



Universität für Bodenkultur Wien

Department für Bautechnik und
Naturgefahren

Institut für konstruktiven Ingenieurbau

Arbeitsgruppe Ressourcenorientiertes Bauen

Peter Jordanstraße 82

A-1190 Wien

Viktoria Werfring

Auswahlkriterien von Haustechnik-Komponenten für die Plusenergiesanierung von Schulbauten

Diplomarbeit des Studiums

„Stoffliche und energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe“

24. Mai. 2012

Betreuer: Univ. Prof. Arch. DI Dr. techn. Martin Treberspurg
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Arbeitsgruppe ressourcenorientiertes
Bauen, BOKU Wien

Mitbetreuer: Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich
Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie, TU München/Straubing

Arch. DI Doris Österreicher, MSc
Austrian Institut of Technology, Wien

DI Mariam Djalili
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Arbeitsgruppe ressourcenorientiertes
Bauen, BOKU Wien

Vorwort

Meinen Bachelor habe ich an der Fachhochschule Wiener Neustadt am Standort Tulln in Biotechnische Verfahren absolviert, wodurch ich gute Kenntnisse in Chemie erworben habe. Da ich dieses chemische Wissen mit der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe kombinieren wollte, habe ich mich an der Universität für Bodenkultur in den Masterstudiengang „Stoffliche und energetische Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen“ eingeschrieben. In diesem neuen Studiengang wurden mir nicht nur Kenntnisse von nachwachsenden Rohstoffen, sondern auch von erneuerbaren Technologien, wie beispielsweise Photovoltaik vermittelt. Dadurch wurde mein Interesse für nachhaltige und erneuerbare Systeme geweckt.

Auf das Thema der Diplomarbeit bin ich durch Zufall gestoßen. Ich wollte mehr über „Smart Cities“ erfahren und nahm deswegen bei einer öffentlichen Konferenz teil. Im Rahmen dieser Veranstaltung lernte ich meine Betreuerin des Unternehmens, die mich als Diplomandin beschäftigte, kennen und wurde darauf aufmerksam gemacht, dass das Austrian Institute of Technology gerade an einer Studie arbeitet, die sich mit Plusenergiesanierungskonzepten einer Schule befasst.

Bevor ich die Stelle annahm, habe ich mir überlegt, warum ich mich mit diesem Thema auseinandersetzen sollte. Dabei kam ich auf folgende Schwerpunkte:

- Beobachtungen und Messungen lassen keinen Zweifel, dass sich das Klima aufgrund der globalen Erwärmung ändert. Um den Klimawandel zu bekämpfen, müssen Treibhausgasemissionen in starkem Ausmaß reduziert werden.
- Der derzeitige Gebäudebestand trägt einen wesentlichen Beitrag zu weltweiten Treibhausgasemissionen bei. Vor allem die Verwendung von fossilen Energieträgern zur Raumheizung und zur Bereitstellung des Warmwassers fungiert als hohe Treibhausgasemissionsquelle.
- Schulgebäude weisen landesweit einen hohen Bestand auf und sind gleichzeitig für einen großen Teil der CO₂-Emissionen verantwortlich. Schulen besitzen somit ein großes Potential zur Verbesserung der Umwelt.
- Um den Klimawandel entgegenzuwirken, muss die Energieversorgung von Gebäuden nachhaltig erfolgen. Um dies zu bewirken, ist es erforderlich, dass im Gebäudesektor die Themen „Energieeffizienz, erneuerbare Energien und Energieeinsparung“ behandelt werden.

Aufgrund der gegenwärtigen Situation, dass energieeffiziente Gebäude sowie nachhaltige und erneuerbare Systeme für einen effektiven Klimaschutz von großer Bedeutung sind, kam ich zu dem Entschluss, mich dieser Aufgabenstellung zu widmen.

Im Zuge dieser Diplomarbeit konnte ich meine Interessen und Kenntnisse auf den Gebieten erneuerbare Energiesysteme und energieeffiziente Gebäude vertiefen.

Kurzfassung:

Um den Energieeinsatz in öffentlichen Gebäuden zu reduzieren und dem Klimawandel entgegenzuwirken muss der Energieverbrauch gesenkt werden, sowie die Nutzung von Energien aus erneuerbaren Quellen verstärkt werden. Im Gebäudesektor geschieht ein Umdenken hin zu energieeffizienten Gebäuden, da der weltweite Energieverbrauch von Gebäuden fast 40 % der Primärenergie in Anspruch nimmt und für ungefähr 24 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich ist.

Gemäß der Arbeitsstättenzählung vom 15. Mai 2001 durch die Statistik Austria befinden sich in Österreich insgesamt 14.980 Arbeitsstätten im Unterrichtswesen (Statistik Austria, 2001). Durch geeignete Sanierungen dieser Bauwerke kann im Gebäudesektor ein bedeutender Anteil zur Reduzierung des weltweiten Energiebedarfs und der Verminderung schädlicher Emissionen beigetragen werden. Des Weiteren sind Schulgebäude gute Demonstrationsprojekte, um der Gesellschaft zu zeigen, dass der Energieverbrauch gering gehalten werden kann und die Energieversorgung mit Hilfe von nachhaltigen Technologien und erneuerbaren Energien zum großen Teil gedeckt werden kann.

Diese Arbeit widmet sich den Haustechnik-Komponenten, die gezielt eingesetzt werden können, um energieeffiziente Schulsanierungen durchzuführen. Neben der Senkung des Energiebedarfs von Schuleinrichtungen, ist die Steigerung des Nutzerkomforts von SchülerInnen und LehrerInnen ein wesentlicher Bestandteil bei einer effizienten Schulsanierung. Vor allem die Installierung einer kontrollierten Lüftung im Zuge einer Abdichtung der Gebäudehülle steht hier im Vordergrund, um einen Mindestgrundluftwechsel zu gewährleisten. Eine erhöhte CO₂-Belastung beeinträchtigt die Lern- und Konzentrationsfähigkeit der SchülerInnen negativ.

Weiters wurden nachhaltige Technologien, wie „Solarthermie, Photovoltaik, Photovoltaik/Solarthermie-Hybrid, Wärmepumpen, Kombination Wärmepumpen mit Solarthermie“ untersucht und dargestellt. Sie tragen zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden bei. Die Haustechnik-Komponente Lüftung wird ebenfalls untersucht, da diese einen wichtigen Beitrag für den hygienischen Grundwechsel von Luft darstellt. Je nach System konnten unterschiedliche Kriterien gefunden werden, die bei der Schulsanierung in Betracht gezogen werden sollten. Diese Auswahlkriterien, die bei der Anwendung und Planung berücksichtigt werden müssen, wurden als Fließdiagramm oder als Checkliste mit Kriterien angeführt.

Plusenergie-Niveau kann bei einer Schulsanierung durch entsprechende bauliche Maßnahmen und den Einsatz von nachhaltigen Systemen erzielt werden und sollte daher auch angestrebt werden, um den Energiebedarf des Gebäudes zu reduzieren und den Nutzerkomfort zu steigern.

Schlagworte:

Energieeffizienz, erneuerbare Energien, Nachhaltige Technologien, Plusenergiegebäude, Sanierung

Abstract:

To reduce the energy input and fight global warming, energy consumption must be diminished and the use of energy from renewable sources has to be increased. In the building sector, there has been a rethinking towards energy-efficient buildings, because the world's energy consumption of buildings accounts for almost 40 % of primary energy and is responsible for approximately 24 % of greenhouse gas emissions.

In 2001 there were about 14.980 workplaces in the Austrian education sector (Source: Statistik Austria, 2001). Through refurbishment of these education buildings, the global energy consumption and harmful emissions can be reduced significantly in the building sector. In addition, school buildings are excellent demonstration projects to show society that the energy consumption can be minimized and the energy supply can be provided by sustainable technologies and renewable energies.

This master thesis deals with building-service-components, which can be used to perform energy-efficient school-refurbishments. Apart from reducing the energy demand of educational institutions, the increased comfort of pupils and teachers is an essential component of an effective school refurbishment. Especially the installation of controlled ventilation is an important part of the refurbishment to ensure a basic minimum air change. This is especially important since an increased CO₂ load affects the learning ability and concentration of students negatively.

Furthermore sustainable technologies, such as "solar thermal, photovoltaics, photovoltaic/solar hybrid, heat pumps, heat pumps combination with solar thermal energy" are examined and shown, since they are also ways to improve the energy efficiency of buildings. The building-service-component ventilation is also examined, as it contributes majority to the basic hygienic change of air. Depending on the type of system, various criteria must be considered for school refurbishments. In chapter four an overview of the planning applications for the different systems is given.

Plus-Energy status can be and should be achieved in order to fight against global warming and to ensure the comfort of the users.

Keywords:

energy efficiency, energy plus buildings, renewable energy, refurbishment, sustainable technologies

Verzeichnis der Abkürzungen

AC	Wechselstrom (alternating current)
BIPV	Building integrated photovoltaic
BREEAM	Building Research Establishment Building Research Establishment (GB)
Bmvit	Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (D)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EBF	Die Energiebezugsfläche ist die Summe aller ober- und unterirdischen Geschossflächen, welche innerhalb der thermischen Gebäudehülle liegen und für deren Nutzung ein Beheizen oder Klimatisieren notwendig ist.
EC	Gleichstrom (electronically commutated)
ECBCS	Energy Conservation in Buildings and Community Systems
el.	elektrisch
Eneff:Schule	Energieeffiziente Schulen (Programm des BMWi)
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
GIPV	Gebäudeintegration von Photovoltaik-Modulen
g-Wert	Der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) ist ein Maß für die Durchlässigkeit von transparenten Bauteilen für Energie. Er ist die Summe aus der direkten Transmission solarer Strahlung, sowie die Wärmeabgabe nach innen durch Strahlung und Konvektion.
HdZ+	Haus der Zukunft+
IEA	Internationale Energieagentur (International Energy Agency)
JAZ	Jahresarbeitszahl
k.A.	keine Angaben
kWp	Kilowattpeak
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design (USA)
Minergie-P	Der Standard MINERGIE-P bezeichnet und qualifiziert Bauten, die einen noch tieferen Energieverbrauch als MINERGIE anstreben. Das Zertifikat ist für Gebäude mit Standort in der Schweiz sowie im Fürstentum Liechtenstein gültig.
O ₂	Sauerstoff
o.J.	ohne Jahresangabe
ORC	Organic Rankine Cycle
PE	Primärenergie
PHI	Passivhaus Institut
ppm	parts per million
PV	Photovoltaik
PV/T	Photovoltaik-Solarthermie-Hybridkollektor
SHC	solar heating and cooling
ST	Solarthermie
STC	Standard-Test-Bedingungen (Standard-Test-Conditions)
th.	thermisch
ΔT	Temperaturdifferenz
U-Wert	Der Wärmedurchgangskoeffizient gibt die Leistung (Energienmenge pro Zeiteinheit) an, die durch eine Fläche von 1 m ² fließt, wenn sich die beidseitig anliegenden Lufttemperaturen stationär um 1 K unterscheiden. Die SI-Maßeinheit ist W/(m ² K).
WW	Warmwasser
ZEBs	Zero Energy Buildings ZEBs

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG	1
2.	PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	2
3.	METHODENBESCHREIBUNG	3
4.	ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE	4
4.1.1	Passivgebäude	4
4.1.2	Zero Energy Buildings (ZEBs)	5
4.1.3	Plusenergiegebäude	10
4.1.4	Schulen in energieeffizienter Bauweise	10
5.	ENERGIEEFFIZIENTE SCHULEN	19
5.1	Schulsanierungen in Österreich mit Passivgebäude-Komponenten	19
5.1.1	Uhlandschule – Grund-/Hauptschule mit Werkrealschule	27
5.1.2	Europa-Schule Gymnasium in Reutershagen	32
5.1.3	Grundschule Niederheide in Hohen Neuendorf	37
5.1.4	Energieeinsparungspotential in der Schulsanierung	40
6.	HAUSTECHNIK-KOMPONENTEN	44
6.1	Photovoltaik (PV)	45
6.1.1	Grundlagen	45
6.1.2	Technologie und Produkt Screening	46
6.1.3	Für die Schulsanierung wichtige Kriterien	48
6.2	Solarthermie	51
6.2.1	Grundlagen	51
6.2.2	Technologie und Produkt Screening	51
6.2.3	Für die Schulsanierung wichtige Kriterien	53
6.3	Photovoltaik/Solarthermie (PV/T)-Hybride	54
6.3.1	Grundlagen	54
6.3.2	Technologie und Produkt Screening	55
6.3.3	Thermische und elektrische Effizienz	57
6.3.4	Für die Schulsanierung wichtige Kriterien	59
6.3.5	PV/T – Systeme, Markt und Zukunftsaussichten	59
6.4	Lüftung	60
6.4.1	Lüftungen in Schulen	60
6.4.2	Grundlagen	61
6.4.3	Technologie und Produkt Screening	63
6.4.4	Für die Schulsanierung wichtige Kriterien	70

6.5	Wärmepumpe	71
6.5.1	Grundlagen	71
6.5.2	Technologie und Produkt Screening	73
6.5.3	Für die Schulsanierung wichtige Kriterien	79
6.6	Solarthermie – Wärmepumpen Kombination	80
6.6.1	Grundlagen	80
6.6.2	Technologie und Produkt Screening	80
6.6.3	Für die Schulsanierung wichtige Kriterien	83
7.	AUSWAHLKRITERIEN	84
7.1	Photovoltaik	84
7.2	Solarthermie	88
7.3	Lüftung	90
7.4	Wärmepumpe	99
8.	ZUSAMMENFASSUNG	109
9.	AUSBLICK	111
10.	LITERATUR- UND QUELLENANGABEN	113
11.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	117
12.	TABELLENVERZEICHNIS	119
13.	FORMELVERZEICHNIS	120

1. Einleitung

Das Richtlinien- und Zielpaket für Klimaschutz und Energie der Europäischen Union enthält Zielvorgaben bis 2020, um den weltweiten Temperaturanstieg unter 2 °C zu halten. Bis zum Jahr 2020 sollen folgende energie- und klimapolitischen Zielsetzungen gelten:

- 20 % weniger Treibhausgasemissionen
- 20 % Anteil an erneuerbaren Energien
- 20 % mehr Energieeffizienz

Die Energieeffizienz im Gebäudesektor ist von entscheidender Bedeutung, weil Gebäude für 40 % des Gesamtenergieverbrauchs der Union und 24 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich sind. Im März 2007 hat der Europäische Rat bei seiner Tagung auf die rasche und ausführliche Umsetzung des Aktionsplans „Aktionsplan für Energieeffizienz: Das Potenzial ausschöpfen“ hingewiesen, mittels Steigerung der Energieeffizienz den Energieverbrauch in der Union bis 2020 um 20 % zu reduzieren. Dieser Aktionsplan weist auf das erhebliche Potenzial für kosteneffiziente Energieeinsparungen im Gebäudesektor.

Die Steigerung der Energieeffizienz steht ebenfalls im Zusammenhang mit der Förderung der Nutzung von erneuerbaren Energiequellen (Europäisches Parlament und der Rat, 2010). Mit Hilfe von nachhaltigen und erneuerbaren Technologien, soll der Energiebedarf eines Gebäudes erzielt werden. Solche Auflagen werden bereits bei Niedrigenergie- und Passivgebäuden verwendet, um einen niedrigen Bedarf an Energie zu gewährleisten. Im Zuge der technischen Entwicklung sind nun auch Nullenergie- oder Plusenergiegebäude möglich.

2. Problemstellung und Zielsetzung

Schulbauten sind vor allem in urbanen Gebieten zahlreich vorhanden und weisen oft, neben geringen Nutzkomfort, hohe Energieverbräuche auf. Durch geeignete Sanierungen dieser Bauwerke kann im Gebäudesektor ein Anteil zur Steigerung der Energieeffizienz und somit auch zur Reduzierung des weltweiten Energiebedarfs und der Verminderung schädlicher Emissionen geleistet werden. Häufig bleiben Schulen im alten Bestand oder werden nur teilweise saniert, indem die notwendigsten Maßnahmen wie Austausch der Fenster erfolgen, weil die finanziellen Mitteln nicht zur Verfügung stehen.

Ziel dieser Arbeit ist es aufzuzeigen, durch welche Maßnahmen das Plusenergie-Niveau bei Sanierungen von Schulbauten erreicht werden kann. Im Zuge dieser Arbeit werden daher für die Schulsanierung wichtige Systeme dargestellt, die zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden beitragen. Unter anderem wird ebenso die Haustechnik-Komponente Lüftung untersucht, da diese einen wichtigen Beitrag für die Erhöhung des Nutzerkomforts darstellt. Die einzelnen Systeme werden nach folgenden Kriterien erforscht: Stand des Wissens, bereits am Markt erhältliche Systeme und für die Forschung relevante Technologien. Je nach System konnten unterschiedliche Kriterien gefunden werden, die bei der Schulsanierung in Betracht gezogen werden müssen und wurden daher nach dem Produkt und Technologie Screening angeführt. Auswahlkriterien der jeweiligen Systeme, die bei der Anwendung und Planung berücksichtigt werden müssen, werden als Fließdiagramm oder als Checkliste angeführt. Ein weiteres Ziel der Diplomarbeit ist es aufzuzeigen, warum Schulen zu energieeffizienten Gebäuden saniert werden müssen. Die Anforderungen an energieeffizienten Schulen werden im Kapitel '1.4.4 Schulen in energieeffizienter Bauweise' aufgezählt.

Die Diplomarbeit wurde im Rahmen des Projektes SchulRen+ durchgeführt. *„Das Forschungsprojekt SchulRen+, welches im Rahmen des 2.Calls der ‚Haus Der Zukunft Plus‘ Programmlinie abgewickelt wird, untersucht anhand eines konkreten Beispiels einer Wiener Gründerzeitschule innovative Konzepte für Plus-Energie-Sanierungen“* (Ökosan, 2011). Die Fördernummer dieses Projekts lautet 827183.

3. Methodenbeschreibung

Um sich einen Einblick darüber zu verschaffen, was sich hinter den Begriffen „Passivgebäude“, „Zero Energy Buildings“, und „Plusenergiegebäude“ verbirgt und welche Anforderungen erfüllt werden müssen, um zum Beispiel den Grad eines Passivgebäudes zu erreichen, werden zunächst die einzelnen Begriffe genauer betrachtet. Gerade in öffentlichen Bauten, insbesondere im Fall von Schulgebäuden, ist eine nachhaltige Bauweise wichtig, da Schulen in einer großen Anzahl vorhanden sind und zudem eine Vorbildfunktion innehalten.

In Österreich sind bisher noch keine Plusenergieschulen vorhanden, jedoch wurden bereits einige Schulen mit Komponenten für Passivgebäude saniert. Da die Grundlage für Plusenergiegebäude das Passivgebäude bildet und deshalb Passivgebäude-Komponenten zur Erreichung des Plusenergie-Niveaus unentbehrlich sind, wird im zweiten Abschnitt eine Übersichtstabelle dargelegt, in der die in Österreich sanierten Schulen in Passiv-Bauweise aufgelistet sind. Als nächstes werden drei Demonstrationsprojekte für Plusenergieschulen aufgezeigt. Diese werden im Rahmen des Projekts „Eneff:Schule“ des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMW) durchgeführt. Mit Hilfe dieser Studien kann bereits ein erster Eindruck erzielt werden, mit welchen Konzepten und Baumaßnahmen der Plusenergiestandard einer Schule erreicht werden kann. Danach wird anhand zweier Beispiele das Einsparungspotential an Energiebedarf mittels Sanierungsmaßnahmen dargelegt, um schließlich zu vermitteln, dass der Bedarf an Energie durch Sanierung stark reduziert werden kann.

Im dritten Kapitel der Arbeit werden folgende „Haustechnik-Komponenten“ betrachtet:

- Photovoltaik (PV)
- Solarthermie (ST)
- Photovoltaik-Solarthermie-Hybrid (PV/T)
- Lüftung
- Kombinationen von Wärmepumpe (WP) und Solarthermie

Diese Systeme wurden ausgewählt, da sie direkt Energie aus der Umgebung beziehen können und so den Gebäudebedarf an Wärme und Strom großteils oder zur Gänze decken können und zugleich einen Beitrag zur Reduktion von Emissionen leisten. Die Lüftung wurde ausgesucht, weil sie sowohl die Bereitstellung des hygienischen Mindestluftwechsels gewährleistet, als auch den Nutzerkomfort erhöht und demnach in Schulgebäuden als Grundausstattung fungieren sollte.

Um zu sehen, welche Systeme bereits am Markt vorhanden sind, wurden Firmen gesucht, welche die jeweiligen Technologien herstellen und für den Endkonsumenten anbieten. Zahlreiche Firmen wurden kontaktiert und um detaillierte Informationen, wie zum Beispiel eine Kostenaufstellung, Vor- und Nachteile der Produkte, etc. gebeten.

Kapitel vier zeigt die Auswahlkriterien für die soeben genannten Haustechnik-Komponenten auf. Dieser Abschnitt kann vor allem für Planer, Architekten und Installateure interessant sein, da präsentiert wird, was beachtet werden muss, wenn die jeweiligen Systeme zum Einsatz kommen. Anschließend erfolgen ein kurzes Resümee der vorliegenden Arbeit sowie ein Ausblick zur Bilanzierung von energieeffizienten Gebäuden und den Haustechnik-Komponenten.

4. Energieeffiziente Gebäude

Um einen kurzen Überblick zu erhalten, was im Detail mit den einzelnen Begriffen Passivgebäude, Zero Energy Buildings und Plusenergiegebäude gemeint ist, werden in diesem Teil der Arbeit Definitionen sowie die nötigen technischen Anforderungen für das entsprechende Niveau angeführt. Zuletzt wird beschrieben, warum es so wichtig ist, dass Schulen, als Vorbild öffentlichen Bauens, diese Anforderungen erzielen sollten.

4.1.1 Passivgebäude

Die Passiv-Bauweise legt den Grundstein für das Plusenergie-Niveau. Daher werden die Anforderungen des Passivgebäudes aufgezeigt. Zuerst erfolgt jedoch die Definition des „Passivgebäudes“ gemäß Passivhaus Institut Darmstadt.

"Ein Passivhaus ist ein Gebäude, in welchem die thermische Behaglichkeit (ISO 7730) allein durch Nachheizen oder Nachkühlen des Frischluftvolumenstroms, der für ausreichende Luftqualität (DIN 1946) erforderlich ist, gewährleistet werden kann - ohne dazu zusätzlich Umluft zu verwenden.

Diese Definition ist rein funktional, enthält keinerlei Zahlenwerte und gilt für jedes Klima. Die Definition zeigt, dass es nicht um einen willkürlich gesetzten Standard geht, sondern um ein grundlegendes Konzept. Das Passivhaus wurde also nicht erfunden - das Passivhaus-Prinzip wurde vielmehr entdeckt. Einzig streiten könnte man über die Frage, ob der Name "Passivhaus" treffend für dieses Konzept ist. Nun - es gibt keinen besseren. Denn thermische Behaglichkeit wird so weit wie irgend möglich durch passive Maßnahmen (Wärmedämmung, Wärmerückgewinnung im Temperaturgefälle, passiv genutzte Sonnenenergie und innere Wärmequellen) gewährleistet" (PHI, 2005).

Das Gebäude muss bestimmte Ansprüche erfüllen, um als Passivgebäude bezeichnet werden zu dürfen. Nach dem Passivhausinstitut Darmstadt (PHI, 2006) ist die Gebäudedichtheit eine wichtige Voraussetzung, um die unten genannten Kriterien zu erfüllen. Diese n_{50} -Werte¹ betragen bei Passivhäusern maximal 0,6 (1/h). Im Passivhaus-Institut wurden Überlegungen angestrebt, inwieweit Einsparmöglichkeiten denkbar sind, um die Energieeffizienz von Gebäuden zu verbessern. Abschließend wurde der Strombedarf zwischen 15 und 20 kWh/(m²a) und der gesamte Wärmebedarf zwischen 20 und 30 kWh/(m²a) festgelegt, aufgrund der Ansicht, dass diese Anforderungen in der Praxis erreicht werden könnten. Im Laufe des Projekts CEPHEUS wurde dann die Obergrenze des gesamten Endenergiebedarfs auf 42 kWh/(m²a) festgesetzt. Des Weiteren wurden Vorkehrungen getroffen, um die Gebäudenutzer davon abzuhalten, die jeweiligen Anforderungen nicht mit Hilfe von ineffizientem Technologieeinsatz, zum Beispiel den Heizwärmebedarf mittels Strom zu decken, zu erzielen. Deshalb wurde der Ansatz betrieben, die Kennwerte primärenergetisch festzulegen (PHI, 2011). Um das Passivgebäude-Niveau zu erreichen, müssen laut

¹ Bei der Messung der Luftdichtheit eines Passivgebäudes darf bei einem Differenzdruck von 50 Pascal die Luftwechselrate nicht 0,6 pro Stunde überschreiten. Quelle nach Wordtmann, 2005

Passivhaus-Institut folgende Grenzwerte nach PHPP eingehalten werden (Treberspurg und Smutny, 2007):

- Heizlast $\leq 10 \text{ W}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \text{ a})$
- Heizwärmebedarf $\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \text{ a})$
- Gesamter Primärenergiebedarf $\leq 120 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{EBF}} \text{ a})$
(Heizung, Warmwasser, Strom)

Als Grenzwerte zur Zertifizierung des Passivgebäudes haben sich in den letzten Jahren die Kennwerte maximaler Heizwärmebedarf von $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und maximale Primärenergie von $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ etabliert (PHI, 2011).

Anzumerken ist, dass diese Kennwerte für Mitteleuropa gelten, also für Länder mit gemäßigten Klimabedingungen. In anderen, südlicheren Regionen mit höherer Sonneneinstrahlung, ist der Heizbedarf geringer, während der Kühlbedarf steigt.

4.1.2 Zero Energy Buildings (ZEBs)

Der weltweite Energieverbrauch von Gebäuden beansprucht über 40 % der Primärenergie und ist für 24 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich (Ayoub, o.J.). Laut Marszal et al. (o.J.) entstehen durch Bestand bis zu 33 % direkte und indirekte Treibhausgasemissionen. Energieeffiziente Gebäude, sogenannte „Zero Energy Buildings (ZEB)“ sollen zur Reduktion des Energiebedarfs und der CO_2 -Emissionen im Gebäudesektor beitragen. Länder erlassen Richtlinien und nationale Ziele für ZEB-Konzepte, obwohl bisher eine klare Definition und eine standardisierte Methode zur Messung der Gebäudeleistung fehlt (Sartori, et al, o.J.). Das IEA-Joint Project SHC Task 40 und ECBCS Annex 52 „Towards Net Zero Energy Solar Buildings (Net ZEB)“ konzentriert sich auf ein gemeinsames Verständnis und eine vereinheitlichte Methode zur Berechnung von energieeffizienten Gebäuden (Marszal et al., o.J.). Eine internationale Definition und eine standardisierte Berechnungsmethode würden zu einer leichteren Evaluierung der Gebäude führen. Außerdem wäre es anschließend möglich, die Gebäude international miteinander zu vergleichen. Im Mai 2010 formte die Europäische Kommission und das Europäische Parlament die Directive on Energy Performance of Buildings (EPBD) zur „Nearly Zero Energy Building“ (Marszal et al., 2011), eine Richtlinie, die im Artikel 9 besagt:

„(1) Die Mitgliedstaaten gewährleisten, dass

- a) bis 31. Dezember 2020 alle neuen Gebäude Niedrigstenergiegebäude sind und*
- b) nach dem 31. Dezember 2018 neue Gebäude, die von Behörden als Eigentümer genutzt werden, Niedrigstenergiegebäude sind.“*

Dementsprechend soll ab 1990 der Energieverbrauch sowie die CO_2 -Emissionen in der gesamten EU bis 2020 um 20 % gesenkt werden (Europäisches Parlament und der Rat, 2010).

Nach Sartori et al. (o.J.) wird zwischen Net ZEBs und ZEBs unterschieden. Net ZEBs sind demzufolge Gebäude, die nur mit dem Energienetz verbunden sind, während der Term ZEB auch autonome Gebäude beinhaltet. Bei einem Nullenergiegebäude muss das Gleichgewicht zwischen Energieimport und –export über die Zeit größer gleich Null sein. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, ist der erste Schritt die Senkung des Energiebedarfs. Folgend ist es wichtig, die

Energieversorgung mittels erneuerbaren Energiesystemen zu decken. Wird Energie im Überschuss produziert, so liegt der Endpunkt über der 'net zero balance line'. Demgemäß wird ein Plusenergie-Niveau erzielt.

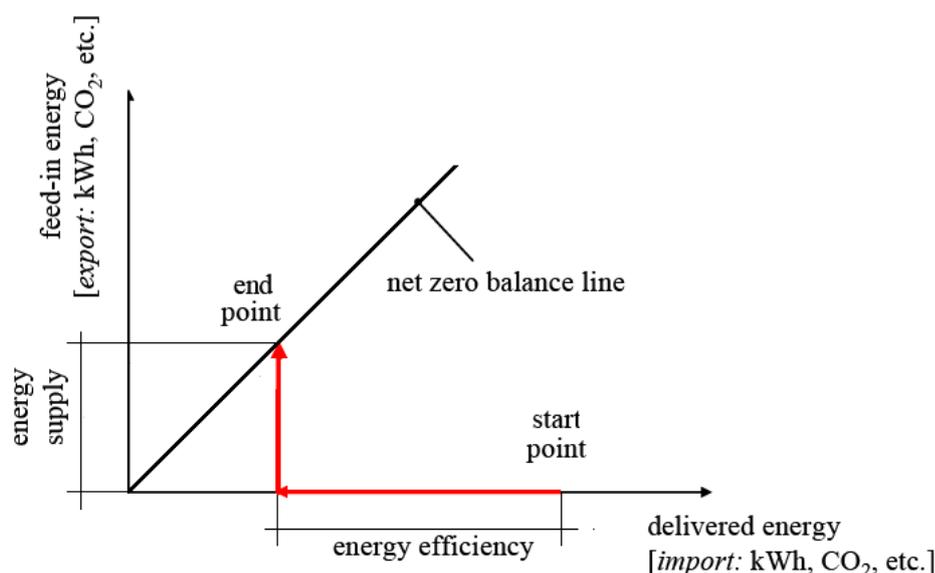


Abbildung 1: Energiebilanz eines Gebäudes. Quelle nach Sartori et al. (o.J.)

Viele ZEBs-Projekte benutzen Komponenten von Solar-Häusern oder Passivgebäuden. Ungefähr ein Drittel der anerkannten Net ZEBs konnten im Vergleich zu herkömmlichen Gebäuden, den Energiebedarf um fast 60 % reduzieren. Die meisten Nullenergiegebäude besitzen Zertifikate, wie zum Beispiel das international angewandte und in den USA entwickelte Gütesiegel LEED. Ein weiteres Zertifikat ist BREEAM, welches in Großbritannien verwendet wird oder das Schweizer Gütesiegel Minergie-P (Musall et al., .o.J). Über diese Zertifikate werden die Gebäude mittels verschiedenster Parameter, die auch für das Niveau des Nullenergiegebäudes wichtig sind, auf nachhaltiges Bauen überprüft und bewertet. Solche Faktoren können ökologische und ökonomische Kriterien sein, sowie Lebenszykluskosten, spezifischer Wärmeleistungsbedarf, Luftdichtigkeit der Gebäudehülle, Effizienz von Haushaltsgeräten, etc. Auch Merkmale wie Raumakustik oder die Qualität der gewählten Bauprodukte beeinflussen die Gesamtbewertung. Als Beispiel ist die LEED-Zertifizierung heranzuziehen. Die Abkürzung LEED steht für „Leadership in Energy and Environmental Design“. Strikte Standards in den Bereichen Standortkonzept, Wasser- und Energieverbrauch, Baustoffe und umweltfreundlicher Innenausbau werden beim Objekt ermittelt und vom Green Building Council bewertet. Innerhalb dieses Bewertungssystems sind vier Qualitätsstufen (einfach, Silber, Gold und Platin) vorhanden, anhand derer die Gebäude zertifiziert werden (Ecobauconsulting, 2011). Wie schon oben erwähnt, gibt es eine Vielfalt von ZEBs Definitionen und Methoden. Marszal et al. (2011) hat im Artikel „Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies“ einige zusammengefasst. Diese werden nun im nächsten Schritt kurz aufgezeigt.

a. 'metric of balance' - metrisches Gleichgewicht

Hier gibt es eine große Breite an Definitionen und Berechnungsmethoden wie zum Beispiel die Primärenergie, CO₂ äquivalente Emissionen, Exergie, Energiekosten, usw. Am häufigsten wird Primärenergie angewandt.

b. 'Period of the balance' - Zeitraum des Gleichgewichts

Als Zeitspanne der Berechnung kann entweder der gesamte Lebenszyklus, die Betriebszeit mit einer Annahme von 50 Jahren, die Jahresbilanz oder ein jahreszeitlicher beziehungsweise monatlicher Bereich verwendet werden. In der Theorie und auch in der Praxis wird meistens die Jahresbilanz eines Bauwerks herangezogen.

c. 'Type of energy use' - Art der Energienutzung

Laut der internationalen Norm EN 15603: 2008 „Energy performance of buildings – overall energy use and definition of energy rating“ sollte sich die Berechnung der Energieeffizienz auf den Energiebedarf beziehen, welcher nicht abhängig von Umweltbedingungen, der aktuellen Wetterlage und dem Verhalten der BenutzerInnen ist. Manche Veröffentlichungen aus den 1970er Jahren und 80er Jahren gehen schon in Richtung Nullenergiegebäude. Damals war der größte Teil des Energieverbrauchs die thermische Energie für Raumheizung, Warmwasser (WW) und Kühlung. Iqbal und Giljamse vertreten einen Ansatz, der sich ausschließlich auf den Stromverbrauch konzentriert. Hernandez und Kenny (2010) meinen, dass nicht nur die Betriebsphase des Gebäudes, sondern auch die graue Energie² mit einbezogen werden sollte. In der Praxis gibt es eine Vielzahl an Methoden. Oft wird für die Methode der Energieverbrauch des Gebäudes gemessen oder der Standardwert wird herangezogen. Die graue Energie wird im Allgemeinen nicht berücksichtigt.

d. 'Type of balance' - Art des Gleichgewichtes

Die Definition ist hier vor allem für netzgekoppelte ZEBs relevant, da zwischen zwei Typen unterschieden werden kann. Diese sind:

1. der Energieverbrauch und die Energieerzeugung mittels erneuerbaren Energiesystemen
2. Energietransport zum Gebäude und in das Netz

Das Ergebnis der beiden Bilanzen ist in den meisten Fällen gleich. Der Unterschied der beiden Berechnungen ist, dass sich die erste Berechnung auf die Design-Phase und die zweite auf die Monitoring-Phase stützt. Des Weiteren kann in der zweiten Berechnung eine fossile Brennstoff-Wärme-Kopplung betrachtet werden, welche in der ersten Methode nicht berücksichtigt werden kann. Sowohl in der Praxis als auch in der Literatur ist erstere Variante am häufigsten vertreten.

² Der Begriff graue Energie bezeichnet jene Energie, die für die Herstellung, den Transport und der Entsorgung eines Produkts oder einer Dienstleistung benötigt wird. Quelle gemäß Schuß, 2004.

e. 'Renewable energy supply options'- Optionen für die erneuerbare Energieversorgung

Es gibt zwei Möglichkeiten erneuerbare Energien zur Verfügung zu stellen:

- on-site supply:**
- Die Bilanzgrenze ist das Gebäude. Es werden erneuerbare Ressourcen genutzt, die im Gebäude integriert sind. Bsp. Photovoltaik, Solarthermie, Windturbinen
 - Es werden erneuerbare Ressourcen genutzt, die sich am Grundstück befinden. Bsp. Photovoltaik, Solarthermie, Windturbinen
- off-site supply:**
- um die Energie vor Ort zu erzeugen, werden erneuerbare Ressourcen, die sich in der Nähe des Gebäudes befinden genutzt. Bsp. Biomassetransport zum Gebäude
 - Erwerb von erneuerbare Energieressourcen über Emissionsgutschriften, etc.

In der Theorie wird das Thema erneuerbare Energien zur Verfügung zu stellen oft vermieden. In der Neufassung der EPBD wird jedoch erwähnt, dass der Gebäudegesamtenergieverbrauch der Union bereits einen beachtlichen Prozentanteil ausmacht und dieser weiter steigen wird. Daher ist neben der Senkung des Energieverbrauchs im Gebäudesektor auch die Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen eine bedeutende Maßnahme, um einerseits die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und andererseits die Energieversorgungssicherheit, die Förderung von technologischen Entwicklungen, Schaffung neuer Arbeitsplätze sowie die regionale Entwicklung zu stärken (Europäisches Parlament und der Rat, 2010).

Eine grafische Darstellung der verschiedenen Möglichkeiten erneuerbare Energien zur Verfügung zu stellen, wird von Marszal et al. (2011) in Abbildung 2 aufgezeigt.

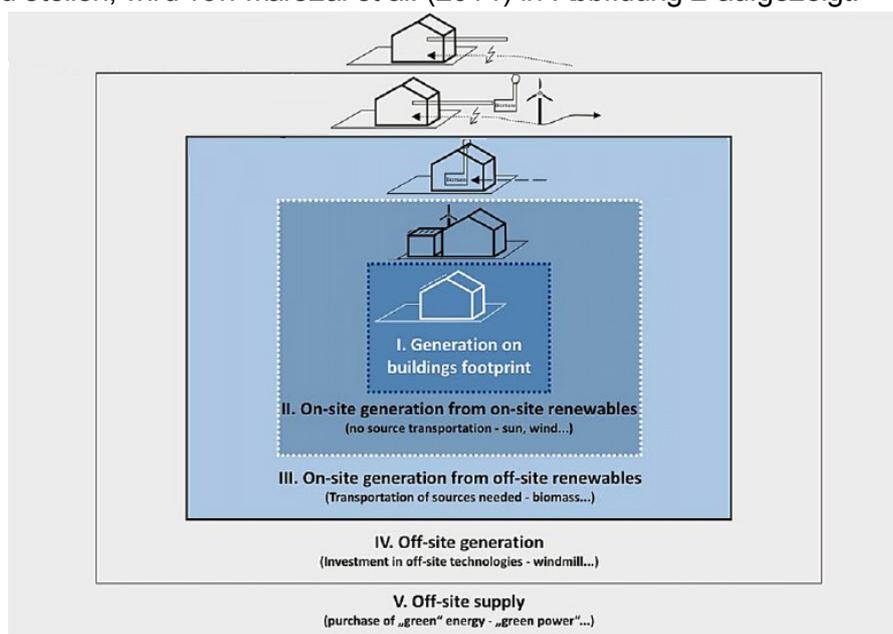


Abbildung 2: Darstellung der Energieversorgung von erneuerbaren Energiequellen.
Quelle gemäß Marszal et al. (2011)

f. 'Connection with the energy infrastructure'- Anbindung an die Energieinfrastruktur

In diesem Fall wird zwischen on-grid und off-grid ZEBs unterschieden. Die Gebäude produzieren und konsumieren erneuerbare Energien. Der Unterschied ist, dass off-grid ZEBs keinen Kontakt mit dem öffentlichen Stromnetz besitzen. Daher benötigen sie Speichersysteme für Perioden mit Spitzenlasten. Diese Art von ZEBs werden als 'selfsufficient', 'autonomous' oder 'standalone' bezeichnet.

Die on-grid ZEBs sind mit einem oder mehreren Infrastrukturnetzen verbunden, wie zum Beispiel Stromnetz, Fernwärme, Gasleitung, Vertriebsnetze usw. Diese Typen werden 'net zero energy', 'grid connected' oder 'grid integrated' benannt. Hier wird eine Speicherung vor Ort vermieden, da die Energie sowohl vom Netz bezogen, als auch in das Netz eingespeist werden kann.

g. 'Requirements'- Anforderungen

Gegenwärtig müssen Gebäude einer Reihe von Anforderungen entsprechen, welche das Design und die Qualität von ZEBs beeinflussen. Im nachfolgenden werden die drei wichtigsten Ansprüche beschrieben.

Anforderung 1: Energieeffizienz

Laut Marszal et al. (2011) ist Lautsen der Ansicht, dass jedes herkömmliche Gebäude zu einem ZEB umgewandelt werden kann, indem das Gebäude mit einer großen Anzahl an Solarkollektoren und Photovoltaik-Modulen ausgestattet wird und es demzufolge über das ganze Jahr gemessen mehr Energie liefert, als verbraucht. Dieser Ansatz ist jedoch für ZEBs ungewöhnlich, da die Reduktion des Energiebedarfs eines Gebäudes an erster Stelle steht. Nebenbei wird ein großer Flächenbedarf beansprucht, um genügend Solarkollektoren (Solarthermie) oder Solarmodule (Photovoltaik) zu installieren. Mangel an Flächenbedarf ist vor allem in Städten vorhanden, da diese immer dichter besiedelt werden. Folglich erlangt gerade in urbanen Gebieten die Gebäudeintegration von Solarmodulen/-kollektoren immer mehr an Bedeutung.

Anforderung 2: Raumklima

Dieses Thema findet in den aktuellen Definitionen kaum Interesse. Nur einige wenige Projekte beziehen das Tageslicht und eine effiziente künstliche Beleuchtungssteuerung, Temperatur, Luftqualität und noch andere Faktoren, die für ein gutes und gesundes Raumklima wichtig sind, mit ein.

Anforderung 3: Wechselwirkung zwischen Gebäude und Stromnetz

Die meisten ZEBs Definitionen vermeiden es diesen Ansatz genauer auszuführen. Es wird nur beschrieben, dass Gebäude mit dem Netz verbunden sind.

4.1.3 Plusenergiegebäude

Bezüglich der Definition „Plusenergiegebäude“ und der Methode zur Bilanzierung gibt es zurzeit weder international noch national einen einheitlichen Standard. Prinzipiell ist der Grundgedanke eines Plusenergiegebäudes der, dass der Energieverbrauch des Gebäudes sehr gering ist und der Bedarf an Restenergie durch nachhaltige Energieträger kompensiert wird. Durch den vermehrten Einsatz von erneuerbaren Energien, wie beispielsweise Photovoltaik, werden Energieüberschüsse produziert, welche anschließend in das Netz eingespeist werden können.

Im Folgendem wird die Definition des Programmes „Haus der Zukunft plus“ des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie dargestellt.

„Unter „Plus-Energie-Gebäude“ wird ein Gebäude verstanden, dessen jährlicher Primärenergieverbrauch vor dem Hintergrund höchster Energieeffizienz unter der vor Ort produzierten erneuerbaren Energie liegt.

Unter „vor Ort“ wird innerhalb der Grenzen der Siedlung oder des Gebäudes bzw. in unmittelbarer Nachbarschaft hierzu verstanden“ (HdZ, 2010).

4.1.4 Schulen in energieeffizienter Bauweise

Warum ist es nun so wichtig, dass Schulen auf den neusten Stand der Energietechnik gebracht werden müssen?

Kinder sind die Ressourcen unsere Zukunft. Schulen dienen daher als Vorbildfunktion für energieeffiziente Gebäude in der 'Zukunft'. Erlernen die SchülerInnen schon im Kindesalter, wie Gebäude einen geringen Energieverbrauch erreichen können und der Bedarf an Energie durch nachhaltige und umweltschonende Systeme gedeckt werden kann, dann tragen sie später mit Sicherheit einen Anteil im Kampf gegen den Klimawandel bei. Dieser Ansatz kann mit Hilfe von einfachen, verständlichen und spielerischen Visualisierungen erzielt werden. Die Methoden wecken das Interesse der Kinder und vermitteln Grundwissen für Energie, Technik und Umwelt.

Visualisierung

Eine kindgerechte Ausführung um die Qualität der Luft im Klassenraum anzuzeigen wäre zum Beispiel die Luftgüteampel. Durch optische und akustische Signale wird den Kindern die momentane Luftqualität aufgezeigt und animiert sie bei unzureichender Luftqualität zum Lüften. Die Luftgüteampel wird in Abbildung 3 dargestellt und in Tabelle 1 erklärt.



Abbildung 3: Darstellung der Luftgüteampel. Quelle gemäß [http://www.baulinks.de/webplugin/2008/0891.php4/\(26.03.2012\)](http://www.baulinks.de/webplugin/2008/0891.php4/(26.03.2012))

Tabelle 1: Erklärung der Luftgüteampel. Quelle nach <http://www.luftgueteampel.de/> (26.03.2012)

CO ₂ -Konzentrationen (ppm)	Optisches Signal (LED)	akustisches Signal (Piepton)	Luftqualität
0 – 1500			gut
1500 – 2500		einmal	mittelmäßig Lüften wird empfohlen
2500 – 3500		einmal	schlecht bitte lüften
> 3500	 blinkendes rotes Licht	fünfmal	sehr schlecht unbedingt lüften

Eine spielerische Variante um die Leistung der Photovoltaikanlage darzustellen, kann mittels des Produkts „VisiKid“ der Firma IKS Photovoltaik (Abbildung 4) veranschaulicht werden. Diese Darstellung eignet sich besonders für Kindergärten und Volksschulen. Auf der rechten Seite befinden sich 24 LED-Glühlampen, welche die aktuelle elektrische Leistung aufzeigt. Je mehr Lampen leuchten, desto höher ist die Anlagenleistung. Durch die Kugeln wird die Energie, welche im aktuellen Monat ins Netz eingespeist wird, demonstriert. Die Kugeln werden durch ein Schrittmotor betriebenes Rad transportiert von einem Vorratsbehälter zu einer Bahn, von der die Kugeln in einen Auffangbehälter rollen. Je mehr Kugeln sich im Behälter befinden, desto mehr Energie wurde im aktuellen Monat erzeugt. Am Monatsende werden die Kugeln im Auffangbehälter in den oberen Behälter zurück gefüllt. Über eine Digitalanzeige kann die exakte Leistung des Gesamt- und Monatsertrags abgelesen werden. Am Ende des Monats wird die Anzeige des Monatsertrags auf Null gesetzt (http://www.iks-photovoltaik.de/pdf/VisiKid_D.pdf/ (17.04.2012)).

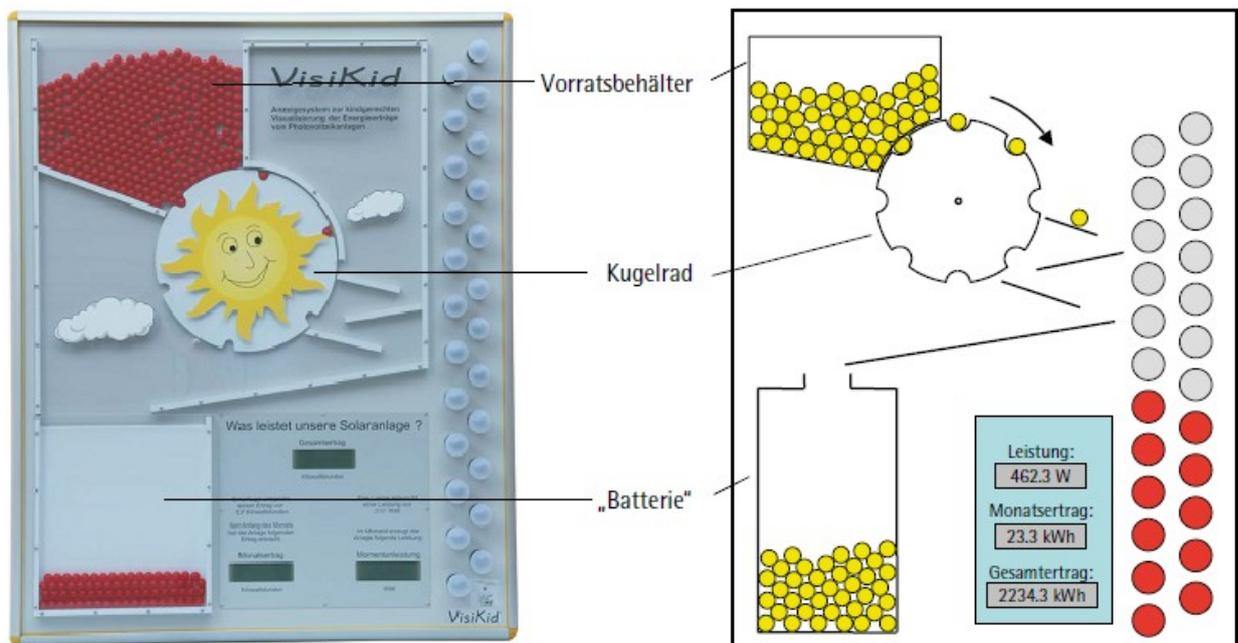


Abbildung 4: VisiKid-Darstellung als Bild (rechts) und Schema (links). Quelle: http://www.iks-photovoltaik.de/mess_und_prueftechnik/visikid.php/ (17.04.2010) und <http://www.sonnenenergie.de/sonnenenergie-redaktion/SE-2009-03/Layout-fertig/PDF/Einzelartikel/SE-2009-03-s038-Photovoltaik-Visikid.pdf/> (20.04.2010)

Schüler mittlerer und höherer Bildung können die Energie- und Umweltkreisläufe bereits besser nachvollziehen, weshalb hier andere Schautafeln eingesetzt werden können. Des Weiteren kann das Interesse der NutzerInnen durch sichtbare Komponenten der Systeme geweckt werden. Im Bettenhaus der Jugendbildungsstätte Windberg in Niederbayern hat der Architekt Thomas Herzog diese Idee durchgesetzt. Im Eingang des Gebäudes befindet sich eine Schautafel, die das System erläutert und die Temperaturverläufe digital anzeigt. Kollektoren, Solarspeicher und Installationsverläufe sind im Gebäude gut erkennbar (Treberspurg, 1999). In den Abbildungen 5 bis 7 werden drei Schautafeln der Firma Rico Electronic Design GbR mit den zugehörigen Merkmalen vorgestellt.

GA-330



Abbildung 5: Visualisierungsmöglichkeit des PV-Ertrags. Quelle: <http://www.rico-electronic.de/>(26.03.2012)

Technische Merkmale:

Lesbarkeit bis ca. 8 m

Gehäuse: 400 x 166 x 35 mm

Aufstellungsort: innen

GA-1000



Abbildung 6: Visualisierungsmöglichkeit des PV-Ertrags. Quelle: <http://www.rico-electronic.de/>(26.03.2012)

Technische Merkmale:

Lesbarkeit bis ca. 100 m

Gehäuse: 300 x 200 x 10 cm

Aufstellungsort: innen und außen

GA-300 (Standardausführung)



Abbildung 7: Visualisierungsmöglichkeit des PV-Ertrags. Quelle: <http://www.rico-electronic.de/>(26.03.2012)

Technische Merkmale:

Lesbarkeit bis ca. 8 m

Gehäuse: 40 x 17 x 3,5 cm

Aufstellungsort: innen

Im Übrigen weisen Schulen einen großen Bestand auf. Allein in Wien wurden im Zeitraum 1849-1971 (Gründerzeit) 233 öffentliche Pflichtschulgebäude (Volksschulen, Hauptschulen, Sonderschulen, Polytechnische Schulen), 12 Berufsschulgebäude, 3 Fachschulgebäude und 6 Gebäude für Spezialsonderschulen und 70 Bundesschulen (AHS, BHS, HAK, HTL, HBLA) erbaut. In den Folgejahren sind noch weitere Schulen errichtet worden, wie zum Beispiel etwa 30 Bundesschulen. (Bosnic, 2011 und Rolf, 2011). Daher spielen Schulen im Gebäudesektor eine wesentliche Rolle für die weltweite Reduktion des Energiebedarfs und der Emissionsraten. Außerdem können sie als Energielieferanten verwendet werden, indem sie die überschüssig produzierte Energie in das Versorgungsnetz einspeisen. Vor allem in den Sommerferien, wenn die Gebäude von den SchülerInnen nicht genutzt werden, wären diese Gebäude hervorragende Energielieferanten für Smart Grids. Des Weiteren stehen die Schulgebäude im Mittelpunkt der Öffentlichkeit und sind daher ausgezeichnete Vorzeigebauwerke um zu belegen, dass Energieeffizienz in Gebäuden umsetzbar ist.

Reduktion des Energiebedarfs

Die Reduktion des Energiebedarfs ist hier natürlich ein grundlegender Schritt. Kluttig et al. (o.J.) führte Untersuchungen durch, um die Energieverbräuche von Bildungsgebäuden im Bestand von Deutschland zu ermitteln. Er veranschaulichte, dass Maßnahmen zur Reduktion des Bedarfes an Heizenergie und Strom von Bedeutung sind. In den Tabellen 2 und 3 sind die Angaben der ermittelten Verbräuche an Heizenergie und Strom von unterschiedlichen Bildungseinrichtungen zu finden.

Tabelle 2: durchschnittlicher Stromverbrauch von diversen Bildungsstätten. Quelle nach Kluttig et al. (o.J.)

Gebäudetyp	Anzahl der untersuchten Gebäude	Mittelwert \pm Standardabweichung in kWh/(m ² a)
Kindergarten	8	26,3 \pm 20,1
Schulen	165	26,0 \pm 19,6
Schulhallen	4	63,5 \pm 39,9
Fachhochschule	59	47,9 \pm 27,9
Universitäten	303	125,8 \pm 145,0

Tabelle 3: durchschnittlicher Heizenergieverbrauch diversen Bildungsstätten. Quelle nach Kluttig et al. (o.J.)

Gebäudetyp	Anzahl der untersuchten Gebäude	Mittelwert \pm Standardabweichung in kWh/(m ² a)
Kindergarten	35	221,0 \pm 101,2
Schulen	199	230,6 \pm 143,1
Schulhallen	14	261,9 \pm 120,0
Fachhochschule	59	190,6 \pm 66,8
Universitäten	301	272,8 \pm 187,7

Der Energiebedarf kann durch eine gute Dämmung der Gebäudehülle sehr stark reduziert werden und sollte bei einer Sanierung immer an erster Stelle stehen. Danach sollten erst die bereits verwendeten Technologien dem neuen Bedarf angepasst, indem neue und nachhaltige Technologien eingesetzt oder die vorhandenen Technologien zumindest auf den neusten Stand gebracht werden. Als Beispiel wird angenommen, dass vor der Sanierung ein Heizkessel mit fossilem Energieträger eingesetzt wurde. Durch die Dämmung wird der Energiebedarf reduziert, wodurch der Heizkessel nun überdimensioniert ist. Dieser sollte dem neuen, gegenwärtigen Energiebedarf angepasst werden. Entweder durch einen neuen und entsprechend dimensioniertem Heizkessel mit fossilem Energieträger oder durch den Einsatz einer alternativen und nachhaltigen Technologie wie zum Beispiel einer Biomasseheizung.

Im Plusenergiegebäude werden diese Maßnahmen gezielt umgesetzt. Mit Hilfe einer entsprechenden Dämmung der Gebäudehülle, Verwendung von geeigneten Fenstern und Einsatz nachhaltiger Technologien wird der Energiebedarf des Gebäudes gesenkt.

Smart Grids

Zurzeit sind zentrale Stromerzeuger die Hauptakteure in unserem Energieversorgungsnetz. Um die Ziele der europäischen Union zur Verminderung der CO₂-Emissionen und der Steigerung des Anteils an erneuerbarer Energie erreichen zu können, müssen Großanlagen auf Basis erneuerbarer Energien und dezentrale Erzeuger, wie zum Beispiel Schulen, in das bestehende Energieversorgungsnetz optimal integriert werden können.

Dezentrale Stromerzeuger speisen direkt ins Niederspannungs- oder Mittelspannungsnetz ein, während zentrale Kraftwerke die Energie ins Hochspannungsnetz liefern. Dadurch wird das Management des Energieversorgungsnetzes komplexer, vor allem im Bereich Lastregelung und Aufrechterhaltung der Netzstabilität (Lugmaier et al., 2012).

Ziel ist es die Energieversorgungsinfrastruktur sicher zu stellen. Dieser Ansatz könnte mit Hilfe von Smart Grids (Abbildung 8) erzielt werden. Gemäß der Technology Roadmap - Smart Grids der International Energy Agency werden Smart Grids wie folgt definiert:

„A smart grid is an electricity network that uses digital and other advanced technologies to monitor and manage the transport of electricity from all generation sources to meet the varying electricity demands of end-users. Smart grids co-ordinate the needs and capabilities of all generators, grid operators, end-users and electricity market stakeholders to operate all parts of the system as efficiently as possible, minimising costs and environmental impacts while maximising system reliability, resilience and stability.“

Durch Smart Grids können dezentrale Energieerzeuger miteinander effizient verbunden werden und durch Einspeisung von Energie das Versorgungsnetz unterstützen (Lugmaier et al., 2012).

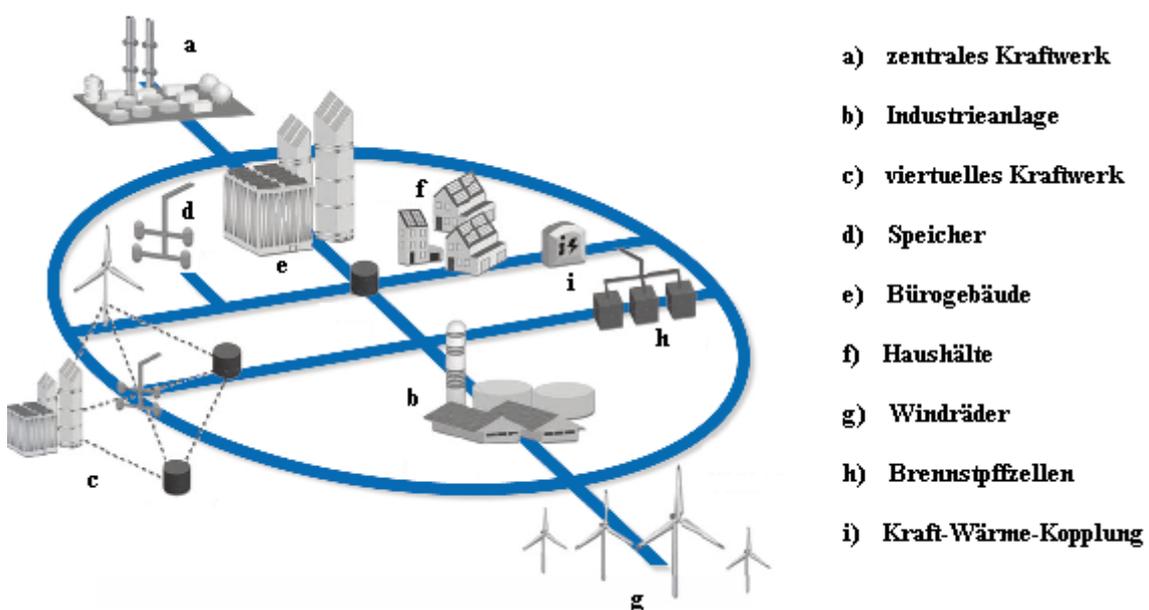


Abbildung 8: Darstellung von Smart Grids. Quelle gemäß Verband der Elektrotechnik (2012)

Neben der Reduktion des Energiebedarfs sind gesundheitliche Gründe, bessere Luftqualität und verbesserte Raumkonzepte weitere Aspekte, weshalb Schulsanierungen von Nöten sind. Diese werden nun genauer betrachtet.

Luftqualität

Bei Schulgebäuden ist neben der Steigerung der Energieeffizienz, die Erhöhung des Nutzerkomforts eine erforderliche Maßnahme. Klassenräume weisen eine hohe Belegungsdichte auf. Dies hat zur Folge, dass sich die Qualität der Luft in kürzester Zeit verschlechtert. Eine gute Luftqualität ist jedoch in öffentlichen Gebäuden, vor allem in Schulen sehr wichtig, weil mit steigendem CO₂-Gehalt die Lern- und Konzentrationsfähigkeit negativ beeinträchtigt werden. Erhöhte CO₂-Werte führen zur Müdigkeit der SchülerInnen und Geruchsbelästigung. Nach dem Hygieniker Max von Pettenkofer ist Luft mit über 1000 ppm CO₂-Gehalt als schlechte Luft einzustufen (Steiger und Hellwig, 2011). Greml et al. (2008) verweist nach EN 13779 auf die Bewertung zur Luftqualität. Diese wird in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Bewertung der Luftqualität. Quelle nach Greml et.al (2008)

CO ₂ -Gehalt in ppm	Hygienische Bewertung
≤ 800	Hoch
800 – 1000	Mittel
1000 -1400	Mäßig
> 1400	Niedrig

In Tabelle 5 wird die notwendige Luftmenge pro Stunde und Person für eine gute bis mittlere Luftqualität dargestellt (Kah, et al., 2010).

Tabelle 5: Literaturangaben für die notwendige Luftmenge pro Stunde und Person um eine gute bis mittlere Luftqualität zu erzielen. Quelle nach Kah, et al. (2010)

Empfehlung für ...	Luftmenge in m ³ /(h Person)
Schulen	15-20
weiterführende Schulen	17-20
Sporthallen	60

Um eine ausreichende Luftqualität mittels natürlicher Lüftung zu gewährleisten, müsste des Öfteren, vor allem während der Unterrichtszeit, über die Fenster stoßweise gelüftet werden. Dies erfordert jedoch sehr viel Disziplin von SchülerInnen und Lehrern und könnte außerdem den Unterricht stören.

Es gibt zahlreiche Studien, die den Zusammenhang zwischen erhöhtem CO₂-Gehalt und Verminderung der Leistungsfähigkeiten in Schulen und Büros aufzeigen. Einige dieser Studien werden kurz angeführt.

- Myhrvold et al. (1996):

Mit dem Artikel „Indoor environment in schools – pupils health and performance in regard to CO₂ concentration“ zeigte Myhrvold et al. (1996), dass Schulen während des Tages CO₂-Konzentrationen von 601-3827 ppm aufweisen. Außerdem führten die SchülerInnen einfache Übungen bei höheren CO₂-Belastungen mit verminderter Aufmerksamkeit und Reaktionszeit durch.

- Wargocki et al. (2000):

Testpersonen mussten Aufgaben wie „Rechnen“, „Texte tippen und korrigieren“ bei unterschiedlichen personenbezogenen Außenluftvolumenströmen³ ausführen. Klassenräume ohne mechanische Belüftung verfügen oft über Luftmengen unter 18 m³/h, wodurch die Leistung der SchülerInnen sinkt. Die Erhöhung des Außenluftvolumenstroms von 18 m³/ (Person*h) auf 36 m³/ (Person*h) zeigte eine Leistungssteigerung von 2–4 %, womit bestätigt wird, dass eine mechanische Lüftung in Schulen sehr sinnvoll ist.

- IGS (Xia, 2011a):

Eine Simulation der CO₂-Konzentration eines Klassenzimmers mit 26 SchülerInnen zeigte, dass während des Unterrichtes mit geschlossenen Fenstern der CO₂-Wert die Grenze von 1500 ppm schon nach den ersten 25 Minuten überschreitet. Die Lüftung über Fenster in den Pausen oder über gekippte Fensterflügel bot keinen ausreichenden Luftaustausch und der CO₂-Gehalt stieg über den Tag auf Maximalwerte von 4000 ppm an.

Plusenergiegebäude oder Passivhausgebäude besitzen oft eine kontrollierte Lüftung, die einen Mindestgrundwechsel der Luft gewährleisten und dadurch eine gute Qualität der Luft erzielen.

Gesundheit

Abgesehen von der Luftqualität wird die Gesundheit der SchülerInnen durch Sonnenwärme und Licht beeinflusst. Das Tageslicht und die direkten Sonnenstrahlen wirken sich positiv auf das Wohlbefinden und die Aktivität des Menschen aus. Kinder verbringen einen großen Teil ihrer Kindheit in Schulen, daher sollten Klassenräume so gestaltet werden, dass die Räumlichkeiten bestens belichtet werden und die SchülerInnen ausreichend direkte Sonne erhalten. Solch ein Konzept, sonnige Klassenräume und eine gesunde Umgebung mittels Freiflächen zu schaffen, wurde im Jahr 1932 in Cloistraat (Amsterdam) vom Architekten Jan Duiker bei einer Schule angewandt. In Abbildung 9 ist eine Aufnahme der Schule sowie der Grundriss des Erd- und Obergeschosses zu sehen.

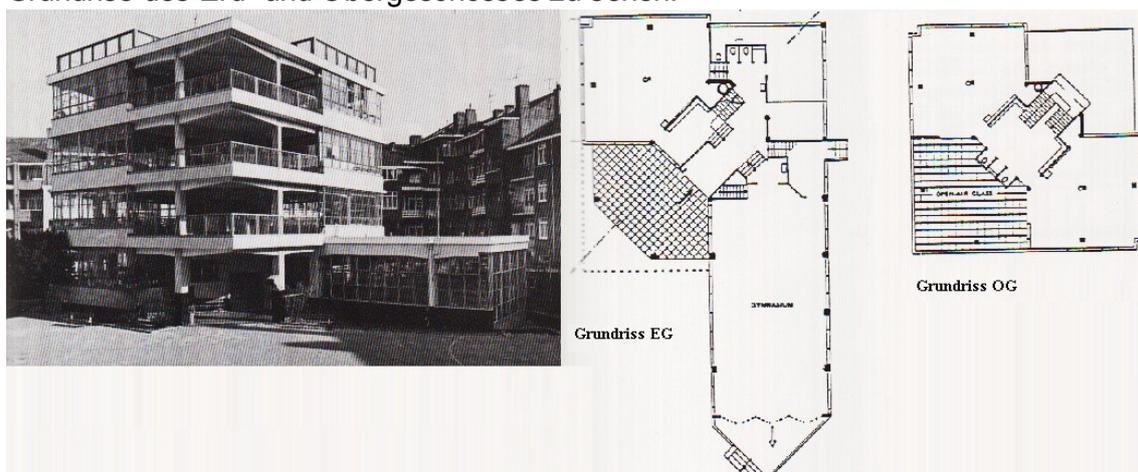


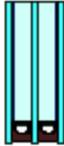
Abbildung 9: Freiluftschule Cloistraat. Links ist ein Bild der sanierten Schule zu sehen und rechts befinden sich der zugehörige Grundriss des Erdgeschosses und des Obergeschosses. Quelle gemäß Treberspurg (1999)

³ Der Außenluftvolumenstrom ist das Volumen der Außenluft die in den Raum eingetragen wird, bezogen auf die SchülerInnen und Stunde.

Das Erdgeschoss weist Personalräume, eine Klasse (im Südwesten) und einen Turnsaal auf. Über dem Erdgeschoss befinden sich drei weitere Geschosse, welche je zwei Klassenräume (Südwesten und -osten) und eine im Süden liegende freie Terrasse beinhalten. Die beiden Klassen sind mit der Terrasse verbunden. Eine Besonderheit dieses Baukonzeptes ist, dass die Terrasse bei gutem Wetter als Freiluftklasse genutzt werden kann (Treberspurg, 1999).

Ein weiteres Merkmal, welches die Gesundheit und das Wohlbefinden der Kinder negativ beeinträchtigt sind die in alten Schulgebäuden vorkommenden Fenster. Aufgrund des höheren Wärmedurchgangskoeffizienten weisen Fenster mit 1- oder 2-Scheiben Verglasung neben höheren Wärmeverlusten auch weitaus geringere Oberflächentemperaturen auf, als Passivgebäudefenster mit 3-Scheiben Verglasung. Die Fensterflächen geben somit kalte Strahlung ab und führen zu Unbehaglichkeit. In Tabelle 6 werden verschiedene Verglasungsstandards gegenübergestellt (Die Werte können je nach Hersteller variieren).

Tabelle 6: Vergleich von verschiedenen Fensterarten. Quelle: <http://www.passivhaustagung.de/> (17.04.2012)

Verglasung	1-Scheibe	2-Isolier	2-Wärmeschutz	3-Wärmeschutz
				
U-Wert [W/(m ² K)]	5,60	2,80	1,20	0,65
g-Wert	0,92	0,80	0,62	0,48
Oberflächentemperatur [°C]	-1,8	9,1	15,3	17,5

Eine Untersuchung des Instituts für Fenstertechnik (ift) Rosenheim hat im Auftrag von Glas Trösch eine Untersuchung zum Thema Oberflächentemperatur von unterschiedlichen Verglasungen durchgeführt. Hierbei wurde ersichtlich, dass sich die Oberflächentemperatur von beschichteten Gläsern mit niedrigem Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) und Gläsern mit hohem U-Wert besonders in den Monaten mit geringer Außentemperatur unterscheiden. Bei Außentemperaturen von minus 10 °C und einer Innenraumtemperatur von 20 °C betrug die Oberflächentemperatur eines unbeschichteten Zweifach-Isolierglases nur 9,5 °C. Die Temperaturdifferenz zwischen dem Innenraum und des Fensterglases führt zur Unbehaglichkeit der Anwesenden. Wird dasselbe Zweifach-Isolierglas mit einer wärmedämmenden Funktionsbeschichtung versehen, so erhöht sich die Oberflächentemperatur auf 15,9 °C. Die Temperaturdifferenz zwischen Glas und Raum sinkt dadurch und steigert das Wohlbefinden der NutzerInnen. Ein behagliches Raumklima kann jedoch nur mit einem beschichteten Dreifach-Isolierglas erzielt werden. Dieses Glas erreicht bei den selben Bedingungen eine Oberflächentemperatur von 17,7 °C und reduziert die Temperaturdifferenz zwischen Raum und Glas enorm (<http://www.baulinks.de/webplugin/2008/0809.php4/> (17.04.2012)).

Durch den Einsatz von Fenstern, die für Passivgebäude zugelassen sind, entstehen im Raum keine störenden Temperaturschichten⁴. Radiatoren, die typischerweise unterhalb der Fensterflächen angebracht wurden, werden somit überflüssig. Natürlich müssen dafür auch die anderen Passivhauskriterien eingehalten werden, wie Luftdichtheit und Wärmebrückenfreiheit (PHI, 2010). Oftmals sind alte Fenster undicht, weshalb Luft von außen in die Klassenräume strömt und sich ein Luftzug bildet. Im Heizfall, vor allem während der Wintermonate, bekommen SchülerInnen, die sich in der Nähe der Fenster aufhalten, sowohl die warme Heizstrahlung, die kalte Abstrahlung der Fensterflächen, als auch die durch Undichtheit der Fenster resultierenden Luftzüge zu spüren. All diese Faktoren können zur gesundheitlichen Beeinträchtigung führen.

Die Behaglichkeit der SchülerInnen in den Klassenräumen kann somit durch eine Sanierung im Vergleich zu alten Schulgebäuden wesentlich gesteigert werden. Einerseits aufgrund der höheren Oberflächentemperaturen der Bauteile, durch die dichte Gebäudehülle, wodurch der Lufteintrag von außen verhindert wird und durch die ständige kontrollierte Be- und Entlüftung, welche einen hygienischen Luftwechsel sicherstellt. Wenn es erforderlich sein sollte, kann durch eine Flächenheizung im Boden, in der Decke, oder in der Wand eine gleichmäßige Beheizung des Raumes erfolgen.

Raumkonzept

Die Räume der Schulen werden während des Tages unterschiedlich genutzt. Klassenräume zum Beispiel werden vor allem vormittags und bis kurz nach Mittags gebraucht. Oft werden die Klassenräume nach Süden hin angeordnet, um das Tageslicht effizient zu nutzen, während sich Flure und Nebenräume wie Sanitärbereiche im Norden befinden. Manche Klassenräume sowie Aufenthaltsräume, PC-Räume, etc. werden überwiegend am Nachmittag verwendet. Turnhallen können ebenfalls am Abend für Vereinsport oder für Veranstaltungen zur Verfügung gestellt werden. Unbeheizte Aufenthaltsbereiche fungieren während des ganzen Tages als Pufferräume. Diese unbeheizten Pufferräume dienen dazu, um den Temperaturunterschied zwischen beheizter Fläche und Umwelt zu reduzieren, wodurch Transmissionsverluste verringert werden. Aufgrund dieser unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten bedarf es einer an die Räume angepasste Regelung von Heizung, Lüftung und Licht.

Vor allem in Passiv- oder Plusenergiegebäuden wird eine bedarfsgeregelte Steuerung diverser Systeme wie Lüftung oder Licht über Sensoren und Anwesenheitsfühler geregelt. Außerdem könnte das Gebäude in unterschiedliche Bereiche eingeteilt werden. Zum Beispiel könnten alle Nachmittagseinheiten in einem Teil des Gebäudes untergebracht werden, während der andere Teil des Gebäudes die Raumeinheiten, die vormittags genutzt werden, beherbergt. Dadurch könnte der eine Teil des Gebäudes nur vormittags beheizt werden, während der andere Teil nur am Nachmittag geregelt werden muss.

⁴ Liegt die Außentemperatur bei -14 °C und die Raumtemperatur bei 20 °C, dann hat die Oberfläche eines normalen EnEV-Fensters eine mittlere Temperatur von zirka 13 °C. Die Luft kühlt sich an der Fensteroberfläche ab und fällt nach unten. Am Boden breitet sich diese Luft aus und es entsteht ein Kaltluftsee. Durch ein Heizelement unterhalb des Fensters kann das Herabsinken des kalten Luftvorhanges reduziert werden. Quelle: [http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Fenster_Behaglichkeit_Vergleich.htm/\(17.04.2012\)](http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Fenster_Behaglichkeit_Vergleich.htm/(17.04.2012))

5. Energieeffiziente Schulen

In Österreich gibt es bis jetzt noch keine Plusenergieschulen, jedoch wurden schon mehrere Schulen in der Passiv-Bauweise saniert. Eine Übersichtstabelle soll zeigen, wie viele Schulen in Österreich bis dato mit Passivgebäude-Komponenten saniert wurden und welche Maßnahmen zur Sanierung ergriffen wurden, da diese genauso für Plusenergiesanierungen eingesetzt werden können. Nach der Tabelle erfolgt die genauere Betrachtung der Sanierung der Allgemeinen Sonderschule 4 (ASO4) in Linz. Des Weiteren werden Plusenergiekonzepte für Schulen vorgestellt. Hierbei wird über die drei Demonstrationsprojekte, des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie in Deutschland, welche im Rahmen des Programmes „Eneff:Schule“ umgesetzt werden, berichtet. Mit Hilfe dieser Demonstrationsprojekte kann aufgezeigt werden, mit welchen Sanierungsmaßnahmen und erneuerbaren und nachhaltigen Technologien Plusenergie-Niveau erzielt werden kann.

5.1 Schulsanierungen in Österreich mit Passivgebäude-Komponenten

Laut www.passivehousedatabase.eu gibt es in Österreich insgesamt 24 Passiv-Schulgebäude – 11 Neubauten, zwei Erweiterungen und 11 Altbausanierungen. In den Tabellen 6-1 bis 6-4 werden nur die Sanierungen der Altbauten aufgelistet, da sich diese Arbeit nur mit Sanierungen von Schulen beschäftigt.

Weitere Angaben zu den Projekten stehen unter dem Link www.passivehousedatabase.eu zur Verfügung. Manche Angaben der Übersichtstabelle waren in den Datenbanken nicht zu finden, diese wurden mit den jeweiligen Architekten abgeklärt.

Tabelle 7-1: Schulkomplexe, die in der Passivhaus-Bauweise saniert wurden. Erklärung der Abkürzungen: HWB bedeutet Heizwärmebedarf. vdS steht für vor der Sanierung und ndS bedeutet nach der Sanierung. WW steht für Warmwasser.

	Polytechn. u. Hauptschule II Schwanenstadt	Allgemeine Sonderschule Linz 06	Allgemeine Sonderschule 4 Karlhofschule
Bild			
Bundesland	Oberösterreich	Oberösterreich	Oberösterreich
Ort	4690 Schwanenstadt	4030 Linz	4040 Linz
Architekt	PAUAT Architekten	Enzenhofer & Dornstädter ZT GesmbH	Architekt DI Michael Wildmann ZT Architekt Irene Prieler
Sanierungszeitraum	2005-2007	2008-2009	2008-2009
Energiebezugsfläche in m²	6214	2098	2228,4
HWB vdS in kWh/(m²a)	165	k.A	wurde bisher nicht berechnet
HWB ndS in kWh/(m²a)	14,1	k.A	12,9
Heizlast in W/m²	10	27	13
Luftdichtheit in 1/h	1,38	k.A	0,56
Wärmeerzeugung und WW	Holzpelletsanlage - Nennleistung: 110 kW Solaranlage	Wärmepumpe Fernwärme Solar-Flachkollektor - WW Heizwärmeverteilung - Fußboden-, Decken-, Wandheizung	Fernwärme Solarthermie für WW
Stromerzeugung	Photovoltaik	k.A	Linz AG
Lüftungssystem	dezentral + WRG Nachtlüftungskonzept	zentral + WRG	dezentral + WRG
Sonstiges/Besonderheiten	Vorgefertigte Leichtbaufassade - auf Bestand mit 58 cm Einpassdämmung	Aufstockung Wandelemente vorgefertigter Holzriegelbau	k.A

Tabelle 7-2: Schulkomplexe, die in der Passivhaus-Bauweise saniert wurden. Erklärungen zu den Abkürzungen siehe Tabelle 5-1.

	Sanierung Hauptschule Zams-Schönwies	Volksschule Lind ob Velden	Volksschule u. Kindergarten Arnoldstein
Bild			
Bundesland	Tirol	Kärnten	Kärnten
Ort	6511 Zams	9220 Velden	9587 Riegersdorf
Architekt	Architekt DI Robert Ehrlich	Arch+More ZT GmbH	Arch+More ZT GmbH
Sanierungszeitraum	2007-2009	2009-2010	2009-2010
Energiebezugsfläche in m²	4213	1419,8	1809,19
HWB vdS in kWh/(m²a)	k.A.	115	121,4
HWB ndS in kWh/(m²a)	14	14	12
Heizlast in W/m²	10	11	11
Luftdichtheit in 1/h	k.A.	k.A.	0,3
Wärmeerzeugung und WW	Wärmepumpe Fernwärme Heizwärmeverteilung - Fußboden-, Decken-, Wandheizung	Solaranlage (6 m ²)	Wärmepumpenkompaktgerät - Lüftungskomponenten + Fortluft-Wärmepumpe in einem Gerät
Stromerzeugung	k.A.	Photovoltaik (13,6 kW)	Photovoltaik (4,9 kW)
Lüftungssystem	Komfort-Lüftungsanlage - Erdwärmekollektoren zur Vorerwärmung der Zuluft - CO ₂ -Regelung	dezentral + WRG	zentral + WRG Wärmepumpenkompaktgerät - Lüftungskomponenten + Fortluft-Wärmepumpe in einem Gerät
Sonstiges/Besonderheiten	vorgehängte Fassade hochwärmegedämmte Holz-Riegel- Elemente	k.A.	k.A.

Tabelle 7-3: Schulkomplexe, die in der Passivhaus-Bauweise saniert wurden. Erklärungen zu den Abkürzungen siehe Tabelle 5-1.

	Volksschule Mäder	Hauptschule Bezau	Volksschule Hof
Bild			
Bundesland	Vorarlberg	Vorarlberg	Vorarlberg
Ort	6841 Mäder	6870 Bezau	6861 Alberschwende
Architekt	Arch.Büro Fink und Thurnher	Architektur DI Ralph Broger GmbH	Architektur Jürgen Hagspiel
Sanierungszeitraum	2010	2007-2008	2009-2010
Energiebezugsfläche in m²	2002,5	7590	2370
HWB vdS in kWh/(m²a)	k.A	k.A	k.A
HWB ndS in kWh/(m²a)	7	27	25
Heizlast in W/m²	10	26	k.A
Luftdichtheit in 1/h	0,3	k.A	k.A
Wärmeerzeugung und WW	Zentralheizung - Stückholz/ Pellet - keinen Speicher Heizwärmeverteilung	ortsansässige Biomasse- Nahwärmanlage Solarkollektor (8 m ²) und zwei Hygienekombispeicher (1600/ 560 Liter)	Fernwärme Heizwärmeverteilung - Fußboden-, Decken-, Wandheizung
Stromerzeugung	Photovoltaik	k.A	k.A
Lüftungssystem	zentral + WRG	de- und semizentral + WRG	dezentral + WRG - Anwesenheitsfühler
Sonstiges/Besonderheiten	k.A	k.A	k.A

Tabelle 7-4: Schulkomplexe ,die in der Passivhaus-Bauweise saniert wurden. Erklärungen zu den Abkürzungen siehe Tabelle 5-1.

	Volksschule Mähdle	Hauptschule Hörbranz
Bild		
Bundesland	Vorarlberg	Vorarlberg
Ort	6922 Wolfurt	6912 Hörbranz
Architekt	Architekturbüro Zweier	walser + werle architekten zt
Sanierungszeitraum	2009	2009-2010
Energiebezugsfläche in m²	1850	2779,4
HWB vdS in kWh/(m²a)	129	k.A
HWB ndS in kWh/(m²a)	17	k.A
Heizlast in W/m²	12	k.A
Luftdichtheit in 1/h	0,6	k.A
Wärmeerzeugung und WW	Wärmepumpe - Grundwasser Solar-Flachkollektor - Pufferspeicher Heizwärmeverteilung - Fußboden-, Decken - , Wandheizung	k.A
Stromerzeugung	Photovoltaik	k.A
Lüftungssystem	zentral/ dezentral + WRG (zentral in der Aula und Turnhalle) (dezentral in Klassen)	k.A
Sonstiges/Besonderheiten	vorgehängten Holzkonstruktion Holzschindelschalung	k.A

Allgemeine Sonderschule 4 (ASO4) Karlhofsschule, Linz, OÖ



Abbildung 10: Darstellung des Altbaus (links) und der sanierten Schule (rechts). Oben wird die Schule bildlich dargestellt und unten wird der Aufbau des Gebäudes gezeigt. Quelle gemäß Architekturjournal (2010)

Die Allgemeine Sonderschule 4 (Abbildung 10) wurde in den Jahren 1959/1960 erbaut. Nach der Einführung einer Nachmittagsbetreuung waren die Räumlichkeiten der Schule zu klein und nicht zweckgerecht. Die Schulsanierung wurde von den Architekten Michael Wildmann und Irene Prieler geplant. Der Umbau, der rund 5. Mio. € gekostet hat, begann 2007 und wurde 2009 fertig gestellt. Ziel war es, dass die Kinder nicht den ganzen Tag in den Klassen verbringen sollten sondern sich auch in Freiräumen aufhalten können. Daher wurden nicht nur Räumlichkeiten für die Nachmittagsbetreuung geschaffen, sondern auch eine Schulbibliothek, sowie Sprachtherapieräume und Werkräume. Im Eingang befindet sich ein Multifunktionsraum, in dem Musik und Veranstaltungen abgehalten werden können und genug Platz für Bewegung herrscht. Im Dach befinden sich weitere Funktionsräume und ein Pausenraum. Das Gebäude wurde mit einem Holzbau aufgestockt. Der Eingangsbereich des Gebäudes wurde von der Mitte an das städtebaulich schlüssige Eck verlegt. Zusätzlich wurden neue Zugänge für die umliegende Grünanlage geschaffen (Abbildung 11).

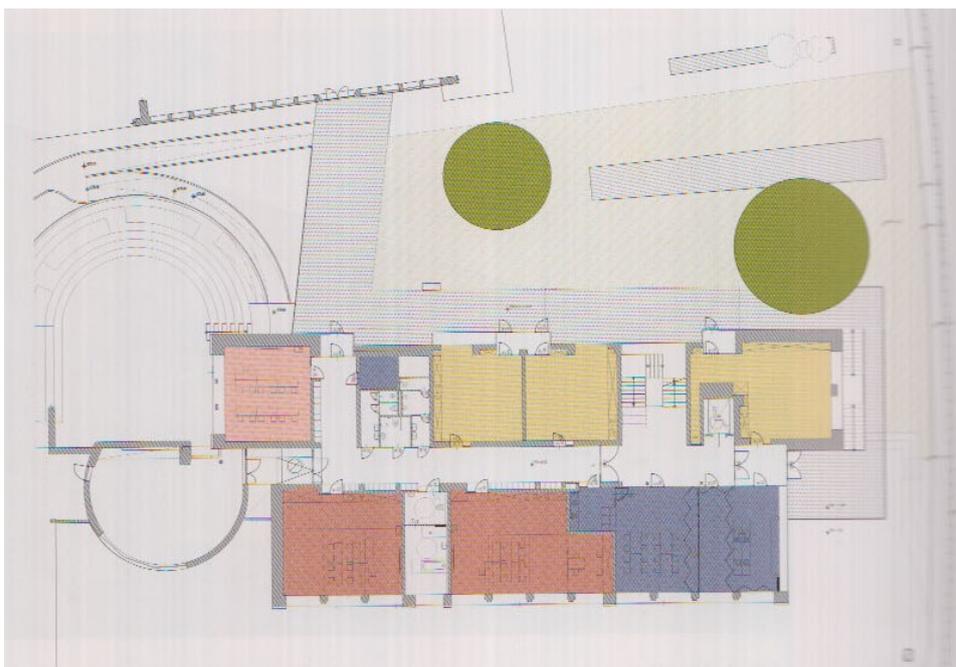


Abbildung 11: Grundriss des Areals. Quelle gemäß Architekturjournal (2010)

Passiv und Nachtlüftung

Der optimale Sauerstoffgehalt der Luft wird über eine kontrollierte Lüftungsanlage realisiert. Jedoch wird die Lüftungsanlage nicht im Dauerbetrieb betrieben um Strom zu sparen. Ein Nachtlüftungskonzept kühlt im Sommer die Räumlichkeiten ab. Lüftungsflügel in den Klassen sorgen dafür, dass das Gebäude nachts gekühlt wird. Die im Stiegenhaus einströmende Luft wird über die Braundrauchentlüfter abgeführt (Kamineffekt). Mit Hilfe einer Lamellenkonstruktion wird Wetter-, Einbruch- und Absturzsicherung gewährleistet. In Abbildung 12 wird das Lüftungskonzept veranschaulicht (Architekturjournal, 2010).

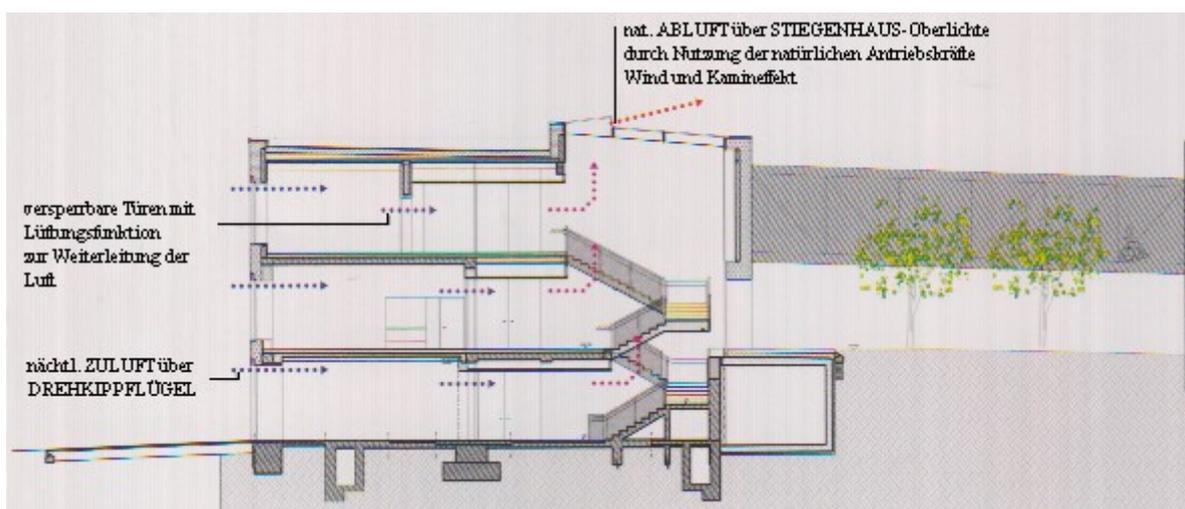


Abbildung 12: Lüftungskonzept. Quelle gemäß Wettbewerbe (2010)

Plusenergiekonzepte für Schulgebäude

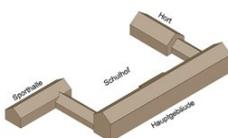
Das deutsche Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) besitzt im Förderkonzept „Energieoptimiertes Bauen (EnOB)“ ein Begleitprojekt mit dem Forschungsschwerpunkt „Energieeffiziente Schule (Eneff:Schule)“. Ziel ist es alle Tätigkeiten und Informationen auf dem Gebiet energieeffiziente Schulsanierungen aufzuzeigen. Daneben erfolgt eine wissenschaftliche Begleitung der durchgeführten Demonstrationsprojekte. Hierbei werden unterschiedliche und innovative Möglichkeiten aufgezeigt, um den Primärenergiebedarf für Beheizung/Kühlung, Warmwassererwärmung, Lüftung, und Beleuchtung stark zu reduzieren. Im Projekt „Eneff:Schule“ werden Schulen durch Sanierungen auf unterschiedliche Niveaus gebracht. Neben den Demonstrationsprojekten für Plusenergiesanierungen, werden auch Sanierungen für 3-Liter-Haus-Schulen (entspricht HWB von 30 kWh/m²a) angeführt. Des Weiteren werden sogenannte ‘Best-Practice Beispiele’ aufgezeigt. Diese Beispiele beinhalten ebenfalls Schulen, welche außerhalb des Projektes „Eneff:Schule“ erfolgreich saniert wurden. Ein weiteres Ziel ist die Darstellung der Integration der Schulsanierung in den Alltag. NutzerInnen, SchülerInnen, LehrerInnen, HausmeisterInnen und Eltern können in die Schulsanierung eingebunden werden. Somit kann zugleich eine sozialwissenschaftliche Begleitforschung durchgeführt werden um das Nutzerverhalten und die Einstellung der NutzerInnen darzulegen.

Das Projektteam gliedert sich in mehrere Parteien. Den Vorsitz des Energieforschungsprogramms hat das deutsche Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Daneben werden die Projekte vom Projektträger Jülich (PtJ) betreut, der unter anderem im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) arbeitet. Die Forschung wird vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) durchgeführt. Dabei werden Modelle erarbeitet und ausgewertet um die Ergebnisse auf nationaler und internationaler Ebene umzusetzen. Eine weitere Funktion ist die Erstellung von Leitfäden unterschiedlichster Thematiken. Die Fachhochschule München ist ein Unterauftragnehmer des IBPs und stellt sich den anlagentechnischen Anforderungen. Die sozialwissenschaftliche Begleitforschung wird über das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) durchgeführt. Diese untersuchen den Einfluss organisatorischer und verhaltensbezogener Maßnahmen auf den Energieverbrauch und wie sich die Effizienzmaßnahmen auf den Schulalltag auswirken. Das Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES) ist ein Unterauftragnehmer des ISI. Dieses erforscht die Akzeptanz von Energieeinsparmaßnahmen und die Wirksamkeit von pädagogischen Begleitkonzepten.

Derzeit werden drei Demonstrationsprojekte im Bereich Plusenergieschulen entwickelt und umgesetzt. Diese beinhalten zwei Sanierungen und einen Neubau. Obwohl sich diese Diplomarbeit mit Sanierungen von Schulgebäuden beschäftigt, wird das Konzept des Neubaus dennoch dargestellt, um unterschiedlichste Anregungen für Entwürfe zur Erlangung von Plusenergie-Niveau zu gewinnen. Die Bestandsaufnahmen und die Erstellung eines geeigneten Konzeptes der jeweiligen Schulen wurden bereits durchgeführt. Die Realisierung soll in den nächsten Jahren stattfinden. Die Daten der drei Demonstrationsprojekte des Programms „Eneff:Schule“ sind in Tabelle 8 dargestellt. Im nächsten Schritt werden die drei

Demonstrationsvorhaben genauer betrachtet. Weitere Angaben zu den Projekten sind unter dem Link <http://www.eneff-schule.de/> zu finden.

Tabelle 8: Daten und Fakten der drei Demonstrationsprojekte „Eneff:Schule“. *Endenergie/Primärenergie.
Quelle: <http://www.eneff-schule.de>

	Grund-/Hauptschule mit Werkrealschule Uhlandschule	Gymnasium Europa-Schule Reutershagen	Grundschule Hohen Neuendorf
Ort	Tapachstraße 4 70437 Stuttgart	Mathias-Thesen-Str. 17 18069 Rostock Deutschland	Goethestraße 16540 Hohen Neuendorf
Foto			
Erbaut	1954	1960/61	2009 – 2010
Sanierung	2010 – 2013		Neubau
BGF_{gesamt} vdS in m²	7.058	10.516	nicht vorhanden
BGF_{gesamt} ndS in m²	7.058	9.136	k.A.
Architekt	k.A.	Prof. Dr. Thomas Römhild Prof. Dipl.-Ing. Martin Wollensak	Prof. Ingo Lütkemeyer, Dr. Gustav Hillmann und Hans-Martin Schmid (IBUS Architekten und Ingenieure)
HWB vdS (kWh/m²a)	168,4	398,9/103,7*	nicht vorhanden
HWB ndS (kWh/m²a)	39	84,6/21,7*	k.A.
Kosten (Mio. €)	12,5	7,79	Baukonstruktion 767 €/m ² Technische Anlagen 220 €/m ²

k.A...keine Angaben

5.1.1 Uhlandschule – Grund-/Hauptschule mit Werkrealschule

Im Rahmen des Programms „Eneff:Schule“ soll die Uhlandschule in Stuttgart im Zeitraum von 2010 bis 2013 zu einem Plusenergiegebäude saniert werden. Die Sanierung der Gebäudehülle sowie der Anlagentechnik sollen zur Verbesserung der Energieeffizienz führen. Des Weiteren wird ein geeignetes Lüftungskonzept entwickelt und setzt innovative Materialien zur Wärmedämmung ein. Mit Hilfe von erneuerbaren Energien, wie der Sonnenenergie und der Erdwärme, soll Strom und Wärme erzeugt werden. Die Gesamtkosten der Sanierung wurden auf 12,5 Millionen Euro geschätzt. Das Projekt wird durch das BMWi, der EnBW Energie Baden-Württemberg AG, der Robert Bosch GmbH, der Saint Gobain und der Landeshauptstadt Stuttgart unterstützt.

Die Gliederung der Informationen zur Uhlandschule, sowie der beiden nachfolgenden Schulbeispiele, ist wie folgt aufgebaut:

- **Schulgebäude und Pläne**
- **Sanierungskonzept der Gebäudehülle**
- **Sanierungskonzept der technischen Anlagen**
- **Auflistung der wichtigsten Kennzahlen vor der Sanierung (vdS) und nach der Sanierung (ndS)**

Schulgebäude und Pläne

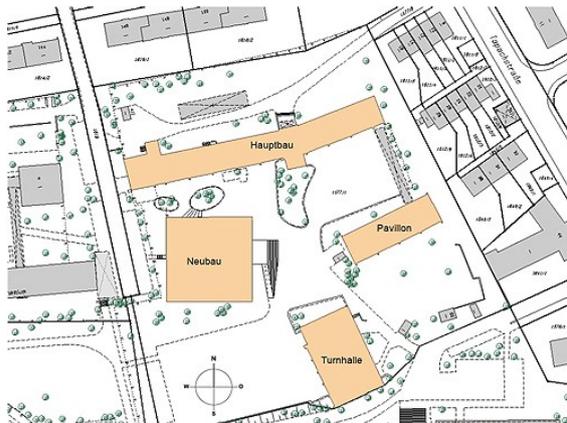


Abbildung 13: Darstellung des Lageplans.
Quelle: <http://www.eneff-schule.de>

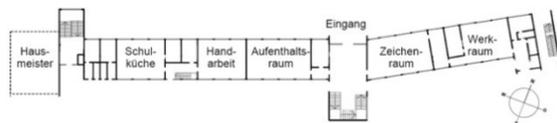


Abbildung 14: Grundriss des Hauptbaus (Erdgeschoss). Quelle: <http://www.eneff-schule.de>

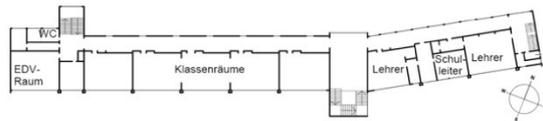


Abbildung 15: Grundriss des Hauptbaus (Obergeschoss). Quelle: <http://www.eneff-schule.de>

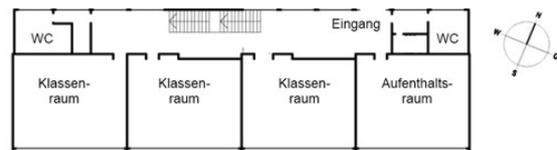


Abbildung 16: Grundriss des Pavillons (Erdgeschoss). Quelle: <http://www.eneff-schule.de>

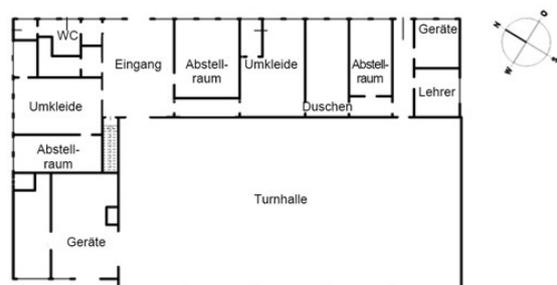


Abbildung 17: Grundriss der Turnhalle (Erdgeschoss). Quelle: <http://www.eneff-schule.de>

Abbildung 13 zeigt das Grundstück der Uhlandschule, welche im Jahr 1954 errichtet wurde. Der Gebäudekomplex, besteht aus dem Hauptbau, Pavillon und der Turnhalle und wurde im Jahr 2003/04 um einen Neubau erweitert. Der Hauptbau umfasst eine Grundfläche von 1.200 m². Er besitzt ein Erdgeschoss, zwei Obergeschosse und ein Untergeschoss.

Wie in Abbildung 14 ersichtlich ist, wurden im Erdgeschoss die Aufenthaltsräume, sowie die Werkräume und eine Hausmeisterwohnung untergebracht.

Die Obergeschosse (Abbildung 15) weisen Klassen-, Lehrer- und EDV-Räume auf, während das Untergeschoss Lager- und Technikräume beinhaltet.

Der Pavillon (Abbildung 16) besteht aus zwei Geschossen und besitzt eine Grundfläche von 460 m². Auf der Südseite wurden Klassenräume angelegt, während sich im Norden Flure und Sanitärebereiche befinden.

In Abbildung 17 ist die Turnhalle zu sehen. Diese verfügt neben der Sporthalle auch über Umkleide- und Sanitärräume. Ein separater Technikraum ist im Kellergeschoss untergebracht.

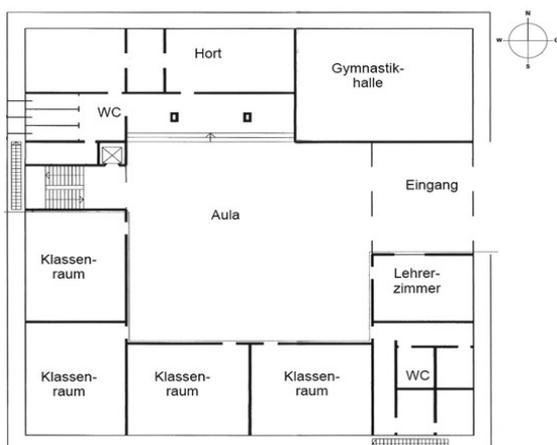


Abbildung 18: Grundriss des Neubaus (Erdgeschoss). Quelle: <http://www.eneff-schule.de>

Der Grundriss des quadratischen Neubaus ist in Abbildung 18 zu erkennen. Der Neubau, mit einer Grundfläche von 1.042 m², besitzt zwei Geschosse und ein Souterraingeschoss. Auch hier wurden Klassenräume untergebracht und im Zentrum befindet sich ein Atrium, welches auch als Aula genutzt werden kann. Die Fassade und das Atriumsdach sind umlaufend vollverglast. Das Dach über den Klassenräumen wurde begrünt.

Sanierungskonzept der Gebäudehülle

Der wichtigste Schritt für eine gute Sanierung ist die Dämmung der Gebäudehülle. Obwohl der Neubau höhere Heizwärmebedarfswerte als bei Plusenergieschulen aufweist, wird dieser nicht saniert, da er erst im Jahr 2003/04 erbaut wurde und sich dementsprechend auf einem guten Stand der Technik befindet. In Tabelle 9 werden die Bauteile des Neubaus dargestellt, während in Tabelle 10 die Sanierungsmaßnahmen aufgelistet werden.

Tabelle 9: Bestandteile des Neubaus im Ist-Zustand

Bauteile	vor der Sanierung
Außenwände	Typ 1: Pfosten-Riegel-Fassade + gedämmte Stahlbetonkonstruktion Typ 2: Holzlamellenfassade
Dach	Stahlbetonkonstruktion + Gründach
Fußboden zum Erdreich	-
Fenster	2-fach Wärmeschutzverglasung

Tabelle 10: Sanierungsmethoden für die einzelnen Bauteile

Bauteile	nach der Sanierung
Außenwände	Außenwände des Haupthauses, Pavillon und Turnhalle versehen mit 30 cm Wämedämmverbundsystem (Die Abstimmung zwischen dem Wärme- und Schallschutz, der Luftdichtheit und des Brandschutzes ist zu beachten. Geeignet um Miniluftkanäle und Elektroinstallationen zu verlegen, sowie solare Elemente in der Wetterschutzschicht einzubinden)
Dach	Vakuumdämmpaneele oder andere innovative Dämmstoffe + Aufdachsystem integrierter Medienführung und Installation von Solaranlagen
Fußboden zum Erdreich	Vakuumdämmsysteme in allen Gebäuden (exzellente Wärmeleitwerte von 0,007 W/(m ² K); keine Erfahrungen mit Langzeitverhalten von Vakuumdämmsystemen unter Schwingböden in Turnhallen oder für hoch frequentierte Bodenbelägen)
Fenster	Dreifach-Wärmeschutzverglasung + Holz-/Aluminiumkonstruktion (U-Wert = 0,8 W/(m ² K) mit Sonnenschutz
Sonstiges	Einsatz hochwertiger Bauteilanschlüsse zur Umgehung von Wärmebrücken

Sanierungskonzept der technischen Anlagen

Ist-Bestand

Im Keller des Hauptbaus befinden sich zwei Erdgaskessel aus dem Jahr 1988 mit einer gesamten Nennleistung von 725 kW. Mit Hilfe einer zentralen Warmwasserheizung erfolgt die Wärmebereitstellung der Gebäude. Die Turnhalle wird als einziges Gebäude kontrolliert gelüftet. Langfeldleuchten sorgen für eine gute Lichtqualität.

Sanierungskonzept

Die Gebäude sollen über eine erdreichgebundene Wasser/Wasser-Wärmepumpe und Niedertemperatur-Flächenheizungssystem beheizt werden. Das System soll ebenfalls zur Unterstützung der natürlichen Kühlung im Sommer eingesetzt werden, wodurch der Gebrauch einer aktiven Kühlung entfällt. Die Wärmepumpe benötigt Strom, welche eine Photovoltaik-Anlage zur Verfügung stellen wird, um die Nachhaltigkeit der Technologie sicherzustellen. An Tagen mit geringer Sonneneinstrahlung soll der Strom aus dem Netz entnommen werden, während an strahlungsreichen Tagen die Überschussproduktion an Strom in das Netz eingespeist wird. Da das Heizsystem des Neubaus bestehen bleibt und nicht auf das energetisch günstigere Temperaturniveau umgerüstet wird, muss dies für das Energieversorgungssystem mitberücksichtigt werden. Dadurch werden die Planungsanforderungen komplexer.

Die Warmwasserbereitung erfolgt nun dezentral. Die Versorgung des Warmwassers in der Turnhalle wird durch eine thermische Solaranlage zum größten Teil übernommen. Für alle Gebäude ist ein Lüftungskonzept vorgesehen. Ein hybrides System wird angestrebt, welches im Sommer eine natürliche Belüftung garantiert und im Winter pro Raum und je nach Bedarf gesteuert werden kann. Die Geräte sollen zumindest eine 85-prozentige Wärmerückgewinnung besitzen. Das Lüftungssystem kann die Beheizung der Räume über eine Nacherwärmung der Frischluft unterstützen.

Für die Beleuchtung werden LEDs mit elektronischen Vorschaltgeräten, sowie Anwesenheits- und Tageslichtsensoren eingesetzt. Das Lichtkonzept besitzt eine Grundbeleuchtung und eine erhöhte Beleuchtung für Arbeitsplätze. Auch hierbei ist es wichtig, dass das Beleuchtungssystem des Neubaus in das neue Lichtkonzept mit eingebunden wird, um den Nutzenergiebedarf zu verringern. Die Hausmeisterwohnung und die Turnhalle bekommen einen eigenen Versorgungsstrang, damit die Anlagen des Schulkomplexes während der Ferien, an Feiertagen und am Wochenende komplett abgeschaltet werden können. Neue energiesparende Geräte im IT- und Servicebereich wirken sich ebenfalls positiv auf den Gesamtstrombedarf der Schule aus. Einen groben Überblick der Sanierungsmaßnahmen der technischen Anlagen liefert die Zusammenfassung in Tabelle 11.

Tabelle 11: Sanierungsmethoden der einzelnen Systemen und Anlagen

Anlagen	Sanierungsmethoden
Wärmeversorgungssystem	separates System für Hausmeisterwohnung und Turnhalle (Ferien: komplette Stilllegung des restlichen Schulgebäudekomplexes möglich; Minimierung von Wärmetransportverluste → effizientes Niedertemperaturheizsystem)
Warmwasserbereitstellungssysteme Erdgaskessel	dezentral anstatt zentral Sole/Wasser Wärmepumpe (Bereitstellung bis zu 75 % der benötigten Wärme; Photovoltaik liefert notwendigen Strom für Wärmepumpe)
Heizkörper Strom	Niedertemperatur-Flächenheizungssysteme Photovoltaik + Stromnetz
Lüftung	Führung der Luftkanäle im Dämmsystem Lüftungssystem mit mindestens 85 Prozent Wärmerückgewinnung
Leuchtsysteme	elektronische Vorschaltgeräte mit zusätzlicher tageslichtabhängiger Regelung Anwesenheits- und Tageslichtsensoren

Kosten und wichtige Kennzahlen vor und nach der Sanierung

Seit 1998 wurde durch das städtische Energiekontrollsystem (SEKS) der Energieverbrauch (Wärme, Strom und Wasser) für das gesamte Schulareal kontinuierlich erfasst. Die Werte vor der Sanierung sind die jährlichen gemittelten Werte im Zeitraum von 2000 bis 2009. Im Jahr 2009 betragen die Energiekosten für Wärme, Strom und Wasser der Uhlandschule 80.100 Euro. Die Heizkosten dominieren mit 75 %, der Anteil an Strom beträgt 20 % und Wasser inklusive der Abwassergebühren weist nur einen geringen Anteil von 5 % auf. In den letzten Jahren wurde ein konstanter Anstieg der Heizkosten ersichtlich, was wiederum auf steigende Energiepreise zurückzuführen ist. Da im Jahr 2004 die Nettogrundfläche durch den Neubau erhöht wurde, muss dies bei den spezifischen Kennwerten berücksichtigt werden.

Heizwärmeverbrauch

Im Jahr 2009 wurde gegenüber dem Jahr 2008 9,1 % weniger Wärme benötigt, weshalb die Endenergie in diesem Jahr 1.016 MWh/a betrug. Jedoch ist zu beachten, dass im Jahr 2008 ein Kesseldefekt auftrat, welcher einen erhöhten Wärmeverbrauch zu Folge hatte. Wird nun der durchschnittliche spezifische jährliche Heizwärmeverbrauch, gemittelt über die letzten 10 Jahre, berechnet, so ergibt sich für die gesamte Schule ein gemessener Heizkennwert von 168,4 kWh/(m²a), welcher durch die Sanierung auf bis zu 39 kWh/(m²a) reduziert werden soll.

Stromverbrauch

2009 betrug der Stromverbrauch 97,2 MWh/a, während dieser im Jahr 2008 einen Wert von 99,8 MWh/a aufwies. Somit wurde eine Reduktion des Stromverbrauchs von 2,6 % zum Vorjahr verbucht. Der Bau des Neubaus im Jahr 2005 führte in diesem Jahr zu einer Steigerung des Stromverbrauches. Bei der Berechnung des durchschnittlichen spezifischen jährlichen Stromverbrauchs, gemittelt über die letzten 10 Jahre, ergibt sich für den gesamten Schulkomplex ein Stromverbrauch von 14 kWh/(m²a), welcher durch die Sanierung auf 9,3 kWh/(m²a) sinken soll.

Wasserverbrauch

Da Frischwasser fast ausschließlich in den Sanitärbereichen, vor allem in der Turnhalle, benötigt wird, ist der Wasserverbrauch sehr gering, wodurch nur 1.161 m³ Wasser im Jahr 2009 verbraucht wurden. Der durchschnittliche Wasserverbrauch, bezogen auf die Nettogrundfläche der letzten zehn Jahre liegt bei 184,1 l/(m²a).

Tabelle 12 zeigt die oben genannten Kennzahlen vor und nach der Sanierung.

Tabelle 12: Die durchschnittlichen, über die vergangenen zehn Jahre gemittelten spezifische jährliche Kennwerte vor und nach der Sanierung

	vor der Sanierung (kWh/m ² a)	nach der Sanierung (kWh/m ² a)
spezifischer HWB	168,4	39
spezifischer Stromverbrauch	14	9,3
spezifischer Wasserverbrauch	184,1	-

Werden die Kosten inklusive dem Stromverkauf bei überschüssiger Produktion durch Photovoltaik vor und nach der Sanierung gegenübergestellt, so sind zurzeit diese geplanten Maßnahmen der Sanierung zur Plusenergieschule noch nicht wirtschaftlich. Dieses Projekt soll dennoch umgesetzt werden, um ein politisches Zeichen zu setzen. Ziel ist es, Gesellschaft und Industrie auf energieeffiziente Sanierungen aufmerksam zu machen und ihnen die Notwendigkeit nachhaltiger Energien im öffentlichen Bereich zu verdeutlichen.

5.1.2 Europa-Schule Gymnasium in Reutershagen

Auch die Europa Schule in Rostock soll mit Hilfe des Programmes „Eneff:Schule“ zu einer Plusenergieschule saniert werden. Die gesamten Bruttobaukosten belaufen sich auf 7,79 Millionen Euro. Unterstützt wird die Sanierung durch das BMWi und das Land Mecklenburg-Vorpommern. Die Architekten dieses Projektes sind Prof. Dr. Thomas Römhild und Prof. Dipl.-Ing. Martin Wollensak.

Schulgebäude und Pläne

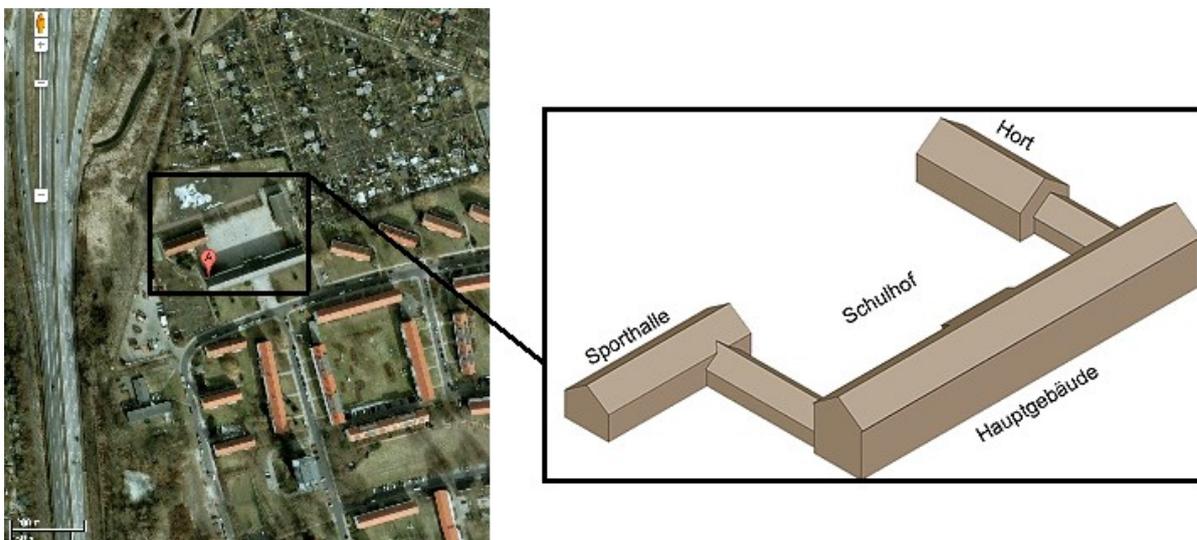


Abbildung 19: Darstellung des Schulgebäudes mit der Umgebung (links) und Bezeichnung der einzelnen Gebäudeteile (rechts) . Quelle: Google Earth (2010) und <http://www.eneff-schule.de>

Das Gymnasium wurde im Jahr 1960/61 erbaut. Es besteht aus zwei identischen Gebäudekomplexen, die auf verschiedenen Standorten stehen. Die Bruttogeschossfläche einer Schule beträgt 5.258 m². Infolge dessen beträgt die Gesamtbruttogeschossfläche 10.516 m². Nach der Sanierung soll es nur mehr einen Standort geben, auf dem sich der Schulkomplex für alle SchülerInnen befindet.

In Abbildung 19 ist zu erkennen, dass der Schulhof von drei Gebäuden umgeben ist. Das Hauptgebäude besitzt drei Geschosse und beinhaltet im südlichen Teil die Klassenräume. Im Norden sind die Flure angelegt, mit denen die eingeschossige Sporthalle und das zweigeschossige Hortgebäude betreten werden können. Aufgrund dieser Bauform entsteht ein ungünstiges A/V -Verhältnis⁵. Dies hat zur Folge, dass im Winter hohe Transmissionswärmeverluste entstehen und im Sommer das Gebäude stark aufgeheizt wird.

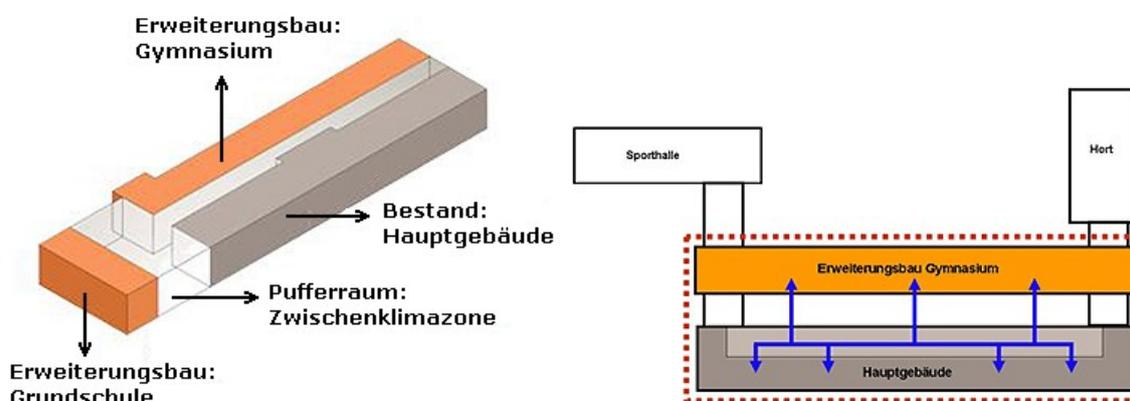


Abbildung 20: schematische Darstellung des neuen Schulgebäudes in der 3-D Ansicht und im Grundriss.
Quelle: [www.eneff-schule.de/\(13.01.2011\)](http://www.eneff-schule.de/(13.01.2011))

Bei der Sanierung bleibt der Hauptbau Großteils erhalten, während die Nebenbauten aufgrund ihrer schlechten Bausubstanz abgerissen und zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgebaut werden. Um den Platzmangel, welcher aufgrund der Zusammenlegung beider Standorte entsteht, zu kompensieren, soll das Hauptgebäude im Norden und Westen erweitert werden. In Abbildung 20 ist die schematische Illustration des neuen Schulkomplexes dargestellt, während in Abbildung 21 die Raumaufteilung angeführt ist. Zwischen dem Hauptgebäude und dem Erweiterungsbau entsteht eine unbeheizte Zwischenklimazone. Diese kann als Aufenthalts- und Kommunikationsraum dienen. Hier können Ausstellungen und andere Aktionen, wie Experimente, sportliche Aktivitäten, Kunstausstellungen oder musikalische Aufführungen durchgeführt werden. Der Wärmeertrag findet nur über passive Solareinträge und innere Lasten statt.

⁵ ist das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen und stellt eine wichtige Kenngröße für die Kompaktheit eines Gebäudes dar. Es beeinflusst entscheidend den Heizenergiebedarf. Ein geringeres A/V -Verhältnis bedeutet eine kleinere wärmeübertragende Außenfläche im Vergleich zum Gebäudevolumen. Deshalb wird weniger Energie benötigt, um die Wärmeverluste über die Hülle auszugleichen. Große Gebäude weisen naturgemäß kleinere A/V -Verhältnisse auf als z. B. Einfamilienhäuser. Quelle gemäß Netzwerk-Energieberater (2011)

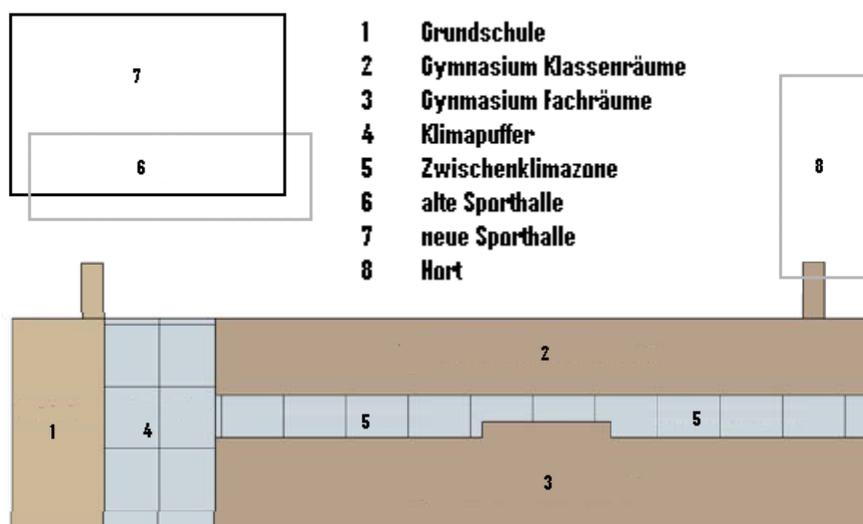


Abbildung 21: Darstellung der Raumaufteilung des Schulgebäudes im Grundriss.
Quelle: www.eneff-schule.de/(13.01.2011)

Sanierungskonzept der Gebäudehülle

Ist-Bestand

Das Hauptgebäude wurde in Massivbauweise errichtet. Das Gebäude besteht aus einem Ziegelmauerwerk und Stahlbetoneinhängedecken, sowie aus ungedämmten Fassaden und einem ungedämmten Dach. Ab und zu wurden ein paar Fenster ausgetauscht.

Sanierungskonzept

Die wenigen Außenwände des Bestandes, welche nicht an die Zwischenklimazone angrenzen, werden außen mit Holzverkleidung gedämmt. An der Süd- und Ostseite werden Kastenfenster eingesetzt. Das ungedämmte Satteldach wird zu einem Flachdach verändert, abgedichtet und gedämmt. Die Bodenplatte wird mit Vakuumdämmpaneelen versehen. Die Zwischenklimazone, welche nicht beheizt wird und als Pufferraum dient, bekommt eine Überdachung aus einem transparenten 3-Lagen-Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE)-Folienkissen und Glas, die in einer Holzkonstruktion eingebettet sind. Für den Boden wurden wärmespeichernde Materialien verwendet. Der Aufbau besteht aus Pflastersteindecken, Kiesschichten, Tragschichten und Frostschutzschichten. Die Wände der Erweiterungsbauten sind aus einer Scheibenkonstruktion aus Kalksandsteinmauerwerk und Stahlbetondecken. Die Innenwände und das Dach werden in Leichtbauweise erbaut. Die Bodenplatte wird mittels Polystyrol-Hartschaum gedämmt und für die Fenster werden Holz-Aluminium-Konstruktionen verwendet.

In den Tabellen 13 bis 15 findet sich eine kurze Darstellung der Sanierungsmethoden der einzelnen Gebäudeteile.

Tabelle 13: Bestandbauteile mit der zugehörigen Sanierungsmethode und den U-Werten

Bauteile des Bestandes	U-Wert vdS in W/(m ² K)	Sanierungsmethode	U-Wert ndS in W/(m ² K)
Außenwand	1,06	36,5 cm verputzte Vollziegel mit 20 cm expandiertem Polystyrolschaum	0,15
Wand zur Zwischenklimazone	-	17,5 / 36,5 cm verputzte Vollziegel	19,1/1,7
Fenster	1,7 / 2,8	3-fach verglaste Holz-Aluminium-Fenster	0,8
	Kunststoff-/Holz-Rahmen		
Dach	1,91	vdS= Satteldach; ndS = Flachdach 28 cm mineralische und pflanzliche Faserdämmstoffe (WLG 035)	0,12
Boden zum Erdreich	-	2 cm Vakuumdämmpaneele	0,34

Tabelle 14: Erweiterungsbau mit dem zugehörigem Baukonzept und den U-Werten

Bauteile des Erweiterungsbau	Baukonzept	U-Wert in W/(m ² K)
Außenwand	Scheibenkonstruktion aus Kalksandstein-Mauerwerk	0,15
Wand zur Zwischenklimazone	Scheibenkonstruktion aus Kalksandstein-Mauerwerk	0,15
Fenster	3-fach verglaste Holz-Aluminium-Fenster	0,8
Dach	28 cm mineralische und pflanzliche Faserdämmstoffe (WLG 035)	0,12
Boden zum Erdreich	12 cm Polystyrol-Hartschaum-Dämmung	0,27

Tabelle 15: Zwischenklimazone mit der zugehörigen Sanierungsmethode und den U-Werten

Bauteile Zwischenklimazone	Sanierungsmethoden	U-Wert in W/(m ² K)
Dach	EFTE-Folienkissen	1,96
Boden zum Erdreich	Wärmespeichernder Boden aus Pflastersteindecken, Kies-, Trag- und Frostschicht	-

Sanierungskonzept der technischen Anlagen

Ist-Bestand

Das Warmwasser wird über die Fernwärme erzeugt und in einem zentralen Speicher gespeichert. Im Schulkomplex befinden sich Radiatoren und Plattenheizkörper die über ein wasserführendes Zweirohrsystem beheizt werden. Die Lüftung erfolgt ausschließlich über die natürliche Querlüftung über die Flure durch die Fenster. Somit kann die Lüftung während der Unterrichtszeit nicht stattfinden.

Sanierungskonzept

Die Fernwärme, mit sehr gutem Primärenergiefaktor, bleibt für die Grundversorgung der Schule erhalten. Die Radiatoren und Plattenheizkörper werden durch Niedertemperaturheizungssysteme ersetzt. Der Neubau bekommt eine thermische Decken-Bauteilaktivierung. Jeder Klassenraum wird mit einer dezentralen Zuluftanlage und die Zwischenklimazone wird mit einer zentralen Ablufführung ausgestattet. Das Luftverteilnetz des Gebäudes über die einzelnen Räume ist in Abbildung 22 dargestellt. Über einen Rotationswärmetauscher wird die Wärme der abgeführten Luft wieder gewonnen und für die Erwärmung der Außenluft sowie zur Erwärmung der Zwischenklimazone genutzt. Durch die Erhöhung der Zulufttemperatur können Transmissions- und Lüftungswärmeverluste verringert werden.



Abbildung 22: Darstellung des Luftverteilnetzes mit Zuluft (grün) und Abluft (gelb) über die Bereiche des Schulgebäudes. Quelle: <http://www.eneff-schule.de/index.php/Demonstrationsobjekte/Plusenergieschulen/plusenergieschule-reutershagen-rostock.html>/(13.01.2011)

Eine optimale zweiseitige natürliche Belichtung soll über Sonnenschutz und Lichtlenksysteme auf der Südfassade und Oberlichter zur Schulstraße eingesetzt werden. Bewegliche Lichtschaulen und holografisch-optische Elemente werden im Atrium verwendet. Somit kann das Kunstlicht um zirka 10 % gesenkt werden. Sensoren stellen fest, ob Kunstlicht benötigt wird oder nicht. Das Kunstlicht schaltet sich nur dann ein, wenn nicht genügend Tageslicht vorhanden ist oder die Räume besetzt sind. Am Dach und auf der Südfassade kommen Photovoltaik-Module und Solarthermiekollektoren zum Einsatz. Das Schulgebäude ist an das öffentliche Versorgungsnetz angeschlossen. Bei Überschüssen soll die Energie in das Netz eingespeist werden, daher sind keine Energiespeicher geplant. Des Weiteren ist eine Windanlage und eine Organic-Rankine-Cycle (ORC)-Anlage⁶ im Versorgungskonzept enthalten. Nachfolgend ist Tabelle 16 zu sehen, in der die Sanierungsmaßnahmen kurz aufgelistet werden.

Tabelle 16: Sanierungsmethoden der technischen Anlagen

Anlagen	Sanierungsmethoden
Fernwärme	bleibt erhalten
Heizung (Radiatoren und Plattenheizkörper)	Niedertemperatursysteme
Belüftung (über Fenster)	dezentrale Zuluftanlagen in den Klassenzimmer + zentrale Abluftanlage in der Zwischenklimazone
Fassade	Sonnenschutz (südliche Fassade)
Beleuchtung	bewegliche Lichtschaulen + holografisch-optische Elemente + Sensoren
Dach	Photovoltaik + Solarthermie
Sonstiges	ORC-Anlage

Auflistung der wichtigsten Kennzahlen v_{dS} und n_{dS}

Der Bedarf an Heizwärme soll über die Fernwärme bezogen werden. Mittels Photovoltaik wird der gleiche Betrag an Primärenergie produziert, der dann in das Stromnetz eingespeist wird. Durch Windenergie, Photovoltaik und ORC-Anlage wird der Bedarf an Strom erzeugt. Für den ORC-Prozess wird ein Teil der Fernwärme benötigt. Dieser Teil wird durch Photovoltaik produzierten Strom kompensiert, der ebenfalls in das Netz eingespeist werden

⁶ Organic-Rankine-Cycle-Anlagen produzieren elektrischen Strom bei niedrigen Temperaturen und Drücken, aufgrund der Verwendung von organischen Arbeitsmitteln. Quelle gemäß Neuhofer, 2004.

soll. Der Endenergieverbrauch an Heizung, Trinkwasser, sowie Strom vor und nach der Sanierung befindet sich in Tabelle 17.

Tabelle 17: Verbrauch an Endenergie von Heizung, Wasser und Strom vor und nach der Sanierung

Endenergieverbrauch in kWh/(m ² a)	vor der Sanierung	nach der Sanierung
Heizung und Trinkwasser	398,3	84,6
Strom	21,4	14,7
Gesamt	420,3	99,4

5.1.3 Grundschule Niederheide in Hohen Neuendorf

Die Grundschule Niederheide ist die erste Plusenergieschule in Deutschland. Die Architekten für dieses Projekt sind Prof. Ingo Lütkemeyer, Dr. Gustav Hillmann und Hans-Martin Schmid. Hier fand keine Sanierung einer bereits vorhandenen Schule statt, so wie es bei der Schule in Rostock und Stuttgart der Fall ist. Die Grundschule ist ein Neubau, der Ende Juni 2011 beendet und durch das BMWi und der Stadt Hohen Neuendorf gefördert wurde.

Schulgebäude und Pläne

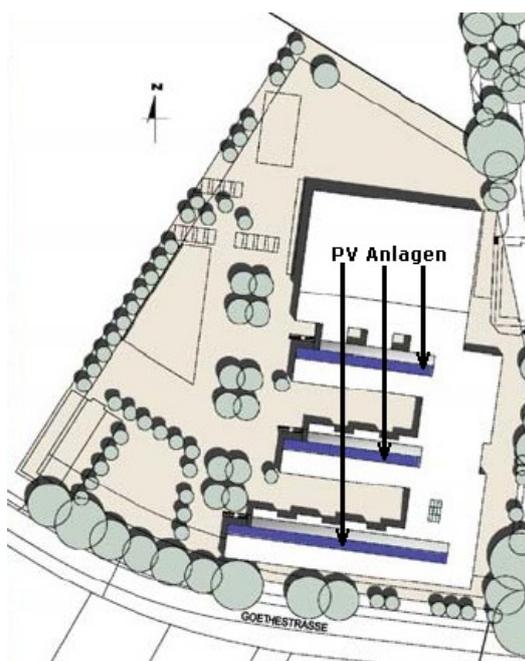


Abbildung 23: schematische Darstellung des Schulgebäudes. Quelle: [http://www.eneff-schule.de/\(20.11.2011\)](http://www.eneff-schule.de/(20.11.2011))

In Abbildung 23 ist der Gebäudekomplex, welcher sich in Unter- und Obergeschoss einteilen lässt, ersichtlich. Die Raumaufteilung der Schule wird in Abbildung 24 dargestellt. Die Schule besteht aus einer zentralen, langgestreckten und Licht durchfluteten Halle und drei Gebäudeflügeln, welche die Klassenzimmer beinhalten. Auf der gegenüberliegenden Seite befinden sich Fachunterrichtsräume, Nebenräume sowie die Aula und eine Bibliothek. Die Klassenräume sind südlich angeordnet. Flure und Nebenräume befinden sich im Norden. Die Aula, welche auch als Mensa dient, kann extern benutzt werden, weil sie über die Erschließungshalle der Schule zugänglich ist.

Die Bibliothek ist unmittelbar in der Nähe des Haupteingangs und kann auch außerhalb der Unterrichtszeiten genutzt werden. Die Sporthalle grenzt an den dritten Gebäudeflügel an und weist eine Grundfläche von 1200 m² auf. Im Erdgeschoss befinden sich das Spielfeld, sowie die Geräte- und Nebenräume. Das Obergeschoss beinhaltet die Umkleide- und Sanitärbereiche. Die Sporthalle besitzt einen eigenen Eingang und steht daher ebenfalls für Veranstaltungen oder Vereinsport zur Verfügung.



Abbildung 24: Darstellung des Schulgebäudes im Grundriss. Links befindet sich das Untergeschoss und rechts ist das Obergeschoss zu sehen. Quelle: [http://www.eneff-schule.de/\(13.01.2011\)](http://www.eneff-schule.de/(13.01.2011))

Neubaukonzept Gebäudehülle

Die Schule ist in Passiv-Bauweise errichtet worden. Eine dichte Gebäudehülle und die Vermeidung von Wärmeverlusten wurden angestrebt. Zum Einsatz sind transparente und nicht-transparente Fassadenflächen sowie Speichermassen und Akustikelemente gekommen. Das Gebäude ist in Massivbauweise ausgeführt worden. Für die Außenmauer ist Beton mit Vormauerziegeln verwendet worden und an manchen Stellen, wie Brüstungsbereichen, wurden Vakuum-Isolationspaneele eingesetzt. In Abbildung 25 ist der Aufbau der Vakuum-Isolationspaneele zu sehen. Der Wärmedurchgangskoeffizient beträgt $0,1-0,2 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Der Aufbau beinhaltet eine 20-40 mm dicke Vakuumisolationsplatte und 40-50 mm Mineralfaser. Um dieselben Anforderungen zu erfüllen wären herkömmliche Standardpaneele mit einer Dicke von 150-350 mm erforderlich. Die Schalldämmung entspricht je nach Aufbau bis zu 50 dB(A).

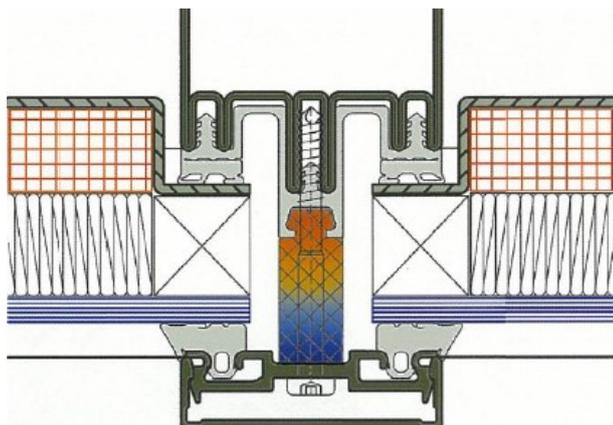


Abbildung 25: Aufbau der Vakuum-Isolationspaneele.
 Quelle: http://aachen2050.isl.rwth-aachen.de/mediawiki/images/0/06/09_Luetkemeyer_Krause_Architektur-und-Technik.pdf (17.01.2012)

In Tabelle 18 sind die Bauteile mit den zugehörigen U-Werten für die Außenwand, das Dach, den Boden und die Fenster aufgelistet.

Tabelle 18: Gebäudebauteile mit den zugehörigen U-Werten

Bauteil	Beschreibung	U-Wert in $W/(m^2K)$
Außenwand	Typ 1: Stahlbeton mit Vormauerziegeln	0,15
	Typ 2: Beton-Hohlblocksteine mit Vormauerziegeln	0,13
	Typ 1+2: Wärmedämmung aus Mineralwolle WLG 032	
Fenster	3-Scheiben Wärmeschutzverglasung + Holz/Alu-Konstruktion	<0,8
Dach	Stahlbeton mit 35 cm Dämmung + Gründach	0,11
Boden zum Erdreich	Stahlbeton mit Dämmung oberhalb und lastabtragender Dämmung unterhalb der Sohlplatte	0,10

Neubaukonzept technische Anlagen

Tageslicht- und Beleuchtungskonzept

Ziel war es, das Tageslicht so gut wie möglich zu nutzen und minimale thermische Belastungen im Sommer auszugleichen. Die unterschiedlichen Anforderungen der Räume sowie die Berücksichtigung der äußeren Bedingungen sind ebenso im Konzept enthalten. Materialien wie Nanogel-Verglasungen, lichtlenkende und elektrochrome Verglasungen wurden eingesetzt. Für die Beleuchtung der Schule dienen LED-Leuchten und Langfeldleuchtstoffleuchten. Die LED-Leuchten dienen als Grundversorgung, falls diese jedoch nicht ausreichen, können die Langfeldleuchtstoffleuchten zusätzlich hinzu geschaltet werden. Für die Steuerung der Beleuchtung sind Präsenz- und Lichtsensoren verwendet worden.

Lüftungskonzept

Es wurde ein hybrides Lüftungskonzept entwickelt, welches aus einer natürlichen (Fensterlüftung) und einer mechanischen Lüftung besteht. Das mechanische Lüftungskonzept beinhaltet dezentrale Zuluftanlagen mit Wärmerückgewinnung. Die Primärluft gelangt in die einzelnen Klassenzimmern und strömt als Sekundärluft in die Flure.

Von den Fluren aus gelangt die Sekundärluft in die Nebenräume, wie WCs, und wird dort extrahiert. Somit wird die eingebrachte Luft mehrmals genutzt. Des Weiteren kommt eine natürliche Lüftung mit Lüftungsflügeln zum Einsatz. Diese Fensterflügel werden motorisch angetrieben, öffnen sich automatisch und können dadurch das Stoßlüften in den Pausen unterstützen.

Durch das hybride System können folgende Aufgaben erfüllt werden:

- mechanische Grundlüftung: Vermeidung eines erhöhten CO₂-Gehaltes während der Unterrichtsstunde
- motorische Fensterflügel: übernimmt die Funktion der Stoßlüftung in den Pausen und die Nachtlüftung im Sommer. Steuerung erfolgt zentral
- bessere Energieeffizienz durch Wärmerückgewinnung im Winter und Bypass- System im Sommer

Energiesysteme

Als Energiesysteme kommen drei Typen zum Gebrauch. Zum einem ein Pellets-Heizkessel (220 kW), zum anderen ein 10 kW Pellets-Blockheizkraftwerk (BHKW) und eine Photovoltaik-Anlage (55 kWp). Der Heizkessel versorgt die Hauptlast der Wärme, zur Unterstützung der Warmwasserbereitung wird das BHKW genutzt. Elektrische Energie wird ebenfalls durch das BHKW sowie von der Photovoltaik-Anlage erzeugt. Mit den beiden Anlagen kann mehr Primärenergie bereitgestellt werden, als die Schule verbraucht.

5.1.4 Energieeinsparungspotential in der Schulsanierung

Um das Einsparpotential des Energiebedarfs von Schulen durch entsprechende Sanierungsmaßnahmen aufzuzeigen, werden zwei Beispiele betrachtet und das Einsparpotential wird in Form eines Balkendiagramms dargestellt.

Beispiel 1: Schule Schwanenstadt

Im Programm „Eneff:Schule“ des BMWi Deutschland wird im Punkt Best-Practice Beispiele die Schulsanierung Schwanenstadt aufgezeigt. Diese wird für das Einsparungspotential für Energie herangezogen. In Tabelle 19 sind die Kennwerte für den Bestand, einer konventionellen Sanierung und einer Sanierung in Passiv-Bauweise der Schule Schwanenstadt für den Bedarf an Endenergie in kWh/(m²a) und in Tabelle 20 die Kennwerte des Bedarfs an Primärenergie in kWh/(m²a) detailliert aufgelistet. Aus den Tabellen ist bereits ersichtlich, dass eine Sanierung in jedem Fall sinnvoll ist und dass durch eine Sanierung zum Passivgebäude im Vergleich zur konventionellen Sanierung ein erhebliches Energieeinsparungspotential vorhanden ist.

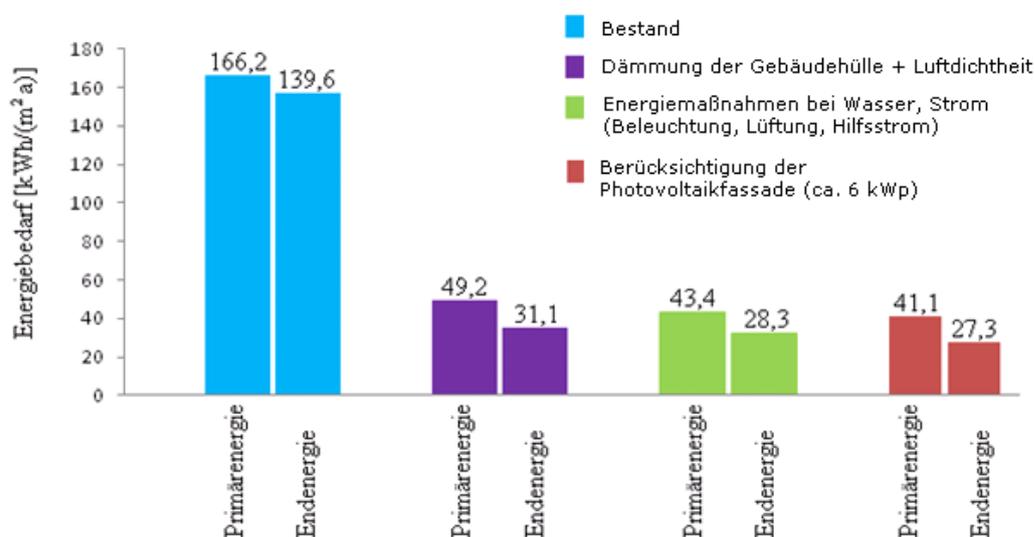
Tabelle 19: Endenergiebedarf der Schule im Bestand, bei einer herkömmlichen Sanierung und einer Sanierung in der Passivhaus-Bauweise. Quelle: [http://www.eneff-schule.de/\(3.01.2012\)](http://www.eneff-schule.de/(3.01.2012))

	Endenergiebedarf in kWh/(m ² a)		
	BESTAND (2004)	konventionelle Sanierung	PH-Sanierung
Werkstättenmaschinen	2,5	2,9	2,9
Schulbetriebsstrom	4,2	3,5	3,2
Beleuchtung	6,3	5,4	3,7
Hilfsstrom	2,7	2,2	1,4
Lüftung	-	-	2,3
Warmwasser	8,0	7,5	6,8
Heizung	122,0	80	14,1
PV-Fassade	-	-	-0,77
Gesamt	145,7	101,5	33,63

Tabelle 20: Primärenergiebedarf der Schule im Bestand, bei einer herkömmlichen Sanierung und einer Sanierung in der Passivhaus-Bauweise. Quelle: [http://www.eneff-schule.de/\(3.01.2012\)](http://www.eneff-schule.de/(3.01.2012))

	Primärenergiebedarf in kWh/(m ² a)		
	BESTAND (2004)	konventionelle Sanierung	PH-Sanierung
Werkstättenmaschinen	7,4	8,6	8,6
Schulbetriebsstrom	12,5	0,4	9,5
Beleuchtung	18,4	6,0	11,0
Hilfsstrom	8,0	6,5	4,2
Lüftung	-	-	6,8
Warmwasser	8,6	8,0	7,2
Heizung	131,2	85,6	14,2
PV-Fassade	-	-	-2,3
Gesamt	186,1	115,1	59,2

Wie in Abbildung 26 zu sehen ist, konnte der Heizwärmebedarf durch die Dämmung der Gebäudehülle drastisch reduziert werden. Von einem Primärenergiebedarf von 166,2 kWh/(m²a) auf 49,2 kWh/(m²a). Über eine Solaranlage mit einer Fläche von 15 m² erfolgt die Bereitstellung von Warmwasser. Am Ende der Sanierung in der Passiv-Bauweise kann ein Primärenergiebedarf von 43,4 kWh/(m²a) erreicht werden. Durch die Photovoltaikfassade, mit einer ungefähren Leistung von 6 kWp werden zirka 2,3 kWh/(m²a) Primärenergie produziert. Um einen Plusenergie-Standard erzielen zu können, müsste hier noch zusätzlich Energie von über 41,1 kWh/(m²a) durch erneuerbare Energien produziert werden.

**Abbildung 26:** Spezifische Energieverbräuche im Bestand und nach einigen Einsparungsmaßnahmen

Es erfolgt die Berechnung (Formel 1), des zu benötigten Flächenbedarfs einer Photovoltaik-Anlage, um das Plusenergie-Niveau zu erlangen. Folgende Annahmen wurden für die Berechnung verwendet:

- Die Sonnenstrahlung beträgt 1000 kWh/m²
- Photovoltaik-Anlage weist einen Wirkungsgrad von 12 % auf
- Der Primärenergiefaktor des Strom-Mix ist 2,7
- Laut www.eneff-schule.de beträgt die Energiebezugsfläche des Schulkomplexes (ohne Turnhalle) 5.596 m²

Es wird mit dem spezifischen Primärenergiebedarf von 41,1 kWh/(m²a) gerechnet, dieser muss jedoch überschritten werden, um Plusenergie zu produzieren. Mit dem Ergebnis der Berechnung wird nur ein Nullenergiehaus erzielt. Insofern muss der Flächenbedarf der Photovoltaik-Anlage größer sein.

$$\text{Flächenbedarf m}^2 = \frac{\text{spez. Primärenergiebedarf } \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}} \times \text{Energiebezugsfläche m}^2}{\text{Primärenergiefaktor}_{\text{Strom-Mix}} \times \text{Modulwirkungsgrad } \% \times \text{Einstrahlungsenergie } \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}}$$

Formel 1: Berechnung des Flächenbedarfs einer Photovoltaik-Anlage bei einem bestimmten spezifischen Energiebedarf

Werden die oben angeführten Werte in Formel 1 eingesetzt, so wird ein Flächenbedarf von rund 710 m² benötigt, um Nullenergie-Niveau zu erzielen. Schon alleine wegen des enormen Flächenbedarfs, der nicht zur Verfügung steht, kann in diesem Beispiel durch den alleinigen, zusätzlichen Einsatz von Photovoltaik kein Plusenergie-Standard erreicht werden.

Um herauszufinden, ob und wie das Plusenergie-Niveau erzielt werden kann, spricht durch die Verwendung unterschiedlichster erneuerbarer Technologien wie Solarthermie, Photovoltaik oder Hybriden aus Solarthermie und Photovoltaik, wodurch Flächen eingespart werden können, Wärmepumpen, kleine Windanlagen, usw., müsste das Schulgebäude genaueren Betrachtungen unterzogen werden, wobei neben dem Flächenbedarf auch die finanziellen Aspekte eine wichtige Rolle spielen.

Beispiel 2: Franz Jonas Europa Schule in Wien

Im Projekt „SchulRen+“ des Programmes „HdZ+“ wird für die Franz Jonas Europaschule ein Sanierungskonzept zur Plusenergieschule durchgeführt. Die Werte können dem Endbericht entnommen werden, welcher im März 2012 erscheint.

Der gemessene jährliche Stromverbrauch der Franz Jonas Europaschule beträgt ungefähr 70 MWh. Der Bedarf an Fernwärme, welche mit den Heizgradtagen bereinigt wurde, liegt bei rund 624 MWh. Werden diese Kennzahlen auf die beheizte Bruttogeschossfläche bezogen, so entspricht dies einem spezifischen Strombedarf von 14 kWh/(m²a) und einem Heizbedarf von ungefähr 125 kWh/(m²a). Mit Hilfe eines Simulationsmodells wurde für den Bestand ein spezifischer Heizwärmebedarf von 124 kWh/(m²a) ermittelt. Die angegebene beheizte Bruttogeschossfläche ist gegenüber dem Modell niedriger. Wird der Wert der Simulation genommen, so entspricht die Energiekennzahl von 124 kWh/(m²a) einem jährlichen Bedarf an thermischer Energie von 677 MWh. Durch die Sanierungsmaßnahmen können gemäß

der Simulation über 80 % thermische Energie eingespart werden, siehe Abbildung 27, wodurch nach der Sanierung ein Restbedarf an Wärme von 124 MWh/a benötigt wird. Der Stromverbrauch beträgt nach der Sanierung 35 MWh/a.

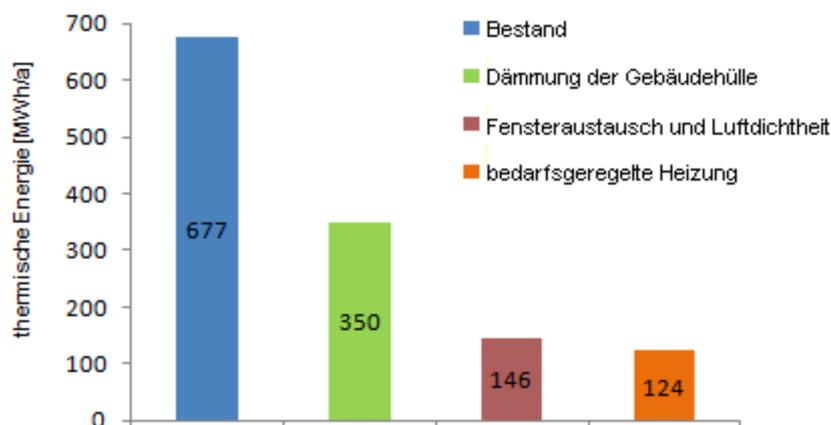


Abbildung 27: thermische Jahresenergiebilanz im Bestand und mit den Sanierungsmaßnahmen

Thermische Energie [MWh/a]

Durch die Verwendung einer 412 m² Photovoltaik-Anlage und einer Installation von 30 m² thermischer Solarkollektoren kann über das Jahr ein Plus an Primärenergie produziert werden. Für die Berechnung, wie viel Strom, beziehungsweise Wärme durch die Solarmodule/-kollektoren produziert wird, wurde eine Sonneneinstrahlung von 1000 kWh/a angenommen sowie ein Wirkungsgrad von 12,5 % bei der Photovoltaik-Anlage und für die Solarthermieanlage 30 %. Mit Hilfe der Photovoltaik können zirka 51,5 MWh/a ins Netz eingespeist werden und die Solaranlage weist einen Ertrag von 9 MWh/a auf.

Die Bilanzierung zum Plusenergiegebäude erfolgt auf primärenergetischer Basis und über das Jahr. Der Primärenergiefaktor des Strom-Mixes weist einen Wert von 2,62⁷ auf. Die benötigte Wärme für die Schule wird über die Fernwärme bereitgestellt, daher wird für die Berechnung der Primärenergiefaktor der Fernwärme in Wien mit 0,368 herangezogen. Aufgrund der Wärmegewinnung von 9 MWh/a über die Solarthermie bedarf es anstatt der 124 MWh/a nur mehr 115 MWh/a Wärme, die mittels der Fernwärme bereitgestellt werden müssen. Pro Jahr wird ein Überschuss an Primärenergie von 0,91 produziert, siehe Tabelle 21 (Ökosan, 2011).

Tabelle 21: Berechnung der primärenergetischen Bilanzierung über das Jahr

Bedarf	MWh/a	bereitgestellt durch	MWh/a	Primärenergie in MWh/a
Wärme	124,00	Fernwärme	115,00	42,32
Strom	35	Strom-Netz	35	91,70
		Photovoltaik	51,50	-134,93
Gutschrift				-0,91

⁷ Der Primärenergiefaktor des Strom-Mixes mit einem Wert von 2,62 bezieht sich auf die Quelle: Gerhard Faninger. Energetische, Wirtschaftliche und Umweltbezogene Bewertung. Version 2.1. 15.August 2010. (Primärquelle: Datensätze GEMIS)

6. Haustechnik-Komponenten

Plusenergiekonzepte können nur mit Hilfe von erneuerbaren und nachhaltigen Technologien erzielt werden. Der Energiebedarf des Gebäudes muss durch geeignete Maßnahmen, wie eine dichte und gut gedämmte Gebäudehülle und der Einsatz von energieeffizienten Systemen, so gering wie möglich gehalten werden und der benötigte Bedarf muss über erneuerbare und nachhaltige Technologien gedeckt werden. Diese Systeme müssen in den Gebäudebestand leicht integrierbar sein, um die Planung der Sanierung zu erleichtern. Weiterhin sollen diese Technologien nicht nur den Energiebedarf decken, sondern auch umweltfreundlich sein, um dem Klimawandel entgegenzuwirken und Emissionen wie CO₂, im Vergleich zu herkömmlichen Systemen mit fossilen Energieträgern, zu reduzieren. Dementsprechend werden in diesem Teil der Arbeit folgende nachhaltige und erneuerbare Technologien dargestellt:

Photovoltaik

Gebäude haben einen großen Bedarf an Strom, welcher über das Strom-Netz bezogen wird. Mit Hilfe von Photovoltaik lässt sich der Stromverbrauch zum Teil decken oder es ist sogar eine Überproduktion an Energie möglich. Die Energiegewinnung erfolgt außerdem direkt über die Sonneneinstrahlung. Während der Betriebszeit ist das System CO₂-arm. Photovoltaik-Module können in verschiedenster Art und Weise in das Gebäude integriert werden und stellen daher für die Sanierung von Gebäuden ein wichtiges Element dar.

Solarthermie

Neben Strom benötigen Gebäude Wärme zur Beheizung der einzelnen Räume sowie zur Bereitstellung von Warmwasser. Die Solarthermie kann für beides verwendet werden. Sie liefert entweder Wärme für die Bereitstellung von Warmwasser oder sie dient zur Raumheizungsunterstützung. Eine typische Dimensionierung einer Solaranlage kann in einem 4-Personen-Haushalt bis zu 60 % des jährlichen Energieverbrauchs an Warmwasser einsparen (IWR, 2011 und Viessmann, 2008). Im Übrigen nutzt die Solarthermie die direkte Sonnenstrahlung und ist während des Betriebes umweltschonend, weil keine fossilen Rohstoffe zur Anwendung kommen. Im Gegensatz zu Heizkesseln mit fossilen Brennstoffen stellt die Solarthermieanlage eine sinnvolle Alternative dar und sollte aus diesem Grund für die Schulsanierung in Betracht gezogen werden.

Photovoltaik-Solarthermie-Hybridssysteme

Ein großer Nachteil von Solarkollektoren und -modulen ist der relativ große Bedarf an Fläche. Das Hybridssystem kombiniert die Photovoltaik-Anlage mit der Solarthermie, wodurch simultan Strom und Wärme produziert werden kann und zugleich Fläche eingespart wird. Gerade bei einer Sanierung können diese Systeme von großer Bedeutung sein, da im Bestand Gebäude- und Grundstücksflächen bereits begrenzt sind.

Lüftung

Der Einsatz einer kontrollierten Raumlüftung ist mit Abstand die wichtigste Haustechnik-Komponente einer Schule. Die Aufnahmefähigkeit der SchülerInnen sinkt mit steigendem CO₂-Gehalt. Ein entsprechendes Lüftungskonzept wirkt dem CO₂-Anstieg entgegen und sorgt für einen hygienischen Mindestluftwechsel. Deshalb sollte bei einer Sanierung nicht darauf verzichtet werden, ein geeignetes Lüftungskonzept in das Schulgebäude zu integrieren, auch wenn eine solche Anlage relativ hohe Kosten verursachen kann.

Wärmepumpe

Die Wärmepumpe dient, wie die Solarthermie, der Bereitstellung von Wärme für Raumheizung und Warmwasser. Der Vorteil liegt gleichfalls in der direkten Nutzung der Umgebungsenergie. Die Wärmepumpe benötigt im Vergleich zur natürlichen Wärmequelle einen geringen Teil an Antriebsenergie, um die benötigte Wärme bereitzustellen. Daneben entfallen genauso wie bei der Solarthermie Transportwege, die bei einem Holzpelletsessel für die Anlieferung der Biomasse notwendig wären. Sowohl Schulen mit viel Flächenbedarf als auch Schulen mit geringem Flächenbedarf können Wärmepumpen einsetzen, weil unterschiedlichste Wärmequellen zur Energiegewinnung verwendet werden können. Die Wärmepumpe ist somit eine gute Wahl zur Deckung des Wärmebedarfs einer Schule und sollte bei einer Schulsanierung berücksichtigt werden. Des Weiteren kann eine Kombination mit der Solarthermie- oder der Photovoltaik-Anlage erfolgen.

Im Anschluss erfolgt eine ausführliche Betrachtung der einzelnen Systeme. Um sich einen Überblick über die einzelnen Systeme zu verschaffen, wird zunächst über die Grundlagen der Technologien berichtet. Danach erfolgt das Technologie- und Produkt-Screening, damit bereits am Markt vorhandene Systeme angeführt werden und für die Forschung interessante Themen aufgezeigt werden. Zum Schluss werden für die Sanierung relevante Kriterien aufgelistet, um Planern und Architekten zu vermitteln, was bei der Anwendung der Systeme für die Sanierung zu beachten ist.

6.1 Photovoltaik (PV)

6.1.1 Grundlagen

Mit Hilfe der Photovoltaik kann Lichtenergie in Strom umgewandelt werden. Es können unterschiedlichste Zelltypen für ein Photovoltaik-Modul eingesetzt werden. Diese gliedern sich in drei Generationen (Abbildung 28). Zur ersten Generation zählen die kristallinen Siliziumzellen. Diese können wiederum in monokristalline und poly-/multikristalline Zellen unterteilt werden. Die zweite Generation umfasst die Dünnschichtzellen, welche aus amorphem Silizium gewonnen werden, aber auch aus anderen Rohstoffen wie Cadmium-Tellurid. Die dritte Generation befasst sich unter anderem mit Nanozellen, Farbstoffzellen und Organische Zellen (Behrendt et al., 2010).

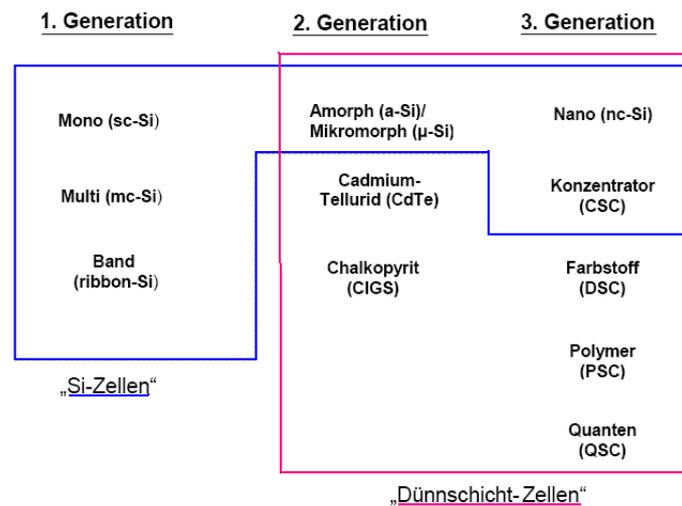


Abbildung 28: Zelltypeneinteilung in drei Generationen.
Quelle verändert nach Behrendt et al. (2010)

Je nach Zelltyp besitzen die Module verschiedenen Wirkungsgrade. Die von den Firmen angegebenen Modulwirkungsgrade beziehen sich auf die Standard-Test-Bedingungen (STC). Bei diesem Test beträgt die Einstrahlung 1000 W/m^2 , die Luftmasse (AM) ist 1,5 und die Zelltemperatur weist $25 \text{ }^\circ\text{C}$ auf. Die Module der Firmen sind somit vergleichbar, jedoch ist zu beachten, dass die STC-Werte in der Realität kaum erreicht werden (Haines, 2008). Tabelle 22 zeigt von diversen Zelltypen die Modulwirkungsgrade, den Solarstromertrag eines 1 m^2 Photovoltaik-Moduls und die benötigte Solarfläche für eine Anlagenleistung von 1 kW_p . Es wurde für Österreich eine Sonnenenergieeinstrahlung von $1000 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und eine maximale Strahlungsintensität von $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ angenommen (Haas et al., 2003).

Tabelle 22: Diese Tabelle zeigt für die unterschiedlichen Zelltypen die Wirkungsgrade, den Solarstromertrag einer 1 m^2 PV-Anlage in $\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$ und die benötigte Solarfläche in m^2 für eine 1 kW_p Anlage.
Quelle gemäß Haas et al. (2003)

Zelltyp	Wirkungsgrad in %	Solarstromertrag in $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$	Solarfläche in m^2
monokristallines Silizium	10-14	100-140	7-10
polykristallines Silizium	9-13	90-130	8-11
amorphes Silizium (a-Si)	4-7	40-70	14-25
Cadmium Tellurit (CdTe)	5-8	50-80	11-20

Wie in der Tabelle zu sehen ist, besitzen die Dünnschichtmodule den geringsten Wirkungsgrad, während die monokristallinen Module den höchsten aufweisen. Somit benötigen Dünnschichtmodule mehr Fläche, um dieselbe Anlagenleistung wie mono- oder polykristalline Module zu erbringen.

6.1.2 Technologie und Produkt Screening

Die Gebäudeintegration von Photovoltaik-Modulen (GIPV/BIPV) kann entweder durch Addition oder durch Substitution erfolgen. Während bei der Addition die Photovoltaik-Anlage mittels Gestell an das Gebäude installiert wird, nehmen bei der Substitution die Module

bautechnische Funktionen des Gebäudes ein. Laut Hagemann (2002) weist die GIPV zahlreiche Vorteile auf.

Vorteile der Gebäudeintegrierten Photovoltaik-Module

- Verwendung von ungenutzten Gebäudeflächen
- Senkung der Stromverteilungskosten. Kurzer Stromtransport, weil der Verbraucher in der Nähe des Produzenten ist
- Photovoltaik-Module können Bauteile substituieren, wodurch eine Kostenreduktion, bis zu 25 % der Gesamtkosten erreicht werden kann, zumal Material- und Installationskosten sowie Kosten für die Unterkonstruktion, etc. entfallen
- Reduktion des Primärenergieverbrauchs
- hohe Sichtbarkeit

Photovoltaik-Module können an verschiedenen Gebäudeflächen, wie beispielsweise auf Dächern oder an der Fassade, installiert werden. Sie können ebenfalls Aufgaben von Markisen oder Fenstern, mit Hilfe von transparenten Photovoltaik-Modulen, übernehmen. Bei der Montage auf dem Dach muss zum Beispiel zwischen Schräg- und Flachdach unterschieden werden. Auf einem Flachdach kann die Photovoltaik Anlage mit Hilfe eines Gestells in einem geeigneten Winkel aufgestellt werden. Des Weiteren können sich die Module mit Hilfe eines Nachführungssystems (einachsig oder zweiachsig) dem Sonnenverlauf anpassen, um den Ertrag zu steigern. Bei Schrägdächern kann zwischen einer Aufdach- und einer Indach-Montage gewählt werden. Aufdach bedeutet, dass die Module auf das Dach mittels Gestell aufgebracht werden, während bei einem Indach die Module die Funktion der Dachziegel erfüllen. Mittels Dünnschichttechnologie können auch gewölbte Dächer zur Stromproduktion verwendet werden. Bei der Fassadenintegration muss zwischen Kalt- und Warmfassade unterschieden werden. Kaltfassaden sind vorgehängte Fassaden. Hier dient die äußere Schicht als Wetterschutz und die innere Schicht als Wärmedämmung. Bei der Warmfassade gibt es nur eine Schicht, die gleichzeitig als Wetterschutz und Wärmedämmung dient (Bau-Praxis, 2011). Die Photovoltaik-Module können vertikal (90° Winkel) oder schräg angebracht werden. Auch hier ist eine Nachführung möglich. In Abbildung 29 werden die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten bildlich dargestellt.

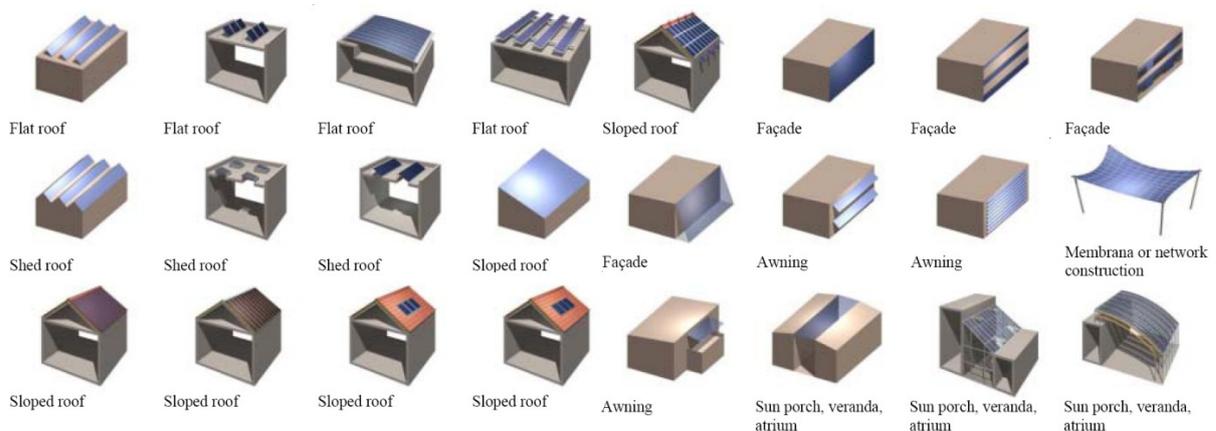


Abbildung 29: Anwendungsmöglichkeiten von PV-Modulen. Quelle nach Haas, et al. (2003)

6.1.3 Für die Schulsanierung wichtige Kriterien

Dachaufbau

Bei einer Sanierung ist das Dach bereits Bestand des Gebäudes. Hier ist zu beachten, aus welchem Material das Dach besteht. Bei einem Metaldach, ist es eventuell sinnvoller die Module mit einem geeigneten Gestell aufzubauen. Ansonsten müsste das Dach aufgeschnitten werden um ein Indach-Konzept einzubinden. Bei einem Ziegeldach können die Ziegelsteine hingegen ohne Probleme heruntergenommen werden.

Aufstellung

Die Ausrichtung der Module ist im Allgemeinen ein wichtiges Kriterium. Vor allem im Zusammenhang mit einer Sanierung, wo das Gebäude bereits existiert und ausgerichtet ist, sollten die Module in einem geeigneten Winkel installiert werden. Gemäß Haas et al. (2003) sollten die Module in Richtung Süden mit einem Winkel von 30° ausgerichtet werden, um eine optimale Leistung erbringen zu können. Kommt es zu Richtungsabweichungen, so vermindert sich die Moduleffizienz, siehe Abbildung 30. Bei Aufstellungen mit Gestell ist besonders der Schattenwurf der eigenen Module zu berücksichtigen. Sind die Module zu wenig geneigt, ist der Selbstreinigungsgrad durch Regen erschwert. Ebenfalls bleibt im Winter der Schnee besser haften.

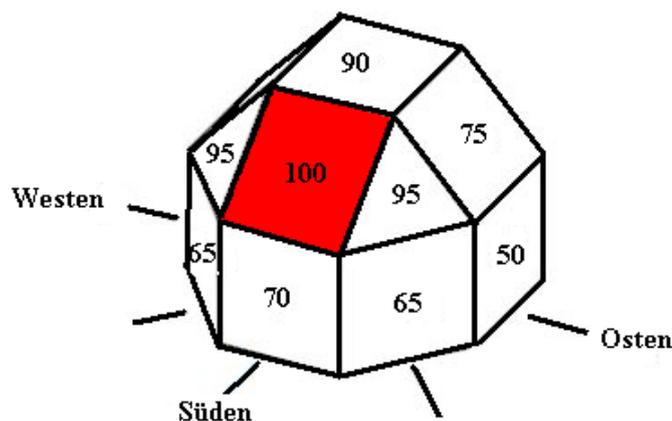


Abbildung 30: maximal erbringende Leistung je nach Ausrichtung der Module.
Quelle gemäß Ertex Solar (2010)

Verschattung

Die Verschattung ist ein weiterer bedeutender Parameter, auf den bei der Sanierung Wert gelegt werden muss. Es ist sehr wichtig, dass kein Schatten auf die Module auftrifft, weil ansonsten der Modulwirkungsgrad negativ beeinflusst wird. Dabei sind auch der Sonnenverlauf und die Umgebung zu berücksichtigen. Ebenso muss der Sonnenstand zwischen Winter und Sommer beachtet werden. Besonders bei der Sanierung sollten bestehende Gebäudebauteile wie Schornsteine, etc. in die Planung der Anlage mit einbezogen werden.

Abbildung 31 zeigt verschiedene Beispiele, die zu einem Schattenwurf führen können.

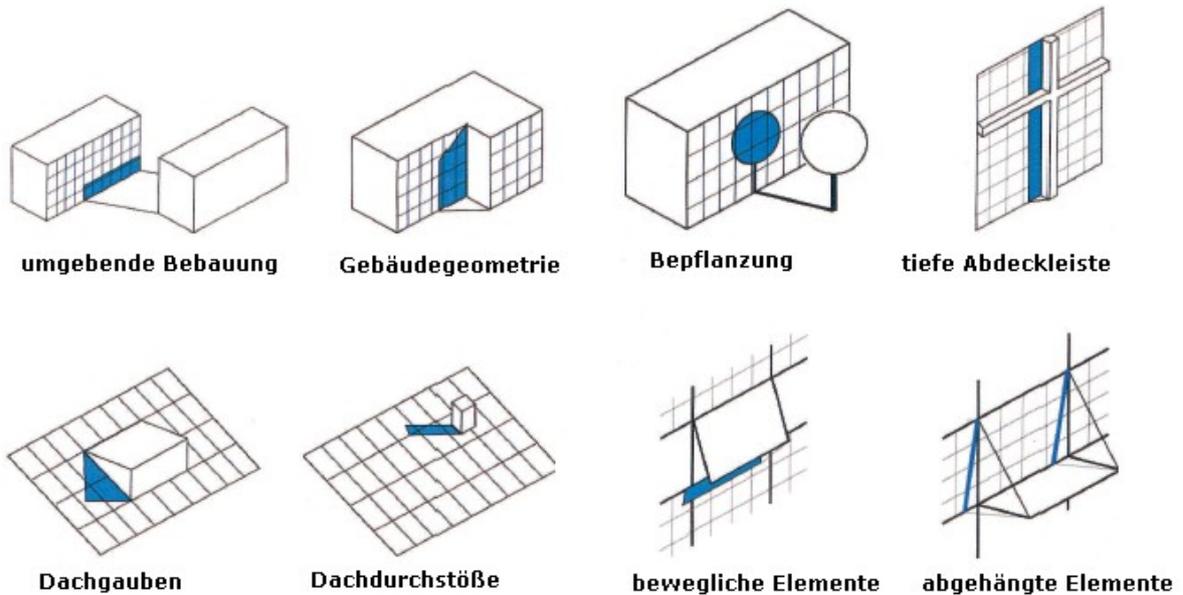


Abbildung 31: Schattenbildung durch umgebende Objekte. Quelle nach Krawietz (2003)

Teilverschattungen können die Leistung der Module oft um einen großen Prozentsatz reduzieren, da die meisten Module seriell verschaltet werden, wodurch die verschatteten Module einen anderen optimalen Arbeitspunkt aufweisen als die unverschatteten Module. Daher sind Bypässe zur Umgehung der verschatteten Module von Vorteil.

Bypass

Weist ein Modul eine geringere Effizienz auf, zum Beispiel aufgrund eines Schattenwurfes, beeinträchtigt dies die Leistung der gesamten Anlage. Um solch einen Vorgang zu vermeiden, kann ein Bypass eingebaut werden (Abbildung 32). Aufgrund der schon vorhandenen Geometrie des Gebäudes kann die Verschattung teilweise nur schwer vermieden werden. Daher sollte gerade bei einer Sanierung der Einbau eines Bypasses in die Anlage erfolgen.

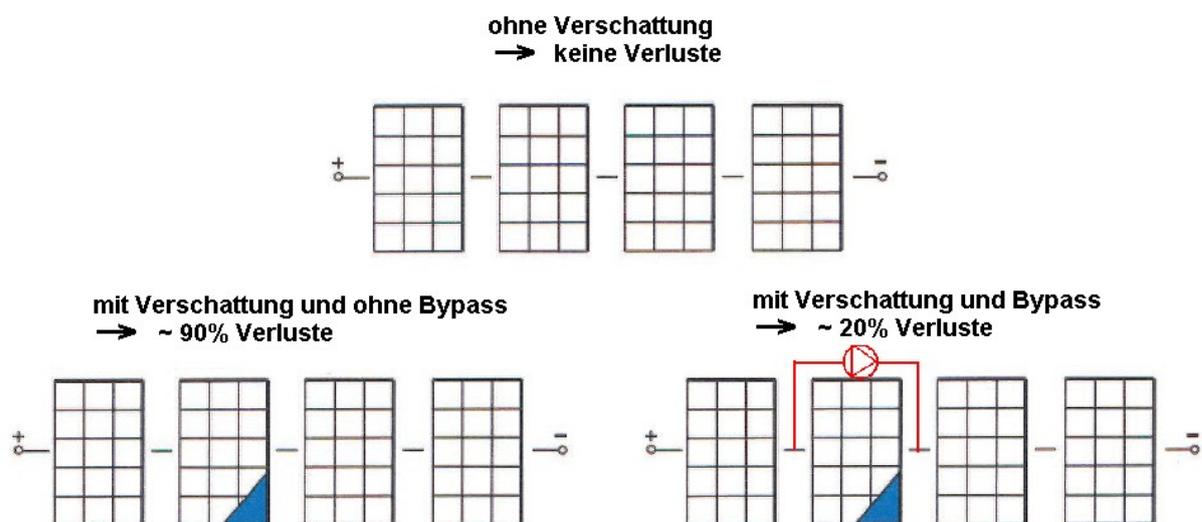


Abbildung 32: Verluste mit/ohne Verschattung und mit/ohne Bypass. Quelle nach Krawietz (2003)

Hinterlüftung

Werden die Photovoltaik-Module bei der Sanierung auf die Gebäudehülle installiert und nicht in die Gebäudehülle integriert, so muss eine Hinterlüftung zwischen den Modulen und dem Gebäude sichergestellt werden, um einen optimalen Energiegewinn zu erhalten. In zahlreichen Literaturstudien wird auf die Hinterlüftung von Photovoltaik-Anlagen hingewiesen, weil ohne Hinterlüftung die Zelltemperatur ansteigt, was wiederum zur Senkung der Moduleffizienz führt. Im Artikel von Hasan et al. (2010) wird erwähnt, dass ein kristallines Silizium-Modul bei einer Temperatur von größer als 25 °C eine Erhöhung der Zelltemperatur pro Kelvin die Modulleistung zwischen 0,4 und 0,65 % vermindert. Die Erwärmung der Module führt neben der Leistungsreduktion auch zu Spannungen bei Photovoltaik-Glasmodulen. Diese können ebenfalls durch eine Hinterlüftung abgebaut werden. Weiters können Flüchtigkeiten abtransportiert werden und der Zwischenraum des Gebäudes und der Photovoltaik-Anlage kann der Anbringung von Kabeln dienen (Hagemann, 2002). Neben der natürlichen Hinterlüftung können die Module auch hydraulisch gekühlt werden indem Wasser auf der Rückseite der Module fließt (Hasan et al., 2010). Diese Vorgehensweise beschreibt einen Hybridkollektor, welcher im Kapitel '3.3 Photovoltaik/Solarthermie (PV/T)-Hybride' genauer betrachtet wird.

In Abbildung 33 wird gezeigt, dass der Abstand zwischen Gebäude und Photovoltaik-Module ungefähr 15 cm sein sollte, um eine gute Hinterlüftung zu gewährleisten. Bei nicht hinterlüfteten Photovoltaik-Modulen sinkt der Ertrag um zirka 10 %.

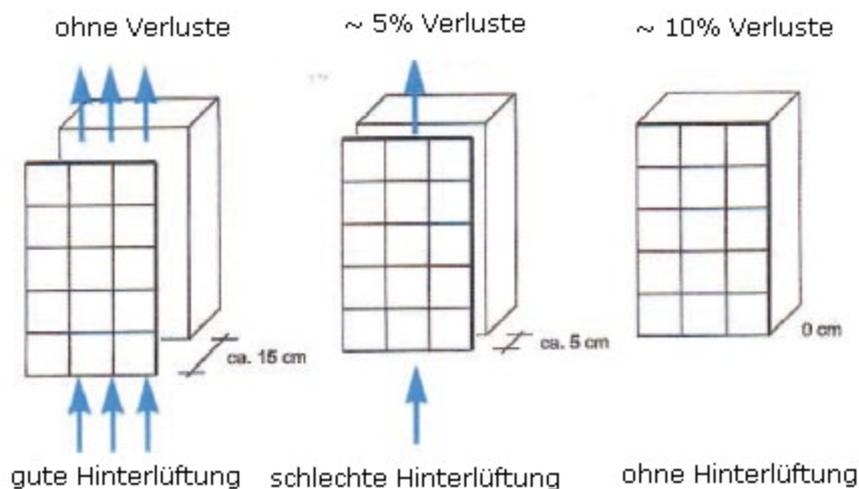


Abbildung 33: Modulleistungen mit und ohne Hinterlüftung. Quelle gemäß nach Krawietz (2003)

Belastung

Vor der Installation der Module ist zu prüfen, ob das bereits vorhandene Dach im Lauf der Zeit aufgrund von Witterungen Schäden aufweist und Sanierungsbedürftig ist oder die zusätzliche Belastung der Module tragen kann. Vor allem im Winter tragen die Module mehr Gewicht aufgrund von Schneebefall.

Laut Hagemann (2002) bleibt Schnee bei einer Steigung von kleiner als 45° haften. Rahmenlose Module weisen den Vorteil auf, dass der Schnee leichter abrutscht. Besitzen die Module eine Rahmenkonstruktion, so muss diese sehr stabil sein, da bei viel

Schneemasse der Rahmen durch den Eisdruck deformiert werden kann. Je nach Standort kann die Leistung zwischen 1-3,5 % sinken. Werden die Module bei der Sanierung in die Gebäudehülle integriert, so muss die Dichtigkeit überprüft werden, um ein Eindringen von Wind und Wasser zu verhindern.

6.2 Solarthermie

6.2.1 Grundlagen

Bei der Solarthermie wird Sonnenenergie in Wärme umgewandelt. Die solare Wärme wird entweder ausschließlich zur Bereitstellung von Brauchwasser oder zur Raumheizungsunterstützung verwendet. Es gibt drei Arten von Kollektoren, den Flachkollektor, den Luftkollektor und den Vakuumröhrenkollektor (Quaschnig, 2010). In Tabelle 23 sind die unterschiedlichen Kollektoren mit ihren Wirkungsgraden und den dazugehörigen Temperaturbereichen, in denen die Kollektoren eingesetzt werden können, aufgelistet. Der Wirkungsgrad der Kollektoren hängt von der Temperaturdifferenz des Kollektors und der Umgebung ab. Mit Hilfe der Wirkungsgradkennlinie wird die Effizienz dargestellt. Mit Erhöhung der Kollektortemperatur steigen auch die thermischen Verluste, wodurch der Wirkungsgrad der Kollektoren sinkt, da der Kollektor weniger Nutzwärme abgeben kann. Weiters kommen noch optische Verluste hinzu, weil der Absorber selber und die zusätzliche Glasscheibe des Kollektors die Sonnenstrahlen reflektieren, und je nach Art des Kollektors zwischen 70–90 % der Sonnenstrahlen umgewandelt werden können (Quaschnig, 2010). Tendenziell verhalten sich die thermischen und optischen Verluste gegenläufig. Wird dem Kollektor eine weitere Glasplatte hinzugefügt, damit sich die thermischen Verluste reduzieren, so steigen die optischen Verluste (Marko und Braun, 1997).

Tabelle 23: Darstellung der Kollektortypen mit den jeweiligen Wirkungsgraden und im welchem Temperaturbereich sie angewandt werden können. Quelle gemäß Solarserver (2011)

Kollektortyp	Wirkungsgrad in %	Einsatz im Temperaturbereich in °C
Absorber (unabgedeckt)	82 – 97	bis 40
Flachkollektor	66 – 83	20 bis 80
Luftkollektor	75 – 90	20 bis 50
Vakuum-Flachkollektor	81 – 83	20 bis 120
Vakuum-Röhrenkollektor	62 – 84	50 bis 120

Laut Schnauss (2008) beträgt die Lebensdauer einer Solaranlage ungefähr 20-25 Jahre. Die Solarthermie eignet sich gut für Gebäude die ganzjährig Wärme benötigen, während sie in Gebäuden wie Schulen, die an Wochenenden oder Ferienzeiten geschlossen sind und an diesen Tagen wenig bis gar keine Wärme benötigen, ineffizienter sind und sich andere Alternativen wie Wärmepumpe oder Holzpelletskessel besser eignen würden.

6.2.2 Technologie und Produkt Screening

Wie bereits erwähnt, kann die Solarthermie für unterschiedliche Anwendungsbereiche eingesetzt werden, sei es zur Erwärmung des Brauchwassers und/oder zur Unterstützung der Raumheizung (Quaschnig, 2010). Im Folgenden werden die diversen Konzepte der Solarthermie vorgestellt.

Die Solarthermie kann auch so ausgelegt werden, dass sie den gesamten Heizbedarf eines Gebäudes deckt, jedoch müssten hierzu die Kollektoren und die Speicher großzügig dimensioniert werden. Dies ist jedoch aus ökonomischen Gründen nicht sinnvoll, da die Systeme nur zur Heizungsunterstützung dienen sollten.

6.2.3 Für die Schulsanierung wichtige Kriterien

Aufstellung

Für eine optimale Ausrichtung der Kollektoren gelten dieselben Anforderungen wie bei der Photovoltaik, siehe Abbildung 17. Zu beachten ist, dass die Kollektoren in einem Winkel von ungefähr 35° ausgerichtet werden müssen, damit die bestmögliche Leistung erzielt wird (Viessmann, 2008).

Verschattung

Im Vergleich zu den Solarmodulen ist der Ertrag der Solarkollektoren vom Schatten nicht so stark abhängig. Trotzdem wird der Ertrag reduziert, wenn die Sonnenstrahlen nicht auf den Kollektoren auftreffen. Daher ist darauf zu achten, dass diese so platziert und dimensioniert werden, sodass schattenwerfende Objekte sich so gering wie möglich auf die Leistung der Kollektoren auswirken (Viessmann, 2008). Besonders für die Sanierung ist dies ein bedeutender Faktor der berücksichtigt werden muss, zumal schon Gebäudebauteile wie Schornsteine, etc. im Bestand bereits gegenwärtig sind.

Belastung

Vor der Montage der Solarkollektoren ist zu prüfen, ob das bestehende Dach die zusätzliche Belastung der Kollektoren und der Unterkonstruktion tragen kann. Besonders im Winter besitzen die Kollektoren zusätzliches Gewicht aufgrund der Schneelasten. Auch Winddruck oder Windsog wirken sich auf die Belastung des Daches aus. Demzufolge sollte die Überprüfung des Dachbestands im Rahmen der Sanierung erfolgen, weil das bereits vorhandene Dach im Lauf der Zeit aufgrund von Witterungen Schäden aufweisen könnte, wodurch zusätzliche Lasten nicht mehr getragen werden können (Viessmann, 2008).

Auslegung der Kollektorflächen und des Speichervolumens

Um ökonomisch wirtschaftlich arbeiten zu können, sollte die Anlage weder zu klein noch zu groß dimensioniert werden. Bei der Sanierung ist dies ein sehr kritischer Punkt, der berücksichtigt werden muss. Bei der Berechnung der Auslegung der Anlage für die Raumheizung darf nicht von jetzigem Wärmeverbrauch ausgegangen werden sondern vom Bedarf an Wärme nach der Sanierung. Denn durch die Sanierungsmaßnahmen wie Dämmung der Gebäudehülle und Austausch undichter Fenster wird der Wärmebedarf stark reduziert.

In der Literatur können verschiedene Angaben für die grobe Auslegung der Solarthermie gefunden werden.

Laut Amann et al. (2010) werden für die Warmwasseraufbereitung folgende Größen benötigt:

- Kollektor: 1,25 m² für 50 l Trinkwasser pro Tag
- Speicher: 50-70 l pro m² Kollektorfläche
(die Werte gelten bei 50 % Deckungsgrad)

während folgende Werte für die Bereitstellung von Wärme für Warmwasser und Raumheizung gelten:

- Kollektor: 1 m² pro 5 m² Wohnfläche
- Speicher: 1000 l Pufferspeicher pro 10 m² Kollektorfeld
(bei einer Heizenergieeinsparung von zirka 30 %)

Nach Quaschnig (2010) werden ca. 30 % weniger Kollektorfläche benötigt, wenn Vakuumröhrenkollektoren anstatt Flachkollektoren verwendet werden. Für die grobe Auslegung von Flachkollektoren werden folgende Werte benötigt:

- Kollektor: 1-1,5 m² Flachkollektor pro Person
- Speicher: 80-100 l pro Person

Für eine genauere Auslegung der Solaranlage muss der Bedarf an Warmwasser und Heizung bestimmt werden. Der Heizwärmebedarf wird von der Wohnfläche und dem Gebäudestandard beeinflusst, während der Wasserverbrauch von der Personenanzahl und den Nutzungsgewohnheiten abhängt (Schnauss, 2008). Bei einer Schule wird der Wasserverbrauch somit von der Anzahl an SchülerInnen und LehrerInnen beeinflusst sowie von der Tatsache, ob nach dem Turnunterricht Duschkpflicht für die SchülerInnen herrscht und ob die Turnhallen auch für Vereinsport zur Verfügung stehen. Des Weiteren befinden sich meistens in jedem Klassenzimmer Waschbecken, damit sich die NutzerInnen nach der Anwendung von Kreide die Hände waschen können. Durch die Verwendung von Smart Boards entfallen die herkömmlichen Tafeln und Kreiden, wodurch auch die Waschbecken nicht mehr gebraucht werden und ein Teil des Warmwasserbedarfs entfällt.

6.3 Photovoltaik/Solarthermie (PV/T)-Hybride

6.3.1 Grundlagen

Seit Mitte der 1970er Jahre wird im Bereich der Photovoltaik-Solarthermie-Hybridssystemen, kurz genannt PV/T, geforscht (Zondag, 2008). Die Gründe, diese Systeme zu erforschen, sind zum einen der vorhandene geringe Flächenbedarf, vor allem im urbanen Raum und zum anderen die geringe Effizienz und die hohen Kosten der konventionellen Photovoltaik-Systemen, da diese nur ungefähr 6-8 % der einfallenden Sonnenstrahlung in elektrische Energie konvertieren und der Rest durch Reflexionen und Wärme als Verluste an die Umwelt verloren geht (Ibrahim et al., 2011). Die Hybridssysteme besitzen Funktionen der Solarmodule und der Solarkollektoren (Charalambous et al., 2007). Über die Photovoltaik-Zellen kann elektrische Energie in Form von Strom produziert werden, während das System simultan thermische Energie in Form von heißem Wasser oder Luft mittels Absorber eines Solarkollektors erzeugt. Dies kann zur Brauchwassererwärmung oder zur direkten Raumheizung genutzt werden (Ibrahim et al., 2011). Zusätzlich fungiert der Absorber als Kühlung der Photovoltaik-Zellen, und wirkt sich wiederum positiv auf die elektrische Effizienz der Photovoltaik-Module aus (Zondag, 2008).

6.3.2 Technologie und Produkt Screening

Grundtypen

Es können, je nachdem ob Wasser oder Luft als Wärmeüberträger fungiert, zwei Grundtypen von PV/T Hybriden unterschieden werden (Kalogirou und Tripanagnostopoulos, 2007). Wasser und Luft basierte PV/T Kollektoren können ebenfalls miteinander kombiniert werden. Diese Systeme werden als Integrated Photovoltaic and Thermal Solar Systems (IPVTS) bezeichnet. Die PV/T Hybride können nach der Art des Absorbers weiter unterteilt werden, siehe Abbildung 37.

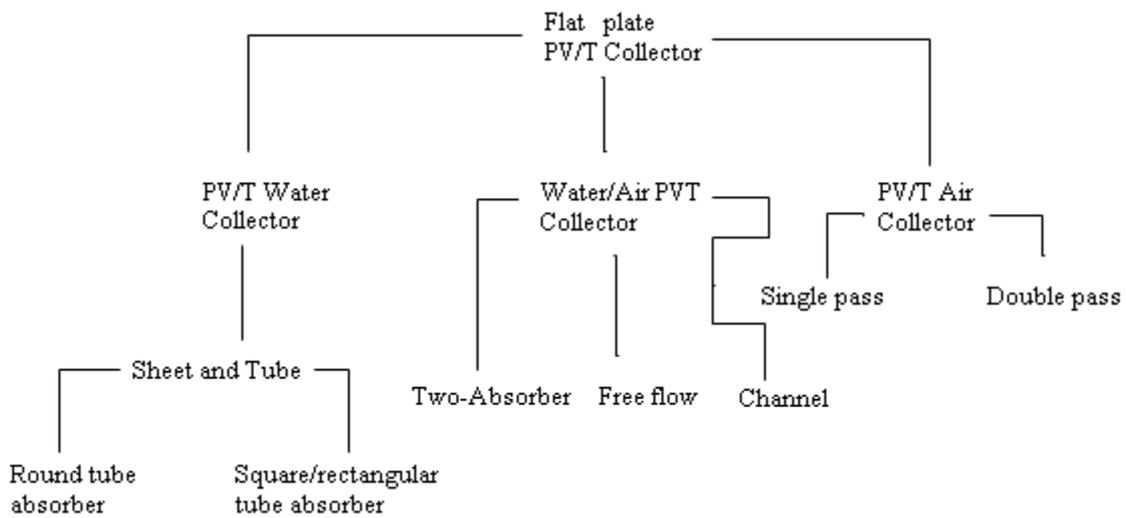


Abbildung 37: Darstellung der PV/T Flachkollektoren. Quelle gemäß Ibrahim et al. (2011)

Bei einem PV/T Luftkollektor ist der Strömungsverlauf der Luft, welcher oberhalb, unterhalb oder auf beiden Seiten des Absorbers als Einzel- oder Doppelpass erfolgen kann, für die Leistung von Bedeutung. In Abbildung 38 wird ein PV/T Luftkollektor mit einem Doppelpass oberhalb des Absorbers gezeigt (Ibrahim et al., 2011).

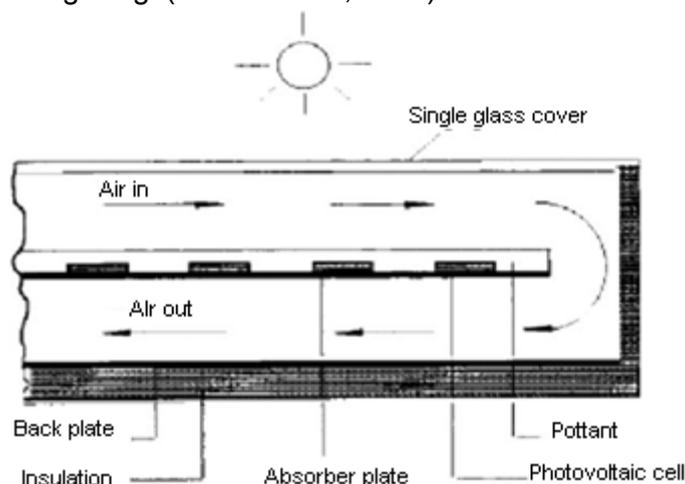


Abbildung 38: PV/T Luftkollektoren mit Doppelpass oberhalb des Absorbers. Quelle nach Ibrahim et al. (2011)

Die PV/T Wasserkollektoren werden ebenfalls nach ihrem Strömungsverlauf charakterisiert, während sich dieser meistens unterhalb des Solarthermiekollektors befindet. Die einfachste Form einen wasserbasierten PV/T Kollektor zu konzipieren ist das „sheet and tube“ Design, wobei der Absorber rund oder rechteckig sein kann (Ibrahim et al., 2011). Diese Variante des Designs erbringt nur 2 % weniger Leistung im Vergleich zu den anderen Typen. PV/T Hybride die auf Luft basieren sind in der Regel ineffizienter als die wassergeführten PV/T Varianten (Charalambous et al., 2007).

Die Kollektoren können, wie die Solarthermiekollektoren oder die Photovoltaik-Module, zusätzlich auf die Gebäudehülle aufgebracht werden oder innerhalb der Gebäudehülle integriert (BIPVT) werden. Im Artikel „Performance of a multifunctional PV/T hybrid solar window“ wird von Davidsson et al. (2010) ein Fenster entwickelt und evaluiert, welches sowohl zur Strom- und Wärmeproduktion, als auch zur passiven Gewinnung von Solarenergie dient und zusätzlich auch als Sonnenschutz verwendet werden kann. Das Solarfenster (Abbildung 39) besteht aus einem Solarthermie-Absorber, auf dem Photovoltaik-Zellen laminiert wurden. Dieser Absorber wurde in das Innere eines gebäudeintegrierten Standard-Fensters eingesetzt. Dadurch konnten Rahmen und Verglasungen eingespart werden, was sich positiv auf die Gesamtkosten des Baus auswirkt. Um weitere Kosten zu sparen wurden die Photovoltaik-Zellenflächen so klein wie möglich gehalten. Deshalb wurden hinter den Absorbern Reflektoren platziert. Werden diese Reflektoren in eine vertikale Position gerichtet, so fokussiert sich die Solarstrahlung auf den PV/T Absorber, wodurch der Ertrag der Photovoltaik-Zellen gesteigert wird. Daneben werden thermische Verluste durch das Fenster vermieden und die Reflektoren stehen als Sonnenschutz zur Verfügung. Bei der horizontalen Ausrichtung gelangen die Sonnenstrahlen in das Gebäude und tragen passiv zur Raumheizung bei. Während der Sommermonate geht ein großer Teil der solaren Strahlen direkt auf den Absorber mit einem geringen Beitrag aus dem Reflektor. Dann kann der Reflektor teilweise geöffnet werden und das Fenster liefert Wärme, Strom und Licht. Dies stellt wahrscheinlich die ideale Nutzung der Sonnenenergie über das Solarfenster dar. Ein großer Nachteil des Solar-Fensters sind die hohen Wärmeverluste aufgrund der großen Fläche.

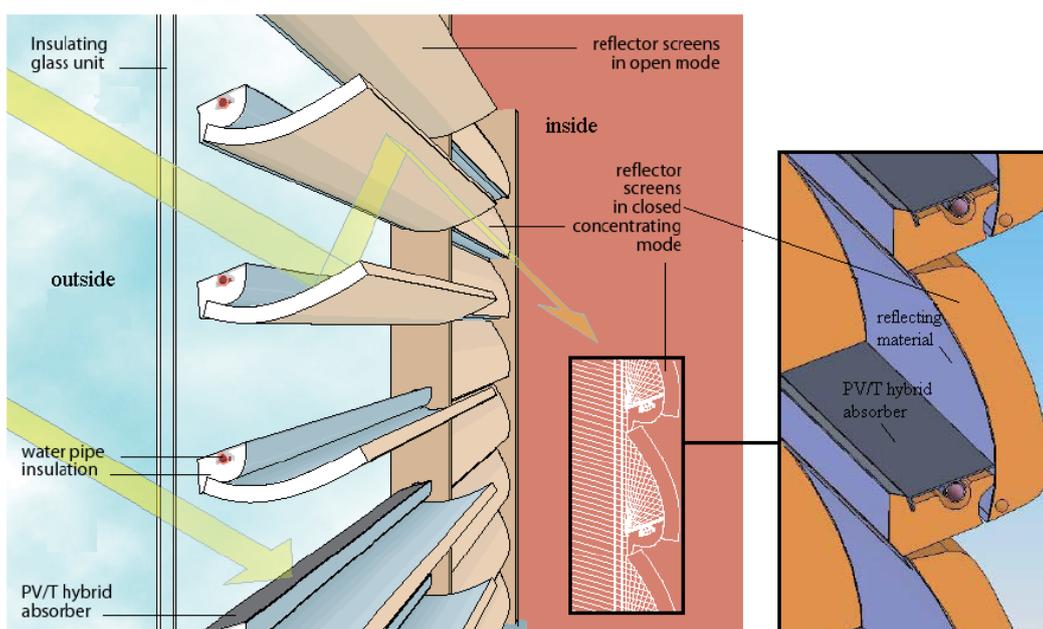


Abbildung 39: Darstellung des PV/T Hybrid Solarfensters. Quelle nach Davidsson (2010)

Die simulierten jährlichen Erträge der elektrischen Energie zeigen deutlich, wie wichtig es ist, die diffusen Strahlungen zu nutzen. Über 40 % der elektrischen Energie, die das Fenster erzeugte, wurde durch diffuse Strahlung produziert. Weiters erzeugt das Solar-Fenster etwa 35 % mehr elektrische Energie pro Flächeneinheit von Photovoltaik-Zellen als ein Photovoltaik-Modul, welches auf einer Wand in einer 90° Neigung befestigt ist. Die Simulation zeigt ebenfalls, dass das Solar-Fenster mehr Wärme pro Absorberfläche als ein Flachkollektor auf dem Dach mit einer Neigung von 20°, produziert (Davidsson et al., 2010).

In der wissenschaftlichen Arbeit „System analysis of a PV/T hybrid solar window“ von Henrik Davidsson wird erwähnt, dass bei Platzmangel, das Solar-Fenster eine interessante Alternative für Hochhäuser wäre. Steht ausreichend Platz zur Verfügung, sodass die Systeme am Dach montiert werden können, sollte diese Variante bevorzugt werden, da die am Dach installierten Systeme um 17 % mehr elektrische Energie produzieren als das Solar-Fenster (Davidsson, 2010).

Dem Artikel zufolge könnte mittels des Solarfensters insgesamt 8.3 m² Solarkollektoren und 5.4 m² Photovoltaik-Module ersetzt werden. Das Solar-Fenster erfordert weniger Solarzellen-, Absorber- und Glasflächen als die herkömmlichen Systeme, wodurch die Materialkosten geringer sind. Die vollständigen Kosten für die Installation sind jedoch schwer abzuschätzen, da das getestete Solar-Fenster ein früher Prototyp ist (Davidsson et al., 2010).

Gemäß Davidsson (2012) wurde der Prototyp in Lund von einem Architekten entwickelt. Zurzeit befindet sich kein Solar-Fenster am Markt, denn die Analysen haben gezeigt, dass viele Faktoren die Leistung des Solar-Fensters beeinflussen. Wird dieselbe Menge an Solarmodulen und –kollektoren am Dach montiert, erzielen diese einen höheren Output als das Solar-Fenster. Zudem kann die Solarstrahlung bei dem Solar-Fenster entweder als aktive Solarenergie für das Hybridsystem genutzt werden oder als passive Energie um den Raum zu erwärmen. Erfolgt die Installation am Dach, so können die Photonen der Sonnenstrahlung zur aktiven Energiegewinnung über das Hybridsystem sowie zur passiven Energiegewinnung durch die Fenster genutzt werden.

6.3.3 Thermische und elektrische Effizienz

Wird die elektrische und thermische Leistungen der PV/T Hybride gegenüber konventionellen Solarmodulen und –kollektoren im Einzelnen betrachtet, so ist zu erkennen, dass die elektrische Leistung der PV/T geringer als die der herkömmlichen Photovoltaik-Module ist. Nach Kalogirou und Tripanagnostopoulos (2007) handelt es sich zirka um 25 %. Genauso weisen PV/T-Systeme gegenüber den konventionellen Solarkollektoren niedrigere thermische Leistungen auf. Setzt man jedoch ein konventionelles Photovoltaik-Modul neben einem herkömmlichen Solarkollektor und vergleicht den Output mit zwei PV/T-Systemen, so ist zu erkennen, dass die PV/T-Hybride mehr Energie pro Flächeneinheit produzieren. Dieser Vorteil ist vor allem für Anwendungen, bei begrenzten Flächen, von großer Bedeutung (Charalambous et al., 2007).

Nach Charalambous et al. (2007) wirken sich folgende Parameter auf die Effizienz von PV/T Kollektoren aus:

- Wärmeübertragungsmedium
- Massenstrom der Luft oder des Wassers
- Anzahl der Verglasungen
- Absorbertyp
- Design-Parameter wie Rohrabstand, -durchmesser und -dicke

Thermische Effizienz

Wie schon bereits erwähnt, ist die thermische Effizienz eines PV/T Kollektors geringer als die eines konventionellen Kollektors. Während der herkömmliche Solarkollektor bis zu 95 % der Sonnenstrahlen absorbiert, ist der PV/T-Absorber im Bereich von 75-85 % limitiert. Um eine gute thermische Effizienz zu erzielen, werden eine gute solare Absorption und ein hervorragender Wärmetransfer benötigt. Verglaste PV/T Kollektoren besitzen eine höhere thermische Leistungen als unverglaste Systeme. Jedoch beeinträchtigt die Verglasung die elektrische Effizienz aufgrund der zusätzlichen Reflexion der Sonnenstrahlen (Zondag, 2008).

Nach Zondag (2008) liegt die Reduzierung der thermischen Effizienz vier Effekten zu Grunde:

- Der Absorptionsfaktor der Photovoltaik-Oberfläche ist geringer als die eines konventionellen Solarkollektors
- Die Photovoltaik-Oberfläche ist spektral nicht selektiv, welche zu großen thermischen Strahlungsverlusten führt
- Erhöhte Wärmeresistenz zwischen der Absorberfläche und dem Wärmeträgermedium führt zu höheren Temperaturen der Photovoltaik-Paneele, wodurch die elektrische Leistung verringert wird und zusätzliche Wärmeverluste erzeugt werden
- Die Energie, welche in elektrische Energie umgewandelt wird, kann nicht in thermische Energie umgewandelt werden, wodurch der thermische Energie-Output reduziert wird

Des Weiteren weisen PV/T Luftkollektoren gegenüber den wasserbasierten PV/T Systemen einen geringeren thermischen Wirkungsgrad auf, weil:

- Luft zirka eine 24-fache geringere thermische Leitfähigkeit als Wasser besitzt
- Luft eine geringere Wärmekapazität aufzeigt

Elektrische Effizienz

Nach Kalogirou und Tripanagnostopoulos (2007) hängt die elektrische Effizienz der PV/T Hybride von den verwendeten Photovoltaik-Zellen ab. PV/T Systeme mit kristallinen Photovoltaik-Zellen besitzen im Vergleich zu amorphen Siliziumzellen eine höhere elektrische Ausbeute. Die Leitung wird durch Kühlung, welche aufgrund des Solarthermiekollektors stattfindet, gesteigert. Ein hoher Output an Strom ist bei PV/T Hybriden das Ziel, wodurch sie eher für Anwendungen mit niedrigeren Temperaturen eingesetzt werden sollten, um den elektrischen Wirkungsgrad zu maximieren.

Bei verglasten PV/T Modulen kommt es auch wegen der Verglasung zu zusätzlichen Reflexionen von Sonnenstrahlen, wodurch die Effizienz verringert wird. Außerdem kann die Verglasung zum Auftreten von Schatten führen, so wie dies bei konventionellen Solarkollektoren der Fall ist. Die thermische Leistung wird dadurch nicht signifikant

beeinflusst, jedoch bewirkt die Verschattung eine starke Reduktion der elektrischen Effizienz (Zondag, 2008). Unverglaste PV/T Kollektoren weisen somit die höchste gesamte elektrische Energie auf (Charalambous et al., 2007).

6.3.4 Für die Schulsanierung wichtige Kriterien

Es konnten während der Literaturrecherche keine besonderen Angaben zu den Planungskriterien gefunden werden, jedoch kann angenommen werden, dass die Regeln der Photovoltaik und der Solarthermie gelten, aufgrund der Kombination beider Systeme. Siehe die zuvor im Kapitel '3.1 und 3.2' für die Sanierung beschriebenen Kriterien der Systeme Photovoltaik und Solarthermie.

6.3.5 PV/T – Systeme, Markt und Zukunftsaussichten

Die PV/T-Systeme können in verschiedenen industriellen Bereichen angewandt werden, aber am besten eignen sie sich für Anwendungen mit mittleren (60-80 °C) und vor allem mit niedrigeren (< 50 °C) Temperaturen. In diesen Fällen können sowohl der elektrische und der thermischen Wirkungsgrad des PV/T-Systems auf einem akzeptablen Niveau gehalten werden. Der Wärmebedarf ist in Bereichen mit niedrigen Temperaturen insbesondere in der Lebensmittel-, Wein-, Bier- und Getränkeindustrie sowie in der Papier- und Textilindustrie hoch. Hier könnten PV/T-Systeme bis zu 80 % des gesamten thermischen Energiebedarfs decken (Kalogirou und Tripanagnostopoulos, 2007).

In nördlichen Ländern mit tief stehender Sonne und kaltem Klima werden PV/T Hybride vor allem für die Raumerwärmung genutzt, während in südlichen Gebieten sie vor allem zur Erwärmung von Brauchwasser dienen (Charalambous et al., 2007).

PV/T Hybride sind zum Teil schon im Einsatz. In Österreich befinden sich zwei unverglaste PV-Luft Hybride von Grammer KG auf dem „OKA-Haus der Zukunft“. Bei dem PV/T-Luft Projekt Erlach wurden PV/T Luftkollektoren auf einer Schule installiert, die mittels eines Luft-Wasser-Wärmetauschers das Brauchwasser für die Duschen der Turnhalle und des Hausmeisters vorheizt. Dieses System wurde 1996 erbaut und produziert 14,5 kW_{el} und 29 kW_{th} Energie. Die Kombination von gebäudeintegrierter Photovoltaik mit Heißwasser sind nur für Systemgrößen über 15 kW_{el} geeignet, während kleinere Systeme die heiße Luft direkt zur Heizung und Lüftung nutzen sollten (Zondag, 2008).

Eine geringe Anzahl von Systemen ist bereits am Markt erhältlich. PV/T Luftkollektoren wurden ab und an bei Bauprojekten installiert (Sörensen und Munro, o.J.). PV/T Konzentratoren sowie verglaste und unverglaste PV/T Wasserkollektoren sind kommerziell erhältlich, werden aber nicht in großen Mengen produziert. Die zwei deutschen Firmen SolarWeak und SolarWatt oder die kanadische Firma Conserval Engineering Inc. sind zum Beispiel im Besitz von PV/T Hybriden (Sörensen und Munro, o.J.). Auch unter der Seite www.solardoc.at können Hybridkollektoren erworben werden (SolarDoc, 2010). Die Universität für Bodenkultur (Arbeitsgruppe Ressourcenorientiertes Bauen) leitet zurzeit ein Forschungsprojekt namens „Plus-Hybrid“. In diesem Projekt kommen unterschiedliche Haustechnik-Komponenten zum Einsatz wie zum Beispiel ein Hybridkollektor, der Firma

SolarDoc. Mit der gewonnenen Energie der hybriden Photovoltaik-Anlage soll der Strombedarf der Wärmepumpe gedeckt werden und die im Sommer produzierten Überschüsse sollen für die umliegenden Siedlungen dienen (Djalili, 2012).

Das größte Marktpotential besitzt der PV/T Wasserkollektor für Brauchwassererwärmung, eventuell auch in Kombination zur Unterstützung der Raumheizung. In der PVT-Roadmap werden Wasser-Heizsysteme für Wohnungen als wichtigster Markt für verglaste PV/T-Systeme angegeben, während die öffentlichen Pool-Systeme und große Warmwasseranlagen (für Campingplätze, Krankenhäuser, Altenheime, etc.) als interessante Nischenmärkte angeführt werden.

Es ist sehr wichtig, dass in dieser Branche weiterhin geforscht wird und zahlreiche Projekte durchgeführt werden. Dadurch können wichtige Erfahrungen gesammelt werden, um die Leistung, Lebensdauer und Zuverlässigkeit der PV/T-Systeme weiter zu entwickeln. Entwicklungen von Standards im Bezug auf die Zuverlässigkeit und die Effizienz der Hybride, sowie die Gewinnung des Vertrauens der Öffentlichkeit müssen noch erfolgen. Nähere Informationen über die Probleme und Barrieren der Systeme werden in der PV-Roadmap dargestellt. Weitere Details zu PV/T Systemen sind auf folgender Homepage – www.pv-t.org – zu finden, welche im Rahmen des derzeit laufenden IEA SHC Task 35 aktualisiert wird (Zondag, 2008).

6.4 Lüftung

6.4.1 Lüftungen in Schulen

Heutzutage kann aufgrund der dichten Gebäudehülle der hygienische Luftwechsel über eine natürliche Belüftung nicht mehr stattfinden. Daher besteht die Notwendigkeit, eine mechanische, kontrollierte Wohnraumlüftung einzusetzen, welche entweder eine konstante Menge an Frischluft zur Verfügung stellt oder bedarfsabhängig über z.B. Luftqualitätsfühler (CO_2 , Feuchte, ...) die Luftmenge automatisch regelt (Amann et al., 20110).

Zahlreiche Studien weisen auf eine mangelnde Luftqualität in Schulen hin. Vor allem im Winter tritt dieser Fall auf, weil zum einen die Klassen mit einer hohen Anzahl an SchülerInnen belegt sind und zum anderen aufgrund der geringen Außentemperaturen die Fenster häufig geschlossen bleiben. Gerade in Schulgebäuden ist eine gute Luftqualität erforderlich, weil Kinder auf Innenraumlüftbelastungen empfindlicher reagieren und sie einen Großteil ihres Lebens in diesen Gebäuden verbringen. Nebenbei tragen erhöhte CO_2 -Werte zur Verminderung der Leistungs- und Konzentrationsfähigkeit bei (Kah, et al., 2010). Im Sommer wirkt eine Nachtkühlung hohen Temperaturen entgegen. Diese kann über mechanische Klappen, Lüftungsfenster mit feststehenden Lamellen oder mit Hilfe der Lüftungsanlage erfolgen (Xia, 2011b).

In Abbildung 40 werden österreichische Schulen verschiedener Typen und Kindergärten aufgezeigt, die im Jahr 2007 bereits eine zentrale oder dezentrale Lüftungsanlage aufweisen konnten.

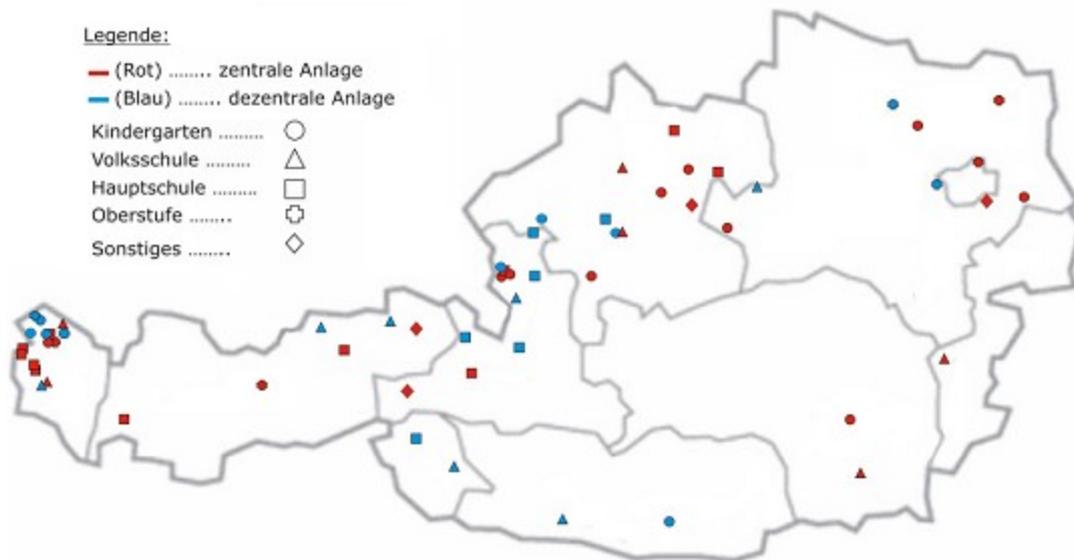


Abbildung 40: Schulen und Kindergärten mit Lüftungsanlagen in Österreich; Stand: 2007.
Quelle gemäß Greml et al. (2008)

6.4.2 Grundlagen

Gemäß Greml et al. (2008) kann grundsätzlich zwischen natürlicher und mechanischer Lüftung unterschieden werden, siehe Abbildung 41. Die natürliche Lüftung oder freie Lüftung entsteht durch natürliche Druck- oder Temperaturunterschiede. Ein Beispiel für eine natürliche Lüftung ist die Raumlüftung über Fenster. In Bildungsgebäuden kann mit Hilfe der Fensterlüftung keine ausreichende Raumlüftungsqualität bei gleichzeitiger Energieeffizienz erzielt werden. Mit einer kontrollierten Lüftungsanlage (mechanischen Lüftung) kann in Schulen eine gute Raumlüftungsqualität geschaffen werden. Für einen effizienten Betrieb solch einer Anlage werden hohe Wärmerückgewinne, energieeffiziente Ventilatoren und eine optimierte Regelung benötigt. Eine Liste von zertifizierten Zentralgeräten befinden sich auf der Passivhaus Institut Homepage www.passiv.de unter dem Punkt „Zertifizierung“.

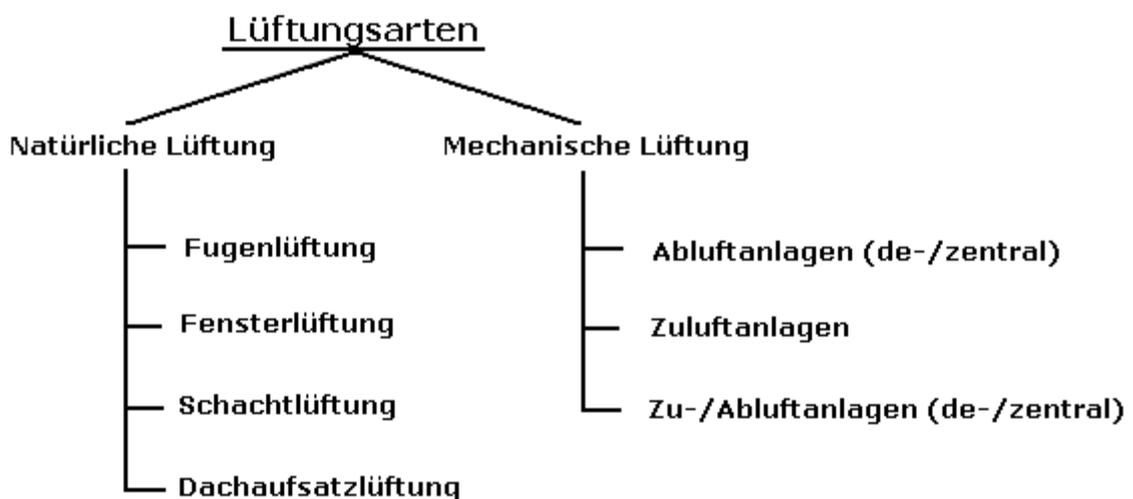


Abbildung 41: Gliederung der Lüftungsarten. Quelle verändert nach Greml et al. (2008)

Bevor die kontrollierte Lüftung genauer betrachtet wird, sollte noch erwähnt werden, dass zwischen zwei Lüftungsprinzipien unterschieden werden kann. Die Art, nach welchem Prinzip gelüftet wird, Verdrängungs- oder Mischlüftung, ist ein ebenso wichtiger Parameter, der für die Auslegung der Lüftungsanlage entscheidend ist. Deshalb erfolgt laut Greml et al. (2008) eine kurze Beschreibung der zwei Lüftungsarten.

Verdrängungslüftung

Bei dieser Variante strömt die Luft auf der einen Seite großflächig in den Raum ein, wird auf der anderen Seite des Raumes wieder abgeführt und verdrängt somit die schlechte Raumlufte, wobei eine Vermischung der Raumlufte mit der Frischluft unerwünscht ist. Die Quelllüftung ist eine Sonderform der Verdrängungslüftung. Die Frischluftausbringung erfolgt hier in der Nähe des Bodens. Da die Temperatur der Frischluft um ein bis zwei Kelvin unter der Raumlufte liegen muss, entstehen oft sogenannte „Frischlufteeen“. Somit können kalte Füße und ein Unbehaglichkeitsgefühl entstehen. Die schlechte Luft wird nach oben verdrängt und im Deckenbereich abgeführt.

„Bei Komfortanwendungen soll die Austrittsgeschwindigkeit aus Quellluftdurchlässen 0,2 m/s nach RHEVA-Guidebook 1 nicht überschreiten. Die Austrittsgeschwindigkeit ist von der zulässigen Luftgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich zu unterscheiden. Um das Zugluftrisiko im Aufenthaltsbereich zu beschränken sind max. 0,13 m/s bei 20°C Raumtemperatur nach ÖNORM EN 13779:2008 als Standardwert für 15 % Zugluftrisiko zulässig.“ (Greml et al., 2008)

Vorteile einer Verdrängungslüftung

- verbesserte Luftqualität in der Aufenthaltszone, da schlechte Luft verdrängt und nicht verdünnt wird
- geringe Luftgeschwindigkeiten und Turbulenzen tragen zur besseren Behaglichkeit bei
- geringere Geräuschentwicklungen aufgrund der geringen Luftgeschwindigkeiten
- geänderte Luftvolumenströme wirken sich nicht auf die Art der Lufteinbringung aus (vgl. mit der Induktion: Wurfweite nimmt mit dem Luftvolumenstrom ab)
- eignet sich für hohe spezifische Volumenströme
- gut geeignet für hohe Räume aus energetischer Sicht
- hohe Lüftungswirksamkeit

Nachteile einer Verdrängungslüftung

- Bildung von Frischluftseen, welche zur Unbehaglichkeit („Kalte Füße“) der NutzerInnen führt
- große Flächen für den Zuluftaustritt notwendig und Gefahr von Zugluft bei nicht geeigneten Durchlässen

Verdünnungslüftung (Mischlüftung)

Diese Art der Lüftung ist eine der ältesten und wird am häufigsten angewendet. Für eine gute Durchmischung wird die Zuluft mit höheren Geschwindigkeiten über einzelne Luftstrahlen in den Raum eingebracht. Dabei wird die Raumlufte mit der frischen Luft verdünnt und abgeführt. Bei der Auslegung muss die Anzahl und Anordnung der Luftauslässe, sowie auf den Volumenstrom geachtet werden, um die Anforderungen der thermischen Behaglichkeit, der Luftqualität und der Luftgeschwindigkeit erzielen zu können.

Vorteile einer Verdünnungslüftung

- geringere Investitionskosten
- Vielfalt der Anordnung von Zu- /Abluftauslässe

Nachteile einer Verdünnungslüftung

- schlechte Raumluft wird mit der frischen Luft verdünnt. Dadurch verteilen sich Emissionen und Partikel und führen somit zu einer geringeren Luftqualität im Aufenthaltsbereich

6.4.3 Technologie und Produkt Screening

Für kontrollierte Lüftungsanlagen von Klassenzimmern stehen drei Konzeptmöglichkeiten zur Verfügung:

- Klassenzimmerlüftung über **zentrale Lüftungsanlage** für das gesamte Gebäude oder für Gebäudeabschnitte
- Klassenzimmerlüftung über **semizentrale Lüftungsanlage** für das gesamte Gebäude oder für Gebäudeabschnitte
- Klassenzimmerlüftung über **dezentrale Lüftungsanlagen** in jedem einzelnen Klassenzimmer

zentrale Lüftungsanlagen

Zentrale Systeme werden oft im Neubau eingesetzt, weil der Haustechnikraum und das Lüftungsverteilstück noch in die Planung einbezogen werden können (Kah, et al., 2010). Die Außenluft wird über eine zentrale Ansaugstelle in den Technikraum geführt, wo sie im Lüftungsgerät, je nach Anforderungen des Nutzers aufbereitet (gefiltert, erwärmt, befeuchtet oder gekühlt) wird. Diese Zuluft wird anschließend über das Kanalnetz in den Zuluftträumen, wie Klassenräume, verteilt. Danach wird die verbrauchte Luft, je nach Prinzip, entweder direkt aus dem Raum abgeführt oder mit Hilfe von Überströmöffnungen in Flure bzw. Aufenthaltsbereiche, die niedrigere Anforderungen an die Luftqualität stellen, geleitet. Als nächstes wird die Luft in die Abluftträume, wie Sanitärbereiche, geführt, wo diese über den Abluftstrang an das zentrale Lüftungsgerät zurück befördert wird. Die Feuchte oder Wärme wird mittels Feuchte- bzw. Wärmerückgewinnung entzogen und an die Zuluft übergeben. Anschließend wird die Luft als Fortluft an die Umwelt abgegeben (Gremel et al., 2008). Die Geräteaufstellung kann z.B. im Keller oder am Dachboden erfolgen. Idealerweise sollte die Aufstellung innerhalb der thermischen Gebäudehülle stattfinden, andernfalls sind spezielle Geräte (sogenannte wetterfeste Geräte) zu verwenden. Auf möglichst kurze Leitungslängen ist zu achten. Für Wartung und Reparatur genügt der Zutritt zu den betreffenden Technikräumen, welcher unabhängig von der Anwesenheit der SchülerInnen erfolgen kann und nur befugtem Personal ermöglicht werden sollte (Amann et al., 2010).

Bei zentralen Lüftungskonzepten kann das Prinzip der gerichteten Durchströmung angewandt werden, siehe Abbildung 42. Dabei wird das Gebäude unterteilt in:

- **Zuluftbereiche** (Unterrichtsräume, Gruppenräume, Büros, etc)
- **Abluftbereiche** (Sanitärsbereiche, etc.)

Über Überströmungselementen stellt sich eine Strömung zwischen den Zuluft- und Abluftbereichen ein, wobei Flure, Pausenhallen, usw. als Überströmungszonen dienen. Aufgrund der Doppelnutzung der Luft kann der benötigte Gesamtvolumenstrom reduziert werden. Die Gesamtluftmenge mit gerichteter Durchströmung kann bei Schulnutzung bis zu 35 % verringert werden. In Schulsporthallen kann die Gesamtluftmenge sogar halbiert werden. Brand- und Schallschutzanforderungen können diese Variante in Bildungsgebäuden jedoch erschweren (Kah, et al., 2010).

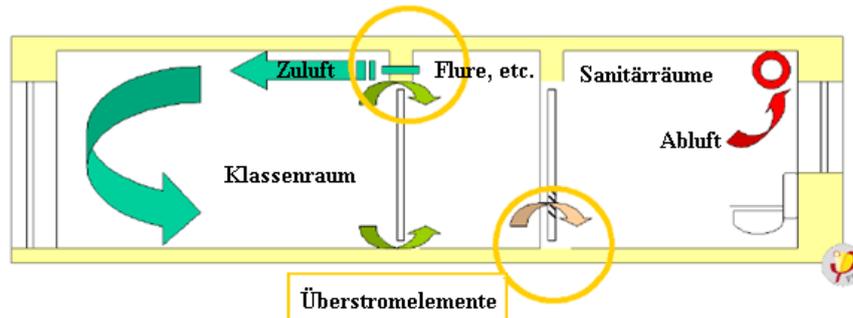


Abbildung 42: Prinzip der gerichteten Durchströmung. Quelle nach Kah, et al. (2010).

Nach Kah et al. (2010) und Greml et al. (2008) ergeben sich folgende Vor- und Nachteile bei einem zentralen Lüftungskonzept.

Vorteile der zentralen Lüftung

- Position für Luftansaugung und –auslass frei wählbar → Ansaugung kann mit guter Luftqualität erfolgen und Luftkurzschlüsse zwischen Außen- und Fortluft können vermieden werden
- geringe Anzahl der Anschlüsse für Außen- und Fortluft → geringere Wanddurchbrüche und Wärmebrücken
- eigener Haustechnikraum → besserer Schallschutz, Wartung und Filterwechsel können jederzeit ungestört durchgeführt werden, etc.
- weniger Einsatzkomponenten erforderlich → Lüftungsgeräte, Frostschutz, Wetterschutzgitter, etc.
- zentraler Luft- oder Sole-Erdwärmetauscher kann gut integriert werden; führt zur Steigerung der Außenlufttemperatur und Energieeinsparungen im Winter, sowie zur Reduktion der Außenlufttemperatur im Sommer (kein Wärmeeintrag über Lüftung)
- Prinzip der gerichteten Durchströmung kann angewandt werden → Doppelnutzung der Luft
- Integration einer nichtelektrischen Nachheizung der Zuluft auf Raumtemperatur möglich
- Einsatz höhere Filterklassen möglich → geringere Verschmutzung des Verteilsystems
- Einsatz einer zentralen Befeuchtung möglich
- geringer Energieaufwand für die Aufbereitung der Luft
- einfache zentrale Steuerung der gesamten Anlage
- Kondensatabfuhr wegen zentralem Technikraum gut möglich
- große Filterfläche ermöglichen eine hohe Filterstandzeit

Nachteile der zentralen Lüftung

- hoher Planungs-, Abstimmungs- und Ausführungsaufwand zur Integration der Lüftung vor allem im Bestand.
- hoher baulicher Aufwand (Platzbedarf für Verteilnetz und eigenen Technikraum)
- Verteilsystem: komplex und hoher Flächenbedarf, höhere Druckverluste wegen langen Leitungen, Formstücken und Einbauten wie Nachheizregister, Brandschutzklappen, etc.
- höhere Druckverluste führen zu höherem Stromverbrauch
- Brandschutzabschnitte berücksichtigen → hohe Anforderungen
- Gefahr der Geruchsbelästigung wegen Sanitärräume oder Küchen
- Nachtlüftung: wird das lange Leitungsnetz der Lüftung dafür genutzt so ist die Nachtlüftung wegen den Transmissionsverluste ineffizienter
- individuelle raumweise Steuerung ist nur mit hohem Aufwand möglich und wird daher in den meisten Fällen vernachlässigt; dazu ist erforderlich:
 - pro Raum einen Zu- und Abluftanschluss, sowie eine Steuereinrichtungen in den jeweiligen Zu- und Abluftsträngen
 - pro Raum einen CO₂-Fühler oder Anwesenheitssensor
- geringe Nutzerakzeptanz, weil die BenutzerInnen keine Möglichkeit besitzen in das System einzugreifen
- geringe Anlagensicherheit → bei Störungen fällt das ganze System aus
- Reinigung des Verteilnetzes ist aufwändig
- wird das System auch zur Heizung und Kühlung verwendet, so werden größere Oberflächen der Rohrleitungen des Verteilnetzes benötigt wodurch größere Verteilverluste entstehen

semizentrale Lüftungsanlagen

Es gibt eine zentrale Ansaugung für die Außenluft, welche in den zentralen Technikraum geführt und aufbereitet (gefiltert, entfeuchtet, gekühlt oder erwärmt) wird und anschließend im Gebäude zonenweise verteilt wird. Jede Zone besitzt dezentrale Lüftungsgeräte, sodass der benötigte Luftzustand pro Zone individuell geregelt werden kann. Die Ventilatoren des zentralen Lüftungsgerätes müssen einen Druckausgleich im Verteilsystem realisieren. Die verbrauchte Luft der jeweiligen Zonen wird über die dezentralen Geräte abgesaugt und dem zentralen Lüftungsgerät über den Abluftstrang zugeführt. Die Feuchte oder Wärme wird wieder mittels Feuchte- oder Wärmerückgewinnung der Abluft entzogen und an die Zuluft übertragen. Danach wird die Fortluft an einer geeigneten Stelle an die Umwelt abgegeben. Die Vor- und Nachteile des semizentralen Systems hängen von den Randbedingungen ab, je nachdem ob die Auslegung der Anlage eher dem zentralen oder dem dezentralen Prinzip entspricht (Gremel et al, 2008).

dezentrale Lüftungsanlagen

Bei Bestandsgebäuden werden eher dezentrale Systeme verwendet, da sie leichter zu integrieren sind. Der geringere Platzbedarf für das Luftkanalnetz und die Tatsache, dass kein Haustechnikraum beansprucht wird, sind klare Vorteile. Die kleinen Geräte können im Aufenthaltsraum entweder in Schrankelementen, an der Decke hängend oder hinter einer Vorwandinstallation aufgestellt werden. Wichtig ist, dass der Schallpegel der Geräte nicht zu laut ist. Nach Klima et al. (2006) darf der Schallpegel im Klassenraum nicht mehr als 25 dB(A) betragen. Dezentrale Geräte können auch auf die vorhandenen Brandabschnitte gut angepasst werden (Kah, et al., 2010). Gemäß Gremel et al. (2008) wird die Außenluft über eine dezentrale Ansaugstelle zum dezentralen Gerät geleitet, welches sich außerhalb oder

innerhalb des zu belüfteten Raumes aufhalten kann. Im Gerät wird die Zuluft aufbereitet (erwärmt, gekühlt, be-/entfeuchtet) und in den Raum abgegeben. Die Abluft wird an einer geeigneten Stelle des gleichen Raumes angesaugt und dem dezentralen Gerät zugeführt. Die Feuchte oder Wärme wird wieder mittels Feuchte- oder Wärmerückgewinnung der Abluft entzogen und an die Zuluft übertragen. Die Fortluft wird an einer geeigneten Stelle an die Umwelt abgegeben. Wegen des Brandschutz oder der Geruchsbelästigungsübertragung werden Flur- und Sanitärbereiche in die Luftführung mit integriert. Für Wartung und Reparatur ist der Zutritt zu den betreffenden Räumen immer zu gewährleisten. Das wiederum führt zu einem erhöhten Wartungsaufwand (Amann et al., 2010).

Häufige Varianten dezentraler Lüftungsanlagen (Greml et al., 2008):

- Lüftungsgerät in der Klasse mit Zu- und Abluftdurchlass direkt am Gerät
- Lüftungsgerät in der Klasse mit Zuluftverteilung oder Abluftleitungen in der Klasse
- Lüftungsgerät außerhalb der Klasse

Nach Klima et al. (2006), Kah, et al. (2010) und Greml et al. (2008) ergeben sich folgende Vor- und Nachteile bei einem zentralen Lüftungskonzept.

Vorteile dezentraler Lüftungsanlagen

- geringe Investitionskosten
- geringer Planungsaufwand, einfache Integration und Installation
- Anlagen benötigen wenig Flächenbedarf
- einfache und individuelle Steuerung der NutzerInnen möglich
- hohe Anlagensicherheit → bei Störung fällt nicht die gesamte Anlage aus
- geringe Anforderungen an den Brandschutz
- kurzes Verteilsystem, einfache Druckverhältnisse, geringere Druckverluste → geringerer Strombedarf
- leichte Reinigung des Verteilsystems möglich

Nachteile dezentraler Lüftungsanlagen

- Außenluftansaugung und Fortluftaustrag nur bedingt frei wählbar
- Luftansaugung abhängig von der Fassadenausrichtung → Außenluft kann schlechte Qualität aufweisen, wenn sich zum Beispiel in der Nähe dicht befahrenen Straßen befinden
- Luftkurzschlüsse zwischen Außen- und Fortluft können bei einer Fassadenintegration leicht entstehen
- Eingriff in die Fassade → Wanddurchbrüche führen zu Wärmebrücken, gute Isolierung notwendig
- Gang-/Erschließungsflächen können nicht immer mit eingebunden werden
- Wartung und Service: hoher Aufwand, Räume müssen betreten werden → kann daher in den Schulen nur außerhalb der Unterrichtszeit erfolgen
- Filterklassen⁸ max. F5/F6
- geringe Filterflächen fordern kürzere Filterstandzeiten
- um den Schallpegel niedrig zu halten, ist eine aufwändige Schalldämmung erforderlich
- Integration eines Sole- oder Luft-Erdwärmetauschers ist aufwendig

⁸ Es wird zwischen Grobfiltern und Feinfiltern unterschieden. Grobfilter besitzen die Bezeichnungen G1-G4 und Feinfilter sind in der Stufe F5-F9 zu erhalten. Quelle nach Greml et al. (2008)

In Abbildung 43 sind die drei Lüftungskonzepte dargestellt, links befindet sich eine zentrale Anlage, in der Mitte das semizentrale Konzept und rechts das System als dezentrale Variante.

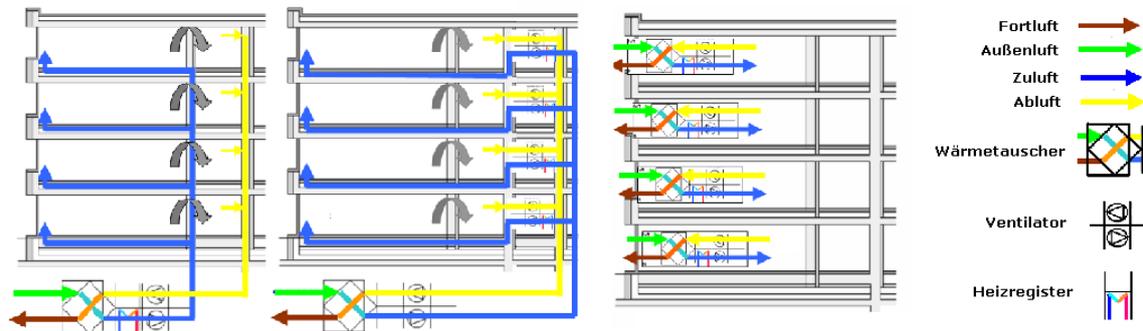


Abbildung 43: Lüftungskonzept eines zentralen (links), semizentralen (Mitte) und dezentralen (rechts) Anlagensystems. Die Legende befindet sich neben der dezentralen Anlage.
Quelle gemäß GremI et al. (2008)

Beispiele für unterschiedliche Lüftungskonzepte

In Baidersdorf wurde in einer Grundschule ein dezentrales Lüftungskonzept installiert. Hinter einer Vorwand sind jeweils ein Lüftungsgerät für zwei nebeneinander liegende Unterrichtsräume untergebracht. In Abbildung 44 wird das Konzept dargestellt. Der blaue Pfeil gibt die Ansaugstelle der Außenluft an und die grünen Leitungen und Pfeile stellen das Verteilnetz der Zuluft und die Auslässe dar. Die Abluftansaugung erfolgt bei den gelben Pfeilen und wird als Fortluft, oranger Pfeil, an die Umwelt abgegeben.



Abbildung 44: Darstellung eines dezentralen Lüftungskonzepts.
Quelle nach Kah, et al. (2010).

Ein weiteres dezentrales Gerät wird in der Abbildung 45 gezeigt. Das Lüftungssystem „LiLu“ beinhaltet ein integriertes Gerät im Fensterrahmen mit Wärmerückgewinnung, Filter und Schalldämpfer. Die Außenluft wird oben angesaugt und tritt über den oberen Teil des Fensters ein. Im unteren Teil des Fensters erfolgt die Abluftansaugung und die Fortluftausbringung. Bei diesem System könnte es zu einem Kurzschluss von Außen- und Fortluft kommen, da die Ansaugung oberhalb des Austritts der schlechten Luft erfolgt.

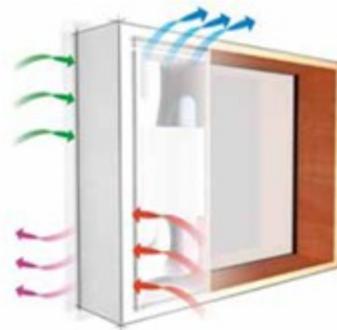


Abbildung 45: Lüftungssystem „LiLu“. Quelle nach Kah, et al. (2010)

Das Prinzip der gerichteten Strömung wird zum Beispiel in der Kindertagesstätte in Schwanheim angewandt. Neben- und Gruppenraum dienen als Zuluftbereiche. Die Luft wird mittels Überströmungselementen in den Sanitärraum geführt, wo die verbrauchte Luft dann ins Freie abgegeben wird (Abbildung 46).

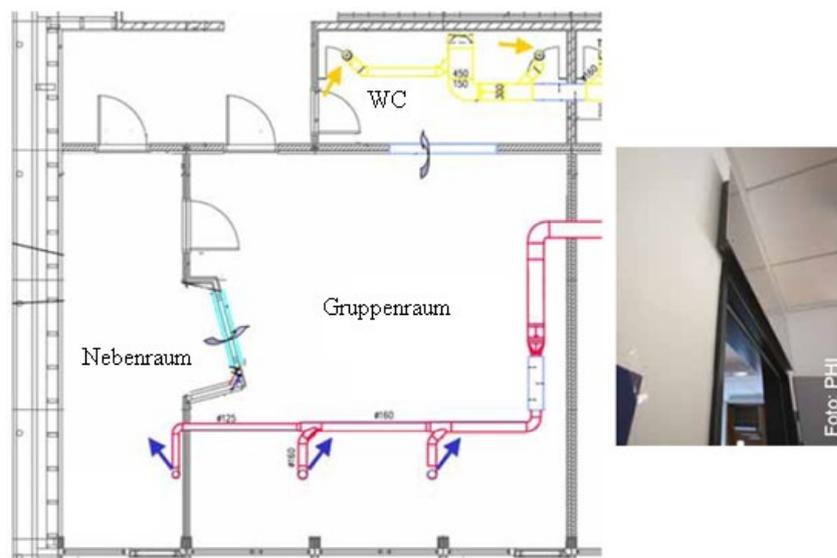


Abbildung 46: Prinzip der gerichteten Durchströmung angewandt in der Kindertagesstätte Schwanheim (links) und ein Überströmungselement (rechts). Quelle nach Kah et al. (2010)

In Abbildung 47 wird eine Nachtkühlung über Öffnungsklappen einer Schule, mit Passivgebäude-Niveau, dargestellt. Die Klappen der Klassenräume, der Dachlaterne⁹ und die Türen werden in der Nacht geöffnet, damit die Luft von den Aufenthaltsräumen über das zentrale Treppenhaus strömt. Aufgrund des Höhenunterschiedes der Klappen wird der natürliche Auftrieb durch den thermischen Auftrieb verstärkt.

⁹ Eine Dachlaterne ist ein turmartiger Ausbau auf einem Dach. Bei einer Lüftung wird die Abluft nach draußen befördert. Quelle: <http://www.baumarkt.de/lexikon/Dachlaterne.htm>/(12.01.2012)



Abbildung 47: natürliche Nachtlüftung mit Hilfe von Klappen
Quelle gemäß Kah, et al. (2010)

Wichtige Parameter von zentralen und dezentralen Anlagen

In der Tabelle 24 sind ein paar wichtige Angaben verschiedener Recherchen (Klima et al. (2006), Greml et al. (2008)) von dezentralen und zentralen Systemen aufgelistet.

Tabelle 24: Parametergegenüberstellung von dezentralen und zentralen Lüftungsanlagen

Parameter	Zentrale Lüftung	Dezentrale Lüftung	Literaturangabe
Luftqualität	gut	gut	Klima et al. (2006)
	gut bis sehr gut	gut bis sehr gut	Greml et al (2008)
th. Komfort (im Winter)	gut bis sehr gut	gut bis sehr gut	Greml et al (2008)
th. Komfort (im Sommer)	mittel bis sehr gut	mittel bis sehr gut	Greml et al (2008)
Heizenergiebedarf	15-50 kWh/m ² a	15-50 kWh/m ² a	Greml et al (2008)
Stromverbrauch	3,5-12 kWh/m ² a	2,5-9 kWh/m ² a	Greml et al (2008)
Planungsaufwand	hoch	mittel bis hoch	Greml et al (2008)
Herstellerekosten	100-150 €/m ² 80-140 €/m ²	90-170 €/m ² 90-170 €/m ²	Klima et al. (2006) Greml et al (2008)

In Abbildung 48 werden die Kosten den im Verhältnis zu Behaglichkeit/Individualität der unterschiedlichen Systeme dargestellt.

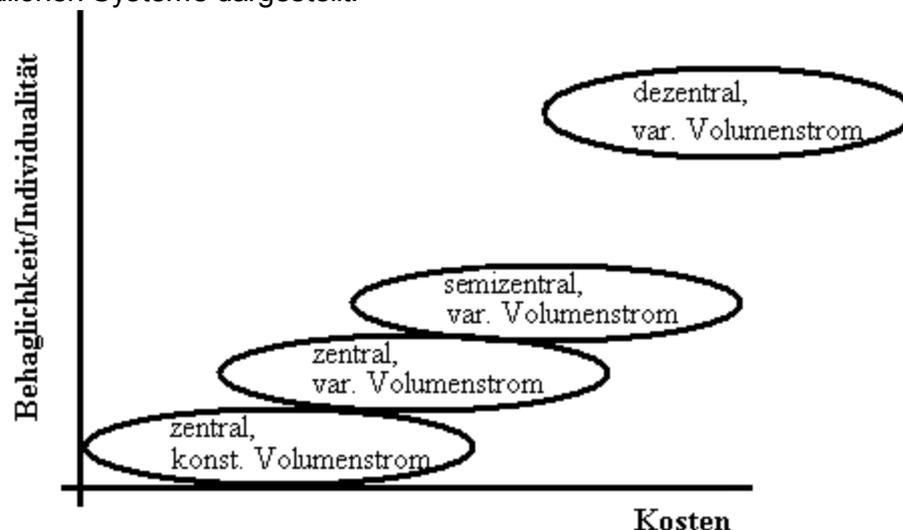


Abbildung 48: Darstellung der Kosten im Verhältnis zu Behaglichkeit/Individualität.
konst.=konstant, var.=variabler. Quelle nach Amann et al. (2010)

6.4.4 Für die Schulsanierung wichtige Kriterien

Strom- und Wärmebedarf

Bei der Sanierung zur Plusenergieschule soll der Energiebedarf so stark wie möglich reduziert werden. Damit Lüftungsanlagen betrieben werden können, benötigen die Ventilatoren Antriebsleistung. Der Bedarf an Strom steigt mit der dritten Potenz des Druckverlustes. Daher müssen Einflussgrößen wie lange Kanäle, Kanalkreuzungen und hohe Strömungsgeschwindigkeiten vermieden werden, damit der Druckverlust so gering wie möglich gehalten wird. Mit Hilfe einer Wärmerückgewinnung lässt sich Wärme aus der Abluft entziehen, die dann für die Aufbereitung der Außenluft dienen kann. Somit kann auch der Bedarf an Wärme verringert werden. Anlagen mit höheren Wärmerückgewinnen weisen aber auch höhere Druckverluste auf. Deshalb ist zu beachten, dass Geräte mit höherer Wärmerückgewinnung nur verwendet werden dürfen, wenn die Gesamteffizienz inklusive Strombedarf gesteigert wird.

Nachtkühlung und Bypass

Im Sommer kann es zu einer Überwärmung des Gebäudes kommen, aufgrund der dichten Gebäudehülle nach der Sanierung und der Massiv-Bauelementen, welche als gute Wärmespeicher fungieren. Um eine angenehme Behaglichkeit der Raumtemperatur für die BenutzerInnen zu schaffen, muss die überschüssige Wärme abtransportiert werden. Dies kann zum Beispiel durch eine Kühlung der Räume erreicht werden, allerdings steigt dabei der Energiebedarf. Andere Möglichkeiten um die Wärmelasten abzutragen wären Bypässe und Nachtlüftungen. In den Sommermonaten ist während des Raumlüftungswechsels durch die kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung ein Eintrag von warmer Luft unerwünscht. Dies kann entweder durch einen Bypass umgangen werden oder durch Verwendung von geeigneten Wärmetauschern wie Rotationswärmetauscher, bei denen die Wärmerückgewinnung reguliert werden kann. In der Nacht kann das Gebäude über eine Nachtlüftung gekühlt werden. Die Nachtlüftung kann mit Hilfe der Lüftungsanlage mit Bypass ausgeführt werden oder über eine Fensterlüftung, mit zum Beispiel motorischen Klappen, die sich ab einer bestimmten Zeit öffnen. Weiters sind geeignete Maßnahmen zum Schutz vor Insekten, Einbruch und Regen erforderlich.

Platzbedarf

Bei der Sanierung muss im Lüftungskonzept der benötigte Platzbedarf für die Anlage berücksichtigt werden, da die Räume bereits bestehen. Eine zentrale Anlage benötigt einen eigenen Raum, indem das zentrale Gerät aufgestellt wird. Daher muss beachtet werden, ob im Bestand ein Raum zur Verfügung steht, der als Haustechnikraum dienen kann. Außerdem werden geeignete Leitungen benötigt, um die Zu- und Abluft zu transportieren. Die Integration eines entsprechenden Verteilnetzes in ein bestehendes Gebäude einzufügen ist aufgrund von Brandschutzkonzepten, etc. erschwert, weshalb oft dezentrale Geräte bei einer Sanierung zum Einsatz kommen. Bei den dezentralen Anlagen müssen die Raumhöhen der Klassen berücksichtigt werden und ob an der Decke oder an der Wand genug Platz vorhanden ist, um die dezentralen Anlagen direkt integrieren zu können.

Brandschutzkonzept

Da der Schulbestand schon ein Brandschutzkonzept aufweist muss dieses unbedingt bei der Planung der Lüftungsanlage berücksichtigt werden. Besonders im Anlagenkonzept mit einer zentralen Anlage, weil die Luftleitungen in alle be- und entlüftenden Räume führen müssen.

Sicherheitsklappen in den Rohrleitungen sind erforderlich, um das Ausbreiten von Feuer und den entstehenden Emissionen zu verhindern.

Luftkurzschlüsse

Luftkurzschlüsse entstehen, wenn die Öffnungen für die Luftansaugung und des Fortauslasses nicht weit genug voneinander entfernt sind. Bei zentralen Anlagen spielt dies in den meisten Fällen keine Rolle, da die Öffnungen nicht nebeneinander liegen. Bei dezentralen Systemen können Luftkurzschlüsse leichter entstehen, daher muss darauf geachtet werden, dass geeignete Systeme verwendet werden, bei denen die Öffnungen nicht zu dicht beieinander liegen. Wichtig ist auch, dass der Austrag der Fortluft nicht direkt unter der Außenluftansaugung liegt, damit die schlechte Abluft nicht wieder in das Gebäude eingetragen wird. Dieses Kriterium ist insbesondere bei Sanierungen zu beachten, weil vorwiegend dezentrale Anlagen zur Verwendung kommen, da sie in den Bestand leichter zu integrieren sind.

6.5 Wärmepumpe

6.5.1 Grundlagen

Eine weitere wichtige alternative Technologie, die zur Wärmebereitstellung für Heizung und Warmwasser dient, ist die Wärmepumpe, welche regenerative Umgebungswärme diverser Wärmequellen nutzt. Als natürliche Wärmequellen stehen Wasser (Grundwasser oder Oberflächenwasser), Erdreich und Luft (Außenluft, Abluft, etc.) zur Verfügung.

Wird die Wärmepumpe mit konventionellen Heizungsanlagen verglichen, so ist ersichtlich, dass sie eine geringere Primärenergie aufweist, aufgrund der Nutzung der frei zur Verfügung stehenden Umgebungswärme. Diese Einsparungen liegen beim momentanen Stand der Technik bei zirka 30-45 % im Vergleich zum Ölkessel und gegenüber dem Gasbrennwertkessel 20-35 %. Weiterhin werden CO₂-Emissionen reduziert, da keine fossilen Brennstoffe im Bereich Raumheizung und Warmwasserbereitung verwendet werden (Huber et al., 2006).

Für die Warmwasserbereitung sollten eigene Warmwasser-Wärmepumpen (Brauchwasser-Wärmepumpen, Wärmepumpenboiler, Abluft-Wärmepumpen) eingesetzt werden, weil Heizungs-Wärmepumpen mit einem niedrigeren Temperaturhub arbeiten als Warmwasser-Wärmepumpen. Wird nun eine Heizungs-Wärmepumpe verwendet um Warmwasser bereitzustellen, so müssen diese mit einer größeren Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und –senke arbeiten, was zur Verringerung ihrer Leistungszahl führt. Die Wärmepumpe kann in umgekehrter Weise betrieben werden und kann anstatt das Gebäude zu beheizen auch kühlen.

Je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle (Umwelt) und Wärmesenke (Wärmenutzungsanlage) ist, umso effektiver läuft die Wärmepumpe. Daraus folgt, dass sie weniger Strom benötigt und deshalb ist die Verwendung von Niedertemperatur-Heizsystemen ein Vorteil (Ochsner, 2009).

In Abbildung 49 erfolgt gemäß Ochsner (2009) die Darstellung der wichtigsten Anlagenteile der Wärmepumpanlage und der Vorgang des Heizens. Bei der Wärmepumpe wird zwischen dem Kompressions-, Absorptions- und Adsorptionsprinzip unterschieden, wobei die Kompressionswärmepumpe mit Abstand am weitesten verbreitet ist (Quaschnig, 2011).

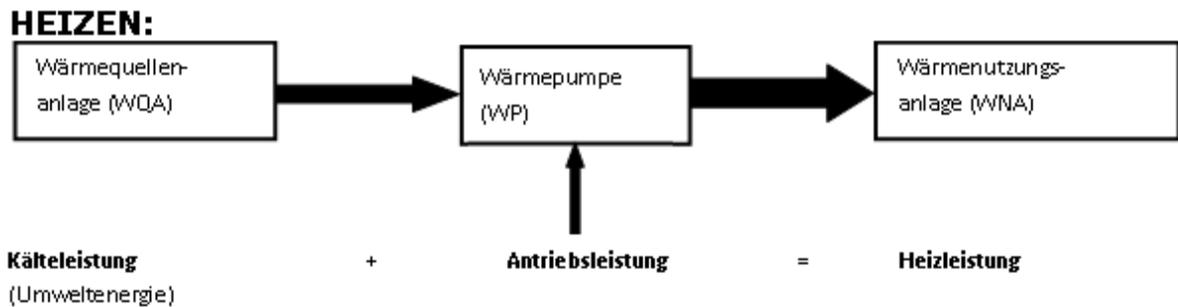


Abbildung 49: Vorgang zur Erbringung der Heizleistung. Quelle gemäß Ochsner (2009)

Steht Grundwasser als Wärmequelle zur Verfügung, dann sollte sich diesem bedient werden, auch wenn eine Genehmigung erforderlich ist. Ist das nicht der Fall sollte das Erdreich und zu guter Letzt die Luft verwendet werden (Ochsner, 2009).

Nach Ochsner (2009), Hartmann und Schwarzburger (2009) können Wärmepumpen auf verschiedenste Arten betrieben werden, siehe Tabelle 25.

Tabelle 25: unterschiedliche Betriebsweisen der Wärmepumpe. Quelle gemäß Ochsner (2009), Hartmann und Schwarzburger (2009)

Betriebsweise	Erläuterung
Monovalent	Die Wärmepumpe dient als alleiniger Wärmeerzeuger für den Bedarf an Wärme. Diese deckt den Wärmebedarf zu 100 %.
Bivalent alternativ	Bei dieser Betriebsweise wird der zweite Wärmeerzeuger zur Deckung der Heizlast eingeschaltet, wenn die Wärmepumpe für den Bedarf nicht mehr alleine aufkommen kann. Die Wärmepumpe wird ausgeschaltet und der zweite Wärmeerzeuger ist alleine für den Betrieb verantwortlich. Je tiefer der Zuschaltzeitpunkt des zweiten Wärmeerzeugers ist, desto effizienter arbeitet die Wärmepumpe, da sie mit einem höheren Anteil an der Jahresheizarbeit mitwirkt.
Bivalent parallel	Der zweite Wärmeerzeuger arbeitet parallel zur Wärmepumpe. Dieser wird ebenfalls eingeschaltet, wenn die Wärmepumpe die Heizlast nicht mehr alleine decken kann.
Monoenergetisch	Bivalente parallele Betriebsweise, wobei ein Heizstab als zweiter Wärmeerzeuger fungiert.

Wichtige Kenngrößen, die über die Effizienz der Wärmepumpe Auskunft geben, sind die Leistungszahl ϵ , der Coefficient of Performance (COP) und die Jahresarbeitszahl.

Die **Leistungszahl ϵ** gibt das Verhältnis von abgegebener Heizleistung zur aufgenommenen elektrischen Antriebsleistung bei einem bestimmten Betriebspunkt an und ist somit ein Momentanwert. Eine Leistungszahl von vier bedeutet daher, dass die nutzbare Wärmeleistung das Vierfache der eingesetzten elektrischen Antriebsenergie ist (Ochsner, 2009). Bei Wasser/Wasser- oder Sole/Wasser-Wärmepumpen wird die elektrische Leistungsaufnahme der Heizungsumwälzpumpe und der Förderpumpe auf der Quellenseite nicht einbezogen. Die Antriebsleistung der Ventilatoren von Luft/Wasser-Wärmepumpen wird berücksichtigt, jedoch nicht die Leistung die für das Abtauen des Verdampfers benötigt wird (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 2006).

Der **Coefficient of Performance** ist ein Gütekriterium der Wärmepumpe und ebenfalls nur für einen bestimmten Betriebspunkt zutreffend. Er ist aussagekräftiger als die Leistungszahl, da die Hilfsenergie in die Berechnung mit einbezogen wird. Auch hier werden die elektrischen Leitungsaufnahmen der Heizungsumwälzpumpe und der Förderpumpe auf der Quellenseite nicht berücksichtigt, da diese je nach Standort variieren.

Je niedriger die Temperaturdifferenz von Wärmequelle und Heizsystem ist, umso höher ist der COP und die Leistungszahl ϵ .

Das hat zur Folge, dass hohe Temperaturen der Wärmequelle und geringe Vorlauftemperaturen einen höheren COP und somit eine bessere Energieeffizienz aufweisen (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 2006). Als Faustformel können folgende Werte angenommen werden:

**Sinkt die Temperatur der Wärmesenke um 1 Kelvin,
so steigt der COP um rund 2,5 %.**

**Steigt die Temperatur der Wärmequelle um 1 Kelvin an,
so steigt der COP ungefähr um 3 %.**

Die **Jahresarbeitszahl β** gibt eine Aussage über die Effizienz während des ganzen Jahres wieder und ist somit die entscheidende Kenngröße für die wirtschaftliche Betrachtung der Wärmepumpe (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 2006). Sie entspricht der tatsächlichen Leistungszahl während des Betriebes (Hartmann und Schwarzburger, 2009).

**Gute Wärmepumpanlagen müssen daher
hohe Jahresarbeitszahlen besitzen.**

Sehr gute Systeme, wie Wasser-Systeme, erzielen Jahresarbeitszahlen von über vier. Luft-Systeme hingegen können Jahresarbeitszahlen unter drei aufweisen, wegen der niedrigen Außenlufttemperaturen. Daher sind wenn möglich Wasser-Systeme vorzuziehen (Quaschnig, 2011).

6.5.2 Technologie und Produkt Screening

Je nach Wärmeträger der Wärmequellenseite und der Wärmenutzungsanlage werden die Wärmepumpen eingeteilt in:

- **Luft/Wasser-Wärmepumpe**
- **Wasser/Wasser-Wärmepumpe**
- **Sole/Wasser-Wärmepumpe**
- **Luft/Luft-Wärmepumpe**

Bei der Bezeichnung der Wärmepumpe steht das Wärmeträgermedium auf der Verdampferseite (Wärmequelle) immer am Anfang und danach folgt das Wärmeträgermedium auf der Verflüssigerseite (Wärmenutzungsanlage). Darauf folgend

werden die unterschiedlichen Bautypen nach ihrer Wärmequelle genauer betrachtet und ihre jeweiligen Planungskriterien werden aufgezeigt.

Wärmequelle Wasser

Umweltenergie kann nicht nur aus der Erde oder der Luft entnommen werden sondern auch aus Wasser, daher eignen sich Grundwasser, Oberflächengewässer oder Kühlwasser für den Einsatz von Wärmepumpen. Das Grundwasser besitzt neben den anderen Wärmequellen die höchste Leistungszahl, weil über das ganze Jahr hindurch eine fast konstante Temperatur zwischen 8-12 °C vorherrscht. Aufgrund dessen muss das Temperaturniveau nur gering angehoben werden und sollte daher wenn möglich den anderen Wärmequellen vorgezogen werden (Ochsner, 2009). Auf jeden Fall ist zu beachten, dass eine behördliche Bewilligung notwendig ist, da ein Eingriff in das Grundwasser erfolgt. Des Weiteren ist die Wasserqualität eine Voraussetzung für die Nutzung des Grundwassers und daher sollte im Voraus unbedingt eine Wasseranalyse stattfinden. Die Anlage darf nicht durch Kalk oder anderen Inhaltsstoffen geschädigt werden, weil dies hohe Kosten verursacht (Hartmann und Schwarzburger, 2009). Um Verockerungen und Korrosionsschäden zu vermeiden darf die Wassertemperatur nicht unter 8 °C fallen und die Leitfähigkeit des Wassers muss unter 450 mikro-Siemens pro cm sein. Die Verockerung wird durch Lufteinbringung begünstigt, daher kommt in solchen Fällen eine Taucherpumpe zum Einsatz. Auch Verschlämmungen und Versickerungen sind unerwünscht. Die Wasserqualität kann sich beispielsweise aufgrund von Dünger im Lauf der Zeit ändern. Die Brunnenbohrung sollte von einer qualifizierten Firma erfolgen, da bei nicht fachgerechter Errichtung des Brunnens oder zu klein dimensionierten Brunnen die Gefahr der Versandung besteht (Ochsner, 2009). Die Wasser/Wasser-Wärmepumpe unterscheidet sich kaum von der Sole/Wasser-Wärmepumpe, sie ist jedoch meistens ein offenes System während die Sole/Wasser-Wärmepumpe ein geschlossenes System ist (Hartmann und Schwarzburger, 2009 und Ochsner, 2009). Die Anlage besteht aus einem Förderbrunnen, wobei das Grundwasser nicht tiefer als 15 m liegen sollte. Mittels einer Tauchpumpe wird das Wasser vom Grund herauf befördert, anschließend passiert es die Wärmepumpe und zuletzt wird das 3-4 °C kühlere Wasser in den Schluckbrunnen befördert. Der Brunnendurchmesser muss wegen der Tauchpumpe mindestens 220 mm breit sein. In einem feinen Gebirge ist jedoch der Durchmesser größer auszulegen, damit Sand nicht mit befördert wird. Wichtig ist, dass der Schluckbrunnen in Richtung des Grundwasserstroms vom Förderbrunnen ca. 10-15 m entfernt ist (Ochsner, 2009), weil ansonsten durch einen Kurzschluss der wasserführenden Schichten das gekühlte Wasser des Schluckbrunnens den Verdampfer einfrieren lässt (Hartmann und Schwarzburger, 2009). Die Verbindungsleitungen sind frostgeschützt mit dem Gefälle des Brunnens zu verlegen und Leitungen, die Grundwasser führen, müssen gegen Schwitzwasser gut isoliert sein. Die Fließgeschwindigkeit des Wassers sollte nicht größer als 0,8 m/s sein. Die Heizungs-Wärmepumpe sollte sich in einem trockenen und frostgeschützten Raum auf einem ebenen und waagrechten Stand platziert werden, wobei die Errichtung eines freischwebenden Sockels empfohlen wird (Ochsner, 2009).

Wärmequelle Erdreich

Das Erdreich verfügt das ganze Jahr hindurch über eine relativ konstante Temperatur und die Wärmepumpen mit der Wärmequelle „Erdreich“ erzielen nach der Wärmequelle „Wasser“ die zweithöchste Jahresarbeitszahl (Ochsner, 2009). In einer Tiefe von 20-30 cm befindet sich die neutrale Zone. Oberhalb dieser Zone erfolgt die Regeneration des Bodens über Sonnenenergie, welche im Boden gesammelt und gespeichert wird. Auch die

Niederschlagsmenge spielt dabei eine wichtige Rolle. Unterhalb dieser Zone findet die Regeneration mit Hilfe des Wärmeflusses im Inneren der Erde statt. Daher darf keine Bebauung sondern nur eine Begrünung der Absorberfläche bei der Verwendung von Flachkollektoren erfolgen. Im Gegensatz dazu gibt es Erdwärmesonden, wo eine Bebauung der Fläche keine Rolle spielt (Hartmann und Schwarzburger, 2009 und Ochsner, 2009). Die Größe der Wärmequellenanlage ist abhängig von der Wärmepumpe (Typ, Leistungszahl) und der spezifischen Wärmeentzugsleistung des Erdreiches, welche gemäß Richtlinie VDI 4640 in den Tabellen 25 und 26 für Erdwärmekollektoren und Erdwärmesonden bei Betriebsleistungen der Wärmepumpen von 1.800 h und 2.400 h pro Jahr dargestellt wird. Je höher der Feuchtgehalt der Böden ist, umso besser ist die Wärmeleitung und desto höher ist die Entzugsleistung. Daher benötigen feuchte Böden kleinere Flächen um denselben Wärmeentzug wie trockene Böden sicherzustellen (Ochsner, 2009). Weiterhin ist zu beachten, dem Boden nur so viel Wärme zu entziehen, wie er wiedergewinnen kann (Hartmann und Schwarzburger, 2009).

Tabelle 26: max. spezifische Entzugsleistung von **Erdwärmekollektoren**. Quelle gemäß VDI (2001)

Bodenbeschaffenheit	max. spez. Entzugsleistung in W/m^2	
	Wärmepumpenbetrieb	Wärmepumpenbetrieb
	1.800 h pro Jahr	2.400 h pro Jahr
Trockener, nicht bindiger Boden	10	8
Bindiger Boden, feucht	20-30	16-24
Wassergesättigter Sand/Kies	40	32

Tabelle 27: max. spezifische Entzugsleistung von **Erdwärmesonden**. Quelle gemäß VDI (2001)

Bodenbeschaffenheit	max. spez. Entzugsleistung in W/m^2	
	Wärmepumpenbetrieb	Wärmepumpenbetrieb
	1.800 h pro Jahr	2.400 h pro Jahr
Schlechter Untergrund (trockenes Sediment) ($\lambda < 1,5 W/mK$)	25	20
Normaler Festgesteins-Untergrund und wassergesättigtes Sediment ($\lambda = 1,5-3,0 W/mK$)	60	50
Festgestein mit hoher Leitfähigkeit ($\lambda > 3,0 W/mK$)	84	70

Um dem Erdreich die Wärme entziehen zu können werden unterschiedliche Methoden angewandt. Zum Beispiel können Flachkollektoren verlegt oder Erdwärmesonden eingesetzt werden. Auch Sonderformen wie Energiekörbe, Energiepfähle oder Grabenkollektoren können zum Einsatz kommen (ÖWAV, 2009, Hartmann und Schwarzburger, 2009, Ochsner, 2009). In diesem Teil der Arbeit wird jedoch nur auf die Flachkollektoren und Erdwärmesonden genauer eingegangen.

Flachkollektoren

Häufig werden sie auch als Erdwärmekollektoren bezeichnet und bestehen entweder aus Kunststoffrohren oder aus Kupferrohren mit Kunststoffmantel (ÖWAV, 2009) um Beschädigungen durch mechanische Einwirkungen zu vermeiden (Ochsner, 2009). Bei der Verlegung von Flachkollektoren muss keine Genehmigung erfolgen, eine Anmeldung in Rahmen der Baugenehmigung ist ausreichend. Die nutzbare Wärme kann über Erdwärmekollektoren am Anfang der Heizperiode mit den höchsten Leistungen erbracht werden, jedoch sinkt diese zum Ende der Heizperiode, je nach Dimensionierung der Anlage. Fällt die Temperatur der Sole schon vor Ende der Heizperiode unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, dann wurde die Anlage zu klein dimensioniert (Ochsner, 2009).

Verlegung

Damit auch bei längeren Kälteperioden dem Erdreich genügend Wärme entzogen werden kann, sollte die Kollektorfläche ungefähr 1,5- bis 2-fach der beheizten Fläche betragen (Leven, Neubarth und Weber, 2001). Die Kollektoren werden unter der Erde in einer Tiefe von zirka 1,2-1,5 m horizontal verlegt (ÖWAV, 2009). Der Verlegeabstand der Kollektoren hängt von der benötigten Kollektorfläche und der Gesamtrohrenlänge ab. Ein grober Richtwert für bindige und feuchte Böden sind ungefähr 50 cm, während bei trockenen, sandigen und schottigen Böden der Mindestabstand etwa 80 cm betragen sollte. Auch auf ausreichende Abstände zum Gebäude oder angrenzenden Grundstücken ist acht zu geben. Hier sollte der Abstand etwa 1,5 m betragen. Versorgungsleitungen die ins Gebäude führen wie zum Beispiel der Anschluss für das Trinkwasser darf nicht mit den Kollektoren gekreuzt werden (Ochsner, 2009). Um eine optimale Wärmeübertragung zu gewährleisten, sollten die Flachkollektoren in Sand oder steinfreien Böden eingebettet werden. Steine oder Erdbrocken könnten Luft mit einschließen und die Übertragung von Wärme verringern (Hartmann und Schwarzburger, 2009). Erfolgt die Bettung mit Hilfe von wasserundurchlässigem Lehm, so muss eine Drainage gelegt werden (ÖWAV, 2009). Außerdem dürfen die Rohre nicht geknickt oder abgedrückt werden und etwa 50 cm oberhalb der Kollektoren sollten Warnbänder gelegt werden (Ochsner, 2009). Da der Boden ausgehoben wird, fallen große Erdmengen an, die währenddessen zwischengelagert werden müssen und viel Platz beanspruchen (Hartmann und Schwarzburger, 2009). Auch dies sollte beachtet werden. Um Beschädigungen vorzubeugen, sollten die Kollektoren nach den Herstellerangaben verlegt und gebettet werden (ÖWAV, 2009).

Erdwärmesonden

Erdwärmesonden sind Tiefensonden, welche flüssiges oder gasförmiges Wärmeträgermedium beinhalten können (ÖWAV, 2009). Hier ist zu beachten, dass um eine Genehmigung bei der Behörde angesucht werden muss. Es muss ein Nachweis der Planung und Positionierung der Erdwärmesonden, ein zu erwartendes Schichtprofil der Erde, Ausbauvorschläge sowie einen Nachweis zur Unbedenklichkeit wegen dem Verpressungsmaterial und des Glykols vorgelegt werden. Auch die Herstellerangaben und Erklärungen der Wärmepumpe müssen eingereicht werden. Wenn die Überprüfung der eben angeführten Bedingungen positiv abgeschlossen und der Bau genehmigt wird, steht es der Behörde frei auch während der Bauphase Überprüfungen durchzuführen. Zum Abschluss muss ein Bericht mit der Dokumentation des Baues vorgelegt werden. Die Bohrung darf nur von zertifizierten Firmen übernommen werden. Das D-A-CH-Gütesiegel belegt eine geprüfte Qualität für Erdsonden und stellt besondere Anforderungen an die Unternehmen (Hartmann und Schwarzburger, 2009).

Verlegung

Oft werden Doppel-U-Rohr-Sonden eingesetzt, die ebenfalls in Sand gebettet werden müssen. Nach der Bohrung des Loches und dem Einbau der Sonde muss so schnell wie möglich die wasserdichte Verpressung stattfinden, damit das Bohrloch nicht einstürzen kann (ÖWAV, 2009). Das Verpressmaterial wird zwischen Bohrloch und Sondenrohr verfüllt und ausgehärtet. Um während der Verfüllung Lufteinschlüsse zu vermeiden, wird das Verpressmaterial vom Sondenende nach oben eingetragen. Lufteinschlüsse würden die Wärmeübertragung hemmen. In der Mitte der Verfüllung befinden sich die beiden Solekreise der Erdwärmesonde. Dieser Wärmeübertragungszylinder muss einen Wechsel von Frost und Tau überstehen, da ansonsten die Dichtheit der Sondenverpressung beeinträchtigt wird. Die

Sonde könnte dadurch beschädigt werden und würde zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades führen (ÖWAV, 2009). Die Sonden dürfen nicht zu nahe beisammen liegen, weil sie sich ansonsten thermisch beeinflussen. Der Mindestabstand sollte 10 % der Sondenlänge betragen. Außerdem sollten die Sonden gleich lang sein, kann der Verteilerschacht zu den Sonden jedoch nicht zentral platziert werden, so muss die am weitesten entfernte Sonde die kürzeste Länge aufweisen und diejenige die am Nächsten liegt, die längste Sondenlänge besitzen. Pro Sonde ist ein Soleverteiler und Sammelanschluss notwendig (Hartmann und Schwarzburger, 2009). Die Bohrungen reichen oft zwischen 70–150 m in die Tiefe des Bodens. Ein Mindestabstand von zirka 2,5 m soll zur Grundstücksgrenze erzielt werden (ÖWAV, 2009).

Wärmequelle Luft

Die Varianten Luft/Wasser-Wärmepumpen und Luft/Luft-Wärmepumpen besitzen beide Luft als Wärmequelle. Vorteil dieser Bautypen ist, dass Außenluft eine unbegrenzt verfügbare Quelle ist und diese Anlagen ohne Genehmigungen genutzt werden können (Ochsner, 2009). Weiters entfallen Umwandlungsverluste, da die Luft nicht nur Wärmequelle sondern gleichzeitig auch Wärmeüberträger ist und daher die Wärme direkt zum Kältekreis übertragen wird (Hartmann und Schwarzburger, 2009). Nachteil der Wärmepumpe ist, dass die Heizleistung und die Leistungszahl mit fallender Außenlufttemperatur sinken, während der Gebäudewärmebedarf steigt. Luft/Wasser-Wärmepumpen, die eine integrierte Abtaueinrichtung aufweisen, funktionieren auch noch bei Temperaturen unter 15 °C ohne Probleme (Ochsner, 2009).

Bautyp Luft/Wasser-Wärmepumpe

Luft/Wasser-Wärmepumpen werden für die Warmwasserbereitung sowie für die Heizung verwendet. Als Heizungsgeräte werden sie oft in bivalenter Weise betrieben. Bei einer Außentemperatur kleiner als -5 °C schaltet sich ein zweiter Wärmeerzeuger hinzu. Der Einsatz eines Elektroheizstabes als weiterer Wärmeerzeuger ist die einfachste Möglichkeit, dieser sollte jedoch nur an sehr kalten Tagen in Betrieb genommen werden, da eine zu lange Verwendung des Elektroheizstabes aus energetischen und wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll ist.

Aufstellungsort

Grundsätzlich kann zwischen Kompakt- und Split-Anlagen unterschieden werden. Bei Kompaktanlagen befinden sich der Verdampfer und alle anderen Elemente der Wärmepumpe in einem Gerät. Dieses kann sowohl im Inneren des Gebäudes, als auch außerhalb aufgestellt werden. Die Außenluft wird über Luftkanäle zu- und abgeführt (Hartmann und Schwarzburger, 2009). Anders sieht es bei der Split-Variante aus. Hier befindet sich der Verdampfer im Freien, wodurch im Gebäude bei der Aufstellung des Gerätes an Platz gespart werden kann. Die Luftkanäle entfallen, weil die Verbindung des Verdampfers mit den restlichen Komponenten der Wärmepumpe über gedämmte Kälteleitungen durch die Gebäudemauer erfolgt. Die Dimensionierung und die Bauart des Verdampfers beeinträchtigen die Leistungszahlen der Wärmepumpe. Langsame und geräuscharme Ventilatoren sollten bei der Anlage verwendet werden. Durch den Einsatz von EC-Ventilatoren wird die Jahresarbeitszahl erhöht, womit die Anlage in Punkto Wirtschaftlichkeit effizienter wird (Ochsner, 2009).

Kompaktanlage Innenaufstellung

Als Kompaktgerät kann die Aufstellung innerhalb der Gebäudehülle erfolgen, somit ist das Gerät vor Wettereinflüssen geschützt. Das Gerät sollte sich in einem trockenen und vor Frost geschützten Raum auf einem ebenen und waagrechten Platz befinden. Die Vorrichtung einer Kondensatablauffasse mit Ablaufstutzen sowie einer Auffangmulde, welche an dem Kanalsystem angeschlossen ist, um das Kondensatwasser abzuführen, muss erzielt werden. Befindet sich die Anlage in einem Raum mit einer Feuerungsanlage und bezieht die Verbrennungsluft, so muss eine zusätzliche Lüftungsöffnung angebracht werden. Die Ansaugluft muss staubfrei sein und darf keine aggressiven Stoffe wie Chlor enthalten (Ochsner, 2009). Die Luftkanäle müssen gedämmt sein, um zum einen Wärmeverluste und zum anderen Schwitzwasser zu vermeiden. Auch auf die richtige Positionierung der Öffnungen der Ansaug- und der Ausblasleitung muss geachtet werden, um Kurzschlüsse zu vermeiden. Die Ansaugstelle sollte an einer ruhigen Stelle erfolgen, damit die gekühlte Luft ungehindert abblasen kann. Außerdem sollte die Ansaugstelle vor kaltem Wind geschützt werden (Hartmann und Schwarzbürger, 2009). Zudem dürfen Schallübertragungen von den Luftkanälen zur Wärmepumpe nicht stattfinden (Ochsner, 2009).

Kompaktanlage Außenaufstellung

Als Kompaktgerät kann die Aufstellung außerhalb der Gebäudehülle erfolgen und eignet sich somit für Neubau und Sanierungen, wenn Platzmangel herrscht. Das Gerät ist durch eine geeignete Hülle vor Wettereinflüssen zu schützen. Mittels Abtauvorrichtungen eignen sich die Anlagen sogar bis ca. -15 °C . Das Gerät sollte auf einem waagrechten Stand unter festem Fundament platziert werden. Ein Kondensatablauf ist dabei unerlässlich. Kondensatabläufe, die zirka 30-40 cm in das Erdreich dringen, sollten erzielt werden. Das Gerät kann in die Gartengestaltung integriert werden, solange die Stutzen der Luftzufuhr und des Auslasses frei liegen (Hartmann und Schwarzbürger, 2009). Um Störgeräusche durch einen ungeeigneten Aufstellungsort vorzubeugen, sollten die Hinweise der Hersteller beachtet werden (Ochsner, 2009). Die Steuerleitungen und der Vor- bzw. Rücklauf der Heizungsrohre werden unterirdisch verlegt. Die Heizungsrohre müssen unterhalb der Frostgrenze verlaufen und gut gedämmt sein. Auf eine dichte Mauerdurchführung der Leitungen ist zu achten (Hartmann und Schwarzbürger, 2009).

Split-Anlage

Der Verdampfer befindet sich außerhalb der Wärmepumpe, wodurch das Gerät auch in kleineren Räumen aufgestellt werden kann (Hartmann und Schwarzbürger, 2009). Die Wärmepumpe sollte in trockenen und frostgeschützten Räumen auf einer waagrechten und ebenen Fläche aufgestellt werden. Der Abstand zwischen Gerät und Mauer variiert, je nachdem, wie das Gerät zur Mauer gestellt wird. Ist das Gerät seitlich zur Mauer platziert, so sollte ein Mindestabstand von zirka 30 cm erfolgen, während der Abstand der Mauer zur Rückseite der Wärmepumpe mindestens 50 cm betragen sollte und mindestens 70 cm zur Vorderseite. Hierbei ist auf die Herstellerangaben zu achten (Ochsner, 2009). Die Aufstellung des Verdampfers kann flexibel außerhalb des Gebäudes durchgeführt werden, jedoch sollten die Kälteleitungen – Verbindung des Verdampfers mit der Wärmepumpe im Inneren des Gebäudes – nicht länger als 15 m sein, da ansonsten sehr viel Kältemittel gebraucht wird und sich die Wärmeverluste durch längere Leitungen erhöhen (Hartmann und Schwarzbürger, 2009). Des Weiteren sollten diese Leitungen gemäß Ochsner (2009) gedämmt sein und nach Hartmann und Schwarzbürger (2009) sollten diese in einer Bodentiefe von 30-40 cm verlegt werden. Abschließend ist eine Abtaueinrichtung

vorzusehen und ein frostsicherer Abfluss für das Kondensatwasser ist zu gewährleisten. Das Kondensatwasser sollte unterhalb des Verdampfers in das Erdreich geführt werden. Der Verdampfer sollte mit langsam laufenden und sehr leisen Ventilatoren ausgestattet sein (Ochsner, 2009). Auch der Schalldruckpegel ist zu beachten, die Werte der Normen sind einzuhalten. Wird der Verdampfer auf schallharte Böden (Asphalt, Beton, etc.) beziehungsweise zwischen zwei Wänden oder in einer Ecke errichtet, so steigt der Schallpegel. Gemäß Ochsner (2009) können Pflanzen oder bewachsene Flächen die Schallemissionen verringern, jedoch weist Hartmann und Schwarzburger (2009) darauf hin, dass Pflanzen und Sträucher den Luftdurchsatz reduzieren können. Nebenbei minimieren vollmodulierende Lüfter die Schallemissionen und erhöhen die Leistungszahlen (Ochsner, 2009).

Bautyp Abluft/Wasser-Wärmepumpe

Diese Anlage lässt sich gut mit einer kontrollierten Wohnraumlüftung kombinieren, da sie die warme Abluft als Wärmequelle nutzt. Mit der Abwärme kann die Wärme entweder zur Erwärmung der Frischluft, des Warmwassers oder für die Heizung genutzt werden. Der Volumenstrom wird durch die Lüftungsanlage vorgegeben und ist daher begrenzt und die Luftmengen sind nicht dauernd vorhanden. Ob daher die Anlage wirtschaftlich genutzt werden kann muss vorher gut überprüft werden.

Bautyp Luft/Luft-Wärmepumpe

Dieser Bautyp wird oft in Wohnungslüftungen von Passivhäusern eingesetzt. Die Wärmenutzungsanlage sowie die Wärmequellenanlage nutzen Luft und werden daher oft in Lüftungs- und Klimageräten integriert. Für die Bereitstellung von Warmwasser wird ein externer Wärmetauscher benötigt (Hartmann und Schwarzburger, 2009).

6.5.3 Für die Schulsanierung wichtige Kriterien

Auslegung der Wärmepumpe

Damit die Wärmepumpe die benötigte Wärme bereitstellen kann, muss als erstes der Wärmebedarf des Gebäudes bestimmt werden. Bei Sanierungen muss berücksichtigt werden, dass durch Sanierungsmaßnahmen, wie beispielsweise der Austausch von Fenstern und die Dämmung der Gebäudehülle, die Heizlast senken. Somit muss die Auslegung über den Wärmebedarf nach den baulichen Sanierungsmaßnahmen erfolgen.

Vorlauftemperaturen

Alte Gebäude weisen zum größten Teil Heizkörper mit hohen Vorlauftemperaturen auf, wodurch die Effizienz der Wärmepumpenanlage vermindert wird. Neben den Niedertemperatur-Wärmepumpen gibt es noch Geräte für mittlere und hohe Temperaturen. Der große Nachteil dieser Anlagen, im Gegensatz zu Niedertemperatur-Wärmepumpen, ist, dass pro erhöhtes Kelvin der Vorlauftemperatur der COP der Anlage um 2,5 % sinkt. Bei der Sanierung muss daher entschieden werden, ob eine Wärmepumpenanlage mit geringerer Effizienz zum Einsatz kommen soll, die Radiatoren im Bestand durch ein Niedertemperatursystem ausgetauscht werden sollen, oder ob der Heizwärmebedarf durch die baulichen Sanierungsmaßnahmen so stark verringert werden kann, dass die Wärmepumpe das vorhandene Heizungssystem ohne Probleme mit niedrigeren Temperaturen versorgen kann.

6.6 Solarthermie – Wärmepumpen Kombination

6.6.1 Grundlagen

Die erste Idee zu einer Kombination von Wärmepumpe mit Solarthermie liegt schon mehr als 50 Jahre zurück. In den letzten Jahren wurden vermehrt Systeme entwickelt, die mit Hilfe von Kombination der Solarthermie und Wärmepumpen Wärme für Warmwasser und Raumheizung bereitstellen. Manche Konzepte sind schon am Markt erhältlich und werden bereits in Serie produziert. Die Hersteller kommen meistens aus der Solarthermie oder Wärmepumpen Branche, wodurch verschiedene Systemlösungen konzipiert werden. Es kann sein, dass der Heizkessel eines konventionellen solarthermischen Kombisystems durch eine Wärmepumpe ersetzt wird oder die Solarthermie dazu genutzt wird, um die Arbeit der Wärmepumpe zu verbessern, indem sie thermodynamisch ungünstige Betriebspunkte der Wärmepumpe vermeidet. Weitere Ansätze, welche die bereits genannten Konzepte miteinander verbinden oder Ideen, in denen zum Beispiel die Solarwärme des Kollektors je nach Temperaturniveau direkt oder indirekt über den Verdampfer in das System eingespeist wird, sind schon in Entwicklung und werden untersucht. Je nach Konzept kann der Ertrag des Solarkollektors gesteigert werden, wodurch der Primärenergieverbrauch des Heizsystems reduziert werden kann, im Gegensatz zu herkömmlichen Systemen (Haller und Elimar, 2010). Wie sinnvoll diese verschiedenen Konzepte sind, ist bisher noch wenig untersucht. Im Rahmen des Task 44 des Solar Heating and Cooling Programm vor allem im Annex des Heat Pump Programmes der Internationalen Energieagentur werden Arbeiten durchgeführt die sich sowohl mit bereits existierenden als auch mit neuen Konzepten beschäftigen und Simulationswerkzeuge und Bewertungsansätze analysieren und entwickeln (Haller und Elimar, 2010).

6.6.2 Technologie und Produkt Screening

Zahlreiche Artikel, die sich diesem Thema widmen, sind längst vorhanden. Die meisten Systemkombinationen, welche in der Literatur beschrieben werden, bieten nicht die Möglichkeit an, die Wärme für teilsolarer Raumheizung und Warmwasser zu nutzen. Im Folgenden werden ein paar Literaturen angeführt, worin Wissenschaftler versuchen die Kombinationsmöglichkeiten einzuteilen.

Im Jahr 1979 unterteilte der Wissenschaftler Freeman die Systeme in *parallele*, *serielle* und *duale* Methoden ein. Im parallelen System deckt die Solarthermie den Wärmebedarf solange ab, bis die Temperatur nicht mehr ausreicht und die Wärmepumpe dann einspringt. Wird die Solarthermie grundsätzlich als Wärmequelle der Wärmepumpe eingesetzt, sodass die Solarwärme der Kollektoren kaum die Möglichkeit besitzen die Wärme direkt, also ohne Wärmepumpe, in das System einzuspeisen, dann handelt es sich um ein serielles Konzept. Bei dualen Systemen kommt neben der Solarthermie noch eine weitere Wärmequelle zum Einsatz.

Laut Haller et al. (2010) bezeichnet Trinkl Konzepte als *combined*, wenn die Solarwärme der Kollektoren für mehrere Wärmesenken verwendet wird, sprich die Wärme kann direkt genutzt werden oder für den Verdampfer der Wärmepumpe zur Verfügung stehen. Nach

Hepbasli und Kalinci verdampfen *Solar boosted heat pump water heaters* das Kältemittel der Wärmepumpe direkt im Solarabsorber (Haller et al., 2010).

Am Institut für Solartechnik SPF wurde ein Simulationsmodell mittels TRNSYS erstellt um Kombinationen von einer solarthermischen Anlage mit einer Luft-Wärmepumpe aufzuzeigen, welche Wärme für Raumheizung und Warmwasser bereitstellen sollen. Fünf Ansätze für die Kombination beider Systeme wurden gefunden. Diese sind:

- 1) Die Wärmepumpe und die Solaranlage arbeiten parallel und speichern beide in den Kombispeicher ein (Abbildung 50).

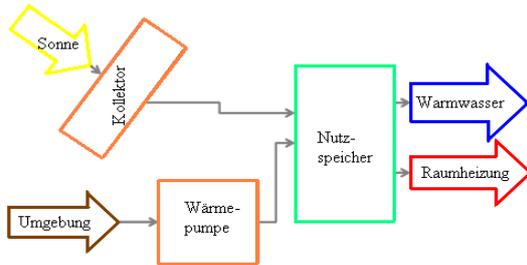


Abbildung 50: Wärmepumpe arbeitet parallel zur Solaranlage. Quelle nach Haller et al. (2010)

- 2) Die Kollektorstärke kann in den Speicher geleitet werden oder zur aktiven Erdreichregenerierung genutzt werden, siehe Abbildung 51.

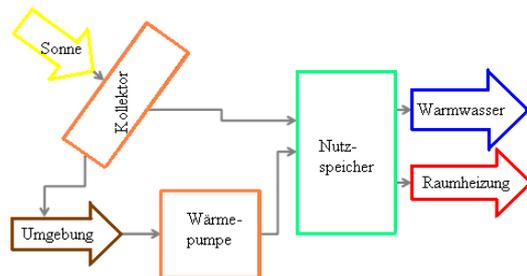


Abbildung 51: Kollektorstärke wird direkt in das System geleitet oder zur Regenerierung des Erdreiches verwendet. Quelle nach Haller et al. (2010)

- 3) In Abbildung 52 unterstützt die Kollektorstärke den Verdampfer der Wärmepumpe oder speichert die Wärme in den Kombispeicher ein.

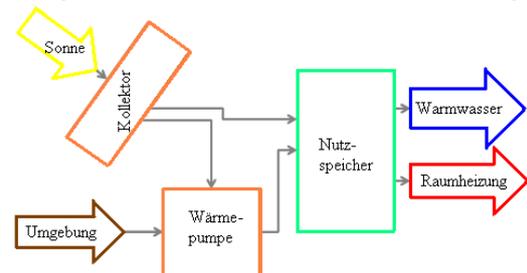


Abbildung 52: Direkte Einspeisung der Wärme oder Wärme wird zum Verdampfer der Wärmepumpe geleitet. Quelle nach Haller et al. (2010)

- 4) Der Kollektor speichert die Wärme in den Kombispeicher oder auf einem kälteseitigen Speicher ein (Abbildung 53).

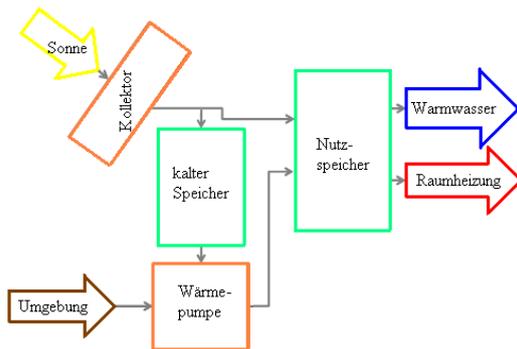


Abbildung 53: Kollektorwärme wird in den Kombispeicher oder in einen kälteseitigen Speicher geleitet. Quelle nach Haller et al. (2010)

- 5) Der Hybridkollektor ist die einzige Quelle für die Wärmepumpe und speichert auch Wärme direkt ins System ein, siehe Abbildung 54.

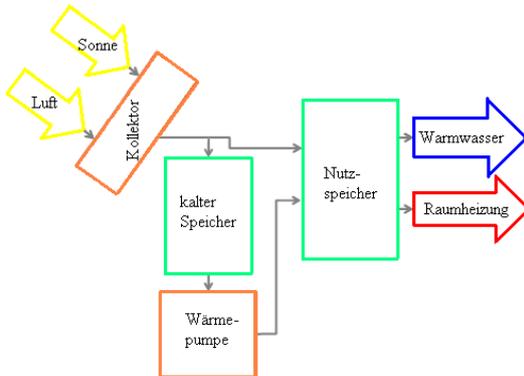


Abbildung 54: Hybridkollektor ist die einzige Wärmequelle. Die Wärme wird in den Kombispeicher oder in einen kalteseitigen Speicher geleitet. Quelle nach Haller et al. (2010)

Das System im Punkt 1, bei dem ein paralleler Betrieb von Wärmepumpe und Solaranlage stattfindet, wird in der Praxis von vielen Herstellern angeboten. Das Konzept im zweiten Punkt mit der aktiven Regeneration des Erdreiches wird ebenfalls bereits untersucht und umgesetzt. Hierbei wird diskutiert, ob dieses Modell sinnvoll ist, da die Regeneration in den Sommermonaten betrieben wird, obwohl die maximale Wärmeentnahme erst einige Monate später erfolgt. Die Variante im Punkt 3 existiert auch bereits. In diesem System ist Potential zur Verbesserung der Jahresarbeitszahl aufgrund von zusätzlichen Laufzeiten und Umschalten auf den Verdampfer zu sehen. Mit zusätzlichen Laufzeiten ist gemeint, dass, wenn die Temperatur des Kollektors für die direkte Einspeisung nicht ausreicht, die Wärme über den Verdampfer in das System eingebracht werden kann. Weiterhin könnte man auf den Verdampfer umschalten, wenn sich die Effizienz durch die indirekte Nutzung verbessert, als die Wärme der Kollektoren direkt zu nützen.

Das TRNSYS Modell zeigte kaum eine Verbesserung, wenn die Wärme auf den Verdampfer übertragen wurde anstatt es direkt einzuspeisen. Das Potential für die energetische Verbesserung in den zusätzlichen Laufzeiten betrug weniger als 14 % der Verdampfungswärme des Wärmepumpenkreislaufs, wodurch die Jahresarbeitszahl nur gering steigen würde (Haller und Elimar, 2010).

Hartmann und Schwarzburger (2009) stellen in dem Buch „Systemtechnik für Wärmepumpen“ ebenfalls eine Kombination von Wärmepumpe mit einer solarthermischen Anlage zur bivalenten Solarheizung vor. Diese bivalente Solarheizung kann in zwei Stufen erfolgen. Entweder deckt die Solarthermie einen Mindestanteil von 35 % des gesamten Wärmebedarfs und die restlichen 65 % werden von der Wärmepumpe getragen, oder die Solarthermie stellt mehr als 50 % des gesamten Wärmebedarfs bereit. Die thermische Anlage kann nicht nur die Wärme direkt in den Speicher leiten, sondern sie mit geringeren Temperaturen, die für das direkte System nicht mehr genutzt werden können, auf eine zweite bivalente Wärmequellenanlage, den Solarkreis, übertragen. Bei diesem Konzept werden zwei Speicher benötigt. Zum einen den Bereitschaftspuffer, welcher ausschließlich Heizungswasser beinhaltet und die Heizkreise und die Frischwasserstation, um Warmwasser im Durchlaufprinzip bereitzustellen, beliefert. Zum anderen wird ein Sole-Pufferspeicher gebraucht. Die Sole aus dem Erdreich mit einer ungefähren Temperatur von 5 °C wird durch die Wärme des Sole-Pufferspeichers, der nur vom Solekreis thermisch beladen wird, zusätzlich erwärmt auf zum Beispiel 10 °C. Daher ist die Temperaturdifferenz zur Vorlauftemperatur geringer, wodurch die Wärmepumpe bessere Ergebnisse erzielen kann und die Betriebskosten dadurch gesenkt werden. Die geeigneten Mischtemperaturen für Warmwasser und Raumheizung sind jedoch unterschiedlich und müssen beachtet werden. Für Warmwasser sollte eine Mischtemperatur zwischen 15-20 °C und für Raumheizung zwischen 10-15 °C erfolgen. Der Sole-Pufferspeicher besitzt im Vergleich zum Bereitschaftsspeicher geringere Temperaturen. Die Temperaturen des Bereitschaftsspeichers liegen im Jahresdurchschnitt bei zirka 35 °C. Im Sommer können die Kollektorspitzen in den Untergrund abgeführt werden (Tag-Nacht-Schaltung). Über eine Bypass-Schaltung, die kurz vor und nach dem Verdampfer angebracht ist, kann der Sole-Pufferspeicher sanft umgeschichtet und in der Nacht entleert werden. Am Tag danach kann er über die Kollektoren wieder aufgeladen werden, wodurch Stillzeiten der Kollektoren vermieden werden.

6.6.3 Für die Schulsanierung wichtige Kriterien

Es konnten während der Literaturrecherche keine besonderen Angaben zu den Planungskriterien gefunden werden, jedoch kann angenommen werden, dass die Regeln der Wärmepumpe und der Solarthermie gelten, aufgrund der Kombination beider Systeme. Siehe die im Kapitel '3.2' und '3.5' für die Sanierung beschriebenen Kriterien der Wärmepumpe und der Solarthermie.

7. Auswahlkriterien

In diesem Abschnitt werden die Auswahlkriterien der im Kapitel '3' beschriebenen nachhaltigen Systeme betrachtet. Dieses Kapitel soll Planer, Architekten und an den Systemen interessierten Personen einen Anhaltspunkt geben, was bei der Planung der jeweiligen Technologien zu berücksichtigen ist. Die Auswahlkriterien sind entweder als Fließdiagramm bildlich dargestellt oder als Checkliste mit Kriterien angeführt.

7.1 Photovoltaik

Photovoltaik-Anlagen können in verschiedenster Art und Weise in das bestehende Gebäude integriert werden. Um die Möglichkeiten aufzuzeigen, müssen zunächst die existierenden Gebäudeformen betrachtet werden. Alleine im Fall des Daches gibt es unterschiedliche Bauarten, je nachdem können diverse Modulformen und –arten zum Einsatz gelangen. Es erfolgt nun eine kurze Auflistung der Integrationsmöglichkeiten und danach werden die Auswahlkriterien mit Hilfe einer Abbildung angeführt.

Dächer

Die Sonnenstrahlung soll über das gesamte Jahr betrachtet in einem optimalen Winkel eintreffen, um entsprechende Leistungen zu erzielen. Weiterhin ist die Beschattung ein wichtiger Faktor, der berücksichtigt werden muss. Die am Dach installierten Module werden von naheliegenden Objekten, wie Gebäuden, Pflanzen, usw. nicht so leicht beschattet. Dies ist vor allem in urbanen Gebieten ein Vorteil gegenüber Fassadenintegrationen.

- Flachdach

Bei Flachdächern gelten die Kriterien der Photovoltaik, die im Kapitel '3.1' schon erwähnt wurden. Photovoltaik-Module können verschiedene Konstruktionen wie Wannformen, Betonformen, etc. verwenden. Module mit Nachführungssystemen sind hier sehr vorteilhaft, jedoch muss beachtet werden, dass die Module selbst keine Schatten auf andere Module werfen und dadurch den Wirkungsgrad vermindern. Dünnschichtfolien können hier ebenso zur Verwendung kommen. Der Vorteil liegt darin, dass die Eigenverschattung der Module entfällt. Diese Technik steckt jedoch noch in der Entwicklung und ist kaum verbreitet. Zudem weisen Dünnschichtmodule zurzeit noch die geringsten Wirkungsgrade auf.

- Schrägdach

Bei Schrägdächern ist die Lage und Ausrichtung besonders wichtig, da der Ertrag aufgrund der Sonnenstrahlenintensität und des Wirkungsgrades der Module beeinflusst wird. Auf Schattenfall durch angrenzende Objekte ist ebenfalls zu achten sowie ob das Dach in den kommenden Jahren saniert werden muss. Das Dach sollte zumindest die Lebensdauer der Photovoltaik-Anlage überdauern. Ansonsten muss die Anlage wieder abgebaut und montiert werden, um das Dach zu erneuern, wodurch zusätzliche Kosten anfallen. Natürlich spielen auch die ästhetischen Motive eine wichtige Rolle. All diese Kriterien sind in den folgenden Illustrationen beachtet worden.

Viele Firmen bieten eine Reihe von unterschiedlichen Modulaufbauten, Formen und Farben an. Die Vorstellungen und Geschmäcker der NutzerInnen sind individuell, weshalb Angebote von mehreren Firmen eingeholt werden sollten.

- Gewölbte Dächer
Gewölbte Flächen bzw. Dächer sind ebenfalls für Photovoltaik-Systeme geeignet. Die Photovoltaik-Module können auch auf gekrümmten Tragflächen montiert werden und bei gewölbten Dächern in das Gebäude integriert werden.
- Vordächer
Vordächer können über Fenster, Eingangsbereiche oder Terrassen angebracht werden und dienen zum Schutz vor Sonne, Regen und Schnee.
- Lichtdächer und Oberlichter
Lichtdächer kommen zum Einsatz um das Tageslicht gezielt zu nutzen, wie zum Beispiel bei einem Atrium. Hier können transparente oder semitransparente Module verwendet werden, wobei die semitransparenten Photovoltaik-Module neben den Funktionen Wärme-, und Witterungsschutz auch Aufgaben wie Sonnen- und Blendschutz übernehmen können. Werden die Photovoltaik-Module auf einem Dach integriert entstehen sogenannte Oberlichter. Durch die semitransparenten Module können Schatteneffekte erzeugt werden, welche einerseits für ästhetische Lichtspiele in Bereichen wie Fluren verwendet werden können. Andererseits sollten diese Effekte jedoch bei Arbeitsplätzen vermieden werden, da die Arbeitnehmer die Schattenbildungen mit der Zeit als störend empfinden könnten.

Fassade

Fassaden haben den Nachteil, dass angrenzende Objekte leicht Schatten auf die Gebäudehülle werfen können, das kann zu einer Verminderung des Wirkungsgrades führen. Der Vorteil einer Fassade ist jedoch die große, unbenutzte und vorhandene Fläche, weshalb vermehrt Module installiert werden können und der Ertrag dadurch steigt. Außerdem treffen im Winter, aufgrund der tiefer stehenden Sonne (Abbildung 55), die Strahlen auf die Fassadenflächen in einem besseren Winkel auf, gegenüber Dachanlagen.

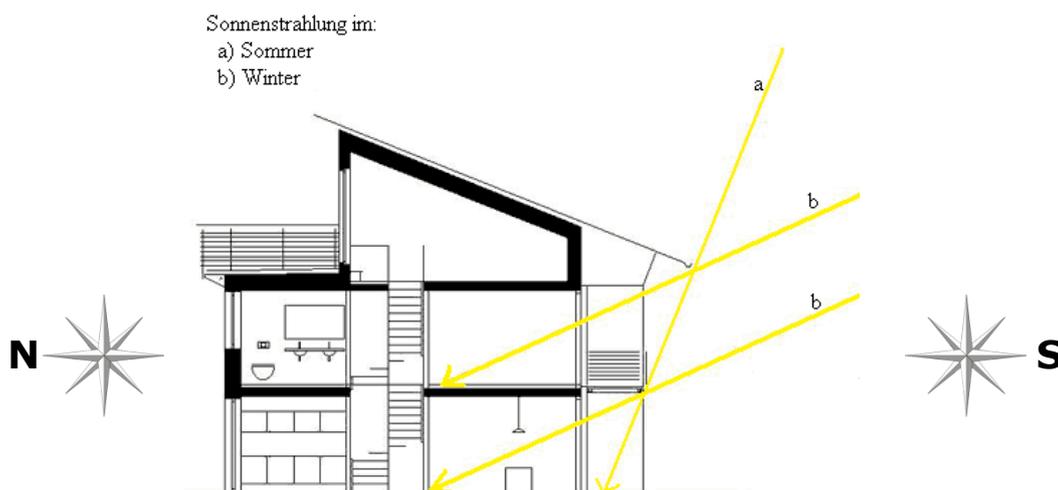


Abbildung 55: Darstellung Sonnenstand im Sommer und Winter.
Quelle nach <http://www.sonnenschiff.de/>(17.01.2012)

- Sonnenschutz

Um das Raumklima zu Regulieren und den Lichteintrag in den Räumen zu steuern, sind Sonnenschutzsysteme von Vorteil. Externe Systeme werden als außenliegende Sonnenschutzsysteme meistens bevorzugt, da diese effizienter sind. Laut Hagemann (2002) sind die Aufgaben außenliegender Systeme:

- Schutz vor direktem Sonnenlicht
- Schutz gegen Blendung
- Modulation des Tageslichtes
- Kühlung der Gebäudehülle

Ein Lösungsansatz wäre Photovoltaik-Lamellen einzusetzen, wobei zwischen starren und beweglichen Systemen zu unterscheiden ist. Bei den beweglichen ist vor allem auf die Ausrichtung zu achten, damit diese sich nicht gegenseitig beschatten und somit die Effizienz verringern.

- Brüstungen

Brüstungen können ebenfalls mit Photovoltaik-Modulen versehen und zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Mittels semitransparenter Photovoltaik-Module wird ein Blickschutz nach innen ermöglicht, während nach außen hin freie Sicht besteht.

Die diversen Integrationsmöglichkeiten werden in der nächsten Abbildung (Abbildung 56) dargestellt. In Tabelle 28 finden sie die Erklärungen der Abkürzungen und die Inhalte der Felder.

Tabelle 28: Erklärungen der Abkürzungen die in den Abbildungen dargestellt werden

Abkürzung und Inhalte der Felder	Beschreibung
m	monokristalline Photovoltaik-Zellen
p	polykristalline Photovoltaik –Zellen
t	transparente Photovoltaik –Zellen
Dachart	Ist der Einbau in das Dach überhaupt möglich? Wie ist das Dach aufgebaut? Besteht es aus Ziegeln oder Metall, etc? Besteht das Dach aus Metall, so ist eine Aufdach-Konstruktion leichter zu erzielen, da ansonsten das Metall aufgeschnitten werden muss. Bei einem Ziegeldach können die Ziegelsteine ohne Probleme für eine Indach-Montage entfernt werden.
Sanierung	Gemäß Schnauss (2008) sollte bei einer Aufdach-Montage, das Dach in den nächsten 25 Jahren saniert werden. Ansonsten müsste die Aufdach-Konstruktion wieder abgebaut und nach der Erneuerung des Daches wieder montiert werden. Dies verursacht einen zusätzlichen Aufwand und erhöhte Kosten. Ist ersichtlich, dass das Dach in den nächsten 25 Jahren erneuert werden muss, so sollte dies gleich bei der Sanierung erfolgen, wobei ein Indach-System zur Anwendung kommen könnte, wodurch Dachmaterial eingespart werden kann.
Einbußen der Erträge	Siehe Kapitel '3' bei den Planungskriterien für die Ausrichtung, Verschattung, Bypass, Hinterlüftung, etc.

Legende:

- Ist-Zustand
- Technologie Einsatz
- Voraussetzungen und Kriterien
- * siehe Kapitel 3/ Planungskriterien
- Warm[°] Warmfassade
- Kalt[#] Kaltfassade

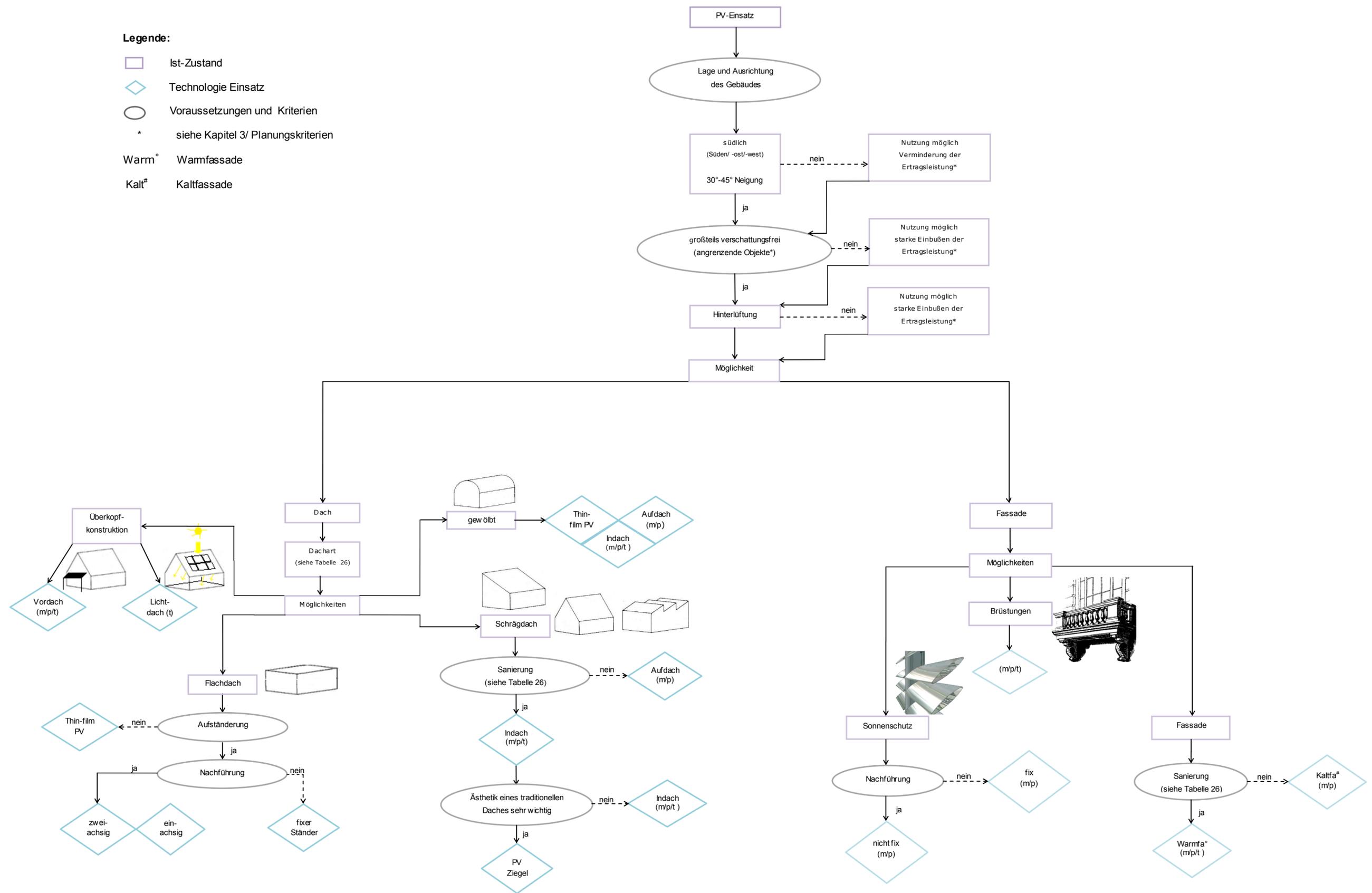


Abbildung 56: Integrationsmöglichkeiten von PV

7.2 Solarthermie

Wie auch bei der Photovoltaik können bei der Solarthermie Dächer oder Fassaden verwendet werden um Solarkollektoren zu installieren.

Es kann jede Art von Kollektoren verwendet werden, zu beachten ist, dass Vakuumröhrenkollektoren gegenüber Flachkollektoren rund 30 % weniger Fläche benötigen, allerdings auch sehr teuer sind. Nach Viessmann (2008) sollten für die solare Heizungsunterstützung Vakuumröhrenkollektoren verwendet werden, wenn die Montage der Anlage nur dachparallel mit einem Neigungswinkel kleiner als 30° erfolgen kann.

Auf der nächsten Seite befindet eine Darstellung (Abbildung 57), die den Einsatz und die Integration von Solarthermiekollektoren zeigt.

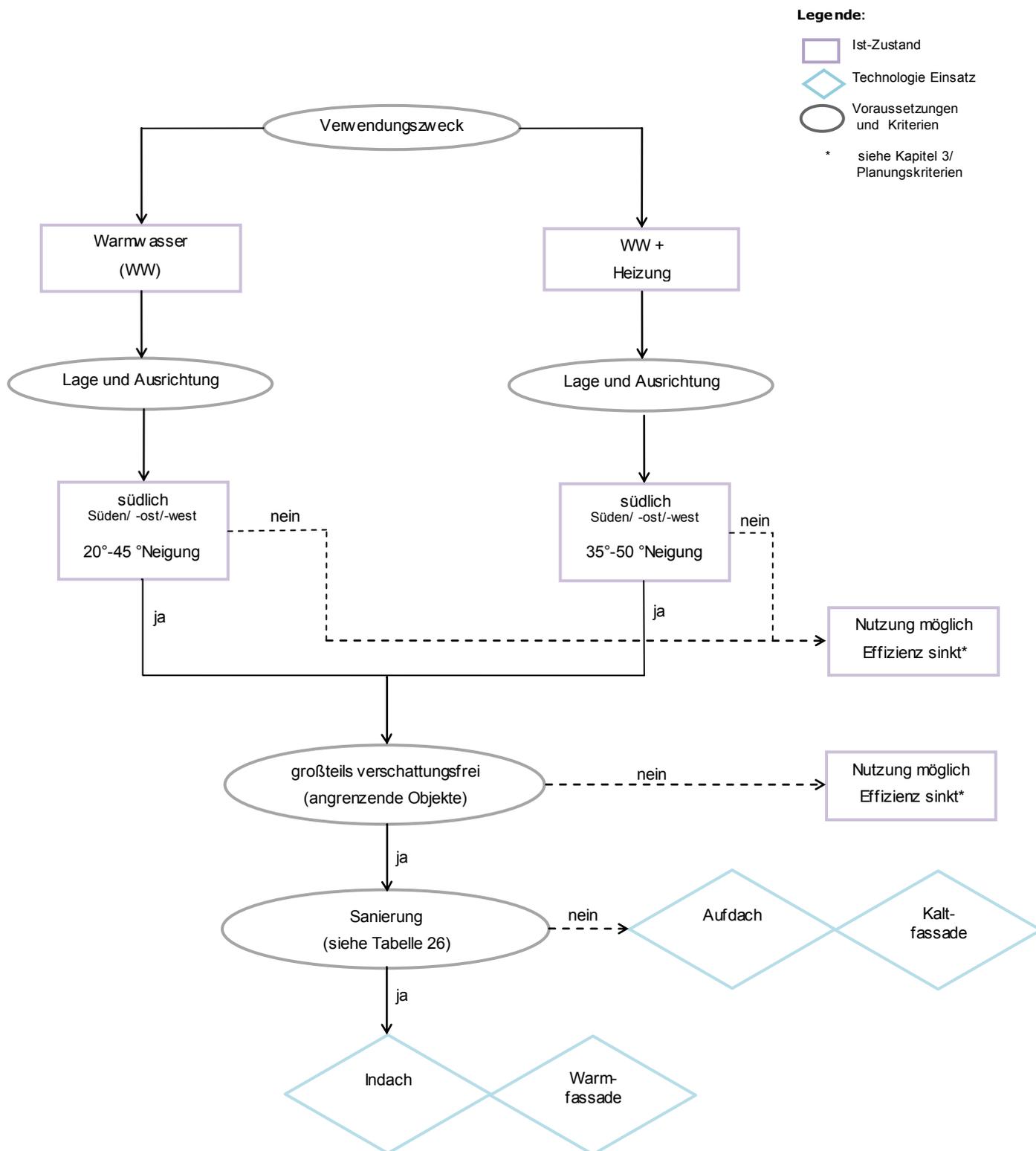


Abbildung 57: Integrationsmöglichkeiten der Solarthermie

7.3 Lüftung

Welche Lüftungstechnologie für Schulen am geeignetsten ist, kann pauschal nicht festgelegt werden. Die Konzepte müssen individuell an die Schule angepasst werden. Dadurch entsteht eine Vielzahl an diversen Projekten. Viele Parameter wie Standort, Klima, Bautyp, Anzahl und Alter der SchülerInnen, Raumaufteilung etc. beeinflussen die Lüftungskonzepte. Greml et al. (2008) evaluierte im Rahmen des Impulsprogramms „Nachhaltig Wirtschaften“ 16 Schullüftungen in Österreich und erstellte einen Planungsleitfaden für Klassenzimmerlüftungen, der auf 61 Qualitätskriterien basiert. Dieser Leitfaden wird für diesen Teil der Arbeit herangezogen, um die wichtigsten Kriterien aufzuzeigen, die bei der Planung einer Lüftungsanlage beachtet werden sollten.

Kriterium 1: Qualitätskriterien

Raumluftqualität

Greml et al. (2008) berichtet, dass nach ÖNORM EN 13779 CO₂-Konzentrationen der Außenluft am Land im Durchschnitt 350 ppm betragen, während in der Stadt 400 ppm üblich sind und in Stadtzentren 450 ppm vorherrschen. Unter Einbeziehung des Standardwertes von 400 ppm darf der CO₂-Gehalt im Klassenzimmer den Wert von 1.200 ppm nicht überschreiten, um eine mäßige Raumluftqualität zu gewährleisten. Eine hohe bis mittlere Raumluftqualität mit max. 1000 ppm wird als Zielwert für Klassenräume gesetzt.

Planer und Installateure müssen daher berücksichtigen, dass in urbanen Gebieten eine schlechtere Luft vorhanden ist und daher eine höhere Luftmenge benötigt wird, um den hygienischen Mindestluftwechsel zu gewährleisten.

Mindestluftmenge

Die Frischluftmenge zur Klassenraumlüftung hängt von verschiedensten Faktoren ab, wie zum Beispiel von der geforderte Luftqualität, der Außenluft-Qualität, SchülerInnen (Alter, Gewicht, Anzahl, Aktivitätsgrad), Raumvolumen und anderen Kriterien.

Da die Planer und Installateure weder einen Einfluss auf die Parameter SchülerInnen und bereits vorhandene Raumvolumen besitzen, sollte zumindest der Außenluft-Qualität Beachtung geschenkt werden. Die Ansaugstelle für die Außenluftzufuhr ist so zu wählen, dass keine Schadstoffe wie Autoabgase oder störende Gerüche in das Gebäude eingetragen werden.

In Tabelle 29 wird die Mindestluftrate in Kubikmeter pro Stunde für unterschiedliche Schultypen angegeben.

Tabelle 29: Mindestluftfrate für unterschiedliche Schultypen. Quelle nach Greml et al. (2008)

Schultyp	Altersgruppe	Mindestluftfrate in m ³ /(h*Person) bei	
		CO ₂ -Gehalt max. 2000 ppm	CO ₂ -Gehalt max. 1000 ppm
Kindergarten	0-6	19	25
Volksschule	6-10	19	25
Hauptschule	10-14	23	30
AHS, BHS	14-19	24	33
FH, UNI,...	>19	25	34
	Lehrpersonen	28	37

Schalldruckpegel

Der empfohlene Bereich des maximalen A-bewerteten Schalldruckpegels von Lüftungsanlagen für Schul- und Kindererziehungseinrichtungen wird in der ÖNORM EN 13779:2008 zwischen 35 und 45 dB(A) angeführt, während die ÖNORM B 8115-2:2006 für haustechnische Anlagen einen A-bewertete Schalldruckpegel von max. 25 dB(A) verlangt. Die Facharbeiter sollten bei der Planung der Lüftungsanlage den niedrigsten Schalldruckpegel anstreben, da bei den NutzerInnen durch laute und andauernde Geräusche ein Unbehaglichkeitsbefinden entsteht, wodurch die Leistungs- und Konzentrationsfähigkeit gehemmt werden. Der Schalldruckpegel kann durch unterschiedlichste Faktoren beeinflusst werden. Der Ventilator des Lüftungsgerätes ist zum Beispiel eine dominierende Schallquelle. Das Verteilnetz leitet die von dem Ventilator verursachten Geräusche in die Klassenräume weiter. Neben dem Ventilator verursachen die Luftströmungen in den Leitungen Geräusche. Zu hohe Luftgeschwindigkeiten bewirken zum einem Strömungsgeräusche und zum anderem steigt der Schallpegel im Gerät. Durch Einbau von Schalldämpfern kann die Geräuschbelastung reduziert werden. Um Geräuschübertragungen zu vermeiden müssen alle Anlagenteile und Wanddurchbrüche körperschalldämmend ausgeführt sein. D.h., dass die Rohre mit dämpfenden oder elastischen Materialien (z.B. Schaumstoff) ummantelt werden müssen, damit kein direkter Kontakt zu Fußböden, Rohrleitungen und Mauerwerk besteht. Außerdem sollten Lüftungsrohre alle zwei Meter mit einer schwingungsdämpfenden Aufhängung befestigt werden.

Zuluft-Qualität

Die Qualität der Zuluft hängt vom Ansaugungsbereich ab. Daher sollte die Ansaugstelle nicht in Reichweite von stark befahrenen Straßen, Parkplätzen, Mülllagerplätzen, usw. platziert werden.

Die Zuluft-Ansaugstelle sollte vor Vandalismus geschützt werden, indem sie sich in einer Höhe befindet, die ohne Hilfsmittel (z.B. Leiter), nicht zu erreichen ist. Außerdem sollte der Ort für die Zuluft-Ansaugung nicht zu schwer zugänglich sein um die Wartung und Instandhaltung zu erleichtern. Um die Ansaugstelle vor Schnee zu schützen sollte diese laut ÖNORM EN 13779:2008 drei Meter oder mindestens die 1,5-fache Höhe der maximalen Schneehöhe betragen.

Des Weiteren müssen Luftkurzschlüsse zwischen Außenluft-Ansaugung und Fortluft-Auslasses vermieden werden, da ansonsten ein Teil der schlechten Luft wieder in das System geleitet wird und zur Verminderung der Effizienz des Systems führt. Bei dezentralen Anlagen müssen die Ansaugstelle und die Auslassstelle mindestens zwei Meter entfernt

sein, wenn sich diese auf derselben Wandseite befinden. Bei Eckräumen sollten die Ansaugung und der Auslass an verschiedenen Fassadenseiten angebracht werden. Bei zentralen Anlagen liegt die Mindestentfernung zwischen der Ansaugstelle und der Auslassstelle bei drei Meter. Um Luftkurzschlüsse zu vermeiden wäre die idealste Lösung die Ansaugung an der Fassadenseite und den Fortluft-Auslass auf dem Dach anzubringen. Ist jedoch bei beiden Systemen nur eine vertikale Anbringung möglich, so sollte die Außenluft-Ansaugstelle unterhalb des Fortluft-Auslasses platziert werden.

Kondensatbildung

Dringt Kondensat und Vereisung in den Hinterlüftungen ein und staut sich dort, kann es zur feuchten Fortluft kommen. Daher sollte die Fortluftaustragung über das Dach erfolgen. Werden diese jedoch über die Fassade geführt, dann müssten nach ÖNORM EN 13779:2008 eine Mindestluftgeschwindigkeit von 5 m/s, ein maximaler Volumenstrom von 1.800 m³/h und ein Mindestabstand von 5 m zum Gebäude erzielt werden. Bei dezentralen Systemen muss der Fortluft-Auslass so angebracht werden, dass die feuchte Luft nicht in die Fassade eindringen kann.

Erdwärmetauscher (EWT)

Erdwärmetauscher dienen zum Frostschutz. Im Winter wird die kalte Luft auf ungefähr minus 3°C erwärmt und im Sommer auf zirka 20°C abgekühlt. Deshalb kann auf eine elektrische Frostschutzanlage bzw. Nachheizregister verzichtet werden. Außerdem entfällt im Sommer ein Teil der Kühllast, da die warme Luft erkaltet. Es können Luft-EWT oder Sole-EWT eingesetzt werden, wobei für größere Anlagen, wie sie in Schulen benötigt werden, ein Sole-EWT sinnvoller wäre, weil dieser hygienische Vorteile bietet, sowie eine leichtere Verlegung und eine einfache Wartung und Reinigung. Ein weiterer positiver Aspekt ist, dass sich die Wärmeleistung einfach regeln lässt und sie nicht von der Luftmenge abhängt. Als Nachteile können Anlagenteile wie Pumpen, Sicherheitseinrichtungen, usw. die zusätzlich benötigt werden aufgezeigt werden. Um bei einem Ausfall des Erdwärmetauschers, der Vereisung des Gerätes entgegenzuwirken, wird ein Sicherheitskonzept benötigt.

Wärmerückgewinnung (WRG)

Eine höchst mögliche Gesamtenergieeffizienz der Anlage ist zu erzielen. Eine höhere Wärmerückgewinnung wirkt sich nicht immer positiv auf die Gesamtenergieeffizienz aus. Durch höhere Wärmerückgewinnungswerte resultieren höhere Druckverluste und erhöhte Vereisungstemperaturen. Deshalb ist es wichtig, dass diese Faktoren bei der Berechnung der Gesamtenergiebilanz, bei der Erdwärmetauscher-Dimensionierung oder bei der Vorerwärmung berücksichtigt werden. Höhere Werte bei der Wärmerückgewinnung sind daher nur erwünscht, wenn gleichzeitig die Gesamteffizienz gesteigert wird.

Bei zentralen Anlagen sollte nach EN 308 die Rückwärmezahl mindestens 60 % betragen. Wird bei höheren Werten ebenfalls die Gesamteffizienz erhöht, dann werden Werte größer als 70 % angestrebt. Bei dezentralen Anlagen ist bisher keine einheitliche europäische Prüfung vorhanden. Dies führt zu unterschiedlichen Werten je nach Institution. Nach ÖNORM EN 13141-7 sollte das Temperaturverhältnis (Formel 2) bezogen auf der Abluftseite mindestens 60 % betragen, während Werte von mindestens 70 % bei Erhöhung der Gesamteffizienz gewünscht sind. Laut PHI Prüfreglement benötigen dezentrale Anlagen eine Wärmerückgewinnung von mindestens 65 %. Bei Steigerung der Gesamteffizienz werden hier Zielwerte von über 75 % erstrebt. Nach DIBt-Prüfreglement sollten die

Wärmebereitstellungsgrade zumindest 77 % betragen, wobei Werte größer als 87 % mit einer besseren Gesamteffizienz erzielt werden sollten.

$$\text{Temperaturverhältnis} = \frac{\Delta T \text{ einströmender und ausströmender Luft eines Luftstromes}}{\Delta T \text{ einströmenden Luft der beiden Luftströme}}$$

Formel 2: Berechnung des Temperaturverhältnis

Im Sommer und bei Nachtkühlungen ist die Wärmerückgewinnung nicht erwünscht und muss umgangen werden. Kann die Wärmerückgewinnung nicht geregelt werden, so sollte die Anlage mit einem Bypass versehen werden. Durch den Bypass sollte die Gesamteffizienz nicht verschlechtern werden, weshalb der Bypass der ÖNORM EN 1751:1999 entsprechen muss.

Planer und Installateure sollten das Konzept so anpassen, dass eine Umgehung der Wärmerückgewinnung automatisch erfolgen kann. Muss der Bypass im Sommer eingebaut und im Winter wieder demontiert werden, so entsteht ein zusätzlicher Arbeitsaufwand. Das Konzept sollte außerdem auf jeden Fall eine entsprechende Nachtkühlung beinhalten.

Aufstellungsort

Bei dezentralen Geräten ist eine Deckenausführung geeignet, vor allem für Räume mit Platzmangel. Zentrale Anlagen sollten in einem trockenen, rostfreien Raum, mit leichtem Zugang für Wartungen, aufgestellt werden. Es gibt auch Geräte für eine Freiaufstellung, welche aus energetischen Gründen jedoch vermieden werden sollten. Auch die Möglichkeit für den Anschluss eines Kondensatablaufs muss berücksichtigt werden. Der Technikraum sollte von dem zu belüftenden Räumen nicht allzu weit entfernt sein, um die Leitungen des Verteilnetzes so kurz wie möglich zu halten.

Regelung der Lüftungsanlage

Eine gute Steuerung der Lüftungsanlage ist aus energetischen Gründen, optimaler Luftfeuchtigkeit und unterschiedlicher Benutzung von Klassenräumen erforderlich. Eine bedarfsgerechte Regelung kann mit Hilfe von Fühlern, wie CO₂-Fühlern und Feuchtekontrollen, gesteuert werden, jedoch wird wegen Kostengründen sehr oft darauf verzichtet. Zentrale Anlagen bei denen die Gesamtanlage mit einer konstanten Luftmenge betrieben wird, anstatt einer individuellen Regelung von Klassen, sollten vermieden werden. Vor und nach der Belegung der Klassenräume sollten die Räumlichkeiten zumindest mit der Luftmenge des Raumes automatisch gespült werden.

Planer und Installateure sollten bei einer zentralen Anlage nicht auf eine individuelle Regelung der Luftmengen pro Klassenraum verzichten, sondern diese im Lüftungskonzept berücksichtigen, denn dadurch können die unterschiedlichen Anforderungen der NutzerInnen sichergestellt werden. Auch wenn dies zu höheren Anschaffungskosten der Anlage führt.

Verteilnetz

Eine entsprechende Dimensionierung und Auslegung des Verteilnetzes setzt eine aufwendige Planung voraus. Beim Konzept müssen die Brandschutzbestimmungen, bzw. OIB Richtlinie 2 sowie die brandschutztechnischen Aspekte laut ÖNORM M 7624:1985 beachtet werden. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass im Gesamtsystem ein geringer Druckverlust herrscht, da ansonsten höherer Strombedarf notwendig ist und kein geräuscharmer Betrieb erreicht werden kann. Ein wichtiger Faktor für den Druckverlust stellt die Rohr- bzw. Kanalausführung dar. Glatte und runde Luftleitungsquerschnitte sind vorzuziehen.

Führen kalte Lüftungsrohre (Außenluftleitung bzw. Fortluftleitung) in warme Bereiche, so bildet sich Kondensat und es entstehen Wärmeverluste des warmen Raumes. Deshalb müssen diese Rohrleitungen feuchtbeständig gedämmt werden. Die kalten Lüftungsrohre, welche in warme Bereiche führen, sollten so kurz wie möglich gehalten werden. Ebenfalls können warme Lüftungsrohre (Zu- bzw. Abluft) in kalte Bereiche führen. Ist dies der Fall, so wird die warme Luft abgekühlt und der energetische Wirkungsgrad wird dadurch vermindert. Unter kalte Bereiche werden alle Sektoren verstanden, die sich außerhalb der Dämmhülle befinden. Auch hier ist das Ziel, warme Lüftungsrohre, die in kalte Bereiche führen, so kurz wie möglich zu halten.

Laut Komfortlüftung (2010) sollten die Zu- und Abluftleitungen zirka 6 cm Dämmung aufweisen, während die Außenluft- bzw. Fortluftleitungen ungefähr 3 cm gedämmt werden sollten. Bei den Fort- bzw. Außenluftleitungen müssen die Dämmstoffe für Feuchte geeignet sein. Beispiele für entsprechende Dämmstoffe sind Armaflex oder Kaiflex. Mineralwolle reicht bei den Zu- und Abluftleitungen als Dämmstoff aus. Weiterhin ist zu beachten, dass Wand- und Deckendurchbrüche ebenfalls gedämmt werden.

Kriterium 2: Teil- oder Volllüftung

Bei einer Teillüftung können niedrige CO₂-Werte nur mittels Stoßlüftungen über Fenster erreicht werden. In den unbeaufsichtigten Pausen könnte dies zu einem Sicherheitsrisiko (Absturzgefahr) führen. Die Volllüftung kann über das ganze Jahr ohne eine zusätzliche Stoßlüftung erfolgen, während die erforderliche CO₂-Grenze eingehalten wird. Wenn die NutzerInnen trotzdem eine Fensterlüftung wünschen ist dies möglich. Im Sommer muss die Luftmenge erhöht werden, um Gerüche zu vermeiden und im Gegensatz zum Winter müssen mehr Luftmengen entfeuchtet werden. Nach Greml et al. (2008) ist eine Volllüftung der Teillüftung vorzuziehen, da sich zum einem die Volllüftung zur Unterstützung der Nachtlüftung besser eignet und die Teillüftung sehr viel Disziplin von SchülerInnen und Lehrern erfordert, um den Nutzungskomfort zu gewährleisten. Für Schulen mit kurzen Unterrichtszeiten, wie Grundschulen, welche die Möglichkeit einer Querlüftung besitzen, könnte eine Teillüftung trotzdem attraktiv sein.

Kriterium 3: Basisdatenerhebung

Zur Erhebung der Basisdaten werden viele verschiedenen Informationen benötigt, die Einfluss auf das Lüftungskonzept besitzen. In Tabelle 30 sind die Daten mit ihrer zugehörigen Relevanz aufgelistet.

Tabelle 30: Daten die das Lüftungskonzept beeinflussen

Information	Relevanz und Auswirkung
Klima Außentemperaturen (Winter/Sommer), Kleinklima, Wetter (Sonneneinstrahlung, Windrichtung, Schneehöhe, ...)	Außenluft-Ansaugung (Ausführung und Anordnung), Frostschutzdauer, Filter (Gefahr der Durchfeuchtung), Neigung zur Überwärmung, Effizienz der Nachtlüftung
Standort Verkehr und Lärm, Gewerbe/Industrie, Abschattungen, Nachbargebäude, Emissionen Grundstück Grünfläche, Innenhof, Nutzung, Orientierung	Aufbereitung der Außenluft, Schallschutz, mögliche Erdwämenutzung Außenluft-Ansaugung (Anordnung), Erdwämenutzung
Bebauung Gebäude ist freistehend, dicht verbaut, usw.	Außenluft-Ansaugung und Fortluft-Auslasses (Anordnung), Integrationsmöglichkeit
Vorhaben Sanierung, Erweiterung, Neubau Schultyp Klassen-/SchülerInnenanzahl, Altersgruppe, Nutzungsprofil Bautyp Anzahl der Geschosse, Keller, Dach- und Gebäudeform	Integrationsmöglichkeiten, Verwendung der bestehenden Infrastruktur Luftmenge, Art der Steuerung/Regelung Systemwahl (zentral/dezentral/semizentral), Anzahl und Lage der Lüftung, Führung und Verteilung der Leitungsrohre
Bauvolumen Bruttogeschossfläche, Nettofläche, Klassenanzahl Bauweise (schwere/mittelschwer/leicht), Baukonstruktion, Statik, Baumaterialien, Glasflächen, ... PH-Konzept, Energiekennzahl	Kalkulation der Kosten (grob), erforderliche Ressourcen und Kapazitäten Neigung zur Überwärmung, Luftmengen, Nachtlüftungsart, Schallschutz, Durchbruchmöglichkeiten Neigung zur Überwärmung, Art der Wärme-/Feuchterückgewinnung, max. Luftmengen und Einblastemperatur, min. Feuchtwerte, Gebäudedichtheit, Dämmstärke (Leitungen), Steuer- und Regelungsart
Heizkreislaufsystem Wärme (-erzeugung, -transport und -abgabe), Sanitärinstallation	Art der Zuluft-Einbringung, Strömungsrichtung der Luft (Konvektion), Kondensatableitungsanschluss, Art der Steuerung/Regelung
Richtlinien und Vorgaben Vorschriften für Brandschutz und Sicherheit, Fensteröffnung Raumnutzungen Klassenräume, Versammlungsräume, Veranstaltungsräume, Turnsäle, Aula, Kantine, etc. (Doppelnutzung durch Vereine), Flure, Nutzungsprofil (Art und Zeit der Benutzung)	Volllüftung/Teillüftung, Führung der Luftleitung, Abschnitte für Brandschutz Zonierung, Zonendichtheit, Luft-„Doppelnutzung“, Steuer- und Regelungsart
Geräteausstattung PCs, Beamer, Labor, usw.	Interne Wärmelasten (zusätzlich), Neigung zur Überwärmung, Quellen für Schadstoffe
Möblierung Ausstattung, Platzierung, Emissionen	Anordnung der SchülerInnen, Luftmengen (zusätzlich), Platzierung von Luftdurchlässen
Erhöhte Feuchtelasten nicht bezogen auf Personen, Pflanzen, etc.	Art der Wärme-/Feuchterückgewinnung, dezentralen Geräten (eventuelle erhöhte Kondensatbildung an der Wärmerückgewinnung)

Kriterium 4: Quell- oder Mischlüftung

Bei der Mischlüftung gibt es mehrere Möglichkeiten zur Anordnung der Luftauslässe, was die Integration in einen Altbau erleichtert. Kürzere Leitungslängen können somit erzielt werden, wenn die Ein- und Auslässe an die gleiche Wandseite angebracht werden. Luftkurzschlüsse müssen jedoch vermieden werden.

Quelllüftung

- + gut geeignet für Klassenräume die kleiner sind als 3 m
- + Luftablenkungen die stören sind an den Decken möglich
- + geeignet für Zuluftkühlung
- nicht geeignet für Zuluftheizung
- keine abgehängten Decken, keine Integrationsmöglichkeiten von Luftleitungen im Deckenbereich
- nicht gut geeignet für in Bodennähe vorhandenen Überströmungsquerschnitte

Mischlüftung

- + Luftablenkungen die stören sind an den Decken nicht möglich
- + geeignet für Zuluftheizung
- nicht gut geeignet für Klassenräume die kleiner sind als 3 m
- nicht geeignet für Zuluftkühlung
- bei abgehängten Decken möglich, Integrationsmöglichkeiten von Luftleitungen im Deckenbereich
- geeignet für in Bodennähe vorhandene Überströmungsquerschnitte

Kriterium 5: Heizen mit der Lüftung

Eine Trennung von Heiz- und Lüftungssystemen ist im Allgemeinen zu befürworten. Um die Heizlast mit Hilfe der Zuluftheizung abdecken zu können, müssen die Kriterien für Passivgebäude erfüllt sein. Während die Lüftungsanlagen auch noch kurz nach der Unterrichtszeit laufen sollten, muss an Unterrichtstagen die Wärmeeinbringung kurz vor dem Unterricht erfolgen. An Wochenenden, in den Ferien oder bei strengem Winter sollte die Grundlüftung außerhalb der Unterrichtszeit ebenfalls in Betrieb genommen werden können, damit die Räume nicht zu stark abkühlen. Laut EN 13779:2008 beträgt die Grundlüftung $0,15 \text{ m}^3/\text{h}$ pro m^2 . Hier muss auf Befeuchtungsmaßnahmen oder Feuchterückgewinnung geachtet werden. Klassenräume, welche in schwerer Bauweise ausgeführt wurden, können stark schwankenden internen Lasten durch Wärmespeicherung der angrenzenden Bauteile ausgleichen. In Schulen werden manche Klassenräume länger in Anspruch genommen als andere. Zentrale Anlagen müssen somit komplexe Anforderungen der Steuerung und Regelung erfüllen.

Kriterium 6: Systemwahl-Vorteile und Nachteile**zentrale Anlagen**Vorteile

- keine Transmissionsverluste und Wärmebrücken (System + Integration)
- kein Eingriff in die Fassade
- frei wählbare Ansaugdurchlässe
- Außenluft-Ansaugung unabhängig von der Fassadenausrichtung
- guter Wetterschutz
- guter Schallschutz vor Außenlärm
- Integrationsmöglichkeit eines Erdwärmetauschers
- Integrationsmöglichkeit eines Heiz-/Kühlregisters

- Mitbelüftung von Fluren und Erschließungsflächen möglich
- Filter: geringer Wartungsaufwand, höhere Filterklassen möglich, große Filterflächen, höhere Filterstandzeit
- geringer Energieaufwand für Lufttemperierung wegen Einsatz von Wärmerückgewinnung, Erdvorwärmung oder zentralen Nachheiz-/Kühlregister
- leichte zentrale Steuerung der gesamten Anlage
- bei Brand leichtes Abschalten der Gesamtanlage durch Gas- und Rauchsensoren und Kopplung mit der Brandmeldeanlage
- geringer Wartungs- und Instandhaltungsaufwand (zentraler Technikraum, wenige Filter, usw.)
- leichte Funktionskontrolle aufgrund der zentralen Leittechnik
- Vermeidung von Luftkurzschlüssen zwischen Außenluft und Fortluft, da die Platzierung der Luftdurchlässe frei wählbar ist
- geringe Verschmutzung der Leitungen durch regelmäßige Wartung und höhere Filterklassen
- geringere Durchfeuchtung der Außenluft-Filter

Nachteile

- hoher baulicher Aufwand
- Verteilungsnetz: hoher baulicher Aufwand, aufwändige Planung und Reinigung, hoher Flächenbedarf, höhere Druckverluste wegen großen Leitungslängen/Formstücken/Einbauten (Brandschutzklappen, Nachheizregister, ...)
- höherer Strombedarf aufgrund der erhöhten Druckverluste
- hohe Brandschutzanforderungen
- hoher Planungs-, Abstimmungs-, und Ausführungsaufwand zur Integration der Lüftung vor allem im Bestand
- Geruchsübertragung möglich → gutes Konzept für Küchen, Speiseräume, Labors etc. erforderlich
- Ventilator und Antriebs Wirkungsgrad von Bauart abhängig → größere Ventilatoren sind effizienter
- hohe interne Druckverluste und Leckagen durch zu knapper Dimensionierung der Geräte
- Ventilator- und Antriebs-Wirkungsgrad von Bauart abhängig → größere Ventilatoren sind effizienter
- oft AC-Motoren mit schlechtem Wirkungsgrad im Einsatz → EC Motoren wären besser
- hohe interne Druckverluste und Leckagen durch zu knapper Dimensionierung der Geräte
- individuelle Regelung ist eingeschränkt und sehr aufwendig; Maßnahmen für eine individuelle Steuerung sind:
 - pro Raum Zu- und Abluft sowie CO₂- Fühler und Anwesenheitssensor
 - Steuereinrichtungen in den Zu- und Abluftsträngen
 - Regelungsaufwendung um die Nutzeranforderungen einzubinden (Nutzervorrang)
- Nutzerakzeptanz: gering, wenn der Nutzer keine Möglichkeit besitzt in das System einzugreifen (z.B. Kippen der Fenster, Ausschaltung der Lüftung)
- Rohrnetzerweiterung folgt zur neuen Regulierung des Gesamtsystems
- geringe Anlagensicherheit (bei Störungen ist das gesamte System betroffen)
- Heiz-/Kühlfunktionen: führt zu einer Vergrößerung der Leitungsoberflächen, wodurch es zu höheren Verteilverlusten kommt

dezentrale Anlagen

Vorteile

- einfache Integration (vor allem bei einer Sanierung)
- baulicher Aufwand ist gering
- Verteilsystem: nicht vorhanden, kein Flächenbedarf notwendig
- Individuelle Steuerung
- geringe Brandschutzanforderungen
- gute Anlagensicherheit (bei Störung eines Gerätes kommt es nicht zum kompletten Ausfall des Systems)

Nachteile

- Eingriff in die Fassade
- Zuluft-Qualität: Ansaugung der Zuluft abhängig von der Raumausrichtung → schlechte Qualität der Außenluft z.B. durch stark befahrene Straßen oder durch Kurzschlüsse mit der Fortluft
- Kondensatabfluss des Gerätes meistens heikel (erfolgt oft über die Fassade)
- Schutz vor Vereisung: kann oft nur über Abschalten von der Zuluft erfolgen
- komplexer Aufwand für Schall- und Wetterschutz
- höhere Schallbelastung gegenüber zentralen Anlagen
- keine Integrationsmöglichkeiten von Erdwärmetauschern
- hoher Wartungs- und Instandhaltungsaufwand aufgrund der vielen Geräte
- Filter: geringe Qualität und Standzeit aufgrund kleiner Filterfläche, Durchfeuchtung möglich und hoher Wartungsaufwand
- erschwerte Funktionskontrolle aufgrund der vielen Geräte

semizentrale Anlagen

Die Vor- und Nachteile dieses Systems variieren je nachdem ob das System eher als zentrale Anlage ausgerichtet wird oder ob das Prinzip in Richtung dezentrale Anlage ausgelegt wird.

Kriterium 7: Systemwahl – Kosten

Tabelle 31 zeigt die Vor- und Nachteile der Kosten von dezentralen und zentralen Anlagen.

Tabelle 31: Vor- und Nachteile von dezentralen und zentralen Lüftungskonzepten

Kostenfaktor	dezentral	zentral
Errichtung	dezentrale Anlagen sind in der Anschaffung gegenüber zentralen Anlagen teuer; pro Klasse ein Gerät	zentrale Konzepte weisen Kostenvorteile auf, da häufig auf eine Steuerung und Regelung der Luftmengen der einzelnen Klassen verzichtet wird
Wartung	höhere Wartung und Anschaffungskosten bei Filtern; für Abluft- und Zuluftseite, kleinere Filterflächen, mehrmals im Jahr wechseln	höhere Wartung und Anschaffungskosten beim Luftleitungssystem, vor Staubablagerung schützen
Strom	geringerer Strombedarf aufgrund von effizienterer Motortechnologie	höhere Kosten aufgrund von höheren Druckverlusten → längere Leitungsnetze

7.4 Wärmepumpe

Das wichtigste Kennzeichen für eine effiziente Wärmepumpenanlage ist eine hohe Jahresarbeitszahl des Systems. Um dies zu erzielen, spielen viele Faktoren (Wärmequelle, Wärmepumpe und Nutzungsanlage) eine entscheidende Rolle, daher wird in diesem Teil dargestellt, was bei der Auslegung einer Wärmepumpenanlage beachtet werden muss. Die Kriterien 1 bis 3 werden gemäß Effiziento (2011) aufgezeigt.

Kriterium 1: Ermittlung des Wärmebedarfs

Soll eine Wärmepumpe für die Wärmebereitstellung eingesetzt werden, so muss als erstes die Heizlast des Gebäudes bestimmt werden. Bei Sanierungen muss berücksichtigt werden, dass durch die Dämmung der Wärmebedarf gesenkt wird und die Leistung des vorhandenen Heizkessels nicht mehr als Maß für die Heizlast angesehen werden darf. Die genaue Berechnung des Wärmebedarfs erfolgt über die jeweiligen Normen, jedoch können zur groben Berechnung Formel 3 und Formel 4 angewandt werden, um den spezifischen Wärmebedarf aus dem bisherigen Energieverbrauch zu berechnen.

$$Q_N \text{ [kW]} = \frac{\text{Gasverbrauch} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{a}} \right]}{250 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{a kW}} \right]}$$

Formel 3: grobe Berechnung des Wärmebedarfs, wenn mit Gas geheizt wird. Quelle nach Effiziento (2011)

$$Q_N \text{ [kW]} = \frac{\text{Ölverbrauch} \left[\frac{\text{l}}{\text{a}} \right]}{250 \left[\frac{\text{l}}{\text{a kW}} \right]}$$

Formel 4: grobe Berechnung des Wärmebedarfs, wenn mit Öl geheizt wird. Quelle nach Effiziento (2011)

Der Wärmebedarf des Gebäudes ergibt sich aus dem spezifischen Wärmebedarf mal der beheizten Fläche.

Kriterium 2: zusätzlicher Leistungsbedarf

Wie im Kapitel '3.5 Wärmepumpen' schon erwähnt wurde, sollte für die Warmwasserbereitung eigene Warmwasser-Wärmepumpen verwendet werden. Wird dennoch die Heizungs-Wärmepumpe für die Bereitung von Warmwasser eingesetzt so muss ein Zuschlag von 0,2 kW pro Person erfolgen.

Oft bieten Energieversorgungsunternehmen spezielle (günstigere) Tarife für den Strom, den die Wärmepumpe benötigt, an. Bei Lastspitzen im Versorgungsnetz werden die Wärmepumpen jedoch gesperrt. In dieser Zeit steht die Wärmepumpe still und liefert keinen Beitrag zur Wärmeversorgung des Gebäudes. Häufig sind Sperrzeiten von 4 Stunden pro Tag üblich, was einem Sperrfaktor von 1,2 entspricht, siehe Formel 5.

$$\text{Sperrfaktor} = \frac{24 \text{ h}}{24 \text{ h} - \text{Sperrzeit}}$$

Formel 5: Berechnung des Sperrfaktors
Quelle nach Effiziento (2011)

Der Wärmebedarf des Gebäudes muss mit der Warmwasserbereitung summiert werden und mit dem Sperrfaktor multipliziert werden, wenn in der Sperrzeit kein zweiter Wärmeerzeuger zugeschaltet wird. Meistens können auch längere Sperrzeiten ohne Einbußen des Komforts überbrückt werden, da Gebäude in Massivbauweise ein hohes Wärmespeichervermögen besitzen, vor allem bei Fußbodenheizungen. Die Leistungserhöhung durch den Sperrfaktor ist dennoch unerlässlich, weil die Speichermassen wieder aufgeheizt werden müssen.

Kriterium 3: Betrachtung der Temperaturen des Systems.

Geringe Vorlauftemperaturen sollten erzielt werden, denn mit Senkung der Vorlauftemperatur pro Kelvin werden ungefähr 2,5 % des Energieverbrauches eingespart. In Bestandsgebäuden ist oft der Fall, dass Radiatorheizungen mit höheren Vorlauftemperaturen verwendet werden. Bei Neubauten sollten unbedingt Niedertemperatursysteme zum Einsatz kommen. Für die Verwendung von Wärmepumpen muss die benötigte Vorlauf- und Rücklauftemperatur ermittelt werden. Dies kann auf zwei unterschiedliche Weisen erfolgen. Entweder wird der Wärmebedarf jedes Raumes ermittelt und der Raum mit der höchsten Temperatur gibt die maximale Vorlauftemperatur an oder es werden während der Heizperiode die Thermostatventile geöffnet und die Vor- und Rücklauftemperaturen werden so lange gesenkt, bis sich eine Raumtemperatur zwischen 20-22 °C einstellt. Über die aktuelle Vorlauftemperatur und Außentemperatur kann mittels der Abbildung 58 abgelesen werden, welches Temperaturniveau die Wärmepumpe liefern muss. Beträgt zum Beispiel die Vorlauftemperatur 50 °C bei einer Außentemperatur von minus 10 °C, so ist mit Hilfe der Abbildung ersichtlich, dass eine Niedertemperatur-Wärmepumpe eingesetzt werden kann. Würde bei derselben Außentemperatur die Vorlauftemperatur des Heizwassers über 60 °C, so müsste eine Hochtemperatur-Wärmepumpe verwendet werden.

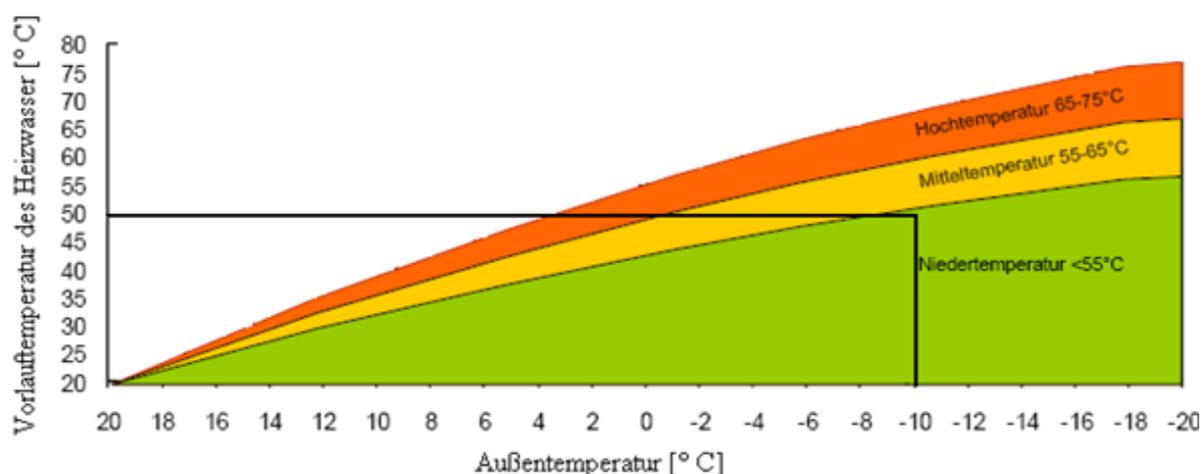


Abbildung 58: Einsatz des Temperaturniveaus bezogen auf die Außentemperatur und die Vorlauftemperatur.
Quelle gemäß Effiziento (2011)

Kriterium 4: Auswahl der Wärmepumpe

Die Effizienz der Wärmepumpe steigt um 2,8 % pro Temperaturerhöhung der Wärmequelle von einem Kelvin. Wärmepumpen mit Grundwasser als Wärmequelle erzielen die höchste Jahresarbeitszahl, gefolgt von der Erdreich-Wärmequelle und die geringste Jahresarbeitszahl besitzt die Wärmequelle Luft, jedoch weist sie auch die geringsten Investitionskosten auf und die Installation benötigt nicht so viel Aufwand. Laut Quaschnig (2006) sollte die Wärmequelle Grundwasser als erstes in Betracht gezogen werden, wegen

der höheren Jahresarbeitszahlen. Die Luft-Wärmepumpe lässt sich jedoch mit der Passiv-Bauweise gut kombinieren, da nur mehr ein geringer Wärmebedarf gedeckt werden muss und sich die Luft-Wärmepumpe sehr gut mit einer kontrollierten Wohnraumlüftung kombinieren lässt. Die Wärmequelle Erdreich kann in der monovalenten Betriebsweise gefahren werden und hat ebenfalls keine schlechten Jahresarbeitszahlen. Jedoch wird wegen Flachregistern viel Grundfläche benötigt, die nicht bebaut, sondern nur begrünt werden darf. In Städten könnte dies eher ein hemmender Faktor sein im Gegensatz zu ländlichen Gebieten, weil es in städtischen Gebieten aufgrund der dichten Besiedlung an Flächen mangelt. Daher könnten in urbanen Bereichen Tiefensonden verwendet werden, da diese weniger Fläche benötigen und überbaut werden dürfen. Jedoch muss eine Genehmigung durch das Landratsamt eingeholt werden.

In Abbildung 59 sind die Wärmequelle Wasser, Luft und Erdreich mit ihren Systemen veranschaulicht. Kriterien die unbedingt beachtet werden müssen sind im Anschluss aufgelistet.

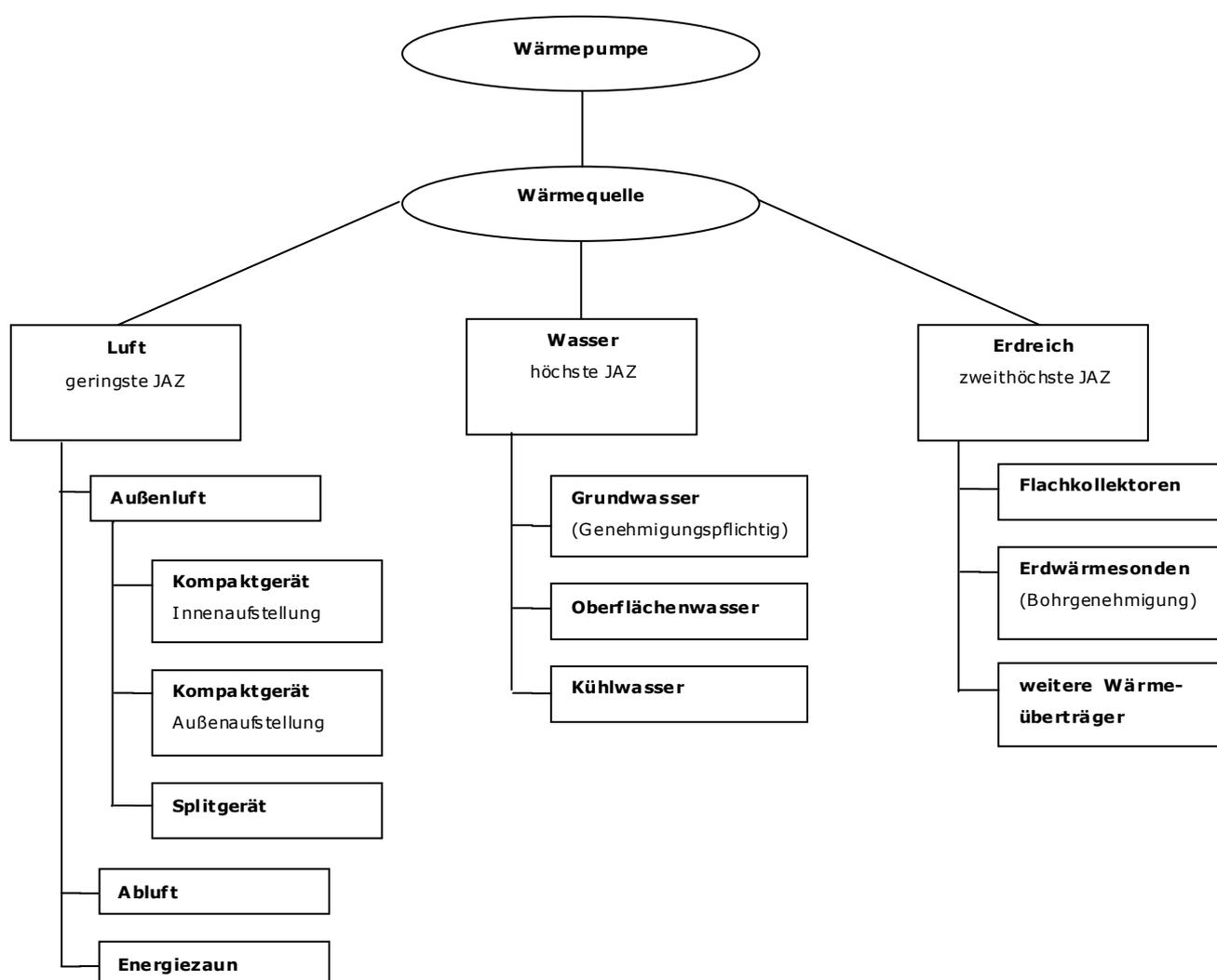


Abbildung 59: Wärmequelle Luft und Erdreich mit ihren diversen Systemarten die eingesetzt werden können. Die Abkürzung JAZ steht für Jahresarbeitszahl.

Gemäß VDI 4640 erfolgt die Darstellung der Planungskriterien der Wärmequelle Erdreich mit den Wärmeübertragungssystemen Flachkollektoren, Erdwärmesonden und anderen Formen sowie der Wärmequelle Grundwasser. Während der Recherche wurde die Richtlinie für die Wärmequelle Luft nicht gefunden, weshalb sie in diesem Abschnitt nicht beschrieben wird. Im Kapitel '3.5 Wärmepumpen' wurden jedoch die jeweiligen Systeme der Luft-Wärmepumpen anhand von Ochsner (2009) und Hartmann und Schwarzburger (2009) aufgezeigt. Bei der Wahl der Luft-Wärmepumpen sollten die im Kapitel '3.5 Wärmepumpen' erwähnten Angaben und die Herstellerangaben beachtet werden.

Wärmequelle Grundwasser mit Brunnenanlagen

In Abbildung 60 wird die Nutzung der Erdwärme mit Hilfe des Grundwassers dargestellt. Die Brunnenleistung muss eine Dauerentnahme für den Nenndurchfluss der angeschlossenen Wärmepumpe gewährleisten, welche ungefähr $0,25 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Kilowatt Verdampferleistung beträgt. Weiterhin beeinflussen die örtlichen geologischen Gegebenheiten die Brunnenleistung, somit sind vorerst Pumpversuche durchzuführen, um sicherzustellen, dass die Brunnenleistung gewährleistet wird.

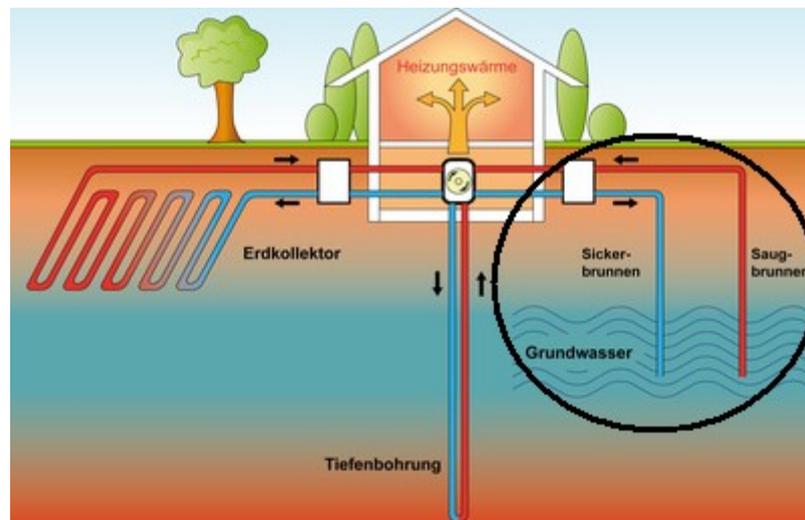


Abbildung 60: Nutzung von Erdwärme mittels Grundwasser. Quelle verändert nach <http://www.vdtuev.de/themen/Industrie/informationen-zur-pruefung-von-erdwaermesonden/> (23.01.2012)

Förderbrunnen

Der Förderbrunnen muss eine korrosionsfeste Unterwasserpumpe besitzen und vor der Wärmepumpe ist unbedingt ein Schmutzfänger einzubauen. Während der Beförderung des Grundwassers zur Wärmepumpe darf das Wasser nicht zu stark abgekühlt werden, damit die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Nutzungsanlage gering bleibt. Das in den Schluckbrunnen geförderte kältere Grundwasser darf nicht zu stark abgekühlt werden, da das Wasser ansonsten in den Rohren gefriert und die Anlage beschädigt.

Schluckbrunnen

Die Bohrung erfolgt in ausreichendem Abstand des Förderbrunnens und in Grundwasserfließrichtung. Das zurückbeförderte Grundwasser darf maximal eine Temperaturveränderung von ± 6 K aufweisen. Wird die Temperaturgrenze überschritten, gefriert das Wasser in den Rohrleitungen, wodurch die Anlage beschädigt wird. Das Fallrohr des Schluckbrunnens muss sich unter dem Ruhewasserspiegel befinden.

Hydrochemische Parameter

Besitzt das sauerstofffreie Grundwasser ein niedriges Redox-Potential und weist Spuren von Eisen und Mangan auf, so kann dies zur Verockerung führen. Dieses Grundwasser darf nicht mit der Umgebungsluft in Kontakt kommen, weshalb ein geschlossenes System errichtet werden muss, welches unentwegt unter Überdruck steht. Es gibt auch die Möglichkeit, das Wasser aufzubereiten und die Stoffe Eisen und Mangan zu entziehen. Nebenbei muss das Wasser auf Korrosionsgefahr untersucht werden, damit Bauteile nicht beschädigt werden können. Solange die Temperaturveränderungen maximal ± 6 K betragen sind Kalkausfällungen nicht von großer Bedeutung. Eine Wasseranalyse, welche die Parameter Temperatur, pH-Wert, Leitfähigkeit, Redox-Potential und O_2 -Gehalt untersucht, muss erfolgen. Über diese Parameter wird bestimmt, ob sich die Wärmequelle für die Nutzung einer Wärmepumpe eignet.

Installation

Das Bohr- und Brunnenbauunternehmen muss nach DVGW W 120 zugelassen sein. Um den Brunnenbau durchführen zu können, wird zunächst ein Schichtenprofil nach DIN 4022 und 4023 benötigt. Nebenbei sind organisatorische Vorbereitungen zu treffen, wie zum Beispiel die Sicherstellung von ausreichendem Platzbedarf für die Baustelleneinrichtung, Transportwege, etc. Die Entsorgung des Bohrgutes und der Bohrspülung, die Bereitstellung von Hilfsstoffen, Wasser und Energie müssen ebenfalls beachtet werden. Die Anforderungen an die Rohrleitungen und Armaturen sind dieselben wie bei den Erdwärmekollektoren. Wichtig ist, dass die Grundwasserleitungen in frostfreier Tiefe verlegt bzw. gedämmt werden. Außerdem darf das Grundwasser im Kreislauf nicht mit Luft in Kontakt kommen. Die Rohrleitungen müssen bevor sie an die Wärmepumpe angeschlossen werden, durchgespült und auf Dichtigkeit überprüft werden.

Wärmequelle Erdreich mit Flachkollektoren

In Abbildung 61 wird die Nutzung der Erdwärme mit Hilfe einer Erdwärmesonde dargestellt. Die maximalen Entzugsleistungen für 1800 und 2400 Betriebsstunden, welche in Kapitel '3.5 Wärmepumpen' aufgelistet wurden, gelten nur für den reinen Heizbetrieb, d.h. für die Warmwasserbereitung müssen zusätzliche Volllaststunden berücksichtigt werden. Des Weiteren gelten diese Angaben nur für einfache Fälle wie zum Beispiel für Einfamilienhäuser. Werden andere Formen von Erdreichüberträger wie Grabenkollektoren, Spiralrohre, Heat-Shunt-Kollektoren, etc. verwendet, so müssen diese für sich betrachtet werden. Für den reinen Heizbetrieb ergeben sich allgemein spezifische jährliche Entzugsarbeiten zwischen 50-70 kWh/(m²a). Zu beachten ist, dass die Temperatur des in dem Kollektor zurückfließenden Wärmeträgermediums gegenüber der ungestörten Erdreichtemperatur maximal ± 12 K beträgt.

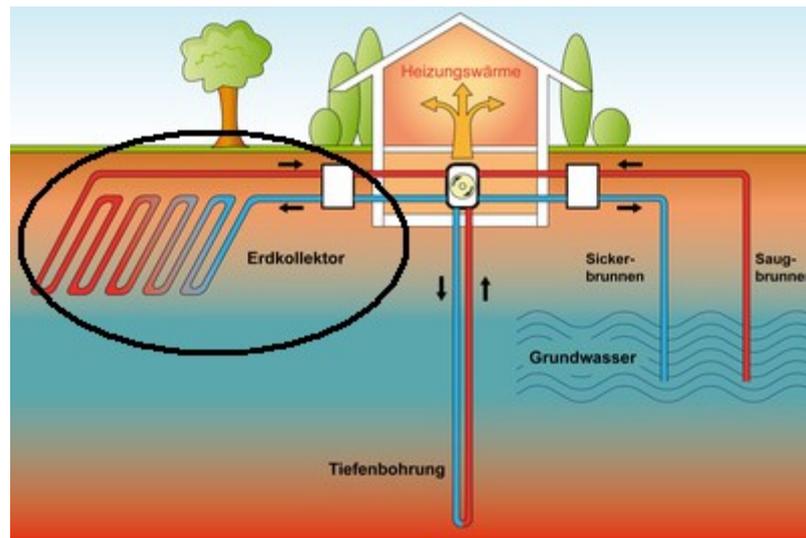


Abbildung 61: Nutzung von Erdwärme mittels Flachkollektoren. Quelle nach [http://www.vdtue.v.de/themen/Industrie/informationen-zur-pruefung-von-erdwaemesonden/\(23.01.2012\)](http://www.vdtue.v.de/themen/Industrie/informationen-zur-pruefung-von-erdwaemesonden/(23.01.2012))

Installation

Die Regeneration des oberflächigen Bodens erfolgt über Luftbewegungen, Regen und Sonnenstrahlung. Überbauungen und Versiegelungen der Erdoberfläche würden die Regeneration des Bodens hemmen. Daher darf in dem Areal, wo Flachkollektoren verlegt wurden, die Oberfläche des Bodens keinesfalls überbaut oder versiegelt werden. Unter Umständen kann die Verlegung von Flachkollektoren wasserrechtlich genehmigungspflichtig sein.

Die Verlegung der Kollektoren erfolgt in einer Tiefe zwischen 1,2 und 1,5 m, denn in 1 m Tiefe kann auch ohne Wärmeentzug der Gefrierpunkt erreicht werden und in einer Tiefe von 2 m liegt die minimale Temperatur bei 5 °C. Der Verlegeabstand zueinander beträgt 0,3 bis 0,8 m, damit sich bei Eisbildung, um die Rohre, die Schichten nicht miteinander verbinden können. Die Verlegedichte der Kollektoren hängt von den dimensionierten Rohren ab, wobei die maximalen Entzugsleistungen nicht überschritten werden dürfen. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass kalte Anlagenteile im Untergrund zu Ver- und Entsorgungsleitungen einen Abstand von etwa 70 cm einhalten. Die Rohrleitungen sind in Sand einzubetten und zirka 30 cm oberhalb muss ein Warnband verlegt werden. Bei der Wiederbefüllung der Kollektorfläche muss der Untergrund entsprechend verdichtet werden.

Alle Bauteile müssen Korrosionsfest sein, da Taubildung entstehen kann, während freiliegende Geräte und Leitungen UV-beständig sein müssen. Als Wärmeübertragungsrohre werden meistens Kunststoffrohre eingesetzt, welche in parallel geschaltete Kreise verlegt werden sollten und am höchsten Punkt der Anlage sollte sich ein Verteiler und Sammler bzw. eine Entlüftungsstation befinden. Die jeweiligen Kreise sind mit Ventilen zu versehen, damit die Regulierung und im Notfall eine Absperrung erfolgen kann. Von großer Bedeutung ist, dass die Wärmeüberträgerkreise gleichmäßig durchströmt werden.

Wärmequelle Erdreich mit Direktverdampfung

Bei einer Direktverdampfung, siehe Abbildung 62, zirkuliert das Arbeitsmittel der Wärmepumpe auch im Kreis des Wärmeübertragungssystems. Dadurch entfallen weitere Übertragungsverluste, jedoch muss darauf geachtet werden, dass keine Leckagen entstehen. Für die Verwendung der Direktverdampfung sollten nur Erdwärmekollektoren eingesetzt werden. Hier müssen die Rohrlängen und -durchmesser stärker ausgelegt werden. Die verwendeten Materialien müssen korrosionsfest sein, sowie chemische, thermische und mechanische Beanspruchungen standhalten. Die Verdampferrohre bestehen aus Kupfer mit einem 1 mm nahtlosen Kunststoffmantel. Sie besitzen einen Durchmesser von 8, 12 oder 15 mm und sind 75 mm lang. Die Kollektorrohre sind oberhalb des Grundwasserspiegels zu verlegen und die einzelnen Rohrkreise sollten möglichst gleiche Strömungswiderstände aufweisen. Gedämmte Venturi-Verteiler und Magnetventile in der Flüssigkeitsleitung müssen zum Einsatz kommen. Die Magnetventile trennen den Verdampfer von der Wärmepumpe, bei Stillstände oder wenn Niederdruck im Verdampfer herrscht. Die Installation ist von einem qualifizierten Fachpersonal einer kältetechnischen Firma durchzuführen.

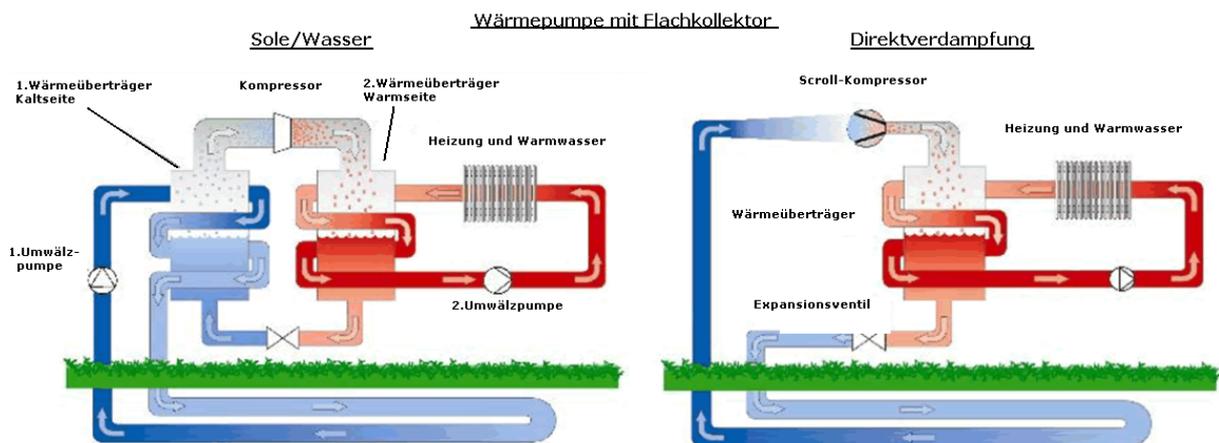


Abbildung 62: Funktionsprinzip einer Sole/Wasser-Wärmepumpe (rechts) und einer Wärmepumpe mit Direktverdampfung. Quelle nach <http://www.kollar.at/inhalte/waerme/waermepumpe/direktverampfer.html> (23.01.2012)

Wärmequelle Erdreich mit Erdwärmesonden

Erdwärmesonden (Abbildung 63) werden in das Erdreich vertikal, häufig in einer Tiefe von 10 bis 200 m verlegt, können aber auch bis zu 400 m tief ins Erdreich langen. Ab einer Tiefe von 100 m ist eine Genehmigung erforderlich. Das Wärmeüberträgermedium, welches in die Erdwärmesonde zurückgeleitet wird, sollte im Dauerbetrieb im Vergleich zur ungestörten Erdreichtemperatur maximal ± 11 K und bei Spitzenlasten maximal ± 17 K betragen. Ein laminarer Fluss des Wärmeträgermediums in der Erdwärmesonde sollte verhindert werden. Um den Wärmeübergang zwischen dem Erdreich und der Sonde zu gewährleisten muss eine Verfüllung mit gutem Wärmeübergang erfolgen. Die spezifische jährliche Entzugsarbeit liegt zwischen 100-150 kWh/(m²a) für den reinen Heizbetrieb von 30 kW. Die maximalen Entzugsleistungen sind dem Kapitel '3.5 Wärmepumpen' zu entnehmen. Diese gelten für den reinen Heizbetrieb und für einfache Fälle wie Einfamilienhäuser.

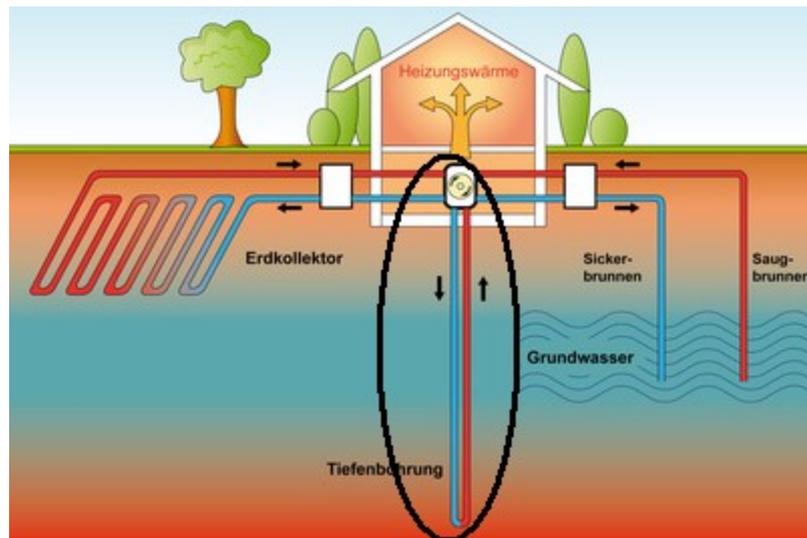


Abbildung 63: Nutzung von Erdwärme mittels Erdwärmesonden. Quelle nach <http://www.vdtue.v.de/themen/Industrie/informationen-zur-pruefung-von-erdwaermesonden/> (23.01.2012)

Installation

Um eine Erdwärmesonde zu verlegen, muss zunächst eine Genehmigung nach Wasserecht angesucht werden. Die Sonden müssen zu Gebäuden mindestens 2 m entfernt sein. Die Materialien müssen korrosionsbeständig sein und eine lückenlose und vollständige Verfüllung vom Sondenfuß bis zur Oberfläche muss gewährleistet werden, damit eine gute Wärmeübertragung bei Wärmeentzug oder Wärmeeinspeisung erfolgt. Das Bohrloch muss abgedichtet werden, um Schadstoffe nicht einzutragen. Ebenfalls müssen Lufteinschlüsse und Hohlräume vermieden werden. Das Verfüllmaterial muss frostsicher sein. In der Praxis werden oft Bentonit Suspensionen verwendet. Durch die Zugabe von Zement erhöht sich die Frostbeständigkeit und die Beifügung von Quarzsand steigert die Wärmeleitfähigkeit.

Weitere Formen von Erdwärmesonden sind Schrägsonden. Die starkwandigen Stahlrohre werden in den Untergrund gerammt. Hier wird keine Verfüllung gemacht, jedoch wird ein kathodischer Korrosionsschutz benötigt. Die Arbeiten müssen von einer Spezialfirma durchgeführt werden. Normale Erdwärmesonden können ebenfalls in schräge Bohrungen eingebracht werden, wobei die zuvor im Kapitel '3.5 Wärmepumpe' beschriebenen Anforderungen der vertikalen Erdwärmesonden gelten.

Die Leitungsverlegung der Sonden erfolgt in parallel geschalteten Kreisen. Am höchsten Punkt der Anlage befindet sich der Verteiler und ein Sammler bzw. eine Entlüftungsstation. Ebenso sind Ventile für die Absperrung und Regulierung erforderlich und die Erdwärmesonden müssen gleichmäßig durchströmt werden. An zentraler Stelle des Rohrsystems sollte sich eine Entgasungsstation befinden. Das geschlossene System wird mit maximal 3 bar Betriebsdruck betrieben. Über ein Membrandehnungsgefäß werden Volumenänderungen ausgeglichen. Ein Sicherheitsventil dient, um Überfüllungen in eine Wanne auszublasen. Weiters wird ein Manometer mit minimaler und maximaler Anzeige benötigt und die Überwachung von Leckagen muss mit Hilfe von optischen und akustischen Signalen erfolgen.

Das Wärmeträgermedium ist ein Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel. Zu beachten ist, dass die Sonde nur mit dem fertigen Gemisch befüllt wird. Die Temperatur des Gemisches muss mindestens 7 K unter der geringsten Verdampfungstemperatur sein. Bei richtiger Dimensionierung der Erdwärmesonde beträgt dieser Wert -18 °C . Wichtig ist, dass eine Spülung der Sonde gewährleistet wird, damit sich keine Luft in den Rohren befindet. Vor der Inbetriebnahme muss eine Druckprobe mit 1,5-fachem Betriebsdruck erfolgen, sowie die Überprüfung aller Bauteile.

Wärmequelle Erdreich mit weitere Wärmeüberträger

Grabenkollektoren

Dafür werden Gräben mit schrägen Wänden ausgehoben. Diese können über 3 m tief sein. Mit Hilfe von Halteleisten werden Kunststoffrohre an die Wandfläche in einem 10 cm Abstand verlegt (Abbildung 64). Danach wird der Graben wieder verfüllt.



Abbildung 64: Darstellung von Grabenkollektoren. Quelle: <http://www.elektroheinle.com/referenz.html> (links), <http://www.nick-leonberg.de/grabenkollektor.htm> (in der Mitte) und <http://www.elektrotechnik-held.de/erdkollekt.htm> (23.01.2012) (rechts)

Spiralkollektoren

Es gibt zwei Arten von Spiralkollektoren (Abbildung 65). Zum einen die SLINKY-Kollektoren, welche bisher in Europa noch nicht eingesetzt wurden und zum anderen SVEC-Kollektoren, die überwiegend in Nordamerika verwendet werden. Die Kunststoffrohrrolle wird auf dem Grabenboden gelegt und seitlich auseinander gezogen, so dass sich die Windungen jeweils überlappen. Danach wird der Graben wieder verfüllt. Pro kW Wärmepumpenheizung werden 5-6 m Grabenlänge benötigt.



Abbildung 65: Darstellung von Spiralkollektoren. Quelle: <http://www.haustechnikdialog.de/SHKwissen/1194/Spiralkollektor> (links) und <http://www.supergruen.at/Produktkatalog/Erdwaerme-Geothermie/SG-Spiralkollektor/>(23.01.2012) (rechts)

Koaxialbrunnen

Ein Koaxialbrunnen ist eine Kombination aus dem System Erdwärmesonde und Grundwasser. In einer Erdbohrung ist ein Steigrohr, welches am Ende einen Filter aufweist, von einer Kiespackung umgeben. Die Unterwassertauchpumpe im Steigrohr fördert das Wasser zur Wärmepumpe und über die Kiespackung im Ringraum wird das Wasser wieder abgegeben. Da keine Abtrennung zum natürlichen Boden erfolgt, darf kein Frostschutzmittel zum Einsatz kommen. Die Verdampfer Temperatur darf nicht unter 3 K absinken, weshalb tiefe Brunnen mit einer Tiefe von 100 bis 250 m benötigt werden. Im Vergleich zur Erdwärmesonde haben Koaxialbrunnen im reinen Heizbetrieb höhere Kosten.

8. Zusammenfassung

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Schulgebäude durch entsprechende bauliche Sanierungsmaßnahmen, sowie die gleichzeitige Verwendung von nachhaltigen Technologien und den Einsatz von erneuerbaren Energieträgern, ein Plusenergie-Niveau erzielen können. Um einerseits den Nutzerkomfort für Lehrer- und SchülerInnen zu verbessern und andererseits einen Beitrag zum Umweltschutz zu leisten, sollte dieses Niveau bei einer Sanierung angestrebt werden. So wird zum Teil die Freisetzung von Treibhausgasemissionen reduziert und Energie auf Basis erneuerbarer Energieträgern wird in das öffentliche Netz eingespeist. Der Trend in Richtung dezentrale Energieerzeugungsanlagen erschwert die Regelung und Aufrechterhaltung des Energieversorgungsnetzes. Die Lösung dieses Problems könnten die zurzeit erforschten Smart Grids sein. Ziel ist es, alle Akteure (de-/zentrale Erzeuger, Verbraucher, Speicher,...) miteinander effizient zu verbinden. Dezentrale Energieerzeuger wie zum Beispiel Plusenergieschulen könnten genutzt werden um das Versorgungsnetz zu unterstützen.

Um in den Schulen den Nutzerkomfort zu verbessern und das Wohlbefinden der Kinder sicher zu stellen, müssen zwei wichtige Kriterien erfüllt werden. Zum einen wäre die Verwendung von, für Passivgebäude zertifizierte, Fenstern und zum anderen eine kontrollierte Lüftungsanlage. Durch die Verwendung von zertifizierten Passivgebäude-Fenstern wird neben der Reduzierung des Energiebedarfs auch das Wohlbefinden der SchülerInnen gesteigert. Diese Fenster besitzen gegenüber herkömmlichen Fenstern eine höhere Oberflächentemperatur, weshalb keine „kalten Abstrahlungen“ der Fensterflächen erfolgen. Des Weiteren führen die in den bestehenden Schulgebäuden undichten Fenstern zu Luftzügen. Vor allem im Winter senkt sich bei den herkömmlichen Fenstern ein kalter Luftvorhang zum Boden. Kinder die nahe an den Fenstern sitzen, bekommen daher die kalte Luftfront und die warmen Heizungsstrahlen ab, das kann zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen wie Erkältungen führen. Des Weiteren ist in Schulen ein hygienischer Grundluftwechsel von Nöten, denn die hohe Belegungsdichte von SchülerInnen pro Raum und die unzureichende Stoßlüftung über die Fenster, führen zu einer erhöhten CO₂-Konzentration in kürzester Zeit. Dies hat zur Folge, dass die Müdigkeit der SchülerInnen zunimmt, während die Aufmerksamkeit und Konzentrationsfähigkeit sinken. Ist die CO₂-Konzentration im Raum geringer als 800 ppm, so entspricht dies einer hohen Luftqualität (Greml et.al, 2008). Liegt der CO₂-Gehalt über 1000 ppm, so ist die Luft als schlechte Luft einzustufen (Steiger und Hellwig, 2011). Die Empfehlung für Schulen für die Luftmenge in m³/(h Person) liegt zwischen 15-20 (Kah et al, 2010). Eine ausreichende Luftqualität kann mittels natürlicher Lüftung gewährleistet werden, jedoch müsste des Öfteren während der Unterrichtszeit sowie in den Pausen gelüftet werden. Dessen ungeachtet sollte in jeder Schule eine kontrollierte Lüftung als Grundausstattung vorhanden sein, um die Energieeffizienz aufrechtzuerhalten.

Um eine positive Energiebilanz zu erzielen muss der Energiebedarf so niedrig wie möglich sein. Ein geringer Wärmeverbrauch kann durch eine geeignete thermische Isolierung erzielt werden, denn der Einsatz von Dämmmaterialien mit hohen Dämmwerten und die Verwendung von entsprechenden Fenstern und Türen führen zu einer dichten Gebäudehülle. Dadurch wird der Energiebedarf zur Erzeugung von Wärme reduziert. Neben

der Verminderung des Wärmebedarfs ist auch die Reduktion des Stromverbrauches von großer Bedeutung. Bei der Recherche wurde ersichtlich, dass der Strombedarf einer Schule zum Beispiel mit Hilfe eines ausgeklügelten Lichtkonzeptes verringert werden kann. Die Nutzung des Tageslichtes, die Verwendung von energiesparenden Lampen und der Gebrauch von Anwesenheits- und Tageslichtsensoren sowie Sonnenschutzsysteme tragen zu einem stromsparenden Lichtkonzept bei. Nachdem der Energiebedarf sowohl durch bauliche Sanierungsmaßnahmen als auch durch die Verwendung von energiesparenden Systemen so gering wie möglich gehalten wird, müssen im nächsten Schritt nachhaltige und erneuerbare Energien eingesetzt werden. So lässt sich ein Teil des benötigten Energiebedarfs der Schule decken oder sogar zu einem späteren Zeitpunkt Energie im Überschuss produzieren. Verschiedenste nachhaltige Technologien können eingesetzt werden, um im Gebäude ein Plusenergie-Niveau zu erreichen.

Plusenergie wird nur dann erreicht, wenn erneuerbare Energiesysteme die Aufgaben zur Bereitstellung von Wärme und Strom übernehmen. Für die Sanierung von Schulbauten sind vor allem die Systeme Photovoltaik, Solarthermie, Photovoltaik-Solarthermie-Hybride und Wärmepumpe von großem Belangen. Sie verbessern die Energieeffizienz des Gebäudes und nutzen, im Vergleich zu anderen nachhaltigen Systemen, die Umgebungsenergie direkt, welche allen ausreichend zur Verfügung steht. Zudem setzen diese Technologien während des Betriebes keinerlei Treibhausgasemissionen frei. Dies wirkt sich positiv auf den Klimaschutz aus. Werden diese Technologien verwendet, um den Energiebedarf bereitzustellen, so ist bei der Planung der Systeme auf die richtige Auslegung zu achten, damit sie die bestmöglichen Leistungen erzielen. Als Instrumentarium für die Anwendung und Planung der jeweiligen Technologien dienen die in dieser Arbeit erstellten Fließdiagramme und Checklisten. Mit Hilfe dieser Illustrationen wird aufgezeigt, welche Systeme der jeweiligen Technologien zum Einsatz kommen können und was bei ihrer Auslegung unbedingt beachtet werden sollte.

9. Ausblick

Im Gegensatz zu Deutschland weist Österreich bisher noch keine Plusenergieschulen auf. Deutschland besitzt im Förderkonzept „Energieoptimiertes Bauen (EnOB)“ einen Forschungsschwerpunkt „Energieeffiziente Schule (Eneff:Schule)“. Im Projekt „Eneff:Schule“ werden Schulen durch gezielte Sanierungen auf unterschiedliche Niveaus (Plusenergie, Niedrigenergie, usw.) gebracht. In Österreich gibt es bundeslandweit nur teilweise Förderungen für Schulsanierungen, wie zum Beispiel das „Substanzsanierungsprojekts Schulen Wien“ (SUSA). Mit Hilfe dieses Schulsanierungspakets können in Wien an 242 allgemein bildenden Pflichtschulen Substanz erhaltende Maßnahmen (Austausch von Fenstern, etc.) durchgeführt werden (<http://www.wien.gv.at/verwaltung/schulen/schulsanierung.html>/(20.04.2012)). Aufgrund der hohen Kosten, die bei einer entsprechenden Sanierung anfallen, bleiben Schulen häufig im alten Bestand oder werden nur zum Teil saniert (Fenster austausch, usw.). Um entsprechende Schulsanierungen zu ermöglichen, muss das Land Österreich zielgerechte Förderprogramme errichten.

Die Energiebilanzierung zum Plusenergie-Niveau stellt zurzeit noch ein Problem dar, weil es nach derzeitigem Stand der Forschung keine einheitliche Definition und Berechnungsmethoden gibt. Es besteht Forschungsbedarf in der Analyse zum Plusenergie-Niveau, um eine klare Definition sowie eine einheitliche und sinnvolle Bilanzierungsmethode zu erarbeiten. Nur so können Gebäude national und international miteinander verglichen werden.

Fakt ist, dass in einem Plusenergiegebäude mehr Energie produziert werden muss, als das Gebäude tatsächlich verbraucht. Inwiefern dieser Energieüberschuss erzielt wird, welche Faktoren berücksichtigt werden sollten und wie die Bilanzgrenze am besten gesetzt wird, müssen im Detail noch bestimmt werden.

Der Ansatz zur Berechnung der Plusenergie sollte mit der Endenergie vollzogen werden, unter Berücksichtigung der primärenergetischen Betrachtung, damit nachhaltige Systeme sinnvoll eingesetzt werden. Bei der primärenergetischen Bilanzierung ist zu beachten, dass sich im Moment die normativ angesetzten Primärenergiefaktoren ausschließlich auf den nicht erneuerbaren Anteil der Primärenergie beziehen. Dementsprechend werden zum Beispiel Gebäude mit Biomasseheizung aufgrund des niedrigeren Primärenergiefaktors für Biomasse begünstigt, obwohl die zu erwartende Verknappung der Ressource Biomasse nicht berücksichtigt wird. Derartige Faktoren, wie die zu erwartende Verknappung von Biomasse, sollten in die Berechnung zum Plusenergie-Niveau mit einfließen. Bezogen auf den Klimaschutz sollte die CO₂-Bilanzierung des Gebäudes der primärenergetischen Berechnung vorgezogen werden. Es muss darauf geachtet werden, dass geringe Emissionen während des Betriebes anfallen. Genauso sollte die graue Energie berücksichtigt werden, damit Systeme und Bauelemente verwendet werden, die bei der Herstellung, Entsorgung und Transport geringe Mengen von Treibhausgasen freisetzen. Nicht nur das Gebäude sollte als Bilanzraum angesehen werden, sondern auch Gebiete über die Grundstücksflächen hinaus, da die Gebäude mit dem Versorgungsnetz verbunden sind und von diesem Energie beziehen sowie in das Netz einspeisen. Ob mit dieser Betrachtung ein Plusenergie-Niveau wirtschaftlich erzielt werden kann, muss an anderer Stelle untersucht werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Entwicklung der untersuchten nachhaltigen Systeme. Bei der Photovoltaik und Solarthermie muss nach neuen Ausgangsmaterialien geforscht werden und neue Herstellungsverfahren gefunden werden, um einerseits die Effizienz der Anlagen zu steigern und andererseits die Kosten der Anlagen zu reduzieren. Weiters wird auf das Design der Solarmodule und -kollektoren großen Wert gelegt, denn die ästhetischen Vorstellungen der NutzerInnen stehen immer mehr im Vordergrund und spielen daher eine entscheidende Rolle, ob die Systeme in der Realität zum Einsatz kommen. Besonders die Einbindung in historische Gebäude stellt nicht nur ästhetisch sondern auch technisch eine Herausforderung dar. In urbanen Gebieten herrscht vor allem eine große Nachfrage nach einer sinnvollen Gebäudeintegration der beiden Technologien, wobei neben den Dachflächen die Nutzung der Fassadenflächen von Bedeutung sind. Bei den Wärmepumpen liegt das Ziel in der Erhöhung der Jahresarbeitszahlen und einer sinnvollen Kombination von Solarthermie und Photovoltaik. Die Lüftung muss hinsichtlich der Wärmerückgewinnung untersucht werden, damit die Abwärme so gut wie möglich genutzt werden kann. Auch der Bedarf an Strom für die Wärmepumpe und die Lüftung muss noch weiter reduziert werden und stellt deshalb einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung der Systeme dar. Neben den Verbesserungen der jeweiligen einzelnen Technologien muss die Gebäudetechnik auf Systemkombinationen abgestimmt sein, damit das Gebäude ideal mit Energie versorgt wird.

Zum Schluss dieser Arbeit kann nur nochmals erwähnt werden, dass bei einer Schulsanierung Plusenergie-Niveau erreicht und angestrebt werden sollte. Denn dadurch wird ein Teil zum Klimaschutz beigetragen und die Gebäude können als Energielieferanten dienen. Ein wesentlicher Aspekt bei der Sanierung ist die Sicherstellung des Nutzerkomforts, damit SchülerInnen während der Unterrichtszeit hohe Konzentration- und Aufmerksamkeitsfähigkeiten besitzen, um gute Leistungen zu erzielen.

10. Literatur- und Quellenangaben

- Amann C., Rammerstorfer, J., Wirth, D., Fiebinger, M., Oettl, F., Hanninger, G., Obermayer, J., Hanic, R. 2010. Thermisch-energetische Sanierung eines Gründerzeitgebäudes in Wien. Machbarkeitsstudie für das Demonstrationsprojekt „David's Corner“ im Rahmen des Leitprojekts „Gründerzeit mit Zukunft“. BMVIT. e7 Energie Markt Analyse GmbH.
- Architekturjournal. 2010. Wettbewerbe. Architekturjournal. 34. Jahrgang. Februar/März. 283/284
- Ayoub, J. ohne Jahreszahl.. SHC Task 40/ ECBCS Annex 52. Towards Net-Zero Energy Solar Buildings
- Behrendt, S., Erdmann, L., Marwede, M., Caporal, S. 2010. Roadmap: Ressourceneffiziente Photovoltaik 2020+ (Arbeitspaket 9 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)). Ressourceneffizienz Paper 9,1. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Wuppertal.
- Bosnic, D. 2010 E-Mail Schriftverkehr am 07. Nov. 2011
- Charalambous, P.G., Maidment, G.G., Kalogirou, S.A., Yakoumetti, K. 2007. Photovoltaic thermal (PVT) collectors: A review. Applied Thermal Engineering 27. 275–286
- Davidsson, H., Peres, B., Karlsson, B. 2010. Performance of a multifunctional PV/T hybrid solar window. Solar Energy 84. 365–372
- Davidsson, H. 2010. System analysis of a PV/T hybrid solar window. Division of Energy and Building Design. Department of Architecture and Built Environment. Lund University. Faculty of Engineering LTH, 2010. Report EBD-T--10/11
- Davidsson, H. 2012. E-Mail Schriftverkehr am 17. Jan.2012
- Djaili Mariam. 2012. E-Mail Schriftverkehr am 13. Jan.2012
- Ecobauconsulting, 2011. U.S. Green Building Council LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). [www.ecobauconsulting.de/leed-zertifikat.html/\(24.11.2011\)](http://www.ecobauconsulting.de/leed-zertifikat.html/(24.11.2011))
- Effiziento. 2011. Projektierungshandbuch. Wärmepumpe - Lüftung – Heizung. Effiziento Haustechnik GmbH. [http://www.effiziento.de/fileadmin/Download/PH_HTZ_LI_LG_PS_Zubehoer.pdf/\(24.11.2011\)](http://www.effiziento.de/fileadmin/Download/PH_HTZ_LI_LG_PS_Zubehoer.pdf/(24.11.2011))
- Ertext Solar GmbH. 2010. GIPV. Gebäude Integrierte Photovoltaik. Das Magazin für individuell gefertigte Photovoltaik-Module zur architektonischen Gebäudeintegration.
- Europäisches Parlament und der Rat 2010. Richtlinie 2010/31/EU Des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung).
- Greml, A., Blümel, E., Gössler, A., Kapferer, R., Leitzinger, W., Suschek-Berger, J., Tappler, P. 2008. Evaluierung von mechanischen Klassenzimmerlüftungen in Österreich und Erstellung eines Planungsleitfadens. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Hagemann, 2002: Hagemann, I.B. 2002. Gebäudeintegrierte Photovoltaik. Architektonische Integration der Photovoltaik in die Gebäudehülle. 2002. Müller. Köln. 433 p.
- Haller, M.Y., Elimar, F. 2010. Kombination von Wärmepumpen mit solarthermischen Kollektoren-Konzepte und Fragestellungen. 16. Status-Seminar „Forschen und Bauen im Kontext von Energie und Umwelt“. ETH Zürich.

- Haller, M., Frank, E., Trinkl, C., Zörner, W. 2010. Systematische Gliederung der Systemkombination von solarthermischen Anlagen und Wärmepumpen. 20. OTTI Symposium Themische Solarenergie. http://www.solarenergy.ch/fileadmin/daten/publ/haller2010_WPsolar.pdf(23.11.2011)
- Haines, J. 2008. Automatische Fehlererkennung in netzparallelen Photovoltaik-Anlagen. Universität Kassel
- Hartmann, F., Schwarzburger, H. 2009. Systemtechniken für Wärmepumpen. Solar- und Umweltwärme für Wohngebäude. Hütling & Pflaum Verlag. München/Heidelberg. 320 p.
- Haas, R., Stieldorf, K., Wilk, H., López-Polo, A., Faninger, G. 2003. Photovoltaik in Gebäuden (IEA Task 7). Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Wien. 162 p.
- HdZ, 2010: Best-of „Haus der Zukunft“ 2010. Das „Plusenergiegebäude“. Definition, Methodik und Kriterien. http://www.oegut.at/downloads/pdf/hdz-plus_presentation_geier.pdf (02.11.2011)
- Hernandez, P., Kenny, P. 2010. From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). *Energy and Buildings* 42. 815–821
- Huber, H., Köfinger, C., Em, Studer, H., Haage, U., Wieshammer, G., Zivkovic, M., Wenzel, W.W. 2006. Wärmepumpen, Erdkollektoren, Garten- und Wohnqualität. Endbericht 3
- Ibrahim, A., Othman, M.Y., Ruslan, M.H., Mat, S., Sopian, K. 2011. Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15. 352–365
- IWR, 2011. Checkliste: Planung einer Solarthermie-Anlage (Solarwärme, Warmwasser, Heizungsunterstützung). www.iwr.de/solar/erricht/solarthermie.html/ (24.11.2011)
- Kah, O., Schulz, T., Winkel, S., Schneiders, J., Bastian, Z., Kaufmann, B. 2010. Leitfaden für energieeffiziente Bildungsgebäude. Passivhaus Institut.
- Kalogirou, S.A., Tripanagnostopoulos, Y. 2007. Industrial application of PV/T solar energy systems. *Applied Thermal Engineering* 27. 1259–1270
- Klima, M., Reiß, J., Erhorn, H., Fluch, M. 2006. Gebäude sanieren - Schulen. Themeninfo I/06. Bine Informationsdienst. Karlsruhe.
- Komfortlüftung, 2010: Luftleitungen. www.komfortlüftung.at/index.php?id=1673/ (1.12.2011)
- Krawietz, S. A. 2003. Gebäudeintegration von Photovoltaik (GIPV) in Europa. Technische Universität Darmstadt.
- Leven, B., Neubarth J., Weber, C. 2001. Ökonomische und ökologische Bewertung der elektrischen Wärmepumpe im Vergleich zu anderen Heizungssystemen. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung. Stuttgart1. ISSN 0938-1228. Band 80
- Lugmaier, A., Brunner, H., Prügler, W., Glück, N., Kupzog, F., Fechner, H., Tauschek, U., Rieder, T., Derler, K., Mühlberger, T. 2012. Roadmap. Smart Grids Austria. [http://www.smartgrids.at/temine-downloads/\(7.4.2012\)](http://www.smartgrids.at/temine-downloads/(7.4.2012))
- Marko, A., Braun, P. 1997. Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden. Für Ingenieure und Architekten. Springer Verlag. Heidelberg. 445 p.
- Marszal, A.J., Bourelle, J.S., Musall, E., Heiselberg, P., Gustavsen, A., Voss, K. ohne Jahreszahl. Net Zero Energy Buildings. Calculation Methodologies versus National Building.
- Marszal, A.J., Heiselberg, P., Bourelle, J.S., Musall, E., Voss, K., Satori, I., Napolitano, A. 2011. Zero nergy Buildings (A review of definitions and calculation methodologies). Elsevier. *Energy and Buildings*.
- Musall, E., Weiss, T., Voss, K., Lenoir, A., Donn, M., Cory, S., Garde, F. ohne Jahreszahl. Net Zero Energy Solar Buildings. An Overview and Analysis on Worldwide Building Projects.

- Myhrvold A.N., Olsen E., Lauridsen O. 1996. Indoor environment in schools – pupils health and performance in regard to CO₂ concentration. Institute of Public Health. Vol. 4
- Netzwerk-Energieberater, 2011: A/V-Verhältnis. [www.netzwerk-energieberater.de/wiki/A/V-Verh%C3%A4ltnis/\(30.11.2011\)](http://www.netzwerk-energieberater.de/wiki/A/V-Verh%C3%A4ltnis/(30.11.2011))
- Neuhofer, W. 204. Technologiebewertung von dezentralen Erzeugungseinheiten. Fachhochschule Kapfenberg.
- Ochsner, K. Wärmepumpen in der Heizungstechnik. Praxishandbuch für Installateure und Planer. 2009. C.F. Müller. Heidelberg. 250 p.
- Ökosan, 2011. Ökosantagung. Österreicher, D. Dubisch, F. AIT Austrian Institut of %Technology GmbH. ENergy Department. Austria
- ÖWAV-Regelblatt 209. 2009. Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrundes-Heizen und Kühlen. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband. Wien
- PHI, 2005. Passivhauskurs. Passivhaus Definition. Passivhaus Institut Darmstadt. [http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Passivhaus_Definition.html/\(02.11.2011\)](http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Passivhaus_Definition.html/(02.11.2011))
- PHI, 2006. Luftdichtheit vermeidet Bauschäden. Passivhaus Institut Darmstadt. [http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/luftdicht_06.html/\(02.11.2011\)](http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/luftdicht_06.html/(02.11.2011))
- PHI, 2010. Passivhausfenster. Höchste Qualität bei transparenten Bauteilen. . Passivhaus Institut Darmstadt. http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/PassivhausFenster_06.htm
- PHI, 2011. E-Mail Schriftverkehr und persönliches Gespräch mit Dipl.-Ing Sören Peper am 27.10.2011
- Quaschnig, 2010: Quaschnig, V. 2010. Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hintergründe Techniken Anlageplanung Wirtschaftlichkeit. Carl Hanser Verlag. München. 337 p.
- Quaschnig, 2011. Renaissance der Wärmepumpe. Sonne Wind & Wärme 09/2006. 28-31 p. www.volker-quaschnig.de/artikel/waermepumpe/index.php/ (23.11.2011)
- Rolf, B. 2011. E-Mail Schriftverkehr am 28. Oktober 2011
- Sartori, I., Napolitana, A., Marszal, A.J., Pless, S., Torcellini, P., Voss, K. ohne Jahreszahl. Criteria for Definition of Net Zero Energy Buildings.
- Schnauss, M., 2008. Große Solarmwämeanlagen für Gebäude. Sonne liefert warmes Wasser und unterstützt die Raumheizung. Bine Informationsdienst. Karlsruhe.
- Schuß, M. 2004. Life-cycle-Analyse von Passivhäusern. Technischen Universität Wien.
- Solarserver, 2011. Sonnenkollektoren: Typen und Einsatz. [www.solarserver.de/wissen/basiswissen/kollektoren.html/\(5.10.2011\)](http://www.solarserver.de/wissen/basiswissen/kollektoren.html/(5.10.2011))
- SolarDoc, 2010. SolarDoc. Planungen, Gutachten, Seminare, Hybridkollektoren. [www.solardoc.at/\(1.12.2011\)](http://www.solardoc.at/(1.12.2011))
- Statistik Austria, 2001. Arbeitsstättenzählung 2001. [http://www.statistik.at/blickgem/az2/b0.pdf/\(10.1.2012\)](http://www.statistik.at/blickgem/az2/b0.pdf/(10.1.2012))
- Steiger, S., Hellwig, R.T. 2011. Hybride Lüftungssysteme für Schulen. Abschlussbericht zum Förderkennzeichen AZ 0327387A. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Stuttgart.
- Treberspurg, M., 1999. Neues Bauen mit der Sonne. Ansätze zu einer klimagerechten Architektur. Springer-Verlag. Wien. 2. Auflage

- Treberspurg, M., Smutny, R. 2007. Nachhaltigkeits-Monitoring des Passivhausstudentenheims Molkereisstrasse (Projekt NaMoMo). Wissenschaftliche Evaluierung von NutzerInnenzufriedenheit, Energieperformance und Klimaschutzbeitrag von gemeinnützigen Wiener Wohnbauten in Passivhausstandard am Beispiel des Passivhaus-Studentenheims Molkereistraße in Wien. Endbericht.
- VDI-Richtlinien. 2011. Themische Nutzung des Untergrundes. Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. VDI 4640 Blatt 2. Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf
- Verband der Elektrotechnik. Elektronik Informationstechnik e.V. 2012. Die deutsche Normungsroadmap. E-Energy/Smart Grid. <http://www.dke.de/de/std/kompetenzzentrame-energy/aktivitaeten/seiten/deutschenomungsroadmap-energy-smartgrid.aspx>(7.4.2012)
- Viessmann. 2008. Planungshandbuch Solarthermie. Viessmann Werke. http://www.viessmann.at/etc/medialib/internet-global/pdf_documents/sonstige.Par.8493.File.File.tmp/Planungshandbuch-Solarthermie.pdf (24.11.2011)
- Wargocki P, Wyon DP, Sundell J, Clausen G, Fanger PO (2000): The Effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality. Sick Building. Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity. Indoor Air Vol 10, No. 4. 222-236.
- Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 2006. Energie sparen durch Wärmepumpenanlagen. Stuttgart. 9.Auflage
- Wordtmann, B. 2005. Energetische Altbausanierung durch Umwandlung eines bestehenden Wohngebäudes in ein Passivhaus. Universität Hannover
- Xia. 2011a. Intelligente Architektur. Zeitschrift für Architektur und Technik. 07-09
- Xia. 2011b. Intelligente Architektur. Zeitschrift für Architektur und Technik. 04-06
- Zondag, H.A. 2008. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12. 891–959

11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energiebilanz eines Gebäudes	6
Abbildung 2: Darstellung der Energieversorgung von erneuerbaren Energiequellen	8
Abbildung 3: Darstellung der Luftgüteampele	10
Abbildung 4: VisiKid-Darstellung als Bild (rechts) und Schema (links)	11
Abbildung 5: Visualisierungsmöglichkeit des PV-Ertrags	12
Abbildung 6: Visualisierungsmöglichkeit des PV-Ertrags	12
Abbildung 7: Visualisierungsmöglichkeit des PV-Ertrags	12
Abbildung 8: Darstellung von Smart Grids	14
Abbildung 9: Freiluftschule Cloistraat	16
Abbildung 10: Darstellung des Altbaus (links) und der sanierten Schule (rechts)	24
Abbildung 11: Grundriss des Areals	25
Abbildung 12: Lüftungskonzept	25
Abbildung 13: Darstellung des Lageplans	28
Abbildung 14: Grundriss des Hauptbaus (Erdgeschoss)	28
Abbildung 15: Grundriss des Hauptbaus (Obergeschoss)	28
Abbildung 16: Grundriss des Pavillons (Erdgeschoss)	28
Abbildung 17: Grundriss der Turnhalle (Erdgeschoss)	28
Abbildung 18: Grundriss des Neubaus (Erdgeschoss)	29
Abbildung 19: Darstellung des Schulgebäudes mit der Umgebung (links) und Bezeichnung der einzelnen Gebäudeteile (rechts)	32
Abbildung 20: schematische Darstellung des neuen Schulgebäudes in der 3-D Ansicht und im Grundriss	33
Abbildung 21: Darstellung der Raumaufteilung des Schulgebäudes im Grundriss	34
Abbildung 22: Darstellung des Luftverteilnetzes mit Zuluft (grün) und Abluft (gelb) über die Bereiche des Schulgebäudes	36
Abbildung 23: schematische Darstellung des Schulgebäudes	37
Abbildung 24: Darstellung des Schulgebäudes im Grundriss	38
Abbildung 25: Aufbau der Vakuum-Isolationspaneelle	39
Abbildung 26: spezifische Energieverbräuche im Bestand und nach einigen Einsparungsmaßnahmen	41
Abbildung 27: themische Jahresenergiebilanz im Bestand und mit den Sanierungsmaßnahmen	43
Abbildung 28: Zelltypeneinteilung in drei Generationen	46
Abbildung 29: Anwendungsmöglichkeiten von PV-Modulen	47
Abbildung 30: maximal erbringende Leistung je nach Ausrichtung der Module	48
Abbildung 31: Schattenbildung durch umgebende Objekte	49
Abbildung 32: Verluste mit/ohne Verschattung und mit/ohne Bypass	49
Abbildung 33: Moduleleistungen mit und ohne Hinterlüftung	50
Abbildung 34: Thermosyphonanlage	52
Abbildung 35: Solarthermie für Brauchwassererwärmung	52
Abbildung 36: Solarthermie für Trink- und Heizwasser	52
Abbildung 37: Darstellung der PVT Flachkollektoren	55
Abbildung 38: PVT Luftkollektoren mit Doppelpass oberhalb des Absorbers	55
Abbildung 39: Darstellung des PVT Hybrid Solarfensters	56

Abbildung 40: Schulen und Kindergärten mit Lüftungsanlagen in Österreich; Stand: 2007	61
Abbildung 41: Gliederung der Lüftungsarten	61
Abbildung 42: Prinzip der gerichteten Durchströmung	64
Abbildung 43: Lüftungskonzept eines zentralen (links), semizentralen (Mitte) und dezentralen (rechts) Anlagensystems	67
Abbildung 44: Darstellung eines dezentralen Lüftungskonzepts	67
Abbildung 45: Lüftungssystem „LiLu“	68
Abbildung 46: Prinzip der gerichteten Durchströmung angewandt in der Kindertagesstätte Schwanheim (links) und ein Überströmungselement (rechts)	68
Abbildung 47: natürliche Nachtlüftung mit Hilfe von Klappen	69
Abbildung 48: Darstellung der Kosten im Verhältnis zu Behaglichkeit/Individualität	69
Abbildung 49: Vorgang zur Erbringung der Heizleistung	72
Abbildung 50: Wärmepumpe arbeitet parallel zur Solaranlage	81
Abbildung 51: Kollektorstärke wird direkt in das System geleitet oder zu Regenerierung des Erdreiches verwendet	81
Abbildung 52: Direkte Einspeisung der Wärme oder Wärme wird zum Verdampfer der Wärmepumpe geleitet	81
Abbildung 53: Kollektorstärke wird in den Kombispeicher oder in einen kälteseitigen Speicher geleitet	82
Abbildung 54: Hybridkollektor ist die einzige Wärmequelle	82
Abbildung 55: Darstellung Sonnenstand im Sommer und Winter	85
Abbildung 56: Integrationsmöglichkeiten von PV	87
Abbildung 57: Integrationsmöglichkeiten der Solarthermie	89
Abbildung 58: Einsatz des Temperaturniveaus bezogen auf die Außentemperatur und die Vorlauftemperatur ...	100
Abbildung 59: Wärmequelle Luft und Erdreich mit ihren diversen Systemarten die eingesetzt werden können ...	101
Abbildung 60: Nutzung von Erdwärme mittels Grundwasser	102
Abbildung 61: Nutzung von Erdwärme mittels Flachkollektoren	104
Abbildung 62: Funktionsprinzip einer Sole/Wasser-Wärmepumpe (rechts) und einer Wärmepumpe mit Direktverdampfung	105
Abbildung 63: Nutzung von Erdwärme mittels Erdwärmesonden	106
Abbildung 64: Darstellung von Grabenkollektoren	107
Abbildung 65: Darstellung von Spiralkollektoren	108

12. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Erklärung der Luftgüteeampel.....	11
Tabelle 2: durchschnittlicher Stromverbrauch von diversen Bildungsstätten.....	13
Tabelle 3: durchschnittlicher Heizenergieverbrauch diversen Bildungsstätten	13
Tabelle 4: Bewertung der Luftqualität	15
Tabelle 5: Literaturangaben für die notwendige Luftmenge pro Stunde und Person um eine gute bis mittlere Luftqualität zu erzielen	15
Tabelle 6: Vergleich von verschiedenen Fensterarten	17
Tabelle 7-1: Schulkomplexe, die in der Passivhaus-Bauweise saniert wurden	20
Tabelle 7-2: Schulkomplexe, die in der Passivhaus-Bauweise saniert wurden	204
Tabelle 7-3: Schulkomplexe, die in der Passivhaus-Bauweise saniert wurden	205
Tabelle 7-4: Schulkomplexe, die in der Passivhaus-Bauweise saniert wurden	206
Tabelle 8: Daten und Fakten der drei Demonstrationsprojekte „Eneff:Schule“	27
Tabelle 9: Bestandteile des Neubaus im Ist-Zustand	29
Tabelle 10: Sanierungsmethoden für die einzelnen Bauteile.....	29
Tabelle 11: Sanierungsmethoden der einzelnen Systemen und Anlagen	31
Tabelle 12: Die durchschnittlichen, über die vergangenen zehn Jahre gemittelten spezifische jährliche Kennwerte vor und nach der Sanierung	32
Tabelle 13: Bestandbauteile mit der zugehörigen Sanierungsmethode und den U-Werten	35
Tabelle 14: Erweiterungsbau mit dem zugehörigem Baukonzept und den U-Werten.....	35
Tabelle 15: Zwischenklimazone mit der zugehörigen Sanierungsmethode und den U-Werten	35
Tabelle 16: Sanierungsmethoden der technischen Anlagen	36
Tabelle 17: Verbrauch an Endenergie von Heizung, Wasser und Strom vor und nach der Sanierung.....	37
Tabelle 18: Gebäudebauteile mit den zugehörigen U-Werten	39
Tabelle 19: Endenergiebedarf der Schule im Bestand, bei einer herkömmlichen Sanierung und einer Sanierung in der Passivhaus-Bauweise.....	41
Tabelle 20: Primärenergiebedarf der Schule im Bestand, bei einer herkömmlichen Sanierung und einer Sanierung in der Passivhaus-Bauweise	41
Tabelle 21: Berechnung der primärenergetischen Bilanzierung über das Jahr.....	43
Tabelle 22: Diese Tabelle zeigt für die unterschiedlichen Zelltypen die Wirkungsgrade, den Solarstromertrag einer 1 m ² PV-Anlage in kWh/m ² a und die benötigte Solarfläche in m ² für eine 1 kWp Anlage.....	46
Tabelle 23: Darstellung der Kollektortypen mit den jeweiligen Wirkungsgraden und im welchem Temperaturbereich sie angewandt werden können.....	51
Tabelle 24: Parametergegenüberstellung von dezentralen und zentralen Lüftungsanlagen.....	69
Tabelle 25: unterschiedliche Betriebsweisen der Wärmepumpe.....	72
Tabelle 26: max. spezifische Entzugsleistung von Erdwärmekollektoren.....	75
Tabelle 27: max. spezifische Entzugsleistung von Erdwärmesonden	75
Tabelle 28: Erklärungen der Abkürzungen die in den Abbildungen dargestellt werden	86
Tabelle 29: Mindestluft rate für unterschiedliche Schultypen	91
Tabelle 30: Daten die das Lüftungskonzept beeinflussen.....	95

Tabelle 31: Vor- und Nachteile von dezentralen und zentralen Lüftungskonzepte	98
---	----

13. Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung des Flächenbedarfs einer Photovoltaik-Anlage bei einem bestimmten spezifischen Energiebedarf.....	42
Formel 2: Berechnung des Temperaturverhältnis	93
Formel 3: grobe Berechnung des Wärmebedarfs, wenn mit Gas geheizt wird	99
Formel 4: grobe Berechnung des Wärmebedarfs, wenn mit Öl geheizt wird	99
Formel 5: Berechnung des Sperrfaktors	99