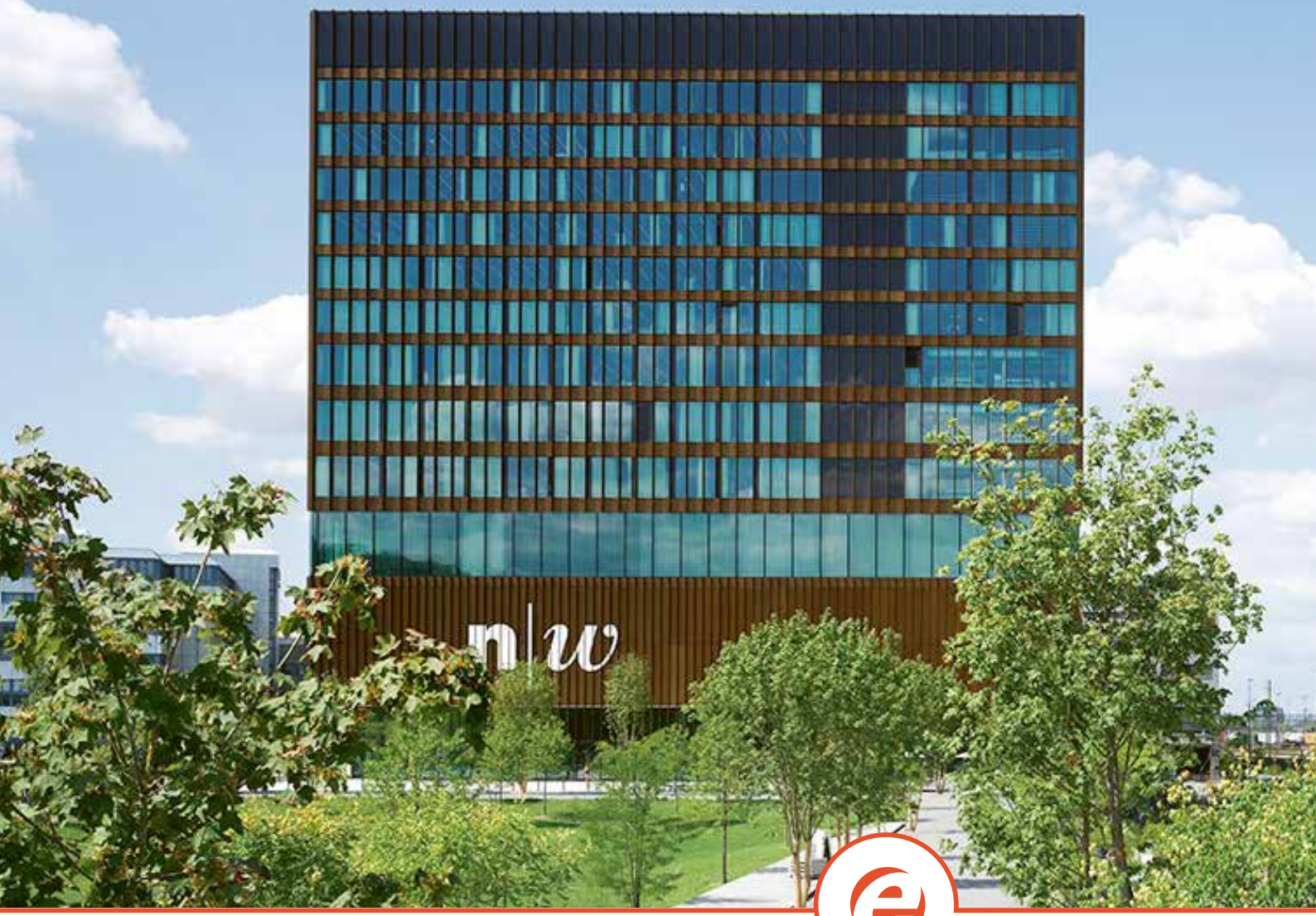
Binz | Bichsel | Geissler | Hall | Huber | Ragonesi | Steinke | Weickgenannt

Neubau

Energieeffizientes Bauen



energieschweiz
Unser Engagement: unsere Zukunft.

EnDK
Konferenz Kantonaler Energiedirektoren

faktor
Architektur Technik Energie

Inhalt

1.	**Energie und Gebäude**	**5**
1.1	Energie im Gebäude und im Gebäudepark Schweiz	5
1.2	Haus, Überbauung, Areal, Quartier, Stadt	11
1.3	Konzepte, Strategien, Standards	15
1.4	Energiereduktion und Eigenproduktion	23
1.5	Energetische Gesamtbilanzierung	25
1.6	Energiestandards und Nachhaltigkeitslabels	28
1.7	Graue Energie	31
1.8	Behaglichkeit	36
1.9	Quellen	39
2.	**Gebäude – Form und Hülle**	**41**
2.1	Baukörper	41
2.2	Gebäudehülle	42
2.3	Wärmeschutz	43
2.4	Opake Bauteile der thermischen Gebäudehülle	46
2.5	Vermeidung von Schwachstellen	54
2.6	Gläser und Fenster	56
2.7	Vorhangfassaden	61
2.8	Sommerlicher Wärmeschutz	63
2.9	Tageslichtversorgung	68
2.10	Quellen	71
3.	**Hochgedämmte Gebäudehüllen**	**73**
3.1	Verständigung	73
3.2	Konzeptionelle Überlegungen	73
3.3	Opake Bauteile	76
3.4	Transparente Bauteile	92
3.5	Wärmebrücken	94
4.	**Gebäudetechnik**	**99**
4.1	Gesetzliche Vorgaben	99
4.2	Heizung und Warmwasser	101
4.3	Lüftung, Klima, Kühlung	110
4.4	Haushaltsgeräte	122
4.5	Beleuchtung	126
4.6	Photovoltaik	132
4.7	Allgemeine Gebäudetechnik	139
4.8	Gebäudeautomation	141
4.9	Quellen	146
5.	**Anhang**	**147**
5.1	Autoren	147
5.2	Normen und Regelwerke	148
5.3	Stichwortverzeichnis	149

Impressum

Neubau – Energieeffizientes Bauen

Autorinnen und Autoren: Armin Binz, Jürg Bichsel, Achim Geissler, Monika Hall, Heinrich Huber, Jürg Nipkow, Marco Ragonesi, Gregor Steinke, Beate Weick-genannt

Lektorat und Seitenherstellung: Faktor Journalisten AG, Zürich; Othmar Humm, Christine Sidler

Titelbild: FHNW Campus Muttenz von Pool Architekten (Foto: Andrea Helbling, Arazebra, Zürich)

Diese Publikation ist Teil der Fachbuchreihe «Nachhaltiges Bauen und Erneuern». Die Publikation wurde durch das Bundesamt für Energie BFE / Energie-Schweiz und die Konferenz Kantonaler Energiedirektoren (EnDK) finanziert.

Bezug: Als Download (kostenfrei) unter www.energieschweiz.ch oder als Buch beim Faktor Verlag, info@faktor.ch oder www.faktor.ch

Januar 2020
ISBN: 978-3-905711-53-0

Der Schlüssel zur Energiewende

Armin Binz

Seit 40 Jahren ist energieeffizientes Bauen ein Thema. Auch wenn seine Bedeutung im Lauf der Zeit mit den Energiepreisen schwankte: Es wurde viel erreicht in dieser Zeit. Neubauten, Heizungen, Pumpen und Ventilatoren, Geräte und Beleuchtungen sind um Grössenordnungen energieeffizienter als damals. Das Wissen zum energieeffizienten Bauen ist unüberschaubar geworden. Warum also dieses Buch?

Einerseits gerade wegen der Fülle an Material. Das Buch soll helfen, die Bäume trotz lauter Wald sehen zu können. Das Wesentliche wird herausgehoben und das Know-how, die Technologien und die Tools in ihrer Bedeutung eingeordnet. Die erfahrene Energiefachperson soll mit wenig Aufwand das Übersichtswissen in den angrenzenden Fachbereichen aktualisieren können. Studierenden und Neueinsteigern soll das Buch eine Landkarte sein, das eigene Fachgebiet zusammenfassen und Grundkenntnisse über das energieeffiziente Bauen vermitteln.

Andererseits braucht es das Buch, weil dieses Wissen rasch veraltet. Entwicklung und Selektion von Effizienztechnologien haben über die Jahrzehnte eine gewisse Klärung und auch eine Fokussierung auf Schlüsseltechnologien bewirkt. Vieles hat sich bewährt und durchgesetzt, etwa Wärmepumpen oder verputzte Aussendämmungen. Anderes ist von der Entwicklung überholt worden und verschwunden, beispielsweise wärmedämmende Fensterläden und bald auch Energiesparlampen. Energieeffizientes Bauen hat damit auch eine gewisse Selbstverständlichkeit erlangt. Aber gerade in den letzten Jahren hat der Wandel – auch des Umfelds – zu grundlegenden Änderungen geführt. So haben die enormen technologischen Fortschritte im Bereich der Wärmepumpen den Druck und die Unabdingbarkeit eines hervorragenden Wärmeschutzes relativiert. Nicht jede Fassade muss mit Polystyrol beklebt werden. Nicht jede Wärmebrücke muss – koste es, was es wolle – eliminiert werden. Die Planung von energetischen Erneuerungen hat an Freiheit gewonnen.

Auch sonst hat sich die Situation bei der grossen verbleibenden Aufgabe des energieeffizienten Bauens, der Sanierung der vor 1980 erstellten Gebäude, geändert. Die Grenze zwischen Neubau und Erneuerung wird zunehmend unschärfer. Es ist geradezu ein Hauptmerkmal von erfolgreichen Erneuerungen, dass grössere Teile der Gebäudehülle als Neubau gestaltet werden. Aufstockungen und Anbauten, Integration bestehender Balkone und Neuerstellung ganzer Fassaden mit grossen Fensterflächen bieten dieselben bautechnischen Möglichkeiten wie der Neubau. Und sie entsprechen dem politischen Willen zur Verdichtung, wie er im revidierten Raumplanungsgesetz festgehalten ist, das vom Souverän im Frühling 2011 angenommen wurde. Mit dieser Tendenz hält auch der Trend in der Gebäudeerneuerung Einzug, mehr und mehr integrale Systeme und nicht mehr handwerklich Materialien zu verbauen, mit positiven Folgen für Kosten, Qualität und Energieeffizienz.

Dass sich auch das politische Umfeld grundlegend verändert hat, kommt besonders deutlich im 2017 beschlossenen neuen Energiegesetz des Bundes und der zugehörigen Energiestrategie 2050 zum Ausdruck: Die Energieversorung ist der Wirtschaftsbereich, der seit Jahrzehnten in hohem Masse globalisiert ist und drei Viertel der Energie als fossile oder nukleare Energieträger aus dem Ausland bezieht. Sie soll jetzt umgebaut werden: Einheimisch und erneuerbar sollen künftig ihre Hauptmerkmale sein. Da die Hälfte des Energieverbrauchs für den Betrieb von Gebäuden benötigt wird und Energieeffizienz – richtig umgesetzt – mit Komfortgewinn, Nutzungsverbesserung sowie Aufwertung der Bausubstanz verbunden ist, wird energieeffizientes Bauen die Primadonna der Energiewende sein.

Kapitel 1

Energie und Gebäude

Armin Binz

1.1 Energie im Gebäude und im Gebäudepark Schweiz

Mehr als die Hälfte des Energieverbrauchs und rund die Hälfte der gesamten Treibhausgasemissionen der Schweiz entfällt auf den Gebäudepark – für Erstellung, Unterhalt und Betrieb (Abbildung 1.1). Raumwärme, Warmwasser und der grösste Teil des Stromverbrauchs für Beleuchtung, Geräte, Informations- und Kommunikationstechnik sowie die ebenfalls dort subsummierte Energie für Gebäudetechnik (Pumpen, Ventilatoren, Ventile etc.) werden für den Betrieb von Gebäuden gebraucht.

Der Energieverbrauch für die Erstellung und Erneuerung von Bauten (graue Energie beziehungsweise der ganze Aufwand der Bauwirtschaft) ist in Abbildung 1.3 nicht separat erfasst beziehungsweise dem restlichen Energieverbrauch zugeordnet. Es dürfte sich dabei um eine Grössenordnung von 30 TWh handeln, wovon ein stattlicher Anteil importiert wird (was in Abbildung 1.3 nicht enthalten, aber gleichwohl relevant ist). In Abbildung 1.2 wird zudem sichtbar, dass Wohnbauten das vorrangige Thema des energieeffizienten Bauens und Erneuerns im Gebäudepark Schweiz sind.

Energieeffizientes Bauen als Teil der Bauwirtschaft

Die Investitionen im Hochbau lagen 2016 in der Schweiz bei insgesamt 50 Mrd. Fr. Zwei Drittel davon entfielen auf den Neubau, ein Drittel auf Erneuerungen. Von den gut 16 Mrd. Fr., die in Erneuerungen investiert wurden, wurde etwa ein Viertel für energetisch relevante Massnahmen verwendet. Davon wurde je etwa die Hälfte für Verbesserungen an der Bausubstanz und an der Gebäudetechnik (Heizungsersatz, Komfortlüftungseinbau etc.) eingesetzt. Selbstredend erfüllen diese Massnahmen nicht nur energetische Ziele. Neue Fenster sind in erster Linie ein neues Bauteil, das seine Funktionen besser als die alten Fenster erfüllt. Die moderne Wärme-

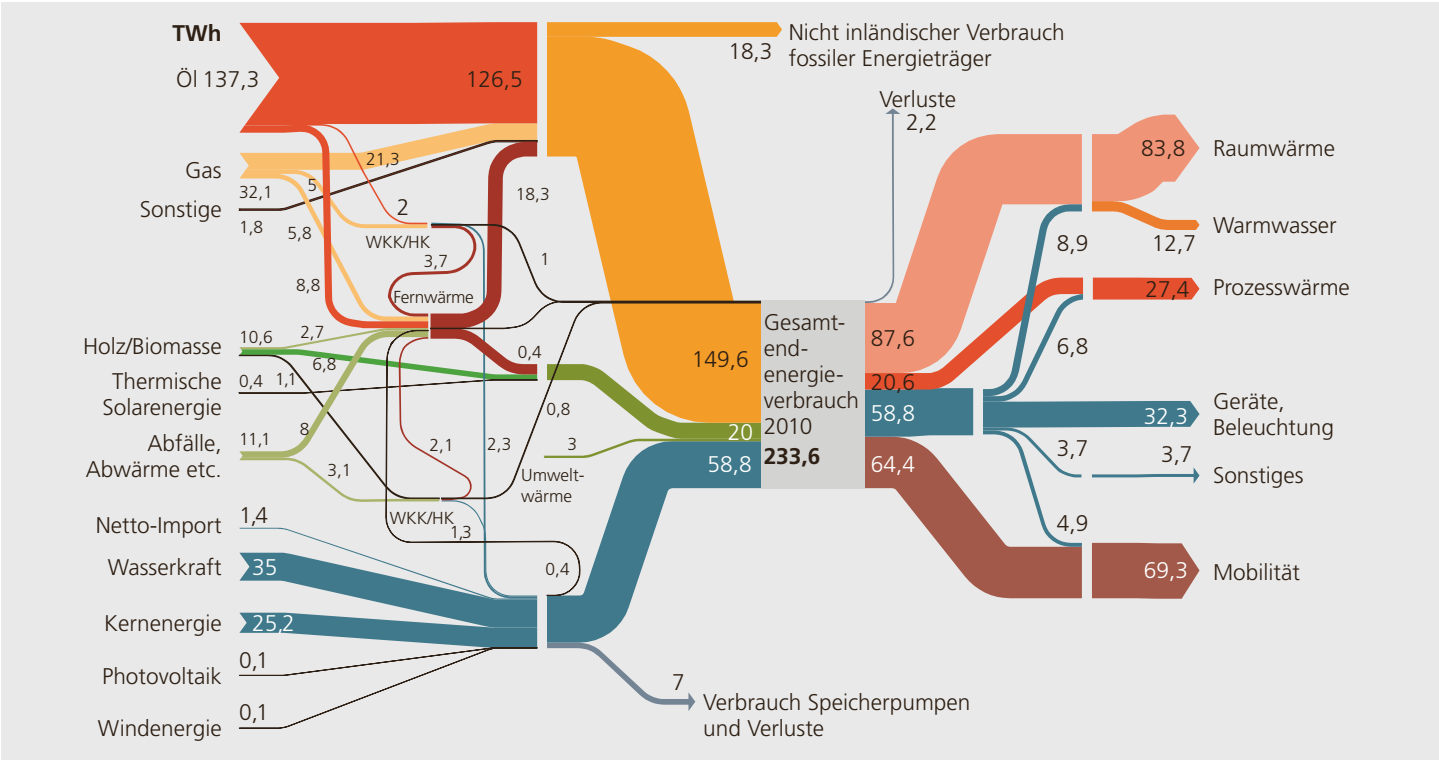


Abbildung 1.1: Endenergieverbrauch 2010 in der Schweiz nach Verwendungszwecken in TWh/a. (Quelle: [1], Datengrundlage: [2])

schutzverglasung bringt jedoch die erwünschte energetische Verbesserung (und wird deshalb je nach Situation auch subventioniert). Bei Neubauten ist es schwieriger, dem Aspekt Energieeffizienz einen Investitionsanteil zuzuordnen. Anteilsmässig wird es deutlich weniger sein als bei den Erneuerungen. Absolut gesehen dürfte es nochmals dieselbe Grössenordnung wie bei den Erneuerungen sein, wie dies in Abbildung 1.4 dargestellt ist. Immerhin lässt sich festhalten, dass die Energievorschriften und darüber hinausgehende freiwillige Energieeffizienzanforderungen wie die verschiedenen Minergie-Standards oder der SIA-Effizienzpfad Energie auch bei Neubauten einen eigenen «Marktanteil Energieeffizienz» abstecken.

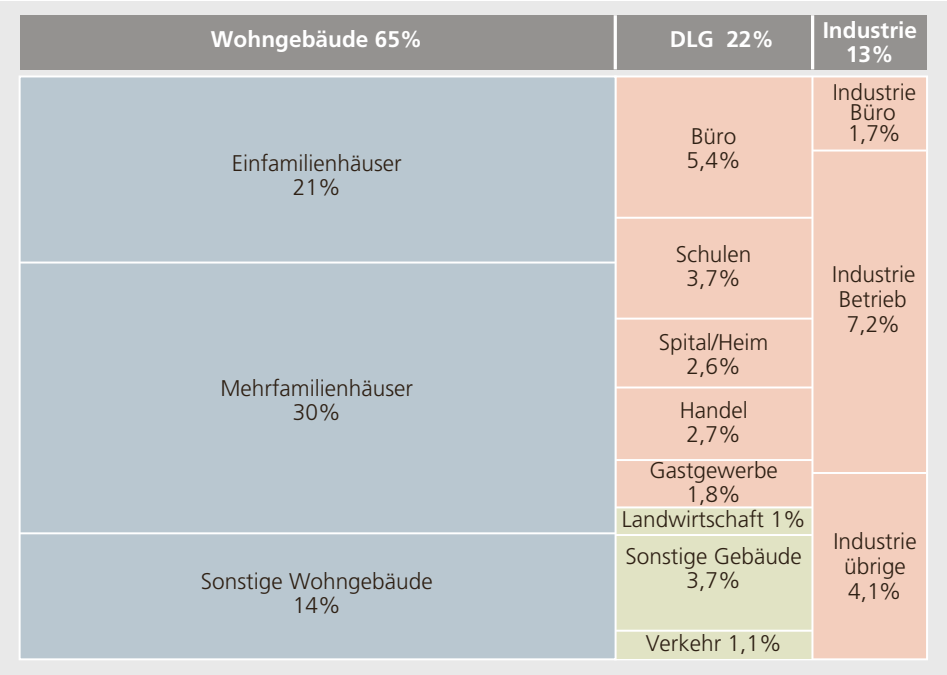


Abbildung 1.2: Die Energiebezugsfläche des schweizerischen Gebäudebestandes nach Nutzungen (2004). 100 % sind 665 Mio. m². (Quelle: [3])

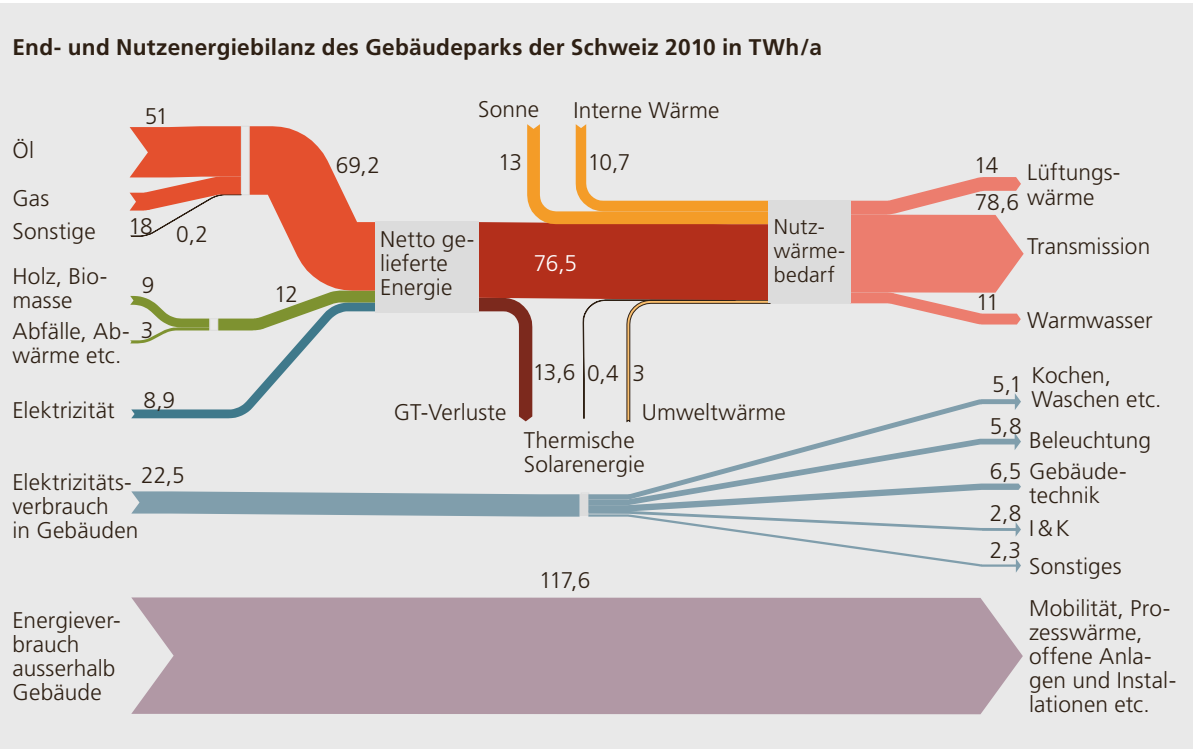


Abbildung 1.3: Endenergieverbrauch 2010 in der Schweiz in TWh/a, aufgeteilt in den für Betrieb und Nutzung des Gebäudeparks nötigen Anteil und den Verbrauch für alle übrigen Zwecke (Mobilität, Prozessenergie Industrie etc.). Dargestellt gemäss Energiedefinitionen des SIA (netto gelieferte Energie anstelle der Endenergie). (Quelle: [1], [5], [6], [7] und Berechnungen A. Binz)

Energieflüsse am Gebäude

Energieeffizientes Bauen hat sich über die letzten vier Dekaden vom einfachen «Heizenergiesparen» zur umfassenden und entwurfsintegrierten Energieoptimierung von Bauten und Bauprojekten entwickelt. Sieben Felder gilt es zu bearbeiten:

1. Raumheizung: Die Fokussierung auf diesen Bereich in der Vergangenheit hat dazu geführt, dass die weitgehende Optimierung von Neubauten heute schon von Gesetzes wegen gegeben ist. Das Thema bleibt aber von vorrangiger Bedeutung, weil immer noch ein Drittel des schweizerischen Gesamtenergieverbrauchs für die Beheizung von Gebäuden verbraucht wird und die energetische Erneuerung der Bestandsbauten deshalb die vordringliche Aufgabe bleibt.

2. Raumkühlung scheint leider ein Zukunftsthema zu sein. Der Wunsch nach grossen Fensterflächen, die gesteigerten Komfortbedürfnisse und die Missachtung der Regeln des sommerlichen Wärmeschutzes führen dazu, dass immer häufiger in Zweckbauten, aber auch vermehrt in Wohnbauten, aktiv gekühlt wird. Die Zunahme an überdurchschnittlich heissen Sommern unterstützt diesen Trend noch.

3. Warmwasser: Der Spielraum bezüglich Energiebedarf für die Wassererwärmung ist zwischen Gebäudetechnikoptimierung und suffizientem Benutzerverhalten aufgespannt. Beide Ansätze weisen grosse Potenziale auf.

4. Elektrizitätsverbrauch für Licht und Geräte: Eigentlich geht es um die zwei grundlegend verschiedenen Optimierungsfelder «Beleuchtung» und «Betriebseinrichtungen» (von Kühlschränken bis zu Computern). An dieser Stelle sind die Anwendungen zusammengefasst, weil nicht nur der Energieträger, sondern auch der Energielieferant sowie der Planer und der Installateur oft derselbe ist.

5. Graue Energie: In den letzten Jahren wurden die nötigen Grundlagen zur Quantifizierung der grauen Energie von Baumaterialien und Bausystemen sowie die Methoden zur rechnerischen Abschätzung der grauen Energie ganzer Gebäude beziehungsweise Bauvorhaben intensiv vorangetrieben. Heute steht den Planern mit dem Merkblatt SIA 2032 «Graue Energie» sowie geeigneten Methoden und Tools wie Minergie-Eco, dem elektronischen Bauteilkatalog und weiterer Software die Möglichkeit offen, die graue Energie sachgerecht in den Entwurf einzubeziehen.

6. Eigenerzeugung von Wärme und Elektrizität: Neben der weitverbreiteten Wassererwärmung mit thermischen Kollektoranlagen ist die Eigenerzeugung von Wärme und Elektrizität vor allem mit zunehmend kostengünstig werdender Photovoltaik zu einem wichtigen Thema der Energiewende geworden. Damit verbunden sind ganz neue Herausforderungen, wie etwa die Belastung des Elektrizitätsnetzes, dezentrale Speicherung und Maximierung der Eigennutzung des Stromertrages.

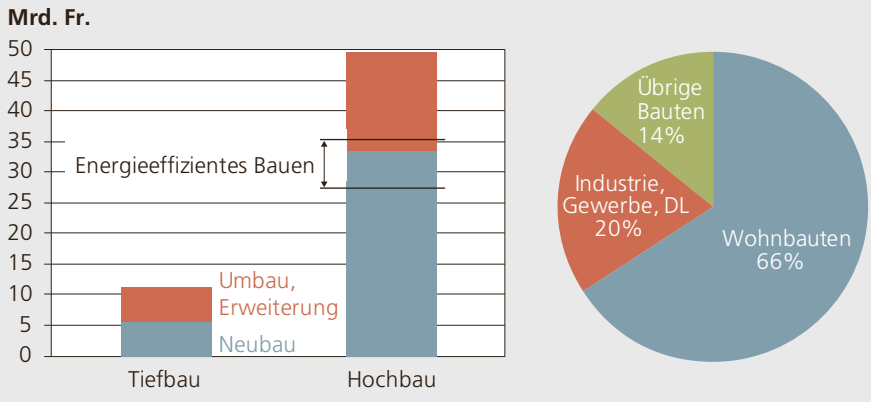


Abbildung 1.4: Bauinvestitionen in der Schweiz 2016, in Mrd. Fr., aufgeteilt in Neubau und Erneuerung beziehungsweise nach Nutzungsart der Gebäude. Energieeffizienz als Marktkomponente bei Neubau und Erneuerung.

7. Induzierte Mobilität: Art und Umfang eines Teils der Mobilität hängt von Gebäuden ab. In erster Linie vom Standort, dann aber auch von Massnahmen zur Förderung beziehungsweise Behinderung verschiedener Fortbewegungsarten. Die Massnahmenpalette erstreckt sich von optimalen Fussgängerverbindungen und Veloabstellmöglichkeiten bis hin zu Autoparkplatzverknappung. Mit dem Merkblatt SIA 2039 «Mobilität – Energiebedarf in Abhängigkeit vom Gebäudestandort» kann der Planer eines Gebäudes auch diesen Aspekt einbeziehen.



Abbildung 1.5: Die sieben Bereiche des energieeffizienten Bauens.

In den Fachkapiteln dieser Publikation werden die oben dargestellten Bereiche aufgegriffen und – mit bewusster Setzung von Schwerpunkten – abgehandelt.

Umfassende Energieoptimierung heisst nicht nur, alle Energiebereiche abzudecken, sondern auch, die ganze Kette der Energieumwandlung zu berücksichtigen. Da es letztlich darum geht, Energieressourcen zu schonen und damit Treibhausgas- (und andere) Emissionen zu reduzieren muss gefragt werden, was Einsparungen an Nutz- und Endenergie auf dieser grundsätzlichen Ebene bewirken (Abbildung 1.6).

Die Basis des Energieflussdiagrammes von Abbildung 1.6 ist ein typischer Mehrfamilienhaus-Neubau im schweizerischen Mittelland. Alle spezifischen Werte im Diagramm multipliziert mit der Energiebezugsfläche von 600 m² ergeben die Absolutwerte des Gebäudes. Das Diagramm zeigt den Energiefluss von links nach rechts. Wobei allerdings die ursächliche Wirkung von rechts nach links geht: Rechts sind die Energiebedarfswerte aufgeführt, die durch Erstellung und Betrieb des Gebäudes entstehen. Um die nötige Nutzenergie zur Bedarfsdeckung zu erzeugen, muss Endenergie eingekauft und umgewandelt werden. Diese Endenergie ent-

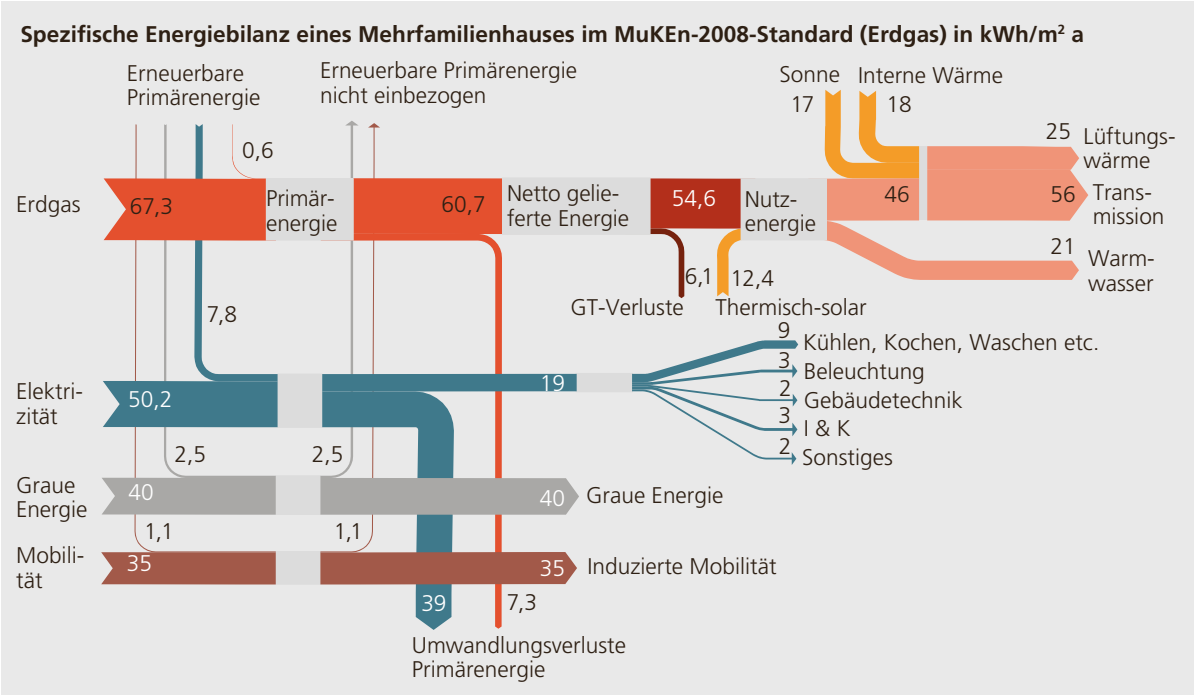


Abbildung 1.6: Spezifische Energieflüsse in kWh pro m² EBF pro Jahr in einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus-Neubau mit einem Erdgas-Wärmeerzeuger für Heizung und Warmwasser.

steht wiederum aus Primärenergieressourcen. Die damit verbundenen Umwandlungsverluste sowie zusätzlich nutzbare Energien fliessen seitlich zu oder ab. Anhand Abbildung 1.6 lässt sich die aktuelle Situation des energieeffizienten Bauens illustrieren.

Wärme für Heizung und Warmwasser

Das dargestellte Mehrfamilienhaus ist kein Vorzeige-Beispiel, sondern soll die heute durchschnittliche und typische Situation bei Neubauten illustrieren. Es ist ein Renditeobjekt. Tiefe Baukosten sowie ein gutes Preisleistungsverhältnis stehen im Vordergrund und Energieoptimierung ist kein besonderes Anliegen. Eine moderne Gasheizung und ein gesetzeskonformer Wärmeschutz entsprechen dieser Haltung. Die gesetzlichen Anforderungen bezüglich Heizung und Warmwasser sind allerdings anspruchsvoll. Sie erzwingen bereits einen recht hohen Standard an Energieeffizienz im Bereich Heizung und Warmwasser. Der Heizwärmebedarf von 46 kWh/(m^2 a) liegt nur knapp unter dem gesetzlich vorgeschriebenen Wert (Basis: Mustervorschriften der Kantone, MuKEn 2008). Die Werte für die Lüftungswärmeverluste und die Abwärmegewinne durch Personen und Elektrizitätsnutzung sind in der Bedarfsberechnung vorgegebene Standardwerte. Optimierungsspielraum bieten nur der Wärmeschutz der Gebäudehülle und die passiven Sonnenenergiegewinne. Ohne weitreichenden Wärmeschutz sind die heute geltenden Vorschriften nicht zu erfüllen. Es kommt jedoch noch eine zweite Bestimmung hinzu: Der maximal zulässige Höchstanteil an nicht erneuerbaren Energien. Höchstens 80 % des maximal zulässigen Wärmebedarfs für Heizung und Warmwasser dürfen durch nicht erneuerbare Energien erbracht werden. Weil der gesetzliche maximal zulässige Wärmebedarf aber nur knapp unterschritten und die Wärme mit einem nicht erneuerbaren Energieträger (Gas) erzeugt wird, muss eine Lösung gesucht werden. Ein verbesserter Wärmeschutz wäre zulässig, jedoch mit einer aufwendigen Aufdoppelung der Dämmschichten verbunden. Die Wahl einer Holzfeuerung wäre möglich, aber ebenfalls mit deutlich höheren Kosten verbunden. Gewählt wurde eine häufige Lösung: Mit einer relativ bescheidenen thermischen Sonnenkollektoranlage kann etwa 60 % des Warmwassers erwärmt werden und die 80-%-Limite für den (nicht erneuerbaren) Erdgaseintrag unterschritten werden.

Erdgas weist auf dem Weg von seiner Gewinnung als Primärressource bis zur Lieferung als Endenergie an den Kunden relativ wenig Verluste auf beziehungsweise braucht wenig Energie für Aufbereitung und Transport. Der erneuerbare Anteil in der Energieaufbereitung ist fast vernachlässigbar, sodass praktisch die ganze Primärenergie als nicht erneuerbare Primärenergie von links in das Diagramm eingeführt wird.

Elektrizität für Geräte und Beleuchtung

Der Energiefluss des «Haushaltstroms» wird nur bis zur Nutzenergie hingeführt. Es ist unüblich, beim Elektrizitätsverbrauch Wirkungsgrade der Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie anzugeben (wieviel Backofenhitze pro kWh Elektrizität und ähnliche Angaben). Vielmehr hat sich die Nutzungseffizienz der einzelnen Geräte, Leuchten, Lampen etc. als Schlüsselgrösse durchgesetzt (beispielsweise in Form von Energieetiketten, Lichtausbeute in Lumen/Watt etc.). Es wird auch ersichtlich, welches die Verbrauchskategorien sind und dass Kühlen-Waschen-Kochen in der durchschnittlichen Wohnung die dominante Verbrauchskategorie ist. Dass dem Elektrizitätsverbrauch besondere Bedeutung zukommt, wird auf der Stufe Primärenergieverbrauch deutlich. Jede kWh Endenergie Strom (aus dem Netz) wurde (im Mittel) mit 2,52 kWh nicht erneuerbarer Primärenergie hergestellt [4]. Diese Primärenergiegewichtung entspricht nicht der inländischen Produktion von Elektrizität, sondern dem sogenannten Verbrauchermix, der wesentliche Anteile an importiertem Strom enthält.

Graue Energie
In der Herstellung, der Montage und der Entsorgung von Baumaterialien steckt viel Energie – graue Energie. Damit die Energieinhalte der unterschiedlichen Energieträger (Heizöl, Benzin, Elektrizität, Gas etc.) zusammengezählt werden können, müssen sie auf die Stufe Primärenergie zurückgerechnet werden. Graue Energie wird daher grundsätzlich auf der Stufe Primärenergie bilanziert. In Abbildung 1.6 wird daher der Fluss der grauen Energie nicht über die Stufe Endenergie hinausgeführt und es können auch keine entsprechenden Umwandlungsverluste ausgewiesen werden. Auch bei der grauen Energie ist die nicht erneuerbare Primärenergie relevant und damit Ziel der Optimierungsbemühungen. Der Anteil der erneuerbaren Primärenergie ist in der Regel sehr klein, wie im erwähnten MFH. Einzig bei Holzbauten verschieben sich nennenswerte Anteile der grauen Energie vom nicht erneuerbaren zum erneuerbaren Anteil (was ja auch eine Optimierungsmöglichkeit darstellt).

Mobilität
Wie die graue Energie wird auch die vom Gebäude induzierte Mobilität direkt auf Stufe Primärenergie errechnet und es wird nur der nicht erneuerbare Anteil einbezogen. Als (vereinfachte) Gesamtsicht der Energieflüsse am Gebäude zeigt Abbildung 1.6 die Bedeutung der Energieverbrauchsbereiche, vor allem jene der erst in neuerer Zeit für das energieeffiziente Bauen thematisierten grauen Energie und Mobilität.

Umwandlungsstufen der Energie
Energie wird durch die Umwandlung von Energieträgern genutzt. Diese Umwandlung führt von Stufe zu Stufe und ist jedes Mal mit Energieverlusten verbunden. Hier die wichtigsten Begriffe in dieser Abfolge.
Primärenergieträger wurden (noch) keiner Umwandlung unterzogen. Beispiele: Erdöl (Rohöl), Erdgas, Uran, Waldholz, Sonnenstrahlung, Erd- und Umgebungswärme.
Endenergie: Energie, die dem Verbraucher zur Umsetzung in Nutzenergie zur Verfügung steht. Dazu zählt die Energie, die von der letzten Stufe des Handels geliefert wird und die am Standort gewonnene und benutzte Energie. Endenergie, die dem Verbraucher von der letzten Stufe des Handels (inkl. nachbarliche Netze) geliefert wird, heisst gelieferte Energie. Massgebend ist der Bilanzperimeter. Wird vom Verbraucher Energie, die er – z. B. aus erneuerbaren Energien oder mit Wärme-Kraft-Kopplung – erzeugt hat, dem Handel zurückgeliefert, wird die zurückgelieferte Energie von der gelieferten Energie abgezogen und man spricht von netto gelieferter Energie.
Nutzenergie: Energie, die aus der Umwandlung von Endenergie entsteht und dem Verbraucher unmittelbar dient, z. B. als Wärme im Raum, als dem Raum entzogene Wärme (Kühlung), als Warmwasser an der Zapfstelle, als Licht in den Räumen, als Hitze im Backofen etc.
Grundlage: Normenwerk SIA, Gesamtenergiestatistik Schweiz

1.2 Haus, Überbauung, Areal, Quartier, Stadt

Energieeffizientes Bauen fokussiert auf die Optimierung von Bauvorhaben; Neubauten und Erneuerungen. Das ist richtig und wichtig und ist das Thema dieser Publikation. Dabei darf es aber nicht bleiben. Gebäude bilden Überbauungen, Areale und Quartiere, Gemeinden, Städte. Diese Siedlungsstrukturen sind ebenfalls bedeutsam für den Energieverbrauch. Je nach Ausprägung lösen sie übermässigen Energiekonsum aus. Sie bieten aber auch zusätzliche Chancen für den nachhaltigen Energieeinsatz.

Die Abbildung 1.7 zeigt schematisch die Handlungsfelder der Energieoptimierung von Gebäuden zwischen Versorgung und Bedarf. Die rechte Seite des Diagramms repräsentiert die Massnahmen des energieeffizienten Bauens, das in zwei Felder unterschieden werden kann. Einerseits die klassischen Massnahmen der Energiebedarfsreduktion wie Wärmeschutz, effiziente Heizungs- und Warmwassersysteme und bestmögliche Technologie bei elektrischen Geräten und Beleuchtung. Traditionell werden auch die lokale Nutzung von Sonnenenergie sowie Wärmerückgewinnungstechnologien (vor allem Lüftung) ebenfalls der Bedarfsreduktion zugeordnet. Neben dieser quantitativen Reduktion des Bedarfs spielt andererseits immer mehr auch die qualitative Optimierung eine Rolle:

- Möglichst tiefe (Vorlauf-)Temperaturen von Heizung und Wassererwärmung
- Minimierung der elektrischen Spitzenlasten des Bedarfsprofils, sowohl im Jahresgang (Hochwinterspitze) wie auch im Tagesgang
- Hohe Eigenbedarfsdeckung bei eigener Stromerzeugung mit Photovoltaik
- Optimales Benutzerverhalten und optimale Benutzerfreundlichkeit aller bedienbaren und energieverbrauchsrelevanten Elemente des Gebäudes sowie Messung und Information der Nutzer beziehungsweise des Betreibers des Gebäudes

Was an Energiebedarf nach der Gebäudeoptimierung im engeren Sinne bleibt, wird dem Gebäude von aussen zugeführt. Der energetische Bezug zur Aussenwelt ergibt sich durch die Wahl der Energieträger, die zur Bedarfsdeckung zum Einsatz kommen. Ob erneuerbare oder nicht erneuerbare Brennstoffe verwendet werden und in welchem Mass Elektrizität den Energiebedarf des Gebäudes abdeckt und welcher Herkunft sie ist, spannt das Handlungsfeld von Bauherrschaften und Gebäudeplanern versorgungsseitig auf. Abbildung 1.8 illustriert (schematisch), wie das Gebäude mit dem Umfeld verbunden ist. Die unmit-

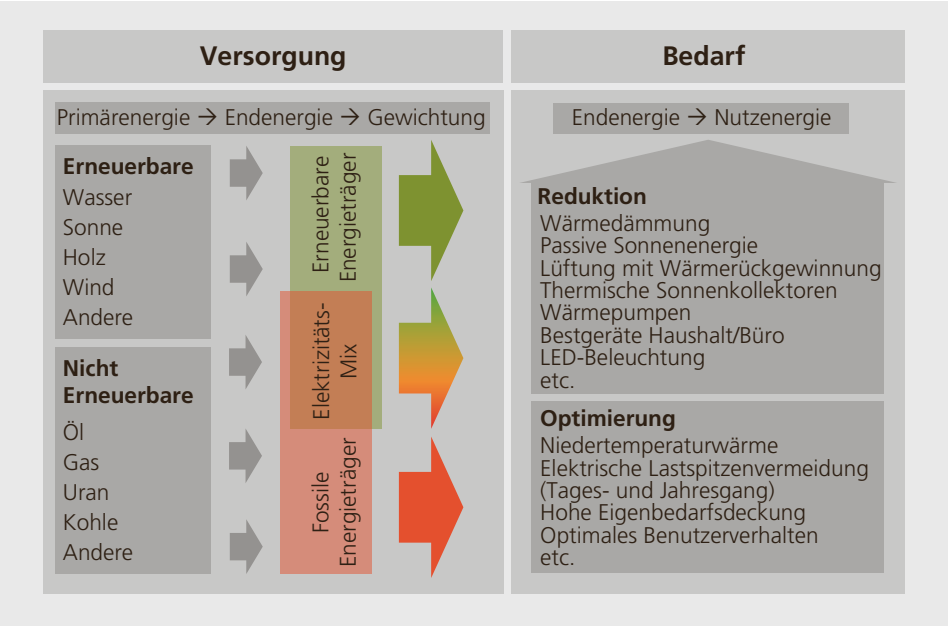


Abbildung 1.7: Bedarfs- und Versorgungsseite von Energie in Gebäuden. Schematische Darstellung der direkten Optimierungsfelder des Gebäudes und der erforderlichen Energiezufuhr von ausserhalb des Gebäudes.

telbare Einbindung des Einzelgebäudes in eine Überbauung oder ein Areal ergibt die meisten Optimierungsmöglichkeiten:

- Heizzentralen mit oder ohne gemeinsame Nutzung lokaler Ressourcen wie Umweltwärmepotenziale (Erdwärme, Grundwasser, Oberflächenwasser) oder von Abwärme benachbarter Betriebe
- Gemeinsame Anlage zur Sonnenenergienutzung, thermisch respektive photovoltaisch
- Wärmeverbundsysteme, welche die kritische Grösse erreichen, sodass zusätzliche Typen der Wärmeerzeugung möglich sind, z. B. Holzschnitzelheizungen oder Wärmekraftkopplungsanlagen
- Je nach Nutzung und Grösse des Areals sind auch Anergienetze oder Niedrigtemperaturnetze zu prüfen. Abbildung 1.9 zeigt die Darstellung aus der Anwendungshilfe von Minergie, die auch die Definition enthält: «Unter einem Anergienetz wird ein Wärmeverbund verstanden, der auf einem (aus der Optik von Heizungen) tiefen Temperaturniveau betrieben wird. Ein solches Netz gibt einerseits Wärme an verschiedene Bezüger ab (Heizbetrieb) und nimmt andererseits Wärme von Bezügern auf (Kühlbetrieb). Zudem ist eine Kopplung ans Erd-

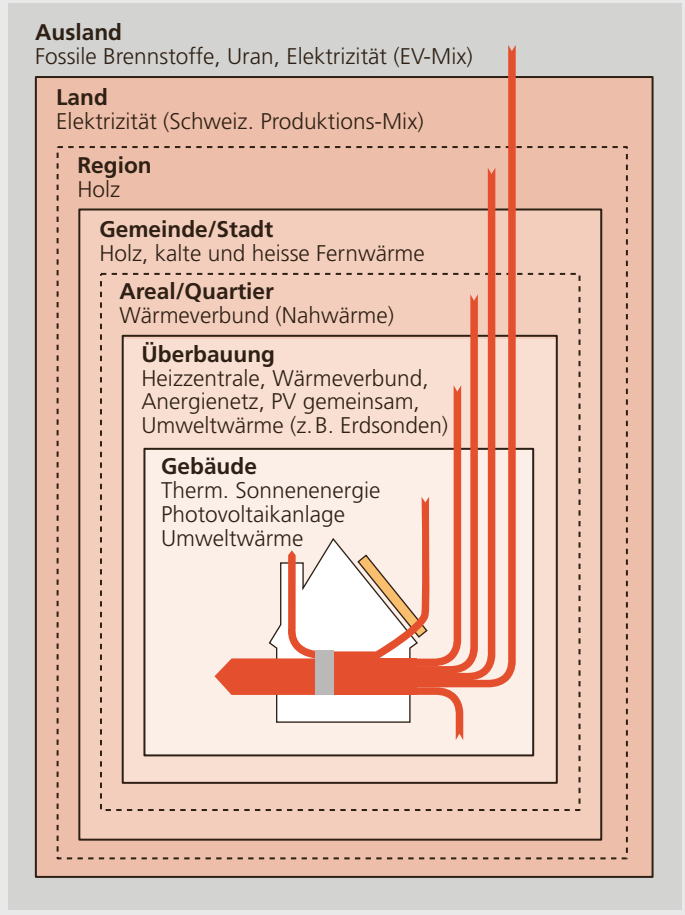


Abbildung 1.8: Energieversorgung aus dem nahen und fernen Umfeld. Schematische Darstellung der energetischen Bezüge des Gebäudes zum Umfeld.

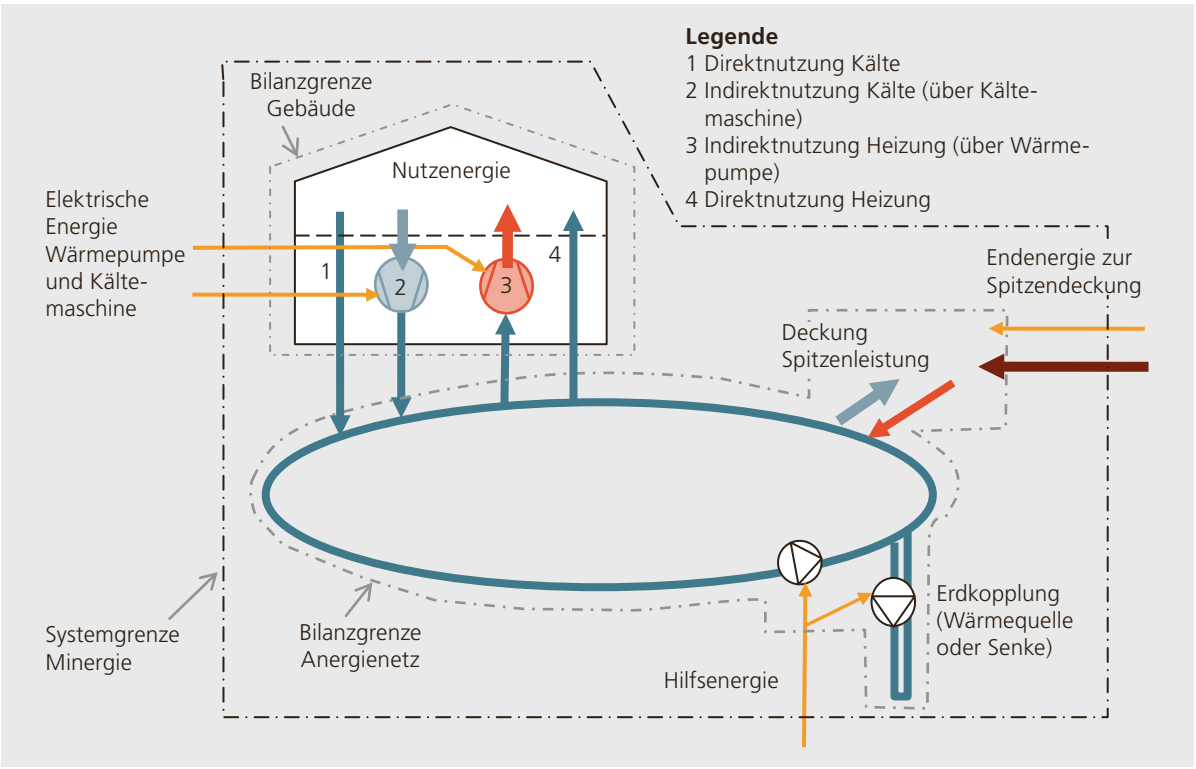


Abbildung 1.9: Anergienetz. (Quelle: Anwendungshilfe Minergie, www.minergie.ch)

reich möglich (Erdsonden). Allenfalls kann eine Spitzendeckung für Heizung respektive Kühlung vorhanden sein.»

Von der Überbauung zur Stadt

Beim Überschreiten der Grenze von der Überbauung zum Areal, zum Quartier und zur Gemeinde oder gar zur Stadt verändert sich die Situation grundlegend. Bauherrschaften und Gebäudeplaner nutzen Versorgungsangebote einerseits und professionelle Energieanbieter sowie Kommunalplaner und Gemeindepolitiker agieren als Energieversorger beziehungsweise Infrastruktur-Gestalter andererseits. Nebst den Möglichkeiten des Gebäudes und der Überbauung können weitere Optionen zur Diskussion stehen, vor allem Versorgungsnetze aller Art: heisse und kalte Nah- und Fernwärme beispielsweise.

Gemeinden werden in Zukunft eine aktivere Energieplanung betreiben. Dazu gehört eine detaillierte Erfassung und Kartierung aller kommunalen Ressourcen und die Bedingungen für die Beschaffung extrakommunaler Energien sowie die Analyse und Prognose von Energiebedarfswerten für die unterschiedlichen Nutzungen. Abbildung 1.10 illustriert die Ressourcenerfassung am Beispiel der Stadt Zürich. Daraus wird auch deutlich, dass mit dem Übergang in das nachfossile Zeitalter der Energieversorgung eine übergeordnete Koordination und Steuerung unumgänglich wird. Auch Bauherrschaften und Gebäudeplaner von Einzelgebäuden werden in Zukunft von solchen neuen Rahmenbedingungen betroffen sein. Natürliche Ressourcen wie See-, Fluss- und Grundwasser werden nach Plan und gesetzlichen Vorgaben erschlossen und genutzt werden müssen. Erdsonden-Wärmepumpenanlagen als Schlüsseltechnologie der zukünftigen Wärmeversorgung werden in einer Dichte auftreten, die voraussichtlich eine systematische Wärmeregeneration zur Pflicht machen wird.

Je grösser der Planungsraum, desto politischer die Rahmenbedingungen

Das regionale und das nationale Umfeld sind vor allem für den Energiemix und die Angebotspalette weiterer Energieträger wie Holz wichtig. Die internationale Ebene ist dies in ähnlicher Art für das Angebot an herkömmlichen Energieträgern (fossile und Uran), aber auch für Elektrizität aus erneuerbaren Quellen (Wind und Photovoltaik). Gebäudeplaner und Bauherrschaften müssen heute noch für sich selbst entscheiden, ob sie Nähe als positiv und Distanz als Nachteil bewerten wollen, was die Herkunft der Energie angeht. In der offiziellen Debatte sind die Meinungen dazu noch kontrovers. Minergie verlangt, dass für das Gebäudelabel anrechenbare Eigen-

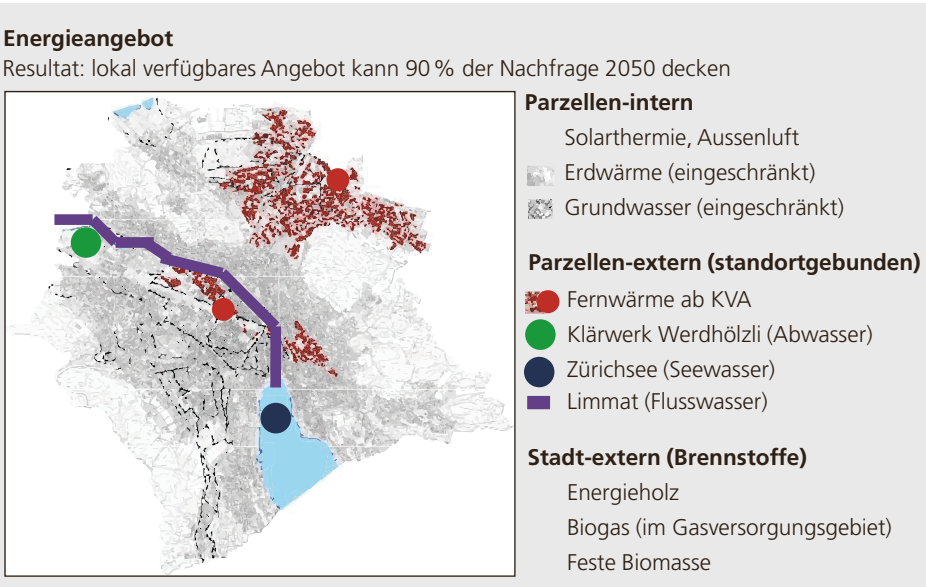


Abbildung 1.10: Übersicht der erneuerbaren Energieressourcen am Beispiel der Stadt Zürich. (Quelle: Stadt Zürich, Departement der Industriellen Betriebe)

erzeugung auch auf dem Gebäude zu realisieren ist. Für die Erreichung der Ziele des SIA-Effizienzpfades Energie kann Ökostrom eingekauft werden. Er muss mindestens die Qualität «naturemade star» erreichen und der Abschluss eines langjährigen Liefervertrags ist Pflicht.

Areale, Siedlungen oder gar Städte sind wesentlich komplexer als Gebäude. Sie weisen komplizierte Entscheidungsabläufe auf und Energiefragen sind eng mit anderen Politikbereichen verknüpft. So ist selbstverständlich die Verdichtungsplanung in Gemeinden in höchstem Masse energierelevant und das politische Instrument des Ausnützungsbonus (z. B. im Rahmen von Sonderbauvorschriften bei Arealüberbauungen) ist ausserordentlich wirksam. Das Umfeld für Gebäudeplaner wird sich durch die intensivierten energieplanerischen Aktivitäten der Gemeinden stark ändern. Es werden neue, ortsbezogene Bestimmungen zu berücksichtigen sein und neue Energieversorgungsangebote zur Verfügung stehen. Der Gebäudeplaner wird auf dieser Ebene allerdings tendenziell vom Agierenden zum Reagierenden. Dies ist auch die Ebene, auf der wirklich wirksame Massnahmen getroffen werden können, beispielsweise durch eine bessere Erschliessung durch den öffentlichen Verkehr. Denn der durch ein Gebäude induzierte Verkehr ist gemäss Merkblatt SIA 2039 «Mobilität» zu berücksichtigen.

Instrumente zur Beurteilung und Planung von Arealen

2000-Watt-Areal: Das 2000-Watt-Areal-Zertifikat bietet eine umfassende Qualitätssicherung für nachhaltige Areale. Es wurde im Rahmen des Programms EnergieSchweiz des Bundesamts für Energie entwickelt. Die Zertifizierung ist umfassend dokumentiert. Das «Handbuch zum Zertifikat 2000-Watt-Areal» und weitere Unterlagen sind downloadbar von www.2000watt.swiss

Sméo: Frei zugängliches Online-Tool für die Bewertung und Optimierung von Quartieren hinsichtlich Nachhaltigkeit.

Auch die grossen internationalen Labels für nachhaltiges Bauen haben Tools und Zertifizierungsangebote für Areale und Quartiere, so beispielsweise **DGNB, LEED und BREEAM**.



Abbildung 1.11: Hunziker-Areal in Zürich-Nord – Nutzungsmix belebt das Quartier. (Quelle: 2000-Watt-Areal, Energie-Schweiz)

1.3 Konzepte, Strategien, Standards

Energieeffizientes Bauen – Ziele und Mittel

Das energieeffiziente Bauen hat sich mittlerweile über mehr als vier Jahrzehnte entwickelt. Mehrere Entwicklungslinien lassen sich erkennen: Der Fokus des energieeffizienten Bauens ist breiter und umfassender geworden. Von Heizung und Warmwasser über Geräte, Beleuchtung und Eigenenergieerzeugung bis hin zu grauer Energie und Mobilität werden alle Energiewirkungen eines Gebäudes in Betracht gezogen. In Abbildung 1.12 werden die dem Thema heute zugehörigen Elemente aufgezeigt: Sämtliche Energieverwendungen und nicht nur Endenergie werden betrachtet, sondern der gesamte Primärenergiebedarf wird zum massgeblichen Optimierungsgegenstand. Die Wertigkeit von Nutzenergie und Energieträgern wird gewürdigt und exergetische Potenziale genutzt. Die Vielfalt an Konzepten, Normen, Standards und Hilfsmitteln, aber auch an Technologien, Materialien und Geräten ist ins Unübersehbare gewachsen. Abbildung 1.13 stellt eine Auswahl heute massgeblicher Instrumente dar.

Das Gebäudeprogramm stellt umfangreiche Mittel mit langfristiger Kontinuität zur Förderung der Energieeffizienz am Bau zur Verfügung (www.dasgebaeudeprogramm.ch). Zusammen mit den neuen Energievor-

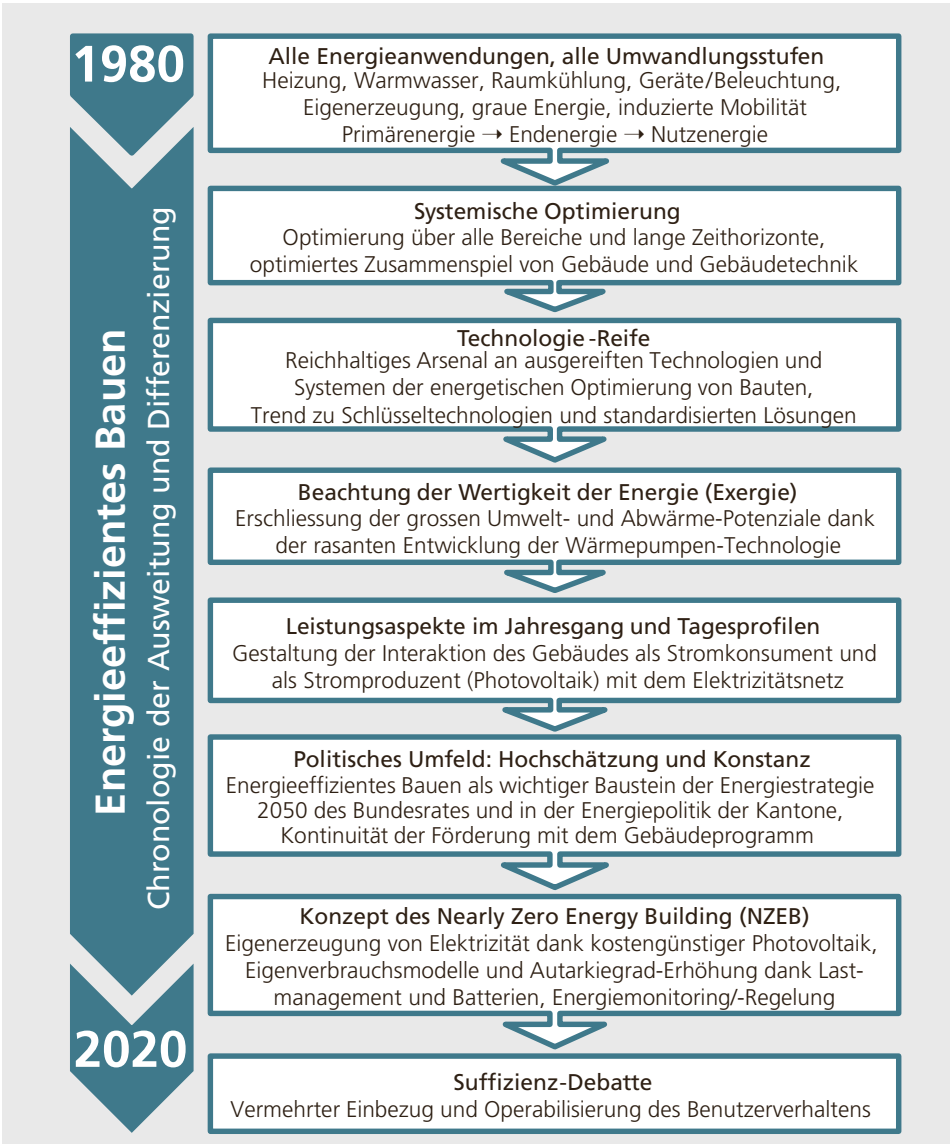


Abbildung 1.12: Themenbereiche, Hintergrund und Rahmenbedingungen des energieeffizienten Bauens.

schriften im Gebäudebereich, den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich 2014 (MuKEn 2014), dem Beschluss zum Ausstieg aus der Kernenergie und der Energiestrategie 2050 des Bundesrates hat das energieeffiziente Bauen weiteren Auftrieb erhalten. Neue Themenfelder werden angegangen. Ein Beispiel ist die Suffizienz-Debatte, in der das Benutzerverhalten und die Benutzerbedürfnisse thematisiert werden. Im technologischen Bereich wird einerseits der Siegeszug der Photovoltaik weitergehen und andererseits wird die Digitalisierung im Gebäudebereich in Form der Gebäudeautomation immer selbstverständlicher, wobei auch zunehmend Wohnbauten mit Systemen zu Monitoring und intelligenter Regelung ausgestattet werden.

Optimierungskonzepte und Schlüsseltechnologien

Die politisch beschlossene Energiewende lässt sich nicht mit einem Patent-Konzept erreichen. Es werden alle Register der Energieeffizienz gezogen und alle zur Verfügung stehenden erneuerbaren Energieträger eingesetzt werden müssen. Trotzdem kann festgestellt werden, dass es einige Schlüsseltechnologien gibt, welche die Energiezukunft prägen werden. Am bereits mit Abbildung 1.6 eingeführten typischen Mehrfamilienhaus-Neubau soll dies illustriert werden. Verschiedene Stufen der Energieoptimierung werden in der Folge an diesem Beispiel gezeigt und kommentiert.

In Abbildung 1.14 wird das Energieflussdiagramm desselben Mehrfamilienhaus-Neubaus mit einer anderen, ebenfalls häufigen technischen Lösung gezeigt und auf den Einsatz eines fossilen Energieträgers (Erdgas) verzichtet. Erdsonden-Wärmepumpen sind zur Schlüsseltechnologie für Heizung und Warmwasser geworden. Mit Jahresarbeitszahlen über vier erfüllen sie die Forderung nach Nutzung der Exergie von Energieträgern optimal. Die Energiebilanz ist geprägt vom Ausmass an Umweltwärme, die gewonnen werden kann. Das Grundschema dieses Konzepts dürfte in Zukunft sehr häufig sein und es illustriert den Trend zur «Vollelektrifizierung» der Gebäude. Nicht nur bei der Mobilität, wo ein starker Trend zur «Elektromobilität» hin feststellbar ist, wird auch der Gebäudepark in Zukunft mehr und mehr mit Elektrizität betrieben werden. Auch die damit

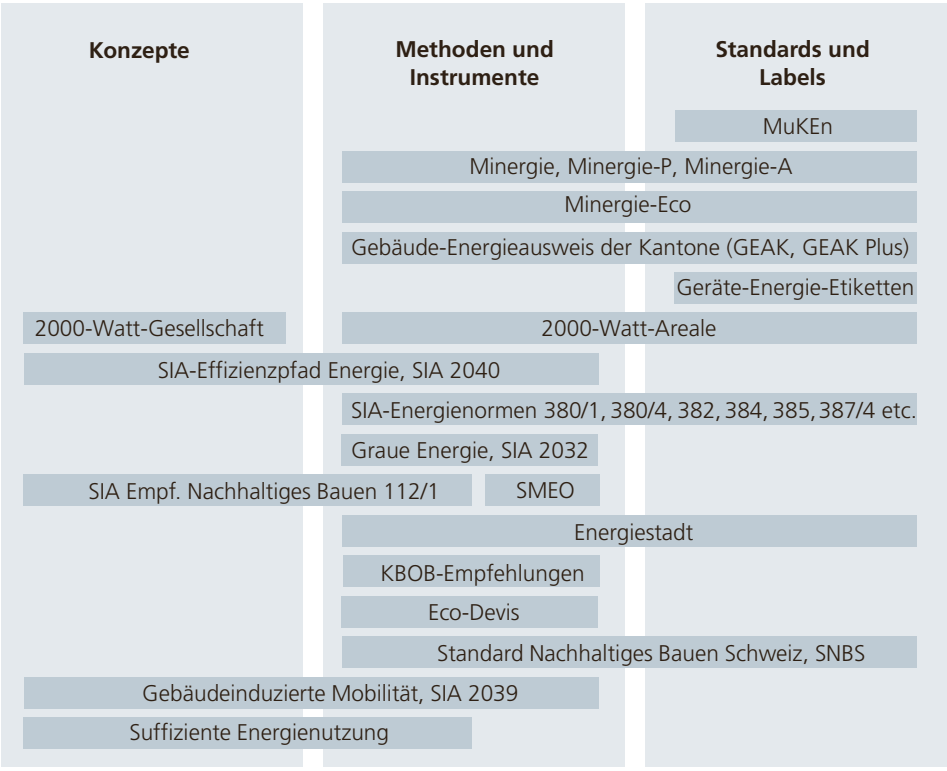


Abbildung 1.13: Übersicht über wichtige Instrumente des nachhaltigen Bauens (Auswahl).

verbundene Problematik wird augenfällig: Der Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie liegt wegen des hohen Strombedarfs hoch, weil für die durchschnittliche kWh Elektrizität in der Schweiz 2,6 kWh nicht erneuerbare Primärenergie eingesetzt werden müssen. Die 2000-Watt-Gesellschaft bezieht sich auf Primärenergie. Dank der hohen Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpenanlagen kann der Primärenergiefaktor (nicht erneuerbar) von Elektrizität mehr als kompensiert werden. Der SIA-Effizienzpfad Energie, der sich als Instrument des Konzepts der 2000-Watt-Gesellschaft versteht, setzt seine Ziel- und Richtwerte daher auch auf Stufe Primärenergie an. Die Summe der Richtwerte für Erstellung, Betrieb und Mobilität ergeben den Zielwert für die 2000-Watt-Gesellschafts-Kompatibilität eines Bauvorhabens. Bei neuen Wohnbauten liest sich diese Gleichung als 30 (Erstellung) + 60 (Betrieb) + 30 (Mobilität) = 120 kWh/(m² a). Mit 175 kWh/(m² a) ist das Beispiel gemäss Abbildung 1.14 allerdings mehr als 40 % von diesem Zielwert entfernt. Eine oft vergessene Anforderung des SIA-Effizienzpfades Energie ist die Erfüllung des Grenzwertes für den Heizwärmebedarf nach Norm SIA 380/1. Wäre das betrachtete Mehrfamilienhaus eine Erneuerung, würde das immerhin bedeuten, dass der Heizwärmebedarf 77 kWh/(m² a) unterschreiten müsste. Dies stellt sicher, dass zur Einhaltung des Zielwertes gemäss Effizienzpfad nicht eine thermisch miserable Gebäudehülle mit einem erneuerbaren Energieträger oder mit eingekauftem Ökostrom kompensiert wird.

Bei Minergie würde das Bild leicht anders aussehen, weil anstelle der nicht erneuerbaren Primärenergie die gewichtete Endenergie (bzw. gelieferte Energie) stehen würde. Ausserdem würde nur der Wärmeteil vom Minergie-Grenzwert betroffen. Mit einer Gewichtung von 2 des Elektrizitätsbedarfs für Heizung und Warmwasser von 17,5 kWh/(m² a) erreicht das Projekt den Grenzwert MuKEn 2014 und von Minergie knapp (38 kWh/(m² a)). Allerdings sind andere Anforderungen an Minergie nicht erfüllt beziehungsweise nachgewiesen, vor allem die automatische Lüftung.

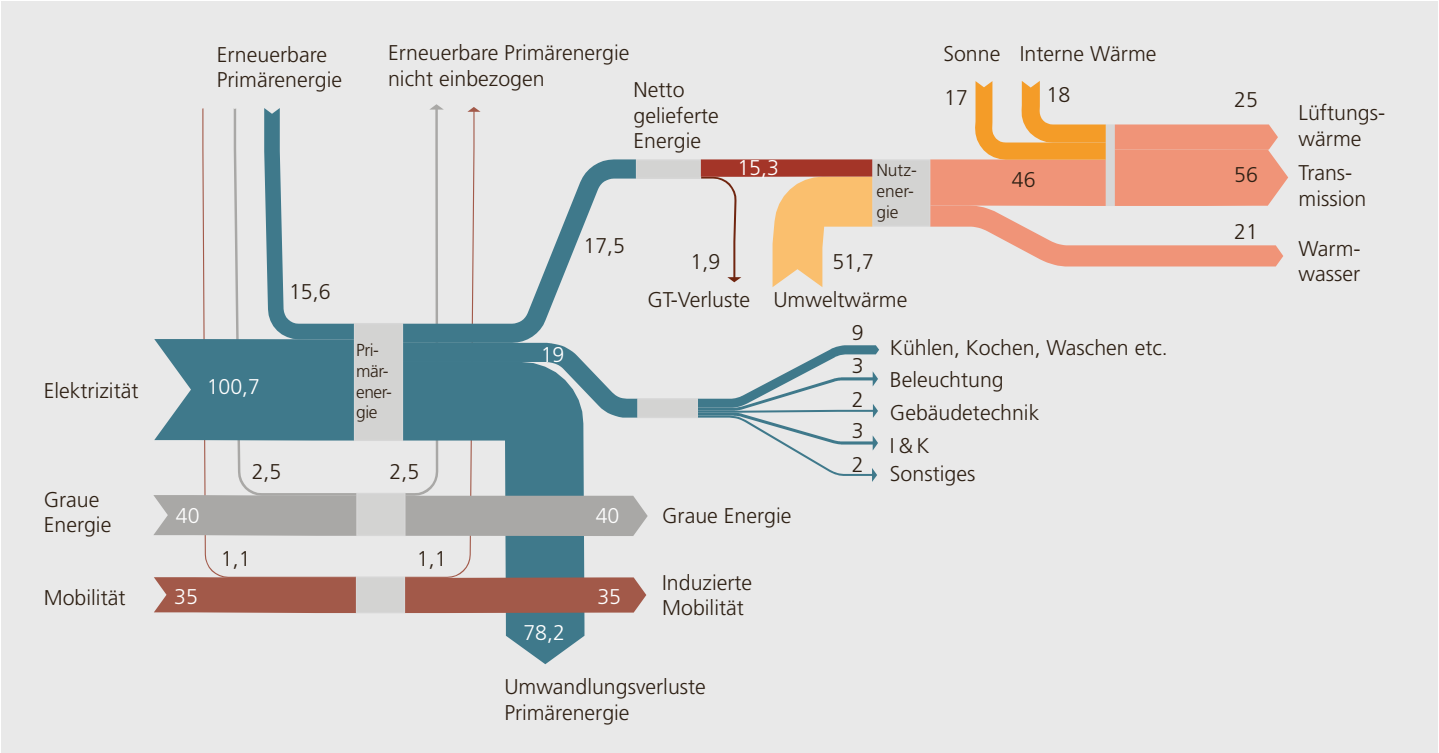


Abbildung 1.14: Spezifische Energieflüsse in kWh pro m² EBF pro Jahr in einem durchschnittlichen Mehrfamilienhaus-Neubau mit einer Erdsonden-Wärmepumpenanlage für Heizung und Warmwasser.

In Abbildung 1.15 wird der Schritt zum Minergie-Standard gemacht. Der Nutzwärmebedarf wird durch zwei Massnahmen deutlich verringert, nämlich den Einbau einer Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung und einen verbesserten Wärmeschutz der Gebäudehülle. Wegen der geringeren Verluste verschlechtert sich die Fähigkeit des Gebäudes, Solarstrahlung und interne Wärme (Abwärme von Beleuchtung, Geräten und Personen) zu nutzen und die entsprechenden Erträge sinken etwas. Für die Wärmeversorgung wird auf einheimische erneuerbare Energie gesetzt. 60 % der Wassererwärmung werden mit einer thermischen Kollektoranlage gedeckt. Für die Heizung und den Rest der Wassererwärmung kommt eine Holzheizung mit einer automatischen Pelletfeuerung zum Einsatz. Da der Brennwert von Holz erneuerbar ist, beschränkt sich der Anteil nicht erneuerbarer Primärenergie auf Holzschlag, Pelletierung und Transport und ist damit minimal. Selbstverständlich könnte das Ziel Minergie auch mit einer Wärmepumpenlösung erreicht werden. Beim übrigen Elektrizitätsverbrauch wird angenommen, dass überdurchschnittlich effiziente Geräte und Leuchten eingesetzt werden. Auch bei der grauen Energie wird angenommen, dass die diesbezügliche Optimierung ein Anliegen sei. Das führt zum Resultat, dass der Richtwert des Effizienzpfades für den Betrieb des Gebäudes (Wärme und Elektrizität für Geräte, Beleuchtung etc.) um 10 % unterschritten und der Gesamt-Zielwert gerade erreicht wird, obwohl der Richtwert für graue Energie nicht ganz eingehalten wird. Dass der Bedarf an Holzenergie im SIA-Effizienzpfad Energie kaum ins Gewicht fällt und daher alle Schwächen eines Gebäudekonzepts mit dieser Wahl ausgebügelt werden können, wird oft bemängelt.

Bei Minergie ist dies anders. Der Gewichtungsfaktor für Holz liegt bei 0,5, sodass im betrachteten Fall der gewichtete Holzenergiebedarf bei 16,4 kWh/(m² a) liegt. Dazuzurechnen ist noch der Elektrizitätsbedarf für die Lüftung von ca. 2 kWh/(m² a), womit die Minergie-Kennzahl Wärme auf 18,4 kWh/(m² a) zu liegen kommt. Das ist deutlich unter dem Minergie-Grenzwert von 55 kWh/(m² a) für den Gesamtenergiebedarf beziehungsweise 35 kWh/(m² a) für den Energiebedarf für Heizung und Warmwasser.

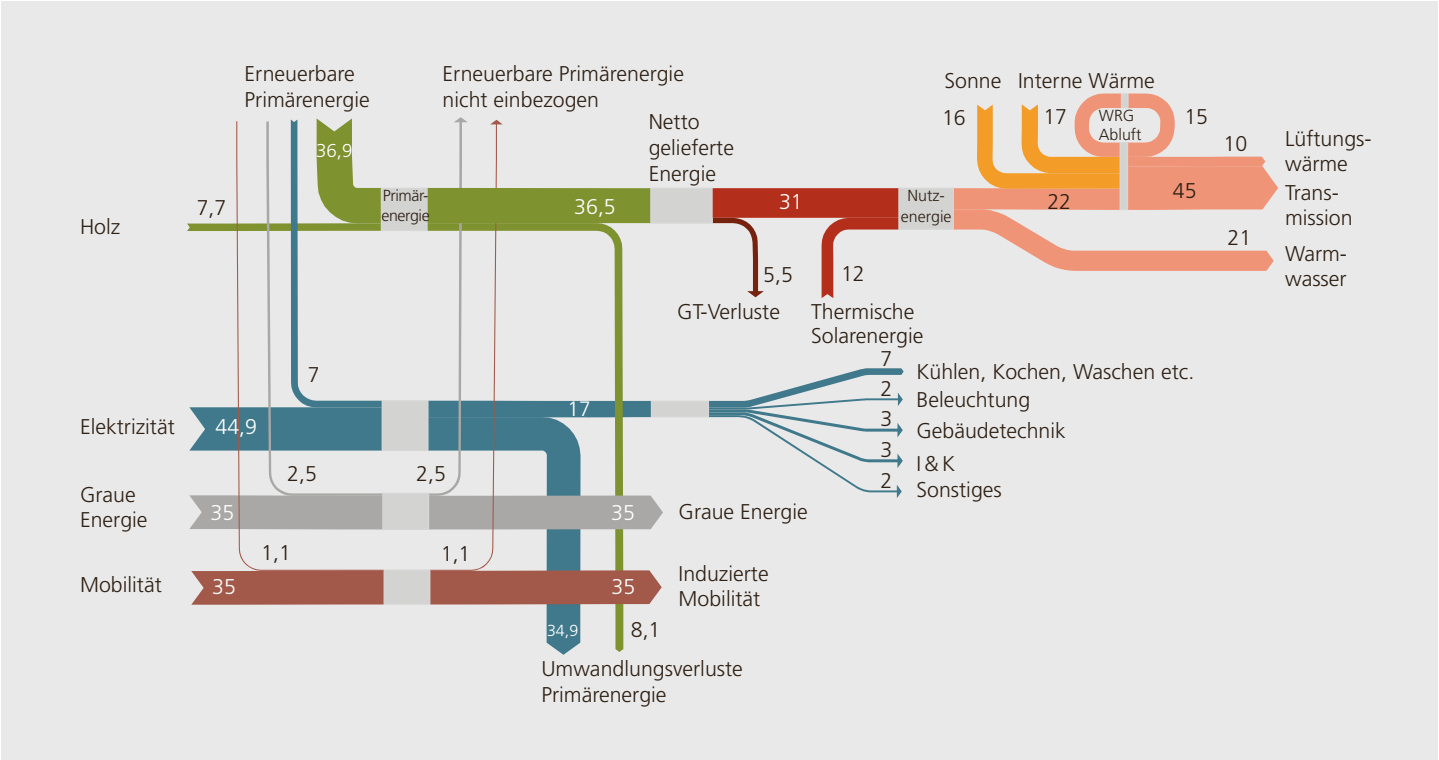
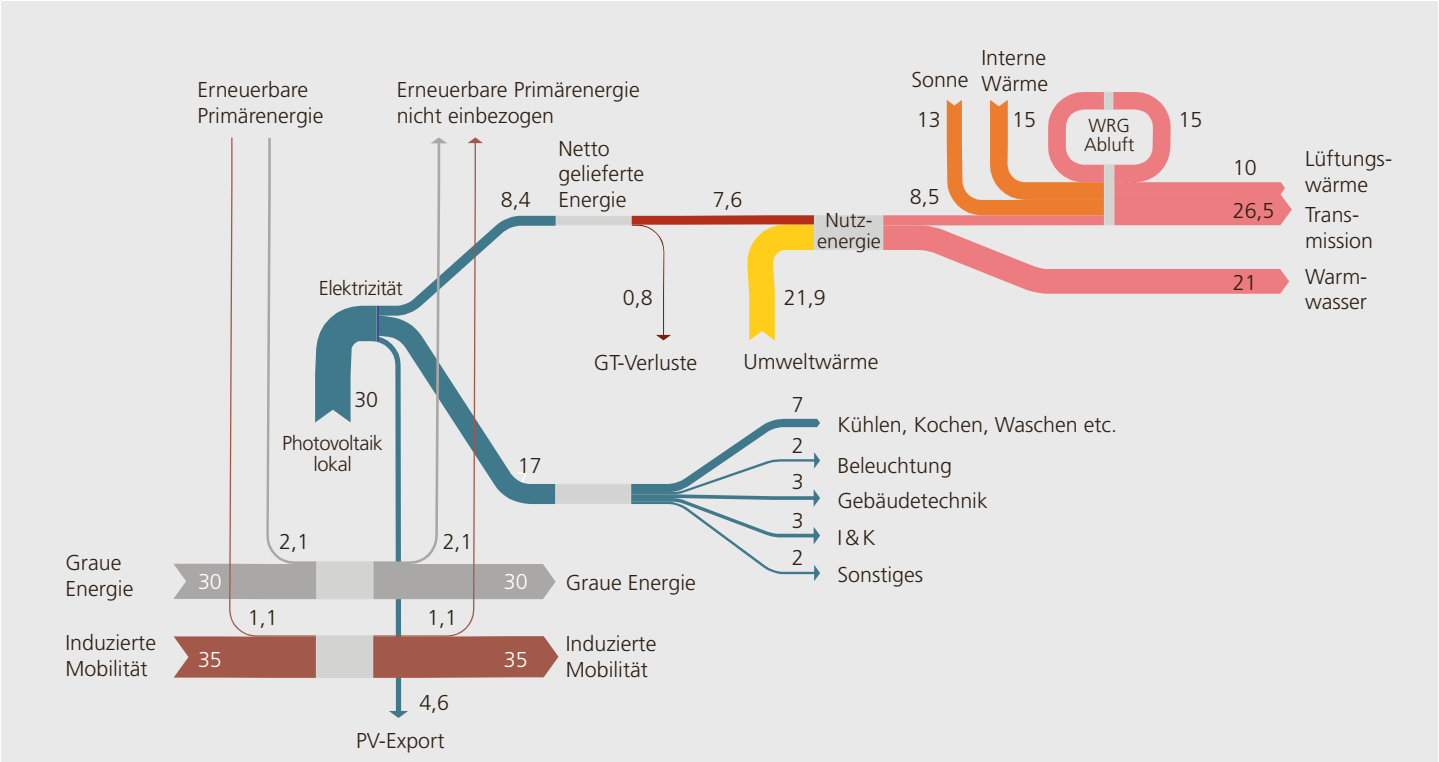


Abbildung 1.15: Spezifische Energieflüsse in kWh pro m² EBF pro Jahr im Mehrfamilienhaus-Neubau im Minergie-Standard.

Abbildung 1.16 zeigt die Projektvariante Minergie-A mit einer Lösung, die auch die Anforderungen von Minergie-P erreicht, d. h. über einen aussergewöhnlich guten Wärmeschutz verfügt. Die sehr stark reduzierten Wärmeverluste führen dazu, dass die Ausnutzung der eingestrahlten Sonnenenergie und der internen Abwärmen sich nochmals etwas verschlechtert. Minergie-A wird hier durch eine relativ grosse Photovoltaikanlage erreicht, die nicht nur den Wärmebedarf abdeckt, wie dies für Minergie-A verlangt ist (inkl. Ventilatorenergie der Lüftung), sondern auch noch den Elektrizitätsbedarf für Beleuchtung, Geräte etc. Es kann sogar noch überschüssiger Strom an das Netz abgegeben werden. Bei einem Gebäudestandort im schweizerischen Mittelland braucht es zur Erzeugung von 30 kWh Photovoltaikstrom etwa 0,25 m² bis 0,3 m² hochwertiger PV-Zellen. Das bedeutet, dass das diskutierte Energieflussbild nur für ein Gebäude mit maximal vier Stockwerken (bei 0,25 m²) beziehungsweise mit maximal drei Stockwerken (bei 0,3 m²) realisiert werden kann. Jedenfalls, wenn die ganze Photovoltaik auf dem Dach platziert ist und das Dach vollständig dafür genutzt werden kann.

Abbildung 1.16: Spezifische Energieflüsse in kWh pro m² EBF und pro Jahr im Mehrfamilienhaus-Neubau, der die Standards Minergie-P und Minergie-A erreicht.

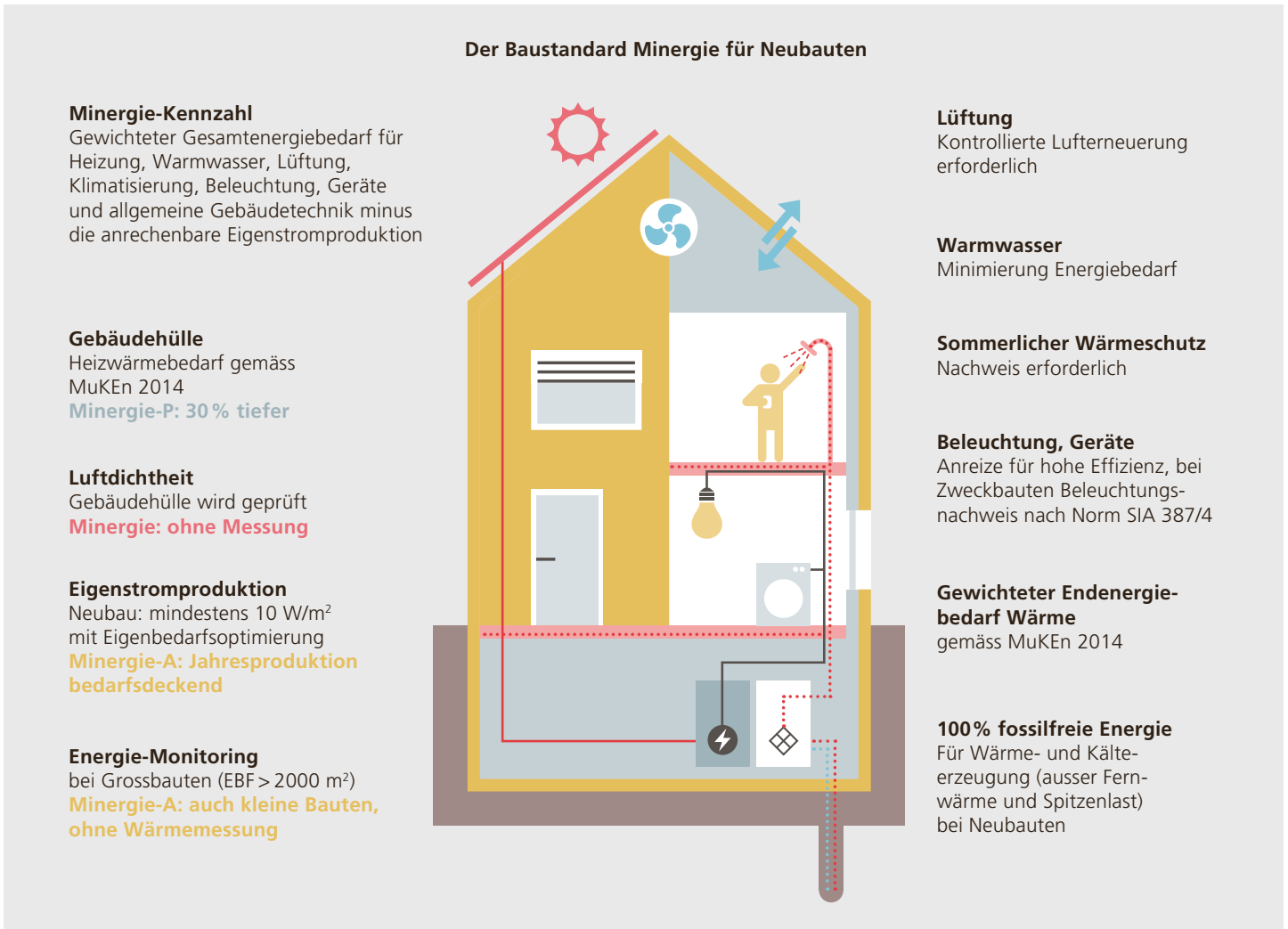


Planen und bauen mit Minergie

Minergie ist ein Qualitätslabel für energieeffiziente Neubauten und Modernisierungen und umfasst alle Gebäudekategorien. Im Fokus stehen eine hochwertige Gebäudehülle, ein kontrollierter Luftwechsel und eine effiziente Versorgung mit erneuerbaren Energien. Das Label umfasst die drei Standards Minergie, Minergie-P und Minergie-A sowie den Zusatz Eco. Dabei steht Minergie-P für Niedrigstenergie-Gebäude und Minergie-A für Plusenergie-Gebäude. Der Zusatz Eco lässt sich mit allen Standards kombinieren und bezeichnet Gebäude, bei denen auch bauökologische und gesundheitliche Aspekte berücksichtigt sind.

Minergie wendet sich gleichermassen an Bauherrschaften wie an Planer und Architekten. Die Minergie-Standards sind präzise definiert und werden durch den erforderlichen Zertifizierungsnachweis auch detailliert dokumentiert. Für Bauherrschaften ist es damit möglich, mit der Bestellung eines Minergie-Standards – einem einzigen Begriff im Architektenvertrag – ein Gebäude zu erstellen, das nach den aktuellen, in der Fachwelt anerkannten Regeln des energieeffizienten Bauens mit hohem thermischem Komfort gebaut wurde. Architekten und Planer finden bei Minergie eine Fülle an Hilfsmitteln und Instrumenten, die ihnen helfen, auf bewährten Wegen zum energieeffizienten Gebäude zu gelangen. 2017 wurden – rechtzeitig zum zwanzigjährigen Jubiläum von Minergie – die Standards und Hilfsmittel auf den aktuellsten Stand des Wissens gebracht. Minergie ist somit auch umfassender Hort des Wissens und der Erfahrung in energieeffizientem Bauen. Es soll daher in der Folge gezeigt werden, wie mit Miner-

Abbildung 1.17: Die wichtigsten Anforderungen an ein Minergie-Gebäude. (Quelle: Minergie)



gie das in dieser Publikation zusammengetragene Knowhow zusammengebracht und zu erfolgreichen energieeffizienten Gebäuden geformt werden kann.

Gesamtenergiebilanz

Mit den neuen Vorschriften (MuKEn 2014) übernehmen die Kantone die wesentlichsten Anforderungen von Minergie für Neubauten, nämlich die Grenzwerte für den gewichteten Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser (inkl. Lüftung und Klimatisierung, wenn vorhanden). Minergie behält die strengeren Anforderungen bei (etwa den kontrollierten Luftwechsel) und geht nochmals einen Schritt weiter (z. B. bei Minergie-P sowie mit dem Verbot fossiler Energien bei Neubauten oder der Verpflichtung zum PV-Einsatz). Ausserdem erweitert Minergie die Systemgrenze: Zusätzlich zum Verbrauch für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Klimatisierung berücksichtigt Minergie auch den Bedarf für Beleuchtung, Geräte und allgemeine Gebäudetechnik. Quantifiziert wird dieser gewichtete Gesamtenergiebedarf durch die Minergie-Kennzahl.

Minergie im Kontext

- **SNBS:** Auch mit dem Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz SNBS lassen sich Synergien nutzen. Eine Doppelzertifizierung von Gebäuden ist vereinfacht möglich und für die Antragsteller finanziell attraktiv. Der Minergie-Eco-Nachweis deckt sich mit den SNBS-Kriterien zu Energie, Bauökologie und Gesundheit, was die Zertifizierung zusätzlich vereinfacht.
- **2000-Watt-Areal:** Minergie- und vor allem Minergie-A- und Minergie-P-Gebäude sind als Bausteine eines 2000-Watt-Areals sehr gut geeignet. Sie stellen die hohen Ansprüche an die Energieeffizienz sicher und vereinfachen die Areal-Zertifizierung.
- **Energiestadt:** Im Gebäudestandard 2019 des Labels Energiestadt werden für Neubauten die Standards Minergie-A und Minergie-P empfohlen und für Erneuerungen die Minergie-Neubau-Standards.

Minergie-Anforderungen

Die Minergie-Kennzahl ist die Hauptanforderung zur Bewertung der energetischen Qualität eines Gebäudes. Sie setzt die Limite für den gewichteten Gesamtenergiebedarf für Heizung, Warmwasser, Lüftung, Klimatisierung, Beleuchtung, Geräte und

Anforderungen Wohnen EFH und MFH			
	Minergie	**Minergie-P**	**Minergie-A**
Minergie-Kennzahl*			
Neubau	55 kWh/m²	50 kWh/m²	35 kWh/m²
Erneuerung	90 kWh/m²	80 kWh/m²	35 kWh/m²
Heizwärmebedarf**			
Neubau	MuKEn 2014	70 % MuKEn 2014	MuKEn 2014
Erneuerung	keine Vorgabe	90 % MuKEn 2014	keine Vorgabe
Endenergiebedarf Wärme**			
Neubau	35 kWh/m² (MuKEn 2014)		
Erneuerung	60 kWh/m² (Minergie-Anforderung)		
Eigenstromproduktion	Neubau: mindestens 10 W/m² (MuKEn 2014)		bedarfsdeckend
Kontrollierte Lufterneuerung	Ja		
Sommerlicher Wärmeschutz	Ja		
Energieträger	Neubau: keine fossilen Brennstoffe		
Luftdichtheit q_{a50}			
Neubau	1,2 m³/h m²	0,8 m³/h m²	
Erneuerung	1,6 m³/h m²	1,6 m³/h m²	
Energie-Monitoring	Ja, wenn über 2000 m² Energiebezugsfläche		Ja***

* Hauptanforderung
** Zusatzanforderung
*** alle Gebäudegrössen, unter 2000 m² ohne Wärmemessung

Abbildung 1.18: Die Minergie-Anforderungen für Wohngebäude (MFH und EFH).

allgemeine Gebäudetechnik. Am Haus erzeugter Strom kann angerechnet werden. Damit verlangt Minergie eine Gesamtbetrachtung aller für den Betrieb nötigen Energien und schafft ein Bewusstsein für die Bedeutung der verschiedenen Energieverbräuche. Die Minergie-Kennzahl ist von der Gebäudekategorie abhängig. Zusätzliche Anforderungen an den Heizwärmebedarf und an den Endenergiebedarf gemäss MuKEn 2014 gewährleisten, dass die Anforderungen nicht nur mit einer Massnahme, z. B. einer sehr grossen PV-Anlage, eingehalten werden, sondern dass alle Komponenten von hoher Qualität sind.

Sommerlicher Wärmeschutz – die Dringlichkeit steigt

Mit fortschreitendem Klimawandel wird der thermische Komfort in den Sommermonaten auch bei uns zum ernsten Thema. An erster Stelle stehen die baulichen Massnahmen zur Vermeidung oder Reduktion der Anzahl Überhitzungsstunden im Gebäude. Die physikalischen Vorgänge, die dazu führen, erfolgen im Tagesgang, sind also verglichen mit der Heizsituation im Winter sehr rasch. Ihre Berechnung ist nur mit aufwendigen Simulationen möglich. Minergie stellt Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz. Minergie stellt den Planerteams aber auch einfache Hilfsmittel zur Verfügung, mit denen die wesentlichsten Elemente des sommerlichen Wärmeschutzes (Sonneneinstrahlung durch die Fenster und thermische Masse) zweckmässig prognostiziert und ausgeführt werden können. Ein guter sommerlicher Wärmeschutz soll sicherstellen, dass in Wohnbauten auch in Zukunft ein guter thermischer Komfort ohne aktive Kühlung oder allenfalls mit Freecooling gewährleistet ist und auf eine mechanische Kühlung verzichtet werden kann.

Zweckbauten

Die Regeln zum energieeffizienten Bauen basieren auf Wohnbauten. Komplexe Grossbauten und spezielle Nutzungen wie Turnhallen, Hallenbäder oder Industriebauten sprengen den Rahmen dieser Publikation. Einfache Zweckbauten für Büronutzungen, Schulen und ähnliche Bauten werden in der Folge thematisiert. Sie bilden neben den Wohnbauten den zweiten grossen Teil des schweizerischen Gebäudeparks. Grundsätzlich kommen dieselben Massnahmen zur energetischen Sanierung zur Anwendung wie bei Wohnbauten. Zwei Unterschiede sind zu nennen:

1. Mechanische Kühlung und Klimatisierung sind in zunehmendem Masse ein Thema, vor allem bei Neubauten und neueren Bestandsbauten. Der sommerliche Wärmeschutz vermag bei Zweckbauten einen befriedigenden Komfort im Sommer je nach Ausgangslage nicht immer sicherzustellen. Kenntnis und Einhaltung der Grundregeln des sommerlichen Wärmeschutzes sollen aber dazu führen, dass Zweckbauten nach Möglichkeit ebenfalls mittels Freecooling gekühlt werden respektive dass die Gebäudebereiche, in denen eine mechanische Kühlung notwendig ist, möglichst klein sind und der spezifische Kältebedarf gering bleibt.
2. Der Elektrizitätsbedarf für Beleuchtungen und Betriebseinrichtungen hat eine wesentlich grössere Bedeutung als bei Wohnbauten (was wiederum mit dem Kühlbedarf zu tun hat, da hier grössere interne Wärmelasten anfallen).

Die Optimierung von Zweckbauten (Neubauten wie Sanierungen) ist ausserdem geprägt von einer anderen Nutzungs- und Betriebsweise. Während Wohnbauten rund um die Uhr genutzt und häufig im Privatbesitz sind (und teilweise auch vom Eigentümer genutzt werden), sind bei Zweckbauten Eigentümerschaft und Nutzer stärker getrennt, die Nutzer in den Betrieb des Gebäudes kaum involviert und die Gebäude nachts und an den Wochenenden oft nicht benutzt. Daraus ergeben sich wichtige Chancen für Automatisierung, Steuerung und Regelung des Betriebs.

1.4 Energiereduktion und Eigenproduktion

Was als «heizenergiesparendes Bauen» vor vielen Jahren begonnen hat, führte schliesslich zum Begriff des Net Zero Energy Building (NZEB, meist zurückgestuft zum Nearly ZEB). Es ist die Vision, dass das Gebäude so viel Energie erzeugt, wie es braucht. Tatsächlich öffnen sich dem Planerteam eines Bauprojektes zwei Stossrichtungen, die in ihrem Zusammenwirken enorme Optimierungspotenziale bergen. Es ist die Kombination aus Massnahmen zur Energiebedarfsreduktion (Wärmeschutzmassnahmen der Gebäudehülle und effiziente Geräte) und Eigenproduktion von Elektrizität (ermöglicht durch die billig gewordene Photovoltaik).

Abbildung 1.19 illustriert, dass für die Optimierung der Akzent eher auf die Verbrauchsreduktion oder eben auf die Produktion erneuerbarer Energie gesetzt werden kann. Mehr oder weniger dämmen ergibt ganz unterschiedliche Werte im Heizwärmebedarf eines Gebäudes, der durch mehr oder weniger Stromerzeugung gedeckt werden muss, um eine gute Energieeffizienz zu erreichen. Eine deutliche Ausprägung des gut gedämmten Hauses bildet der Standard Minergie-P. Minergie-A steht für eine volle Deckung des Jahresbedarfs. Eine grosse Photovoltaikanlage ist deshalb unabdingbar. Offensichtlich können durch die weitgehende Ausschöpfung beider Strategien zusammen sehr weitreichende Ziele erreicht werden und die Gebäude sogar zu Netto-Energielieferanten werden. Diese Abwägung zwischen Energiereduktion und Eigenproduktion bringt architektonische Freiheit und wirtschaftliche Vorteile, weil weder die Energieeffizienz noch die Platzierung von Solarmodulen bis ins letzte kostentreibende Detail ausgereizt werden müssen. Dadurch können auch vermehrt handelsübliche Produkte genutzt werden.

Drei Optimierungsfelder

Planerteams können die Gesamtenergiebilanz eines Gebäudes innerhalb von drei Optimierungsfeldern beeinflussen. Von den zahlreichen möglichen Massnahmen ist eine Auswahl in der Abbildung 1.19 aufgelistet. Naturgemäss ist der Weg zum Ziel objektabhängig. Die Nutzung eines Gebäudes, seine Geometrie, insbesondere die Höhe, der Standort und ob es sich um

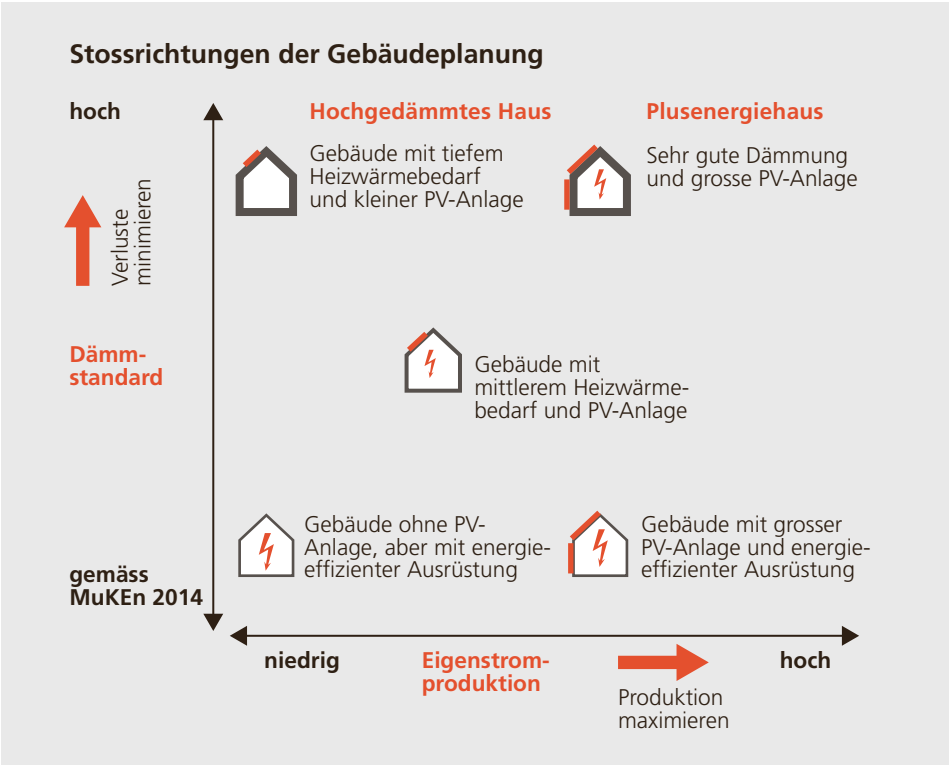
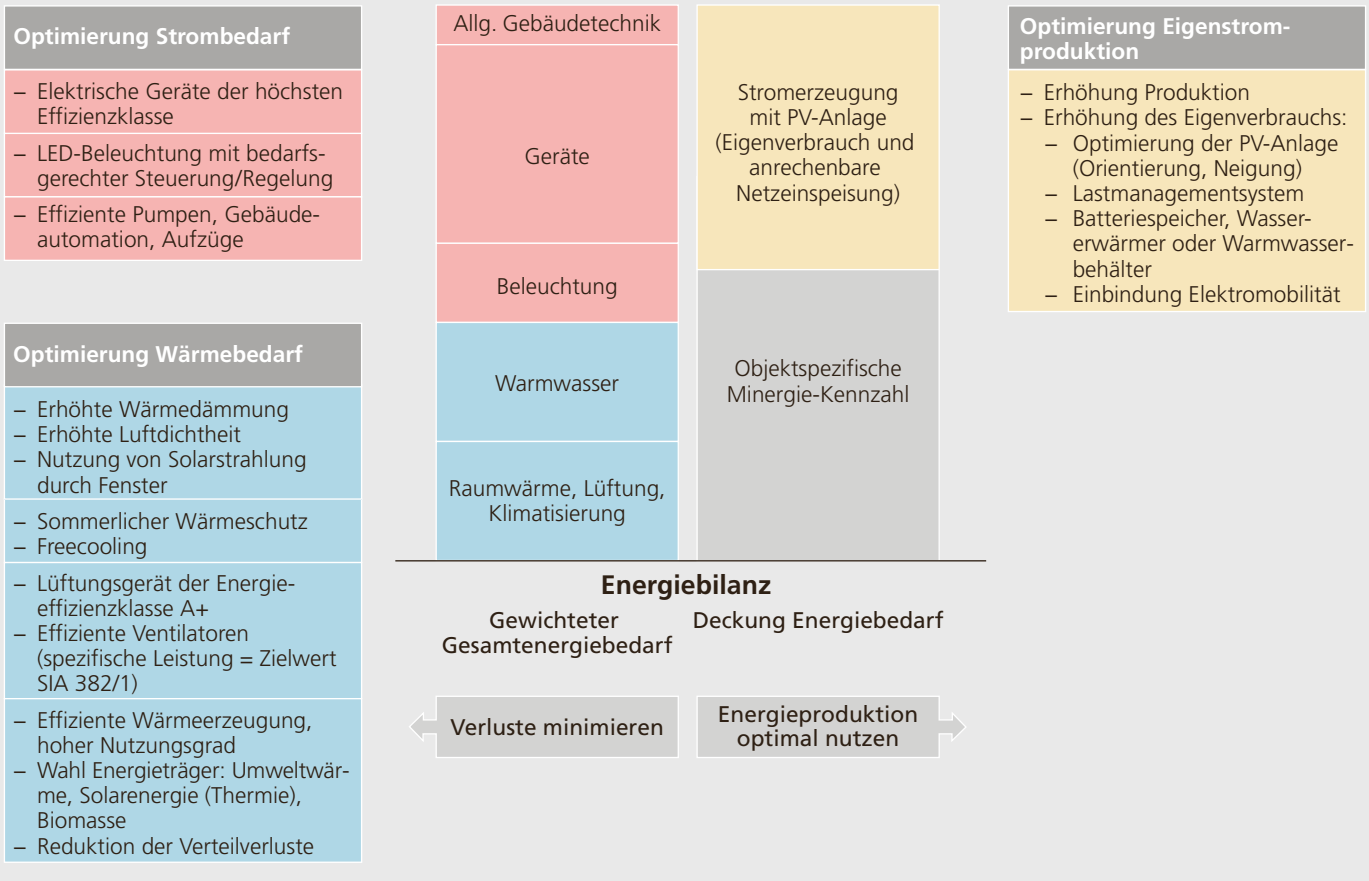


Abbildung 1.19: Ein Gebäude lässt sich innerhalb der Grafik positionieren, je nach Nutzung, Geometrie und Standort, aber auch nach individuellen Vorlieben der Bauherrschaft. Viele Häuser liegen im Zentrum des Quadrats, umfassen also eine ausgewogene Mischung aus gutem Dämmstandard und der Bedarfsdeckung durch Eigenstromerzeugung. Ein hochgedämmtes Haus minimiert vor allem die Verluste. Ein Plusenergiehaus maximiert zusätzlich noch die Eigenproduktion. (Quelle: Minergie)

einen Neubau, eine etappierte oder eine Gesamterneuerung handelt, verändern die Palette der Massnahmen.
Dies eröffnet Planern und Bauherrschaften grosse Freiheiten bei der Abstimmung von baulichen und haustechnischen Massnahmen gleichermassen wie in der Gestaltung und Materialisierung der Gebäude.
Der Baumarkt bietet auch ein breites Spektrum im Technisierungsgrad eines Gebäudes. Denn je nach Gewichtung der Optimierungsfelder ergeben sich Bauten mit wenig Technik («low-tech») oder Objekte mit vielfältiger technischer Ausrüstung («high-tech»).
Durchwegs stehen aber die Optimierungsfelder «Wärmebedarf», «Strombedarf» sowie «Eigenstromproduktion» in direkter Wechselwirkung zueinander.

Abbildung 1.20: Drei Optimierungsfelder: Wärmeverluste minimieren, Strombedarf optimieren oder Eigenproduktion an Energie maximieren? (Quelle: Minergie)

Drei Optimierungsfelder von Minergie-Gebäuden



1.5 Energetische Gesamtbilanzierung

Monika Hall

Grundlagen der Energiebilanz

Neben dem Heizwärmebedarf ist heute zusätzlich der Wärmebedarf (Heizung, Warmwasser, Lüftung, Kälte/Klima [8]) oder gar eine Gesamtbilanz über das Gebäude sinnvoll [9]. Je nach Anforderung beinhaltet die Gesamtbilanz nicht nur die Betriebsenergie, sondern auch die graue Energie des Gebäudes und die Energie für die Alltagsmobilität [10]. Aufgrund der Klimadebatte und dem damit verbundenen Umstieg auf erneuerbare Energien steigt die Anzahl der Photovoltaikanlagen an Gebäuden. Bund und Kantone unterstützen dies seit Jahren durch Fördergelder und mit der MuKEn 2014 durch eine Anforderung an die Installation einer Photovoltaikanlage bei Neubauten. Der Ertrag der lokalen Stromerzeugung fliesst ebenfalls in die Energiebilanz ein. Zum Teil werden sogar der im Gebäude direkt verbrauchte Strom, der sogenannte Eigenverbrauch, und die Netzeinspeisung in der Bilanz separat berücksichtigt [9], [11]. Hierfür ist die gängige Bilanz auf Jahressummen jedoch nicht mehr praktikabel. Bei der Jahressumme kompensiert der sommerliche Ertragsüberschuss das Defizit im Winter, was zu einer zu hohen Eigenverbrauchsrate führt. Die Monats- beziehungsweise Tagesbetrachtung eliminiert die saisonale Kompensation, was eine Reduktion der Eigenverbrauchsrate zur Folge hat. Eine Bilanz auf Stundenzeitschritten oder kürzer berücksichtigt den Tagesverlauf von Solarertrag und Bedarfsprofil und führt somit zu den kleinsten, jedoch realistischen Eigenverbrauchsraten (Abbildung 1.21).

Gängige Zeitintervalle für Profile und Klimadaten sind 15- und 60-Minuten-Werte. Grundsätzlich wären kürzere Zeitschritte wünschenswert. Der Unterschied von 15 Minuten zu 1 Minute als Intervall bedeutet eine Reduktion der Eigenverbrauchsrate um ca. 5 % [12]. Daten mit kürzeren Zeitschritten als 15 Minuten sind selten verfügbar und führen zu grossen Datenmengen, was auch die Handhabung aufwendig macht. Da der Fehler nicht allzu gross ist, reicht es, mit den üblicherweise vorhandenen Daten zu rechnen. Ist eine Batterie installiert, spielt die Auflösung von 60-, 15- oder 1-Minuten-Schritten keine Rolle mehr [12]. Grundsätzlich hängt die energetische Gesamtbilanzierung von verschiedenen Parametern ab (Tabelle 1.1).

Eigenverbrauchsrate
Eigenverbrauch (= Anteil des selbst verbrauchten PV-Ertrags) bezogen auf den Jahres-PV-Ertrag

Autarkiegrad
Eigenverbrauch bezogen auf den Jahresbedarf des Gebäudes

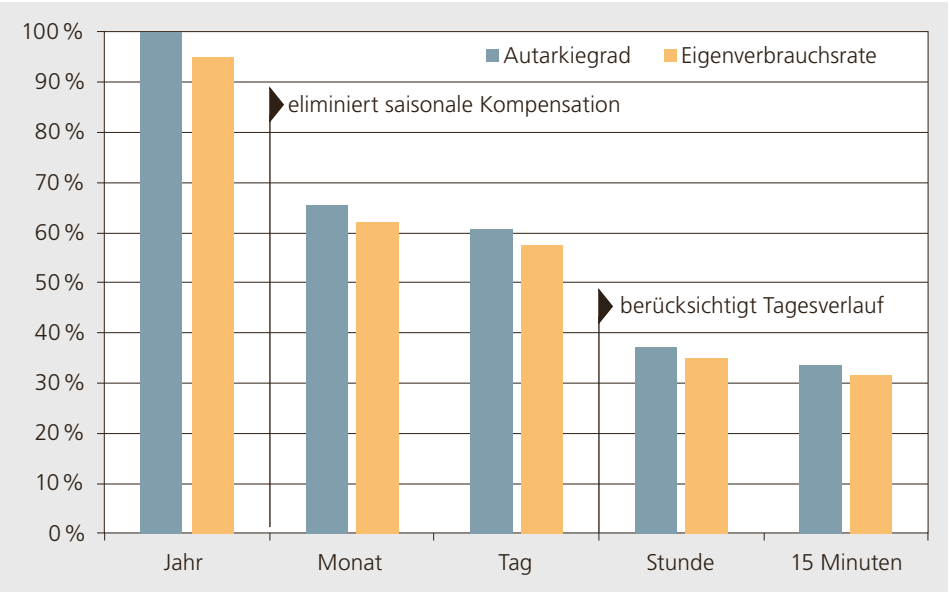


Abbildung 1.21: Autarkiegrad und Eigenverbrauchsrate in Abhängigkeit von der zeitlichen Auflösung, Basis 15-Minuten-Werte. Ertrag: 11 200 kWh/a, Verbrauch 10 600 kWh/a. (Quelle: [12])

Gewichtung der Energiebilanz

Die Energiebilanzen werden in der Regel auf Stufe Primärenergie, gewichtete Endenergie oder Treibhausgasemissionen erstellt und damit die eingesetzten Energieträger in der Bilanz berücksichtigt. Je nach Umrechnungsfaktoren zeigt die Energiebilanz ein anderes Ergebnis und hat allenfalls Einfluss auf die Planung (Abbildung 1.22). Während bei symmetrischen Gewichtungsfaktoren (gleiche Faktoren für Netzbezug und Netzeinspeisung) die Grösse der benötigten Photovoltaikanlage für z. B. eine Null-Energiebilanz in End- und gewichteter Energie gleich gross ist, weicht sie bei einer Bilanzierung mit unsymmetrischen Gewichtungsfaktoren nach oben beziehungsweise unten gegenüber der Bilanz in Endenergie ab. Das hat zur Folge, dass physikalisch mehr oder weniger als der benötigte Jahresbedarf ins Netz eingespeist wird.

Parameter	Erläuterung
Bilanzgrenze	**Gebäudetechnik, Betriebsenergie**, graue Energie, Mobilität
Datengrundlage	**Planungswerte (Bedarf)**, gemessene Werte (Verbrauch)
Zeitraum	Stunden, Tag, Woche, Monat, **Jahr**, Lebenszyklus
Bilanztyp	**Bedarf respektive Produktion**, Export respektive Import
Angebot respektive Nachfrage	Gleichzeitigkeit von Produktion und Eigenbedarf
Anrechenbarkeit der Eigenproduktion	**Energiekonzept**, ökologischer Mehrwert (Handel mit Herkunftszertifikaten für erneuerbare Energie)
Gewichtung der Energieträger	**Primärenergie total respektive nicht erneuerbar, politische Faktoren, Minergie, Treibhausgasemissionen,** Umweltbelastungspunkte, Kosten
Gewichtungsfaktoren der Energieträger	**Symmetrische** oder asymmetrische Werte, diese können **fixe**, saisonale, monatliche, stündliche oder momentane Werte sein.

Tabelle 1.1: Prinzipiell hängt die energetische Gesamtbilanzierung eines Gebäudes von verschiedenen Parametern ab (übliche Parameter sind fett gedruckt).

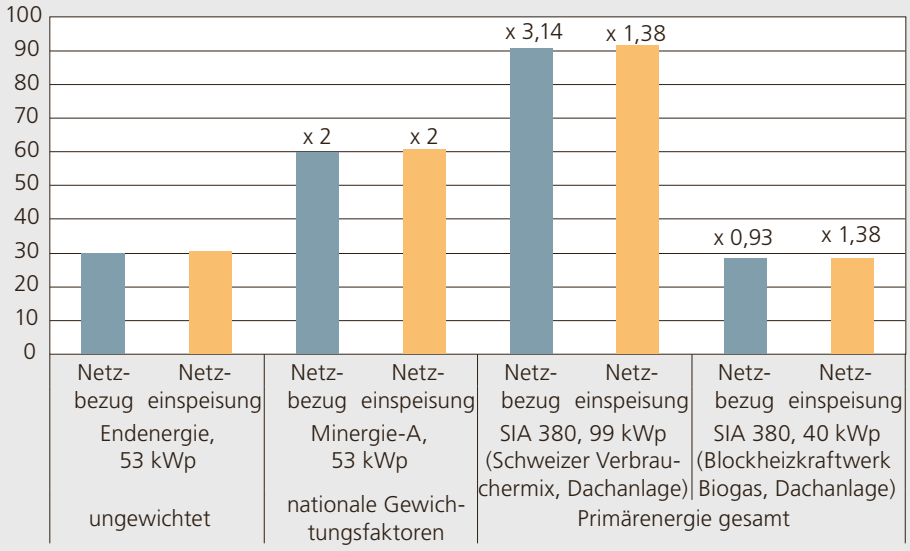


Abbildung 1.22: Benötigte Photovoltaikleistung, um die Null-Energiebilanz mit unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren zu erreichen. Umrechnungsfaktoren für Strom gemäss den nationalen Gewichtungsfaktoren [13] und Norm SIA 380 [14].

Gebäudedefinition: Mehrfamilienhaus, Energiebezugsfläche 1200 m², Heizwärmebedarf 25 kWh/(m²a), Minergie-Standardwerte für Geräte, Beleuchtung und allgemeine Gebäudetechnik, Wärmepumpe mit JAZ Heizung/Warmwasser: 3,0/2,7, Photovoltaikdachanlage: Süd-West, 30° Neigung, 950 kWh/kWp (Berechnung mit PVopti V2019.1 [15]).
Der Primärenergiefaktor (PEF) von 1,38 gemäss SIA 380 gilt für PV-Dachanlagen, bis Ausgang Wechselrichter. Die Einspeisung ist also mit einem PEF von 1,38 zu verrechnen.

Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV)

Lokale Stromerzeugung hat einerseits einen Einfluss auf die Energiebilanz und andererseits auf das öffentliche Stromnetz. Die Gebäude beziehen nicht nur wie bisher Strom aus dem Netz, sondern speisen auch den überschüssigen Strom zurück. Je mehr vom lokal erzeugten Strom direkt im Gebäude verbraucht wird, desto weniger wird in das Netz zurückgespeist. Im besten Fall können somit Einspeise- und Bezugsspitzen reduziert und das Gebäudeprofil etwas geglättet werden, was die Netzstabilität verbessert. Ein hoher Eigenverbrauch ist auch finanziell interessant, da die Gestehungskosten für Solarstrom in der Regel günstiger sind als die Strombezugstarife des Energieunternehmens.

Seit Anfang 2018 sind Zusammenschlüsse von mehreren Endverbrauchern zum Eigenverbrauch (ZEV) zulässig [15]. Eigenverbrauchsgemeinschaften (EVG) von vor 2018 können in ZEV umgewandelt werden, wenn sie die entsprechenden Bedingungen erfüllen. Ein ZEV verfügt über nur einen Netzanschluss zum Verteilnetzbetreiber. Für einen ZEV ist eine Produktionsleistung der Anlage von mindestens 10 % der Anschlussleistung des Zusammenschlusses notwendig. Es ist nicht erlaubt, den Solarstrom innerhalb des ZEV teurer zu verkaufen als das extern bezogene Stromprodukt kostet. In der Regel wird er günstiger verkauft und der ZEV führt zu günstigeren Strompreisen für alle teilnehmenden Endverbraucher. Grossen ZEV mit einem Gesamtstromverbrauch von mehr als 100 MWh/a steht der Zugang zum freien Strommarkt offen, was den Strompreis weiter senkt und einen ZEV noch attraktiver macht.

Eigenverbrauchsoptimierung

Zur Erhöhung des Eigenverbrauchs bieten sich Batteriespeicher und Lastmanagement an. Ein Tagesspeicher ist in der Regel ausreichend, damit die Batterie über Nacht vollständig entladen werden kann und am nächsten Morgen wieder für einen kompletten Ladezyklus zur Verfügung steht. Eine Batterie bietet die grösste Flexibilität und führt in der Regel zu den höchsten Eigenverbrauchsraten. Für das Lastmanagement eignen sich insbesondere grosse Verbraucher wie Wärmepumpen und Elektromobilität. Smarte Regler erlauben, die Leistung der Wärmepumpe an den Solarertrag anzupassen. Zur Brechung der Einspeisespitzen können Warmwasserspeicher über die Mittagszeit geladen werden. Auch die Kombination von Wärmepumpen mit einem technischen Speicher erhöht den Eigenverbrauch. Werden Luft-Wasser-Wärmepumpen hauptsächlich am Tag betrieben, erhöht sich nicht nur der Eigenverbrauch, sondern auch ihre Effizienz infolge der höheren Aussenlufttemperatur.

Elektrofahrzeuge können tagsüber direkt geladen werden. Werden sie über Nacht geladen, sollte dies in der Auslegung des Batteriespeichers berücksichtigt werden. Ein Lademanagement ist zu empfehlen.

Waschmaschine und Geschirrspüler können ebenfalls während den Stunden mit Solarertrag betrieben werden, jedoch ist ihr Einfluss auf die Eigenverbrauchserhöhung eher gering [16].

Plusenergiegebäude

Ist in der Jahressumme der Photovoltaikertrag höher als der gesamte Jahresenergiebedarf des Gebäudes, wird es als Plusenergiegebäude bezeichnet (Abbildung 1.23). Hierbei spielt die Höhe der Differenz aus Ertrag und Bedarf keine Rolle, solange die Differenz positiv ist. Es empfiehlt sich, die Photovoltaikanlage für

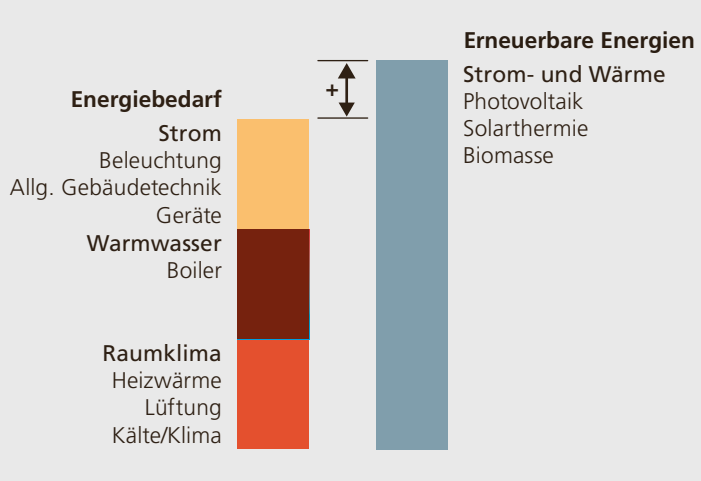


Abbildung 1.23: Schematische Darstellung der Plusenergiebilanz.

ein Plusenergiegebäude nicht zu knapp auszulegen, sodass das Plus auch bei jährlichen Schwankungen von Einstrahlung, Aussentemperatur und Nutzerverhalten erreicht wird.

Ob die Bilanz auf Basis Endenergie, gewichtete Endenergie oder Primärenergie stimmen muss, ist nicht festgelegt. Minergie-A hat z. B. die Anforderung, dass die Bilanz in gewichteter Endenergie mindestens Null sein muss. Minergie-A-Gebäude, die diese Anforderung gerade so auf dem Papier erreichen, erfüllen diese in der Realität aufgrund der oben genannten Schwankungen nicht zuverlässig jedes Jahr.

Plusenergiequartiere sind die Fortführung der Plusenergiegebäude. Plusenergiequartiere haben den Vorteil, dass durch die Kompensationsmöglichkeit zwischen den Gebäuden nicht jedes Gebäude ein Plus aufweisen muss.

1.6 Energiestandards und Nachhaltigkeitslabels

Der Trend, nicht nur die Energieeffizienz für Heizung, Kühlung, Lüftung und Wassererwärmung eines Gebäudes zu betrachten, sondern den Fokus auf die gesamte Betriebsenergie, die graue Energie und die Mobilität zu legen, nimmt immer mehr zu. Zusätzlich wächst die Forderung nach einer möglichst umfassenden Nachhaltigkeitsbetrachtung, die ausser energetischen und ökologischen Aspekten auch wirtschaftliche und gesellschaftliche Kriterien beinhaltet. Die in der Schweiz am häufigsten anzutreffenden nationalen und internationalen Energiestandards und Nachhaltigkeitslabels sind in Tabelle 9.2 aufgelistet. Während die Energiestandards hauptsächlich auf die Themen Betriebsenergie, Komfort und Ökologie der Baustoffe fokussieren, umfassen die Nachhaltigkeitslabels auch andere Themenbereiche wie z. B. Standort, Infrastruktur und Betriebskosten.

Die Struktur aller Standards respektive Labels ist gleich: Die betrachteten Bereiche werden in Themenbereiche unterteilt, die



Abbildung 1.24: Das ganz in Photovoltaik gehüllte Plusenergie-Mehrfamilienhaus in Zürich-Höngg. (Quelle: Kämpfen für Architektur AG)

jeweils ein oder mehrere Kriterien enthalten. Für jeden Standard variiert der Inhalt und der Umfang dieser Bereiche sowie die Ermittlung, Anforderung und Bewertung der Einzelkriterien, was die Vergleichbarkeit erschwert beziehungsweise unmöglich macht. Bei den Energiestandards muss das geforderte Anforderungsniveau von allen Einzelkriterien eingehalten werden, während bei den Nachhaltigkeitsstandards eine Kompensation zwischen verschiedenen Themenbereichen erfolgen kann. Auch werden unterschiedliche Zertifikatsstufen in Abhängigkeit des Erfüllungsgrads der Themenbereiche vergeben.

Der Nutzen

Der Nutzen von Energiestandards und Nachhaltigkeitslabels liegt darin, dass ein Gebäude klar definierte Kriterien und Anforderungen in unterschiedlichen Bereichen erfüllt. Damit wird der Wunsch nach energieeffizientem und nachhaltigem Bauen umgesetzt, die geforderte Qualität dokumentiert und nach aussen sichtbar gemacht (Tabelle 1.2 und Tabelle 1.3).

Nationale und internationale Standards

Bei Wohnbauten dominiert in der Schweiz der Minergie-Standard mit oder ohne Eco-Zusatz. Im Bereich der Verwaltungsbauten wird vermehrt auf internationale Labels gesetzt, da ausländische Konzerne mit Sitz in der Schweiz einen internationalen Nachhaltigkeitsstandard verlangen. Meist erfolgt die Bewertung nach einem nationalen Minergie-Standard und wird durch ein internationales Nachhaltigkeitslabel wie z. B. LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) oder DGNB (Deutsches Gütesiegel Nachhaltiges Bauen) ergänzt. Ein Beispiel ist der Prime Tower in Zürich mit drei Gütesiegeln (Minergie, greenproperty Gold, LEED-Gold). Mit dem nationalen Standard werden die Bedürfnisse des Schweizer Marktes abgedeckt und mit dem internationalen Label wird die Vergleichbarkeit weltweit erreicht.

Bei den internationalen Standards ist zu klären, ob und wieweit sie die nationalen Normen und Bedingungen in der Schweiz berücksichtigen. Der deutsche Standard

Tabelle 1.2: Themenbereiche der häufigsten Energiestandards und Nachhaltigkeitslabels in der Schweiz. Dunkel: Schwerpunktthemen, hell: Themen teilweise abgedeckt. (Quelle: Landkarte Standards und Labels, Nachhaltiges Bauen Schweiz, www.nnbs.ch)

	Betriebsenergie	Komfort und Innenraumklima	Materialisierung und graue Energie	Kosten und Wirtschaftlichkeit	Gesellschaft und Soziales	Mobilität	Umgebung
GEAK/GEAK Plus, Merkblatt SIA 2031 [18]	■						
Minergie(-P/-A)	■	▫					
Minergie(-P/-A)-Eco	■	■	■				
SIA-Effizienzpfad Energie, Merkblatt SIA 2040	■		▫			■	
Energiestadt	■		■		■	■	▫
2000-Watt-Areale	■		■	▫	■	■	■
LEED (US)	■	■	■	▫	▫	■	■
Standard SNBS 2.0 Hochbau, DGNB(D)/ SNGI für Gebäude, greenproperty, BREEAM Neubau (UK)	■	■	■	■	■	■	■

DGNB wurde z. B. durch die Schweizer Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft (SGNI) an die Schweizer Bedürfnisse angepasst. Dagegen besteht z. B. für BREEAM keine Adaption auf Schweizer Verhältnisse.

Auf nationaler Ebene bieten bestehende und bewährte Instrumente wie Minergie, SIA-Normen und Merkblätter, 2000-Watt-Areale, KBOB-Empfehlungen und der Verein eco-bau gute Voraussetzungen, nachhaltig zu bauen. Basierend auf diesen Instrumenten wurde 2009 das Nachhaltigkeitslabel Greenproperty (Credit Suisse) lanciert und 2013 der «Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz SNBS» (Verein Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz) mit einer Pilotphase gestartet. Seit 2016 kann nach SNBS zertifiziert werden. Die Alternative Bank Schweiz hat ein Ratingsystem zur Bewertung von nachhaltigen Wohnneu- und Bestandsbauten sowie zur Festlegung von Zinsvergünstigungen entwickelt.

Ausblick

Energiestandards und Nachhaltigkeitslabels werden als Strategie- und Qualitätswerkzeug für Neu- und Bestandesbauten verwendet. Welcher Standard oder welches Label passend ist, kann z. B. mit Zielvereinbarungen gemäss Empfehlung SIA 112/1 «Nachhaltiges Bauen – Hochbau» [17] festgelegt werden. Wichtig für die Erreichung des gewünschten Zertifikats ist es, die entsprechenden Anforderungen frühzeitig im Planungsprozess zu berücksichtigen. Die Nachfrage nach zertifizierten Gebäuden wird in Zukunft steigen und durch die Internationalisierung respektive die unterschiedliche Ausrichtung der verschiedenen Standards und Labels werden Doppel- und Mehrfachzertifizierungen zunehmen. Eine Vereinheitlichung der Nachhaltigkeitslabels ist wünschenswert.

Gebäudeeigenschaften	Nutzer	Bauherrschaft respektive Eigentümer
Vorteile		
• Hohe Energieeffizienz • Hohe Wassereffizienz • Abfallreduzierung • Geringere Umwelteinflüsse • Hochwertige Bausubstanz	• Geringere Betriebskosten • Gesündere und komfortablere Wohn- und Arbeitsumgebung	• Geringerer Leerstand • Höherer Rendite • Besseres Marketing • Hohe Werthaltigkeit der Immobilie • Besseres Risikomanagement • Gewährleistung und Visualisierung hoher Gebäudequalität
Nachteile		
–	• Höhere Mieten • Höherer Kaufpreis • Wenig soziale Durchmischung	• Erhöhte Planungs- und Baukosten • Kosten der Zertifizierung

Tabelle 1.3: Vorteile und Nachteile von Energiestandards und Nachhaltigkeitslabels.

1.7 Graue Energie

Energie wird nicht nur zum Betreiben eines Gebäudes benötigt, sondern auch bei der Rohstoffgewinnung, den Herstellungsprozessen, dem Transport und der Entsorgung beziehungsweise Rezyklierung von Baumaterialien für ein Gebäude. Diese Energie wird graue Energie (embodied energy) oder auch kumulierter Energieaufwand (KEA) genannt. Beim Vergleich der grauen Energie verschiedener Gebäude ist es wichtig, eine einheitliche Basis zu finden. Die Datengrundlage ist abhängig

- von der verwendeten Datenbank
- vom Alter der Daten
- von der eingesetzten Amortisationszeit von Materialien und Komponenten
- davon, welche Bauteile und Komponenten berücksichtigt werden (Tabelle 1.4)
- davon, wie die Bauteile und Komponenten berücksichtigt werden (Tabelle 1.4)
- vom Zeitraum der Betrachtung
- vom Umfang des betrachteten Lebenszykluses (z. B. cradle to grave, cradle to gate)
- von der Gewichtung der Energieträger (Primärenergie total respektive nicht erneuerbar Umweltbelastungspunkte, Treibhausgasemissionen etc.)

Verteilung am Gebäude

Die graue Energie von Gebäuden teilt sich in den Energieaufwand für den Baukörper sowie für die verwendete Gebäudetechnik auf. Je nach Ausstattung der Gebäudetechnik kann ihr Anteil an der gesamten

Definition «Graue Energie»
Die graue Energie umfasst nach Merkblatt SIA 2032 «Graue Energie» [19] den Energieaufwand für

- die Rohstoffgewinnung und Rezyklierung,
- die Herstellung einzelner Materialien, Bauteile und Komponenten,
- den Transport und die Lagerung sowie
- den Rückbau und die Entsorgung der Materialien.

Der gesamte Lebenszyklus einzelner Baumaterialien ist im «cradle to grave»-Ansatz berücksichtigt. Die graue Energie wird in nicht erneuerbarer Primärenergie (E_{Pnren}) ausgedrückt und ist damit ein Mass für den Aufwand an nicht erneuerbaren Ressourcen für den Lebenszyklus eines Baustoffes beziehungsweise einer Komponente. Für jedes Material und jede Komponente wird eine definierte Amortisationszeit zugrunde gelegt.

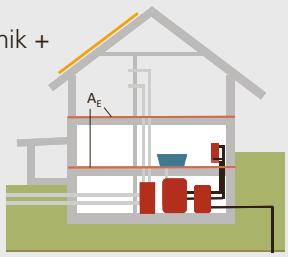
- Rohstoffabbau, Rohstoffgewinnung und Rezyklierung
- Produktion und Herstellung
- Transport und Lagerung

«cradle to gate»

- Rückbau und Entsorgung

«cradle to grave»

Tabelle 1.4: Bilanzierung nach Merkblatt SIA 2032 «Graue Energie». Anmerkung: Die Gebäudehülle besteht grundsätzlich aus Bauteilen mit relativ hohem Gehalt an grauer Energie. Wenn sie viele Anschlüsse, Ecken und Kanten aufweist, gilt dies noch verstärkt. Einfaches und kompaktes Bauen ist deshalb aus Sicht der grauen Energie wünschenswert. Die Tragstruktur sowie Umfang und Art der Untergeschosse tragen viel zur grauen Energie bei.

Bilanzperimeter	Vernachlässigungen	Berechnung
Der Bilanzperimeter umfasst das gesamte Gebäude (beheizte und unbeheizte Bereiche) inklusive der dazugehörigen Aussenanlagen: • Aushub • Gebäudehülle • Innenbauteile • Gebäudetechnik + Verteilung • Balkon, Wintergarten • Aussenbauteile 	• Treppen, Türen, Zargen • Kleinbauteile, z. B. Lichtschächte, Sonnenschutz • Eingebautes Mobiliar • Umgebung und Ausstattung des Gebäudes • Sicherheits- und Transportanlagen • Transporte auf die Baustelle (Ausnahme z. B. Helikoptertransport) • Energieverbrauch auf der Baustelle • Baustellenabfälle, Verpackungsmaterialien • Lineare Elemente, z. B. Regenrinnen	• Aussenwände mit Aussenmass • Decken ohne Abzüge für Schächte und Treppen • Innenwände mit Innenabmessungen und ohne Abzüge für Türen, Leitungs- und Kanaldurchbrüche

grauen Energie für ein Gebäude zwischen 17 % und 52 % ausmachen (Abbildung 1.25). Eine Analyse von rund 230 provisorisch und definitiv zertifizierten Minergie-A-Wohngebäuden im Jahr 2012 gibt detailliert Auskunft über die Verteilung der grauen Energie in der Praxis. Diese Objekte eignen sich sehr gut für eine Analyse, da der Nachweis für die graue Energie für alle Gebäude in einem Zeitraum von zwei Jahren erfolgte, die Berechnung von Minergie vorgegeben ist und zum überwiegenden Teil mit demselben Tool erstellt wurde. Es kann also von einer einheitlichen Datenbasis ausgegangen werden. Der Mittelwert über die gesamte graue Energie der Minergie-A-Gebäude beträgt 42 ± 6 $kWh_{EPnren}/(m^2 a)$. Dies entspricht ca. 84 % der Anforderung zur grauen Energie für Minergie-A-Neubauten bis 2017 (50 $kWh_{EPnren}/(m^2 a)$, Abbildung 1.26). Rund zwei Drittel der grauen Energie entfallen auf den Baukörper, 20 % auf die Standard-Gebäudetechnik (Heizung, Warmwasser, Lüftung, elektrische Installationen, Sänitär) und ca. 17 % auf thermische Solaranlagen und Photovoltaikanlagen.

Materialwahl

Die graue Energie wird entweder pro kg oder pro m^2 der einzelnen eingesetzten Materialien respektive Bauteile oder pro Stück, Lauflänge, Energiebezugsfläche, Leistung oder m^2 bei den Gebäudetechnikkomponenten angegeben. Für ein Bauteil, welches sich aus mehreren Materialien zusammensetzt, wird ein Gesamtwert

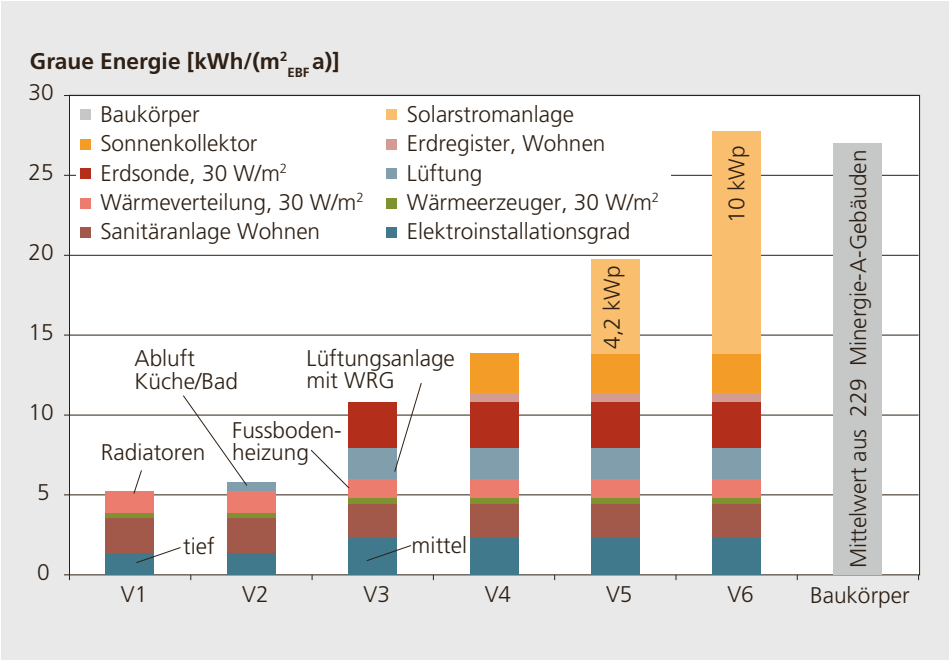


Abbildung 1.25: Graue Energie von verschieden Ausbaugraden der Gebäudetechnik im Vergleich zum Baukörper (Basis KBOB-Ökobilanzdatenbank 2012).

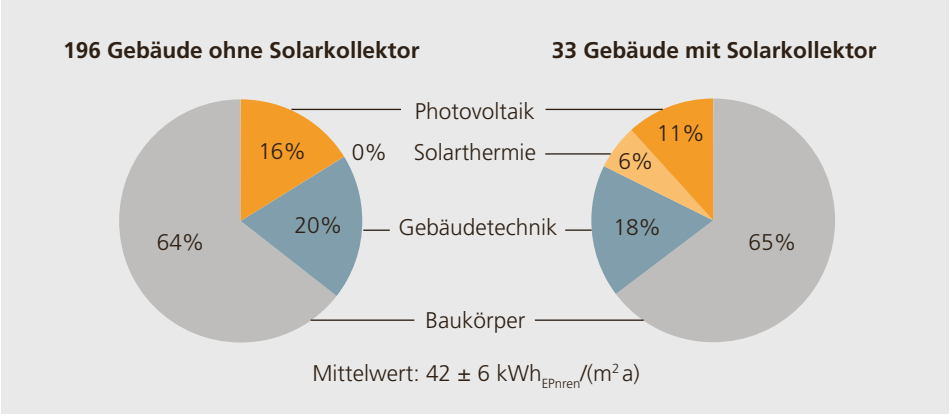


Abbildung 1.26: Anteil von Gewerken an der grauen Energie von 229 Minergie-A-Gebäude mit und ohne Solarthermie (Stand 2012).

pro m² Bauteilfläche berechnet, der abhängig von der Materialstärke, der Dichte sowie von der Nutzungsdauer der einzelnen Materialien ist. Nach Merkblatt SIA 2032 wird die graue Energie als Jahreswert angegeben, d. h. der Gesamtwert wird durch die Amortisationszeit geteilt. Somit wird über die Nutzungsdauer eines Bauteils ein konstanter Wert für die graue Energie pro Jahr angenommen.
Die graue Energie von verschiedenen Materialien mit der gleichen Funktionalität ist sehr unterschiedlich. Für verschiedene Dämmmaterialien ist die graue Energie in Abbildung 2.6 auf Seite 45 dargestellt. Der Vergleich der grauen Energie von Dämmstoffen muss immer in Abhängigkeit des erforderlichen U-Wertes erfolgen. Ein Dämmstoff mit einem hohen grauenergetischen Wert pro kg Material kann durch eine dünnere Schichtdicke infolge einer geringen Wärmeleitfähigkeit zum Optimum führen.
Abbildung 1.27 zeigt den Einfluss des Rahmenmaterials, des Rahmenanteils und der Verglasung auf die graue Energie eines Fensters. Die Wahl des Rahmenmaterials und -anteils hat einen grösseren Einfluss auf die graue Energie als der Wechsel von Zweifach- auf Dreifach-Verglasung.
Prinzipiell hat die Materialisierung einen starken Einfluss auf den Gesamtwert. Bei der Wahl von Materialien ist darauf zu achten, dass die tatsächlich eingebauten Mengen berücksichtigt werden, da Gewicht und Ausmass den effektiven Wert der grauen Energie bestimmen.

Gesamtbilanz

Die Energie, um den Heizwärmebedarf zu decken, kann durch eine thermisch verbesserte Gebäudehülle reduziert werden. Hierfür wird in der Regel die Dämmstärke erhöht, was zu einem zusätzlichen Einsatz an grauer Energie führt. Die Erhöhung der grauen Energie für den vermehrten Materialaufwand steht der Einsparung beim Heizwärmebedarf gegenüber. Eine gute Wärmedämmung spart mehr Betriebsenergie ein, als die zusätzliche graue Energie beträgt.
Um eine Gesamtbilanz aufstellen zu können, muss der Heizwärmebedarf analog zur grauen Energie in nicht erneuerbarer Primärenergie ausgedrückt werden. In Abhängigkeit von Wärmesystem und Energieträger variiert der nicht erneuerbare primärenergetische Heizwärmebedarf. Je nach Wärmeerzeuger und Energieträger ergibt sich ein anderes Optimum der Dämmstärke [20]. Abbildung 1.28 zeigt die graue Energie in Abhängigkeit der Betriebsenergie (Gebäudetechnik und Betriebsenergie) für rund 230 Minergie-A-Gebäude. Gebäude mit einer niedrigen Gesamtenergie weisen nicht unbedingt eine höhere graue Energie auf.

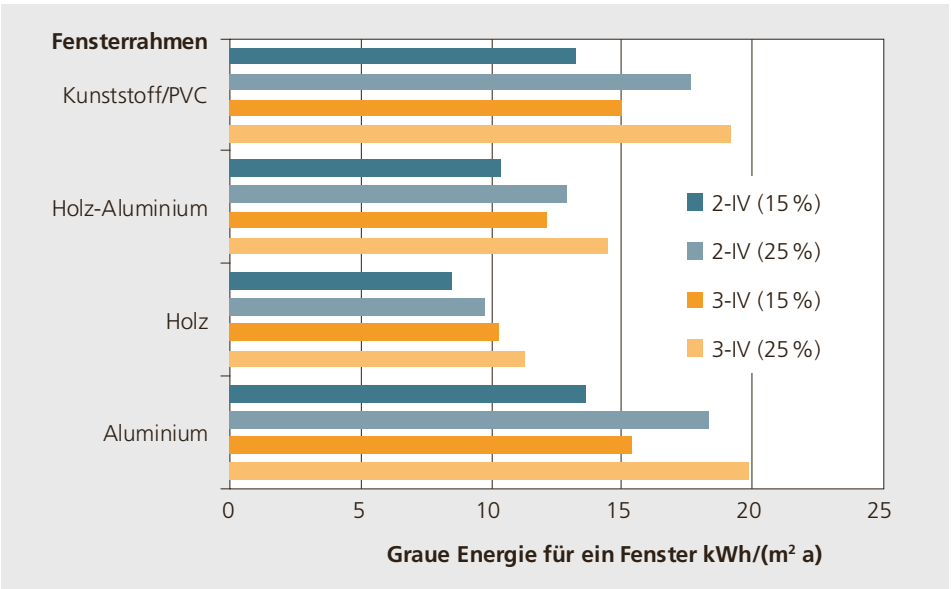


Abbildung 1.27: Graue Energie von zwei- und dreifach verglasten Fenster mit verschiedenen Rahmenmaterialien und -anteilen, Amortisationszeit 30 Jahre (KBOB-Ökobilanzdatenbank 2016, nicht erneuerbare Primärenergie, 2-IV: U_g = 1,1 W/(m²K), Dicke 18 mm, 3-IV: U_g = 0,6 W/(m²K), Dicke 40 mm).

Life Cycle Energy

Wird die Eigenenergieproduktion in der Bilanzierung berücksichtigt, wird eine Netto-Bilanz über die gesamte Betriebsenergie aufgestellt. Die Summe aus Netto-Betriebsenergie und graue Energie wird Lebenszyklusenergie oder Life Cycle Energy, LCE, genannt. Die Life Cycle Energy ist für drei Energiestandards in Abbildung 1.29 dargestellt. Ausgehend von den rund 230 Minergie-A-Gebäuden wurde der Anteil an Photovoltaikanlagen (PV) bei den Gebäuden so variiert, dass:

- Standard 1 keine PV aufweist (Niedrigenergiegebäude)
- bei Standard 2 der Energiebedarf für Wärme durch PV gedeckt wird (Minergie-A-Standard bis 2017) und
- für Standard 3 die gesamte Betriebsenergie über PV gedeckt wird (Nullenergiegebäude, z. B. Minergie-A ab 2017).

Es zeigt sich, dass die graue Energie vom Niedrigenergie- zum Nullenergiegebäude ansteigt, jedoch gleichzeitig die Netto-Betriebsbilanz per Definition auf 0 kWh/(m²a) fällt. Damit reduziert sich, trotz steigender grauer Energie, die Life Cycle Energy eines Nullenergiegebäudes gegenüber einem Niedrigenergiegebäude um rund 60 %. Das Nullenergiegebäude weist die niedrigste Netto-Gesamtbilanz auf.

Energetische Amortisation von Photovoltaikanlagen

Abbildung 1.30 zeigt die energetische Amortisationszeit einer Photovoltaikanlage. Nach 2 bis 5 Jahren hat die Anlage selbst bei ungünstigen Bedingungen soviel Elektrizität erzeugt und damit nicht erneuerbare Primärenergie eingespart, wie sie an grauer Energie zur Herstellung und Entsorgung benötigt. Während der Lebensdauer wird je nach Anlage ca. 5- bis 12-mal der Betrag der grauen Energie eingespart. Aus primärenergetischer Sicht ist es positiv, eine Photovoltaikanlage einzusetzen.

Optimierung

Die Analyse der knapp 230 Minergie-A-Wohngebäude zeigt, dass die Optimierung der grauen Energie hauptsächlich von der konkreten Materialisierung abhängt. Infolge der Vorgabe eines fixen Grenzwertes von 50 $kWh_{Epnren}/(m^2 a)$ des Minergie-A-Standards bis 2017 wird die graue Energie unabhängig von der Kompaktheit und der Bauweise (Abbildung 1.31). Einflussfaktoren auf die graue Energie sind in Tabelle 1.5 zusammengefasst. Materialien und Komponenten mit einem geringen Wert an grauer Energie und einer langen Lebensdauer sind zu bevorzugen.

Abbildung 1.28: Betriebsenergie in Abhängigkeit von der grauen Energie des Gebäudes ohne Berücksichtigung einer Photovoltaikanlage und deren Ertrag für 229 Minergie-A-Wohnbauten (Stand 2012).

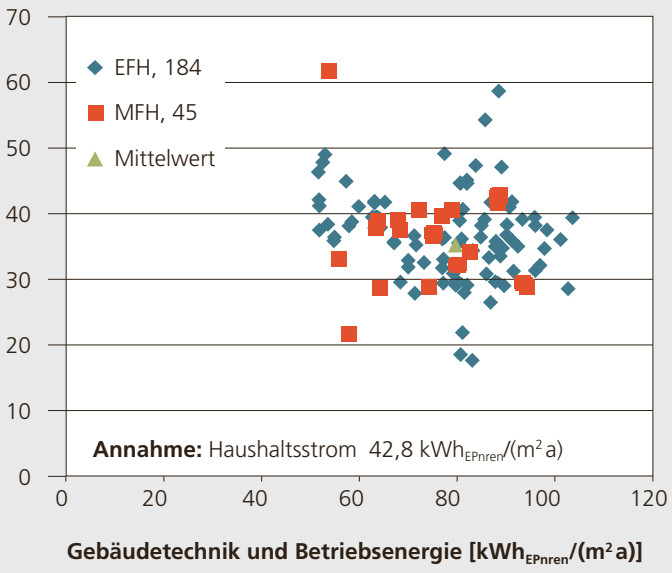
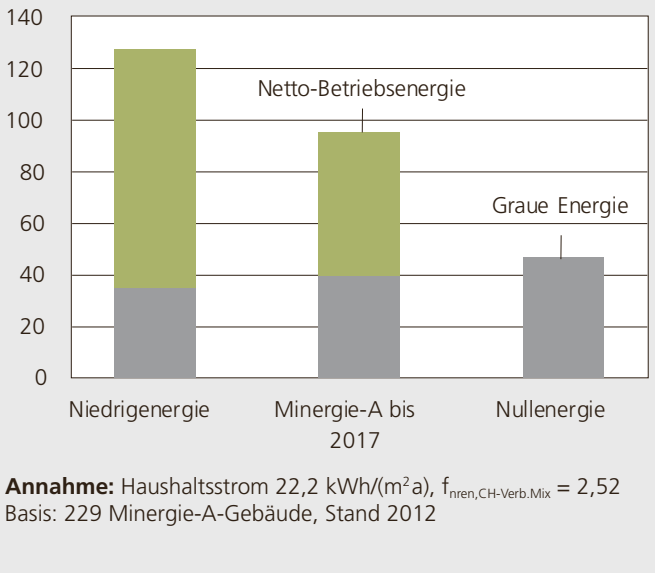


Abbildung 1.29: Gesamtbilanz von Netto-Betriebsenergie und grauer Energie von verschiedenen Gebäudestandards.



Annahme: Haushaltsstrom 22,2 kWh/(m²a), $f_{nren,CH\text{-}Verb.Mix} = 2{,}52$
Basis: 229 Minergie-A-Gebäude, Stand 2012

Tabelle 1.5 (oben): Einflussfaktoren auf die graue Energie.

Einflussfaktor	Auswirkungen
Materialisierung	Verschiedene Materialien mit gleicher Funktionalität haben unterschiedliche Werte der grauen Energie. Materialien mit einem geringen grauen Energiegehalt sind zu bevorzugen.
Lebensdauer	Bauteile und Komponenten mit langer Lebensdauer verwenden. Bei technischen Komponenten ist zusätzlich auf die Effizienz zu achten.
Trennbarkeit von Materialien und Bauteilen	Die Trennbarkeit von Materialien und Bauteilen gewährleistet, dass bei einem Ersatz nicht das gesamte Bauteil ausgetauscht werden muss.
Konstruktion	Kompakte Gebäude, einfache Tragkonstruktionen und ein sparsamer Umgang mit Unterterrainkonstruktionen reduzieren den Materialaufwand.
Gesamtbilanz	Die Betrachtung der Gesamtbilanz aus Betriebsenergie und grauer Energie führt zu optimalen Dämmstärken in Abhängigkeit vom Dämmmaterial und Wärmeerzeugung. Die Bewertung erfolgt in nicht erneuerbarer Primärenergie.

Abbildung 1.30: Amortisationszeit von Photovoltaikanlagen und eingesparte nicht erneuerbare Primärenergie durch den Ertrag (graue Energie: 7390 kWh/kWp, $f_{nren,CH\text{-}Verb.Mix}$ = 2,52, $f_{nren,PVErtrag}$ = 0,289, basierend auf KBOB-Ökobilanzdatenbank 2016, Degradation 0,5 % pro Jahr).

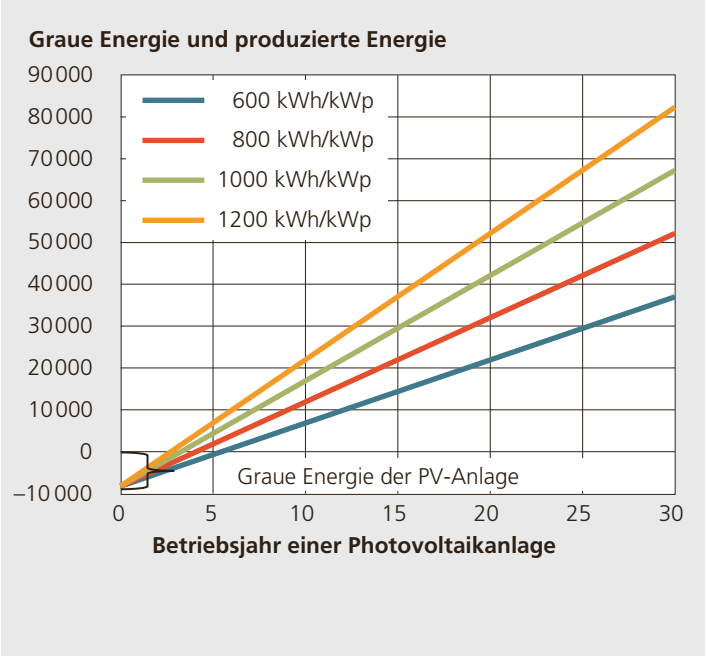
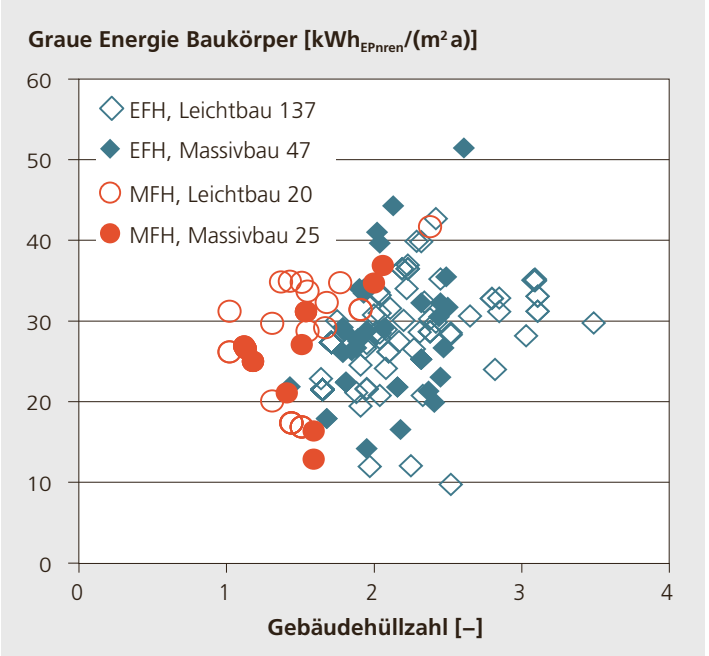


Abbildung 1.31 (unten): Graue Energie von Baukörpern in Abhängigkeit von der Kompaktheit und der Bauweise der Gebäude bei 229 Minergie-A-Wohnbauten (Stand 2012).



Achim Geissler

1.8 Behaglichkeit

Der Mensch verbringt einen grossen Teil seiner Lebenszeit in geschlossenen Räumen. Es ist daher naheliegend, an diese Räume hohe Ansprüche zu stellen. Man soll sich wohl fühlen. Für Räume mit (Büro-)Arbeitsplätzen oder für Schulräume kann hierbei auch die Produktivität oder die Konzentrationsfähigkeit als Motivation dafür dienen, einen möglichst guten Raumkomfort bereitzustellen. Dabei ist idealerweise auf die thermische, die visuelle, die akustische sowie die olfaktorische Behaglichkeit respektive auf die allgemeine Luftqualität Rücksicht zu nehmen.

Wechselwirkungen zwischen Behaglichkeit und Energiebedarf sind vielfältig. Primär sind jedoch der Gebäudestandort und die Gebäudeauslegung zu nennen. Beispielsweise ist der Energiebedarf für den Betrieb eines Gebäudes ohne aktive Kühlung im Sommer praktisch unabhängig von der Behaglichkeit. Mit dem Einsatz von Energie lässt sich die Raumlufttemperatur nicht senken. Die Behaglichkeit hängt jedoch sehr stark vom korrekten Betrieb des Gebäudes ab.

Tabelle 1.6 gibt beispielhaft für ein Bürogebäude ohne mechanische Lüftungsanlage und ohne Klimatisierung an einer innerstädtischen Lage an einer belebten Strasse eine Einordung an. Ohne Klimatisierung kann im Sommer nicht auf Fehlbedienungen beispielsweise des Sonnenschutzes reagiert werden. Behaglichkeitsdefizite führen zwar nicht zu einer Erhöhung der Betriebsenergie, jedoch zu einem möglicherweise stark reduzierten Gebrauchswert der Räumlichkeiten.

Thermische Behaglichkeit

Wohngebäude und auch viele Verwaltungsgebäude mit dem Anspruch auf gute Energieeffizienz können in allen Schweizer Klimaregionen ohne aktive Kühlung eine gute thermische Behaglichkeit im Sommer aufweisen. Es gehört zum Repertoire des energieeffizienten Bauens, dass dieses Ziel erreicht wird. Einzig Dienstleistungsbauten mit hohen inneren Abwärmen oder Gebäude, die aus Gründen der Nutzung oder der Architektur sehr sonnenexponierte Räume aufweisen (z. B. eine grosse Über-

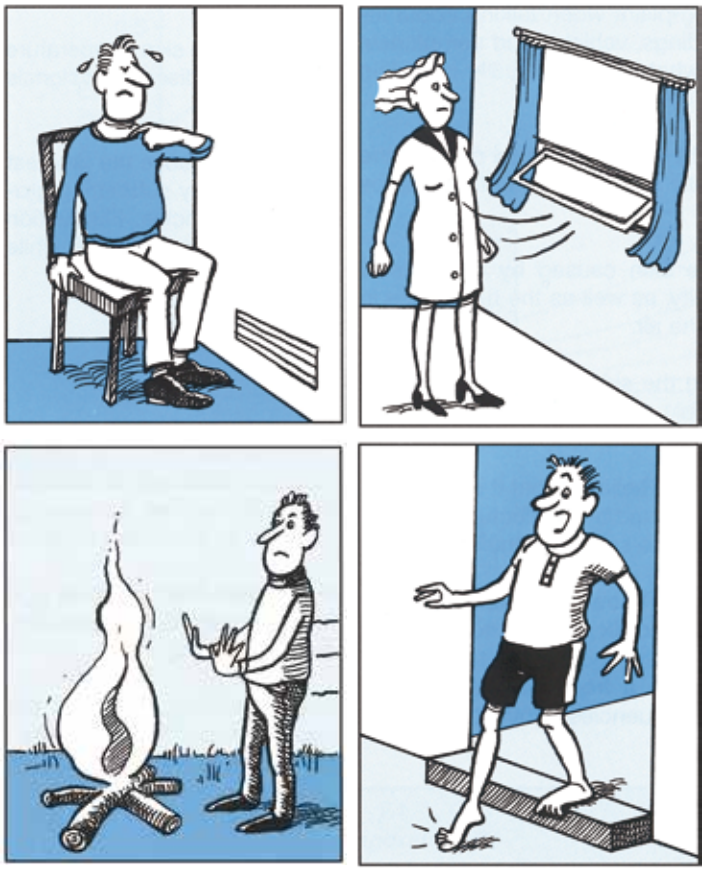


Abbildung 1.32: Die Lufttemperatur, die Luftgeschwindigkeit, die Strahlungstemperatur und die Kontakttemperatur beeinflussen die thermische Behaglichkeit. (Quelle: Innova)

Tabelle 1.6: Beispiel für die Einordnung der energetischen Relevanz (siehe Text).

	Winterfall	Sommerfall
Thermische Behaglichkeit	Energetisch relevant, Heizwärme.	Energetisch nicht relevant.
Visuelle Behaglichkeit	Energetisch relevant, durch Blendschutz möglicherweise stark verringerte solare Energiegewinne.	Energetisch etwas relevant, durch Sonnen- beziehungsweise Blendschutz erhöhter Strombedarf für die Beleuchtung.
Akustische Behaglichkeit	Energetisch kaum relevant.	Energetisch nicht relevant, jedoch beispielsweise für die Abfuhr von Wärme durch Lüftung, z. B. in den Morgenstunden, stark eingeschränkt.
Olfaktorische Behaglichkeit respektive Luftqualität	Energetisch relevant, ohne Lüftungsanlage ist Fensterlüftung nötig, keine Wärmerückgewinnung möglich.	Energetisch nicht relevant, Lüftung gegen Nachmittag, bei hohen Aussentemperaturen jedoch zusätzliche Wärmelast.

eckverglasung nach Südwest) können hier eine Ausnahme bilden. Willkommene gebäudetechnische Unterstützung bietet Freecooling, z. B. durch Erdsonden einer Wärmepumpen-Anlage. Das thermische Behaglichkeitsempfinden hängt wesentlich von der Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Strahlungstemperatur und Kontakttemperatur ab (Abbildung 1.32) und muss – letztlich wie alle Aspekte der Behaglichkeit – als individuelle Grösse betrachtet werden. Es wird also in der Einschätzung der Behaglichkeit in ein und demselben Raum durch verschiedene Personen gleichzeitig stets Unterschiede geben. Zudem passt sich der Mensch in weiten Bereichen an – im Sommer «gewöhnt» man sich an hohe Temperaturen, im Winter an tiefe und passt natürlich auch die Kleidung an. Die einschlägige Norm SIA 180:2014 [21] berücksichtigt dies z. B. durch Vorgabe eines gleitenden Anspruchs an die maximal zulässige Raumtemperatur in Abhängigkeit von dem über 48 h gleitend gemittelten Wert der Aussentemperatur unter der Annahme einer angepassten Kleidung (Abbildung 1.33). Die Normung verwendet zur Einschätzung der (thermischen) Behaglichkeit verschiedene statistische Grössen. Die wichtigsten sind: der «Prognostizierte Prozentsatz Unzufriedener» («Predicted Percentage of Dissatisfied», PPD) in Abhängigkeit von der Raumtemperatur und das Zugluftrisiko («Draught Rate», DR) in Zusammenhang mit Zuglufterscheinungen. In der Planung wird davon ausgegangen, dass mindestens 5 % der Nutzer grundsätzlich unzufrieden sind. Mit diesen Grössen sowie den Behaglichkeitsklassen (Tabelle 1.7) erfolgt die Zuordnung beziehungsweise Überprüfung der (planerisch) ausreichenden Behaglichkeit.

Klasse	Beschreibung
A	Hohes Mass an Erwartungen an das Raumklima; empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten.
B	Normales Mass an Erwartungen
C	Annehmbares, moderates Mass an Erwartungen

Tabelle 1.7: Behaglichkeitsklassen und ihre Anforderungen.

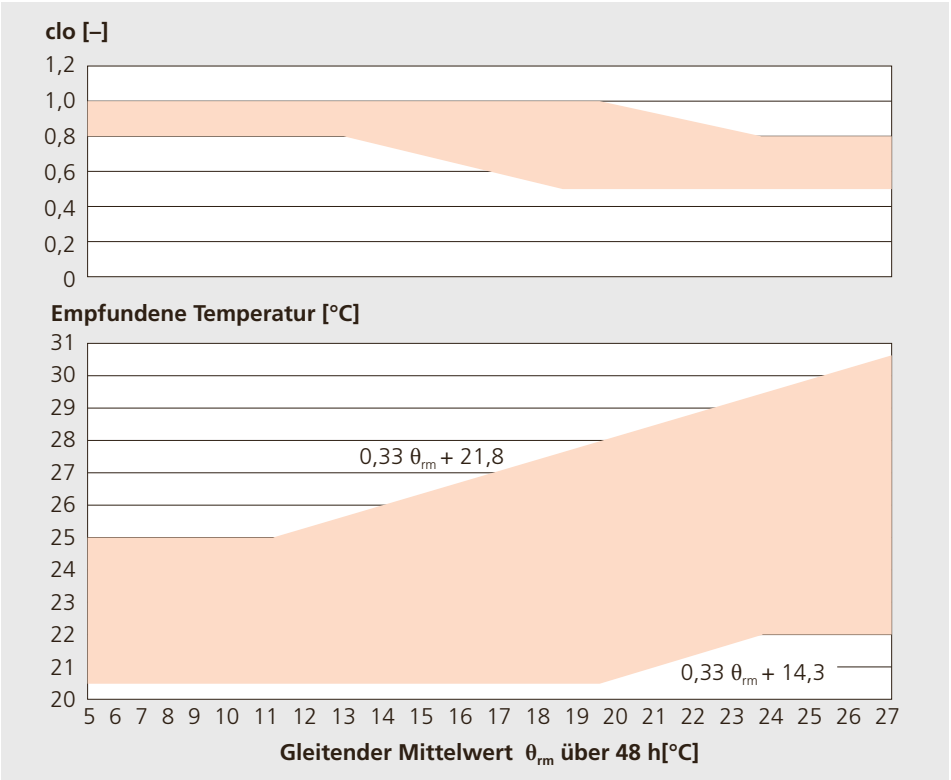


Abbildung 1.33: Anpassung der Kleidung (oben) und zulässige empfundene Temperatur für Räume mit natürlicher Belüftung, die weder geheizt noch gekühlt sind. Die empfundene Temperatur wird näherungsweise als arithmetisches Mittel der Raumlufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur bestimmt. Der «clo»-Wert beschreibt die Wärmedämmwirkung der Bekleidung. (Quelle: nach SIA 180:2014)

Visuelle Behaglichkeit
Je nach Beschäftigung benötigt man mehr oder weniger Licht. Dabei spielt auch die Farbe des Lichtes eine wichtige Rolle – in Abhängigkeit von der Tageszeit wirkt die Lichtfarbe unterschiedlich auf den menschlichen Organismus (circadianer Rhythmus des Menschen – «Tag-Nacht-Rhythmus»). Die Konzentrationsfähigkeit beziehungsweise die allgemeine Wachheit kann deutlich beeinflusst werden. Insbesondere an Bildschirmarbeitsplätzen, aber auch bei anderen Tätigkeiten sind grosse Helligkeitsunterschiede im Sichtfeld störend – deutlich hellere Bereiche blenden. Der Mensch reagiert auf diese visuelle Beeinträchtigung unterschiedlich. Auch hier werden daher statistische Werte zur Beschreibung der Blendungsintensität herangezogen, z. B. der UGR-Wert (siehe Seite 71).

Akustische Behaglichkeit
Auch die Schallempfindlichkeit ist individuell unterschiedlich stark ausgeprägt. In sehr vielen Bereichen nimmt die Belastung mit Lärm stetig zu. Es ist zwischen dem Schutz vor Aussenlärm und vor Lärm in benachbarten Nutzungseinheiten – dem Schallschutz – und dem Schutz vor störendem Lärm innerhalb eines Raumes – der Raumakustik – zu unterscheiden.
Der Schallschutz hat wenige Konfliktstellen mit energetischen Fragestellungen. Mit steigender Scheibengrösse nimmt der Schallschutz von Gläsern ab, die solaren Wärmegewinne mit der gesamten Glasfläche zu. Die Lichtdurchlässigkeit und der g-Wert von Gläsern nehmen mit zunehmender Glasstärke ab, der Schallschutz zu. Geöffnete Fenster haben kaum schalldämmende Wirkung, für den sommerlichen Wärmeschutz kann es jedoch wünschenswert sein, Fenster zu öffnen. Bei der Raumakustik sind die Interdependenzen eher noch geringer. Zwischen thermisch aktivierbaren Speichermassen und raumakustischen Massnahmen insbesondere bei Grossraumbüros liegt allerdings häufig ein Zielkonflikt vor. Schallabsorbierende Oberflächen sind meist grossporig und weich – dies ist in der Regel gleichbedeutend mit einer eher geringen Wärmeleitfähigkeit und damit mit einer Entkoppelung zwischen Raumluft und thermischer Masse.

Olfaktorische Behaglichkeit und Luftqualität
Der Mensch hat eine nur schlecht ausgeprägte Sensorik für schleichende Änderungen der Luftqualität – dies gilt sowohl für Geruchsstoffe als auch für die Belastung der Luft mit CO_2. Eine schlechte Luftqualität hat jedoch direkte Auswirkungen auf die Konzentrationsfähigkeit. Schlechte Luft kann auch zu Symptomen wie Kopfschmerzen führen. Die Versorgung von Räumen, in denen sich regelmässig Personen aufhalten, mit ausreichend Frischluft ist energetisch relevant. Frischluft bedeutet Aussenluft – diese muss in der Heizperiode erwärmt und im Sommer allenfalls gekühlt werden.

1.9 Quellen

[1] Binz, A., Eicher, H.-P., Iten, R., Keller, M., Bacher, R.: Energierespekt, Faktor Verlag, Zürich 2014
[2] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2010, Bundesamt für Energie, Bern 2011
[3] Zukünftige Entwicklung der Energiebezugsflächen, Wüest & Partner, im Auftrag des BFE, Zürich 2004
[4] Stolz, Ph., Frischknecht, R.: KBOB-Ökobilanzdatenbestand v.2.2:2016
[5] Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 – 2009 nach Verwendungszwecken, Prognos, Bundesamt für Energie, Bern, Dezember 2010
[6] Effizienz und Elektrifizierung Haushalte, Ernst Basler + Partner, VSE, Zollikon 2012
[7] Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, Prognos et al., im Auftrag des BFE, Basel 2012
[8] MuKEn 2014, www.endk.ch
[9] www.minergie.ch (Stand 2019)
[10] Merkblatt SIA 2040: SIA-Effizienzpfad Energie, 2017
[11] Gebäudeenergieausweis der Kantone GEAK, www.geak.ch (Stand 2019)
[12] Hall, M., Bittel, R.: 30 % oder 80 % Eigenverbrauch? HK-Gebäudetechnik 6–7, 2019, S. 48–50
[13] Nationale Gewichtungsfaktoren, 2017, www.endk.ch
[14] Norm SIA 380: Grundlagen für die energetische Berechnung von Gebäuden, 2015
[15] Leitfaden Eigenverbrauch, Version 2.0; im Auftrag von EnergieSchweiz, 2019
[16] Handbuch Solarstrom-Eigenverbrauch optimieren, VESE, 2017, www.vese.ch
[17] Norm SIA 112/1 Nachhaltiges Bauen – Hochbau, 2017
[18] Merkblatt SIA 2031, Energieausweis für Gebäude, 2016
[19] Merkblatt SIA 2032: Graue Energie (2010)
[20] Ragonesi, M.: Effizienzstrategie. Faktor Verlag, Heft 36 Wärmeschutz, 2012, Seiten 26 bis 35.
[21] Norm SIA 180, Wärme- und Feuchteschutz in Hochbau, 2014

Kapitel 2

Gebäude – Form und Hülle

Gregor Steinke

2.1 Baukörper

Die Form des Baukörpers, der Wärmeschutz der Gebäudehülle und die Ausrichtung, Verschattung, Grösse und Art der Verglasungsflächen haben eine zentrale Bedeutung für die Energieeffizienz des Gebäudes. In der frühen Entwurfsphase wird mit der Festlegung der Gebäudeform und der Gliederung der Fassaden sowohl eine wichtige Weichenstellung für den Bedarf an grauer Energie und Betriebsenergie, als auch für die Baukosten vorgenommen.

Kompaktheit im Sinne des energieeffizienten Bauens wird mit der Gebäudehüllzahl (Verhältnis von thermischer Gebäudehüllfläche zur Energiebezugsfläche) zum Ausdruck gebracht (Abbildung 2.1). Die dominanten Faktoren der Kompaktheit sind absolute Grösse des Baukörpers und Vielgeschossigkeit. Der Grad an Kompaktheit ist jedoch recht variabel und nicht in jedem Fall visuell direkt erfassbar. Ein sehr kompakter Baukörper kann durch feingliedrig gestaltete vorgesetzte Elemente wie Balkone, Laubengänge und andere offene Anbauten sehr zergliedert wirken. Umgekehrt kann ein visuell sehr kompakt erscheinender Grossblock wegen eingezogener Balkone tatsächlich relativ unkompakt sein (Abbildung 2.2). Zergliederte Baukörper und Fassaden mit Einschnitten, Vor- und Rücksprüngen haben ein schlechteres Verhältnis von Gebäudehüllfläche zu Energiebezugsfläche. Während der Heizperiode geht über die Gebäudehülle durch Transmission und Lüftung Wärme verloren. Je grösser die Gebäudehüllfläche im Verhältnis zur Energiebezugsfläche, umso höher ist bei gleichem Wärmeschutz der Gebäudehülle der Heizwärmebedarf. Deshalb muss im Umkehrschluss ein weniger kompaktes Gebäude besser als ein kompaktes Gebäude gedämmt werden, wenn der gleiche Heizwärmebedarf erreicht werden soll. Die kompakte Bauweise hat gegenüber zergliederten Baukörpern folgende Vorteile: geringerer Flächenbedarf/Baulandbedarf, grössere Einwohnerdichte, kostengünstiger, konstruktiv einfacher, weniger graue Energie, geringerer Bedarf an Baumaterial, geringere Eigenbeschattung, geringerer Heizwärmebedarf und

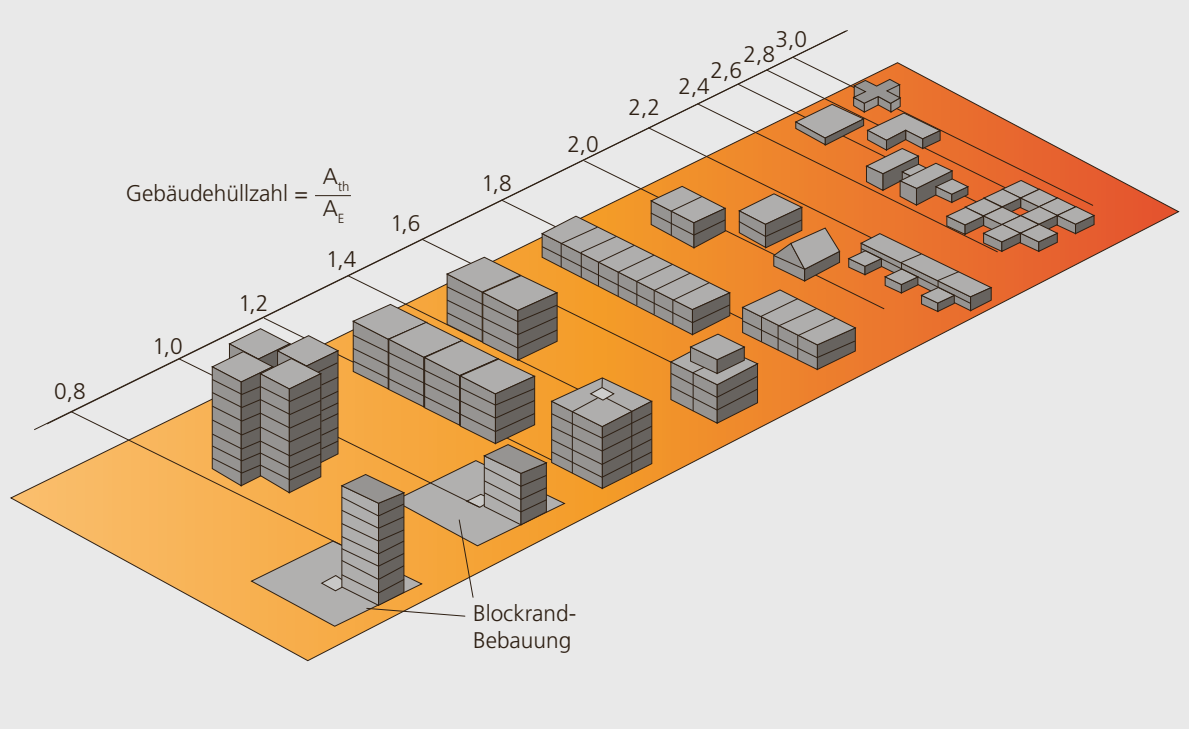


Abbildung 2.1: Kompaktheit und Gebäudehüllzahl. (Quelle: Solarfibel, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg)

geringere Betriebskosten. Allerdings sind der Kompaktheit durch die Notwendigkeit ausreichender natürlicher Belichtung Grenzen gesetzt. Dem geringeren Heizwärmebedarf durch kompaktere Bauweise kann bei grosser Gebäudetiefe ein höherer Elektrizitätsbedarf für künstliche Beleuchtung gegenüberstehen. Zudem steht bei kompakteren Gebäuden weniger Gebäudehüllfläche zur Stromerzeugung durch Photovoltaik zur Verfügung, was die Umsetzung von Null- oder Plusenergiekonzepten erschwert.

Auch die Gebäudestruktur wirkt sich wesentlich auf die graue Energie, Betriebsenergie und Kosten aus. Durch ein Tragwerk mit optimierten Spannweiten und reduzierten Deckendicken kann der Aufwand für die Erstellung minimiert werden. Ein effizientes Steigzonen- und Trassenkonzept mit kurzen Leitungslängen trägt zum energieeffizienten Betrieb bei.

2.2 Gebäudehülle

Die thermische Gebäudehülle muss die beheizten Bereiche des Gebäudes lückenlos umschliessen. Unbeheizte Bereiche, z. B. Treppenhäuser oder Kellerräume, können auch in die thermischen Gebäudehülle integriert werden. Somit lassen sich eine unnötig grosse Abwicklung, komplizierte Bauteilanschlüsse und Wärmebrücken vermeiden (Abbildung 2.3).

Die Aufteilung des Wärmeschutzes, etwa bei unbeheizten Pufferräumen und verglasten Loggien, ist möglich, aber problematisch. Die faktische Nutzung solcher Räume als vollwertige Wohnräume liegt nahe und kann zu sehr grossen Heizwärmeverlusten führen. Grundsätzlich ist daher anzustreben, dass die thermische Gebäudehülle in der äussersten Schicht des geschlossenen Baukörpers realisiert wird. Daraus ergibt sich auch das Postulat, dass unbeheizte Kellergeschosse innerhalb der thermischen

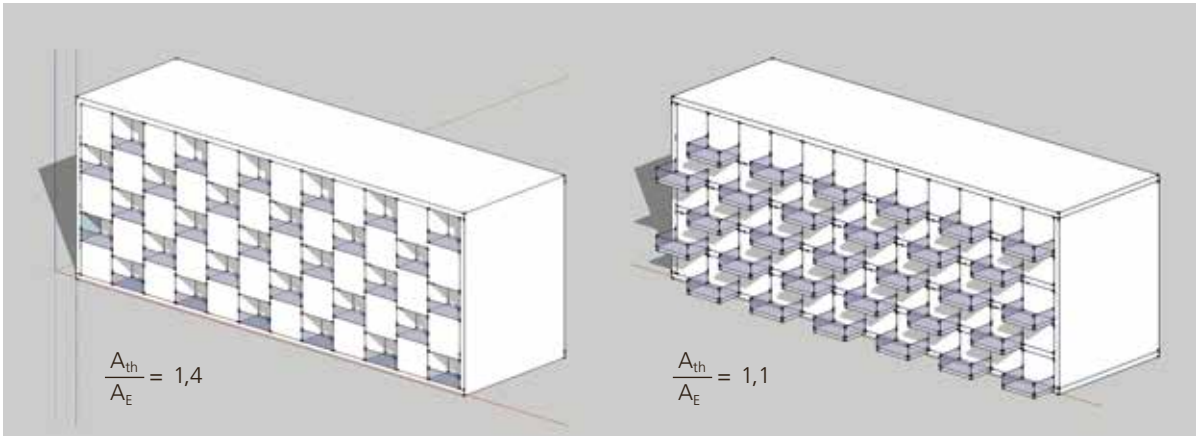


Abbildung 2.2: Das Gebäudevolumen mit den Loggien wirkt recht kompakt, hat aber auf der Südfassade 111 % mehr Gebäudehüllfläche. Bei gleicher Energiebezugsfläche hat das Gebäude mit Loggien eine Gebäudehüllzahl 1,37, das Gebäude mit vorgehängten oder vorgestellten Balkonen eine Gebäudehüllzahl 1,06.

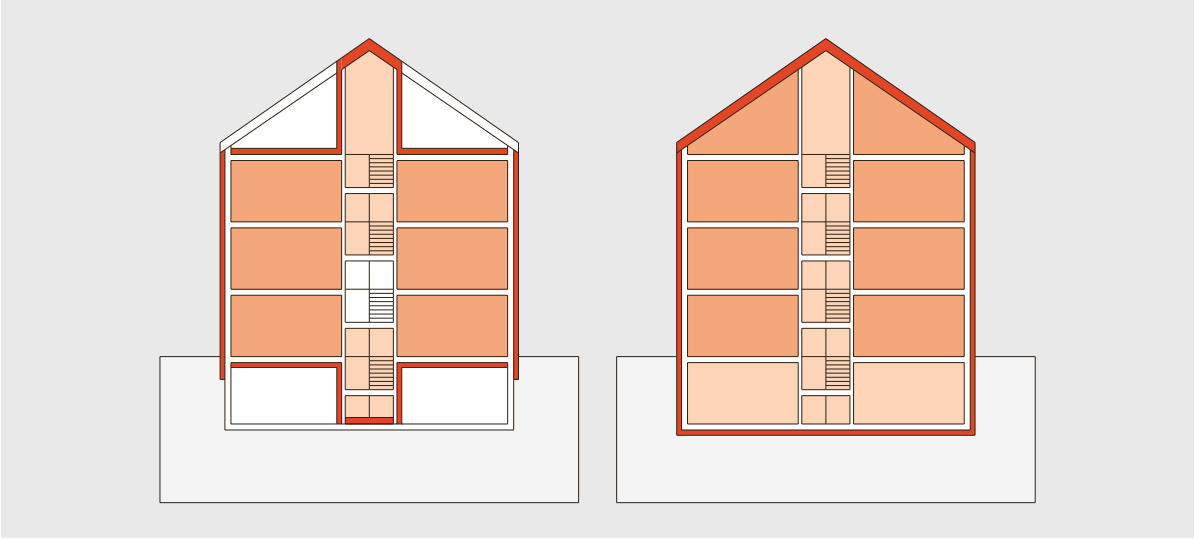


Abbildung 2.3: Verlauf der thermischen Gebäudehülle, links Keller und Dach ausserhalb der thermischen Hülle, rechts Keller und Dach in der thermischen Gebäudehülle.

Gebäudehülle liegen sollten, d. h. die Dämmung wenn möglich im Kellerboden platziert sein sollte. Die Kellerräume werden so trockener und das Risiko, dass sehr kalte und unbeheizte Kellerräume behelfsmässig beheizt oder temperiert werden, wird vermindert. In Kombination mit einer Fussbodenheizung beziehungsweise dem Trittschallschutz der Erdgeschossdecke lässt sich die Decke über dem Keller mit einem gewissen Wärmeschutz ausstatten, der die Auskühlrisiken begrenzt.

2.3 Wärmeschutz

Der Wärmeschutz der Gebäudehülle hat verschiedene Funktionen:

- Das Sicherstellen ausreichend hoher Innenoberflächentemperaturen der Aussenbauteile zum Schutz der Nutzer vor gesundheitsschädlichen, feuchtebedingt auftretenden Schimmelpilzen an den Innenoberflächen der Aussenwand.
- Den Schutz der Bausubstanz vor Feuchteschäden durch Vermeidung kritischer Oberflächentemperaturen.
- Das Sicherstellen der thermischen Behaglichkeit für die Nutzer. Je besser der Wärmeschutz der Gebäudehülle, umso höher sind die Oberflächentemperaturen an der Innenseite der Aussenwand und umso höher ist die Behaglichkeit. Geringe Unterschiede der Temperatur verschiedener Oberflächen eines Raumes (Innenwände, Aussenwände, Boden, Decke) haben positiven Einfluss auf die Behaglichkeit.
- Die Reduzierung der Umweltbelastung durch Verringerung des Heizwärmebedarfs. Der Heizwärmebedarf hängt von den Transmissionswärmeverlusten ab. Je geringer der U-Wert, desto geringer sind die Transmissionswärmeverluste.

Anforderungen an den Wärmeschutz der Gebäudehülle sind in Tabelle 2.1 darge-

U-Werte für Neubauten in W/(m² K)	Grenzwert SIA 180	SIA 380/1 Einzelbauteilnachweis	
		Grenzwert	Zielwert
Opake Bauteile gegen Aussenklima oder weniger als 2 m im Erdreich			
• Dach, Decke, Aussenwand, Boden (gegen Erdreich)	0,40	0,17	0,10
Fenster, Fenstertüren	2,4	1,0	0,80
Opake Bauteile gegen unbeheizt oder mehr als 2 m im Erdreich			
• Dach, Boden, Aussenwand	0,60	0,25	0,10
• Oberste Decke gegen unbeheizt	0,50		

Tabelle 2.1: Anforderungen U-Werte Neubau nach SIA 380/1:2016, Einzelbauteilnachweis und Mindestwärmeschutz nach SIA 180:2014.

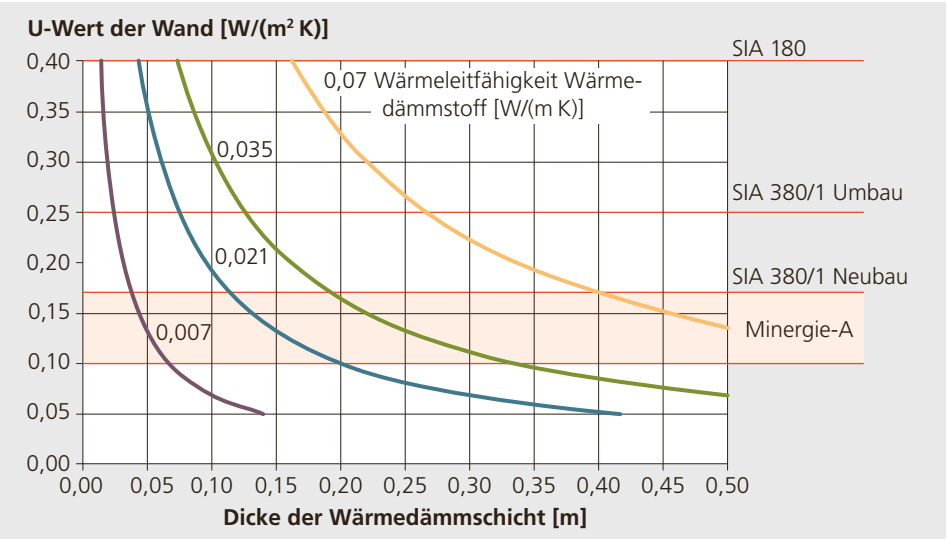


Abbildung 2.4: Erforderliche Wärmedämmdicken gegen Aussenklima in Abhängigkeit zur Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmstoffs.

stellt. Erforderliche Wärmedämmstärken verschiedener Anforderungsniveaus sind in Abbildung 2.4 enthalten. Falls eine Standardlösungskombination zur Anwendung kommt (wie in den MuKEn 2014 dokumentiert), gelten fallweise Anforderungen von 0,15 W/(m² K).

Fensterflächen verursachen aufgrund schlechterer U-Werte im Vergleich zu opaken Bauteilen zwar höhere Transmissionswärmeverluste, liefern aber auch die für die Energiebilanz des Gebäudes wichtigen passiven Solargewinne. Für die Höhe der passiven Solargewinne sind Strahlungsangebot, Ausrichtung, Verschattung, Grösse und Energiedurchlassgrad (g-Wert) der Verglasungsflächen in der Gebäudehülle entscheidend. In Abhängigkeit von Fenstergrösse und Rahmen- und Verglasungskennwerten können unverschattete süd-, ost- und westorientierte Glasflächen mit Dreifachverglasung in der Summe von Transmissionswärmeverlusten und Solargewinnen eine positive Energiebilanz aufweisen. Dieses Bauteil ist somit ein Energiegewinnbauteil. Je höher der Vergla-

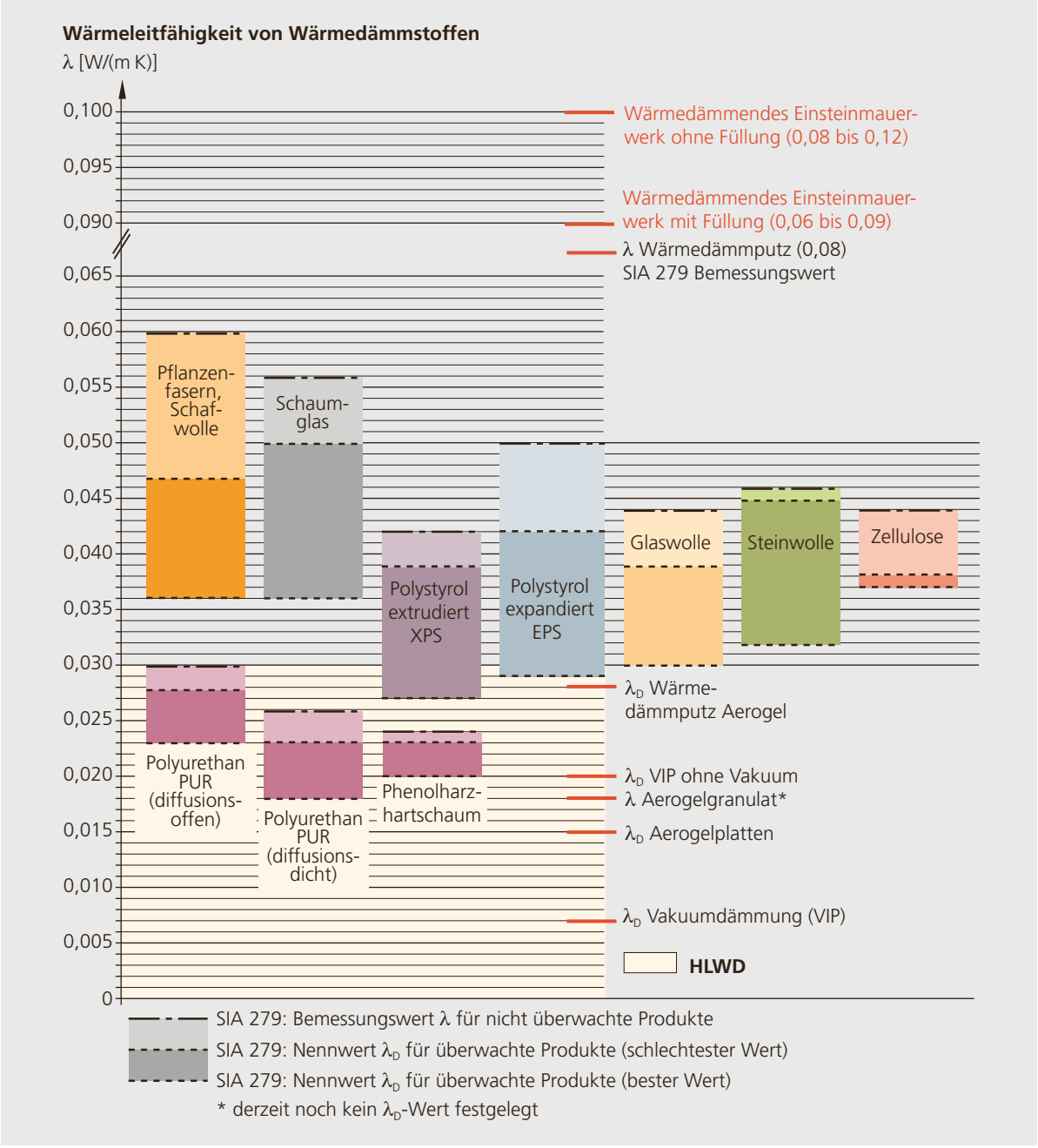


Abbildung 2.5: Wärmeleitfähigkeit von Wärmedämmstoffen, Stand 10/2019. (Quelle: Marco Ragonesi, Gregor Steinke, Faktor Verlag)

sungsanteil der Fassade, umso grösser ist das Risiko der Überhitzung durch hohe Solarwärmelasten und umso wichtiger sind Massnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz. Bei geringen Aussentemperaturen kann es raumseitig zum Kaltluftabfall an den Fensterflächen kommen. Je schlechter der U-Wert und je höher das Fenster, umso stärker ist der Kaltluftabfall.

Wärmedämmstoffe

Für den Wärmeschutz der opaken Bauteile der thermischen Gebäudehülle sind Wärmedämmstoffe von zentraler Bedeutung. Unter Wärmedämmstoffen versteht man Materialien, deren Wärmeleitfähigkeit λ höchstens 0,1 W/(m K) beträgt. Die Wärmeleitfähigkeit setzt sich aus der Wärmeübertragung durch Konvektion in den Poren, Wärmeleitung im Feststoffanteil zwischen den Poren und der Wärmestrahlung zwischen den Porenwandungen zusammen. Entscheidende Einflussgrössen für die Wärmeleitfähigkeit sind die Porengrösse, Eigenschaften des Gases oder Vakuum in den Poren und die Beschaffenheit des Gerüstes um die Poren herum. Wärmedämmstoffe müssen je nach Einsatzgebiet neben ihrer Aufgabe des Wärmeschutzes Anforderungen an Brandschutz, Druckfestigkeit, Wasserdampfdurchlässigkeit, Wasserbeständigkeit, Dauerhaftigkeit etc. erfüllen. Wärmedämmstoffe werden aus natürlichen oder künstlichen, organischen oder anorganischen Materialien hergestellt. Die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Wärmedämmstoffe ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

Synthetische anorganische Materialien, wie z. B. Glas- und Steinwolle und synthetische organische Dämmstoffe, wie z. B. EPS, XPS und PUR haben einen Anteil von über 90 % am Dämmstoffmarkt. Bei der Auswahl des Wärmedämmstoffs sollte neben den geforderten Eigenschaften für den Gebrauch auch die Umweltbelastung bei der Herstellung berücksichtigt werden (Abbildung 2.6).

Mit Aerogelen, Nanoschäumen und Vakuumdämmpaneelen stehen Wärmedäm-

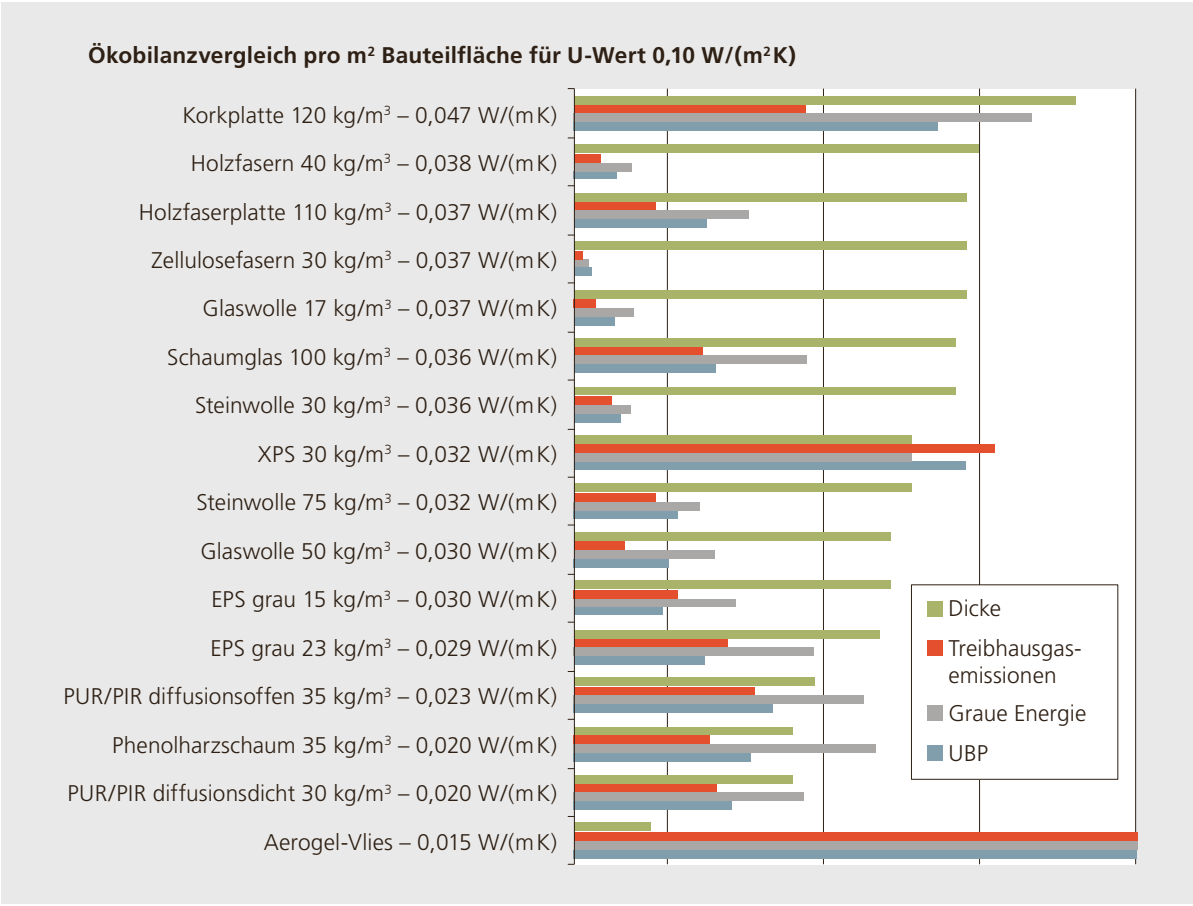


Abbildung 2.6: Umweltbelastung verschiedener Wärmedämmstoffe, referenziert auf einen U-Wert von 0,10 W/(m² K). Stand 10/2019. (Quellen: KBOB – Ökobilanzdaten im Baubereich und SIA-Baustoffkennwerte)

mungen zur Verfügung, die eine zwei- bis fünffach geringere Wärmeleitfähigkeit haben, als herkömmliche Wärmedämmstoffe. Diese Hochleistungswärmedämmstoffe (HLWD) werden aufgrund höherer spezifischer Materialpreise meist als Problemlöser an Stellen der Gebäudehülle eingesetzt, wo wenig Platz für Wärmedämmung zur Verfügung steht, durch den Platzbedarf für Wärmedämmung wertvolle Nutzfläche verloren geht oder dickere Dämmstoffschichten konstruktive Probleme verursachen würden.

Anwendungsbeispiele für HLWD

- Verbesserter Wärmeschutz bei: thermischen Schwachstellen, z. B. Rollladenkästen, Boden/Decke trotz geringer Raumhöhe, Aussenwanddämmung trotz geringer Gehwegbreite
- Konstruktive Vereinfachung z. B. Aussenwanddämmung bei geringem Dachüberstand
- Nutzflächengewinn bei Innendämmung oder festgelegten Aussenabmessungen des Gebäudes
- Schmale Ansichtsbreiten und bessere Raumausnützung bei Lukarnen
- Komfortgewinn durch schwellenlosen Übergang bei Dachterrassen/Loggien oder Tiefkühlräumen

2.4 Opake Bauteile der thermischen Gebäudehülle

Dach und oberste Geschossdecke

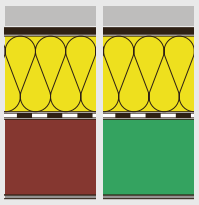
Bei Dächern lässt sich häufig ohne hohen Mehraufwand ein sehr guter Wärmeschutz (U-Wert 0,10 – 0,15 W/(m² K)) mit dicken Wärmedämmstoffschichten realisieren. So lassen sich beim Systemnachweis nach SIA 380/1 weniger gut wärmegedämmte Bereiche der Gebäudehülle kompensieren.

Flachdächer werden im Massivbau in der Regel als unbelüftete Warmdachkonstruktionen ausgeführt (Abbildung 2.7). Über der Wärmedämmung ist die Dachabdichtung angeordnet. Unter der Wärmedämmung muss eine Dampfbremse installiert sein, um ein Durchfeuchten der Wärmedämmung durch Dampfdiffusion aus dem Innenraum zu vermeiden.

Bei Steildächern werden die Sparren in der Regel über die gesamte Höhe ausgedämmt (Abbildung 2.8). Eine Kombination der Zwischensparrendämmung mit einer Untersparren- oder Aufsparrendämmung reduziert den Wärmeverlust der Sparren und erlaubt geringere Bauteilhöhe im Vergleich zu Konstruktionen, welche nur zwischen den Sparren gedämmt sind. Diese Konstruktionen sind insbesondere bei Erneuerungen empfehlenswert, falls die

Abbildung 2.7: Flachdach massiv, Warmdach.

Flachdach massiv, Warmdach



		λ [W/(m K)]
6	Schutz- und Nutzschichten	–
5	Abdichtung	–
4	Wärmedämmschicht	variabel
3	Dampfbremse	–
2	Massivholz oder Stahlbeton	0,13 / 2,30
1	Innenputz	0,70

Variante: Oberste Geschossdecke gegen unbeheizt, massiv. Analog Flachdachaufbau, allerdings ohne Dampfsperre und Abdichtung. In Abhängigkeit zur Nutzung des Estrichs bildet ein Unterlagsboden oder eine Holzwerkstoffplatte den oberen Abschluss.

Erforderliche Dämmschichtdicke [m] in Abhängigkeit vom Material der Rohdecke, U-Wert und Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht

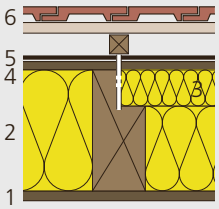
Material Rohdecke	Massivholz					Stahlbeton					
U-Wert [W/(m² K)]	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10	Beispiele
Dämmdicke [m] für λ = 0,041 W/(m K)	0,09	0,13	0,17	0,20	0,34	0,15	0,19	0,23	0,26	0,40	Schaumglasplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,035 W/(m K)	0,08	0,11	0,15	0,17	0,29	0,13	0,17	0,20	0,22	0,34	Mineralwollplatte, XPS
Dämmdicke [m] für λ = 0,030 W/(m K)	0,07	0,10	0,12	0,15	0,25	0,11	0,14	0,17	0,19	0,29	EPS-Platte
Dämmdicke [m] für λ = 0,027 W/(m K)	0,06	0,09	0,11	0,13	0,22	0,10	0,13	0,15	0,17	0,26	PUR-Platte
Dämmdicke [m] für λ = 0,022 W/(m K)	0,05	0,07	0,09	0,11	0,18	0,08	0,10	0,12	0,14	0,21	PUR-Platte alukaschiert
Dämmdicke [m] für λ = 0,018 W/(m K)	0,04	0,06	0,07	0,09	0,15	0,07	0,09	0,10	0,12	0,18	Aerogelplatten
Dämmdicke [m] für λ = 0,008 W/(m K)	0,02	0,03	0,03	0,04	0,07	0,03	0,04	0,04	0,05	0,08	Vakuumdämmplatten

Sparrenhöhe gering ist. Wenn die innere Bekleidung der Schrägdachkonstruktion einen ausreichend hohen Dampfdiffusionswiderstand aufweist (z. B. OSB- oder Dreischichtplatte) und die Plattenstösse abgeklebt werden, kann auf eine Dampfbremse verzichtet werden.

Bei sämtlichen Durchdringungen der Dachfläche und Anschlüssen an Wände, Stützen und Balken muss eine lückenlose Luftdichtigkeitsschicht ausgeführt werden. Ansonsten können durch unkontrolliertes Durchströmen der Wärmedämmung mit warmer feuchter Raumluft massive Feuchteschäden auftreten. Die nachträgliche Wärmedämmung der obersten Geschossdecke ist eine sehr effektive und kostengünstige Massnahme zur Verbesserung des Wärmeschutzes, falls das Dachgeschoss bei bestehenden Gebäuden nicht ausgebaut ist und nicht beheizt wird.

Abbildung 2.8: Steildach.

Steildach



	Variante 1	λ [W/(m K)]
6	Konterlattung, Lattung, Dacheindeckung	–
5	optional Unterdachbahn	–
4	optional Holzwerkstoffplatte	0,09
2	Sparren Höhe variabel (Holzanteil 8%/16%)	0,13
	Wärmedämmschicht	variabel
1	Dreischicht- od. OSB-Platte	0,13
	alternativ Gipskarton	0,24
	Installationshohlraum	–
	Dampfbremse	–

	Variante 2	λ [W/(m K)]
6	Konterlattung, Lattung, Dacheindeckung	–
5	optional Unterdachbahn	–
4	optional Holzwerkstoffplatte	0,09
3	Aufsparrendämmung	variabel
2	Sparren Höhe 18 cm (Holzanteil 8%/16%)	0,13
	Wärmedämmschicht 18 cm	0,036
1	Dreischicht- oder OSB-Platte	0,13
	alternativ Gipskarton	0,24
	Installationshohlraum	–
	Dampfbremse	–

Variante 1 (einschalig)

Erforderliche Dämmschichtdicke [m] in Abhängigkeit vom Holzanteil, U-Wert und Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht

Holzanteil der Konstruktion	**8%**					**16%**					
U-Wert [W/(m² K)]	**0,20**	**0,17**	**0,15**	**0,12**	**0,10**	**0,20**	**0,17**	**0,15**	**0,12**	**0,10**	**Beispiele**
Dämmdicke [m] für λ = 0,042 W/(m K)	0,21	0,26	0,29	0,38	0,46	0,24	0,29	0,34	0,43	0,52	Grasfasern lose
Dämmdicke [m] für λ = 0,038 W/(m K)	0,20	0,24	0,27	0,35	0,42	0,23	0,27	0,32	0,40	0,49	Zellulosefasern, Holzfasermatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,036 W/(m K)	0,19	0,23	0,26	0,33	0,41	0,22	0,27	0,31	0,39	0,48	Schafwoll-, Pflanzenfasermatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,034 W/(m K)	0,18	0,22	0,25	0,32	0,39	0,21	0,26	0,30	0,38	0,46	Mineralwollmatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,032 W/(m K)	0,17	0,21	0,24	0,31	0,37	0,21	0,25	0,29	0,37	0,44	Mineralwollmatte

Variante 2 (zweischalig)

Erforderliche Dicke der Aufsparrendämmung [m] in Abhängigkeit vom Holzanteil, U-Wert und Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht

Holzanteil der Konstruktion	**8%**					**16%**					
U-Wert [W/(m² K)]	**0,20**	**0,17**	**0,15**	**0,12**	**0,10**	**0,20**	**0,17**	**0,15**	**0,12**	**0,10**	**Beispiele**
Dämmdicke [m] für λ = 0,043 W/(m K)	0,02	0,06	0,09	0,17	0,24	0,05	0,09	0,12	0,19	0,26	Holzfaserplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,036 W/(m K)	0,02	0,05	0,08	0,14	0,20	0,04	0,07	0,10	0,16	0,22	Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,032 W/(m K)	0,02	0,05	0,07	0,12	0,18	0,04	0,06	0,09	0,14	0,20	Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,028 W/(m K)	0,01	0,04	0,06	0,11	0,15	0,03	0,06	0,08	0,13	0,17	PUR-Aufdachelement
Dämmdicke [m] für λ = 0,022 W/(m K)	0,01	0,03	0,05	0,08	0,12	0,02	0,04	0,06	0,10	0,13	PUR-Aufdachelement alukaschiert
Dämmdicke [m] für λ = 0,018 W/(m K)	0,01	0,03	0,04	0,07	0,10	0,02	0,04	0,05	0,08	0,11	Aerogelmatte

Aussenwand

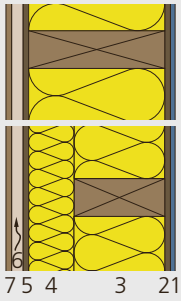
Bei Neubauten ermöglichen **vorfabrizierte Holzsystembauelemente** hochgedämmte und vergleichsweise schlanke Konstruktionen. Die Fassadenelemente können lastabtragend (Holzbau) oder nicht tragend (Hybridbauweise mit tragender innerer Massivbaustruktur) ausgeführt werden. Die nicht tragenden Elemente haben schmalere Holzrahmen und einen geringeren Holzanteil. Der Wärmeverlust der Holzrahmen lässt sich durch einen zweischaligen Aufbau mit durchgehender äusserer Wärmedämmschicht reduzieren und erlaubt geringere Bauteiltiefen im Vergleich zu Konstruktionen, welche nur zwischen den Rahmen gedämmt sind. Abbildung 2.9 zeigt verschiedene Varianten. Den äusseren Abschluss bildet eine hinterlüftete Bekleidung oder eine verputzte Wärmedämmschicht. In Abhängigkeit der Gebäudehöhe sind zusätzliche Brandschutzmassnahmen notwendig.

Die verputzte Aussenwärmedämmung (Kompaktfassade) auf massiver Aussenwand ist im Neubau und bei Erneuerungen eine der am häufigsten anzutreffenden Konstruktionen (Abbildung 2.10). Im Vergleich weist dieser Bauteilaufbau die geringsten Investitionskosten, aber auch kürzere Instandhaltungsintervalle auf.

Es dürfen nur aufeinander abgestimmte Systemkomponenten eingesetzt werden,

Abbildung 2.9: Aussenwand Holzrahmenkonstruktion.

Aussenwand Holzrahmenkonstruktion



Variante 1 (einschalig)	λ [W/(m K)]
1 Gipskarton	0,24
optional Installationshohlraum	–
2 Holzwerkstoffplatte	0,13
3 Holzrahmen Tiefe variabel (Holzanteil 10% / 13%)	0,13
Wärmedämmschicht	variabel
5 Holzwerkstoffplatte	0,13
6 Lattung/Hinterlüftung	–
7 Bekleidung	–

Variante 2 (zweischalig)	λ [W/(m K)]
1 Gipskarton	0,24
optional Installationshohlraum	–
2 Holzwerkstoffplatte	0,13
3 Holzrahmen 16 cm (Holzanteil 10% / 13%)	0,13
Wärmedämmschicht 16 cm	0,036
4 Wärmedämmschicht Überdämmung	variabel
6 Lattung/Hinterlüftung	–
- ca. 2,5 Schrauben pro m²	
- Wärmebrückenverlust pro Schraube ca. 0,001 W/K	
7 Bekleidung	–
alternativ zu 6+7 verputzte Aussenwärmedämmung	

Variante 1 (einschalig)

Erforderliche Dämmschichtdicke [m] in Abhängigkeit vom Holzanteil, U-Wert und Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht

Holzanteil der Konstruktion	10%					13%					
U-Wert [W/(m² K)]	**0,20**	**0,17**	**0,15**	**0,12**	**0,10**	**0,20**	**0,17**	**0,15**	**0,12**	**0,10**	**Beispiele**
Dämmdicke [m] für λ = 0,042 W/(m K)	0,23	0,27	0,31	0,40	0,48	0,24	0,29	0,33	0,42	0,51	Grasfasern lose
Dämmdicke [m] für λ = 0,038 W/(m K)	0,21	0,25	0,29	0,37	0,45	0,23	0,27	0,31	0,39	0,47	Zellulosefasern, Holzfasermatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,036 W/(m K)	0,20	0,24	0,28	0,35	0,43	0,22	0,26	0,30	0,38	0,46	Schafwoll-, Pflanzenfasermatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,034 W/(m K)	0,20	0,23	0,27	0,34	0,41	0,21	0,25	0,29	0,36	0,44	Mineralwollmatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,032 W/(m K)	0,19	0,22	0,26	0,33	0,39	0,20	0,24	0,28	0,35	0,42	Mineralwollmatte

Variante 2 (zweischalig)

Erforderliche Dicke der Überdämmung [m] in Abhängigkeit vom Holzanteil, U-Wert und Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht

Holzanteil der Konstruktion	10%					13%					
U-Wert [W/(m² K)]	**0,20**	**0,17**	**0,15**	**0,12**	**0,10**	**0,20**	**0,17**	**0,15**	**0,12**	**0,10**	**Beispiele**
Dämmdicke [m] für λ = 0,043 W/(m K)	0,05	0,09	0,12	0,20	0,27	0,06	0,10	0,13	0,21	0,28	Holzfaserplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,036 W/(m K)	0,04	0,07	0,10	0,17	0,23	0,05	0,08	0,11	0,17	0,24	Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,032 W/(m K)	0,04	0,07	0,09	0,15	0,20	0,04	0,07	0,10	0,15	0,21	Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,018 W/(m K)	0,02	0,04	0,05	0,08	0,11	0,02	0,04	0,06	0,09	0,12	Aerogelmatte

d.h Kleber, Wärmedämmung, eingebettetes Armierungsgewebe und Deckputz müssen zueinander passen.

- Die Wärmedämmschicht besteht meist aus plattenförmigen Wärmedämmstoffen, kann aber auch aus Wärmedämmputz mit z. B. EPS-, Perlite- oder Aerogelzuschlägen bestehen.
- Das Fenster sollte möglichst in der Wärmedämmebene vorgesehen werden, um Wärmebrückenverluste des Fensteranschlusses zu reduzieren und passive Solargewinne zu erhöhen.
- Im Systemaufbau können anstelle des Aussenputzes auch keramische Materialien oder Spaltklinker auf die Wärmedämmschicht geklebt werden.
- Aus Brandschutzgründen können bei entflammbaren Wärmedämmstoffen horizontale Brandriegel oder Fenstersturzdämmung aus nicht brennbaren Wärmedämmstoffen notwendig sein. In bestimmten Fällen dürfen nur nicht brennbare Materialien eingesetzt werden (z. B. Hochhaus).
- Auf hochgedämmten beschatteten Fassaden kann Algenbildung auftreten. Putze und Anstriche mit Bioziden können das Auftreten verzögern. Allerdings werden die Stoffe durch Niederschläge ausgewaschen und gelangen in die Umwelt. Dickputzsysteme respektive Wärmedämmstoffe hoher Wärmespeicherkapazität können der Algenbildung entgegenwirken.
- Rückbau mit getrenntem Recycling der Bauteilschichten ist kaum möglich.

Bei Aussenwärmedämmung mit hinterlüfteter Bekleidung übernehmen die verschiedenen, voneinander getrennten Bauteilschichten unterschiedliche Funktionen der Aussenwand, was zu guten bauphysikalischen Eigenschaften führt. Für die äussere Bekleidung steht eine Vielzahl verschiedener Materialien und Unterkonstruktionen zur Verfügung. Beispielsweise kann eine Bekleidung aus Photovoltaikmodulen zur Stromerzeugung am Gebäude eingesetzt werden.

- Thermisch optimierte Unterkonstruktionen mit geringen Wärmebrückenzuschlägen wählen, z. B. GFK-Wärmedämmkonsolen (Abbildung 2.11).
- Durchströmung der Wärmedämmung (Faserdämmstoffe) bei Wind muss durch winddichte diffusionsoffene Schutzlage auf der Wärmedämmung vermieden werden.
- Auf eine lückenlos verlegte Wärmedämmung um die Konsolen und Verankerungen achten.
- Bei Unterkonstruktionen mit Distanzschrauben wird zuerst die Wärmedämmung vollflächig montiert und anschliessend die Unterkonstruktion auf den tragenden Untergrund verankert.

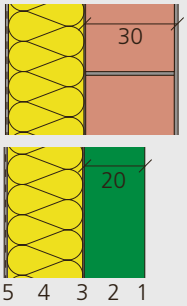
Mit wärmedämmendem Mauerwerk (Abbildung 2.13) lassen sich verputze monolithische Aussenwandkonstruktionen ohne zusätzliche Wärmedämmschichten erstellen, welche bei entsprechender Dicke auch hohe Anforderungen an den Wärmeschutz erfüllen können. Erhältlich sind Porenbetonsteine und Backsteine mit optimierter Lochgeometrie. Die Hohlräume der Backsteine sind bei einigen Produkten zusätzlich mit Wärmedämmmaterial gefüllt. Lastabtragende Aussenwände können maximal drei- bis viergeschossig realisiert werden, da die Druckfestigkeit der Steine relativ gering ist. Die Verarbeitung erfolgt mit speziellem Dünnbettmörtel. Für Bauteilanschlüsse (z. B. Fensteranschlag) werden Sonderbauteile angeboten.

Bei verputztem Zweischalenmauerwerk ist im Zwischenraum eine Wärmedämmschicht angeordnet (Abbildung 2.12). Der Abstand der Mauerwerksschalen ist aus konstruktiven Gründen in der Regel auf 30 cm begrenzt.

Abbildung 2.10 (oben): Kompaktfassade.

Abbildung 2.11 (unten): Hinterlüftete Fassade auf massiver Aussenwand mit Wärmedämmkonsole.

Aussenwand Kompaktfassade

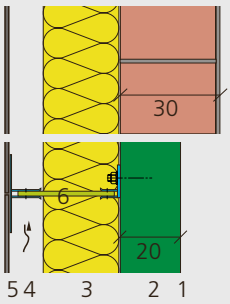


Konstruktionsaufbau	λ [W/(m K)]
1 Innenputz	0,70
2 Backstein oder Stahlbeton	0,35 / 2,3
Aussenputz (bei Bestandswand)	0,87
3 Klebemörtel	0,90
4 Wärmedämmschicht	variabel
5 Aussenputz und Armierung	0,90

Erforderliche Dämmschichtdicke [m] in Abhängigkeit vom Material der Aussenwand, U-Wert und Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht

Material Aussenwand	**Backstein**					**Stahlbeton**					
U-Wert [W/(m²K)]	**0,25**	**0,20**	**0,17**	**0,15**	**0,10**	**0,25**	**0,20**	**0,17**	**0,15**	**0,10**	**Beispiele**
Dämmdicke [m] für λ = 0,045 W/(m K)	0,14	0,18	0,22	0,26	0,41	0,17	0,21	0,25	0,29	0,44	Calziumsilikatschaumplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,040 W/(m K)	0,12	0,16	0,20	0,23	0,36	0,15	0,19	0,22	0,26	0,39	Holzfaserplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,035 W/(m K)	0,11	0,14	0,17	0,20	0,32	0,13	0,17	0,20	0,22	0,34	Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,030 W/(m K)	0,09	0,12	0,15	0,17	0,27	0,11	0,14	0,17	0,19	0,29	EPS-Platte
Dämmdicke [m] für λ = 0,028 W/(m K)	0,09	0,11	0,14	0,16	0,25	0,10	0,13	0,16	0,18	0,27	Aerogel-Wärmedämmputz
Dämmdicke [m] für λ = 0,023 W/(m K)	0,07	0,09	0,11	0,13	0,21	0,09	0,11	0,13	0,15	0,22	EPS-PIR-Verbundplatten
Dämmdicke [m] für λ = 0,018 W/(m K)	0,06	0,07	0,09	0,10	0,16	0,07	0,09	0,10	0,12	0,18	Aerogelplatten

Hinterlüftete Fassade auf massiver Aussenwand mit Wärmedämmkonsole



	λ [W/(m K)]
1 Innenputz	0,70
2 Backstein oder Stahlbeton	0,35 / 2,3
3 Wärmedämmschicht	variabel
4 Hinterlüftung	–
5 Bekleidung	–
6 Wärmedämmkonsole	
– etwa 2 Stück pro m² Aussenwand	
– Wärmebrückenverlust χ pro Konsole etwa 0,0005 W/K	

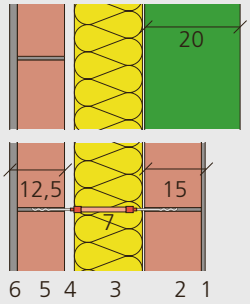
Erforderliche Dämmschichtdicke [m] in Abhängigkeit vom Material der Aussenwand, U-Wert und Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht

Material Aussenwand	**Backstein**					**Stahlbeton**					
U-Wert [W/(m²K)]	**0,25**	**0,20**	**0,17**	**0,15**	**0,10**	**0,25**	**0,20**	**0,17**	**0,15**	**0,10**	
Dämmdicke [m] für λ = 0,040 W/(m K)	0,12	0,16	0,20	0,23	0,37	0,15	0,19	0,23	0,26	0,39	Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,038 W/(m K)	0,12	0,16	0,19	0,22	0,35	0,14	0,18	0,21	0,24	0,37	Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,036 W/(m K)	0,11	0,15	0,18	0,21	0,33	0,13	0,17	0,20	0,23	0,35	Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,034 W/(m K)	0,11	0,14	0,17	0,20	0,31	0,13	0,16	0,19	0,22	0,33	Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,032 W/(m K)	0,10	0,13	0,16	0,19	0,29	0,12	0,15	0,18	0,21	0,31	Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,018 W/(m K)	0,06	0,07	0,09	0,10	0,17	0,07	0,09	0,10	0,12	0,18	Aerogelplatten

Abbildung 2.12 (oben): Zweischalenmauerwerk.

Abbildung 2.13 (unten): Einschaliges wärmedämmendes Mauerwerk.

Zweischalenmauerwerk

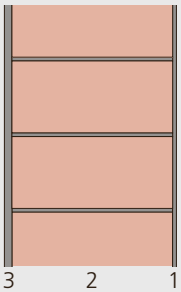


		λ [W/(m K)]
1	Innenputz	0,70
2	Backstein oder Sichtbeton	0,35 / 2,30
3	Wärmedämmschicht	variabel
4	Luftschicht	–
5	Backstein	0,35
6	Aussenputz	0,87
7	Zweischalenanker	
	– etwa 0,7 Stück pro m² Aussenwand	
	– Wärmebrückenverlust χ pro Anker etwa 0,003 W/K	

Erforderliche Dämmschichtdicke [m] in Abhängigkeit vom Material der Aussenwand, U-Wert und Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht

Material Aussenwand	**Backstein**					**Stahlbeton**					
U-Wert [W/(m² K)]	**0,25**	**0,20**	**0,17**	**0,15**	**0,10**	**0,25**	**0,20**	**0,17**	**0,15**	**0,10**	**Beispiele**
Dämmdicke [m] für λ = 0,038 W/(m K)	0,12	0,15	0,19	0,22		0,13	0,17	0,20	0,23		Schaumglasplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,036 W/(m K)	0,11	0,15	0,18	0,21		0,12	0,16	0,19	0,22		XPS-Platte
Dämmdicke [m] für λ = 0,035 W/(m K)	0,11	0,14	0,17	0,20		0,12	0,15	0,19	0,21		Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,033 W/(m K)	0,10	0,13	0,16	0,19		0,11	0,15	0,18	0,20		EPS-Platte
Dämmdicke [m] für λ = 0,032 W/(m K)	0,10	0,13	0,16	0,18		0,11	0,14	0,17	0,20		Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,018 W/(m K)	0,05	0,07	0,09	0,10	0,17	0,06	0,08	0,10	0,11	0,17	Aerogelplatten

Einsteinmauerwerk wärmedämmend



Konstruktionsaufbau		λ [W/(m K)W]
1	Innenputz 10 mm	0,70
2	wärmedämmende Block- oder Plansteine, variabel	variabel
3	Leichtgrundputz 20 mm	0,30

Erreichbarer U-Wert [W/(m² K)] in Abhängigkeit der Dicke der Aussenwand und der Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmsteins

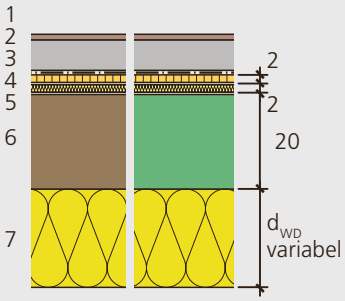
Dicke Wärmedämmstein [m]	**0,300**	**0,365**	**0,400**	**0,425**	**0,480**	**0,490**	**0,500**	
U-Wert [W/(m² K)] für λ = 0,090 W/(m K)	0,28	0,23		0,20				Leichtbackstein
U-Wert [W/(m² K)] für λ = 0,085 W/(m K)	0,27	0,22		0,19				Leichtbackstein
U-Wert [W/(m² K)] für λ = 0,080 W/(m K)	0,25	0,21		0,18		0,16		Leichtbackstein
U-Wert [W/(m² K)] für λ = 0,075 W/(m K)	0,24	0,20		0,17		0,15		Leichtbackstein
U-Wert [W/(m² K)] für λ = 0,070 W/(m K)		0,18		0,16		0,14		Leichtbackstein
U-Wert [W/(m² K)] für λ = 0,065 W/(m K)						0,13		Leichtbackstein
U-Wert [W/(m² K)] für λ = 0,081 W/(m K)	0,26	0,21	0,19		0,16		0,16	Porenbetonstein
U-Wert [W/(m² K)] für λ = 0,073 W/(m K)	0,23	0,19	0,18		0,15		0,14	Porenbetonstein

Boden

Beim Boden gegen unbeheizt als Bauteil der thermischen Gebäudehülle wird im Massivbau zusätzlich zur Trittschalldämmung die Wärmedämmschicht je nach baulicher Situation meist unterhalb oder kombiniert ober- und unterhalb der Geschossdecke angeordnet (Abbildung 2.15). Wärmebrücken nichttragender Innenwände lassen sich bei Neu- oder Umbauten durch leichte Ständerwände oder eine wärmedämmende erste Steinreihe reduzieren. Bei Erneuerungen ist die mögliche Lage der Wärmedämmschicht von den lichten Raumhöhen und von allfälliger Erneuerung der Fussbodenkonstruktion abhängig. Auch beim Boden gegen Erdreich kann die Wärmedämmung oberhalb, unterhalb oder kombiniert angeordnet werden (Abbildung 2.16). Unterseitige Wärmedämmung der Bodenplatte muss druckfest und feuchteresistent sein (z. B. Schaumglasplatten- oder Schaumglasschotter, XPS). Bei oberseitiger Wärmedämmung fallen Wärmebrückenverluste der Übergänge von Innenwänden zur Bodenplatte umso weniger ins Gewicht, je tiefer die Bodenplatte im Erdreich und je grösser das Verhältnis von Bodenplattenfläche zu Bodenplattenumfang ist. Demnach wird bei nicht unterkellerten Gebäuden eine Wärmdämmschicht unterhalb der Bodenplatte empfohlen.

Abbildung 2.14: Boden gegen unbeheizt, massiv.

Boden gegen unbeheizt, massiv

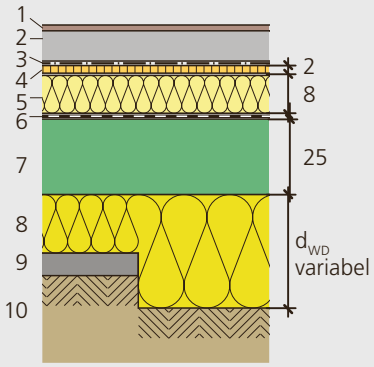


	λ [W/(m K)W]
1 Bodenbelag	–
2 Unterlagsboden	–
3 Trennlage	–
4 Trittschalldämmung	0,035
5 Wärmedämmung	0,035
6 Massivholz oder Stahlbeton	0,13 / 2,3
7 Wärmedämmschicht	variabel

Erforderliche Dämmschichtdicke [m] in Abhängigkeit vom Material der Aussenwand, U-Wert und Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht

Material Rohdecke	**Massivholz**					**Stahlbeton**					
U-Wert [W/(m² K)]	**0,28**	**0,25**	**0,21**	**0,15**	**0,10**	**0,28**	**0,25**	**0,21**	**0,15**	**0,10**	**Beispiele**
Dämmdicke [m] für λ = 0,038 W/(m K)	0,03	0,05	0,08	0,15	0,28	0,09	0,10	0,13	0,20	0,33	Schaumglasplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,035 W/(m K)	0,03	0,04	0,07	0,14	0,25	0,08	0,09	0,12	0,19	0,30	Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,032 W/(m K)	0,03	0,04	0,06	0,12	0,23	0,07	0,09	0,11	0,17	0,28	Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,030 W/(m K)	0,02	0,04	0,06	0,12	0,22	0,07	0,08	0,10	0,16	0,26	EPS-Platte
Dämmdicke [m] für λ = 0,028 W/(m K)	0,02	0,03	0,06	0,11	0,20	0,06	0,08	0,10	0,15	0,24	PUR-Platte
Dämmdicke [m] für λ = 0,022 W/(m K)	0,02	0,03	0,04	0,09	0,16	0,05	0,06	0,08	0,12	0,19	PUR-Platte alukaschiert
Dämmdicke [m] für λ = 0,018 W/(m K)	0,01	0,02	0,04	0,07	0,13	0,04	0,05	0,06	0,10	0,16	Aerogelplatten
Dämmdicke [m] für λ = 0,008 W/(m K)	0,01	0,01	0,02	0,03	0,06	0,02	0,02	0,03	0,04	0,07	Vakuumdämmplatten

Boden gegen Erdreich, Wärmedämmung unter Bodenplatte



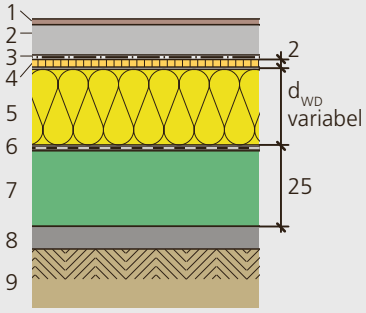
		λ [W/(m K)]
1	Bodenbelag	–
2	Unterlagsboden	–
3	Trennlage	–
4	Trittschalldämmung 2 cm	0,035
5	Wärmedämmschicht	0,035
6	Abdichtung	–
7	Stahlbeton 25 cm	2,3
8	Wärmedämmschicht	variabel
9	evt. Magerbeton	1,5
10	Erdreich	2,0

Erforderliche Dämmschichtdicke [m] in Abhängigkeit vom U-Wert und der Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht

U-Wert [W/(m² K)]	0,25	0,21	0,15	Beispiele
Dämmdicke [m] für λ = 0,081W/(m K)	0,08	0,14	0,30	Schaumglasschotter
Dämmdicke [m] für λ = 0,041 W/(m K)	0,04	0,07	0,15	Schaumglasplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,036 W/(m K)	0,04	0,06	0,13	XPS-Platte

Abbildung 2.15: Boden gegen Erdreich, Wärmedämmung unter Bodenplatte.

Boden gegen Erdreich, Wärmedämmung über Bodenplatte



		λ [W/(m K)]
1	Bodenbelag	–
2	Unterlagsboden	–
3	Trennlage	–
4	Trittschalldämmung	0,035
5	Wärmedämmschicht	variabel
6	Abdichtung	–
7	Stahlbeton 25 cm	2,3
8	Magerbeton	1,5
9	Erdreich	2,0

Erforderliche Dämmschichtdicke [m] in Abhängigkeit vom U-Wert und der Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht

U-Wert [W/(m² K)]	0,28	0,25	0,21	0,15	0,15	Beispiele
Dämmdicke [m] für λ = 0,041 W/(m K)	0,12	0,13	0,17	0,24	0,24	Schaumglasplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,035 W/(m K)	0,10	0,12	0,14	0,21	0,21	Mineralwollplatte
Dämmdicke [m] für λ = 0,033 W/(m K)	0,09	0,11	0,13	0,20	0,20	EPS-Platte
Dämmdicke [m] für λ = 0,027 W/(m K)	0,08	0,09	0,11	0,16	0,16	PUR-Platte
Dämmdicke [m] für λ = 0,022 W/(m K)	0,06	0,07	0,09	0,13	0,13	PUR-Platte alukaschiert
Dämmdicke [m] für λ = 0,018 W/(m K)	0,05	0,06	0,07	0,11	0,11	Aerogelplatten
Dämmdicke [m] für λ = 0,008 W/(m K)	0,02	0,03	0,03	0,05	0,05	Vakuumdämmplatten

Abbildung 2.16: Boden gegen Erdreich, massiv, Wärmedämmung auf Bodenplatte.

2.5 Vermeidung von Schwachstellen

Oft ist in Entwurf und Planung von Gebäuden die Aufmerksamkeit ausschliesslich auf die U-Werte gerichtet. Inhomogenitäten und Verbindungsstellen in Bauteilen bergen aber das Risiko von erheblichen Wärmeverlusten und Bauschäden, wenn sie nicht früh und kompetent in der Planung erkannt werden.

Wärmebrücken

Wärmebrücken sind Übergänge zwischen Bauteilen und Bereiche in Baukonstruktionen, die im Vergleich zur umgebenden Konstruktion einen höheren Wärmefluss beziehungsweise auf der Warmseite eine geringere Oberflächentemperatur aufweisen. Die Folge ist ein höherer Transmissionswärmeverlust durch die Gebäudehülle sowie ein erhöhtes Feuchterisiko im Bereich der Wärmebrücken an der Innenoberfläche der Gebäudehülle. Lineare Wärmebrücken (z. B. Kragplattenanschlüsse, Fensteranschlüsse) werden durch den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ (Psi, W/(m K)) angegeben, punktuelle Wärmebrücken (z. B. Unterkonstruktionen von hinterlüfteten Fassaden) durch den punktbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten χ (Chi, W/K). Mit Hilfe von Wärmebrückenberechnungsprogrammen und Wärmebrückenkatalogen können die Chi- und Psi-Werte ermittelt werden. Im Energienachweis werden Wärmebrücken mit Hilfe der «Checkliste Wärmebrücken» dokumentiert (Abbildung 2.17). Durch wärmebrückenminimierte Konstruktionen lassen sich Transmissionswärmeverluste reduzieren und kritische Oberflächenfeuchten vermeiden. Der gesamte Wärmeverlust einer Wärmebrücke ergibt sich aus der Multiplikation von Psi mit der Länge beziehungsweise von Chi mit der Anzahl. Oft werden zu hohe Psi- und Chi-Werte erfolgreich vermieden, aber nicht realisiert, dass grosse Längenabmessungen (z. B. Fensterrahmenabwicklungen) oder grosse Stückzahlen (z. B. Fassadenanker) genauso fatal sind.

Luftdichtheit

Die Gebäudehülle muss luftdicht sein. Undichtigkeiten der Gebäudehülle führen zu Warmluftverlusten und unbefriedigendem Luftwechselverhalten. Sie vermindern die Effektivität von Lüftungsanlagen und führen zu Kondensatrisiken aufgrund des Luftlecks. Diese können innert kurzer Zeit hohe Schäden anrichten. In der Norm SIA 180:2014 sind Grenz- und Zielwerte für die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle gemäss Tabelle 2.2 angegeben. Mit Hilfe einer Messung kann die Luftdurchlässigkeit überprüft werden (Blower-door-Test). Beim Minergie-Standard sind je nach angestrebtem Label ein Luftdichtheitskonzept, Luftdichtheitsmesskonzept respektive eine Luftdichtheitsmessung gefordert.

Entsprechend des Wärmedämmperimeters muss auch die Luftdichtheitsebene sorgfältig geplant, ein Luftdichtheitskonzept erstellt und ausgeführt werden. Häufig ist der Innenputz der Aussenwand die Luftdichtigkeitsebene. Im Steildach und Holzelementbau bildet die innere Bekleidung oder die Dampfbremse die luftdichte Ebene.

- Anschlüsse Fenster mit geeigneten Klebebändern oder Fugenbändern vorsehen.
- Im Bereich des Unterlagsbodens den Innenputz bis auf die Rohdecke führen.
- Elektroinstallationen dicht ausführen (Unterputzdosen satt eingipsen, luftdichte Dosen verwenden).
- Rückwände von Installationsschächten verputzen.

Tabelle 2.2: Grenzwerte und Zielwerte für die maximale Luftdurchlässigkeit $q_{a,50}$ in $m^3/(h\,m^2)$ der Gebäudehülle gemäss SIA 180:2014 und Minergie 2019.

	SIA 180:2014			**Minergie**	**Minergie-P Minergie-A**
	Grenzwert		Zielwert	Anforderung	
	für Fensterlüftung	für mechanische Lüftung	generell	für mechanische Lüftung	
Neubau	2,4	1,6	0,6	1,2	0,8
Erneuerung	3,6	2,4	1,2	1,6	1,6

- Übergang von Steigzonen zu Bereichen ausserhalb der thermischen Gebäudehülle luftdicht ausführen.
- Zeitpunkt der Luftdichtigkeitsmessung («Blower-door-Test», vor allem bei nicht durchgängig massiv gebauten Objekten) im Bauablauf einplanen und durchführen, solange die heiklen Stellen noch zugänglich sind.

Bei den in Tabelle 2.2 dokumentierten Grenz- und Zielwerten handelt es sich um den Leckvolumenstrom in $m^3/(h\,m^2)$ bei einer Druckdifferenz zwischen innen und aussen von 50 Pa und bezogen auf 1 m^2 der Gebäudehüllfläche.

Übersicht «Wärmebrücken»

Gebäudeschnitt

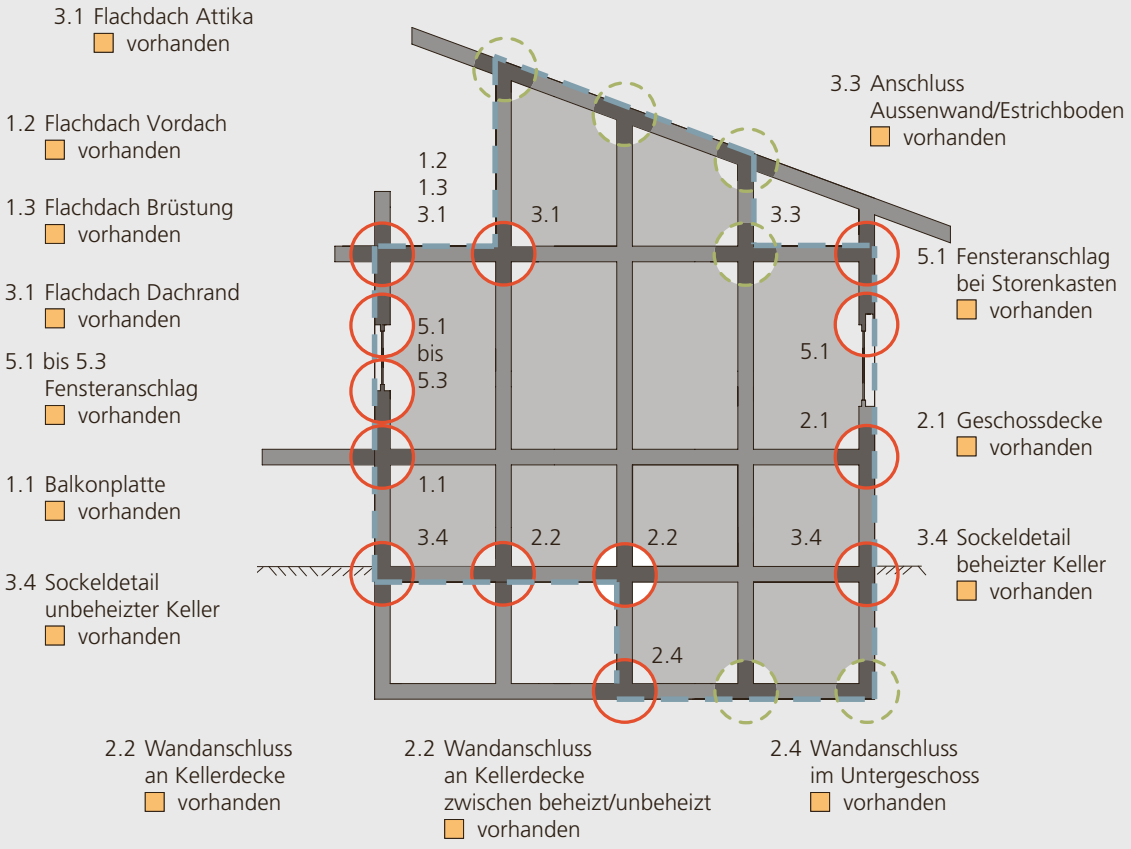


Abbildung 2.17: Hinweise und Anforderungen in konzentrierter Form sind in der «Checkliste Wärmebrücken» enthalten (www.endk.ch).

Achim Geissler

2.6 Gläser und Fenster

Gläser beziehungsweise Fenster sind zentrale Bauteile für energieeffiziente Gebäude. Sie versorgen den Innenraum mit Tageslicht und ermöglichen den visuellen Bezug zur Umgebung. Im Winter ermöglichen sie die passive Solarenergienutzung und reduzieren damit den Heizwärmebedarf deutlich. Im Sommer können sie allerdings bei einem zu grossen Flächenanteil auch zu einem Problem werden. Moderne Wärme- beziehungsweise Sonnenschutzgläser sind Hochleistungsprodukte. Die folgenden Komponenten des Glas- und Fensteraufbaues sind dabei für die thermischen Eigenschaften massgebend:

- Anzahl und Dicke der Scheibenzwischenräume (SZR; Zweifach-, Dreifach-Isolierverglasung oder mehr, Kastenfenster, Glas-Doppelfassade)
- Gasfüllung (Art des Füllgases; Luft, Krypton, Xenon, Argon)
- Beschichtungen (Emissionskoeffizient und solare Absorption bzw. Reflexion)
- Glas-Abstandhalter (Material). **Anmerkung:** Diese Komponente ist in den von Herstellern angegebenen U_g-Werten nicht berücksichtigt!
- Rahmenmaterial bzw. Güte der thermischen Trennung (Rahmen U-Wert U_f)

Für die schalltechnischen Eigenschaften sind die Glasstärken der Einzelgläser, allenfalls vorhandene laminierte Gläser sowie die Asymmetrie der Glasstärken und Scheibenzwischenräume wesentlich. Die Auswahl an verfügbaren Gläsern ist riesig. Entsprechende Aufstellungen sind im Internet bei Herstellern gut zu finden. Die technische Entwicklung ist auch längst nicht abgeschlossen, d. h., es empfiehlt sich, immer aktuelle Listen zu Rate zu ziehen. Ähnliches gilt für Rahmen beziehungsweise vollständige Fenster. Auch hier empfiehlt es sich, entsprechende Herstellerseiten im Internet zu konsultieren. Vorsicht bei den Angaben von Fenster-U-Werten. Diese sind wegen des Rahmenanteils grössenabhängig. Der normative Vergleichswert bezieht sich auf ein zweiflügeliges Fenster der Grösse 1,55 x 1,15 m^2.

Der U-Wert

Der Glas-U-Wert U_g wird von Herstellern in aller Regel für den Einbau in vertikaler Anordnung angegeben. Dieser Wert ist für Dachverglasungen und Dachflächenfenster falsch. Die Bestimmung des Glas-U-Wertes ist in SN EN 673 festgelegt. Diese Norm stellt auch für geneigte Gläser die entsprechende Berechnungsgrundlage bereit. Je nach Aufbau einer Isolierverglasung ist bei Verwendung in horizontaler Lage (Wärmestrom nach oben) mit einer Erhöhung des Glas-U-Wertes um 20 % bis 50 % zu rechnen. Die Ursache hierfür ist eine stark erhöhte Konvektion im Scheibenzwischenraum (Abbildung 2.18 und Abbildung 2.20). Wird dieser Sachverhalt bei der U-Wert-Berechnung beziehungs-

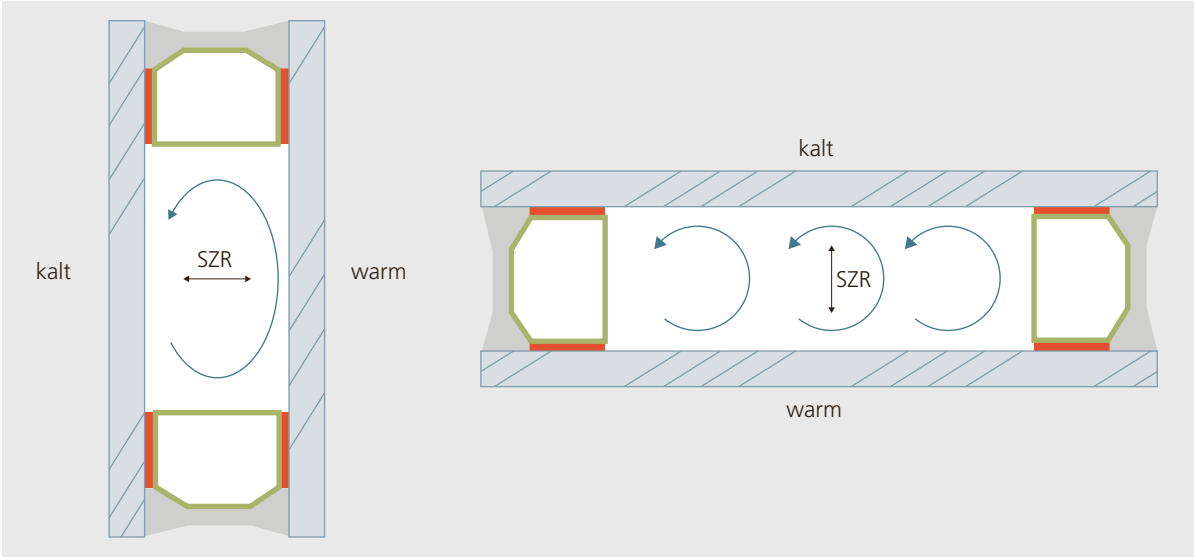


Abbildung 2.18: Erhöhter konvektiver Wärmetransport bei geneigten Gläsern – sogenannte Raleigh-Bénard-Konvektion. (Quelle: ift Rosenheim)

weise der energetischen Bilanzierung (Systemnachweis) nicht berücksichtigt, wird der entsprechende Transmissionswärmeverlust dieses Bauteils natürlich deutlich unterschätzt. Abbildung 2.20 zeigt, dass das Bauteil «Fenster» in der Ausbildung «Dachflächenfenster» mit einer Zweifach-Isolierverglasung die Einzelanforderung nach SIA 380/1:2016 sicher nicht erfüllen kann. Ein horizontales Dreifach-Isolierglas muss mit einem guten Rahmen kombiniert werden (tiefer Rahmen-U-Wert U_f), um die Anforderungen erfüllen zu können. Die Norm verlangt, dass der U-Wert mit zwei signifikanten Stellen angegeben wird. Viele Hersteller zieren sich hier. Es macht aber einen Unterschied, ob ein Glas mit U_g = 0,5 W/(m² K) tatsächlich einen Wert von 0,549 hat! Zwingen Sie den Hersteller, den Wert mit zwei signifikanten Stellen anzugeben. Die Berechnung des Fenster U-Wertes erfolgt gemäss:

$$U_W = \frac{U_g A_g + U_f A_f + \psi_g l_g}{A_g + A_f}$$

wobei A_g der lichten Fläche des Glases entspricht. U_f und A_f setzen sich in der Regel

Planungswerkzeuge
Das LBNL in Kalifornien, USA, betreut und veröffentlicht die International Glazing Database. Diese Glasdatenbank enthält über 4000 Datensätze zu den optischen Eigenschaften von Glasscheiben (spektrale Daten). Das LBNL stellt darüber hinaus Software zur Analyse von Sonnenschutzgläsern bereit (http://windows.lbl.gov). Ebenfalls verwendet werden kann das aus einem europäischen Forschungsprojekt resultierende Programm WIS (www.windat.org/wis/html). Dieses ermöglicht es, komplexe Systeme aus Glas und Sonnenschutz zu analysieren.

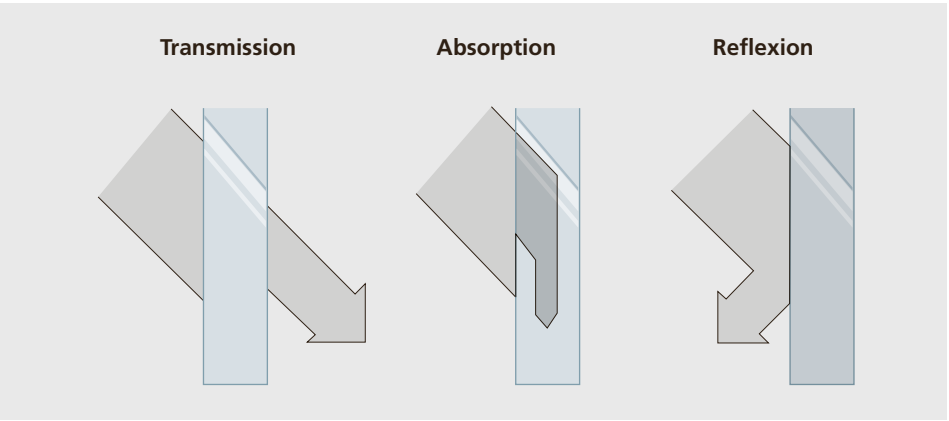


Abbildung 2.19: Vorgänge beim Auftreffen von kurzwelliger Strahlung auf ein Bauteil. (Quelle: Glas Trösch)

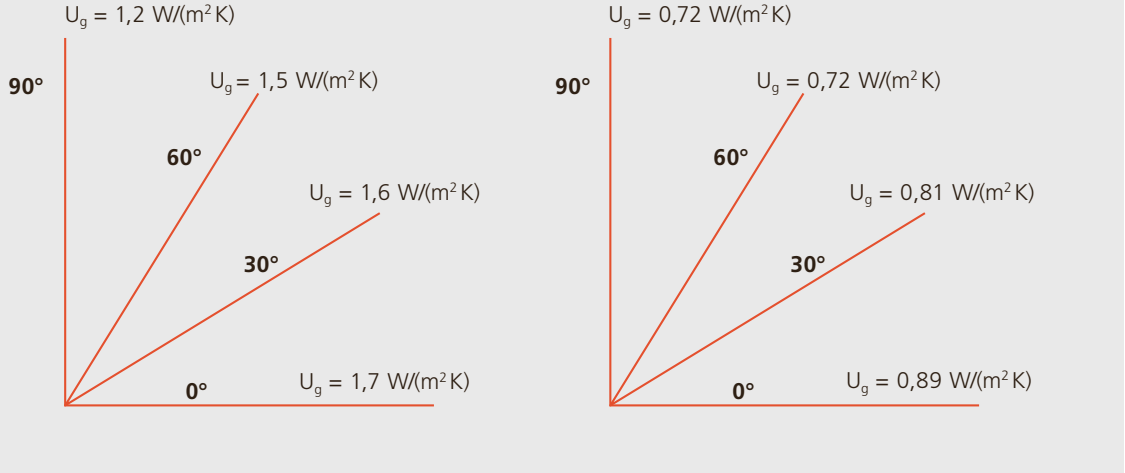


Abbildung 2.20: U_g-Wert in Abhängigkeit vom Neigungswinkel, links für eine Zweifach-, rechts für eine Dreifach-Isolierverglasung. (Quelle: ift Rosenheim)

aus mehreren Werten zusammen und Ψ_g der Wärmebrückenkoeffizient für den Randverlust des Glases ist.

Solarstrahlung

Die auf die Erde treffende kurzwellige Solarstrahlung ist auf Wellenlängen zwischen ca. 250 nm und 2500 nm verteilt. Abbildung 2.21 zeigt die spektrale Verteilung der Strahlungsintensität und auch den Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes im Solarspektrum. Die auf eine Fläche insgesamt auftreffende kurzwellige Einstrahlung setzt sich aus direkten und diffusen Anteilen zusammen.
Es gilt:

$$I_{glob} = I_{dir} + I_{diff}$$

mit
I_{dir}: direkte (gerichtete) Strahlung [W/m²]
I_{diff}: diffuse (ungerichtete) Strahlung [W/m²]
I_{glob}: Globalstrahlung [W/m²]

Dabei können sowohl direkte Anteile als auch diffuse Anteile durch Reflexion am Boden oder an umliegenden Bauten entstehen. Der Anteil der diffusen Strahlung hängt auch stark von der Bewölkung ab.
Trifft kurzwellige solare Strahlung auf einen Körper, so wird sie entweder transmittiert, reflektiert oder absorbiert (Abbildung 2.19). Der absorbierte Teil wird im Körper zu Wärme. Wie sich eintreffende kurzwellige Strahlung auf diese möglichen Mechanismen verteilt, hängt von den strahlungsphysikalischen Eigenschaften der jeweiligen Bauteilfläche ab. Diese Eigenschaften sind in der Regel von der Wellenlänge abhängig, es gilt also:

$$\tau(\lambda) + \alpha(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$$

mit
$\tau(\lambda)$: Transmission bei der Wellenlänge λ,
$\alpha(\lambda)$: Absorption bei der Wellenlänge λ und
$\rho(\lambda)$: Reflexion bei der Wellenlänge λ.

Für Bauprodukte werden diese wellenlängenabhängigen Grössen üblicherweise zu integralen Werten für die solaren und lichttechnischen Eigenschaften zusammengefasst. Ist die (Licht-) Transmission τ_{vis} Null, spricht man von einer opaken Fläche, ist sie grösser als Null von einer transluzenten oder transparenten Fläche. Glas als Werkstoff bietet für kurzwellige solare Strahlung über den gesamten Wellenlängenbereich eine gute Transmission. Isolierverglasungen haben durch die eingesetzten, hoch spezialisierten Beschichtungen eine deutliche Selektivität hinsichtlich der Transmission und Absorption beziehungsweise Reflexion kurzwelliger solarer Strahlung. Selektivität bedeutet dabei, dass das beschichtete Glas selektiv nur kurzwellige Strahlung im Wellenlängenbereich des Lichts durchlässt

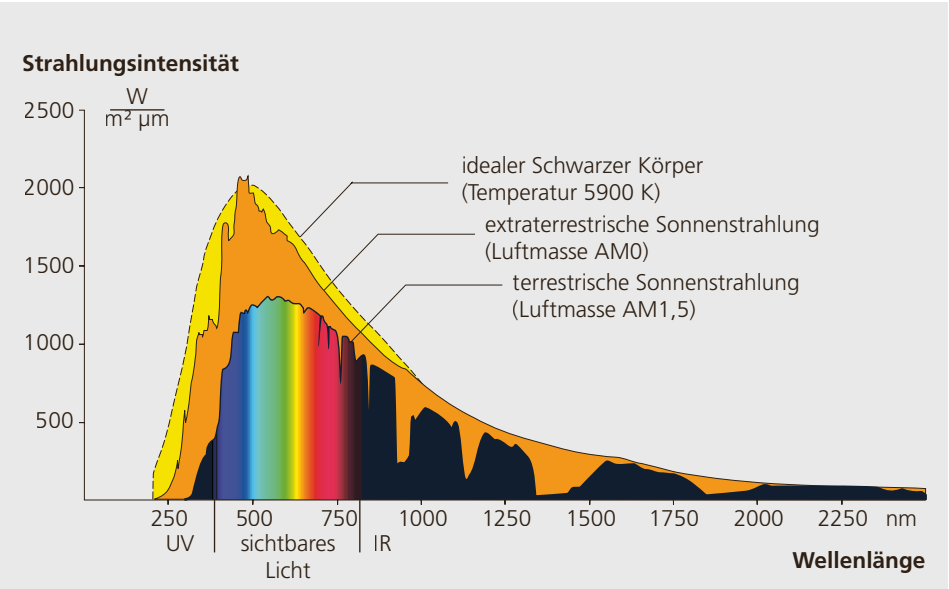


Abbildung 2.21: Solarspektrum mit Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes. (Quelle: Wikimedia)

und andere Wellenlängen überwiegend reflektiert oder absorbiert. Ist diese Selektivität gering, liegt ein einfaches Wärmeschutzglas vor – die Beschichtung ist ausschliesslich auf eine tiefe Emissivität optimiert. Ist die Selektivität ausgeprägt, spricht man von einem Sonnenschutzglas. Der Übergang zwischen diesen Glastypen ist fliessend und es gibt eine Vielzahl an Produkten auf dem Markt.

Das wesentliche Ziel der Selektivität ist es, viel Licht durchzulassen, also einen hohen Lichttransmissionsgrad zu ermöglichen und gleichzeitig einen möglichst geringen Durchgang solarer Strahlung beziehungsweise Energie in Kauf zu nehmen, also einen tiefen solaren Strahlungstransmissionsgrad beziehungsweise einen tiefen g-Wert. Abbildung 2.22 zeigt ein Beispiel der spektralen solaren Transmission einer wenig und einer stark selektiven Beschichtung. Derzeit liegt bei dieser Selektivität der Gläser τ_{vis}/g die technische Grenze sowohl für Zweifach- als auch für Dreifach-Isolierverglasungen bei einem Faktor von ca. 2. Die physikalische Grenze liegt bei einem Faktor von ca. 3.

Der g-Wert

Hersteller von Wärmeschutz- und Sonnenschutzverglasungen (allgemein: Isolierverglasungen) geben einen g-Wert zu jedem Glasprodukt an. Der angegebene g-Wert beruht auf der Norm SN EN 410 und ist

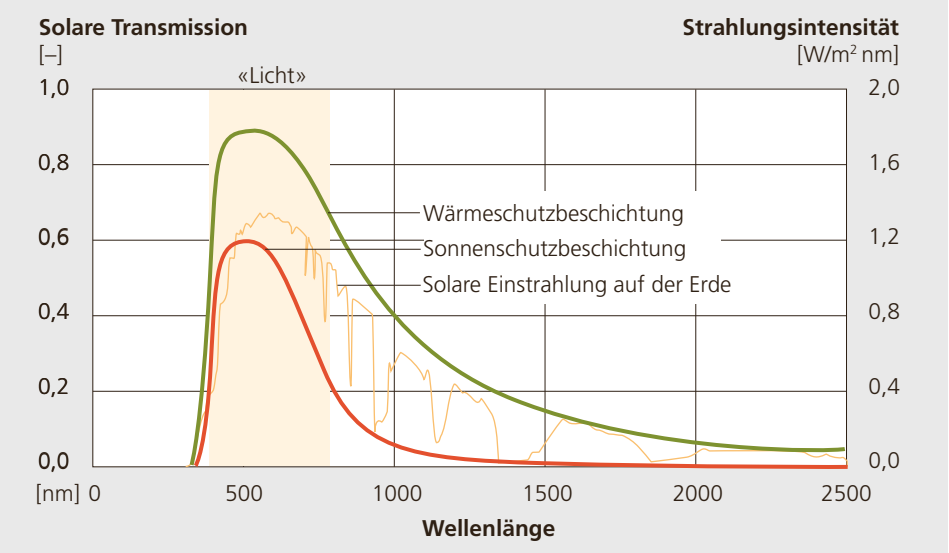


Abbildung 2.22: Selektivität. Beispiel der wellenlängenabhängigen solaren Transmission einer Wärmeschutzbeschichtung (Interpane Iplus S) sowie einer Sonnenschutzbeschichtung (Interpane 52/29), jeweils auf einem 6-mm-Flachglas.

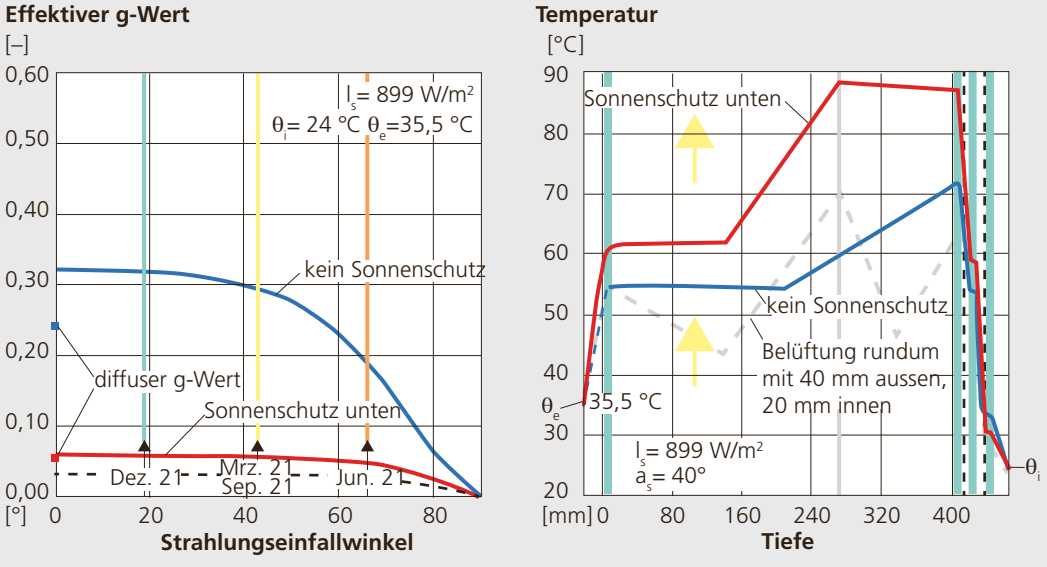


Abbildung 2.23: Effektiver g-Wert für direkte und diffuse Strahlung mit und ohne Lamellenstore in Abhängigkeit vom Profilwinkel (links) und Temperaturen in den Bauteilebenen für einen Sonnenhöhenwinkel von 40° (Maximalwerte, rechts).

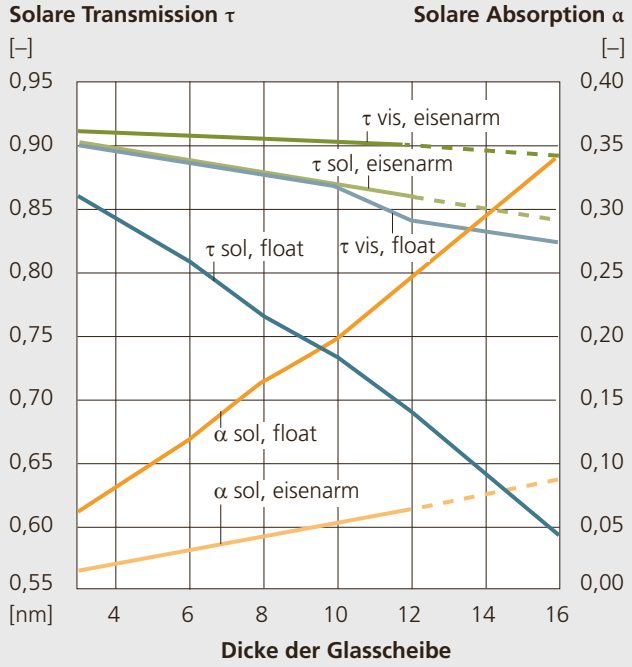
eine Kombination aus Mess- und Rechenwerten. Er bezieht sich auf direkte kurzwellige Strahlung, die normal zur Glasoberfläche auftrifft. Der g-Wert beruht auf Temperaturgleichheit beidseits der Verglasung. Der von Herstellern genannte g-Wert ist demnach eine reine Vergleichsgrösse für Produkte.

Es ist üblich, bei der Berücksichtigung von Temperaturdifferenzen und von Strahlungseinfallswinkeln, die von der normalen abweichen, von einem «effektiven g-Wert» zu sprechen. Mit zunehmendem Einfallswinkel relativ zur Flächennormale nimmt der effektive g-Wert für direkte Strahlung ab. Der diffuse g-Wert ist unabhängig vom Einfallswinkel der direkten Strahlung. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 2.23 beispielhaft für ein System, bestehend aus Isolierverglasung und aussen liegender Lamellenstore, wiedergegeben. Mit zunehmender Temperaturdifferenz zwischen aussen und innen nimmt der effektive g-Wert zu (zunehmende Transmissionswärmegewinne).

Als Grundlage der Herstellerangaben dient in der Regel ein Aufbau der Isolierverglasung von 4 – 16 – 4 bzw. 4 – 12 – 4 – 12 – 4. Dem angegebenen g-Wert liegt dabei meist normales Flachglas («float») zugrunde. Wird eisenarmes Glas eingesetzt, kann sich bei gleicher Beschichtung der g-Wert signifikant erhöhen. In Abbildung 2.24 ist exemplarisch die solare Transmission und Absorption sowie die Lichttransmission und Lichtabsorption in Abhängigkeit von der Glasstärke für Flachglas und für eisenarmes Glas wiedergegeben. Zu beachten ist, dass insbesondere Sonnenschutzbeschichtungen bei der Verwendung von eisenarmem Glas unerwünschte Farbeffekte zur Folge haben können. Hier helfen nur Muster, die bei Tageslicht – am besten mit einem Aufbau, der die spätere räumliche Situation näherungsweise nachbilden lässt – begutachtet werden.

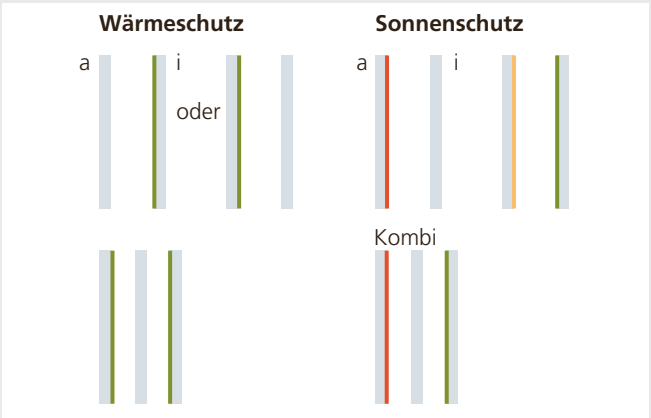
In der Planung ist entweder über die im Kasten Planungswerkzeuge genannten Angebote oder mit Daten aus einer konkreten Herstellerangabe mit dem tatsächlich vorgesehenen Aufbau der Verglasung zu arbeiten.

Abbildung 2.24: Solare Transmission und Absorption (τ_{sol}, α_{sol}) sowie Lichttransmission und Lichtabsorption (τ_{vis}, α_{vis}) in Abhängigkeit der Glasstärke. Gezeigt sind Werte für Flachglas («float») und eisenarmes Glas.



Wo ist die Beschichtung anzubringen?

Die Position der selektiven Beschichtungen in Isoliergläsern ist nicht frei wählbar. Bei Zweifach-Wärmeschutz-Isoliergläsern ist die Beschichtung in der Regel auf der raumseitigen Glasscheibe, kann aber auch auf der äusseren Glasscheibe sein. Eine zweite Beschichtung bringt praktisch keine Verbesserung des U-Wertes. Bei Dreifach-Wärmeschutz-Isoliergläsern ist in der Regel je Scheibenzwischenraum eine Beschichtung auf dem äusseren Glas vorhanden. Grundsätzlich kann eine Beschichtung auch auf der mittleren Scheibe angebracht sein, . dies ist aber meist teurer. Sowohl bei Zweifach- als auch bei Dreifach-Sonnenschutzgläsern muss die Sonnenschutzbeschichtung zwingend auf dem äusseren Glas aufgebracht sein! Ist die Sonnenschutzbeschichtung keine sogenannte Kombibeschichtung (Wärme- und Sonnenschutzwirkung), muss bei einem Zweifach-Isolierglas zusätzlich eine Wärmeschutzbeschichtung auf das innere Glas aufgebracht sein. Siehe Skizzen zur Verdeutlichung.



2.7 Vorhangfassaden

Gläser sind heute Hochleistungsprodukte. Sie erfüllen vielfältige Anforderungen, sorgen für Licht im Innenraum, für passive solare Wärmegewinne und für einen direkten visuellen Bezug zur Umgebung. Viele moderne Verwaltungsbauten, aber auch vereinzelte Wohnbauten werden mit Vorhangfassaden geplant und ausgeführt. Im Prinzip ist eine vollverglaste Vorhangfassade ein grosses Fenster. In Abbildung 2.25 und Abbildung 2.26 sind Gebäude mit Vorhangfassaden abgebildet – der Prime Tower entspricht der üblichen Erwartung, das Renaissancegebäude könnte auch eine Lochfassade sein.

Wärmeverluste

Wie Abbildung 2.25 und Abbildung 2.26 zeigen, ist die architektonische Gestaltung durch die Konstruktionsart Vorhangfassade kaum eingeschränkt. Eine Lochfensteroptik ist genauso realisierbar wie eine Fensterbänder-Optik. Der konstruktive Aufbau einer Fassade ist aus Ansichten nicht unbedingt ersichtlich. Der Aufbau kann jedoch hinsichtlich der thermischen Eigenschaften einer Fassade einen deutlichen Unterschied machen – Vorhangfassaden haben in den opaken Bereichen in der Regel einen gewissen Rahmenanteil. Dieser ist nötig, um die notwendige selbsttragende Eigenschaft der Vorhangfassade zu gewährleisten. Der Rahmenanteil führt jedoch aus thermischer Sicht zwangsweise zu Wärmebrücken, die in diesem Umfang bei Loch- oder Fensterbandfassaden nicht unbedingt vorkommen. Der gewöhnliche Ansatz für die U-Wert Berechnung «Wand plus Fenster plus Wärmebrückenzuschlag für Wandanker plus Wärmebrückenzuschlag Fensteranschlag» kann zu einem zu tiefen Gesamt-U-Wert und damit später im Planungs- oder Umsetzungsprozess zu grossen Problemen führen.

Mit der Faustformel $U_{cw} \approx 1{,}5 \cdot U_g$ kann für Vorhangfassaden eine erste Abschätzung erfolgen. Liegt der U-Wert aus einer Berechnung gemäss dem erwähnten gewöhnlichen Ansatz deutlich tiefer, ist Vorsicht geboten. Die Frage «Warum kann auch mit einem U-Wert der Fassade um 1 W/(m² K) der Grenzwert des Systemnachweises trotzdem noch erfüllt werden?» ist rasch erklärt. Zum einen ist bei grösseren Verwaltungsbauten die Gebäudehüllzahl sehr tief. Der Wärmeverlust durch die Hülle lässt sich auf eine grosse Energiebezugsfläche verteilen. Zudem sind die internen und solaren Wärmeeinträge oft verhältnismässig hoch. Ein häufiger Denkfehler bei derartigen Fassaden ist, dass mit einer Erhöhung der Dämmschichtstärke im Geschossdeckenbereich der U-Wert der



Abbildung 2.25: Prime Tower in Zürich mit einer vollverglasten Vorhangfassade.



Abbildung 2.26: Mobimo Tower in Zürich – Vorhangfassade mit Lochfassadenoptik.

Gesamtfassade nennenswert beeinflusst werden kann – das kann er in der Regel eher nicht! Das Optimierungspotenzial liegt im Bereich der Gläser, der Rahmen und dem System als Ganzem.

Wärmegewinne

Fenster und Vorhangfassaden mit grossen Glasanteilen sind hinsichtlich der Transmissionswärmeverluste zwar deutlich schlechter zu bewerten als eine opake Wand mit zeitgemässer Dämmstärke. Umgekehrt ermöglichen die Verglasungen den Eintrag von solarer Wärme in das Gebäude. In der Gesamtbilanz Wärmeverluste abzüglich Wärmegewinne schneiden diese Flächen gut ab. Diese Bilanz kann mit einem äquivalenten U-Wert erstellt werden. Wichtig ist, dass derartige äquivalente U-Werte ausschliesslich für den Vergleich von Fenstern beziehungsweise Fassaden als «Produkt» herangezogen werden und nicht in weiterführende Berechnungen wie beispielsweise einen Wärmeschutznachweis gemäss SIA 380/1 einfliessen.

U_{cw}-Wert

Es ist nach Norm SIA 380/1:2016 nicht zulässig, für Vorhangfassaden einen Einzelbauteilnachweis zu führen. Bei diesen Fassaden sind die Bauteile Fenster und Wand für eine thermische Berechnung untrennbar zusammengesetzt. Aus diesem Grund erfolgt die Berechnung des U_{cw}-Wertes von Vorhangfassaden im Rahmen des Systemnachweises mit der Norm SN EN ISO 12631 (cw steht dabei für curtain wall – Vorhangfassade). Für die typischen Konstruktionsdetails derartiger Fassaden – z. B. Rahmen/Dämmpaneel, Rahmen/Isolierverglasung etc. – sind lineare Verlustkoeffizienten gegeben, anhand derer ein einfacher Nachweis möglich ist. Eine detaillierte Berechnung mit einem zweidimensionalen Wärmebrückenprogramm erlaubt allerdings eine projektbezogene Optimierung und ist vorzuziehen.

Äquivalenter U-Wert für Fenster und Fassaden

$U_{eq,w} = U_w - S_f \cdot (1-F_f) \cdot g$

- U_w U-Wert des Fensters respektive der Fassade
- S_f Solarer Gewinnfaktor, abhängig von der Orientierung, z. B. Wärmeschutz Verordnung 1995: Nord S_f = 0,95; West/Ost S_f = 1,65; Süd S_f=2,4; dieser Faktor berücksichtigt individuelle Verschattungen nicht.
- F_f Rahmenanteil Fenster respektive Fassade (Verhältnis zwischen der Bauteilfläche, für die der U-Wert gilt zur sichtbaren Glasfläche)
- g g-Wert des Fensters respektive Fassade (dieser g-Wert sollte sich auf die gesamte der Solarstrahlung ausgesetzte Bauteilfläche beziehen, bei Fenstern auf die lichte Maueröffnung)

2.8 Sommerlicher Wärmeschutz

Es gibt zwei grundsätzliche Möglichkeiten, eine sommerliche Überhitzung von Räumen zu vermeiden. Wie in Tabelle 2.3 dargestellt, sind dies die Vermeidung von Wärmeeinträgen und das Abführen von Wärme – optional mit einem vorgängigen Zwischenspeichern der Wärme beispielsweise in Bauteilen.

Bei der Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes muss z. B. der Widerspruch zwischen der möglichst starken Reduktion des solaren Eintrages und der Notwendigkeit einer ausreichenden Tageslichtversorgung gelöst werden. Bei Wohngebäuden ist dies in der Regel kein Problem, bei Büro- und Gewerbebauten sowie Schulgebäuden ein sehr wichtiges.

Sonnenschutzvorrichtungen

Zentral für einen ausreichenden sommerlichen Wärmeschutz ist ein ausreichender Sonnenschutz für alle transparenten Bauteile. Ein idealer Sonnenschutz kann den g-Wert des Systems aus Verglasung und Sonnenschutz auf unter ca. 10 % bis 15 % reduzieren, ermöglicht dabei einen visuellen Bezug zur Umgebung und lässt ausreichend Tageslicht durch. In Tabelle 2.4 ist eine Übersicht über mögliche Ausbildungen gegeben. Bewegliche Vorrichtungen sind zu bevorzugen. Ein wichtiger Aspekt ist die Steuerung – der beste (bewegliche) Sonnenschutz bringt nichts, wenn er nicht korrekt bedient wird – und die Windfestigkeit.

	Grösse	Massnahme
Vermeiden	Fenster- bzw. Glasanteil der Fassade(n)	verringern
	g-Werte (Glas, opak)	verringern
	Interne Lasten	verringern
	U-Wert (transluzent und opak)	klima- und niveauabhängig, nicht unbedingt eindeutig
	Verschattung	erhöhen
	Sonnenschutz	verbessern
Abführen	Lüften	abhängig von der Aussentemperatur erhöhen oder verringern
	Speichern und Nachtlüftung	Speichermöglichkeit vergrössern, Nachtlüftung ermöglichen
	TABS und andere aktive Systeme	im Konzept vorsehen
	U-Wert (transluzent und opak)	klima- und niveauabhängig, nicht unbedingt eindeutig

Tabelle 2.3: Möglichkeiten zur Vermeidung und zum Abführen von Wärmelasten in Gebäuden.

Typ	Varianten	innen	intra	aussen
Bewegliche Behänge	Stoff; reflektierend, lichtdurchlässig	x	x	x
	Normale Lamellen, Lichtlenksysteme (z. B. zweigeteilte Behänge, spezielle Lamellenformen), vertikal, horizontal	x	x	x
Feststehende Verschattungen	Überhänge, Auskragungen	-	-	x
	Seitliche Lisenen	-	-	x
	Brise soleil	-	-	x
Sonnenschutzglas	Normal	-	(x)	-
	Thermo- oder elektrochrom	-	(x)	-
	Aktuelle Entwicklungen umfassen integrierte Lichtlenkung, PCM, neue Verdunklungsmöglichkeiten etc.	-	(x)	-

Tabelle 2.4: Sonnenschutzvorrichtungen und ihre Anordnungsmöglichkeit.

Wärmespeicherfähigkeit
Eine hohe Wärmespeicherfähigkeit eines Raumes hilft, Temperaturspitzen zu vermeiden. Es kann – dies ist insbesondere im Bereich gewerblicher Bauten interessant – eine zeitliche Verschiebung zwischen dem Eintrag und der Abführung der Lasten erreicht werden. Die Wärmespeicherfähigkeit wird in Zusammenhang mit dem sommerlichen Wärmeschutz für eine 24-h-Periode berechnet. Es ist darauf zu achten, ob die Berechnung mit oder ohne Berücksichtigung der Wärmeübergangswiderstände an den Bauteiloberflächen erfolgen muss – beide Ansätze werden in unterschiedlichen Verfahren verwendet.

Lüftung
Über die Lüftung kann einem Raum Wärme zugeführt oder aus diesem abgeführt werden. Sowohl der Wärmeübergang an die Luft als auch die Wärmespeicherfähigkeit der Luft ist jedoch relativ gering. Entsprechend gross muss der Luftvolumenstrom sein, wenn grössere Wärmemengen abgeführt werden sollen. Das Kühlpotenzial kann abgeschätzt werden über:

$q_L = \rho\, c_p\, \Delta T$
beziehungsweise
$Q_L = \dot{V}\, q_L$
mit
q_L spezifisches Kühlpotenzial durch Lüftung in Wh/m³
ρ Dichte der Luft in kg/m³
$\rho_N \approx 1{,}189$ kg/m³ (trocken, 23 °C, 1013,25 hPa)
c_p spezifische Wärme der Luft in Wh/(kg K)
$c_{p,N} \approx 0{,}279$ Wh/(kg K) kann als Zahlenwert verwendet werden.
ΔT nutzbare Temperaturdifferenz
Q_L Kühlpotential durch Lüftung in W
$\dot{V}$ Luftvolumenstrom der Lüftung in m³/h

Eine intensive Nachtlüftung über Fenster ist ein gängiges Konzept, mit dem der sommerliche Wärmeschutz häufig entscheidend verbessert werden kann. Grundvoraussetzungen sind dabei, dass:
- die Umgebungsluft kühler als die Raumluft beziehungsweise als die Raumumschliessungsflächen ist.
- ein hinreichend grosser Luftvolumenstrom vorliegt.
- der Raum eine ausreichende Wärmespeicherfähigkeit aufweist.

Beispiel: Einem Raum mit den Abmessungen (B x T x H) 6,0 m x 6,0 m x 3,5 m = 126 m³ kann in Abhängigkeit vom Luftwechsel und der Temperaturdifferenz zwischen den raumseitigen Oberflächen und der Aussenluft Wärme entsprechend Abbildung 2.28, unten, entzogen werden. Am Standort Basel-Binningen muss bei einer 50 % verglasten Südfassade des Raumes (A_g = 10,5 m²) mit einem g-Wert von 0,10 bei einem Luftwechsel von n = 2 h⁻¹ entsprechend Abbildung 2.28, oben, rund 5½ Stunden mit einer mittleren Temperaturdifferenz von 6 K gelüftet werden, um die tagsüber via Solarstrahlung zugeführte Wärmemenge wieder aus dem Raum abzuführen.
Problematisch bleiben längere, sehr warme Perioden ohne nennenswerte Abkühlung in der Nacht. Insbesondere für städtische Gebiete wird dies – auch infolge des sogenannten Hitzeinseleffekts in Ballungsgebieten – zunehmend zu einem Problem. Für eine effektive Nachtauskühlung sind Luftwechsel von mindestens 2 h⁻¹ bis 3 h⁻¹ anzustreben. Als Anhaltspunkt für die hierfür notwendige wirksame Querschnittsfläche der Öffnungen können ca. 5 % der Bodenfläche bei einseitiger Lüftung (Abbildung 2.27) und je 1 % bis 2 % der Bodenfläche bei Querlüftung angesetzt werden.

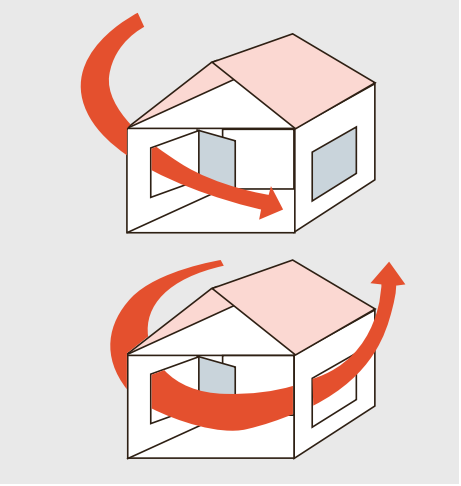


Abbildung 2.27: Einseitige Lüftung (oben) und Querlüftung unten). (Quelle: Fenster Keller AG)

Der für eine effektive Nachtauskühlung nötige Luftwechsel liegt deutlich über dem hygienisch notwendigen Luftwechsel. Aus diesem Grund eignen sich mechanische Lüftungsanlagen hierfür in aller Regel nicht. Eine entsprechende Anlage muss für die Nachtauskühlung dimensioniert werden und ist damit für den Normalbetrieb überdimensioniert und weder wirtschaftlich noch energetisch sinnvoll.

Abbildung 2.28 zeigt das Kühlpotenzial durch die Lüftung. Wenn die Temperaturdifferenz zwischen der Aussenlufttemperatur und der mittleren Oberflächentemperatur der Raumumschliessungsflächen bei $\Delta T = 6$ K liegt und ein Luftwechsel von $n = 2\ h^{-1}$ erreicht werden kann, dann wird eine Kühlleistung von rund 500 W erreicht. Bei dem Standort Basel-Binningen ist tagsüber im Mai bei einem g-Wert von 0,1 durch 10,5 m² Glasfläche mit einer Wärmezufuhr von 2518 x 10,5 x 0,1 ≈ 2644 Wh/(m² d) zu rechnen. Das heisst z. B. eine Nachtauskühlung muss in der Form rund 5,5 h aufrechterhalten werden, um dieselbe Menge an Wärme abführen zu können, wie durch Solarstrahlung zugeführt wurde.

Anforderungen und Nachweis

Massgeblich für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes sind in der Schweiz zunächst die kantonalen Anforderungen (Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich, Art. 1.7 und 1.8): «Der sommerliche Wärmeschutz von Gebäuden ist nachzuweisen». Konkretisierungen des Nachweises sind in SIA 180:2014 enthalten.

Es sind, entsprechend der Komplexität des Objektes, drei Verfahren für den Nachweis möglich. Verfahren 1 ist sehr einfach, aber nur für gewisse Fälle anwendbar. Verfahren 3, die Simulation, ist allgemeingültig, jedoch aufwendig. Verfahren 2 liegt hinsichtlich Aufwand und Anwendbarkeit dazwischen.

Einfache Kriterien (Verfahren 1)

Der Nachweis gilt als erfüllt, wenn für alle Räume die allgemeinen Kriterien nach Norm SIA 180:2014 erfüllt sind:

- Transparente oder lichtdurchlässige Dachfenster mit äusserem Sonnenschutz haben eine Fläche von weniger als 5 % der Nettobodenfläche des betrachteten Raumes.
- Der Wärmedurchgangskoeffizient des Daches beträgt maximal 0,20 W/(m² K).

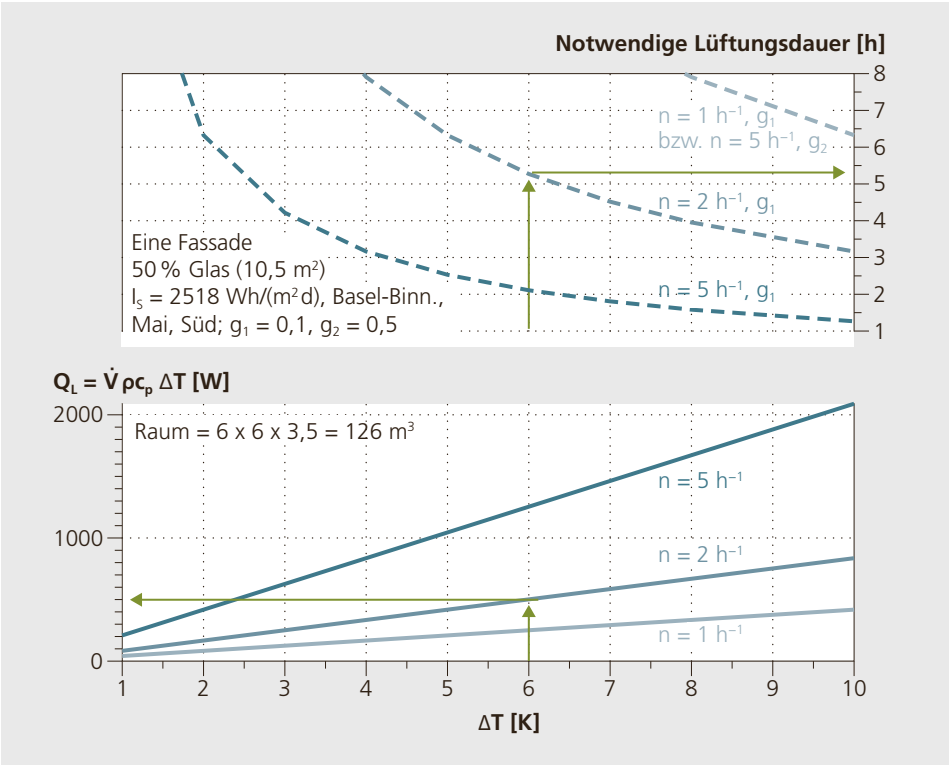


Abbildung 2.28: Kühlpotenzial durch Lüftung.

- Bei allen Fenstern ist ein aussenliegender beweglicher Sonnenschutz mit Windwiderstandsklasse 6 gemäss SIA 342, Anhang B.1.1, vorhanden. Der Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} des Fensters (Verglasung und Sonnenschutz) beträgt maximal 0,10.
- Eine Nachtauskühlung mit einem Luftvolumenstrom von mindestens 10 $m^3/(h\,m^2)$ ist gewährleistet (dies entspricht bei üblichen Raumhöhen in Wohngebäuden einem Luftwechsel von $n \geq 3\ h^{-1}$.
- Die Raumtiefe ist bei jedem Fenster mindestens 3,5 m. Gegenüberliegende Fenster müssen einen Abstand von mindestens 7 m aufweisen.
- Eine mittlere bis hohe thermische Trägheit vorhanden ist und die maximalen Glasanteile gemäss Tabelle 2.5 nicht überschritten werden. Für Orientierungen zwischen Südsüdost und Südsüdwest kann der in Tabelle 2.5 genannte maximale Glasanteil mit 1,2 multipliziert werden, wenn das Fenster durch ein Vordach oder einen Balkon beschattet wird, deren Auskragung mindestens der halben Fensterhöhe entspricht.

Vereinfachter Nachweis (Verfahren 2)

Im Verfahren 2 ist insbesondere der Sonnenschutz detaillierter zu betrachten. Der zu erreichende g-Wert ist in Abhängigkeit von der Orientierung und dem Glasanteil festgelegt (der auf die Ansichtsfläche der Fassade bezogenen lichten Glasfläche). Abbildung 2.29 zeigt die zu erreichenden Werte. Die Werte sind mit aktiviertem Sonnenschutz nachzuweisen.

Tabelle 2.5: Auf die Nutzung und die Situation bezogene Kriterien für das Nachweisverfahren 1: Maximale Glasanteile für einen einfachen Nachweis der Behaglichkeit in der warmen Jahreszeit.

Raumkategorie	Fenster auf	Maximaler Glasanteil für Sonnenschutz mit Bedienung	
		manuell	automatisch
Wohnen hohe thermische Trägheit	einer Fassade	50 %	70 %
	mehreren Fassaden	30 %	50 %
Wohnen mittlere thermische Trägheit	einer Fassade	40 %	60 %
	mehreren Fassaden	30 %	50 %
Büro, Versammlungsraum, Schule, hohe thermische Trägheit	einer Fassade	—	40 %
	mehreren Fassaden	—	30 %

Konstruktionen mit hoher thermischer Trägheit

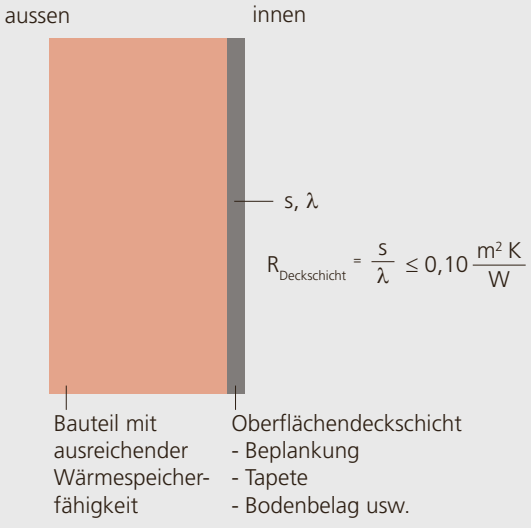
- Decken in Beton oder Wände in Beton, Backstein oder Kalksandstein mit direktem Raumluftkontakt; die so materialisierten Bauteile sollten mindestens 80 % der Bodenfläche entsprechen.

Konstruktionen mit mittlerer thermischer Trägheit

- Zementestrich von mindestens 6 cm Dicke oder Calciumsulfat-Estrich von mindestens 5 cm Dicke auf 80 % der Bodenfläche, belegt mit Platten oder einem Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit.
- Massivholzkonstruktion (Wände, Böden, Decken) mit mindestens 10 cm Dicke.
- Folgende Konstruktionen haben eine niedrige thermische Trägheit (was die Anwendung des Verfahrens 1 ausschliesst):
- Leichtbauweise in Holz oder Metall, ohne schwere Schichten.

Der Wärmedurchlasswiderstand R von raumseitigen Oberflächen-Deckschichten darf maximal 0,10 m^2 K/W betragen.

Wärmedurchlass von Deckschichten an Raumoberflächen



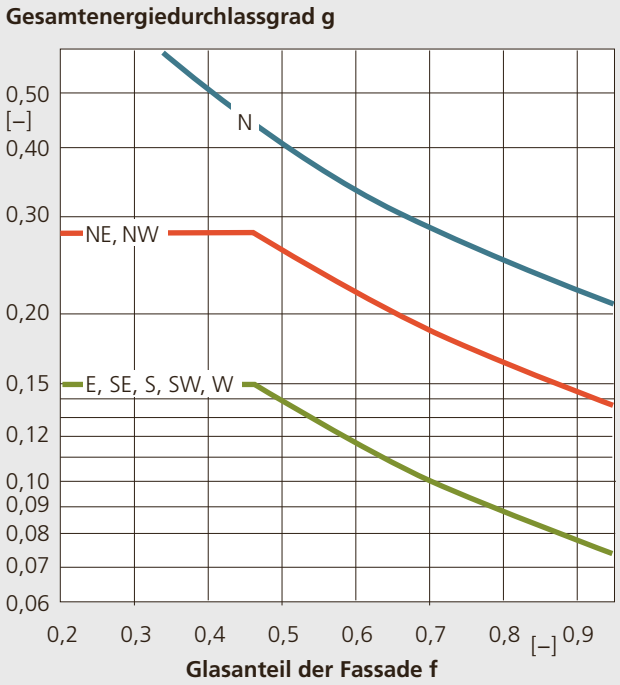


Abbildung 2.29: Anforderungen an den g-Wert von Fassadenfenstern (Verglasung und Sonnenschutz) je nach Glasanteil und Orientierung der Fassade. (Quelle: Norm SIA 180)

Nachtauskühlung

Die Nachtauskühlung ist im Sinne der Norm SIA 180:2014 für Verfahren 1 und Verfahren 2 dann möglich, wenn folgende Bedingungen gegeben sind:

- Eine effiziente Nachtauskühlung der Gebäudemasse durch Lüftung braucht raumvolumenspezifische Luftströme (Luftwechsel) im Bereich von mindestens 3 h^{-1} beziehungsweise 9 m^3 pro Stunde und pro m^2 Nettogeschossfläche. Liegt der Glasanteil der Fassaden des betreffenden Raumes über 30 %, erhöhen sich diese Werte auf 4 h^{-1} beziehungsweise 12 m^3 pro Stunde und pro m^2 Nettogeschossfläche.
- An geeigneten Stellen sind grosse Lüftungsöffnungen vorzusehen, die nachts offen bleiben können und die auch bei Windstille zu einer für die Auskühlung des Raumes ausreichenden Belüftung führen. Dafür eignen sich Fenster und Dachöffnungen.
- Eine Abluftöffnung ist an höchstmöglicher Stelle im Raum zu platzieren, um alle warme Luft abzuführen.
- Die wirksame Querschnittsfläche der Öffnungen muss bei einseitiger Lüftung mindestens 5 % der Nettobodenfläche betragen. Bis zu einer Raumtiefe von 3,5 m ist die Belüftung der Räume über eine Fassade möglich, darüber hinaus sind Öffnungen an zwei gegenüberliegenden Fassaden vorzusehen.

2.9 Tageslichtversorgung

Die Versorgung von Innenräumen mit Tageslicht ist ein stets aktuelles Thema. Insbesondere an Lern- und Arbeitsplätzen bestehen nebeneinander die Anforderung, einen visuellen Aussenbezug zu gewährleisten, ausreichend Tageslicht zur Verfügung zu stellen und Bildschirmarbeit zu ermöglichen. In Planungen ist der Tageslichtquotient zur Beurteilung der Tageslichtsituation nach wie vor anzutreffen. Der Tageslichtquotient TQ (daylight factor, DF) ist jedoch im Sinne einer zeitgemässen Planung der Tageslichtversorgung als obsolet zu betrachten. Er ist ein stationärer Wert, der eine ganz bestimmte Situation beschreibt, die nur selten vorkommt. Er kann zwar erste Hinweise auf die Tageslichtsituation geben, genügt aber nicht, um im Spannungsfeld zwischen Tageslicht, solaren Wärmegewinnen und der Vermeidung von Blendung eine Fassade optimieren zu können (Abbildung 2.30). Die Optimierung der Lichtversorgung eines Innenraumes muss jedoch – insbesondere für Fertigungs-, Lern- und Arbeitsplätze – zwischen diesen Polen erfolgen. Aus diesem Grund wird zur Planung der Tageslichtversorgung heute die sogenannte «klimabasierte Tageslichtplanung» verwendet. Das Schema in Abbildung 2.31 verdeutlicht die Erweiterung auf natürliche Beleuchtungssituationen gegenüber der künstlich-statischen Annahme eines uniformen Himmels mit 10 000 Lux.

Tageslicht und Wärmeeintrag

Die Versorgung eines Raumes mit Tageslicht – kurzwelliger Strahlung im Wellenlängenbereich 380 nm bis 780 nm – verursacht naturgemäss auch einen Wärmeeintrag. Die Effektivität des Tageslichtes kann analog zur Lichtausbeute von Leuchtmitteln beziehungsweise von Leuchten in lm/W ausgedrückt werden. Die Lichtausbeute hängt von den strahlungsphysikalischen Eigenschaften der Verglasung, insbesondere von der Selektivität der Beschichtung, ab. Sie ist für Wärmeschutzverglasungen geringfügig und für Sonnenschutzverglasungen deutlich höher als bei den besten bisher verfügbaren Leuchten. Diese Situation kann sich voraussichtlich in den nächsten Jahren durch weitere Entwicklungen bei LED (und wahrscheinlich auch bei OLED) ändern – mit der Folge,

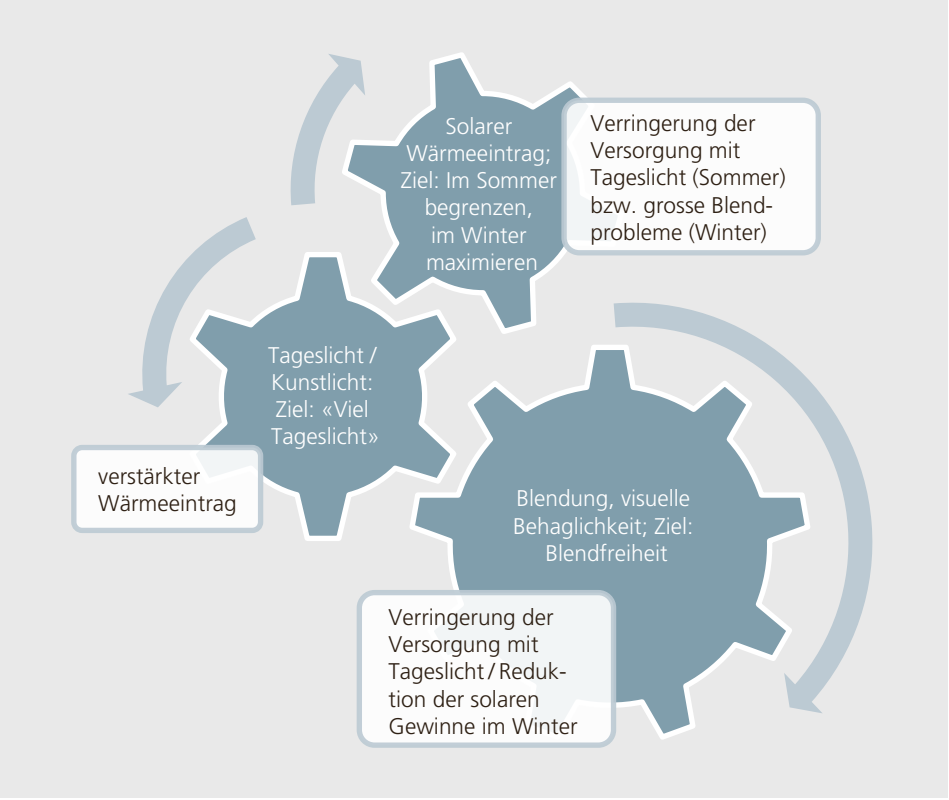


Abbildung 2.30: Spannungsdreieck zwischen den Zielen optimale Tageslichtversorgung, Blendfreiheit und Wärmeeinträge – die Wärmeeinträge sind zudem im Winter zu maximieren und im Sommer zu minimieren.

dass sich zumindest aus energetischer Sicht die Diskussion um das Tageslicht verändern wird. In Tabelle 2.6 und Tabelle 2.7 sind Anhaltswerte für die Lichtausbeute von natürlichen und künstlichen Lichtquellen aufgelistet.

Klimabasierte Tageslichtplanung

Im Rahmen der «klimabasierten Tageslichtplanung» (Climate-based daylight modelling, CBDM) werden detaillierte, klimadatenbasierte Simulationen (beispielsweise mit Daysim [2]) durchgeführt. Diese sind vom Ansatz her mit thermischen Gebäudesimulationen für die detaillierte Untersuchung und Optimierung des thermischen Verhaltens von Gebäuden vergleichbar. Es gehen sowohl der Standort, Nutzungszeiten, Verschattungen und Sonnenschutzvorrichtungen sowie auch die Regelstrategie und das Nutzerverhalten in die Analyse ein. Wechselwirkungen zwischen der Tageslichtversorgung, Blendungen, dem Beleuchtungsstrombedarf sowie dem solaren Wärmeeintrag können für verschiedene Planungsvarianten ganzheitlich beurteilt werden. Derartige detaillierte Analysen sind aufgrund des Aufwandes kaum für Ein- und Mehrfamilienhäuser geeignet, wohl aber für Schul- und Bürogebäude. Durch die weitere Digitalisierung in allen Planungsphasen ist jedoch damit zu rechnen, dass CBDM zum Standard wird.

Metriken

Mit Ausnahme des UGR-Wertes (Grad der Direktblendung: Unified Glare Rating) beruhen die folgend genannten Metriken – also Masszahl-Systeme – auf klimabasierten Simulationen in Zeitschritten von in der Regel höchstens einer Stunde. Die Metriken dienen dazu, die erzeugte Datenmenge auf sinnvolle Art und Weise so zu reduzieren, dass die Ergebnisse einer Interpretation zugänglich werden. Der UGR-Wert wird nur der Vollständigkeit halber aufgeführt.

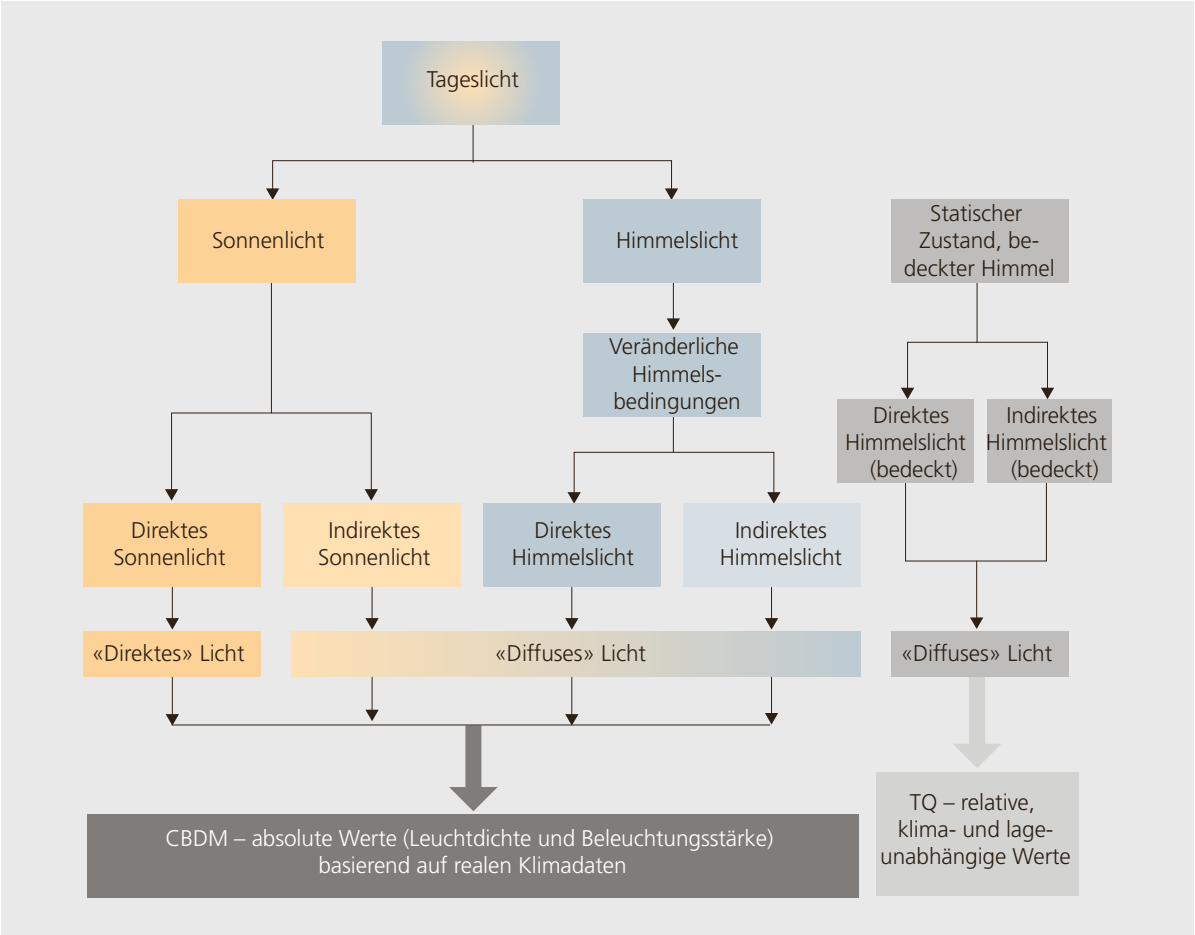


Abbildung 2.31: Berücksichtigte Lichtquellen bei der klimabasierten Tageslichtplanung (CBDM) im Vergleich zum (obsoleten) statischen Wert «Tageslichtquotient» (daylight factor, DF). (Quelle: [1])

Die Tageslichtautonomie (TA) (Daylight Autonomy, DA) ist der Anteil Nutzungsstunden, für den über Tageslicht eine definierte Beleuchtungsstärke erreicht beziehungsweise überschritten wird. Die Angabe erfolgt in Prozent. Der Visualisierung dient eine skalierte Farbdarstellung auf einem Grundriss des betrachteten Raumes.

Vereinfachte Tageslichtautonomie ($TA_{387/4}$): Auf der Grundlage der Norm SIA 387/4:2017 kann der Kehrwert der Volllaststunden der Beleuchtung für eine vereinfachte Abschätzung der Tageslichtautonomie herangezogen werden – das Planungsziel ist es, die Volllaststunden der Beleuchtung zu minimieren. Dies ist gleichbedeutend mit einer Erhöhung der Tageslichtautonomie.

$$TA_{387/4} = 100 \cdot (1 - t_{Li,Nz}/Nz)$$

Nz Nutzungszeit gemäss SIA 387/4 in Stunden pro Tag (Standardwert 11 Stunden)

$t_{Li,Nz}$ Volllaststunden pro Tag für eine Nutzungszeit Nz gemäss SIA 387/4

Nützliche Beleuchtungsstärke (UDI): Die nützliche Beleuchtungsstärke durch Tageslicht (Useful Daylight Illuminance, UDI) beschreibt den Prozentsatz der Nutzungsstunden im Jahr, die mit Tageslicht eine gegebene Beleuchtungsstärke erreichen. Übliche Wertebereiche sind z. B. $UDI_{>2000\,Lux}$ (zu hell), $UDI_{500\text{-}2000\,Lux}$ (Autonomie), $UDI_{100\text{-}500\,Lux}$ (unterstützend) und $UDI_{<100\,Lux}$ (kein Tageslicht). Die Werte lassen sich als entsprechend skalierte Farbdarstellung auf einem Grundriss des betrachteten Raumes wiedergeben. Die Kombination aus Tageslichtautonomie und UDI kann zusätzlich Bereiche aufzeigen, die zwar autonom aber zu hell sind – ein Hinweis darauf, dass der Sonnenschutz häufiger nötig sein wird, als dies im aktuellen Planungsstand vorgesehen ist [3].

Quelle	Lichtausbeute (lm/W)
Direktes Sonnenlicht	70 – 95
Klarer blauer Himmel, diffuser Anteil	130
Bedeckter Himmel, diffuser Anteil	110
Tageslicht global (direkt und diffus)	105
Glühbirne	15
Leuchtstoff-Leuchten	57 – 72
T5-Leuchtstoff-Röhren	70 – 100
LED	100 – 190*
*Stand 2019 für diverse Prototypen – einzelne LED, noch keine fertigen Leuchtmittel respektive Leuchten; Lichttemperatur unterschiedlich, Quelle: Netzrecherche 2019.	

Tabelle 2.6: Richtwerte für die Lichtausbeute natürlicher und künstlicher Lichtquellen. (Quelle (ausser LED): [1])

Quelle	Glastyp*	Lichtausbeute (lm/W)
Direktes Sonnenlicht	Wärmeschutz	100 – 130
	Sonnenschutz	115 – 160
Klarer blauer Himmel, diffuser Anteil	Wärmeschutz	180
	Sonnenschutz	217
Bedeckter Himmel, diffuser Anteil	Wärmeschutz	150
	Sonnenschutz	180
Tageslicht global (direkt und diffus)	Wärmeschutz	145
	Sonnenschutz	176
*Wärmeschutzglas Interpane IPlusE, Sonnenschutzglas Interpane 52/29; jeweils 6-16-6. ** Der positive Effekt der selektiven Gläser ist darauf zurückzuführen, dass die entsprechenden Beschichtungen genau zu dem Zweck entwickelt sind, möglichst viel Licht und möglichst wenig Wärme durchzulassen, siehe auch die Abschnitte «Solarstrahlung» und «g-Wert» sowie Abbildung 2.22		

*Tabelle 2.7: Richtwerte für die Lichtausbeute natürlicher Lichtquellen aus Tabelle 2.6 mit selektiven Eigenschaften von modernen Gläsern korrigiert**.*

Die Blendwahrscheinlichkeit (DGP, Daylight Glare Probability) gibt den Prozentsatz der Nutzer an, die sich an der ausgewerteten Stelle mit der betrachteten Blickrichtung in einem Raum geblendet fühlen werden. Der Definitionsbereich liegt zwischen 20 % und 80 %, wobei Werte unter ca. 32 % bis 35 % als «nicht wahrnehmbare Blendung», Werte bis ca. 40 % als «wahrnehmbar», Werte bis ca. 45 % als «störend» und Werte darüber als «nicht tolerierbar» einzustufen sind [4].

Direktblendungsgrad (UGR): Der Grad der Direktblendung (Unified Glare Rating) ist für Leuchten definiert und auf Quellen mit einem Raumwinkel zwischen $3 \cdot 10^{-4}$ bis $1 \cdot 10^{-1}$ sr beschränkt (sr steht für Steradiant). Der UGR-Wert hat keine Einheit. Der Direktblendungsgrad wird in der Norm SIA 387/4:2017 für die Planung der Beleuchtung verwendet. Die empfohlenen UGR-Grenzwerte bilden eine Reihe, deren Stufen eine merkliche Änderung der Blendung darstellen: 10, 13, 16, 19, 22, 25 und 28. Arbeitsplätze sollen einen UGR-Wert von 19 bis 22 nicht überschreiten (SN EN 12464-1).

2.10 Quellen

[1] J. Mardaljevic, L. Heschong, E. Lee: Daylight metrics and energy savings; Lighting Res. Technol. 2009; 41: 261–283

[2] Reinhart CF.: Daysim; version 4.0, http://daysim.ning.com (Stand Juli 2019)

[3] C. F. Reinhart, J. Wienold: The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylit spaces; Building and Environment 46 (2011), 386 – 396

[4] Wienold, J. (2009): Dynamic daylight glare evaluation; Building Simulation 2009, Glasgow (UK), 944 – 951

Kapitel 3

Hochgedämmte Gebäudehüllen

Marco Ragonesi

3.1 Verständigung

Es gibt keine klare Definition, was unter einer «hochgedämmten Gebäudehülle» zu verstehen ist. Mit Sicherheit verlangen Standards wie Minergie-P oder der in Deutschland sehr verbreitete Passivhaus-Standard nach einer hochgedämmten Gebäudehülle. Wenn der Energiebedarf für die Heizung mit erneuerbarer Energie (z. B. Holz) respektive effizienter Haustechnik (Wärmepumpe mit hoher JAZ) abgedeckt wird, weisen auch Gebäudehüllen nach MuKEn 2014 (diese Primäranforderungen gelten auch für Minergie- und Minergie-A-Bauten) bereits eine Qualität auf, die als hochgedämmt gelten kann. Oder einfacher formuliert: Die geltende Energiegesetzgebung lässt keine anderen Gebäudehüllen mehr zu als hochgedämmte.

Eine weitergehende «Ausreizung» der thermischen Gebäudehülle, hin zu Minergie-P, bedingt eine Reduktion des Heizwärmebedarfs nach MuKEn 2014 um 30 %; dies ist aus ökologischen (graue Energie, Treibhauseffekt) und ökonomischen Überlegungen nicht immer sinnvoll.

3.2 Konzeptionelle Überlegungen

Ziel einer hochgedämmten Gebäudehülle ist, den rechnerisch ermittelten Heizwärmebedarf möglichst klein zu halten, dies beeinflusst durch:

- Möglichst kleine Transmissionswärmeverluste mit hochgedämmten Bauteilen (tiefe U-Werte) und geringen Wärmebrückenverlusten.
- Hohe passivsolare Gewinne durch unverschattete Fenster mit hohem Glasanteil, idealerweise gegen Süden orientiert und mit optimiertem g-Wert (neben der Heizperiode ist auch die sommerliche Überhitzungsgefahr zu beachten).

Thermische Gebäudehülle A_{th}

Für die rechnerische Optimierung der Energiebilanz nach Norm SIA 380/1 beziehungsweise den Nachweis des ausreichenden Wärmeschutzes wird in der Regel die thermische Gebäudehülle A_{th} so gewählt, dass auch nicht beheizte Räume innerhalb von A_{th} zu liegen kommen. Der so ermittelte Heizwärmebedarf widerspiegelt aber nicht den effektiven Heizwärmebedarf mit

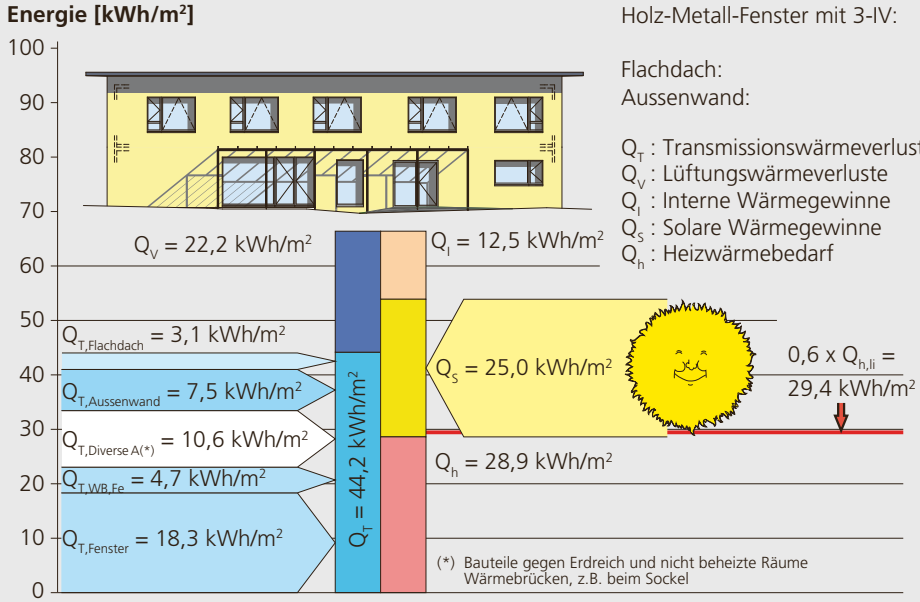


Abbildung 3.1: Energiebilanz einer hochgedämmten Gebäudehülle. Die Fenster verursachen, zusammen mit den Wärmebrücken beim Einbau, über 50 % der Transmissionswärmeverluste. Der nutzbare Anteil der Energiegewinnne durch Sonneneinstrahlung ist aber noch deutlich grösser als die gesamten Verluste beim Fenster. WB: Wärmebrücken

Blick auf die aktiv beheizten Räume (Abbildung 3.2).

Diese «Optimierung» über die Festlegung der thermischen Gebäudehülle z. B. unter Einbezug der unbeheizten Untergeschossräume (Keller-/Technikräume) ist nur dann sinnvoll, wenn:

- Der Wärmeschutz zwischen aktiv beheizten und unbeheizten Räumen vernünftig gewählt wird, z. B. Decke über unbeheizten Räumen mit U-Wert ≤ 0,20 W/(m² K).
- Bei unbeheizten Räumen die Aussenwände gegen Erdreich nicht erheblich dicker wärmegedämmt werden müssen, als

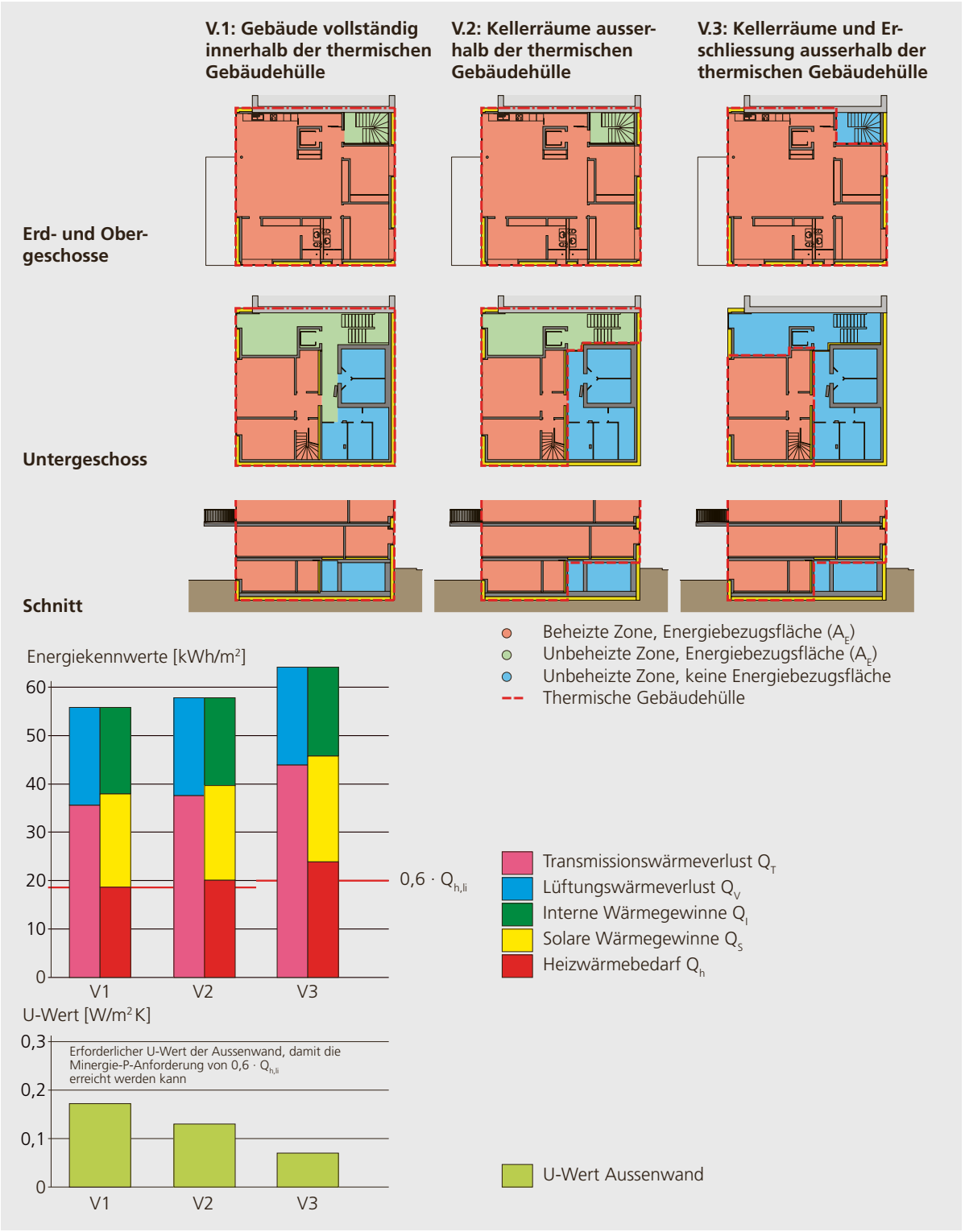


Abbildung 3.2: Die Wahl der thermischen Gebäudehülle beziehungsweise die Abgrenzung im und gegen das unbeheizte Untergeschoss ist wesentlich für den rechnerischen Nachweis des Heizwärmebedarfs. Eine thermische Gebäudehülle, die nur die aktiv beheizten Räume umfasst (vgl. V.3) hätte bei diesem Beispiel nie zum Ziel «Minergie-P» geführt, die Aussenwand hätte hierfür einen unrealistischen U-Wert von 0,07 W/(m² K) aufweisen müssen. Optimal zeigt sich bei diesem Objekt die Variante V.1, bei der sich sämtliche Räume innerhalb der thermischen Gebäudehülle befinden. Bereits mit einem U-Wert der Aussenwand von 0,172 W/(m² K) konnte der für Minergie-P erforderliche Heizwärmebedarf erreicht werden. Im Betrieb weisen natürlich alle drei Varianten denselben Heizwärmeverbrauch auf!

es für den baulichen Wärme- und Feuchteschutz ausreichend ist (z. B. etwa 10 cm dicke Perimeterdämmung).

- Die Bodenplatte über Erdreich bei unbeheizten Räumen nicht wärmegedämmt werden muss, obwohl sie Teil der thermischen Gebäudehülle ist.

Für eine effektive Optimierung der hochgedämmten Gebäudehülle, die sich dann auch beim Betrieb über viele Nutzungsjahre auszahlt, betrachtet man am besten nur die thermische Gebäudehülle A_{th}, die aktiv beheizte Räume gegen Aussenklima, Erdreich und unbeheizte Räume abgrenzt und berücksichtigt dabei in etwa folgende U-Werte:

- Aussenwände gegen Aussenklima mit $U \leq 0{,}17$ W/(m² K) und gegen unbeheizte Räume mit $U \leq 0{,}20$ W/(m² K)
- Dächer mit $U \leq 0{,}15$ W/(m² K)
- Böden gegen Aussenklima mit $U \leq 0{,}17$ W/(m² K) und gegen unbeheizte Räume mit $U \leq 0{,}20$ W/(m² K)
- Bauteile gegen Erdreich mit $U \cdot b$ (Erdreicheinfluss auf Wärmefluss) $\leq 0{,}17$ W/(m² K)
- Fenster mit $U_w \leq 1{,}0$ W/(m² K)

Passivsolare Gewinne maximieren

Weil bei hochgedämmten Bauten mit U-Werten wie vorgeschlagen eine weitere Verminderung der Transmissionswärmeverluste kaum sinnvoll ist, führt eine weitere energetische Optimierung der Bauten über maximal hohe passivsolare Gewinne:

- Gebäude gegen Süden ausrichten, mit tolerierbaren Abweichungen gegen Südwest oder Südost.
- Grosse Fensterflächen gegen Süden und kleine Fensterflächen gegen Norden orientieren. Fenster mit kleinem Rahmen- und hohem Glasanteil und Verglasungen mit maximal hohem Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Werte im Bereich von 50 % bis 60 % möglich) evaluieren.
- Möglichst keine fixe Verschattung bei südorientierten Fensterflächen, Balkone vor opake Bauteile stellen (Abbildung 3.3).
- Variable Verschattung (Sonnenschutz) während der Heizperiode möglichst nicht einsetzen.
- Damit die eingestrahlte Sonnenenergie optimal genutzt werden kann, soll das Gebäude eine möglichst grosse Speichermasse aufweisen.

Wenn die Sonneneinstrahlung durch den Horizont, den Überhang (Balkone, Vordächer) und Seitenblenden (Gebäudeversatz, Loggien) erheblich vermindert wird, kann dies durch Reduktion der Verluste (Transmission) kaum oder nur mit sehr hohem Aufwand kompensiert werden.

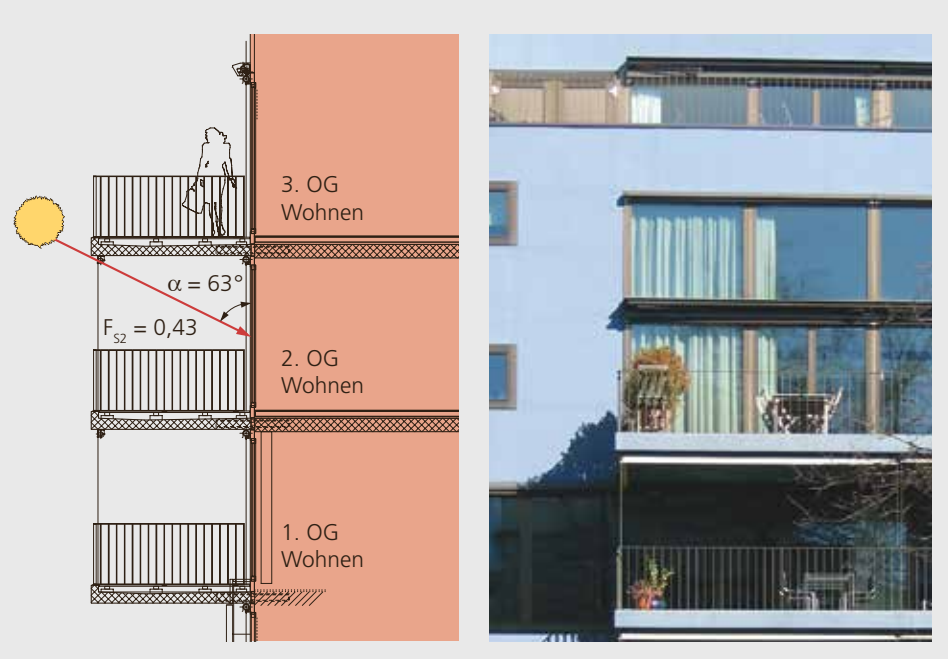


Abbildung 3.3: Durch die Balkone werden die gegen Süden orientierten Fenster erheblich verschattet. Über die Heizperiode betrachtet führt die Fensterfront hinter den Balkonen zu einem bilanzierten Energieverlust von 33 kWh/m². Ohne verschattende Balkone resultiert ein Energiegewinn von 19 kWh/m². Die Differenz von 52 kWh/m² Fensterfläche entspricht dem Heizwert von etwa 5 Litern Heizöl.

3.3 Opake Bauteile

Hochgedämmte Gebäudehüllen verfügen über opake Bauteile mit nur noch geringen Wärmeverlusten im Bereich von unter 0,17 W/(m² K) gegen Aussenklima. Insbesondere die Dächer und Böden sollen eher kompromisslos wärmegedämmt werden, weil sie Räume abgrenzen, die grössere Verlustflächen aufweisen als Räume der Zwischengeschosse. Bei mehrgeschossigen Bauten lassen Aussenwände oft Kompromisse beim Wärmeschutz zu, U-Werte im Bereich von 0,20 W/(m² K) können auch für hochgedämmte Gebäude genügen.

Bedeutung der Wärmedämmstoffe

Abgesehen von Aussenwänden, bei denen vermehrt wieder dicke Einsteinmauerwerke Verwendung finden, ist es in der Regel die Wärmedämmung, welche die Hauptleistung des Wärmedurchlasswiderstandes bietet. Ausgehend von einem für die hochgedämmte Gebäudehülle genügenden Wärmedurchlasswiderstand von 6 (m² K)/W sind hierfür z. B. folgende Wärmedämmstoffe denkbar:

- Vakuum-Dämmung VIP, etwa 42 mm
- Aerogel-Dämmung, etwa 90 mm
- PUR-Alu «Premium-Plus», etwa 108 mm
- EPS «grau», etwa 180 mm
- Stein- und Glaswolleplatte, ab etwa 192 mm

Andere Bauteilschichten wie tragende und bekleidende Materialien und die Wärmeübergangswiderstände haben, abgesehen von Massivholzquerschnitten (z. B. Mehrschichtplatten o. Ä.), nur einen unbedeutenden Einfluss. Für die Wärmedämmschicht sollten überwachte Produkte eingesetzt werden. So kann mit einer deklarierten Wärmeleitfähigkeit (λ_D-Wert) gemäss Norm SIA 279 gerechnet werden.
Neben der Wärmedämmschicht und deren Wärmeleitfähigkeit wirken sich auch konstruktive Einflüsse (z. B. Holzquerschnitte, Befestigungselemente) und die Orientierung des Bauteils (z. B. gegen Erdreich) auf das Wärmedämmvermögen von opaken Bauteilen aus.

Wärmeflüsse beim Holzbau: U-Werte von inhomogenen Holzbaukonstruktionen

Die meisten Holzbaukonstruktionen sind als inhomogene Systeme, mit Wärmedämmschichten zwischen der Holztragkonstruktion, konzipiert. Der die Wärmedämmschicht durchdringende Holzquerschnitt bildet dabei eine Wärmebrücke (Inhomogenität), die es bei der Beurteilung der Wärmeflüsse zu berücksichtigen gilt. Die Optimierung solcher Bauteile führt zur Minimierung des Holzanteils und zu mehrschichtigen, überdämmten Konstruktionen (Abbildung 3.4).

Wärmebrückenverluste bei Befestigungselementen

Lokale Wärmebrücken in Form von Befestigungselementen, welche die Wärmedämmschicht durchdringen (z. B. Anker und Schienen bei hinterlüfteten Fassadenbekleidungen), führen zu punktförmigen (χ-Wert in W/K) oder linienförmigen (Ψ-Wert in W/m K) Wärmebrückenverlusten, die bei der Berechnung der Bauteil-U-Werte zu berücksichtigen sind. Diese Einflüsse können derart gross sein, dass es nicht möglich ist, U-Werte zu erreichen, wie sie für die hochgedämmte Gebäudehülle erforderlich sind. Insbesondere bei Aussenwänden mit hinterlüfteten Bekleidungen sind spezielle Befestigungssysteme zu evaluieren, welche die Möglichkeit bieten, hochwärmedämmend zu konstruieren (Abbildung 3.5), z. B.:

- Unterkonstruktion mit Distanzschraube, durch einlagige Wärmedämmschicht hindurch, in Unterkonstruktion befestigt.
- Unterkonstruktion mit Wärmedämmkonsole aus glasfaserverstärktem Kunststoff-Schwert, das die Wärmedämmschicht durchdringt und warm- beziehungsweise kaltseitig angeordneten Befestigungselementen aus Aluminium.
- Wärmedämmschicht zwischen kreuzweise verlegtem Lattenrost.

Wärmeflüsse bei Bauteilen gegen Erdreich

Bei Bauteilen im ungestörten Erdreich (ohne Grundwassereinfluss) wird der Transmissionswärmeverlust durch die dämmende Wirkung des Erdreichs vermindert (Abbildung 3.6 und Abbildung 3.7). Der wärmedämmende Einfluss des Erdreichs wird gemäss EN ISO 13370 berücksichtigt, wobei folgende Tendenzen gelten:

- Je tiefer sich das Gebäude im Erdreich befindet (Höhe z), desto besser werden die U-Werte von Wand und Boden bei gleichbleibenden Konstruktionsaufbauten.
- Je grösser die Bodenfläche, desto besser wird der U-Wert des Bodens bei gleichbleibendem Konstruktionsaufbau. Bei sehr grossen Bodenflächen kann eventuell auf eine Wärmedämmschicht verzichtet werden oder es wird nur in den Randbereichen des Bodens wärmegedämmt.

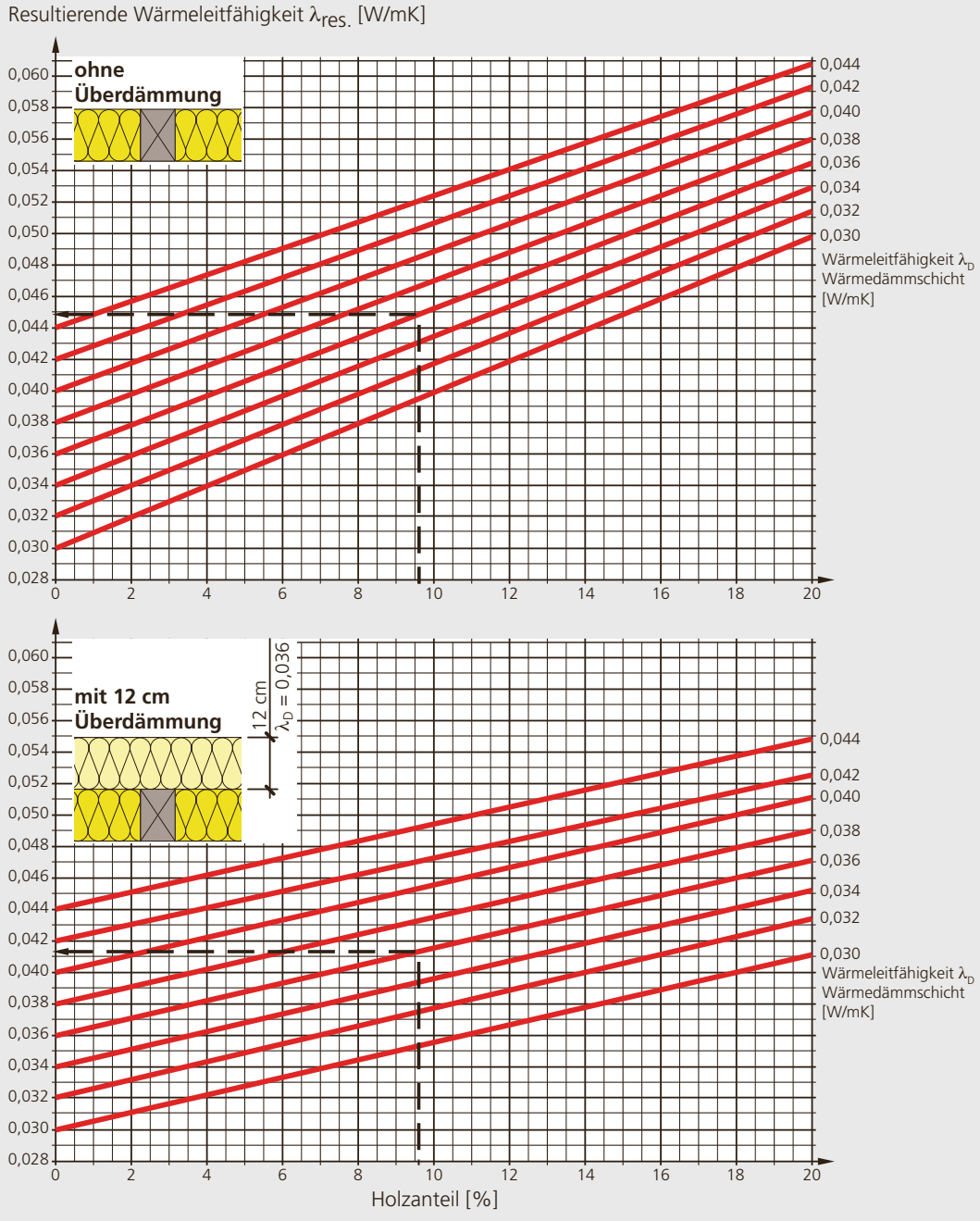
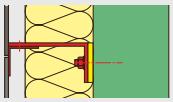


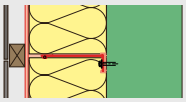
Abbildung 3.4: Resultierende Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{res.}$ für die inhomogene Schicht «Holz und Wärmedämmstoff» in Abhängigkeit vom Holzanteil und von der Wärmeleitfähigkeit λ_D des Wärmedämmstoffes, mit und ohne Überdämmung der inhomogenen Schicht. Bei 9,5 % Holzanteil kann die resultierende Wärmeleitfähigkeit durch Überdämmung von $\lambda_{res.}$ = 0,045 auf $\lambda_{res.}$ = 0,041 W/m K reduziert werden.



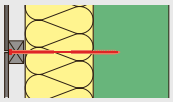
Holzunterkonstruktion
(Lattenrost, zwei- bzw. mehrlagig)



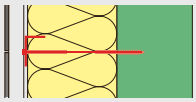
Alu-Unterkonstruktion ohne/mit Thermostop



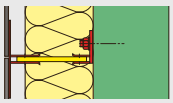
Holz/Alu-Unterkonstruktion ohne/mit Thermostop



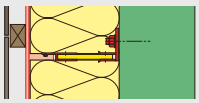
RSD-Distanzschrauben



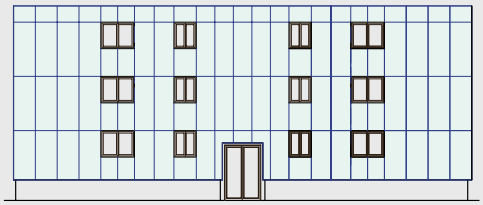
RSD-Distanzschrauben + Metallwinkel



Wärmebrückenfreie Unterkonstruktion



Holz/wärmebrückenfreie Unterkonstruktion



Referenzfassade für die Berechnung der Wärmebrückenverluste, bei grossformatiger Fassadenbekleidung aus Faserzementplatten.

Anmerkung:
Die effektiven Konstruktionen sind abhängig von der Dicke der Wärmedämmschicht, z. B. von 160 mm (einlagig) bis 360 mm (mehrlagig)

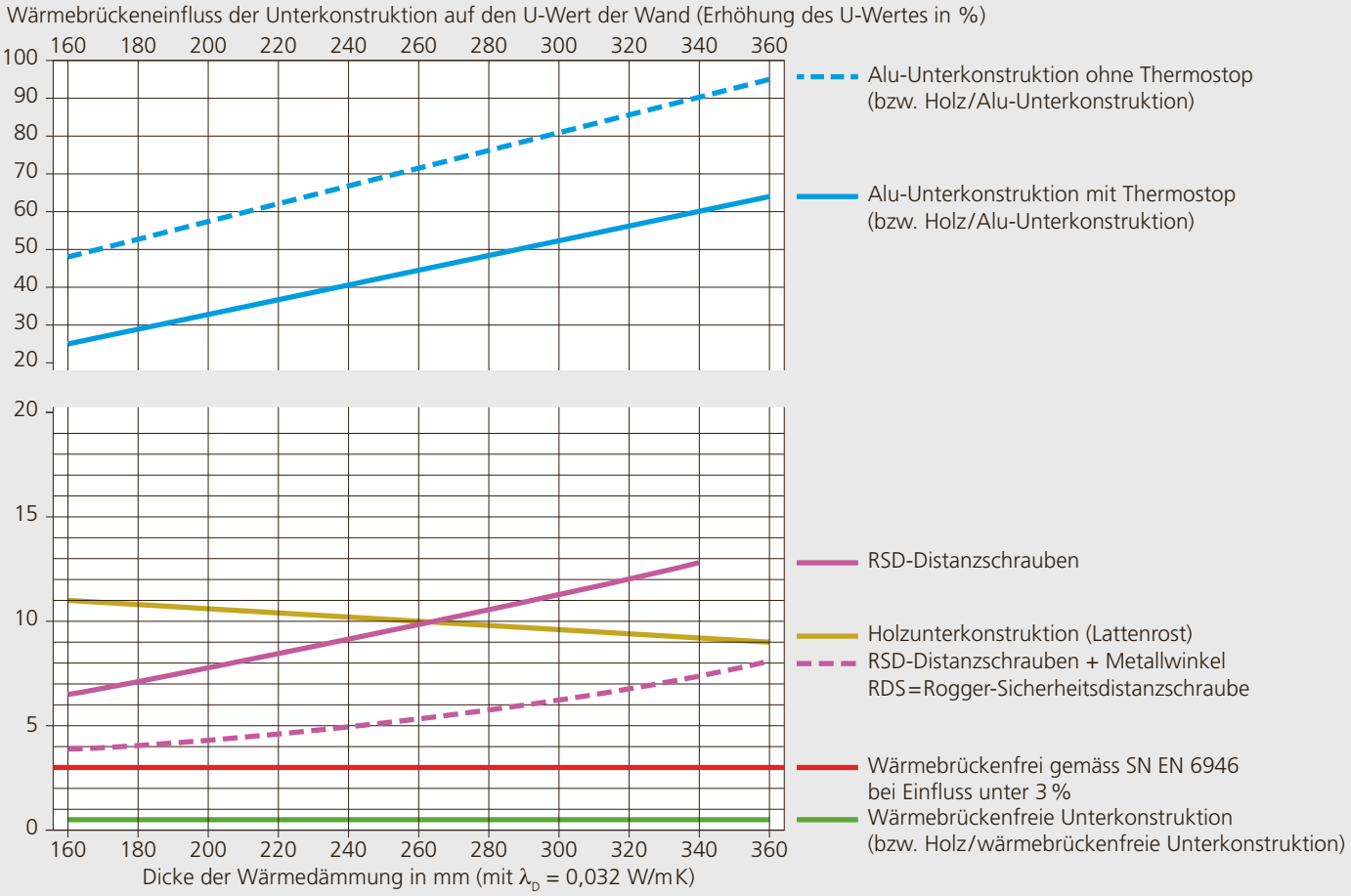


Abbildung 3.5: Beispiele für die in etwa zu erwartende prozentuale Erhöhung des U-Wertes durch verschiedene Unterkonstruktionssysteme, abhängig von der Unterkonstruktion und der Dicke der Wärmedämmung, bei Verankerungsgrund aus Stahlbeton. Differenzen von weniger als 3 % zwischen dem U-Wert ohne und mit Wärmebrückeneinfluss, wie dies z. B. bei Wärmedämmkonsolen der Fall ist, müssen gemäss SN EN 6946 nicht berücksichtigt werden. Bei Distanzschrauben resultiert, je nach System und Dicke der Wärmedämmschicht, eine Erhöhung des Wärmeabflusses um etwa 3 % bis 15 %. Bei Holzunterkonstruktionen ist der Wärmebrückeneinfluss abhängig vom Holzanteil (6 % berücksichtigt) und er nimmt infolge Überdämmung der Holzquerschnitte mit zunehmender Wärmedämmschichtdicke ab; er beträgt etwa 9 % bis 11 %. Bei Alu-Unterkonstruktionen beträgt der Wärmebrückeneinfluss mindestens 20 % und er kann bis fast zu einer Verdoppelung des Wärmedurchgangs führen. Mit stockwerkübergreifenden Alu-Unterkonstruktionen können jedoch erheblich kleinere Wärmebrückenverluste erreicht werden als bei «normalen» Alu-Unterkonstruktionen. Grundsätzlich sind die effektiven Wärmebrückenverluste zur Ermittlung der korrekten Wärmeverluste (U-Werte) objektspezifisch zu beurteilen.

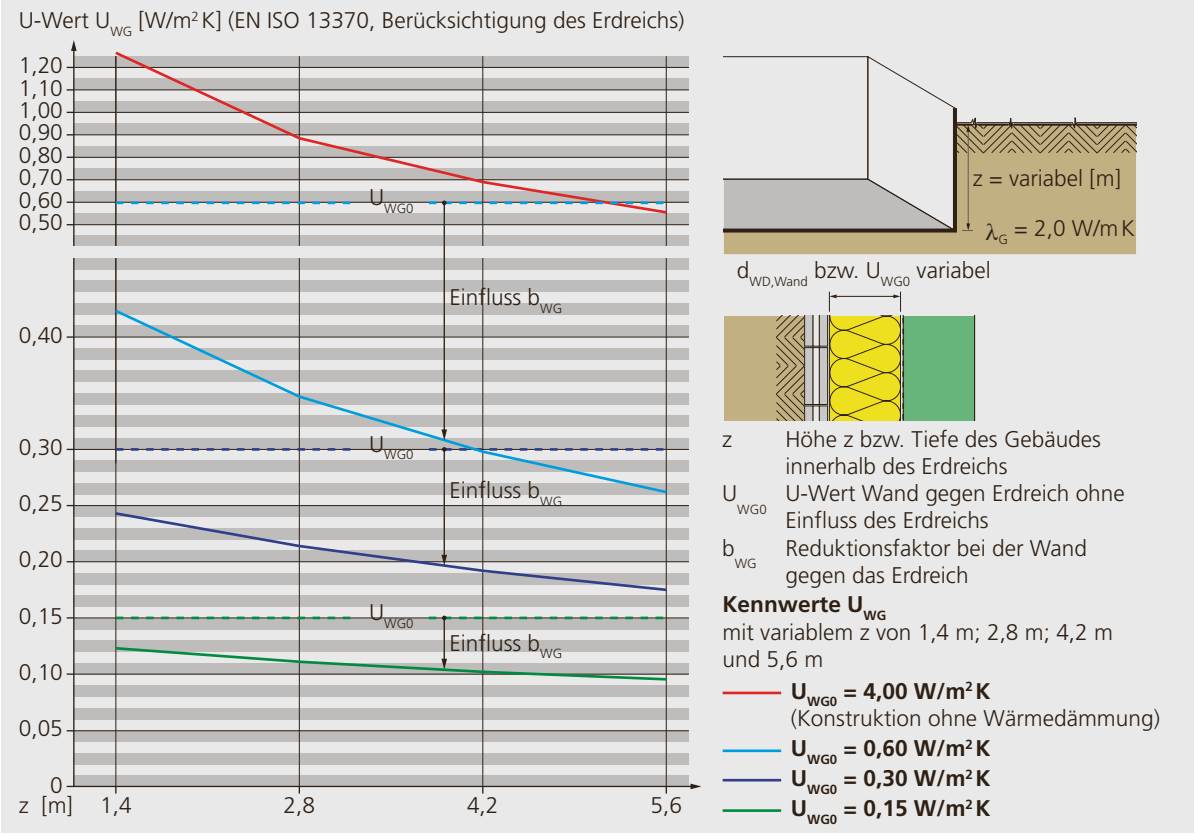


Abbildung 3.6: Die U-Werte U_{WG0} werden um den Faktor b_{WG} reduziert. Der Einfluss des Erdreichs hängt von der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs (üblicherweise wird λ_G = 2,0 W/m K berücksichtigt) und der Tiefe z ab. Bei Wänden gegen Erdreich ist für die hochgedämmte Gebäudehülle immer eine zusätzliche Wärmedämmung erforderlich.

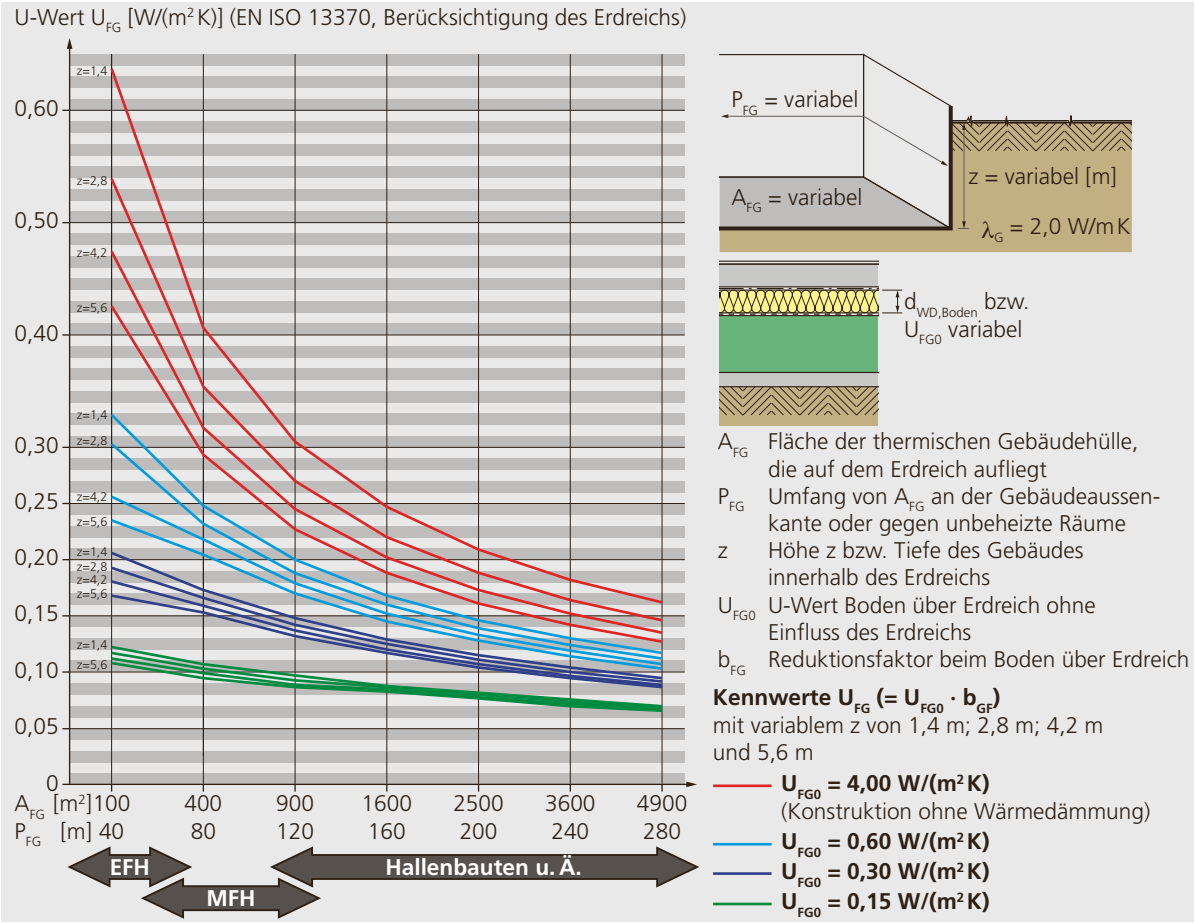


Abbildung 3.7: Die U-Werte U_{FG0} werden um den Faktor b_{GF} reduziert. Der Einfluss des Erdreichs hängt von der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs (üblicherweise wird λ_G = 2,0 W/m K berücksichtigt), der Grösse der Bodenfläche, dem Umfang des Bodens und der Tiefe z ab. Bei Hallenbauten kann z. B. auch ohne Wärmedämmung meist ein genügender Wärmeschutz erreicht werden.

Flachdach

Die Norm SIA 271:2007 definiert die bei Flachdächern zu berücksichtigenden Regeln der Baukunde und mit der Wegleitung der Verbände (Gebäudehülle Schweiz und Suissetec) steht ein praxisbezogenes Fachbuch für die Planung und Ausführung zur Verfügung.

Flachdächer sind Dächer mit geringer oder keiner Neigung und fugenloser Abdichtung. Insbesondere das Warmdach (System 4 in Abbildung 3.8) eignet sich hervorragend als hochgedämmte Konstruktion. Es stehen viele Wärmedämmstoffe zur Verfügung, die in Form von Platten ein- oder mehrlagig über der Dampfbremse respektive der Bauzeitabdichtung verlegt werden können.

Wenn bei Attikaterrassen Lösungen mit möglichst geringem Konstruktionsaufbau gefragt sind, kommen z. B. auch Vakuumdämmungen (Vacuum Insulated Panels VIP) in Frage. Bereits mit 50 mm VIP kann ein guter U-Wert von etwa 0,14 W/(m² K) erreicht werden. Wer aber dicker dämmen kann, dämmt kostengünstiger: Mit 120 mm dicken PUR-Alu-Platten (λ_D = 0,018 W/m K) kann beispielsweise ebenfalls ein U-Wert von 0,14 W/(m² K) erreicht werden. Falls Wärmedämmschichten aus Steinwollplatten erforderlich sind, müssen diese genügend druckfest sein, was Auswirkungen auf deren Wärmeleitfähigkeit hat. Die für das nicht begehbare Flachdach gebräuchlichen Steinwollplatten weisen λ_D-Werte von 0,038 W/m K auf, jene für das begehbare Flachdach λ_D = 0,045 W/m K. Für U-Werte um 0,14 W/(m² K) sind etwa 260 mm bis 310 mm dicke Steinwollplatten erforderlich. Abhängig von der Leistungsfähigkeit der Wärmedämmung sind für hochgedämmte Warmdächer somit etwa 50 mm bis 310 mm dicke Wärmedämmschichten erforderlich.

Bei der Anordnung der Wärmedämmung lediglich zwischen der Tragstruktur kommt nur die Konstruktion mit Unterlüftung der dampfdichten Abdichtung in Frage (System 3 in Abbildung 3.8). Es ist bei einem üblichen Holzanteil von 16 % mit einer

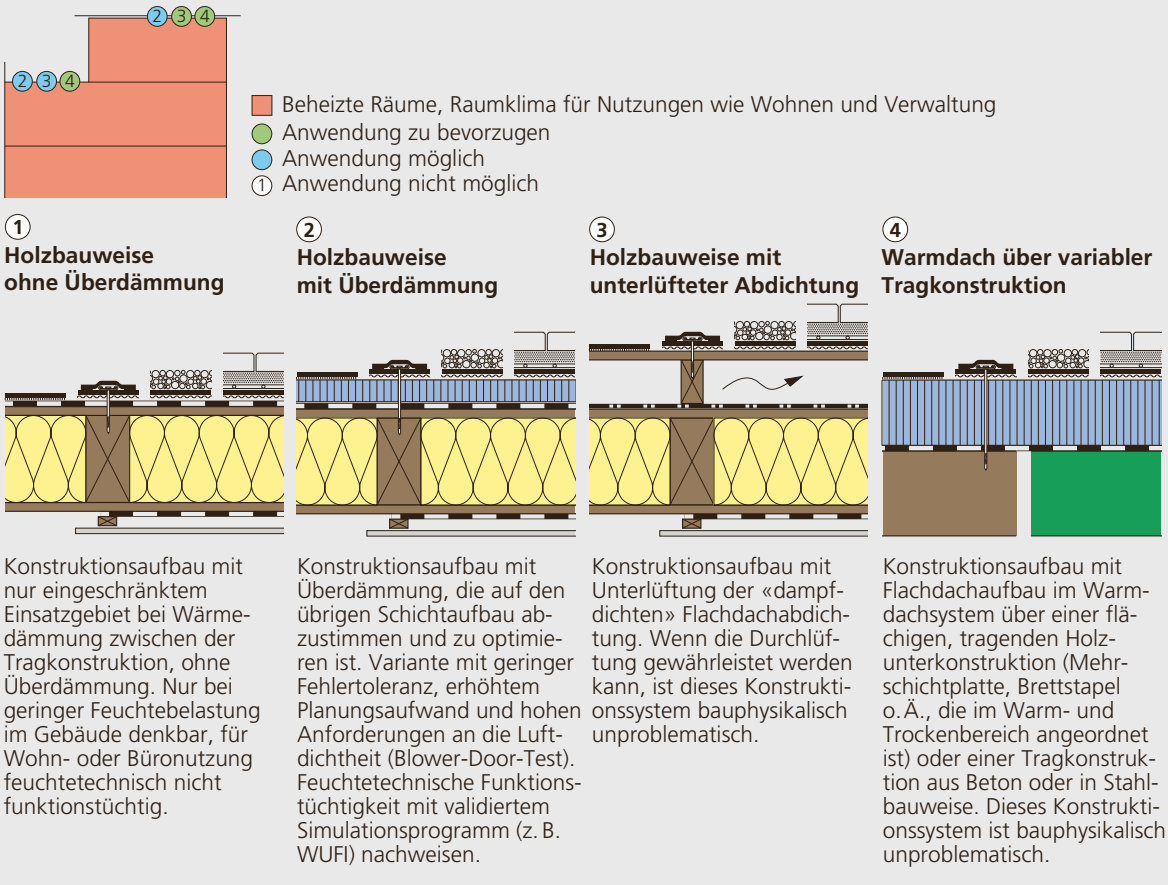


Abbildung 3.8: Konstruktionssystematik Flachdächer bei Holzbaukonstruktion und über Tragkonstruktion aus Beton/Stahlbau. Die feuchtetechnische Funktionstüchtigkeit der Holzbauvarianten 1 und 2 muss unter Berücksichtigung der dynamischen Effekte, z. B. mittels «WUFI», erfolgen; die Variante 1 ist jedoch nur bei geringer Feuchtebelastung möglich.

Höhe der Balkenlage beziehungsweise Dicke der Wärmedämmung von etwa 310 bis 340 mm (Mineralwollplatte mit λ_D = 0,032 W/m K bzw. Cellulose mit λ_D = 0,038 W/m K zwischen der Balkenlage) auszugehen, um einen U-Wert im Bereich von 0,14 W/(m² K) zu erreichen.
Damit auf eine Unterlüftung der Abdichtung verzichtet werden kann, muss die zwischen der Balkenlage ausgedämmte Holzbaukonstruktion genügend überdämmt werden (System 2 in Abbildung 3.8). Für die Überdämmung kommen auch Hochleistungswärmedämmstoffe zur Anwendung. Wenn die Konstruktion z. B. mit einer 60 mm dicken Wärmedämmschicht mit λ_D = 0,027 W/m K (z. B. PUR-Vlies) überdämmt wird, muss die Wärmedämmschicht zwischen der Balkenlage etwa 180 bis 210 mm betragen, um einen U-Wert im Bereich von 0,14 W/(m² K) zu erreichen (Holzanteil 16 %, Wärmeleitfähigkeit λ_D 0,032 bzw. 0,038 W/m K).

Spezialfall Umkehrdach

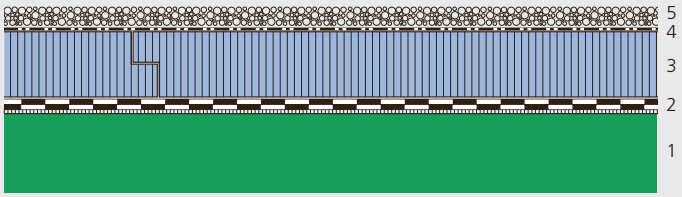
Beim Umkehrdach wird die «feuchteunempfindliche» Wärmedämmung aus extrudierten Polystyrolhartschaumplatten (XPS) über der Abdichtung verlegt. Das hat einerseits den Vorteil, dass die Abdichtung direkt über der Unterkonstruktion verlegt werden kann und so eine Dampfbremse respektive Bauzeitabdichtung entfällt. Andererseits wird die Abdichtung vor thermischen und mechanischen Einflüssen geschützt.
Systembedingt fliesst das Niederschlagswasser auf der Abdichtung in den Dachwasserablauf und entzieht der Unterkonstruktion Wärme, wodurch der Wärmedurchgang zeitweise erhöht wird. Je nach Beurteilung respektive der anwendbaren Norm und dem Gebäudestandort (Niederschlagsmenge) resultieren sehr hohe Wärmefluss-Zuschläge ΔU, die keine hochwärmegedämmten, konventionellen Umkehrdächer ermöglichen.
Die XPS-Wärmedämmungen für das hochwärmedämmende Umkehrdach werden deshalb mit einer wasserableitenden Trennlage zwischen XPS und Schutz-/Nutzschicht angeboten, die ermöglicht, dass der Zuschlag ΔU zum Wärmedurchgangswert 0 W/(m² K) wird (Prüfattest für die wasserableitende Trennlage verlangen).
Obwohl Untersuchungen der Dämmstoffhersteller (DOW) darauf hinweisen, dass eine zweilagige Verlegung der Wärmedämmung möglich ist, lässt die Norm SIA 271 dies nicht zu und auch die Praxiserfahrungen in der Schweiz belegen, dass nur eine einlagige Verlegung zulässig ist. Es sind hierfür auch genügend dicke XPS-Platten für hochwärmegedämmte Umkehrdächer erhältlich.
Für die wärmetechnische Verbesserung von bestehenden, noch intakten Flachdächern eignet sich eine im Umkehrdachsystem verlegte Wärmedämmung ebenfalls, man spricht dann von einem Plus-Dach. Neben den Anschlussrandbedingungen (z. B. Aufbordungshöhen) gilt es insbesondere auch, die mechanische Belastung auf die Abdichtung während der Ausführung der Zusatzdämmung zu beachten. Allenfalls ist es sinnvoll, die Abdichtung zu verstärken.

Einfluss begrünte Nutzschicht

Es ist nicht üblich, dass die Schutz- und Nutzschichten, die über der Abdichtung angeordnet sind, als Wärmedurchlasswiderstand berücksichtigt werden. Es gibt zwar Untersuchungen zum Verhalten von begrünten Dächern in der Kälteperiode, daraus lassen sich aber noch keine umsetzbaren Effekte auf den U-Wert ableiten. Der Nutzen von begrünten Dächern auf den sommerlichen Wärmeschutz ist aber unbestritten.

Abbildung 3.9: Die Wärmedämmung aus XPS muss beim Umkehrdach einlagig verlegt werden. Nur mit wasserableitender Trennlage, wodurch ein U-Wert-Zuschlag ΔU entfällt, kann ein hochwärmegedämmtes Flachdach realisiert werden.

Umkehrdach einlagig, mit wasserableitender Trennlage: geeignet für hochwärmegedämmtes Umkehrdach



1 Verlegeunterlage/Tragkonstruktion
2 Abdichtung
3 XPS-Platte mit Stufenfalz, einlagig verlegt
4 Trennlage wasserabweisend
5 Beschwerungsschicht aus Rundkies

Geneigtes Dach

Norm SIA 232/1:2011 definiert die bei geneigten Dächern zu berücksichtigenden Regeln der Baukunde und mit der Wegleitung der Verbände (Gebäudehülle Schweiz und Suissetec) steht ein praxisbezogenes Fachbuch für die Planung und Ausführung zur Verfügung.

Als geneigte Dächer gelten solche, die eine Dachneigung aufweisen, die eine überlappend verlegte oder gefalzte Deckung zulassen. Geneigte Dächer können auch begrünt werden. Sie sind dann aber, von der Funktion der Abdichtung her betrachtet, sinngemäss wie eine Flachdachkonstruktion auszubilden.

Das am häufigsten ausgeführte System ist die Variante 1 des einfach belüfteten Daches (Abbildung 3.10), mit Wärmedämmschichten zwischen und über den Sparren. Für die Überdämmung kommen in der Regel Holzweichfaserplatten mit einer Wärmeleitfähigkeit λ_D von z. B. 0,039 W/m K zur Anwendung. Damit bei einer 100 mm dicken Holzweichfaserplatte ein U-Wert von 0,14 W/(m² K) erreicht werden kann, muss die Wärmedämmschicht zwischen den Sparren etwa 180 bis 200 mm dick gewählt werden (Holzanteil 16%, Wärmeleitfähigkeit λ_D 0,032 bzw. 0,038 W/m K).

Hinweis zum Feuchteschutz

Bei wärmegedämmten Dächern ist über der Wärmedämmung immer ein Unterdach einzubauen. Abhängig von der Neigung des Daches und der Deckung wird zwischen Unterdächern für normale, erhöhte und ausserordentliche Beanspruchung unterschieden. Solche Unterdächer sind diffusionsoffen und ermöglichen dampfdiffusionstechnisch problemlose Konstruktionen. Wenn jedoch auf dem Unterdach mit permanentem Wasseranfall infolge geringer Dachneigung mit ungenügender Dichtheit der Deckung zu rechnen ist, muss eine spezielle Abdichtung

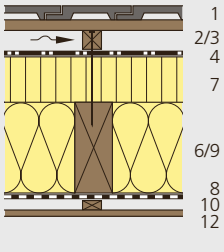
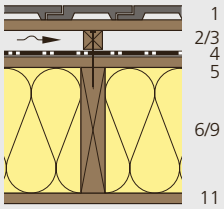
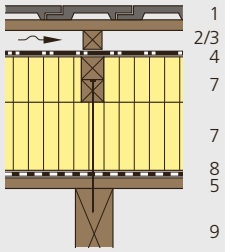
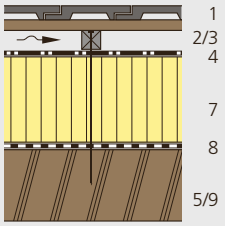
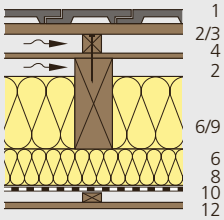
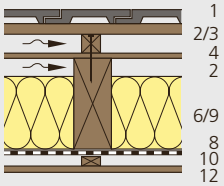
Geneigte Dächer	Holzbau			
Einfach belüftet Durchlüftung zwischen Unterdach und Deckung	**Variante 1** – Dampfbremse/Luftdichtung über Kopf – Wärmedämmschicht zwischen und über der Tragkonstruktion	**Variante 2** – Dachelement mit luftdichter Beplankung – Wärmedämmschicht zwischen der Tragkonstruktion	**Variante 3** – Dampfbremse/Luftdichtung auf Verlegeunterlage – Wärmedämmschicht über Tragkonstruktion	**Variante 4** – analog Variante 3 – mit Massivholzplatte o. ä. als Tragelement
				
Zweifach belüftet Durchlüftung zwischen Wärmedämmung und Unterdach und zwischen Unterdach und Deckung	**Variante 1** – Wärmedämmschicht zwischen und unter der Tragkonstruktion	**Variante 2** – Wärmedämmschicht zwischen der Tragkonstruktion		
				
Legende	1 Deckung 2 Durchlüftung 3 Unterkonstruktion (Konter-/Dachlattung) 4 Unterdach 5 Schalung/Verlegeunterlage	6 Wärmedämmung 7 Wärmedämmung trittfest 8 Dampfbremse/Luftdichtung 9 Tragwerk 10 Lattung/Installationsebene	11 Beplankung luftdicht 12 Deckenbekleidung	

Abbildung 3.10: Konstruktionssysteme für geneigte Dächer bei Holzkonstruktionen. Sinngemäss sind auch Verlegeunterlagen aus Stahlbeton (z. B. bei hoher Lärmbelastung) oder aus Profilblech (bei Stahlbauten) möglich.

(Flachdachabdichtung mit Dichtungsbahnen gemäss Norm SIA 271) erstellt werden. Diese Flachdachabdichtungen sind nicht diffusionsoffen, die daraus resultierenden Auswirkungen auf die bauphysikalische Funktionstüchtigkeit der Konstruktion sind zu berücksichtigen (siehe auch Abbildung 3.8).

Aussenwände

Aussenwände prägen das äussere architektonische Erscheinungsbild eines Gebäudes durch die Materialisierung, das Öffnungsverhalten und die Ausbildung der Bauteilübergänge (Sockel, Öffnungen, Dach; Abbildung 3.12). Aussenwände umhüllen und schützen die Räume vor Einflüssen wie:

- Temperaturdifferenzen (Wärmeschutz),
- Feuchtigkeit (Regen, Schlagregen, Dampfdiffusion, Luftleck-Kondensat),
- Schall (Aussenlärm) und
- Feuer (Brandschutz).

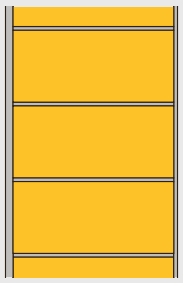
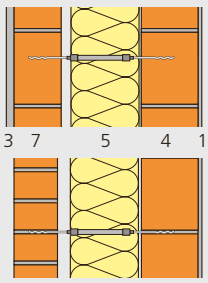
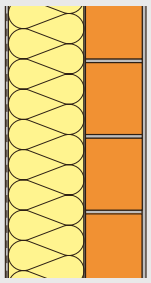
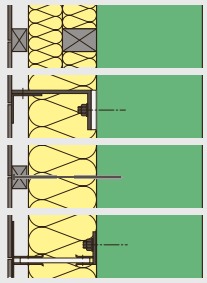
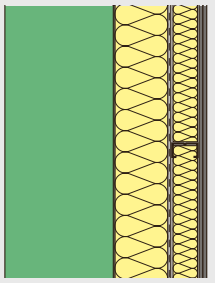
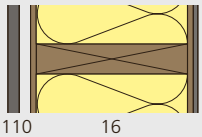
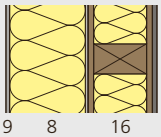
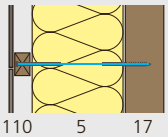
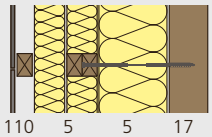
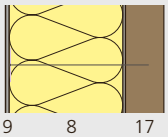
In der Regel müssen die Aussenwände als wesentlicher Teil des Tragwerks eines Gebäudes Lasten und Kräfte übernehmen und stabilisierend wirken (Erdbebensicherheit).

Bei der Projektierung stellt die Wahl der Aussenwand wegen den vielfältigen Anforderungen und Möglichkeiten eine Herausforderung dar.

Aussenwandtypologien

Abbildung 3.11 gibt einen Überblick über die wesentlichen Unterscheidungskriterien bei der Wahl von Aussenwänden. Neben den abgebildeten Kriterien gilt es, zwischen tragenden und nicht tragenden Aussenwänden (z. B. bei Hybridbauten) zu unterscheiden. Auf die Stahlbauweise oder den Fassadenbau (z. B. Fassaden vor Skelettbauten) wird nicht eingegangen.

Abbildung 3.11: Aussenwandtypologien, ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

Massivbau	Einschalig	Zweischalenmauerwerk	Wärmedämmverbundsystem	Fassadenbekleidung hinterlüftet	Innenwärmedämmung
	– Einsteinmauerwerk mit Backsteinen, Porenbetonsteinen u.Ä. – U-Wert bis etwa 0,14 W/m²·K	– Verputzt oder mit Sichtmauerwerk	– Mit EPS- oder Mineralwollplatte oder mit anderen geeigneten Wärmedämmstoffen	– Optimal mit wärmebrücken freier Unterkonstruktion – Grenzenlose Möglichkeiten betreffend Fassadenbekleidung, bis hin zu PV-Elementen	– In der Regel ausschliesslich bei Sichtbetonbauten – Eher hohe Wärmebrückenverluste zu erwarten
					
Holzbau	**Holzrahmenkonstruktion** – Mit hinterlüfteter Fassadenbekleidung – Verputzt möglich, mit Wärmedämmverbundsystem oder hinterlüfteter Putzträgerplatte		**Massivholzbau** – Mit hinterlüfteter Fassadenbekleidung – Verputzt möglich, mit Wärmedämmverbundsystem oder hinterlüfteter Putzträgerplatte		
					

Legende

1 Innenputz
2 Einsteinmauerwerk wärmedämmend
3 Aussenputz
4 Mauerwerk/Beton (Verankerungsgrund)
5 Wärmedämmschicht
6 Lufthohlraum/Entwässerungsebene
7 Mauerwerk/Sichtmauerwerk
8 Wärmedämmschicht aufgeklebt
9 Aussenputz mit Gewebearmierung
10 Unterkonstruktion/Hinterlüftung
11 Fassadenbekleidung
12 Gipskarton- oder Gipsfaserplatten
13 C-Profil ausgedämmt/Installationshohlraum
14 Wärmedämmschicht (z.B. XPS), vollflächig hohlraumfrei aufgeklebt, mit Grundputz (Luftdichtheit)
15 Sichtbeton
16 Holzrahmen, beidseitig beplankt und ausgedämmt
17 Massivholzplatte

Homogene, einschalige Wand (Einsteinmauerwerk)

Der tragende und dämmende Querschnitt einer homogenen Aussenwand besteht durchgehend aus demselben möglichst feinporigen Material (z. B. Backstein oder Gasbeton) und wird aussen und innen verputzt. Trotz einer hohen Porosität (gute Wärmedämmeigenschaft) und teilweise Wärmedämmstoffen in den Hohlräumen (der Querschnitt ist dann kaum mehr als homogen zu bezeichnen) weisen solche Wandsysteme grosse Wanddicken von bis zu 50 cm auf, um damit im besten Fall U-Werte im Bereich von 0,14 W/(m² K) zu erreichen (Abbildung 3.13). Der Wärmeschutz kann auch mit einem Wärmedämmputz verbessert werden. Eine Optimierung des Wärmeschutzes mit zusätzlicher Aussenwärmedämmung (verputzt oder mit hinterlüfteter Bekleidung) ist hingegen kaum sinnvoll, dann wird wohl eher eine tragende Wand aussen überdämmt, verputzt oder hinterlüftet bekleidet.

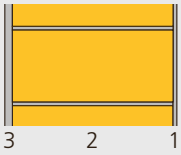
Besondere Aufmerksamkeit ist der Lasteinleitung und dem Öffnungsverhalten der Fassade zu schenken. Wenn z. B. wegen grosser Fensterfronten aus statischen Überlegungen Betonwandscheiben erforderlich werden, mutiert die homogene Aussenwand zu einer heterogenen Mischbauweise mit schwierig zu lösenden Details.

Weil diese Aussenwände teilweise zu recht hohen Schall-Nebenwegübertragungen führen, können die erhöhten Anforderungen an den Luftschallschutz bei Wohnungstrennwänden und Geschossdecken nicht in jedem Fall eingehalten werden.

Abbildung 3.12: Aussenwände sind mit ihrer Materialisierung wesentlich für die vielfältigen architektonischen Ausprägungen eines Gebäudes.



Einsteinmauerwerk wärmedämmend



		λ [W/m K]
1	Innenputz 10 mm	0,70
2	Backsteine, Porenbetonsteine u.Ä.	variabel
3	Leichtgrundputz 20 mm	0,30

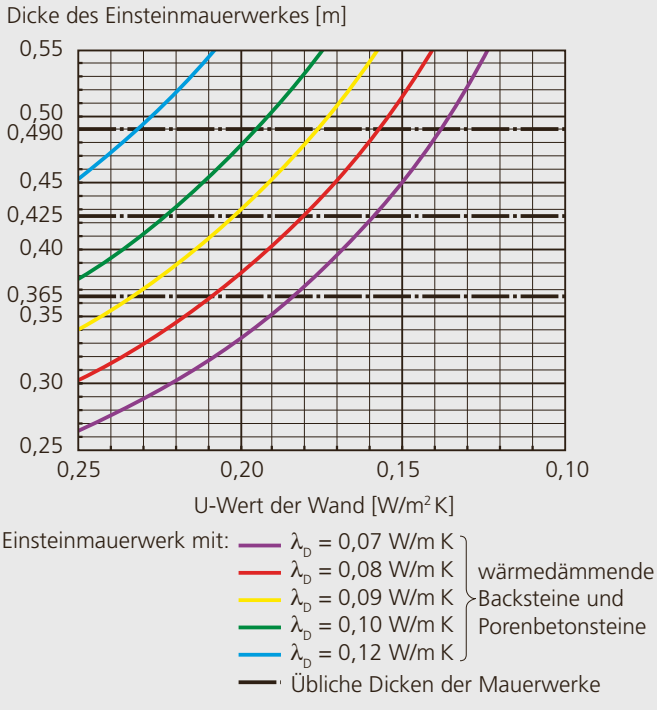


Abbildung 3.13: Ohne zusätzliche Überdämmung kann mit Einsteinmauerwerken ein Wärmeschutz bis U = 0,14 (W/m² K) erreicht werden.

Zweischalenmauerwerk sichtbar oder verputzt

Das Zweischalenmauerwerk besteht aus:

- einem inneren, tragenden Mauerwerk,
- einem äusseren, schützenden Mauerwerk und
- einer dazwischenliegenden Wärmedämmschicht.

Die Möglichkeit des lückenlosen Verlegens einer gut geschützten Wärmedämmschicht führt zu einer weitgehend wärmebrückenfreien Aussenwandkonstruktion. Der Einfluss der Zweischalenanker ist gering und kann vernachlässigt werden. Neben der in Abbildung 3.14 beschriebenen Konstruktion mit Backsteinen sind alternativ auch andere Mauerwerke, wie z. B. Kalksandsteine, möglich.

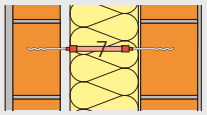
Das innere, tragende Backsteinmauerwerk wird in der Praxis 125 mm bis 175 mm dick gewählt, je nach statischen Anforderungen. Es kann eventuell auch eine Stahlbetonschale erforderlich sein (Tragsicherheit). Der maximale Schalenabstand beträgt mit Standard-Zweischalenankern etwa 290 mm; eine dickere Wärmedämmschicht als 280 mm (verputztes Mauerwerk) beziehungsweise 260 mm (Sichtmauerwerk) ist somit bautechnisch nur erschwert möglich.

Die Wärmedämmschicht wird in Form von Platten eingebracht. Sie wird vorteilhafterweise mechanisch auf die Tragschale befestigt. Bei Aussenschalen aus Sichtmauerwerken ist zwischen der Wärmedämmschicht und dem äusseren Mauerwerk ein Abstand (Lufthohlraum) von 2 cm bis 3 cm einzuhalten, um eindringendes Wasser von der Wärmedämmschicht fernzuhalten; von einer Hinterlüftung kann jedoch nicht gesprochen werden.

Je nach klimatischen Verhältnissen und Wärmedämmstoff ist eventuell eine Dampfbremse erforderlich, die z. B. bereits auf der Wärmedämmschicht aufkaschiert ist. Das Anschlagen der Fenster hat auf die innere, tragende Schale zu erfolgen.

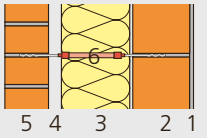
Abbildung 3.14: Zweischalenmauerwerk verputzt oder Sichtmauerwerk.

Zweischalenmauerwerk verputzt

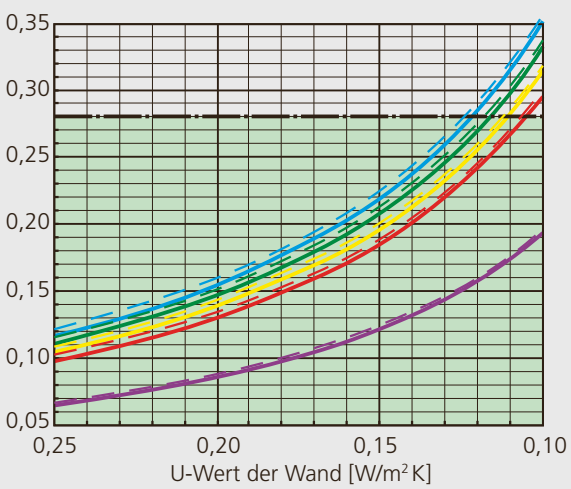


		λ [W/m K]
1	Innenputz 10 mm	0,70
2	Backsteinmauerwerk 150 mm	0,35
3	Wärmedämmschicht variabel	variabel
4	Lufthohlraum 10 bis 20 mm	nicht berücksichtigt
5	Backsteinmauerwerk 125 mm	0,35
6	Aussenputz 20 mm	0,87
7	Zweischalenanker	
	– etwa 0,7 Stück pro m² Aussenwand	
	– Wärmebrückenverlust χ etwa 0,003 W/K	

Zweischalen-Sichtmauerwerk



		λ [W/m K]
1	Innenputz 10 mm	0,70
2	Backsteinmauerwerk 150 mm	0,35
3	Wärmedämmschicht variabel	variabel
4	Lufthohlraum etwa 30 mm	nicht beürcksichtigt
5	Sichtmauerwerk 115 mm	1,80
6	Zweischalenanker	
	– etwa 0,7 Stück pro m² Aussenwand	
	– Wärmebrückenverlust χ etwa 0,003 W/K	

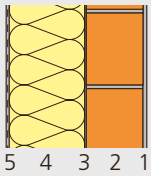


Wärmedämmschicht mit:

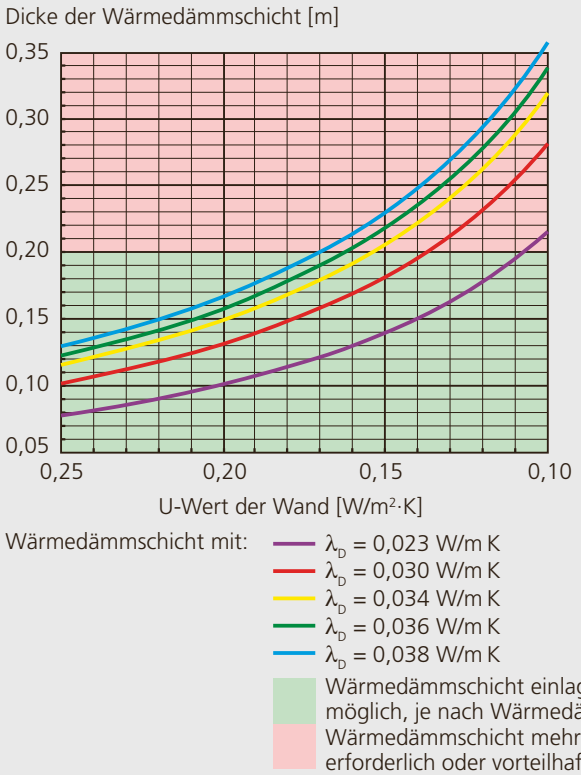
- λ_D = 0,021 W/m K
- λ_D = 0,032 W/m K
- λ_D = 0,034 W/m K
- λ_D = 0,036 W/m K
- λ_D = 0,038 W/m K
- Konstruktiver Grenzbereich (Zweischalenanker oder Ähnliches)
- Wärmedämmschicht einlagig möglich, je nach Wärmedämmung

Abbildung 3.15: Verputzte Aussenwärmedämmung (VAWD) auf Backsteinwand. Auf eine mechanische Befestigung der Wärmedämmschicht kann in der Regel verzichtet werden. Bei den Dickenangaben zur Erreichung der U-Werte sind für allfällige Befestigungen keine Wärmebrückenverluste berücksichtigt.

Aussenwärmedämmung verputzt (Kompaktfassade)



		λ [W/m·K]
1	Innenputz 10 mm	0,70
2	Backsteinmauerwerk 150 mm	0,35
3	Klebemörtel 4 mm	0,90
4	Wärmedämmschicht	variabel
5	Einbettmörtel/Aussenputz 8 mm	0,90



Verputzte Aussenwärmedämmung (VAWD)

Bei dieser Aussenwandkonstruktion wird die Wärmedämmung auf einen tragfähigen Untergrund aufgeklebt und evtl. zusätzlich mechanisch befestigt. Bei Massivbauten kann der Untergrund z. B. aus Stahlbeton, Backstein (Abbildung 3.15) oder Kalksandstein bestehen. Verputzte Aussenwärmedämmungen lassen sich aber auch bei Holzbauten, z. B. beim Holzrahmenbau, auf eine äussere Beplankung aus Holzwerkstoffplatten oder auf eine tragende Massivholzwand aufbringen. Die verputzte Aussenwärmedämmung ist wohl das kostengünstigste System für hochwärmegedämmte Aussenwände.

Die Planung und Ausführung hat unter Berücksichtigung der Norm SIA 243:2008 und den Systemvorschriften entsprechend zu erfolgen, um Bauschäden zu vermeiden. Mit Wetterschutzmassnahmen wie Vordächern, Fensterbänken, Abdeckungen u. Ä. können schädliche Feuchtebelastungen und die Gefahr von Algenbildung vermindert und die Nutzungszeit der VAWD verlängert werden. Auch im Sockelbereich ist den erhöhten Beanspruchungen durch geeignete Materialisierung (z. B. XPS- statt EPS-Platten) und Schutzmassnahmen Rechnung zu tragen.

Aussenwärmedämmung mit hinterlüfteter Bekleidung

Norm SIA 232/2:2011 definiert die bei hinterlüfteten Bekleidungen zu berücksichtigenden Regeln der Baukunde und mit der Wegleitung der Verbände (Gebäudehülle Schweiz, Suissetec, Schweizerischer Fachverband für hinterlüftete Fassaden) steht ein praxisbezogenes Fachbuch für die Planung und Ausführung zur Verfügung.

Dieses Aussenwandsystem ist bauphysikalisch unproblematisch und weist eine hohe Bauschadensicherheit auf. Der planerische, ausführungstechnische und damit auch der finanzielle Aufwand ist wesentlich von der Wahl des Bekleidungsmaterials abhängig.

Die hinterlüftete Bekleidung bildet die Fassade und ist für die Architektur des Gebäudes entscheidend. Es ist deshalb legitim, dass die Fassadenbekleidung früh im Projekt (vor)gegeben und als unverrückbare Randbedingung zu berücksichtigen ist. Folgende Entscheide hinsichtlich Bekleidung haben einen wesentlichen Einfluss auf die konstruktive Ausbildung der Aussenwand:

- Gewicht der Bekleidung
- Geschlossene oder offene Bekleidung
- Anforderung an Planheit
- Ermöglichung von aktivsolaren Energiegewinnen, primär durch Photovoltaik

Wesentlich auf den Wärmeschutz wirken sich die folgenden Faktoren aus:

- Dicke und Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmschicht,
- Wärmebrückenverluste durch Unterkonstruktion und

- Thermischer Widerstand des Verankerungsgrundes, mit Auswirkung auf den Wärmebrückenverlust der Unterkonstruktion.

Die teilweise hohen Anforderungen an den Wärmeschutz können mit Metallunterkonstruktionen oft nicht eingehalten werden, dies wegen der lokalen Wärmebrücken, die je nach zu erreichendem U-Wert auch mit «Thermostop» noch zu hoch sein können (Abbildung 3.5).
Mit Holzunterkonstruktionen, Distanzschrauben oder wärmebrückenfreien Unterkonstruktionen, die nur zu moderaten oder sogar keinen zu berücksichtigenden Wärmebrückenverlusten führen, können hochgedämmte Aussenwände mit hinterlüfteten Bekleidungen realisiert werden.

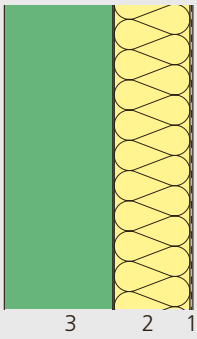
Innenwärmedämmung

Die Innenwärmedämmung wird bei Neubauten fast ausschliesslich bei Sichtbetonbauten angewendet und gilt bauphysikalisch eher als problematisch. Die Wärmedämmschicht wird auf der Innenseite entweder verputzt, bekleidet oder durch eine Vormauerung geschützt (Abbildung 3.16). In der Regel befindet sich mit der etwa 25 cm dicken Betonwand die dampfdichteste Schicht auf der Kaltseite, mit entsprechenden Risiken betreffend Auffeuchtung (Diffusions- und Konvektionskondensat). Das Speichervermögen der tragenden Aussenwand ist für den Innenraum nicht nutzbar. Erhöhte Wärmebrückenverluste sind meist unvermeidbar. Folgende Konstruktionen sind zu diskutieren, um allenfalls auch mit Innenwärmedämmung hochwärmedämmend zu bauen:

- Die Betondecke durchdringt die Innenwärmedämmung, Detailoptimierung mit Randzonenwärmedämmschichten an der Decke und durch eine dicker zu wählende Wärme- und Trittschalldämmschicht in der Bodenüberkonstruktion.
- Die Betondecke liegt weitgehend auf Innenwänden und innen, vor der Sichtbetonwand beziehungsweise der Wärmedämmung, angeordneten Stützen auf. Dies führt zu einer nahezu wärmebrückenfreien Konstruktion.
- Eine Innenwärmedämmung, die alle raumbildenden Bauteile lückenlos umfasst, ideal z. B. bei «1-Raum-Gebäuden».

Abbildung 3.16: Konstruktionsbeispiele für innen wärmegedämmte Sichtbeton-Aussenwände.

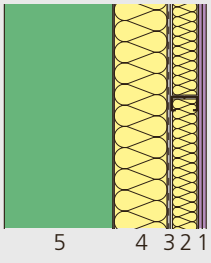
Innenwärmedämmung verputzt



1 Einbettmörtel/Innenputz
2 Wärmedämmung vollflächig aufgeklebt, z.B.: • Gasbetonplatte
• Perliteplatte
• Polystyrolhartschaumplatte XPS (*)
3 Sichtbeton

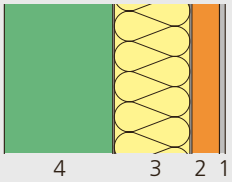
(*) Vorsicht bei schalltechnischen Anforderungen (z. B. Luftschallschutz der Geschossdecke) betreffend Nebenwegübertragung über erhöhte Schalllängsleitung!

Innenwärmedämmung mit Wandbekleidung



1 Wandbekleidung, z. B. Gipskartonplatten
2 C-Profile, Mineralwolleplatte, Installationshohlraum
3 Grundputz als luftdichte Schicht ausgeführt (Anschlüsse!) Einbettmörtel/Innenputz
4 Wärmedämmung vollflächig aufgeklebt, z. B. Polystyrolhartschaumplatte XPS
5 Sichtbeton

Innenwärmedämmung mit Vormauerung



1 Innenputz
2 Vormauerung nicht tragend, z. B.:
• Tonisolierplatten
• Gipsplatten
3 Wärmedämmung, z. B.: Polystyrolhartschaumplatte XPS
4 Sichtbeton

Holzbauwände

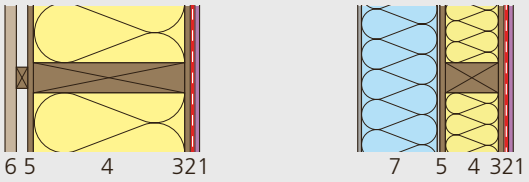
Die Aussenwände werden meist industriell unter optimalen Bedingungen vorgefertigt und kommen oft inklusive Fenster, als grossformatige Elemente, auf die Baustelle. Die Aussenwandelemente sind bei reinen Holzbauten in der Regel tragend; bei Hybridbauweise jedoch nicht tragend (z. B. ausfachende, hochgedämmte Wandelemente zwischen Betondecken).

Abgesehen von wenigen Ausnahmen handelt es sich um inhomogene Konstruktionen mit Anordnung der Wärmedämmung zwischen der Tragstruktur (Holzrahmen) oder zwischen Holzlatten (Abbildung 3.17). Durch einen möglichst geringen Holzanteil innerhalb der Wärmedämmebene gilt es, eine möglichst gute Wärmedämmwirkung zu erzielen.

Die erforderliche Luftdichtheit wird entweder durch warmseitig luftdichte, grossformatige Beplankungen mit abgeklebten Stössen erreicht oder durch den Einbau einer separaten Luftdichtung.

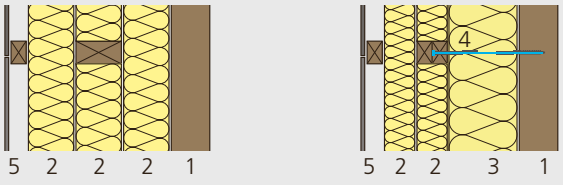
Abbildung 3.17: Konstruktionsbeispiele für Holzbau-Aussenwände.

Holzrahmenbau (hinterlüftet bekleidet/verputzt)



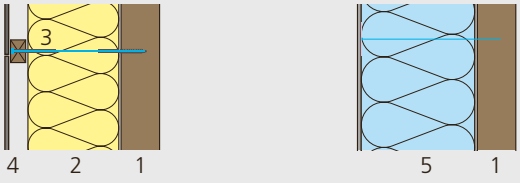
1 Innenbekleidung Gipskarton
2 evtl. Dampfbremse/Luftdichtung
3 Rahmenbeplankung mit Holzwerkstoffplatte
4 Holzrahmen/Wärmedämmschicht
5 Rahmenbeplankung mit Holzwerkstoffplatte
6 Hinterlüftete Fassadenbekleidung
7 Verputzte Aussenwärmedämmung

Massivholzbau (hinterlüftet bekleidet)



1 Massivholzwand (luftdicht, Stösse abgeklebt)
2 Wärmedämmschicht zwischen Lattenrost
3 Wärmedämmschicht
4 Lattung mit Distanzschraube befestigt
5 Hinterlüftete Fassadenbekleidung

Massivholzbau (hinterlüftet bekleidet/verputzt)



1 Massivholzwand (luftdicht, Stösse abgeklebt)
2 Wärmedämmschicht
3 Lattung mit Distanzschraube befestigt
4 Hinterlüftete Fassadenbekleidung
5 Verputzte Aussenwärmedämmung

Wände gegen unbeheizte Räume

Bei Wänden gegen unbeheizte Räume gelten bezüglich Konstruktionen und Wärmeschutz dieselben Überlegungen wie bei Aussenwänden, wobei etwas schlechtere U-Werte im Bereich von 0,20 W/(m² K) denkbar sind.

Wände gegen Erdreich

Als tragendes Material wird im Erdreich mehrheitlich Stahlbeton eingesetzt, der erdreichseitig mittels Anstrich, Spachtelung oder Betonverbundfolie vor Feuchtigkeit geschützt wird. Durch den Einbau von Sickerpackungen, Sickerplatten und Sickerleitungen (unter der Arbeitsfuge Bodenplatte/Aussenwand) ist wenn möglich eine funktionstüchtige äussere Entwässerung zu gewährleisten, damit das Entstehen von drückendem Wasser vermieden werden kann (Ableitkonzept). Bei beheizten Untergeschossräumen ist für den genügenden Wärmeschutz trotz wärmedämmender Wirkung des Erdreichs (Abbildung 3.6) immer eine Wärmedämmschicht erforderlich.

Aussen- bzw. Perimeterdämmung

Analog zum Flachdach im Umkehrdachsystem lassen sich auch Aussenwände im Erdreich mit feuchteunempfindlichen Schaumkunststoffen (Polystyrolhartschaum extru-

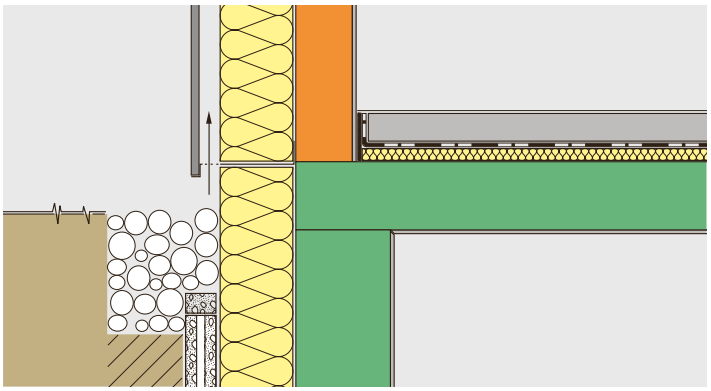


Abbildung 3.18: Perimeterdämmung im Erdreich als Fortsetzung einer Aussendämmung verputzt oder mit hinterlüfteter Bekleidung.

diert) oder mit Schaumglas auf der Aussenseite wärmedämmen. Mit einer Perimeterdämmung kann eine Aussendämmung über Terrain (verputzt oder mit hinterlüfteter Fassadenbekleidung) lückenlos weitergeführt werden (Abbildung 3.18).

Zweischalenmauerwerk

Auch unter Terrain lässt sich das Zweischalenmauerwerk weiterführen, wobei die äussere Schale meist in Stahlbeton ausgebildet wird. Die Wärmedämmschicht kann dadurch auch im Sockelbereich (Übergang zur Aussenwand gegen Aussenklima) lückenlos verlegt werden (Abbildung 3.19).

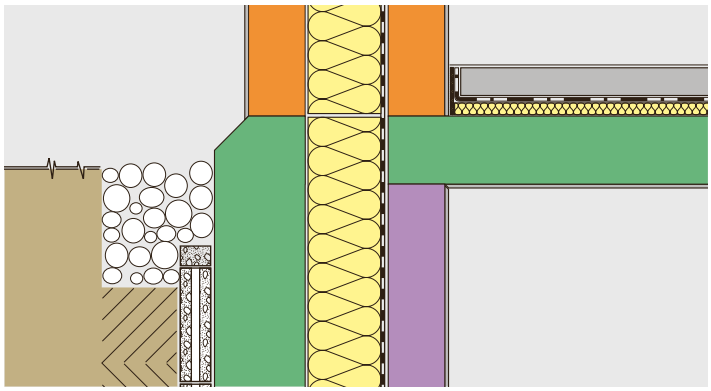
Innenwärmedämmung

Bei Aussenwänden im Erdreich gilt bezüglich Innenwärmedämmung grundsätzlich dasselbe wie bei der Aussenwand über Terrain. Die Wärmedämmschicht befindet sich auf der bauphysikalisch ungünstigen Seite. Bei Deckenauflagern (Sockelanschluss) und Innenwänden sind wärmetechnische Schwachstellen meist unvermeidbar. Dieses System hat allenfalls dann seine Berechtigung, wenn nur einzelne Untergeschossräume beheizt und wärmegedämmt werden.

Baulicher Wärme- und Feuchteschutz

Damit erdberührte Untergeschossräume als Keller- und Lagerräume genutzt werden können, ist ein baulicher Wärme- und Feuchteschutz, z. B. mit einer etwa 8 cm dicken Perimeterdämmung, sinnvoll. Allenfalls lassen sich dadurch auch unbeheizte Untergeschossräume innerhalb der thermischen Gebäudehülle anordnen (Kapitel 3.2 «Konzeptionelle Überlegungen»).

Abbildung 3.19: Zweischalenmauerwerk im Erdreich als Fortsetzung eines Zweischalen-Sichtmauerwerks.



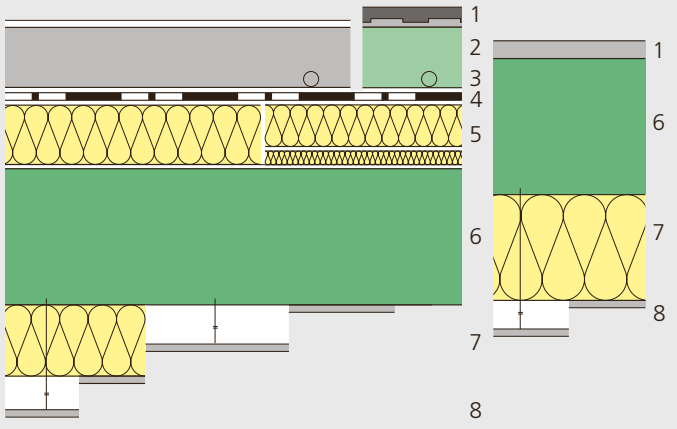
Böden über Aussenklima und unbeheizten Räumen

Bodenkonstruktionen begrenzen den Wärmefluss von oben nach unten. Sie grenzen beheizte Räume gegen darunter liegende, nicht beheizte Räume und gegen Aussenklima ab. Die Wärmedämmschicht kann über, unter oder zwischen (Holzbalkendecke) der Tragkonstruktion angebracht werden, und es sind auch Kombinationen möglich. Bei Bodenheizungen ist ein Teil der Wärmedämmschicht über der Tragkonstruktion anzuordnen.

Konstruktionen mit Betondecken

Der Entscheid, wie die Böden wärmegedämmt werden, hängt wesentlich von den Detailüberlegungen hinsichtlich der Vermeidung von Wärmebrückenverlusten ab (Abbildung 3.20). Bei Situationen mit vielen Wänden über der Betondecke (Schottenbauweise) und kaum Wänden unter der Betondecke (z. B. Stürzen in Einstellhallen) ist es effizient, die Wärmedämmung unter der Betondecke anzuordnen. Wenn hingegen über der Betondecke ein Holzbau realisiert wird, sind die Wärmebrückenverluste beim Sockel dann am kleinsten, wenn die gesamten Wärmedämmschichten über der Betondecke an-

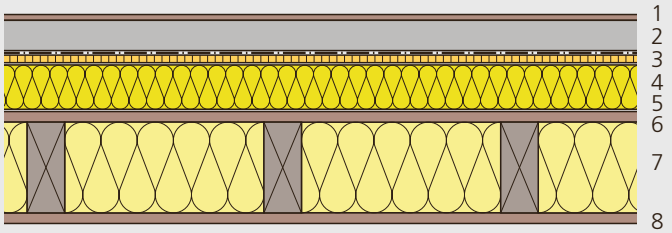
Abbildung 3.20: Bodenkonstruktion über Aussenluft und nicht beheizten Räumen mit unterschiedlicher Anordnung der Wärmedämmschicht und Massnahmen, um den Trittschallschutz zu gewährleisten.



1 Bodenbelag
2 Unterlagsboden, evtl. mit Armierung
3 Evtl. Bodenheizung
4 Trenn- und Gleitlage, z.B. PE-Folie
5 Wärmedämmschicht und evtl. Trittschalldämmschicht
6 Tragkonstruktion, z.B. Stahlbetondecke
7 Wärmedämmschicht unter der Tragkonstruktion
8 Deckenbekleidung

geordnet werden und so an den wärmedämmenden Holzbau anschliessen.
Bei Bodenkonstruktionen mit schwimmenden Unterlagsböden können Flächenheizungen eingebaut werden. Die Bodenkonstruktion wird durch Wärmedämmschichten über respektive unter der Tragkonstruktion dem Wärmedämmkonzept sowie den U-Wert-Anforderungen angepasst. Durch das Einbauen von Trittschalldämmschichten und die Verwendung trittschalldämmender Bodenbeläge kann der geforderte Trittschallschutz gewährleistet werden.
Bodenkonstruktionen ohne schwimmende Unterlagsböden sind durch Wärmedämmschichten unter der Tragkonstruktion den Wärmeschutzanforderungen und, falls erforderlich, durch trittschalldämmende Bodenbeläge den Anforderungen an den Trittschallschutz anzupassen.
Je nach Wärmeleitfähigkeit der Wärme- und Trittschalldämmschichten ist insgesamt mit etwa 10 cm bis 16 cm dicken Schichten zu rechnen, um gegen unbeheizte Räume einen U-Wert von 0,20 W/(m² K) zu erreichen. Für einen Wärmeschutz mit einem U-Wert von 0,15 W/(m² K) für Böden über Aussenklima sind etwa 12 cm bis 22 cm dicke Wärme- respektive Trittschalldämmschichten erforderlich.

Abbildung 3.21: Bodenkonstruktion über Holzbalkendecke, mit Wärmedämmschicht zwischen den Holzbalken und variablen Wärme-/Trittschalldämmschichten über der Holzbalkendecke, je nach Anforderung an den Wärme- und Trittschallschutz.



1 Bodenbelag
2 Unterlagsboden
3 Trenn- und Gleitlage
4 Trittschalldämmschicht mind. 0,02 m
5 Wärmedämmschicht
6 Dreischichtplatte o. ä.
7 Massiv- oder Brettschichtholz dazwischen Wärmedämmschicht
8 Dreischichtplatte o. ä.

Konstruktion mit Holzbalkenlage
Wegen der durch die Inhomogenität von Holz und Wärmedämmung erhöhten Wärmeleitfähigkeit ist es bei diesen Konstruktionen effizient, die Wärmedämmschicht zwischen den Holzbalken nur so dick zu wählen, wie es die minimal erforderliche statische Höhe vorgibt. Der Rest der Wärme- und Trittschalldämmschicht wird mit Vorteil über der Tragstruktur in der Bodenüberkonstruktion verlegt, weil diese Schichten bedeutend bessere Wärmeleitfähigkeiten aufweisen als die Wärmedämmung zwischen der Balkenlage (Abbildung 3.21). Unter Berücksichtigung einer 24 cm dicken Wärmedämmschicht (λ_D Wärmedämmung 0,035 W/m K; Holzanteil 16 %) zwischen der Balkenlage wird bereits ohne Zusatzdämmung ein U-Wert von 0,20 W/(m² K) erreicht. Für einen Wärmeschutz mit U-Wert von 0,15 W/(m² K) für Böden über Aussenklima sind zusätzlich etwa 4 cm bis 5 cm dicke Wärme- respektive Trittschalldämmschichten erforderlich.

Böden über Erdreich
Wegen der wärmedämmenden Wirkung des Erdreichs kann bei grösseren Bodenflächen allenfalls auch ohne Wärmedämmung bereits ein genügender Wärmeschutz erreicht werden (Abbildung 3.7). Der Verzicht auf eine Wärmedämmung beim Boden über Erdreich ist insbesondere dann sinnvoll, wenn der Boden als Teil der thermischen Gebäudehülle unbeheizte Räume (Keller, Lager, Haustechnik) zum Erdreich hin abgrenzt. Eine Investition in die Wärmedämmung hätte dann nur Auswirkungen auf den rechnerischen Nachweis des genügenden Wärmeschutzes, nicht aber auf den Wärmeverlust beim Betrieb (dann ist nur der Boden über dem unbeheizten Raum relevant).
Bei Böden über Erdreich kann die Wärmedämmung über oder unter der Betonbodenplatte angeordnet werden oder auch kombiniert, ein Teil oben und ein Teil unten (Abbildung 3.22).
Wenn die Aussenwand mit einer Aussen- respektive Perimeterdämmung versehen ist und sich das Gebäude nicht tief im Erdreich befindet, ist es sinnvoll, zumindest

einen Teil der Wärmedämmung unter der Bodenplatte anzuordnen. Dies einerseits, um den Wärmebrückenverlust über das «Sockeldetail» zu minimieren und andererseits, um genügend hohe raumseitige Oberflächentemperaturen zu gewährleisten (Vermeidung von Feuchteschäden respektive Schimmelpilzbildung).
Bei Bodenheizung und Anforderungen an den Trittschallschutz (indirekte Trittschallübertragung) ist zumindest ein Teil der Wärme- respektive Trittschalldämmung über der Bodenplatte anzuordnen.

Decken

Unter Decken verstehen wir Bauteile über beheizten Räumen, mit der Aufgabe, den Wärmefluss von unten nach oben gegen unbeheizte Räume (z. B. Estrich) zu begrenzen. Bei Massivbauten wird die Wärmedämmschicht in der Regel über der Betondecke verlegt und je nach Nutzung des unbeheizten Raumes mit oder ohne begehbare Schicht ausgeführt. Um einen U-Wert von 0,20 W/(m² K) zu erreichen, sind je nach Wärmedämmstoff und Verlegeart respektive Inhomogenität etwa 10 bis 18 cm dicke Wärmedämmschichten erforderlich.

Bei einer Holzbalkendecke wird die Wärmedämmschicht zwischen die Holzbalken verlegt (etwa 22 cm dicke Wärmedämmung für U-Wert von 0,20 W/(m² K)). Falls die Balken aus statischer Sicht weniger hoch sein müssen, ist es sinnvoll, einen Teil der Wärmedämmung unter oder über der Balkenlage zu verlegen (Abbildung 3.23).

Türen und Tore

Türen gegen Aussenklima dürfen gemäss MuKEn 2014 im Rahmen eines Einzelbauteilnachweises maximal einen U-Wert von 1,2 W/(m² K) haben. Diese Anforderung ist auch für die hochgedämmte Gebäudehülle ausreichend, dies insbesondere deshalb, weil der Flächenanteil der Türen an der thermischen Gebäudehülle meist sehr klein ist. Damit die Anforderungen an den Wärmeschutz erreicht werden können, sind wärmegedämmte Türblätter oder verglaste Türen erforderlich (Kapitel 3.4 «Transparente Bauteile»).
Tore gegen Aussenklima dürfen gemäss MuKEn 2014 im Rahmen eines Einzelbauteilnachweises maximal einen U-Wert von 1,7 W/(m² K) haben. Je nach Flächenanteil in der thermischen Gebäudehülle ist diese

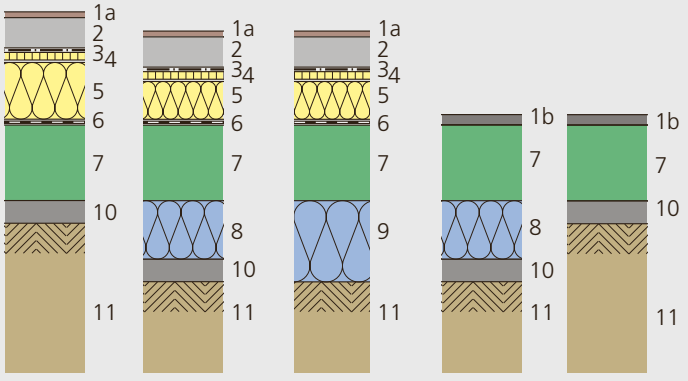


Abbildung 3.22: Bodenkonstruktion über Erdreich, mit unterschiedlicher Anordnung der Wärme-/Trittschalldämmschichten über und unter der Betonbodenplatte, je nach Anforderung an den Wärme- und Trittschallschutz.

1a Bodenbelag
1b Bodenbelag, feuchteunempfindlich
2 Estrich
3 Trenn- und Gleitlage
4 Trittschalldämmschicht
5 Wärmedämmschicht
6 Abdichtung gegen aufsteigende Feuchte (Kapillarwassersperre)
7 Stahlbeton-Bodenplatte
8 Wärmedämmschicht (XPS- oder Schaumglasplatten)
9 Wärmedämmschicht (Schaumglasschotter)
10 Sauberkeitsschicht (Magerbeton)
11 Erdreich

Deckenkonstruktion in Massivbauweise

Deckenkonstruktion in Holzbauweise

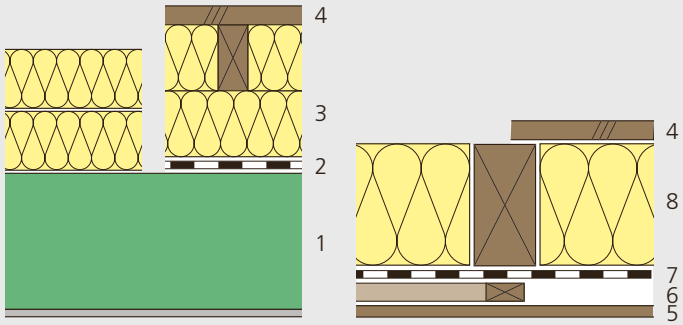


Abbildung 3.23: Deckenkonstruktion gegen unbeheizten Dach- oder Estrichraum, evtl. nicht oder nur beschränkt begehbar.

1 Tragkonstruktion, z. B. Stahlbetondecke
2 Evtl. Dampfbremse
3 Wärmedämmschicht, ein- oder zweilagig, evtl. mit einzelnen oder streifenförmigen Lagern
4 Evtl. partiell Holzwerkstoffplatte als Gehbelag
5 Deckenbekleidung (z. B. Holzschalung, Gipskartonplatte mit Abrieb o. Ä.), evtl. schallabsorbierende Bekleidung
6 Schiftlattung und Installationshohlraum
7 Dampfbremse und Luftdichtung
8 Wärmedämmschicht zwischen der Balkenlage verlegt

Einzelbauteilanforderung auch für das Erreichen der Anforderungen einer hochgedämmten Gebäudehülle (z. B. für Minergie) relevant. Nicht alle Tore können einen solchen Wärmeschutz bieten:

- Kipptor 1,7 bis 5,9 W/(m² K)
- Falttor, Schiebefalttor 1,7 bis 5,3 W/(m² K)
- Schiebetor 1,2 bis 4,5 W/(m² K)
- Flügeltor 1,4 bis 5,9 W/(m² K)
- Sektionaltor 0,5 bis 5,0 W/(m² K)
- Rolltor 3,9 bis 5,9 W/(m² K)
- Schnelllauftor 1,5 bis 5,9 W/(m² K)

3.4 Transparente Bauteile

Das Fenster beeinflusst die Energiebilanz und letztlich den Energieverbrauch eines Gebäudes wesentlich (Abbildung 3.1). Das Fenster ist somit insbesondere für die hochgedämmte Gebäudehülle das relevanteste Bauteil.

Einflüsse des Fensters auf Energiebilanz und Energieverbrauch

Das Fenster wirkt sich durch die Energieverluste (Transmission) und die passivsolaren Energiegewinne massgebend auf den Heizwärmebedarf aus. Bei unverschatteten Fenstern gegen Süden, Osten und Westen sollte es möglich sein, über die Heizperiode bilanziert, einen Energiegewinn zu erzielen. Auch auf die Lüftungswärmeverluste hat das Fenster einen Einfluss, der aber rechnerisch nicht speziell betrachtet wird. Durch luftdichte Fenster (Fälze, Einbau der Verglasung) und einen luftdichten Einbau (Anschluss Fenster und Aussenwand) gilt es einen unkontrollierten, ungewollten Aussenluftwechsel zu vermeiden. Die Lüftungswärmeverluste, die der Nutzer durch Fensterlüftung verursacht (z. B. Dauerlüftung durch Fenster in Kippstellung), können erheblich sein. Dieser Einfluss zeigt sich auch bei den grossen Differenzen beim individuellen Heizwärmeverbrauch. Insbesondere bei hochwärmegedämmten Gebäudehüllen erklärt das

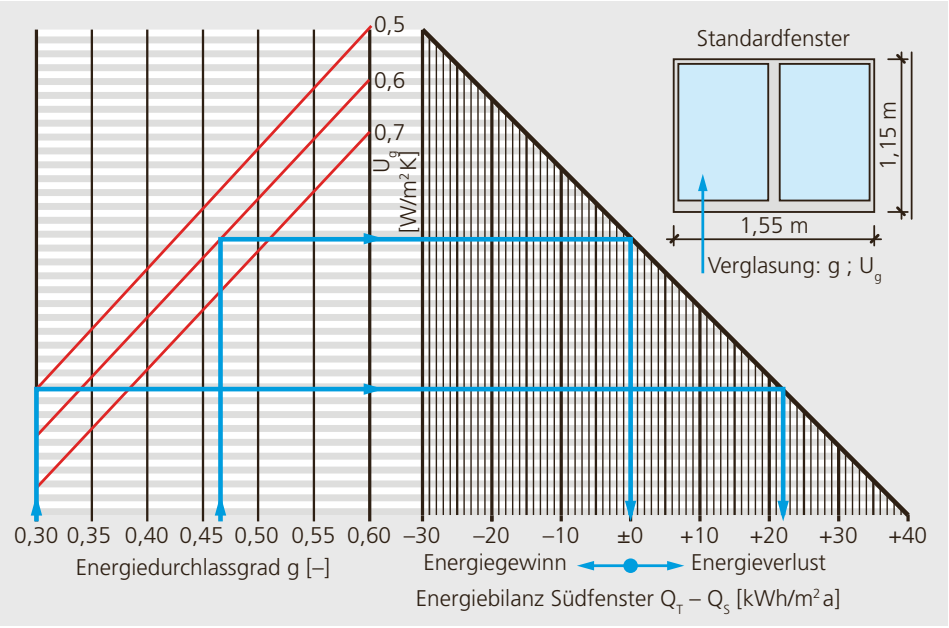


Abbildung 3.24: Energiebilanz bei Südfenster, also Transmissionswärmeverlust minus Energiegewinn durch Sonneneinstrahlung, in Abhängigkeit vom Energiedurchlassgrad g und vom Glas-U-Wert U_g. Sonnenschutzgläser mit g-Wert 0,3 führen selbst bei Dreifach-IV mit U_g = 0,5 W/(m² K) zu einem bilanzierten Energieverlust. Ab einem g-Wert von 0,47 führen Dreifach-IV mit U_g = 0,6 W/(m² K) zu einem bilanzierten Energiegewinn.

teilweise auch die Differenzen zwischen berechnetem und tatsächlich erreichtem Heizwärmeverbrauch.

Energieverlust durch Transmission bei Fenstern

Folgende Faktoren beeinflussen den Transmissionswärmeverlust rund ums Fenster:

- Rahmenkonstruktion (äussere Projektionsfläche im Mauerlicht, U-Wert U_f).
- Verglasung (Glasfläche, U-Wert U_g; Abwicklung Glasrandverbund, Wärmebrückenverlust Ψ_g).
- Geometrische (Lage des Fensters in der Aussenwand) und materialtechnische Einflüsse (wärmeleitende Schichten, insbesondere Alu-Profile) beim Fenstereinbau (Wärmebrückenverlust Ψ_E).

Energiegewinn durch Sonneneinstrahlung

Die beste Möglichkeit, den Heizwärmebedarf zu reduzieren, bietet in der Regel die Optimierung oder Erhöhung der passivsolaren Gewinne mit folgenden Einflussgrössen:

- Möglichst grosse Glasfläche A_g, z. B. durch grosse Fensterflächen ohne viele Unterteilungen (Sprossen, Kämpferpartien) und überdämmte Rahmen.
- Gläser mit möglichst hohem Gesamtenergiedurchlassgrad g wählen. Anmerkung: Wenn bei Gebäuden mit hohen internen Lasten der Energieaufwand für die Kühlung dominant wird, kann es effizient sein, einen optimierten, kleineren g-Wert zu wählen. Dasselbe trifft auch aus Sicht des sommerlichen Wärmeschutzes zu.
- Gebäude so orientieren, dass die grossen Fenster von der gegen Süden hohen Globalstrahlung profitieren.
- Verschattung so weit als möglich vermeiden. Balkone vor opaken statt transparenten Bauteile anordnen.
- Ausnutzungsgrad für Wärmegewinne η_g (abhängig von Speichermasse und Regulierung der Heizung).

Der Nutzer hat einen grossen Einfluss auf die beim Betrieb effektiv anfallenden Sonnenenergiegewinne:

- Die variable Verschattung (Sonnenschutz) soll während der Heizperiode möglicht nicht eingesetzt werden. Sie reduziert den g-Wert von z. B. über 50 % auf unter 10 %.
- Übertemperatur gegenüber der behaglichen Wunschtemperatur, verursacht durch passivsolare Gewinne, soll in der Heizperiode in Kauf genommen werden.
- Den die Wärme bzw. Energie speichernden Boden nicht mit Teppichen abdecken.

Fenster für die hochwärmegedämmte Gebäudehülle

Die Planer müssen ein Fenster evaluieren und ausschreiben, das die energetischen Gesichtspunkte möglichst optimal berücksichtigt. Das evaluierte Fenster bildet die «unveränderbare Randbedingung» bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs; die opaken Bauteile können dann durch die Dicke der Wärmedämmschicht und die Art des Wärmedämmstoffes (deklarierte Wärmeleitfähigkeit λ_D) soweit optimiert werden, dass die Anforderung an den Heizwärmebedarf erreicht wird. Energetisch optimal sind Fenster, die seitlich und oben fast bis zum Glas hin überdämmt werden können, was zu einem hohen Glasanteil führt. Es ist von folgenden Kennwerten auszugehen, die nur mit Dreifach-Isoliergläsern erreicht werden können:

- U-Wert U_g für die Verglasung im Bereich von $\leq$ 0,6 W/(m² K). Es sind Dreifach-Isoliergläser mit U-Werten bis 0,4 W/(m² K) erhältlich.
- Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) der Verglasung $\geq$ 60 %, falls die Räume nicht gekühlt werden (Nutzung ohne hohe interne Lasten). Anmerkung: Falls wegen der Lärmbelastung Schallschutzgläser erforderlich sind, müssen in der Regel Konzessionen an den g-Wert gemacht werden.
- Thermisch isolierender Glasrandverbund (warme Kante) mit Wärmebrückenverlust Ψ_g im Bereich von 0,033 W/m K.
- U-Wert U_f für den Fensterrahmen im Bereich von $\leq$ 1,2 W/(m² K); je kleiner der Anteil des Rahmens, desto geringer ist seine Relevanz. Es sind somit Fensterrahmen aus Holz, Holz/Metall, Kunststoff und thermisch getrennten Metallprofilen möglich.

3.5 Wärmebrücken

Im Kapitel 3.3 sind die Einflüsse auf den Wärmeverlust durch Wärmebrücken bei Bauteilen beschrieben. Diese Verluste werden durch den korrekt ermittelten Bauteil-U-Wert berücksichtigt:

- Inhomogenitäten bei Holzbaukonstruktionen.
- Wärmebrückenverluste bei Befestigungselementen, welche die Wärmedämmung durchdringen, z. B. bei Aussenwänden mit hinterlüfteten Bekleidungen.

Die bei den Bauteilübergängen resultierenden linearen oder punktförmigen Wärmebrückenverluste sind separat zu berücksichtigen.

Wärmebrücken bei Bauteilübergängen

Der Einfluss der Wärmebrücken bei Bauteilübergängen kann gross sein, z. B. etwa 10 % bis 15 % der gesamten Transmissionswärmeverluste. Bei hochwärmegedämmten Bauten gilt es, den Wärmebrückenverlust so weit als möglich zu reduzieren. Die Beurteilung der Wärmebrückenverluste kann mittels Wärmebrückenkataloge erfolgen:

- Wärmebrückenkatalog für Minergie-P-Bauten des BFE, 2008 erschienen, bei Bauteil-U-Werten im Bereich von 0,1 bis 0,12 W/(m² K).
- Wärmebrückenkatalog des BFE, 2002 erschienen, bei Bauteil-U-Werten im Bereich von 0,15 bis 0,14 W/(m² K).
- Checkliste Wärmebrücken der EnFK, bei Bauteil-U-Werten von 0,20 W/(m² K).

Weil das Katalogdetail nie präzise mit dem objektspezifisch entwickelten Detail übereinstimmt und die Katalog-Kennwerte sinnvollerweise eher auf der sicheren Seite sind (höhere Wärmebrückenverluste), besteht ein Anreiz, objektspezifisch korrekte, optimierte Werte aus Wärmebrückenberechnungen zu berücksichtigen.

Wärmebrücken bei Holzbauten

Bezogen auf die äussere Abmessung wird der Wärmebrückenverlust bei Holzbauten in der Regel negativ. Das heisst, dass bei Gebäudekanten (Ecken, Sockel, Dachrand etc.) kein Wärmebrückenverlust zu berücksichtigen ist (Abbildung 3.25). Der Einbau von Fenstern und Türen führt bei Holzbauten aber zu zusätzlichen Wärmebrückenverlusten, die nachzuweisen und zu berücksichtigen sind.

Wärmebrücken bei Mischbauweise

Der Übergang von Holzbauteil zu Holzbauteil lässt sich wärmebrückenfrei konstruieren. Im Übergangsbereich zum Massivbau (z. B. Deckenauflager bei Stahlbeton-Geschossdecken) sind jedoch Wärmebrücken unvermeidbar (Abbildung 3.26).

Wärmebrücken bei Massivbauten

Gegenüber Holzwerkstoffen mit Wärmeleitfähigkeit um 0,13 W/mK führen andere Baustoffe wie Backsteine, Kalksandsteine, Stahlbeton und Metalle zu lokal viel höheren Energieflüssen, wenn sie die Wärmedämmschicht durchdringen. Solche Baustoffe müssen deshalb «umdämmt» oder thermisch getrennt werden.

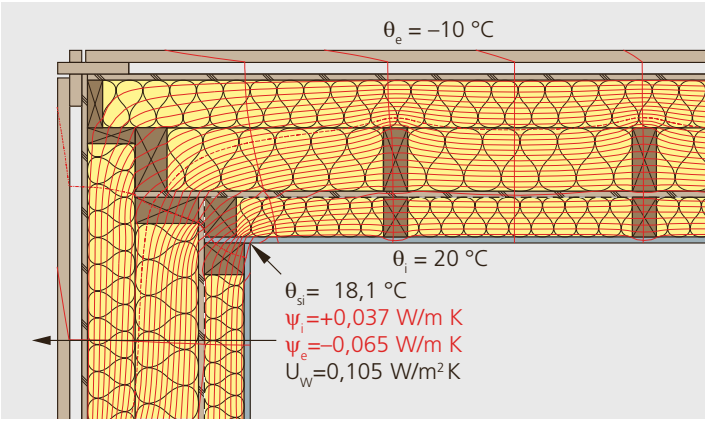


Abbildung 3.25: Beim Zusammenbau von Holzbauteilen führen die geometrie- und materialbedingten Einflüsse zu keinen erhöhten Wärmeflüssen (bezogen auf die Aussenabmessung).

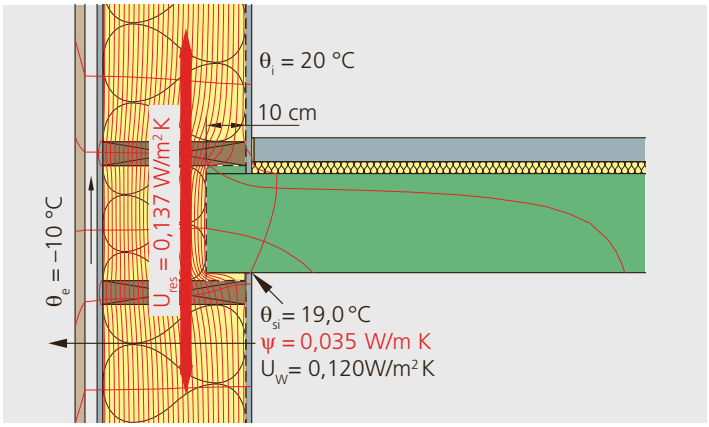


Abbildung 3.26: Beim Hybridbau sind Wärmebrückenverluste über die in das Aussenwandelement hineinragenden Geschossdecken und Trennwände aus Stahlbeton unvermeidbar. Der Wärmebrückeneinfluss des energetisch und schalltechnisch optimierten Details hält sich aber in Grenzen.

Abbildung 3.27: Durch den baulichen Wärme-/Feuchteschutz bei den Aussenwänden gegen Erdreich sind im unbeheizten Untergeschoss auch bei Aussentemperaturen von –10 °C kaum tiefere Raumtemperaturen als etwa 12 °C zu erwarten. Der Wärmebrückenverlust über die Kalksandsteinwand, welche die Wärmedämmschicht durchdringt, ist mit 0,03 W/m K moderat. Wenn die tragende Wand thermisch getrennt aufgelagert werden kann, lässt sich dieser Wärmebrückenverlust auf etwa 0,01 W/m K reduzieren.

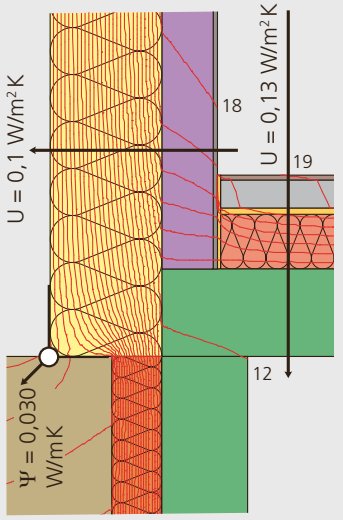
Wärmebrücken beim Sockel

Beim Sockel in Abbildung 3.27 trifft das beheizte Erdgeschoss auf das unbeheizte Untergeschoss. Dieser Bauteilübergang grenzt, je nach Terrainverlauf, gegen Aussenklima und gegen das Erdreich. Als baulicher Wärme- und Feuchteschutz ist es sinnvoll, auch die Wände beim unbeheizten Untergeschoss minimal zu umdämmen (z. B. mit einer etwa 10 cm dicken Perimeterdämmung gegen Erdreich). Dadurch kann der Wärmebrückenverlust trotz Durchdringung der tragenden Aussenwand minimiert werden.

Wenn die Wandscheibe auf ein tragendes, wärmedämmendes Element gestellt werden kann, was bei Betonwänden kaum möglich ist, lässt sich der Wärmebrückenverlust gemäss Detail in Abbildung 3.27 noch um etwa Faktor 3 reduzieren.

Wärmebrücken bei Innenwänden

Wenn Betonwände ohne thermische Trennung (dies ist die Regel) vom beheizten Erdgeschoss in das unbeheizte Untergeschoss führen, sind Wärmebrückenverluste im Bereich von 0,5 bis 0,7 W/m K zu berücksichtigen, je nachdem, wo die Wärmedämmschichten angeordnet werden. Bei Wänden aus Backstein und Kalksandstein reduziert sich der Wärmebrückenverlust ohne thermische Trennung auf etwa 0,2 bis 0,3 W/m K.



	λ [W/m K]
Bodenbelag	0,140
Unterlagsboden	1,500
Trittschalldämmschicht	0,032
Wärmedämmschicht	0,035
Wärmedämmschicht	0,024
Stahlbeton	2,300
Misapor-Beton	0,300
Kalksandstein	1,000
Innenputz	0,700
Erdreich	2,000

Wenn die Erdgeschosswände aus Backstein und Kalksandstein über der Betondecke entkoppelt werden können, ist es ideal, die Wärmedämmung über der Betondecke gegen das unbeheizte Untergeschoss oder gegen Aussenklima anzuordnen (Abbildung 3.28).

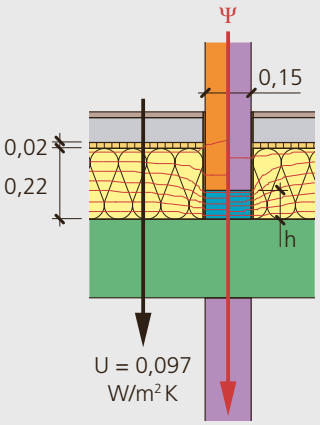
Wärmebrücken beim Dachrand

Wenn Tragbleche beim Dachrand die Wärmedämmung durchdringen, entstehen hohe Wärmebrückenverluste, die durch eine thermisch entkoppelte Montage (3 cm dicker Wärmedämmstoffstreifen zwischen Stahlblech und Deckenstirne) wesentlich reduziert werden können (Abbildung 3.29).

Die in Abbildung 3.30 gezeigte Dachrandausbildung ist weitgehend wärmebrückenfrei. Die Distanzschraube, welche die Wärmedämmung durchdringt, führt zu einem punktförmigen Wärmebrückenverlust von etwa 0,005 W/K, und es sind pro m Dachrand etwa 2,5 Distanzschrauben erforderlich.

Wenn der Dachrand in Form einer Attikabrüstung ausgeführt wird, ist es am effizientesten, die gemauerte oder betonierte Brüstung thermisch zu entkoppeln (Abbil-

Abbildung 3.28: Wenn die Wand von der Stahlbetondecke thermisch getrennt werden kann, ist es optimal, die gesamte Wärmedämmschicht über der Decke anzuordnen. Je höher das thermisch trennende Element und je kleiner dessen Wärmeleitfähigkeit, desto kleiner wird der Wärmebrückenverlust bei diesem Bauteilübergang. In der Praxis bestimmen die statischen Kriterien über die Einsatzmöglichkeit solcher Elemente (z. B. Thermur, Ytong-Thermofuss, Foamglas-Perinsul).



	λ [W/m K]
Bodenbelag	0,140
Unterlagsboden	1,500
Trittschalldämmschicht	0,035
Wärmedämmschicht	0,024
Wärmedämmschicht	0,030
Wärmedämmschicht	0,035
Stahlbeton	2,300
Kalksandstein	1,000
Backstein oder	0,440
Thermische Trennung	variabel

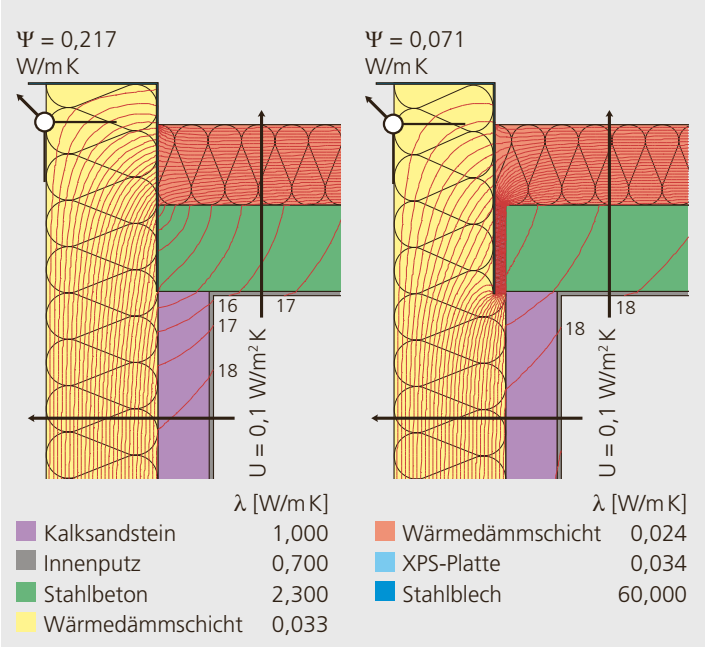
Variante		Backstein Ψ [W/mK]	Kalksandstein Ψ [W/mK]
ohne thermische Trennung:		0,159	0,315
mit thermischer Trennung:			
λ = 0,200 W/m K	h = 90 mm	0,118	0,167
	h = 135 mm	0,104	0,132
λ = 0,160 W/m K	h = 90 mm	0,106	0,146
	h = 140 mm	0,088	0,108
	h = 190 mm	0,074	0,084
λ = 0,058 W/m K	h = 90 mm	0,055	0,070

dung 3.31). Selbst gegenüber einer umdämmten Brüstung kann so der Wärmebrückenverlust in etwa halbiert werden. Ohne spezielle Massnahmen entspricht der hohe Wärmebrückenverlust von 0,252 W/m K in etwa dem Wärmeverlust durch eine geschosshohe, 1 m lange Wand mit einem U-Wert von 0,1 W/(m² K).

Wärmebrücken beim Balkon

Thermisch optimal, weil wärmebrückenfrei, sind separat abgestützte Balkone mit durchgehend verlegter Aussenwärmedämmung zwischen Aussenwand und Balkonplatte. Wenn das Baugesetz dies nicht erlaubt – etwa weil die Balkone über die Baulinie hinausragen – bleibt quasi nur der Anschluss mit Kragplatten. In diesem Fall beschränkt sich der Optimierungsspielraum auf die Güte des Anschlusselements. Variiert werden kann beispielsweise die Qualität des Stahls oder es können Elemente mit faserverstärkten Kunststoffen eingesetzt werden. Realistisch ist für konventionelle Kragplattenanschlüsse ein ψ-Wert um etwa 0,3 W/m K.
Wenn die Balkonplatte aus statischen Überlegungen nicht getrennt werden kann, ist diese zu umdämmen, was baukonstruktiv aufwendig ist und bei einer 6 cm dicken Umdämmung (oben, unten und an der Balkonplattenstirne) zu einem Wärmebrückenverlust von etwa 0,45 W/m K führt.

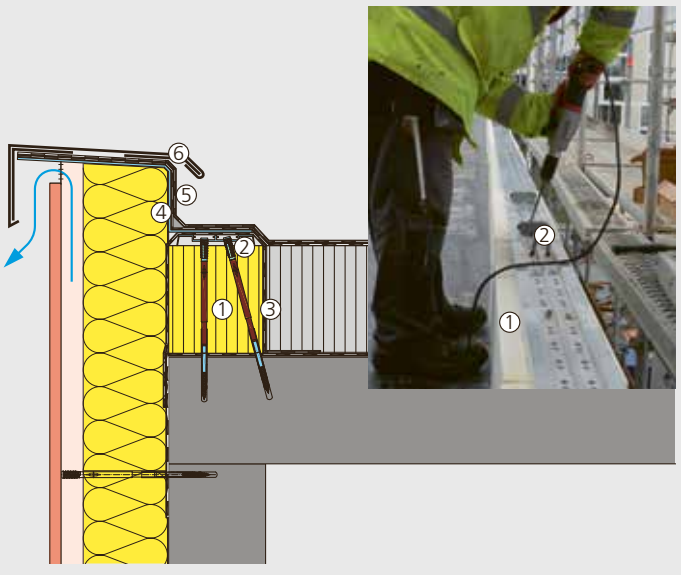
Abbildung 3.29: Durchgehende Tragbleche aus Stahlblech führen beim Dachrand zu hohen Wärmebrückenverlusten. Diese können durch eine thermische Trennung mit einer 3 cm dicken druckfesten XPS-Platte um Faktor 3 reduziert werden.



Wärmebrücken beim Fenstereinbau

Der Fenstereinau führt immer zu relevanten Wärmebrückenverlusten, sowohl beim Massiv- als auch beim Holzbau. Stellvertretend auch für die Wärmebrückenverluste beim Fenstereinbau im Brüstungs- beziehungsweise Schwellenbereich und beim Sturz (wo noch weitere Einflussfaktoren wie z. B. die Sturznische dazukommen) wird im Folgenden nur auf den seitlichen Fensteranschluss in die Aussenwand eingegangen.
Den Einfluss des Fenstereinbaus zeigt die Abbildung 3.32 für den Holzrahmenbau und die Aussenwärmedämmung verputzt (sinngemäss auch mit hinterlüfteter Bekleidung). Es wurde ein Fenster berücksichtigt, das zu einem minimalen Wärmebrückenverlust beim Einbau führt. Bei Holz-Metall- oder Metallfenstern wäre der Wärmebrückenverlust noch bedeutend höher. Der seitliche Fensteranschlag führt dann zum kleinsten Wärmeverlust und somit

Abbildung 3.30: Die Firma Rogger bietet eine Befestigungsschiene an, die mit Distanzschrauben durch die Wärmedämmschicht hindurch in den Verankerungsgrund befestigt wird. Durch die Befestigung des Tragblechs auf der Befestigungsschiene kann ein weitgehend wärmebrückenfreier Dachrand realisiert werden.

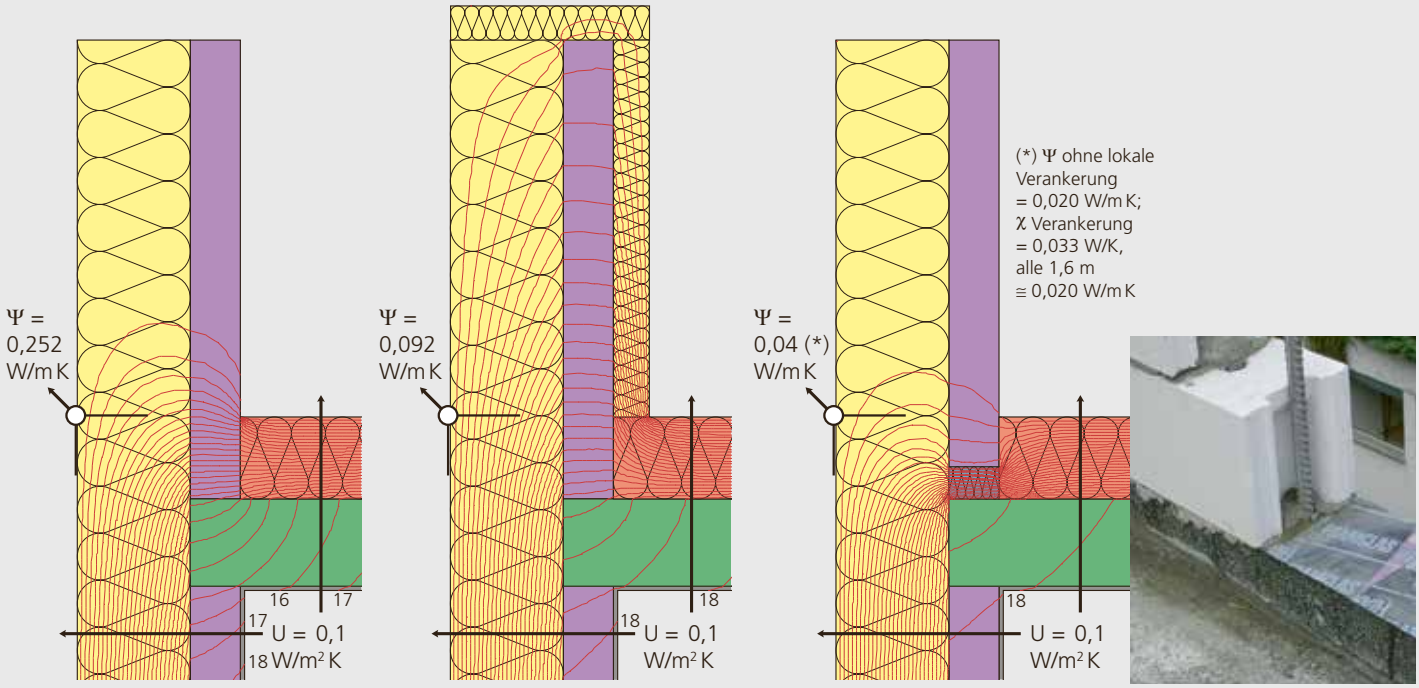


1 Wärmedämmstreifen
2 Befestigungsschiene, mit Distanzschrauben im Verankerungsgrund befestigt
3 Bauzeitabdichtung
4 Dachzarge, in Befestigungsschiene verankert
5 Flachdachabdichtung
6 Einhängestreifen und Brüstungsabdeckung

auch zum kleinsten Wärmebrückenverlust für den Einbau des Fensters, wenn dieses im Mittenbereich der Holzbaukonstruktion beziehungsweise im inneren Bereich der Aussenwärmedämmung von massiven Aussenwänden angeschlagen wird (ψ_E = 0,097 bzw. 0,049 W/m K). Beim Holzbau wird der Wärmebrückenverlust deshalb grösser als beim Massivbau, weil der statisch-konstruktiv erforderliche Holzrahmen im Laibungsbereich den Wärmebrückenverlust beeinflusst. Beim ganz aussen angeschlagenen Fenster sind die Energieverluste am grössten, wobei sich dies wegen der veränderten Bezugsebenen nicht zwangsläufig im ψ_E-Wert manifestiert. Auch das ganz innen angeschlagene Fenster ist energetisch ungünstiger als das im Mittenbereich angeordnete Fenster. Diese Anschlagsart führt jedoch zu einem kleineren Wärmeverlust als das ganz aussen angeschlagene Fenster, zudem sind die raumseitigen Oberflächentemperaturen bei dieser Detailausbildung maximal hoch.

Weil die Differenzen bei den Wärmebrückenverlusten abhängig vom Fensterrahmen und der Anschlagsituation sehr gross sein können, sollten die effektiven Wärmebrückenverluste bei hochgedämmten Gebäuden jeweils objektspezifisch rechnerisch ermittelt werden.

Abbildung 3.31: Selbst eine überdämmte Attikabrüstung verursacht noch eher hohe Wärmebrückenverluste. Optimal ist es, die Brüstung auf ein Wärmedämm-Element zu stellen und dadurch thermisch von der Stahlbetondecke zu entkoppeln.



Thermische Entkoppelung der Brüstung aus Kalksandsteinmauerwerk.

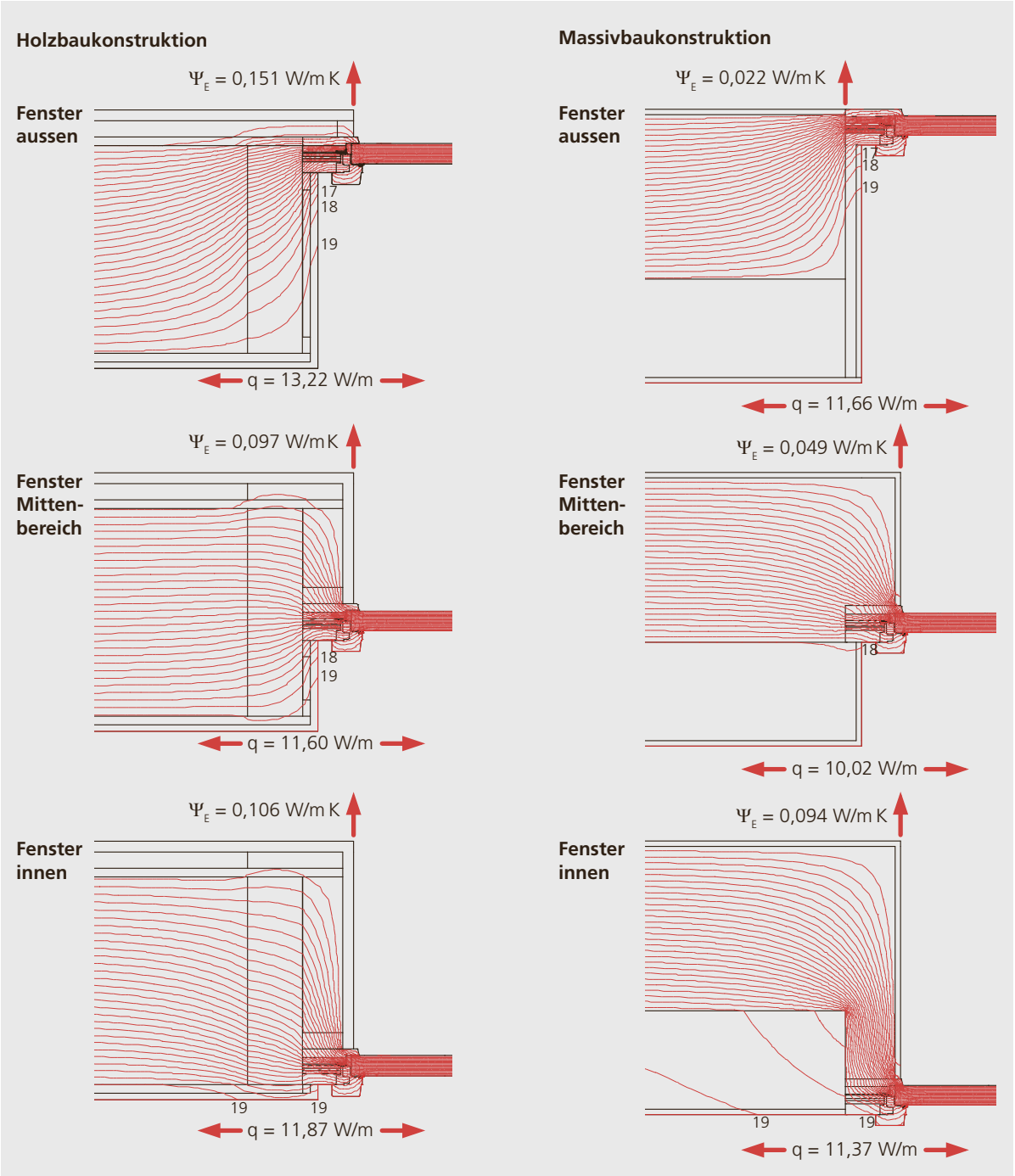


Abbildung 3.32: Wärmebrückenverlust Ψ_E beim seitlichen Fensteranschlag und Wärmeverlust q über den gesamten Detailperimeter (Wand mit $U = 0{,}1$ W/m² K; Fensterrahmen mit $U_f = 0{,}91$ W/m² K; Glas mit $U_g = 0{,}5$ W/m² K und $\Psi_g = 0{,}05$ W/m K). Der Fenstereinbau im Mittenbereich führt zu den kleinsten Energieverlusten. Der Fenstereinbau ganz innen zu maximal hohen inneren Oberflächentemperaturen. Beim ganz aussen angeschlagenen Fenster sind die Energieverluste am grössten, wobei sich dies wegen der veränderten Bezugsebenen nicht zwangsläufig im Ψ_E-Wert manifestiert.

Kapitel 4

Gebäudetechnik

Heinrich Huber

4.1 Gesetzliche Vorgaben

Die Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich, MuKEn 2014, stellen «Anforderungen an die Deckung des Wärmebedarfes von Neubauten». Danach darf der gewichtete Endenergiebedarf für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Klimatisierung 35 kWh/m² pro Jahr nicht übersteigen (Wohnbauten, Tabelle 4.1). Dazu drei wichtige Punkte:

- Von diesen Anforderungen befreit sind Erweiterungen von bestehenden Gebäuden, wenn die neu erstellte Energiebezugsfläche weniger als 50 m² oder höchstens 20 % der Energiebezugsfläche der bestehenden Substanz und weniger als 1000 m² beträgt.
- Elektrizität aus Eigenstromerzeugung ist nicht anrechenbar. Eine Ausnahme bildet Strom aus Wärmekraftkopplungsanlagen.
- Diese Anforderung ist deshalb für die Gebäudetechnik eines neuen Gebäudes relevant, weil die wirtschaftlichsten Lösungen nur in Verbindung mit Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien möglich sind. Diese Vorgaben stehen für die integrale Planung, in der die Bausubstanz und die Haustechnik ein Gesamtsystem bilden.

Die MuKEn 2014 bieten für die beiden Gebäudekategorien Wohnen MFH und Wohnen EFH sechs Standardlösungskombinationen an, um den Nachweis des Energiebedarfs für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Klimatisierung zu führen (Tabelle 4.2). In Tabelle 4.3 sind Werte enthalten, um die Wirkung von Massnahmen abzuschätzen.

Tabelle 4.1 Grenzwerte für den Energiebedarf von Neubauten gemäss den Mustervorschriften der Kantone (MuKEn 2014) lassen sich durch Kombinationen von baulichen und haustechnischen Massnahmen erfüllen.

Energiebedarf für Heizung, Warmwasser, Lüftung, Klimatisierung von Neubauten (MuKEn 2014)

Gebäudekategorie	Nutzung	Grenzwerte für Neubauten (Energiebedarf Wärme)
I	Wohnen MFH	35 kWh/m²
II	Wohnen EFH	35 kWh/m²
III	Verwaltung	40 kWh/m²
IV	Schulen	35 kWh/m²
VII	Versammlungslokale	40 kWh/m²

Tabelle 4.2: Standardlösungskombinationen für Neubauten nach MuKEn 2014.

Kombinationen von baulichen und haustechnischen Massnahmen

SLK	Baulich-haustechnische Bedingungen	Wärmeerzeugung
1	Opake Bauteile gegen aussen: 0,17 W/(m² K); Fenster: 1,0 W/(m² K); Wohnungslüftung	Elektro-Wärmepumpe; automatische Holzfeuerung; Fernwärme aus KVA, ARA oder erneuerbaren Energien
2	Opake Bauteile gegen aussen: 0,17 W/(m² K); Fenster: 1,0 W/(m² K); thermische Solaranlage mindestens 2 % der EBF	Elektro-Wärmepumpe; automatische Holzfeuerung; Fernwärme aus KVA, ARA oder erneuerbaren Energien; Stückholzfeuerung
3	Opake Bauteile gegen aussen: 0,15 W/(m² K); Fenster: 1,0 W/(m² K)	Elektro-Wärmepumpe Erdsonde oder Wasser; automatische Holzfeuerung; Fernwärme aus KVA, ARA oder erneuerbaren Energien
4	Opake Bauteile gegen aussen: 0,15 W/(m² K); Fenster: 0,8 W/(m² K)	Elektro-Wärmepumpe; automatische Holzfeuerung; Fernwärme aus KVA, ARA oder erneuerbaren Energien
5	Opake Bauteile gegen aussen: 0,15 W/(m² K); Fenster: 1,0 W/(m² K); Wohnungslüftung; thermische Solaranlage mindestens 2 % EBF	Elektro- oder Gas-Wärmepumpe; automatische Holzfeuerung; Fernwärme aus KVA, ARA oder erneuerbaren Energien; Stückholzfeuerung
6	Opake Bauteile gegen aussen: 0,15 W/(m² K); Fenster: 0,8 W/(m² K); Wohnungslüftung; thermische Solaranlage mindestens 7 % EBF	Elektro- oder Gas-Wärmepumpe; automatische Holzfeuerung; Fernwärme aus KVA, ARA oder erneuerbaren Energien; Stückholzfeuerung; fossiler Wärmeerzeuger

SLK: Standardlösungskombinationen
SLK 6: Thermische Solaranlage für Heizung und Warmwasser
Elektrowärmepumpe: Quelle Erdsonde, Wasser oder Aussenluft

MuKEn-Anforderung: Abschätzung des Energiebedarfs und der Wirkung von Massnahmen					
Gebäudehüllzahl	0,6	1,2	1,8	siehe Abbildung 2.1, S. 41	
Bedarf Heizen	23,6	32,2	42,8		
Bedarf Wassererwärmung	21	21	21		
Wärmebedarf (100 %)	44,6	53,2	63,8		
Grenzwert MuKEn 2014	35			**Werte in kWh/(m² a)**	
Maximal zulässiger Anteil nicht erneuerbarer Energie	78 %	66 %	55 %		
Minimal notwendiger zu deckender Anteil nicht erneuerbarer Energie	9,6	18,2	28,8		
Reduktion durch SLK: U-Werte in W/(m² K)	**Wirkung auf Heizwärmebedarf** Werte in kWh/(m² a)			**Wirkung auf WW-Bedarf** Werte in kWh/(m² a)	
Massnahmen an der Gebäudehülle (U-Werte Fenster/Aussenwand/Dach)					
SLK 1 + 2 (1,0/0,17/0,17)	3	2	2		
SLK 3 + 5 (1,0/0,15/0,15)	4	4	3		
SLK 4 + 6 (0,8/0,15/0,15)	6	7	7		
Superdämmung (0,8/0,1/0,1)	7	10	13		
Massnahmen an der Gebäudetechnik				**Ohne SoKo**	**Mit SoKo**
Wohnungslüftung 80 %	9	9	9	–	–
WP Luft-Wasser 50 °C	6	9	11	4	12
WP Erdwärmesonden 50 °C	9	12	16	4	12
WP Luft-Wasser 35 °C	10	15	19	4	12
WP Erdwärmesonden 35 °C	13	19	24	4	12
Fernwärme	8	13	17	8	14
Pelletsheizung	8	13	17	9	14
Stückholzheizung	8	11	14	7	13
Fossile Heizung	– 4	– 6	– 8	– 4	8
Thermische Solaranlage				10	
Photovoltaikanlage (Spitzenleistung pro m² Energiebezugsfläche)				Der Ertrag einer PV-Anlage ist für die Deckung des Wärmebedarfs nicht anrechenbar.	
5 Wp/m²	10 kWh/(m² a)				
10 Wp/m²	20 kWh/(m² a)				
20 Wp/m²	40 kWh/(m² a)				
30 Wp/m²	60 kWh/(m² a)				

Anmerkungen
Quelle: EnFK, Arbeitsgruppe MuKEN 2014, Olivier Brenner
Die Tabelle erlaubt eine grobe Abschätzung der Deckung des Wärmebedarfs von Neubauten. Für detaillierte Schätzungen wird das Berechnungstool EN-101c empfohlen (siehe «Vereinfacher Nachweis»).
Die Zahlen in kWh/(m² a) zu den «Massnahmen an der Gebäudetechnik» beziffern die Reduktion des Anteils nicht erneuerbarer Energie.
Gebäudehüllzahl: Verhältnis von thermisch relevanter Gebäudehüllfläche zu Energiebezugsfläche.
Die Zahlen basieren auf Klimadaten für das Mittelland (SMA Zürich) sowie üblichen Nutzungsgraden und Jahresarbeitszahlen (JAZ).
Bedarf für Wassererwärmung: Entspricht Standardnutzung nach SIA 380/1 für Mehrfamilienhäuser.
Grenzwert MuKEn 2014 Endenergiebedarf für Heizen, Warmwasser, Lüften und Klimatisierung.
SLK: Standardlösungskombinationen nach MuKEn 2014. U-Werte in W/(m² K)
Wohnungslüftung 80 %: Wärmerückgewinnung von 80 %
WP: Wärmepumpe; 50 °C: Heizungsvorlauftemperatur 50 °C; 35 °C: Heizungsvorlauftemperatur 35 °C
SoKo: Sonnenkollektoren (thermisch)
Die Richtwerte berücksichtigen die nationalen Gewichtungsfaktoren für Endenergie: fossile Energien 1; elektrische Energie 2; Biomasse 0,5; Fernwärme 0,6 (Anteil fossil erzeugter Wärme unter 50 %).
Ablesebeispiel Seite 101

Tabelle 4.3: Wirkung von Massnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs für Wärme von Neubauten in kWh/(m² a) am Beispiel eines Mehrfamilienhauses unterschiedlicher Kompaktheit (Zwischenwerte interpolieren).

Ablesebeispiel zu Tabelle 4.3
Ein Mehrfamilienhaus mit der Gebäudehüllzahl von 1,2 weist ein Manko bei der Deckung des Energiebedarfs für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Klimatisierung von 18,2 kWh/m^2 auf. Eine Wärmepumpe, die über eine Erdwärmesonde alimentiert und mit einer Vorlauftemperatur von 35 °C betrieben wird, würde dieses Manko um 19 kWh/m^2 reduzieren. Alternativ dazu könnten die Massnahmen an der Gebäudehülle entsprechend der Standardlösungskombinationen (SLK) 4 und 6 sowie die gleiche Erdsonden-Wärmepumpe, aber mit einer Vorlauftemperatur von 50 °C (Radiatorheizung) gewählt werden (Reduktion um 7 kWh/m^2 respektive um 12 kWh/m^2).

Vereinfachter Nachweis
Die Konferenz der Energiedirektoren (EnDK) bietet auf ihrer Website einen vereinfachten Energienachweis samt einer Anleitung an (www.endk.ch → Fachleute → Energienachweis → EN-101 bis EN-141). Der Nachweis bezieht sich auf den Endenergiebedarf zur Deckung des Wärmebedarfs von Neubauten, basierend auf dem Grenzwert von 35 kWh/m^2, sowie auf den winterlichen und sommerlichen Wärmeschutz. Es handelt sich dabei um Formulare respektive um ein Nachweistool für einfache Bauten (ENteb) unter dem Kürzel EN-101c. Es sind nur wenige Eingaben nötig. Unterlegt sind die Formulare EN-101, EN-102 und EN-104. Ziel ist in erster Linie die Vereinfachung des Nachweisverfahrens. Aber nicht nur, denn das Tool soll auch die energierelevanten Zusammenhänge zwischen der Gebäudehülle und der Gebäudetechnik aufzeigen, wie in der Tabelle 4.3 aufgezeigt. Zudem lässt sich ein Projekt in einem sehr frühen Stadium plausibilisieren. Die Variation der Eckdaten erlaubt eine einfache Optimierung. Zulässig ist der Nachweis nur für Wohnbauten der Gebäudekategorien EFH und MFH. Zur Konzeption der gebäudetechnischen Anlagen sind die Standardlösungskombinationen (SLK) nach MuKEn 2014 entscheidend; auch diese SLK sind im Tool abgebildet.

4.2 Heizung und Warmwasser

Tiefe Temperaturen – hohe Effizienz
Praktisch jede Art von Wärmeerzeugung arbeitet umso effizienter, je tiefer die Heizmediumtemperatur ist. Sehr ausgeprägt ist dieser Zusammenhang bei Wärmepumpen. Wenn die Vorlauftemperatur z. B. von 50 °C (max. zulässiger Wert im Betrieb von neuen Heizkörpern) auf 35 °C (max. zulässiger Wert bei der Versorgung von neuen Fussbodenheizungen) sinkt, verbessert sich die Jahresarbeitszahl einer Luft-Wasser-Wärmepumpe um gut 30 % respektive der Stromverbrauch sinkt um rund einen Drittel. Bei thermischen Solaranlagen steigt der Ertrag mit sinkender Nutztemperatur. Selbst bei neuen Heizkesseln wirken sich tiefe Heizmediumtemperaturen positiv aus: Je tiefer die Rücklauftemperatur ist, umso mehr Wasser kondensiert aus dem Abgas aus, was zu einem höheren Wirkungsgrad führt.

Konzepte
In diesem Abschnitt finden sich Empfehlungen für Wärmeversorgungskonzepte von kleineren und mittleren Wohnhäusern. Die Konzepte lassen sich teilweise auch auf kleinere und mittlere Bürogebäude und Schulhäuser übertragen. Behandelt sind nur die häufigsten Wärmeerzeugungen:
- Luft-Wasser-Wärmepumpe
- Sole-Wasser-Wärmepumpe, als Wärmequelle dient in der Regel eine Erdwärmesonde.
- Holzheizung: darunter fallen Pellet, Stückholz und Hackschnitzel.
- Thermische Solaranlagen für Heizungsunterstützung und Wassererwärmung

Nicht behandelt sind:
- Fossil befeuerte Heizkessel, da diese höchstens noch als Spitzendeckung bei Modernisierungen eingesetzt werden sollen.
- Wärmekraftkopplung, da diese Technik eher bei grossen Wärmeverbrauchern zum Einsatz kommt.

Wärmeversorgung und Gebäude
Für drei verschiedene Wärmedämmstandards werden Kombinationen mit verschiedenen Wärmeversorgungen dargestellt. Die Werte für den Heizwärmebedarf gelten für Wohngebäude im schweizerischen Mittelland mit einer Gebäudehüllzahl von ca. 1,2 (mittleres MFH) bis etwa 2,2 (Reihen-EFH, kompaktes EFH).

Grundkonzepte der Wärmeverteilung
Wasserheizung mit Heizkörpern
Ein Wasserkreislauf versorgt die Heizkörper in den einzelnen Räumen mit Wärme. Bei neuen Anlagen liegt die Vorlauf-Temperatur (VL) zwischen 40 °C und 50 °C. Die VL-Temperatur ist in der Regel witterungsgeführt. Die einzelnen Heizkörper sind zumeist mit Thermostatventilen ausgerüstet. Die Vorteile dieses Anlagetyps sind:
- In den einzelnen Räumen kann die Temperatur individuell eingestellt und geregelt werden.
- Die Wärmeabgabe ist rasch veränderbar.

Nachteilig sind folgende Merkmale:
- Für Gebäude mit einem sehr tiefen Heizleistungsbedarf ist die Wärmeverteilung relativ aufwendig und damit spezifisch teuer (grosse Investition pro Watt Wärmeleistung).
- Heizkörper können die Möblierung einschränken und sind teilweise aus ästhetischen Gründen unbeliebt.
- Die relativ hohen VL-Tempaturen wirken sich negativ auf Arbeitszahlen von Wärmepumpen aus.

Wasserheizung mit Fussbodenheizung oder thermoaktiven Bauteilen (TABS)
Die grossflächige Wärmeabgabe erlaubt tiefe Vorlauftemperaturen. Bei neuen, gut wärmegedämmten Gebäuden liegen die Werte im Bereich von 30 °C bis maximal 35 °C. Bei TABS sind noch tiefere Vorlauftemperaturen möglich. In Einfamilienhäusern wird anstelle der Vorlauftemperatur oft die Rücklauftemperatur geregelt. Die Vorteile dieses Anlagetyps sind:
- Die tiefen Vorlauftemperaturen bieten eine gute Voraussetzung für den Einsatz von Wärmepumpen.
- Bei Vorlauftemperaturen von 30 °C und tiefer ist der Selbstregeleffekt in der Regel wirksam, womit auf eine Einzelraumregelung verzichtet werden kann.

Einschränkend oder nachteilig sind folgende Merkmale:
- Die Wärmeabgabeleistung ist begrenzt (z. B. rund 30 W pro m² Bodenfläche bei einer Vorlauftemperatur von 30 °C).
- Durch die hohe Wärmekapazität des Bodenaufbaus reagiert die Wärmeabgabe träge.
- Bei Fussbodenheizungen wird ein Teil der Wärme nach unten abgegeben. Dies

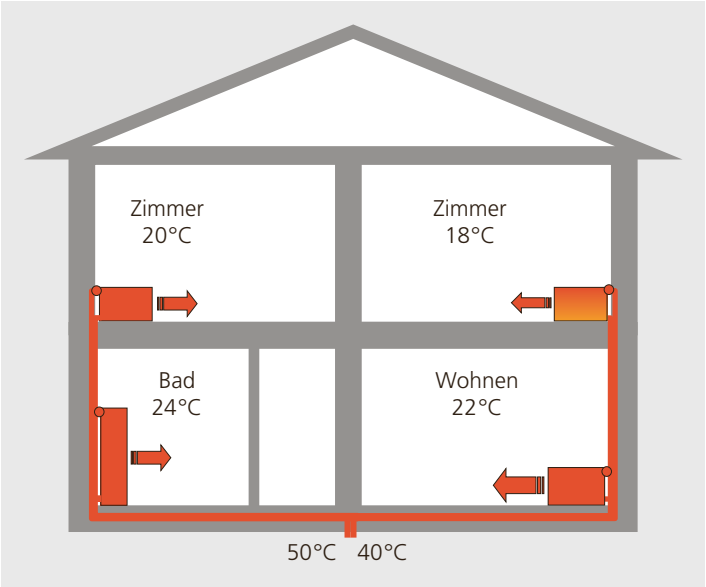


Abbildung 4.1: Prinzip Wasserheizung mit Heizkörpern.

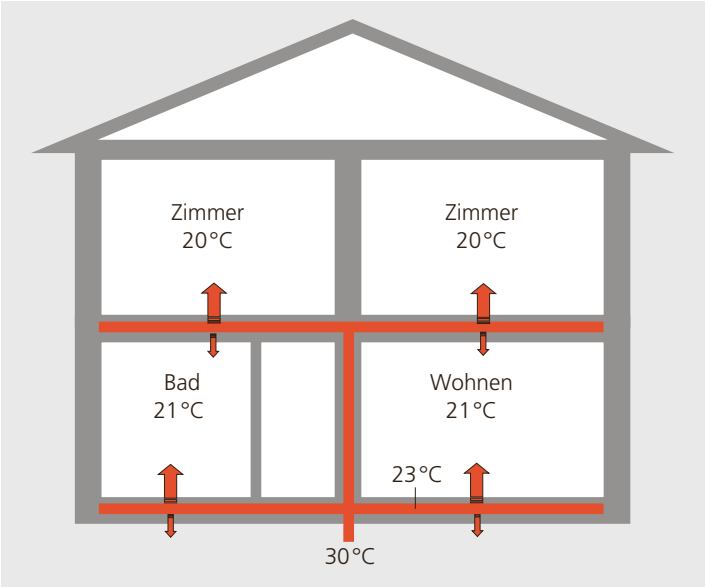


Abbildung 4.2: Prinzip Wasserheizung mit Fussbodenheizung oder TABS.

ist ein Nachteil, wenn diese Räume zu einer anderen Nutzungseinheit oder zum Keller gehören.

- Bei Gebäuden mit tiefem Heizleistungsbedarf ist die Oberflächentemperatur der Heizfläche nicht spürbar warm. Benutzer können beim Berühren der Heizfläche den Eindruck erhalten, dass die Heizung nicht in Betrieb sei.

Heizen mit Zuluft

Bei Gebäuden mit einem spezifischen Heizleistungsbedarf von maximal 10 W/m^2 kann die Heizwärme über eine mechanische Lüftungsanlage verteilt werden. Die Raumtemperatur wird typischerweise über einen Referenzraum geregelt. Der Vorteil dieser Lösung ist:

- Eine vorhandene einfache Lüftungsanlage kann mit wenigen Zusatzausrüstungen auch eine Heizfunktion übernehmen.

Einschränkend und nachteilig sind:

- Einzelraumregelungen werden aus Kostengründen meist nicht realisiert. Dadurch ist keine individuell einstellbare Raumtemperatur möglich.
- Bei exponierten Räumen, wie Eckzimmern, kann der zum Heizen benötigte Zuluftvolumenstrom über dem hygienisch angemessenen Zuluftvolumenstrom liegen, auch wenn der Heizleistungsbedarf im Mittel (d. h. über die gesamte Wohnung) unter 10 W/m^2 liegt.
- Die Wärmeerzeugung gibt die produzierte Wärme typischerweise auf einem höheren Temperaturniveau ab als bei einer Wärmeverteilung mit Wasser. Dementsprechend reduziert sich bei Wärmepumpen die Arbeitszahl.
- In Bad und WC wird meist keine Zuluft zugeführt. Bei Gebäuden mit Luftheizung sollen diese Räume daher im Zentrum liegen.

Ofen mit freier Wärmeverteilung

Ein zentraler Ofen (z. B. Kachelofen oder Pelletofen) steht typischerweise im Wohnzimmer. Die Wärme wird über Strahlung und natürliche Luftströmungen verteilt. In Niedrigenergiehäusern kann ein Ofen als Ganzhausheizung eingesetzt werden. Durch bauliche und betriebliche Massnahmen muss dafür gesorgt werden, dass sich die Wärme in alle Räume verteilt.

Ortsfeste Öfen können so konstruiert werden, dass sie Heizflächen zu mehreren Räumen aufweisen. Bei sogenannten Satelliten-Öfen werden die Heizflächen auf zwei Geschossen platziert. Die Vorteile dieser Lösung sind:

- Holzöfen sind beliebte Wärmeerzeuger.
- Einfache Anlage
- Frostsichere Anlage

Abbildung 4.3: Prinzip Heizung mit Zuluft.

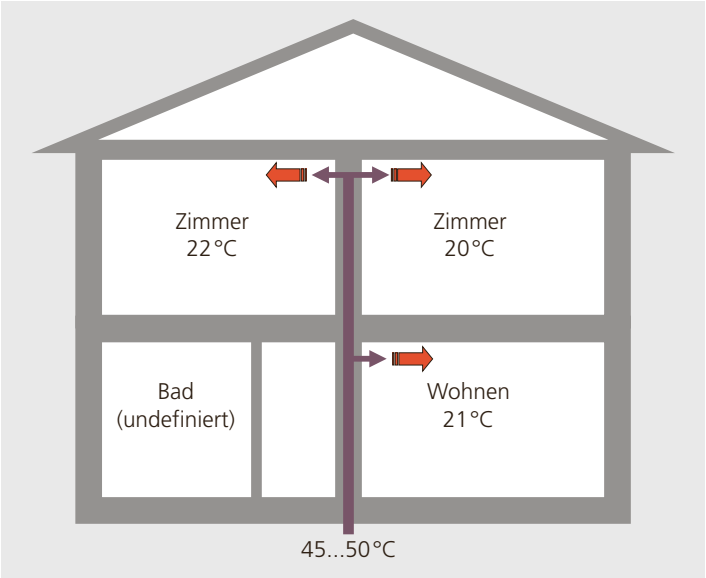
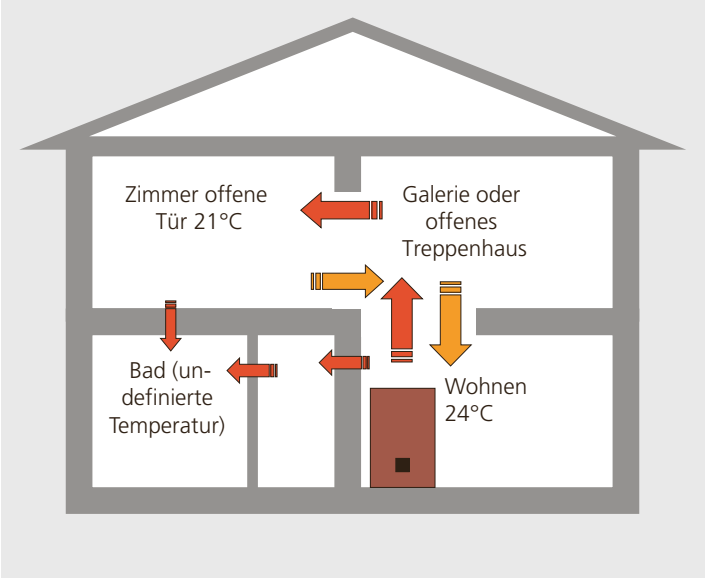


Abbildung 4.4: Prinzip Ofen mit freier Wärmeverteilung.



Einschränkend oder nachteilig sind folgende Merkmale:

- Die zeitliche und räumlichen Temperaturunterschiede sowie der Arbeitsaufwand müssen von den Benutzern akzeptiert werden.
- Für die Wärmeverteilung müssen die Zimmertüren offen stehen.

Mischsysteme

Bei Anlagen für Gebäude mit tiefem Heizwärmebedarf können Wärmeerzeuger eingesetzt werden, die einen Teil der produzierten Wärme an eine Wasserheizung abgeben. Beispiele sind Wärmepumpen-Kompaktgeräte mit kombinierter Wärmeabgabe an Luft und Wasser oder Öfen mit Absorbertechnik. Bei der Absorbertechnik wird die Speichmasse eines Ofens mit Absorbern (gleiche Konstruktion wie Sonnenkollektoren) umgeben. Damit kann bis zu 70 % der Wärmeabgabe an ein wasserführendes System abgegeben werden. Ein Vorteil der Absorbertechnik ist die einfache hydraulische Einbindung.

Kombinationen von Energiestandards und Heizsystemen

Tabelle 4.4 zeigt, bei welcher Kombination von Wärmedämmstandard und Wärmeverteilung welche Wärmeversorgung empfohlen wird. Folgende Punkte sind zu beachten:

- Bei den Varianten mit Holzheizung sollte eine thermische Solaranlage eingesetzt werden, die mindestens 60 % des jährlichen Warmwasser-Wärmebedarfs deckt. Der Grund ist, dass die Holzheizung im Sommer ausgeschaltet werden soll, da Wirkungsgrad und Schadstoffemissionen bei Holzfeuerungen in Teillast ungünstig sind. Falls Platz für einen genügend grossen Speicher vorhanden ist, soll die Solaranlage so ausgelegt werden, dass sie zusätzlich 10 % bis 20 % des Heizwärmebedarfs deckt. Wenn keine thermische Solaranlage möglich ist, kann zur Wassererwärmung auch eine separate Warmwasser-Wärmepumpe (WP-Boiler oder Abluft-WP) eingesetzt werden.
- Bei der Variante Minergie-P ist der Wärmebedarf so gering, dass ein Anschluss an ein allfälliges Fernwärmenetz gut überlegt werden muss. Bei grossen Gebäuden im städtischen Raum kann die Wärmebezugsdichte allenfalls genügend hoch sein, dass sich ein Anschluss ökonomisch vertreten lässt. Bei kleinen Objekten dürfte eine eigene Wärmeerzeugung angemessen sein.

Tiefe Vorlauftemperaturen und Selbstregeleffekt

Eine tiefe Vorlauftemperatur ist der Schlüssel zu einer effizienten Wärmeversorgung. Zudem kommt bei Vorlauftemperaturen von 30 °C und tiefer der Selbstregeleffekt zum Tragen. Dann liegt die Oberflächentemperatur des Fussbodens nur etwa 2 K über der Raumtemperatur. Wenn nun z. B. wegen Sonneneinstrahlung die Raumtemperatur von 20 °C auf 22 °C steigt, gibt der Fussboden keine Wärme mehr an den Raum ab. Da diese Anpassung ohne tech-

Wärmedämmstandard → Wärmeverteilung	Neubau MuKEn 2014 oder Minergie	Neubau Minergie-P
Wasserheizung mit Heizkörpern	Auslegung auf VL ≤ 45 °C. Geeignet für Holzheizung, Fernwärme und Sole-Wasser-WP.	Auslegung auf VL ≤ 40 °C. Geeignet für Holzheizung und Sole-Wasser-WP.
Fussbodenheizung oder TABS	Auslegung auf VL ≤ 35 °C. Gut geeignet für alle Wärmeerzeuger.	Auslegung auf VL ≤ 30 °C. Sehr gut geeignet für alle Wärmeerzeuger.
Heizen mit Zuluft	Ungeeignet	Geeignet bei einer Heizleistung von maximal 10 W/m^2. In Kombination mit Abluft-Wärmepumpe für Heizung und Wassererwärmung.
Ofen mit freier Wärmeverteilung	Ungeeignet für MFH. Bei Kombination mit thermischer Solaranlage geeignet für kompakte EFH.	Ungeeignet für MFH. Bei Kombination mit thermischer Solaranlage geeignet für EFH.

Tabelle 4.4: Empfehlungen für die Kombinationen von Wärmedämmstandards und Heizungsanlage.

nische Regeleinrichtungen erfolgt, wird vom Selbstregeleffekt gesprochen.
Die Energievorschriften verlangen bei Vorlauftemperaturen ≤ 30 °C keine technische Einzelraumregelung. Dies führt zu hydraulisch einfachen und zuverlässigen Anlagen. Eine Regelung kann trotzdem sinnvoll sein, bei gut gedämmten Bauten z. B. nach einem Pilotraum.

Spezifische Heizleistung

Um praktikable Verlegeabstände zu ermöglichen, sollte der spezifische Heizleistungsbedarf im ungünstigsten Zimmer nicht über 30 W/m² liegen. Bei kleinen Flächen, wie Bäder, können allenfalls Verlegeabstände von 10 cm oder weniger realisiert werden (Tabelle 4.5).

Beispiel

Eine Attikawohnung eines Mehrfamilienhauses hat ein 30 m² grosses Wohnzimmer mit Daten gemäss Tabelle 4.6. Bei guten Fenstern mit Dreifachverglasung lässt sich ein Fenster-U-Wert von 0,9 W/m² erreichen. Damit ergibt sich ein spezifischer Heizleistungsbedarf von 27 W/m² und die angestrebte Vorlauftemperatur von 30 °C ist problemlos realisierbar. Bei geringer Dämmung oder schlechteren Fenstern (U-Wert: 1,3 W/(m² K)) beträgt der Heizleistungsbedarf 35 W/m². Eine Vorlauftemperatur von 30 °C würde nicht genügen.

Merkpunkte für Vorlauftemperaturen von maximal 30 °C

- Maximaler Heizleistungsbedarf (bezogen auf nutzbare Bodenfläche): 30 W/m²
- Allenfalls U-Wert der Fenster optimieren
- Allenfalls bei Fenstern, die nicht nach Süden ausgerichtet sind, die Grössen prüfen (z. B. Brüstungen in Schlafzimmern)

Tabelle 4.5: Typische spezifische Heizleistung (bezogen auf die Bodenfläche) einer Fussbodenheizung bei einem Parkettbelag, Vorlauftemperatur 30 °C, Rücklauftemperatur 26 °C.

Verlegeabstand	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
Spezifische Heizleistung	35 W/m²	33 W/m²	30 W/m²	28 W/m²

Warmwasser: Verteilverluste minimieren

Die Wärmeverluste von Warmwasseranlagen können in einem Bereich von etwa 20 % bis 60 % liegen. Ein wesentlicher Grund für diese grosse Spanne sind die teilweise hohen Verteilverluste. Bei Niedrigstenergie-Wohngebäuden, wie z. B. Minergie-P, ist der Warmwasserbedarf etwa gleich gross wie der Heizwärmebedarf. Warmwasserverluste haben bei diesen Gebäuden einen mindestens so grossen Einfluss wie Wärmebrücken. Das bedeutet auch, dass den Warmwasserverlusten in der Planung und Ausführung mindestens eine gleiche grosse Bedeutung zukommen soll wie Wärmebrücken.
Warmwasserverluste werden vor allem in der ersten Planungsphase beeinflusst. Die Verluste werden durch folgende Massnahmen gering gehalten:

- Im Grundriss sollen die Zapfstellen um die Steigzonen herum konzentriert werden.
- Bei Einfamilienhäusern soll auf eine Zirkulation oder auf Begleitbandheizungen verzichtet werden.
- Bei Mehrfamilienhäusern sind Zirkulationssysteme gegenüber elektrischen Begleitbandheizungen zu bevorzugen.

Warmwasserversorgung zentral oder dezentral?

Bei Mehrfamilienhäusern stellt sich die Frage, ob die Wassererwärmung und Speicherung zentral erfolgen soll oder dezentral in den einzelnen Wohnungen. Bei zentralen Anlagen muss gemäss Normen das Wasser im Speicher auf 60 °C erwärmt werden. Bei wohnungsweisen Wassererwärmern sind tiefere Temperaturen, z. B.

Tabelle 4.6: Beispiel Wohnzimmer einer Attikawohnung.

Bauteil	Fläche A m²	U-Wert U W/(m² K)	Leistung Φ W	Relative Leistung
Aussenwände und Dach	37,0	0,20	207	25 %
Fenster	21,6	0,9	544	67 %
Lüftungsverlust	–	–	67	8 %
Summe			818	100 %
Spezifischer Heizleistungsbedarf 27 W/m²				

55 °C, zulässig. Eine zentrale Wassererwärmung soll gewählt werden bei einer solaren Wassererwärmung oder bei einem Fernwärmeanschluss.
Wassererwärmer dürfen nicht direkt elektrisch beheizt werden. Eine effiziente dezentrale Wassererwärmung ist mit Rücklauf- oder Abluft-Wärmepumpen möglich. Abluft-Wärmepumpen werden vorzugsweise bei einfachen Abluftanlagen eingesetzt. Es gibt aber auch Geräte, die bei Komfortlüftungen (d. h. Anlagen mit Zu- und Abluft) eingesetzt werden können. Abluft-Wärmepumpen erreichen Jahresarbeitszahlen von bis zu 3,5. Rücklauf-Wärmepumpen nutzen den Heizungsrücklauf der Wohnung als Wärmequelle. Der energetische Nutzen dieses Systems hängt entscheidend von der Wärmeerzeugung der Heizung ab. Rücklauf-Wärmepumpen lassen sich bezüglich Energieeffizienz nur dann rechtfertigen, wenn die Heizungswärmepumpe eine Jahresarbeitszahl von mindestens 4,5 erreicht.

Wassererwärmung thermisch-solar oder elektrisch-solar?

In Zusammenhang mit den stetig sinkenden Kosten von photovoltaischen Zellen stellt sich die Frage, wie weit eine thermisch-solare Wassererwärmung sinnvoll ist, wenn zur Gebäudeheizung (wie bei rund 70 % der neuen Wohnbauten der Fall) eine Wärmepumpe eingesetzt wird. Am Beispiel eines Mehrfamilienhauses sind zwei Varianten einander gegenüber gestellt:

- Thermisch-solar: 60 % des Warmwassers werden mit einer thermischen Solaranlage bereitgestellt. Die Wärmepumpe heizt das Gebäude und erwärmt das restliche Warmwasser.
- Elektrisch-solar: Die Wärmepumpe übernimmt die gesamte Wärmeversorgung für Heizung und Warmwasser.

Für den Vergleich gelten folgende Annahmen:

- Der Wärmebedarf Warmwasser entspricht der Standardnutzung von Norm SIA 380/1 von 21 kWh/m².
- Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe für die Wassererwärmung liegt bei 2,8.
- Der Vergleich wird für eine Wohnung mit 100 m² Energiebezugsfläche durchgeführt.
- Der Netto-Stromverbrauch ist bei beiden Varianten gleich gross.

Bei einem PV-Preis von 2500 Fr. pro kWp ergibt sich im Beispiel lediglich eine Investition von 1400 Fr. pro Wohnung (EBF 100 m²). Selbst bei einem grossen MFH könnte eine thermisch-solare Wassererwärmung kaum für diesen Preis realisiert werden. Zusätzliche Vorteile der Variante elektrisch-solar sind:

- Einfache Heizungsanlage mit einfacher Regelung
- Geringer Platzbedarf: kleinerer Warmwasserspeicher
- Das System lässt sich auch mit dezentraler Wassererwärmung (Rücklauf-Wärmepumpe oder Abluft-Wärmepumpe) realisieren.
- Vor allem bei Erneuerungen sind Elektrokabel einfacher zu führen als Wasserleitungen.

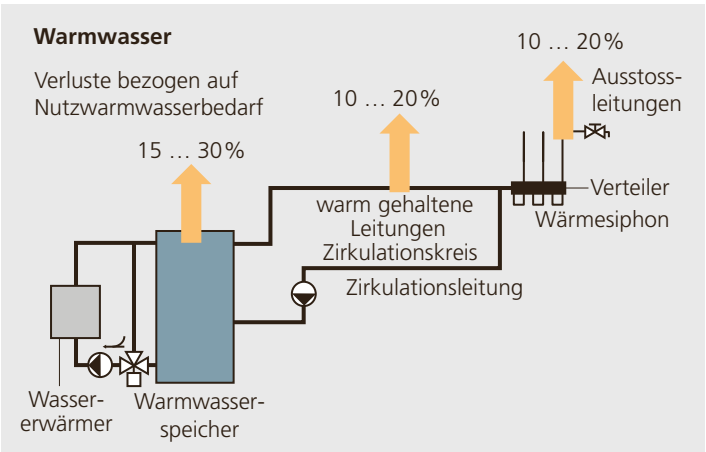


Abbildung 4.5: Verluste bei Warmwasseranlagen.

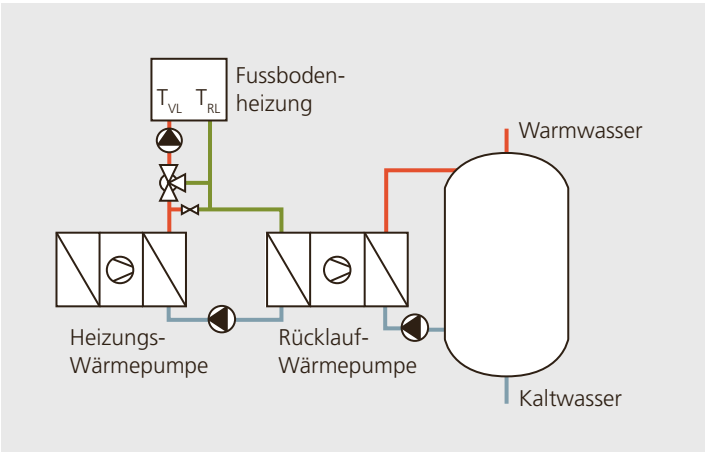


Abbildung 4.6: Schema RL-Wärmepumpe.

Merkpunkte für Gesamtkonzepte
Bei Wärmeversorgungskonzepten sollen folgende Punkte beachtet werden:

- **Beschränkung auf zwei Wärmeerzeuger:** Bei mehr als zwei Wärmeerzeugern werden kleine und mittlere Anlagen so komplex, dass sie oft nicht mehr optimal einreguliert und betrieben werden.
- **Luft-Wasser-Wärmepumpen mit Leistungsregelung:** Die Jahresarbeitszahlen von Luft-Wasser-Wärmepumpen konnten dank Leistungsregelung (z. B. Invertertechnik) markant verbessert werden und erreichen bei Wohnbauten im Ganzjahresbetrieb (Heizung und Warmwasser) Werte von 3,0 bis 4,0. Erdwärmesonden-Wärmepumpen sind zwar immer noch etwas effizienter, aber bei kleinen Gebäuden mit tiefen Vorlauftemperaturen ist die Energieeinsparung oft zu gering, um die Mehrinvestitionen rechtfertigen zu können.
- **Erdwärmesonden-Wärmepumpen bei Kühlbedarf:** Mit Erdwärmesonden-Wärmepumpen lassen sich im Ganzjahresbetrieb Jahresarbeitszahlen von 3,5 bis 5,0 erreichen. Sobald ein Kühlbedarf vorhanden ist, stehen Erdwärmesonden-Wärmepumpen auch bei kleinen Gebäuden im Vordergrund, da die Erdwärmesonde im Sommer eine kostengünstige und sehr effiziente Raumkühlung ermöglicht.
- **Wärmepumpen mit Photovoltaik kombinieren:** Wenn bei Gebäuden mit Wärmepumpen-Heizungen zusätzlich Solarenergie genutzt werden soll, dann führt Photovoltaik zu einfacheren und zuverlässigeren Lösungen als die Kombination mit thermischen Solaranlagen.
- **Holz mit thermischer Solarenergie kombinieren:** Holz- oder Pelletsheizkessel eignen sich sehr gut für den Winterbetrieb. Wenn sie aber im Sommer zur Wassererwärmung eingesetzt werden, führt der Teillastbetrieb oft zu einer deutlichen Abnahme des Nutzungsgrades und zu höheren Schadstoffemissionen. Daher ist es sinnvoll, Holz- und Pelletsheizkessel mit thermischen Solaranlagen zu kombinieren, die mindestens 60 % des jährlichen Warmwasserbedarfs decken.
- **Hilfsenergie beachten:** Der Stromverbrauch von Umwälzpumpen, Brennergebläsen, Brennstoffördereinrichtungen sowie Steuerung und Regelung liegt oft zwischen 1 % und 5 % der produzierten Wärme. Unter Berücksichtigung des Gewichtungsfaktors von elektrischer Energie kann Hilfsenergie deshalb zu einem wesentlichen Primärenergieverbraucher werden.

Variante	Thermisch-solar	Elektrisch-solar
Spezifischer Solarertrag	450 kWh thermische Energie pro m^2 Kollektor (pro Jahr)	900 kWh elektrische Energie pro kW installierte Leistung (pro Jahr)
Installierte Kollektoren respektive Panels	2,8 m^2	0,56 kW_P (ca. 4 m^2)
Absoluter Solarertrag	1250 kWh thermisch	504 kWh elektrisch
Wärmeproduktion Warmwasser • Solaranlage • Wärmepumpe	 1250 kWh 833 kWh	 0 kWh 2083 kWh
Elektrische Energie • Verbrauch Wärmepumpe • Produktion Photovoltaik	 298 kWh 0 kWh	 744 kWh 504 kWh

Tabelle 4.7: Vergleich einer thermisch-solaren mit einer elektrisch-solaren Wassererwärmung, für eine 4-Zimmer-Wohnung (100 m^2) in einem MFH.

Ausgewählte Themen

Heizung im Bad

Je tiefer die Vorlauftemperatur ist, desto effizienter arbeitet eine Wärmepumpe. Wegen der begrenzten Bodenfläche bestimmt oft das Bad die Auslegungstemperatur der Bodenheizung.

Es ist immer wieder zu hören, dass im Bad eine Raumtemperatur von 24 °C gefordert wird. Es genügt indessen, ein unbenutztes Bad auf 22 °C Raumtemperatur zu beheizen. Bei Benutzung (Duschen, Baden) steigt die Raumtemperatur sofort um einige Grade an, z. B. auf rund 25 °C. Fazit: Bäder und Duschen in Wohnungen können auf die gleiche Temperatur ausgelegt werden, wie Haupträume.

Zudem ist es weiterhin zulässig, in Bädern elektrische Heizungen (Handtuchheizkörper) einzusetzen, sofern diese nur zu Komfortzwecken und nicht zur Deckung des Heizleistungsbedarfs eingesetzt werden und sie mit einer automatischen Abschaltung («Timer») kombiniert sind. Details dazu finden sich in der Vollzugshilfe EN-103 der MuKEn 2014.

Komfortfaktor Bodenbelag

Bei Bodenbelägen mit Keramik und Steinplatten wird mehr Körperwärme über die Füsse abgeleitet als bei einem Teppich oder einem Parkett. Die physikalische Kenngrösse dazu heisst Wärmeeindringzahl. Bei einer hohen Wärmeeindringzahl resultieren rasch kalte Füsse. Früher konnte dies im Winter durch Bodenheizungen kompensiert werden. Bei den heute zulässigen Vorlauftemperaturen liegen die Bodenoberflächentemperaturen aber höchsten bei etwa 25 °C und somit unter der Fusssohlentemperatur. Das heisst, dass auch während des Betriebs der Bodenheizung Wärme vom Fuss an den Boden strömt. Dazu kommt, dass in der Übergangszeit und ausserhalb der Heizsaison die Bodenoberflächentemperatur sinkt.

In Wohnräumen können keramische Bodenbeläge zu einer tieferen empfundenen Raumtemperatur führen als z. B. Parkett, auch wenn eine identische Raumtemperatur gemessen wird. Daher lässt sich feststellen, dass in Wohngebäuden mit keramischen Bodenbelägen in den Hauptnutzräumen (speziell Wohnzimmer) die Heizung in der Übergangszeit teilweise früher eingeschaltet wird als bei Wohnungen mit Parkett oder Teppich.

Holzfeuerstätten in Wohnungen

Cheminees und Holzöfen in Wohnungen sind vor allem als Ambientefeuer beliebt. Diese Aggregate können in gut wärmegedämmten Gebäuden aber auch als Heizungsunterstützung oder Ganzhausheizung eingesetzt werden. Unabhängig vom Einsatzbereich sollen aber einige Grundsätze beachtet werden.

Druckverhältnisse

Bei neuen Feuerstätten muss die Verbrennungsluft über eine separate Leitung direkt von aussen in den Brennraum geführt werden. Eine Verbrennungsluftleitung macht eine Feuerstätte nicht raumluftunabhängig. Der Begriff «raumluftunabhängig» meint, dass eine Feuerung bei Unterdruck im Aufstellungsraum nicht gestört wird und dass kein Rauch aus dem Ofen dringt. Eine Feuerstätte ist nur dann raumluftunabhängig, wenn dies durch eine unabhängige akkreditierte Prüfstelle nachgewiesen ist. Leider ist dies auch bei Fachhändlern und Installationsfirmen nicht immer bekannt, sodass selbst Fachleute teilweise fälschlicherweise von raumluftunabhängigen Feuerungen sprechen, sobald eine Verbrennungsluftzufuhr vorhanden ist. Auf dem Markt sind raumluftunabhängige Holz- und Pelletsöfen verfügbar. Besteht kein Risiko für einen Unterdruck, müssen auch keine Anforderungen bezüglich geprüfter Aggregate erfüllt werden.

Norm SIA 384/1:2009 legt fest, dass keine lüftungstechnische Einrichtung einen Unterdruck verursachen darf, der die folgenden Werte übertrifft:

- Raumluftabhängige Feuerstätten (übliche Holz- und Pelletsöfen) maximal 4 Pa
- Raumluftunabhängige Feuerstätten (spezielle geprüfte Aggregate) maximal 8 Pa

Unzulässiger Unterdruck kann durch folgende Massnahmen verhindert werden:

- Sperren von Ablufteinrichtungen (Dunstabzughauben, WC-Abluft, Zentralstaubsauger etc.) über Fensterkontaktschalter. Solche Schalter finden sich auch unter der Bezeichnung «Reed-Kontakt».
- Nachströmeinrichtungen, die mit elektrischen Antrieben öffnen und schliessen, z. B. automatische Fensterantriebe.
- Geprüfte Unterdrucküberwachung, die von Lieferanten von Feuerungsaggregaten angeboten werden.
- Bei Komfortlüftungen sollen Geräte eingesetzt werden, die für den Betrieb mit Feuerungen konzipiert sind (kein Vereisungsschutz via Ventilatorsteuerung, Strömungsüberwachung).

Heizleistung

Ein Aufstellungsraum kann schnell überhitzt werden, wenn ein zu grosser Holzofen eingefeuert wird. Es wird daher empfohlen, dass die Abgabeleistung an den Aufstellungsraum höchstens dreimal grösser sein soll, als dessen Heizleistungsbedarf. Zum Aufstellungsraum ist jene Fläche anrechenbar, die nicht durch Türen abgetrennt werden kann. Bei neuen Wohnungsgrundrissen sind das typischerweise das Wohnzimmer, der Essbereich, die Küche und der Korridor. Bei Neubauten bedeutet dies aber dennoch, dass die Nennleistung der Feuerstätte bei höchsten 8 kW liegt, bei Minergie-P sollten es nicht mehr als 4 kW sein. Vor allem Cheminees und sogenannte Schwedenöfen geben aber teilweise wesentlich grössere Heizleistungen an den Raum ab, zum Teil über 20 kW. Neben einer geringen Abbrandleistung führt auch eine hohe Speichermasse zu einer kleineren Abgabeleistung. Die Abgabeleistung an den Aufstellungsraum kann mit Satelliten oder Absorbertechnik zusätzlich reduziert werden.

Keine offene Feuer

Offene Feuer gehören nicht in Wohnungen. Ein wesentlicher Grund ist, dass die Verbrennungsqualität schlechter und damit der Schadstoffausstoss grösser ist als bei geschlossenen Brennräumen. Da die Verbrennung deutlich weniger kontrolliert ist als bei geschlossenen Brennräumen, sinkt auch der Wirkungsgrad. Ein weiterer Grund ist, dass die Luftdichtheit der Wohnung deutlich geschwächt wird. Die Lüftungsverluste nehmen dadurch zu.

Lagerung von Holz und Pellets

Bei Brennstofflagern sind generell die Vorgaben der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF) sowie allfällige lokale Vorschriften zu beachten. Das Brennstofflager soll sich möglichst nahe bei der Feuerstätte befinden, um den Arbeitsaufwand gering zu halten. Bei Heizungsunterstützung oder Ganzhausheizungen sollte in unmittelbarer Nähe des Ofens ein Vorrat für einige Tage gelagert werden können.

4.3 Lüftung, Klima, Kühlung

Raumluftbelastung und Luftvolumenströme

SIA-Normen und freiwilligen Baustandards ist gemeinsam, dass eine Gebäudehülle grundsätzlich luftdicht sein soll. Die Konsequenz ist, dass für jedes Gebäude ein Lüftungskonzept zu erarbeiten ist. Eine Lüftung hat in erster Linie die Aufgabe, Luftbelastungen, die in Räumen anfallen, abzuführen:

- Gerüche von Personen
- Kohlenstoffdioxid (CO_2), das vorwiegend von Personen stammt
- Wasserdampf
- Emissionen von Baustoffen, Möbeln und Betriebseinrichtungen

In Räumen, in denen Personen die massgebende Raumluftbelastung darstellen, ist der CO_2-Gehalt eine praktikable und gut messbare Grösse für die Beurteilung der empfundenen Raumluftqualität. In Wohn- und Bürogebäuden wird meistens ein CO_2-Gehalt unter 1000 ppm angestrebt. Dieser Wert entspricht gemäss SIA 382/1 einer mittleren Raumluftqualität (RAL 2) und soll im Rahmen der Revision der Norm 382/1 verändert werden.

CO_2 ist nicht riechbar und bis zu einer Konzentration von 5000 ppm gesundheitlich nicht relevant. Dieser Stoff dient lediglich als Indikator für Gerüche, die Personen abgeben. Gerüche können nicht präzis gemessen werden und eignen sich daher nicht als Anforderungsgrössen für Normen. Hingegen kann eine Raumluftqualitätsregelung mit Mischgassensoren (die Geruchsstoffe summarisch detektieren) in Räumen mit grosser Geruchsbelastung durchaus Sinn machen.

Luftvolumenströme sollen nach der Personenbelegung dimensioniert und einreguliert werden. Um die oben erwähnte mittlere Raumluftqualität zu erreichen, sind gemäss Merkblatt SIA 2024 (Vernehmlassungsentwurf 2019) für Büro, Schulzimmer und Verkauf 25 m^3/h pro Person erforderlich.

Bei Wohnungen ist die Personenbelegung nicht exakt planbar. Daher wird als Hilfsgrösse die Zimmerzahl verwendet. Als Richtwert kann ein Luftvolumenstrom von 30 m^3/h pro Schlafzimmer verwendet werden. Eine differenzierte Dimensionierung erfolgt nach Merkblatt SIA 2023 (nach dem Jahr 2021 gemäss Norm SIA 382/5).

Hygiene

Zuluft, die dem Raum zugeführt wird, soll hygienisch mindestens die gleiche Qualität aufweisen wie die Aussenluft. Um dieses allgemeine Hygieneziel zu erreichen, sind folgende Grundsätze zu beachten:

- Die Aussenluftfassung muss bei grösseren Anlagen mindestens 3 m über Boden positioniert sein. Bei kleineren Anlagen,



Abbildung 4.7: Wartung eines Komfortlüftungsgeräts. (Quelle: Kaminfeger Schweiz)

z. B. für Einfamilienhäuser, kann die Höhe auf 1,5 m bis minimal 0,7 m über Boden reduziert werden (Details siehe Merkblatt SIA 2023). Eine Aussenluftfassung auf Bodenhöhe oder gar in einem Lichtschacht muss heute als Mangel bezeichnet werden.

- Die Aussenluft soll mit Filtern der Klasse ISO ePM_1 50 % gefiltert werden (entspricht der früheren Filterklasse F7). Die Staublast, die bei dieser Filterqualität in die Anlage gelangt, ist so gering, dass die Zuluftleitungen höchstens alle 10 bis 20 Jahre gereinigt werden müssen. Abluftleitungen sind einer grösseren Staubbelastung ausgesetzt und sollten daher ca. alle 5 bis 10 Jahre gereinigt werden.
- Sämtliche Komponenten einer Lüftungsanlage müssen für Inspektion und Reinigung zugänglich sein. Bei einbetonierten Leitungen sind Revisionszugänge, z. B. in Verteilerkästen, einzubauen.
- Stehendes Wasser in Lüftungsanlagen ist ein Hygienerisiko. Anlagen ohne Luftbefeuchtung sind daher von Technik her hygienisch wesentlich unproblematischer als Anlagen mit Befeuchtung. Aber auch bei Anlagen ohne Befeuchtung muss darauf geachtet werden, dass kein Wasser, z. B. durch Aussenluftfassung oder Lufterdregister, in den Zulufteil der Anlage gelangt.
- Hygienekontrollen und Inspektionen sollen bei mittleren und grösseren Anlagen ohne Befeuchtung alle 3 Jahre durchgeführt werden. Bei Anlagen mit Befeuchtung beträgt das Intervall 2 Jahre. Bei kleinen Anlagen ohne Befeuchtung, z. B. Komfortlüftungen in Einfamilienhäusern, kann das Intervall auch auf etwa sechs Jahre erhöht werden. Eine Reinigung erfolgt bei allen Anlagen nach Bedarf. Das heisst, dass anlässlich einer Inspektion entschieden wird, welche Anlageteile tatsächlich zu reinigen sind. Das grösste Verschmutzungsrisiko besteht während der Bauphase. Daher wird für alle Arten von Lüftungsanlagen empfohlen, eine erste Inspektion nach der Montage durchzuführen. Im Werkvertrag sollte deshalb geregelt sein, wie die Kosten der Inspektion und von allfälligen Reinigungen zu bezahlen sind.

Spezielle Aspekte bei Abluftanlagen

Für Aussenluftdurchlässe (ALD) von Abluftanlagen besteht bislang keine Pflicht für Filter der Klasse F7, sofern die Aussenluftqualität gut ist. Diesbezüglich ist eine Verschärfung geplant, indem für alle Lüftungsanlagen, also auch für ALD von Abluftanlagen, Filter mindestens der Klasse ISO ePM_{10} 50% gefordert werden. Fallweise können Filter einer höheren Klasse oder Vorfilter zum Einsatz kommen.

Leitungen von Abluftanlagen verschmutzen gleich stark wie Abluftleitungen von Komfortlüftungen. Deshalb sollten auch bei Abluftanlagen die Leitungen ca. alle 5 bis 10 Jahre gereinigt werden. Zudem sind alle Aussenluft-Durchlässe mindestens jährlich zu inspizieren. Der Instandhaltungsaufwand ist daher bei Abluftanlagen kaum tiefer als bei Komfortlüftungen.

Raumluftfeuchte

In Wohnungen verdunsten pro Tag und Person etwa 1,5 bis 3 Liter Wasser. Diese Dampfmenge muss durch Lüften abgeführt werden, damit keine Bauschäden oder Schimmelpilze entstehen. Aus Sicht der thermischen Behaglichkeit wird gemäss SIA-Normen eine relative Raumluftfeuchte zwischen 30 % und 60 % relative Feuchte angestrebt. Kurzzeitige Unterschreitungen sind unproblematisch. In üblichen Wohn-, Büro- und Schulräumen kann die Einhaltung von Feuchtegrenzwerten mit keinem Lüftungssystem garantiert werden, da der Benutzereinfluss zu gross ist. Besonders in Zusammenhang mit Komfortlüftungen wird oft über zu tiefe Raumluftfeuchten diskutiert. Massnahmen dagegen sind:

- Keine zu hohen Aussenluftraten. Lüftungsanlagen sollen nicht überdimensioniert werden. Bei allen Arten von Lüftungssystemen sollen die Luftvolumenströme dem hygienischen Bedarf entsprechen.
- Bei tiefen Aussentemperaturen soll die Aussenluftrate reduziert werden. Bei mechanischen Anlagen heisst dies, dass eine tiefere Betriebsstufe gewählt wird.
- Nicht überheizen. Wenn ein Raum um 2 K überheizt wird, sinkt die relative Luftfeuchte um ca. 5 % relative Feuchte.

- Allenfalls können Lüftungsgeräte mit Feuchterückgewinnung eingesetzt werden. Ein spürbarer Nutzen stellt sich aber nur bei optimal dimensionierten und betriebenen Anlagen ein.
- Bei kleinen Lüftungsanlagen, wie z. B. Komfortlüftungen für einzelne Wohnungen, sollen aus hygienischen Gründen keine aktiven Zuluftbefeuchtungen eingesetzt werden. Bei grösseren Anlagen mit Zuluftbefeuchtung gelten hohe hygienische Anforderungen.
- Bei besonderen Nutzungen, z. B. Schlafzimmer für Asthmatiker, können kurzzeitig Raumluftbefeuchter eingesetzt werden. Aber auch hier ist aus hygienischer Sicht Vorsicht geboten.
- Zu hohe Raumluftfeuchten sind hygienisch problematischer als tiefe Feuchte-Werte. Insbesondere Hausstaubmilbenallergiker sollen darauf achten, dass die Raumluftfeuchte im Winter nicht über 50 % relative Feuchte steigt.

Parkett

Die Zuluftbefeuchtung wird in sehr trockenen Räumen zur Verbesserung der Behaglichkeit für die Nutzer und nicht wegen spezieller Baumaterialien gewählt. In diesem Zusammenhang ist Parkett zu erwähnen. Ein guter Parkettbelag, der für schweizerisches Klima geeignet ist, verträgt eine Raumluftfeuchte von 30 % sowie kurzzeitige Unterschreitungen.

«Atmende Wände»

Wasserdampfdiffusion durch Wand- und Dachkonstruktionen kann nur einen Bruchteil der Feuchte abführen, die im Raum anfällt. Auch bei diffusionsoffenen Konstruktionen mit offenporigen Wänden ist daher eine ausreichende Aussenluftrate erforderlich. Offenporige Oberflächen können aber Feuchte puffern: Bei hohen Raumluftfeuchten wird Wasserdampf eingelagert, der dann bei tiefen Raumluftfeuchten wieder in den Raum gelangt. Je nach Art und Grösse dieser Flächen können diese einen Beitrag gegen tiefe Raumluftfeuchten leisten.

Klima und Kühlung

Bis in die 1980er-Jahre wurden Kühllasten meistens über die Lüftung abgeführt. Die dazu notwendigen grossen Luftwechselraten haben teilweise zu Zugerscheinungen geführt. Die heutige Schulmeinung in der Schweiz ist, dass die Funktionen Lüften und Kühlen getrennt werden sollen. Eine Lüftungsanlage wird so dimensioniert, dass sie die Raumluftbelastungen abführt. Für die Dimensionierung ist in der Regel die Personenbelegung massgebend. Das bedeutet auch, dass Lüftungsanlagen ohne Umluftbetrieb installiert werden.
Bei Gebäuden mit geringen Wärmelasten und öffenbaren Fenstern erfolgt die Kühlung traditionell über eine Fensterlüftung nachts oder in den frühen Morgenstunden. Bei nicht öffenbaren Fenstern oder wenn eine Bedarfsermittlung nach SIA 180 zeigt, dass eine Kühlung erforderlich ist, soll über wasserführende Systeme gekühlt werden. Bei dieser Kühlung lassen sich oft die gleichen Elemente respektive Bauteile einsetzen, wie für die Raumheizung: Thermisch aktive Bauteilsysteme (TABS) oder, bei sehr geringen Kühllasen, auch Fussbodenheizungen. Eine andere Lösung sind Konvektoren, die mit Hilfe von kleinen, sehr effizienten Ventilatoren die Wärme mit kleinen Temperaturdifferenzen (zwischen Wasser und Raumluft) abgeben respektive abführen können. Weiter kommen auch Kühldecken in Frage. Diese Elemente können allenfalls für die Raumheizung eingesetzt werden respektive diese unterstützen.

Tabelle 4.8: Arbeitszahlen von Kälteerzeugungen.

System	Kaltwassertemperatur VL/RL in °C *	JAZ respektive ETV **
TABS oder effiziente Ventilatorkonvektoren ohne Freecooling	18 °C/22 °C	5 bis 7
TABS oder effiziente Ventilatorkonvektoren mit Freecooling	20 °C/23 °C	8 bis 15

** VL: Vorlauftemperatur, RL: Rücklauftemperatur*
*** JAZ: Jahresarbeitszahl; ETV: Elektro-Thermo-Verstärkung*

Kühlung nicht verhindern, sondern effizient lösen

Alte Klimaanlagen haben berechtigterweise den Ruf von Energieschleudern. Heute lassen sich aber sehr effiziente Raumkühlungen realisieren. Eine Voraussetzung dazu ist, dass der Wärmeeintrag von aussen durch einen wirksamen Sonnenschutz minimiert wird. Weiter sollen trotz guter Anlagetechnik die internen Lasten gering gehalten werden.

Analog zu Heizungsanlagen liegt die Lösung für eine energieeffiziente Kühlung bei der Wassertemperatur: Je näher die Kaltwassertemperatur (der Raumkühlung) bei der Raumtemperatur liegt, desto höher ist die Arbeitszahl der Kälteerzeugung respektive umso mehr freie Kühlung ist möglich.

Die sehr guten Werte von neuen Systemen lassen sich nur erreichen, wenn die Kühlung ab Beginn des Planungsprozesses berücksichtigt wird. Falls erst in einer späten Planungs- oder gar in der Ausführungsphase entschieden wird, eine Kühlung zu realisieren, lassen sich energetisch optimale Konzepte nicht mehr umsetzen. Bei einer Nachrüstung lassen sich fallweise nur noch Splitgeräte einbauen. Sehr gute Splitgeräte erreichen zwar auch Jahresarbeitszahlen von 4 bis 5, aber der Energieverbauch ist damit zwei- bis dreimal höher als bei einer Bestlösung. Zudem müssen bezüglich Komfort und Ästhetik Kompromisse eingegangen werden.

Fazit: Bei Neubauten soll eine Kühlung nicht verhindert werden, es sollen vielmehr von Beginn an optimale Lösungen gesucht werden. Die heutigen Energiegesetze unterstützen diesen Ansatz.

Lüftungsmethoden und Systeme

Fensterlüftung

Die natürliche Lüftung ist komplex, da sie neben der Geometrie (neben anderem Grösse und Lage von Fenstern) auch von Witterungsverhältnissen und vom Benutzerverhalten beeinflusst wird. Automatisierte natürliche Lüftungen von grossen Gebäuden werden daher mit Simulationsprogrammen dimensioniert und über Gebäudeautomationssysteme betrieben.

Richtwerte für die Auslegung von Fensterlüftungen bei Wohnbauten. Freie Querschnittsflächen von Lüftungsflügeln in Wohnbauten:

- Einseitige Lüftung mindestens 2 % bis 3 % der Bodenfläche
- Querlüftung mindestens 1 % bis 2 % der Bodenfläche

Maximales Verhältnis von Raumtiefe L zur Raumhöhe H:

- Einseitige Lüftung: L/H kleiner 2,5
- Querlüftung: L/H kleiner 5,0

Richtwerte für freie Öffnungsflächen von Lüftungsflügeln beruhen darauf, dass Fensterlüftung zur Nachtauskühlung eingesetzt wird. Damit wird in Sommernächten ein 2- bis 3-facher stündlicher Luftwechsel erreicht. Diese Auslegung für die Nachtauskühlung genügt auch, um ganzjährig mit einer Stosslüftung eine hygienisch gute Raumluftqualität zu garantieren. Die Richtwerte gehen von einer üblichen Fenstergeometrie aus. Das heisst insbesondere, dass die Lüftungsflügel bis ca. 20 cm unter die Decke reichen. Die tieferen Wert gelten für hohe, schmale Lüftungsflügel (Verhältnis von Höhe zu Breite grösser 2). Für Lüftungsflügel mit geringer Höhe und grosser Breite (z. B. Oberlichter) gelten die höheren Werte.

Die Flächen sind als freie Querschnitte zu verstehen. Bei allfälligen Wetterschutz- oder Insektenschutzgittern sind daher die Lüftungsflügel umgekehrt proportional zur freien Querschnittsfläche der Gitter zu vergrössern.

Für Nichtwohnbauten finden sich im schweizerischen Normenwerk keine Richtwerte. Teilweise gibt es aber Vorgaben in den Bauvorschriften. Wo solche Vorgaben fehlen, wird empfohlen, etwa 50 % höhere Werte als jene für Wohnbauten anzuwenden.
Bei Räumen mit grossen Personenbelegungen und entsprechend hohen Aussenluftraten spielt nicht nur die Fenstergrösse eine Rolle, sondern auch die Raumgeometrie. Damit eine genügende Raumdurchspülung erreicht wird, soll das Verhältnis von Raumtiefe und Raumhöhe die Richtwerte nicht überschreiten.

Einsatzgrenzen der Fensterlüftung
An Lagen mit grosser Lärmbelastung oder starken Schadstoffimmissionen (speziell Feinstaub) ist eine reine Fensterlüftung nicht empfehlenswert. In SIA 382/1 und 180 finden sich quantitative Anforderungen bezüglich Schall und Schadstoffen.

Abluftanlage
Wo Abluft abgesaugt wird, muss auch Ersatzluft definiert nachströmen. Gebäude mit Abluftanlagen müssen daher mit Aussenluft-Durchlässen (ALD) ausgerüstet werden. Wegen Schallschutz, Verschmutzung respektive Filterung, Unterdruck und thermischer Behaglichkeit sind ALD nicht einfach Löcher in der Wand, es sind vielmehr anspruchsvolle Komponenten. Bei Abluftanlagen sind folgende Punkte speziell zu beachten:

- ALD sind so auszulegen, dass der Unterdruck im Raum nicht grösser als 4 Pa bis 5 Pa ist. (Nach geplanter Norm SIA 382/5 nur 4 Pa.) Diese Anforderung lässt sich in der Praxis nur erreichen, wenn keine F7-Filter (ISO ePM_1 50 %) eingesetzt werden müssen (Abschnitt Hygiene). Das heisst, dass Abluftanlagen nur an Standorten mit guter Aussenluftqualität (Jahresmittelwert PM10 maximal 20 mg/m³) in Frage kommen.
- Durch den Unterdruck darf das Radonrisiko nicht erhöht werden. Insbesondere für bestehende Einfamilienhäuser muss dieses Risiko erhoben werden.

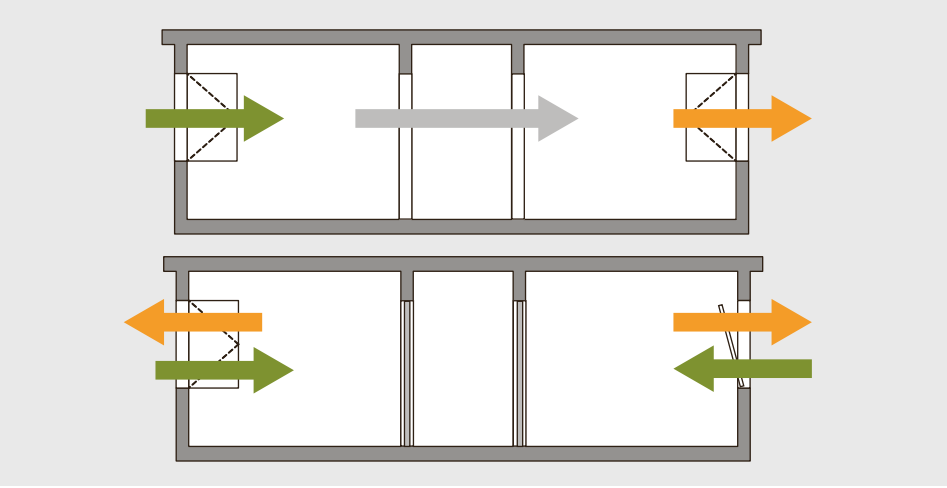


Abbildung 4.8: Querlüftung und einseitige Fensterlüftung.

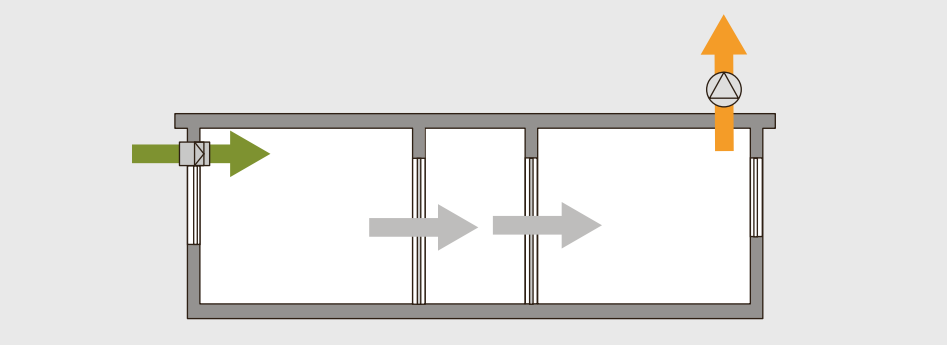


Abbildung 4.9: Schema Abluftanlage.

- Wegen Infiltration (verursacht durch den Unterdruck) ist der Aussenluftvolumenstrom bei Abluftanlagen rund 30 % bis 40 % grösser als bei Komfortlüftungen.
- Trotz dem höheren Aussenluftvolumenstrom funktioniert eine Abluftanlage nur einwandfrei, wenn die Gebäudehülle eine gute Luftdichtheit aufweist. Die Luftdurchlässigkeit soll einen n_{50}-Wert von 1,0/h nicht übersteigen.
- Auch Feuerungen können durch den Unterdruck gestört werden. Raumluftabhängige Feuerstätten dürfen daher nicht in Wohnungen mit Abluftanlagen betrieben werden. Auch von raumluftunabhängigen Feuerstätten wird abgeraten.
- Wenn Fenster längere Zeit geöffnet sind, funktioniert eine Abluftanlage nicht mehr richtig. Die Aussenluft strömt dann über die Zimmer mit offenen Fenstern nach und die Zimmer mit geschlossenen Fenstern werden trotz ALD praktisch nicht mehr mit frischer Luft versorgt.

Komfortlüftung

Dank der Wärmerückgewinnung werden die Lüftungswärmeverluste mit einer Komfortlüftung gegenüber einer Fensterlüftung um ca. 80 % reduziert. Bei fachgerecht realisierten Anlagen ist der Verbrauch an Ventilatorenergie rund 7- bis 10-mal kleiner als die Wärmeeinsparung der Wärmerückgewinnung.

Die Komfortlüftung hat sich in der Schweiz gut etabliert. Die Qualität der realisierten Anlagen weist aber noch Unterschiede auf. Detaillierte Hinweise und Tipps finden sich auch in «Komfortlüftung – Projektierung von einfachen Lüftungsanlagen in Wohnbauten» [1]. Eine kostenlose Kurzanleitung sowie Checklisten bietet die «Leistungsgarantie Komfortlüftung» [2] von EnergieSchweiz.

Bei einer Komfortlüftung dürfen die Fenster jederzeit geöffnet werden, ohne dass die Funktion der Anlage beeinträchtigt wird. Es ist lediglich darauf hinzuweisen, dass bei häufig geöffneten Fenstern im Winter zusätzliche Lüftungswärmeverluste entstehen.

Kochstellenabluft in Wohnungen

Die Kochstellenabluft funktioniert in den meisten Fällen unabhängig von der Wohnungslüftung. Sie kann aber die Raumluftqualität auch ausserhalb der Küche beeinflussen.

Fortlufthauben fördern die Kochstellenabluft direkt ins Freie. Wie alle Abluftanlagen bedingen sie grundsätzlich Nachströmeinrichtungen. Andernfalls können Feuerungen gestört werden und Ersatzluft strömt über hygienisch unerwünschte Wege nach (Installationsschächte, Rückströmung WC-Abluft, Nachbarwohnung etc.).

Bei Umlufthauben wird die Luft nur umgewälzt. Fett- und Aktivkohlfilter reinigen die

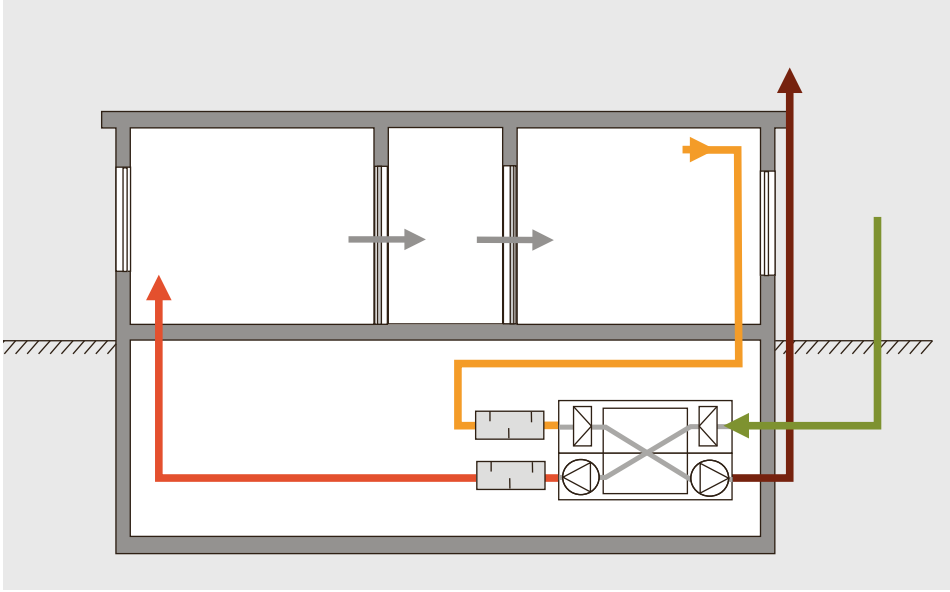


Abbildung 4.10: Prinzip Komfortlüftung.

Luft. Der Wasserdampf bleibt aber in der Wohnung und muss durch eine andere Lüftung (z. B. Fenster oder Komfortlüftung) abgeführt werden. Kein Filter eliminiert 100 % der Luftfremdstoffe. Daher gelangt ein geringer Teil der Gerüche wieder in den Raum zurück.

Unter Beachtung von speziellen brandschutztechnischen Auflagen dürfen Ablufthauben mit Komfortlüftungen kombiniert werden.

Beim Kochen, insbesondere Anbraten und Frittieren, entsteht Feinstaub. Bei Gasherden kommen Partikel aus der Verbrennung hinzu. Daher soll eine Abzughaube eine möglichst hohe Erfassungseffizienz aufweisen. Wandhauben sind diesbezüglich effizienter als Inselhauben.

Ergänzende Informationen liefert das Merkblatt «Kochstellenlüftung» von EnergieSchweiz.

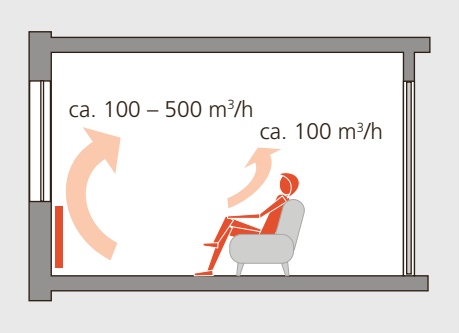


Abbildung 4.11: Luftbewegung in Wohnräumen.

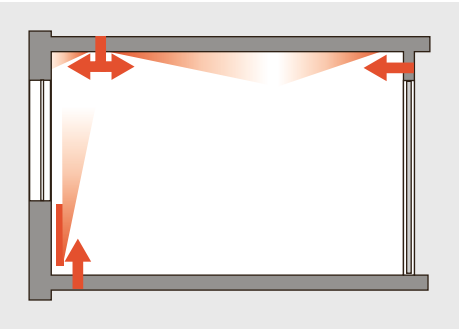


Abbildung 4.12: Lage von Zuluft-Durchlässen; der Zuluftstrahl darf nicht in den Aufenthaltsbereich gerichtet sein.

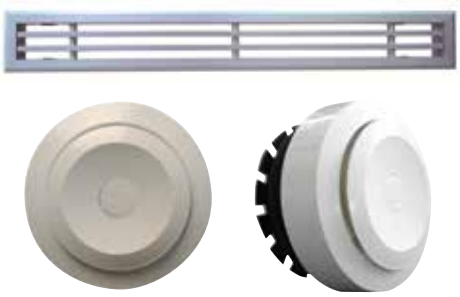


Abbildung 4.13: Beispiele von Zuluft-Durchlässen.

Raumluftströmung

Als Faustformel gilt, dass bei einem mechanischen Luftwechsel von unter etwa 3/h die thermische Konvektion (Personen, Geräte, Heizung, warme oder kühle Raumflächen) die Raumluftströmung prägt. Bei einem mechanischen Luftwechsel von über 3/h dominiert die mechanisch zugeführte Luft die Raumluftströmung. Da der Übergang fliessend ist und der Nahbereich von Luftdurchlässen immer durch die mechanisch zugeführte Luft beeinflusst wird, muss der Richtwert von 3/h mit Vorsicht bewertet werden.

Wohnbauten und Nutzungen mit kleinen Luftwechseln

In Räumen mit folgenden Merkmalen kann davon ausgegangen werden, dass die Raumluftströmung vorwiegend durch thermische Konvektion geprägt wird:

- Luftwechsel maximal 1,5/h
- Zuluftvolumenstrom pro Luftdurchlass maximal 40 m³/h

Bei diesen Verhältnissen wird die Zuluft praktisch vollständig mit der Raumluft gemischt und es treten praktische keine Kurzschlüsse auf. In solchen Räumen hat die Lage von Zuluftdurchlässen keinen relevanten Einfluss auf die Raumluftqualität. Das heisst, dass bei der Platzierung der Durchlässe eine grosse planerische Freiheit besteht. So spielt es z. B. keine Rolle, ob in einem Schlafzimmer die Zuluft beim Fenster oder über der Zimmertür zugeführt wird.

Diese Aussagen können auch auf mehrere Räume übertragen werden, die nicht durch geschlossene Türen voneinander abgetrennt sind. Im Projekt [3] wurde die Frage in einer realen 4,5-Zimmer-Wohnung untersucht, in der nur in den Schlafzimmern Zuluftdurchlässe vorhanden sind, nicht aber im Wohn- und Essbereich. Da das Wohnzimmer ungewöhnlich lang ist, wurde eine schlechtere freie Durchströmung vermutet als bei typischen Grundrissen. Für die Untersuchungen wurde angenommen, dass im Wohnzimmer zwei Personen sitzen. Die in Abbildung 4.14 dargestellte CO_2-Konzentration zeigt, dass sich

die Luft im Aufenthaltsbereich fast überall perfekt mischt. Folglich steht die erforderliche Aussenluft in diesen Bereichen zur Verfügung und das System funktioniert. Diese Simulationsergebnisse konnten durch eine Messung bestätigt werden. Beachtenswert ist, dass der im Korridor zirkulierende Luftvolumenstrom rund 10-mal grösser ist als der Zuluftvolumenstrom der gesamten Wohnung. In offenen Wohnzimmern kann also ohne Einbusse an Raumluftqualität auf Luftdurchlässe verzichtet werden.

Nutzungen mit mittleren und hohen Luftwechseln

In Räumen mit mechanischen Luftwechseln von über 1,5/h kann allenfalls die thermische Konvektion die Raumluftströmung prägen, aber die Platzierung und Auswahl der Zuluftdurchlässe erfordert deutlich mehr Fachwissen als bei Wohnbauten.

Allgemein wird zwischen Misch- und Quelllüftung unterschieden (Abbildung 4.15). Bei der Mischlüftung wird die Zuluft möglichst ideal mit der Raumluft gemischt. Die Vorteile sind, dass Luftdurchlässe an Decken (z. B. Drallauslässe) und Wänden (z. B. Gitter, Weitwurfdüsen) platziert werden können. Die Nutzfläche von Räumen wird dadurch kaum beeinträchtigt. Weiter kann die Zuluft mit Untertemperaturen von bis zu 10 K zugeführt werden. Auch Übertemperaturen in diesem Bereich sind möglich. Die grossen Spannen von Unter- und Übertemperatur können speziell bei kleineren Anlagen zu günstigeren Luftaufbereitungen führen. Das heisst, dass gegebenenfalls auf Nachwärmer und Kühler verzichtet werden kann.

Bei der Quelllüftung, die ausserhalb von Laboranwendungen auch mit der Verdrängungslüftung gleichgesetzt werden kann, strömt die Zuluft mit einer tiefen Geschwindigkeit von maximal 0,2 m/s und einer Untertemperatur von 2 K bis 3 K in den Raum. Dadurch bildet sich ein Frischluftsee. An warmen Oberflächen, wie Personen und Geräten, steigt die Frischluft auf. Personen «saugen» durch ihre Körperwärme Frischluft aus dem Bodenbereich an. Quelllüftung gilt als effizient und komfortabel. Zugerscheinungen treten nur im Nahbereich der Zuluftdurchlässe auf, das heisst, dass diese Nahbereiche nicht für einen Aufenthalt von Personen geeignet sind. Die definierte Untertemperatur von 2 K bis 3 K erfordert eine entsprechende Luftaufbereitung mit Nachwärmung und Kühlung. Ein Nachteil der Quelllüftung ist zudem, dass ein Frischluftsee durch kalte oder warme Raumoberflächen (speziell Fenster) und durch mechanische Bewegungen (z. B. sich bewegende Personen) gestört werden kann.

Verbundlüftung

In der klassischen Lüftungstechnik wird Zuluft durch Luftleitungen zu Räumen geführt, für die sie bestimmt ist. Wie im Abschnitt Wohnbauten aufgezeigt ist, verteilt sich Luft typischerweise sehr gut in Zonen mit mehreren Räumen, wenn die Zimmer-

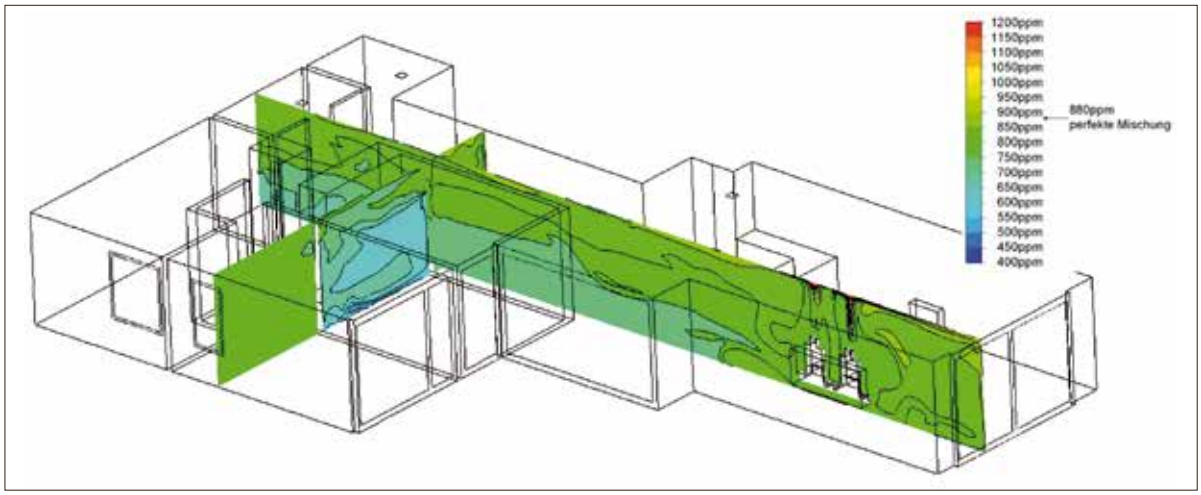


Abbildung 4.14: CO_2-Konzentration bei freier Durchströmung des Wohnzimmers. (Quelle: AHB 09)

türen offen sind. Das heisst, dass in einer Wohnung oder einem kleineren Bürogeschoss die gesamte Zuluft an einer Stelle im Verkehrsbereich zugeführt werden kann. Falls die Türen offen stehen, verteilt sich die Zuluft auf die Räume. Um dieses Konzept auch bei geschlossenen Türen realisieren zu können wurden Verbundlüfter oder aktive Überströmer entwickelt. Diese werden in den Türen oder neben den Türen eingebaut. Bei geschlossenen Türen fördert ein Kleinstventilator Luft aus dem Korridor in den Raum (Zimmer oder Büro) und ein zweiter Kleinventilator gibt die Raumluft wieder in den Korridor zurück. Bei offenen Türen können die Kleinventilatoren ausgeschaltet werden. Der Korridor wird bei diesem Konzept quasi zum Frischluftkanal oder Frischluftreservoir. Bei Verbundlüftungen ist zu beachten:

- Der Brandschutz begrenzt die Zonengrösse. In Wohnungen ist diese unproblematisch, da eine Wohnung einen Brandabschnitt bildet. In Büros sind Brandabschnitte und Fluchtwege zu berücksichtigen.
- Nassräume und Räume mit hohen Raumluftbelastungen (Räume mit Druckern, Raucherräume) dürfen nicht in Verbundlüftungen eingebunden werden. Solche Räume sind mit Abluftdurchlässen auszurüsten. Falls brandschutztechnisch zulässig, kann die Zuluft dieser Räume aber aus dem Korridor von Verbundlüftungszonen stammen.
- Da die Luft im Korridor eine Mischqualität aufweist, sollten Verbundlüfter etwa doppelt so grosse Luftvolumenströme fördern, wie den Räumen mit klassischen Lüftungen zugeführt würde. Da die Förderdrücke der Kleinstventilatoren aber sehr klein sind, liegt die Leistungsaufnahme für ein Büro oder Schlafzimmer im Bereich von 2 bis 3 Watt.
- Gerüche können sich in Verbundlüftungszonen gleichmässig verbreiten. Bei Wohnungen sind dies speziell Kochgerüche. Es wird deshalb empfohlen, die Verbundlüfter der einzelnen Räume mit Timerschaltern auszurüsten: Wenn ein Timer betätigt wird, soll der Luftaustausch mit dem Korridor für ca. eine halbe Stunde unterbrochen werden. Die Essgerüche breiten sich nicht stärker aus, als wenn die Zimmertüren offen stehen.
- Verbundlüfter erzeugen Strömungsgeräusche und können den Schallschutz zwischen Raum und Korridor schwächen. Die Konstruktion von akustisch hochwertigen Verbundlüfern ist daher sehr anspruchsvoll. Vor allem aus akustischen Gründen sollen nur Verbundlüfter eingesetzt werden, die als Serienprodukte entwickelt wurden und von denen akustische Prüfdaten vorliegen.

Ein grosser Vorteil von Verbundlüftungen ist, dass die Luftqualität einer ganzen Zone über einen einzigen Sensor geregelt werden kann. Speziell für Büros wird daher eine CO_2-Regelung empfohlen. Durch die starke Vereinfachung der Zuluftverteilung kann allenfalls die Geschosshöhe reduziert werden.

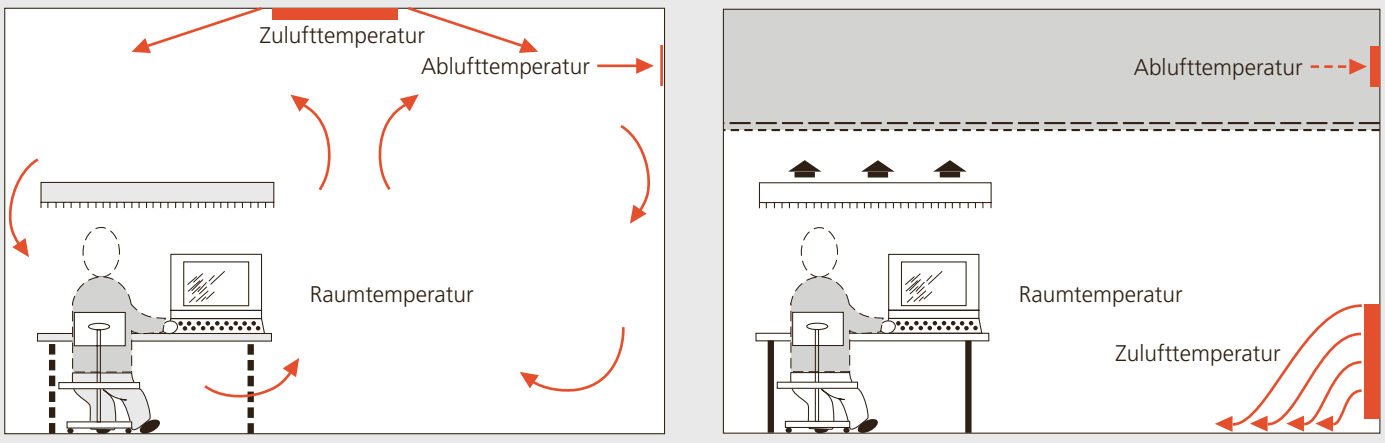


Abbildung 4.15: Mischlüftung (links) und Quelllüftung (rechts). (Quelle: Lindab)

Wie alle lüftungstechnischen Einrichtungen, erfordern auch Verbundlüfter Instandhaltungsarbeiten. So soll mindestens eine jährliche Kontrolle vorgesehen werden. Weiter ist zu beachten, dass die Kleinstventilatoren rotierende Teile sind, deren Nutzungsdauer bei etwa 10 bis 15 Jahren liegt.

Zentral oder dezentral?

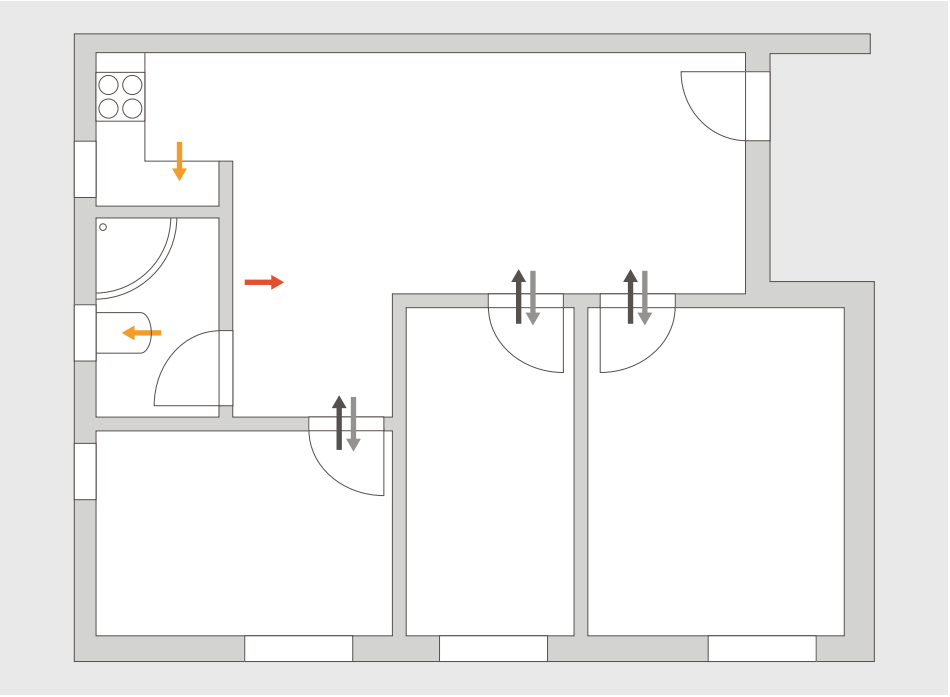
Bei Wohn- und Nichtwohngebäuden stehen grundsätzlich folgende Anlagenkonzepte zur Auswahl:

- Anlagen für mehrere Nutzungseinheiten. Bei Wohngebäuden werden diese als Mehrwohnungsanlagen bezeichnet.
- Anlagen für einzelne Nutzungseinheiten. Bei Wohngebäuden wird hier von Einzelwohnungsanlagen gesprochen.
- Ein Lüftungsgerät pro Raum. Bei Wohngebäuden wird hier der Begriff Einzelraumlüftungsgerät verwendet. Bei Nichtwohnbauten ist die Bezeichnung Fassadengerät verbreitet.

Bezüglich Energieeffizienz unterscheiden sich die verschiedenen Lösungen kaum. Sowohl für die Wärmerückgewinnung wie auch für die Ventilatorenergie werden bei fachgerechter Installation und guter Anlagetechnik sehr ähnliche spezifische Werte erreicht. Dabei wird aber vorausgesetzt, dass die Mehrzonen- respektive Mehrwohnungsanlagen mit Bedarfssteuerungen oder besser mit Bedarfsregelungen ausgerüstet sind. Bei Nichtwohnbauten wird die entsprechende Technik der Variabel-Volumenstrom-Regler (VAV) schon seit Jahrzehnten eingesetzt. Bei Wohnbauten sind, u. a. wegen höheren Schallanforderungen, erst seit etwa 2012 geeignete Systeme auf dem Markt. Bei Mehrwohnungsanlagen wird aus Gründen der Schnittstellen empfohlen, ganze Systeme, d. h. VAV und Lüftungsgeräte und Regelung, von einem einzigen Systemanbieter zu beziehen.

Verluste von Leitungen und Kanälen

Ein energetischer Aspekt, der oft vergessen wird, sind die Wärmeverluste von Luftleitungen und Luftkanälen. Bei Hauptleitungen von grossen zentralen Anlagen fallen diese Verluste kaum ins Gewicht. Bei Einzelwohnungsanlagen hingegen entscheidet die Disposition darüber, ob 10 % oder mehr der von der WRG zurückgewonnenen Energie allenfalls durch Leitungsverluste verloren geht. Aus energetischer Sicht ist ein Lüftungsgerät nahe an der thermischen Gebäudehülle gut platziert, z. B. nahe an der Aussenwand oder



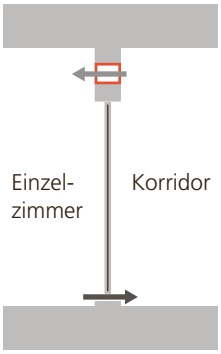


Abbildung 4.16: Prinzip der Verbundlüftung bei einer Wohnung.

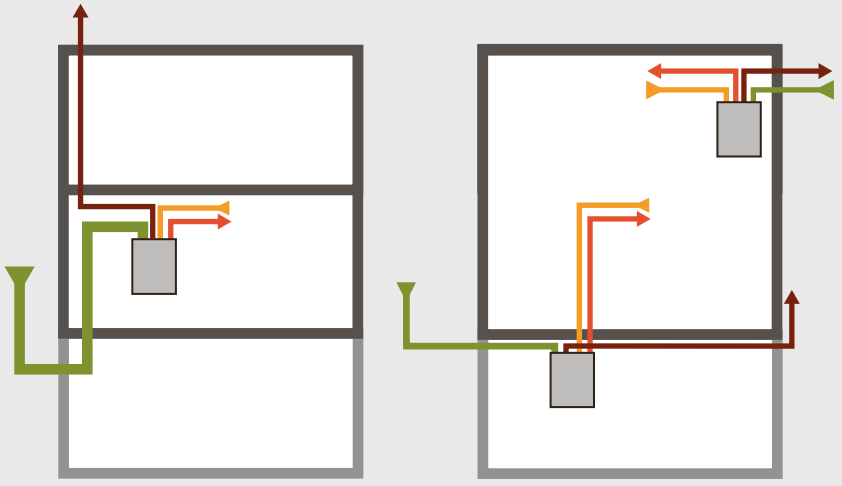
im Keller unmittelbar unter dem ersten beheizten Geschoss. Kalte Leitungen (Aussen- und Fortluft) sollen möglichst durch unbeheizte Räume geführt werden und warme Leitungen (Zu- und Abluft der Wohnung) möglichst durch warme. Mehrwohnungsanlagen sind in der Regel so konzipiert, dass dieser Grundsatz ohne spezielle Massnahmen eingehalten wird. Bei Einzelwohnungsanlagen, bei denen die Geräte in den Geschosswohnungen platziert werden, muss durch eine geschickte Disposition für kurze kalte Leitungen gesorgt werden (Abbildung 4.17), ansonsten werden gemäss kantonalen Energievorschriften 100 mm Dämmstärke verlangt.

Fachgerechte Planung

Je grösser die Anlage ist, desto anspruchsvoller sind Planung, Installation und Inbetriebsetzung. Kleinere Anlagen sind dafür aufwendiger im Betrieb. Bezüglich Hygiene heisst das, dass grössere Anlagen eher bei der Montage verschmutzt werden. Bei kleinen Anlagen sind der Filterwechsel und die Inspektion von z. B. hunderten von Einzelraumgeräten aufwendiger. Bei fachgerechter Planung und Ausführung werden aber Mehrzonenanlagen insgesamt hygienisch als unproblematischer beurteilt als dezentrale Anlagen.
Bei den Kosten dürfte sich ein ähnliches Bild ergeben: Dezentrale Lösungen können zu geringeren baulichen Massnahmen führen, sie sind aber im Betrieb oft teurer.
Bei Einzelwohnungsanlagen von Komfortlüftungen ist der Vereisungsschutz der Wärmerückgewinnung gut zu überlegen. Geeignet sind Geräte mit Enthalpie-Wärmeübertragern oder eine Vorwärmung der Aussenluft mit Umgebungswärme (Sole-Wärmeübertrager oder Lufterdregister). Nicht fachgerecht sind Lösungen, die Unterdruck verursachen, indem der Zuluftventilator abgestellt oder dessen Drehzahl reduziert wird. Eine elektrische Aussenluftvorwärmung ist in den meisten Fällen energetisch problematisch. Bei Mehrwohnungsanlagen lässt sich der Vereisungsschutz anlagentechnisch einfach lösen, da die entsprechenden technischen Lösungen (Vorwärmung, Bypass) schon lange auf dem Markt eingeführt sind.

Effiziente Luftförderung

Bei vielen Lüftungsanlagen entspricht die Ventilatorleistung nicht den Anforderungen gemäss SIA 382/1. Eine Komfortlüftung soll für einen Luftvolumenstrom von 100 m³/h eine elektrische Aufnahmeleistung von 35 W aufweisen. Damit ist der Stromverbrauch von Zu- und Abluftventilator, eingeschlossen allfälliger Hilfsantriebe wie Rotorantrieb und Steuerung, gemeint. Untersuchungen zeigen, dass diese elektrische Aufnahmeleistung in der Praxis machbar ist.



Ungünstig: Grosse Wärmeverluste durch lange kalte Leitungen in beheizten Räumen.

Günstig: Kleine Wärmeverluste. Kurze warme Leitungen in unbeheizten Räumen.

Abbildung 4.17: Skizze mit günstiger und ungünstiger Anordnung.

Strömungstechnische Dimensionierung

Bei Einzelwohnungsanlagen soll der externe Druckverlust (Druckverlust der Luftleitungen und Komponenten ausserhalb des Lüftungsgerätes) sowohl auf der Aussen- und Zuluftseite wie auch auf der Ab- und Fortluftseite maximal 70 Pa betragen. Dies setzt einen Betrieb mit den gesetzlich geforderten Luftgeschwindigkeiten und strömungstechnisch günstige Komponenten voraus, das heisst, runde Luftleitungen und keine scharfkantigen Umlenkungen. Oft werden Aussen- und Fortluftgitter zu klein dimensioniert. Runde Gitter sollen mindestens um eine Nennweite grösser sein als die angeschlossene Leitung. Konstantvolumenstromregler sollen vermieden werden.

Beste Geräte

Bei neuen Geräten werden die Ventilatoren mit Gleichstrom- oder mit EC-Motoren angetrieben. Bei Kleinanlagen wird so gegenüber alten Ventilatoren mit Wechselstrommotoren die elektrische Aufnahmeleistung etwa halbiert. Aber auch mit der neuen Technologie geht die Entwicklung weiter. Es lohnt sich daher, anhand von Gerätedeklarationen zu vergleichen, wie hoch die elektrische Aufnahmeleistung ist. Neben Passivhaus-Prüfungen und der Deklaration von energie-cluster.ch stehen auch Daten des Minergie-Moduls Komfortlüftung zur Verfügung.

Energieetikette

Viele Geräte zur Wohnungslüftung müssen mit Energieetiketten qualifiziert sein. Es sollten nur Geräte der Klasse A oder A+ zum Einsatz kommen. Nachteilig ist, dass die Energieetikette den Vereisungsschutz nicht berücksichtigt. Deshalb sind Lösungen gemäss Merkblatt SIA 2023 respektive Norm SIA 382/5 zu wählen.

4.4 Haushaltsgeräte

Beate Weickgenannt

Einteilung von Geräten

Die Entwicklung von elektrischen Geräten ist eng verknüpft mit der Nutzbarmachung des elektrischen Stroms um die Jahrhundertwende. Die vor allem mit der Hand oder einfachen mechanischen Hilfsmitteln ausgeführte Hausarbeit wurde mit der Entwicklung von elektrischen Geräten vereinfacht und verkürzt [4]. Die grosse Menge von elektrischen Geräten macht es notwendig, Kategorien zu bilden. Gemäss ihrer Gehäusefarbe wird unterschieden zwischen der:

- weissen Ware: Haushaltsgeräte wie Kühlschränke, Waschmaschinen, Tumbler, aber auch Elektroherde etc.
- grauen Ware: Informations- und Kommunikationsgeräte, wie Computer, Natel, Smartphones usw.
- braunen Ware: Geräte der Unterhaltungselektronik, wie Fernseher, Radio, Stereoanlage etc.

War die Abgrenzung zwischen den Kategorien in der Vergangenheit noch klar, verschwimmen die Grenzen mit der zunehmenden Multifunktionalität und dem steigenden Technisierungsgrad der Geräte. So ist es heute teilweise zur Normalität geworden, auf dem Smartphone Filme zu schauen oder vernetzte Haushaltsgeräte fernzusteuern.

Stromverbrauch für Geräte allgemein

Der Ausstieg aus der Atomenergie und der steigende Elektrizitätsverbrauch machen es unabdingbar, sich detailliert mit dem Thema Geräte zu beschäftigen. Nicht umsonst ist neben dem Ausbau der erneuerbaren Energien besonders die Steigerung der Energieeffizienz Schwerpunkt der Energiestrategie 2050 des Bundes. Die Energieeffizienz soll neben den Bereichen Gebäude, Mobilität und Industrie auch bei Geräten erhöht werden [5]. Heutzutage gibt es eine grosse Vielzahl von Geräten, die unseren Arbeitsalltag erleichtern.

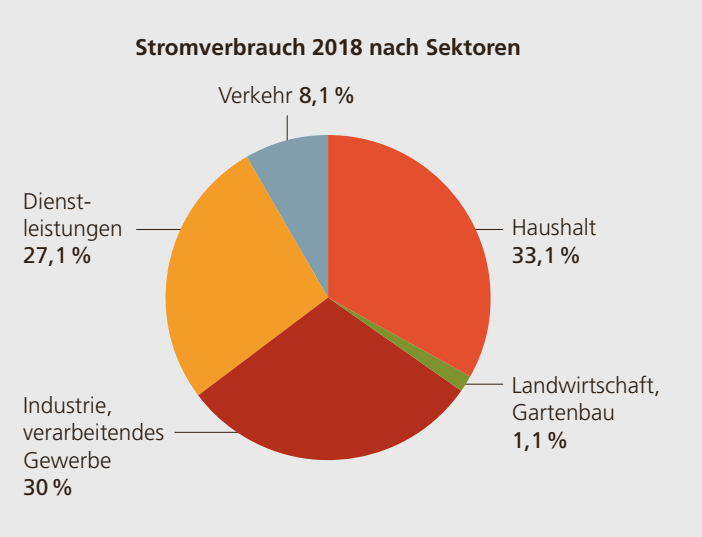


Abbildung 4.18: Stromverbrauch 2018 nach Sektoren. (Quelle: Bundesamt für Energie BFE, Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2018)

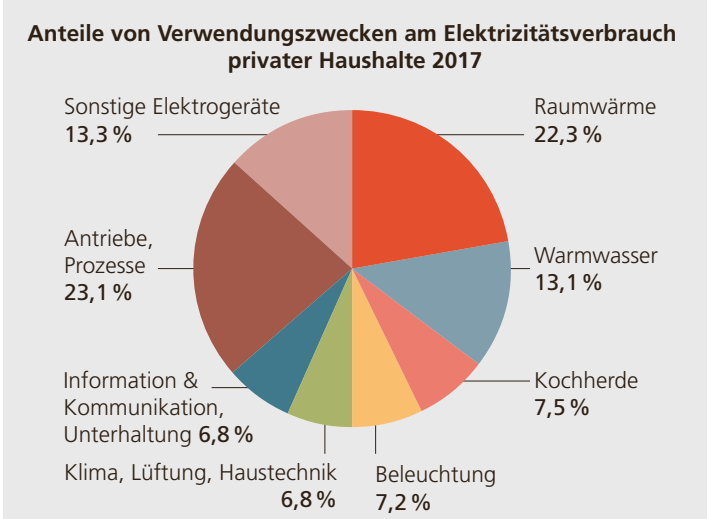


Abbildung 4.19: Prozentuale Anteile von Verwendungszwecken am Elektrizitätsverbrauch privater Haushalte 2017. (Quelle: [7])

Tabelle 4.9 (unten): Elektrizitätsverbrauch der privaten Haushalte nach Verwendungszwecken in TWh von 2000 bis 2017. (Quelle: [7])

Verwendungszweck	2000	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Differenz 2000–2017
Raumwärme	3,4	3,7	4,1	4,6	3,6	4,0	4,3	4,2	+25,4 %
Warmwasser	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	+6,4 %
Kochherde	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	+6,7 %
Beleuchtung	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	–13,8%
Klima, Lüftung, Haustechnik	1,0	1,1	1,2	1,3	1,1	1,2	1,3	1,3	+28,4 %
Information und Kommunikation inkl. Unterhaltung	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	–14,5 %
Antriebe, Prozesse	3,6	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,4	4,4	+21,1 %
Sonstige Elektrogeräte	1,3	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	+95,0 %

Abbildung 4.18 zeigt, dass der Sektor Haushalt den grössten Anteil am Stromverbrauch aufweist (33,1% oder 19,1 Mrd. kWh) [6]. Betrachtet man den Elektrizitätsverbrauch der Haushalte genauer, ergibt sich eine Verteilung gemäss Abbildung 4.19 und Tabelle 4.9 [7].

Der Verwendungszweck mit dem grössten prozentualen Anteil (23,1%) ist «Antriebe, Prozesse». Er umfasst Waschen und Trocknen, Kühlen und Gefrieren, Geschirrspülen und Arbeitshilfen. Die Verbräuche dieser Prozesse zeigt Tabelle 4.10.

Erfreulicherweise ist der Elektrizitätsverbrauch für Beleuchtung, Information und Kommunikation (I&K), Unterhaltung sowie Kühlen und Gefrieren im Betrachtungszeitraum von 2000 bis 2017 gesunken. Massnahmen wie das sogenannte «Glühlampenverbot» oder die Reglementierung über das Inverkehrbringen von Kühlgeräten der Effizienzklasse A++ oder A+++ scheinen zu wirken. Hingegen ist bei den Verwendungszwecken «Waschen und Trocknen» sowie «sonstige Elektrogeräte» ein immenser Anstieg des Verbrauchs zu verzeichnen. Vermutlich, weil eine grössere Anzahl von Haushalten über eigene Waschmaschinen und Trockner verfügen (strukturelle Veränderung: weg von Gemeinschafts-Waschküchen hin zu eigenen Geräten im Haushalt). Der Anstieg bei den sonstigen Elektrogeräten ist mit der Tatsache zu erklären, dass es immer mehr elektrische Hilfsgeräte im Haushalt gibt.

Tabelle 4.10: Elektrizitätsverbrauch für Beleuchtung, Kochherde und Elektrogeräte im Jahr 2017 und Differenz von 2000 bis 2017 in %. (Quelle: zusammengefasst aus [7])

Verwendungszweck	2017	Differenz 2000–2017
Kochherde	1,4 TWh	+6,7 %
Beleuchtung	1,4 TWh	–13,8 %
Information und Kommunikation, inkl. Unterhaltung	1,3 TWh	–14,5 %
Kühlen und Gefrieren	1,7 TWh	–12,4 %
Waschen und Trocknen	1,4 TWh	+97,7 %
Sonstige Elektrogeräte	2,5 TWh	+95,0 %

Energieetikette

Die in der EU seit 1996 und in der Schweiz seit 2002 eingeführte Energieetikette informiert über den Energiebedarf und zusätzliche Gebrauchseigenschaften (beispielsweise Wasserverbrauch oder Lärmpegel) von Geräten (Abbildung 4.20). Die Etikette bietet dem Verbraucher die Möglichkeit, Geräte miteinander zu vergleichen und erleichtert die Kaufentscheidung. Sie besteht aus sieben Energieeffizienzstufen, die von G (höchster Energieverbrauch) bis A (niedrigster Energieverbrauch) reichen. Aufgrund des Technologiefortschritts wurden für Geräte, die den niedrigsten Energieverbrauch nochmals deutlich unterschritten, die Kategorien A+, A++ und A+++ eingeführt. Die fortlaufende Verbesserung der Geräte führt dazu, dass die Etiketten regelmässig angepasst werden (voraussichtlich neues Energielabel ab März 2021 [8]). Die Energieetikette dient auch der Reglementierung des Inverkehrbringens von Geräten oder als marktwirtschaftliches Instrument. Ein Beispiel ist das seit 2009 herrschende Verbot des Verkaufs von ineffizienten Leuchtmitteln (Glühlampen) [9]. Inzwischen gibt es die Energieetikette für eine Vielzahl von



1 Name oder Marke des Herstellers
2 Typenbezeichnung
3 Energieeffizienzklasse
4 Energieverbrauch in kWh/Jahr basierend auf 280 Standard-Spülgängen. Der tatsächliche Energieverbrauch hängt von der Nutzung des Gerätes ab.
5 Geräuschemission indB(A) respektive 1pW (Schallleistung)
6 Anzahl der Massgedecke bei Standardbeladung
7 Klassifizierung der Trocknungswirkung
8 Jährlicher Wasserverbrauch in Litern basierend auf 280 Standard-Spülgängen. Der tatsächliche Wasserverbrauch hängt von der Nutzung des Gerätes ab.
9 Bezeichnung der Regulierung

Abbildung 4.20: Energieetikette eines Geschirrspülers als Beispiel. (Quelle: EnergieSchweiz)

Geräten und Bauteilen (Fenster, Armaturen etc.). Eine Übersicht gibt Abbildung 4.21.

Energielabel Energy Star für Bürogeräte

Energieeffiziente Geräte für Information und Kommunikation werden mit dem Label «Energy Star» gekennzeichnet. Es soll den Konsumentinnen und Konsumenten den Kaufentscheid erleichtern. Das freiwillige Programm wird vom Bund (Energie Schweiz) unterstützt. Hersteller, Importeure und Wiederverkäufer können ihre Geräte online anmelden, wenn sie den gesetzten Mindestanforderungen entsprechen. Die Anforderungen werden nur von einem Viertel der am Markt verfügbaren Geräte erfüllt [10].

Nutzerverhalten

Mit der Wahl eines energieeffizienten Geräts ist der erste Schritt zum rationellen Umgang mit Elektrizität getan. Aber auch die richtige Wahl der Gerätegrösse, der Aufstellungsort und das Nutzerverhalten haben einen massiven Einfluss auf den Elektrizitätsverbrauch. Eine energieeffiziente Waschmaschine, die nur zur Hälfte gefüllt ist, aber dafür mehrmals wöchentlich läuft, kann unter Umständen mehr Energie verbrauchen, als eine weniger effiziente, die optimal gefüllt und daher nur

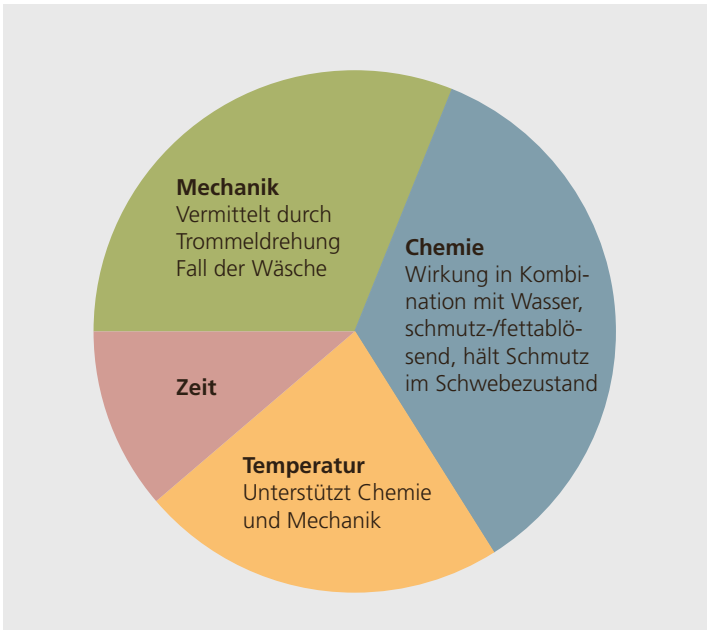


Abbildung 4.22: Waschkreis nach Sinner am Beispiel Waschmaschine. (Quelle: [11])

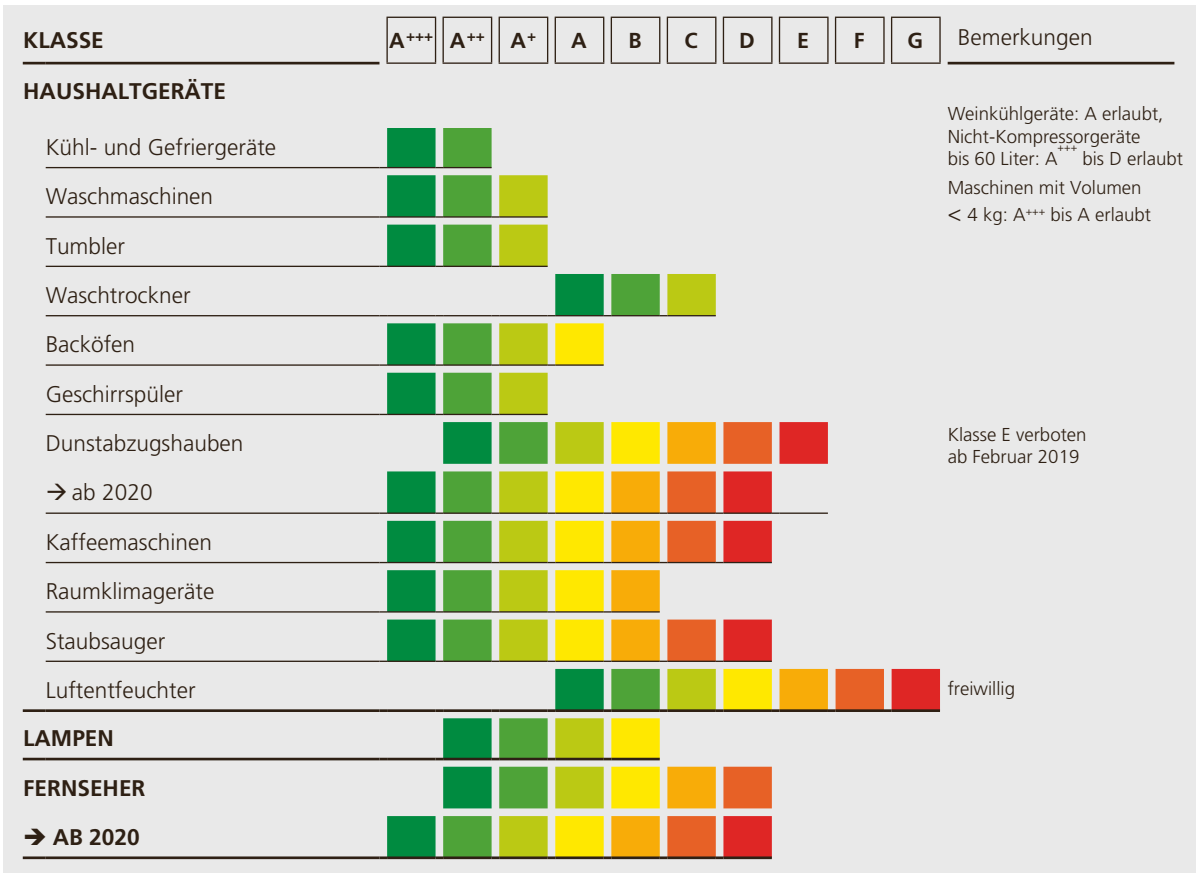


Abbildung 4.21: Haushaltsgeräte mit Effizienzetikette und deren Effizienzklasse. (Quelle: EnergieSchweiz)

ein Mal pro Woche im Einsatz ist. Ganz besonders bemerkbar macht sich dieser Umstand bei Geräten, die rund um die Uhr (Kühlschrank) oder sehr häufig im Einsatz sind (Kochherd, Backofen). Ebenso wichtig ist die Wahl des geeigneten Programms. Viele Nutzende fragen sich, warum die sogenannten «Eco-Programme» sehr lange dauern (2 bis 3 Stunden). Eine Erklärung liefert der Waschkreis nach Sinner (Abbildung 4.22). Das Reinigungsergebnis wird von vier Faktoren beeinflusst: Temperatur, Zeit, Chemie und Mechanik. Ein grosser Anteil des Energieverbrauchs wird für die Bereitstellung der Wassertemperatur aufgewendet. Wird also dieser Faktor verkleinert, muss mindesten einer der anderen Faktoren geändert werden (unter Umständen die Zeit).

Einige Geräte verfügen über einen Warmwasseranschluss, mit dem auch Energie gespart werden kann. Dies aber nur, wenn der Warmwasserboiler nicht zu weit vom Haushaltsgerät entfernt ist und das Warmwasser nicht elektrisch erwärmt wird [12].

Es gibt eine Vielzahl weiterer Energiesparmassnahmen, wie beispielsweise:

- Deckel auf die Pfanne beim Kochen
- Bei Elektroherden mit Gussplatten oder Heizwedeln die Nachwärme nutzen
- Keine warmen Lebensmittel in den Kühlschrank stellen
- Gefrorene Lebensmittel im Kühlschrank auftauen lassen etc.

Standby-Verbrauch

Nicht zu vernachlässigen ist der Standby-Modus (Bereitschaftsmodus), über den viele Geräte der Unterhaltungselektronik und zunehmend auch vernetzte Haushaltsgeräte verfügen. Uhrzeit- und Zustandsanzeige oder die Bereitschaft, ein Funksignal der Fernbedienung zu empfangen, bedeuten, dass auch ausgeschaltete Geräte noch Strom verbrauchen. Gesetzliche Bestimmungen begrenzen den Standby-Wert von Neugeräten auf 0,3 W bis 1 W. Bei Geräten mit verkabelten oder drahtlosen Kommunikationsnetzwerken liegt er bei 3 W bis 8 W. Diese Leistungsbezüge erscheinen zwar relativ gering, wirken aber rund um die Uhr und an 365 Tagen pro Jahr. 700 Mio. kWh pro Jahr könnten mit einer Reduktion des Standby-Verbrauchs theoretisch schweizweit eingespart werden [13] (Abbildung 4.23). Mit schaltbaren Steckerleisten und Steckdosen oder dem Einsatz von Zeitschaltuhren (mit geringem Standby-Verbrauch) können Nutzende den Standby-Verbrauch reduzieren. Etwas umständlich, aber sehr wirkungsvoll, ist das Ziehen des Netzsteckers.

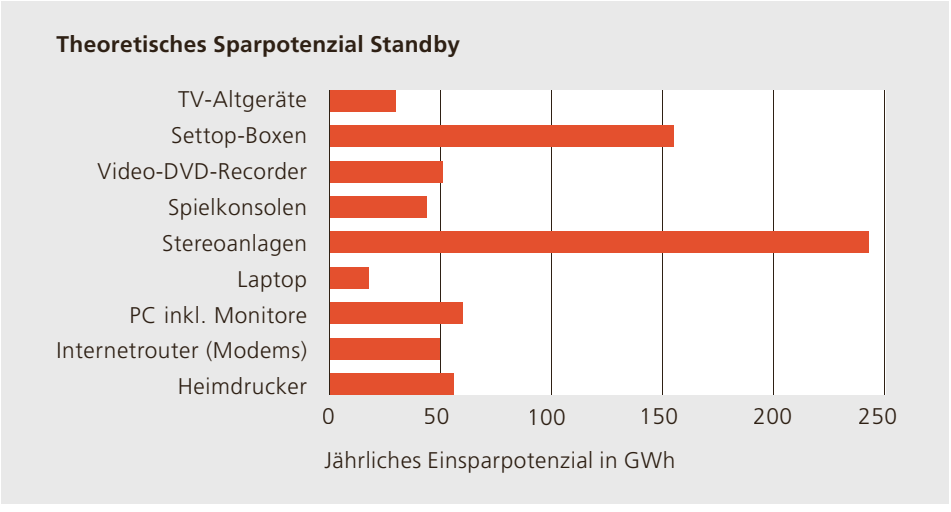


Abbildung 4.23: Theoretisches Einsparpotenzial Standby [13].

4.5 Beleuchtung

Lichttechnische Grössen

Licht ist elektromagnetische Strahlung, für die unser Auge empfindlich ist. Der Wellenlängenbereich beginnt bei ungefähr 380 nm und geht bis 780 nm und ist somit ein sehr kleiner Bereich des gesamten Spektrums der elektromagnetischen Strahlung. Die vier wichtigsten lichttechnischen Grössen, mit deren Hilfe Beleuchtungsanlagen, Leuchtmittel und Leuchten geplant und qualitativ sowie energetisch bewertet werden können, sind in Tabelle 4.11 aufgeführt.

Lichttechnische Anforderungen an die Beleuchtungsanlage

Im Zentrum der Planung einer Beleuchtungsanlage sollte der Mensch stehen, der sich in den Innenräumen aufhält und gewisse Tätigkeiten ausführt. In der SN EN 12464-1 [14] sind quantitative und qualitative Gütemerkmale der Beleuchtung aufgeführt, die die Bedürfnisse des Menschen nach Sehkomfort (Wohlbefinden und Leistungsbereitschaft), Sehleistung (Ausführung der Sehaufgabe) und Sicherheit erfüllen sollen (Abbildung 4.24).



Abbildung 4.24: Gütemerkmale der Beleuchtung nach SN EN 12464-1: 2011. (Quelle: Trilux)

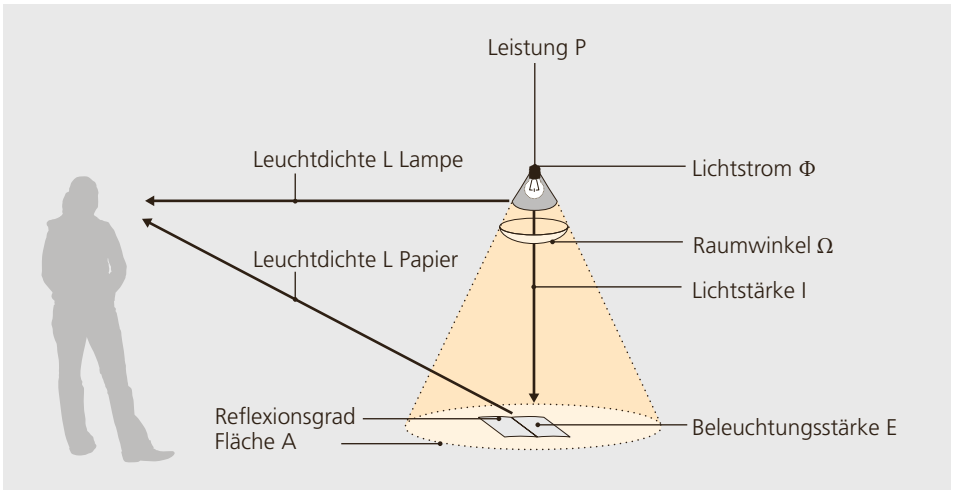


Abbildung 4.25: Zusammenhang der lichttechnischen Grössen. (Quelle: vdf Hochschulverlag)

Lichtstrom	Φ	Lumen (lm)	Die von einem Leuchtmittel erzeugte Menge an Licht. Wieviel Licht ausgesendet wird, hängt davon ab, wie viel elektrische Leistung in das Leuchtmittel gesteckt wird und wie effizient der Umwandlungsprozess stattfindet.
Lichtstärke	I	Candela (cd)	Der in einer bestimmten Richtung (Raumwinkel) abgegebene Lichtstrom.
Beleuchtungs-stärke	E	Lux (lx)	Der auf eine bestimmte Fläche A auftreffende Lichtstrom. Die Beleuchtungsstärke ist für Arbeitsbereiche in Innenräumen in der Norm SN EN 12464-1 (Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil1: Arbeitsstätten in Innenräumen) festgelegt.
Leuchtdichte	L	Candela pro Fläche (cd/m^2)	Ist die vom Auge wahrgenommene Helligkeit eines Selbstleuchters (Leuchtmittel oder Leuchte) oder einer beleuchteten Fläche.

Tabelle 4.11: Zusammenhang der lichttechnischen Grössen.

In zweiter Linie kann Licht in Innenräumen der Gestaltung dienen, Atmosphäre schaffen und die Architektur unterstützen. Im Idealfall werden in der Lichtplanung beide Gesichtspunkte (Bedürfnis des Menschen und Gestaltung) berücksichtigt. Hinzu kommt die Anforderung an die Energieeffizienz der Beleuchtungsanlage.

Stromverbrauch für Beleuchtung

Der Anteil der Beleuchtung am Stromverbrauch der Schweiz im Jahr 2017 betrug 12,2 % oder 7,03 Mrd. kWh. Dies beinhaltet die Innenraum- sowie die Aussenbeleuchtung [7]. Wird der Beleuchtungsanteil sektorenweise betrachtet, so kann man erfreulicherweise feststellen, dass im Sektor Private Haushalte der Anteil der Beleuchtung am Stromverbrauch in den letzten Jahren gesunken ist (Abbildung 4.26; –13,8 % zwischen 2000 und 2017). Dies ist auf das stufenweise Verbot von ineffizienten Leuchtmitteln zurückzuführen.

Anders sieht es im Dienstleistungssektor aus (Abbildung 4.27). Hier ist der Anteil der Beleuchtung mit 23,8 % (4,2 Mrd. kWh) etwa ähnlich gross, wie der Anteil für Klima, Lüftung und Haustechnik. Allerdings wird hier auch der Beleuchtungsanteil des Verkehrssektors mitgerechnet (Beleuchtung von Strassen und Bahnhöfen).

Mit der Entwicklung von energieeffizienten Leuchtmitteln und Leuchten mit LED-Technologie ist ein grosser Schritt zur Energieeinsparung im Beleuchtungsbereich erreicht. Der einfache Einsatz von LED-Technologie reicht allerdings nicht immer aus, um automatisch eine energieeffiziente Beleuchtung zu erreichen, wie im Folgenden gezeigt werden soll. Der Stromverbrauch für Beleuchtungsanlagen wird in der Planungsphase wie folgt berechnet [15]:

$$E_L = \frac{p_L \cdot t_L}{1000}$$

E_L spezifischer Elektrizitätsbedarf Beleuchtung in kWh/(m² a)
p_L spezifische Leistung Beleuchtung in W/m²
t_L Volllaststunden Beleuchtung in h/a

Der Elektrizitätsbedarf ergibt sich aus dem Produkt der spezifischen Leistung multipliziert mit den Volllaststunden. Um eine Beleuchtungsanlage also möglichst energieeffizient zu planen und zu betreiben, muss gewährleistet sein, dass die bezogene elektrische Leistung klein ist und die Beleuchtungsanlage möglichst wenig eingeschaltet ist. Der Leistungsbezug wird massgeblich von der Effizienz der Leuchtmittel und Leuchten, aber auch von der Gestaltung des Raumes und von der Höhe der geforderten Beleuchtungsstärke beeinflusst. Die Einschaltdauer ist, wenn keine automatische Lichtregelung oder Lichtsteuerung in Funktion ist, nutzerabhängig.

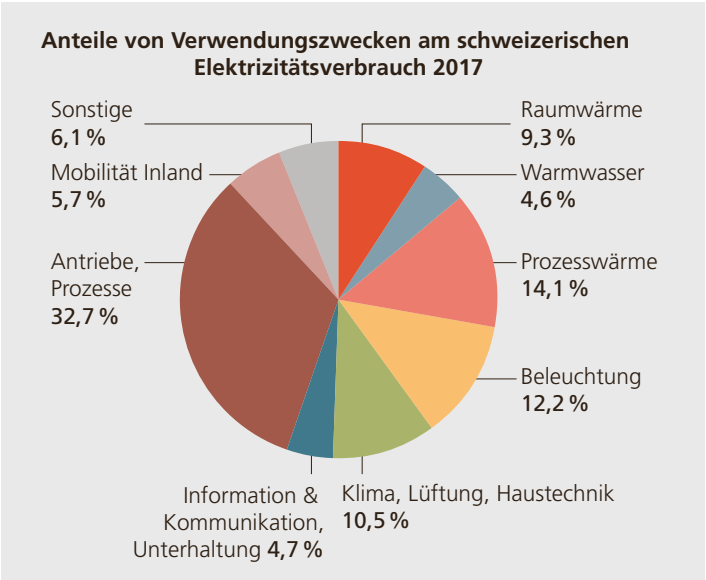


Abbildung 4.26: Prozentuale Anteile der Verwendungszwecke am schweizerischen Stromverbrauch 2017. (Quelle: [7])

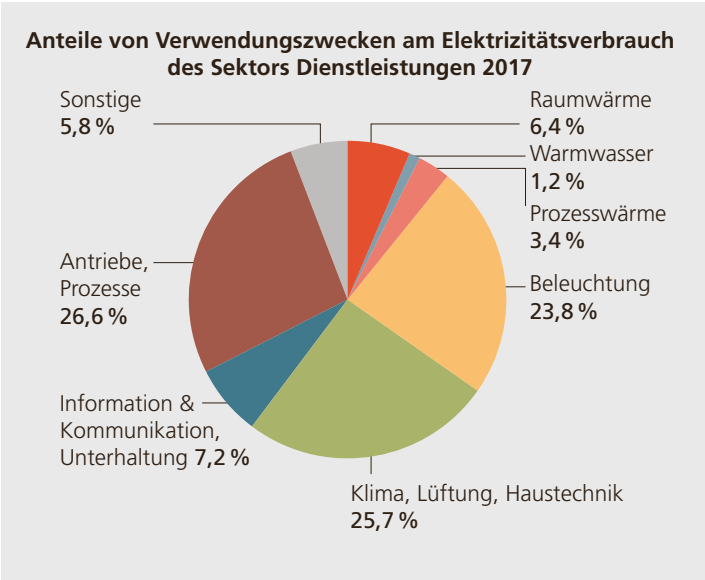


Abbildung 4.27: Prozentuale Anteile der Verwendungszwecke am Stromverbrauch 2017 des Dienstleistungssektors. (Quelle: [7])

Energieeffizienz von Leuchtmitteln und Leuchten

Licht lässt sich mittels dreier Technologien erzeugen:

- Temperaturstrahlung (Glühlampen, Halogenglühlampen etc.)
- Gasentladung (Leuchtstofflampen, Energiesparlampen etc.)
- Elektrolumineszenz (LED, OLED).

Das Mass für die Energieeffizienz eines Leuchtmittels ist das Verhältnis von produziertem Lichtstrom zur aufgenommenen elektrischen Leistung und wird als Lichtausbeute bezeichnet.

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \frac{lm}{W}$$

Wie sehr sich die Lichtausbeute einzelner Leuchtmittel der unterschiedlichen Technologien unterscheiden können, zeigt Tabelle 4.12.

Die LED-Lampe produziert also mit einem Watt elektrischer Leistung ca. 8-mal mehr Licht als eine Halogenglühlampe, ist also eindeutig energieeffizienter. Allerdings zeigt Abbildung 4.28, wie wichtig es ist, diese Daten von Leuchtmitteln oder von Leuchten genauer anzuschauen. Die LED-Technologie ist nicht automatisch immer energieeffizient. Waren die Leistungen bei der Glühlampe noch einer definierten Helligkeit (bzw. Lichtstrom) zugeordnet, kann eine LED-Lampe mit beispielsweise 6 W einen grösseren oder geringeren Lichtstrom erzeugen.

Die LED-Technologie hat zu einer weiteren Entwicklung geführt: Leuchten und Leuchtmittel sind nicht mehr durch Sockel und Fassung voneinander getrennt. LED-Module (oder Platinen und Chips) sind fest in der Leuchte verbaut. Das führt dazu, dass die Energieeffizienz von Leuchten ebenfalls durch die Lichtausbeute quantifiziert wird. Der früher gebräuchliche Wirkungsgrad beschreibt diese Qualität nur unzureichend. Die Leuchtenlichtausbeute ist das Verhältnis des Leuchtenlichtstroms zur Systemleistung der Leuchte (Leistungsaufnahme des Leuchtmittels und der Betriebsgeräte, P_{sys}). Üblich sind mittlerweile Leuchten mit Lichtausbeuten von über 100 lm/W.

Tabelle 4.12: Vergleich von Lichtausbeuten von handelsüblichen Leuchtmitteln; Lichtstrom und Leistung sind Herstellerangaben auf der Leuchtmittelverpackung.

Technologie	Temperaturstrahler	Gasentladung	Elektro-lumineszenz
Leuchtmitteltyp	Halogenglühlampe	Energiesparlampe	LED-Lampe
Lichtstrom	850 lm	810 lm	806 lm
Leistung	53 W	15 W	6 W
Lichtausbeute	~16 lm/W	~54 lm/W	~134 lm/W

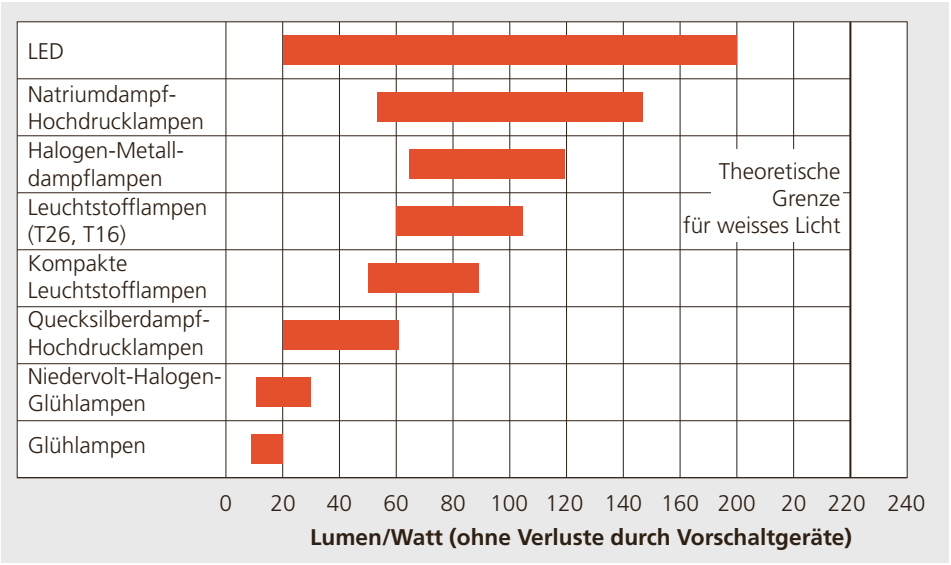


Abbildung 4.28: Lichtausbeuten von unterschiedlichen Leuchtmitteln. (Quelle: Licht.de)

Einfluss von Raum und Leuchte

Der Raum hat durch seine Geometrie (Länge, Breite und Höhe), durch seine Gestaltung (Raumreflexionsgrade) und durch seine Nutzung ebenfalls Einfluss auf die Energieeffizienz der Beleuchtungsanlage. Eindeutig ist, dass grosse Raumflächen mehr Leuchten (und damit mehr elektrische Leistung) benötigen, um eine bestimmte Helligkeit zu erzeugen, als kleinere Raumflächen. Das photometrische Entfernungsgesetz besagt, dass die Beleuchtungsstärke auf ein Viertel reduziert wird, wenn der Abstand der Lichtquelle zur beleuchteten Fläche verdoppelt wird.

Die Raumhöhe und damit der Abstand der Leuchte zur Fläche, auf der das Licht gebraucht wird, ist also auch ein erheblicher Einflussfaktor. Durch die helle Gestaltung von Raumbegrenzungsflächen, wie Boden, Decke und Wände kann das erzeugte Licht gut reflektiert werden und geht nicht verloren. Dabei spielt die Abstrahlcharakteristik der Leuchte ebenfalls eine Rolle. Strahlt diese beispielsweise mit einem hohen Indirekt-Anteil die Decke an, so sollte diese möglichst hell gestaltet sein, damit viel Licht reflektiert wird (Tabelle 4.13).

Die Abstrahlcharakteristik von Leuchten wird mit der Lichtstärkeverteilungskurve

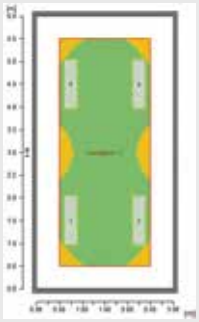
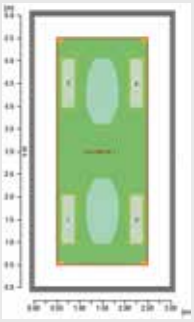
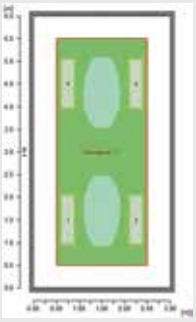
Raumreflexionen	dunkel	normal	hell
			
Decke	30 %	70 %	80 %
Wände	30 %	50 %	50 %
Boden	10 %	20 %	30 %
Mittlere Beleuchtungsstärke	575 lx	638 lx	650 lx

Tabelle 4.13: Einfluss der Reflexionsgrade auf die Beleuchtungsstärke (gleiche Raumgrösse und gleiche Leuchte; Berechnung mittels Relux-Desktop).

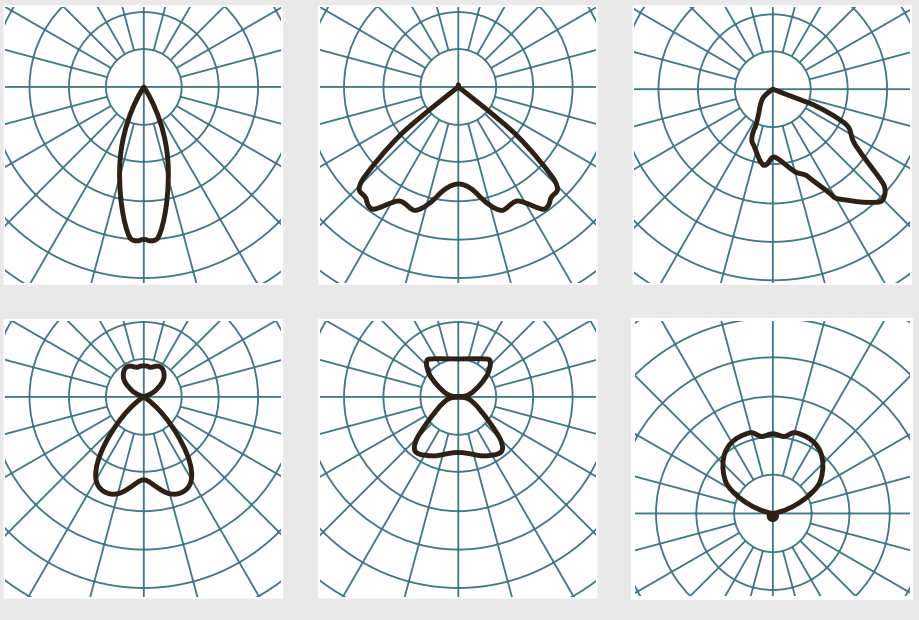


Abbildung 4.29 : Beispiele verschiedener Lichtstärkeverteilungskurven (oben von links nach rechts): tief strahlend, breit strahlend, asymmetrisch strahlend, unten von links nach rechts: vorwiegend direkt strahlend, gleichförmig strahlend, indirekt strahlend. (Quelle: Trilux)

dargestellt. Dabei wird die Lichtstärke, die unter genormten Bedingungen (z. B. Gebrauchslage, Umgebungstemperatur) gemessen wurde, in ein Polarkoordinatensystem eingefügt. Damit die Lichtstärkeverteilungskurven (kurz LVK) aller Leuchten miteinander verglichen werden können, wird die Lichtstärke auf 1000 Lumen der in der Leuchte installierten Leuchtmittel bezogen. Abbildung 4.29 zeigt unterschiedliche LVK verschiedener Leuchten. Werden diese LVK vom Hersteller auf dem Datenblatt der Leuchte aufgeführt, erkennt der Lichtplaner auf einen Blick, wie die Leuchte ihr Licht abstrahlt und kann je nach Bedarf eine Leuchte mit einer bestimmten Abstrahlcharakteristik wählen.

Durch die Nutzung des Raumes ist die Beleuchtungsstärke festgelegt, die erreicht werden muss. In einem Büro werden beispielsweise 500 lx und in einer Teeküche nur 200 lx gefordert. Selbstverständlich muss mehr elektrische Leistung investiert werden, um 500 lx zu generieren als 200 lx (bei gleicher Leuchte).

Durch die Verschmutzung von Räumen und Leuchten, sowie den Lichtstromrückgang der Leuchtmittel während der Lebensdauer (Alterung) und Ausfall einzelner Leuchtmittel nimmt mit der Zeit der produzierte Lichtstrom der Beleuchtungsanlage und damit die Beleuchtungsstärke ab. In der Lichtplanung wird diese Tatsache mit einem Wartungsfaktor (WF; oder Maintenance Factor MF) berücksichtigt. Dieser stellt im Prinzip einen Sicherheitszuschlag dar, damit über ein bestimmtes Wartungsintervall die Beleuchtungsstärke nicht unter den normativ empfohlenen Wert fällt.

Energetisch gesehen ist es sinnvoll, das Wartungsintervall möglichst kurz zu halten. Denn so kann ein geringerer Neuwert der Beleuchtungsanlage installiert werden (Abbildung 4.30). Ein kleiner Neuwert der Beleuchtungsstärke bedeutet gleichzeitig auch, dass weniger Leistung benötigt wird.

Lichtmanagement

Eine Beleuchtungsanlage wird nicht immer mit der maximalen Leistung betrieben (Abbildung 4.31). Das heisst, das Licht wird mal ausgeschaltet respektive je nach Tageslichtverfügbarkeit gedimmt. Volllaststunden sind diejenigen Stunden, während derer die Beleuchtungsanlage unter Volllast in Betrieb ist (bei gleichem Energieverbrauch). Die rechteckige graue Fläche in Abbildung 4.31 hat also den gleichen Flächeninhalt wie die rote Fläche unter der Kurve.

Die Minimierung der Betriebszeit ist ein entscheidender Faktor, um bei der Beleuchtung Energie zu sparen. Das Nutzen von Tageslicht oder das Reagieren auf Anwesenheit von Personen kann mittels einer geeigneten Lichtsteuerung und Lichtregelung über Sensoren gewährleistet werden. Wieviel Energie damit eingespart werden kann, hängt massgeblich davon ab, wie gut der Innenraum mit Tageslicht versorgt ist. Ein allgemein gebräuchliches Mass für diese Versorgung mit Tageslicht ist der Ta-

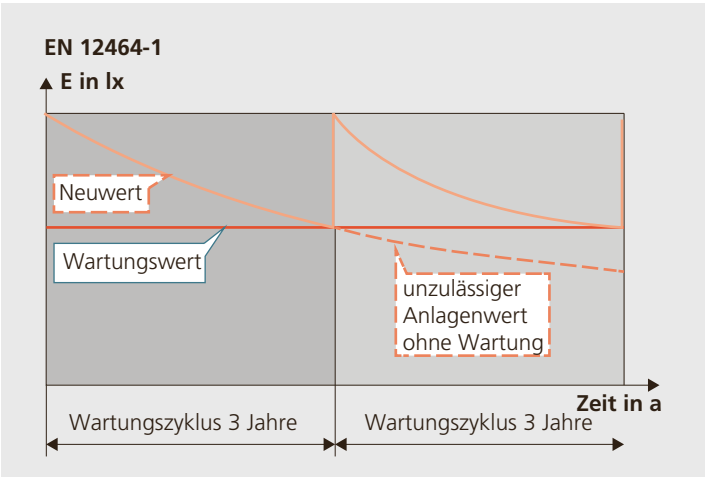


Abbildung 4.30: Verlauf der Beleuchtungsstärke einer Anlage über die Betriebszeit. (Quelle: Trilux)

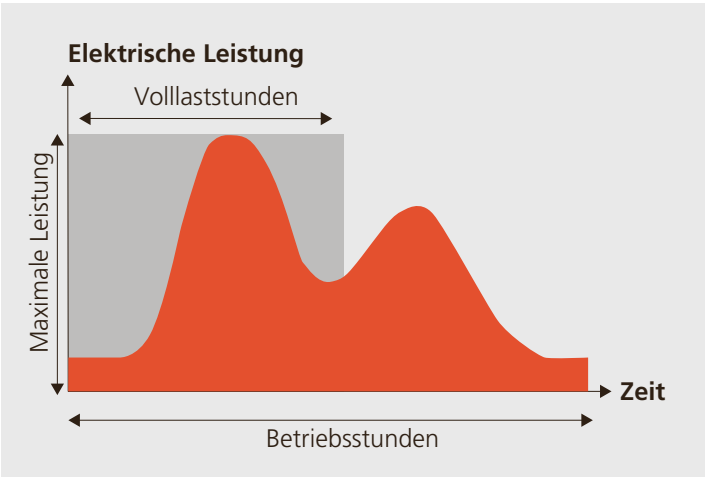


Abbildung 4.31: Volllaststunden nach SIA 387/4.

geslichtquotient D. Er ist definiert als das Verhältnis der Beleuchtungsstärke an einem Punkt im Innenraum (E_{innen}) zur Beleuchtungsstärke im Aussenbereich.

$$D = \frac{E_{innen}}{E_{aussen}} \cdot 100$$

Ein Tageslichtquotient von weniger als 2 % gilt in Arbeitsräumen als ungenügend [16]. Die Grösse der Fensterflächen und deren Positionierung, der Lichttransmissionsgrad von Gläsern, die Horizontverschattung des Gebäudes sowie die Beschaffenheit des Sonnenschutzes und deren Steuerung beeinflussen die Nutzung von Tageslicht in Gebäuden.

Abbildung 4.32 zeigt das Zusammenspiel von Tageslicht (blaue Kurve: Verlauf des Tageslichtquotienten) und elektrischer Beleuchtung (rote Kurve). Die Leuchtenreihe am Fenster muss weniger Licht aussenden als die Leuchtenreihe in der Tiefe des Raumes, wo weniger Tageslicht hingelangt. Mit der Nutzung von Tageslicht in Innenräumen kann die Energieeinsparung bis zu 70 % betragen [17]. Neben der Tageslichtnutzung kann mittels Sensoren die An- beziehungsweise die Abwesenheit von Personen im Raum erfasst werden und so das Licht ein- oder ausgeschaltet werden. Beide Massnahmen führen zu einer erheblichen Einsparung von Energie der Beleuchtung (Abbildung 4.33).

Abbildung 4.32: Verlauf der Beleuchtungsstärke des Tageslichts (blau) und der zugeschalteten elektrischen Beleuchtung (rot) eines einseitig befensterten Klassenraums. (Quelle: Trilux)

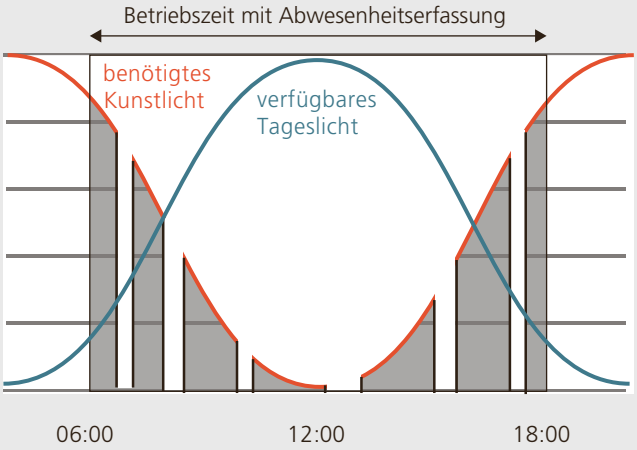
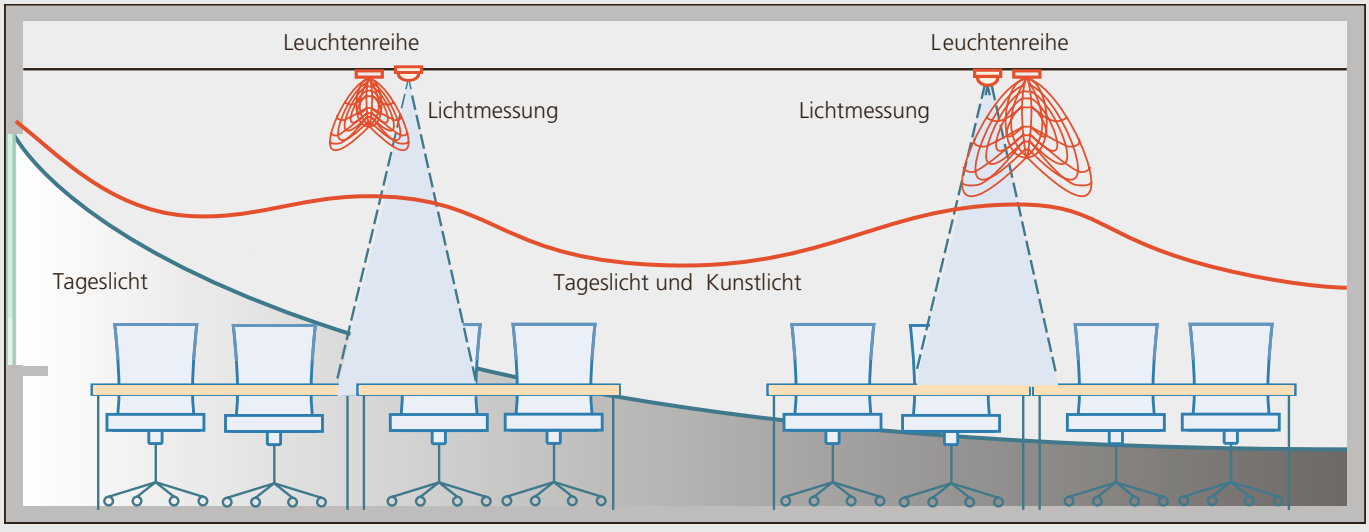


Abbildung 4.33: Durch geeignetes Lichtmanagement kann viel Energie eingespart werden. (Quelle: Trilux)



4.6 Photovoltaik

Armin Binz

Photovoltaik auf dem Vormarsch

Photovoltaik wird zu einer tragenden Säule der Elektrizitätsversorgung der Zukunft werden. Zwei Ursachen hat diese allgemeine Zuversicht:

1. Die Technologie hat sich bewährt. Einerseits funktionieren Anlagen aus den 1980er-Jahren auch heute noch einwandfrei. Andererseits wurden Lösungen für die Vielzahl von Anwendungsfragen wie Betriebssicherheit, Blitzschutz, Feuerrisiken etc. gefunden und sind heute Standard der Anlagen.
2. Die Preise für PV-Module sind über die letzten dreissig Jahre im Schnitt mit jeder Verdoppelung der Photovoltaik-Installationen um 24 % gesunken (Abbildung 4.34). Da die Modulkosten etwa die Hälfte der Gesamtkosten einer PV-Anlage ausmachen, wirkte sich dies entsprechend auch auf die gesamten Anlagenkosten aus.

Diese Entwicklung hat ihren politischen Niederschlag in den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEn 2014) gefunden. Dort wird unter dem Titel «Eigenstromerzeugung bei Neubauten» gefordert: «Neue Bauten erzeugen einen Teil der von ihnen benötigten Elektrizität selber.» Und in quantifizierter Form: «Die im, auf oder am Gebäude installierte Elektrizitätserzeugungsanlage bei Neubauten muss mindestens 10 W pro m² EBF betragen, wobei nie 30 kW oder mehr verlangt werden.» Damit wird das bereits früher publizierte Ziel in den Leitlinien der Konferenz der kantonalen Energiedirektoren (EnDK) konkretisiert, dass sich ab 2020 Neubauten «ganzjährig möglichst selbst mit Wärme sowie mit einem angemessenen Anteil Strom» versorgen sollen. Photovoltaikanlagen haben so ihren festen Platz im energieeffizienten Bauen für die Zukunft.

Die Technologie

Die Vielfalt der Photovoltaik-Zellen, mit denen Sonnenstrahlung in elektrischen Gleichstrom umgewandelt wird, lässt sich grob in zwei Gruppen unterteilen: Zellen auf der Basis von kristallinem Silizium mit Wirkungsgraden (Umsetzung von Sonnenstrahlung in Elektrizität) von 16 % bis 23 % und amorphe, oder auch Dünnschicht-Zellen mit Wirkungsgraden von 6 % bis 13 %. Kristalline Zellen machen mehr als 80 % des Marktes aus. Obwohl sie etwas teurer als Dünnschichtzellen sind, haben ihr Preiszerfall und der höhere Wirkungsgrad bewirkt, dass sie ihre Marktposition weiter behaupten konnten.

Eine Photovoltaikanlage besteht aus wesentlich mehr als nur aus den Zellen. Grup-

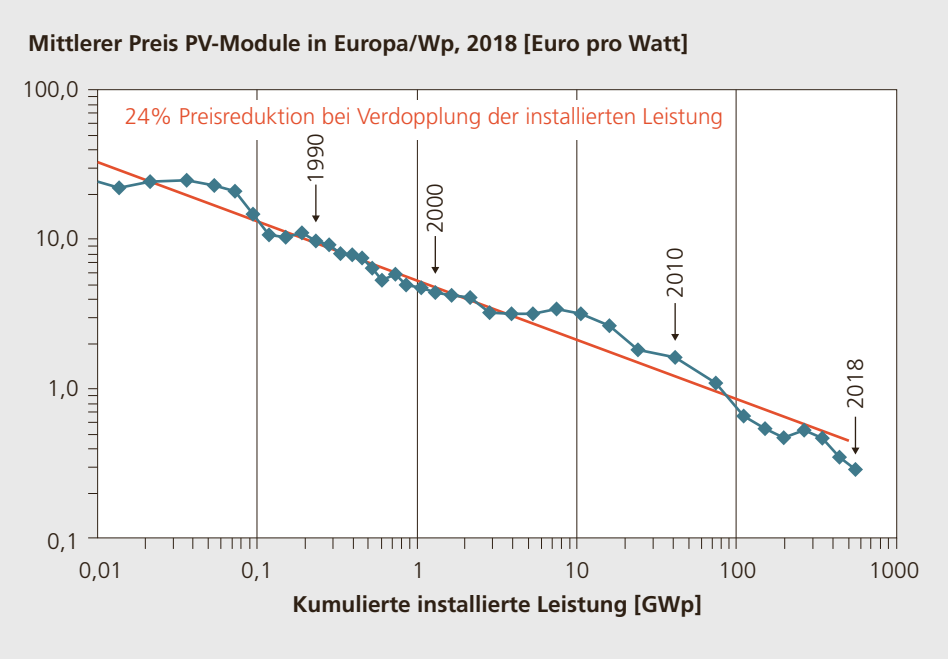


Abbildung 4.34: Entwicklung der Preise für PV-Module (Weltmarkt) in Euro pro Watt. Die Gerade zeigt den Trend der Preisentwicklung. (Quelle: ISE 2019)

pen von Zellen werden zu Modulen zusammengefasst. Module sind die relevante Fertigungs-, Handels- und Montageeinheit von PV-Anlagen. Daher sind Modul-Wirkungsgrade bedeutsamer und näher an der Realität als Zellen-Wirkungsgrade. Sie liegen bei Modulen mit kristallinen Zellen bei 15 % bis 21 % und bei Modulen mit Dünnschichttechnologie bei 5 % bis 13 %. Module werden elektrisch zu Strängen zusammengefasst und Wechselrichter formen den Strom um, sodass ein Anschluss an das Stromnetz möglich ist. Ebenfalls notwendig sind wetterfeste Verkabelungen, Sicherheitsmassnahmen gegen Brandrisiken, Blitzschutz etc. sowie eine Kommunikationseinrichtung, die Betriebsdaten und Störfälle meldet. Zudem muss die ganze Anlage solide gebaut und am Gebäude befestigt sein (Windlasten).

Photovoltaik am Gebäude

Wenn Gebäude als Photovoltaikträger genutzt werden sollen, stellt sich sofort die Frage, wo die Paneele platziert werden und damit auch die Frage, wie sie ausgerichtet sein sollen. Abbildung 4.36 zeigt die ungefähre Abhängigkeit der Erträge von PV-Anlagen von Neigung und Orientierung. Bei der Wertung dieser Zahlen ist noch einzubeziehen, dass die produzierte Elektrizität zum überwiegenden Teil in das Netz eingespeist wird und daher der Nachfrage anderer Nutzer respektive der jeweiligen Nachfrage im Netz entsprechen sollte. Heute sind im internationalen Stromhandel bereits deutliche Auswirkungen der solaren Spitzen-Stromproduktion der Photovoltaikanlagen feststellbar. Ein etwas verminderter Ertrag wegen Ost- oder West-Ausrichtung der Module fällt dafür zu Zeiten ausserhalb der Mittagsspitze an. Südfassaden bringen zwar 30 % weniger Jahresertrag als optimal ausgerichtete Zellen. Bezogen auf besonders willkommenen Winterstrom sieht die Bilanz allerdings anders aus (in Winter-Sonnengebieten!). Allerdings werden diese Zusammenhänge weder mit der Förderung, etwa der Kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV), noch mit der regulären Einspeisevergütung gewürdigt. Während Neigung und Orientierung der PV-Module durchaus erheblich von der otimalen Südorientierung mit 45° Neigung abweichen kann, ist die Beschattung ein ernstzunehmendes Thema. Auch wenn heute Schaltungen möglich sind, die nicht mehr zum Ausfall ganzer Anlagenbereiche führen, wenn nur ein Teil der Anlage beschattet wird, sollten Teilbeschattungen durch Gebäudeteile (Aufbauten, Vorsprünge etc.) möglichst vermieden werden. Schnee ist in Lagen unterhalb 1000 m über Meer kein nennenswertes Problem. Auch in höheren Lagen ist der Anteil an der Jahresproduktion, die durch liegenbleibenden Schnee vermindert wird, nicht sehr gross. Da es sich dabei aber um besonders willkommenen Winterstrom handelt, sollte bei der konstruktiven Ausgestaltung der PV-Anlage darauf geachtet werden, dass das Ab-

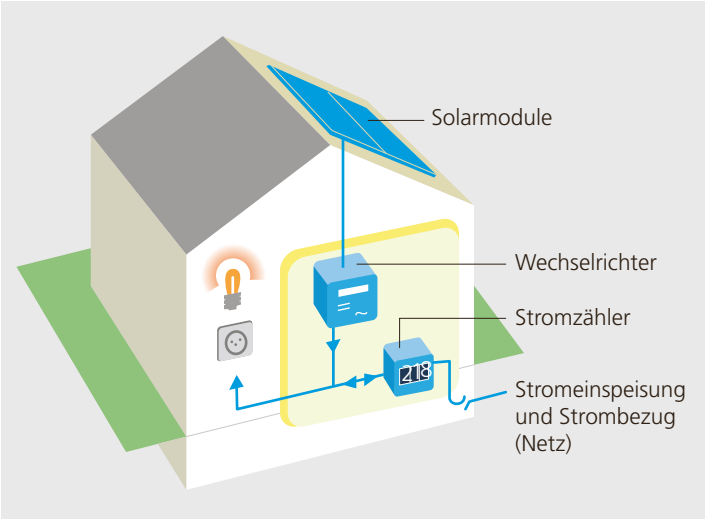


Abbildung 4.35: Die typische netzgebunde PV-Anlage auf dem Gebäude. (Quelle: Swissolar)

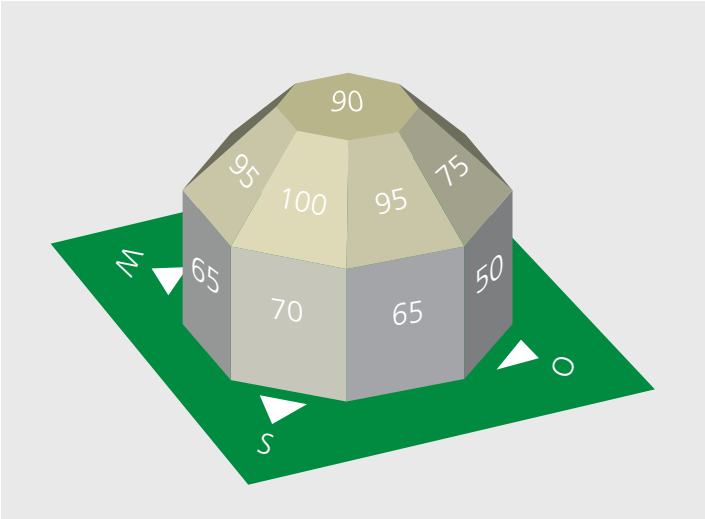


Abbildung 4.36: Abhängigkeit der Stromproduktion von PV-Modulen von der Orientierung und dem Neigungswinkel. (Quelle: Swissolar)

rutschen der Schneeschicht nicht durch querliegende Kanten, Stufen oder andere Hemmnisse behindert wird. Selbstredend muss jedoch Personengefährdung durch herunterfallenden Schnee vermieden werden.

BiPV – Building-integrated Photovoltaic

Der massive Preiszerfall hat dazu geführt, dass PV-Module als Alternativen zu gewöhnlichen Wetterschutzschichten konkurrenzfähig werden. In Fassaden sind sie eine Alternative zu Steinplatten, Metall-Paneelen oder Gläsern. Im Dach ersetzen sie als «In-Dach-Anlagen» die traditionelle Dacheindeckung. Damit werden PV-Module plötzlich auch als architektonisches Gestaltungselement wahrgenommen. Die seit einiger Zeit erhältlichen PV-Module in allen möglichen Farbtönen kommen diesem Trend entgegen (Abbildung 4.37). Während die Farbpalette der herkömmlichen Siliziumzellen von schwarz über anthrazit bis zu verschiedenen Blautönen reicht, werden mit Dünnschichtzellen auch dunkle Grün- und Rottöne möglich. Die Ausweitung dieser Palette auf fast die ganze Farbpalette ist ebenfalls möglich, wird allerdings mit einer Reduktion des Wirkungsgrades erkauft, da sie mit einer Veränderung der Reflexionsschicht der Zellen, Farbaufträgen oder farbigen Trägerelementen erreicht wird. Durch den Doppelnutzen als stromerzeugendes und gestaltungswirksames Gebäudehüllenelement hat diese neue Produktegeneration der Photovoltaik durchaus gute Marktchancen. Ohnehin ist zu erkennen, dass Photovoltaik mehr und mehr in Bauprodukte integriert wird. Auf dem Markt ist von semitransparenten Beschattungspaneelen auf Einfach- und Wärmeschutzverglasungen bis hin zu Balkonbrüstungen mit farbigen PV-Modulen mittlerweile eine Fülle von Produkten erhältlich (Abbildung 4.38). Weitere Informationen: www.bipv.ch.



Abbildung 4.37: Das Wohnhaus Solaris in Zürich-Wollishofen von huggenbergerfries ziert eine dunkelrote PV-Fassade. (Foto: Beat Bühler)



Abbildung 4.38: Vorplatzbeschattung mit PV-Modulen, Gemeindezentrum Ludesch, Österreich. (Foto: Ertex Solar, Amstetten, Österreich)

Das Gebäude als Stromproduzent

Photovoltaik-Strom hat für die Elektrizitätsversorgung zwei problematische Aspekte: Einerseits der geringe Ertrag im Winter und andererseits die starken, witterungsabhängigen Ertragsschwankungen. Die zukünftige Elektrizitätsversorgung wird durch einen entsprechenden Mix der Stromlieferanten und die differenzierte Steuerung der Netze (Smart Grids) die sichere Stromversorgung aufrechterhalten. Die dezentrale Erzeugung von Photovoltaik auf Gebäuden hat immerhin den Nutzen, dass sie die Netze zunächst einmal entlastet, weil der Strom vor Ort produziert und genutzt wird. Zu einer Netzüberlastung kommt es erst, wenn der Ausbaugrad an Photovoltaik den Eigenbedarf der kommunalen Verteilnetzregionen deutlich überschreitet, was noch einige Zeit dauern wird.

Zur Problematik der Jahreszeiten-Unterschiede zeigt Abbildung 4.39 die Situation am Beispiel eines Minergie-A-Einfamilienhauses im schweizerischen Mittelland. Minergie-A verlangt, dass der Gesamtenergiebedarf (Heizung, Warmwasser, Beleuchtung, Geräte und allgemeine Gebäudetechnik) durch Eigenenergieerzeugung in der Jahresbilanz gedeckt ist. Das Einfamilienhaus weist einen geringen Heizwärmebedarf auf. Die Heizperiode ist deshalb reduziert auf die fünf wirklich kalten Wintermonate. In dieser Zeit trägt die Photovoltaikanlage tatsächlich nicht allzuviel zur Deckung dieses Bedarfs bei. Trotz einem Grundbedarf an Elektrizität für Warmwasser, Beleuchtung und Geräte, der über das ganze Jahr gedeckt werden muss, entsteht in der Sommerperiode ein grosser Überschuss, der ins Netz eingespiesen wird. Bei genauerer Betrachtung der Tagesgänge wäre festzustellen, dass eine Einspeisung ins Netz sogar im Winter immer mal wieder nötig ist, weil die Stromnachfrage im Haus auch im Winter nicht nicht jederzeit das Stromangebot der PV-Anlage abnehmen kann. Die Speicherung und Regelung von tageszeitlichen Differenzen bietet aber wesentlich einfachere Lösungsmöglichkeiten als der Ausgleich von jahreszeitlichen Unterschieden. Durch Verschiebung von Lastbezügern in die Spitzenproduktionszeit (z. B. Waschen und Geschirrspülen in der Mittagszeit) und in der Zukunft evtl. auch durch die dezentrale Speicherung von Elektrizität in Batterien oder die Aufladung von Elektromobilen sollen diese Herausforderungen angegangen werden.

Eigenverbrauch und Autarkiegrad

Aus der Sicht des Bauherrn und Bewohners (oder beruflichen Nutzers eines Zweckbaus) ist die Photovoltaikanlage auf dem eigenen Gebäude häufig mehr als nur ein Energielieferant, wie es der Gaskessel oder die Wärmepumpe für die Beheizung des Gebäudes ist. Selbst erzeug-

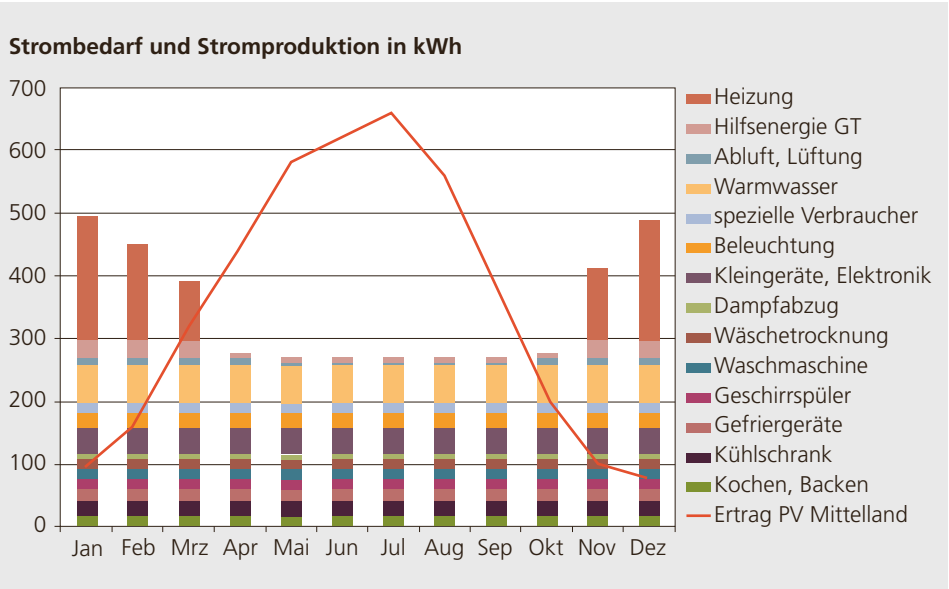


Abbildung 4.39: Typische photovoltaische Stromproduktion und Elektrizitätsbedarf für Beleuchtung und Geräte eines Minergie-A-Einfamilienhauses in kWh; Standort: schweizerisches Mittelland; PV-Anlage: 44 m², 30 ° Süd; Jahresertrag 4190 kWh. Gebäudetechnik: Erdsonden-Wärmepumpe für Heizung und WW; Hilfsenergien: 1800 kWh/Jahr; übriger Elektrizitätsbedarf: Geräte, Installationen Kommunikation, Beleuchtung: 2500 kWh/Jahr.

ter Strom wird wahrgenommen und meist hat man ein positives Verhältnis dazu. Eigenproduktion vermindert Abhängigkeit und ist ein kleiner (oder manchmal auch ein grosser) Schritt in Richtung (Energie-) Autarkie. Wie hoch Autarkiegrad und Eigenverbrauchsanteil sind, hängt in erster Linie von der Grösse der PV-Anlage ab, aber nicht nur. Auch die Grösse des Elektrizitätsverbrauchs spielt eine Rolle und die Möglichkeiten, eigenproduzierte Elektrizität für einige Stunden zu speichern, sie also beispielsweis auch für die Nacht nutzbar zu machen. Abbildung 4.40 zeigt diese Zusammenhänge in schematischer Art. Strom aus der eigenen PV-Anlage kann direkt dem Nutzer zugeführt werden. Was im Moment überschüssig ist, wird in der Batterie abgespeichert, wo sie später vom Nutzer abgerufen werden kann. Wenn die Batterie voll ist, wird der weiterhin überschüssige Strom ins Netz eingespiesen, von wo auch Strom bezogen werden kann, wenn weder von der PV-Anlage noch von der Batterie Solarstrom geliefert werden kann.

Zwischen Autarkiegrad und Eigenbedarfsanteil besteht eine Gegenläufigkeit: Je höher der Autarkiegrad sein soll, desto grösser muss die PV-Anlage dimensioniert sein. Desto häufiger muss dann aber in Kauf genommen werden, dass überschüssiger Strom ins Netz gespiesen werden muss. Letzteres heisst, dass der Anteil am gesamten eigenerzeugten PV-Strom sinkt, den man selbst verbrauchen kann. Im kos-

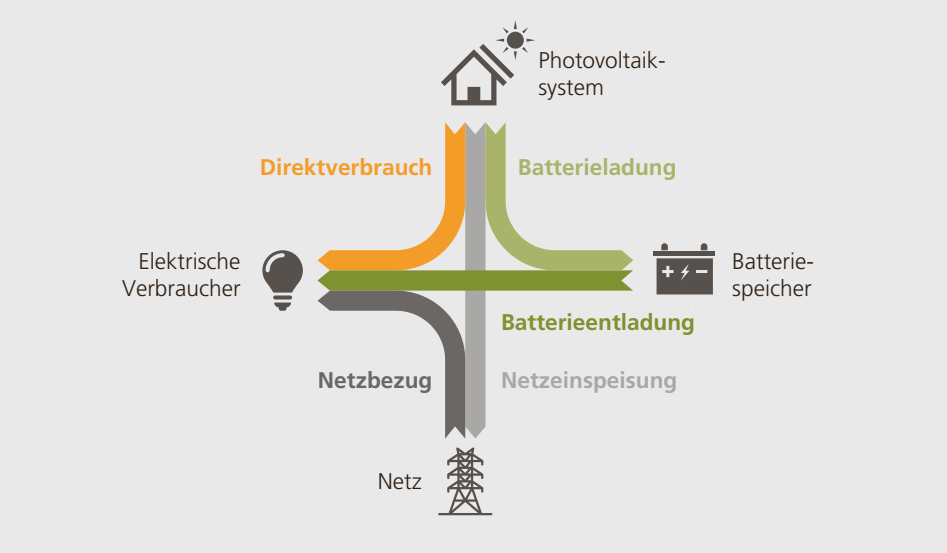


Abbildung 4.40: Eigenstromproduktion und ihre Nutzung. (Quelle: HTW Berlin)

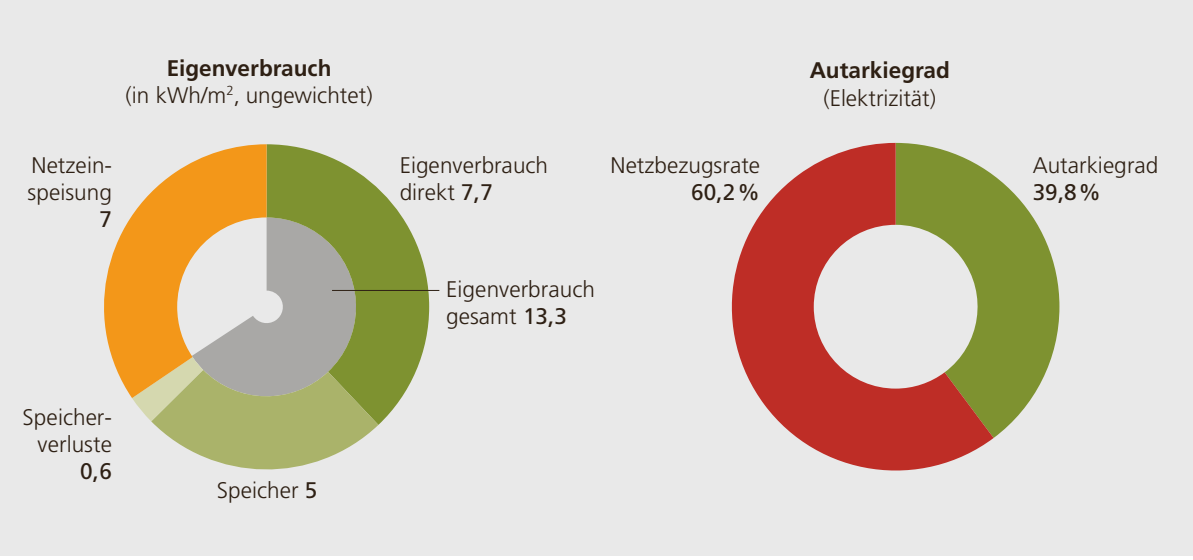


Abbildung 4.41: Eigenverbrauch und Autarkiegrad für ein Einfamilienhaus im schweizerischen Mittelland mit 200 m² Energiebezugsfläche, einer optimal ausgerichteten PV-Anlage von 25 m² mit Batteriespeicher von 5 kWh Kapazität. (Quelle: Gerechnet mit Minergie-Rechentool PVopti)

tenlos downloadbaren Berechnungstool PVopti von Minergie lässt sich einfach austesten, wie sich Verbrauchsreduktion, Anlagengrösse, Batteriespeicher und andere Einflussgrössen auf den Autarkiegrad und die Eigenverbrauchsquote auswirken. Dabei wird auch schnell klar, dass sich die Anlagengrösse am stärksten auf die Eigenverbrauchsquote auswirkt. Das ist nicht verwunderlich. Eine minimale Anlage produziert so wenig Strom, dass man ihn fast immer selber brauchen kann. Je grösser die Anlage wird, desto häufiger kann eigenerzeugter Stroms nicht selber verbraucht werden und muss ins Netz eingespiesen werden.

Wie gross soll die Photovoltaikanlage sein?

Photovoltaik ist die Schlüsseltechnologie der Energieversorgung der Zukunft. Also sollten alle vernünftig mit PV nutzbaren Oberflächen von Neubauten genutzt werden. Aus betriebswirtschafltlicher Sicht sieht es aber etwas anders und vor allem komplizierter aus. Auch wenn PV-Anlagen heute relativ kostengünstigen Strom produzieren, ist die finanzielle Seite im Einzelfall sehr stark davon abhängig, wie hoch die verschiedenen Tarife sind, insbesondere wieviel für den ins Netz eingespiesenen Strom bezahlt wird und wieviel der vom Netz bezogene Strom kostet. Im Jahr 2019 werden Photovoltaikanlagen von der Grössenordnung, wie sie im Wohnungsbau zum Einsatz kommen, mit einmaligen Investitionszuschüssen subventioniert (Einmalvergütung EIV). Da auf eigenverbrauchten Strom auch kein Netzzuschlag bezahlt werden muss, kommt der Solarstrom ab der eigenen Anlage deutlich billiger zu stehen als der vom Netz angebotene Strom. Das animiert dazu, den Eigenverbrauchsanteil möglichst hoch zu halten. Dies wird bewirkt mit Lastmanagement (Waschen, Geschirrspülen, Wassererwärmung etc. während der Sonnenstunden), mit Batteriespeichern oder sogar mit solaren Elektromobil-Ladestationen.

Der zweite Effekt allerdings ist weniger positiv, weil man darauf achtet, die Anlagen klein zu halten. Das bedeutet, dass die vorhandenen Flächen auf den Gebäuden nicht ausgenützt werden, sondern nur Teilflächen mit PV belegt werden.

Grundsätzlich haben aber die Anpassungen des Energiegesetzes und dessen Verordnung von 2014 und vor allem 2018 wesentliche Verbesserungen für den zweckmässigen Einsatz von PV-Anlagen gebracht. Die aktuellen Probleme lassen aber vermuten, dass die Rahmenbedingungen durch weitere Änderungen der Energiegesetzgebung so verändert werden, dass der Anreiz auf möglichst hohen Eigenverbrauch ergänzt wird mit Anreizmechanismen für die möglichst vollständige Nutzung der Gebäudehüllflächen für PV. Für die Erreichung der Ziele der Energiewende müssen unbedingt auch grosse Dachflächen, wie sie bei Zweckbauten vorkommen, mit Photovoltaikanlagen genutzt werden. Weil in diesen Fällen sehr oft kein entsprechend grosser Eigenbedarf vorhanden ist, braucht es unbedingt ergänzende Anreize (und Rechtssicherheit) für Investoren solcher Grossanlagen. Diskutiert werden beispielsweise Ausschreibungsverfahren für Solarstromlieferungen.

Realisierungsmodelle

Die wesentlichsten Verbesserungen der Rahmenbedingungen für PV-Anlagen auf Gebäuden haben sich durch die präzisen rechtlichen Regelungen zum Eigenver-

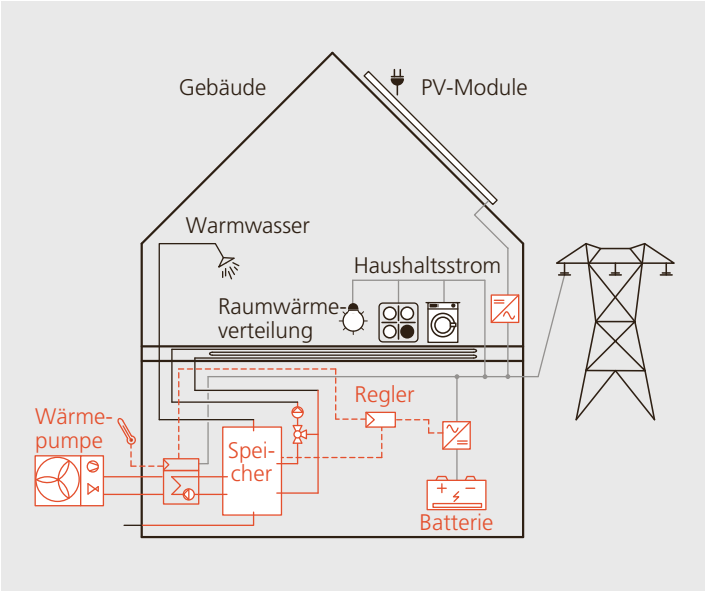


Abbildung 4.42: Ein Wohngebäude mit allen Komponenten zur Energieversorgung mit einem hohen Eigenverbrauchsanteil (Regler, Speicher, Batterie, Wärmepumpe, PV-Anlage und Netzanschluss). (Quelle: SPF Institut für Solartechnik)

brauch des erzeugten Solarstromes ergeben. Darunter vor allem die Möglichkeit, Zusammenschlüsse zum Eigenverbrauch (ZEV) zu bilden. Seit 2018 ist rechtlich verbindlich definiert, wie sich Betreiber von Anlagen in Nachbarschaften zusammenschliessen können, um Solarstrom einer Anlage direkt zu nutzen. Das erhöht die Möglichkeiten, den Eigenverbrauchsanteil zu steigern, noch einmal stark. Das ganze ZEV-interne Netz ist über einen einzigen Zähler (Messpunkt) mit dem örtlichen Verteilnetzbetreiber (VNB) verbunden, der in der Regel identisch ist mit dem örtlichen Elektrizitätsversorger. Die Schaltung entspricht dem altbekannten System von Eigenverbrauchsgemeinschaften, nur dass im ZEV nicht allein das eigene Haus Abnehmer ist, sondern auch noch eine Reihe von Nachbarn oder Mieter eines Mehrfamilienhauses. Tatsächlich ist das Modell sehr beliebt, weil es dank der Ausdehnung des Eigenverbrauchs von Solarstrom auch finanziell interessant ist. Ausserdem ist der rechtliche Rahmen ziemlich offen formuliert. So gibt es heute schon ZEV mit mehreren hundert Teilnehmern. Organisation und Betrieb werden bei solchen Grössenordnungen zu rechtlichen wie technischen Herausforderungen. Lösungen dazu werden als Dienstleistung in verschiedensten Ausführungen angeboten, weil es nicht allen Gebäudeeigentümern und Vermietern liegt, solche Modelle eigenhändig zu etablieren und zu betreiben. Es macht den Anschein, dass diese Entwicklung erst am Anfang steht. Modelle, wo ZEV-intern der Strom über – mit Smartphone-App ansteuerbare – Strombörsen für den eigenen Haushalt eingekauft werden kann, sind bereits in Erprobung. Mittagsstrom ist dann deutlich billiger als Nachtstrom und Lastmanagement wird zum persönlichen Nutzen, wie es auch aus Netzbetriebsperspektive sinnvoll ist.

Das traditionelle Modell der Eigenverbrauchsgemeinschaft, in der alle Solarstromkonsumenten (z. B. einer PV-Anlage auf einem Mehrfamilienhaus) Kunden des örtlichen Elektrizitätsversorgers sind und dieser als Verteilnetzbetreiber (VNB) mit Smartmetern die an die Mieter gelieferten Solarstrommengen misst und abrechnet, existiert natürlich weiterhin.

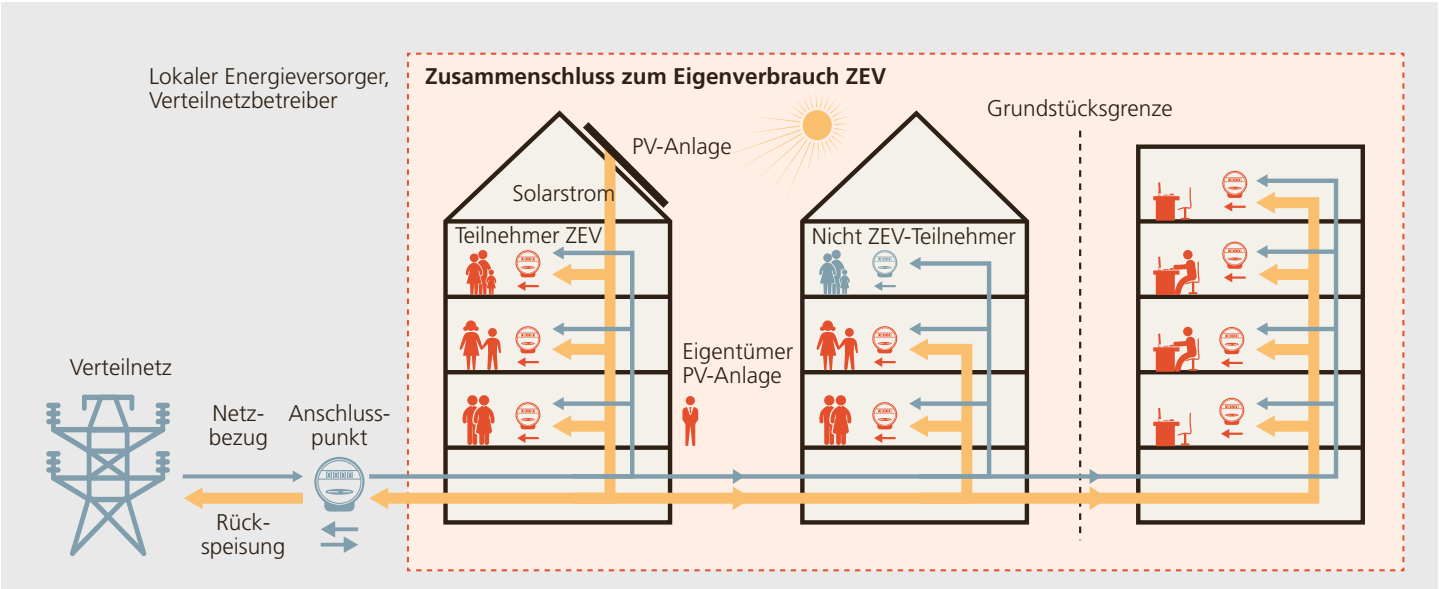


Abbildung 4.43: Ein Zusammenschluss zum Eigenverbrauch ZEV ist ein rechtskräftiger Zusammenschluss mehrerer Parteien (Immobilienbesitzer, Stockwerkeigentümer, Mieter) von einem oder mehreren Gebäuden, die gemeinsam Solarstrom verbrauchen. Dies ist auch über Grundstücksgrenzen hinaus möglich. (Quelle: Faktor Verlag)

4.7 Allgemeine Gebäudetechnik

Jürg Nipkow

Für den rationellen Elektrizitätseinsatz in Gebäuden sind neuere Technologien für elektrische Antriebe wichtig (Frequenzumrichter, EC-Motoren und deren Steuerungen) sowie Energie-Management. Die Gebäudeautomation (GA) wird in grösseren Gewerbe- und Bürobauten standardmässig eingesetzt, in Wohnbauten aber auch unter dem Stichwort «Smart Home» zunehmend vermarktet. Zwar kann die GA durchaus Voraussetzung für ein gutes Energiemanagement sein, ihr eigener Elektrizitätsverbrauch ist aber kritisch zu betrachten und muss bei Ausschreibungen berücksichtigt werden (siehe auch Kapitel 4.8 Gebäudeautomation).

Elektrische Motoren in der Gebäudetechnik

Elektrische Antriebe sind gewichtige Elektrizitätsverbraucher in der Gebäudetechnik. Sie sind nicht nur in den gut sichtbaren Antrieben für Lüftungsventilatoren oder grosse Pumpen präsent, sondern oft auch versteckt in Storen, automatischen Türen, Liften, Umwälzpumpen in Heizgeräten, Klein-Lüftern in Geräten etc. Heute sind für fast alle kleinen und mittleren Antriebe hocheffiziente EC-Motoren verfügbar (technisch sind dies elektronisch kommutierte Permanentmagnet-Motoren) mit Wirkungsgraden von über 80 % gegenüber 10 % bis 30 % bei alten Motoren.

Umwälzpumpen

Bei einer gewichtigen Kategorie von Antrieben ist die effiziente Technik seit 2009 vorgeschrieben: Nassläufer-Umwälzpumpen bis 2500 W hydraulischer Leistung müssen der europäischen und Schweizer Vorschrift der Mindesteffizienz des EEI (Energy Efficiency Index) genügen, um zum Verkauf zugelassen zu sein. Die Anforderung beträgt bis 2019 für den EEI höchstens 0,23, nach der geplanten Überarbeitung sollen es höchstens 0,20 sein. Zudem ist die Erweiterung auf Trinkwasser-Umwälzpumpen geplant. Da die EU-Richtlinie eine Verkaufszulassung bedeutet, brauchen sich Planer und Installateure nur zu vergewissern, dass sie nicht illegale «Schnäppchen» einsetzen. Zu beachten ist allerdings nach wie vor die richtige, d. h. knappe Dimensionierung der Pumpen: Oft wird angenommen, durch die automatische Drehzahlregelung sei eine Überdimensionierung kein Problem. Aber die Regelung läuft dann möglicherweise am unteren Anschlag und kann ihre Funktion nicht richtig erfüllen.

Ventilatoren

Bei Lüftungsventilatoren gibt es für grössere Geräte mit getrennten Motoren ebenfalls Vorschriften zur Ventilator- und zur Motoren-Effizienz. Für kleinere, in der Regel als Kompaktventilatoren gebaute Geräte gibt es vorläufig keine analoge Vorschrift. Trotzdem ist es sehr wichtig, wirklich effiziente Ventilatoren einzusetzen, welche meist mit der Bezeichnung «EC-Ventilator» gehandelt werden. «EC» meint «electronically commutated» und bedeutet in der Regel auch, dass ein effizienter Permanentmagnet-Motor enthalten ist.

Storenantriebe

In vielen Storenantrieben sind immer noch ineffiziente Rohrmotoren, mit Leistungsaufnahmen von z. B. 100 W bis 300 W in Betrieb. Da die Laufzeiten sehr begrenzt sind, resultiert trotzdem kein wesentlicher Elektrizitätsverbrauch. Kritischer kann die drahtlose Fernsteuerung solcher Anwendungen sein, da deren Empfänger-Elemente oft eine Standby-Leistungsaufnahme von einigen Watt aufweisen, woraus sich bei 8760 Stunden Betriebszeit ein beträchtlicher Energieverbrauch ergibt. Dies gilt natürlich für alle IoT-vernetzen Geräte (Internet of Things). Die entsprechenden Energieverbrauchswerte werden oft nicht deklariert und müssen vom Planer erfragt werden.

Gebäudetechniksysteme als Ganzes betrachten

Die gesamtheitliche Betrachtung sollte zwingend schon in der Vorstudienphase beginnen, da dann bereits wichtige Weichen für den später resultierenden Ener-

gieverbrauch gestellt werden. Eine frühe Zusammenarbeit von Gesamtleiter, Architekt und Gebäudetechnikplaner ist notwendig, aber immer noch nicht Standard. Das Planungsvorgehen muss diese Zusammenarbeit sowie auch spätere, regelmässige Reviews vorsehen.

Einige Beispiele

- **Lüftungskanäle:** Die Auslegung von Kanälen (und schon der von der Architektur dafür vorgesehene Platz) beeinflusst den Energieverbrauch für den Lufttransport stark. Auch allfällige Geräuschprobleme können damit zusammenhängen. Wenn eckige statt runde Kanalquerschnitte und abrupte Umlenkungen (Ecken statt Bögen) aus Platzgründen scheinbar nötig werden, sind die Auswirkungen oft gravierend.
- **Lüftungsventilatoren mit Direktantrieb:** damit erspart man sich eine Riementransmission mit allen Nachteilen. Zudem sind Direktantriebe zumeist mit effizienten EC-Motoren ausgestattet, um die richtige Einstellung zu ermöglichen. Solche Ventilatoren sind vielfach auch für höhere Leistungen erhältlich. Die möglicherweise etwas höheren Investitionskosten lohnen sich über die Nutzungsdauer fast immer.
- **Effiziente Motoren:** Bei grösseren Antrieben der Gebäudetechnik wie Ventilatoren, Pumpen und Aufzüge werden nur schon wegen der Vorschriften zumeist effiziente Motoren eingebaut. Da sich bei einer Lebenszykluskosten-Betrachtung fast immer der effizienteste erhältliche Motor lohnt, sollte bei der Beschaffung geprüft werden, ob das Angebot dem auch entspricht. Nur bei Laufzeiten von wenigen Hundert Stunden pro Jahr können günstigere Motortypen sinnvoll sein. Die extrem ineffizienten Einphasen- oder gar Spaltpol-Asynchronmotoren sollten nur eingesetzt werden, wenn es keine Alternative gibt.

Aufzüge

Bei Liftantrieben ist mittlerweile die Frequenzumrichtertechnik Standard, nicht zuletzt wegen der präzisen Anhalte-Regelung. Bei Liften spielt der Standby-Verbrauch eine grosse Rolle. Er ist in der Energie-Etikette der Liftindustrie (Richtlinie VDI 4707, Blatt 1) geregelt. Die VDI-Richtlinie 4707 definiert für die Funktionen «Stillstand» und «Fahren» je 7 Energiebedarfsklassen (A bis G). Die Klasse A macht recht anspruchsvolle Vorgaben für die Effizienz, aber auch mit der Klasse B sind Lifte energieeffizient. Gemäss Lift-Report (www.lift-report.de) entfallen auf den Energiebedarf eines Aufzuges 3 % bis 8 % des gesamten Bedarfs eines Gebäudes. Das meiste allerdings im Standby, wie dies Tabelle 4.14 deutlich macht. Beispielsweise verharrt ein Aufzug der Nutzungskategorie 1 rund 99 % der Zeit im Stillstand. Schon deshalb hat der Standby-Bedarf einen grossen Einfluss auf die Effizienzklasse. Der jährliche Gesamtstromverbrauch ist durch drei Faktoren bestimmt (Öko-Institut):

- Die Nutzungskategorie respektive Häufigkeit der Nutzung
- Die Leistungsaufnahme im Standby
- Der Energieverbrauch während der Fahrt

Tabelle 4.14: Nutzungskategorien für Aufzüge.

VDI-Richtlinie 4707, Blatt 1: Nutzungskategorien für Aufzüge					
Nutzungskategorie	1	2	3	4	5
Intensität	sehr gering	gering	mittel	stark	sehr stark
Häufigkeit	sehr selten	selten	gelegentlich	häufig	sehr häufig
Durchschnittliche Fahrzeit pro Tag	0,2 h/d	0,5 h/d	1,5 h/d	3 h/d	6 h/d
Durchschnittliche Stillstandszeit pro Tag	23,8 h/d	23,5 h/d	22,5 h/d	21 h/d	18 h/d
Typische Gebäude	• Wohnhaus mit bis zu 6 Wohnungen • Kleines Bürohaus mit wenig Betrieb	• Wohnhaus mit bis zu 20 Wohnungen • Kleines Bürohaus mit 2 bis 5 Geschossen	• Wohnhaus mit bis zu 50 Wohnungen • Mittleres Bürohaus bis 10 Geschosse	• Wohnhaus mit mehr als 50 Wohnungen • Bürohaus mit mehr als 10 Geschossen	• Bürohaus über 100 m Höhe • Grosses Krankenhaus

4.8 Gebäudeautomation

Jürg Bichsel

Was ist Gebäudeautomation?

Gebäudeautomation befasst sich mit der Überwachung, Steuerung, Regelung und Optimierung aller technischen Anlagen in Gebäuden (Abbildung 4.44). Dies beginnt bei der Zutrittskontrolle, geht über die Brandschutzüberwachung bis hin zur intelligenten Raumkomfortregelung. Bis heute werden in vielen Gebäuden übergreifende Aspekte wie beispielsweise Klimatisierung, Beleuchtung und Verschattung separat behandelt. Gerade diese Aufteilung ist in einer vernetzten Betrachtungsweise nicht mehr zielführend. Wenn beispielsweise im Sommer die Sonneneinstrahlung durch die Verglasung das Gebäude aufheizt, soll nicht einfach die Klimaanlage automatisch eingeschaltet werden, sondern zuerst die Storen abgesenkt und allenfalls der Benutzer informiert werden. Erst danach, bei noch nicht akzeptablem Komfort, wird die Kältemaschine gestartet. Ein gut geführtes Gebäude betrachtet alle wichtigen Teilaspekte vernetzt und optimiert das Gebäude im Verbund.

Energetische Optimierung heute

Gebäudesysteme sind darauf ausgelegt, Zielwerte wie Temperaturen oder Beleuchtungsstärken jeweils einzeln möglichst exakt auf einen vordefinierten Wert zu regeln. Hierbei wird heute bei einer Temperaturregelung weder die benötigte Wärmemenge, der Einsatz erneuerbarer Energie, der CO_2-Austoss, die Umweltbelastung noch die Hilfsenergie (Antriebe, Pumpen, Regler) aufgezeigt und optimiert. Prinzipiell könnte eine Gebäudeautomation die optimalen Betriebspunkte bestimmen. Da es hier um komplizierte physikalische Zusammenhänge mit aufwendiger Modellierung geht, scheitert die Umsetzung speziell im Bereich von Wohnbauten an den Kosten. Deshalb werden energetische Optimierungen meist manuell durch den Hauswart vorgenommen und die erzielten Einsparungen sind direkt von seinem Wissen und seinen Erfahrungen abhängig.

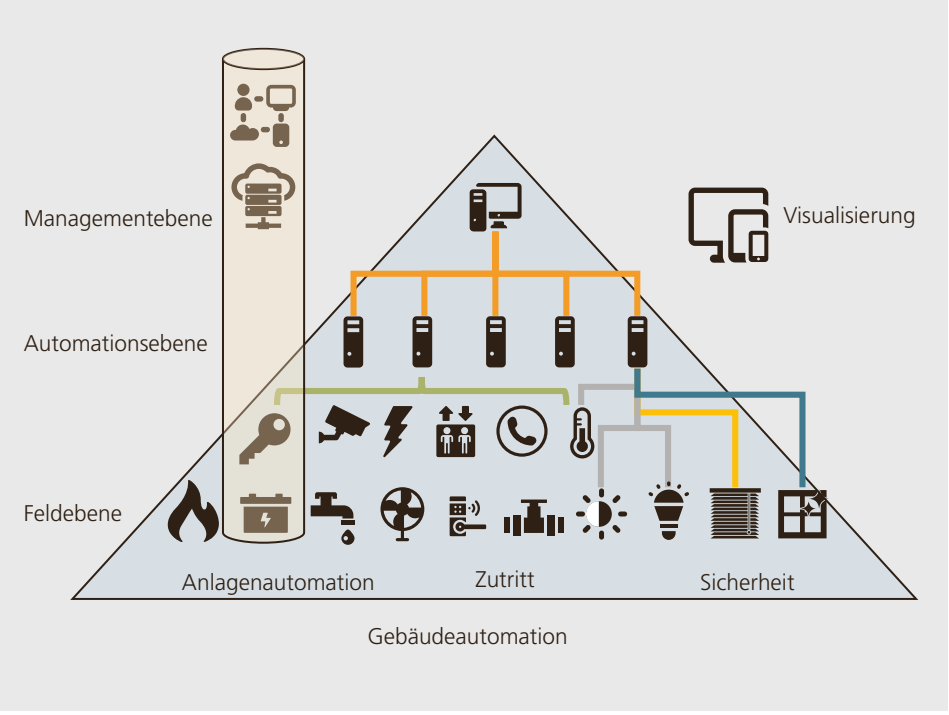


Abbildung 4.44: Nach EN 16484 wird die Gebäudeautomation in die Feld-, Automations- und Managementebene eingeteilt. Dies gilt jeweils einzeln, beispielsweise für die Sicherheit und die Heizungsanlage. In Wohnbauten interagieren die einzelnen Gewerke nicht miteinander. Dies führt unter dem Blickwinkel «Optimierung Energiebedarf» zu suboptimalen Lösungen. Heute wird die Visualisierung häufig in eine Cloud ausgelagert und die Daten sind hiermit weltweit verfügbar; dieser Teil ist gelb hinterlegt. (Grafik: D. Kunz, FHNW)



Abbildung 4.45: Grün signalisiert einen kleinen, rot einen hohen Energiebedarf; durch Drehen am Sollwertknopf durch den Benutzer direkt beeinflussbar.

Wie kann mit einfachen Mitteln ohne automatische Optimierung etwas erreicht werden?

Haustechnische Anlagen müssen für einen optimalen Betrieb richtig parametriert werden. Die Effizienz von Wärmepumpen sinkt bei hohen Vorlauftemperaturen sowohl für den Heizkreis als auch für das Warmwasser (maximal 60 °C) stark ab. Werden diese Anlagen nicht gebraucht (z. B. im Sommer), so sind diese vollständig auszuschalten und nicht im Stand-by-Betrieb zu belassen.

Der Mensch hat kein Sinnesorgan, das den Energieverbrauch direkt misst. Deshalb ist er auf einfache Darstellungen angewiesen. Technisch ist heute von der Anzeige mit «rot-grün» bis hin zu grafischen Oberflächen mit Fernzugriff über das Internet alles möglich. Mit einer einfachen, nachvollziehbaren Darstellung sollen Nutzerinnen und Nutzer zu einem sparsamen Umgang mit der nicht wahrnehmbaren Energie motiviert werden. Beispielsweise werden heute Raumbediengeräte (wie im Minergie-Modul Raumkomfort definiert), welche die Temperatur in Einzelräumen regeln, zusätzlich mit farbigen Leuchtdioden ausgerüstet: Leuchten diese grün, ist der Energieverbrauch in einem günstigen Bereich, leuchten diese rot, wird zu viel Energie verbraucht. Der Benutzer kann allein durch das Verstellen des Temperatur-Sollwertknopfes die Leuchtdiode vom «roten» in den «grünen» Zustand bringen (Abbildung 4.45).

Ohne Kenntnis des Energieverbrauchs kann keine langfristige energetische Optimierung einer Liegenschaft erreicht werden. Dieses Monitoring braucht Sensoren, welche die Zustände des Gebäudes (Energieflüsse, Temperaturen etc.) messen und anschliessend für den Anwender optisch darstellen. Das Minergie-Modul Monitoring erfüllt diese Vorgaben und unterstützt den Betreiber einer Liegenschaft. Die heutige Technik erlaubt auch das Überwachen des Energieverbrauchs und das Steuern (Ein- und Ausschalten, Veränderung von Temperatur-Sollwerten, Fehlermeldungen) ganzer Liegenschaften über das Internet. So werden Fehler rasch erkannt. Einfamilienhäuser werden durch Bewohner gesteuert, Mehrfamilienhäuser zum Teil durch spezialisierte Firmen (technical facility management) gewartet.

Neben den technischen Möglichkeiten kann auch der Bewohner durch seinen Anspruch an den Komfort einen Beitrag leisten. Muss die Raumtemperatur wirklich starr auf einen Sollwert (z. B. von 21 °C ± 0,1 °K) geregelt werden oder ist eine Schwankungsbreite als Funktion der Aussentemperatur zulässig, die beim Heizen und Kühlen Energie sparen hilft? Diese Überlegungen finden sich in der Norm SIA 382/1, die es erlaubt, Raumtemperaturen als Funktion der Aussentemperatur zwi-

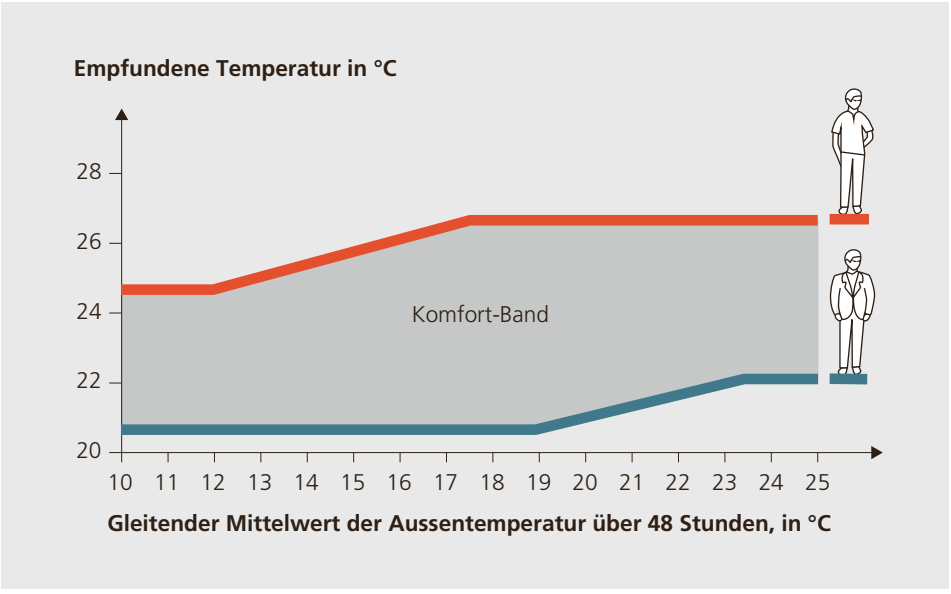


Abbildung 4.46: Norm SIA 382/1:2014 und Norm SIA 180:2014, Komfortbänder (Grafik: FHNW, J. Bichsel). Lesebeispiel: Bei einem gleitenden Mittelwert der Aussentemperatur über 48 Stunden von 23,5 °C liegt das Temperatur-Komfortband zwischen 22 °C (Bekleidung: Business-Anzug mit Krawatte) und 26,5 °C (Bekleidung: lange Hose und Kurzarm-Hemd).

schen einer oberen und einer unteren Grenze pendeln zu lassen. Voraussetzung hierbei ist, dass die Bewohner die Möglichkeit haben, die Bekleidung anzupassen (Abbildung 4.46). Die Regelung in Temperaturbändern bietet ein erhebliches Einsparpotenzial: Die nach wie vor gültige Faustregel besagt, dass im Winter eine um 1 K tiefere Raumtemperatur zirka 6 % Heizenergie einspart.

Aufgrund der installierten Geräte teilt die Norm SIA 386.110 (Tabelle 4.15) gebäudetechnische Systeme bezüglich Energieeffizienz in die Klassen A bis D ein. Beispielsweise beträgt das Einsparpotenzial eines nicht automatisierten (Klasse D) und eines vollautomatisierten (Klasse A) Wohngebäudes 26 % der thermischen und 15 % der elektrischen Energie. Die Klasse A setzt in den Einzelräumen mindestens einen Präsenz- und Temperatursensor mit einem Temperaturregelkreis voraus. So lassen sich Energieeinsparungen einfach automatisiert realisieren. Auch hier gilt, dass das theoretische Potenzial der Energieeinsparung nur ausgeschöpft werden kann, wenn die haustechnischen Anlagen richtig parametriert und in Betrieb genommen worden sind.

Neue Anforderungen durch die MuKEn 2014

Die Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEn 2014) wurden im Hinblick auf die Umsetzung der Energiestrategie 2050 des Bundes erarbeitet und müssen in den kantonalen Regelungen bis 2020 umgesetzt werden. Hierbei gibt es Anforderungen an die Energieoptimierung, die zwingend umzusetzen sind. Hierzu gehören:

- **Verbrauchsabhängige Heiz- und Warmwasserkostenabrechnung** in Neubauten mit 5 oder mehr Nutzeinheiten (dies betrifft vor allem Mehrfamilienhäuser).
- **Energetische Grossverbraucher**, die (wirtschaftlich) zumutbare Massnahmen festlegen, wie der Energieverbrauch gesenkt werden kann.

Zusätzlich wurden freiwillige Module definiert, die kantonal umgesetzt werden können; dadurch erhalten diese dann einen rechtsverbindlichen Status. Hierzu gehören:

- **Modul 4:** Regulierbarkeit der Raumtemperatur von neuen Ferienhäusern und -wohnungen auf mindestens zwei Niveaus mittels Fernbedienung; diese Vorschrift gilt auch, wenn der Wärmeerzeuger einer bestehenden Liegenschaft ausgetauscht

Effizienzklassen nach SIA 386.110

Gebäudeautomationssystem	Monitoring	Energieoptimierung	Anforderungen an die Automation und Wartung
Sehr hohe Effizienz A Klasse A	Ja, monatlich	Ja, durch ausgebildete Fachkräfte	• Vernetzte Gebäudeautomation der Primäranlage • Vernetzte Raumautomation **mit** automatischer Bedarfserfassung • Regelmässige Wartung
Hohe Effizienz B Klasse B	Ja, jährlich	Nein	• Vernetzte Gebäudeautomation der Primäranlage • Vernetzte Raumautomation **ohne** automatische Bedarfserfassung
Mittlere Effizienz C Klasse C	Nein	Nein	• Vernetzte Gebäudeautomation der Primäranlage • **Keine elektronische** Raumautomation, z. B. Thermostatventile an Heizkörpern
Tiefe Effizienz D Klasse D	Nein	Nein	

Tabelle 4.15: Norm SIA 386.110:2012, Effizienzklassen der Gebäudeautomation.
Lesebeispiel: Neue Gebäude sollten nur noch in den Klassen A und B erstellt werden (typische Bestandsbauten sind in der Schweiz in der Klasse C zu finden); das Erreichen der Klasse A bedingt eine nachhaltige Energieoptimierung. Das Energiemonitoring von Minergie umfasst die vier Stufen «Light», «Standard», «Plus» und «GA mit Monitoring». Nur die Stufe «GA mit Monitoring» erfüllt die Vorgaben der SIA 386.110 (grün hinterlegt).

wird. So kann die Temperatur in Ferienhäusern bei Nichtbelegung tief gehalten werden, da durch das Ferneinschalten der Heizung die Temperatur zeitnah hochgefahren werden kann.

- **Modul 5:** Ausrüstungspflicht Gebäudeautomation bei Neubauten (ausgenommen Ein- und Mehrfamilienhäuser und kleine Liegenschaften); dies entspricht in etwa der Effizienzklasse B der SIA 386.110.
- **Modul 8:** Betriebsoptimierung für Gebäude mit hohem Elektrizitätsverbrauch (ausgenommen Ein- und Mehrfamilienhäuser); dies entspricht in etwa der Effizienzklasse A der SIA 386.110.

Bis heute (Stand Ende 2019) wurde das Modul 4 in den Kantonen Bern, Uri, Zug, Freiburg, St. Gallen, Tessin, Wallis und Neuenburg und die Module 5 und 8 in den Kantonen Bern und Basel-Stadt umgesetzt.

Forschungsaktivitäten

Zukünftig werden Themen der Gebäudeautomatisierung dahingehend untersucht, wie der Energieverbrauch durch die Kenntnis der Ladezustände der thermischen und elektrischen Speicher und der zu erwartenden Belegung und Wetterentwicklung reduziert werden kann. Durch eine Energieverschiebung vom Gebäudespeicher zum Warmwasser- oder zum Erdspeicher sowie dem intelligenten Einsatz von Photovoltaik und elektrischen Speichern lässt sich der Gesamtenergieverbrauch einer Liegenschaft optimieren.
Zusätzlich kann die momentan verfügbare Sonnenenergie in die Rechnung einbezogen werden. Dies alles unter der Vorgabe, dass der Komfort der Benutzer nicht leidet. Eine Luft-Wasser-Wärmepumpe sollte tagsüber den Warmwasser- und Gebäudespeicher mit Energie laden, da die Photo-

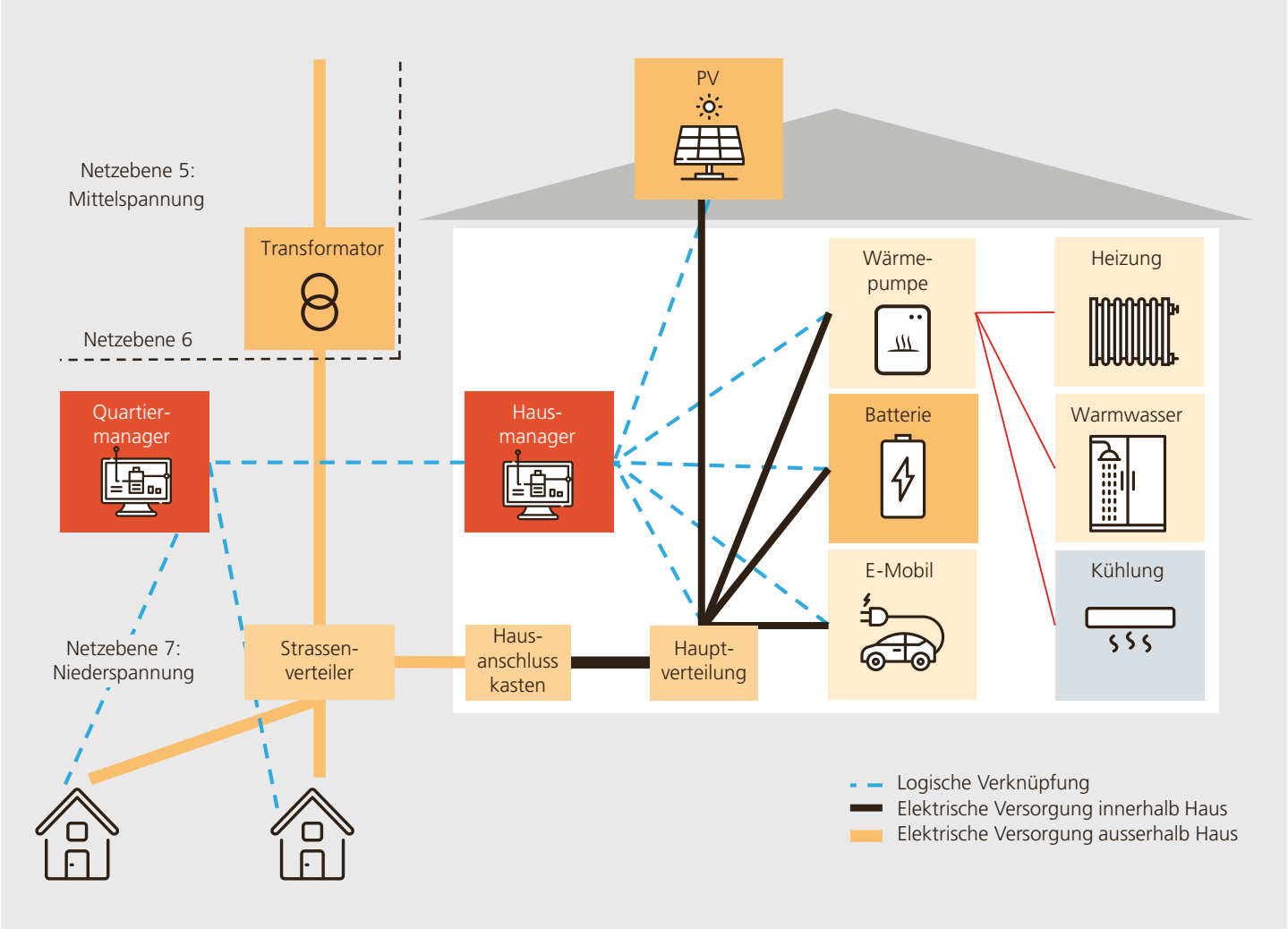


Abbildung 4.47: Die hierarchische Optimierung erfolgt dezentral in jedem Haus durch einen Hausmanager. Die übergeordneten Ziele des Quartiers werden in einem Quartiermanager optimiert und entsprechende Anreizsignale an die Hausmanager weitergegeben. (Quelle: D. Kunz, FHNW, Forschungsprojekt Energy Chance)

voltaik auf dem Gebäude elektrischen Strom zum Betreiben liefert und am Tag die Effizienz der Wärmepumpe – aufgrund der höheren Umgebungstemperatur – grösser ist. Hiermit wird eine erhöhte Gleichzeitigkeit von Verbrauch und Erzeugung mit Zwischenspeicher erreicht, die heute nicht selbstverständlich ist. Mit dem Einbezug der Wettervorhersage kann dieser Effekt noch verstärkt werden, da der Warmwasser- und Gebäudespeicher in der Schönwetter-Periode vor dem Wetterumschwung maximal aufgeladen werden können.

Neue Wohnbauten sollten bereits heute mit den entsprechenden Speichern, Energieerzeugungsanlagen, Sensoren und Antrieben mit offenen Schnittstellen ausgestattet werden. Dadurch kann zukünftig erhältliche Optimierungssoftware leicht installiert und betrieben werden.

Das Ziel der Gebäudeautomation ist nicht das energieautarke Gebäude, sondern das Gebäude, welches mit seiner Umgebung vernetzt ist und hierdurch einen minimalen Energiebedarf oder sogar eine positive Energiebilanz erlaubt. Die zukünftige Herausforderung wird die Gesamtoptimierung der Energieflüsse sein. Dafür wird im Einzelhaus ein Hausmanager eingesetzt, der die Energieflüsse (Photovoltaik, Batterie, Wärmepumpe und Elektromobil) im Haus wirtschaftlich und ökologisch optimiert (Abbildung 4.47). Der Hausmanager bekommt externe Anreize (beispielsweise Preissignale), welche die eigene hausinterne Energieoptimierung beeinflussen. Diese externen Anreize gibt ein Quartiermanager vor, der übergeordnet die Ebene Quartier optimiert. Neben der Wirtschaftlichkeit ist ein Hauptziel, die selbst erzeugte Energie im Quartier zu verwenden und keine Überlastung der elektrischen Infrastruktur zu verursachen.

Selbstlernende Systeme sind der Traum jedes Nutzenden; ohne dass man sich um die Details kümmern muss, optimiert sich die Heizungsanlage selbständig immer wieder neu und passt sich automatisch den unterschiedlichen Bedingungen wie Belegung der Räume, andere Aussentemperaturen und wechselnde Sonneneinstrahlung an. Diesem Traum kommen wir heute mit der Planung am digitalen Gebäudemodell einen Schritt näher. Die Praxis wird zeigen, ob diese Systeme kostenmässig mit der entsprechenden Robustheit und Langzeitstabilität die heute übliche Planung übertreffen können.

4.9 Quellen

[1] Huber, H.: Planungshandbuch Komfortlüftung, Faktor Verlag, Zürich 2010.
[2] Leistungsgarantie Komfortlüftung. EnergieSchweiz, Bern 2019. Bezug unter www.leistungsgrantie.ch
[3] Amt für Hochbauten der Stadt Zürich: Projekt Luftaustausch. Diverse Publikationen zum Projekt, (Synthesebericht), Zürich 2009. Bezug unter www.stadt-zuerich.ch/nachhaltiges-bauen → 2000-Watt-Gesellschaft → Technik
[4] M. Hessler: «Mrs. Modern Woman»: zur Sozial- und Kulturgeschichte der Haushaltstechnisierung, Campus Verlag, 2001.
[5] Bundesamt für Energie (BFE): Energiestrategie 2050 nach dem Inkrafttreten des neuen Energiegesetzes, 2018.
[6] Bundesamt für Energie (BFE): Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2018, 2019.
[7] Prognos AG, Infras AG, TEP Energy GmbH: Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2017 nach Verwendungszwecken, Bundesamt für Energie (BFE), 2018.
[8] ec.europa.eu. [Zugriff am 26. August 2019]
[9] F. Vuille, D. Favrat und S. Erman: Energiewende? Antworten auf 100 brennende Fragen, Bern: hep verlag ag, 2015.
[10] www.energystar.ch. [Zugriff am 3. Semptember 2019]
[11] G. Wegner, Elektrische Hausgeräte, München/Heidelberg: Hüthig & Pflaum Verlag GmbH & Co. Fachliteratur KG, 2008.
[12] www.topten.ch. [Zugriff am 3. September 2019]
[13] www.energieschweiz.ch. [Zugriff am 4. September 2019]
[14] SN EN 12464-1, Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen, Beuth-Verlag, 2011.
[15] SIA 387/4, Elektrizität in Gebäuden – Beleuchtung: Berechnung und Anforderungen, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2017.
[16] Haas-Arndt und Ranft: Tageslicht in Gebäuden, Heidelberg. C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG , 2007.
[17] Trilux GmbH & Co. KG, Beleuchtungspraxis, 2019.

Kapitel 5

Anhang

5.1 Autoren

Armin Binz, Prof. dipl. Arch. ETH/SIA; bis Ende 2012 Leiter des Instituts Energie am Bau der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW). Leiter der Minergie Agentur Bau und Mitglied der Geschäftsleitung von Minergie von 2006 bis Ende 2012. Seither selbständig als Berater tätig (Binz Energie am Bau GmbH).

Jürg Bichsel, Prof., Dr. sc. techn. ETHZ, dipl. El. Ing. ETHZ; Leiter Institut Energie am Bau an der FHNW. Vorher langjähriger Entwicklungsleiter Sauter AG (Gebäudeautomation).

Achim Geissler, Prof. Dr., dipl. Chemieingenieur TH; Leiter Gruppe Bau am Institut Energie am Bau der Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik an der FHNW. Dozent für Nachhaltiges Bauen und Energieeffizienz, Bauphysik und Gebäudesimulation an der FHNW.

Monika Hall, Dr. Bauphysik, dipl. Chemieingenieur TH; Wissenschaftliche Mitarbeiterin und Dozentin an der FHNW, Institut Energie am Bau.

Heinrich Huber, Prof., dipl. Maschineningenieur und HLK-Ingenieur FH, MAS FNNW Nachhaltiges Bauen; Hauptamtlicher Dozent für Gebäudetechnik an der HSLU und Leiter der Prüfstelle Gebäudetechnik am Zentrum für Integrale Gebäudetechnik (ZIG) der Hochschule Luzern – Technik & Architektur.

Jürg Nipkow, dipl. Ing. ETH/SIA; Inhaber Arbeitsgemeinschaft Energie-Alternativen ARENA, Kommissionspräsident SIA 385 Warmwasser, Experte in Energieeffizienz, insbesondere elektrische Geräte und Antriebe sowie Warmwasser.

Marco Ragonesi, Architekt HTL/Bauphysiker; Mitinhaber RSP Bauphysik AG

Gregor Steinke, Dipl.-Ing. Architekt TH, Nachdiplomstudium Energie FH; Dozent und Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der FHNW im Bereich Nachhaltiges Bauen.

Beate Weickgenannt, dipl. Gebäudetechnikingenieurin TU; Wissenschaftliche Mitarbeiterin Institut Energie am Bau der FHNW.

5.2 Normen und Regelwerke

Normen und Merkblätter SIA

Norm SIA 112/1, Nachhaltiges Bauen – Hochbau, 2017
Norm SIA 180, Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau, 2014
Norm SIA 181, Schallschutz im Hochbau, 2006
Norm SIA 232/1, Geneigte Dächer, 2011
Norm SIA 232/2, Hinterlüftete Bekleidung von Aussenwänden, 2000
Norm SIA 243, Verputzte Aussenwärmedämmung, 2008
Norm SIA 271, Abdichtungen von Hochbauten, 2007
Norm SIA 279, Wärmedämmende Baustoffe, 2018
Norm SIA 331, Fenster und Fenstertüren, 2012
Norm SIA 380, Grundlagen für energetische Berechnungen von Gebäuden, 2015
Norm SIA 380/1, Heizwärmebedarf, 2016
Norm SIA 382/1, Lüftungs- und Klimaanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen, 2014
Norm SIA 382/2, Klimatisierte Gebäude – Leistungs- und Energiebedarf, 2011
Norm SIA 386.110, Effizienzklassen der Gebäudeautomation, 2012.
Norm SIA 387/4, Elektrizität in Gebäuden – Beleuchtung, 2017
Merkblatt SIA 2028, Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik, 2010
Merkblatt SIA 2031, Energieausweis für Gebäude, 2016
Merkblatt SIA 2032, Graue Energie von Gebäuden, 2010
Merkblatt SIA 2040, SIA-Effizienzpfad Energie, 2017

Weitere Regelwerke

- MuKEn 2014, www.endk.ch
- Nationale Gewichtungsfaktoren, 2017, www.endk.ch
- Leitfaden Eigenverbrauch, Version 2.0. Im Auftrag von EnergieSchweiz, 2019

5.3 Stichwortverzeichnis

Symbole
2000-Watt-Areal 14, 21

A
Abluftanlagen 111
Ablufteinrichtung 109
Ablufthaube 116
Abluft-WP 104
Absorbertechnik 104, 109
Absorption 57, 60
Abwärme 18
Aerogel 45
Aktive Überströmer 118
Aktivkohlfilter 115
Akustische Behaglichkeit 38
Allgemeine Gebäudetechnik 139
Areal 11, 14
Armierungsgewebe 49
Aufzüge 140
Aussenluft-Durchlass 114
Aussenluftrate 111
Autarkiegrad 25, 135

B
Balkon 41
Bedarfssteuerung 119
Befeuchtung 111
Beleuchtung 126
Beleuchtungsstärke 70, 126
Beschichtung 56
Bilanzgrenze 26
Bilanzperimeter 31
Biozid 49
Blendwahrscheinlichkeit 71
Böden über Erdreich 90
Building-integrated Photovoltaic 134
Büro 6
Bypass 120

C
Cheminees 108
CO_2-Konzentration 116

D
Dachflächenfenster 56
Dämmmaterialien 33
Dämmstoff 33
Dampfbremse 46
Diffus 58
Direkt 58
Direktblendungsgrad (UGR) 71
Distanzschraube 49
Drallauslässe 117
Druckverlust 121
Durchdringung 47

E
EC-Motor 121
Effizienzpfad Energie 18
Eigenbedarfsdeckung 11
Eigenerzeugung 7
Eigenverbrauch 135
Eigenverbrauchsgemeinschaft (EVG) 27
Eigenverbrauchsoptimierung 27
Eigenverbrauchsrate 25
Einfallswinkel 60
Einsteinmauerwerk 51, 84
Einzelbauteilnachweis 43
Einzelraumgerät 120
Elektrisch-solar 106
Endenergie 10
Energetische Amortisation 34
Energetische Grossverbraucher 143
Energiebezugsfläche 6
Energieetikette 121, 123
Energie-Monitoring 20
Energieoptimierung 11
Energieplanung 13
EPS 45
Erdwärmesonden-Wärmepumpe 107
Exergie 15

F
Fenster 93
Fensterantrieb 109
Fensterbänder-Optik 61
Fensterlüftung 113
Fernwärme 99
Feuchterisiko 54
Feuchteschutz 82
Feuerstätten 108
Flachdach 80
Fortlufthaube 115
Freecooling 37
Fussbodenheizung 43

G
Gasfüllung 56
Gas-Wärmepumpe 99
Gebäudeautomation 141
Gebäudehülle 41
Gebäudepark 5
Gemeinde 13
Geneigtes Dach 82
Geräte 7, 9
Gerüche 110
Gesamtbilanz 33
Geschosswohnung 120
Gewichtungsfaktor 26
Gipskarton 48
Glas-Abstandhalter 56
Glasanteil 63
Glasanteil der Fassade 67
Gläser 56
Glaswolle 45
Globalstrahlung 58
Graue Energie 5, 7, 10, 31
g-Wert 59

H
Handel 6
Haushaltsgeräte 122
Heizkörper 102
Heizleistungsbedarf 102
Heizzentrale 12
Hilfsenergie 107
Hinterlüftete Bekleidung 86
Hinterlüftete Fassade 50
HLWD 46
Hochleistungswärmedämmstoffe 46
Holzbalkenlage 90
Holzbau 48, 76, 94
Holzbauwände 88
Holzfasern 45
Holzfeuerung 99
Holzheizung 101
Holzöfen 108
Hydraulische Einbindung 104
Hygiene 110
Hygienerisiko 111

I
Industrie 6
Infiltration 115
Innenwärmedämmung 87
Isoliergläser 60

J
Jahresarbeitszahl 113

K
Kellerraum 43
Klimaanlage 113
Kochstellenabluft 115
Kohlenstoffdioxid 110
Kompaktfassade 50
Kompaktheit 41
Konvektion 56
Konvektiv 56
Korkplatte 45
Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) 133

L
Landwirtschaft 6
Lebenszyklus 34
LED 128
Leichtbauweise 66
Leistungsregelung 107
Licht 7
Lichtausbeute 128
Lichtmanagement 130
Lichttechnische Anforderungen 126
Lichttransmissionsgrad 59
Life Cycle Energy 34
Lineare Wärmebrücke 54
Luftdichtigkeitsmessung 54
Lüftung 64
Luft-Wasser-Wärmepumpe 101

M
Massivbau 46, 94
Massivholzkonstruktion 66
Materialien 33
Materialwahl 32
Minergie-A-Gebäude 34
Minergie-Kennzahl 20
Minergie-Modul 121
Minergie-Standard 18
Mischbauweise 94
Mischlüftung 117
Mobilität 8, 10
Monitoring 143
MuKEn 2014 21, 44, 73, 99, 132, 143

N
Nachströmeinrichtung 109
Nachtauskühlung 65, 67
Nanoschäume 45
Nullenergiegebäude 34
Nutzenergie 10
Nutzerverhalten 124

O
Olfaktorische Behaglichkeit 36

P
Passivsolare Gewinne 73, 75
Pelletofen 103
Photovoltaik 11, 42, 132
Plusenergiegebäude 27
Plusenergiekonzept 42
Primärenergie 17
Primärenergieträger 10
PUR 45

Q
Quartier 11, 13
Quelllüftung 117
Querlüftung 113

R
Rahmenanteil Fenster 62
Raumheizung 7
Raumkomfortregelung 141
Raumluftfeuchte 111
Raumluftqualität 110
Raumluftunabhängig 108
Reed-Kontakt 109
Reflexion 57

S
Satellit 109
Schaumglas 45
Scheibenzwischenraum 56
Schulen 6
Selbstlernende Systeme 145
Selbstregeleffekt 104
Selektive Beschichtung 60
Selektivität 58
Siedlung 14
Solaranlage 101
Solarer Gewinnfaktor 62
Solarspektrum 58
Solarstrahlung 58
Sole-Wasser-Wärmepumpe 101
Sommerlicher Wärmeschutz 22, 63, 65
Sonnenkollektoren 104
Sonnenschutzglas 60
Sonnenschutzvorrichtung 63
Spaltklinker 49
Spital/Heim 6
Splitgeräte 113
Stadt 11, 13, 14
Standardlösungskombination 44, 99
Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz
SNBS 21
Standby 125
Steigzonen 54
Steinwolle 45
Storenantriebe 139
Strahlung 58
Stromverbrauch 122
Stückholzfeuerung 99
Suffizienz 15

T
Tageslichtautonomie 70
Tageslichtplanung 69
Tageslichtquotient 68
Tageslichtversorgung 68
Thermische Behaglichkeit 36
Thermische Gebäudehülle 42
Thermische Trägheit 66
Thermisch-solar 106
Transmission 57
Transmissionswärmeverlust 44, 73
Transparente Bauteile 92
Treibhausgasemissionen 5
Trittschallschutz 43

U
Überbauung 11, 13
U_{cw}-Wert 62
Umkehrdach 81
Umwälzpumpen 139
Umwandlungsstufe 10
Unterdrucküberwachung 109
Unterkonstruktion 49, 78

V
Vakuumdämmpaneel 45
Variabel-Volumenstrom-Regler (VAV) 119
Ventilatoren 139
Verbrauchsabhängige Heiz- und Warmwasserkostenabrechnung 143
Verbrennungsluft 108
Verbundlüfter 117, 118
Vereinfachter Nachweis 101
Verglasungsfläche 41
Verkehr 6
Verputzte Aussenwärmedämmung 86
Verschattung 41
Visuelle Behaglichkeit 38
Vorhangfassade 61

W
Warmdachkonstruktion 46
Wärmeabgabe 102
Wärmebrücke 54, 61, 94
Wärmebrückenverluste 76
Wärmedämmstoff 44, 76
Wärmedurchlasswiderstand 66
Wärmekraftkopplungsanlagen 99
Wärmeleitfähigkeit 44
Wärmepumpe 101
Wärmeschutz 43
Wärmespeicherfähigkeit 64
Wärmetransport 56
Wärmeverbundsystem 12
Wärmeverteilung 102
Warmwasser 7
Warmwasser-Wärmepumpe 104
Wasserdampf 110
Weitwurfdüse 117
Wellenlängenbereich 59
Winterstrom 133
Wohngebäude 6
WP-Boiler 104

Z
Zellulosefasern 45
Zementestrich 66
Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV) 27, 138
Zweckbauten 22
Zweischalenmauerwerk 49, 85
Zweischalen-Sichtmauerwerk 85