	6,35	2,88	15,4
V2-WP	5,26	0,35	1,33	0,01	4,57	2,88	14,4
V3-WP	6,86	0,43	1,33	0,01	3,89	2,88	15,4
V4-WP	8,21	0,52	1,33	0,01	1,01	2,88	13,9
V0-PK	31,83	0,18	2,97	0,01	6,35	2,88	44,2
V1-PK	27,59	0,17	2,95	0,01	6,35	2,88	39,9
V2-PK	31,83	0,18	2,97	0,01	4,57	2,88	42,4
V3-PK	40,64	0,20	2,98	0,01	3,89	2,88	50,6
V4-PK	48,93	0,21	2,99	0,01	1,01	2,88	56,0
V0-FW	25,09	0,15	2,81	0,01	6,35	2,88	37,3
V1-FW	21,66	0,14	2,81	0,01	6,35	2,88	33,8
V2-FW	25,09	0,15	2,81	0,01	4,57	2,88	35,5
V3-FW	32,20	0,18	2,81	0,01	3,89	2,88	42,0
V4-FW	38,37	0,21	2,81	0,01	1,01	2,88	45,3

Tabelle A-5: Angepasste Berechnung (Freiburg - Klimazone 12)

Anlage 3: Endenergiebedarfsberechnung Realschule Memmingen

RS Memmingen	Heizung (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Heizung [kWh/m²a]	Warmwasser (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Warmwasser [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	gesamt [kWh/m²a]
V0-WP	7,72	0,51	0,00	0,00	5,87	2,65	16,8
V1-WP	6,65	0,46	0,00	0,00	5,87	2,65	15,6
V2-WP	7,72	0,51	0,00	0,00	4,23	2,65	15,1
V3-WP	10,13	0,64	0,00	0,00	3,35	2,65	16,8
V4-WP	11,44	0,71	0,00	0,00	0,00	2,65	14,8
V0-PK	45,90	0,25	0,00	0,00	5,87	2,65	54,7
V1-PK	39,97	0,23	0,00	0,00	5,87	2,65	48,7
V2-PK	45,90	0,25	0,00	0,00	4,23	2,65	53,0
V3-PK	59,03	0,29	0,00	0,00	3,35	2,65	65,3
V4-PK	52,81	0,28	0,00	0,00	0,00	2,65	55,7
V0-FW	36,14	0,21	0,00	0,00	5,87	2,65	44,9
V1-FW	31,32	0,19	0,00	0,00	5,87	2,65	40,0
V2-FW	36,14	0,21	0,00	0,00	4,23	2,65	43,2
V3-FW	46,81	0,26	0,00	0,00	3,35	2,65	53,1
V4-FW	52,81	0,28	0,00	0,00	0,00	2,65	55,7

Tabelle A-6: Standardisierte Berechnung

RS Memmingen	Heizung (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Heizung [kWh/m²a]	Warmwasser (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Warmwasser [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	gesamt [kWh/m²a]
V0-WP	7,27	0,47	0,00	0,00	5,87	2,65	16,3
V1-WP	6,16	0,42	0,00	0,00	5,87	2,65	15,1
V2-WP	7,27	0,47	0,00	0,00	4,23	2,65	14,6
V3-WP	9,54	0,59	0,00	0,00	3,35	2,65	16,1
V4-WP	11,25	0,68	0,00	0,00	0,00	2,65	14,6
V0-PK	43,16	0,24	0,00	0,00	5,87	2,65	51,9
V1-PK	36,97	0,22	0,00	0,00	5,87	2,65	45,7
V2-PK	43,16	0,24	0,00	0,00	4,23	2,65	50,3
V3-PK	55,41	0,27	0,00	0,00	3,35	2,65	61,7
V4-PK	51,73	0,27	0,00	0,00	0,00	2,65	54,7
V0-FW	34,08	0,20	0,00	0,00	5,87	2,65	42,8
V1-FW	29,05	0,18	0,00	0,00	5,87	2,65	37,8
V2-FW	34,08	0,20	0,00	0,00	4,23	2,65	41,2
V3-FW	44,01	0,24	0,00	0,00	3,35	2,65	50,3
V4-FW	51,73	0,27	0,00	0,0	0,00	2,65	54,7

Tabelle A-7: Angepasste Berechnung (Memmingen - Klimazone 13)

RS Memmingen	Heizung (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Heizung [kWh/m²a]	Warmwasser (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Warmwasser [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	gesamt [kWh/m²a]
V0-WP	6,69	0,46	0,00	0,00	5,87	2,65	15,7
V1-WP	5,70	0,41	0,00	0,00	5,87	2,65	14,6
V2-WP	6,69	0,46	0,00	0,00	4,23	2,65	14,0
V3-WP	8,65	0,57	0,00	0,00	3,35	2,65	15,2
V4-WP	10,08	0,66	0,00	0,00	0,00	2,65	13,4
V0-PK	40,03	0,22	0,00	0,00	5,87	2,65	48,8
V1-PK	34,47	0,21	0,00	0,00	5,87	2,65	43,2
V2-PK	40,03	0,22	0,00	0,00	4,23	2,65	47,1
V3-PK	50,75	0,26	0,00	0,00	3,35	2,65	57,0
V4-PK	46,90	0,26	0,00	0,00	0,00	2,65	49,8
V0-FW	31,58	0,20	0,00	0,00	5,87	2,65	40,3
V1-FW	27,05	0,17	0,00	0,00	5,87	2,65	35,8
V2-FW	31,58	0,20	0,00	0,00	4,23	2,65	38,7
V3-FW	40,28	0,24	0,00	0,00	3,35	2,65	46,5
V4-FW	46,90	0,26	0,00	0,0	0,00	2,65	49,8

Tabelle A-8: Angepasste Berechnung (Hamburg - Klimazone 3)

RS Memmingen	Heizung (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Heizung [kWh/m²a]	Warmwasser (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Warmwasser [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	gesamt [kWh/m²a]
V0-WP	5,45	0,40	0,00	0,00	5,87	2,65	14,4
V1-WP	4,59	0,35	0,00	0,00	5,87	2,65	13,5
V2-WP	5,45	0,40	0,00	0,00	4,23	2,65	12,7
V3-WP	7,09	0,50	0,00	0,00	3,35	2,65	13,6
V4-WP	8,22	0,57	0,00	0,00	0,00	2,65	11,4
V0-PK	32,93	0,20	0,00	0,00	5,87	2,65	41,7
V1-PK	28,20	0,18	0,00	0,00	5,87	2,65	36,9
V2-PK	32,93	0,20	0,00	0,00	4,23	2,65	40,0
V3-PK	41,96	0,23	0,00	0,00	3,35	2,65	48,2
V4-PK	38,43	0,23	0,00	0,00	0,00	2,65	41,3
V0-FW	25,86	0,17	0,00	0,00	5,87	2,65	34,6
V1-FW	21,94	0,15	0,00	0,00	5,87	2,65	30,6
V2-FW	25,86	0,17	0,00	0,00	4,23	2,65	32,9
V3-FW	33,17	0,21	0,00	0,00	3,35	2,65	39,4
V4-FW	38,43	0,23	0,00	0,0	0,00	2,65	41,3

Tabelle A-9: Angepasste Berechnung (Freiburg - Klimazone 12)

Anlage 4: Endenergiebedarfsberechnung Grundschule Prüfening

GS Prüfening	Heizung (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Heizung [kWh/m²a]	Warmwasser (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Warmwasser [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	gesamt [kWh/m²a]
V0-WP	10,62	0,51	0,91	0,01	6,14	4,55	22,7
V1-WP	9,15	0,47	0,91	0,01	6,14	4,55	21,2
V2-WP	10,62	0,51	0,91	0,01	4,42	4,55	21,0
V3-WP	11,75	0,56	0,91	0,01	4,97	4,55	22,7
V4-WP	14,55	0,67	0,91	0,01	0,03	4,55	20,7
V0-PK	64,80	0,29	12,27	0,04	6,14	4,55	88,1
V1-PK	56,29	0,26	12,29	0,05	6,14	4,55	79,6
V2-PK	64,80	0,29	12,27	0,04	4,42	4,55	86,4
V3-PK	71,00	0,30	12,27	0,04	4,97	4,55	93,1
V4-PK	81,53	0,33	12,19	0,04	0,03	4,55	98,7
V0-FW	47,82	0,19	12,05	0,05	6,14	4,55	70,8
V1-FW	41,34	0,17	12,05	0,05	6,14	4,55	64,3
V2-FW	47,82	0,19	12,05	0,05	4,42	4,55	69,1
V3-FW	52,73	0,21	12,05	0,05	4,97	4,55	74,6
V4-FW	63,41	0,23	12,04	0,05	0,03	4,55	80,3

Tabelle A-10: Standardisierte Berechnung

GS Prüfening	Heizung (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Heizung [kWh/m²a]	Warmwasser (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Warmwasser [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	gesamt [kWh/m²a]
V0-WP	10,61	0,51	0,88	0,01	5,21	4,11	21,3
V1-WP	9,09	0,46	0,88	0,01	5,21	4,11	19,7
V2-WP	10,61	0,51	0,88	0,01	3,75	4,11	19,9
V3-WP	11,41	0,54	0,88	0,01	4,30	4,11	21,2
V4-WP	13,87	0,62	0,88	0,01	0,02	4,11	19,5
V0-PK	64,91	0,29	10,98	0,03	5,21	4,11	85,5
V1-PK	56,03	0,27	10,99	0,03	5,21	4,11	76,6
V2-PK	64,91	0,29	10,98	0,03	3,75	4,11	84,1
V3-PK	69,11	0,30	10,98	0,03	4,30	4,11	88,8
V4-PK	78,27	0,32	10,93	0,03	0,02	4,11	93,7
V0-FW	47,79	0,19	10,86	0,04	5,21	4,11	68,2
V1-FW	41,05	0,17	10,86	0,04	5,21	4,11	61,4
V2-FW	47,79	0,19	10,86	0,04	3,75	4,11	66,7
V3-FW	51,17	0,20	10,86	0,04	4,30	4,11	70,7
V4-FW	60,61	0,22	10,85	0,04	0,02	4,11	75,8

Tabelle A-11: Angepasste Berechnung (Regensburg - Klimazone 13)

GS Prüfering	Heizung (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Heizung [kWh/m²a]	Warmwasser (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Warmwasser [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	gesamt [kWh/m²a]
V0-WP	9,68	0,49	0,88	0,01	5,21	4,11	20,4
V1-WP	8,30	0,44	0,88	0,01	5,21	4,11	18,9
V2-WP	9,68	0,49	0,88	0,01	3,75	4,11	18,9
V3-WP	10,37	0,52	0,88	0,01	4,30	4,11	20,2
V4-WP	12,45	0,60	0,88	0,01	0,02	4,11	18,1
V0-PK	60,00	0,28	10,93	0,03	5,21	4,11	80,6
V1-PK	51,97	0,26	10,94	0,03	5,21	4,11	72,5
V2-PK	60,00	0,28	10,93	0,03	3,75	4,11	79,1
V3-PK	63,67	0,29	10,93	0,03	4,30	4,11	83,3
V4-PK	71,13	0,31	10,88	0,03	0,02	4,11	86,5
V0-FW	44,00	0,18	10,82	0,04	5,21	4,11	64,4
V1-FW	37,82	0,17	10,82	0,04	5,21	4,11	58,2
V2-FW	44,00	0,18	10,82	0,04	3,75	4,11	62,9
V3-FW	46,96	0,19	10,82	0,04	4,30	4,11	66,4
V4-FW	55,10	0,21	10,80	0,04	0,02	4,11	70,3

Tabelle A-12: Angepasste Berechnung (Hamburg - Klimazone 3)

GS Prüfering	Heizung (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Heizung [kWh/m²a]	Warmwasser (o. Hilfsenergie) [kWh/m²a]	Hilfsenergie Warmwasser [kWh/m²a]	Belüftung [kWh/m²a]	Beleuchtung [kWh/m²a]	gesamt [kWh/m²a]
V0-WP	8,14	0,42	0,88	0,01	5,21	4,11	18,8
V1-WP	6,96	0,38	0,88	0,01	5,21	4,11	17,5
V2-WP	8,14	0,42	0,88	0,01	3,75	4,11	17,3
V3-WP	8,71	0,45	0,88	0,01	4,30	4,11	18,4
V4-WP	10,40	0,52	0,88	0,01	0,02	4,11	15,9
V0-PK	50,86	0,25	10,88	0,03	5,21	4,11	71,3
V1-PK	43,86	0,23	10,90	0,03	5,21	4,11	64,3
V2-PK	50,86	0,25	10,88	0,03	3,75	4,11	69,9
V3-PK	53,85	0,26	10,88	0,03	4,30	4,11	73,4
V4-PK	59,34	0,27	10,87	0,03	0,02	4,11	74,6
V0-FW	37,12	0,16	10,74	0,04	5,21	4,11	57,4
V1-FW	31,82	0,14	10,74	0,04	5,21	4,11	52,1
V2-FW	37,12	0,16	10,74	0,04	3,75	4,11	55,9
V3-FW	39,54	0,17	10,74	0,04	4,30	4,11	58,9
V4-FW	45,96	0,18	10,73	0,04	0,02	4,11	61,0

Tabelle A-13: Angepasste Berechnung (Freiburg - Klimazone 12)