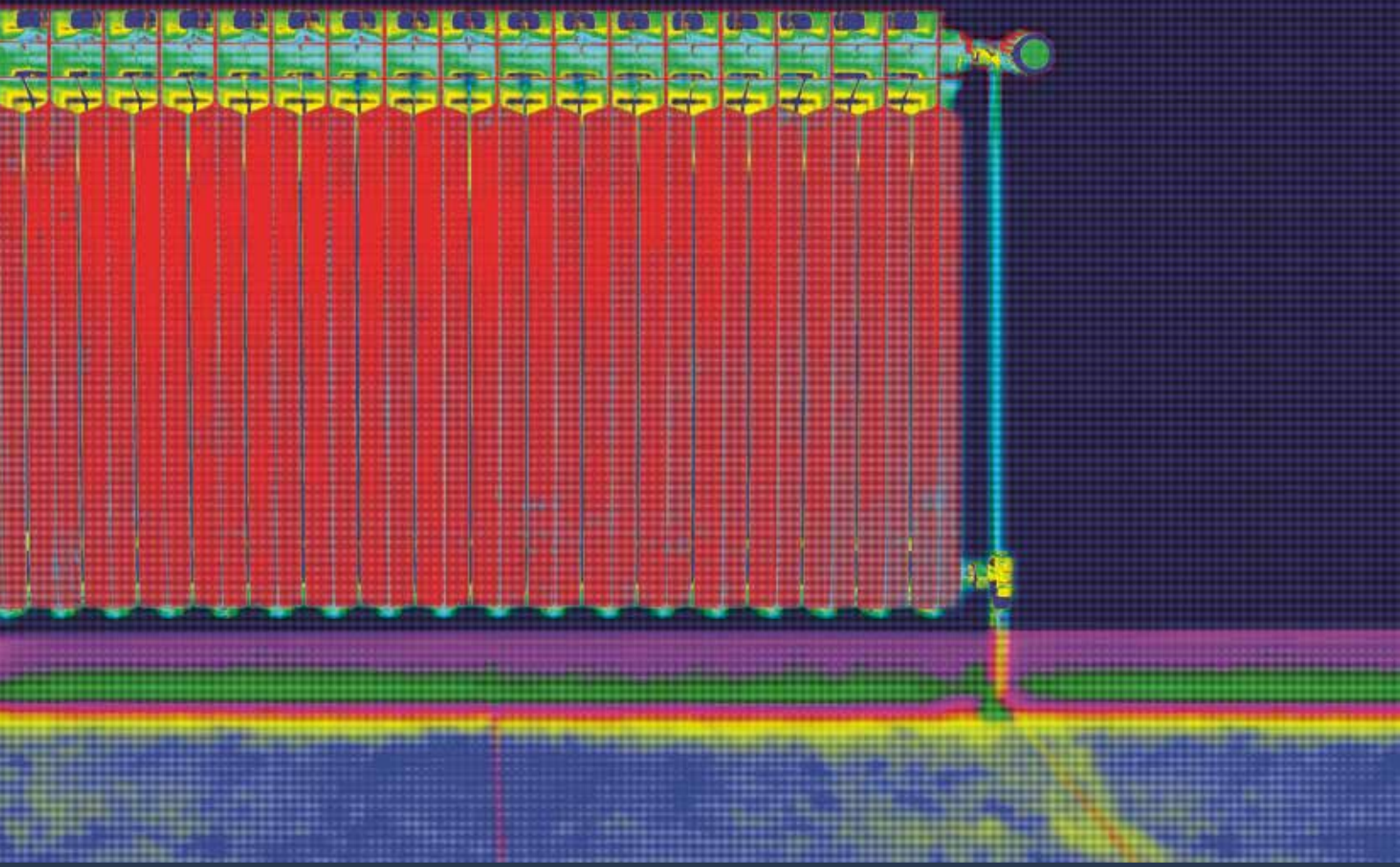


Reto von Euw (Hrsg.)

Gebäudetechnik

Systeme integral planen



Inhalt

1. Integrale Gebäudetechnik	5	5.5 Ladekonzepte	157
1.1 Vorteile der Teamarbeit	5	5.6 Wassererwärmung mittels Abwärme	162
1.2 Gebäudetechnik und Nachhaltigkeit	8	5.7 Legionellen	165
1.3 Komfort und Behaglichkeit	15		
1.4 Gebäudetechnik und Energie	22	6. Beleuchtung	169
		6.1 Energieeffiziente Beleuchtung	169
2. Heizungsanlagen	31	6.2 Tageslicht	170
2.1 Komponenten einer Heizungsanlage	31	6.3 Kunstlicht	172
2.2 Hydraulik der Wärmeverteilung	34	6.4 Lichttechnische Grundlagen und Grössen	174
2.3 Wärmepumpen	43	6.5 Lampen und Leuchten	177
2.4 Praxisbeispiele zu Wärmepumpen	53		
2.5 Holzheizungen	64	7. Elektrische Geräte und Anlagen	181
2.6 Praxisbeispiel zu Holzheizungen	68	7.1 Strom gewinnt an Bedeutung	181
2.7 Thermische Netze	70	7.2 Merkblatt SIA 2056 «Elektrizität in Gebäuden»	181
2.8 Praxisbeispiele zu thermischen Netzen	71	7.3 Typischer Stromverbrauch Haushalt und Büroarbeitsplatz	183
2.9 Wärmekraftkopplung	73	7.4 Stromverbrauch messen	184
2.10 Praxisbeispiele zu WKK	74	7.5 Elektrische Motoren und Frequenzumrichter	184
2.11 Thermische Solaranlagen	76	7.6 Gebäudetechnik gesamthaft optimieren	185
2.12 Praxisbeispiele zu thermischen Solaranlagen	80		
2.13 Wärmeabgabe	88	8. Gebäudeautomation	187
		8.1 Aufbau	188
3. Klimakälte	91	8.2 Funktionen	190
3.1 Bedeutung, Begriffe	91	8.3 Systemkommunikation	190
3.2 Kältemittel	95	8.4 Umsetzung der Gebäudeautomation	192
3.3 Kühllasten	101		
3.4 Kälteerzeugung	105	9. Photovoltaik	195
3.5 Kälteabgabe im Raum	115	9.1 Allgemeine Anforderungen	195
3.6 Trends in der Kältetechnik	120	9.2 PV-Module	195
		9.3 Montagesysteme	197
4. Lüfterneuerung	123	9.4 Solarkabel	197
4.1 Abgrenzung	123	9.5 Stecker	198
4.2 Vorschriften und Normen	123	9.6 Generatoranschlusskasten	198
4.3 Raumluftqualität und Luftraten	124	9.7 Wechselrichter	199
4.4 Begriffe, Komponenten und Funktionen	126	9.8 Schutz- und Sicherungselemente	200
4.5 Ventilatorenergie und Druckverluste	132	9.9 Trenn- und Schaltelemente	200
4.6 Wärmerückgewinnung und Leckagen	135	9.10 Messeinrichtungen	201
4.7 Anlagentypen	141	9.11 Kommunikationssystem	202
4.8 Lüftungssysteme	144	9.12 Batteriespeicher	202
		9.13 Eigenverbrauchsregler	203
5. Warmwasserversorgung	149	9.14 Energieertrag einer PV-Anlage	203
5.1 Aufbau und Komponenten	149	9.15 Eigenverbrauch	204
5.2 Allgemeine Hinweise	152		
5.3 Hydraulische Einbindung von Wassererwärmungsanlagen	154	10. Anhang	207
5.4 Wärmeübertragung bei indirekter Erwärmung	155		

Impressum

Gebäudetechnik – Systeme integral planen

Herausgeber: Reto von Euw

Autoren: Reto von Euw, Zoran Alimpic, Heinrich Huber, Björn Schrader, Jürg Nipkow, Olivier Steiger und Christof Bucher

Mit Beiträgen von: Gianrico Settembrini, Marvin King und René Mosbacher

Redaktion und Layout: Faktor Journalisten AG, Zürich; René Mosbacher, Christine Sidler

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

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

2. aktualisierte Auflage, September 2022.
ISBN: 978-3-905711-71-4

Als Gesamtsystem denken

Eines der wichtigen Ziele der ersten Ausgabe dieses Buchs von 2012 war, den Planenden in der Gebäudetechnik das «Gebäude als System» näherzubringen. Dabei referenzierte es insbesondere auf die modulare Darstellung der Gebäudetechnik, wie sie im damaligen Entwurf der Norm SIA 411 beschrieben war.

Mittlerweile hat sich nicht nur die Gebäudetechnik rasant weiterentwickelt. Auch die gesetzlichen Vorgaben und die Normen wurden den Erfordernissen der Zeit angepasst, von denen der Klimaschutz wohl das prominenteste Beispiel ist. Das Arbeitsumfeld für Gebäudetechnikfachleute ist komplexer, aber auch interessanter geworden. Sie können von neuen technischen Lösungen, Arbeitsmitteln und Konzepten profitieren, die es ihnen erlauben, Synergien zwischen den einzelnen Gewerken besser auszuschöpfen. Damit lassen sich nicht nur die Investitions- und Betriebskosten und der Energiebedarf reduzieren, sondern auch der Komfort für die Nutzenden verbessern. Was letztere betrifft: Mit den sich häufenden Hitzeperioden ist das Bedürfnis nach Gebäuden gestiegen, die auch im Sommer ein angenehmes Innenraumklima bieten.

Was vor zehn Jahren galt, gilt heute noch verstärkt: Soll Gebäudetechnik optimal geplant, erstellt und betrieben werden, muss sie als Gesamtsystem verstanden werden. Dies setzt voraus, dass interdisziplinär gearbeitet wird und das wiederum gelingt nur, wenn alle beteiligten Fachleute ein minimales Verständnis für die anderen Gewerke mitbringen. Dieses zu vermitteln, bleibt das wichtigste Ziel auch der neuen Ausgabe dieses Buchs.

Es ist gedacht für Praktiker und solche, die es werden wollen. Die Inhalte wurden von Grund auf überarbeitet und entsprechend dem aktuellen Stand der Technik und der Normierung nachgeführt. In sich geschlossene Kapitel vermitteln die Grundlagen zu den verschiedenen Disziplinen auf kompakte Weise. Wo immer sinnvoll und möglich, wurden die Kapitel mit Kennwerten, Beispielen, typischen Lösungen und Hinweisen für die Planung angereichert. Dies ermöglicht es, sich in kurzer Zeit einen Überblick über ein bestimmtes Gewerk zu verschaffen oder gezielt nur einen Fachbegriff respektive einen Kennwert nachzuschlagen.

Integrale Gebäudetechnik

Reto von Euw
Gianrico
Settembrini
Heinrich Huber
Marvin King
René Mosbacher

1.1 Vorteile der Teamarbeit

«Bauen» heisst, eine gestalterisch ansprechende und funktionale Verbindung von Form, Konstruktion, Material und Gebäudetechnik zu schaffen. Dies bedingt ein interdisziplinäres Team, das sich über die Grenzen des jeweiligen Metiers hinweg zu verständigen weiss. Arbeitet das Team gut zusammen, kann es Mehrwerte für alle Beteiligten schaffen. Dazu gehören unter anderem ein gesteigerter Komfort für die Nutzenden, ein niedriger Energiebedarf sowie tiefere Betriebs- und Unterhaltskosten. Um diese Ziele zu erreichen, muss an einem neuen Verständnis für Planung, Bau und Betrieb von Bauten gearbeitet werden. Die Planenden müssen Aspekte der Architektur, der Raumorganisation und der Gebäudetechnik verbinden und gewerkübergreifend kommunizieren können. Sie müssen auch den Mut aufbringen, der Bauherrschaft ein Gesamtkonzept zu verkaufen. Dies zwingt sie dazu, sich mit dem «Gebäude als System» auseinanderzusetzen, das Konzept zu verstehen und im Kontext zu den Nutzenden und zur Bauherrschaft zu sehen (Bild 1.1). Dabei sollten sie die im Team erarbeiteten Ziele und Projekt-

definitionen laufend überprüfen und die heute möglichen Planungshilfen wie dynamische Berechnungstools (Simulationen) und Building Information Modeling (BIM) einsetzen.

Angemessene Lösungen

Die heutigen Konzepte und die aktuelle Technik im Bauwesen erlauben uns, komplexe Aufgaben zu lösen. «Komplex» heisst hier aber nicht, dass möglichst viel Technik eingesetzt werden soll. Gesucht sind vielmehr angemessene Lösungen mit angemessener Technik. Hierfür müssen den Gebäudetechnikfachleuten stets die Abhängigkeiten zwischen Architektur und Gebäudetechnik bewusst sein (Tabelle 1.1). Wir streben nach wie vor kompakte Gebäude an, optimieren dabei aber die Versorgung mit Tageslicht, die Fassadenorientierung, den Glasanteil, die Speichermasse, die Luftdichtheit, den Schallschutz, die Sicherheit und nicht zuletzt die Gestaltung sowie die soziale Verträglichkeit. Dies bedingt eine stetige Iteration der einzelnen Planungsschritte im Planungsteam unter Berücksichtigung der Wünsche der Bauherrschaft.

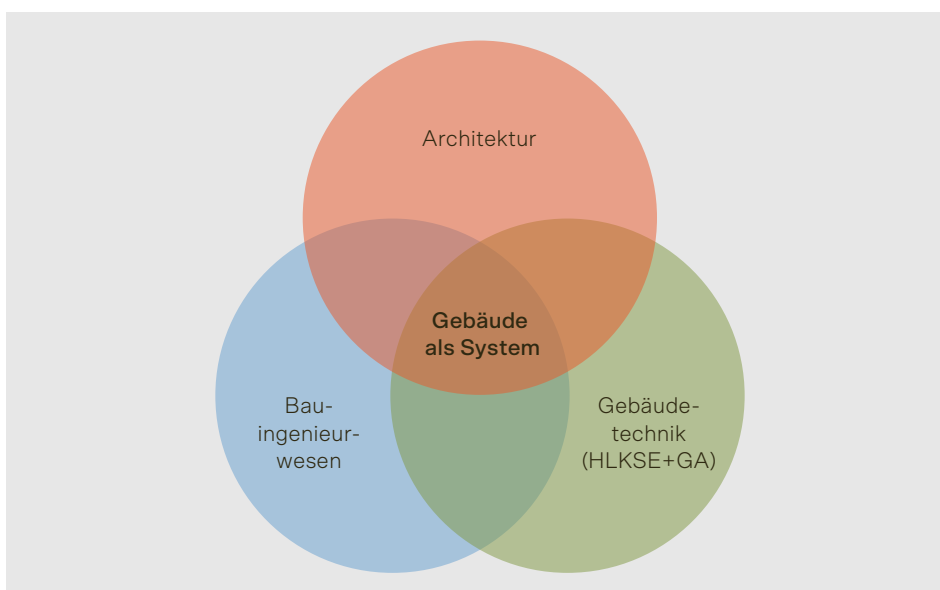


Bild 1.1: Das Gebäude als System.

Es braucht also ein interdisziplinäres Team, das sich um die Gesamtheit eines Bauwerks kümmert. Bauherrschaft, Architektin, Kostenplaner, Tragwerk- und Bauingenieurin sowie Gebäudetechnikplaner müssen in partnerschaftlichem Zusammenwirken die Nutzungsvereinbarungen, Ziel- und Projektdefinition im Hochbau treffen. In jeder Projektphase muss die Möglichkeit bestehen, Aspekte zu hinterfragen, zu optimieren und dafür Verantwortung zu übernehmen. Die modulare Darstellung der Gebäudetechnik wird in der Norm [SIA 411] beschrieben. Sie gilt für Bestandsbauten wie für Neubauten und hat den Anspruch, als Verständigungsnorm interdisziplinär und integral zwischen Bauherrschaften, Architekten und Ingenieurinnen Brücken zu schlagen. Die Idee hinter der modularen Darstellung ist, dass ein interdisziplinäres Team eine gemeinsame Terminologie nutzt und dadurch zu einem besseren gegenseitigen Verständnis gelangt (Tabelle 1.2). Die Methode enthält jedoch keine Anforderungen an gebäudetechnische Systeme.

Anlagen der klassischen Haustechnik, also Heizungs-, Lüftungs-, Klima- und Sanitäreanlagen, Elektroversorgung und Gebäudeautomation (H-L-K-S-E-GA) werden in zunehmendem Masse miteinander vernetzt. Schon deshalb ist ein gesamtheitliches Verständnis dieser Disziplinen sehr wichtig – sowohl hinsichtlich der einzelnen Funktionen als auch als gebäudetechnisches Gesamtsystem.

Für die Planenden schwinden die Unterschiede zwischen Neubauten und Erneuerungen. In beiden Fällen gelten dieselben Regeln der integralen Planung. Bei hochwertigen Bürobauten wird Umbau- und Anpassungsflexibilität erwartet, das heisst: Die Hohlräume unter den Fussböden und/oder in den Decken respektive Wänden sollen ein einfaches Anpassen der gebäudetechnischen Installationen ermöglichen. Ausschlaggebend für die Planung sind vor allem die Nutzungsformen sowie die Verfügbarkeit von Energieressourcen am Standort des Gebäudes. Letztere lassen sich, neben weiteren Informationen, auf Geoportalen abfragen.

Tageslichtnutzung	Tageslichtnutzung versus Kompaktheit, d. h. Raumtiefen bis 6 m (Fenster: Lichttransmission)
Fassadenorientierung	Passive Sonnenenergienutzung mitberücksichtigen. Orientierung nach Nutzung (z. B. Wohnen Südwest-Nordost, Büro Süden-Norden)
Angemessene, optimierte Glasanteile pro Fassade	Reine Glasfassaden sind nicht behaglich – zu grosser Strahlungsaustausch, negativer Einfluss der Oberflächentemperaturen etc.
Speichermasse	Selbstregeleffekte, dämpfende Wirkung von Wärme- und Kälteeinflüssen (von innen und aussen)
Luftdichtheit	Verhindern von ungewolltem Luftaustausch und damit unkontrolliertem Energiefluss
Schallschutz	Schallimmissionen gezielt beschränken
Wärmeschutz	Ziel: hoher Komfort und eine optimale Energiebilanz
Materialwahl	Berücksichtigung von grauer Energie und gesundheitsschädlichen Einflüssen, Schonung von Ressourcen
Dämmperimeter	Dämmperimeter möglichst einfach definieren, unter Minimierung von Wärmebrücken
Bilanz von Energieflüssen	Leistungs- und Energiebedarf möglichst mit dynamischen Rechenmodellen berechnen und optimieren
Sicherheit	Betriebliche Sicherheit, Unfallsicherheit, Brandschutz etc.
Soziale Verträglichkeit	Für Menschen gebaut, schön und richtig, in der Funktionalität überzeugend

Tabelle 1.1: Abhängigkeiten zwischen Architektur und Gebäudetechnik.

Beispiel Solarenergienutzung

Das Angebot an Solarstrahlung unterscheidet sich stark nach Standort, Tageszeit, Wetterlage und Ausrichtung der beschienenen Fläche. Zudem kann die Nutzung von Sonnenenergie durch Verschattung beeinträchtigt sein. Bild 1.2 zeigt, wie sich die Verschattung eines Geländes als Diagramm darstellen lässt.

Beim Planen der Gebäudetechnik soll stets ein Optimum zwischen der Solarenergienutzung und dem Schutz der Innenräume vor Überhitzung angestrebt werden. Das lässt sich nur erreichen, wenn die relevanten Gewerke wie Heizung, Kühlung, Sonnenschutz, Beleuchtung und Solartechnik aufeinander abgestimmt werden.

Bild 1.2: Beispiel für ein Sonnenstanddiagramm mit eingezeichneter Horizontaufnahme.

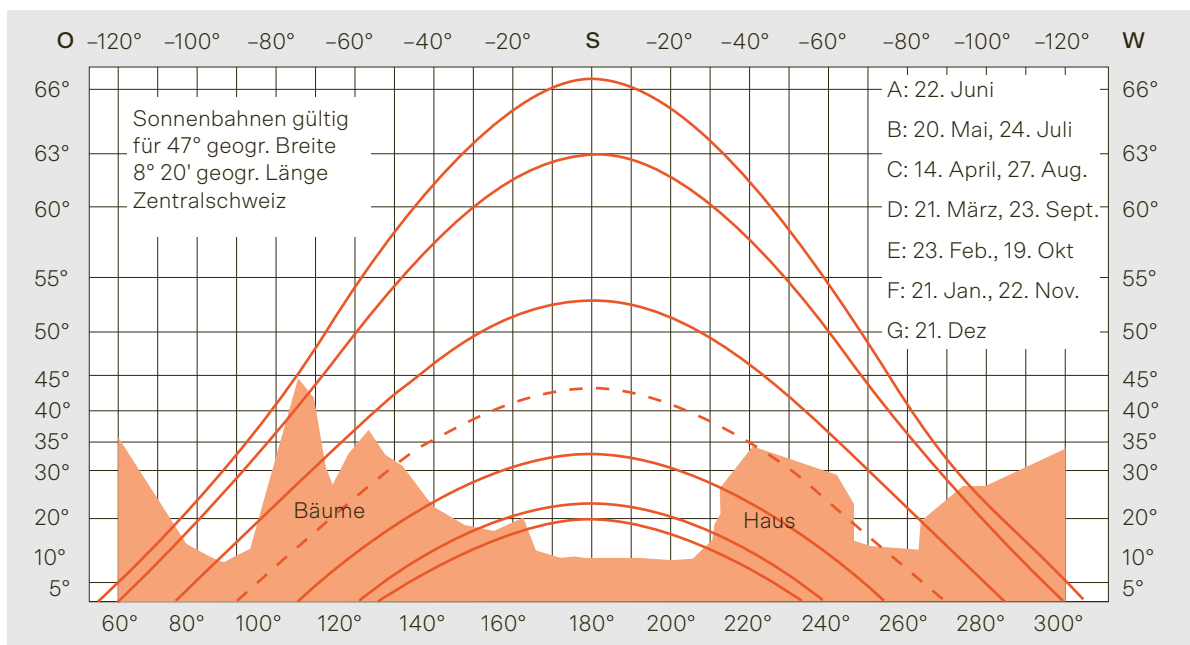


Tabelle 1.2: Beispiele für die Zuordnung der gebäudetechnischen Teilsysteme gemäss der [SIA 411] «Modulare Darstellung der Gebäudetechnik».

Teilsysteme	Quelle/Senke	Umwandlung	Speicherung	Verteilung	Raum/Übergabe
Systeme					
Heizungsanlagen	Energiezufuhr	Wärmeerzeugung	Wärmespeicherung	Wärmeverteilung	Wärmeabgabe
Lüftungs- und Klimaanlage	Aussenluft-/ Fortluftführung	Luftaufbereitung	Luftwärmespeicherung	Luftverteilung	Luftabgabe
Kälteanlagen	Energiezufuhr/ Wärmesenke	Kälteerzeugung/ Rückkühlung	Kältespeicherung	Kälteverteilung	Kälteabgabe
Sanitäranlagen					
Wasserversorgungsanlage	Wasserquelle	Wasserbehandlung	Wasserspeicherung	Wasserverteilung	Entnahmestelle
Wasserentsorgungsanlage	Abwasser	Abscheideanlage	Abwasserspeicherung	Abwasserleitung	Entwässerungsgegenstand
Gasversorgungsanlage	Gasquelle	Gasbehandlung	Gasspeicher	Gasverteilung	Gasverbrauchsapparat
Elektro- und Kommunikationsanlagen					
Elektroanlage	Starkstromanschlussleitung	Starkstromerzeugung	Energiespeicher	Installationen (Stark- bzw. Schwachstrom)	Verbraucher
Kommunikationsanlage	Kommunikationseinspeisung	Datenquelle	Datenspeicher	Daten- und Kommunikationsinstallation	Daten- und Kommunikationsverbraucher
Gebäudeautomationssysteme		Feldebene	Automationsebene	Managementebene	

1.2 Gebäudetechnik und Nachhaltigkeit

Agenda 2030 und SDG

Mit der Agenda 2030 hat sich die Staatengemeinschaft erstmals umfassende Ziele für eine globale nachhaltige Entwicklung gesetzt. Ihr Kern sind die 17 «Sustainable Development Goals» (SDGs) mit ihren 169 Unterzielen (Bild 1.3). Sie wurden 2015 von der UNO-Generalversammlung verabschiedet.

Die Umwelt- und Ressourcenpolitik ist bei 11 der 17 Ziele und bei 86 von 169 Unterzielen direkt oder indirekt betroffen. Besonders relevant in dieser Hinsicht sind folgende SDGs:

- SDG 6: Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und Sanitärversorgung für alle gewährleisten
- SDG 12: Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sicherstellen
- SDG 13: Umgehend Massnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen ergreifen
- SDG 15: Landökosysteme schützen, wiederherstellen und ihre nachhaltige Nutzung fördern

Die Auswirkungen des Klimawandels

Der Begriff «Klimawandel» bezeichnet die weltweit festgestellte Veränderung des Klimas, also die für globale Verhältnisse rasche Erwärmung. Sie beruht im Wesentlichen auf einer Veränderung der Strahlungsverhältnisse in der Atmo-

sphäre, die vorwiegend aus gestiegenen Konzentrationen von Treibhausgasen (THG) wie Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Wasserdampf (H₂O) resultiert. Laut den Klimaszenarien [CH2018] kann es in der Schweiz bei weiter steigenden THG-Emissionen in der warmen Jahreszeit Mitte des Jahrhunderts in einem durchschnittlichen Jahr bis 4,5°C wärmer als heute sein.

Bauen in Zeiten des Klimawandels

Das Bauen im Klimawandel muss zwei Anforderungen erfüllen (Bild 1.4): Zum einen geht es darum, die Ursachen für den Klimawandel zu bekämpfen, also die THG-Emissionen zu minimieren. Zum anderen sollen die Wirkungen des Klimawandels auf die Nutzenden und auf das Umfeld eines Gebäudes verringert werden. Es soll also so gebaut werden, dass die Gebäude an die künftigen klimatischen Bedingungen angepasst sind.

Klima- und Energiestrategie

Der Bundesrat hat das Ziel einer «klimaneutralen Schweiz bis 2050» im Rahmen der Klimaanpassungsstrategie formuliert. Entsprechende Ziele zur Energieeffizienz sind in der Energiestrategie 2050 des Bundes festgelegt. Der Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein (SIA) unterstützt diese strategischen Ziele und hat im Positionspapier «Klimaschutz, Klimaanpas-



Bild 1.3: Die «Sustainable Development Goals» der Vereinten Nationen. (Quelle: <https://sdgs.un.org/goals>)

sung und Energie» [SIA 2020] hierzu folgende Leitsätze formuliert:

- Der SIA fordert einen energieeffizienten Gebäude- und Infrastrukturpark mit Netto-Null Treibhausgasemissionen.
- Der SIA setzt sich für einen sparsamen Einsatz von Ressourcen und den Ausbau der Kreislaufwirtschaft ein.
- Der Gebäude- und Infrastrukturpark trägt zur Erzeugung erneuerbarer Energien und zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit bei.
- Der effiziente Betrieb und das Suffizienzprinzip haben hohe Priorität.
- Das zukünftige Klima wird schon heute bei der Planung berücksichtigt.
- Der SIA gestaltet die durch den Klimawandel erforderliche Transformation aktiv mit.

Dekarbonisierung des Gebäudeparks

Die jährlichen Treibhausgasemissionen der Schweiz entsprechen rund 45 Mio. Tonnen CO₂. Rund 40% davon erzeugt der Gebäudepark: 24% stammen aus dem Betrieb der rund 2,3 Mio. Gebäude, also aus dem Energiekonsum für Raumklima, Warmwasser, Beleuchtung oder andere haustechnische Dienstleistungen. 16% sind «graue» THG-Emissionen, die unter anderem beim Erstellen

der Gebäude sowie bei Produktion und Transport der Baustoffe und Bauteile entstehen [Bafu 2020].

Die Relevanz dieser grauen THG-Emissionen wird im SIA-Effizienzpfad Energie [SIA 2040] bestätigt. Dort sind nutzungsabhängige Zielwerte für emissionsarme, 2000-Watt-kompatible Gebäude festgelegt. [SIA 2040] liefert Richtwerte für deren Betrieb und Erstellung sowie für die gebäudeinduzierte Mobilität. Der Aufwand für die Erstellung ist heute in der Regel deutlich höher als derjenige für den Betrieb. Bei Wohnneubauten beträgt der aktuelle Richtwert für THG-Emissionen 9,0 kg/m²a für die Erstellung, 4,0 kg/m²a für die Mobilität und 3,0 kg/m²a für den Betrieb.

Erstellung von Gebäuden

Der Erstellungsaufwand von Gebäuden entspricht der Summe der Ökobilanzen von allen beim Gebäude eingesetzten Bauteile oder Baustoffe. Die Ökobilanz ergibt sich aus dem Mengengerüst der bewerteten Elemente multipliziert mit dem Umweltfaktor der einzelnen Bauteile (Bild 1.5).

Zur Darstellung der ökologischen Qualität liefern die KBOB-Ökobilanzdaten im



Bild 1.4: Interaktion zwischen Gebäudepark und Klima: Gebäude sind gleichzeitig für den Klimawandel verantwortlich und auch von ihm betroffen. (Quelle: [Bafu 2019])

Mengengerüst Fassade opak [Einheit] Fassade Fenster [Einheit] Stützen [Einheit]	x	Umweltfaktor UBP/[Einheit] MJ/[Einheit] kg CO ₂ /[Einheit]	=	Ökobilanz Umweltbelastungspunkte (UPB) Graue Energie (PEne) Treibhausgasemissionen (THGE)
---	---	---	---	---

Bild 1.5: Methodik zur Berechnung der Ökobilanz von Gebäuden. Der Umweltfaktor wird in [KBOB 2022] pro Baustoff definiert.

Baubereich [KBOB 2022] Umweltfaktoren von Baustoffen und gebäudetechnischen Komponenten in drei Kenngrößen:

- graue Energie (PEne)
- Treibhausgasemissionen (THGE)
- Umweltbelastungspunkte (UBP)

Graue Energie und graue THGE repräsentieren die aufgewendete nicht erneuerbare Primärenergie respektive die emittierten THG für die Herstellung und Entsorgung von Baustoffen. Die UBP setzen sich zusammen aus der Menge eines Stoffes multipliziert mit dem zugehörigen Ökofaktor der sich aus der «Methode der ökologischen Knappheit» ergibt. Seit 2022 wird in den Ökobilanzdaten der in Baumaterialien und Bauelementen enthaltene biogene Kohlenstoff ausgewiesen.

Ähnlich wie bei einer Kostenbetrachtung kann die Ökobilanz eines Gebäudes zum Zeitpunkt der Erstellung, also als Total der grauen Energie der beim Bau zugeführten Bauteile (Investitionskosten) oder über die gesamte Lebensdauer des Gebäudes erfasst werden (Lebenszykluskosten). Bei der zweiten Methode spielt die Festlegung der Nutzungsdauer des Gebäudes, respektive der einzelnen Bauteile eine wesentliche Rolle. Diesbezüglich schafft das Merkblatt [SIA 2032] «Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden» einheitliche Grundlagen. Es

legt einen normierten Gebäudelebenszyklus von 60 Jahren fest und definiert die Lebensdauer der einzelnen Bauteile (Amortisationszeiten). Dies bedeutet, dass ein Bauteil mit 30-jähriger Lebensdauer (beispielsweise Solarkollektoren) im Lebenszyklus des Gebäudes zweimal hergestellt und zweimal entsorgt wird.

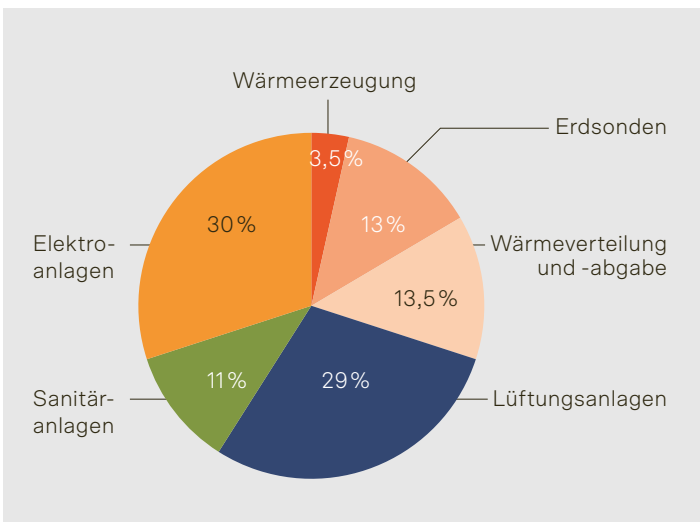
Graue Energie in der Gebäudetechnik

Neben Form, Hülle und Tragstruktur bestimmen auch die gebäudetechnischen Anlagen in hohem Masse die graue Energie eines Gebäudes. Beim 2012 auf einem 2000-Watt-Areal gebauten, 7-geschossigen Wohn- und Gewerbegebäude «Sihlbogen» (Tabelle 1.3) beispielsweise erreicht der Anteil der Gebäudetechnik an der grauen Energie 23%. Bezüglich THG-Emissionen sind es 18%. Mit dem Trend zur höheren Technisierung von Gebäuden kann der Anteil heute auch noch höher sein. Bild 1.6 zeigt die Aufteilung der grauen Energie von einzelnen gebäudetechnischen Systemen und Komponenten aus Beispielbilanzierungen. Es fällt auf, dass bei den untersuchten Wohn-, Büro- und Schulbauten die Heizungs-, Lüftungs- und Elektroanlagen je rund 30% des Erstellungsaufwands ausmachen. Die Sanitäranlagen sind für die restlichen 10% verantwortlich.

Heizungsanlagen: Hier tragen vor allem die Abgabesysteme (Heizkörper, Fuss-

Tabelle 1.3: Objekt-daten Sihlbogen. (Quelle: Basler & Hofmann Ingenieure und Planer AG)

Bild 1.6: Aufteilung der grauen Energie von Gebäudetechnik auf die verschiedenen Systeme und Elementgruppen. Durchschnittliche Anteile, auf 0,5% gerundet, gemäss Sachbilanzstudien über 16 Gebäude mit unterschiedlichen Nutzungen von [Klingler 2014], [Klingler 2011] und [Gugerli 2015].



Objekt-daten	
Standort	Zürich-Leimbach
Gebäudetyp	7-geschossiger Wohn- und Gewerbebau
Baujahr	2012
Gesamtbaukosten (BKP 2)	ca. 90 Mio. Franken
Geschossfläche	9860 m ²
Aussengeschossfläche Balkone	1326 m ²
Energiebezugsfläche	8583 m ²
Gebäudehüllfläche	8149 m ²
Gebäudehüllzahl	0,95
Heizwärmebedarf Q _n	56 MJ/m ² a
Graue Energie für Erstellung	3590 MJ/m ² EBF
Graue Energie für Entsorgung	627 MJ/m ² EBF
Graue Energie total pro Jahr	102 MJ/m ² a

bodenheizungen, Heiz- und Kühldecken) einen signifikanten Teil zum Erstellungsaufwand bei. Entscheidend für die Bilanz ist jeweils, ob Erdwärmesonden vorhanden sind. Sie machen bis zu mehr als 60% des Erstellungsaufwands eines Heizsystems aus. Weniger relevant sind hingegen der Wärmeerzeugertyp und die Wärmeverteilung.

Lüftungsanlagen: Der Erstellungsaufwand wird grösstenteils von den verzinkten Lüftungskanälen (rund 30 bis 40%) und den Lüftungsgeräten (rund 20 bis 30%) verursacht. PE-Lüftungskanäle sind für die Ökobilanz weniger relevant – ihr Einsatz bringt jedoch in einer Gesamtbetrachtung Nachteile mit sich: In Beton eingelegt widersprechen sie dem Prinzip der Systemtrennung. Nicht eingelegt werden sie in der Regel hinter einer zusätzlichen abgehängten Decke installiert. Unabhängig vom System ist die Luftverteilung für rund 50 bis 65% des Erstellungsaufwands von Lüftungsanlagen verantwortlich. Dies zeigt, wie wichtig Konzepte mit kurzen Leitungen sind, wie sie sich etwa mit Verbundlüftern oder mit Luftzirkulation über offene Türen realisieren lassen (Low-Tech-Ansätze). Erdregister verursachen einen hohen Erstellungsaufwand, besonders wenn sie mit Beton konstruiert sind.

Sanitäranlagen: Der Erstellungsaufwand von Sanitäranlagen hängt wesentlich von der Wasserverteilung und vom Ausrüstungsstandard ab und ist entsprechend variabel. Entscheidend für die Bilanz ist die sinnvolle Anordnung

von Steigzonen und die Anzahl der Apparate. Eine Grauwasser- oder Regenwassernutzung führt zu einem Mehraufwand an grauer Energie, kann aber auch den Frischwasserverbrauch reduzieren.

Elektroanlagen: Hier verursachen Kabel und Installationsrohre etwa 40 bis 60% respektive 20 bis 35% des Erstellungsaufwands. Kunststoffe und Kupfer prägen dementsprechend die Ökobilanz. Vor allem bei den UBP ist der Anteil an Kupfer entscheidend. Generell hängt der Erstellungsaufwand von Elektroanlagen vom Ausrüstungsgrad ab. Bei hochtechnisierten Gebäuden kann ihr Anteil an der gesamten grauen Energie mehr als 10% erreichen.

Entwicklung der Dekarbonisierung

Der gesamte inländische THG-Ausstoss ist in den letzten 30 Jahren um 15% gesunken, im Gebäudebereich nahezu um das Doppelte [Klimastrategie]. Um den Pariser Klimavertrag (2015) einzuhalten, müssen jedoch die THG-Emissionen, im Vergleich zu 1990, bis 2030 halbiert werden.

Bild 1.7 zeigt, dass die Dekarbonisierung des Gebäudebereichs aktuell vorwiegend im Betrieb stattfindet. Zum Erreichen des Netto-Null-Zieles müssen aber auch die grauen THG-Emissionen reduziert werden. Relevant sind dabei Lieferketten der verwendeten Baustoffe, also Rohstoffgewinnung, Verarbeitung und Transport, der Gebäudeunterhalt und der Rückbau (Bild 1.8).

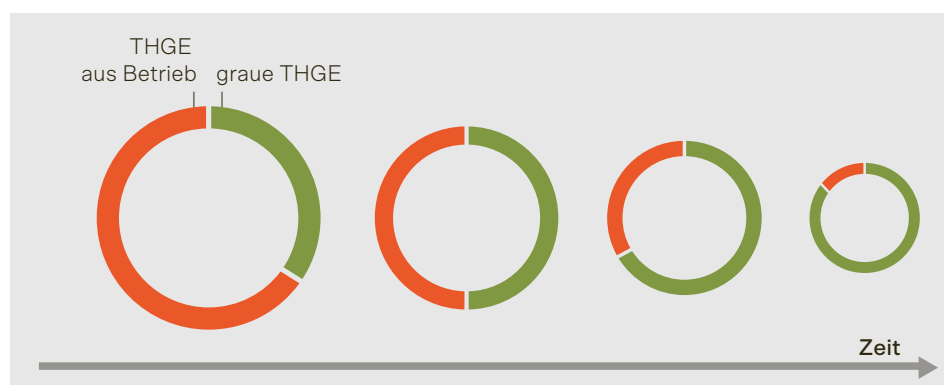


Bild 1.7: Trend bei den THG-Emissionen im Lebenszyklus von Gebäuden, aufgeteilt nach Betrieb und Erstellung (graue THGE). (Quelle: [Bionova 2018])

Die Reduktion der THGE bei der Erstellung eines Gebäudes ist weniger offensichtlich als in dessen Betrieb. Es lassen sich aber auf verschiedenen Planungsebenen allgemeine Grundsätze zur Verbesserung der THG-Bilanz ableiten:

Gebäude: Entwurf und Setzung: Minimierung des Anteils von Unterterrainbauten; Suffizienz und Effizienz: Genügsamkeit und Kompaktheit; lange Nutzungsdauer

Konstruktion: Leichte Bauweise; Systemtrennung: Primär-, Sekundär-, Tertiärstruktur unter Berücksichtigung der Bauteillebensdauer; einfach trennbare Verbundsysteme

Materialisierung: Klimaaoptimierte mineralische oder nachwachsende Baustoffe; Bauteile als Kohlenstoffzwischen-speicher; Wiederverwenden von Bauteilen und Baustoffen (Kreislaufansatz)

Kreislaufwirtschaft

Zirkulär Denken: Unser Wirtschaftssystem ist stark von einem linearen Verkaufsmodell geprägt. Produkte werden hergestellt, verwendet und entsorgt. Die Schweiz hat eines der höchsten Abfallaufkommen der Welt. Jährlich entstehen hier rund 85 Mio. t Abfall, wovon mit rund 84 % der grösste Anteil aus dem Bausektor stammt. Insgesamt fal-

len dort rund 57 Mio. t Aushub- und Ausbruchmaterial sowie 17 Mio. t Rückbaumaterial an [Bafu 2021].

Baustoffe bestehen meist aus Primärrohstoffen, die begrenzt vorhanden sind. Werden sie weiter- oder wiederverwendet respektive -verwertet, mindert dies entsprechend den Primärrohstoffverbrauch. Im Optimieren der Kreisläufe sowie dem Verwenden sekundärer Baustoffe und -teile liegt noch ungenutztes Potenzial zur Reduktion von THG-Emissionen (Bild 1.9).

Systemgrenzen: Die [SN EN 15804] bildet die Phasen des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes ab. Für den Bereich Erstellung gemäss [SIA 2040] beschreibt [SIA 2032] die Ökobilanzierung respektive die graue Energie detailliert, insgesamt wird aber nur ein Teil der



Bild 1.9: Die Abfallmenge sinkt beim Übergang von der linearen Wirtschaft zur Kreislaufwirtschaft. (Quelle: <https://muntagnard.ch>)

Gesamte THG-Emissionen über den Lebenszyklus

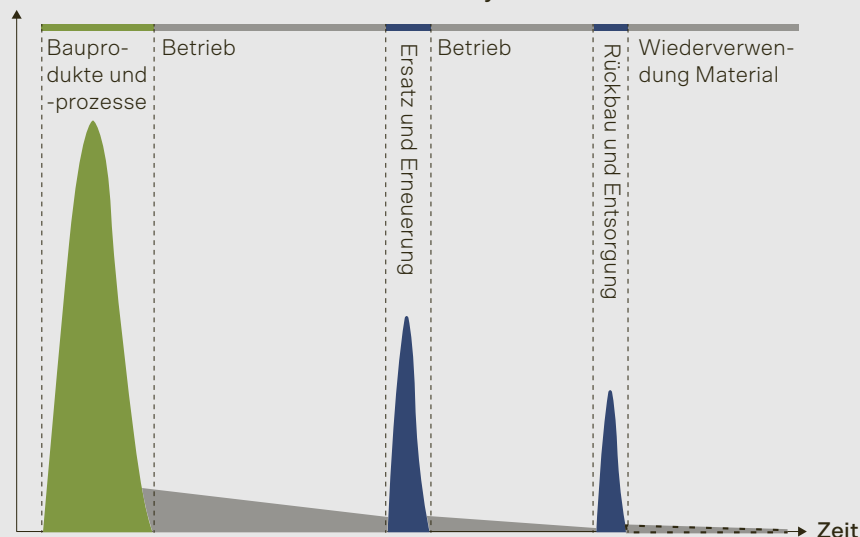


Bild 1.8: Peaks der kumulierten THG-Emissionen im Lebenszyklus eines Gebäudes. (Quelle: [WBCSD 2021])

Phasen abgedeckt (Tabelle 1.4). Ebenfalls ausserhalb der Systemgrenze liegen eventuelle Gutschriften, die sich aus der Wiederverwendung, der Rückgewinnung oder dem Recycling von Baustoffen ergeben würden. Solche Gutschriften können aber durchaus relevant sein. So hat sich bei der 2021 realisierten Aufstockung der Halle 118 auf dem Winterthurer Lagerplatzareal gezeigt, dass durch den hohen Wiederverwertungsanteil von bis zu 50% die Treibhausgasemissionen bedeutend reduziert werden konnten.

Ansätze der Zirkularität

Die Kreislaufwirtschaft zeichnet sich durch den effizienten Einsatz von Rohstoffen aus. Es handelt sich dabei um einen ganzheitlichen Ansatz, der den gesamten Kreislauf betrachtet: von der Rohstoffgewinnung über das Design, die Produktion und die Distribution eines Produkts bis zu seiner möglichst langen Nutzungsphase und zum Recycling [Bafu 2022].

Das lineare Prinzip «Produzieren-Konsumieren-Entsorgen» unseres aktuellen Wirtschaftsmodells soll künftig durch geschlossene, schlanke Materialkreisläufe ersetzt werden. Als Entscheidungsgrundlagen dafür eignet sich die übersichtliche Prioritätenliste der «zehn R» der Kreislaufwirtschaft (Bild 1.10):

Tabelle 1.4: Phasen des Lebenszyklus und Module für die Beschreibung und Beurteilung eines Gebäudes. Der Bereich «Erstellung» und die Ökobilanzierung gemäss [SIA 2032] decken nur einen Teil der Lebenszyklusdefinition nach [SN EN 15804] ab. Dazu gehören die Herstellungsphase (Modul A), der Ersatz in der Nutzungsphase (B4) sowie die Entsorgungsphase (Modul C). Die Errichtungsphase (A4/A5) wird teilweise vernachlässigt. Abgesehen vom Ersatz ist die Nutzungsphase (Module B) nicht Teil der [SIA 2032] bzw. Ökobilanzierung. Optional gibt es Möglichkeit, Gutschriften und Lasten ausserhalb der Systemgrenze gemäss [SN EN 15804] zu berücksichtigen, die sich aus dem Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- und Recyclingpotenzial ergeben (Modul D). Nach SN EN ISO 14044 werden diese beim Erstellen einer Ökobilanz lediglich informativ ausgewiesen.

Informationen zur Gebäudebeurteilung																		
Angaben zum Lebenszyklus des Gebäudes														Ergänzende Informationen ausserhalb des Lebenszyklus des Gebäudes				
Phasen gemäss SN EN 15804	Herstellungsphase			Errichtungsphase		Nutzungsphase							Entsorgungsphase			Vorteile und Belastungen ausserhalb der Systemgrenzen Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recyclingpotenzial		
	Rohstoffbereitstellung	Transport	Herstellung	Transport	Errichtung, Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Betrieblicher Energieeinsatz	Betrieblicher Wassereinsatz	Rückbau, Abriss	Transport	Abfallbehandlung		Beseitigung	
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3		C4	
Bereich Erstellung gemäss SIA 2032	x	x	x	(x)	(x)				x				x	x	x	x		Modul D

- **R1** Refuse (Ablehnen): Verzicht auf die Nutzung von Rohstoffen
- **R2** Rethink (Überdenken)
- **R3** Reduce (Reduzieren): weniger Rohstoffe
- **R4** Re-use (Wiederverwenden) von gebrauchten oder geteilten Produkten
- **R5** Repair (Reparieren) und Unterhalt
- **R6** Refurbish (Erneuern): Umbauen
- **R7** Remanufacture (Refabrikieren): Herstellen neuer Produkte aus den Bestandteilen alter
- **R8** Repurpose (Umfunktionieren): Umwidmen
- **R9** Recycle (Rezyklieren) durch die physikalische oder chemische Umformung von Material
- **R10** Recover (Zurückgewinnen) von Energie

Die Prioritätenliste mit den «zehn R» zeigt Folgendes: Das «grünste» Gebäude ist immer jenes, das gar nie gebaut wurde. Und: Das heute im Zentrum stehende Recycling (R9) von Baumaterialien ist aus Sicht der Kreislaufwirtschaft bloss die zweitschlechteste Massnahme. Hier gilt es einen Weg zu finden, wie wir von den eingeschliffenen Paradigmen wegkommen und den Stufen R1 bis R8 mehr Gewicht geben können.

Erweiterte Betrachtung

Zirkuläres Bauen ist vielschichtig und betrifft neben dem Material- und Ressourceneinsatz unter anderem auch das Energie- und Wassermanagement. Es geht viel weiter als lediglich die Lebensdauer eines Gebäudes durch Instandhaltung zu verlängern oder durch die Wiederverwendung von Bauteilen Ressourcen zu schonen. Zirkuläres Bauen bedarf verschiedenster Massstabsebenen und ein verdichtetes Gesamtbild (Bild 1.10).

Was oben anhand von Baumaterialien gesagt wurde, lässt sich analog auch auf die Gebäudetechnik anwenden: Provokativ gesagt, ist dann die «grünste» Gebäudetechnik die, die nicht installiert wird. Auch hier gilt es also in erster Linie schlanke, den Anforderungen angemessene Lösungen zu finden – dies können unter Umständen auch Low-Tech-Konzepte sein.

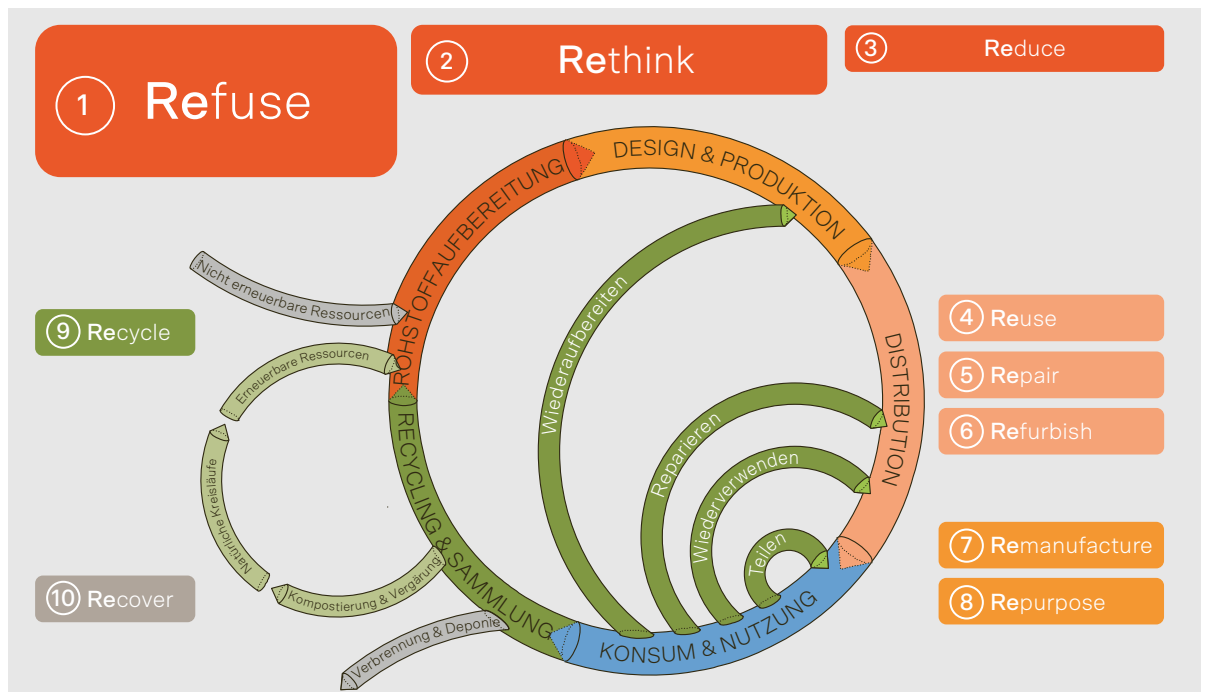
Im Gegenzug trägt Gebäudetechnik auch zur Energiegewinnung und zur Effizienz des Gebäudes bei. Beim gebäudetechnischen Konzept gilt es dementsprechend, das sinnvolle Gleichgewicht zu finden.

Bild 1.10: Prioritäten der «zehn R» in der Kreislaufwirtschaft.

Die Kreislaufwirtschaft basiert in abgeschwächter Form auf dem Prinzip von «Cradle to Cradle».

Zirkulär Bauen heisst, den Ressourceneinsatz sowie die Abfallproduktion zu minimieren. «Cradle to Cradle» geht noch einen Schritt weiter und will Abfälle komplett vermeiden. Es umschreibt somit eine perfekte Kreislaufwirtschaft.

(Quelle: M. King/Bafu)



1.3 Komfort und Behaglichkeit

Ein gutes Innenraumklima fängt bei der Architektur an. Gebäude müssen so geplant werden, dass sie mit möglichst wenig technischem Aufwand einen optimalen Komfort bieten. Die konkreten Anforderungen in dieser Hinsicht ergeben sich aus der Nutzung des Gebäudes. So ist es in einem Kunstmuseum beispielsweise zentral, dass die Raumluftfeuchte konstant auf einem vorgegebenen Wert gehalten wird. In einem Bürobau hingegen soll vor allem für eine thermische Behaglichkeit gesorgt werden, die die Arbeitsleistung der Mitarbeitenden fördert (Bild 1.11). Im Wohnungsbau wiederum muss individuellen Lebensgewohnheiten mehr Rechnung getragen werden als beispielsweise im Schulhausbau. All das können Architektinnen und Architekten nicht alleine leisten. Deshalb greifen sie bei der Planung unter anderem auf Fachleute der Bauphysik, der Raumakustik oder eben der Gebäudetechnik zurück. Wichtig ist dabei aber, dass die Gesamtverantwortung bei den Architekturfachleuten bleibt. Sind Gebäude hinsichtlich des Innenraumklimas optimiert, ändern sich auch die Anforderungen an die Heizungs- und Klimatechnik. Eine gute Wärmedämmung beispielsweise macht schnell reagierende und leistungsstarke Systeme unnötig. Hier verlagert sich der technische Aufwand vom Heizen und Kühlen hin zur Lüfterneuerung. Dieses Konzept nennt sich «Sanfte Klimatechnik».

Thermischer Komfort

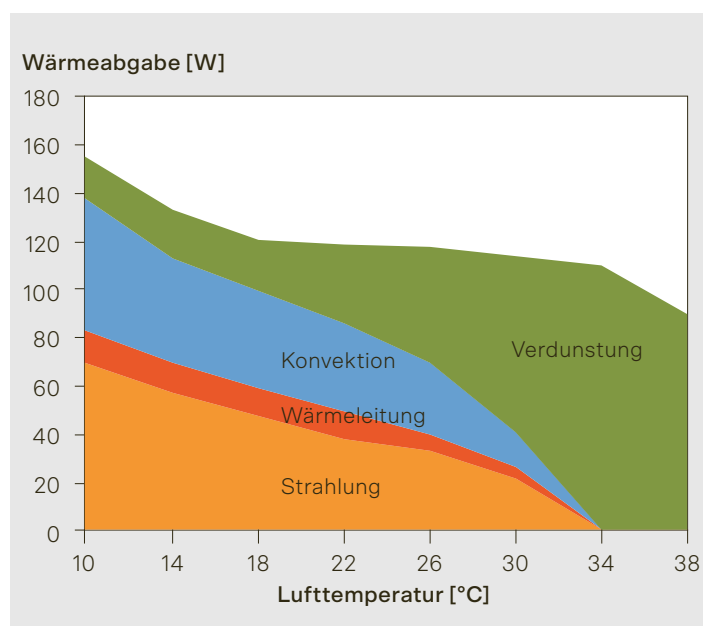
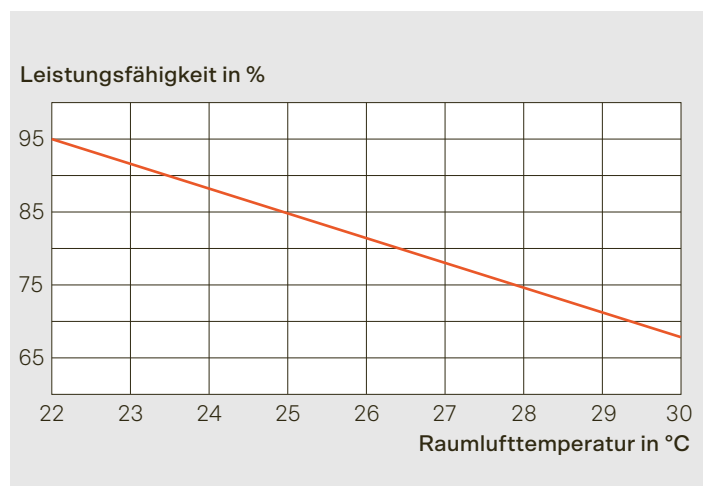
Menschen verfügen über ein sehr flexibles Wärmekontrollsystem. Es stabilisiert die Körpertemperatur in engen Grenzen, indem es die innere Wärmeerzeugung und die äussere Kühlung durch Abstrahlung an Umgebungsflächen sowie durch Konvektion an die Umgebungsluft ausbalanciert. Erst wenn der Körper seine Kerntemperatur nicht mehr durch Abstrahlung und Konvektion halten kann, erhöht er den Wassertransport an die Hautoberfläche. Diesen

Vorgang nennt man schwitzen und er kühlt den Körper durch Verdunstung (Bild 1.12).

Als wichtigster Behaglichkeitsparameter gilt die operative Raumtemperatur. Darunter versteht man den arithmetischen Mittelwert der mittleren Oberflächentemperaturen der Umgebungswände und der Raumlufttemperatur. Als Mass für den energetischen Grundumsatz eines Organismus und damit der Wärmeproduktion dient die Einheit «met» (engl. metabolism, Metabolismus). 1 met entspricht ungefähr 60 W/m^2 , das ist etwa die Wärmeleistung, die eine still sitzende Person, bezogen auf 1 m^2 Körperoberfläche an den Raum abgibt.

Bild 1.11: Geistige Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit der Raumlufttemperatur.

Bild 1.12: Wärmeabgabe des Menschen (sitzend, keine körperliche Tätigkeit, normale Bekleidung, ruhende Luft. (Quelle: Recknagel)



Besonders wohl fühlen sich Menschen, wenn sich ihre Wärmeabgabe durch Abstrahlung an die Umgebungsflächen und durch Konvektion (einschliesslich Atmung) an die Luft im Verhältnis 45 zu 50 aufteilt (Bild 1.14). Dies ist auch ein Grund dafür, dass die konventionelle Klimatechnik, bei der ausschliesslich die Lufttemperatur kontrolliert wird, nie voll befriedigen konnte.

Die optimale (operative) Raumtemperatur hängt aber vom Aktivitätsgrad und dem integralen Wärmedämmwert der Kleidung ab. Letzterer wird als Bekleidungsfaktor «clo» angegeben (aus dem Englischen «clothing», Kleidung). Für einen Mann mit mittelschwerem Anzug, Langarmhemd, Krawatte, kurzen Socken und leichten Strassenschuhen wird ein Bekleidungsfaktor von 1,1 angenommen. Für eine angenehme Sommerbekleidung mit Kurzarmhemd, leichter Baumwollhose und nackten Füessen in leichten Mokassins beträgt er nur 0,5.

Tabelle 1.5:
Biophysikalische
Daten des
Menschen.

Bild 1.13:
Wärmeproduktion
und «met»-Werte
in Abhängigkeit
der Tätigkeit
(Körperoberfläche
erwachsene
Person ca. 1,8 m²).

Masse	60 kg bis 90 kg
Körpervolumen	0,075 m ³
Puls	60/min bis 80/min
Atemzüge	16/min
Atemluftmenge	0,5 m ³ /h
CO ₂ -Ausatmung (ruhend)	18 l/h bis 20 l/h
Körpertemperatur	37 °C
Mittlere Hauttemperatur	32 °C bis 33 °C
Grundwärmeumsatz	70 W bis 80 W
Dauerleistung	85 W
Verdunstungsrate	40 g/h bis 50 g/h

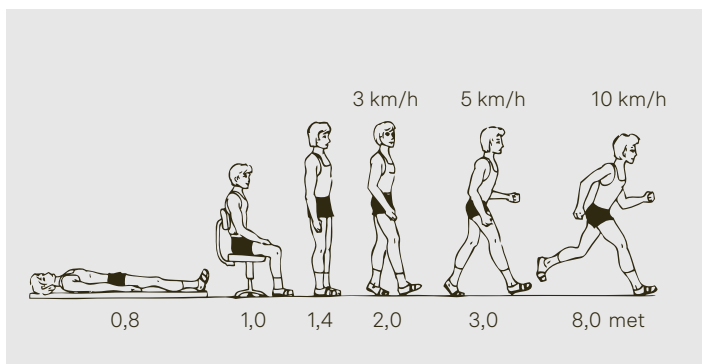


Bild 1.14: Wärmeabgabe des Menschen. (Quelle: Robert Meierhans)

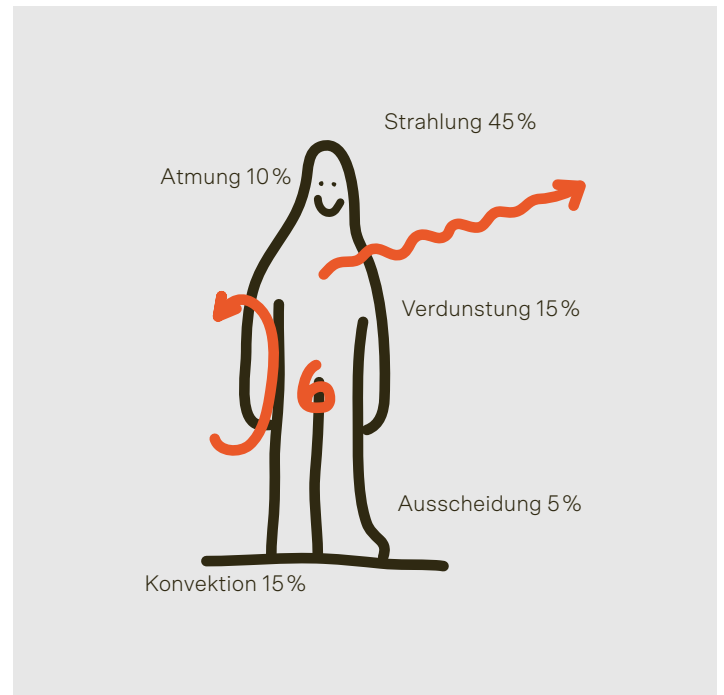
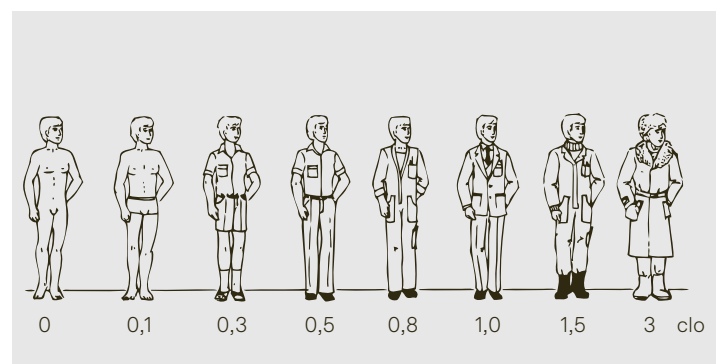


Tabelle 1.6: Die
Empfindsamkeit
des Körpers.

Bild 1.15:
Thermischer
Widerstand von
Bekleidung und
entsprechende
«clo»-Werte.

Parameter	Empfindlichkeitsschwelle	Beurteilung
Raumlufttemperatur	± 0,5 °C	sehr empfindlich
Unterschied zwischen Luft- und Oberflächen-temperatur	2 K	sehr empfindlich
Luftbewegung in Hautnähe	0,1 m/s	sehr empfindlich
Strahlungswärme	25 W/m ²	empfindlich
Relative Luftfeuchtigkeit	±15%	wenig empfindlich



Die zu erwartende Zufriedenheit der Nutzenden mit dem Komfort im Raum wird mit dem PPD-Index (Predicted percentage of dissatisfied) beschrieben (Bild 1.16). Er ist ein dem PMV-Index (Predicted mean vote, zu erwartende durchschnittliche Beurteilung) fest zu-

geordneter Prozentsatz. Der PPD stimmt innerhalb der statistischen Unsicherheit mit der Beurteilung einer grösseren Anzahl von Versuchspersonen überein. PMV- und PPD-Index beschreiben thermische Empfindungen von «zu heiss» bis «zu kalt» für den Körper als

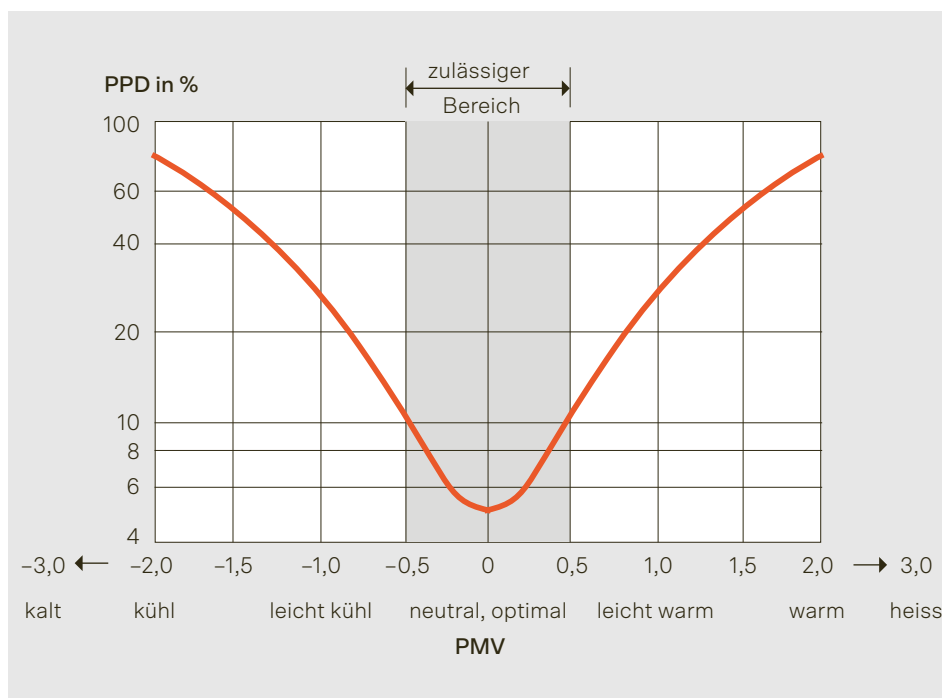


Bild 1.16: Zusammenhang zwischen dem erwarteten Anteil unzufriedener Personen und der durchschnittlichen Bewertung des thermischen Komforts. Abweichungen von der «neutralen» Temperatur in K (gemäss [SN EN ISO 7730]).

Bekleidungsart	clo	m ² K/W
Unbekleidet, nackt	0	0
Turnbekleidung, Tropenbekleidung: Unterwäsche, Shorts, Socken, Turnschuhe, Sandalen	0,3 bis 0,4	0,06
Leichte Sommerbekleidung: offenes, kurzes Hemd, lange, leichte Hosen, Socken, Schuhe	0,5	0,078
Feste Arbeitskleider, leichter Strassenanzug, Hausbekleidung im Winter: Hemd (langarm), Hose, leichte Jacke, Pullover	≈ 1,0	0,16

Tabelle 1.7: «clo»-Werte von Bekleidungsvarianten und deren thermischer Widerstand.

Kategorie (Anteil Unzufriedene)	Beschreibung
A: unter 6 %	Hohes Mass an Erwartungen an das Raumklima; empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten.
B: unter 10 %	Normales Mass an Erwartungen
C: unter 15 %	Annehmbares, moderates Mass an Erwartungen

Tabelle 1.8: Anforderungskategorien der thermischen Behaglichkeit (gemäss [SN EN ISO 7730]).

Kategorie	Raumtemperatur °C	Raumtemperatur °C
	Sommer, Sommerbekleidung: 0,5 clo/1,2 met, Toleranzbereich	Winter, Winterbekleidung: 1,0 clo/1,2 met, Toleranzbereich
A	24,0 °C – 26,0 °C	20,0 °C – 22,5 °C
B	23,5 °C – 26,5 °C	19,0 °C – 24,0 °C
C	23,0 °C – 27,0 °C	18,0 °C – 24,0 °C

Tabelle 1.9: Angemessene Temperaturbereiche für konditionierte Wohnungen und Büros.

Ganzes. Thermische Unbehaglichkeit kann aber auch bezüglich einzelner Kriterien empfunden werden. Zugserscheinungen zählen hierbei zu den häufigsten Ursachen.

Im Winter liegen die inneren Oberflächentemperaturen von Gebäuden mit guter Wärmedämmung deutlich höher als bei solchen mit schlechter. Damit steigt auch der Strahlungskomfort. Gut gedämmte Gebäude benötigen weniger Heizleistung und erlauben deshalb sanftere Massnahmen zur Kontrolle der Raumtemperatur. Sie schützen die Nutzenden vor Lufttrockenheit, Kaltluftabfall an Aussenwänden und Fenstern sowie vor unangenehmer Wärmeabstrahlung gegen kalte Oberflächen. Warme Oberflächentemperaturen schützen auch vor Pilzbefall. An schlecht gedämmten, kalten Aussenwänden steigt die relative Luftfeuchtigkeit, was rasch zu Schimmelbesatz mit all seinen Folgen führen kann.

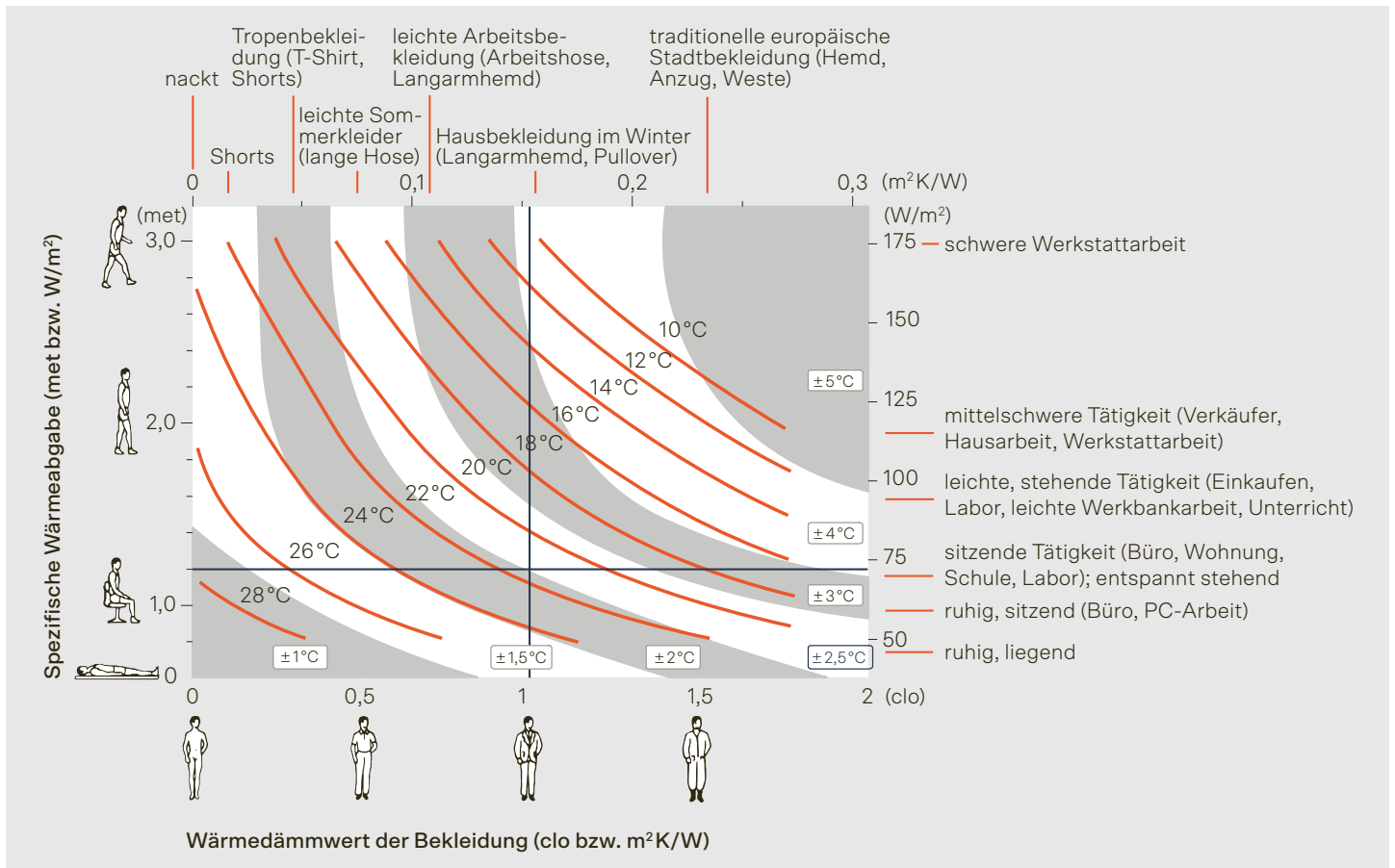
Im Sommer ist neben der Wärmedämmung ein guter baulicher sommerlicher Wärmeschutz für die thermische Behaglichkeit zentral. Er basiert auf zwei zentralen Voraussetzungen:

- Einem aussenliegenden beweglichen Sonnenschutz, der den Wärmeeintrag durch verglaste Gebäudeöffnungen tagsüber minimiert
- Einer ausreichend hohen thermisch aktiven Speichermasse, die den Wärmeanfall puffert

Die Wärmelast von Solarstrahlung und internen Quellen wird während des Tags in der thermisch wirksamen Speicherkapazität des Gebäudes eingelagert. Dieser Speicher kann durch intensives Lüften während der kühlen Nacht- und Morgenstunden wieder entladen werden.

Sofern die baulichen Anforderungen an Sonnenschutz und Speicherkapazität eingehalten sind, reicht die freie oder natürliche Kühlung für viele Nutzungen,

Bild 1.17: Spezifische Wärmeabgabe (met) des Menschen in Abhängigkeit des Wärmedämmwertes (clo) seiner Bekleidung. Rahmenbedingungen: 50 % relative Feuchte, 0,15 m/s Luftgeschwindigkeit und 10 % Unzufriedene. (Quelle: SN EN ISO 7730)



um eine gute thermische Behaglichkeit zu erreichen. Energieintensive Klimatisierungsmassnahmen mit den bekannten Begleiterscheinungen wie lästige Geräusche und Luftzug werden dadurch reduziert.

Komfortmängel können auch aufgrund einer **Temperaturasymmetrie** entstehen, beispielsweise wegen unterschiedlichen Temperaturen von Raumumschliessungsflächen (Bild 1.18). Der Mensch reagiert auf kalte Wände wesentlich intoleranter als auf warme. Bei den Decken sieht es umgekehrt aus: Während hier eine Untertemperatur von 10 K toleriert wird, sind es bei Übertemperatur nur 5 K. Das heisst: Deckenheizungen eignen sich nur für sehr kleine Leistungen mit entsprechend tiefen Deckentemperaturen.

Raumluftqualität

Belastung durch Personen: Durch den Stoffwechsel verbrauchen Menschen und Tiere Sauerstoff. Aber lange bevor in einem Raum der Sauerstoff ausgeht, wird der Geruch unerträglich. Räume werden also nicht in erster Linie gelüftet, um Sauerstoff zuzuführen, sondern um Belastungen abzuführen. Kohlenstoffdioxid (CO₂) ein guter Indikator für die Luftqualität – sofern die Ge-

ruchsbelastung hauptsächlich vom menschlichen Stoffwechsel stammt. Das CO₂ selbst ist geruchlos und in belüfteten Gebäuden erreicht es keine gesundheitlich kritischen Konzentrationen. Es korreliert aber gut mit der Konzentration an riechbaren Stoffwechselprodukten, die der Mensch an die Raumluft abgibt.

Der CO₂-Ausstoss von Menschen hängt von deren Aktivität und der Körpergrösse ab. Für Erwachsene in Wohnungen sind die folgenden CO₂-Emissionen typisch:

- Mittlere Tagesaktivität: pro Person 18–20 l/h
- Schlafen: pro Person 12–14 l/h

Empirische Untersuchungen haben gezeigt, dass Personen, die einen Raum betreten, die Raumluftqualität als gut beurteilen, wenn die CO₂-Konzentration 800 bis 1000 ppm nicht übersteigt (bei 400 ppm in der Aussenluft). Halten sich Menschen aber längere Zeit in einem Raum auf, gewöhnen sie sich an die – vorwiegend eigenen – Gerüche. Dann wird die Raumluftqualität als noch akzeptabel beurteilt, wenn die CO₂-Konzentration zwischen 1200 und 1400 ppm liegt. Damit ist dieser Wert also beispielsweise für Schlafzimmer angemessen. Er gilt auch für Räume, in

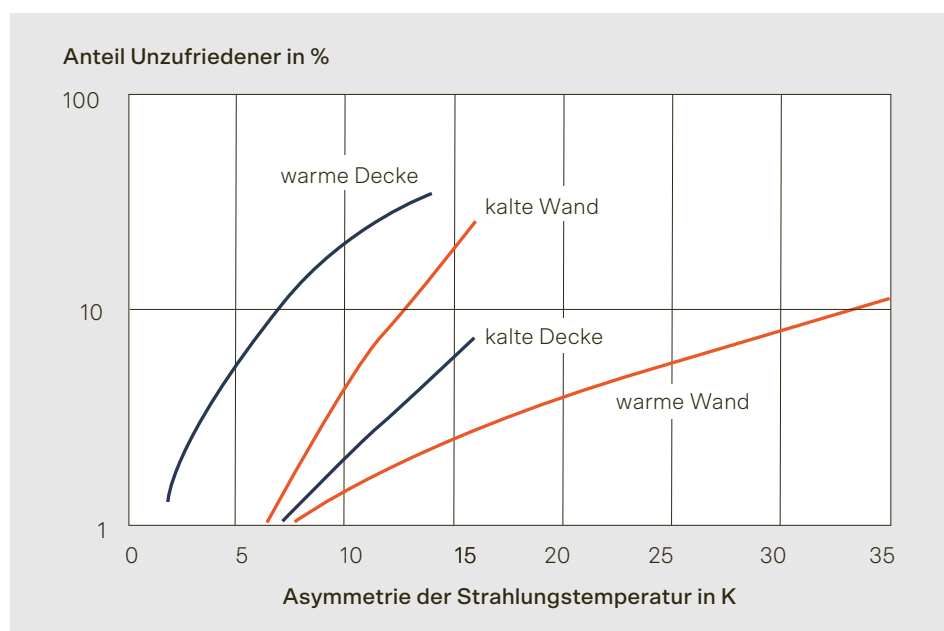


Bild 1.18: Zu erwartender Anteil Unzufriedener infolge Asymmetrie der Strahlungstemperatur. [SIA 180]

denen sich tags mehrere Personen während einiger Stunden gemeinsam aufhalten. [SIA 382/1] verwendet für die Luftqualität sogenannte RAL-Klassen, die in Tabelle 1.10 sinngemäss beschrieben sind. Bei der laufenden Revision der Norm werden die Klassen an neue europäische Normen angepasst.

Belastung durch die Nutzung: Fast alle Aktivitäten in einem Raum setzen mehr oder weniger belastende Stoffe frei. So entsteht beispielsweise ein grosser Teil der Feinstaubbelastung in der Raumluft durch die Nutzung. Kerzen, Räucherstäbchen, offene Feuer (z. B. Gaskochherd, Cheminée, Ethanolfeuer) emittieren erhebliche Feinstaubmengen und allenfalls weitere unerwünschte Stoffe. Selbst beim Kochen, etwa beim Anbraten oder Frittieren, entsteht Feinstaub. Rauchen verursacht massive Raumluftbelastungen, die es verunmöglichen, eine gute Raumqualität zu erreichen. Weiter können Möbel und andere Einrichtungsgegenstände unerwünschte Stoffe an die Raumluft abgeben. Informationen dazu liefert das Merkblatt [Feinstaub] des Bundesamts für Gesundheit.

Belastung durch Baustoffe: Auch eine gute Raumluftqualität fängt bei der Architektur an. Gemäss [SIA 180] gilt der Grundsatz, dass Baumaterialien gewählt werden sollen, die möglichst keine oder nur sehr geringe Schadstoffmengen an die Raumluft abgeben.

Radon: Als natürlich vorkommendes radioaktives Gas kann Radon aus dem Untergrund in Gebäude eindringen. Das Risiko hierfür hängt vom Standort des Gebäudes und von dessen Konstruktion ab. In der Schweiz gilt Radon als wichtigste natürliche Ursache für Lungenkrebs. Auf [radon.ch] sind umfangreiches Informationsmaterial sowie eine Karte mit den Risikogebieten zu finden. Verantwortlich für das Einhalten des Referenzwerts ist die Bauherrschaft respektive die Betreiberin.

Raumluftfeuchte

Die Raumluftfeuchte hängt ab von der Feuchteproduktion im Raum, von der Lüfterneuerung und vom Aussenklima.

Feuchteproduktion: Menschen und ihre Aktivitäten, aber auch Zimmerpflanzen und Tiere setzen Feuchte frei. Tabelle 1.11 zeigt die Feuchteproduktion in einem Mehrfamilienhaus (MFH) in Anlehnung an [SIA 2024] und [SIA 180]. Dabei liegen die Werte in der Tabelle für dauernd belegte Wohnungen eher auf der konservativen Seite. Die Feuchteproduktion von Personen ist zwar bei 21°C etwa 20% tiefer als bei 24°C. Dafür kann bei den «weiteren Feuchtequellen» je nach Kochgewohnheiten, Zimmerpflanzenbestand etc. ohne weiteres eine zwei- bis viermal höhere Feuchteproduktion angenommen werden. Insgesamt fallen in Wohnungen pro Person und Tag typischerweise 1 bis 1,5 kg Wasserdampf an.

Kategorie	Beispielnutzungen	CO ₂ -Konzentration
RAL 1	Spezielle Räume wie Labor und Reinräume	nicht definiert
RAL 2	Räume mit erhöhten Ansprüchen an die Raumluftqualität, z. B. solche, in die häufig Personen neu eintreten	< 1000 ppm
RAL 3	Räume mit durchschnittlichen Ansprüchen an die Raumluftqualität, typische Wohn- und Büroräume	1000 bis 1400 ppm
RAL 4	Räume, in denen sich nur selten oder gar nie Personen aufhalten, z. B. untergeordnete Räume und Nebenräume	> 1400 ppm

Tabelle 1.10:
 Klassierung der
 Raumluft gemäss
 [SIA 382/1], mit Bei-
 spielnutzungen.

Minimale Feuchte: Gemäss [SIA 180] und [SIA 382/1] beträgt die minimal zulässige relative Raumluftfeuchte (r. F.) 30%. Diese Anforderung ist vor allem während der kalten Jahreszeit relevant. Sie ist mit den folgenden Bedingungen verknüpft:

- Die minimal zulässige Raumluftfeuchte darf während 10% der Nutzungszeit unterschritten werden.
- Die relative Raumluftfeuchte bezieht sich auf die für eine Nutzung typische Raumlufttemperatur. Bei normaler Wohnnutzung beispielsweise sind das 21°C.
- Bei Lagen über 800 m ü. M. reduziert sich die zulässige Feuchtegrenze um 1% r. F. pro 100 m.

Für gesunde Personen ist es kein Problem, wenn die Raumluftfeuchte an einigen Tagen im Jahr unter 30% sinkt. Menschen mit speziellen gesundheitlichen Anforderungen (Haut, Atemwege) können aber negativ auf tiefe relative Luftfeuchten reagieren. Falls aus gesundheitlichen Gründen aktiv befeuchtet werden muss, sollen lokale Raumluftbefeuchter verwendet werden. Wegen ihres Energiebedarfs sollen solche Geräte aber zurückhaltend und nur temporär eingesetzt werden. Aus hygienischen Gründen ist regelmässiges Reinigen der Raumluftbefeuchter erforderlich.

Hohe Feuchten: Aus hygienischer Sicht sind hohe Raumluftfeuchten bedeutend kritischer als tiefe. Vorwiegend während

des Sommerhalbjahres besteht insbesondere in Wohnungen ein Feuchteüberschuss, der zwingend abgeführt werden muss. Bei Raumluftfeuchten über 70% nimmt das Risiko von Schimmelpilzwachstum deutlich zu. Sehr feuchte Raumluft wird zudem nicht als frisch empfunden und durch Wachstum von Mikroorganismen entstehen Gerüche.

Für Hausstaubmilbenallergiker sollten mindestens im Winterhalbjahr Bedingungen geschaffen werden, die das Milbenwachstum hemmen. Gemäss dem Allergiezentrum Schweiz ist dies der Fall, wenn die Raumluftfeuchte unter 50% liegt – bei 19 bis 21°C im Wohnzimmer und maximal 19°C im Schlafzimmer.

Weitere Faktoren

Zu einem guten Komfort in Gebäuden gehören auch ein gutes Tageslicht- und Farbdesign sowie ein guter Schallschutz und eine gute Raumakustik. Richtig organisiert kann die Tageslichtnutzung auch den Energieaufwand für die Kühlung reduzieren, weil sie die Lasten aus der künstlichen Beleuchtung reduziert.

Beschreibung	Einheit	Aktivität		ganzer Tag
		wach	schlafen	
Dauer der Aktivität (Anwesenheit gem. SIA 2024:2015)	h	6	8	14
Feuchteproduktion pro Person und Stunde (gem. [SIA 180], bei 24 °C)	g/h	70	45	–
Aufsummierte Feuchteproduktion pro Person über die Dauer der Aktivität	g/d	420	360	780
Weitere Feuchtequellen (in Anlehnung an SIA 2024]: pro Person 15 g/h bei Anwesenheit)	g/d	–	–	220
Feuchteproduktion pro Person und Tag	g/d	–	–	1000

Tabelle 1.11: Feuchteproduktion pro Person und Tag in einem MFH.

1.4 Gebäudetechnik und Energie

Sanfte Klimatechnik

Das Grundprinzip der sanften Klimatechnik ist denkbar einfach: Je weniger Wärme ein Gebäude bei kaltem Wetter verliert und je weniger Sonnenhitze und Feuchtigkeit im Sommer von aussen eindringt, desto kleiner ist der technische Aufwand, um ein annehmbares Innenraumklima sicherzustellen. Zur sanften Klimatechnik gehört auch, dass bei der Kühlung anstelle von Kältemaschinen möglichst erneuerbare Wärmesenken wie Grundwasser oder Erdwärme genutzt werden. Wird Kälte motorisch erzeugt, soll die Abwärme genutzt werden, beispielsweise für die Vorwärmung des Warmwassers.

Nachtkühlung: Wenn die Nachtluft kühl genug ist, kann die Gebäudemasse durch natürliches Auskühlen auf den nächsten warmen Tag «vorbereitet» werden. Bei wärmeren Klimaverhältnissen kann dieser Vorkühlung mit einer Kältemaschine nachgeholfen werden. Mit dieser Strategie kann die Spitzenkühlleistung gekappt und ein Teil der Kühlenergie in die Nachtstunden ver-

schoben werden. Oft genügt die freie Nachtkühlung alleine, um einen angemessenen Komfort zu erreichen.

Wärmeabgabe: Der Wärmetransfer zwischen einem Gebäude und seiner Umgebung ist proportional zur exponierten Oberfläche, zum Wärmedämmvermögen und zur Temperaturdifferenz zwischen aussen und innen. Der Heizeffekt einer Wärmequelle wiederum richtet sich nach ihrer Oberfläche (Grösse und Beschaffenheit), ihrer Form und ihrer mittleren Oberflächentemperatur. Deshalb benötigen Fussbodenheizungen tiefere Vorlauftemperaturen als solche mit Heizkörpern. Im Idealfall liegen diese bei der niedrigsten Aussentemperatur nur 2 K über der gewünschten minimalen Raumlufttemperatur. Voraussetzung dafür ist eine Gebäudehülle, die so stark gedämmt ist, dass der Raum mit 22°C Oberflächentemperatur der Fussbodenheizung auf 20°C geheizt werden kann. Oder anders herum gesagt: Die maximale Oberflächentemperatur der Wärmeabgabe ergibt sich aus der Wärmedämmung der Gebäudehülle. Grossflächige Heizelemente, gepaart mit guter Wärmedämmung sind aus folgenden Gründen günstig:

Bild 1.19: Wärmefluss in Gebäuden beim Heizen/Kühlen. (Quelle: Robert Meierhans)

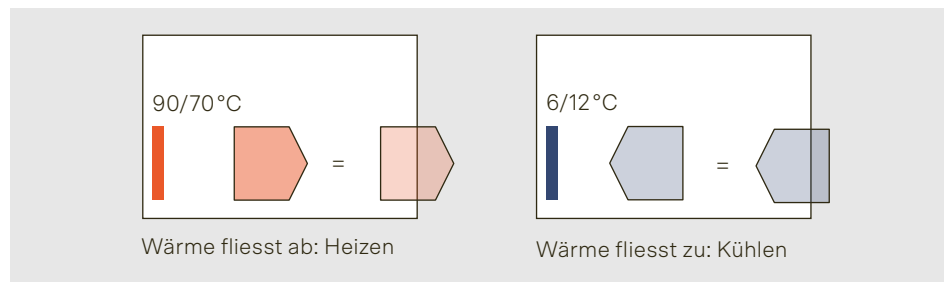
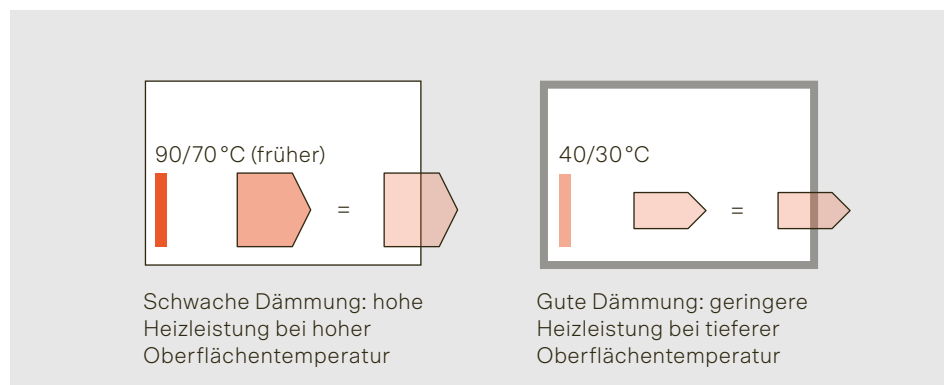


Bild 1.20: Schwache Dämmung erzwingt eine hohe Heizleistung bei hoher Heizflächentemperatur (links). Gute Dämmung ermöglicht geringere Heizleistung bei tieferer Heizflächentemperatur (rechts). (Quelle: Robert Meierhans)



- Die Heizung wird selbstregulierend. Das heisst, sie gibt keine Wärme mehr an den Raum ab, wenn dessen Temperatur beispielsweise infolge von Sonneneinstrahlung über die Heizwassertemperatur steigt.
- Die Heizelemente können im Sommer auch zum Kühlen genutzt werden (Bild 1.22). Dies gilt insbesondere bei mehrgeschossigen Bauten, in denen sich die Heiz- und Kühlleistung auf Fussböden und Decken verteilt. Mit Heizkörpern hingegen kann normalerweise nicht gekühlt werden, weil die Temperaturdifferenz zwischen deren Oberfläche und der Raumluft so gross sein muss, dass daran Luftfeuchte kondensiert.

Pro Kelvin (Grad Celsius) Temperaturdifferenz zwischen Raumluft- und Deckenoberfläche können im Heizfall rund 7 W/m^2 und im Kühlfall 11 W/m^2 ausgetauscht werden. Zwischen Raumluft- und Fussbodenoberfläche beträgt der entsprechende Wert im Heizfall 11 W/m^2 und im Kühlfall 7 W/m^2 . Im Fall von Bild 1.22 wird also mit 2-mal $18 \text{ W/m}^2 = 36 \text{ W/m}^2$ geheizt und mit 4-mal $18 \text{ W/m}^2 = 72 \text{ W/m}^2$ gekühlt.

Zum Vergleich: Bei einer Klimaanlage, die die Raumluft 3- bis 6-mal pro Stunde umwälzt, müsste die Luft mit 26 res-

pektive $14 \text{ }^\circ\text{C}$ eingeführt werden, um die gleichen Leistungen zu erreichen. Dies führt tendenziell dazu, dass im Winter die warme Luft an der Decke hängen bleibt und dass die Kühlluft im Sommer zu Zuglufterscheinungen führt.

Wenn wir die Grundsätze der sanften Klimatechnik beachten, werden Bauten fehlertolerant und damit flexibler für Nutzungen verschiedenster Art bei unveränderter Gebäudetechnik.

Rahmenbedingungen für eine sanfte Klimatechnik sind:

- Gebäude mit kompakten Formen und sorgfältig bemessenem Glasanteil
- Abstimmung von Gebäudespeichermassen und Raumboflächen zur Speicherung von solaren Wärmeeinträgen
- Sommerlicher und winterlicher Wärmeschutz

Wichtige Begriffe zur Energie

Definitionen und Begriffe zur Energie in der Gebäudetechnik liefert insbesondere die Norm [SIA 411]. Im Folgenden sind einige oft verwendete Begriffe aufgeführt, die Definitionen wurden sinngemäss aus den Normen übernommen:

Abwärme: Die in einem Prozess nicht nutzbare Wärme. Die Abwärme wird

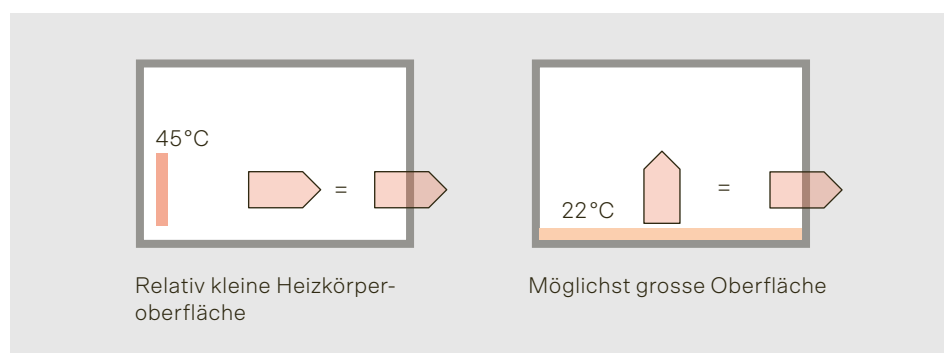


Bild 1.21: Kleine Heizflächen benötigen höhere Temperaturen (links), grosse Heizflächen tiefere (rechts). (Quelle: Robert Meierhans)

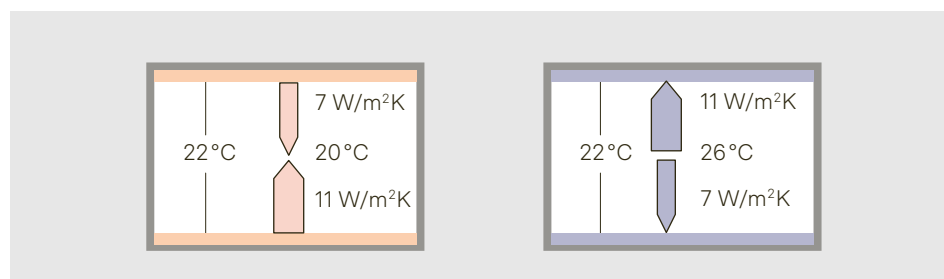


Bild 1.22: Heizen und kühlen mit gewärmten und gekühlten Oberflächen. (Quelle: Robert Meierhans)

entweder an die Umgebung oder über Wärmerückgewinnungsanlagen einem anderen System zugeführt. Abwärmeträger sind beispielsweise Raumabluft, Kühlwasser, Abdämpfe, Abgase aus Öfen und Verbrennungsmotoren. Je nach Abwärmeträger und Temperaturniveau ergeben sich unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten.

Bilanzperimeter: Perimeter, der das Gebäude (oder die Gebäudeteile, für welche die Berechnung der Energiebilanz durchgeführt werden soll) inklusive der dazugehörigen Aussenanlagen vollständig umschliesst. Er definiert insbesondere die Abgrenzung gegen benachbarte Gebäude oder gegen Gebäudeteile, die nicht in die Berechnung einbezogen werden sollen.

Brennwert (oberer Heizwert): Wärmemenge, die bei vollständiger Verbrennung eines Brennstoffes frei wird, wenn der entstandene Wasserdampf kondensiert.

Eigenerzeugte Energie: Durch Eigenerzeugungsanlagen innerhalb des Bilanzperimeters erzeugte Energie, die mindestens zum Teil innerhalb des Bilanzperimeters genutzt wird. Die passive Nutzung von Sonnenenergie und die Nutzung der Umweltwärme gilt nicht als Eigenenergieerzeugung.

Eigenproduktion erneuerbare Energien: Eigenenergieproduktion aus erneuerbaren Energien (mit Sonnenkollektoren, Solarzellen usw.). Die passive Nutzung von Sonnenenergie gilt nicht als Eigenenergieproduktion.

Einsatzenergie: Die beim Verbraucher unmittelbar vor der letzten Umwandlungsstufe (der Umwandlung zu Nutzenergie) bereitgestellte Energie. Einsatzenergie ist also beispielsweise Strom, welcher der Klemme des Elektromotors oder einer Lampe zugeführt wird. Auch Heizwasser, das in den Heizkörper strömt, zählt dazu.

Endenergie: Energie, die vom Endverbraucher, etwa einem Industriebetrieb, einem Gebäude, einem Haushalt, zum Zweck der weiteren Umwandlung und Nutzung bezogen oder eingekauft wird. Beispiele: Heizöl, Erdgas, Fernwärme als Heisswasser oder Prozessdampf, aus dem Netz bezogene Elektrizität, von einem Betrieb energetisch genutzte Industrieabfälle.

Energiegewichtungsfaktor: Von der Politik festgesetzter Bewertungsfaktor für verschiedene Energiearten. Die Energiegewichtungsfaktoren werden auf der Website der Energiedirektorenkonferenz (www.endk.ch) publiziert.

Energiequelle: In der Gebäudetechnik ist dies das Element, das die Energie in einem abgeschlossenen System meist durch Umwandlung aus einer anderen Energieform zur Verfügung stellt.

Energiequellen erneuerbar: Dazu gehören Biomasse, Geothermie, Solarenergie, Wasserkraft, Windenergie.

Energiequellen nicht erneuerbar: Dazu gehören Kohle (Steinkohle, Braunkohle), Torf, Erdöl, Ölsande und Ölschiefer, Erdgas, Gashydrat, Uran, Plutonium.

Energieträger: Die mengenmässig bilanzierbare Einheit, die Energie enthält oder überträgt.

Energieträger, fossile: Dazu zählen Kohle, Erdgas, Erdöl und Methanhydrat. Allen fossilen Energieträgern ist gemein, dass sie nur in begrenztem Mass vorhanden sind und ihre Verwendung mit mehr oder weniger hohen CO₂-Emissionen verbunden ist.

Gelieferte Energie: Gesamte Endenergie, die während der Berechnungsperiode über den Bilanzperimeter geliefert wird. Die gelieferte Energie wird pro Energieträger separat ausgewiesen (SIA 380).

Graue Energie: Gesamte Menge nicht erneuerbarer Primärenergie, die für alle vorgelagerten Prozesse, vom Rohstoffabbau über Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse und für die Entsorgung, inklusive der dazu notwendigen Transporte und Hilfsmittel, erforderlich ist. Sie wird auch als kumulierter, nicht erneuerbarer Energieaufwand bezeichnet. Siehe auch [SIA 2032].

Heizwert (unterer Heizwert): Wärmemenge, die bei vollständiger Verbren-

nung eines Brennstoffes frei wird, wenn der bei der Verbrennung entstehende Wasserdampf nicht kondensiert.

Hilfsenergie: Energie (meist elektrische Energie), die nicht zur unmittelbaren Deckung des Energiebedarfs eines Gebäudes eingesetzt wird. Sie wird etwa für den Betrieb von Systemkomponenten wie Motoren, Steuerung und Regelung, aber auch für die Begleitheizung der Warmwasserversorgung benötigt.

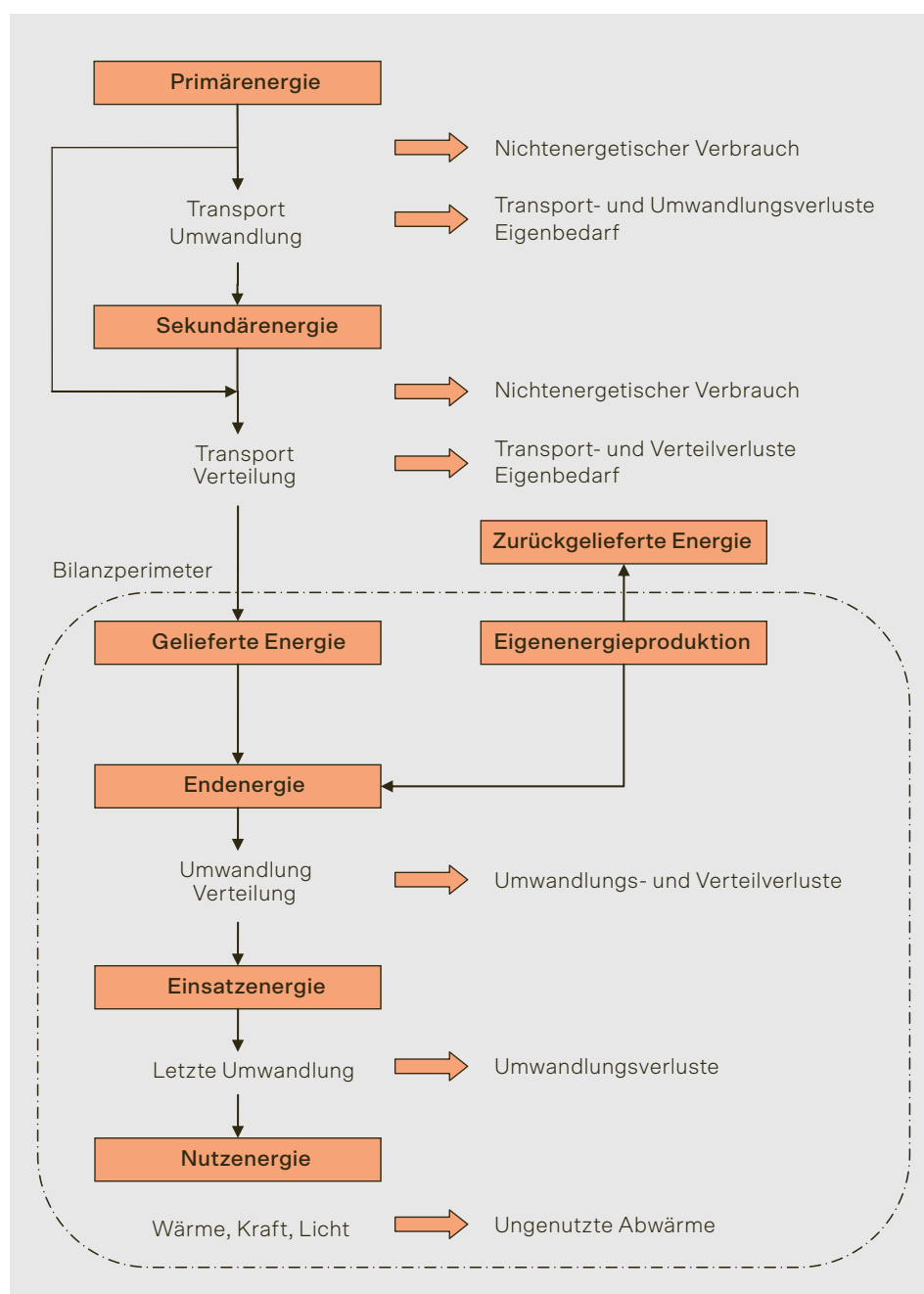


Bild 1.23: Stufen der Energieumwandlung von der Primärenergie bis zur Nutzenergie. (Quelle: Norm [SIA 411])

Nutzenergie: Energie, die dem Energieanwender nach der letzten Umwandlung am Ausgang der energieverbrauchenden Geräte in der für den jeweiligen Zweck benötigten technischen Form zur Verfügung steht. Beispiele: an der Antriebswelle des Motors, am Heizkörper im Zimmer

Primärenergie (Rohenergie): Energieträger, die man in der Natur vorfindet und die noch keiner Umwandlung oder Umformung unterworfen wurden. Dies gilt unabhängig davon, ob sie in dieser Rohform direkt verwendbar sind oder nicht. Primärenergie ist also Energie in jenem Ausgangszustand, wie er für die wirtschaftliche Nutzung zur Verfügung steht. Dazu gehören etwa Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Uran, Laufwasser, Brennholz und andere Biomasse, Sonnenein-

strahlung, Wind, Umgebungswärme (Umweltenergie), Erdwärme. Die Primärenergie wird gewöhnlich unterteilt in die nicht erneuerbaren und die erneuerbaren (regenerativen) Energieträger.

Primärenergie erneuerbar: Energie, die aus einer Quelle gewonnen wird, die sich durch Nutzung nicht erschöpft. Dazu gehören unter anderem: Sonnenenergie, Windenergie, Umgebungswärme, hydraulische Energie und Biomasse aus nachhaltiger Land- und Forstwirtschaft.

Sekundärenergie: Energie, die durch Umwandlung aus Primärenergie oder einer anderen Sekundärenergie (unter Umwandlungsverlusten) gewonnen wurde und für die weitere Umsetzung oder Nutzung zur Verfügung steht. Beispiele:

	Verwendungszweck	Raumwärme	Wassererwärmung	Raumkühlung/ Entfeuchtung
Nutzenergie	Energiedienstleistung	Thermischer Komfort	Warmwasser	Thermischer Komfort
	Thermische Nutzenergie	Heizwärmebedarf Heizwärmeleistung	Wärmebedarf für WW Wärmeleistung für WW	Klimakältebedarf Klimakälteleistung
↓				
Gebäudetechnik	Gebäudetechnische Anlage	Heizungsanlage	Wassererwärmung	Klimakälte
	Gebäudetechnische Teilanlagen	Heizwärmeerzeuger Heizwärmespeicher Heizwärmeverteilung	Wärmeerzeuger für WW WW-Speicher WW-Verteilung	Klimakälteerzeuger Klimakältespeicher Klimakälteverteilung
	Wärmeverlust	... der Heizungsanlage inkl. -verteilung	... der Warmwasserversorgung	... der Klimaanlage inkl. -verteilung
	Hilfsenergie	... der Heizungsanlage inkl. -verteilung	... der Warmwasserversorgung	... der Klimaanlage
↓				
Endenergie	Netto gelieferte Energie	Heizenergie Heizleistung	Energie für WW Leistung für WW	Klimakälteenergie Klimakälteleistung
↓				
Gewichtete Energie		Gewichtungsfaktoren	Gewichtungsfaktoren	Gewichtungsfaktoren
	Netto gelieferte gewichtete Energie	Teilenergiekennzahl Heizung	Teilenergiekennzahl Warmwasser	Teilenergiekennzahl Raumkühlung/Entfeuchtung

Tabelle 1.12: Stufen der Energie in der Gebäudetechnik. Die Pfeile zeigen die Richtung der Berechnungsschritte. Fortsetzung nächste Seite. (Quelle: Merkblatt SIA 2025)

Erdölprodukte wie Heizöl, Benzin, Dieselöl, Flüssiggas, Koks, Biogas, Elektrizität, Fernwärme, Abwärme.

Raumgruppe, Zone: Gruppe von Räumen, die bezüglich Betriebseinrichtungen, Beleuchtung oder Lüftung und Klimatisierung gleichartige Voraussetzungen haben, also gleiche Grenz- und Zielwerte. Die Gruppierung der Räume kann sich je nach Verwendungszweck unterscheiden.

Raumnutzung: Die Räume werden aufgrund ihrer vorherrschenden Nutzung einer von rund 40 Nutzungen gemäss Merkblatt [SIA 2024] zugeteilt.

Standardnutzung: Nutzungsbedingungen, die bei der Berechnung des Projektwertes eingesetzt werden müssen,

wenn dieser mit den Grenz- und Zielwerten verglichen werden soll. Die Standardnutzungswerte der Raumnutzungen stammen aus [SIA 2024].

Wärmerückgewinnung: Bei der Wärmerückgewinnung wird die bei einem Prozess oder in einer Anlage anfallende nutzbare Abwärme demselben System ohne Zeitverschiebung als Nutzwärme (Rückwärme) wieder zugeführt. Der Gesamtnutzungsgrad des Systems lässt sich damit erheblich erhöhen. Beispiele:

- Wärmerückgewinnung aus der Fortluft einer mechanischen Lüftungs- oder Klimaanlage
- Rückführung von Prozessabwärme in einem Waschprozess, etwa in einem Geschirrwäscher
- Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser in einem Schwimmbad

Fortsetzung Tabelle 1.12.

Lüftung	Befeuchtung	Beleuchtung	Diverse Gebäudetechnik	Betriebseinrichtungen	Elektrizitätsproduktion	Total
Luftaustausch	Befeuchtung	Beleuchtung	Gebäudemanagement, Transport etc.	Kochen, Rechenleistung etc.		
Energie auf Nutzebene nicht definiert						
Lüftung	Befeuchtung	Beleuchtung	Div. Anlagen	Div. Geräte	Photovoltaik, WKK	
Energie für Lüftung	Energie für Befeuchtung	Energie für Beleuchtung	Energie für diverse Gebäudetechnik	Energie für Betriebseinrichtungen	Elektrizität aus erneuerbaren Energien	Gesamtenergie
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Gewichtungsfaktoren	Gewichtungsfaktoren	Gewichtungsfaktoren	Gewichtungsfaktoren	Gewichtungsfaktoren	Gewichtungsfaktoren	Gewichtungsfaktoren
Teilenergiekennzahl Lüftung	Teilenergiekennzahl Befeuchtung	Teilenergiekennzahl Beleuchtung	Teilenergiekennzahl diverse Gebäudetechnik	Teilenergiekennzahl Betriebseinrichtung	Teilenergiekennzahl Elektrizität aus erneuerbaren Energien	Energiekennzahl

Kennwerte von Energieträgern					
Endenergieträger	Energie- gewichtungs- faktor	Primär- energie- faktor	Anteil erneu- erbarer Primärenergie	Treibhausgasemissionen spezifisch	
Referenz	[EnDK]	[SIA 2031]	[SIA 2031]	[SIA 2031]	
				g/MJ	g/kWh
Feste Brennstoffe					
Stückholz	0,7	1,06	95,2%	3	11
Holzschnitzel	0,7	1,14	94,6%	3	11
Pellets	0,7	1,22	83,0%	10	36
Flüssige Brennstoffe					
Heizöl	1,0	1,24	0,7%	82	295
Propan	1,0	1,15	0,5%	67	241
Butan	1,0	1,15	0,5%	67	241
Gasförmige Brennstoffe					
Erdgas	1,0	1,15	0,5%	67	241
Propan	1,0	1,15	0,5%	67	241
Butan	1,0	1,15	0,5%	67	241
Biogas (mit 40 % bis 75 % Methan)	0,7	0,48	8,2%	38	137
Elektrizität					
Produktion Inland (Strom aus . . .)					
Verbrauchermix Schweiz	2,0	2,97	15%	43	155
Wasserkraft (ohne Pumpspeicher)	2,0	1,22	97%	3	11
Wasserkraft (Pump- speicherung)	2,0	4,25	15%	55	198
Photovoltaik	2,0	1,66	76%	25	90
Windenergie	2,0	1,33	92%	8	29
Biomasse (Holz)	2,0	3,80	96%	32	115
Biogas	2,0	0,20	20%	52	187
Kernenergie	2,0	4,08	0,1%	5	18
Erdöl	2,0	3,36	2%	277	997
Erdgas	2,0	3,30	1%	205	738
Kehricht	2,0	0,02	0%	2	7
Produktion Ausland (Strom aus . . .)					
Wasserkraft (ohne Pumpspeicher)	2,0	1,23	97%	3	11
Photovoltaik	2,0	1,74	74%	25	90
Kernenergie	2,0	4,25	0%	5	18
Erdöl	2,0	3,85	0%	277	997
Erdgas	2,0	3,22	0%	180	648
Kohle	2,0	3,92	2%	344	1238
Nicht überprüfbare Quelle (UCTE*-Strom- mix)	2,0	3,53	6%	165	594

Tabelle 1.13:
Kennwerte von
Energieträgern.

* UCTE: Union for the Coordination of Transmission of Electricity (Union für die Koordinierung des Transports von Elektrizität)

1.5 Quellen

- [Bafu 2019] Bundesamt für Umwelt. Broschüre «Anpassung an den Klimawandel, Pilotprogramm, Phase II». Bern, 2019.
- [Bafu 2020] Bundesamt für Umwelt. Kenngrößen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz 1990–2018. Bern, 2020.
- [Bafu 2021] Bundesamt für Umwelt. Thema Abfall: Das Wichtigste in Kürze. Zugriff 24. Online-Dokument. April 2022.
- [Bafu 2022] Bundesamt für Umwelt. Thema Wirtschaft und Konsum: Fachinformationen Kreislaufwirtschaft. Online-Dokument. Zugriff 24. April 2022.
- [Bionova 2018] Bionova Ltd, One Click LCA. Studie «The embodied Carbon Review». Helsinki, 2018.
- [EnDK] Konferenz kantonaler Energiedirektoren. www.endk.ch. Abgerufen Mai 2022.
- [Feinstaub] Bundesamt für Gesundheit. Merkblatt «Feinstaub in der Innenraumluft», Bern, 2008.
- [Gugerli 2015] Gugerli, Heinrich et al., EnergieSchweiz. Gesund und ökologisch bauen mit Minergie-Eco, Faktor Verlag. Zürich, 2015.
- [KBOB 2022] Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB). Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1. Bern, 2022.
- [Klimastrategie] Schweizer Bundesrat. Langfristige Klimastrategie der Schweiz. Bern, 2021.
- [Klingler 2011] Klingler, Matthias et al., Bundesamt für Energie. Graue Energie von Sanitär- und Elektroanlagen, Sach- und Ökobilanzen von 12 Gebäuden (Wohnen und Büro). Bern, 2011.
- [Klingler 2014] Klingler, Matthias et al., Bundesamt für Energie. Ökobilanzdaten für Lüftungs- und Wärmeanlagen, Sach- und Ökobilanzen von 16 Gebäuden. Bern, 2014.
- [radon.ch] Bundesamt für Gesundheit. Radon-Informationsplattform www.ch-radon.ch. Abgerufen Mai 2022.
- [SIA 180] Norm SIA 180. Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2014.
- [SIA 2020] Positionspapier «Klimaschutz, Klimaanpassung und Energie». Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2020.
- [SIA 2024] Merkblatt SIA 2024. Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2021.
- [SIA 2025] Merkblatt SIA 2025. Begriffe in Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2012.
- [SIA 2031] Merkblatt SIA 2031. Energieausweis für Gebäude. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2016.
- [SIA 2032] Merkblatt SIA 2032. Graue Energie – Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2020.

- [SIA 2040] Merkblatt SIA 2040 – SIA-Effizienzpfad Energie, mit Korrigenda C1. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2017
- [SIA 382/1] Norm SIA 382/1. Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2014.
- [SIA 382/5] Norm SIA 382/5. Mechanische Lüftung in Wohngebäuden. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2021.
- [SIA 411] Norm SIA 411. Modulare Darstellung der Gebäudetechnik. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2016.
- [SN EN 15804] Schweizer Norm SN EN 15804. Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Schweizerische Normen-Vereinigung. Winterthur, 2013.
- [SN EN ISO 14044] Schweizer Norm SN EN ISO 14044. Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Schweizerische Normen-Vereinigung. Winterthur, 2006.
- [SN EN ISO 7730] Schweizer Norm SN EN ISO 7730. Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005). Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV). Winterthur, 2006.
- [WBCSD 2021] World Business Council for Sustainable Development. Studie «Net-zero Building: Where do we stand?». Genf, 2021.

Heizungsanlagen

2.1 Komponenten einer Heizungsanlage

Reto von Euw

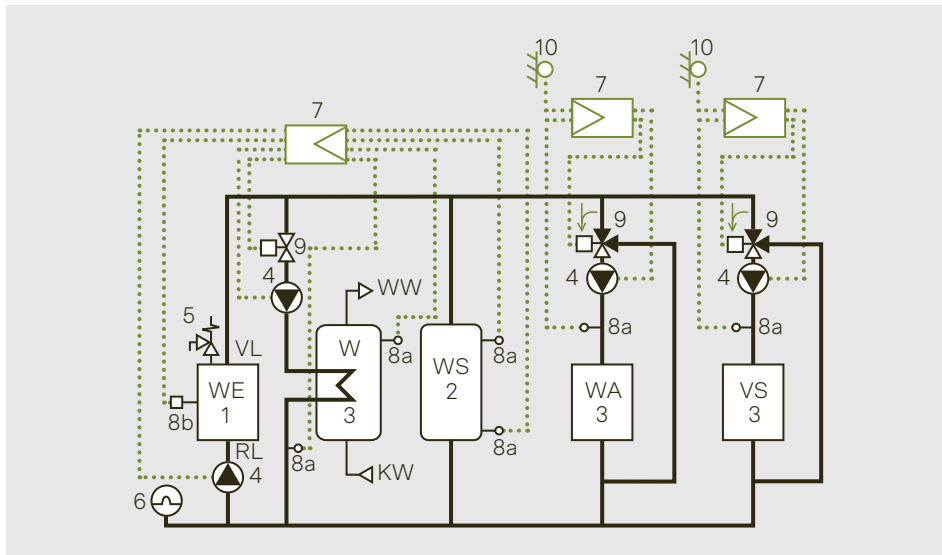


Bild 2.1: Wesentliche Komponenten einer Heizungsanlage.
 VL: Vorlauf
 RL: Rücklauf
 KW: Kaltwasser
 WW: Warmwasser

1 Wärmeerzeuger (WE)

Ein Wärmeerzeuger formt Endenergie und allenfalls weitere zugeführte Energien in direkt nutzbare Wärme um. Er überträgt die Wärme an ein Heizmedium [SIA 384/1].

Grundsätzlich lassen sich Wärmeerzeuger anhand der Energieträger unterscheiden, mit denen sie betrieben werden. Wärmeerzeuger mit fossilen Brennstoffen (Gas- und Ölheizungen) werden in diesem Buch nicht detailliert behandelt. Auf Wärmeerzeuger mit erneuerbaren Energieträgern wird in folgenden Abschnitten eingegangen:

- 2.3 Wärmepumpen, 2.4 Praxisbeispiele zu Wärmepumpen
- 2.5 Holzheizungen, 2.6 Praxisbeispiele zu Holzheizungen
- 2.7 Thermische Netze, 2.8 Praxisbeispiel zu thermischen Netzen
- 2.9 Wärmekraftkopplung, 2.10 Praxisbeispiele zu Wärmekraftkopplung
- 2.11 Thermische Solaranlagen, 2.12 Praxisbeispiele zu thermischen Solaranlagen

2 Wärmespeicher (WS)

Speicher für thermische Energie. Die Speicherung basiert gemäss [SIA 411] auf folgenden physikalischen Prinzipien:

- Speicherung fühlbarer oder sensibler Wärme infolge einer Temperaturveränderung
- Speicherung latenter Wärme durch Änderung des Aggregatzustandes (ohne Änderung der Temperatur)
- Speicherung chemischer Wärme als Bindungsenergie bei Stoffreaktionen

Ein Speicher sorgt mit seiner Speicherkapazität für den zeitlichen Ausgleich zwischen Wärmeangebot und Wärmebedarf beim Nutzer. Grundsätzlich unterscheidet man die Wärmespeicher nach deren Funktionen:

- Pufferspeicher (technischer Speicher): hydraulische Entkoppelung von mehreren Anlagenteilen und Reduzierung der Schalthäufigkeit von Wärmeerzeugern (im Bereich von Minuten bis Stunden)
- Kurzzeit-Wärmespeicher: Speicherung von Wärme aus Solarenergie oder dem Überschuss der Wärmeerzeugung über eine gewisse Zeit (im Bereich von Stunden bis Tagen)
- Langzeit-Wärmespeicher: Speicherung von Wärme aus Solarenergie über eine längere Zeit (im Bereich von Wochen bis Monaten, saisonale Speicher)

3 Wärmeverbraucher

Wärmeabgabe zur Raumheizung (WA)

Bestandteile einer Heizungsanlage respektive Anlage zur Abgabe oder Übergabe der Wärme an einen zu beheizenden Raum [SIA 384/1]. Die Wärmeabgabe kann gemäss [SIA 411] nach verschiedenen Kriterien klassifiziert werden:

- Nach der physikalischen Form der Wärmeübertragung (Strahlung, Konvektion, Leitung)
- Nach Bauform (Heizkörper, Flächenheizung usw.)
- Nach Position im Raum (Boden, Wand, Decke, Brüstung, Sockel, bauteilintegriert usw.)
- Nach Art des Wärmeträgers (Wasser, Luft, Elektrizität usw.)

Üblicherweise werden für die Wärmeabgabe Fussbodenheizungen (FBH) oder Heizkörper eingesetzt.

Wassererwärmung (W)

Erwärmung des Trinkwassers und Speicherung des Warmwassers.

Verbundenes System (VS)

Ein System, das die Planung der Heizungsanlage beeinflusst, aber kein integraler Teil derselben ist; Beispiele solcher Anlagen sind Lüftungs- und Klimaanlage, Prozesswärmeanlagen [SIA 384/1].

- 4 Umwälzpumpe**
(siehe Kapitel 2.2
«Hydraulik der Wärme-
verteilung»)

Die Umwälzpumpe fördert ein Wärmeträgermedium durch einen definierten Kreislauf. Es wird zwischen unregulierten und regulierten Umwälzpumpen unterschieden.
- 5 Sicherheitsventil**

Versagen die thermostatischen Regel- und Begrenzungseinrichtungen oder liegt ein Bedienungsfehler vor, kann der Druck in einem hydraulischen Kreislauf gefährlich ansteigen. Ein Sicherheitsventil öffnet, wenn der Ansprechdruck überschritten wird. Die austretenden Gase, Dämpfe oder Flüssigkeiten werden in die Atmosphäre abgeleitet.
- 6 Ausdehnungsgefäß**

In Heizungsanlagen ändern sich die Temperaturen laufend und damit auch die Dichte- respektive das Volumen des Wassers. Das Ausdehnungsgefäß nimmt bei der Erwärmung das zusätzliche Volumen auf und gibt es bei der Abkühlung wieder ans Netz ab.
- 7 Regler**
(siehe Kapitel 8
«Gebäudeautomation»)

Regler sorgen dafür, dass vorgegebene Sollwerte wie Raumtemperatur oder Vorlauftemperatur eingehalten werden. Messfühler erfassen den Istwert und Stellorgane wie Ventile oder Klappen stellen die zu regelnden Größen ein.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Regelung und Steuerung. Bei der Regelung wird der Istwert erfasst. Weicht dieser vom vorgegebenen Sollwert ab, reagiert das Regelorgan. Man spricht von einem geschlossenen Regelkreis. Ein Beispiel ist die Raumtemperaturregelung.

Die Steuerung wirkt auf einen offenen Regelkreis. Dabei wird der Istwert nicht mit dem Sollwert verglichen. Ein Beispiel ist der Nachlaufbetrieb bei einer einfachen Abluftanlage.
- 8 Fühler, Thermostat**

Fühler erfassen den Istwert und geben ihn an das Regelgerät weiter. Es wird zwischen Fühlern (8a) und Thermostaten (8b) unterschieden. Bei Fühlern wird der Sollwert am Regelgerät eingestellt. Bei Thermostaten hingegen wird der Sollwert an Ort und Stelle direkt eingestellt.
- 9 Stellorgan**

Stellorgane wie Ventile oder Klappen bestehen aus dem Stellantrieb und dem Stellglied. Das Stellorgan stellt aufgrund des Eingangssignals eine Grösse (z. B. den Hub) im Stellglied ein.
- 10 Aussentemperaturfühler, Witterungsfühler**
(siehe «Witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung», Seite 39)

Eine aussentemperatur- oder witterungsgeführte Regelung der Vorlauftemperatur ist die am häufigsten eingesetzte Art einer Heizungsregelung. Dabei wird die Vorlauftemperatur abhängig von der Aussentemperatur respektive der Witterung geregelt. Welche Vorlauftemperatur bei welcher Aussentemperatur notwendig ist, wird durch die Heizkurve definiert.

2.2 Hydraulik der Wärmeverteilung

Hydraulische Grundschaltungen

Zum Bereitstellen und Verteilen von Wärme in Gebäuden werden in Heizungsanlagen oft hydraulische Netze verwendet. In [SIA 384/1] sind folgende sechs Grundschaltungen beschrieben:

- Beimischschaltung
- Direktschaltung
- Drosselschaltung
- Umlenkschaltung (soll bei Anlagen mit niedrigen Rücklauftemperaturen nicht mehr verwendet werden)
- Einspritzschaltung mit 3-Weg-Stellorgan (soll bei Anlagen mit niedrigen Rücklauftemperaturen nicht mehr verwendet werden)

- Einspritzschaltung mit Durchgangsstellorgan

Im Folgenden wird auf die Beimischschaltung und die Einspritzschaltung mit Durchgangsstellorgan (Bild 2.2, Grundschaltungen 1 und 6) näher eingegangen. Dies sind die am häufigsten eingesetzten Schaltungen in der Heizungstechnik.

Beimischschaltung

Funktionsweise: Bei der Beimischschaltung (Bild 2.3) wird das Rücklaufwasser mit dem Vorlaufwasser auf die gewünschte Vorlauftemperatur der Verbrauchergruppe gemischt. Die Vorlauftemperatur der Verbrauchergruppe ist mit der Heizkurve definiert und abhän-

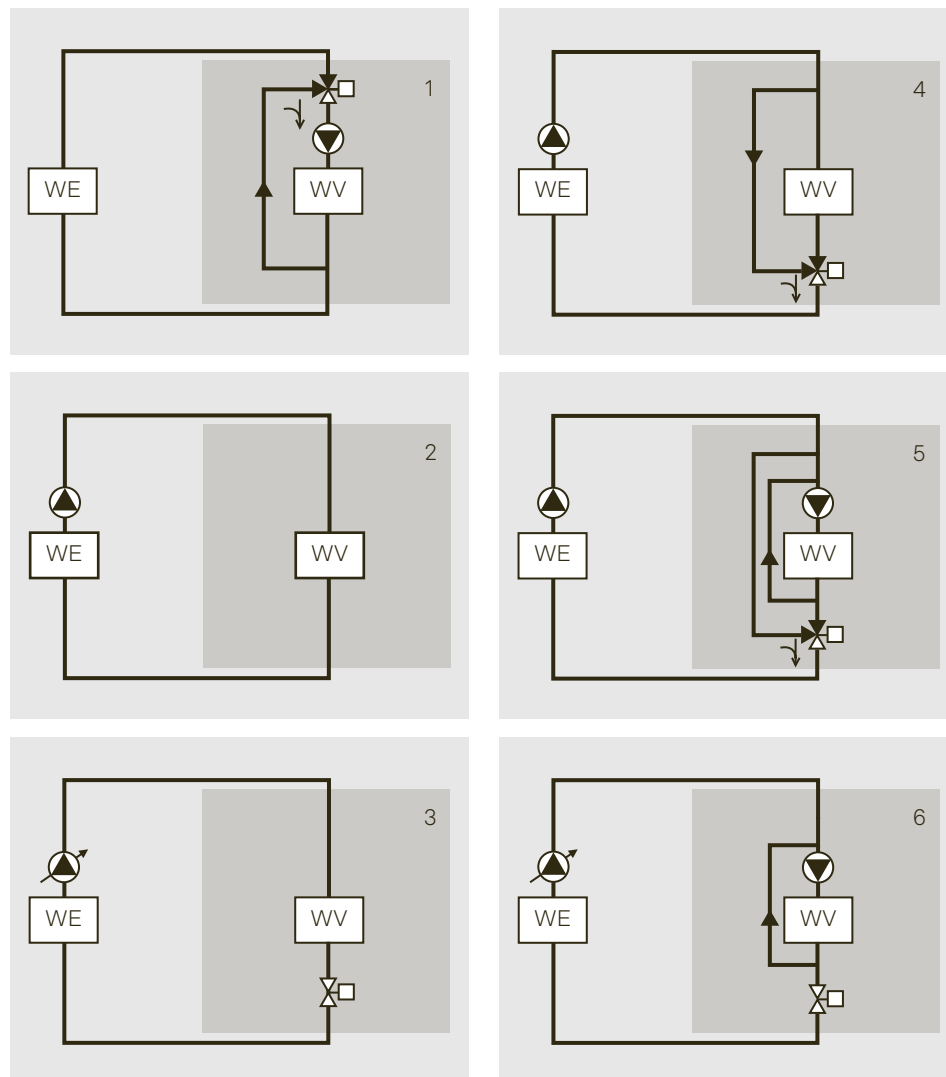


Bild 2.2:

Hydraulische Grundschaltungen:

1 Beimischschaltung

2 Direktschaltung

3 Drosselschaltung

4 Umlenkschaltung

5 Einspritzschaltung

mit 3-Weg-Stellorgan

6 Einspritzschaltung

mit Durchgangsstellorgan

WE: Wärmeerzeuger

oder -übertrager

WV: Wärmever-

braucher (z. B. Fuss-

bodenheizung, Heiz-

körper, Luftheritzer)

gig von der Aussentemperatur. Beim Einsatz von Thermostatventilen wird der Durchfluss im Wärmeabgabekreis variabel. In diesem Fall sollte eine geregelte Umwälzpumpe eingesetzt werden. Ist die vom Wärmeerzeuger (WE) gelieferte primäre Vorlauftemperatur bei Auslegungsbedingungen höher als die geforderte sekundäre Vorlauftemperatur in der Verbrauchergruppe (beispielsweise bei Fussbodenheizungen), muss bei der Beimischschaltung auf der Sekundärseite eine feste Vormischung, also ein **interner Bypass** eingebaut werden (Bild 2.4). Durch das stetige Beimischen des abgekühlten Rücklaufwassers via Bypass sinkt die Vorlauftemperatur, und damit steht dem Stellorgan der komplette Hub für die Regelung zur Verfügung. Damit wird die Regelfähigkeit des Stellorgans optimal ausgenutzt.

Eigenschaften: Typisch für die Beimischschaltung sind

- tiefe Rücklauftemperatur bei kleiner Last
- konstanter Durchfluss mit variabler Vorlauftemperatur im Wärmeverbraucherkreis, sofern keine Durchflussregler wie Thermostatventile bei der Wärmeabgabe eingesetzt werden

- variabler Durchfluss über den Wärmeerzeugerkreis bei differenzdrucklosem Verteiler ohne Hauptpumpe
- gleichmässige Temperaturverteilung über den Wärmeverbraucher (WV)
- geringe Einfriergefahr bei Lufterhitzern

Einsatzgebiet:

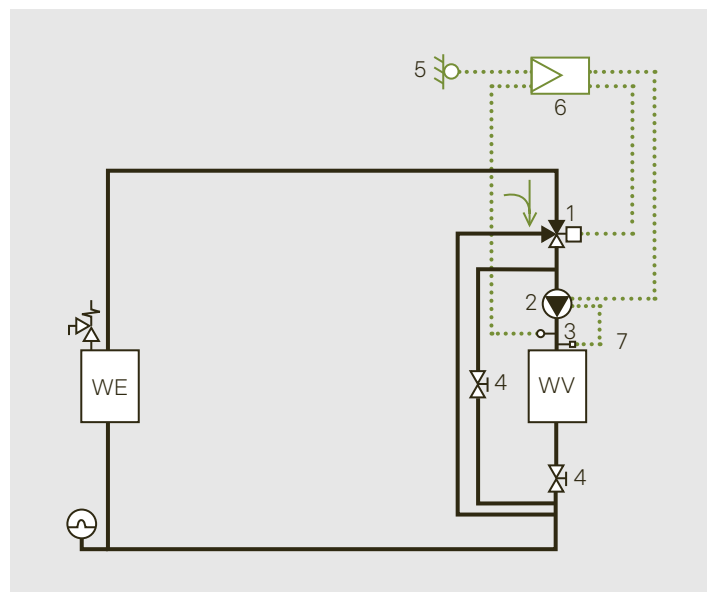
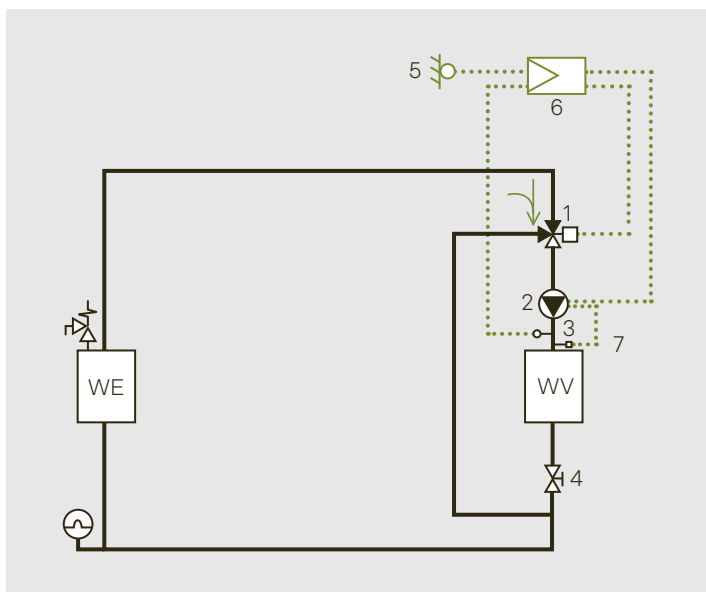
- differenzdrucklose Verteiler mit oder ohne Hauptpumpe
- Regelung von Heizkörper- und Fussbodenheizungen
- Lufterhitzer mit Einfriergefahr
- Anlagen mit Niedertemperatur-Wärmeerzeugern, also bei kondensierenden Wärmeerzeugern/Brennwertkessel oder Wärmepumpen

Einspritzschaltung mit Durchgangsstellorgan

Funktionsweise: Das Durchgangsstellorgan (4 in Bild 2.5) regelt den Wasserdurchfluss vom Wärmeerzeuger in den Verbraucherkreis. Je nach Stellung wird dem Verbraucherkreis mehr oder weniger Vorlaufwasser eingespritzt. Um den Durchfluss durch den Verbraucherkreis konstant zu halten, wird via Bypass stets die erforderliche Menge an Rücklaufwasser beigemischt. So resultiert im Verbraucherkreis eine Temperaturregelung mit konstantem Durchfluss und im Wärmeerzeugerkreis (Primärkreis) eine

Bild 2.4:
Beimischschaltung mit internem Bypass, differenzdrucklose Verteiler ohne Hauptpumpe.
1 Stellorgan
2 Umwälzpumpe
3 Fühler
4 Abgleichdrossel
5 Aussentemperaturfühler
6 Regler
7 Sicherheitstemperaturbegrenzung bei FBH

Bild 2.3:
Beimischschaltung (Grundschtaltung 1), differenzdrucklose Verteiler ohne Hauptpumpe.
1 Stellorgan
2 Umwälzpumpe
3 Fühler
4 Abgleichdrossel
5 Aussentemperaturfühler
6 Regler
7 Sicherheitstemperaturbegrenzung bei FBH
WE: Wärmeerzeuger oder -übertrager
WV: Wärmeverbraucher (z. B. FBH, Heizkörper, Lufterhitzer)



Durchflussregelung mit konstanter Vorlauftemperatur. Aus diesem Grund muss im Wärmeerzeugerkreis eine geregelte Hauptpumpe eingesetzt werden.

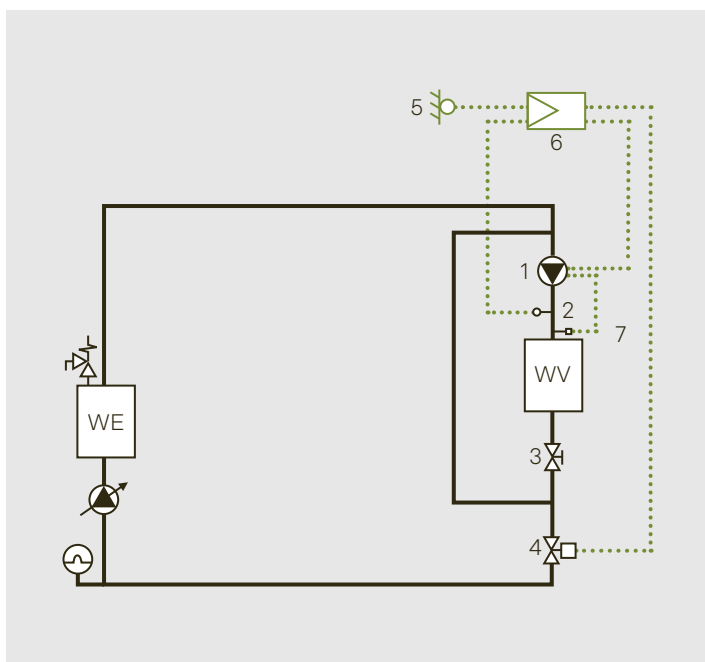
Wie bei der Beimischschaltung folgt auch bei der Einspritzschaltung die Vorlauftemperatur innerhalb des Verbraucherkreis der definierten Heizkurve und hängt somit von der Aussentemperatur ab. Gibt es im Verbraucherkreis Thermostatventile, schwankt der Durchfluss, und es muss wie bei der Beimischschaltung eine geregelte Verbraucherpumpe eingesetzt werden.

Bild 2.5:

- Einspritzschaltung mit Durchgangsstellorgan.
- 1 Umwälzpumpe
 - 2 Fühler
 - 3 Abgleichdrossel
 - 4 Durchgangsstellorgan
 - 5 Aussentemperaturfühler
 - 6 Regler
 - 7 Sicherheitstemperaturbegrenzung bei FBH
- WE: Wärmeerzeuger oder -übertrager
WV: Wärmeverbraucher (z. B. FBH, Heizkörper, Luftheritzer)

Eigenschaften: Typisch für Einspritzschaltungen mit Durchgangsstellorgan sind

- Tiefe Rücklauftemperatur, deshalb gut geeignet bei Fernwärmeanschlüssen und bei kondensierenden Wärmeerzeugern
- Konstanter Durchfluss mit variabler Vorlauftemperatur im Wärmeverbraucherkreis, sofern keine Durchflussregler wie Thermostatventile bei der Wärmeabgabe eingesetzt werden
- Variabler Durchfluss über den Wärmeerzeugerkreis, d. h. Einsatz geregelter Pumpen



- Bei Einspritzschaltungen mit Durchgangsstellorganen muss immer ein differenzdruckbehalteter Verteiler installiert werden.
- Gleichmäßige Temperaturverteilung über den Wärmeverbraucher
- Geringe Einfriergefahr bei Luftherizern

Einsatzgebiet:

- Bei differenzdruckbehalteten Verteilern
- Anlagen mit Niedertemperatur-Wärmeerzeugern (kondensierende Wärmeerzeuger/Brennwertkessel oder Wärmepumpen)
- Direkte oder indirekte Fernwärmeanschlüsse
- Regelung von Heizkörper- und Fussbodenheizungen
- Luftheritzer mit Einfriergefahr

Kesselrücklaufhochhaltung

In den Abgasen von Heizkesseln ist Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf vorhanden. Will man dessen Energieinhalt nutzen, müssen die Abgase soweit heruntergekühlt werden, bis der Taupunkt unterschritten wird und das Wasser kondensiert. Heizkessel, welche die Kondensationswärme (also latente Wärme) nutzen, bezeichnet man als Brenn-

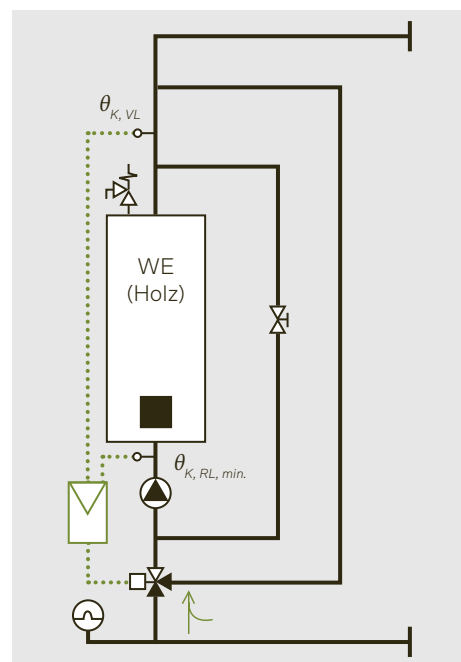


Bild 2.6:
Kesselrücklaufhochhaltung mit internem Bypass.

wertkessel oder kondensierende Wärmeerzeuger. Ein Brennwertkessel kann den Energieinhalt (Brennwert) des eingesetzten Brennstoffs nahezu vollständig nutzen.

Bei nicht kondensierenden Heizkesseln darf die Rücklauftemperatur die Taupunkttemperatur der Abgase nicht unterschreiten. Grund dafür ist, dass solche Kessel aus Materialien bestehen, die korrodieren, wenn sie mit Kondensat in Berührung kommen. Um eine zu tiefe Rücklauftemperatur vor dem Heizkesselintritt anzuheben, bedarf es einer entsprechenden hydraulischen Schaltung. Mit einer sogenannten Kesselrücklaufhochhaltung kann die Kondensatbildung verhindert und dadurch Korrosion vermieden werden.

Hinweis: Die [MuKE] schreiben vor, dass bei fossil betriebenen Heizkesseln (Gas, Öl) kondensierende Heizkessel eingesetzt werden müssen. Dies gilt es auch bei einem 1:1-Kesslersatz zu berücksichtigen.

Funktionsweise: Liegt die Rücklauftemperatur ($\theta_{K,RL,min}$) unter dem Taupunkt des jeweiligen Brennstoffs, wird dem Rücklauf heißes Vorlaufwasser mittels eines 3-Weg-Stellorgans zugemischt (Bild 2.6). Dadurch wird die Rücklauftemperatur über die Taupunkttemperatur angehoben. Haben Wärmeerzeugerkreis und Wärmeverbraucherkreise stark unterschiedliche Rücklauftemperaturen, braucht es auf der Heizkessel-seite einen konstanten internen Bypass, der im Auslegungsfall so viel Vorlaufwasser beimischt, dass das 3-Weg-Stellorgan voll auf «Durchgang» gestellt ist.

Eigenschaften: Typisch für die Kesselrücklaufhochhaltung sind

- Sicheres Anheben der Rücklauftemperatur auf eine definierte Temperatur (höher als Taupunkttemperatur)
- Stellorgan kann gleichzeitig auch genutzt werden, um die Kesselvorlauftemperatur zu regeln

Einsatzgebiet: Bei nicht kondensierenden Heizkesseln wie Stückholzheizkesseln

Verteiler

Eine Wärmeerzeugungsanlage versorgt mittels Verteiler einen oder mehrere Wärmeverbraucher. Der Verteiler ist somit das Bindeglied zwischen der Wärmeerzeugeranlage und den Wärmeverbrauchern. Dazu gehören etwa Wär-

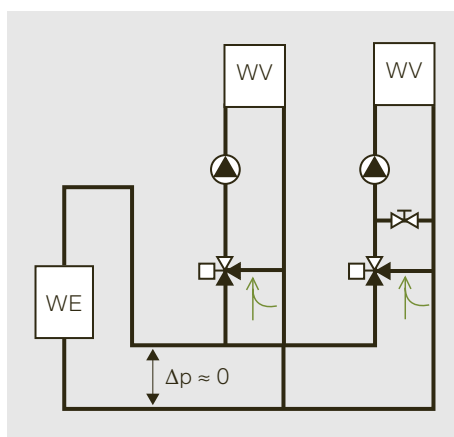


Bild 2.7:
Differenzdruckloser Verteiler ohne Hauptpumpe.
WE: Wärmeerzeuger
WV: Wärmeverbraucher

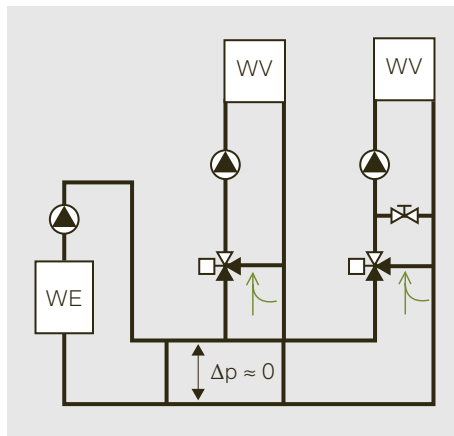
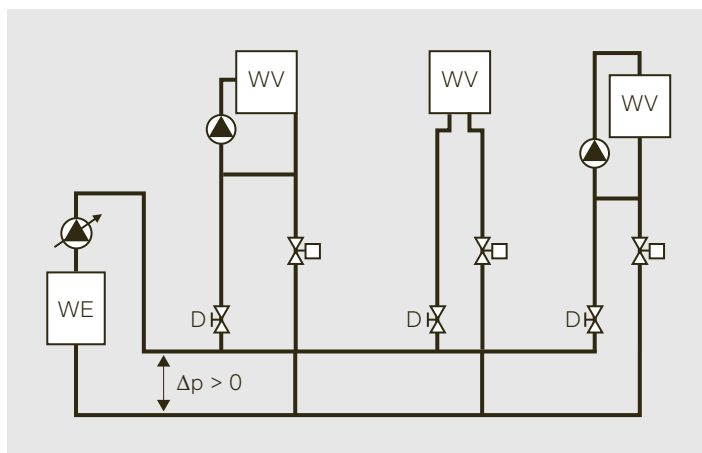


Bild 2.8:
Differenzdruckloser Verteiler mit Hauptpumpe.

Bild 2.9:
Differenzdruckbehafteter Verteiler.
D: Abgleichdrossel



meabgabe, Wassererwärmung, verbundene Systeme wie raumluftechnische Anlagen oder Prozesswärme. Es werden zwei Verteilerarten unterschieden:

- Differenzdruckloser Verteiler ohne oder mit Hauptpumpe
- Differenzdruckbehafteter Verteiler

Differenzdrucklose Verteiler ohne Hauptpumpe: Hier muss der Druckverlust über den Wärmeerzeugerkreis sehr niedrig sein ($< 3000 \text{ Pa}$). Differenzdrucklose Verteiler ohne Hauptpumpe (Bild 2.10) werden in kleineren Anlagen eingesetzt und lassen sich ideal mit Beimischschaltungen kombinieren. Die Pumpe muss den Druckverlust des Stellorgans und des Wärmeerzeugerkreises überwinden. Die Wärmeerzeuger müssen für tiefe Rücklauftemperaturen konstruiert sein.

Differenzdrucklose Verteiler mit Hauptpumpe: Hier wird die Verteilung in zwei Kreisläufe unterteilt (Bild 2.11), in den Primärkreis (WE) und den Sekundärkreis (WV). Die Hauptpumpe sorgt für den Durchfluss im Primärkreis: vom WE zum Verteiler über den Verteilerbypass zum WE zurück. Ab Verteilerbypass ziehen die Verbrauchergruppen mit ihren eigenen Pumpen den benötigten Durchfluss ab. Der Druckverlust des Stellorgans wird von der Pumpe der je-

weiligen Verbrauchergruppe übernommen. Der Verteiler ist fast differenzdrucklos, weshalb auf einen hydraulischen Abgleich zwischen den Verbrauchergruppen verzichtet werden kann. Auch hier lässt sich in den Verbrauchergruppen die Beimischschaltung ideal einsetzen.

Diese Verteilerart bewirkt ein Hochmischen der WE-Rücklauftemperatur; deshalb ist sie für kondensierende Wärmeerzeuger nicht optimal.

Differenzdruckbehaftete Verteiler: Hier stellt die drehzahlgeregelte Hauptpumpe im Wärmeerzeugerkreis den Verbrauchergruppen eine Druckdifferenz zur Verfügung (Bild 2.12). Somit kann bei einer Verbrauchergruppe in Drosselschaltung (Grundschtaltung 3) auf eine Pumpe verzichtet werden. Dies ist bei anderen Grundschtaltungen nicht der Fall. So muss bei einer Verbrauchergruppe in Einspritzschaltung mit Durchgangsstellorgan (Grundschtaltung 6) eine Pumpe vorgesehen werden. In diesem Fall überwindet die Hauptpumpe den Druckverlust des Stellorgans, nicht aber den Druckverlust über den Wärmeverbraucherkreis. Dieser Druckverlust wird von der Pumpe der Verbrauchergruppe gedeckt.

Bei differenzdruckbehafteten Verteilern ist ein hydraulischer Abgleich unter den Verbrauchergruppen an den Drosseln (gemäss Bild 2.9) erforderlich. Sind tiefe WE-Rücklauftemperaturen notwendig, wie bei kondensierenden Wärmeerzeugern, sollen Verbraucherschaltungen mit Durchgangsstellorganen (Grundschtaltungen 3 und 6) gewählt werden.

Bild 2.10:
Differenzdruckloser Verteiler ohne Hauptpumpe, Verbrauchergruppe in Beimischschaltung.
WE: Wärmeerzeuger
WV: Wärmeverbraucher

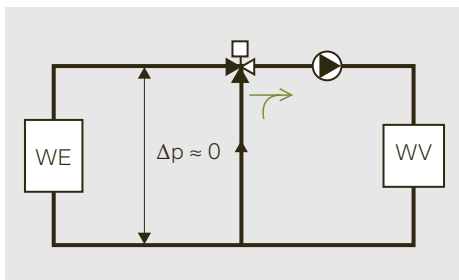


Bild 2.11:
Differenzdruckloser Verteiler mit Hauptpumpe, Verbrauchergruppe in Beimischschaltung.

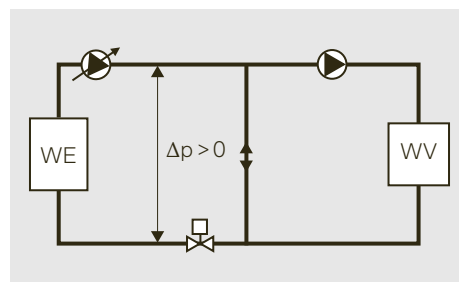
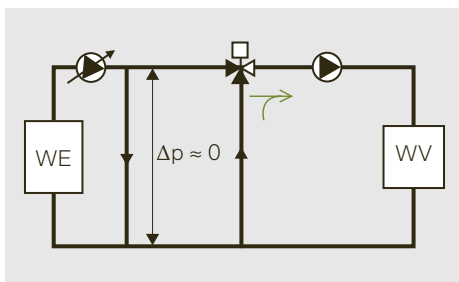


Bild 2.12:
Differenzdruckbehafteter Verteiler, Verbrauchergruppe in Einspritzschaltung mit Durchgangsstellorgan.

Regelung der Wärmeverteilung und Wärmeabgabe

Während der Heizperiode beeinflussen die Wärmeabgabesysteme die Raumtemperaturen. Die hierfür notwendige Wärmeleistung wird vorwiegend mit zwei Regelungsarten sichergestellt, die sehr oft kombiniert werden:

- Primärregelung (Wärmeverteilung): Anpassen der Vorlauftemperatur an den Verlauf der Aussentemperatur für die ganze Heizgruppe
- Sekundärregelung (Wärmeabgabe): Anpassen des Durchflusses im Raum zur raumweisen Feinregelung der Raumtemperatur

Witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung

Bei schlechtem Wetter und tiefen Aussentemperaturen steigt der Wärmeleistungsbedarf. Um die gewünschte Raumtemperatur zu erreichen, steigt die Vorlauftemperatur entsprechend der fest eingestellten Heizkurve. Dabei werden aber die intern und extern anfallenden Wärmeeinträge im Raum nicht berücksichtigt.

Besonders bei gut gedämmten Gebäuden sinkt der Einfluss einer Aussentemperaturänderung auf die Raumtemperatur. Die nur aussentemperaturgeführte Vorlauftemperaturregelung kann durch

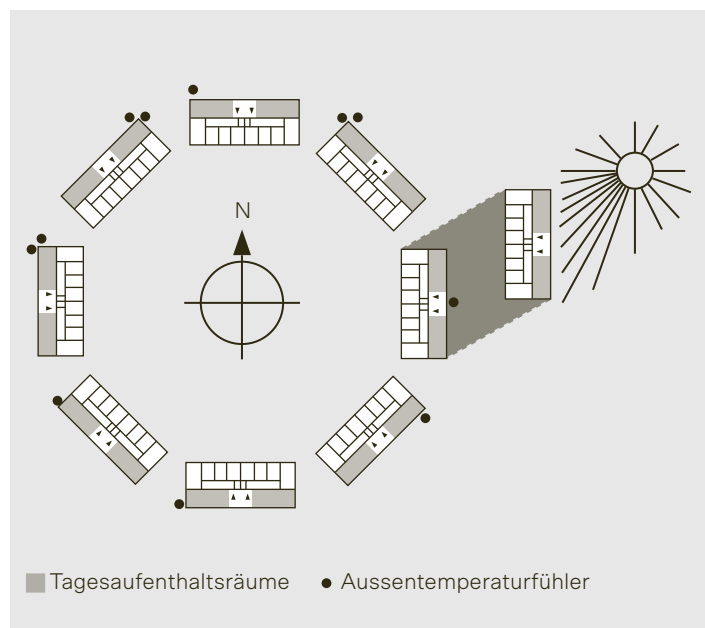
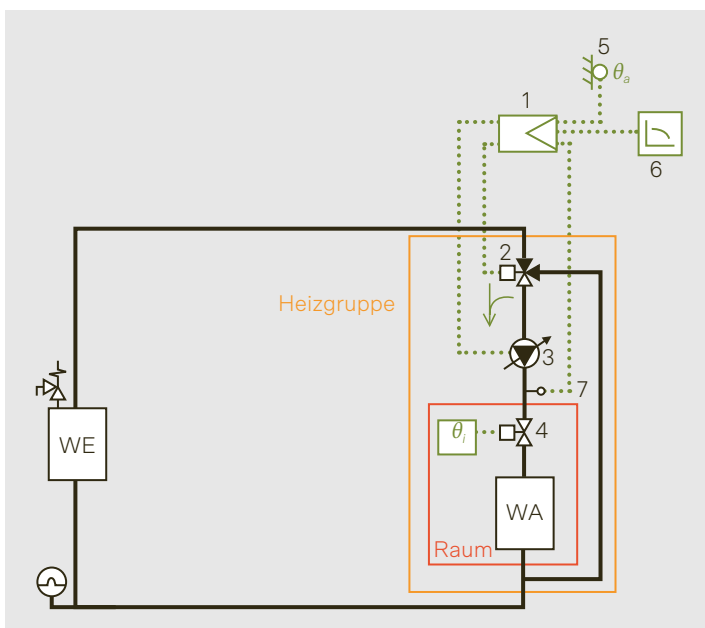
Berücksichtigen von Wind- und Sonneneinflüssen verbessert werden. In diesem Fall spricht man von einer «witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung».

Auch kann der zusätzliche Wärmeeintrag mit einer Raumtemperaturkompensation korrigiert werden. Dazu wird die Raumtemperatur in einem Referenzraum gemessen und die Heizkurve bei einem zusätzlichen Wärmeeintrag entsprechend der Raumtemperaturabweichung parallel nach unten verschoben. Diese Methode wird aber nur dann gut funktionieren, wenn Störgrößen wie interner und externer Wärmeeintrag auf alle Räume gleichmässig einwirken. Dies ist leider in der Regel nicht der Fall – Störgrößen wirken vielmehr unterschiedlich auf die einzelnen Räume ein. Dann helfen nur Thermostatventile in allen Räumen, welche die Durchflüsse in den Wärmeabgabesystemen regeln (Sekundärregelung). Deshalb wird die witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung oft mit Thermostatventilen kombiniert. Hinsichtlich **Platzierung der Aussentemperaturfühler** gilt:

- Nie direkter Sonneneinstrahlung aussetzen
- Nie auf Fassaden mit grosser Auftriebswärme montieren

Bild 2.14: Platzierung von Aussentemperaturfühlern.

- Bild 2.13: Witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung in Verbindung mit Thermostatventilen.
- 1 Vorlauftemperaturregelung
 - 2 Stellorgan
 - 3 geregelte Heizgruppenpumpe mit variablem Durchfluss
 - 4 Thermostatventil
 - 5 Aussentemperaturfühler
 - 6 Heizkurve (Vorlauftemperatur-Sollwertgeber)
 - 7 Vorlauftemperaturfühler
- θ_a : Aussentemperatur
 θ_i : Raumtemperatur
- WE: Wärmeerzeuger bzw. -übertrager
WA: Wärmeabgabe (z. B. FBH, Heizkörper)



- Nicht über Lüftungs-Austrittsöffnungen montieren

Die früher pauschale Regel «immer Nordseite für den Aussentemperaturfühler» ist heute mit Sicherheit nicht mehr gültig. Hier muss je nach Rahmenbedingungen unterschieden werden: Bei gut gedämmten Gebäuden mit massiven Bauteilen beispielsweise möchte man die Speicherfähigkeit der Gebäudemasse nutzen. Dabei wird die anfallende Wärme in Bauteilen gespeichert und zeitverzögert wieder an abkühlende Umgebungsluft abgegeben. Fühler an der Ostfassade sollten in den Morgenstunden von einem Nadelbaum (Achtung: Laubbäume haben im Winter keine Blätter), Nachbargebäude oder Balkon beschattet sein. Ansonsten kann der Fühler von der Morgensonne zu stark aufgeheizt werden, so dass die Vorlauftemperatur zu niedrig ist. Die **Heizkurve** beschreibt die Abhängigkeit der Vorlauftemperatur von der Aussentemperatur. Im Regler wird die Heizkurve von Hand eingestellt; sie hängt ab vom Gebäude und vom Wärmeabgabesystem.

Als Vorlauftemperatur bezeichnet man die Temperatur des Heizungswassers, das durch die Wärmeabgabe (Fussbodenheizung, Heizkörper usw.) zirkuliert. Sie liegt je nach Aussentemperatur und dem Wärmeabgabesystem zwischen 25 °C und 50 °C. Anlagen mit reinen Flä-

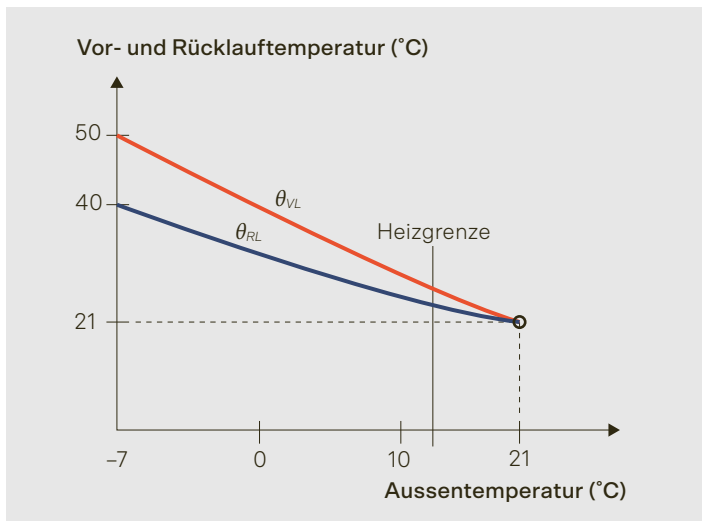
chenheizungen, also etwa Fussbodenheizungen, kommen mit 25 °C bis 35 °C aus (Tabelle 2.22 und Tabelle 2.23).

Die Heizkurve sollte nach der Inbetriebnahme überwacht und optimiert werden. Hierzu empfiehlt es sich, die Thermostatventile im Referenzraum (ungünstigster Raum) an kalten Tagen voll zu öffnen und die Rückmeldungen der Nutzenden einzuholen. Je nach Rückmeldung wird die Heizkurve nach unten oder oben korrigiert. Ist die Heizkurve korrekt eingestellt, wird die gewünschte Raumtemperatur an kalten Wintertagen ohne intensive Sonneneinstrahlung gerade noch erreicht. Präziser lässt sich die Heizkurve mithilfe von Aufzeichnungen der Aussen- und der Raumtemperatur während einer Heizperiode justieren.

Umwälzpumpen

Umwälzpumpen lassen ein Wärmeträgermedium in Heizungs- und Warmwasserversorgungsanlagen zirkulieren. Sie werden von Elektromotoren angetrieben. Obwohl sie nur wenig elektrische Leistung aufnehmen, können sie wegen den langen Betriebszeiten einen grossen Anteil des Energieverbrauchs verursachen. In kleinen und mittleren Gebäudetechnischen Anlagen werden fast ausschliesslich Nassläufer-Umwälzpumpen eingesetzt. In der Schweiz dürfen solche Pumpen gemäss Energieeffizienzverordnung [EnEV] bis 2500 W hydraulischer Leistung nur noch mit einem Energieeffizienzindex (EEI) $\leq 0,23$ eingesetzt werden. Der EEI bestimmt den Wirkungsgrad von Nassläufer-Umwälzpumpen. Je tiefer der EEI, desto effizienter ist die Pumpe. Die besten Umwälzpumpen auf dem Markt werden von EC-Motoren (Electronically Commutated) angetrieben und erreichen EEI-Werte unter 0,16. Eine Auswahl besonders effizienter Umwälzpumpen ist unter [Topten] zu finden. Bei grossen Umwälzpumpen mit Leistungen ab etwa 800 W elektrisch sollten auch Trockenläufermodelle in Betracht gezogen werden.

Bild 2.15: Beispiel einer Heizkurve für die Wärmeabgabe über Heizkörper.



Pumpenregelung: Grundsätzlich wird zwischen unregelmäßig (Fall u in Bild 2.16) und geregelten Umwälzpumpen (Fälle c und v in Bild 2.16) unterschieden. Der Schnittpunkt des Volumenstroms (\dot{V}) mit der Pumpenkennlinie ergibt den Betriebspunkt (B). Bei der Auslegung von Umwälzpumpen sollte darauf geachtet werden, dass sie während des Betriebs mit einem guten Wirkungsgrad laufen. Dabei gilt es, folgende Punkte zu beachten:

- Bei unregelmäßigten Umwälzpumpen sollte der Auslegungsbetriebspunkt im mittleren Drittel der Pumpenkennlinie liegen.
- Bei geregelten Umwälzpumpen sollte der Auslegungsbetriebspunkt im hinteren (rechten) Drittel der Pumpenkennlinie liegen. Somit wird ein grosser Regelbereich und im Teillastfall ein hoher Wirkungsgrad erreicht.

Der Betriebspunkt von **unregelmäßigten Umwälzpumpen** liegt immer auf der Pumpenkennlinie. Das heisst: Die Förderhöhe steigt bei sinkendem Volumen-

strom. Dabei bleibt die Drehzahl konstant. Unregelmäßigte Umwälzpumpen werden eingesetzt, wenn die hydraulischen Parameter während des Betriebs möglichst konstant bleiben. Das ist beispielsweise beim Laden des Warmwasserspeichers oder bei Hauptpumpen in differenzdruckloser Verteilungen der Fall.

Im Gegensatz zu den unregelmäßigten passen **geregelte Umwälzpumpen** die Förderhöhe bei ändernden Lastzuständen im hydraulischen Kreis laufend an. Die Pumpenleistung wird dabei stufenlos mittels eines Frequenzumrichters geregelt. Hierzu wird die Drehzahl der Pumpe den geforderten Bedingungen in der Anlage angepasst. Sie stellt sich für jeden Teillastbetriebspunkt wieder neu ein und passt so die elektrische Leistungsaufnahme an. Dies steigert die Effizienz der Umwälzpumpe deutlich. Voraussetzung dafür ist eine volumenstromabhängige Differenzdruckregelung. Bei der Differenzdruckregelung

Bild 2.16: Regelungsarten für unregelmäßigte und automatisch geregelte Pumpen. (Quelle: Dimensionierungshilfe Umwälzpumpen, EnergieSchweiz)

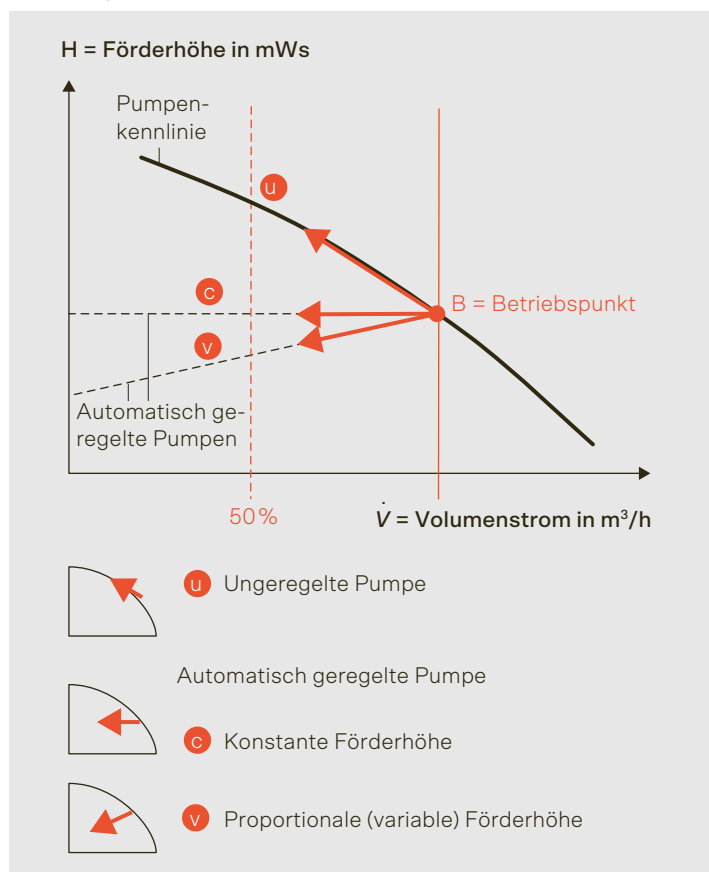


Bild 2.17: Empfohlene Bereiche bei der Pumpenauslegung von unregelmäßigten und geregelten Pumpen.

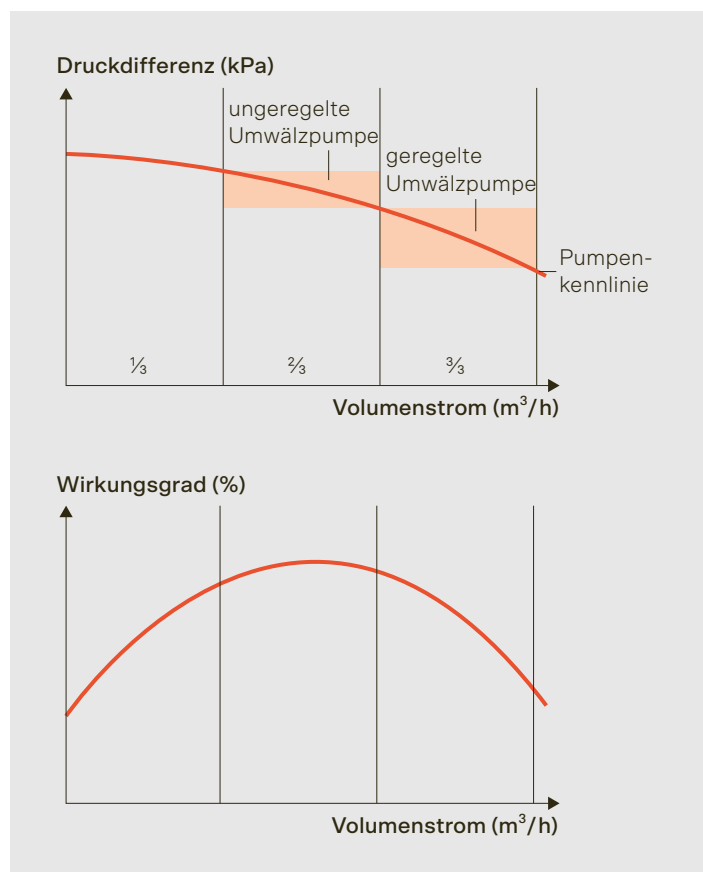
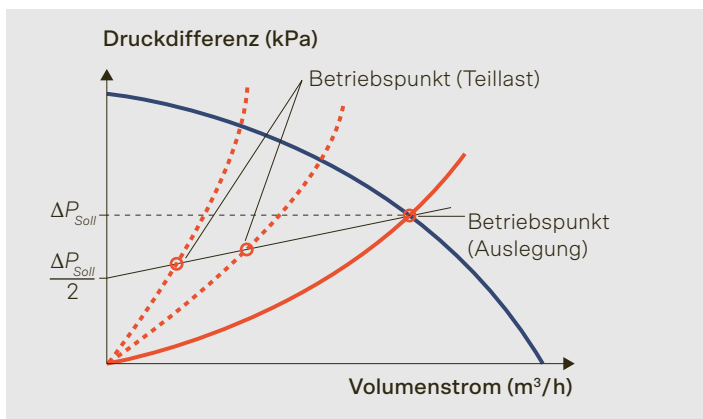
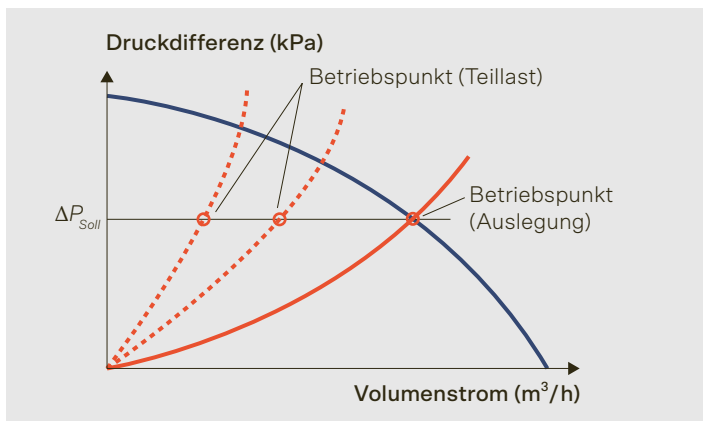
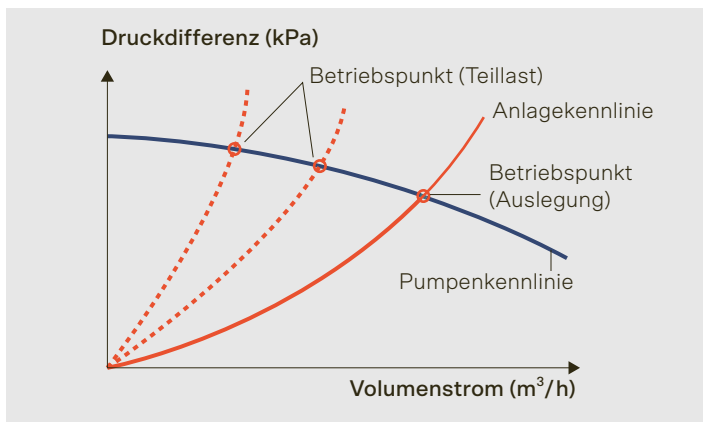


Bild 2.18: Pumpendiagramm einer unregulierten Umwälzpumpe.
 Bild 2.19: Pumpendiagramm einer geregelten Umwälzpumpe mit konstantem Betriebsdruck (c).
 Bild 2.20: Pumpendiagramm einer geregelten Umwälzpumpe mit proportionalem Betriebsdruck (v).



wird heute zwischen zwei Regelungsarten unterschieden:

- Regelung mit konstantem Betriebsdruck (Fall c in Bild 2.16): Dabei wird der Differenzdruck der Anlage bei änderndem Volumenstrom konstant gehalten. Diese Betriebsart wird in der Regel bei kleineren Heizungsanlagen mit beispielsweise Thermostatventilen eingesetzt oder bei grossen Anlagen mit unterschiedlichem Verhalten in den Teillastbetrieben. Die Pumpe wird entweder auf einen konstanten Differenzdruck über den Verbraucher oder auf einen konstanten Differenzdruck über der Pumpe geregelt.

- Regelung mit proportionalem Betriebsdruck (Fall v in Bild 2.16): Bei dieser Regelungsart sinkt der Differenzdruck mit abnehmendem Volumenstrom und steigt mit zunehmendem Volumenstrom. Dabei wird der Differenzdruck über die Pumpe gemessen und entlang der proportionalen Pumpenregelkennlinie geregelt. Diese Regelungsart ist in den meisten Fällen sinnvoll. Sie wird bei Anlagen eingesetzt, bei denen der Druckverlust in der Verteilung hoch ist und über den Verbrauchern überall ähnliches Teillastverhalten herrscht.

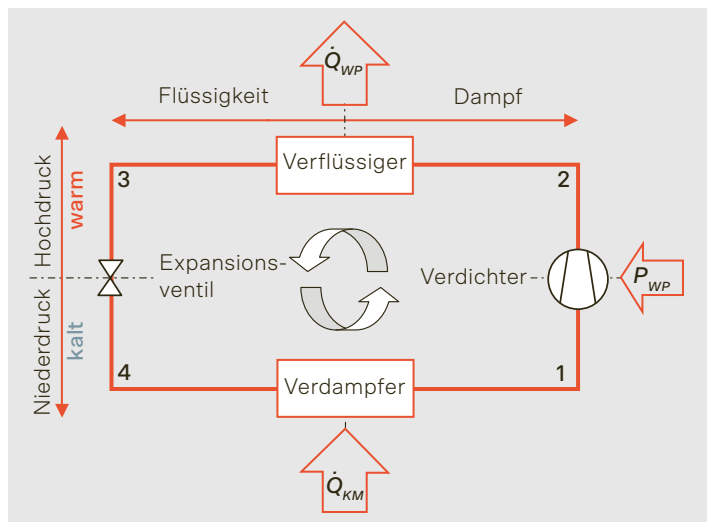
2.3 Wärmepumpen

Eine Wärmepumpe (WP) ist technisch gesehen eine Kältemaschine (KM). Im Gegensatz zur KM dient aber die WP dazu, ein Wärmeträgermedium, das Heizungswasser zu erwärmen. Die von der WP erzeugte Wärme (Kondensationswärme \dot{Q}_{WP}) stammt aus einem tieferen Energiepotenzial und wird durch den Verdampfer aus Abwärme oder der Umwelt (Verdampfungswärme \dot{Q}_{KM}) gewonnen. Dabei verdampft ein bei tiefer Temperatur siedendes Kältemittel. Das Kältemittelgas wird mittels Verdichter auf ein höheres, nutzbares Temperaturniveau gebracht. Das so erwärmte Gas gibt die Wärme im Verflüssiger (auch Kondensator genannt) als Kondensationswärme \dot{Q}_{WP} an das Heizungswasser ab und verflüssigt sich dabei wieder. Zuletzt wird das noch unter Druck stehende Kältemittel in einem Expansionsventil entspannt, und der Kreislauf beginnt wieder von vorne.

Ein Log-p-h-Diagramm stellt den Kreisprozess anschaulich dar und zeigt den Bezug zu den Zustandsgrößen des Kältemittels. Der Verlauf der Zustandsgrößen eines realen Prozesses wird in Bild 2.22 (vereinfacht) dargestellt. Der Kreislaufprozess (rote Linie) wird grundsätzlich in drei Phasen unterteilt:

- 1 – 2: Verdichtung (Kompression)
- 2 – 3: Verflüssigung (Kondensation)
- 3 – 4: Expansion
- 4 – 1: Verdampfung

Bild 2.21: Prinzip eines Kältemittelkreises.



In einem realen Kreislauf sind noch weitere Phasen relevant:

- 1'–1: Überhitzung (Sauggasüberhitzung); dadurch wird verhindert, dass Kältemitteltröpfchen in den Verdichter gelangen.
- 2–2': Enthitzung; Wärmeentzug mittels sogenannter Heissgasenthitzung auf einem höheren Temperaturniveau.
- 3'–3: Unterkühlung; dadurch kann bei gleichem Aufwand eine höhere Kondensationswärme erreicht werden.

Detaillierte Informationen zu Wärmepumpen liefert das [WP-Handbuch].

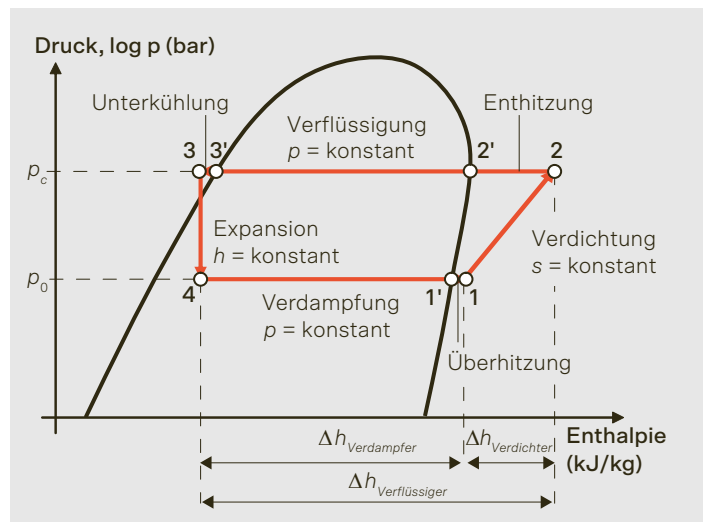
Systemgrenzen und Effizienzkennzahlen

Die im Alltag gebräuchlichsten Effizienzkennzahlen von Wärmepumpenanlagen sind die Leistungszahl (COP; engl. Coefficient of Performance) und die Jahresarbeitszahl (JAZ).

Die «Leistungszahl Heizen» wird in [SIA 384/3] wie folgt definiert: «Verhältnis der von einer Wärmepumpe abgegebenen Wärmeleistung zur aufgenommenen elektrischen Antriebsleistung (inkl. Leistungsbedarf für Steuerung und allfällige Förderpumpen).»

Die «Arbeitszahl Heizen» wird in [SIA 384/3] wie folgt definiert: «Verhältnis der von einer elektrischen Wärmepumpe erzeugten Wärme zur eingesetz-

Bild 2.22: Idealer Kältemittelkreis im Log-p-h-Diagramm dargestellt.



ten elektrischen Energie (inkl. Steuerung und allfällige Förderpumpen).» In [SIA 384/3] ist die Betrachtungsperiode immer ein Jahr. Die Arbeitszahl Heizen entspricht daher auch dem gebräuchlichen Begriff «Jahresarbeitszahl» (JAZ).

Die JAZ wird in der Praxis oft mit unklaren Systemgrenzen verwendet. Je nach Systemgrenze (Betrachtungsraum) ergeben sich aber stark unterschiedliche Zahlen. Die in Bild 2.23 angegebenen, differenzierteren Systemgrenzen und Begriffe haben sich bewährt. Zudem sollte zwischen dem Heizbetrieb, dem Warmwasserbetrieb oder dem kombinierten Heiz-/Warmwasserbetrieb unterschieden werden.

Arten von Wärmequellen

Wichtigste Voraussetzung, um mit einer Wärmepumpe eine gute JAZ zu erreichen, ist eine geeignete Wärmequelle. Ihre Temperatur sollte möglichst hoch und konstant sein; damit wird eine kleine Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle (Verdampfer) und Verflüssiger erreicht. Für WP eignen sich folgende Wärmequellen:

- Luft, also Umgebungswärme aus Aussenluft und Fortluft
- Wasser, also Oberflächenwasser, Grundwasser oder Abwasser

- Erdwärme von oberflächennaher und tiefer Geothermie
- Abwärme, beispielsweise aus gewerblicher Kälte, Klimakälte oder Prozesskälte

Luft-Wasser-Wärmepumpen entziehen Aussenluft oder Fortluft von raumlufttechnischen Anlagen Wärme. Aussenluft steht in unbeschränkten Mengen zur Verfügung. Nachteilig sind die saisonal tiefen Aussenlufttemperaturen und hohe Luftfeuchte. So kann es sein, dass bei tiefen Aussenlufttemperaturen Reif und Eis am Verdampfer ansetzen. Mittels Abtaueinrichtung der WP wird der vereiste Lamellenwärmeübertrager wieder abgetaut. Folglich eignet sich eine Luft-Wasser-WP gut für neue oder sanierte Gebäude, die ganzjährig mit Niedertemperatur (Vorlauftemperatur $\leq 35^\circ\text{C}$) geheizt werden können. Zudem sollten die Gebäude nicht in kalten Regionen stehen wie etwa in einigen Jura-Tälern.

Bei der Aussenluft-Wasser-WP unterscheidet man Kompaktgeräte und Splitgeräte. Wobei bei den Kompaktgeräten zwischen zwei Bauformen unterschieden wird: Innenaufstellung und Aussen-aufstellung aussen gefasst und mit einem Luftkanal zur WP geführt. Ist der Platz im Gebäude knapp, kann ein Kom-

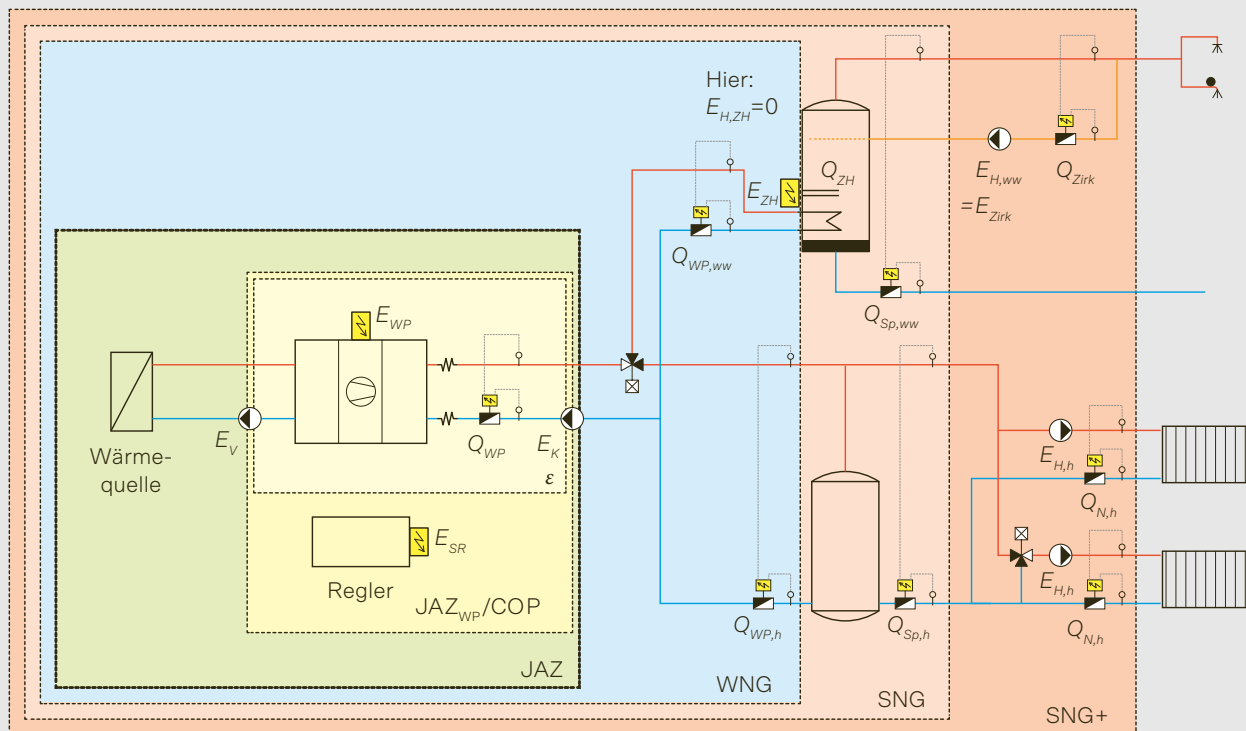
Bild 2.23 (rechts, Zeichenerklärung unten): Systemgrenzen und Kennzahlen von Wärmepumpenanlagen.

Leistungen (Momentanwerte oder Mittelwerte über kurze Zeitdauer)

- \dot{Q}_{WP} Heizleistung der Wärmepumpe
- P_{WP} Verdichter-Leistungsaufnahme der Wärmepumpe
- (P_V) Leistungsanteil zur Überwindung des Verdampferdruckabfalls
- (P_K) Leistungsanteil zur Überwindung des Kondensatordruckabfalls
- P_{SR} Leistungsaufnahme der Steuerung und Regelung innerhalb der Wärmepumpe
- P_A mittlere Leistungsaufnahme der Abtaueinrichtung

Energien (Jahreswerte)

- $Q_{WP} = Q_{WP,h} + Q_{WP,ww}$ von der Wärmepumpe produzierte Wärme
- Q_{ZH} von der Zusatzheizung produzierte Wärme
- $Q_{Sp} = Q_{Sp,h} + Q_{Sp,ww}$ von den Speichern abgegebene Nutzwärme
- $Q_N = Q_{N,h} + Q_{N,ww}$ beim Nutzer verfügbare Wärme
- E_{WP} Verdichter-Energieverbrauch der Wärmepumpe
- (E_V) Energieverbrauch Verdampferpumpe/Ventilator (Anteil WP-intern)
- (E_K) Energieverbrauch Kondensatorpumpe (Anteil WP-intern)
- E_V Energieverbrauch Verdampferpumpe/Ventilator (insgesamt)
- E_K Energieverbrauch Kondensatorpumpe (insgesamt)
- E_{SR} Energieverbrauch Steuerung und Regelung
- E_A Energieverbrauch Abtaueinrichtung
- E_C Energieverbrauch Carterheizung
- E_{ZH} Energieverbrauch Zusatzheizung
- $E_{H,ZH}$ Hilfsenergieverbrauch Zusatzheizung (z. B. Umwälzpumpen)
- $E_{H,h}$ Hilfsenergieverbrauch Wärmeverteilung Heizung (z. B. Umwälzpumpen)
- $E_{H,ww}$ Hilfsenergieverbrauch Wärmeverteilung Warmwasser (z. B. Zirkulation)



Leistungs- bezogen	Leistungszahl (ϵ)	Coefficient of Performance (COP)
	$\epsilon = \frac{\dot{Q}_{WP}}{P_{WP}}$	$COP = \frac{\dot{Q}_{WP}}{P_{WP} + (P_V) + (P_K) + P_{SR} + P_A}$

Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe (JAZ_{WP})

$$JAZ_{WP} = \frac{Q_{WP}}{E_{WP} + (E_V) + (E_K) + E_{SR} + E_A + E_C}$$

Jahresarbeitszahl (JAZ)

$$JAZ = \frac{Q_{WP}}{E_{WP} + E_V + (E_K) + E_{SR} + E_A + E_C}$$

Wärmeerzeugernutzungsgrad (WNG)

$$WNG = \frac{Q_{WP} + [Q_{ZH}]}{E_{WP} + E_V + E_K + E_{SR} + E_A + E_C + [E_{ZH} + E_{H,ZH}]}$$

[...]: inkl. Zusatzheizung

Systemnutzungsgrad (SNG)

$$SNG = \frac{Q_{Sp}}{E_{WP} + E_V + E_K + E_{SR} + E_A + E_C + E_{ZH} + E_{H,ZH}}$$

Systemnutzungsgrad Plus (SNG+)

$$SNG+ = \frac{Q_N}{E_{WP} + E_V + E_K + E_{SR} + E_A + E_C + E_{ZH} + E_{H,ZH} + E_{H,h} + E_{H,ww}}$$

Energiebezogen

pektgerät für die Aussenaufstellung eingesetzt werden. Kann wegen grossen Luftvolumenströmen der Luftkanal nicht im Gebäude installiert werden, wird die WP in zwei Teile gesplittet. Ein solches Splitgerät besteht demzufolge aus einem aussen aufgestellten Verdampfer und einem innen aufgestellten Verflüssiger mit Verdichter. Die beiden Teile sind mit Kältemittelleitungen verbunden.

Planungshinweise für Luft-Wasser-WP:

- Bewilligungspflicht: Der Elektroanschluss muss vom zuständigen Elektrizitätsversorgungsunternehmen bewilligt werden. Die Nutzung der Aussenluft ist hingegen nicht bewilligungspflichtig.
- In kalten Klimaregionen mit tiefen Aussenlufttemperaturen: Aufgrund von saisonal tiefen Aussenlufttemperaturen kann unter Umständen die notwendige

Heizsystemtemperatur nicht erreicht werden oder die Wärmepumpe wird mit einem schlechten COP betrieben. Dabei kann es sinnvoll sein, eine andere, zusätzliche Wärmequelle einzusetzen (beispielsweise einen Holzofen), die entweder nur unterstützt oder während den kältesten Zeiten sogar allein heizt. Die WP muss gemäss [MuKE] so dimensioniert sein, dass sie im Auslegungsfall den gesamten Leistungsbedarf abdecken kann.

- Automatische Abtauung des Verdampfers: Bei Aussentemperaturen unter etwa 5 °C und entsprechender Luftfeuchtigkeit kann der Verdampfer vereisen. Es ist eine automatische Abtauung notwendig. Dabei müssen die gerätespezifischen Anforderungen beachtet werden.
- Kondenswasserbildung beim Verdampfer muss abgeführt werden: Durch die Abkühlung der Luft im Verdampfer unter den Taupunkt entsteht Kondenswasser. Dieses muss gesammelt und in einer frostsicheren Leitung abgeführt werden. Dies gilt auch für die Verrohrung des Verdampfers.

- Keinen Kurzschluss von gefasster und abgekühlter Aussenluft: Es gilt zu beachten, dass die Luftfassung des Verdampfers keine abgekühlte Luft ansaugt und es dadurch zu einem Kurzschluss kommen kann.

- Steigerung der Energieeffizienz durch idealen Luftfassungsstandort: Wird die Luft an «warmen» Standorten gefasst, etwa in Autoeinstellhallen, Gebäudeabluftanlagen oder in Erdwärmeübertragern, kann die Energieeffizienz der WP gesteigert werden.
- Wärmepumpe schützen: Die WP inklusive Aussenluftfassung muss vor Beschädigung durch Personen, Schnee, Laub, Staubpartikeln oder Kleintieren geschützt werden. Umgekehrt gilt es, Personen vor beweglichen Teilen (Ventilatoren, Verdichtern und Pumpen) und elektrischen Schlägen zu schützen.

- Bewilligung für Aussengeräte: Fest installierte Aussengeräte bedürfen einer Baubewilligung.

Bild 2.24: Luft-Wasser-WP für die Aussenaufstellung als Kompaktgerät. (Quelle: energie-umwelt.ch)

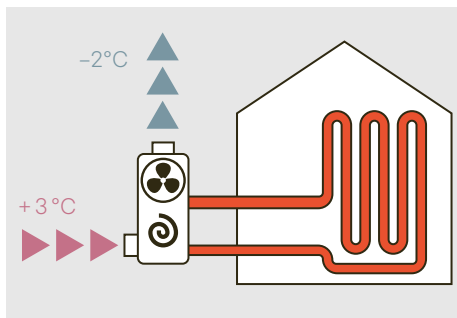


Bild 2.25: Luft-Wasser-WP für die Innenaufstellung als Kompaktgerät. (Quelle: energie-umwelt.ch)

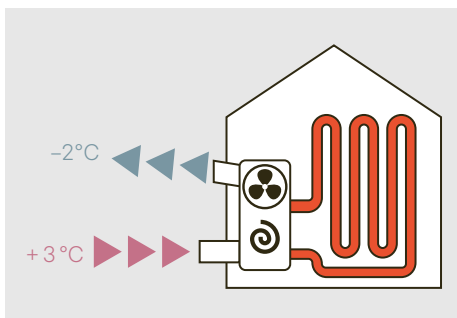
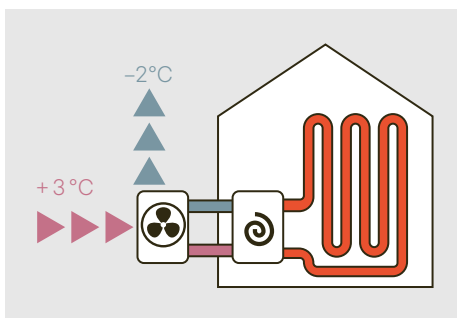


Bild 2.26: Luft-Wasser-WP als Splitgerät. (Quelle: energie-umwelt.ch)



– Schallemissionen beachten: Ventilatoren und Verdichter verursachen Lärm und Vibrationen. Deshalb muss die WP die Vorgaben der [LSV] und oft auch einschlägige Gemeindereglemente einhalten. Der Installateur muss in jedem Fall einen «Schallnachweis» erstellen.

Wasser-Wasser-Wärmepumpen beziehen Wärme aus Abwasser, Grundwasser oder Oberflächengewässern wie Flüssen oder Seen. Wasser als Wärmequelle hat gegenüber Luft den grossen Vorteil, dass die Quelltemperatur das ganze Jahr hindurch fast konstant ist. Aufgrund des vergleichsweise hohen und konstanten Temperaturniveaus gilt Grundwasser als die beste Wärmequelle für WP. Aber auch Oberflächenwasser aus Seen und Flüssen kann eingesetzt werden. Wasser-Wasser-WP sind immer bewilligungspflichtig und die Art der Entnahme, die Rückgabe sowie die minimale Rückgabetemperatur des Wassers müssen mit den zuständigen Behörden abgeklärt werden.

Planungshinweise für Wasser-Wasser-WP:

– Bewilligungspflicht: Das Nutzen von Abwasser, Grundwasser und Oberflächenwasser muss von der zuständigen Behörde bewilligt werden.
– Geologisches und hydrologisches Gutachten: Planung und Umsetzung sollten mit einer geologischen oder hydro-

logischen Beratung einhergehen. Wo Grundwasser genutzt werden darf, ist aus den Geoinformationsportalen (Gewässerschutz- und Wärmenutzungskarten) der Kantone ersichtlich.

– Infiltration von Oberflächenwasser beachten: Bei Grundwasserfassungen in der Nähe von Oberflächengewässern ist eine mögliche Infiltration durch diese zu beachten.

– Grundwasserströmung beachten: Bei der Lokalisierung von der Entnahme- und Rückgabestelle müssen die Grundwasserströmungen berücksichtigt werden (keine Rückgabe im Anströmbereich der Entnahmestelle).

– Wasseranalyse berücksichtigen – folgende Grenzwerte sollten bei der Grundwassernutzung eingehalten werden:

- pH-Wert ≥ 7
- Eisen (gelöst) $\leq 0,15$ mg/l
- Mangan (gelöst) $\leq 0,1$ mg/l

Es soll allerdings beachtet werden, dass die Wasserqualität saisonal schwanken kann. Um Korrosion oder Verschmutzung vorzubeugen, müssen die Materialien für Leitungen und Komponenten entsprechend gewählt werden.

– Grundwasserspiegel: Die Anlage sollte auf den niedrigsten zu erwartenden Grundwasserstand ausgelegt werden.

– Temperatur- und Strömungsüberwachung: Durch geeignete Massnahmen muss vermieden werden, dass die Wärmequelle übernutzt oder sich das ge-



Bild 2.27: Wasser-Wasser-WP; Wärmequelle: Grundwasserfassung. (Quelle: BKW)



Bild 2.28: Sole-Wasser-WP; Wärmequelle: Erdwärmesonden. (Quelle: BKW)

nutze Wasser unter den Gefrierpunkt abkühlt.

Sole-Wasser-Wärmepumpen beziehen die Wärme über einen geschlossenen Solekreis in der Erde. Hierfür werden horizontale Register (Erdwärmeregister) oder vertikale Sonden (Erdwärmesonden, EWS) eingesetzt. Da das Erdreich über das ganze Jahr eine nahezu konstante Temperatur hat, ist die Erdwärme eine ideale Wärmequelle für die WP.

Erdwärmesonden werden vertikal angesetzt und reichen zwischen 50 bis 350 m tief in den Boden. Damit der Solekreis im Verdampfer der WP nicht einfriert, wird oft ein Frostschutz-Gemisch (Wasser-Glykol-Gemisch) als Wärmeträger verwendet.

Detaillierte Informationen zur Planung von Erdwärmesonden-WP liefert das [WP-Handbuch]. Hier einige **Planungshinweise**:

- Wo Erdwärme genutzt werden darf, zeigen die Erdwärmenutzungskarten der kantonalen Geoinformationsportale.
- EWS-Anlagen werden durch zertifizierte Bohrfirmen ausgeführt und sind in jedem Fall bewilligungspflichtig. Zuständig sind die Kantone. Die Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz [FWS] vergibt ein Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen; deren Berücksichtigung wird empfohlen.
- Die Anlagen müssen nach [SIA 384/6] ausgelegt sein; für einfache Anlagen mit bis zu vier Sonden beschreibt diese ein vereinfachtes Verfahren. Grundsatz: Je grösser das Erdwärmesondenfeld, desto geringer ist der mögliche langfristige Wärmeentzug je Laufmeter Sonde. Zu berücksichtigen sind auch nicht vollständig regenerierte Nachbarsonden.
- Wird die EWS-Anlage auch als «Kältequelle» für Kühlzwecke (Geo-Cooling) eingesetzt, kann das Erdreich durch den Wärmeeintrag teilweise «regeneriert» werden. Die Auswirkungen der Regeneration auf die EWS-Dimensionierung müssen durch ausgewiesene Spezialisten abgeklärt oder mit geeigneter Software simuliert werden.

– EWS-Anlagen dürfen nicht zur Bauaustrocknung eingesetzt werden, da die erwähnten Rahmenbedingungen in der Regel überschritten werden.

- Die Zufahrt zur Bohrstelle mit dem Bohrgerät muss sichergestellt sein.
- Das [WP-Handbuch] liefert Hinweise zur Erdwärmesonden- und Bohrlochgeometrie.
- Die Erdwärmesonden-Anschlussleitungen werden in einem Verteiler zusammengefasst. Dieser kann sich ausserhalb oder innerhalb des Gebäudes befinden. Frostschutz beachten: Entweder Wärmedämmung oder Betrieb mit Frostschutzgemisch vorsehen.
- Der Verteiler muss über die gesamte Lebensdauer zugänglich sein. Es braucht eine klare Kennzeichnung, welche EWS wo am Verteiler angeschlossen sind. Bei Anlagen mit zwei oder mehr Sonden: Durchflussregelventile einbauen und einregulieren.
- EWS auf lange Lebensdauer auslegen und nicht zu knapp dimensionieren (Reserve bei WP-Ersatz mit besserer Effizienz).

Erdwärmeregister bestehen aus horizontal verlegten Rohren, die im Erdreich zwischen 1,2 m bis 1,5 m unter Terrain liegen. Sie entziehen dem Erdreich mehrheitlich jene Wärme, die durch Sonnenstrahlung und Regen eingetragen wird. Bei diesem Verfahren sollte ein Frostschutzgemisch als Wärmeträger eingesetzt werden.

Detaillierte Informationen zur Planung von Erdwärmeregister-WP liefert das [WP-Handbuch]. Hier einige **Planungshinweise**:

- Erdwärmeregister können bewilligungspflichtig sein; zuständig sind die Kantone.
- Die maximale Entzugsleistung (Kälteleistung) bei guten Bodenverhältnissen beträgt pro m² Erdregisterfläche rund 25 bis 30 W oder etwa 60 kWh während einer Heizperiode. Bei schlechtem, also trockenem Boden liegen die Werte bei 10 bis 15 W/m².

- Bei der Eindeckung des Erdwärmeregisters muss das System unter Druck stehen, um allfällige Beschädigungen zu erkennen. Steine, Bauschutt und ähnliches eignen sich nicht zum Überdecken.
- Bei Erdwärmeregistern kann es jahreszeitlich zu Erdbewegungen kommen, wenn diese vereisen.
- Erdregister vor Wurzelwuchs schützen (Bepflanzung, Bäume).

Für Erdwärmesonden und Erdwärmeregister gibt es folgende **Auslegungshinweise**: Um in der Vorprojektphase die Erdwärmesondentiefen oder die Erdwärmeregisterflächen abzuschätzen, können die spezifischen Entzugsleistungen \dot{q}_{KM} in Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 berücksichtigt werden. Diese Werte wurden aus unterschiedlichen Literaturquellen zusammengetragen. Die allermeisten stimmen mit [SN EN 15450] überein. Die spezifische Entzugsleistung der Erdschichten hängt von der Beschaffenheit des Erdreichs und dessen Wassergehalt ab.

In der Projektierungsphase müssen die relevanten Normen und Richtlinien (für Erdwärmesonden etwa [SIA 384/6], für Erdwärmeregister [VDI 4640-2]) sowie Empfehlungen von Herstellern oder Verbänden, beispielsweise [FWS] berücksichtigt werden.

Störungen im Wärmepumpenbetrieb

Eine Wärmepumpenanlage, die optimal betrieben wird, hat in der Regel keine Störung. Die Anlagen müssen sauber in Betrieb gesetzt und später einer Betriebsoptimierung unterzogen werden. Nur so können ein energieeffizienter Betrieb und dadurch tiefstmögliche Betriebskosten gewährleistet werden. [EnergieSchweiz] thematisiert die energetische Betriebsoptimierung, unter anderem im [BO-Fachbuch]. Kann die Kondensationswärme \dot{Q}_{WP} nicht abgeführt werden, entsteht im Kältemittelkreis ein zu hoher Druck und die WP geht auf **Hochdruckstörung**. Ein Überschreiten der Betriebsgrenze des Kondensationsdruckes wird durch

Untergrund Erdwärmesonden	Spezifische Entzugsleistung \dot{q}_{KM} in W/m
Allgemeine Richtwerte	
Schlechter Untergrund (trockenes Sediment) ($\lambda < 1,5$ W/mK)	20
Normaler Festgesteinsuntergrund und wassergesättigtes Sediment ($1,5 \leq \lambda \leq 3,0$ W/mK)	50
Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit ($\lambda > 3,0$ W/mK)	70
Einzelne Gesteine	
Kies, Sand (trocken)	< 20
Kies, Sand (wasserführend)	55 – 65
Ton, Lehm (feucht)	30 – 40
Kalkstein (massiv)	45 – 60
Sandstein	55 – 65
Saure Magmatite (z. B. Granit)	55 – 70
Basische Magmatite (z. B. Basalt)	35 – 55
Gneis	60 – 70

Tabelle 2.1: Spezifische Entzugsleistungen \dot{q}_{KM} für Erdwärmesonden in Mitteleuropa bei rund 2400 h/a Betriebsdauer; für eine Erstabtschätzung. (Quelle: Planungsanleitung KWT)

Untergrund Erdwärmeregister	Spezifische Entzugsleistung \dot{q}_{KM} in W/m ²
Trockener sandiger Boden	10 – 15
Feuchter sandiger Boden	20 – 25
Trockener lehmiger Boden	20 – 25
Feuchter lehmiger Boden	25 – 30
Grundwasserführender Boden	30 – 35

Tabelle 2.2: Spezifische Entzugsleistungen \dot{q}_{KM} für Erdwärmeregister; für eine Erstabtschätzung. (Quelle: Planungsanleitung KWT)

den Hochdruck-Sicherheitspressostat verhindert. Er schaltet den Verdichter aus und die Wärmepumpe geht ausser Betrieb. Dies kann etwa eintreten, wenn die Verflüssigereintrittstemperatur des Heizwassers zu hoch oder der Durchfluss über den Verflüssiger zu klein ist. Durch einen massiven und raschen Temperaturabfall beim Eintritt des Verflüssigers kann der Kältemitteldruck beim Verflüssiger so stark sinken, dass die WP auf **Niederdruckstörung** gehen kann. Dabei schaltet der Niederdruck-Sicherheitspressostat den Verdichter aus. Das rasche Umstellen von Wassererwärmung auf Heizbetrieb kann eine Niederdruckstörung auslösen.

Hydraulische Einbindung von Wärmepumpen

Um auch im Teillastbetrieb lange Laufzeiten zu erreichen, sollte eine WP modulierend betrieben werden oder eine hydraulische Entkoppelung, in Form eines Speichers oder eines Bypasses, vorgesehen werden. Dies ist zentral für die Lebensdauer der WP.

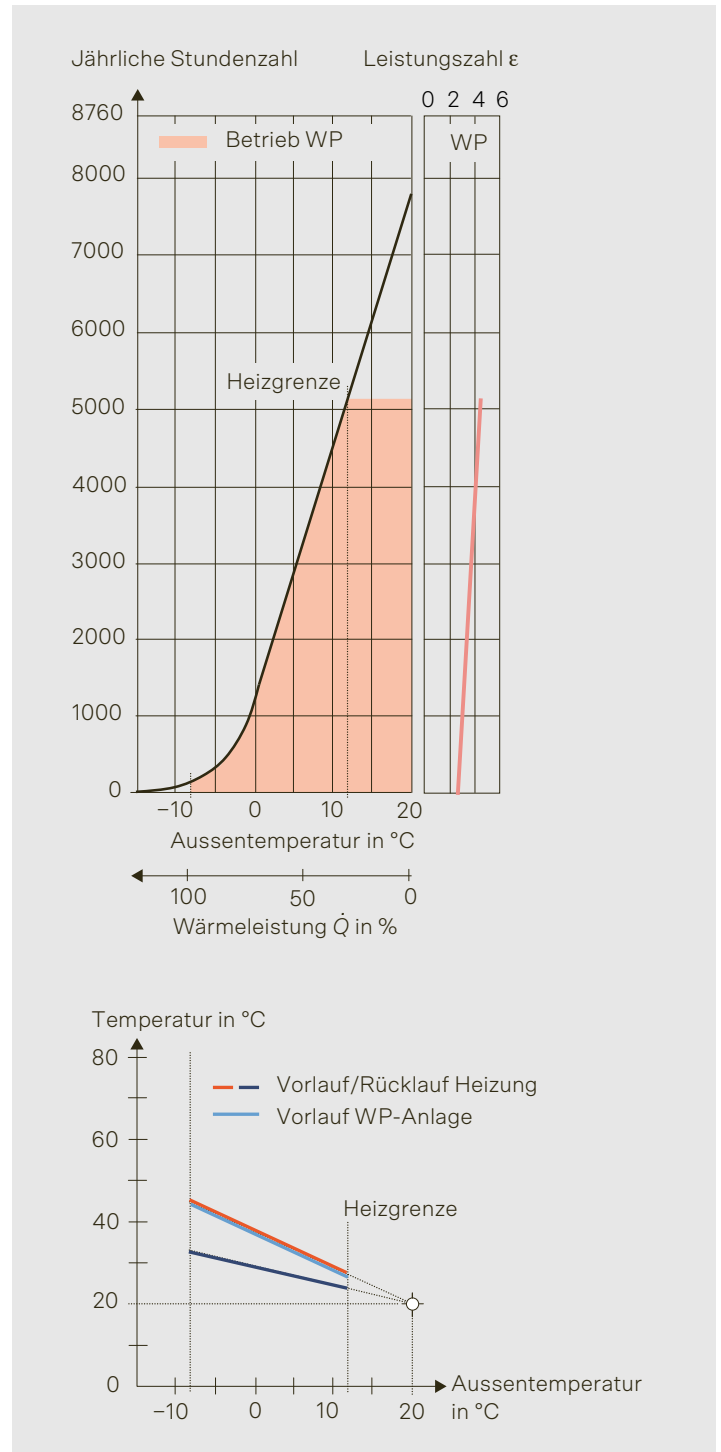
Mit einem Wärmespeicher können unter anderem Sperrzeiten des Elektrizitätsversorgungsunternehmens überbrückt werden. Grundsätzlich ist ein Wärmespeicher notwendig:

- wenn mehrere Heizkreise geregelt sind - hier ist die hydraulische Entkoppelung notwendig, weil die Heizkreise je nach Bedarf gedrosselt werden;
- wenn die Heizungsanlage einen grösseren Thermostatventilanteil als 40 % der beheizten Fläche hat - hier ist die hydraulische Entkoppelung notwendig, weil die Thermostatventile je nach Bedarf schliessen und so den Durchfluss drosseln;
- wenn eine Aussenluft-WP für den Abtauungsvorgang Heizwasser verwendet, hierfür ist ein bestimmtes Heizungswasservolumen erforderlich;
- bei Heizungsanlagen mit geringem Heizungswasservolumen - hier ist ein bestimmtes Heizungswasservolumen zum Vermeiden von unzulässigem Takten erforderlich;

- wenn Sperrzeiten der WP zu überbrücken sind.

Wird die Wärme über eine Fussbodenheizung (FBH) oder ein thermoaktives Bauteilsystem (TABS) abgegeben, dient die speicherwirksame Gebäudemasse ebenfalls als Wärmespeicher. So kann beim Einhalten des minimalen Durch-

Bild 2.29:
Monovalenter Betrieb einer Wärmepumpe.



flusses über den Verflüssiger auf einen Speicher verzichtet werden. Der minimal notwendige Durchfluss muss dabei mit einer hydraulischen Entkoppelung erreicht werden. Dies kann mittels eines Bypasses, einer hydraulischer Weiche oder eines Überströmventils sichergestellt werden. Weiter müssen die Sperrzeiten beachtet werden.

Betriebsarten

Monovalenter Betrieb: Hier stellt die WP in allen möglichen Betriebszuständen die erforderliche Wärmeleistung bereit. Die WP wird auf den maximalen Wärmeleistungsbedarf der Anlage sowie für die maximal notwendige Vorlauf-temperatur ausgelegt.

Bivalenten Betrieb: Hier wird die WP nicht die gesamte Wärmeleistung selbst erbringen. Es wird ein zweiter Wärmeerzeuger benötigt, der die WP je nach Betriebsart unterstützt oder die notwendige Leistung zu 100% selbst erbringt.

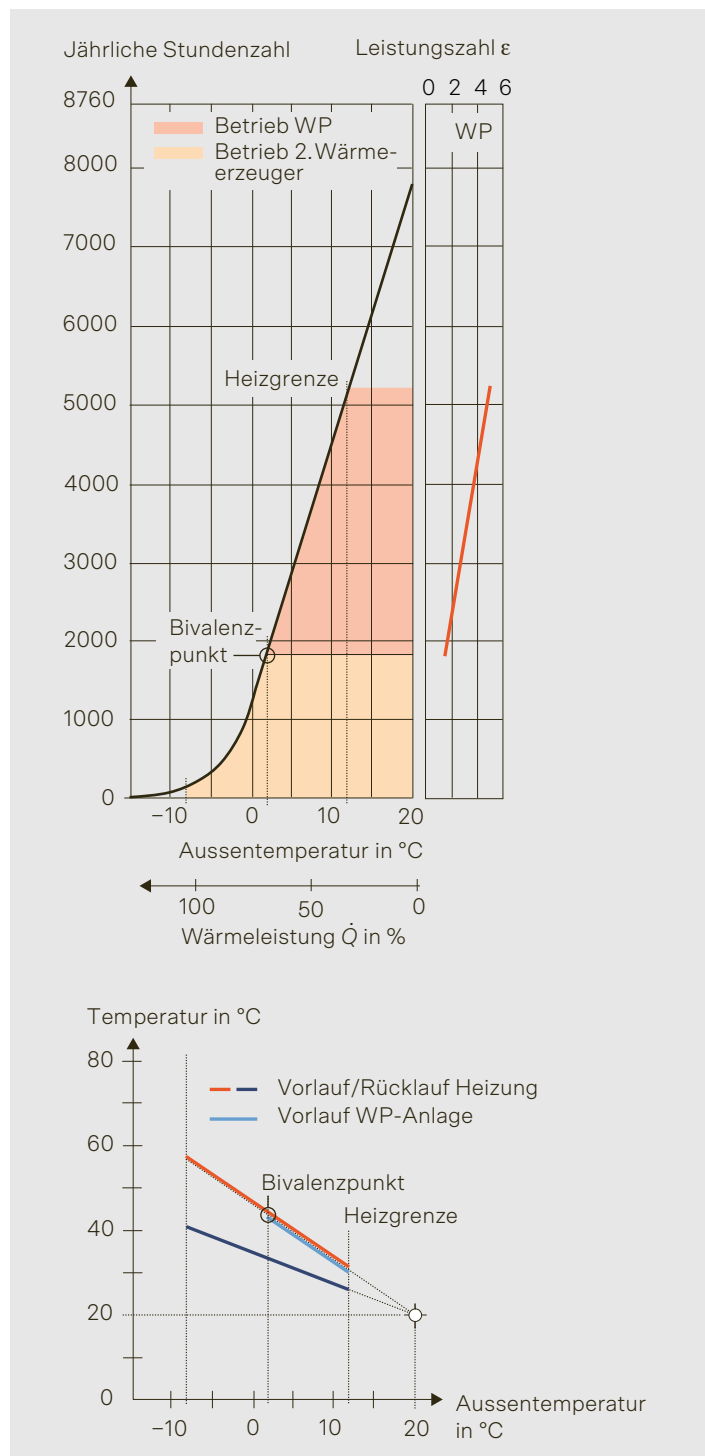
Bivalent-alternativer Betrieb: Hier deckt die WP bis zu einer bestimmten Aussentemperatur – dem sogenannten Bivalenzpunkt – den gesamten Wärmeleistungsbedarf. Wird dieser Bivalenzpunkt unterschritten, übernimmt ein alternativer Wärmeerzeuger (Holz-, Gas- oder Ölheizkessel) die Deckung des Wärmeleistungsbedarfs. Der zweite Wärmeerzeuger muss somit auf den maximalen Wärmeleistungsbedarfs des Gebäudes sowie für die maximal notwendige Vorlauf-temperatur ausgelegt werden. Die WP kann auf den kleineren Wärmeleistungsbedarf beim Bivalenzpunkt ausgelegt werden.

Bivalent-paralleler Betrieb: Hier wird die WP ab dem Bivalenzpunkt von einem zweiten Wärmeerzeuger unterstützt. Somit arbeiten an Tagen mit tiefen Aussentemperaturen beide Wärmeerzeuger parallel und ergänzen sich. Der zugeschaltete Wärmeerzeuger muss nicht auf den maximalen Wärmeleistungsbedarf des Gebäudes ausge-

legt werden. Hingegen ist es wichtig, dass die maximal notwendige Vorlauf-temperatur erreicht werden kann.

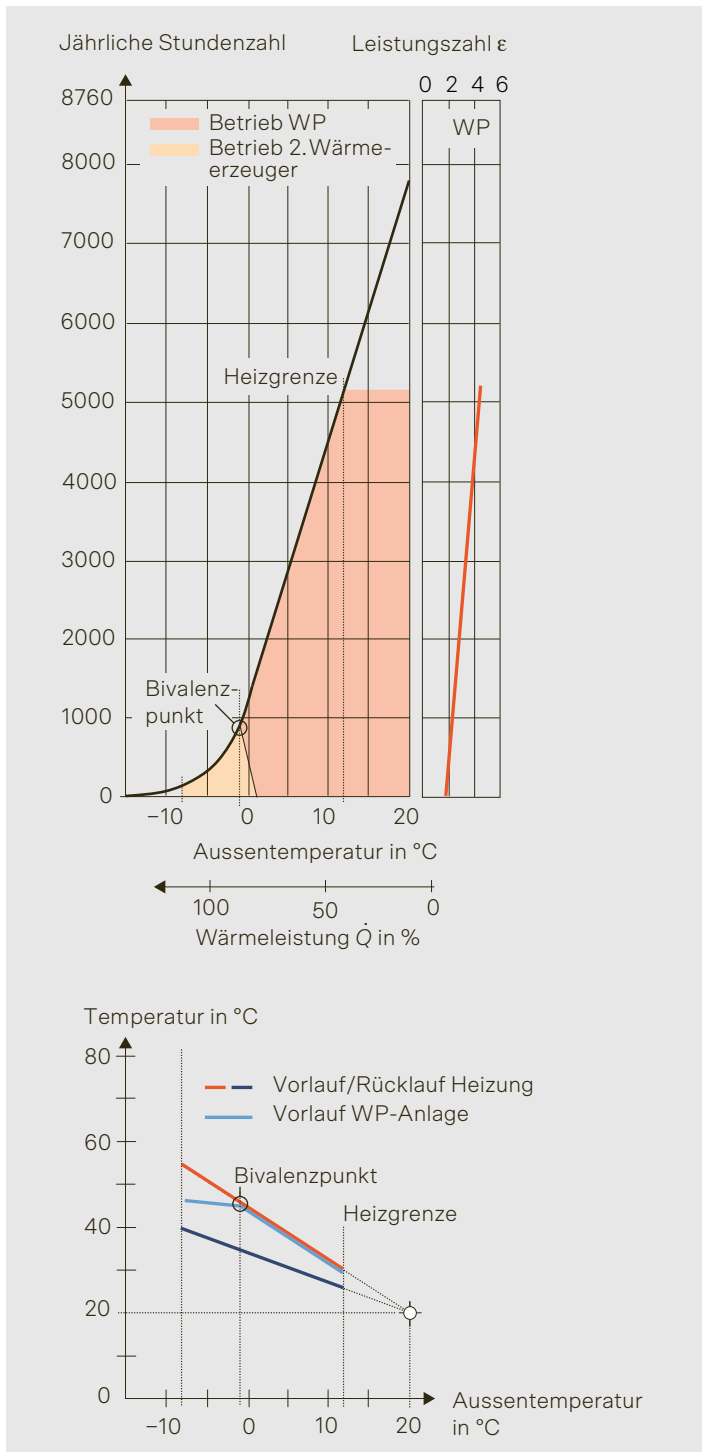
Bivalent-teilparalleler Betrieb: Dabei handelt es sich um eine Zwischenlösung zwischen Alternativ- und Parallelbetrieb. Die WP wird wie im alternativen Betrieb ausgelegt. Sie deckt bis zum Bi-

Bild 2.30:
Bivalent-alternativer
Betrieb einer
Wärmepumpe.



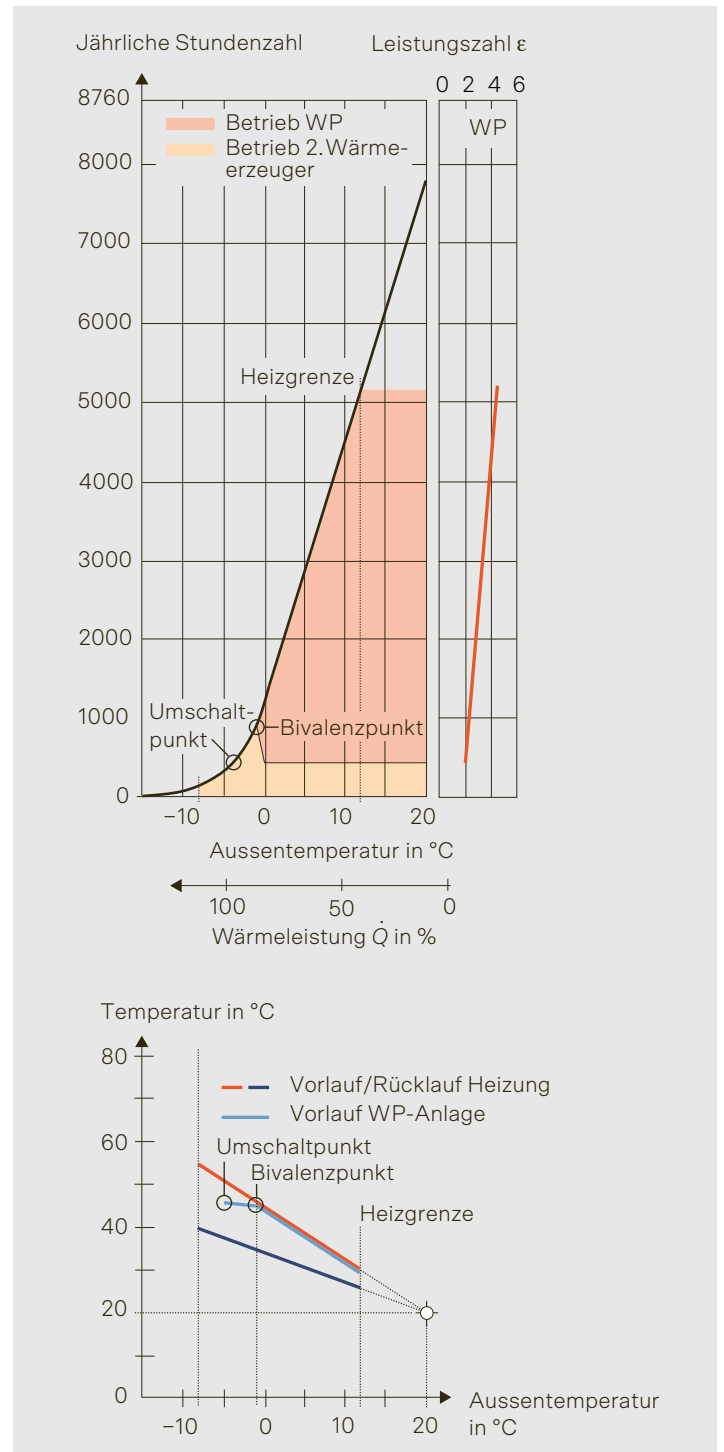
valenzpunkt den gesamten Wärmeleistungsbedarf. Beim Bivalenzpunkt wird der zweite WE zugeschaltet, der ab hier parallel zur WP arbeitet. Fällt die Aussentemperatur noch tiefer, schaltet die WP bei einem definierten Umschalt- punkt ab und der zweite WE deckt den gesamten Wärmeleistungsbedarf bis zur tiefsten Aussentemperatur allein.

Bild 2.31:
Bivalent-paralleler
Betrieb einer
Wärmepumpe.



Der zweite Wärmeerzeuger muss somit auf den maximalen Wärmeleistungsbedarf des Gebäudes ausgelegt werden. Auch hier ist es wichtig, dass die maximal notwendige Vorlauftemperatur erreicht werden kann.

Bild 2.32:
Bivalent-teilparalle-
ler Betrieb einer
Wärmepumpe.



2.4 Praxisbeispiele zu Wärmepumpen

Beispiel 1: WP ohne Energiespeicher

Funktion Heizbetrieb: Die Wärmeabgabe (WA) erfolgt mit einer Fussbodenheizung. Je nach Wärmeleistungsbedarf des Raumes sinkt bzw. steigt die Rücklauf­temperatur ($\theta_{WP,Aus}$). Dementsprechend erfolgt der Temperaturanstieg beim Verflüssigeraustritt ($\theta_{VL,WP}$). Überschreitet die Rücklauf­temperatur ($\theta_{WP,Aus}$) den Sollwert gemäss der Heizkurve, schaltet die WP aus. Der Sollwert der Rücklauf­temperatur ist abhängig von der Aussentemperatur und der ein­gestellten Heizkurve.

Funktion beim Laden des Speicherwassererwärmers: Die Ladung des Speicherwassererwärmers (SPWE) kann als Vorrangschaltung konzipiert werden. Sinkt die SPWE-Temperatur ($\theta_{WW,Ein}$) unter den Sollwert, wird der Wärmeabgabekreis unterbrochen und die WP fährt

auf das notwendige Temperaturniveau hoch, um das Trinkwasser im SPWE zu erwärmen.

Der SPWE wird mittels eines innenliegenden Rohrbündelwärmeübertragers stufenweise in mehreren Durchgängen mit steigender Verflüssigeraustritts­temperatur geladen. Wird der gewünschte Sollwert der Verflüssigereintritts­temperatur ($\theta_{WP,Aus}$) erreicht, geht die Warmwasserladung ausser Betrieb. Da diese Ladevariante zeitintensiv ist und die aktive Wärmeabgabe an die Raumheizung im Ladebetrieb nicht aufrechterhalten werden kann, sollte die Warmwasserladung mit dieser Lade­strategie nur während der Nacht freigegeben werden. Während dieser Zeit erfolgt keine Wärmeabgabe an den Raum und es kann zu einer Absenkung der Raumtemperatur kommen.

	Heizung	Wassererwärmung
Quellen	Umweltwärme/Abwärme und elektrischer Strom/Erddgas	–
Umwandlung	Wärmepumpe	– Innenliegender Wärmeübertrager – Zusatzheizung elektrisch möglich
Speicherung	–	– SPWE (Stufenladung) – Variante: Warmwasserspeicher mit aussenliegendem Wärmeübertrager (Schichtladung)
Bemerkungen	– Monovalenter Betrieb – Ohne Energiespeicher – Witterungsgeführte RL-Temperatur ($\theta_{WP,Aus}$) – Temperaturhub über Verflüssiger zwischen 5 und 10 K – Ungeregelte Heizgruppe	– Vorwärmung SPWE mittels WP; Nachwärmung mittels Elektroheizeinsatzes möglich. – Erwärmung sollte in der Nacht erfolgen.
Standardlösung (SL) bei Wärme­erzeugerersatz in Wohnbauten gemäss [MuKE n]	SL 3: WP mit Erdwärme, Wasser oder Aussenluft Elektrisch angetriebene WP für Heizung und Warmwasser ganzjährig SL 4: WP mit Erdwärme, Wasser oder Aussenluft Mit Erdgas angetriebene WP für Heizung und Warmwasser ganzjährig. Variante: bivalent mit mindestens 50 % des Leistungsbedarfs und einem Wirkungsgrad von mindestens 120 %.	

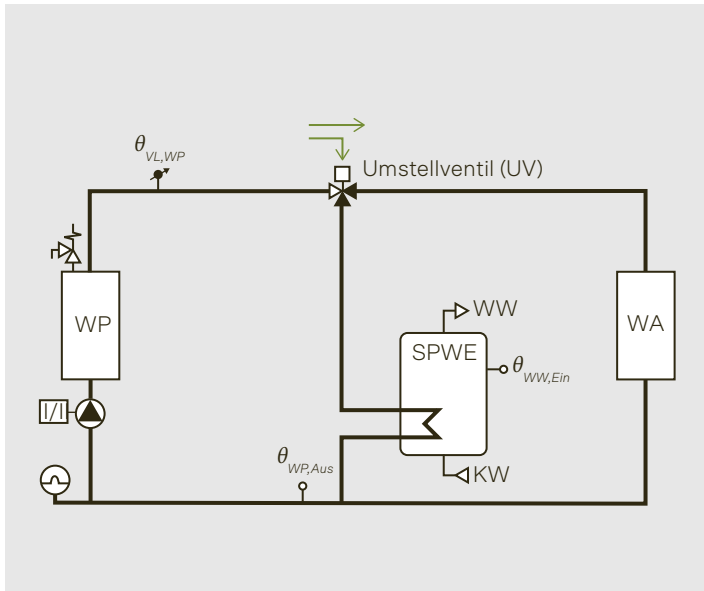
Tabelle 2.3: Spezifikationen zu Beispiel 1 mit Wärmepumpe.

Kritische Elemente:

- Keine hydraulische Entkoppelung zwischen WP und Wärmeabgabekreis
- Minimaler Durchfluss über den Verflüssiger
- Thermostatventile können hydraulische Probleme verursachen; bei Thermostatventilanteil grösser als 40 % muss eine hydraulische Entkoppelung eingebaut werden.
- Umwälzpumpe mit mindestens zwei Betriebspunkten – einen für den Heizbetrieb und einen für die Warmwasserladung; oder zwei Umwälzpumpen einsetzen (je eine in SPWE-Ladekreis und im Wärmeabgabekreis)

Bild 2.33 (links oben): WP mit monovalentem Betrieb; ohne Energiespeicher und einer Heizgruppe.

Bild 2.34 (links unten): Beispiel Regelfunktion – Verlauf der Temperatur im Heizbetrieb mit witterungsgeführter Rücklauftemperatur bei einer nicht leistungsgeregelten WP.



- Notwendiges Heizungswasservolumen und genügend grosse thermische Speichermasse des Gebäudes
- Abtauung des Verdampfers mit Heizungswasser nicht möglich
- Absenkung der Raumtemperatur bei SPWE-Vorrangschaltung möglich
- Hochdruck- und Niederdruckstörung durch Erhöhung der Verflüssigertrittstemperatur am Schluss der SPWE-Ladung respektive beim schnellen Umschalten von der SPWE-Ladung auf Heizbetrieb
- Bei Fussbodenheizungen darf deren maximale Vorlauftemperatur nach einer SPWE-Ladung nicht überschritten werden; Temperaturbegrenzung vorsehen

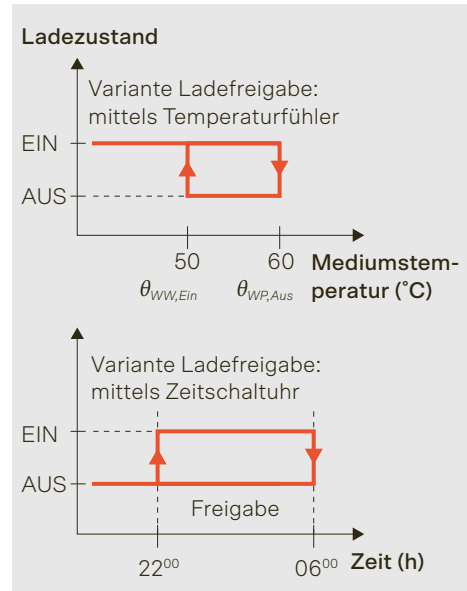
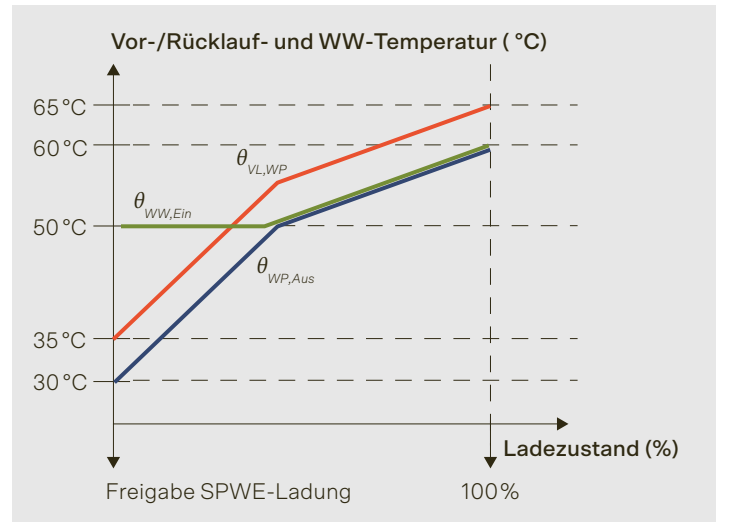
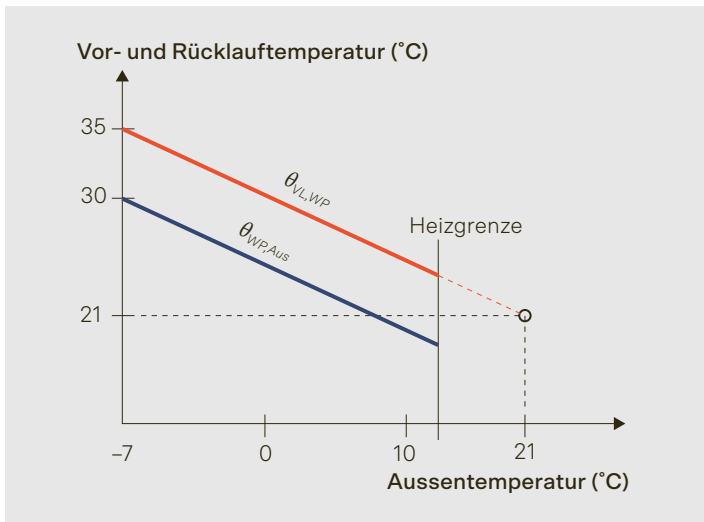


Bild 2.35 (rechts oben): Beispiel Regelfunktion – Freigabe für SPWE-Ladung (temperatur- oder zeitgesteuert).

Bild 2.36 (rechts unten): Beispiel Regelfunktion – SPWE-Ladeverlauf bei konstanter Temperaturdifferenz und konstantem Durchfluss über den Verflüssiger.



- COP sinkt bei zunehmenden Vorlauf-temperaturen.
- Wird die geforderte SPWE-Tempera-tur mit der WP nicht erreicht, sollte eine Zusatzheizung vorgesehen werden.
- Unterbrechung des Wärmeabgabe-systems während SPWE-Ladung

Einsatzgebiet: Kleinanlagen in Einfami-lienhäusern (EFH), Doppel-Einfamilien-häusern (DEFH) und kleinen Mehrfami-lienhäusern (MFH) mit einer Heizgruppe

Beispiel 2: WP mit Energiespeicher

Funktion im Heizbetrieb: Unterschreitet die Energiespeichertemperatur ($\theta_{WA, Ein}$) den geforderten Sollwert, gehen die Wärmepumpe und die Umwälzpumpe (P_{WP}) in Betrieb. Die Energiespeicher-temperatur hängt von der höchsten Vor-lauf-temperatur ($\theta_{VL,x}$) ab, die von der Heizgruppe (WA_x) gefordert wird. Diese kann abhängig sein von der Aussen-temperatur und der definierten Heizkur-ve – der sogenannten «witterungsge-führten Vorlauf-temperaturregelung». Die Umwälzpumpe (P_{WP}) fördert das Heizungswasser in der ersten Stufe über das 3-Weg-Umstellventil (UV) in der Stellung «Durchgang» zum Energie-speicher (ES), bis dessen Temperatur ($\theta_{WA, Aus}$) den Sollwert erreicht hat.

Funktion beim Laden des Speicherwas-sererwärmers:

Die Ladung des Spei-cherwassererwärmers (SPWE) sollte als Vorrangschaltung konzipiert sein. Dabei würde beim Bedarf der SPWE-Ladung ($\theta_{WW, Ein}$) der Wärmeabgabekreis unter-

Bild 2.37 (links): Beispiel Regelfunk-tion: Freigabe für SPWE-Ladung mit-tels Speicherther-mostat.

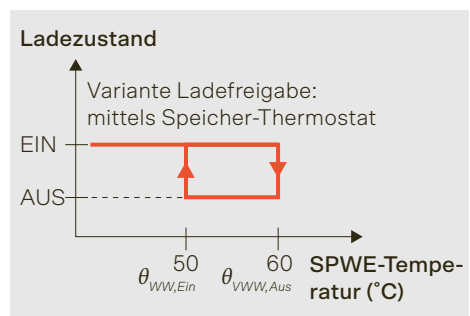
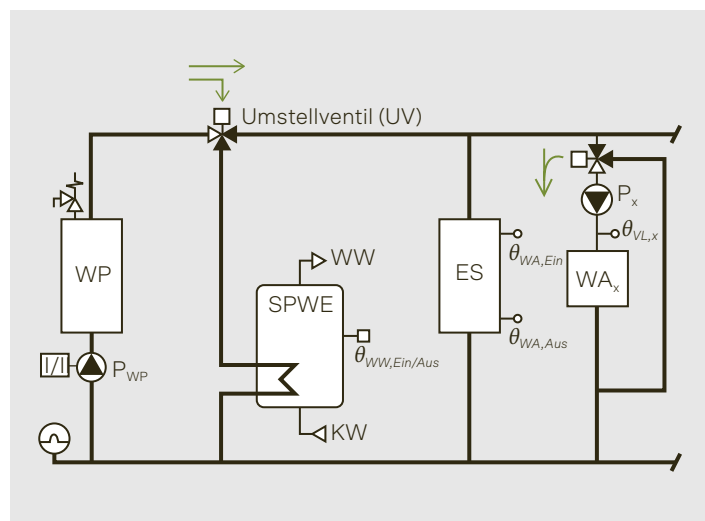


Bild 2.38 (unten): WP mit monovalen-tem Betrieb, Ener-giespeicher (ES) und mehreren Heizkrei-sen (HK).
WA_x: Heizgruppe.



brochen (Stellung 3-Weg-Umstellventil auf «Abzweig»). Die WP fährt auf das notwendige Temperaturniveau hoch, bis die geforderte Warmwassertemperatur am Thermostat ($\theta_{WW,Aus}$) erreicht ist.

Kritische Elemente:

- Minimaler Durchfluss über Verflüssiger
- Umwälzpumpe (P_{WP}) mit mindestens 2 Betriebspunkten – einen für den Heizbetrieb und für Warmwasserladung oder zwei Umwälzpumpen einsetzen (je eine Pumpe im SPWE-Ladekreis und im Heizkreis)
- Speicherkapazität des Gebäudes bei einer SPWE-Vorrangschaltung und Nachtabenkung beachten
- Absenkung der Raumtemperatur bei SPWE-Vorrangschaltung möglich
- SPWE wird in Stufen geladen, somit zeitintensiv
- Wird die geforderte SPWE-Temperatur mit der WP nicht erreicht, sollte eine Zusatzheizung vorgesehen werden.

- COP sinkt bei zunehmenden Vorlauf-temperaturen.
- Hochdruckdruckstörung durch Erhöhung der Verflüssigereintrittstemperatur am Schluss der SPWE-Ladung

Einsatzgebiet:

- EFH und kleinere MFH (bei Kleinanlagen ist ein alternativer Betrieb von Warmwasserladung und Wärmeabgabe möglich)
- Grössere Wohnbauten, Gewerbe- und Industriebauten (Warmwasserladung und Wärmeabgabe parallel betreiben)

	Heizung	Wassererwärmung
Quellen	Umweltwärme/Abwärme und elektrischer Strom/Erdgas	-
Umwandlung	Wärmepumpe	- Innenliegender Wärmeübertrager - Zusatzheizung elektrisch möglich
Speicherung	Energiespeicher (technischer Speicher, Energie-Wärmespeicher, hydraulische Weiche)	- SPWE (Stufenladung) - Variante: WWSP mit ausserliegendem Wärmeübertrager (Schichtladung)
Bemerkungen	- Monovalenter Betrieb - Energiespeicher kann das Wärmeabgabesystem während der SPWE-Ladung gleichzeitig versorgen - Witterungsgeführte VL-Temperaturregelung des Primärkreises und der Heizgruppe (WA_x)	- Vorwärmung SPWE mittels WP; Nachwärmung mittels Elektroheizeinsatzes möglich - Ein/Aus-Befehl mittels Thermostats oder Ein- und Aus-Fühlers
Standardlösung (SL) bei Wärmeerzeugerersatz in Wohnbauten gemäss [MuKEN]	<p>SL 3: WP mit Erdwärme, Wasser oder Aussenluft Elektrisch angetriebene WP für Heizung und Warmwasser ganzjährig</p> <p>SL 4: WP mit Erdwärme, Wasser oder Aussenluft Mit Erdgas angetriebene WP für Heizung und Warmwasser ganzjährig. Variante: bivalent mit mindestens 50 % des Leistungsbedarfs und mindestens 120 % Wirkungsgrad .</p>	

Tabelle 2.4:
Spezifikationen zu Beispiel 2 mit Wärmepumpe.

Beispiel 3: WP mit Kombispeicher

Funktion im Heizbetrieb: Wird die Speichertemperatur ($\theta_{WA, Ein}$) im Bereitschaftsvolumen «Heizung» unterschritten, schalten die Wärmepumpe und die ungerichtete Umwälzpumpe (P_1) ein. Der untere Teil des Kombispeichers wird auf die geforderte Temperatur geladen. Bei der Variante mit zwei getrennten Ladekreisen (Bild 2.39) schaltet das 3-Weg-Umstellventil (UV) auf «Durchgang». Der Sollwert der Energiespeichertemperatur kann witterungsgeführt werden. Die Wärmeerzeuger-Vorlauftemperatur entspricht der höchsten Vorlauftemperatur ($\theta_{VL,x}$) der Heizgruppen. Der Kombispeicher wird solange geladen, bis der Fühler ($\theta_{WA, Aus}$) den Sollwert erreicht hat.

Funktion beim Laden des oberen Speicherbereichs mit zwei Ladekreisen: Sobald die Warmwasserladung anspricht ($\theta_{WW, Ein}$), fahren der Wärmeerzeuger und die geregelte Umwälzpumpe (P_2) hoch. Das 3-Weg-Umstellventil (UV)

schaltet auf «Umlenkung». Der Wärmeerzeuger erwärmt das Heizungswasser auf die notwendige Vorlauftemperatur ($\theta_{VL, WW}$), um die geforderte Warmwassertemperatur (θ_{WW}) zu erreichen. Das Bereitschaftsvolumen «Warmwasser» wird geladen, bis die Solltemperatur ($\theta_{WW, Aus}$) erreicht ist. Das Bereitschaftsvolumen «Heizung» wird während der Warmwasserladung nicht geladen. Die Umwälzpumpe (P_1) wird ausgeschaltet (Bild 2.39).

Funktion beim Laden des oberen Speicherbereichs mit einem Ladekreis:

Wird im Bereitschaftsvolumen «Warmwasser» die geforderte Speichertemperatur ($\theta_{WW, Ein}$) unterschritten, fahren der Wärmeerzeuger und die geregelte Umwälzpumpe (P_1) auf die 2. Stufe hoch. Das erwärmte Heizungswasser wird impulsarm im mittleren Bereich des Kombispeichers zurückgeführt und schichtet wegen der geringeren Dichte im oberen Speicherbereich ein, bis die

	Heizung	Wassererwärmung
Quellen	Umweltwärme/Abwärme und elektrischer Strom/Erdgas	–
Umwandlung	Wärmepumpe	– Innenliegender SPWE – Zusatzheizung elektrisch möglich
Speicherung	Energiespeicher (Kombispeicher)	Innenliegender SPWE (Kombispeicher)
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> – Monovalenter Betrieb – Kombispeicher mit Lochblech bei zwei getrennten Ladekreisen – Bei Kombispeicher mit einem Ladekreis geregelte Pumpe vorsehen – Alternative: Temperaturhochhaltung über WP mittels Bypass – Sonnenenergienutzung im Energiespeicher möglich 	Ladung des Bereitschaftsvolumens «Warmwasser»: WP muss auf die geforderte VL-Temperatur hochfahren, um die gewünschte WW-Temperatur zu erreichen.
Standardlösung (SL) bei Wärmeerzeugersatz in Wohnbauten gemäss [MuKEN]	<p>SL 3: WP mit Erdwärme, Wasser oder Aussenluft Elektrisch angetriebene WP für Heizung und Warmwasser ganzjährig</p> <p>SL 4: WP mit Erdwärme, Wasser oder Aussenluft Mit Erdgas angetriebene WP für Heizung und Warmwasser ganzjährig; Variante: bivalent mit mindestens 50 % des Leistungsbedarfs und mindestens 120 % Wirkungsgrad.</p>	

Tabelle 2.5: Spezifikationen zu Beispiel 3 mit Wärmepumpe.

Speichertemperatur ($\theta_{WW,Aus}$) den Sollwert erreicht hat (Bild 2.41).

Kritische Elemente:

- Minimaler Durchfluss über den Verflüssiger – Achtung bei mehrstufiger Umwälzpumpe!
- Wird die geforderte Warmwassertemperatur mit der WP nicht erreicht, muss eine Zusatzheizung, beispielsweise ein Elektroheizeinsatz (vorgesehen werden.
- COP sinkt bei zunehmenden Vorlauftemperaturen.
- Zwei Umwälzpumpen (Bild 2.39) für Heizbetrieb und Warmwasserladung; Alternative: eine mehrstufige Umwälzpumpe mit Umschaltung mittels 3-Weg-Umstellventils im Vorlauf
- Hochdruckdruckstörung durch Erhöhung der Verflüssigereintrittstemperatur am Schluss der SPWE-Ladung

- WP (Bild 2.40) muss die Temperaturdifferenz zwischen RL und VL erbringen.
- SPWE (Bild 2.41) wird in Stufen geladen, das ist zeitintensiv.

Einsatzgebiet:

- Kleinanlagen in EFH und kleineren MFH
- Zusätzliche thermische Solaranlage leicht integrierbar

Bild 2.39: Beispiel Regelfunktion für Anlagen gem. Bild 2.40 – Ladeverlauf des oberen Kombispeicherbereichs.

Bild 2.40: WP im monovalenten Betrieb mit Kombispeicher, der mit zwei getrennten Speicherladekreisen geladen wird.

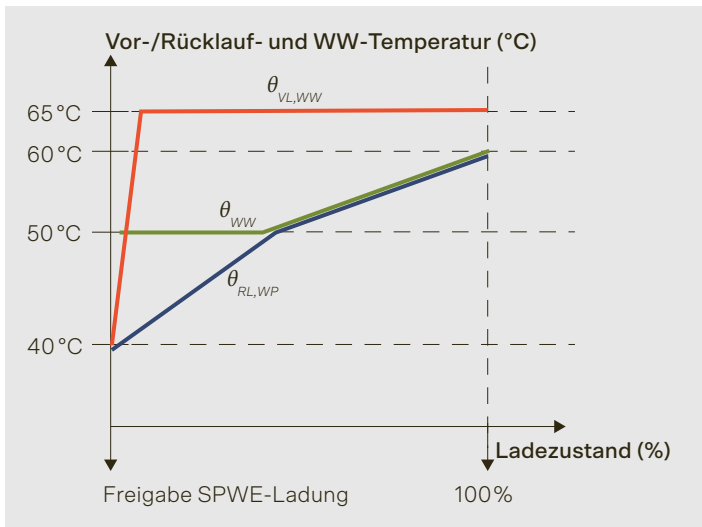
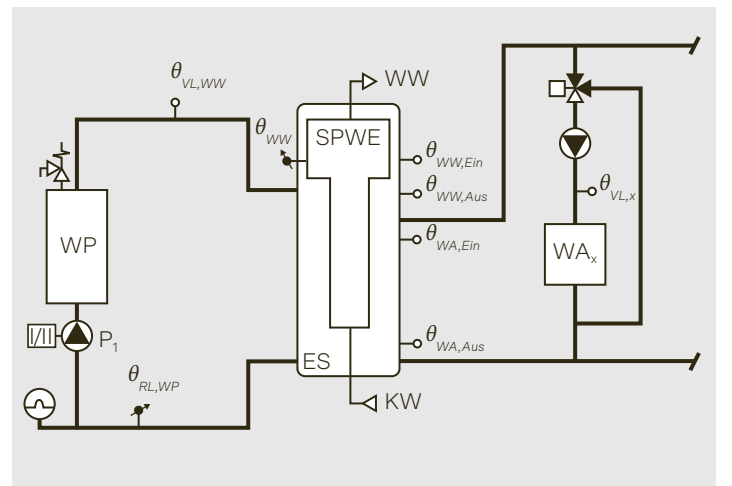
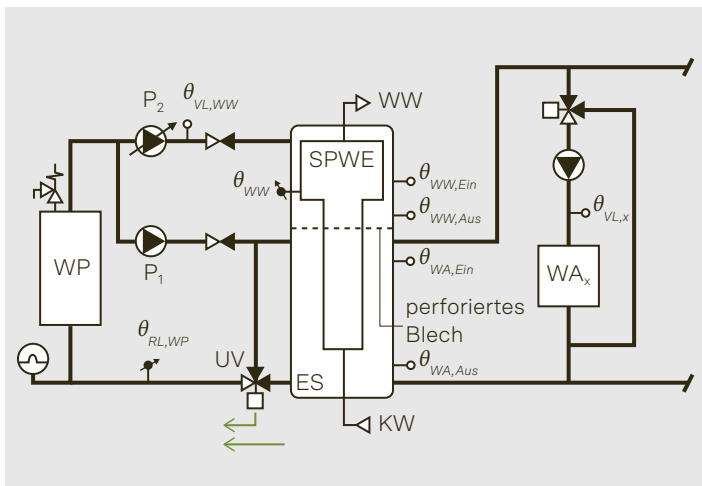


Bild 2.41: WP im monovalenten Betrieb mit Kombispeicher, der mit einem Speicherladekreis geladen wird.



Beispiel 4: WP und Zusatzheizung im bivalent-alternativen Betrieb

Funktion beim Heizbetrieb: Bis zum Bivalenzpunkt deckt die WP den Wärmeleistungsbedarf. Wird bei sinkender Aussentemperatur der Bivalenzpunkt unterschritten, schaltet die WP aus und die Zusatzheizung, beispielsweise ein Holzheizkessel oder ein Gas-Brennwertkessel geht in Betrieb. Die Zusatzheizung deckt den notwendigen Wärmeleistungsbedarf, somit ist die WP nur bei mildem Wetter in Betrieb. Die Regelung der WP basiert auf einer witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung ($\theta_{VL,WP}$).

Beim Umschalten auf einen **Holzheizkessel** (Bild 2.42), wird die Vorlauftemperaturregelung ($\theta_{VL,K}$) unabhängig von den Aussenbedingungen auf einen konstanten Wert eingestellt, weil die Modulation der Leistung je nach Holzenergieträger eingeschränkt ist. Der Energiespeicher (ES) wird nach den beiden Wärmeerzeugern hydraulisch eingebunden.

Beim Umschalten auf einen **Gas-Brennwertkessel** (Bild 2.43), bleibt die Vorlauftemperaturregelung ($\theta_{VL,K}$) witterungsgeführt, weil solche Wärmeerzeu-

ger gut modulieren können. Der Energiespeicher (ES) wird nach dem Gas-Brennwertkessel hydraulisch eingebunden. Die Ladung des Energiespeichers dauert so lange, bis die Solltemperatur beim Aus-Fühler ($\theta_{K,Aus}$) erreicht ist. Damit der Energiespeicher nicht vollständig mit Gas geladen wird, muss der Aus-Fühler im oberen Drittel des Energiespeichers angebracht sein.

Funktion beim Laden des Warmwasserspeichers: Für die Ladung des Warmwasserspeichers (WWSP) müssen hohe Vorlauftemperaturen ($\theta_{VL,WW}$) erzeugt werden. Reicht die Verdampfungsenergie der WP (im Bivalenzpunkt), um hohe Vorlauftemperaturen ($\theta_{VL,WP}$) zu erreichen, wird der Warmwasserladekreis mit der WP betrieben. Die hohen Vorlauftemperaturen können mit einer Beimischschaltung (Bild 2.42) oder variablem Durchfluss (Bild 2.43) über der WP erbracht werden. Wird der Bivalenzpunkt unterschritten, geht die WP ausser Betrieb und die Zusatzheizung liefert den notwendigen Wärmeleistungsbedarf.

	Heizung	Wassererwärmung
Quelle	<ul style="list-style-type: none"> - Umweltwärme/Abwärme und elektrischer Strom - Fester Brennstoff (Holz) - Fossiler Brennstoff (Erdgas, Heizöl) 	-
Umwandlung	<ul style="list-style-type: none"> - Wärmepumpe - Heizkessel 	Aussenliegender Wärmeübertrager
Speicherung	Energiespeicher	WWSP (Schichtladung)
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Bivalent-alternativer Betrieb - Rücklaufhochhaltung beim Holzheizkessel 	Warmwasserladekreis mit geregelter Umwälzpumpe
Standardlösung (SL) bei Wärmeerzeugerersatz in Wohnbauten gemäss [MuKEN]	<p>SL 2: Holzfeuerung als Hauptwärmeerzeugung Holzfeuerung als Hauptwärmeerzeuger und ein Anteil an erneuerbarer Energie für Warmwasser. Wassererwärmung mittels WP oder während der Heizperiode mit Holzfeuerung.</p> <p>SL 10: Grundlast-Wärmeerzeuger erneuerbar mit bivalent betriebem fossilem Spitzenlastkessel Grundlast-WP mit einer Wärmeleistung von mind. 25% der im Auslegungsfall notwendigen Wärmeleistung ergänzt mit fossilem Brennstoff bivalent betriebem Spitzenlast-Wärmeerzeuger für Heizung und Warmwasser ganzjährig.</p>	

Tabelle 2.6: Spezifikationen zu Beispiel 4 mit Wärmepumpe.

Wenn beim Betrieb eines **Holzheizkessels** Vorlauftemperaturen ($\theta_{VL,K}$) über 65°C erzeugt werden, sollte die Temperatur im Warmwasserladekreis mit einer Beimischschaltung reduziert werden. Dies verringert die Kalkausscheidung im WW-Wärmeübertrager. Die Warmwassertemperatur (θ_{WW}) wird mit variablem Durchfluss der Pumpe (P_{WW}) geregelt. Bei einem **Gas-Brennwertkessel** als Zusatzheizung steht das 3-Weg-Umstellventil (UV_2) während der WW-Ladung auf Stellung «Umlenkung». Während des WP-Betriebs steht das 3-Weg-Umstellventil (UV_1) in der Stellung «Durchgang». Bei Umschaltung auf den Gas-Brennwertkessel geht das 3-Weg-Umstellventil (UV_1) auf die Stellung «Umlenkung». Die Warmwassertemperatur (θ_{WW}) wird mittels Leistungsmodulation des Gas-Brennwertkessels geregelt.

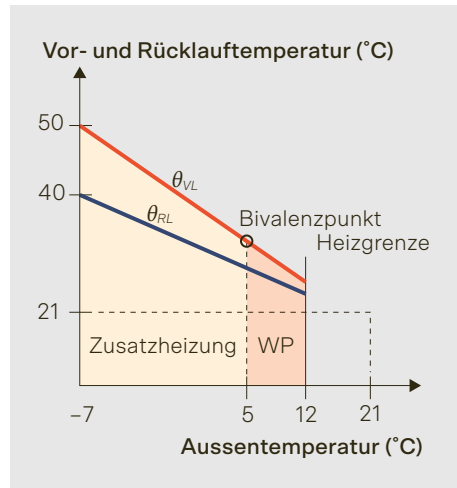


Bild 2.44: Beispiel Regelfunktion – bivalent-alternativer Heizbetrieb mit WP oder Zusatzheizung gemäss Bild 2.42 und Bild 2.43.

Bild 2.42: Wärmepumpe mit Holzheizkessel und Energiespeicher im bivalent-alternativen Betrieb.

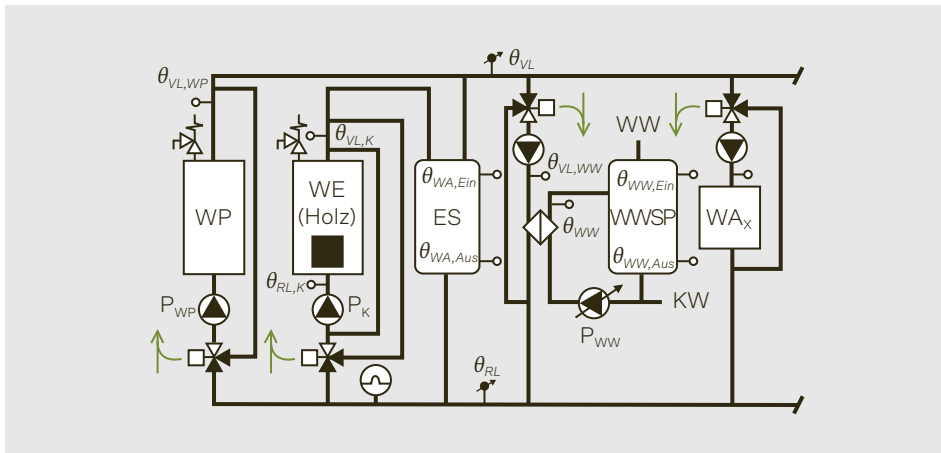
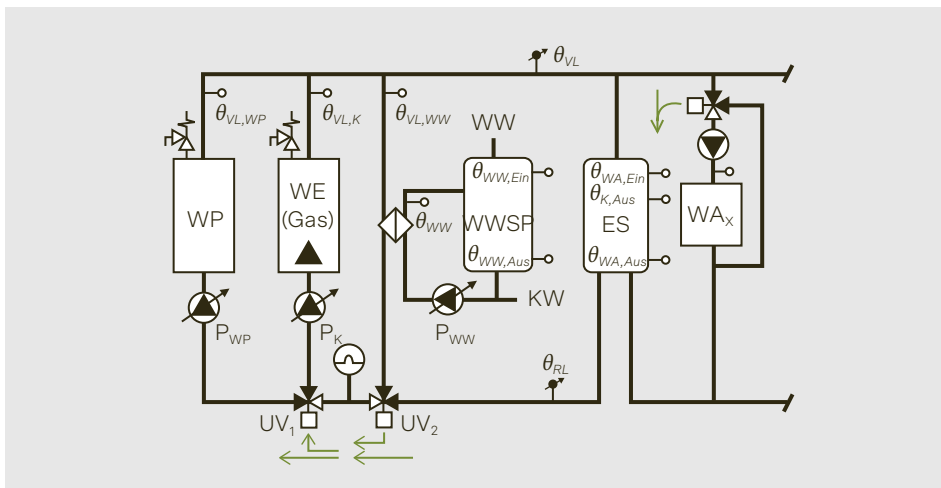


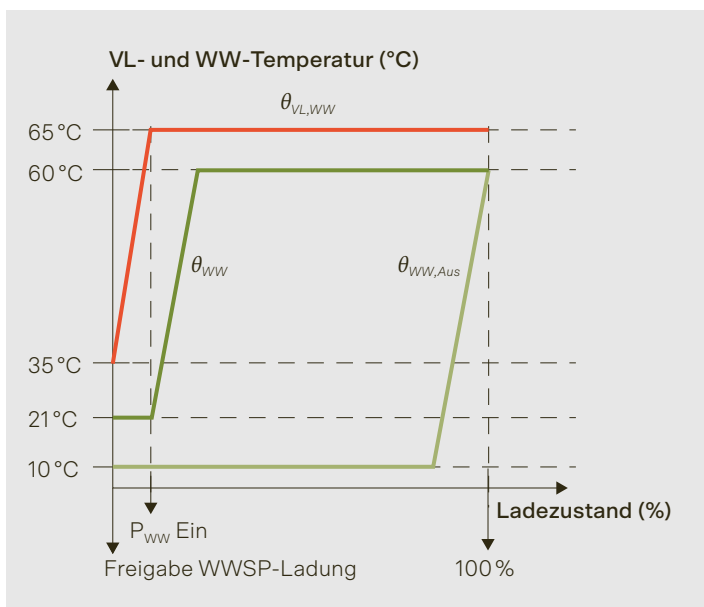
Bild 2.43: Wärmepumpe mit Gas-Brennwertkessel und Energiespeicher im bivalent-alternativen Betrieb.



Kritische Elemente:

- Temperatur- und Leistungsbetrachtung für Umschaltzeitpunkt respektive Bivalenzzeitpunkt
- WP muss den Wärmeleistungsbedarf bis zum Bivalenzzeitpunkt erbringen.
- Auslegung der Zusatzheizung auf den maximalen Wärmeleistungsbedarf
- Nicht kondensierende Holzheizkessel benötigen Rücklaufhochhaltung; damit sind tiefe Rücklauftemperaturen möglich, ohne dass Kondensat im Heizkessel entsteht.
- Temperaturhochhaltung über WP verschlechtert den COP; Alternative: variabler Durchfluss über WP (minimalen Durchfluss über den Verflüssiger berücksichtigen).
- Umwälzpumpe (P_{WP}) mit mindestens zwei Betriebspunkten, je einen für den Heizbetrieb und für die Warmwasserladung bei Temperaturhochhaltung über WP, oder eine geregelte Umwälzpumpe einsetzen.
- Hochdruckstörung durch Erhöhung der Verflüssigereintrittstemperatur am Schluss der WWSP-Ladung
- Nicht optimale Energiespeicherbewirtschaftung bei bivalent-alternativem Betrieb WP und Holzheizkessel

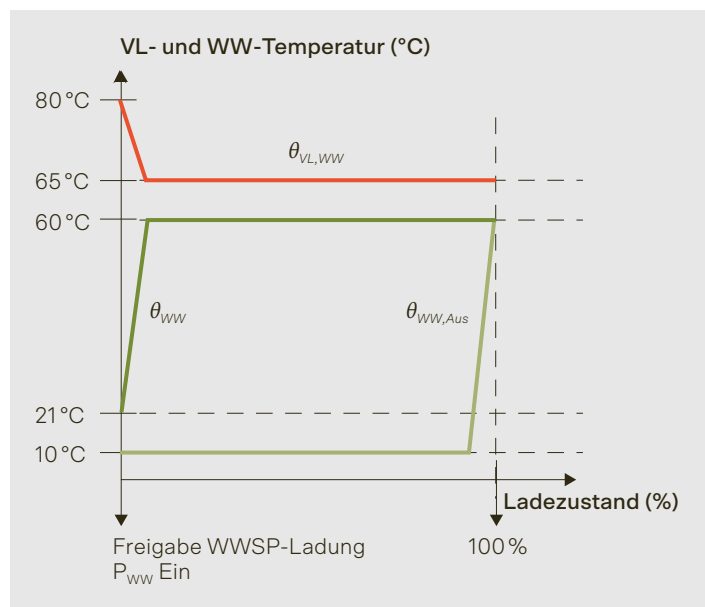
Bild 2.45: Beispiel Regelfunktion – WWSP-Ladeverlauf bei Temperaturhochhaltung über Wärmepumpe gemäss Bild 2.42.



Einsatzgebiet für solche Systeme:

- EFH und MFH, bei denen ein fossiler Wärmeerzeuger nicht ersetzt werden will bzw. kann
- Grossanlagen (Gewerbe- und Industriebauten)

Bild 2.46: Beispiel Regelfunktion – WWSP-Ladeverlauf mit VL-Temperaturregelung über Wärmeübertrager mit Beimischschaltung gemäss Bild 2.42.



Beispiel 5: WP mit Zusatzheizung im bivalent-parallelen bzw. bivalent-teilparallelen Betrieb

Funktion beim bivalent-parallelen Heizbetrieb: Bis zum Bivalenzpunkt deckt die WP den Wärmeleistungsbedarf. Wird bei sinkender Aussentemperatur der Bivalenzpunkt unterschritten, deckt die WP zusammen mit der Zusatzheizung den notwendigen Wärmeleistungsbedarf. Unterhalb des Bivalenzpunkts erbringt die WP ihre maximal mögliche Vorlauftemperatur. Da die WP und die Zusatzheizung in Serie geschaltet sind, erhöht die Zusatzheizung den Vorlauf aus der WP ($\theta_{VL,WP}$) auf die geforderte Vorlauftemperatur ($\theta_{VL,WA}$) (Bild 2.47).

Funktion beim bivalent-teilparallelen Heizbetrieb: Mit Luft-Wasser-WP sollte im bivalent-teilparallelen Betrieb gefahren werden. In diesem Fall schaltet die WP unterhalb einer bestimmten Aussentemperatur ganz aus (Umschalt- punkt). Dann wird der Wärmeleistungs- bedarf von der Zusatzheizung allein ge- deckt. Damit ist gewährleistet, dass die WP immer effizient betrieben werden kann. Zwischen dem Umschalt- punkt

und dem Bivalenzpunkt wird die WP durch die Zusatzheizung im Parallelbe- trieb unterstützt, und sie decken ge- meinsam den notwendigen Wärmeleis- tungsbedarf (Bild 2.48).

Funktion beim Laden des Warmwas- serspeichers: Für die Ladung des Warmwasserspeichers (WWSP) müs- sen hohe Vorlauftemperaturen (θ_{VL}) er- zeugt werden. Falls die WP diese nicht erreicht, unterstützt die Zusatzheizung die WP. Im bivalenten-teilparallelen Be- trieb schaltet die WP beim definierten Umschalt- punkt ganz aus und die Zu- satzheizung erbringt die gesamte Wär- meleistung für das Warmwasser allein.

Kritische Elemente:

- Temperatur- und Leistungsbetrach- tung für Umschalt- punkt respektive Biva- lenzpunkt
- WP muss den Wärmeleistungsbedarf bis zum Bivalenzpunkt erbringen
- Auslegung der Zusatzheizung auf den maximalen Wärmeleistungsbedarf bei bivalent-teilparalleler Betriebsweise
- Brennwertkessel erfordern tiefe Rück- lauftemperaturen. Diese können bei in

	Heizung	Wassererwärmung
Quellen	- Umweltwärme/Abwärme und elektrischer Strom - Fossiler Brennstoff (Erdgas, Heizöl)	-
Umwandlung	- Wärmepumpe - Heizkessel	Aussenliegender Wärmeüber- trager
Speicherung	Energiespeicher	WWSP (Schichtladung)
Bemerkungen	- Bivalent-teilparalleler Be- trieb bei Luft-Wasser-WP - Bivalent-paralleler Betrieb bei anderen Energiequellen für die WP - Schlechte Nutzung der Kon- densationswärme bei in Se- rie geschalteten Wärmeer- zeugern	Warmwasserladekreis mit ge- regelter Umwälzpumpe
Standardlösung (SL) bei Wärme- erzeugetersatz in Wohnbauten ge- mäss [MuKEN]	SL 10: Grundlast-Wärmeerzeuger erneuerbar mit bivalent betriebenen fossilem Spitzenlastkessel Grundlast-WP mit mind. 25% der im Auslegungsfall notwendi- gen Wärmeleistung, ergänzt mit einem bivalent und mit fossi- lem Brennstoff betriebenen Spitzenlast-Wärmeerzeuger für Heizung und Warmwasser ganzjährig.	

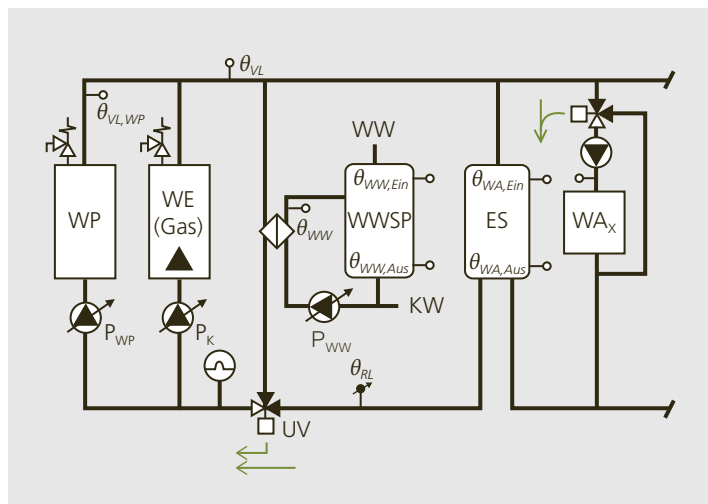
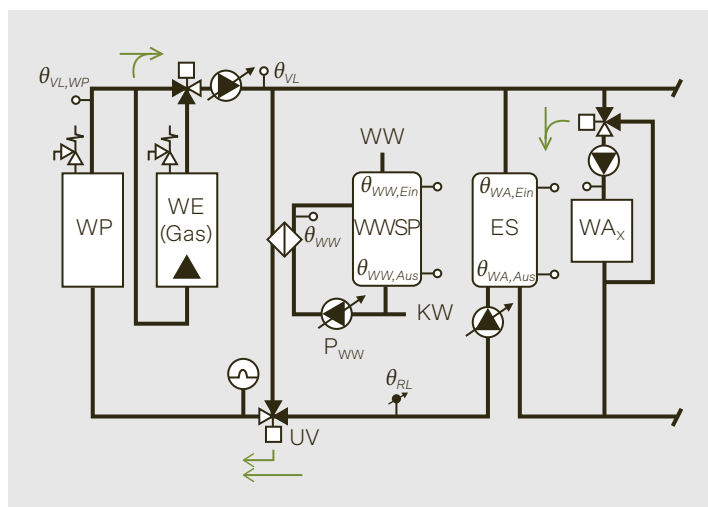
Tabelle 2.7:
Spezifikationen zu
Beispiel 5 mit
Wärmepumpe.

Serie geschalteten Wärmeerzeugern nicht gewährleistet werden.

- Temperaturhochhaltung über WP verschlechtert den COP - Alternative: variabler Durchfluss über WP (minimalen Durchfluss über den Verflüssiger berücksichtigen)
- Umwälzpumpe (P_{WP}) mit mindestens zwei Betriebspunkten (für Heizbetrieb und für Warmwasserladung bei Temperaturhochhaltung über WP; oder eine geregelte Umwälzpumpe einsetzen
- Hochdruckstörung durch Erhöhung der Verflüssigereintrittstemperatur am Schluss der WWSP-Ladung

Bild 2.47: Wärmepumpe mit Gas-Brennwertkessel und Energiespeicher im bivalent-parallelen Betrieb.

Bild 2.48: Wärmepumpe mit Gas-Brennwertkessel und Energiespeicher im bivalent-teilparallelen Betrieb (z. B. bei Luft-Wasser-WP).

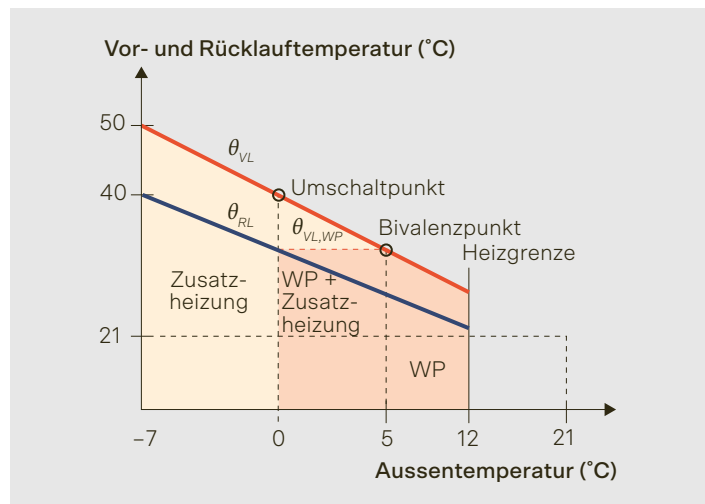
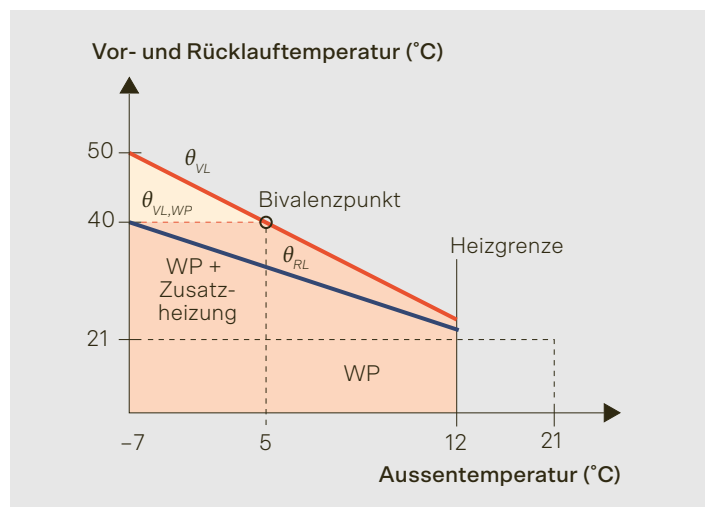


Einsatzgebiet für solche Systeme:

- EFH und MFH, bei denen ein fossiler Wärmeerzeuger nicht ersetzt werden will bzw. kann
- Grossanlagen (Gewerbe- und Industriebauten)

Bild 2.49: Beispiel Regelfunktion - bivalent-paralleler Heizbetrieb mit WP und Zusatzheizung gemäss Bild 2.47.

Bild 2.50: Beispiel Regelfunktion - bivalent-teilparalleler Heizbetrieb mit WP und Zusatzheizung gemäss Bild 2.48.



2.5 Holzheizungen

Heizen mit Holz ist nahezu CO₂-neutral, denn die Verbrennung von Holz setzt gleichviel Kohlendioxid (CO₂) frei, wie die Bäume im Verlauf ihres Wachstums der Atmosphäre entzogen haben. Holz ist ein biogener, das heisst, aus Biomasse gewonnener, Festbrennstoff und zählt somit zu den erneuerbaren Energiequellen. Gemäss [Holzenergie Schweiz] wird unsere Atmosphäre um etwa 3 kg CO₂-Ausstoss entlastet, wenn jedes kg Heizöl durch Holz ersetzt wird.

[EnergieSchweiz] bietet Dimensionierungshilfen für Holzheizungen an. [QM Holzheizwerke] liefert ein Verfahren, um die Qualität in der Konzeption, Planung und Ausführung von Holzheizungsanlagen inklusive Wärmenetz zu sichern. [Holzenergie Schweiz] und [EnergieSchweiz] vergeben Zertifikate und Qualitätssiegel für erfolgreich geprüfte Holzheizungen. Diese Produkte wurden nach den europäischen Normen für feste Brennstoffe geprüft und erreichen die höchste Qualitätsstufe.

Holzbrennstoffe

Stückholz ist nach wie vor ein gebräuchlicher Holzbrennstoff. Wer sich für Stückholz entscheidet, verfügt über genügend Platz zur Lagerung des Brennstoffs und hat meistens eine enge Beziehung zu Wald und Holz. Stückholzöfen müssen von Hand beschickt

werden. Stückholz ist in Form von Rungen und Spalten in Längen von 100 cm, 50 cm, 33 cm oder 25 cm beim örtlichen Forstbetrieb, bei Landwirten oder Forstunternehmungen erhältlich. Stückholz muss trocken sein. Das heisst, dass es ein bis zwei Jahre trocken gelagert werden muss.

Holzchnitzel werden zum Beheizen von grossen Gebäuden und Industriebetrieben sowie für den Betrieb von thermischen Netzen in automatischen Holzchnitzelfeuerungen seit Jahren erfolgreich eingesetzt. Die Qualität der eingesetzten Holzchnitzel ist entscheidend, um einen emissions- und wartungsarmen Betrieb garantieren zu können. Dank enormer technischer Entwicklungen stehen Holzchnitzelheizungen aber auch für Objekte mit kleinem Wärmeleistungsbedarf zur Verfügung. Die kleinsten Kessel liefern eine regelbare Wärmeleistung ab 5 kW.

Pellets sind zylinderförmige, 5 bis 45 mm lange Presskörper aus Sägemehl und Hobelspänen. Sie stammen aus der Holzverarbeitenden Industrie und werden unter hohem Druck in ihre Form gepresst. Dank der homogenen Eigenschaften des Brennstoffs wird in den vollautomatisch betriebenen Pelletheizungen eine sehr effiziente und gleichmässige Verbrennung erreicht, bei der nur wenig Asche anfällt.

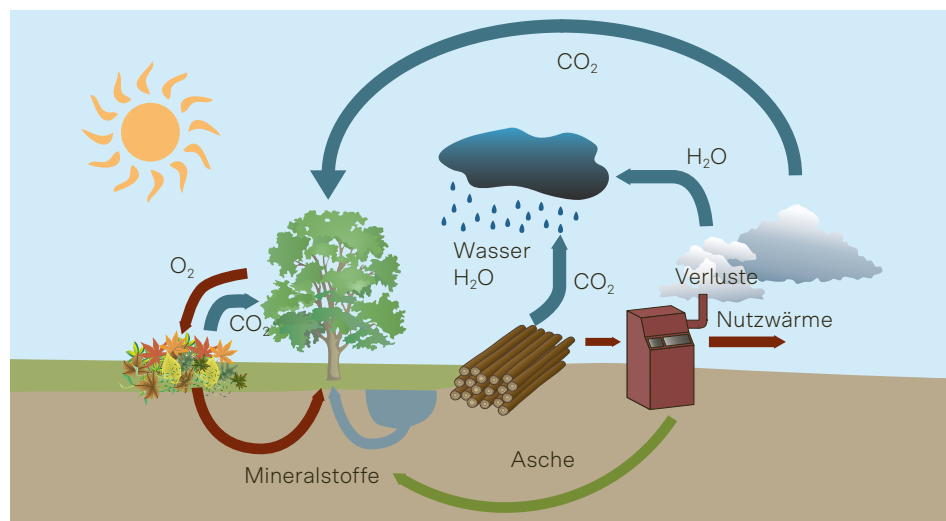


Bild 2.51: Kreislauf der Biomasse.

Die Dichte von Pellets ist je nach Holzart 1,5- bis 2-mal höher als jene von Stückholz. 2 kg Pellets ersetzen 1 l Heizöl – sie benötigen für die Lagerung also nur etwa halb so viel Platz wie Stückholz.

Im Gegensatz zu anderen automatischen Holzcentralheizungen sind Pellet-Heizkessel bereits ab 3 kW regelbarer Leistung erhältlich. Damit eignen sie sich besonders für den Einsatz in Einfamilienhäusern mit niedrigem Energiebedarf.

Holzbricketts sind Presslinge unterschiedlicher Form und Grösse. Sie werden aus trockenen, unbehandelten Holzresten, wie Hobel- und Sägespänen, unter hohem Druck zu gleichmässig grossen und harten Bricketts verpresst. Je nach Ausgangsmaterial haben diese ein unterschiedliches Brandverhalten. So brennen die einen wie ein Scheitholzstück, die anderen glimmen mehr, als dass sie eine Flamme bilden. Generell lässt sich sagen, dass durch die hohe Verdichtung beim Brickettieren das Naturprodukt Holz in etwa das Brennverhalten von Braunkohle erhält. Im Unterschied zur Braunkohle produzieren Holzbricketts beim Abbrand jedoch weniger Russ, Asche und Schwefel. Sie sind also umweltfreundlicher und sauberer. Zudem bleibt die CO₂-Bilanz fast ausgeglichen, weil die Bricketts aus einem nachwachsenden Rohstoff hergestellt werden.

Bricketts haben gegenüber dem klassischen Brennholz einige Vorteile. Beispielsweise haben sie auf das Volumen bezogen einen vielfach höheren Heizwert. Dies bedeutet für die Kundschaft, dass sie für die Lagerung des Holzbrennstoffs viel weniger Platz benötigt. Abhängig von der Qualität des Bricketts, ersetzt eine 1 Tonne Holzbricketts (die klassische Liefermenge) etwa 3 bis 5 Raummeter trockenes Buchenbrennholz. Dabei nimmt die Tonne Holzbricketts lediglich den Platz von rund 1,5 Raummetern ein.



Bild 2.52: Stückholz.
(Foto: Holzenergie Schweiz)



Bild 2.53: Holzschnitzel.
(Foto: Holzenergie Schweiz)



Bild 2.54: Pellets.
(Foto: Holzenergie Schweiz)



Bild 2.55: Holzbricketts.
(Foto: Holzenergie Schweiz)

Holzfeuerungs-systeme

Holzfeuerungs-systeme setzen die im Brennstoff enthaltene Energie in drei Phasen frei:

1. In der **Trocknungsphase** wird das im Holz enthaltene Wasser bei Temperaturen bis zu 150 °C verdampft.
2. Während der **Phase der thermischen Zersetzung** (Pyrolyse) werden die gasförmigen Verbindungen im Holz freigesetzt. Diese Entgasung läuft bei Temperaturen zwischen 150 und 600 °C ab. Nach dieser Phase bleibt Holzkohle zurück.
3. Die **Verbrennungsphase** findet unter Zugabe von Luft (Sauerstoff) und Temperaturen zwischen 400 und bis 1300 °C statt. Hier verbrennen die Holzkohle und die freigesetzten Gase.

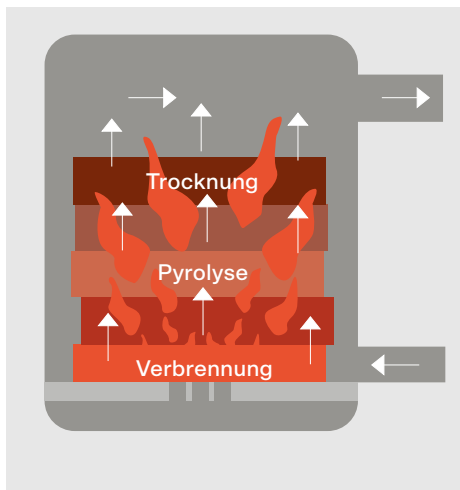


Bild 2.56: Phasen der Holzverbrennung in einem Holzfeuerungs-system.

Hydraulische Einbindung

Mit einem Energiespeicher lässt sich bei geringer Heizlast ein Taktbetrieb verhindern. Dies ist je nach Kesseltechnik zu berücksichtigen. Bei nichtmodulierenden Heizkesseln ist ein Energiespeicher sehr wichtig, da das Takten eine unvollständige Verbrennung und somit höhere Emissionen zur Folge hat. Bei modulierenden Heizkesseln kann die Wärme ohne Energiespeicher verteilt werden. Dann, sollte der Wärmeerzeugerkreis mit einem Bypass vom Wärmeverbraucherkreis hydraulisch entkoppelt werden. Die Hydraulik und die Regelung werden bei solchen Lösungen aber wesentlich anspruchsvoller. Sind der Durchfluss im Kesselkreis und der verfügbare Spielraum bei der Temperatur klein, sollte nie auf einen Energiespeicher verzichtet werden.

Planungshinweise für Stückholz-Heizkessel:

- Bedienkomfort: Hier wird zwischen Standardkessel und Komfortkessel unterschieden. Beim Komfortkessel wird von einmaligem Beschicken pro Tag ausgegangen. Dies hat eine Verdoppelung des Kesselfüllraums gegenüber dem zweimaligen Beschicken beim Standardkessel zur Folge.
- Speichergrösse: Massgebend für den notwendigen Speicherinhalt ist die

Tabelle 2.8: Wohnraumheizung mit Holz in einem Minergie-Gebäude gemäss [Minergie Holz].

Funktion	Ganzhausheizung		Ergänzende Heizung		
	Ohne wasserführenden Wärmeübertrager	Mit wasserführendem Wärmeübertrager	Zur Spitzendeckung	Zweitheizung	Ambientefeu-er
Der Wärmeerzeuger deckt:	Gesamten Heizwärmebedarf	Gesamten Bedarf für Heizwärme und Wassererwärmung	Teilweise den Bedarf an kalten Tagen, zusätzlich zum Hauptwärmeerzeuger	Bedarf im Störfall oder in der Übergangszeit	In der Regel keine Heizfunktion, dient dem Ambiente
Brennstoff Stückholz	Speicherofen mit und ohne Satellit	Ofen mit wasserführendem Wärmeübertrager	Speicherofen, Speichercheminée		Cheminéeofen, Cheminée (geschlossen)
Brennstoff Pellets	Pelletfeuerung	Pelletfeuerung mit wasserführendem Wärmeübertrager	Pelletfeuerung		
Geeigneter Einsatz	Besonders geeignet für Minergie-P-, fallweise auch für Minergie- und Minergie-A-Gebäude		Alle Minergie-Gebäude in Kombination mit einer Wärmepumpe (bei Erneuerungen auch fossile Heizungen)		

kleinste Wärmeleistung, bei der die Emissionsanforderungen erfüllt sind. Das minimale Speichervolumen kann gemäss [SN EN 303-5] bestimmt werden.

Planungshinweise für Holzschnitzel-Heizkessel:

- Geeignet für Grossanlagen: Die kleinsten Anlagen haben etwa 5 kW Kesselleistung.
- Kesselleistung: Die erforderliche Kesselleistung entspricht der Wärmeerzeugerleistung $\Phi_{gen,out}$ gemäss [SIA 384/1].
- Modulierende Heizkessel: Stufenlose Leistungsregelung im Bereich von 30 bis 100% der Nennleistung.
- Wärmespeicher: Bei modulierenden Holzschnitzelfeuerungen ist ein Speicher für einen optimalen Betrieb nicht zwingend.
- Brennstofflagerung: Holzschnitzel müssen trocken gelagert werden. Feuerwiderstände für Wände, Türen und Decken gemäss [VKF-BSV] müssen eingehalten sein. Die Sicherheitsmassnahmen für das Brennstofflager werden nach Checklisten der [Suva] bestimmt. Das Raumvolumen kann gemäss [SIA 384/1] ermittelt werden.
- Qualität des Brennstoffs: Sie gilt es bei der Dimensionierung der Kesselleistung zu berücksichtigen.

Planungshinweise für Pelletheizkessel:

- Einsatzbereich: Pelletfeuerungen sind ab etwa 3 kW Kesselnennleistung einsetzbar – also auch in kleinen Gebäuden wie EFH.
- Kesselleistung: Die erforderliche Kesselleistung entspricht der Wärmeerzeugerleistung $\Phi_{gen,out}$ gemäss [SIA 384/1].
- Modulierende Heizkessel: stufenlose Leistungsregelung zwischen 30 und 100% der Nennleistung.
- Wärmespeicher: Bei modulierenden Pelletfeuerungen ist ein Speicher für einen optimalen Betrieb nicht zwingend.
- Brennstofflagerung: Pellets müssen trocken gelagert werden. Feuerwiderstände für Wände, Türen und Decken müssen gemäss [VKF-BSV] definiert

werden. Die Sicherheitsmassnahmen für das Brennstofflager werden nach Checklisten der [Suva] bestimmt. Das Volumen des Lagerraums kann gemäss [SIA 384/1] ermittelt werden. Die natürliche oder mechanische Belüftung des Lagerraums wird nach [SWKI HE200-01] dimensioniert. Die Zufahrt für das Tankfahrzeug muss gewährleistet sein. Damit die Füllschlauchlänge kurz gehalten werden kann, sollte der Lagerraum an einer Aussenwand im Zufahrtsbereich platziert werden; die maximale Füllschlauchlänge liegt bei 30 m. Der Heizraum wird angrenzend an den Lagerraum platziert. Automatische Transportschnecken führen die Pellets dem Heizkessel zu; mit pneumatischer Förderung sind bis zu 20 m möglich.

- Qualität des Brennstoffs: Der Einsatz von zertifizierten Produkten ist wichtig. Mit dem Qualitätslabel ENplus wird garantiert, dass die gesamte Bereitstellungskette von der Herstellung bis zur Anlieferung nach einem normierten Zertifizierungsprogramm erfolgt.

2.6 Praxisbeispiel zu Holzheizungen

Holzheizungen mit oder ohne Energiespeicher

Funktion beim Heizbetrieb für Heizkessel mit Bypass: Sinkt der Wärmeleistungsbedarf, kann die von der Wärmeerzeugung abzugebende Leistung ebenfalls reduziert werden (Bild 2.57). Dies erfordert einen modulierenden Holzheizkessel. Mit dem Bypass werden der Wärmeerzeugerkreis und Wärmeverbraucherkreis hydraulisch voneinander entkoppelt. Mit der Rücklaufhochhaltung wird die Kesseleintrittstemperatur auf einen vorgegebenen Sollwert mit dem 3-Weg-Regelventil geregelt. Weiter kann die Kesselaustrittstemperatur ($\theta_{V_{L,K}}$) auf einem definierten Sollwert gehalten werden, der mit dem Leistungsregler des Heizkessels angesteuert wird. Ist die Temperaturdifferenz zwischen Kesseleintritt ($\theta_{R_{L,K}}$) und Kesselaustritt ($\theta_{V_{L,K}}$) konstant, muss bei einem modulierenden Holzheizkessel eine geregelte Pumpe (P_K) vorgesehen werden. Die Heizgruppen können über eine definierte Heizkurve geregelt werden.

Funktion beim Heizbetrieb für Heizkessel mit Energiespeicher: Mit Temperaturfühler im Energiespeicher (ES) kann der Speicherladezustand ermittelt werden (Bild 2.58). Fällt die Speichertemperatur beim Ein-Fühler ($\theta_{WV,Ein}$) unter einen definierten Wert, geht der Holzheizkessel in Betrieb. Der Wärmeeintrag in den ES kann mit konstanter Kesselleistung erfolgen. Wird hingegen ein modulierender Holzheizkessel eingesetzt, kann die Kesselleistung anhand mehrerer Speichertemperaturfühler geregelt werden. Je nach Ladezustand des ES regelt der Holzheizkessel die Leistung. Bei nicht modulierenden Holzheizkesseln wird eine unregelte Pumpe (P_K) vorgesehen. Wird hingegen die Leistung geregelt und die Temperaturdifferenz zwischen Kesseleintritt ($\theta_{R_{L,K}}$) und Kesselaustritt ($\theta_{V_{L,K}}$) konstant gehalten, muss die Pumpe (P_K) geregelt laufen. Die Heizgruppen können über eine definierte Heizkurve geregelt werden.

Funktion beim Laden des Warmwasserspeichers: Wird im Warmwasserspeicher (WWSP) die Solltemperatur ($\theta_{WV,Ein}$) unterschritten, geht der Warmwasserladekreis in Betrieb. Die notwendige Leistung für die Wassererwärmung

	Heizung	Wassererwärmung
Quelle	Fester Brennstoff (Holz)	–
Umwandlung	Heizkessel	Aussenliegender Wärmeübertrager
Speicherung	– Bypass (Bild 2.57) – Energiespeicher (Bild 2.58)	WWSP (Schichtladung)
Bemerkungen	– Monovalenter Betrieb – Hydraulische Entkopplung zwischen Wärmeerzeugerkreis und Wärmeverbraucherkreis (Bypass oder Energiespeicher) – Rücklaufhochhaltung beim Holzheizkessel – Zusätzliche Sonnenenergienutzung empfehlenswert	Warmwasserladekreis mit geregelter Umwälzpumpe
Standardlösung (SL) bei Wärmeerzeugersatz in Wohnbauten gemäss [MuKE]	SL 2: Holzfeuerung als Hauptwärmeerzeugung Holzfeuerung als Hauptwärmeerzeuger und ein Anteil an erneuerbarer Energie für Warmwasser. Wassererwärmung mittels WP oder während der Heizperiode mit Holzfeuerung.	

Tabelle 2.9:
Spezifikationen zum
Praxisbeispiel mit
Holzheizung.

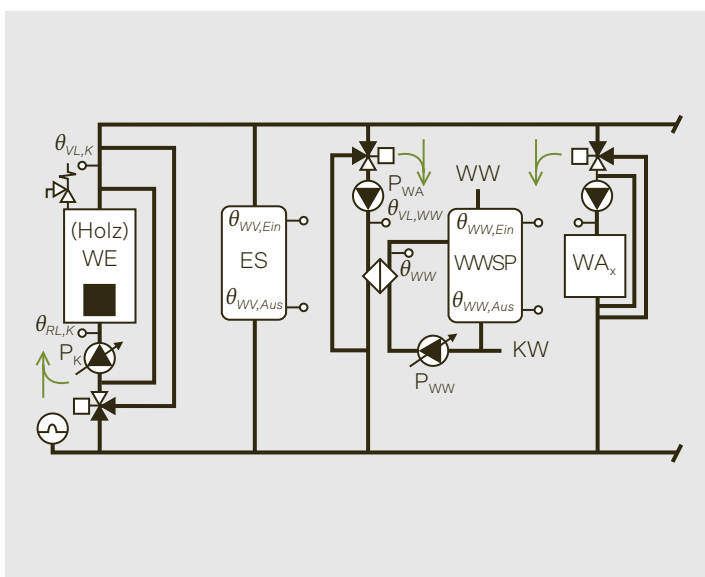
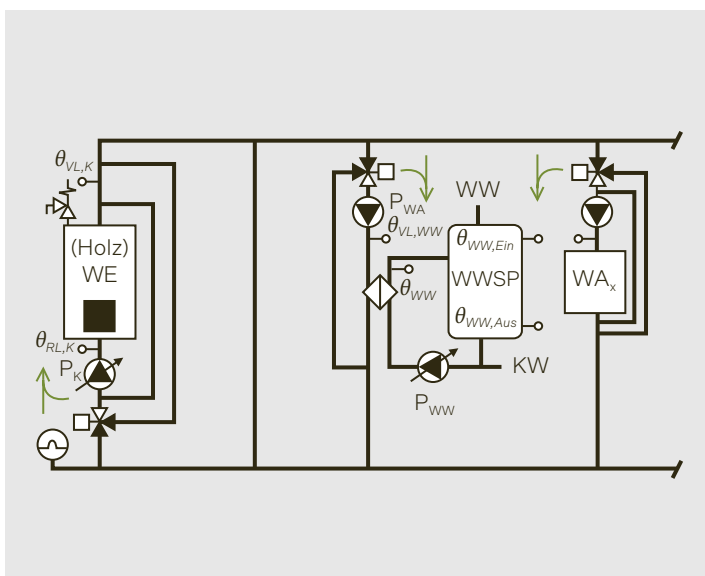
wird dem Energiespeicher (ES) entnommen oder direkt vom Holzheizkessel erbracht. Die Ladung dauert so lange, bis die Solltemperatur beim Aus-Fühler ($\theta_{WW,Aus}$) erreicht ist.

Kritische Elemente:

- Kondensatbildung im Holzheizkessel bei nicht kondensierenden Heizkesseln
- Kesselrücklaufhochhaltung von mindestens 60 °C vorsehen
- Anlaufzeit, bis der Verbrennungsprozess die notwendige Leistung respektive die geforderte Vorlauftemperatur erbringt

Bild 2.57: Holzheizkessel mit Bypass ohne Energiespeicher, mit Rücklaufhochhaltung.

Bild 2.58: Holzheizkessel mit Energiespeicher mit Rücklaufhochhaltung.



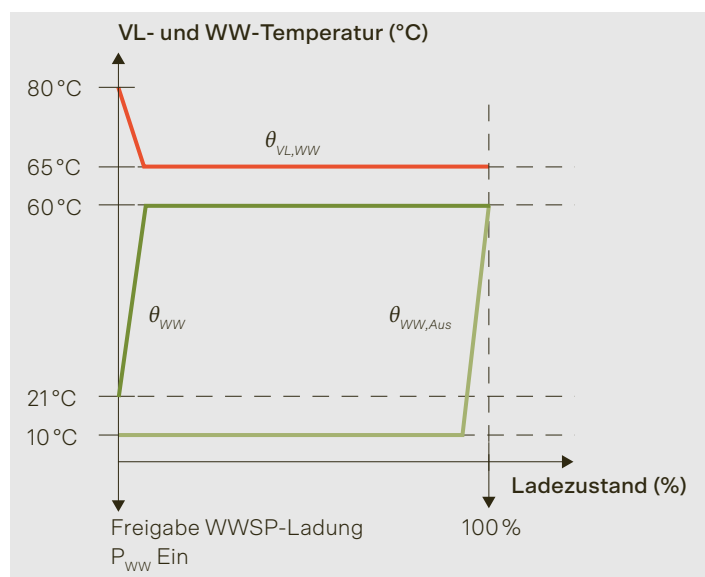
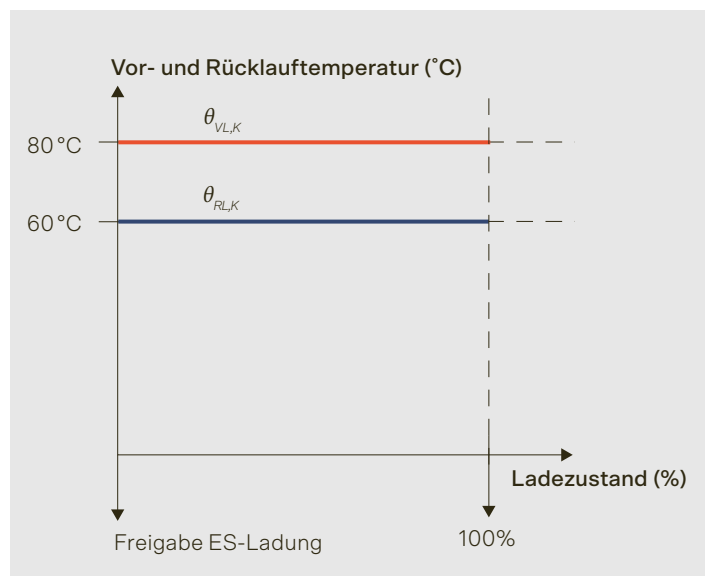
- Abführen der Überschussenergie des Heizkessels, die beim Abbrand entsteht; Energiespeicher vorsehen
- Abdeckung der Lastspitzen an wenig kalten Tagen im Jahr; bivalente Anlagen oder Energiespeicher vorsehen
- Takten eines Wärmeerzeugers; Energiespeicher oder modulierenden Holzheizkessel vorsehen

Bild 2.59: Beispiel Regelfunktion - Verlauf der Temperaturen über den Holzheizkessel im Heizbetrieb.

Einsatzgebiet:

- EFH und MFH, Überbauungen (Wärmeverbund)
- Gewerbe- und Industriebauten
- Bivalente Betriebsweise

Bild 2.60: Beispiel Regelfunktion - WWSP-Ladeverlauf mit VL-Temperaturregelung über Wärmeerzeuger mit primärseitiger Beimischschaltung.



2.7 Thermische Netze

In [Erläuterungen Thermische Netze] werden thermische Netze so definiert: «Ein Thermisches Netz (umgangssprachlich «Fernwärme») dient der leitungsgebundenen Übertragung thermischer Energie mittels Fluids zur direkten oder indirekten Nutzung. Durch die räumliche Trennung von Lieferant und Bezüger ist ein Transport notwendig, der in der Regel einen Verlust der übertragenen thermischen Energie nach sich zieht. Die räumliche Trennung liegt vor, wenn sich die [EGID-Standorte] von Wärmequelle/-senke und mindestens

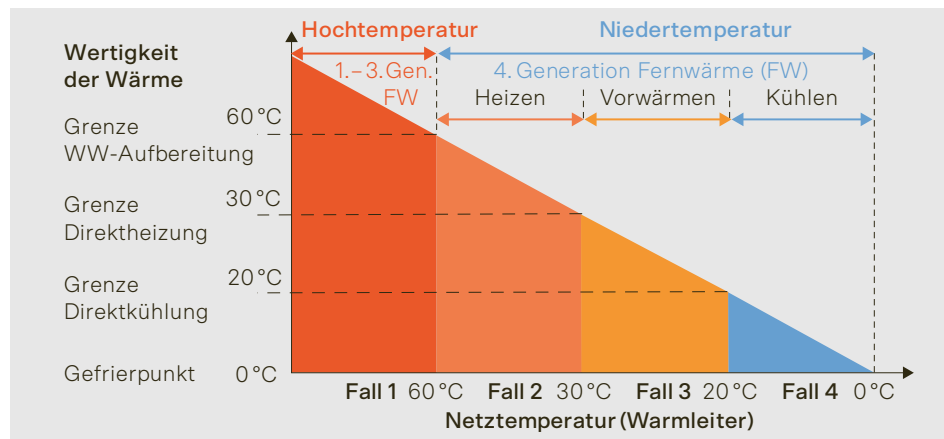
einem Wärmebezüger unterscheiden.»

Thermische Netze funktionieren wie grosse Zentralheizungen, die Gemeinden, Quartiere oder Regionen mit Wärme von einer oder mehreren grossen Wärmequellen versorgen.

Als Quellen kommen infrage: Kehricht, Abwärme aus thermischen Kraftwerken und industriellen Prozessen, Holz-schnitzel, Abwasserreinigungsanlagen, Geothermie sowie Umweltwärme. Solche Netze werden nach dem Temperaturniveau des Warmleiters unterteilt (Tabelle 2.10).

Bild 2.61: Einteilung thermischer Netze aufgrund der Warmleitertemperatur gemäss [Erläuterungen Thermische Netze].

Tabelle 2.10: Charakterisierung der vier Fälle thermischer Netze gemäss [Erläuterungen Thermische Netze].



Thermische Netze

	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
Temperatur Warmleiter	≥ 60°C	60 bis inkl. 30°C	30 bis inkl. 20°C	20 bis 0°C
Bezeichnung	Hochtemperatur (HT)	Niedertemperatur (NT)		
		Heizen	Vorwärmen	Kühlen
Bestimmungskriterium	Grenze Warmwasseraufbereitung ca. 60°C	Grenze Direktheizung ca. 30°C	Grenze Direktkühlung ca. 20°C	Gefrierpunkt Wasser 0°C
Thermisches Potenzial des Netzes	Heizen und Warmwasser direkt	Heizen direkt, Warmwasser vorwärmen	Heizen und Warmwasservorwärmen, Abwärmenutzung Rückkühlung	Wärmequelle für Heizung und Warmwasser, Kühlen direkt
Nötiger Energiebedarf im Gebäude	Kühlung aufbereiten und Rückkühlung	Kühlung aufbereiten und Rückkühlung, Warmwassernachwärmen	Kühlung aufbereiten, Heizung nachwärmen, Warmwassernachwärmen	Heizung und Warmwasseraufbereitung
Im Gebäude erforderliche Technik	Kältemaschine und Rückkühler, evtl. Abwärmenutzung aus Kältemaschine für Warmwasservorwärmung	Kältemaschine und Rückkühler, evtl. Abwärmenutzung aus Kältemaschine für Warmwasser und/oder Einspeisung ins thermische Netz, Warmwassernachwärmung, z. B. mit Wärmepumpe	Kältemaschine, Abwärmenutzung aus Kältemaschine für Heizung, Warmwasser und/oder Einspeisung ins thermische Netz, Heizung und Warmwassernachwärmung, z. B. mit Wärmepumpe	Heizung und Warmwasseraufbereitung, z. B. mit Wärmepumpe, evtl. Kältemaschine für tiefere Temperaturen, Abwärmenutzung für Heizung, Warmwasser und/oder Einspeisung ins thermische Netz

2.8 Praxisbeispiele zu thermischen Netzen

Beispiel 1: Thermisches Netz mit direktem Anschluss

Funktion im Heizbetrieb: Die Heizgruppe wird direkt an das thermische Netz angeschlossen. Die witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung arbeitet mit einer Einspritzschaltung. Je nach Energielieferant wird die maximal zulässige Rücklauftemperatur über eine Rücklauftemperaturbegrenzung begrenzt.

Funktion beim Laden des Warmwasserspeichers: Während der Warmwasserladung werden konstant hohe Vorlauftemperaturen verlangt. Sofern das thermische Netz mit hohen Vorlauftemperaturen ($\theta_{VL,WW} > 65^\circ\text{C}$) betrieben wird, sollten diese auf maximal 65°C reduziert werden. So lässt sich die Kalkausscheidung im Wärmeübertrager reduzieren. Die Vorlauftemperatur kann mit einer Einspritzschaltung mit Durchgangsstellventil geregelt werden. Steigt die Kaltwassertemperatur während des Ladeprozesses, wird auch die Rücklauftemperatur steigen. Dies lässt sich verhindern, indem der sekundärseitige Durchfluss mittels geregelter Pumpe (P_{WW}) reduziert wird.

Kritische Elemente:

– Gleichzeitige Ladung von Heizung und Warmwasser verursacht regeltechnischen Mehraufwand, ist kostenintensiver und erfordert höhere Anschlussleis-

tung. Besser: Alternative Schaltung von Heizung und Warmwasser mit Warmwasser-Vorrangschaltung; dabei berücksichtigen: thermische Gebäudemasse, Raumauskühlung

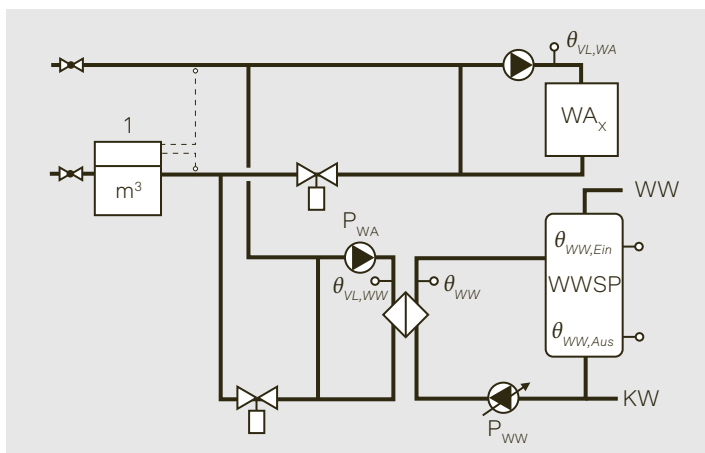
- Hohe Rücklauftemperatur könnte Rücklauftemperaturbegrenzung zur Folge haben.
- Hohe Gebäude (geodätischer Höhenunterschied) werden indirekt angeschlossen.
- Netzdruck und maximal zulässiger Druck in der Heizungsanlage des Gebäudes berücksichtigen.
- Bei variablen Kaltwassertemperaturen während des Warmwasserladeprozesses oder bei Wassererwärmung mit innenliegendem Wärmeübertrager (Stufenladung), könnte die Rücklauftemperatur steigen.

Einsatzgebiet für solche Systeme:

- EFH und DEFH (niedrige Gebäude)

Tabelle 2.11: Spezifikationen zu Beispiel 1 – thermisches Netz mit direktem Anschluss.

Bild 2.62: Direkter Anschluss an thermisches Netz für Heizung und Warmwasser. 1: Wärmehähler



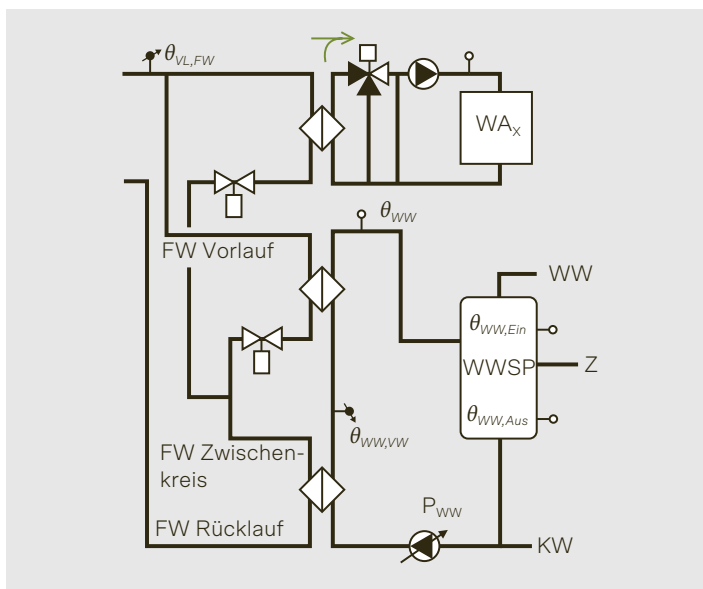
	Heizung	Wassere-wär-mung
Quelle	Thermisches Netz	–
Umwandlung	– Direkter Anschluss – ohne Wärmeübertrager – Indirekter Anschluss – mit Wärmeübertrager	Aussenliegender Wärmeübertrager
Speicherung	–	WWSP (Schichtladung)
Bemerkungen	– Energielieferant fordert tiefe RL-Temperaturen – RL-Temperaturbegrenzung möglich, wenn maximal zulässige RL-Temperatur überschritten wird	Warmwasserladekreis mit unregelter Umwälzpumpe
Standardlösung (SL) bei Wärmeerzeugersersatz in Wohnbauten gemäss [MuKEN]	SL 5: Fernwärmeanschluss Anschluss an ein thermisches Netz mit Wärme aus KVA, ARA oder erneuerbaren Energien. Die Wärme muss für Heizung und Warmwasser (teilweise oder ganz) bereitgestellt werden.	

Beispiel 2: Thermische Netze mit indirektem Anschluss

Funktion im Heizbetrieb: Ein indirekter Anschluss an ein thermisches Netz bedeutet, dass der Wärmeerzeugerkreis (Primärseite) und der Wärmeverbraucherkreis (Sekundärseite) mit einem Wärmeübertrager hydraulisch getrennt sind. Die Primärseite wird hydraulisch mit einer Drosselschaltung angeschlossen. Mit einer Beimischschaltung auf der Sekundärseite können tiefe Rücklauftemperaturen erreicht werden. Die Vorlauftemperaturen bei den Heizgruppen können witterungsgeführt geregelt werden.

Funktion beim Laden des Warmwasserspeichers: Um auf der Primärseite die erforderlichen tiefen Rücklauftemperaturen erreichen zu können, wird mit einem zusätzlichen Wärmeübertrager das zu erwärmende Trinkwasser vorgewärmt. Mit dem zweiten Wärmeübertrager wird das Trinkwasser auf die geforderten Warmwassertemperaturen (θ_{WW}) nachgewärmt. Da während der Warmwasserladung das vorgewärmte Trinkwasser ($\theta_{WW,VW}$) unterschiedliche Temperaturen haben kann, sollte primärseitig die Wärmeabgabe anhand der Warmwassertemperatur (θ_{WW}) geregelt werden.

Bild 2.63:
Indirekter Anschluss an thermisches Netz für Heizung und Warmwasser.
FW: Fernwärme
KW: Kaltwasser
WW: Warmwasser
WA: Wärmeabgabe (z.B. FBH, Heizkörper)
Z = Zirkulation



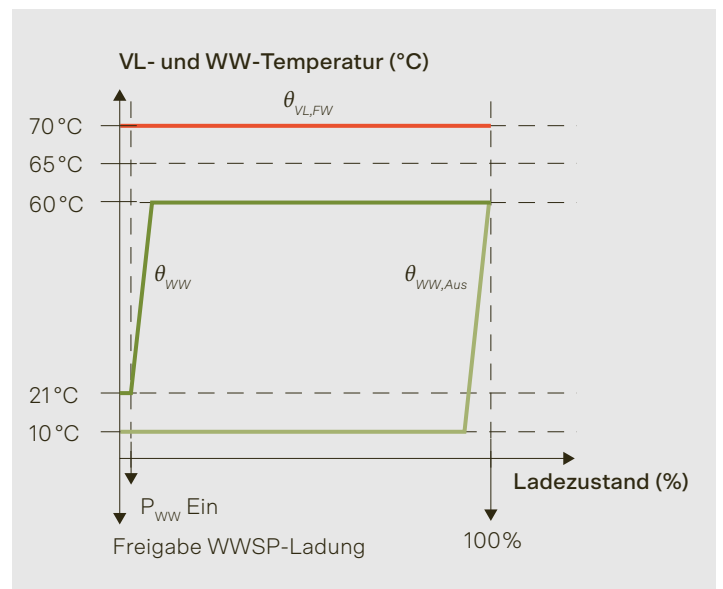
Kritische Elemente:

- Gleichzeitige Ladung Heizung und Warmwasser verursacht regeltechnischen Mehraufwand, ist kostenintensiver und erfordert höhere Anschlussleistung. Besser: Alternative Schaltung von Heizung und Warmwasser mit Warmwasser-Vorrangschaltung; dabei berücksichtigen: thermische Gebäudemasse, Raumauskühlung.
- Hohe Rücklauftemperatur könnte Rücklauftemperaturbegrenzung zur Folge haben.
- Sekundärseitiger Anschluss des Wärmeübertragers für Heizgruppen – dieser sollte druckdifferenzarm erfolgen.

Einsatzgebiet für solche Systeme:

- EFH und MFH, Überbauungen
- Gewerbe- und Industriebauten

Bild 2.64: Beispiel Regelfunktion – WWSP-Ladeverlauf mit VL-Temperaturregelung über Wärmeübertrager mit heizungsseitiger Drosselschaltung.



2.9 Wärmekraftkopplung

Eine Wärmekraftkopplung (WKK) produziert neben der Wärme auch Strom. Der Verbraucher wird so mit den beiden wichtigsten Energiearten versorgt. Die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme wird hierbei sinnvoll zur Bereitstellung von Heizwasser, Dampf oder Trocknungswärme verwendet. Der Brennstoff wird somit zu 90% bis 95% genutzt.

Die meisten WKK-Anlagen sind wärmegeführt. In diesem Fall gehen sie in Betrieb, sobald Wärme benötigt wird.

Die Mikro-WKK steht für eine Klasse von Anlagen, die das unterste Leistungssegment dieser Technik abdeckt. Sie leistet rund 1 bis 15 kW_{el} und 3 bis 70 kW_{th}. Die Mini-WKK umfasst den Bereich von 3 bis 50 kW_{el}.

Ob eine WKK-Anlage umweltfreundlich oder nachhaltig ist, hängt von der Energiequelle ab. Vom Bund als nachhaltig gefördert wird daher die Nutzung der WKK in Biogas- und Klärgasanlagen sowie in Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA).

Blockheizkraftwerke

WKK-Anlagen sind meist Blockheizkraftwerke (BHKW), die aus einem Verbrennungsmotor und einem Generator bestehen. Als Treibstoff wird vorwiegend Gas verwendet. Das Leistungsspektrum dieser Technik liegt zwischen 15 und 1000 kW_{el}. Ein BHKW ist eine modular aufgebaute Anlage, die vorzugsweise am Ort des Wärmeverbrauchs betrieben wird. Sie kann aber auch Nutzwärme in ein thermisches Netz einspeisen.

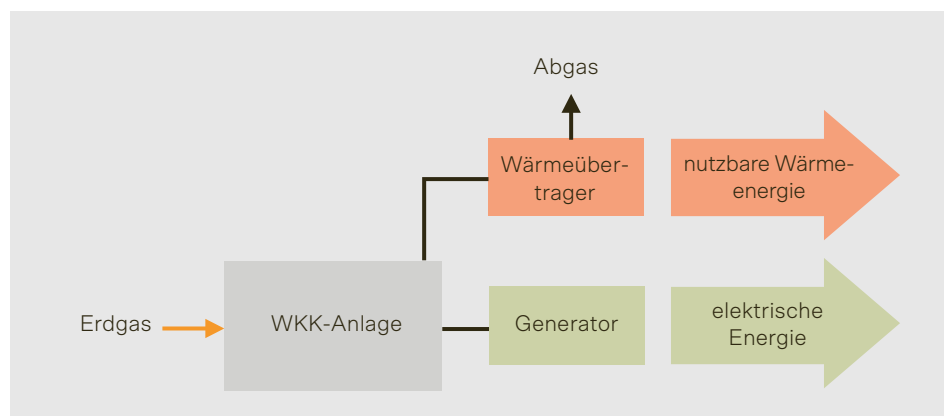


Bild 2.65: Produzierte Energien aus einer Gas-WKK-Anlage.



Bild 2.66: Beispiel für ein BHKW. (Foto: Viessmann Werke)

2.10 Praxisbeispiele zu Wärmekraftkopplung

Beispiel 1: BHKW und Heizkessel mit gasförmigem Brennstoff im bivalent-parallelen Betrieb

Funktion beim Heizbetrieb: Der Energiespeicher (ES) ermöglicht lange Laufzeiten des BHKW. Werden höhere Vorlauftemperaturen ($\theta_{VL,WW}$) gefordert, als das BHKW liefern kann, muss eine Zusatzheizung vorgesehen werden. Im bivalent-parallelen Betrieb werden die beiden Wärmeerzeuger die geforderte Vorlauftemperatur ($\theta_{VL,WW}$) gewährleisten. Die Zusatzheizung deckt somit die Leistungsspitze ab. Falls im BHKW kein Kondensat anfallen darf, muss eine Rücklaufhochhaltung vorgesehen werden.

Funktion beim Laden des Warmwasserspeichers: Im Warmwasserladebetrieb wird das BHKW von der Zusatzheizung unterstützt, falls die Vorlauftemperatur ($\theta_{VL,WW}$) für die Erwärmung des Trinkwassers nicht ausreicht. Mit einer Drosselschaltung und einer geregelten

Tabelle 2.12: Spezifikationen zu Beispiel 1 mit Wärmekraftkopplung (BHKW).

	Heizung	Wassererwärmung
Quelle	- BHKW: gasförmiger oder fester Brennstoff - Wärmeerzeuger: gasförmiger Brennstoff	-
Umwandlung	- Wärmekraftkopplung (BHKW) - Heizkessel	Aussenliegender Wärmeübertrager
Speicherung	Energiespeicher	WWSP, Schichtladung
Bemerkungen	Bivalent-paralleler Betrieb	Warmwasserladekreis mit geregelter Umwälzpumpe
Standardlösung (SL) bei Wärmeerzeugersersatz in Wohnbauten gemäss [MuKEN]	SL 6: Wärmekraftkopplung Elektrischer Wirkungsgrad von mind. 25% und mind. 60% Deckung des Wärmebedarfs für Heizung und Warmwasser. Sowohl für WKK-Anlage als auch für die Spitzendeckung dürfen Systeme mit fossilen Brennstoffen eingesetzt werden.	

Pumpe ($P_{WW,1}$) wird die Leistungsabgabe primärseitig geregelt. Im Warmwasserladekreis kann eine unregelmäßig Pumpen ($P_{WW,2}$) vorgesehen werden. Wird die Warmwassertemperatur am Aus-Fühler ($\theta_{WW,Aus}$) erreicht, gehen der primäre und der sekundäre Warmwasserladekreis ausser Betrieb.

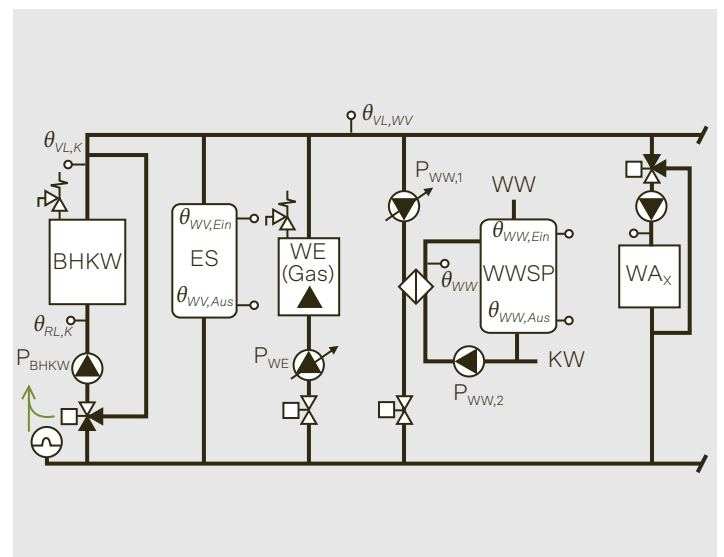
Kritische Elemente:

- Bei BHKW ohne Brennwertnutzung sind tiefe Rücklauftemperaturen nicht erwünscht; Rücklaufhochhaltung vorsehen.
- Bei Gas-Brennwertkesseln sind tiefe Rücklauftemperaturen erwünscht.
- Lange Laufzeiten des BHKW sind erwünscht; Energiespeicher vorsehen.
- Lademanagement des Energiespeichers
- Modulierender Gas-Brennwertkessel; geregelte Umwälzpumpe P_{WE} vorsehen

Einsatzgebiet für solche Systeme:

- EFH und DEFH (kleinere Gebäude) mit Mikro-WKK
- MFH und Gewerbebauten mit Mini-WKK
- Grosse Wohnbauten, Industriebauten, Wärmeverbund mit BHKW

Bild 2.67: BHKW und Gas-Brennwertkessel im bivalent-parallelen Betrieb.



Beispiel 2: BHKW und WP mit Durchflusswassererwärmer im bivalent-teilparallelen-Betrieb

Funktion beim Laden des Energiespeichers: Der Energiespeicher kann in zwei unterschiedlich temperierte Speicherbereiche eingeteilt und geladen werden. Mit dem oberen Speicherbereich wird der Durchflusswassererwärmer (Frischwasserstation) betrieben. Der untere Speicherbereich hingegen speichert die Energie für die Heizgruppen mit tieferen Vorlauftemperaturen als für die Warmwasserwärmung erforderlich sind. Bei der **Ladung für Warmwasser** (oberer Speicherbereich) spricht der obere Temperaturfühler des Energiespeichers ($\theta_{WW, Ein}$) an. Dann gehen die WP und das BHKW in Betrieb. Die WP erwärmt den Rücklauf auf die maximal mögliche Vorlauftemperatur, die sie liefern kann. Das BHKW erwärmt das vorgewärmte Heizungswasser auf die Solltemperatur des WW-Aus-Fühlers ($\theta_{WW, Aus}$). Das Heizungswasser strömt solange impulsarm in den Speicher, bis der Warmwasser-Aus-Fühler ($\theta_{WW, Aus}$) anspricht.

Tabelle 2.13: Spezifikationen zu Beispiel 2 mit Wärmekraftkopplung (BHKW).

	Heizung	Wasserwärmung
Quelle	- Gasförmiger oder fester Brennstoff (BHKW) - Umweltwärme/Abwärme und elektrischer Strom	-
Umwandlung	- Wärmekraftkopplung (BHKW) - Wärmepumpe	Aussenliegender Wärmeübertrager
Speicherung	- Energiespeicher - Kombispeicher möglich	-
Bemerkungen	Bivalent-teilparalleler Betrieb	Mit Frischwasserstation keine Trinkwasserspeicherung
Standardlösung (SL) bei Wärmeerzeugersersatz in Wohnbauten gemäss [MuKE]	SL 6: Wärmekraftkopplung Elektrischer Wirkungsgrad von mind. 25% und mind. 60% Deckung des Wärmebedarfs für Heizung und Warmwasser. Sowohl für WKK-Anlage als auch für die Spitzendeckung dürfen Systeme mit fossilen Brennstoffen eingesetzt werden.	

Bei der **Ladung für Heizbetrieb** (unterer Speicherbereich) spricht der obere Energiespeicher-Temperaturfühler ($\theta_{WA, Ein}$) an. Dann geht die WP in Betrieb. Sie erwärmt den Rücklauf auf die maximal erforderliche Vorlauftemperatur der Heizgruppen. Das Heizungswasser strömt solange impulsarm in den Energiespeicher, bis der Heizungs-Aus-Fühler ($\theta_{WA, Aus}$) anspricht. Unterschreitet die Aussentemperatur den Bivalenzpunkt, wird das BHKW zugeschaltet.

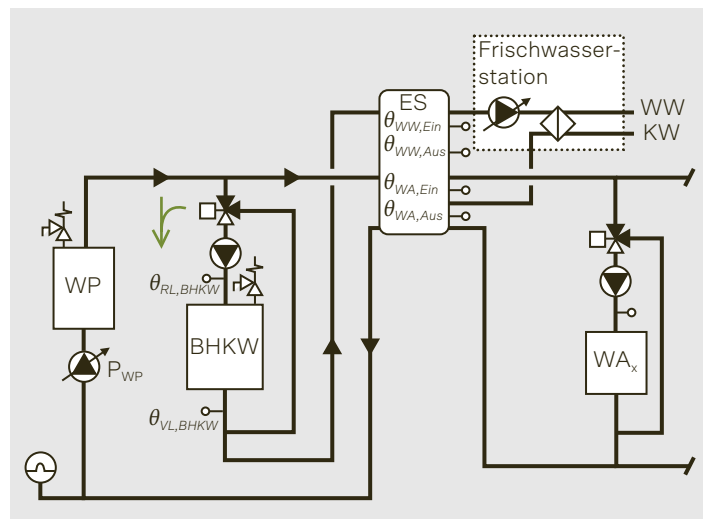
Kritische Elemente:

- Bei BHKW ohne Brennwertnutzung sind tiefe Rücklauftemperaturen unerwünscht; Rücklaufhochhaltung vorsehen.
- Bei WP sind tiefe Betriebstemperaturen erwünscht, sie steigern die Effizienz.
- Lange Laufzeit des BHKW erwünscht; gesamten Energiespeicher im Parallelbetrieb laden
- Lademanagement Energiespeicher
- Impulsarmes Einströmen in den Energiespeicher, Eintrittsgeschwindigkeit < 0,1 m/s wählen.
- Hoher Leistungsbedarf für den Durchflusswassererwärmer (Frischwasserstation)
- Hydraulische Einbindung des BHKW

Einsatzgebiet für solche Systeme:

- MFH
- Gebäude mit grossem Warmwasserbedarf (z.B. Sportanlagen)

Bild 2.68: BHKW und WP im bivalent-teilparallelen Betrieb und mit Durchflusswassererwärmer (Frischwasserstation).



2.11 Thermische Solaranlagen

Thermische Solaranlagen nutzen Sonnenenergie zur Unterstützung respektive zur Deckung des häuslichen Warmwasserbedarfs und der Raumheizung. Zentrales Bauteil ist der Sonnenkollektor. Sein «Herz» sind die Absorber. Das sind schwarze Metallflächen, die durch die Sonnenstrahlung erwärmt werden. Die Absorber sind von kleinen Röhren durchzogen, in den ein flüssiger Wärmeträger zirkuliert. Er erwärmt sich dabei und gibt die Wärme anschliessend über einen Wärmeübertrager an das Warmwasser- und/oder Heizungssystem des Gebäudes ab. Die solare Wärme steht den Nutzern beispielsweise an der Warmwasserentnahmestelle, am Wärmeabgabesystem (Heizkörper, Fussbodenheizung) oder in einem Schwimmbaden zur Verfügung. Wenn Wolken die Kollektoren beschatten, reicht die von der Sonne gewonnene Wärme häufig nicht zum Decken des aktuellen Wärmeleistungsbedarf eines Gebäudes. Dann übernimmt eine weitere Wärmequelle, die Zusatzheizung, die Erwärmung des Speicherinhalts.

Strahlungsangebot auf der Erdoberfläche

Sonnenstrahlen sind elektromagnetische Wellen, deren Energieinhalt sich nach dem Eintritt in die Erdatmosphäre durch Reflexion und Absorption an Be-

standteilen der Luft (beispielsweise Wasserdampf, Ozon) reduziert. So liegt die Gesamtleistung der Sonneneinstrahlung an der Aussenhülle der Erdatmosphäre bei ungefähr 1355 W/m^2 – diese Leistung nennt man Solarkonstante. Auf der Erdoberfläche bleiben davon maximal noch etwa 1000 W/m^2 übrig. Diese sogenannte Globalstrahlung besteht aus:

- direkter Strahlung: Sonnenlicht, das bei klarem Himmel direkt auf den Erdboden trifft und
- indirekter Strahlung: Diffusstrahlung; Sonnenlicht, das durch Wolken gestreut (abgelenkt) auf den Erdboden trifft.

Flachkollektoren

Flachkollektoren sind die meistverbreitete Bauart von Kollektoren. Sie können auf Gestellen aufgeständert, auf Dächern über der Dachhaut installiert (Aufbaukollektoren) oder ins Hausdach respektive in die Fassade integriert werden (Einbaukollektoren). Auch die unverglasteten Kollektoren zählen zu den Flachkollektoren. Diese werden im unteren Temperaturbereich, etwa zur Erwärmung des Wassers von Freibädern eingesetzt. Bei der Wahl von Flachkollektoren sollen folgende technischen Details beachtet werden:

- Zertifizierung: Das Institut für Solartechnik (SPF) an der Ostschweizer Fachhochschule testet Sonnenkollektoren

Bild 2.69: Aufbau einer thermischen Solaranlage.

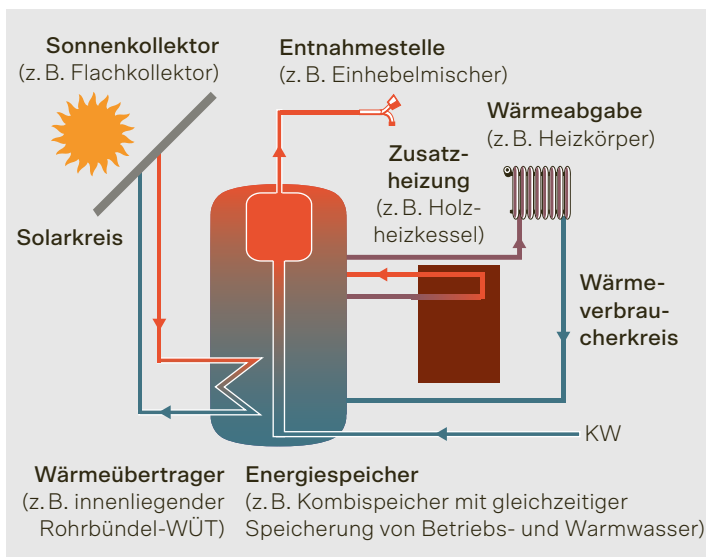
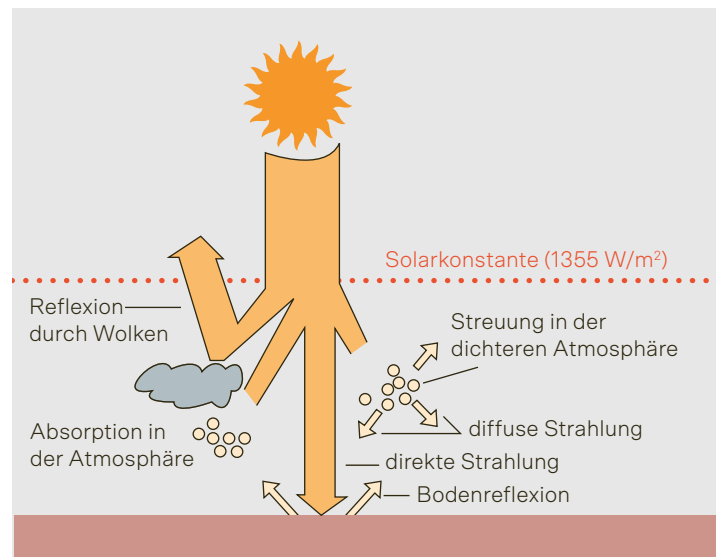


Bild 2.70: Begriffe der Sonnenstrahlung.



ren auf Ertrag und andere Kriterien. Die Ergebnisse sind unter www.solarenergy.ch publiziert.

- Absorberbeschichtung: Der Absorber muss entweder schwarz eingefärbt oder mit einer speziellen Beschichtung versehen sein, die selektiv wirkt (selektive Absorberbeschichtung).
- Grossflächenkollektor: Dieser hat Vorteile im Vergleich zu mehreren Einzelmodulen.
- Dämmung: Der Kollektor muss gegen Wärmeverluste mit mineralischem Dämmstoff gut gedämmt sein.

Vakuümrohrenkollektoren

Ein Vakuum besitzt besonders gute thermische Dämmeigenschaften. Dadurch weisen Vakuümrohrenkollektoren wesentlich kleinere Wärmeverluste auf als Flachkollektoren. Weitere Vorteile von Vakuümrohrenkollektoren sind die drehbaren Absorber, die auch bei schlechter Ausrichtung des Kollektors leistungsfähig sind. Vakuümrohrenkollektoren sind besonders leistungstark und werden für die Bereitstellung von Prozesswärme im Bereich von 100 bis 150 °C eingesetzt.

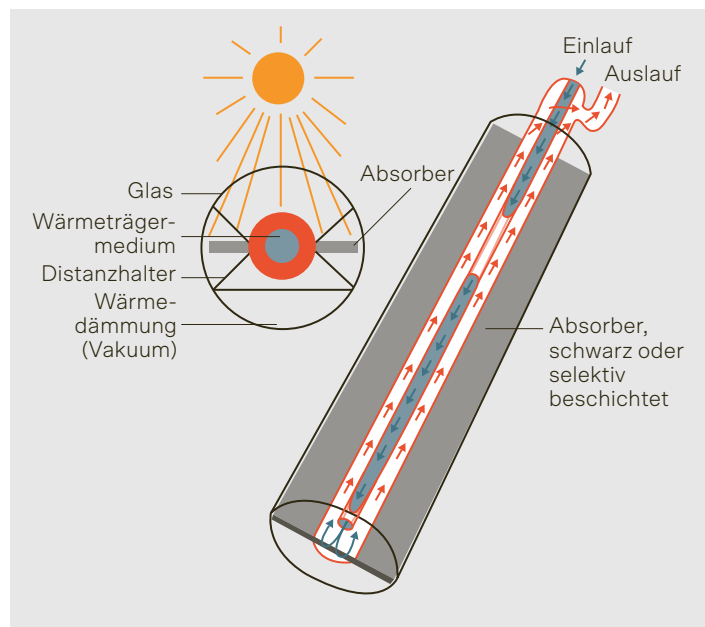
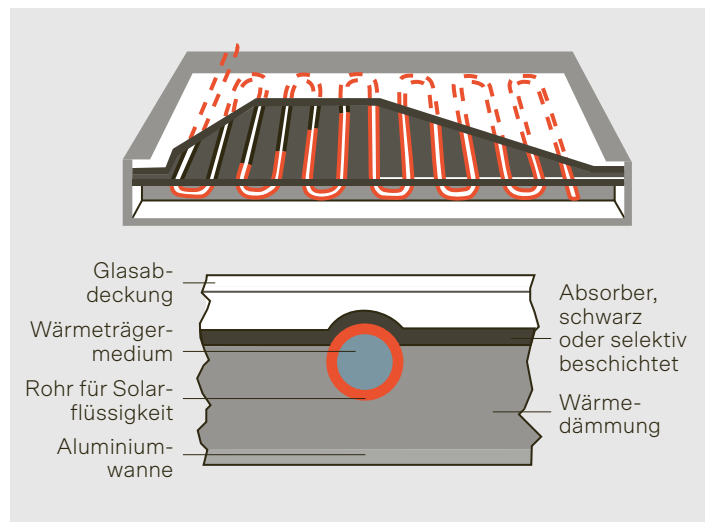
Planungshinweise für thermische Solaranlagen

- Erstabklärung: Mit dem [Solarrechner] kann abgeschätzt werden, wie viel Wärme am Gebäude generiert werden kann. Weiter lassen sich die Gesamtkosten und die Amortisationsdauer berechnen. Das [Gebäudeprogramm] liefert unter anderem Informationen zu den Fördergeldern, die einer Bauherrschaft zustehen.
- Vereinbarungen mit den Nutzenden schriftlich festhalten: Wird nach der Erstabklärung entschieden, dass eine

thermische Solaranlage erstellt werden soll, sollen die Anlagedaten, die für die Planung verbindlich sind, schriftlich festgehalten werden. Dazu gehören unter anderem die Platzierung der Kollektoren, allgemeine Platzverhältnisse, solarer Deckungsgrad, Lieferfristen von Kollektoren, Anwendungen der Sonnenenergie, Wärme- und Warmwasserbe-

Bild 2.71: Flachkollektor.

Bild 2.72: Vakuümrohrenkollektor.



Kollektorbauarten	Einsatzbereich	Typische Anwendung
Unverglaste Flachkollektoren aus Kunststoff	20 bis 40 °C	Schwimmbadwassererwärmung, Trinkwasservorwärmung, Erdwärmesondenregeneration
Verglaste Flachkollektoren mit spektralselektiver Beschichtung	30 bis 100 °C	Trinkwassererwärmung und Raumheizung
Vakuümrohrenkollektoren mit Metallabsorber	50 bis 150 °C	Trinkwassererwärmung, Raumheizung und Prozesswärme

Tabelle 2.14: Einsatzbereich von Flach- und Vakuümrohrenkollektoren.

darf, Investitionslimiten, Randbedingungen der konventionellen Gebäudetechnik.

- Bewilligungs- oder Meldepflicht: Es muss bei der zuständigen Baubehörde abgeklärt werden, ob die thermische Solaranlage bewilligt oder nur gemeldet werden muss.
- Einreichung von möglichen Förderanträgen
- Genügend Raum- und Platzbedarf für Kollektoren, Speicher und Rohrleitungen vorsehen
- Unterschiedliche Offerten von Kollektoren oder ganzen thermischen Solaranlagen anfordern und vergleichen: Es lohnt sich, mehrere Offerten bezüglich Fabrikaten, Systemen, Qualität, Quantität, Preisen, Rabatten, Wirtschaftlichkeit, Leistungsfähigkeit, Terminen, Organisation usw. zu vergleichen.
- Warmwasserbedarf richtig abschätzen: Für die Dimensionierung von Anlagen zur Wassererwärmung sollten Bedarfsprofile erhoben werden. Als Standardverbrauchswerte gelten bei EFH 40 l Warmwasser mit 60 °C pro Person und Tag, bei MFH sind es 35 l.

- Ausrichtung von Flachkollektoren für Wassererwärmung: Der Neigungswinkel sollte zwischen 20° und 50° liegen. Neigungswinkel unter 20° führen zu mangelhafter Belüftung und somit zu Kondensation an der Innenseite des Kollektors. Zudem rutscht der Schnee schlecht ab. Die optimale Orientierung von Flachkollektoren ist Süd. Weicht sie davon ab, muss dies mit einer Vergrößerung der Kollektorfläche kompensiert werden. Südabweichung von ± 90° für Neigungswinkel bis zu 50° werden mit einer Vergrößerung der Kollektorfläche um 50 bis 75% kompensiert. Bei Neigungswinkel bis zu 75° wird eine Einschränkung der Orientierung auf ± 45° empfohlen.

- Ausrichten von Flachkollektoren für Heizungsunterstützung: Der Neigungswinkel sollte zwischen 30 und 70° liegen. Anlagen mit hohem Neigungswinkel haben den Vorteil, dass im Sommer kaum überschüssige Wärme anfällt und im Winter auch grosse Schneemengen keine Probleme verursachen. Orientierung: Südabweichung um ±45° werden für Neigungswinkel bis zu 75° mit einer

Einsatzgebiet	Unverglaster Flachkollektor	Verglaster Flachkollektor	Vakuurröhrenkollektor
Schwimmbad nur Sommerbetrieb	++	-	--
Hallenbad mit Winter- und Sommerbetrieb	--	++	+
Trinkwassererwärmung	--	++	+
Trinkwassererwärmung und Schwimmbad	--	++	+
Trinkwasservorwärmung	+	++	--
Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung	--	++	++
Gewerbliche Anwendung für die Vorwärmung bis 50 °C (Hotels, Kantinen, Campingplätze usw.)	--	++	+
Gewerbliche Anwendung für die Wärmenutzung bis 80 °C (Wäschereien, Autowaschstrassen usw.)	--	++	++
Gewerbliche Anwendung für Prozesswärme bis 150 °C (Nahrungsmittelindustrie usw.)	--	-	++
Luftvorwärmung bei Lüftungsanlagen	--	++	+

Tabelle 2.15:
Auswahl von geeigneten Kollektoren; mehr Infos unter [Swissolar].
Legende:
++ gut geeignet
+ geeignet
- nicht empfehlenswert
-- vermeiden

Vergrößerung der Kollektorfläche um etwa 20 % kompensiert. Bei höheren Neigungswinkeln empfiehlt sich eine Einschränkung der Orientierung auf $\pm 45^\circ$.

- Zusatzheizung: Die Wahl der Zusatzheizung hat einen grossen Einfluss auf die Ökologie des gesamten Systems. Holzheizungen und Wärmepumpen sind dafür besonders geeignet. Weiter kann eine prädiktive, also auch Wettervorhersagen berücksichtigende Regelung die Effizienz einer thermischen Solaranlage erhöhen. Damit lässt sich die Überschneidung von Zusatzheizenergieeintrag und solarer Versorgung vermeiden.
- Überhitzungsschutz: Ist das Sonnenenergieangebot grösser als der Wärmebedarf, besteht Gefahr einer Speicherüberhitzung oder einer Verdampfung des Wasser-Glykol-Gemischs im Kollektor. Deshalb müssen Überhitzungsschutzmassnahmen (Hydraulik, Regelung) eingeplant werden. [Swissolar] und [EnergieSchweiz] bieten Merkblätter dazu an.

- Volumenströme durch Kollektoren: Für die optimale Energiegewinnung eignen sich High-Flow-Anlagen mit einem Volumenstrom zwischen 30 und 50 l pro Stunde und m^2 Kollektorfläche. Low-Flow-Anlagen mit zwischen 10 l und 20 l pro Stunde und m^2 Kollektorfläche eignen sich für die Erzeugung von hohen Temperaturen.

- Schichtladung: Temperaturschichten im Speicher können im Low-Flow-Betrieb eher aufrechterhalten werden als im High-Flow-Betrieb.

Richtwerte für den Bau von thermischen Solaranlagen

Der [Solarrechner] unterstützt bei Erstabklärungen. Damit können ungefähre Energieproduktion, Gesamtkosten und Amortisationsdauer leicht abgeschätzt werden. Grössere und komplexere Anlagen sollten von einer Solarfachperson ausgelegt werden.

Wohngebäude	Belegung	Anlagen zur Wassererwärmung		Kombianlagen (Wassererwärmung und Heizungsunterstützung)	
		Flachkollektorfläche ¹⁾ m ² Abs/Person	Solares Vorwärmvolumen ²⁾ l/m ²	Flachkollektorfläche ¹⁾ m ² /(MWh a)	Solares Vorwärmvolumen ²⁾ l/m ²
kleine Gebäude	bis 20 Personen	1,2	50	1	120
mittlere Gebäude	bis 20 Personen	0,8	40	0,8	90
grosse Gebäude	über 100 Pers.	0,5	30	0,8	60

1) Abs: Bezugsfläche = Absorberfläche

2) Das solare Vorwärmvolumen (VV) ist Bestandteil des Totalvolumens (VT) im Wassererwärmer. Das Totalvolumen ist die Summe des Bereitschaftsvolumens (VZ) und des solaren Vorwärmvolumens (VV). Somit gilt: $VT = VZ + VV$

Tabelle 2.16: Grobe Richtwerte für die benötigte Kollektorfläche mit optimaler Ausrichtung.

Ausrichtung	Vergrößerung bei Wassererwärmung		Vergrößerung bei Kombianlagen (Wassererwärmung und Heizungsunterstützung)	
	Neigung	Korrektur der Kollektorfläche	Neigung	Korrektur der Kollektorfläche
Süd, Südwest (+45°), Südost (-45°)	20 bis 50°	keine Korrektur	30 bis 50°	keine Korrektur
	60°	+15 %	75°	+20 %
	75°	+50 %	> 75°	Korrektur berechnen
	> 75°	Korrektur berechnen		
West (+90°), Ost (-90°)	20 bis 50°	+5 %	20 bis 45°	keine Korrektur
	50°	+10 %	50°	+10 %
	> 50°	Korrektur berechnen	> 50°	Korrektur berechnen

Tabelle 2.17: Vergrößerung der Kollektorfläche bei nicht idealer Ausrichtung.

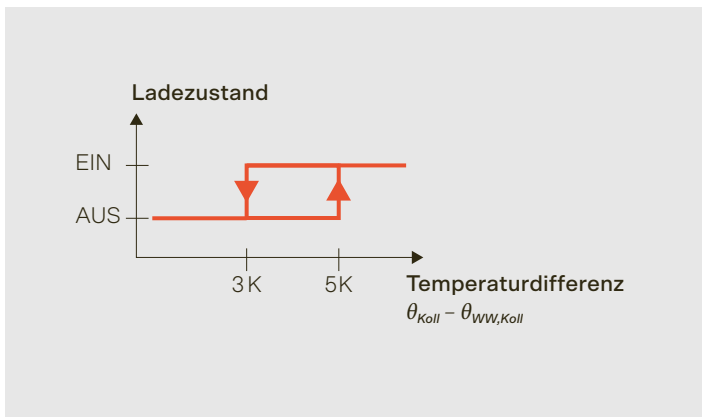
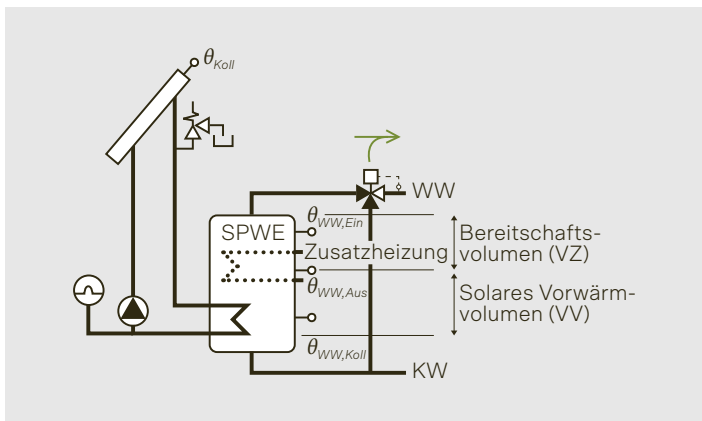
2.12 Praxisbeispiele zu thermischen Solaranlagen

Beispiel 1: Thermische Solaranlage mit innenliegendem Wärmeübertrager zur Wassererwärmung

Funktion bei der Warmwasserladung mit High-Flow-Ladesystemen: Ist die Kollektorfeldtemperatur (θ_{Koll}) 3 bis 5 K wärmer als die Temperatur im Bereich des solaren Vorwärmvolumens ($\theta_{WW,Koll}$), schaltet die Solarpumpe ein. Der Speicher wird von unten nach oben durch die induzierten Konvektionsströmungen geladen. Sobald der Temperaturunterschied zwischen Kollektorfeld und Vorwärmvolumen ($\theta_{Koll} - \theta_{WW,Koll}$) kleiner als 3 K bis 5 K ist, schaltet die Solarpumpe wieder aus. Können die geforderten Warmwassertemperaturen im Bereitschaftsvolumen mit der Solaranlage nicht erreicht werden, liefert die Zusatzheizung die notwendige Wärmeleistung.

Bild 2.73: High-Flow-Solaranlage für indirekte Wassererwärmung.

Bild 2.74: Beispiel Regelfunktion – Freigabe Pumpe Solarladekreis (gemäss Bild 2.73).

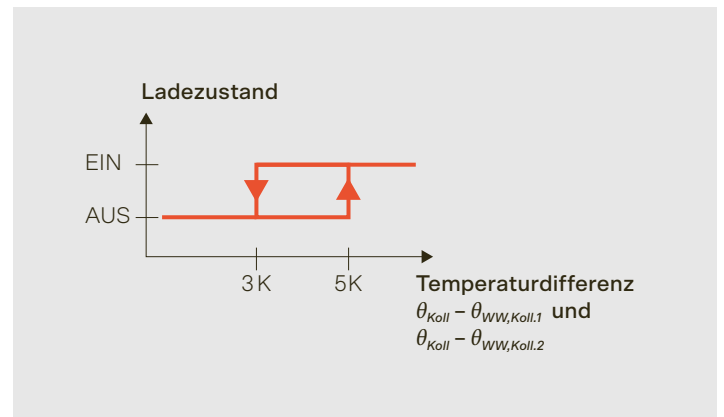
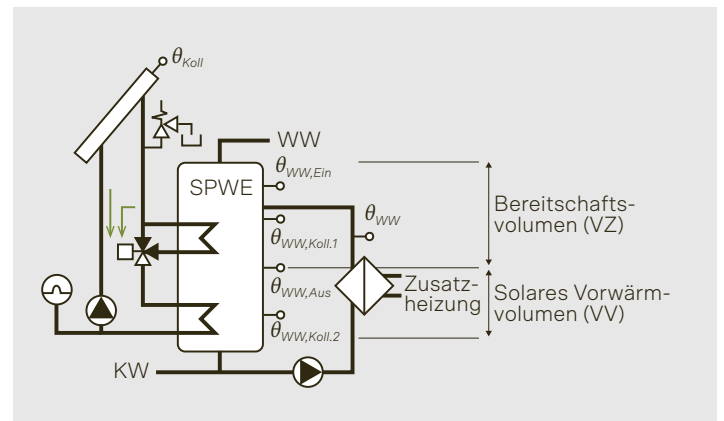


Funktion bei der Warmwasserladung mit Low-Flow-Ladesystemen:

Die Temperaturfühler ($\theta_{WW,Koll.1}$ und $\theta_{WW,Koll.2}$) im SPWE geben den Solarladekreis frei, sobald eine der beiden Temperaturen kleiner ist als die Temperatur im Kollektorfeld (θ_{Koll}). Wird im oberen Bereich ($\theta_{WW,Koll.1}$) eine Temperaturdifferenz zum Kollektorfeld (θ_{Koll}) von 3 K bis 5 K gemessen, schaltet das 3-Weg-Umstellventil auf «Umlenkung» und das Bereitschaftsvolumen wird geladen. Die Restwärme im Solarladekreis wird mit dem zweiten Wärmeübertrager dem Vorwärmvolumen zugeführt. Ist hingegen die Temperatur im Bereitschaftsvolumen ($\theta_{WW,Koll.1}$) höher als die Kollektorfeldtemperatur (θ_{Koll}), wird die anfallende Wärme nur über den unteren Wärmeübertrager ans Trinkwasser abgegeben. Das Trinkwasser wird vorgewärmt. Die Zusatzheizung erwärmt das Bereitschaftsvolumen, wenn beim Ein-Fühler ($\theta_{WW,Ein}$) die Solltemperatur unterschritten wird.

Bild 2.75: Low-Flow-Solaranlage für indirekte Wassererwärmung.

Bild 2.76: Beispiel Regelfunktion – Freigabe Pumpe Solarladekreis Ladung oberes oder unteres Speichervolumen (gemäss Bild 2.75).



Kritische Elemente:

- Überhitzungsprobleme im Solar- und WW-Ladekreis
- Zerstörung von Temperaturschichten im Speicher während der Solarladung – impulsarmes Einströmen in den Speicher mit Eintrittsgeschwindigkeit $< 0,1$ m/s wählen
- Fließgeschwindigkeit im Solarladekreis
- Druckhaltung im Solarladekreis

Einsatzgebiet: EFH und MFH

Beispiel 2: Thermische Solaranlage mit aussenliegendem Wärmeübertrager zur Wassererwärmung

Funktionsbeschreibung: Sobald die Speichertemperaturen ($\theta_{WW,Koll.1}$) 3 bis 5 K tiefer liegen als im Kollektorfeld (θ_{Koll}), gehen der Primär- und Sekundärladekreis in Betrieb. Durch das impulsarme Einströmen in den SPWE wird dieser geschichtet geladen (Schichtladung), bis die Temperatur am Fühler ($\theta_{WW,Koll.2}$) 3 K bis 5 K unter der Kollektorfeldtemperatur (θ_{Koll}) liegt.

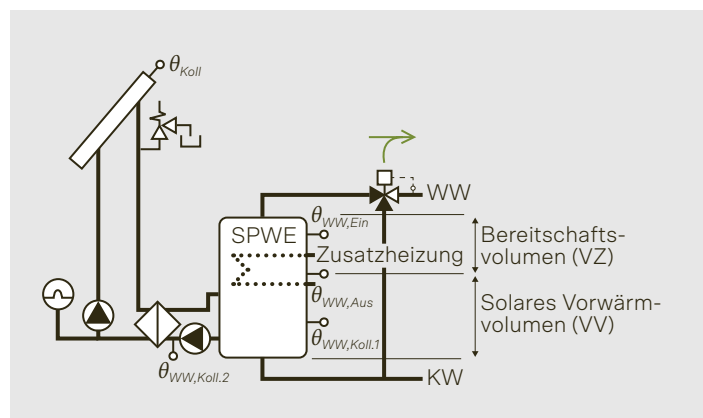
Kritische Elemente:

- Überhitzungsprobleme im Solar- und WW-Ladekreis
- Kalkausscheidung im Wärmeübertrager
- Verluste im Wärmeübertrager
- Zerstörung von Temperaturschichten im Speicher während der Solarladung – impulsarmes Einströmen in den Speicher mit Eintrittsgeschwindigkeit $< 0,1$ m/s wählen
- Fließgeschwindigkeit im Solarladekreis
- Druckhaltung im Solarladekreis

Einsatzgebiet:

- Nachrüstung im EFH und MFH
- Grosse Solaranlagen

Bild 2.77: Thermische Solaranlage mit aussenliegendem Wärmeübertrager zur indirekten Wassererwärmung.



Beispiel 3: Thermische Solaranlagen mit separatem Vorwärmerspeicher mit Umschichtung

Funktionsbeschreibung: Die thermische Sonnenenergienutzung entspricht der von Beispiel 1 (Warmwasserladung mittels High-Flow-Solaranlage). Sobald die Temperatur ($\theta_{WW,VW}$) im Vorwärmerspeicher (VW) wärmer ist als die Temperatur ($\theta_{WW,Ein}$) im Nachwärmerspeicher (NW), schaltet das 3-Weg-Umstellventil (UV) auf «Durchgang». Die Umwälzpumpe (P_{WW}) geht in Betrieb. Dabei wird das

wärmere Wasser aus dem VW über den Wärmeübertrager in den NW gefördert. Diese Umschichtung erfolgt ohne Wärmeeintrag aus dem Wärmeübertrager. Der NW wird aktiv erwärmt, wenn der Ein-Fühler ($\theta_{WW,Ein}$) die Solltemperatur unterschreitet. Sobald die notwendige Wärme am Wärmeübertrager erreicht ist, geht die Umwälzpumpe (P_{WW}) in Betrieb. Das Wasser aus dem NW wird über das 3-Weg-Umstellventil in der Stellung «Umlenkung» gefördert, auf die gewünschte Temperatur (θ_{WW}) erwärmt und wieder im oberen Speicherbereich

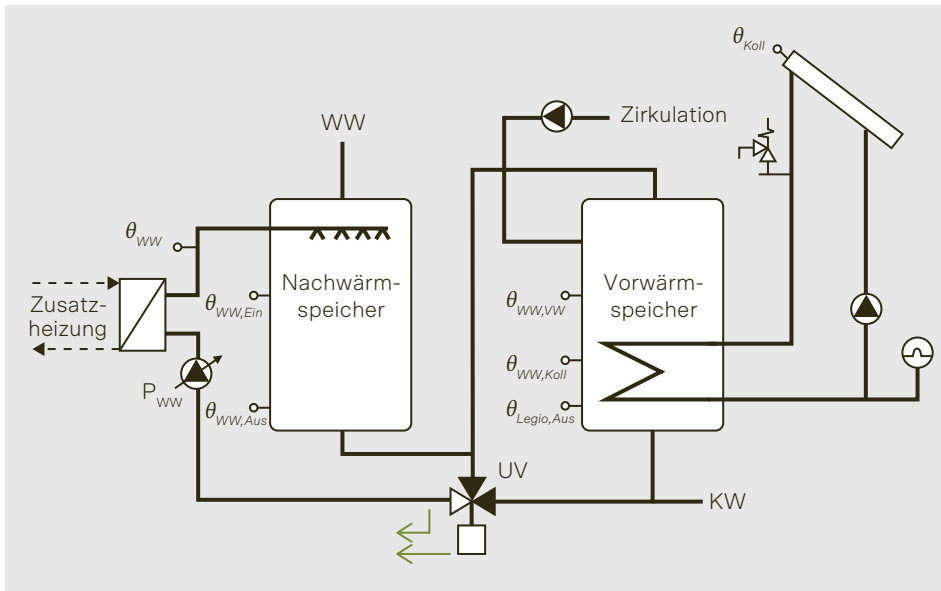


Bild 2.78: Vorwärmung mit Umschichtung und Legionelenschutzschaltung.
KW: Kaltwasser
WW: Warmwasser

	Heizung	Wassererwärmung
Quelle	-	- Sonnenenergie - Gasförmiger, flüssiger oder fester Brennstoff, elektrischer Strom (Zusatzheizung)
Umwandlung	-	- Sonnenkollektoren - Innen- oder aussenliegender Wärmeübertrager
Speicherung	-	- Speicher mit innenliegendem Wärmeübertrager (solarseitig) - Speicher mit aussenliegendem Wärmeübertrager solarseitig möglich
Bemerkungen	-	- Zusatzheizung mit aussenliegendem Wärmeübertrager bei Low-Flow-Betrieb - Zusatzheizung mit innenliegendem Wärmeübertrager möglich
Standardlösung (SL) bei Wärmeerzeugersatz in Wohnbauten gemäss [MuKE n]	SL 1: Thermische Solaranlage für die Wassererwärmung Mindestfläche der Sonnenkollektoren beträgt 2 % der EBF (Absorberfläche bei Flachkollektoren und Aperturfläche bei Röhrenkollektoren). Die SL 1 ist gut geeignet für den Ersatz fossiler WE durch ein gleichartiges System.	

Tabelle 2.18: Spezifikationen zu den Beispielen 1, 2 und 3 mit thermischer Solaranlage.

impulsarm eingeführt. Mit dieser Hydraulik kann der VW thermisch desinfiziert werden. In diesem Fall schaltet das Umstellventil auf «Durchgang». Das Wasser im VW wird mit dem Wärmeübertrager auf die gewünschte Temperatur (θ_{WW}) gebracht, bis diese beim Aus-Fühler ($\theta_{Legio,Aus}$) erreicht ist.

Kritische Elemente:

- Überhitzungsprobleme im Solar- und WW-Ladekreis
- Zerstörung von Temperaturschichten in den Speichern; impulsarmes Einströmen in den Vorwärm- und Nachwärm-

speicher, Eintrittsgeschwindigkeit < 0,1 m/s wählen

- Zirkulationsrücklauf muss impulsarm sein.
- Hygienische Situation im Vorwärm-speicher bei Temperaturen unter 50 °C; Vorwärmung für Betriebswasser nutzen.

Einsatzgebiet:

- Grosse Wassererwärmungsanlagen
- Abwärmenutzung in Vorwärm-speicher (anstelle thermischer Solaranlage)

Bild 2.79: Haus mit thermischer Solaranlage. (Foto: Swissolar)



Beispiel 4: Thermische Solaranlage für Wassererwärmung und Heizungsunterstützung

Funktion beim Laden des Energiespeichers (ES) über thermische Solaranlage: Der Einschaltpunkt des Solarladekreises wird durch die Temperaturdifferenz ($\theta_{ES,Koll.2} - \theta_{Koll}$) definiert. Diese ergibt sich aus den Temperaturmessungen ($\theta_{ES,Koll.2}$) im Energiespeicher (ES) und im Kollektorfeld (θ_{Koll}). Ist die Temperatur im Kollektorfeld 3 bis 5 K höher als im Energiespeicher, schaltet die Solarpumpe (P_{Koll}) ein. Das Umstellventil (UV) steht auf «Umlenkung» und der Energiespeicher wird von unten her geladen. Die Ladung läuft, bis die Differenz zwischen der Speichertemperatur und Kollektorfeldtemperatur 3 bis 5 K unterschreitet.

Funktion beim Laden des Warmwasserspeichers über die Solaranlage: Die Sonnenenergienutzung entspricht der aus Beispiel 1 (Warmwasserladung mittels Low-Flow-Solaranlage). Der Warmwasserspeicher (WWSP) wird bei ausreichendem Sonnenenergieangebot

mittels Sonnenkollektoren erwärmt. Wird die Solltemperatur im WWSP nicht erreicht, kann die Temperatur mit der WP auf den Sollwert angehoben werden.

Die Warmwasserladung mit der WP erfolgt mit Stufenladung. Dabei erwärmt sich das Trinkwasser in Stufen und schichtet sich je nach Temperatur im Speicher ein.

Kritische Elemente:

- Überhitzungsprobleme im Solar- und WW-Ladekreis
- Innenliegende Wärmeübertrager können zur Vermischung der Temperaturschichten führen.
- Richtige Platzierung des Temperaturfühlers im Kollektorfeld
- Stufenladung im WP-Betrieb mit aussenliegendem Wärmeübertrager: Impulsarmes Einströmen in WWSP ist notwendig, Eintrittsgeschwindigkeit < 0,1 m/s wählen.

Einsatzgebiet:

- MFH
- Gewerbebauten

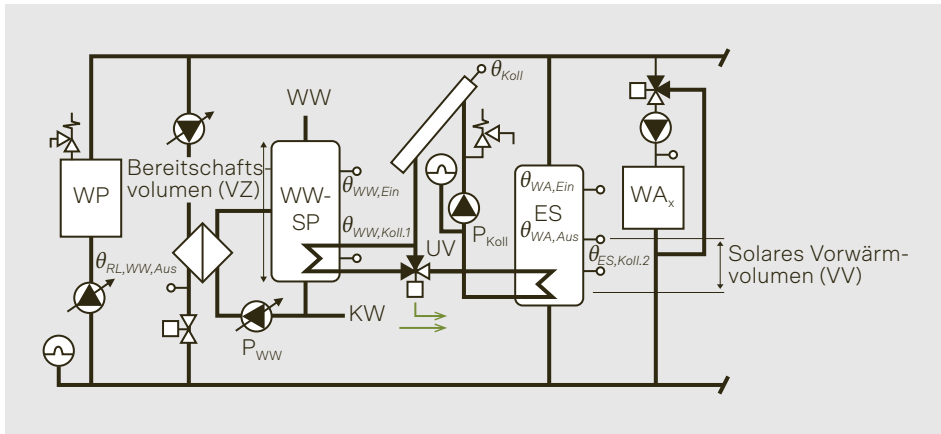


Bild 2.80: WP mit monovalentem Betrieb und solarer Unterstützung.

	Heizung	Wassererwärmung
Quelle	- Umweltwärme/Abwärme und elektrischer Strom - Sonnenenergie (ES)	Sonnenenergie (WWSP)
Umwandlung	- Wärmepumpe - Sonnenkollektoren	- Sonnenkollektoren - Aussenliegender Wärmeübertrager (Stufenladung)
Speicherung	Energiespeicher	Warmwasserspeicher
Bemerkungen	Monovalenter Betrieb mit WP	Stufenladung mit aussenliegendem Wärmeübertrager

Tabelle 2.19: Spezifikationen zu Beispiel 4 mit thermischer Solaranlage.

Beispiel 5: Thermische Solaranlage und Holzfeuerung mit Kombispeicher

Grundsätzliches: Wegen des Problems der Kondensatbildung im Holzheizkessel wird die Kesselnrücklauf­temperatur ($\theta_{RL,K}$) mit der Rücklaufhochhaltung angehoben. Der Kombispeicher wird infolge der Dichtedifferenz des einströmenden Heizungswassers geladen.

Funktion beim Laden des Bereitschaftsvolumens Warmwasser mit der Zusatzheizung: Spricht der Fühler im Kombispeicher ($\theta_{WW,Ein}$) an, gehen der Holzheizkessel und die Umwälzpumpe (P_K) in Betrieb. Der obere Teil des Kombispeichers wird mit Heizungswasser geladen, bis am Temperaturfühler ($\theta_{WW,Aus}$) der Sollwert wieder erreicht ist. Das Bereitschaftsvolumen für das Warmwasser steht den Nutzenden wieder ganz zur Verfügung.

Funktion beim Laden des Bereit­schaftsvolumens Heizung mit der Zusatzheizung: Die Heizgruppen werden witterungsgeführt geregelt. Deshalb hängt die Vorlauf­temperatur über die Heizgruppe von der eingestellten Heizkurve ab. Fällt die Temperatur im Kombispeicher am Ein-Fühler ($\theta_{WA,Ein}$) im Bereit­schaftsvolumen Heizung unter die Vorlauf­temperatur gemäss der Heizgruppe, gehen der Holzheizkessel und die Umwälzpumpe (P_K) in Betrieb. Der untere Kombispeicherbereich wird mit Heizungswasser geladen, bis der Sollwert beim Aus-Fühler ($\theta_{WA,Aus}$) erreicht ist.

Funktion beim Laden des Vorwärmvolumens mit thermischer Solaranlage: Die Sonnenenergienutzung entspricht der in Beispiel 1 (Warmwasserladung mittels High-Flow-Solaranlage). Ist die Kollektorfeldtemperatur (θ_{Koll}) 3 bis 5 K

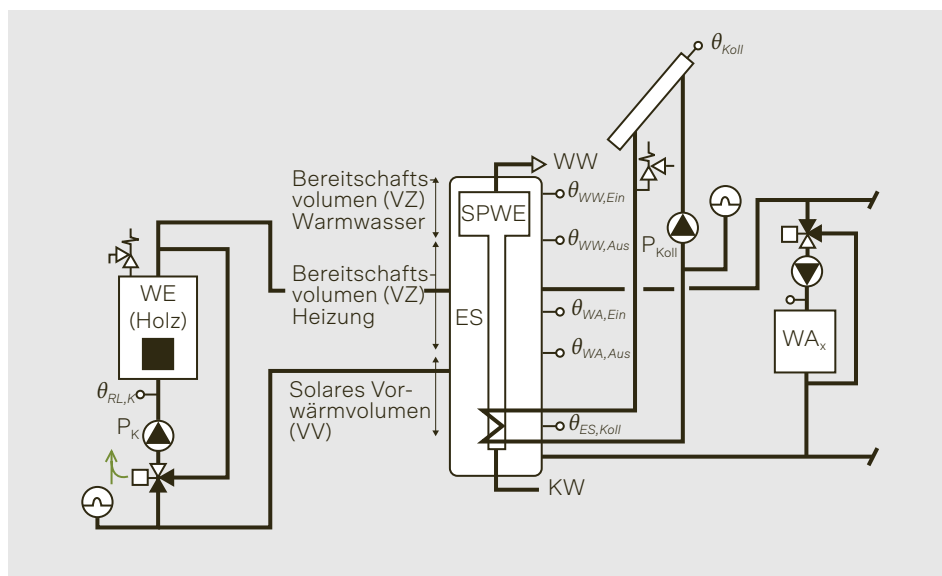


Bild 2.81: Holzfeuerung und thermische Solaranlage mit Kombispeicher.

	Heizung	Wassererwärmung
Quelle	- Fester Brennstoff - Sonnenenergie (ES)	-
Umwandlung	- Heizkessel - Sonnenkollektoren	Innenliegender SPWE
Speicherung	Energiespeicher (Kombispeicher)	Innenliegender SPWE (Kombispeicher)
Bemerkungen	- Monovalenter Betrieb mit Heizkessel - Thermische Solaranlage mit Stufenladung (High-Flow-System)	-

Tabelle 2.20: Spezifikationen zu Beispiel 5 mit thermischer Solaranlage.

höher als die Temperatur im Kombispeicher ($\theta_{ES,Koll}$), schaltet die Solarpumpe (P_{Koll}) ein. Dabei wird Wärme im unteren Bereich des Kombispeichers eingetragen. Sobald der Temperaturunterschied zwischen Kollektorfeld (θ_{Koll}) und Kombispeicher ($\theta_{ES,Koll}$) kleiner als 3 bis 5 K ist, schaltet die Solarpumpe aus.

Kritische Elemente:

- Kondensatbildung bei nicht kondensierenden Holzheizkesseln – Kesselrücklaufhochhaltung von mindestens 60 °C vorsehen
- Überhitzungsprobleme im Solar- und WW-Ladekreis
- Verdampfung Wasser-Glykol-Gemisch im Solarladekreis
- Fließgeschwindigkeit im Solarladekreis
- Erhöhte Wärmeverluste durch den grösseren Kombispeicher
- Bei grossem solarem Leistungseintrag können die Temperaturschichten im Kombispeicher gestört werden.
- Zerstörung von Temperaturschichten im Kombispeicher – impulsarmer Eintritt in den Kombispeicher mit dem Wärmeerzeugerkreis, Eintrittsgeschwindigkeit < 0,1 m/s wählen
- Bei mehreren Heizgruppen mit unterschiedlichen Vorlauftemperaturen muss im Kombispeicher die höchste notwendige Temperatur gespeichert werden.

Einsatzgebiet: EFH und MFH

Beispiel 6: Thermische Solaranlage und WP mit Kombispeicher

Grundsätzliches: Der Kombispeicher kann mit den 3-Weg-Umstellventilen (UV_1 und UV_2) kontrolliert das Bereitschaftsvolumen Warmwasser oder das Bereitschaftsvolumen Heizung laden.

Funktion beim Laden des Bereitschaftsvolumens Warmwasser mit der Zusatzheizung:

Die WP lädt das Bereitschaftsvolumen Warmwasser, sobald der Ein-Fühler ($\theta_{WW,Ein}$) anspricht. Dabei stellen die beiden 3-Weg-Umstellventile (UV_1 und UV_2) auf «Durchgang». Das Bereitschaftsvolumen Warmwasser wird in Stufen geladen, sofern die WP nicht leistungsgeregelt ist. Ist sie hingegen leistungsgeregelt, erreicht sie bereits von Beginn an die notwendige Vorlauf-temperatur, um das Trinkwasser auf die geforderten Warmwassertemperaturen zu erwärmen. Der Aus-Fühler ($\theta_{WW,Aus}$) nimmt den Ladekreis ausser Betrieb, sobald die Solltemperatur erreicht ist.

Funktion beim Laden des Bereitschaftsvolumens Heizung mit der Zusatzheizung:

Im Energiespeicher muss die höchste Vorlauf-temperatur gespeichert werden, die in den Heizgruppen gefordert wird. Wird diese Temperatur am Ein-Fühler ($\theta_{WA,Ein}$) unterschritten, gehen die beiden 3-Weg-Umstellventile (UV_1 und UV_2) in die Stellung «Umlenkung». Die WP lädt das Bereitschaftsvolumen Heizung, bis beim Aus-Fühler ($\theta_{WA,Aus}$) die Solltemperatur erreicht ist.

Funktion beim Laden des Kombispeichers mit thermischer Solaranlage:

Die thermische Sonnenenergienutzung entspricht der in Beispiel 1 (Warmwasserladung mittels Low-Flow-Solaranlage). Die Temperatur im Kollektorfeld (θ_{Koll}) wird mit den Temperaturen im Energiespeicher ($\theta_{ES,Koll,1}$ und $\theta_{ES,Koll,2}$) verglichen. Liegt die Energiespeichertemperatur um 3 bis 5 K tiefer als im Kollektorfeld, wird der Solarladekreis «Bereitschaftsvolumen Warmwasser» und/oder das «solare Vorwärmvolumen» mit Sonnen-

energie geladen. Sobald der Temperaturunterschied zwischen Kollektorfeld (θ_{Koll}) und Kombispeicher ($\theta_{ES,Koll.1}$ oder $\theta_{ES,Koll.2}$) kleiner als 3 bis 5 K ist, schaltet die Solarpumpe aus.

Kritische Elemente:

- Überhitzungsprobleme im Solar- und WW-Ladekreis
- Verdampfung Wasser-Glykol-Gemisch im Solarladekreis
- Fließgeschwindigkeit im Solarladekreis
- Erhöhte Wärmeverluste durch den grösseren Kombispeicher
- Bei Schichtladung ist ein grosser Temperaturhub der WP zum Laden des oberen Speicherbereichs notwendig.
- Zerstörung von Temperaturschichten im Kombispeicher; impulsarmer Eintritt in den Kombispeicher mit Wärmeerzeugerkreis, Eintrittsgeschwindigkeit

< 0,1 m/s wählen. Bei mehreren Heizgruppen mit unterschiedlichen Vorlauftemperaturen muss im Kombispeicher die höchste notwendige Temperatur gespeichert werden.

Einsatzgebiet: EFH und MFH

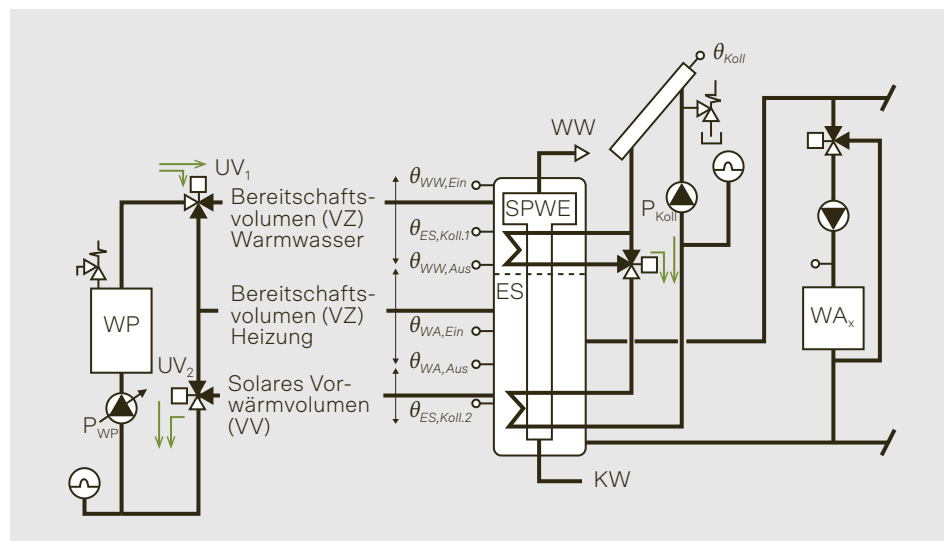


Bild 2.82: Wärmepumpe im monovalenten Betrieb mit thermischer Solaranlage und Kombispeicher.

	Heizung	Wassererwärmung
Quelle	- Umweltwärme und Abwärme - Sonnenenergie (ES)	-
Umwandlung	- Wärmepumpe - Sonnenkollektoren	Innenliegender SPWE
Speicherung	Energiespeicher (Kombispeicher)	Innenliegender SPWE (Kombispeicher)
Bemerkungen	- Monovalenter Betrieb mit WP - Thermische Solaranlage mit Stufenladung (Low-Flow-System)	-

Tabelle 2.21: Spezifikationen zu Beispiel 6 mit thermischer Solaranlage.

2.13 Wärmeabgabe

Grundsätzliches

Bei neuen wie bei alten Anlagen sollen innerhalb eines Heizkreises respektive von Heizgruppen oder Zonen nur Wärmeabgabesysteme (Heizkörper, Flächenheizungen, thermoaktive Bauteilsysteme, Luftherhitzer usw.) mit gleicher Auslegungstemperatur eingesetzt werden. Ist dies nicht möglich, müssen neue Heizkreise gebildet werden.

Anordnung der Wärmeabgabesysteme und thermische Behaglichkeit

Die Anordnung sowie die Art und Grösse der Heizflächen im Raum beeinflussen in Kombination mit den Eigenschaften des Raumes die Raumtemperatur (operative Temperatur), die Strahlungsasymmetrie sowie die Raumluftgeschwindigkeit. In kritischen Lagen soll zusammen mit der Bauherrschaft festgelegt werden, für welche Räume die Berechnung der thermischen Behaglichkeit, beispielsweise der Asymmetrie der Strahlungstemperatur, durchgeführt wird. Massgebend ist der vereinbarte Aufenthaltsbereich. Die Vorlauftemperaturen von Heizflächen (auch von Luftherhitzern) werden gemäss den Grenzwerten und Zielwerten in Tabelle 2.22 angelegt.

Leistung von Heizflächen

Heizflächen müssen auf Grundlage der raumweise ermittelten Norm-Heizlast nach [SIA 384/2] respektive [SN EN 12831-1] ausgelegt werden. Die Planung muss alle Faktoren einbeziehen, welche die Leistung der Heizflächen nennens-

wert beeinflussen können. Dazu gehören etwa Verkleidungen, Anschlussarten, Durchflüsse, Abdeckungen, Anstriche, Fussbodenbeläge, Teppiche oder Vorhänge. Auch bei präzise dimensionierten Wärmeabgabesystemen kann die garantierte Raumtemperatur nicht eingehalten werden, wenn

- die durchschnittliche Aussentemperatur unterhalb der Norm-Aussentemperatur liegt,
- benachbarte Räume gegenüber der Annahme reduziert beheizt werden,
- interne Wärmeeinträge oder die Belegung mit Personen von den Projektgrundlagen abweichen,
- die Nutzung gegenüber den Projektgrundlagen abweicht.

Lüftungsanlage mit Luftherwärmung (Luftheizung)

Lüftungsanlagen sollen nur dann zur Raumheizung eingesetzt werden, wenn dadurch der Aussenluft-Volumenstrom nicht über dem hygienisch notwendigen Wert im Normallüftungsbetrieb liegt. Über eine Luftheizung im Sinne der [SIA 382/5], also ohne unnötig erhöhte Aussenluft-Volumenströme oder -Temperaturen, lassen sich höchstens etwa 10 W/m² Energiebezugsfläche an spezifischer Heizleistung erreichen. Dies ist

Art der Wärmeabgabe	Grenzwert	Zielwert
Wärmeabgabe allgemein, ohne Fussbodenheizung	50 °C	40 °C
Fussbodenheizung (bis Raumtemperaturen von 22 °C)	35 °C	30 °C

Tabelle 2.22: Vorlauftemperaturen bei Dimensionierungsbedingungen gemäss [SIA 384/1].

Tabelle 2.23: Leistungsgrenzen und Temperaturniveaus von Wärmeabgabesystemen gemäss [SIA 382/2]. Bei den Werten handelt es sich um Richtwerte. Im Einzelfall können diese je nach konkreter Lösung abweichen. Insbesondere sind die Abgrenzungen zwischen den einzelnen Systemen nicht immer eindeutig. NGF: Nettogeschossfläche
P: Person

System	Maximale Leistung Heizen		Maximale Vorlauf- oder Zulufttemperatur °C	Medium	Bemerkungen
	W/m ² NGF	W/P			
Heizkörper	50		50	Wasser	
Deckenheizung	40		30	Wasser	
Fussbodenheizung	40		35	Wasser	
Thermoaktives Bauteilsystem	40		30	Wasser	
Luftheizung		360	50	Luft	bei 36 m ³ /(h P)

in der Regel nur bei neuen Gebäuden mit aussergewöhnlich guter Wärmedämmung, wie Minergie-P-Gebäuden, erfüllt. Im Heizfall muss insbesondere das Risiko von zu geringer Raumluftfeuchte berücksichtigt werden.

2.14 Quellen

[BO-Fachbuch]	Balmer, Matthias et al. Energetische Betriebsoptimierung – Gebäude effizienter betreiben. (2020). Faktor Verlag, Zürich, 2020. ISBN: 978-3-905711-57-8.
[EGID-Standorte]	Bundesamt für Statistik. Eidgenössische Gebäudeidentifikator (EGID). Via www.bfs.admin.ch → Register. Abgerufen Juli 2020.
[EnergieSchweiz]	EnergieSchweiz. www.energieschweiz.ch . Abgerufen Mai 2022.
[EnEV]	Verordnung über die Anforderungen an die Energieeffizienz serienmässig hergestellter Anlagen, Fahrzeuge und Geräte (Energieeffizienzverordnung, EnEV). Bern, 2017. www.admin.ch
[Erläuterungen Thermische Netze]	Hangartner D. et al. Grundlagen und Erläuterungen zu Thermischen Netzen. Hochschule Luzern – Technik und Architektur (HSLU). Horw, 2018.
[FWS]	Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz. www.fws.ch . Abgerufen Juli 2020.
[Gebäudeprogramm]	Bundesamt für Energie, Bundesamt für Umwelt. Das Gebäudeprogramm. www.dasgebaeudeprogramm.ch . Abgerufen Juli 2020.
[Holzenergie Schweiz]	Holzenergie Schweiz. www.holzenergie.ch , Abgerufen Mai 2022.
[LRV]	Luftreinhalte-Verordnung (LRV). Bern 1985. www.admin.ch .
[LSV]	Lärmschutz-Verordnung (LSV). Bern, 1985. www.admin.ch .
[Minergie Holz]	Minergie Schweiz und Holzenergie Schweiz. Wärme aus Holz – Wohnraumheizung mit Holz im Minergie-Gebäude. Basel, 2017. www.minergie.ch
[MuKEEn]	Konferenz Kantonalen Energiedirektoren (EnDK). Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEEn). Ausgabe 2014 (Nachführung 2018 – aufgrund geänderter Normen). Bern, 2018.
[QM Holzheizwerke]	QM Holzheizwerke. www.qmholzheizwerke.ch . Abgerufen Mai 2022.
[SIA 382/2]	Norm SIA 382/2. Klimatisierte Gebäude – Leistungs- und Energiebedarf. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2011; in Überarbeitung, neu als SIA 380/2.
[SIA 382/5]	Norm SIA 382/5. Mechanische Lüftung von Wohngebäuden. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2021.
[SIA 384/1]	Norm SIA 384/1. Heizungsanlagen in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2009; in Überarbeitung.

- [SIA 384/2] Norm SIA 384/2. Heizungsanlagen in Gebäuden – Leistungsbedarf. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2020.
- [SIA 384/3] Norm SIA 384/3. Heizungsanlagen in Gebäuden – Energiebedarf. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2020.
- [SIA 384/6] Norm SIA 384/6. Erdwärmesonden. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2021.
- [SIA 411] Norm SIA 411. Modulare Darstellung der Gebäudetechnik. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2016.
- [SN EN 12831-1] Schweizer Norm SN EN 12831-1:2017+C1:2020. (Norm SIA 384.201). Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich.
- [SN EN 15450] Schweizer Norm SN EN 15450 (Norm SIA 384.348). Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2007.
- [SN EN 303-5] Schweizer Norm SN EN 303-5. Heizkessel – Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, manuell und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistung bis 500 kW – Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung. Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV). Winterthur, 2012.
- [Solarrechner] Swissolar. Solarrechner, www.swissolar.ch → Für Bauherren → Planungshilfsmittel. Abgerufen Juli 2020.
- [Suva] Schweizerische Unfallversicherungsanstalt. Checkliste Nr. 67006. Grünschnitzelsilo (2016) und Checkliste Nr. 67007. Holzspänesilo (2013). Luzern. www.suva.ch
- [Swissolar] Swissolar. www.swissolar.ch. Abgerufen Juli 2020.
- [SWKI HE200-01] Richtlinie SWKI HE200-01. Lagerung von Holzpellets beim Endkunden. Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieure (Die Planer, SWKI). Urtenen-Schönbühl, 2018.
- [topten] Topten GmbH. www.topten.ch. Abgerufen Juli 2020
- [VDI 4640-2] Richtlinie VDI 4640 Blatt 2. Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI). Düsseldorf, 2019.
- [VKF-BSV] Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF). Schweizerische VKF-Brandschutzvorschriften 2015, Stand 1.8.2021. Bern, 2021. www.vkg.ch
- [WP-Handbuch] Dott, Ralf et al. Wärmepumpen – Planung, Optimierung, Betrieb, Wartung. Faktor Verlag, Zürich, 2018. ISBN: 978-3-905711-41-7.

Klimakälte

Zoran Alimpic 3.1 Bedeutung, Begriffe

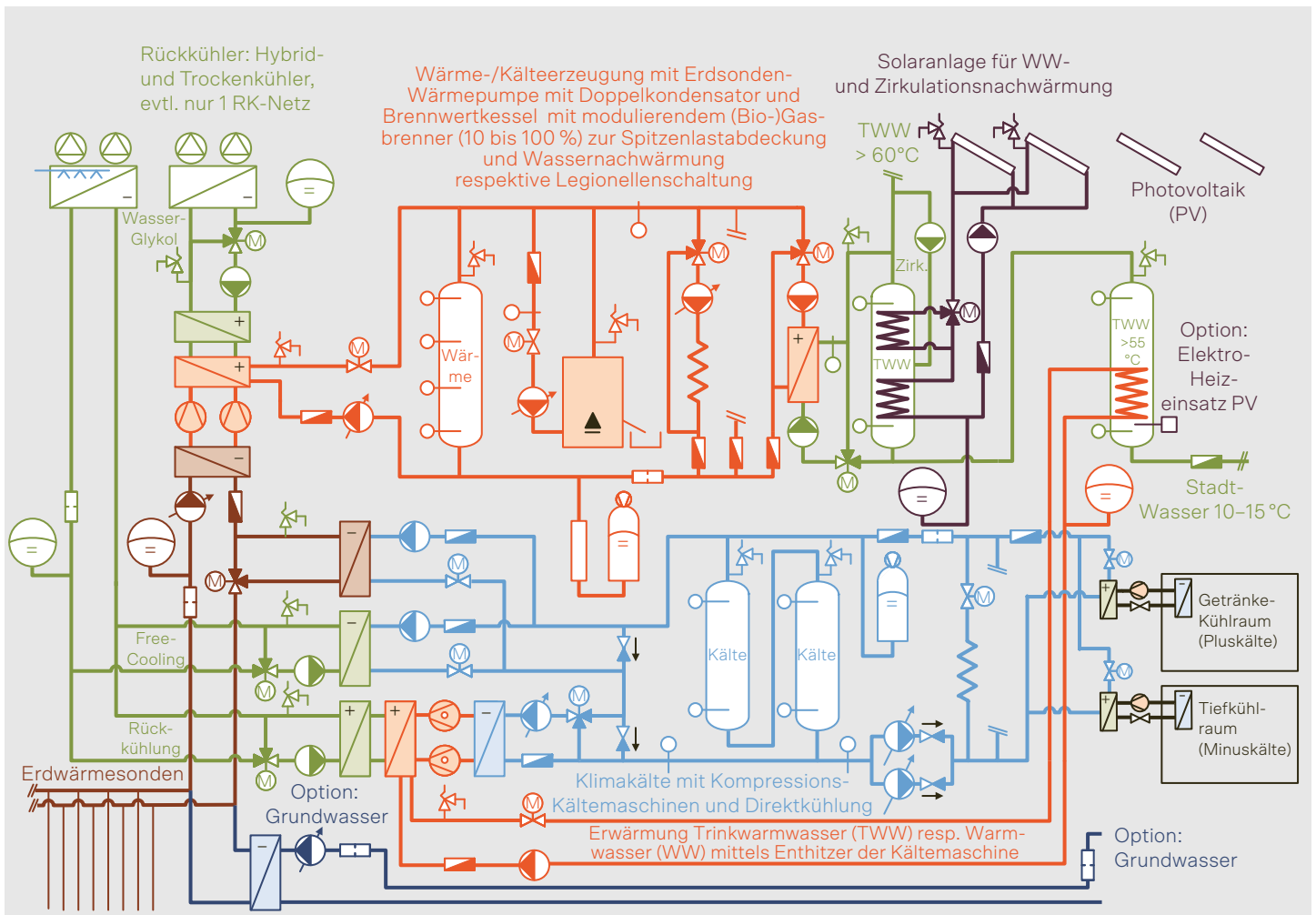
Im Zentrum dieses Kapitels steht die Beschreibung von Kälteanlagen, die mit Kaltwassertemperaturen zwischen etwa 0 und 20 °C arbeiten. Dazu gehören insbesondere die Komfortklimaanlagen. Alle anderen industriellen und verfahrenstechnischen Tiefkühlanlagen, beispielsweise für Gefriertrocknung, Gasverflüssigung, Vakuumtechnik und Supraleitung sind nicht Gegenstand dieses Buches.

Stellenwert: Kältetechnik hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Einerseits sind die Komfortansprüche der Nutzer gestiegen, andererseits hat die Abwärmeproduktion in Gebäuden wegen des höheren Technisie-

rungsgrads zugenommen. Zudem wird sich das Schweizer Klima im Laufe des 21. Jahrhunderts höchstwahrscheinlich signifikant verändern. Je nach Szenario und Region wird vorausgesagt, dass die mittleren Jahrestemperaturen um rund 3 bis 5 °C steigen. Es ist deshalb zu erwarten, dass der Klimakältebedarf künftig exponentiell steigen wird.

Energieeffizienz: Der Energieverbrauch für die Klimakälte lässt sich mit folgenden einfachen Massnahmen sowohl in Alt- als auch Neubauten minimieren:
 – Einstellen einer möglichst hohen Raumlufttemperatur im Sommer, beispielsweise 26 °C.

Bild 3.1: Beispiel für die Einbettung einer Kälteanlage in eine komplexe Energieversorgung mit diversen Grundschaltungen.



- Minimieren der internen Lasten durch Ausschalten von Wärmequellen wie Beleuchtung.
- Aussenliegende Beschattungsvorrichtungen korrekt bedienen.
- Nutzen von Free Cooling für die Nachtauskühlung des Gebäudes respektive der Direktkühlung der Zuluft von Hygienelüftungen mit Erdsonden oder Grundwasser.

Hydraulische Grundschtaltung

Bei einer Grundschtaltung gemäss Bild 3.1 ist es wichtig, dass die einzelnen Kreisläufe wie Rückkühlung, Kälteerzeugung und Kälteverteilung sorgfältig ausgelegt werden. Dabei gilt zu beachten, dass der Erzeugerkreis (Primärkreislauf) mittels Kältespeicherung hydraulisch vom Verbraucherkreis (Sekundärkreislauf) abgekoppelt ist. Damit wird gewährleistet, dass die Primärkreispumpe (Verdampferpumpe) die beiden Kältespeicher ohne Beeinträchtigung der beiden Sekundärkreisumpen (Hauptpumpen) laden kann. Letzte-

re wiederum entladen die Speicher, ohne den Kältemaschinen-Primärkreis zu beeinflussen.

Hinweis: Maximale Energieeffizienz wird erreicht, wenn mit einer Maschine gleichzeitig geheizt und gekühlt werden kann. Zudem müssen alle Abwärmequellen, beispielsweise aus gewerblichen Kälteanlagen, optimal genutzt werden.

Allgemeine Hinweise für die Planung

- Rückkühltemperaturen sollen möglichst tief gewählt werden, beispielsweise 34/28 °C.
- Kältemaschine: Die Leistung der Maschine sollte unbedingt regelbar sein, weil sie meistens im Teillastbereich läuft. Deshalb muss der maximale Wirkungsgrad nach [SIA 382/1 → ESEER] im Leistungsbereich zwischen 50 und 75% liegen. In dieser Bandbreite ist die Kältemaschine etwa 74% der gesamten Laufzeit im Einsatz.
- Kältemittel: Mit der Wahl des optimalen Kältemittels kann die Effizienz um 10 bis 15% gesteigert werden.












Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung
	Geschlossener Verdunstungsrückkühler		Geschlossenes Membran-Ausdehnungsgefäss mit Luftkompressor
	Verdichter: Allgemeines Symbol		Geschlossenes Membran-Ausdehnungsgefäss
	Kolbenverdichter, 2-stufig, offene Bauweise		Platten-Wärmeübertrager
	Kolbenverdichter, 1-stufig, halbhermetisch		Wärmezähler mit elektronischem Zählwerk
	Kolbenverdichter, 1-stufig, hermetische Bauweise		Dreiweg-Mischventil mit Antrieb
	Rotationskolbenverdichter		Durchgangsregelventil mit Antrieb
	Turboverdichter, 1-stufig		Sicherheitsventil mit Feder
	Schraubenverdichter		Rückflussverhinderer, Rückschlagventil
	Umwälzpumpe		Filter, Schmutzfänger
	Ventilator		Messfühler, Sonde: Temperatur

Tabelle 3.1: Symbole der Kältetechnik. (Quellen: SIA 410 und 411)

- Speicher müssen so konzipiert werden, dass jeder Kompressor nach dem Einschalten mindestens 20 Minuten durchlaufen kann. Zudem sollte die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt $\geq 6 \text{ K}$ betragen.
- Kälteverteilung: Mit Drosselschaltungen muss sichergestellt werden, dass der Massenstrom zu jeder Zeit der aktuellen Kältelast angepasst wird.
- Kaltwassertemperaturen sollen möglichst hoch gewählt werden. Gemäss [SIA 382/1] gelten folgende Anforderungen an die Vorlauftemperatur: Klimaanwendungen ohne Entfeuchtung $\geq 14 \text{ °C}$, mit Teilentfeuchtung bei Kühldecken $\geq 10 \text{ °C}$, mit kontrollierter Entfeuchtung $\geq 6 \text{ °C}$ (Prozessklima).
- Frequenzumformer: In grösseren Anlagen wird empfohlen, die Differenzdruckmessung am Ende des Leitungsnetzes oder beim weitesten Verbraucher zu installieren. Dies führt zu grösseren Einsparungen beim Pumpenstrom für die beiden Inline-Hauptpumpen (Trockenläufer).

Schnittstellen zu anderen Bereichen

Die Kältetechnik darf nie isoliert betrachtet werden, weil sie immer mit anderen Gewerken verknüpft ist. Deshalb sind die Schnittstellen ein wichtiges Thema (Tabelle 3.2).

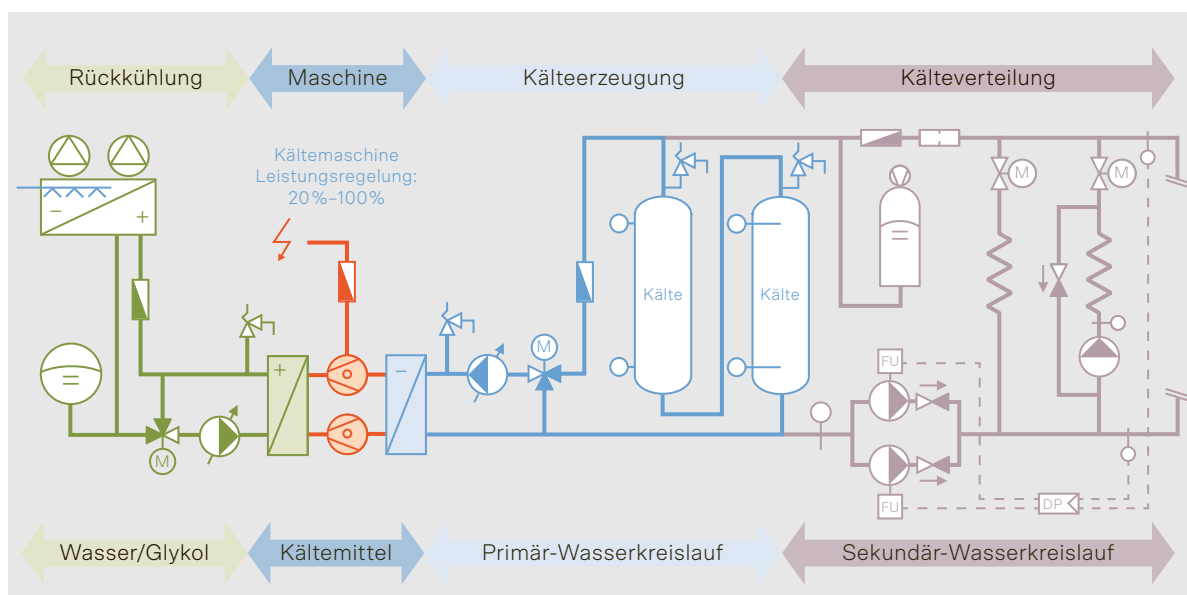


Bild 3.2: Hydraulische Grundschialtung einer grösseren Kälteanlage.

Gewerk, Disziplin	Wichtigste Schnittstellen mit der Klimakälte
Architektur, Kunst am Bau	<ul style="list-style-type: none"> - Ästhetik des Rückkühlers auf dem Flachdach - Farb- und Materialkonzept - Abklärungen mit Denkmalpflege - Mithilfe bei Baueingabe - Transportwege und Einbringöffnungen - Berücksichtigen längerer Bewilligungsverfahren (bei Aussenanlagen) und Lieferzeiten - Prüfen von Dachsanierungen, Schallschutzwänden und örtliche Trennung von Maschinenräumen
Akustik	<ul style="list-style-type: none"> - Schallschutz, insbesondere von Kompressoren, drehzahlgeregelten Ventilatoren und Umwälzpumpen - Unterscheiden von Tages- und Nachtbetrieb
Bauphysik	<ul style="list-style-type: none"> - Anbringen schalldämmender Materialien an Wänden und Decken
Baustatik, Festigkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Gewicht von Kältemaschine, Rückkühler und Energiespeicher - Aussparungen und Sockel für alle Apparate
Elektroanlagen	<ul style="list-style-type: none"> - Anschlüsse aller Elektromotoren, insbesondere von Kompressoren, Wasseraufbereitung, Rückkühlventilatoren und Hauptpumpen
Heizungsanlagen	<ul style="list-style-type: none"> - Einbinden der Abwärmenutzung in die Hydraulik der Wärmeenergieerzeugung - Doppelnutzung der Wärmepumpe auch als Kältemaschine - Direktkühlung mittels Energiequellen wie Erdsonden und Grundwasser
Gewerbliche Kälte	<ul style="list-style-type: none"> - Abwärmenutzung für andere Prozesse, insbesondere die Wassererwärmung - Prüfen eines gemeinsamen Rückkühlers - Evtl. Anschluss der Rückkühlung an die Klimakälte, damit die Wärmerückgewinnung zentral gelöst werden kann. Dann können die Rückkühler der gewerblichen Kälte weggelassen werden.
Lüftungs- und Klimaanlagen	<ul style="list-style-type: none"> - Wahl von möglichst hohen Betriebstemperaturen zur Luftkühlung und zur Entfeuchtung (siehe SIA 382/1) - Berücksichtigen von Revisionsöffnungen bei Monoblocs
Sanitäranlagen	<ul style="list-style-type: none"> - Einbinden der Abwärmenutzung in die Hydraulik der Wassererwärmung - Wasseraufbereitung für besprühte Rückkühler resp. Nasskühler - Montage korrekter Schwitzwasser- resp. Kondensatsiphons (Glycerinfüllung gegen Austrocknung)
Steuerung und Regelung	<ul style="list-style-type: none"> - Definition der minimalen Laufzeiten pro Kompressorstufe (ca. 20 Minuten) - Analyse des Teillastverhaltens - Hydraulische Abkoppelung von Energieerzeugung und Energieverteilung - Optimale Kaskadenregelung aller Energieerzeuger
Sicherheit	<ul style="list-style-type: none"> - Füllen aller im Freien geführten Wasserrohre mit Wasser-Frostschutz-Gemisch - Korrosionsschutz der Leitungen mit Zweikomponenten-Anstrich (Alternative: Kunststoff oder Edelstahl) - Auswahl der vorgeschriebenen Dämmungen im Bereich von Brandabschnitten - Fernüberwachung durch Fachleute - Sturmlüftung in Technikzentralen für die Absaugung von Kältemitteln im Störfall - Vermeiden von Temperaturstaus durch minimale Lüftung der Technikzentrale - Anbringen von Geländern und Schutzabsperungen resp. Verschalen von aussen
Hygiene	<ul style="list-style-type: none"> - Die Wasserqualität muss besonders bei Lüftungs- und Rückkühlanlagen periodisch geprüft werden (Legionellen) - Kondensat resp. Schwitzwasser bei Luftkühlern, Umluftkühlern etc. muss sofort abgeführt werden (kein stehendes Wasser!)
Energie	<ul style="list-style-type: none"> - Gewährleisten von maximalen COP und EER unter Berücksichtigung des Teillastverhaltens - Messung und Auswertung aller relevanten Energieströme - Reduktion der Energieverluste und Vermeidung von Kondensat durch optimale Dämmung - Prüfung von Optionen wie Enthitzern, Doppelkondensatoren und Free-Cooling

Tabelle 3.2: Schnittstellen in der Kälte-technik.

3.2 Kältemittel

Allgemeines

Nach DIN 8960 ist ein Kältemittel ein Arbeitsmedium, das in einem Kältemaschinenprozess bei niedriger Temperatur und niedrigem Druck Wärme aufnimmt und bei höherer Temperatur und höherem Druck Wärme abgibt. Zu den Kältemitteln gehören beispielsweise:

- R290: Propan; R600a: Isobutan; R717: NH₃/Ammoniak; R718: H₂O/Wasser.
- FCKW/CFC: vollhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (engl. Chlor Fluor Carbone)
- FKW/HFC: Fluorkohlenwasserstoffe (engl. Hydro Fluor Carbone)
- H-FCKW/HCFC: teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (engl. Hydro Chlor Fluor Carbone)
- H-FKW: teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
- HFO (Hydrofluorolefine): teilhalogenierte, ungesättigte Kohlenwasserstoffe wie HFO-1234yf (CH₂=CFCF₃ oder C₃H₂F₄) und HFO-1234ze (CHF=CHCF₃ oder C₃H₂F₄). Diese synthetischen Kältemittel sind im Gegensatz zu den anderen synthetischen Kältemitteln in der Luft nicht stabil. Das heisst: Sie haben in der Atmosphäre eine Aufenthaltsdauer von nur wenigen Tagen, also deutlich weniger als 2 Jahre. Damit sind sie nur in geringem Mass klimaschädigend.

Eine systematische Einteilung der Kältemittel zeigt Bild 3.3.

Wichtige Begriffe

- Vollständig halogeniert: Kohlenwasserstoffverbindungen, bei denen alle Wasserstoffatome durch Halogene, also Brom, Chlor, Fluor oder Jod ersetzt sind; Beispiel Halon 1211, also Bromchlordifluormethan, das als Treibmittel in Handfeuerlöschern verwendet wird
- Teilhalogeniert: Bei diesen Verbindungen sind die Wasserstoffatome nur teilweise durch Chlor- oder Fluoratome ersetzt.
- Gemische, Blends: Kältemittel aus mehreren verschiedenen Stoffen
- Zeotrope Gemische: Als Alternative zu den H-FKW bieten sich zeotrope Gemische wie das R407c an. Bei ihnen wird am Phasenwechsel zwischen flüssig und gasförmig die unterschiedliche Zusammensetzung sichtbar. Dementsprechend laufen Verdampfung und Kondensation zwar bei konstantem Druck ab, nicht aber bei konstanter Temperatur (Temperaturgleit).
- Azeotrope Gemische: Dazu gehören Gemische wie das Kältemittel R410a. Im Gegensatz zu den zeotropen Gemischen verhalten sie sich aber wie Einstoffkältemittel.

Halogenhaltige Kältemittel können Ozon in der oberen Atmosphäre abbauen. Ein Mass dafür ist der ODP-Wert (Ozon Depletion Potential). Ihre klimaschädigende Wirkung wird als GWP-Wert (Global Warming Potential, Treibhauspotenzial) angegeben. Er ist ein Mass dafür, wie viel eine bestimmte

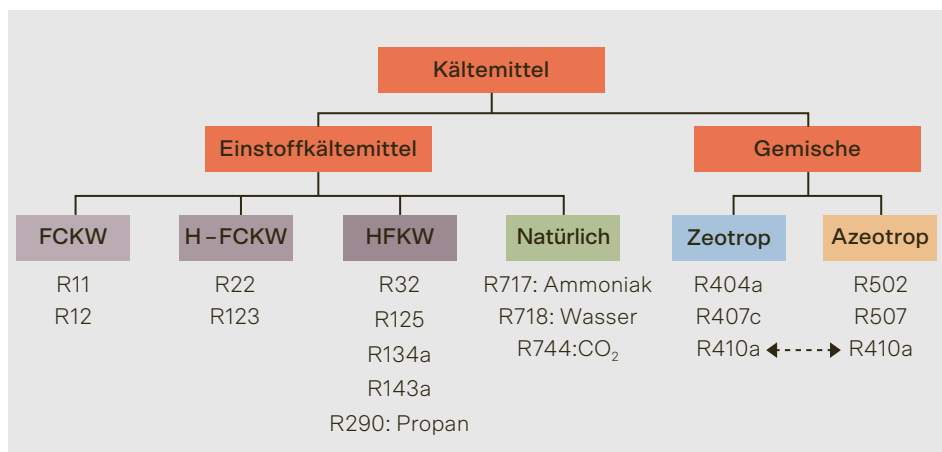


Bild 3.3: Systematische Einteilung der Kältemittel.

Menge Treibhausgas während 100 Jahren im Vergleich zur gleichen Menge CO₂ zur globalen Erwärmung beiträgt. Das Bundesamt für Umwelt (Bafu) veröffentlicht regelmässig die wichtigsten Kältemittel mit ihren ODP, GWP und Sicherheitsgruppen.

Verbotene Kältemittel

Wegen ihrer klima- respektive ozon-schädigenden Wirkung dürfen verschiedene Kältemittel nicht mehr eingesetzt werden. Zu den verbotenen Kältemitteln gehören die FCKW. Auch die meisten H-FCKW wie das R22 sind mittlerweile verboten. Tabelle 3.3 gibt dazu eine Übersicht. Dort aufgeführte Kältemittel dürfen nicht in Neuanlagen verwendet werden. Bestehende Anlagen, die verbotene Kältemitteln enthalten, dürfen weder weiterverkauft noch erweitert oder umgebaut werden. Sie dürfen zwar weiter betrieben, aber nicht mehr nachgefüllt werden. Für bestehende Anlagen mit mehr als 3 kg verbotenen Kältemitteln besteht eine Meldepflicht (www.smkw.ch), zudem sind ein Wartungsheft und periodische Dichtigkeitsprüfung erforderlich.

Natürliche Kältemittel

Grundsätzlich sollen in Klimakälteanlagen natürliche Kältemittel eingesetzt werden. Dies gilt insbesondere für Neuanlagen, Erweiterungen und Umbauten. HFO sind in solchen Fällen ebenfalls zulässig. Für Anlagen mit mehr als 3 kg Kältemittel muss ein Wartungsheft geführt werden. Eine Übersicht über natürliche Kältemittel gibt Tabelle 3.4.

In der Luft stabile Kältemittel

Die Installation von neuen Anlagen sowie das Erweitern und Umbauen von bestehenden mit in der Luft stabilen Kältemitteln über bestimmten Kälteleistungen sind seit Ende 2013 verboten. Voraussetzung für eine Ausnahmebewilligung: Nach dem Stand der Technik sind die Sicherheitsanforderungen gemäss [SN EN 378] ohne in der Luft stabile Kältemittel nicht erfüllbar. Anlagen, die mehr als 3 kg in der Luft stabile Kältemittel enthalten, sind meldepflichtig (www.smkw.ch), es sind ein Wartungsheft und periodische Dichtigkeitsprüfungen erforderlich. Bei kleineren Anlagen sind anstelle natürlicher Kältemittel auch solche gemäss Tabelle 3.5 zulässig, sie müssen aber gemeldet werden.

Tabelle 3.3: Verbotene Kältemittel.
¹GWP: Global Warming Potential, Treibhauspotenzial,
²Sicherheitsgruppe gemäss SN EN 378-1.
 (Quelle: Bundesamt für Umwelt, Stand September 2020, die GWP stammen aus dem 4. IPPC-Bericht IV von 2007; die GWP-Werte für Gemische entsprechen den jeweiligen Massenanteilen)

Rechtlicher Status der Kältemittel gemäss Anhang 2.10 ChemRRV	Kategorie	Kältemittel	GWP ¹	Sicherheitsgruppe ²		
Ozonschichtabbauende, verbotene Kältemittel	FCKW (chlorhaltig, perhalogeniert)	Einstoff-Kältemittel	R11	4750	A1	
			R12	10 900	A1	
			R13	14 400	A1	
			R13B1	7140	A1	
		Gemische (Blends)	R502 (Gemisch)	4657	A1	
	HFCKW (chlorhaltig, teilweise halogeniert)	Einstoff-Kältemittel	R22	1810	A1	
			Gemische (Blends), überwiegend R22-haltig	R401A (MP39)	1182	A1
				R402A (HP80)	2788	A1
				R402B (HP81)	2416	A1
				R408A (FX-10)	3152	A1
R409A (FX-56)	1585	A1				
HCFO (teilweise halogenierte Fluorchlorolefine)	Einstoff-Kältemittel	R1233zd(E)	3,7	A1		
		R1233zd(Z)	0,4	A1		
		R1224yd(Z)	0,8	A1		

Rechtlicher Status der Kältemittel gemäss Anhang 2.10 ChemRRV	Kategorie		Kältemittel	GWP ¹	Sicherheitsgruppe ²
Zulässige Kältemittel unter Vorbehalt der Einhaltung der Sicherheitsanforderungen	Natürliche Kältemittel	Einstoff-Kältemittel	R170 (Ethan)	6	A3
			R290 (Propan)	3	A3
			R717 (NH ₃)	0	B2L ³
			R718 (H ₂ O)	0	A1
			R744 (CO ₂)	1	A1
			R600 (Butan)	4	A3
			R600a (Isobutan)	3	A3
			R1270 (Propen)	2	A3
	Gemische (Blends)	R290/R600a	3	A3	
		R290/R170	3	A3	
		R723 (DME/NH ₃)	8	_ 4	
	HFO (teilweise halogenierte Fluorolefine)	Einstoff-Kältemittel	R1234yf	<1	A2L ³
			R1234ze	<1	A2L ³
R1336mzz(Z)			2	A1	

Tabelle 3.4: Zulässige Kältemittel unter dem Vorbehalt, dass die Sicherheitsanforderungen eingehalten sind.
¹GWP: Global Warming Potential, Treibhauspotenzial,
²Gemäss SN EN 378-1:2017, 3R723 ist in der SN EN 378-1:2017 nicht erfasst,
³neue Sicherheitsgruppe gemäss SN EN 378-1:2017.
 (Quelle: Bundesamt für Umwelt, Stand September 2020)

Rechtlicher Status der Kältemittel gemäss Anhang 2.10 ChemRRV	Kategorie		Kältemittel	GWP ¹	Sicherheitsgruppe ²
In der Luft stabile Kältemittel, begrenzt anwendbar in neuen Anlagen und Geräten	FKW/HFKW (vollständig oder teilweise halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe)	Einstoff-Kältemittel	R23	14 800	A1
			R32	675	A2L
			R125	1430	A1
			R134a	3500	A1
			R143a	4470	A2L
		Gemische (Blends)	R404A	3922	A1
			R407C	1774	A1
			R407F	1825	A1
			R410A	2088	A1
			R413A	2053	A2
			R417A	2346	A1
			R422A	3143	A1
			R422D	2729	A1
			R437A	1805	A1
			R507A	3985	A1
	R-508A	13 214	A1		
	R-508B	13 396	A1		
	Gemische mit HFO (Blends)	R448A	1386	A1	
		R449A	1396	A1	
		R450A	601	A1	
		R-452A	2140	A1	
R-454C		146	A2L		
R-455A		146	A2L		
R513A	630	A1			

Tabelle 3.5: In der Luft stabile Kältemittel, die begrenzt in neuen Anlagen und Geräten verwendet werden dürfen.
¹GWP: Global Warming Potential,
²Gemäss SN EN 378-1:2017.
 (Quelle: Bundesamt für Umwelt, Stand September 2020)

Einsatzgrenzen

Die Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) gibt Einsatzgrenzen für die in der Luft stabilen Kältemittel in stationären Kälteanlagen und Wärmepumpen vor. Sie sind über die Kälteleistung \dot{Q}_0 definiert. Dabei entspricht die in der ChemRRV aufgeführte Kälteleistung der Nutzkälteleistung einer Anlage bei Spitzenverbrauch. Eine Übersicht gibt Tabelle 3.6.

Zu beachten gilt es insbesondere folgende, seit Anfang 2020 geltenden gesetzlichen Vorgaben:

- Die Regeln zum Inverkehrbringen von stationären Anlagen mit in der Luft stabilen Kältemitteln wurden verschärft (Anhang 2.10 Ziffer 2.1 Absatz 3 [ChemRRV]).

- Für Anlagen mit Füllmengen ab 40 Tonnen CO₂-Äquivalent gilt ein Nachfüllverbot mit nicht regenerierten in der Luft stabilen Kältemitteln mit Treibhauspotenzial von 2500 oder mehr (Anhang 2.10 Ziffer 3.3 und Ziffer 7 Absatz 5 [ChemRRV]).

Kältemittelgruppen

Bezüglich ihrer Umweltwirkung werden Kältemittel gemäss Bild 3.4 in Gruppen zusammengefasst:

- Die rot eingefärbten, chlor- und/oder fluorhaltigen Kältemittel wie R11, R12, R22 und R502 sind wegen ihres hohen Ozonabbaupotenzials verboten.
- Die grün eingefärbten natürlichen Kältemittel wie R290, R717, R718 und R744 können bedenkenlos eingesetzt werden.

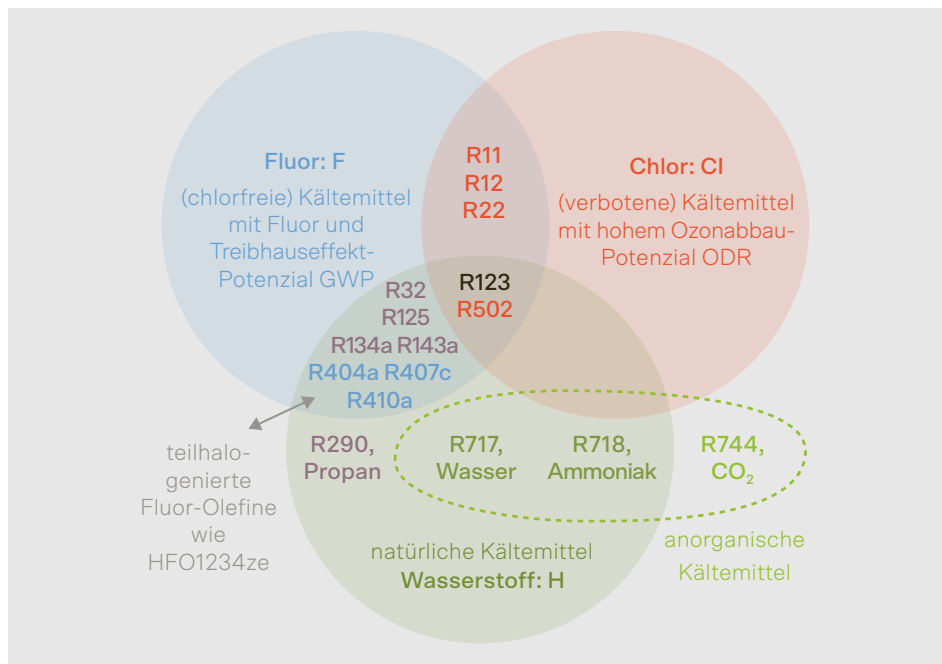


Bild 3.4: Kältemittel werden aufgrund ihrer Umweltwirkungen in Gruppen zusammengefasst; rot: verbotene Kältemittel, grün: bedenkenlos einsetzbar, blau, schwarz und lila: erlaubte Kältemittel, die aber ein Treibhausgaspotenzial haben.

Tabelle 3.6: Einsatzgrenzen von in der Luft stabilen Kältemitteln gemäss [ChemRRV]. (Quelle: Bundesamt für Umwelt, Stand April 2018)

Komfort Klimakälteanlagen (Funktion max. 8 Monate/Jahr)				Beispiel Kältemittel
GWP < 1900	zulässig	Luftgekühlt nicht zulässig wenn Kältemittelmenge >0,4 kg/kW oder >0,48 kg/kW mit AWN	nicht zulässig	R134a, R407C
GWP > 1900	zulässig	Luftgekühlt nicht zulässig wenn Kältemittelmenge >0,18 kg/kW oder >0,22 kg/kW mit AWN	nicht zulässig	R410A, R427A
	$Q_0 \leq 100 \text{ kW}$	$100 \text{ kW} < Q_0 \leq 600 \text{ kW}$	$Q_0 > 600 \text{ kW}$	
Klimakälteanlagen (Industrie)				Beispiel Kältemittel
GWP < 1900	zulässig	Luftgekühlt nicht zulässig wenn Kältemittelmenge >0,4 kg/kW oder >0,48 kg/kW mit AWN	nicht zulässig	R134a, R407C
GWP > 1900	zulässig	Luftgekühlt nicht zulässig wenn Kältemittelmenge >0,18 kg/kW oder >0,22 kg/kW mit AWN	nicht zulässig	R410A, R427A
	$Q_0 \leq 100 \text{ kW}$	$100 \text{ kW} < Q_0 \leq 400 \text{ kW}$	$Q_0 > 400 \text{ kW}$	

Sie haben weder ein Ozonabbau- noch ein Treibhauseffekt-Potenzial.

- Alle übrigen chlorfreien Kältemittel (blau eingefärbt) sind ebenfalls erlaubt, tragen aber zum Erwärmen der Atmosphäre bei.
- Als energieeffiziente Alternative zu den natürlichen Kältemitteln bieten sich die HFO an. Sie können bei grösseren Anlagen, ab etwa $Q_0 > 400$ kW, gemäss Tabelle 3.6 eingesetzt werden, beispielsweise anstelle von R134a oder Ammoniak (NH_3).

Treibhauseffekt und TEWI-Kennwert

Mit dem TEWI-Wert (Total Equivalent Warming Impact) kann der gesamte Einfluss einer Kälteanlage auf das globale Klima abgeschätzt werden. Dabei werden sowohl der direkte Beitrag durch Kältemittellemissionen in die Atmosphäre als auch der indirekte Beitrag durch die während der technischen Lebensdauer verbrauchte Energie berücksichtigt. Letzteres ist notwendig, weil die Betriebsenergie für die Kälteanlage, also Strom oder Wärme, oft nicht CO_2 -neutral sind. Der TEWI wird gemäss Bild 3.5 berechnet:

Aus der Gleichung geht hervor, dass sich der TEWI stark reduzieren lässt, wenn die Kältemaschine vollständig mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen betrieben wird. Ein grosser Nutzen des TEWI ist, dass sich mit ihm die wirkungsvollsten Massnahmen zum Verringern des Einflusses von Kälteanlagen auf das Klima finden und bewerten lassen. Er kann auch beim Optimieren der Betriebskosten helfen.

Zwei Hinweise zum Treibhauspotenzial von Kälteanlagen:

- Zurzeit werden bei Neuanlagen für die Klimakälte oft Kältemittel eingesetzt, die einen guten TEWI-Wert haben. Beispiele: R290 (Propan), R717 (Ammoniak), R718 (Wasser), R744 (CO_2) und R134a (CF_3CH_2F).
- Nach der Revision der ChemRRV gilt der Grundsatz, dass ab rund 400 kW (respektive 600 kW) Kälteleistung nur noch natürliche Kältemittel eingesetzt werden dürfen. Eine Ausnahme sind die HFO-Kältemittel.

Energy Efficiency Ratio

Das Energy Efficiency Ratio (EER) entspricht dem Verhältnis von erzeugter Kühlleistung (Q_{Ktot}) zur Energiezufuhr (P_e). Häufig wird statt EER der Wert COP verwendet. EER und COP sind gleichwertig, während das EER bei Kälteanlagen verwendet wird, ist bei Wärmepumpen der COP gebräuchlich.

$$EER = \frac{Q_{Ktot}}{P_e}$$

P_e = Leistungsaufnahme von Verdichter, Verdampferpumpe, Verflüssigerpumpe, sowie Regel-, Steuer- und Sicherheitseinrichtungen

European Seasonal EER

In Europa wird die saisonale Effizienz von Kühlgeräten, Kältemaschinen und Klimaanlage oft anhand der europäischen saisonalen Energieeffizienzrate, European Seasonal EER (ESEER) bewertet. Sie wird von der Eurovent Certification Company festgelegt. Auf der

$$TEWI = (GWP \cdot L \cdot n) + (GWP \cdot m [1 - a_{\text{recovery}}]) + (n \cdot E_{\text{annual}} \cdot b)$$

| ← Leckage → | ← Rückgewinnungsverluste → | ← Energiebedarf → |
| ← direkter Treibhauseffekt → | ← indirekter Treibhauseffekt → |

GWP_{100a} = Treibhauspotenzial als CO_2 -Äquivalent pro kg Kältemittel (kg_{KM})
 L = Leckrate pro Jahr in kg_{KM}/a
 n = Betriebszeit der Anlage in Jahren
 m = Anlagefüllmasse in kg Kältemittel
 $\alpha_{\text{Rückgewinnung}}$ = dimensionslos
 E_{Jahr} = Energiebedarf pro Jahr in kWh_e gemäss Stommix [CO_2 -Äquivalent/ kWh_e]

Bild 3.5: Berechnung des TEWI.

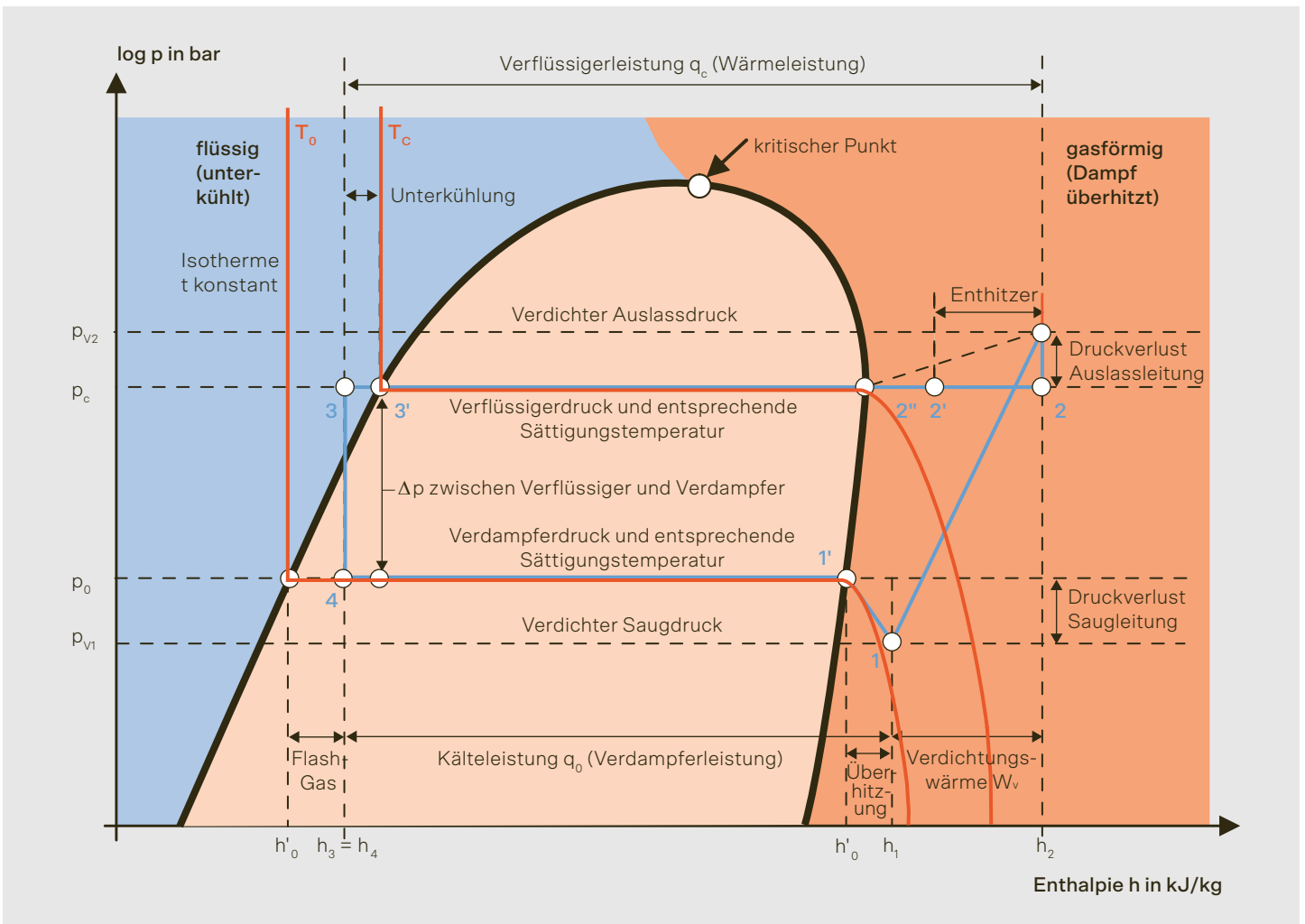
Basis der EER für 100, 75, 50 und 25 % Last wird der ESEER (nach SIA 382/1) wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned} \text{ESEER} &= 0,03 \cdot \text{EER}_{100\%} \\ &+ 0,33 \cdot \text{EER}_{75\%} \\ &+ 0,41 \cdot \text{EER}_{50\%} \\ &+ 0,23 \cdot \text{EER}_{25\%} \end{aligned}$$

Kreisprozess

In Kältemaschinen durchläuft das Kältemittel einen Kreisprozess mit vier Phasen (Bild 3.6). Die Strecke 4-1 in der Grafik entspricht der Kühlleistung und ist die Nutzleistung der Kälteanlage. Die Strecke 1-2 ist die über den Verdichter aufgewendete Antriebsleistung. Die Strecke 2-3 entspricht der über den Verflüssiger abgegebenen Wärmeleistung, also der Abwärme einer Kälteanlage. Aus dem Verhältnis von Nutzleistung zu Antriebsleistung lässt sich die Leistungszahl COP bestimmen. Der COP wird bei Wärmepumpen verwendet.

Bild 3.6: Kältekreisprozess im Druck-Enthalpie-Diagramm (respektive log-p/h-Diagramm) dargestellt.



3.3 Kühllasten

Anforderungen und Quantifizierung

Grundsätzlich müssen Gebäude baulich so konzipiert sein, dass bei normaler Nutzung nicht mechanisch gekühlt werden muss, sie benötigen also beispielsweise einen aussenliegenden Sonnenschutz. Bei der Planung ist es wichtig, dass alle Annahmen aufgelistet und mit den Nutzenden respektive der Bauherrschaft oder dem Betreiber besprochen werden. Erst nach einer Einigung mit ihnen sollte die Anlage dimensioniert werden. Ob eine Kühlung notwendig ist, lässt sich anhand der internen Wärme-

einträge pro Nettogeschossfläche und den zusätzlich zur mechanischen Lüftung vorhandenen Möglichkeiten einer Fensterlüftung abschätzen. Als Grundlage dafür dient Tabelle 3.7, die wiederum auf der Norm SIA 382/1 basiert. Ist eine Fensterlüftung nicht möglich, beispielsweise aufgrund schalltechnischer, architektonischer oder wärmetechnischer Rahmenbedingungen, so müssen aufgrund der Flussdiagramme nach [SIA 382/1] und SIA [382/2] die technischen Anforderungen an eine Kälteanlage geprüft werden. Erscheint aufgrund dieser ersten Abschätzung eine mechanische Kühlung notwendig,

Tabelle 3.7 (links): Abschätzung der Notwendigkeit respektive der Wünschbarkeit einer Kühlung gemäss SIA 382/1.

Interne Wärmeeinträge pro Tag in Wh/m ²			Kühlung
mit Fensterlüftung Tag und Nacht	mit Fensterlüftung bei Belegung	ohne Fensterlüftung	
> 200	> 140	> 120	notwendig
140 – 200	100 – 140	80 – 120	erwünscht*
< 140	< 100	< 80	nicht notwendig*

*Erlaubt ist nur eine minimale Kühlung bis max. 7 W/m² Nettogeschossfläche. Bei bestehenden Anlagen oder Sanierungen sind sogar 12 W/m² erlaubt.

Tabelle 3.8 (unten): Risikobeurteilung bezüglich des thermischen Komforts und Beurteilung der Systemwahl. (Quelle: Merkblatt SIA 2021)

	Mittlere Tagessumme der Gesamtwärmelast (solare und interne Wärmelasten) Q _{total} in Wh/m ² d			
	150	250	350	450
System für Lüftung und Kühlung	Risikobeurteilung des thermischen Komforts und Beurteilung der Systemwahl			
[0] Nur Fensterlüftung** – Komfort Fensterlüftung tags – Wahl Haustechniksystem	evtl. genügend evtl. genügend	ungenügend ungenügend	unzumutbar ungenügend	unzumutbar ungenügend
[1] Mechanische Lüftung und Nachtlüftung Luftwechselrate 2,0/h – Komfort ohne Fensterlüftung tags – Komfort mit Fensterlüftung tags** – Wahl Haustechniksystem	28 °C bis 29 °C evtl. genügend genügend angemessen	29 °C bis 31 °C ungenügend evtl. genügend evtl. genügend	30 °C bis 32 °C unzumutbar ungenügend ungenügend	31 °C bis 34 °C unzumutbar unzumutbar ungenügend
[2] Wie 1 und Primärluftkühlung – Komfort ohne Fensterlüftung tags – Komfort mit Fensterlüftung tags** – Wahl Haustechniksystem	26 °C bis 27 °C gut sehr gut optimal	27 °C bis 29 °C genügend gut angemessen	28 °C bis 31 °C ungenügend evtl. genügend evtl. genügend	29 °C bis 33 °C unzumutbar ungenügend ungenügend
[3] Wie 2 und Zusatzkühlung tags mit 20 W/m ² – Komfort ohne Fensterlüftung tags – Komfort mit Fensterlüftung tags** – Wahl Haustechniksystem	<< 26 °C gut gut überdimensioniert	< 26 °C gut sehr gut optimal	26 °C bis 27 °C genügend* gut angemessen	27 °C bis 28 °C ungenügend* evtl. genügend* evtl. genügend*

Anmerkungen:

* Bei hohen thermischen Gesamtlasten muss die Zusatzkühlung (Leistung respektive Laufzeit) entsprechend erhöht werden, um den gewünschten Komfort zu erreichen.

** Die unterstützende Fensterlüftung tagsüber muss am gegebenen Standort (Lärmbelastung) machbar sein: Es wird eine angemessene manuelle Bedienung durch die Benutzer vorausgesetzt. Zudem muss die zu öffnende Fensterfläche eine minimale Abmessung aufweisen, das heisst, mehr als 3% EBF

soll diese möglichst energieeffizient sein. Massnahmen, um dies zu erreichen sind beispielsweise:

- Nutzung kühler Aussenluft in der Nacht (Nachtauskühlung)
- Direktkühlung mit Erdsonden, Erdregistern, Grundwasser- oder Oberflächenwasser (Free Cooling)
- Kühlung mittels Absorptionskühlung mit Abwärme, Fernwärme aus KVA, thermische Solarenergie etc.

Um einen Kälteerzeuger richtig zu dimensionieren, muss zuerst die Klimakälteleistung nach [SIA 382/2] berechnet werden. Als mittlere Tagessumme der Gesamtwärmelast können beispielsweise die Standardwerte aus [SIA 2024] eingesetzt werden. Diese liefern Stammdaten, die in der Praxis bestätigt wurden.

Die Berechnung der notwendigen Kälteleistung ist anspruchsvoll (Bild 3.7) und muss durch den Gebäudetechnikingenieur erledigt werden. Deshalb ist es für Planerinnen wichtig, in einer frühen Pro-

jektphase die Wärmelast abzuschätzen. Relevant sind dabei beispielsweise: Mittlere und maximale Personenbelegung, Laufzeit und Einschaltdauer von internen Lasten und gewünschte oder vorgeschriebene Raumzustände im Raum.

Wichtig: Es sollen alle Annahmen aufgelistet und mit den Nutzenden respektive der Bauherrschaft oder dem Betreiber besprochen werden. Erst nach einer Einigung sollte die Anlage endgültig dimensioniert werden.

Wärmelasten im Raum

Die in einem Raum anfallenden Wärmelasten teilen sich in externe und interne Lasten auf. Einen Überblick über die Quellen gibt Bild 3.8.

Externe Wärmelasten: Dabei handelt es sich um Lasten, die von aussen via Transmission und Strahlung ins Gebäude gelangen. Sie werden durch folgende Faktoren bestimmt:

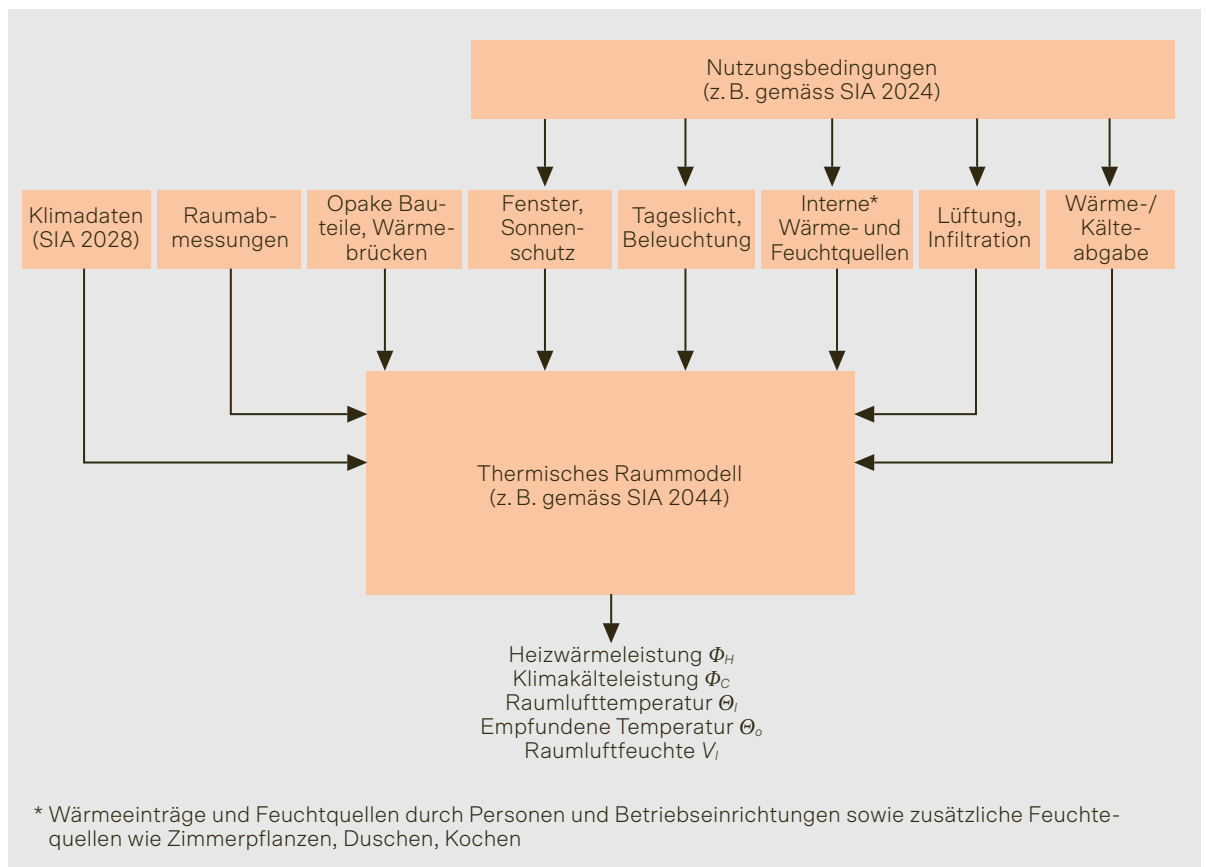


Bild 3.7: Thermisches Raummodell nach SIA 382/2 (Beschriebe in SIA 2024 und 2044).

- Geographische Lage des Gebäudes, also Himmelsrichtung, Standort, Höhe über Meer, Sonneneinstrahlung (direkte und diffuse)
- Beschattung des Gebäudes, äusserer und beweglicher Sonnenschutz von lichtdurchlässigen Bauteilen, korrekte Bedienung des Sonnenschutzes, Gestaltung und Materialisierung des Vorplatzes, Gewährleistung einer energieeffizienten Nachtauskühlung
- Geometrie des Gebäudes (Gebäudehüllzahl), mit optimaler Konstruktion und Hinterlüftung der Gebäudehülle (opake Bauteile und Fenster) und des Daches; Wahl des optimalen Verglasungsanteils je Himmelsrichtung
- Wahl der optimalen Speichermasse des Gebäudes mit Speicheraktivierung für ein ausgeglichenes Raumklima; bei lichtdurchlässigen Bauteilen wie Fenster und Oblichter gelangt Wärme sofort ins Gebäude. Bei opaken Bauteilen hingegen gelangt die Wärme infolge der Massenträgheit erst Stunden später in die Räume. In jedem Fall muss der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) weniger als 15 % betragen.

Der Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung mit Sonnenschutz (g-Wert) bezeichnet das Verhältnis von der im Raum ankommenden zur aussen senkrecht auftreffenden Strahlungsenergie. Er lässt sich beispielsweise mit einer

guten Verglasung und hellen Aussenlamellenstoren niedrig halten. Aus Tabelle 3.9 geht hervor, dass Fenster mit hellen Aussenlamellenstoren die tiefsten Werte aufweisen. Deshalb sollten gekühlte und klimatisierte Räume wenn immer möglich mit solchen ausgerüstet werden (g-Wert unter 0,15), [SIA 380/1], [EN 13363-1/2].

Mit Aussenlamellenstoren lässt sich die Sonnenstrahlung durch die Fenster so stark verringern, dass hauptsächlich die internen Lasten für die Berechnung der erforderlichen Kälteleistung massgebend sind. Deshalb gelten für Räume mit hohen internen Wärmelasten folgende Grundsätze:

- Ein optimaler Sonnenschutz lässt sich so bedienen, dass genügend Tageslicht in die Räume gelangt. Deshalb muss die Beleuchtung nur in Bereichen eingeschaltet werden, die mehr als 5 m Abstand zu den Fenstern aufweisen.
- In solchen, nicht künstlich beleuchteten Randzonen wird mit einer externen Raumbelastung von 10 W/m² gerechnet.

Interne Wärmelasten: Dabei handelt es sich um Abwärmequellen innerhalb eines Gebäudes. Im Fall eines Einzel- oder Gruppenbüros (nach [SIA 2024]) sind das beispielsweise:

- Personen: Relevant sind Belegung, Aktivität, Bekleidung und Volllaststunden in h/d. Beispiel: Bei 26 °C Raumluft-

Art der Verglasung	Beschrieb der Kombination: Verglasung mit Sonnenschutzeinrichtung	Gesamtenergiedurchlassgrad g
2-IV	Klarglas	0,75
	Klarglas + Aussenlamellenstoren hell	0,15
	Klarglas + Innenlamellen hell	0,45
2-IV-IR	Wärmeschutzglas	0,55
	Wärmeschutzglas + Aussenlamellenstoren hell	0,12
	Wärmeschutzglas + Innenlamellen hell	0,47
2-IV	Reflexionsglas	0,26
3-IV	Klarglas	0,70
	Klarglas + Aussenlamellenstoren hell	0,13
	Klarglas + Innenlamellen hell	0,43
3-IV-IR	Wärmeschutzglas mit 2 Beschichtungen	0,45
	Wärmeschutzglas + Aussenlamellenstoren hell	0,11
	Wärmeschutzglas + Innenlamellen hell	0,42
3-IV	Reflexionsglas	0,23

Tabelle 3.9: Beispiele für Gesamtenergiedurchlassgrade von Verglasungen (g-Wert). IV: Isolierverglasung

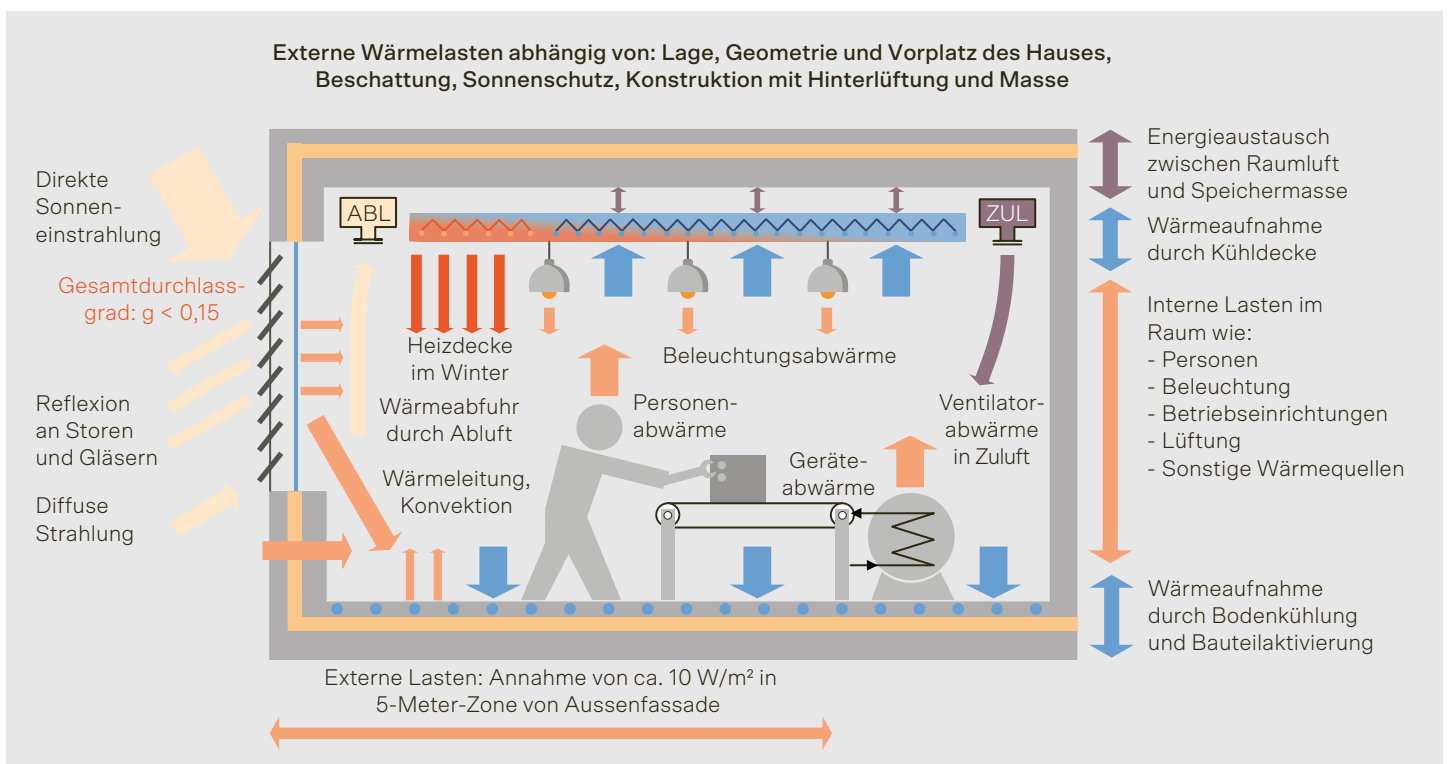
temperatur im Auslegungsfall beträgt die sensible (fühlbare) Wärmeabgabe bei Büroarbeit etwa 63 W/Person.
 – Betriebseinrichtungen: Geräte mit ihren Stand-by- und Vollaststunden in h/d. Beispiele: In einem Einzel- oder Gruppenbüro betragen die Abwärmen von Arbeitshilfen wie Computer, Bildschirm, Drucker, Kühlschrank, Büro- und Haushaltgeräte rund 3 bis 7 W/m² bei

Neubauten und bis 15 W/m² bei Bestandsbauten. In hochinstallierten, modernen Rechenzentren oder Produktionsküchen erreicht der innere Wärmeanfall heute teilweise schon über 2000 W/m².
 – Beleuchtung: Relevant sind die spezifische elektrische Leistung, Korrekturfaktoren für Präsenzmelder und Dimmung und Vollaststunden in h/d. Bei-

Tabelle 3.10: Wärmeabgabe von Personen in Watt.

Kat.	Tätigkeit	Anwendungsbereich	Sensible respektive fühlbare (q_s) und latente (q_l) Wärmeabgabe in Watt pro Person, in Abhängigkeit der Raumlufttemperatur							
			26 °C		24 °C		22 °C		20 °C	
			q_s	q_l	q_s	q_l	q_s	q_l	q_s	q_l
1	ruhig sitzend	Theater, Primarschule	61	41	68	34	74	28	79	23
1	sitzend, sehr leichte Arbeit	Sekundarschule	62	54	70	46	77	39	80	36
1	Büroarbeit	Büro, Hotel, Hochschule	63	68	71	60	80	51	86	45
2	stehend, langsam gehend	Kaufhaus, Laden, Bank (Schalter)	64	83	75	72	82	65	87	60
2	sitzend	Restaurant	71	91	83	79	91	71	96	66
2	leichte Werkbankarbeit	Fabrik, leichte Arbeit	72	148	86	134	100	120	115	105
3	tanzend	Tanzsaal	80	169	95	154	109	140	124	125
3	gehend	Fabrik, ziemlich schwere Arbeit	97	196	112	181	127	166	143	150
3	schwere Arbeit	Bowlingbahn, Fabrik	142	284	154	272	167	259	184	242

Bild 3.8: Thermische Einflüsse auf einen Raum.



spiel: In einem Einzel- oder Gruppenbüro erreicht die Abwärme der Beleuchtung im Raum etwa 11,6 bis 15,9 W/m².

- Lüftung: Relevant sind die spezifische elektrische Ventilatorleistung und die Volllaststunden. Beispiel: In einem Einzel- oder Gruppenbüro beträgt die Abwärme des Lüftungsventilators im Raum bei Neubauten rund 0,9 bis 1,4 W/m² und bei Bestandsbauten bis 2,3 W/m².
- Befeuchtung: Muss ein Raum aus irgendeinem Grund be- und entfeuchtet werden, steigt der Energieverbrauch. Deshalb sollten nur spezielle Räume wie Operationssäle, Intensivpflegestationen und Radiologien befeuchtet werden.

In Tabelle 3.10 ist die Wärmeabgabe von Personen bei verschiedenen Tätigkeiten und Raumtemperaturen für 30 bis 70 % relative Raumfeuchte aufgelistet. Weitere Informationen zur Wärmeabgabe von Menschen können Bild 1.18 entnommen werden.

3.4 Kälteerzeugung

Auslegung

Nach der Berechnung der maximalen Kühllast folgt die Auslegung der Kältemaschine mit der entsprechenden Rückkühlung. Dabei gilt es folgende Punkte (siehe auch Bild 3.2) zu berücksichtigen:

- Kondensator/Rückkühler: Die Betriebstemperatur im Wasser-Frostschutz-Kreis soll möglichst tief gewählt werden, beispielsweise 34/28 °C. Ein maximaler Free-Cooling-Betrieb des Rückkühlers sollte vor allem im Winter, in der Übergangszeit und in den Sommernächten gewährleistet sein. Wird eine Abwärmenutzung (AWN) betrieben, beispielsweise für die Wassererwärmung, können die Betriebstemperaturen je nach Kältemittel kurzzeitig auf rund 50 bis 70 °C erhöht werden.

- Abwärmenutzung: Bei der Awn muss immer die Rentabilität geprüft werden. Die erste Möglichkeit ist der Einbau eines Enthitzerkondensators. Damit lassen sich maximal 15 % der Abwärme auf einem höheren Temperaturniveau, beispielsweise fürs Bereitstellen von Warmwasser nutzen (Heissgaskühlung zwischen Kompressor und Kondensator, ca. 60 °C). Der Vorteil dieser Lösung ist, dass die Kältemaschine nicht auf einen höheren Kondensationsdruck heraufgefahren werden muss. Dadurch resultieren höhere Leistungszahlen (COP/EER) und eine längere technische Lebensdauer der Kältemaschine. Die zweite Möglichkeit ist die Nutzung der gesamten Kondensatorwärme für Niedertemperaturverbraucher wie Bodenheizung oder TABS. Sind hier Betriebstemperaturen über rund 50 °C gefordert, muss die Kondensationstemperatur und damit der kältemittelseitige Druck erhöht werden. Der Vorteil dieser Lösung ist, dass damit ein Grossteil der Abwärme genutzt werden kann.

- Verdampfer: Die Kaltwassertemperaturen beim Verdampfer sollen möglichst hoch gewählt werden. Gemäss

[SIA 382/1] gelten folgende Anforderungen an die Vorlauftemperatur: Klimaanlage ohne Entfeuchtung $\geq 14^\circ\text{C}$, mit Teilentfeuchtung bei Kühldecken $\geq 10^\circ\text{C}$, mit kontrollierter Entfeuchtung $\geq 6^\circ\text{C}$. Bei Bodenkühlung, Kühldecken und Bauteilkühlung via TABS können Vorlauf- und Rücklauf-temperatur des Kühlmittels sogar auf mindestens $18/21^\circ\text{C}$ angehoben werden.

– Kältemaschine: Weil die Maschinen meistens im Teillastbereich laufen, ist es wichtig, dass sie eine Leistungsregulierung haben. Deshalb muss ihr maximaler Wirkungsgrad [nach SIA 381/1 \rightarrow ESEER] im Leistungsbereich zwischen 50 und 75% liegen. In dieser Bandbreite ist die Kältemaschine rund 74% der gesamten Laufzeit im Einsatz.

– Kältemittel: Mit der Wahl des optimalen Kältemittels kann die Effizienz um 10 bis 15% gesteigert werden.

– Speicher: Diese müssen so konzipiert werden, dass jeder Kompressor nach dem Einschalten mindestens 20 Minuten durchlaufen kann. Zudem sollte die

Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt $\geq 6\text{ K}$ betragen.

– Kälteverteilung: Mit Drosselschaltungen muss sichergestellt werden, dass der Massenstrom zu jeder Zeit der aktuellen Kältebelastung angepasst wird. Der Druckverlust in Rohrleitungen sollte als Richtwert $< 80\text{ Pa/m}$ betragen.

– Druckverlust: Um Störungen zu vermeiden, sollten die Durchflüsse am Kondensator und am Verdampfer möglichst konstant sein, mit einem wasserseitigen Druckverlust von maximal 0,3 bar.

Technische Konzepte von Kälteanlagen

Für die Kälteerzeugung stehen im Wesentlichen drei technische Konzepte zur Auswahl (Tabelle 3.11). Der EER ist in diesem Fall der spezifische Primärenergieverbrauch, der sich aus dem Verhältnis der produzierten Kältemenge zur eingesetzten elektrischen oder thermischen Energie errechnet.

Tabelle 3.11: Technische Konzepte für die Produktion von Kälte. (Quelle: HKW Infozentrum, Internet)

Technische Konzepte von Kälteanlagen				
	1. Kompressionskälteanlage	2. Absorptionskälteanlage	3. Adsorptionskälteanlage	4. DEC ¹ -Anlage
Physikalischer Kühlungseffekt	Verdampfen des Kältemittels (Kaltdampfprozess)			Verdunstung des Kältemittels
Verdichtungsprinzip	mechanische Verdichtung	thermisch, Absorptionslösungskreislauf	thermisch, Adsorption von Wasserdampf	sorptive Entfeuchtung
Antriebsenergie	Elektroenergie	Wärmeenergie $85\text{ bis }180^\circ\text{C}$	Wärmeenergie $55\text{ bis }95^\circ\text{C}$	Wärmeenergie $50\text{ bis }100^\circ\text{C}$
Kältemittel	chlorierte oder chlorfreie Kohlenwasserstoffe	Wasser mit Lithiumbromid (LiBr) oder Ammoniak (NH_3) als Absorptionsmittel	Wasser mit Feststoff als Adsorptionsmittel (Silica-Gel)	Wasser
Spezifischer Primärenergieverbrauch ²	1,3 bis 1,65	0,3 bis 1,3	0,4 bis 0,6	0,3
Leistungszahl/EER	3 bis 5	0,6 bis 1,3 (LiBr) 0,3 bis 0,7 (NH_3)	0,4 bis 0,6	0,5 bis 0,7
Kältetemperatur	$-50\text{ bis }15^\circ\text{C}$	$5\text{ bis }15^\circ\text{C}$ (LiBr) $-50\text{ bis }5^\circ\text{C}$ (NH_3)	$6\text{ bis }15^\circ\text{C}$	4 bis 8 K Entfeuchtung
Kälteleistung	50 bis 5000 kW	15 bis 5000 kW (LiBr) 150 bis 5500 kW (NH_3)	50 bis 450 kW	20 bis 350 kW

¹ Desiccative and Evaporative Cooling, also Kühlung durch Trocknung und Verdunstung

² Der spezifische Primärenergieverbrauch errechnet sich aus dem Verhältnis der produzierten Kältemenge zur eingesetzten elektrischen oder thermischen Energie. Beispiel Absorptionskälteanlage: Je eingesetzter Kilowattstunde Wärme können zwischen 0,3 bis 1,3 kWh Kälte produziert werden.

Kompressionskälteanlagen: Zum Erzeugen von Klimakälte werden meist strombetriebene Kompressionskältemaschinen eingesetzt. Für kleinere Leistungen werden eher Hubkolben- und Scroll-Verdichter, für mittlere bis grössere Leistungen eher Schrauben- und Turbomaschinen eingesetzt. Tabelle 3.12 gibt einen Überblick über die gängigen technischen Varianten.

Absorptionskälteanlagen: Das Funktionsprinzip der Absorberkältemaschine basiert darauf, dass Wasser im Unterdruck schon bei niedrigen Temperaturen verdampft (z. B. bei etwa 5 °C bei

800 bis 900 Pa). Um den Verdampfungsprozess aufrechtzuerhalten, wird der Wasserdampf beispielsweise mit Hilfe einer Lithiumbromid-Lösung kontinuierlich gebunden. Die durch diesen Vorgang verdünnte Salzlösung muss durch Verdampfen des Wassers wieder aufkonzentriert werden. Dies geschieht im Austreiber mit Hilfe von hochwertiger Wärme. Der dadurch entstehende Wasserdampf wird im Rückkühler kondensiert und das Kondenswasser wieder dem Verdampfer zugeleitet. Damit schliesst sich der Absorberkreislauf. Weil Absorptionskälteaggregate ohne mechanisch bewegte Teile arbeiten,

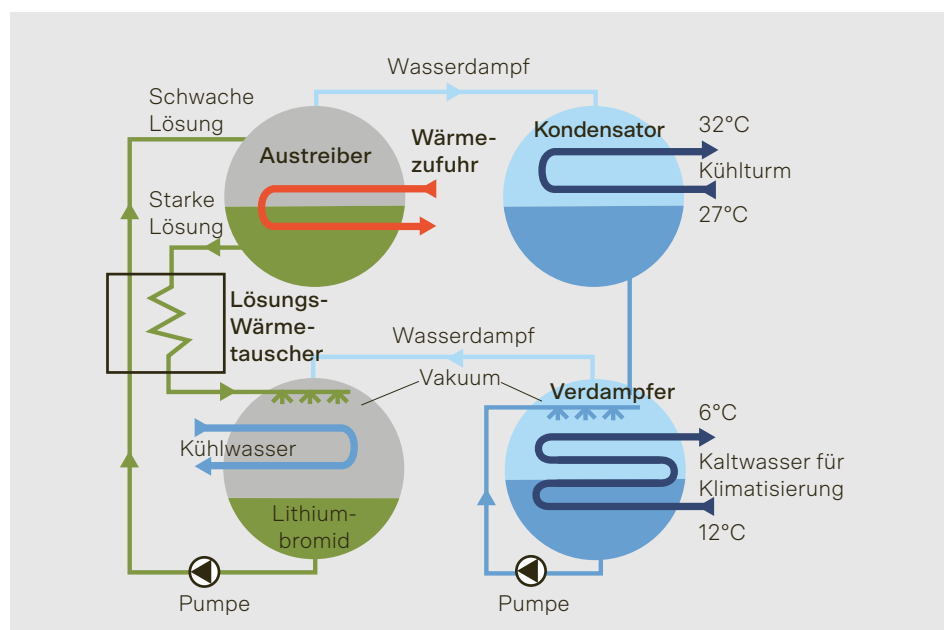


Tabelle 3.12: Verdichter-Bauarten. Quelle: Wärmepumpen. * bei B0/W35, also bei 0 °C Vorlauf auf der kalten Seite der Kältemaschine und 35 °C auf der warmen Seite

Bild 3.9: Prinzip der Kälteerzeugung mittels Absorption.

Verdichterbauart	Hubkolben	Spiralkolben (Scroll)	Schraube	Turbo
Arbeitsprinzip	Verdränger	Verdränger	Verdränger	Strömungsmaschine
Verdichtung	statisch	statisch	statisch	dynamisch
Hubvolumen	geometrisch	geometrisch	geometrisch	abhängig vom Gegendruck
Förderung	pulsierend	stetig	stetig	stetig
Volumenstrom, Bereich	bis 1000 m ³ /h	bis 500 m ³ /h	100 bis 10000 m ³ /h	100 bis 50 000 m ³ /h
Heizleistung, Bereich*	bis 800 kW	bis 400 kW	80 bis 8000 kW	80 bis 40 000 kW
Druckverhältnis im Regelfall (einstufig)	bis 10	bis 10	bis 30	bis 5
Regelbarkeit bei konstanter Drehzahl	Stufen	schwierig	stufenlos	stufenlos
Drehzahlregelung	möglich	möglich	möglich	möglich
Empfindlichkeit gegen Flüssigkeitsschläge	hoch	gering	gering	gering
Verursacht Vibrationen	ja	nein	nein	nein

sind sie nahezu wartungsfrei. Deshalb wird die Nutzungsdauer einer Absorptionsmaschine mit mindestens 20 Jahren angenommen, während es bei einer Kompressionsmaschine nur mindestens 15 Jahren sind. Im Gegensatz zur Kompressionskältemaschine benötigt der Absorber fast keine elektrische Energie und enthält keine klimaschädigenden Kohlenwasserstoffe als Kältemittel. Der Platzbedarf einer Absorptionskälteanlage samt Rückkühlung ist jedoch deutlich grösser als der einer Kompressionskältemaschine. Absorptionskältemaschinen sind dann interessant, wenn die eingekaufte Wärme sehr günstig ist respektive aus erneuerbaren Quellen stammt.

Adsorptionskälteanlagen: Die Anlagerung von Gasen oder Flüssigkeiten an einen Feststoff wird in der Verfahrenstechnik als Adsorption bezeichnet, als Desorption bezeichnet man den umgekehrten Vorgang. Dementsprechend besteht eine Adsorptionskälteanlage aus einem Ad- respektive Desorber und einem Verdampfer respektive Kondensator

tor. Diese Hauptkomponenten sind entweder in einem gemeinsamen Behälter untergebracht oder via ein Rohr miteinander verbunden (Bild 3.10).

Der Vorteil der Adsorption liegt darin, dass die Kälteproduktion allein durch die Temperierung des Sorptionsmittels erfolgt. Deshalb kann der Behälter hermetisch und gasdicht abgeschlossen sein. Beim Verwenden von Wasser als Kältemittel arbeitet die Adsorptionskältemaschine immer im Unterdruck.

Da die Adsorption des Kältemittels mit dessen Kondensation einher läuft, wird sie von niedriger Temperatur und hohem Druck begünstigt. Durch die Adsorption verringert sich das Volumen des Kältemittels und es wird Wärme freigesetzt. Die Desorption läuft mit dem Verdampfen des Kältemittels einher und hat somit den gegenteiligen Effekt. Bei gleichbleibendem Druck entspricht die Temperatur bei der Desorption immer dem Siedepunkt des Kältemittels. Der wesentliche Unterschied zwischen Kompressions- und Sorptionskältemaschinen ist also, dass bei Kompressoren die Primärenergie voll-

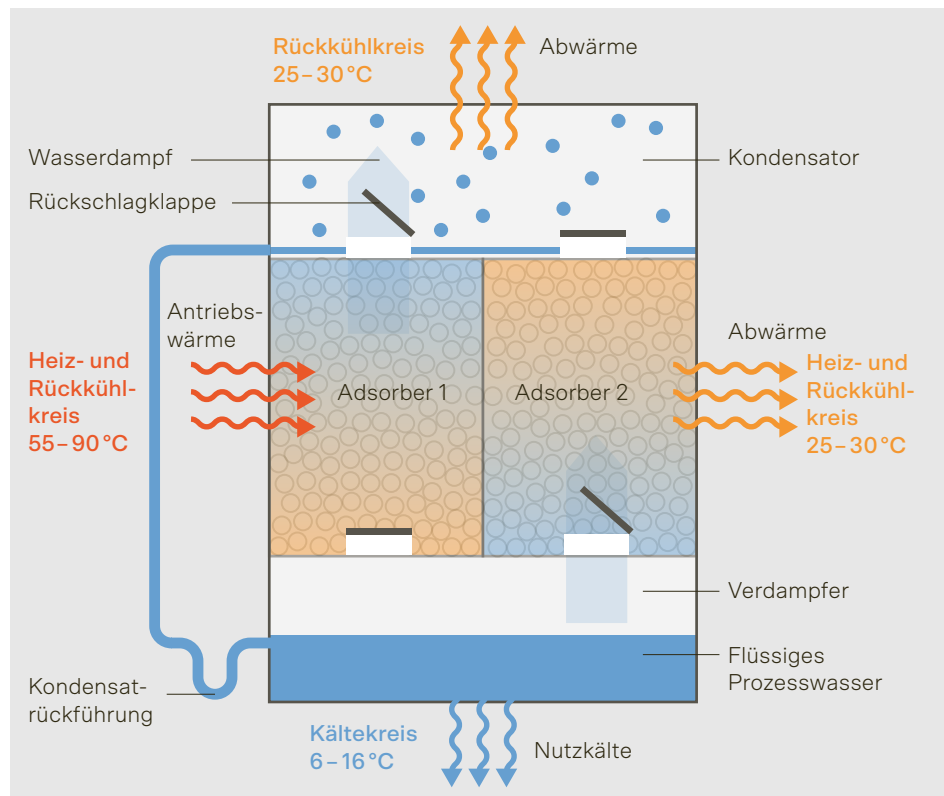


Bild 3.10: Aufbau einer Adsorptionskältemaschine. (Quelle: Sortech, BHKW-Infozentrum)

ständig als mechanische Arbeit, bei Sorptionsanlagen dagegen in Form von Wärme zugeführt wird.

Desiccative and Evaporative Cooling (DEC): Eine Alternative zu Kältemaschinen ist die Verdunstungskühlung. Dieses Verfahren ist in der Industrie schon länger bekannt. Beim Komfortklima konnte es sich erst in den letzten 15 Jahren unter der Bezeichnung adiabatische Kühlung, respektive adiabatische Fortluftbefeuchtung, durchsetzen. Eingesetzt werden solche Systeme insbesondere in der Komfortlüftung. Bild 3.11 zeigt das Prinzip.

Weil die direkte Befeuchtungskühlung im Aussen- respektive Zuluftstrom die relative Luftfeuchte der Zuluft erhöht, führt sie in der Regel zu Reklamationen bei den Nutzenden. Grund dafür ist, dass die Wärmeabfuhr des menschlichen Körpers durch Verdunstung

(Schwitzen) bei hohen Luftfeuchten erschwert ist. Der Schweiß verbleibt dann als Wasserfilm auf der Haut, und der Mensch fühlt sich unbehaglich. Für dieses Verfahren gibt es deshalb in der im Komfortklima nur begrenzte Anwendungsmöglichkeiten.

Ein spezielles Verfahren zur Luftkühlung bei der sorptionsgestützten Klimatisierung ist die sogenannte DEC-Technik. Dabei wird die Sorption (Lufttrocknung) mit einer nachfolgenden Verdunstungskühlung kombiniert, woraus sich auch der Name ableitet: Desiccative and Evaporative Cooling. Dieses System ist eine Weiterentwicklung der Verdunstungskühlung, mit der sich höhere Kälteleistungen erzielen lassen (Bild 3.12). Beim DEC-Verfahren sind alle Aufgaben der Luftaufbereitung, die in einer klimatechnischen Anlage ablaufen, wie Entfeuchten, Kühlen und Nachheizen, im Prozess integriert. Dabei wird die Verdunstung

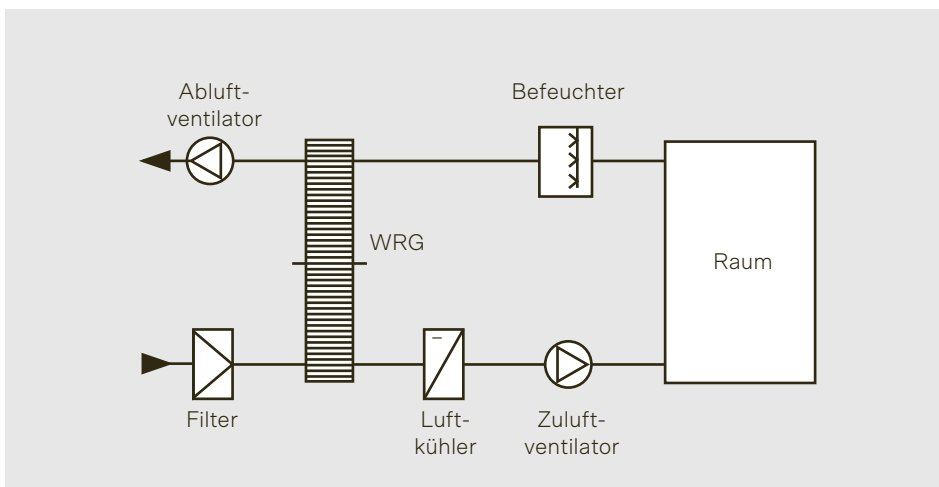


Bild 3.11: Adiabatische Befeuchtung der Fortluft.

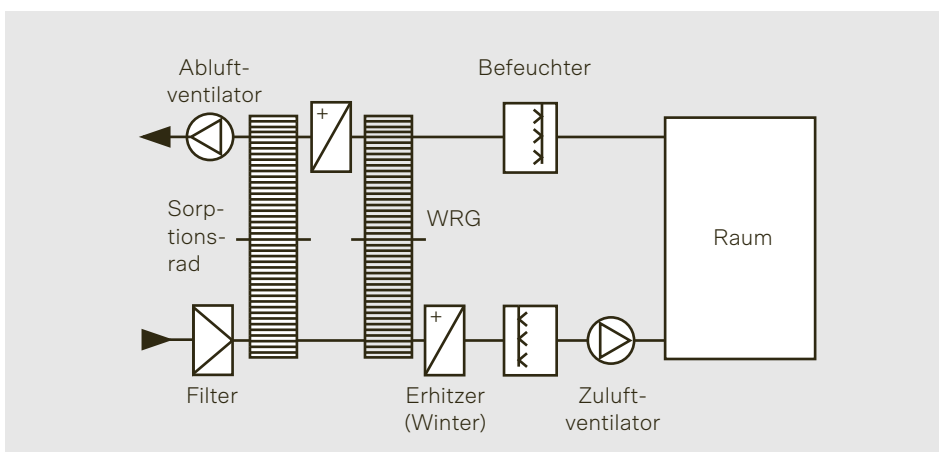


Bild 3.12: Prinzip der Sorptionskühlung, respektive eines DEC-Systems (Desiccative and Evaporative Cooling, Kühlung durch Trocknung und Verdunstung).

von Wasser zur Kühlung der Luft verwendet.

Beim DEC-Verfahren wird in der ersten Phase die zu kühlende Luft entfeuchtet. Hier entnimmt ein Sorptionsmaterial wie Silikagel der Luft Feuchte, mit dem Resultat, dass sich die Luft erwärmt. In der zweiten Phase kann die Luft in einer Energierückgewinnung, durch Luftkühler respektive adiabatischer Befeuchtung mehrstufig gekühlt werden. Die im Silikagel aufgenommene Flüssigkeit muss in der Folge mit Wärme ausgetrieben werden (Desorption).

Gewerbliche Kälte: Ein Spezialfall ist die gewerbliche Kälte. Sie dient dazu, die Kühlräume und Kühlmöbel der Küche auf die gewünschte Temperatur her-

unterzukühlen. Dabei kann ein Großteil der entstehenden Abwärme beispielsweise direkt für die Vorwärmung des Warmwassers genutzt werden – mit relativ kurzen Pay-back-Zeiten unter fünf Jahren. Die restliche Wärme muss zwangsläufig mittels Klimakälteanlage oder Rückkühler abgeführt werden.

Teillastverhalten von Kältemaschinen

Eine Klimakälteanlage wird gemäss der ESEER-Definition während rund 74 % der gesamten Laufzeit im Leistungsbe- reich zwischen 50 und 75 % betrieben. In Komfortklimaanlagen wird die volle Leistung des Kompressors nur während des Hochsommers, also im Juli und August, benötigt. Deshalb ist es wichtig, bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung

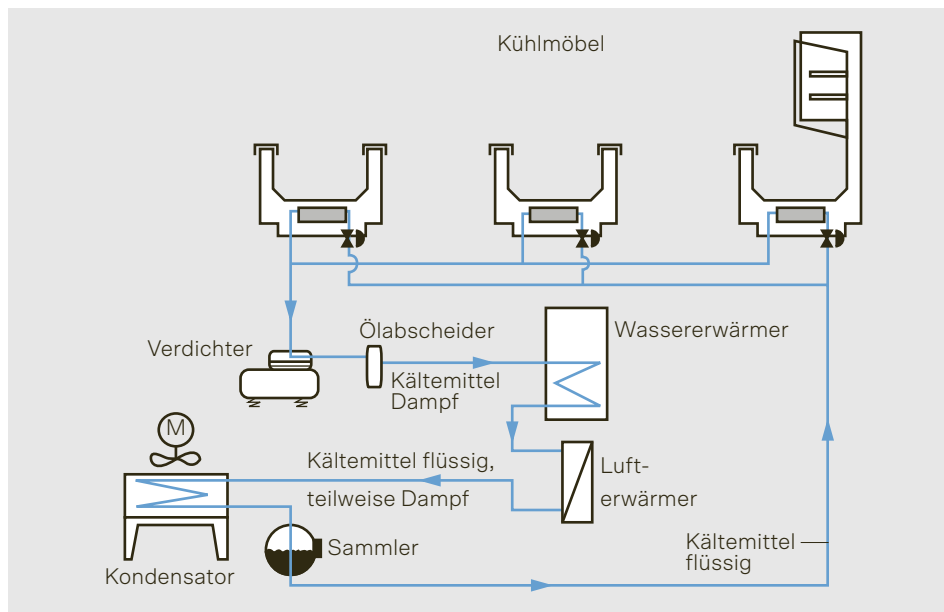


Bild 3.13: Produktion gewerblicher Kälte mit Kühlmöbel.

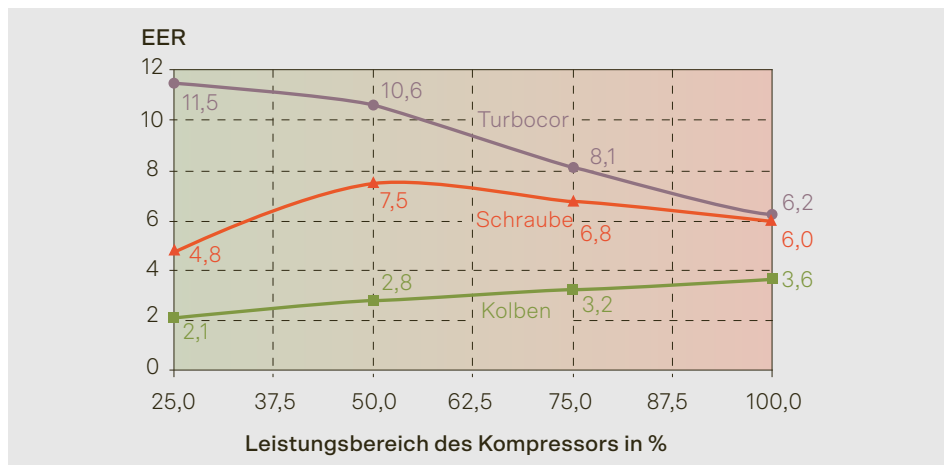


Bild 3.14: Vergleich der EER von verschiedenen Kompressortypen mit rund 400 kW Verdampferleistung. Basis: Kaltwassertemperaturen Verdampfer = 10/16 °C; Rückkühltemperaturen = 34/28 °C

das Teillastverhalten zu berücksichtigen. Im Teillastbereich haben Turbo- respektive Turbocor-Kompressoren einen wesentlich höheren EER als Kolben- und Schraubenkompressoren (Bild 3.14). Das hängt unter anderem damit zusammen, dass «ölfreie» Turbo- kompressoren magnetisch gelagerte Rotoren haben und mit Drehzahlen bis rund 40 000 U/min betrieben werden können. Das ergibt einen sehr weiten nutzbaren Leistungsbereich. Die Energieeffizienz von Turbomaschinen lässt sich durch die Anwendung eines «überfluteten» Verdampfers weiter steigern. Dabei wird dem Verdampfer ein Überschuss an Kältemittel zugeführt und der Flüssigkeitsstand mit einem Niveauregler konstant gehalten. Dies verbessert den k-Wert, weil die Rohre mit flüssigem Kältemittel benetzt sind. Zudem wird das Problem der Ölrückführung vermieden, weil im ganzen Kälte- kreis kein Öl enthalten ist. Beim Einsatz von Turbokompressoren ist es wichtig, dass sie stets im unteren Leistungsbereich zwischen 25 bis maximal 75% betrieben werden. Damit resultieren hohe EER und dementsprechend ein tiefer Stromverbrauch. Es gilt zudem zu beachten, dass in diesem Fall ein hybrider Rückkühler mit tieferer Betriebstemperatur (34/28 °C) kondensatorseitig eingesetzt werden muss.

Rückkühlung

Zum Abführen von Kondensationswärme eines Kälteerzeugers werden Rückkühler (RK) eingesetzt. Sie basieren auf folgenden technischen Prinzipien:

Offene oder nasse Rückkühler: Hier wird das im Kondensator der Kältemaschine erwärmte Kühlwasser in direkten Kontakt mit der Aussenluft gebracht. Dabei kühlt es durch Verdunstungswärme.

Vorteile: Geringer Platzbedarf, höhere Leistungszahl der Kältemaschine durch tiefe Rückkühltemperaturen von 33/27 °C.

Nachteile: Hohe Betriebs- und Wartungskosten, Wasseraufbereitung und Verlust durch Verdunstung und Abschlammung, Frostgefahr, Bildung von Nebelschwaden, Verunreinigung des Kühlwassers mit möglichen Korrosionsprodukten, Algen- und Legionellenbildung.

Geschlossene oder trockene Rückkühler:

Hier bleibt das Kühlwasser von der Aussenluft getrennt. Es wird in einem Wärmeübertrager gekühlt und mit einem Expansionsgefäß abgesichert.

Vorteile: Kein Wasserverbrauch, kleinere Investition, geringere Wartungs- und Unterhaltskosten

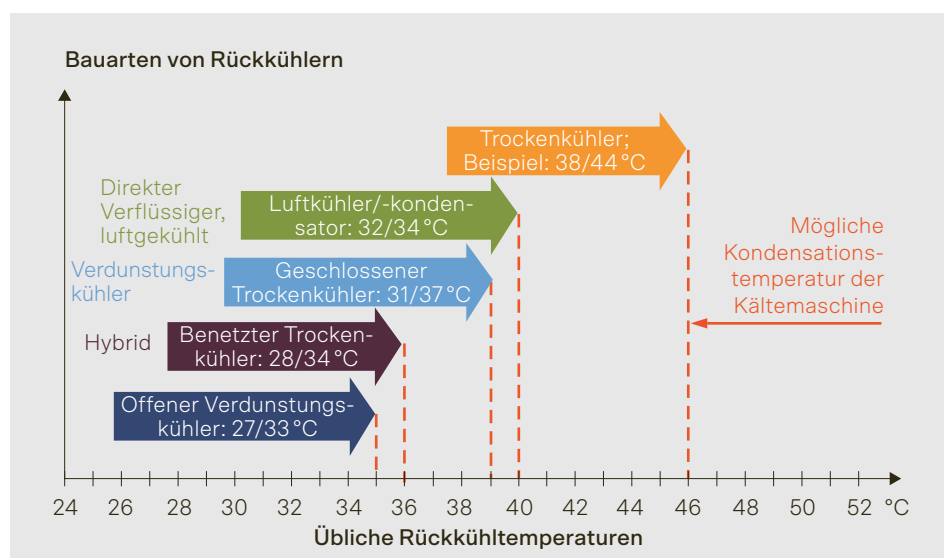


Bild 3.15: Temperatur- Bereiche von Rückkühlern.

Nachteile: grosser Platzbedarf, höherer Stromverbrauch der Kältekompressoren.

Hybride Rückkühler: Solche Systeme sind eine Kombination offener und der geschlossener Rückkühlung. Bei tieferen Aussentemperaturen arbeiten sie meistens als konventionelle Trockenkühler. Bei höheren Temperaturen wird eine wohldosierte Menge an entmineralisiertem Wasser auf die Kühloberfläche gesprüht, das dort zu 70 bis 100 % verdampft. Dies erhöht die Rückkühlleistung drastisch. Eine optimale Lösung, besonders punkto Energie- und Platzbedarf, bieten die hybriden Rückkühler mit Rückkühltemperaturen von 34/28 °C. Wenn die Investitionskosten im Vordergrund stehen, empfiehlt sich der Einsatz von betriebssicheren und hygienisch unbedenklichen Trockenkühlern. Vorteile: Geringerer Platzbedarf, höhere Leistungszahl der Kältemaschine, minimale Energie- und Wasserkosten, keine Nebelschwaden, kein zirkulierendes Wasser und damit keine Algen- und Legionellenbildung. Wichtigste Nachteile: Höhere Investitionskosten, Wasseraufbereitung notwendig, oft auf Basis von Gegenosmose.

Free Cooling: Das System der «freien Kühlung» nutzt kühle Aussenluft, beispielsweise im Winterhalbjahr oder nachts im Sommer, um mittels Rückkühler und ohne Unterstützung des Kompressors Kaltwasser zu erzeugen. Dazu muss zwecks Systemtrennung von Rückkühlkreis und Klimakältekreis ein zusätzlicher Wärmeübertrager installiert werden. Empfehlenswert ist Free Cooling vor allem bei Wärmeabgabesystemen mit Wassertemperaturen ≥ 18 °C wie Bodenkühlung, Kühldecken oder TABS. In der Schweiz wird es meistens bei Temperaturen unter 8 °C eingesetzt. Damit lassen sich die jährlichen Betriebskosten einer Kälteanlage um bis zu 35 % reduzieren. Zudem werden die Kompressoren

geschont, weil sie übers Jahr tiefere Laufzeiten aufweisen. Weitere Informationen sind zu finden in [Free Cooling].

Wärmerückgewinnung

Zur Rückgewinnung von Kondensatorwärme stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Einbau eines Enthitzerkondensators. Damit können bis zu 15 % der gesamten Kondensatorwärme bei Volllast auf höherem Niveau durch Heissgaskühlung, beispielsweise für die Warmwassererzeugung bei > 60 °C genutzt werden («Enthitzer» in Bild 3.6). Der Vorteil dieser Lösung ist, dass die Kältemaschine nicht auf einen höheren Kondensationsdruck heraufgefahren werden muss. Dies verlängert ihre technische Lebensdauer.
- Zur vollständigen Rückgewinnung der Kondensatorwärme muss die Betriebstemperatur der Verbraucher möglichst tief, also < 40 °C gewählt werden. Damit lassen sich etwa Bodenheizungen, TABS, Niedertemperaturheizkörper oder die WW-Vorwärmung betreiben. Sind Betriebstemperaturen > 55 °C gefordert, also beispielsweise für die WW-Erzeugung, muss die Kondensationstemperatur und damit der Druck erhöht werden. Der Vorteil dieser Lösung ist, dass mit ihr ein Grossteil der Abwärme auch auf höherem Temperaturniveau genutzt werden kann. Der Nachteil liegt beim höheren Betriebsdruck, schlechterer Leistungszahl und kürzerer technischer Lebensdauer der Kältemaschine.

Energiequellen

Mit natürlichen Energiesenken ist es möglich, Räume und Anlagen direkt zu kühlen. Es besteht aber auch die Möglichkeit, Energiequellen indirekt, beispielsweise für die Rückkühlung, zu nutzen. Die in Bild 3.16 dargestellten Energiequellen können in zwei Gruppen aufgeteilt werden:

- Offene Systeme mit Grund- und Oberflächenwasser aus oberflächennaher Geothermie; die Quelltemperaturen

betragen 8 bis 25 °C. Bei der Abwasser-
nutzung treten teilweise auch höhere
Temperaturen auf.

– Geschlossene Systeme, in denen ein
Wasser-Frostschutz-Gemisch zirkuliert;
dazu gehören beispielsweise Erdsonden
oder Erdregister. Sie haben den Vorteil,
dass sie sich auch mit einer thermischen
Solaranlage kombinieren lassen. Dann
dient die Solaranlage zur Regeneration
der Erdsonden oder -register, also zur
Langzeitspeicherung von Sonnenener-

gie. Bei solchen Systemen betragen die
Betriebstemperaturen 0 bis 18 °C.

Für Kühlzwecke nutzt man nur
die oberflächennahe Geothermie
(Bild 3.17), dazu gehören Erdwärmeson-
den, Energiepfähle und Grundwasser-
brunnen.

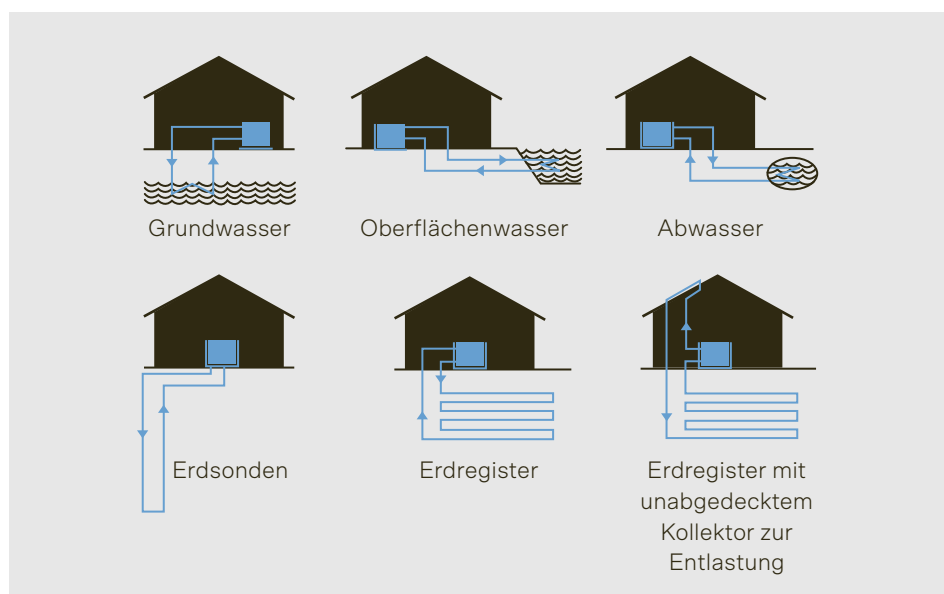


Bild 3.16: Energie-
quellen zur direkten
oder indirekten Nut-
zung für die Kühlung.

Bild 3.17: Nutzung
von Erdwärme
(Übersicht), Quelle
SIA 384/6.

Oberflächennahe Geothermie (etwa 8 °C–25 °C)			Tiefe Geothermie (etwa 20 °C–200 °C)	
Erdwärmesonde	Kollektoren Körbe Energiepfähle	Grundwasserbrunnen mit Wiederversickerung	Hydrogeothermie	Enhanced Geothermal Systems (EGS)
einige 10 m bis 400 m tief	wenige 10 m tief	meist < 50 m tief	einige 100 m bis > 5000 m tief	bis 5000 m tief
Geschlossenes System		Offenes System	Offenes System	
Nutzung durch Einsatz von Wärmepumpen			Nutzung mit Wärmeübertrager und direkte Warmwassernutzung	
Wärmeerzeugung Kühlung			Stromerzeugung mit ORC- oder Kalina-Anlagen Wärmenutzung und Thermalwassernutzung	
			Direkte Nutzung des heißen Wassers	
			Stromerzeugung und Abwärmenutzung	

Energetische Betriebsoptimierung

Die grundsätzlichen Ziele von energetischen Betriebsoptimierungen (eBO) sind:

- Optimale Einstellung einer Anlage
- Erreichen möglichst hoher Wirkungsgrade bei der Energieerzeugung und -verteilung
- Angleichen der Anlagen an die effektive Nutzung respektive den tatsächlichen Bedarf
- Ermitteln und Beibehalten der energetisch optimalen Betriebsweise
- Einhalten der sicherheitstechnischen und hygienischen Anforderungen respektive der gesetzlichen Vorgaben

Nach Merkblatt [SIA-2048] «Energetische Betriebsoptimierung» kommen folgende Ziele hinzu:

- Wesentliche Steigerung der Energieeffizienz in bestehenden Gebäuden
- Korrektes Betreiben gebäudetechnischer Anlagen und Geräte, nach einer klaren Methodik (Bild 3.18)

Für die Durchführung von eBO gibt [SIA 2048] ein schrittweises Vorgehen vor,

mit strukturierter Planung und Umsetzung kostengünstiger Massnahmen (Pay-back-Dauer < 2 a). Wichtig ist dabei, dass die Energieeffizienz ohne merkliche Komforteinbussen gesteigert werden kann. Das Merkblatt skizziert auch eine zeitliche Staffelung von eBO-Massnahmen (Bild 3.19). Dabei werden folgende Arten von eBO definiert:

- eBO* ist eine Optimierung direkt nach der Übergabe eines Objekts, spätestens aber innerhalb der zweijährigen Rügefrist nach [SIA 118]. Hier werden keine gemessenen Betriebsdaten verwendet, sondern nur Planungswerte. eBO* benötigt eine separate Auftragserteilung. Ihr Schwergewicht liegt bei der Optimierung von Regelkreisen und Hydraulik.
- eBO** ist eine Daueraufgabe des Betreibers mit dem Ziel, alle gebäudetechnischen Anlagen immer möglichst energieeffizient zu betreiben. Dies bedingt eine laufende Überwachung (Ist/Soll) der Energiebezüge und den Vergleich zu einer geeigneten Referenz mittels Energiemanagement. Schwergewicht: Energiedatenanalyse und Messungen.

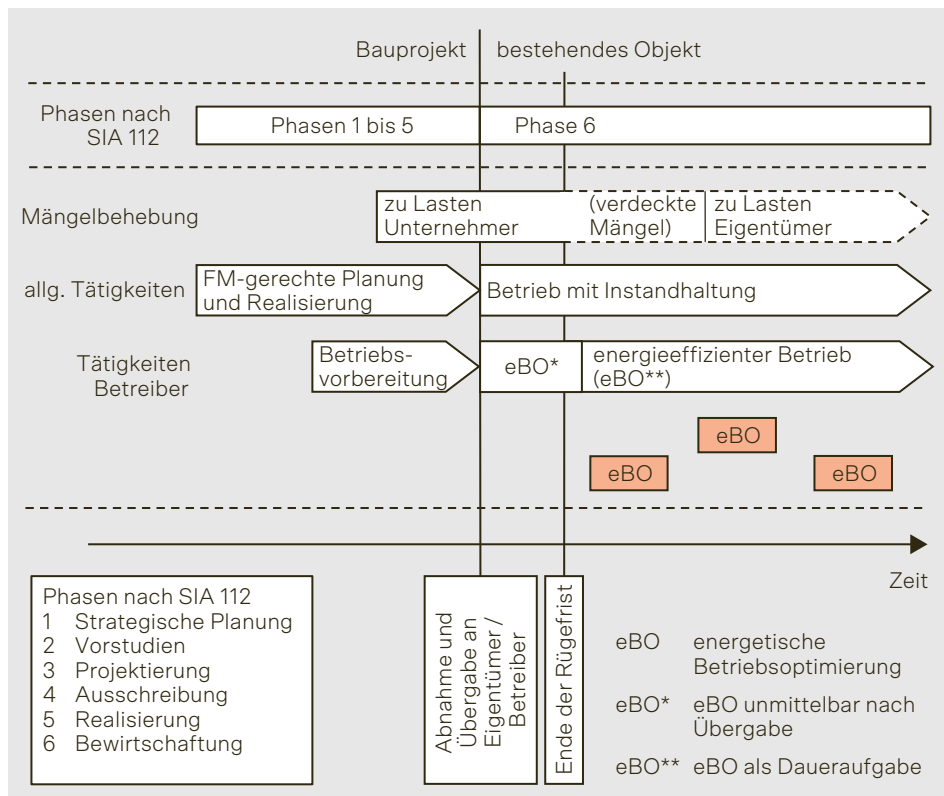


Bild 3.18: Methodik der energetischen Betriebsoptimierung nach [SIA 2048].

3.5 Kälteabgabe im Raum

Für die Kälteabgabe in Räumen stehen ganz unterschiedliche Systeme zur Verfügung (Tabelle 3.13). Bei kleinen Lasten können Gebäude über die zentrale Lüftungs- und Klimaanlage gekühlt werden. Für Einzelräume mit höheren internen Lasten sind zwei Methoden möglich:

- TABS und Kühldecken respektive statischen Kühlflächen unterhalb der Decke; sie ermöglichen es, dem Raum Wärme nahezu lautlos, zugfrei und energieeffizient zu entziehen. Deshalb werden diese Lösungen auch als «stille Kühlung» bezeichnet.
- Umluftkühler werden in Räumen mit sehr hohen internen Wärmelasten eingesetzt, beispielsweise in Rechenzentren, Serverräumen, OP-Räumen, Sterilisationsräumen, Radiologien, Grossraumbüros etc. Hier dienen die Umluftkühler lediglich dazu, interne Wärme abzuführen. Der hygienisch erforderliche Luftwechsel muss durch die Lüftungsanlage sichergestellt werden.

Wenn immer möglich, sollten keine Umluftkühler in Räumen installiert werden, die stark von Personen frequentiert sind. Grund: Umluftkühler sind laut, brauchen einen Kondensatabscheider und Antriebsstrom fürs Gebläse, was zusätzliche Wartung erfordert. Sie sind auch aus hygienischen Gründen nicht ganz unproblematisch.

Stadtwasserkühlungen sind grundsätzlich verboten. In Ausnahmefällen, etwa für die Kühlung von Notstromdieselaggregaten und Magnetresonanztomographen können für solche Notkühlun-

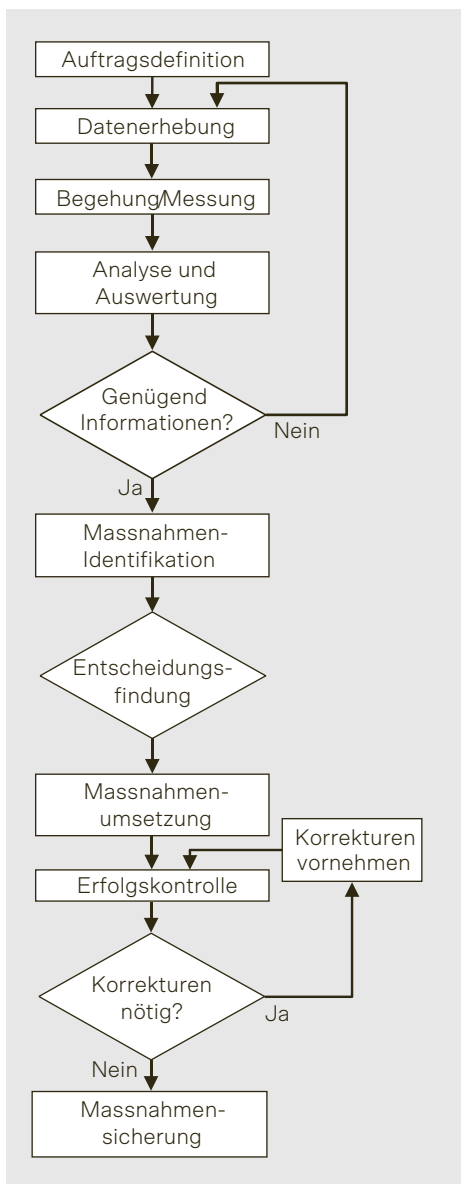


Bild 3.19: Zeitlicher Ablauf einer umfassenden eBO nach [SIA 2048].

System	Maximale Leistung Kühlen		Minimale Vorlauf- oder Zulufttemperatur °C	Medium	Bemerkungen
	W/m ² NGF	W/P			
Fussbodentemperierung	20		19	Wasser	
Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS)	40		19	Wasser	
Kühldecke	80		17	Wasser	
Mischlüftung		120	16	Luft	Bei 36 m ³ /h P
Quelllüftung		70	20	Luft	Bei 36 m ³ /h P
Umluftkühler	≥100		16	Luft	

Tabelle 3.13: Systeme zur Kälteabgabe sowie deren Arbeitstemperaturen und Leistungsgrenzen; NGF: Nettogeschossfläche. (Quelle: [SIA 382/2])

gen Sonderbewilligungen eingeholt werden.
Sowohl Bauteilkühlung, beispielsweise via TABS, als auch Kühldecken können dort eingesetzt werden, wo sensible, fühlbare Wärme abgeführt werden muss. Diese beiden Systeme nutzen die Speichermasse des Raumes und sind deshalb sehr energieeffizient. Einen Vergleich verschiedener Kühlsysteme liefert [Kühlsysteme].

Bauteilkühlung

Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS), auch Betonkern- oder Thermokernkühlung genannt, nutzen die Gebäudespeichermasse für die Raumkühlung. Dadurch müssen die im Raum anfallenden Wärmelasten von Personen, Geräten und Besonnung nicht sofort abgeführt werden, sondern können in der Bauteilmasse zwischengespeichert werden. Diese Wärme kann in den kühleren Nachtstunden dem Gebäude wieder entnommen werden. Günstige Kälteerzeugervarianten sind:

- Direktkühlung mittels Erdsonden
- Free Cooling mittels Hybridrückkühler
- Kühlung mit Kältemaschine, inklusive Abwärmenutzung fürs Trinkwarmwasser, mit günstigerem Niedertarifstrom und kleineren Rückkühlleistungen
- TABS – sie arbeiten effizienter, wenn der Strahlungsanteil der Wärmequellen im Raum hoch ist. Tabelle 3.14 listet die Strahlungs- und Konvektionsanteile verschiedener Wärmequellen.

Tabelle 3.14: Strahlungs- und Konvektionsanteil verschiedener Wärmequellen.

Das Gesamtkonzept der Bauteilkühlung basiert auf folgenden fünf Elementen:
1. Hochwärmegedämmte Gebäudehülle, welche die externen thermischen Las-

Quellen	Strahlungsanteil	Konvektionsanteil
Bürogeräte und Server, mit Ventilator	10 %	90 %
Bürogeräte und Server, ohne Ventilator	20 %	80 %
Beleuchtung	50 %	50 %
Personen	70 %	30 %
Solarstrahlung	90 %	10 %

- ten niedrig hält und auch einen guten Sonnenschutz gewährleistet (g-Wert < 0,15, Beispiel: helle Aussenlamellenstoren)
- 2. Maximal 150 Wh/m²d interne Wärmelasten
- 3. Kontrollierte Hygienelüftung mit Wärmerückgewinnung
- 4. Unverkleidete Betondecke ohne Trittschalldämmung (Vorsicht Akustik!), mit eingelegten Kühl- und Heizrohren
- 5. Kühlmöglichkeit mittels Rückkühler, Erdsonden, Kältemaschine usw.

Aus Tabelle 3.14 geht hervor, dass die Bauteilkühlung Wärme vor allem bei Wärmequellen mit grösserem Strahlungsanteil effizient abführen kann – dazu gehören etwa die Beleuchtung, Personen oder externe Lasten. Für Räume mit grossem Anteil an Bürogeräten muss eine also andere Lösung gesucht werden. Beispiele hierfür sind Rechenzentren, Händlerarbeitsplätze oder Banken.

Kühldecken

Mittels Kühldecken respektive statischen Kühlflächen unterhalb der Decke kann dem Raum Wärme nahezu lautlos, zugfrei und energieeffizient entzogen werden. Von der Funktion her entsprechen Kühldecken den Heizwänden – sie müssen aus physikalischen Gründen aber an der Decke montiert werden. Die warme Luft im Raum steigt hoch und wird unterhalb der Decke abgekühlt. Danach fällt die kühlere, schwerere Luft wieder nahezu zugfrei in den Aufenthaltsbereich ab. Kühldecken haben aber zwei Nachteile: Hohe Investitionskosten und Empfindlichkeit auf hohe Raumluftfeuchten (Kondensationsbildung). Bild 3.20 zeigt eine Kühldecke mit 4-Leiter-Anschluss und der Möglichkeit für gleichzeitiges Heizen und Kühlen innerhalb derselben Zone. Aus der Grafik geht hervor, dass die heutigen Kühldecken auch mit anderen Anwendungen wie Lüftung, Beleuchtung und Schallabsorption kombiniert werden können. Dann fallen etliche Schnittstellen weg.

Mit Kühldecken können Räume auch beheizt werden. Der Vorteil einer Lösung gemäss Bild 3.20 ist, dass nur der Fassadenbereich beheizt wird, also ein rund 1 m breiter Streifen entlang der Aussenwände. Es wird also nur der Teil des Raumes beheizt, in dem die grössten Wärmeverluste auftreten. Dies erhöht den Raumkomfort und die Energieeffizienz, weil nicht die gesamte Deckenmasse erwärmt werden muss. In jedem Fall ist es wichtig, dass die Gebäudehülle sehr gut gedämmt und dicht ist, damit keine Zugerscheinungen auftreten.

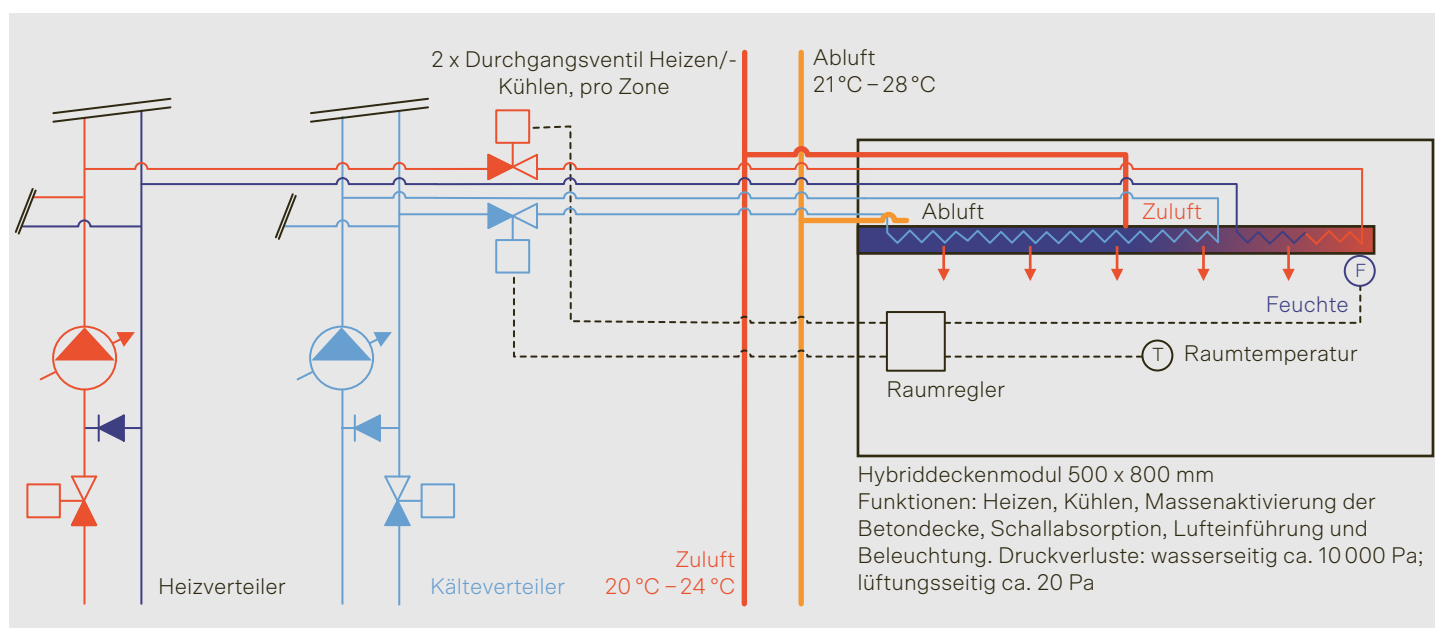
Für das Auslegen einer Kühldecke ist Spezialwissen notwendig. Folgende Punkte gilt es zu berücksichtigen:

- Die Oberflächentemperatur der Kühldecke darf nie den Taupunkt im Raum unterschreiten – Absicherung mittels Kondensat-/Feuchtefühler.
- Kühldecken müssen 100% diffusionsdicht gegen Sauerstoff ausgeführt werden, andernfalls ist eine Netztrennung erforderlich.
- Die Regulierung der Kühldecke muss mit der Lüftung koordiniert werden. Wird der Sollwert im Raum erreicht, muss jeweils der Durchfluss durch die betreffenden Kühldeckenelemente unterbrochen werden.
- Einzelne Kühldeckenelemente müssen separat absperren- und entleerbar sein.
- Besonders in kritischen Räumen empfiehlt es sich, jedes Kühldeckenelement

Tabelle 3.15: Typologie der Kühldecken sowie dazugehörige Leistungswerte.

Kurzbeschreibung	Kühlfall	Heizfall
Spezifische Leistung - Strahlungsdecken mit Taupunktüberwachung - Konvektionsdecken mit Luftgeschwindigkeiten unter 0,15 m/s	- 70 W/m ² bis 100 W/m ² - 100 W/m ² bis 150 W/m ²	- bis 200 W/m ² - bis 300 W/m ²
Leistungsabgabe zur Raumtemperatureinhaltung	Sehr genau möglich	Problematisch wegen Temperaturschichtung
Behaglichkeitskriterien - Temperaturschichtung - Strahlungsasymmetrie - Raumluftgeschwindigkeiten	- praktisch keine - angenehmes Empfinden - unter 0,15 m/s	- lastabhängig, ca. 2 K/m - bis 54 W/m ² behaglich - evtl. Kaltluftabfall
Anforderung an Glasfassade	kein Einfluss	U-Wert unter 1,3 W/m ² K

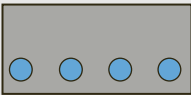
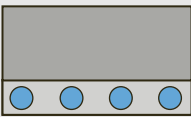
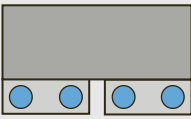
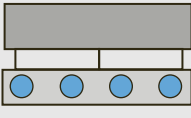
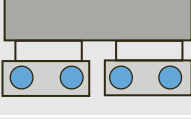

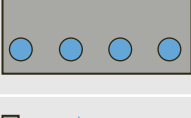
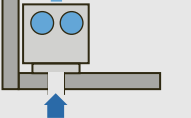
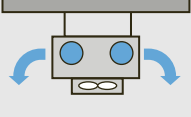
Bild 3.20: Prinzip einer Kühlung mittels Kühldecke, die auch Heizfunktionen übernehmen kann.



bei der Inbetriebnahme mittels Thermografie zu prüfen.

Tabelle 3.16: Die wichtigsten Kälteabgabesysteme, die in der Klimakälte eingesetzt werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass im Raum die Luftfeuchte nicht eingehalten werden muss.

– Zur Aktivierung der Betondecke sollte der freie Querschnitt der Doppeldecke mindestens 50% betragen. Es empfiehlt sich aus diesem Grund, die Kühldecken als «Segel» im Raum auszuführen.

Nr.	Kälteangabe mit Kaltwasser	Funktion	Skizze	Vorteile	Nachteile
1	Thermoaktive Bauteilsysteme TABS	Bauteilkühlung mit Masseaktivierung		Kostengünstige, stille Kühlung nach oben und nach unten bis 40 W/m ²	Teilweise unkontrollierte Kühlung; Integration im Betonbauteil
2	Kühldecke, mit Decke verbunden	Geschlossen, minimale Masseaktivierung		Kostengünstige, stille Kühlung; platzsparend, im Raum kaum sichtbar	Keine direkte Masseaktivierung möglich
3	Kühlmodul	Einbindung der Deckenmasse		Kostengünstige, stille Kühlung; Aktivierung der Speichermasse	Schwierige Montage bei heruntergehängter Doppeldecke
4	Kühldecke unterhalb der Decke	Offen, mit Bauteilaktivierung; konvektive Decke		Stille Kühlung; teilweise Aktivierung der Speichermasse je nach freiem Querschnitt	Schwierige Reinigung; geringere lichte Raumhöhe
5	Kühlsegel unterhalb der Decke	Freie Strömung im Raum mit Bauteilaktivierung		Stille Kühlung, thermisch aktive Lösung mit hoher Leistung	Schwierigere Reinigung; partiell geringere lichte Raumhöhe
6	Bodenkühlung	Changeover mit Bodenheizung		Kostengünstige, stille Kühlung, mit Masseaktivierung	Kälteleistung mit 18°/21°C max. 15 W/m ²
7	Kühlbalken; Kühlbaffle	Kühlpanel mit Primärluft		Grössere Leistung auf kleinstem Raum; nur teilweise Deckenbelegung	Partiell geringere lichte Raumhöhe; Zugserscheinungen möglich; Servicekosten
8	Brüstungsgerät	Induktionsgerät mit Primärluft		Grössere Leistung auf kleinstem Raum; ein Element für Beheizung, Kühlung und Lüftung	Teilweise Zugserscheinungen, Schallemission, energetisch aufwendiger; Brüstung muss geplant werden, Servicekosten
9	Umluftkühler	Ventilator-Konvektor mit oder ohne Kondensatabscheider		Mit Kondensatablauf grosse Leistung; kostengünstige Lösung	Schallemission im Raum; Trockenkühlung mit begrenzter Leistung; Servicekosten

Energieetikette für Raumklimageräte

Seit 2004 ist die Energieetikette für Raumklimageräte obligatorisch. Mit ihrer Hilfe kann die Energieeffizienz anhand der siebenstufigen Skala (A+++ bis D) auf einen Blick beurteilt werden. Grüne, orange und rote Pfeile zeigen an, ob es sich um ein Gerät mit niedrigem, mittlerem oder hohem Energieverbrauch handelt.

Angegeben wird auch der Stromverbrauch bei 60 Minuten Volllastbetrieb, wobei der tatsächliche Energieverbrauch unter anderem von der Verwendung des Geräts sowie den Klimabedin-

gungen abhängt. Damit erlaubt es die Energieetikette, neben dem Anschaffungspreis auch die Energiekosten ungefähr abzuschätzen.



Bild 3.21: Energie-etiketten für Raumklimageräte.

Tabelle 3.17: Grenzwerte bezüglich EER und COP für die Energieetikette von Raumklimageräten. Einkanalgeräte entnehmen die Luft zum Kühlen des Kondensers dem Raum selbst und führen sie nach aussen. Deshalb entsteht Raum ein Unterdruck. Zweikanal-Klimageräte führen die Luft zum Kühlen des Kondensators von außerhalb des Raums zu. Deshalb ändert sich der Druck im zu kühlenden Raum nicht.

EER/COP	Zweikanal		Einkanal	
	EER	COP	EER	COP
A+++	$\geq 4,1$	$\geq 4,6$	$\geq 4,1$	$\geq 3,6$
A++	$3,6 \leq \text{EER} < 4,1$	$4,1 \leq \text{COP} < 4,6$	$3,6 \leq \text{EER} < 4,1$	$3,1 \leq \text{COP} < 3,6$
A+	$3,1 \leq \text{EER} < 3,6$	$3,6 \leq \text{COP} < 4,1$	$3,1 \leq \text{EER} < 3,6$	$2,6 \leq \text{COP} < 3,1$
A	$2,6 \leq \text{EER} < 3,1$	$3,1 \leq \text{COP} < 3,6$	$2,6 \leq \text{EER} < 3,1$	$2,3 \leq \text{COP} < 2,6$
B	$2,4 \leq \text{EER} < 2,6$	$2,6 \leq \text{COP} < 3,1$	$2,4 \leq \text{EER} < 2,6$	$2,0 \leq \text{COP} < 2,3$
C	$2,1 \leq \text{EER} < 2,4$	$2,4 \leq \text{COP} < 2,6$	$2,1 \leq \text{EER} < 2,4$	$1,8 \leq \text{COP} < 2,0$
D	$1,8 \leq \text{EER} < 2,1$	$2,0 \leq \text{COP} < 2,4$	$1,8 \leq \text{EER} < 2,1$	$1,6 \leq \text{COP} < 1,8$

3.6 Trends in der Kältetechnik

In welche Richtung wird sich die Kältetechnik entwickeln? Um dies zu beantworten, gilt es die heute absehbaren Entwicklungen im Baubereich zu bedenken:

- Auf der einen Seite wird dichter gebaut. Parallel dazu wachsen sowohl die Komfortansprüche der Nutzenden als auch der Technisierungsgrad der Gebäude. Zudem werden die mittleren Aussenlufttemperaturen künftig steigen. Diese Entwicklung führt zwangsläufig zu höheren Kälteleistungen und damit zu höherem Stromverbrauch für die Kompressoren, Ventilatoren und Umwälzpumpen.

- Auf der anderen Seite werden vermehrt erneuerbare Energiequellen und Abwärme genutzt und damit die Umwelt nachhaltig entlastet. Durch energetische Betriebsoptimierungen wird der Bedarf an Betriebsenergie zusätzlich sinken. Zudem schaffen deutlich verbesserte Wirkungsgrade bei der Energieumformung und neue Möglichkeiten zur Langzeitspeicherung die Grundlage für die optimale Nutzung von Abwärme.

Insgesamt kann all dies dazu führen, dass längerfristig sogar Energieeinsparung resultieren – trotz höheren Komfortansprüchen und Klimawandel.

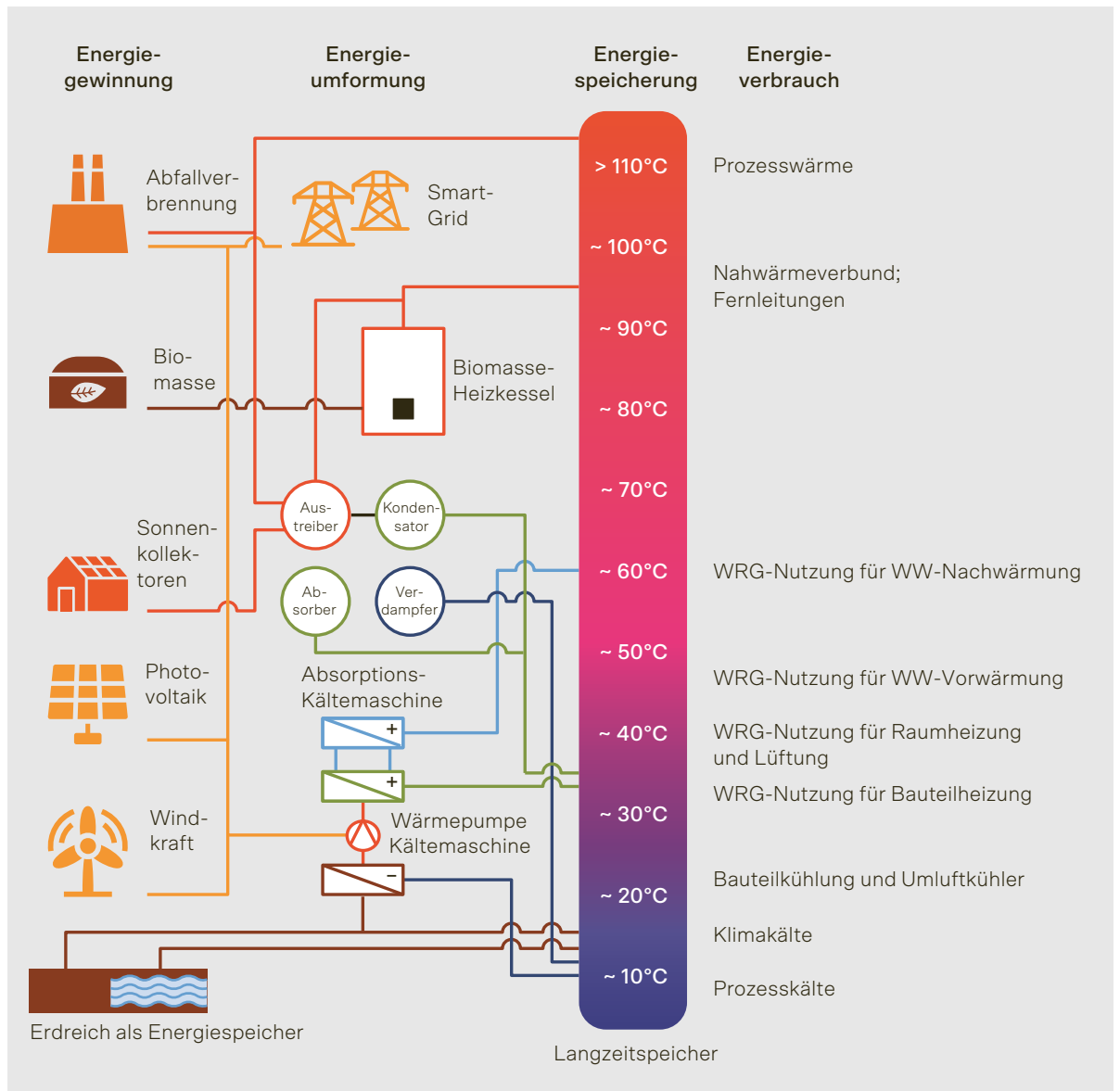


Bild 3.22: Trends in der Kältetechnik.

3.7 Quellen

- [ChemRRV] Bundesverordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung). SR 814.81.
- [EN 13363-1/2] Europäische Norm EN 13363-1/2. Sonnenschutzeinrichtungen in Kombination mit Verglasungen – Berechnung der Solarstrahlung und des Lichttransmissionsgrades. Europäische Union, 2009/2007
- [EnDK] Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE). Konferenz Kantonalen Energiedirektoren (EnDK), Ausgabe 2014. (Nachführung 2018 – aufgrund geänderter Normen), Bern. www.endk.ch
- [Free Cooling] IEF Energy Paper 7/2018. Free Cooling in der Klimakälte. ZHAW, EnergieSchweiz
- [Kühlsysteme] Hocheffiziente Kühlsysteme für Gebäudesanierungen. Bundesamt für Energie, Bern 2010.
- [SIA 118] Norm SIA 118. Allgemeine Bedingungen für Bauarbeiten. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2013.
- [SIA 2024] Merkblatt SIA 2024. Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2015.
- [SIA 2044] Merkblatt SIA 2044. Klimatisierte Gebäude – Standard-Berechnungsverfahren für den Leistungs- und Energiebedarf. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2011.
- [SIA 2046] Merkblatt SIA 2046. Integrale Tests von Gebäudetechniksystemen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2015.
- [SIA 2048] Merkblatt SIA 2048. Energetische Betriebsoptimierung. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2015.
- [SIA 380/1] Norm SIA 380/1. Heizwärmebedarf. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2016.
- [SIA 382/1 → ESEER] Norm SIA 382/1. Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). in Überarbeitung; neu als SIA 380/2. Zürich, 2014
- [SIA 382/1] Norm SIA 382/1. Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2014.
- [SIA 382/2] Norm SIA 382/2. Klimatisierte Gebäude – Leistungs- und Energiebedarf. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). in Überarbeitung; neu als SIA 380/2. Zürich, 2011.
- [SIA 411] Norm SIA 411. Modulare Darstellung der Gebäudetechnik. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2016.

[SN EN 378-1]

Schweizer Norm SN EN 378-1 bis -3. Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen – Teil 1 (2021): Grundlegende Anforderungen, Begriffe, Klassifikationen und Auswahlkriterien. Teil 2 (2017): Konstruktion, Herstellung, Prüfung, Kennzeichnung und Dokumentation. Teil 3 (2021): Aufstellungs-ort und Schutz von Personen. Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV). Winterthur.

Lufterneuerung

Heinrich Huber

4.1 Abgrenzung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über raumluftechnische Anlagen (RLT-Anlagen) in Nicht-Wohngebäuden, die vorwiegend für den Aufenthalt von Personen bestimmt sind. Typische Beispiele sind Büros, Schulen und Versammlungsräume. Für Grundlagen, Vertiefung und spezielle Anwendungen wird auf Fachliteratur, insbesondere das [Handbuch Klimatechnik] verwiesen. Zum Lüften von Wohnungen ist aus der Fachbuchreihe von EnergieSchweiz das Buch [Wohnungslüftung] erhältlich.

4.2 Vorschriften und Normen

Der Überblick über Vorschriften und Normen basiert auf dem Stand vom März 2022. Zu diesem Zeitpunkt waren diverse Dokumente in Revision. Bei anderen war die Revision bereits angekündigt.

Kantonale Energiegesetze

Die kantonalen Anforderungen basieren auf den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE) und sind in der Vollzugshilfe [EN-105] zusammengestellt. Darin werden folgende Punkte geregelt:

- Pflicht zur Wärmerückgewinnung (WRG)
- Abwärmenutzung (AWN) bei grossen Abluftanlagen mit langen Betriebszeiten
- Wärmedämmung von Luftleitungen und Geräten
- Maximale Luftgeschwindigkeiten in Luftleitungen und Geräten
- Bedarfsgerechter Betrieb für Räume und Raumgruppen mit unterschiedlicher Nutzung

Energieeffizienzverordnung (EnEV)

In der Energieeffizienzverordnung [EnEV] hat die Schweiz die europäischen Anforderungen an RLT-Geräte

übernommen, die in der Verordnung [EU 1253/2014] festgehalten sind:

- Minimale Effizienz der WRG
- Maximale spezifische Ventilatorleistung für die Druckverluste der WRG und der Filter
- Minimaler Ventilatorwirkungsgrad für Abluftanlagen

Norm SIA 382/1

Die [SIA 382/1] ist die Schweizer Mutternorm für RLT-Anlagen. Sie regelt die Terminologie und stellt Anforderungen an die Behaglichkeit und Raumlufqualität. Weiter beinhaltet sie Anforderungen an die Funktion und die Energieeffizienz. Die übrigen Schweizer Lüftungsnormen und Richtlinien sind der SIA 382/1 untergeordnet. Bei Redaktionsschluss dieses Buches war die SIA 382/1 in Revision.

SWKI-Hygienerichtlinie

Bezüglich Hygiene verweisen die Schweizer Normen auf die Richtlinie [SWKI VA 104-01]. Neben Anforderungen an Komponenten regelt sie die Instandhaltung.

Brandschutz

Grundsätzlich legen die Kantone die gesetzlichen Grundlagen für den Brandschutz fest. Die meisten halten sich bei der Umsetzung an die Normen und Richtlinien der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF). Die meisten relevanten VKF-Dokumente sind auf www.praever.ch frei verfügbar. Die VKF-Brandschutzrichtlinie «Luftechnische Anlagen» [VKF 25-15] beschreibt allgemein die Anforderungen und Massnahmen für Lüftungsanlagen.

Bei Gebäuden mit mehreren Brandabschnitten, respektive mit RLT-Anlagen, die verschiedene Brandabschnitte versorgen oder traversieren, beeinflusst der Brandschutz das Lüftungskonzept und die Ausgestaltung der RLT-Anlagen massgebend. Deshalb muss der Brand-

schutz ab der ersten Planungsphase einbezogen werden.

Spezielle Nutzungen

Die [SIA 382/1] deckt häufige Nutzungskategorien wie Büros, Schulen und Versammlungsräume ab. Spezielle Nutzungen wie Gastwirtschaftsbetriebe, Hallenbäder und Spitäler werden in den einschlägigen Richtlinien des Verbandes Die Planer – SWKI behandelt.

4.3 Raumlufthqualität und Luftraten

CO₂-Konzentration

Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist ein guter Indikator für die empfundene Raumlufthqualität, wenn die Geruchsbelastung hauptsächlich vom menschlichen Stoffwechsel stammt. CO₂ ist weder riechbar, noch erreicht seine Konzentration in belüfteten Gebäuden einen gesundheitlich kritischen Bereich.

Tabelle 4.1 zeigt in den ersten beiden Spalten die Kategorie der Raumlufthqualität (Indoor Environment Quality, IEQ) gemäss [SN EN 16798-1], Anhang B. Bei der CO₂-Konzentration ist die Differenz gegenüber der Aussenluft relevant. An freien Lagen liegt die CO₂-Konzentration der Aussenluft aktuell bei rund 420 ppm. Je nach Situation, Wetterlage und Saison sind lokal höhere Werte bis zu rund 500 ppm möglich.

Die SN EN 16798-1 wird voraussichtlich 2022 mit einem nationalen Anhang A ergänzt, der bezüglich CO₂-Werten und Luftqualität die Schweizer Verhältnisse berücksichtigt. Diese Werte werden auch in die revidierte SIA 382/1 übernommen. Sobald die revidierte Fassung dieser Norm vorliegt (voraussichtlich 2023), sollen die dort aufgeführten Werte verwendet werden.

Kategorie	CO ₂ -Konzentration oberhalb der Konzentration in Aussenluft, in ppm		Luftvolumenstrom pro Person beim vorgeschlagenen Auslegungswert der CO ₂ -Konzentration, in m ³ /h
	Bereich der Kategorie nach SN EN 16798-1	Vorschlag Auslegungswert	
IEQ I	0 ... 550	350	57
IEQ II	> 550 ... 800	700	29
IEQ III	> 800 ... 1350	1100	18
IEQ IV	> 1350 ... 2200	1600	13

Tabelle 4.1: Raumlufthkategorien für die CO₂-Konzentration oberhalb der Konzentration in Aussenluft; Vorschlag für Auslegungswerte mit einer Standard-CO₂-Emission von 20 l/h je Person, für unangepasste Personen.

Lesebeispiel zu Tabelle 4.1

Für ein Büro wird die Raumlufthkategorie IEQ II vereinbart. Die Anlage wird nach dem Vorschlag von Tabelle 4.1 ausgelegt. Die lokale Aussenluft enthält 450 ppm CO₂. Damit stellen sich bei Auslegebedingungen in der Raumlufth 1150 ppm CO₂ ein.

Die dritte Spalte von Tabelle 4.1 zeigt einen Vorschlag des Autors für die Auslegungswerte, bei dem die CO₂-Konzentration der Raumluft etwa in der Mitte der jeweiligen IEQ-Kategorie liegt. Die letzte Spalte zeigt den Luftvolumenstrom pro Person, der sich aus dem Vorschlag der CO₂-Konzentration ergibt. Die Tabelle gilt für sogenannt unangepasste Personen. Damit sind Personen gemeint, die den Raum von aussen betreten. Diese beurteilen die Raumluftqualität kritischer, also schlechter als sogenannt angepasste Personen, die sich bereits längere Zeit im Raum aufhalten.

Die zugrunde gelegte Standard-CO₂-Emission von 20 l/h je Person gilt für eine typische Bürotätigkeit. Bei Räumen mit einer höheren metabolischen Aktivität (beispielsweise Sportstätten) sind höhere Lüftraten erforderlich.

Üblicherweise soll die RLT-Anlage auf die Raumluftkategorie IEQ II ausgelegt werden. Das entspricht auch den Standardwerten der [SIA 2024]. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Nutzerinnen und Nutzer die Möglichkeit haben, ergänzend zur mechanischen Lüftung bei Bedarf Fenster zu öffnen. Es steht Bauherrschaften und Planerinnen aber frei, für die Auslegung andere Werte zu vereinbaren.

Weitere Luftbelastungen

Neben Personen kann die Raumluft durch Baumaterialien, Einrichtungsgegenstände und Betriebseinrichtungen belastet werden. Dabei spielen vor allem Feinstaub und flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC = Volatile Organic Compounds) eine Rolle. Gemäss [SIA 180], Ziff. 3.3, gilt der Grundsatz, dass Baumaterialien gewählt werden sollen, die möglichst keine oder nur sehr geringe Schadstoffmengen an die Raumluft abgeben. Gute Voraussetzungen für eine Bausubstanz, die die Raumluft möglichst wenig belastet, bietet das Bauen nach Minergie-Eco.

Raumluftfeuchte

Gemäss SIA 180 und [SIA 382/1] beträgt die minimal zulässige relative Raumluftfeuchte (r. F.) 30 %. Sie bezieht sich bei normaler Nutzung auf 21 °C Raumlufttemperatur. Sind andere Raumlufttemperaturen vorgesehen, wird die Feuchte auf 21 °C umgerechnet. Bei Lagen über 800 m ü. M. reduziert sich die Grenze der minimalen Feuchte um 1 % r. F. pro 100 m. Ohne aktive Befeuchtung darf die minimale Raumluftfeuchte während 10 % der Nutzungszeit unterschritten werden. Der Maximalwert für den Sommer ist mit einer absoluten Feuchte von 13,7 g/kg festgelegt. Ohne aktive Entfeuchtung darf die maximale Raumluftfeuchte während 10 % der Nutzungszeit überschritten werden.

SIA 180 regelt zudem die Anforderungen an den Feuchteschutz, um dem Schimmelrisiko vorzubeugen. Je nach Baukonstruktion darf die maximale Raumluftfeuchte bei tiefen Aussentemperaturen im Bereich von 40 % r. F. liegen.

Beim Erarbeiten des nationalen Anhangs zur SN EN 16798-1 werden voraussichtlich Kategorien für die Auslegung der Befeuchtung und Entfeuchtung definiert. Diese dürften in die künftige SIA 382/1 übernommen werden.

4.4 Begriffe, Komponenten und Funktionen

Luftarten

Bild 4.1 zeigt die wichtigsten Luftarten von RLT-Anlagen. In der [SIA 382/1] finden sich weitere Luftarten, wie Lecka-

gen oder Sekundärluft, die hier der Einfachheit halber nicht behandelt werden. In Tabelle 4.2 finden sich die Abkürzungen, Beschreibungen und der normative Farbcode.

Abkürzung Deutsch Englisch	Bezeichnung Deutsch Englisch	Definition	Farbcode
AUL ODA	Aussenluft Outdoor air	Unbehandelte Luft, die von aussen in die RLT-Anlage oder einen Luftdurchlass strömt	grün
ZUL SUP	Zuluft Supply air	Luft, die in den versorgten Raum eintritt oder Luft, die in die RLT-Anlage eintritt, nachdem sie behandelt wurde	je nach Anlagentyp
RAL IDA	Raumluft Indoor air	Luft im versorgten Raum oder der versorgten Zone	grau
ÜSL TRA	Überströmluft Transferred air	Raumluft, die von einem Raum in einen anderen Raum strömt	grau
ABL ETA	Abluft Extract air	Luftstrom, der von einem Raum austritt und in die RLT-Anlage gelangt	gelb
FOL EHA	Fortluft Exhaust air	Luftstrom, der die RLT-Anlage verlässt und ins Freie strömt	braun
UML RCA	Umluft Recirculation air	Abluft, die der Luftbehandlung wieder zugeführt wird und als Zuluft wieder verwertet wird	orange
MIL MIA	Mischluft Mixed air	Luft, die zwei oder mehr Luftströme enthält	Luftströme mit sep. Farben
LEC LEA	Leckluft Leakage	Unbeabsichtigter Luftstrom, der durch undichte Stellen in die RLT-Anlage ein- oder austritt	grau

Tabelle 4.2: Abkürzungen, Beschreibungen und Farbcode der Luftarten gemäss SIA 382/1 (Auszug).

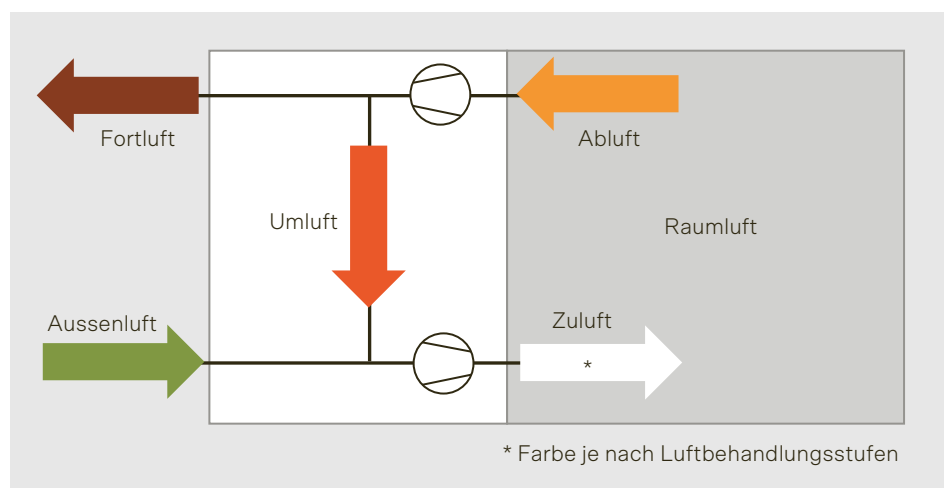


Bild 4.1: Luftarten gemäss SIA 382/1 (Auszug).

* Farbe je nach Luftbehandlungsstufen

Komponenten und Funktionen

In Tabelle 4.3 sind wichtige Komponenten und Funktionen der Luftbehandlung zusammengestellt. Sie sind oft im Luftbehandlungsgerät der RLT-Anlage, dem sogenannten Monobloc, eingebaut.

In Tabelle 4.4 finden sich gängige Komponenten und Funktionen der Luftverteilung. Die Bezeichnungen und Symbole lehnen sich an die [SN EN 12792] an.











Komponente Symbol	Funktion Beschreibung
Ventilator 	Luftförderung Fördert die Luft, indem der erforderliche Förderdruck zur Überwindung des Druckabfalls im Luftpfad erzeugt wird. Je nach Steuerung und Regelung kann ein Ventilator einen Luftvolumenstrom oder einen Differenzdruck konstant halten.
Luftfilter 	Filtrierung Partikelfilter halten partikelförmige Luftverunreinigungen zurück, um die RLT-Anlage vor Verschmutzung zu schützen und/oder die geforderte Zuluftqualität zu erreichen. Spezielle Filter können gasförmige Verunreinigungen wie Gerüche zurückhalten. Partikelfilter werden nach der Norm [ISO 16890-1] klassifiziert. SIA 382/1 verlangt als minimale Stufe für die Zuluft die Klasse ISO ePM1 50%. Abluftfilter für Luftaufbereitungsgeräte mit rotierender Wärmerückgewinnung (Rotoren) sollen mindestens ISO ePM10 50% entsprechen. Bei allen anderen Lüftungsgeräten genügt ISO Coarse 80%. Filter können die Betriebskosten einer RLT-Anlage sowohl bezüglich den Material- als auch Energiekosten (Druckverlust) entscheidend beeinflussen. Deshalb sollen sie die Energieklasse A+ oder A gemäss der Eurovent-Klassifizierung erreichen.
Wärmerückgewinner 	Wärmerückgewinnung (WRG) Überträgt sensible Wärmeenergie von der Abluft an die Zuluft. Bestimmte Typen können neben sensibler Wärme auch Feuchte übertragen. Die verschiedenen WRG-Typen und ihre spezifischen Symbole werden in Kapitel 4.6 behandelt.
Lufterwärmer 	Lufterwärmung Führt der Zuluft Heizungswärme oder evtl. Abwärme zu. Damit soll eine minimale Zulufttemperatur erreicht werden. Teilweise dienen sie auch dazu, die Luft vor der WRG oder einem Luftbefeuchter vorzuwärmen, um deren Funktion zu gewährleisten. Meist werden Luft-Wasser-Wärmeübertrager verwendet. Beim Vereisungsschutz kann auch ein Wasser-Glykol-Gemisch anstelle von Wasser verwendet werden. Bei kleinen Anlagen werden teilweise elektrisch beheizte Lufterwärmer eingesetzt. Diese sind aber ab einer bestimmten Leistung bewilligungspflichtig und können einen hohen Energie- und Leistungsbedarf verursachen. Eine weitere Variante ist eine Lufterwärmung durch den Kondensator einer Wärmepumpe. Lufterwärmer, die zum Vereisungsschutz oder Vorwärmen vor Luftbefeuchtern eingesetzt werden, werden als Vorwärmer bezeichnet. Beim Einbau nach einer Luftbefeuchtung oder Entfeuchtung spricht man von Nachwärmern.
Luftkühler 	Luftkühlung und/oder Luftentfeuchtung Kühlt die Zuluft ab, um eine bestimmte Zulufttemperatur zu erreichen. Wenn sich die Luft unter den Taupunkt abkühlt, wird der Luftstrom zudem kontrolliert (d. h. absichtlich) oder unkontrolliert (als Nebeneffekt) entfeuchtet. Meist werden hierfür Luft-Wasser-Wärmeübertrager verwendet. Neben Kaltwasser von einer Kältemaschine kann auch eine freie Kühlung, beispielsweise von Erdwärmesonden, genutzt werden. Je nach Anlage wird dabei anstelle von Wasser ein Wasser-Glykol-Gemisch verwendet. Eine weitere Variante ist eine Luftkühlung und/oder Entfeuchtung durch einen Verdampfer eines Kälteaggregates.

Tabelle 4.3: Komponenten von Luftbehandlung, Symbole in Anlehnung an [SN EN 12792].

Komponente Symbol	Funktion Beschreibung
<p>Abluft- Wärme- pumpe</p> 	<p>Abwärmenutzung (AWN) oder Wärmerückgewinnung (WRG) Abluft wird durch den Verdampfer einer Wärmepumpe abgekühlt. Die Abkühlung kann bis unter den Taupunkt oder gar bis zur Eisbildung am Verdampfer gehen. Wenn die Abwärme zur Zulufterwärmung genutzt wird, handelt es sich um WRG, die teilweise auch als aktive WRG bezeichnet wird. Wenn die Wärme für die Wassererwärmung oder Heizungsunterstützung verwendet wird, spricht man von AWN.</p>
<p>Luftbe- feuchter</p> 	<p>Luftbefeuchtung oder adiabatische Kühlung Bei der sogenannten adiabatischen Luftbefeuchtung wird Wasser in der Luft versprüht, zerstäubt oder verdunstet. Die Verdampfungsenergie wird dem Luftstrom entzogen und kühlt diesen ab. Ausser zur Zuluftbefeuchtung können adiabatische Befeuchter im Sommer auch zum Kühlen der Abluft eingesetzt werden. Durch eine WRG, die nach dem Befeuchter eingebaut ist, wird dann die Zuluft abgekühlt. Beim Dampfbefeuchter wird dem Zuluftstrom Dampf zugeführt. Die Zulufttemperatur verändert sich dabei kaum, respektive nimmt nur um etwa ein 1 K zu. Deshalb wird hier auch von isothermer Luftbefeuchtung gesprochen. Ausser in sehr grossen Spezialanlagen wird der Dampf hierfür elektrisch erzeugt. Bei der adiabatischen Luftbefeuchtung hingegen kann die Verdampfungsenergie mit Heizwärme, beispielsweise von einer Wärmepumpe, bereitgestellt werden. Die adiabatische Luftbefeuchtung ist damit energetisch günstiger. Dafür ist sie hygienisch anspruchsvoller. Bei allen Luftbefeuchtern muss das zugeführte Wasser teilweise oder ganz entmineralisiert sein.</p>
<p>Tropfen- abscheider</p> 	<p>Tropfenabscheidung Bei Luftbefeuchtern und -kühlern besteht das Risiko, dass Wassertropfen mitgerissen werden. Daher werden nach diesen Komponenten oft Tropfenabscheider installiert.</p>
<p>Schall- dämpfer</p> 	<p>Schalldämpfung In erster Linie dämpfen Schalldämpfer den Schallpegel der Ventilatoren. Teilweise werden sie auch in der Luftverteilung eingesetzt, um die Schallübertragung zwischen Räumen zu dämpfen. Dabei spricht man von Telefonieschalldämpfern.</p>
<p>Jalousie- klappe</p> 	<p>Absperren, Mischen Bei ausgeschalteter RLT-Anlage müssen die Öffnungen nach aussen geschlossen werden. Die entsprechenden motorisierten Klappen werden meistens beim Aussenlufteintritt und Fortluftaustritt des RLT-Geräts angebracht. Von den Wärmeverlusten her wäre eine Platzierung unmittelbar beim Aussenluft- und Fortluftdurchlass sinnvoll. Motorisierte Klappen werden auch zum temporären Absperren von einzelnen Zonen und zur Regelung von Umluftbeimischungen verwendet.</p>

Fortsetzung
Tabelle 4.3.








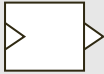
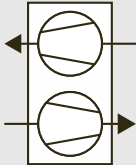
Komponente Symbol	Funktion Beschreibung
Drossel- element 	<p>Drosselung Drosselklappen und Irisblenden dienen zur festen Einregulierung der Luftverteilung. Damit wird der Abgleich zwischen verschiedenen Strängen oder Räumen erreicht. Es wird empfohlen, für die Einregulierung Irisblenden zu verwenden, da diese eine gute Regelcharakteristik haben und über lange Zeit stabil einstellbar sind. Zudem lässt sich an der Blende der Luftvolumenstrom überschlagsmässig messen.</p>
Konstant- Volumen- stromregler 	<p>Konstant-Volumenstromregelung Damit der Luftvolumenstrom geregelt werden kann, ist ein minimaler Vordruck, respektive Druckabfall über dem Regler, erforderlich. Bei einstufigen Anlagen sollen Konstant-Volumenstromregler nicht zum Abgleich des Luftvolumenstroms eingesetzt werden, da dies einen höheren Druckabfall und damit mehr Ventilatorenergie erfordert als der Abgleich mit Drosselelementen. Der Einsatz von Konstant-Volumenstromreglern ist sinnvoll in Anlagen mit variablem Luftvolumenstrom, bei denen einzelne Räume oder Zonen einen konstanten Luftvolumenstrom erfordern (beispielsweise Technikräume).</p>
Variabel- Volumen- stromregler 	<p>Variabel-Volumenstromregelung (VVS-Regelung) Damit der Luftvolumenstrom geregelt werden kann, ist ein minimaler Vordruck, respektive Druckabfall über dem Regler, erforderlich. Variabel-Volumenstromregler werden eingesetzt, um die Raumluftqualität (oft CO₂-Gehalt) oder die Raumlufttemperatur in einzelnen Räumen oder Zonen zu regeln. Zu einem Variabel-Volumenstromregler in der Zuluft gehört immer ein Pendant in der Abluft, damit die Luftvolumenstrombilanz eines Raumes oder einer Zone ausgeglichen ist.</p>
Brand- schutz- klappe 	<p>Absperrung im Brandfall Anforderungen an Brandschutzklappen (BSK) sind in der Richtlinie [VKF 25-15] geregelt. Zudem finden sich Informationen auf der Webseite der IG BSK (www.ig-bsk.ch). BSK sollen die Ausbreitung von Feuer und Rauch über RLT-Anlagen verhindern. Sie müssen beim Ausschalten der RLT-Anlage, beim Ansprechen einer thermischen Auslöseeinrichtung sowie beim Ausfall des Antriebs selbsttätig schliessen. BSK dürfen nicht als Regulierklappen verwendet werden. Zudem müssen sie regelmässig inspiziert werden. BSK sind erforderlich bei Durchtrittsstellen von Lüftungsleitungen durch brandabschnittbildende Bauteile. Ebenso braucht es sie, wenn öffnungslose Lüftungsleitungen durch andere Lüftungsabschnitte führen und nicht den erforderlichen Feuerwiderstand aufweisen. Allerdings gibt es auch Ausnahmen, beispielsweise wenn bei Büro- und Schulbauten die Fläche des Lüftungsabschnittes 1200 m² nicht übersteigt oder bei separater Lüftungsleitungsführung bis zur Lüftungszentrale. Da Installation und Betrieb von BSK aufwendig sind, wird angestrebt, deren Anzahl zu minimieren. Dies kann durch ein entsprechendes Konzept der Luftaufbereitungsgeräte und Luftverteilung erreicht werden.</p>
Wetter- schutz- gitter 	<p>Aussenluftfassung, Fortluftdurchlass Die Aussenluftfassung (auch Aussenluftdurchlass) und der Fortluftdurchlass müssen so gestaltet sein, dass die RLT-Anlage vor Regen und Schnee sowie vor starker Verschmutzung geschützt ist. Zudem darf die Fortluft weder die Nachbarschaft noch das eigene Gebäude beeinträchtigen. Aus diesem Grund werden in der SIA 382/1 minimale Abstände zwischen Aussenluftfassungen und Fortluftdurchlässen gefordert. Die Fortluft soll in der Regel über Dach geführt werden. Je nach Art der Abluft (beispielsweise Restaurant) und Lage ist dies sogar eine harte Anforderung.</p>

Tabelle 4.4: Komponenten von Luftverteilungen, Symbole in Anlehnung an [SN EN 12792].

Komponente Symbol	Funktion Beschreibung
<p>Zuluft- durchlass</p> 	<p>Zuführen von Zuluft</p> <p>Je grösser der Raum und je höher der spezifische Luftvolumenstrom (m^3/h pro m^2 Bodenfläche) sowie die spezifischen Wärmelasten sind, desto stärker beeinflussen die Art und Position der Zuluftdurchlässe die Raumluftströmung und die Raumluftqualität. Bei kleinen Räumen und kleinen Luftvolumenströmen hat sich die Mischlüftung bewährt – respektive stellt sich ohnehin unabhängig von der Luftzufuhr eine Mischlüftung ein. Bei grossen spezifischen Luftvolumenströmen und Wärmelasten kann die sogenannte Quelllüftung Vorteile haben. Dabei wird die Zuluft so zugeführt, dass sich am Boden ein Frischluftsee bildet, von dem die Luft durch die Auftriebsströmung von Personen und anderen Wärmequellen nach oben strömt. Dabei kann sich im Aufenthaltsbereich eine besser Luftqualität einstellen als bei einer Mischlüftung, respektive der Luftvolumenstrom kann bei gleicher Luftqualität reduziert werden.</p>
<p>Abluft- durchlass</p> 	<p>Abführen der Raumluft</p> <p>Abluft wird in der Regel im oberen Raumbereich abgeführt. Bei grossen spezifischen Luftvolumenströmen gilt es darauf zu achten, dass kein Risiko für einen Kurzschluss zwischen Zuluft und Abluft entsteht.</p>
<p>Überström- luftdurchlass</p> 	<p>Passive Überströmung</p> <p>Bei vielen Nutzungen wird die Luft in Räumen mit Zuluft (Zulufräume) nicht oder nicht vollständig direkt über Abluftdurchlässe im Raum abgeführt. Die Raumluft kann durch sogenannte Überströmluftdurchlässe (ÜSLD) von einem Raum in einen anderen strömen. Der Raum, in den diese Luft strömt, kann ein Abluftraum oder ein Durchströmbereich, beispielsweise eine Verkehrsfläche sein. Damit die passive Überströmung funktioniert, muss sich eine bestimmte Druckdifferenz zwischen den Räumen einstellen, respektive der ÜSLD muss auf einen bestimmten Druckabfall ausgelegt sein. In Anlehnung an die Wohnungslüftungsnorm SIA 382/5 werden bei Nutzungen wie Büros oder Schulen maximal 3 Pa Druckabfall empfohlen.</p>
<p>Verbund- lüfter</p> 	<p>Verbundlüftung</p> <p>Bei der Verbundlüftung wird die Zuluft in einem offenen Bereich zugeführt, an den die zu lüftenden Räume angrenzen. Diese Verbundräume sind mit Verbundlüftern ausgerüstet. Stehen die Türen offen, sorgt die natürliche Luftbewegung für ausreichende Umwälzung. Bei geschlossenen Türen sorgen die Verbundlüfter für den Luftaustausch zwischen dem Zuluftbereich und den Verbundräumen. Verbundlüftungen zeichnen sich durch kurze Zuluftleitungen aus. Zudem lässt sich die Raumluftqualität des ganzen Verbundes durch einen einzigen Raumluftqualitätssensor und ein einziges Paar von Variabel-Volumenstromreglern regeln.</p> <p>Eine Einsatzgrenze für die Verbundlüftung bildet der Brandschutz. Insbesondere müssen die Längen der Fluchtwege beachtet werden.</p>

Fortsetzung
Tabelle 4.4.

Hydraulische Schaltungen für Wasser-Luft-Wärmeübertrager

Für die hydraulische Einbindung von Lufterwärmern und Luftkühlern stehen drei Schaltungen im Vordergrund, die im Kapitel 2 «Heizungsanlagen» beschrieben sind. Für welche Anwendungen sich diese Schaltungen eignen, ist in Tabelle 4.5 beurteilt. Aus lüftungstechnischer Sicht sind die Einspritzschaltung mit Durchgangsstellorgan und die Beimischschaltung gleichwertig. Die Wahl hängt davon ab, ob der Heizungs- respektive Kälteverteiler druckbehaftet oder drucklos ist.

Sicherheits- und Überwachungsfunktionen

Ventilatorüberwachung: Der Betrieb des Ventilators wird meist mittels einer Drehzahlüberwachung an der Laufradachse oder einer Luftgeschwindigkeitsmessung am Ventilatorsaugstutzen überwacht.

Filterüberwachung: Bei kleinen und mittleren Anlagen werden die Filter typischerweise manuell mit einer optischen Druckanzeige am RLT-Gerät überwacht.

Eine automatische Überwachung ist möglich, kommt aber eher für grössere Anlagen infrage.

Bei Anlagen mit variablem Luftvolumenstrom muss sowohl bei der manuellen als auch der automatischen Überwachung beachtet werden, dass der Druckabfall über dem Filter vom Luftvolumenstrom abhängt.

Klappen: Aussenluft- und Fortluftklappen müssen bei Anlagestillstand und Stromausfall schliessen, um den Eintritt von kalter Aussenluft und damit das Einfrieren von wasserführenden Wärmeübertragern zu verhindern. Zudem soll so das Eindringen von Verschmutzungen reduziert werden. Aussenluft- und Fortluftklappen sollen stromlos selbsttätig schliessen, was auch als Notstellfunktion bezeichnet wird. Das Schliessen erfolgt zeitverzögert zur Ventilatorabschaltung und das Öffnen vor dem Start der Ventilatoren.

Frostschutz: Bei der luftseitigen Überwachung wird ein Thermostat nach dem ersten Lufterhitzer installiert. Bei der wasserseitigen Überwachung sitzt der Thermostat im Rücklauf des ersten

Anwendung für	Drosselschaltung	Einspritzschaltung mit Durchgangsstellorgan und Beimischschaltung
Lufterhitzer ohne Frostgefahr z. B. Nachwärmer	Geeignet Allenfalls tritt bei tiefer Teillast Temperaturschichtung in der Zuluft auf; tiefstmögliche Rücklauftemperatur und Pumpenenergie.	Geeignet Auch bei niedriger Teillast gutes Regelverhalten und keine Temperaturschichtung
Lufterhitzer mit Frostgefahr z. B. Vorwärmer	Nicht empfohlen Bei Teillast kann die Rücklauftemperatur so tief fallen, dass ein Frostrisiko entsteht.	Empfohlen Die Rücklauftemperatur kann gut überwacht werden.
Luftkühler für geregelte Entfeuchtung	Empfohlen Nur mit dieser Schaltung kann optimal entfeuchtet werden.	Ungeeignet Eine Entfeuchtung kann nicht geregelt werden.
Luftkühler ohne gewollte Entfeuchtung	Ungeeignet Bei Teillast kann eine unerwünschte Entfeuchtung resultieren, was zu einem Energieverbrauch ohne Nutzen führt.	Empfohlen Eine ungewollte Entfeuchtung wird bei korrekter Vorregelung des Kaltwasservorlaufs verhindert.

Tabelle 4.5: Eignung von hydraulischen Schaltungen für Wasser-Luft-Wärmeübertrager.

Wärmeübertragers. Wird der Frostschutz aktiviert, öffnet das Ventil im Wasserkreislauf und die Pumpe schaltet ein. Die Ventilatoren schalten aus und die Aussen- und Fortluftklappe werden geschlossen.

Die luft- und wasserseitige Überwachung können kombiniert werden. Zudem ist auch ein präventiver Frostschutz möglich und/oder eine Frostschutz-Anfahrsteuerung. Bei letzterer wird bei tiefen Aussentemperaturen der Lufterhitzer vor dem Öffnen der Aussen- und Fortluftklappe auf Volllast eingeschaltet und erst nach dem Einschalten der Ventilatoren zurückgeregelt.

Brandfall: In der Regel werden Lüftungs- und klimatechnische Anlagen im Brandfall ausgeschaltet. Eine Entrauchungsschaltung wird nicht vorgesehen und die Klappen werden zugefahren (siehe auch unter Brandschutzklappen in Tabelle 4.4)

Notstromberechtigung: Im Regelfall sind RLT-Anlagen nicht für den Bezug von Notstrom berechtigt.

4.5 Ventilatorenergie und Druckverluste

Ein geringer Energiebedarf für die Luftförderung wird primär durch tiefe Druckverluste, die korrekte Bemessung und den bedarfsgerechten Betrieb erreicht. In zweiter Priorität folgen ein hoher Ventilatorwirkungsgrad und ein effizienter Antrieb. Hinweise auf die energieeffiziente Luftförderung finden sich im [Merkblatt 24] von Topmotors.

Eine zentrale Kenngrösse für die Beurteilung der Energieeffizienz der Luftförderung ist die spezifische Ventilatorleistung (Abkürzung SFP für Specific Fan Power) P_{SFP} , die gemäss [SN EN 16798-3] nach Formel (1) berechnet wird.

$$P_{SFP} = \frac{P}{q_v} = \frac{\Delta p_{tot}}{\eta_{tot}} = \frac{\Delta p_{stat}}{\eta_{stat}} \quad (1)$$

wobei

P_{SFP}	spezifische Ventilatorleistung in $W/(m^3/h)$
P	elektrische Leistungsaufnahme bei Auslegung in W
q_v	Luftvolumenstrom bei Auslegung in m^3/s
Δp_{tot}	Gesamtförderdruck des Ventilators in Pa
η_{tot}	Gesamtwirkungsgrad des Ventilators basierend auf dem Gesamtdruck
Δp_{stat}	statischer Förderdruck des Ventilators in Pa
η_{stat}	Gesamtwirkungsgrad des Ventilators basierend auf dem statischen Druck

Die elektrische Leistungsaufnahme versteht sich als die Wirkleistung, die aus dem Netz bezogen wird. Das heisst: Die Verluste der gesamten Antriebskette, bestehend aus Ventilatorlaufrad, Antriebsmotor, Transmission, eventuell Frequenzumrichter und Steuerung/Regelung sind enthalten.

In der Schweiz wird die SFP oft in der Einheit $W/(m^3/h)$ angegeben. Dann sind die Werte 3600-mal kleiner als die mit Gleichung (1) berechneten. Die Klassifi-

zierung der SFP bei Auslegungsbedingungen ist in Tabelle 4.6 angegeben.

Die [SN EN 16798-3] beschreibt drei Arten, wie die SFP bestimmt werden kann, nämlich für

- einzelne Ventilatoren,
- einzelne RLT-Anlagen,
- ganze Gebäude.

Im Folgenden wird auf die SFP für einzelne RLT-Anlagen eingegangen. In Zukunft könnte die SFP des gesamten Gebäudes wichtiger werden, da damit beispielsweise die ungünstige SFP eines kleinen Abluftventilators durch eine gute SFP einer grossen Anlage kompensiert werden kann.

Die SFP einer RLT-Anlage setzt sich aus drei Teilen zusammen, die sowohl die Zu- und Abluftseite beinhalten:

- Die **innere SFP** $P_{SFP,int}$ ist die spezifische Ventilatorleistung, die zur Überwindung der Druckverluste der Basiskomponenten einer Luftaufbereitung aufgewendet werden muss, also der Filter, der WRG und des Gehäuses. Die Verordnung [EU 1253/2014] stellt Anforderungen an die innere SFP. Diese gesetzliche Anforderung bestimmt im Wesentlichen die Querschnittsfläche eines RLT-Geräts.

- Die **zusätzliche SFP** $P_{SFP,add}$ ist die spezifische Ventilatorleistung, die zur Überwindung der Druckverluste von zusätzlichen Komponenten im RLT-Gerät aufgewendet werden muss. Dabei handelt es sich beispielsweise um Lufterhitzer, Kühler und Befeuchter. Die zusätzliche SFP wird durch Planer insofern bestimmt, als sie den Umfang der zusätzlichen Komponenten festlegen und die Rahmenbedingungen wie beispielsweise heizungsseitige Wassertemperaturen oder die Bauart des Luftbefeuchters vorgeben. Die Herstellerin des RLT-Geräts wirkt aber bei der Auslegung der Komponenten massgebend mit.

- Die **äussere SFP** $P_{SFP,ext}$ bezeichnet die spezifische Ventilatorleistung, die zur Überwindung der Druckverluste ausserhalb des RLT-Geräts erforderlich ist.

Dies entspricht den Druckverlusten der Luftverteilung. Sie wiederum hängt von der Grösse der Anlage, respektive der Länge des Leitungsnetzes und den Apparaten in der Luftverteilung, wie beispielsweise Volumenstromregler und Brandschutzklappen ab. Die äussere SFP wird damit massgebend von der Lüftungsplanerin bestimmt. Bei den bauseitigen Rahmenbedingungen leisten aber auch der Architekt und die Bauherrschaft einen Beitrag.

Als Formel ausgedrückt ist die SFP einer RLT-Anlage also

$$P_{SFP} = P_{SFP,int} + P_{SFP,add} + P_{SFP,ext} \quad (2)$$

wobei

$P_{SFP,int}$ interne spezifische Ventilatorleistung in $W/(m^3/h)$

$P_{SFP,add}$ zusätzliche spezifische Ventilatorleistung in $W/(m^3/h)$

$P_{SFP,ext}$ äussere spezifische Ventilatorleistung in $W/(m^3/h)$

Tabelle 4.6: Klassifizierung der spezifischen Ventilatorleistung nach [SN EN 16798-3].

Kategorie	Spezifische Ventilatorleistung (SFP)	
	P_{SFP}	
	in $W/(m^3/s)$	in $W/(m^3/h)$
SFP 0	≤ 300	$\leq 0,083$
SFP 1	> 300 bis 500	$> 0,083$ bis 0,14
SFP 2	> 500 bis 750	$> 0,14$ bis 0,21
SFP 3	> 750 bis 1250	$> 0,21$ bis 0,35
SFP 4	> 1250 bis 2000	$> 0,35$ bis 0,56
SFP 5	> 2000 bis 3000	$> 0,56$ bis 0,83
SFP 6	> 3000 bis 4500	$> 0,83$ bis 1,25
SFP 7	> 4500	$> 1,25$

Analog der Schreibweise von Gleichung (1), mit der SFP als Verhältnis des Druckverlusts zum Ventilatorwirkungsgrad, ergibt sich:

$$P_{SFP} = \frac{\Delta p_{int,tot} + \Delta p_{add,tot} + \Delta p_{ext,tot}}{\eta_{tot}} \quad (3)$$

$$= \frac{\Delta p_{int,stat} + \Delta p_{add,stat} + \Delta p_{ext,stat}}{\eta_{stat}}$$

wobei

- $\Delta p_{int,tot}$ innerer Gesamtdruckverlust in Pa
- $\Delta p_{add,tot}$ zusätzlicher Gesamtdruckverlust in Pa
- $\Delta p_{ext,tot}$ äusserer Gesamtdruckverlust in Pa
- $\Delta p_{int,stat}$ innerer statischer Druckverlust in Pa

- $\Delta p_{add,stat}$ zusätzlicher statischer Druckverlust in Pa
- $\Delta p_{ext,stat}$ äusserer statischer Druckverlust in Pa
- η_{tot} Gesamtwirkungsgrad des Ventilators
- η_{stat} statischer Wirkungsgrad des Ventilators

Bild 4.2 ordnet die Druckverluste der verschiedenen Komponenten den SFP-Arten zu, am Beispiel einer RLT-Anlage mit Erwärmung und Kühlung der Zuluft. Weitere Komponenten finden sich in Tabelle 4.7, wo auch Richtwerte für die Druckverluste aus der [CEN/TR 16798-4] aufgeführt sind. Werte für die WRG finden sich in Tabelle 4.10. Bei energieeffizienten Anlagen sollen die tiefen

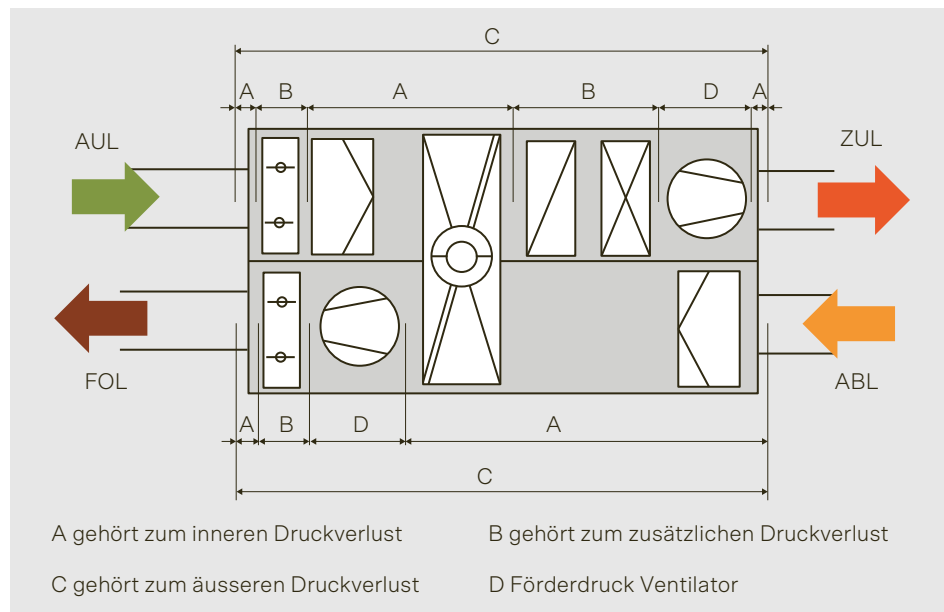


Bild 4.2: Arten von Druckverlusten in Bezug zur SFP (Beispiel).

Tabelle 4.7: Beispiel für Druckverluste von Anlagenteilen und Komponenten.
a: Enddruckdifferenz vor Ersatz
b: Bei RLT-Geräten, die die [EU 1253/2014] erfüllen müssen, kaum mehr möglich
c: ja nach Anordnung innerhalb oder ausserhalb des RLT-Geräts

Anlagenteil, Komponente	Zuordnung bezüglich SFP	Druckverlust in Pa		
		tief	mittel	hoch
Filter ISO ePM10 50% bis ePM1 50% ^a	intern	100	150	(250) ^b
Lufterwärmer	zusätzlich	40	80	100
Luftkühler	zusätzlich	100	140	200
Luftbefeuchter mit Besprühung oder Zerstäubung	zusätzlich	100	200	300
Schalldämpfer	zusätzlich, äussere ^c	30	50	80
Luftkanäle Aussenluft/Zuluft	äussere	200	300	600
Luftkanäle Abluft/Fortluft	äussere	100	200	300
Volumenstromregler	äussere	30	50	100
Zu- oder Abluftdurchlass	äussere	20	50	70

Druckverluste angestrebt werden. Bei grösseren Anlagen entsprechen aber bei den Luftkanälen die mittleren Druckverluste eher der Praxis. Die Anforderungen der [EU 1253/2014] führen dazu, dass die Luftgeschwindigkeiten in heutigen RLT-Geräten zwischen rund 1,5 und 1,8 m/s liegen.

4.6 Wärmerückgewinnung und Leckagen

Typen von Wärmeübertragern

Bei **Platten-Wärmeübertragern** (PWÜ) wird die Wärme über Trennflächen zwischen Zu- und Abluft ausgetauscht, die aus parallel angeordneten Metall- oder Kunststoffplatten bestehen. PWÜ werden von sehr kleinen (Einzelraumlüftungsgeräte) bis zu mittleren Luftvolumenströmen (ca. 10 000 m³/h) eingesetzt. Bei PWÜ sind die Zu- und Abluftseite getrennt. Eine Abluftübertragung ist im Fall von Leckagen aber möglich.

Bei **Rotoren** strömt die Abluft durch Waben einer sich drehenden Scheibe. Dabei wärmt sich die Speichermasse des Rotors auf. Durch die stetige Drehbewegung gelangt die warme Speichermasse auf die Aussenluftseite, wo sie die Zuluft erwärmt. Der Nachteil von Rotoren ist die Abluftübertragung (siehe auch weiter unten). Durch die sogenannte Spülzone und korrekte Druckverhältnisse lässt sich diese zwar bis unter 1% reduzieren. Trotzdem werden Rotoren nicht in hygienisch heiklen Anwendungen eingesetzt. Rotoren werden von kleinen (Wohnungslüftungsgeräte) bis grossen Luftvolumenströmen eingesetzt.

Bei **Kreislaufverbundsystemen (KVS)** transportiert ein Zwischenkreislauf, meist mit einem Wasser-Glykol-Gemisch, die Wärme von einem Wärmeübertrager in der Abluft an einen zweiten in der Zuluft. Ihr Vorteil ist, dass die Zu- und Abluft-Wärmeübertrager räumlich getrennt werden können. So kann beispielsweise der Zuluftteil im Untergeschoss und der Abluftteil auf dem Dach installiert werden. Dies verhindert die Übertragung von der Abluft auf die Zuluft. Zudem können KVS auch zu Verbänden zusammengeschlossen werden. Ein Nachteil von KVS ist der Bedarf an Hilfsenergie für die Umwälzpumpe im Zwischenkreislauf. KVS werden für grosse Luftvolumenströme ab rund 10 000 m³/h eingesetzt.

Enthalpieübertrager übertragen neben sensibler Wärme auch Feuchte. Dabei findet keine Kondensation statt, sondern ein Transport durch Sorption oder Diffusion. Bei Rotoren sind die Oberflächen hierfür speziell beschichtet. Bei PWÜ werden Membranen verwendet, die nur Wassermoleküle durchlassen, aber keine grossen Moleküle wie flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC). Bei KVS ist keine Feuchteübertragung möglich.

Leistungskenngrössen

Die [EN 308] legt die Prüfverfahren für WRG-Komponenten fest und definiert die folgenden Leistungskenngrössen:

Die Brutto-Temperatureffizienz beschreibt das Verhältnis der Temperaturzunahme auf der Zuluftseite zur Temperaturdifferenz zwischen Abluft und Aussenluft nach der Formel:

$$\eta_{t, gro} = \frac{\theta_{22} - \theta_{21}}{\theta_{11} - \theta_{21}} \quad (4)$$

wobei

- θ_{11} Ablufttemperatureintritt in die WRG in °C
- θ_{21} Zulufttemperatureintritt in die WRG in °C
- θ_{22} Zulufttemperaturaustritt aus der WRG in °C

Der Zulufttemperatureintritt entspricht typischerweise der Aussenluft. Mit der Angabe der Brutto-Temperatureffizienz muss deklariert werden, bei welchen Bedingungen der Wert gilt, respektive wie er gemessen wurde. Massgebend sind die Luftmassenströme und eine eventuelle Kondensation. In der Regel wird die Brutto-Temperatureffizienz bei einem Massenstromverhältnis von 1, also bei gleich grossem Zuluft- und Abluft-Massenstrom, angegeben. Zu beachten ist, dass bei der Charakterisierung einer WRG die Massenströme massgebend sind und nicht die Volumenströme. Wenn von den Volumenströmen ausgegangen wird, muss für die Umrechnung die Dichte der Luft bekannt sein. Die Brutto-Temperatureffizienz wird teilweise auch als Rückwärmzahl bezeichnet oder gemäss der alten EN 308 von 1997 als Temperaturänderungsgrad.

Die Feuchteübertragung ist analog zur Übertragung von sensibler Wärme definiert. Die Brutto-Feuchteeffizienz berechnet sich mit:

$$\eta_{x, gro} = \frac{x_{22} - x_{21}}{x_{11} - x_{21}} \quad (5)$$

wobei

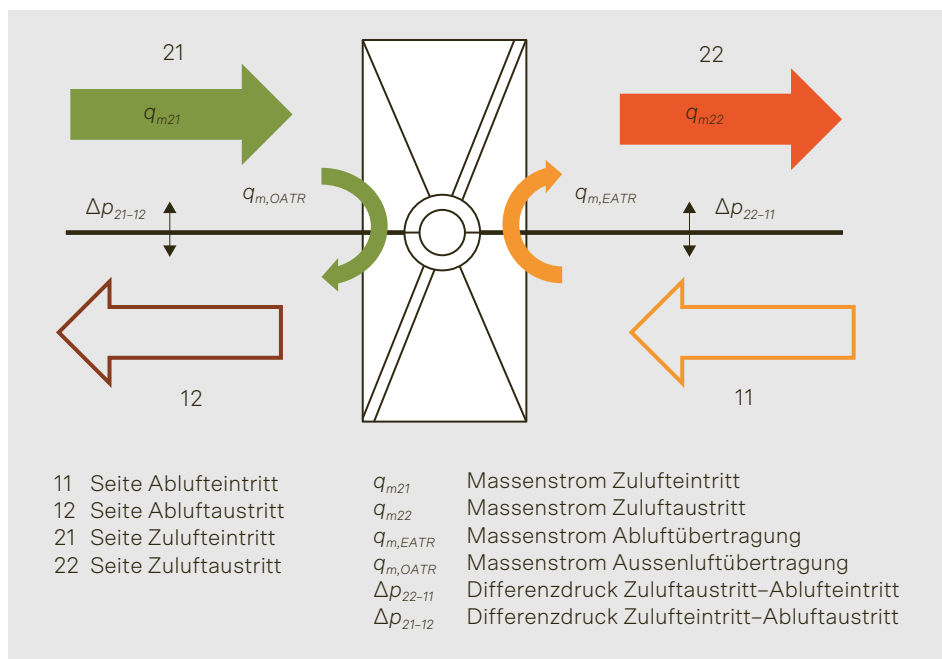


Bild 4.3: Luftströme und Leckagen bei einer WRG, am Beispiel eines Rotors.

- x_{11} absolute Luftfeuchte beim Ablufteintritt in die WRG in g/kg
- x_{21} absolute Luftfeuchte beim Zuluft-eintritt in die WRG in g/kg
- x_{22} absolute Luftfeuchte Zuluft-austritt aus der WRG in g/kg

In einer WRG, speziell bei Rotoren, kann Luft von einer Seite auf die andere übertragen werden. In Bild 4.3 sind die Hauptluftpfade und die Luftübertragungen dargestellt.

Die Abluftübertragung ist hygienisch unerwünscht. Sie kann durch falsche Druckverhältnisse zustande kommen. Dies hängt im Wesentlichen mit der Ventilatoranordnung zusammen. Die in Bild 4.2 dargestellte Anordnung ist in den meisten Fällen gut. Bei Rotoren kann ein Teil der Abluftübertragung vom Luftvolumen des Rotors stammen. Dies wird als sogenannte Mitrotation bezeichnet. Die Mitrotation kann durch eine Spülzone kompensiert werden. Dies hat aber eine Aussenluftübertragung zur Folge. Sowohl die Abluftübertragung als auch die Aussenluftübertragung sind energetisch nachteilig. Der Grund liegt vor allem darin, dass mehr Luft gefördert werden muss, um die gleiche Raumluftqualität zu erreichen wie bei einer WRG ohne Luftübertragung.

Um die Abluftübertragung respektive die Aussenluftübertragung in dimensionslosen Kennzahlen zu beschreiben, werden die beiden Abkürzungen EATR und OACF verwendet. EATR steht für Exhaust Air Transfer Ratio (Abluftübertragungsrate) und OACF für Outdoor Air Correction Factor (Aussenluftkorrekturfaktor).

Bei der Prüfung von WRG-Komponenten wird das EATR mit einer Spurengas-

messung bestimmt und wie folgt berechnet:

$$EATR = \frac{C_{22} - C_{21}}{C_{11} - C_{21}} \quad (6)$$

wobei

- C_{11} Spurengaskonzentration beim Ablufteintritt in die WRG
- C_{21} Spurengaskonzentration beim Zuluft-eintritt in die WRG
- C_{22} Spurengaskonzentration beim Zuluft-austritt aus der WRG

Damit entspricht das EATR auch dem Verhältnis des Massenstroms der Abluftübertragung $q_{m,EATR}$ zum Zuluftmassenstrom $q_{m,21}$ (s. Bild 4.3).

Der OACF ist definiert mit:

$$OACF = \frac{q_{m21}}{q_{m22}} \quad (7)$$

wobei

- q_{m21} Massenstrom Zuluft-eintritt
- q_{m22} Massenstrom Zuluft-austritt

EATR und OACF sind voneinander abhängig und müssen daher immer zusammen und bei den gleichen Bedingungen, insbesondere bei Druckdifferenz Δp_{22-11} und Massenstrom angegeben werden. Bei Rotoren sind zudem die Drehzahl und die Spülzone entscheidend.

Nach der Empfehlung [Eurovent 6/15] liegen das EATR und der OACF von Rotoren und der üblichen Ventilatoranordnung gemäss Bild 4.2 im Bereich, der in Tabelle 4.8 aufgeführt ist. Daraus lässt sich schliessen, dass bei Rotoren die Druckverhältnisse im RLT-Gerät so geplant werden müssen, dass im ganzen Betriebsbereich der Anlage die Differenzdrücke Δp_{22-11} und Δp_{21-12} positiv sind. In der Regel reicht es, wenn Δp_{22-11} zwischen 10 und 20 Pa liegt. Mit optimal

Differenzdruck		Typischer OACF	Typisches EATR		empfohlen
Δp_{22-11}	Δp_{21-12}		ohne Spülzone	mit Spülzone	
> 0	> 0	> 1	< 3%	< 1%	ja
< 0	> 0	1...1,15	< 7%	< 3-5%	nein
< 0	< 0	0,8...0,95	5...20%	5...20%	nein

Tabelle 4.8: Typische OACF und EATR von Rotoren für die Ventilatoranordnung gemäss Bild 4.2 entsprechend [Eurovent 6/15].

ausgelegten Spülzonen lässt sich ein EATR unter 0,3% erreichen. Die [Eurovent 6/15] gibt an, dass der Zu- und Abluftvolumenstrom um das EATR erhöht werden müssen, wenn das EATR grösser als 0,01 respektive 1% ist:

$$q_{v,SUP,corr} = q_{v,SUP} \cdot (1 + EATR) \quad (8)$$

$$q_{v,ETA,corr} = q_{v,ETA} \cdot (1 + EATR) \quad (9)$$

wobei

$q_{v,SUP,corr}$ korrigierter Zuluftvolumenstrom

$q_{v,SUP}$ geplanter Zuluftvolumenstrom mit EATR = 0

$q_{v,ETA,corr}$ korrigierter Abluftvolumenstrom

$q_{v,ETA}$ geplanter Zuluftvolumenstrom mit EATR = 0

Ein EATR über 1% kann auch bei RLT-Geräten mit PWT oder gar mit KVS durch interne Leckagen jeglicher Art vorkommen. Der Aussen- und Fortluftvolumenstrom werden dann wie folgt korrigiert:

$$q_{v,ODA,corr} = q_{v,SUP,corr} \cdot OACF \quad (10)$$

$$q_{v,EHA,corr} = q_{v,ETA,corr} + q_{v,SUP,corr} \cdot (OACF - 1) \quad (11)$$

wobei

$q_{v,ODA,corr}$ korrigierter Aussenluftvolumenstrom

$q_{v,ODA}$ geplanter Aussenluftvolumenstrom mit OACF = 1

$q_{v,ETA,corr}$ korrigierter Fortluftvolumenstrom

$q_{v,EHA}$ geplanter Fortluftvolumenstrom mit OACF = 1

Das heisst: Die Anlageteile (beispielsweise das Kanalnetz) und Komponenten (beispielsweise Ventilatoren) müssen auf die Luftvolumenströme gemäss den Formeln 8 bis 10 ausgelegt werden. Für eine genaue Bemessung der Luftvolumenströme ist ein Iterationsprozess erforderlich, da eine Veränderung der Luftvolumenströme zu veränderten Druckverhältnissen und damit auch ver-

änderten EATR und OACF führt. In [Eurovent 6/15] finden sich dazu Berechnungsbeispiele.

Das EATR beeinflusst durch Abluftbeimischung die Zulufttemperatur sowie die Zuluftfeuchte und täuscht damit eine zu hohe Effizienz der WRG vor. Daher wird gemäss [EN 308] die Nettoeffizienz berechnet, die diesen Einfluss korrigiert. Die Netto-Temperatureffizienz ist:

$$\eta_{t,net} = \frac{\eta_{t,gro} - EATR}{1 - EATR} \quad (12)$$

wobei

$\eta_{t,gro}$ Brutto-Temperatureffizienz gemäss Formel (4)

EATR EATR gemäss Formel (6)

Die Netto-Feuchteffizienz wird analog berechnet.

Wärmeflüsse durch das Gerätegehäuse können die Energiebilanz der WRG ebenfalls verfälschen. [EN 308] gibt daher einen Malus für die Temperatur- und Feuchteffizienz vor, wenn bei einer Prüfung das Energiegleichgewicht zwischen der Zu- und Abluftseite eine bestimmte Toleranz überschreitet. Die im Prüfbericht ausgewiesene Temperatureffizienz ist dann:

$$\eta_{t,efy} = \eta_{t,net} - k_{hb} \quad (13)$$

wobei

$\eta_{t,net}$ Brutto-Temperatureffizienz gemäss Formel (12)

k_{hb} Malus für eine schlechte Energiebilanz des RLT-Geräts

Der Malus k_{hb} beträgt 0,01 für jeden zusätzlichen Prozentpunkt, um den das Energiegleichgewicht die zulässige Toleranz überschreitet. Bei einer Messung einer WRG ohne Feuchterückgewinnung nach Präzisionsklasse P1 beträgt die Toleranz beispielsweise 4%. Für qualitativ hochwertige Geräte mit dichten und gut wärme gedämmten Gehäusen kommt der Malus aber kaum zu tragen.

Hinweis: Für die korrekte Beurteilung der WRG und Auslegung der Luftvolumenströme müssen EATR, OACF und die korrigierte Temperatureffizienz $\eta_{t,efy}$ bekannt sein. Massgebend sind dabei die Werte bei der realen Einbausituation im RLT-Gerät.

Die [EU 1253/2014] verlangt, dass RLT-Geräte mit Zu- und Abluftventilator eine WRG haben müssen. Dabei wird bei Rotoren und PWÜ eine minimale Brutto-Temperatureffizienz von 0,73 gefordert, bei KVS muss sie mindesten 0,68 erreichen. Leider stellt die [EU 1253/2014] keine Anforderungen an EATR, OACF sowie Dichtheit und Wärmedämmung der Gerätegehäuse. Es wird empfohlen, nur Geräte einzusetzen, die bei Auslegebedingungen einen ETAR von maximal 0,03 respektive 3% ausweisen. Die [SIA 382/1] verlangt bei Innenaufstellung mindestens 50 mm Wärmedämmung und bei Aussenaufstellung mindestens 80 mm.

Die Anforderungen und in der Regel auch die von den Herstellern angegebene Temperatur- und Feuchteeffizienz gehen davon aus, dass Zu- und Abluftmassenstrom gleich gross sind. Zum Umrechnen von gleichen auf ungleiche Massenströme oder umgekehrt kann Herstellersoftware genutzt werden. Alternativ kann mit den Näherungsformeln aus [Wohnungslüftung], Kapitel 9.3, abgeschätzt werden.

In Tabelle 4.9 sind Richtwerte von WRG-Komponenten zusammengestellt.

- Dabei wird vorausgesetzt, dass
- die Anforderungen der [EU 1253/2014] eingehalten sind,
 - das Massenstromverhältnis von Zu- und Abluft 1 ist und
 - keine Kondensation auftritt.

Beim Kreislaufverbundsystem gilt es zu beachten, dass der Flüssigkeitsstrom im Zwischenkreislauf mit dem Luftvolumenstrom abgeglichen sein muss. Sowohl ein zu tiefer als auch ein zu hoher Flüssigkeitsstrom reduziert den Nutzen der WRG. Ohne Berücksichtigung der Pumpenenergie ist das Optimum:

$$q_{v,a} \cdot \rho_a \cdot c_{p,a} = q_{v,f} \cdot \rho_f \cdot c_{p,f} \quad (14)$$

wobei

- $q_{v,a}$ Luftvolumenstrom in m³/h
- $q_{v,f}$ Flüssigkeitsvolumenstrom im Zwischenkreislauf in m³/h
- ρ_a Dichte der Luft in kg/m³
- ρ_f Dichte der der Flüssigkeit in kg/m³
- $c_{p,a}$ spezifische Wärmekapazität der Luft in kJ/(kg·K)
- $c_{p,f}$ spezifische Wärmekapazität der Flüssigkeit in kJ/(kg·K)

Beispielsweise ist bei einem Wasser-Glykol-Gemisch mit 30% Ethylenglykol der Flüssigkeitsvolumenstrom rund 3350-mal kleiner als der Luftvolumenstrom (400 m ü. M., 20 °C).

Kennwert	Symbol	Einheit	Platten-Wärmeüber-trager (PWÜ)	Rotor	Kreislaufverbundsystem (KVS)
Netto-Temperatureffizienz	$\eta_{t,net}$	–	0,73 ... 0,85	0,72 ... 0,85	0,68 ... 0,75
Netto-Feuchteffizienz	$\eta_{x,net}$	–	0,55 ... 0,65	0,70 ... 0,85	–
Druckverlust ^a	Δp	Pa	70 ... 150	70 ... 150	100 ... 200
Verhältnis elektr. Leistung Hilfsantrieb zum Luftvolumenstrom ^b	P_{aux}/q_v	W/(m ³ /h)	0	0,01 ... 0,02	0,05 ... 0,15
Aussenluftkorrekturfaktor ^c	OACF	–	1	1,0 ... 1,1	1
Abluftübertragungsverhältnis ^c	EATR	%	0 ... 1	Spülzone ohne 2 ... 5 mit 0,3 ... 1	0

Tabelle 4.9: Richtwerte für Kenndaten von WRG-Komponenten.
a: Druckverlust pro Luftstrom
b: Bei Rotoren ist es der Rotorantrieb, bei KVS die Pumpe.
c: Bei Rotoren gelten die Werte für eine korrekte Ventilatoranordnung gemäss Bild 4.2.

Wenn die Pumpenleistung berücksichtigt wird und die elektrische Energie für die Pumpen um den Faktor 2 wertvoller gewichtet wird als die zurückgewonnene Wärmeenergie, dann liegt der optimale Flüssigkeitsvolumenstrom rund 2 bis 5% tiefer. Der exakte Wert hängt von den Lufttemperaturen und vom Verhältnis der elektrischen Aufnahmeleistung der Pumpe zum Luftvolumenstrom ab. Der Flüssigkeitsvolumenstrom muss immer dem Luftvolumenstrom angepasst werden. Das heisst, dass die Pumpendrehzahl stufenlos gesteuert werden muss.

Bei tiefen Aussenlufttemperaturen besteht auf der Fortluftseite der WRG das Risiko, dass sich Eis und Frost bildet. Durch geeignete Vorkehrungen muss verhindert werden, dass dies zu Betriebsstörungen führt. In [Wohnungslüftung], Kapitel 9.5, findet sich eine Übersicht und Bewertung von möglichen **Vereisungsschutzmassnahmen** für kleine RLT-Geräte.

Bei mittleren und grösseren Anlagen mit PWÜ ist ein Bypass über der WRG verbreitet. Dies ist gleichzeitig die gängige

Massnahme, um die WRG im Sommer zu deaktivieren. Bei Rotoren kann der Vereisungsschutz in der Regel über eine Änderung der Rotordrehzahl erreicht werden. Beim KVS wird der Vereisungsschutz durch einen geregelten Bypass über dem Abluft-Wärmeübertrager im Flüssigkeitskreislauf sichergestellt.

Beispiel: Einfluss der Ventilatoranordnung in RLT-Geräten

Es werden zwei unterschiedliche RLT-Geräte verglichen, die beide mit dem gleichen Rotor ohne Feuchterückgewinnung und ohne Spülzone ausgerüstet sind. Es wird angenommen, dass beide Geräte nach [EN 308], Präzisionsklasse P1, geprüft wurden.

Die relevanten Werte sind in Tabelle 4.10 zusammengefasst. Dort zeigt Spalte «Gerät A» die Daten für ein RLT-Gerät mit optimaler Ventilatoranordnung sowie mit einem gut wärmegeprägten und dichten Gehäuse. Die Spalte «Gerät B» zeigt Daten für ein Gerät mit ungünstiger Ventilatoranordnung, sowie einem eher undichten und ungenügend wärmegeprägten Gehäuse.

Beschreibung	Symbol	Einheit	Gerät A	Gerät B
Ventilatoranordnung			Beidseitig nach WRG	Abluftseite vor WRG Zuluftseite nach WRG
Differenzdruck warme Seite	Δ_{p22-11}	Pa	60	-340
Differenzdruck Aussenseite	Δ_{p21-12}	Pa	240	-140
Aussenluftkorrekturfaktor	OACF	-	1,04	0,85
Abluftübertragungsverhältnis	EATR	-	0,020	0,200
Brutto-Temperatureffizienz	$\eta_{t,gro}$	-	0,750	0,800
Netto-Temperatureffizienz	$\eta_{t,net}$	-	0,745	0,750
Gemessenes Energieungleichgewicht	$\Delta\varphi$	%	3,0	8,0
Toleranz Energieungleichgewicht	$\Delta\varphi_{lim}$	%	4,0	4,0
Malus für schlechte Energiebilanz	k_{hb}	-	0,000	0,040
Temperatureffizienz	$\eta_{t,efy}$	-	0,745	0,710
Geplanter Zu- und Abluftvolumenstrom	$q_{v,SUP}$ $q_{v,ETA}$	m ³ /h	2000	2000
Korrigierter Zu- und Abluftvolumenstrom	$q_{v,SUP,corr}$ $q_{v,ETA,corr}$	m ³ /h	2040	2400
Korrigierter Aussen- und Fortluftvolumenstrom	$q_{v,ODA,corr}$ $q_{v,EHA,corr}$	m ³ /h	2122	2040

Tabelle 4.10: Beispiel Temperatureffizienz und Luftvolumenströme von zwei RLT-Geräten.

ist der am häufigsten anzutreffende Lüftungsanlagentyp.

Betriebsstufen: Je nach Nutzung kann dieser Anlagentyp ein- oder mehrstufig oder mit stufenlos geregeltem Luftvolumenstrom betrieben werden.

Sollwertregelung: Als Steuer- und Regelparameter können Betriebszeiten, Anwesenheit (Bewegungsmelder etc.), Raumluftqualität (CO₂, VOC) bis hin zur Feuchteüberwachung gewählt werden. Die AUL wird gefiltert, durch die WRG erwärmt und durch den ZUL-Ventilator gefördert. Je nach Anforderung kann die Luft noch nacherwärmt werden. Die Abluft wird gefiltert, die WRG überträgt die Wärme an die Zuluft und der Ventilator fördert die Fortluft ins Freie.

Bild 4.4 zeigt ein Beispiel einer bidirektionalen Lüftungsanlage mit einer WRG via PWÜ. Die ZUL-Temperatur wird so weit wie möglich über die Bypassklappe

der WRG geregelt. Wenn diese ausgeglichen ist, kommt der Lufterwärmer zum Einsatz. Dabei wird die ZUL-Temperatur über das Regelventil im Heizungskreislauf geregelt. Im Sommer wird die WRG aktiviert, wenn die AUL-Temperatur über der ABL-Temperatur liegt. Die Regelsequenz ist in Bild 4.5 dargestellt. Anstelle einer reinen ZUL-Temperaturregelung kann auch eine Raumtemperaturregelung eingesetzt werden. Dabei wird der Sollwert der ZUL-Temperatur durch die Raumtemperatur geführt. Die Bypass-Klappe wird auch zum Vereisungsschutz der WRG eingesetzt.

Hinweise

– Die Raumluftfeuchte kann im Winter durch den Einsatz eines Enthalpieübertragers angehoben werden. Damit lässt sich die Raumluftfeuchte aber nicht garantieren. Ein weiterer Vorteil von En-

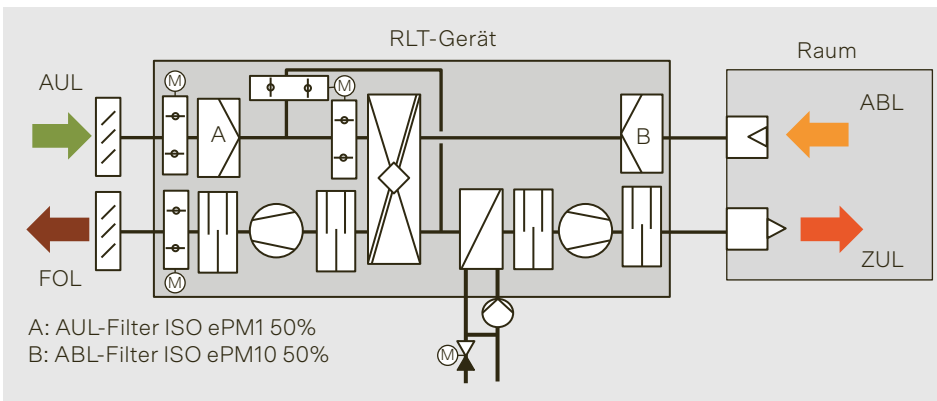


Bild 4.4: Beispiel einer bidirektionalen Lüftungsanlage (Schema ohne Sensoren und Regelkreise).

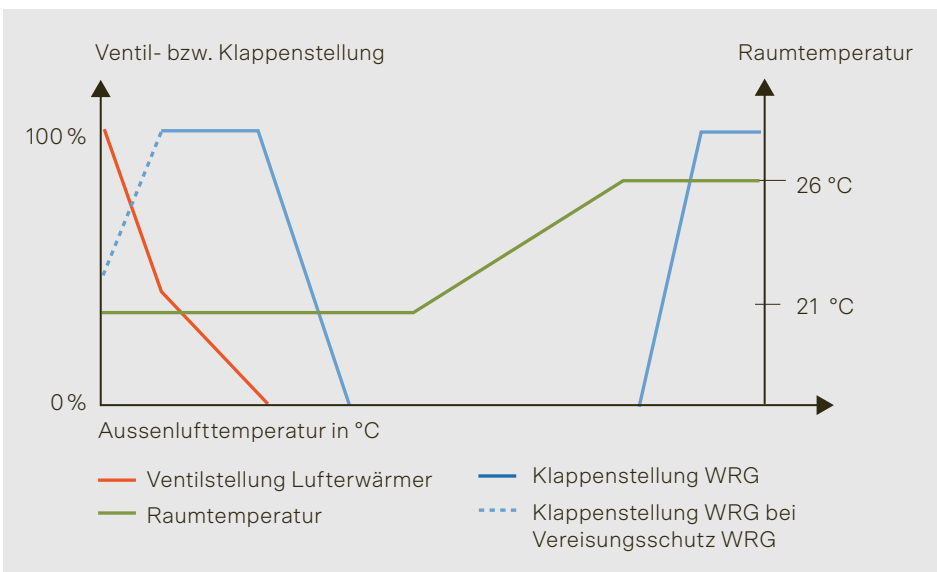


Bild 4.5: Beispiel Regeldiagramm bidirektionale Lüftungsanlage.

thalpieübertragern ist, dass die Vereisungsschutzfunktion erst bei tieferen Aussentemperaturen aktiviert werden muss als bei einer WRG ohne Feuchterückgewinnung.

- Bei einer WRG ohne Feuchterückgewinnung ist ein Kondensatablauf erforderlich.
- Bei Rotoren sind die Druckverhältnisse der WRG zu beachten.
- Im RLT-Gerät müssen Leerteile eingeplant werden, um den Zugang für die Instandhaltung zu gewährleisten.

Vollklimaanlage

Vollklimaanlagen werden nur in Ausnahmefällen eingesetzt, da in Nutzungen wie Büros und Versammlungsräume kaum die ganze Breite ihrer Luftaufbereitungsfunktionen erforderlich ist. Die Ventilatoren werden in der Regel drehzahlreguliert betrieben, entsprechend dem tatsächlichen Bedarf. Die Anlage kann sowohl nach Raumtemperatur, Raumluftfeuchtigkeit, Betriebszeiten,

Anwesenheitskriterien (Bewegungsmelder etc.) respektive der Raumluftqualität (CO_2 , VOC) gesteuert und geregelt werden.

Die AUL wird filtriert und durch die WRG vorkonditioniert. Da bei Vollklimaanlagen eine Be- und Entfeuchtung vorhanden ist, soll wenn immer möglich eine WRG mit Feuchterückgewinnung eingesetzt werden. Im Beispiel von Bild 4.6 ist hierfür ein Rotor vorgesehen.

Die Luftnacherwärmung wird in Sequenz zur WRG zu- oder weggeschaltet. Dies wird über das Regelventil des Lufterwärmers im Heizungskreislauf geregelt. Gemäss [SIA 382/1] wird die Luftbefeuchtung im Winter auf maximal 5 Gramm und die Luftentfeuchtung im Sommer auf 13,5 Gramm Wasser pro Kilogramm Luft dimensioniert. Um eine gezielte Entfeuchtung zu erreichen, soll die Kaltwassertemperatur rund 6°C betragen. Nach der gezielten Entfeuchtung muss die Luft nachgewärmt wer-

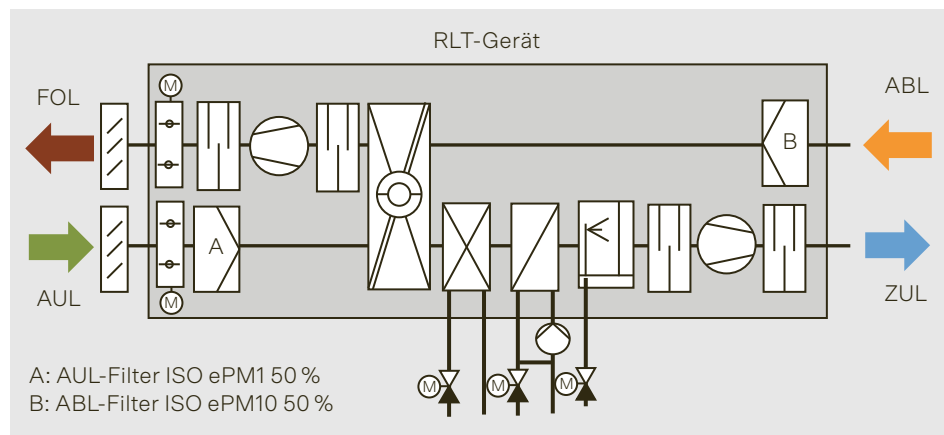
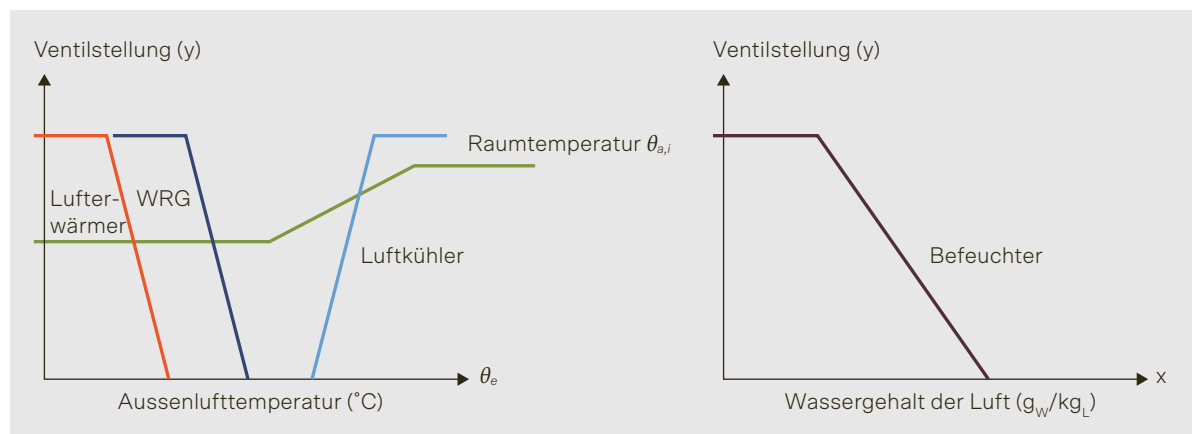


Bild 4.6: Beispiel RLT-Gerät für eine Vollklimaanlage mit Rotor.

Bild 4.7: Beispiel Regeldiagramm einer Vollklimaanlage (WRG-Funktion im Sommer s. Text).



den – oft kann dies mit Abwärme der Kältemaschine realisiert werden. Aus energetischen Gründen wird die Luft adiabatisch befeuchtet. Im Sommer wird die WRG in Betrieb genommen, wenn die Enthalpie der ABL tiefer ist als die Enthalpie der AUL.

Die Regelsequenzen für WRG, Lufterwärmung, Befeuchtung und Entfeuchtung sind in Bild 4.5 dargestellt. Dabei wird angenommen, dass die minimale Auslegungstemperatur so hoch ist, dass der Rotor (mit Feuchteübertragung) nicht im Vereisungsschutzmodus arbeitet.

Hinweise

- Die Abfolge von Luftkühler, Lufterwärmer und Befeuchter im Gerät muss den geforderten Funktionen entsprechen.
- Die Luftbefeuchtung erfordert aufbereitetes Wasser.
- Die Druckverhältnisse über dem Rotor müssen beachtet werden.
- Auswahl der hydraulischen Schaltungen gemäss Tabelle 4.5.
- Leerteile für die Wartung und Reinigung vorsehen.
- Frostschutz prüfen anhand der Meteo-daten; an Lagen mit sehr tiefen Aussen-temperaturen (Alpen) ist eventuell trotz effizienter WRG ein Vorwärmer zwischen Kühler und Erwärmer erforderlich.

4.8 Lüftungssysteme

Einzelraumlüftung

Bei Einzelraumlüftungen werden bidirektionale Lüftungsgeräte ohne Kanalanschluss eingesetzt. Das heisst, die RLT-Geräte werden in den zu belüftenden Räumen platziert. Solche Geräte werden in der [SIA 382/5] auch als Einzelraumlüftungsgeräte bezeichnet.

Ein Vorteil dieser Lösung ist, dass keine Luftkanäle installiert werden müssen. Nachteilig sind der Aufwand für die Instandhaltung (speziell beim Filterwechsel) und der Geräuschpegel, den die Geräte im Raum verursachen. Zudem kann eine Aussenluftfassung an der Fassade bedeuten, dass im Sommer heisse Luft angesogen wird.

Einzelraumlüftungsgeräte werden oft mit Abluftventilatoren in Ablufträumen, insbesondere WCs, kombiniert.

Hinweise zu diesem Mischsystem gibt [Wohnungslüftung] in Kapitel 8. Dort finden sich auch Anforderungen an solche Geräte.

Einzonenanlage

Bei einer Einzonenanlage versorgt ein RLT-Gerät eine einzelne Zone. Eine Zone besteht aus einem oder mehreren Räumen mit gleichen Nutzungsprofilen und Raumkonditionen. Der Luftvolumenstrom wird lediglich über die Ventilator-drehzahl gesteuert respektive geregelt. Die bidirektionale Lüftungsanlage in Bild 4.5 zeigt ein Beispiel einer Einzonenanlage.

Mehrzonenanlage

Bei Mehrzonenanlagen versorgt ein RLT-Gerät mehrere Zonen mit unterschiedlichen Nutzungsprofilen und/oder Raumkonditionen. Je nach Art der Anlage können der Luftvolumenstrom und/oder die Zuluftkonditionen pro Zone geregelt oder gesteuert werden. Bei Klimaanlage kommen zudem Nachwärmer und/oder Nachkühler für jede Zone infrage. Da für Raumheizung und -kühlung heute vorwiegend statische Elemente verwendet werden, wird

hier nur auf die Steuerung respektive Regelung der Luftvolumenströme eingegangen.

Bild 4.8 zeigt beispielhaft eine Mehrzonenanlage mit variablem Volumenstrom (VVS). Solche Anlagen werden oft auch als VAV-Anlage bezeichnet, was als Abkürzung für die englische Bezeichnung «Variable Air Volume» steht.

Der Zu- und Abluftvolumenstrom eines Raumes wird typischerweise nach der Raumluftqualität geregelt. Bei Klimaanlage kommt auch eine Regelung nach der Raumtemperatur oder eine kombinierte Regelung infrage. Die Drehzahl des Zu- und Abluftventilators soll dabei dem Bedarf angepasst werden. In Bild 4.8 sind drei Varianten der Ventilatorregelung eingetragen:

- A) Konstanter Förderdruck des Ventilators
- B) Konstanter Druck bei der ersten Verzweigung und letzten Vereinigung
- C) Minimaldruckregelung anhand der Stellung der VVS-Regler

Bei Variante A messen die Drucksensoren die Differenz zwischen den Druck- und Saugstutzen der Ventilatoren. Dies

ist die Variante mit dem höchsten Energieverbrauch für die Luftförderung.

Bei Variante B werden die Drucksensoren vom RLT-Gerät aus gesehen bei der ersten Verzweigung im Zuluftnetz und der letzten Vereinigung im Abluftnetz vor dem RLT-Gerät platziert. Die Drucksensoren messen den Über- respektive Unterdruck an diesen Stellen gegenüber der Umgebung. Damit wird berücksichtigt, dass die Druckverluste vom Aussenlufteintritt bis zur ersten Verzweigung und von der letzten Vereinigung bis zum Fortluftaustritt mit sinkendem Luftvolumenstrom abnehmen.

Bei Variante C melden die VVS-Regler der einzelnen Zonen ihre Stellung (Öffnung 0 bis 100 %) an eine übergeordnete Regelung. Diese passt nun die Ventilator Drehzahl und damit den Förderdruck so an, dass der ungünstigste VVS-Regler rund 90 % geöffnet ist. Damit besteht noch eine gewisse Regelreserve.

Bei Gebäuden mit vielen gleichartigen Räumen kann auch der Mittelwert von den 3 bis 5 VVS-Reglern mit der grössten Öffnung verwendet werden. Damit besteht ein Risiko, dass in einzelnen

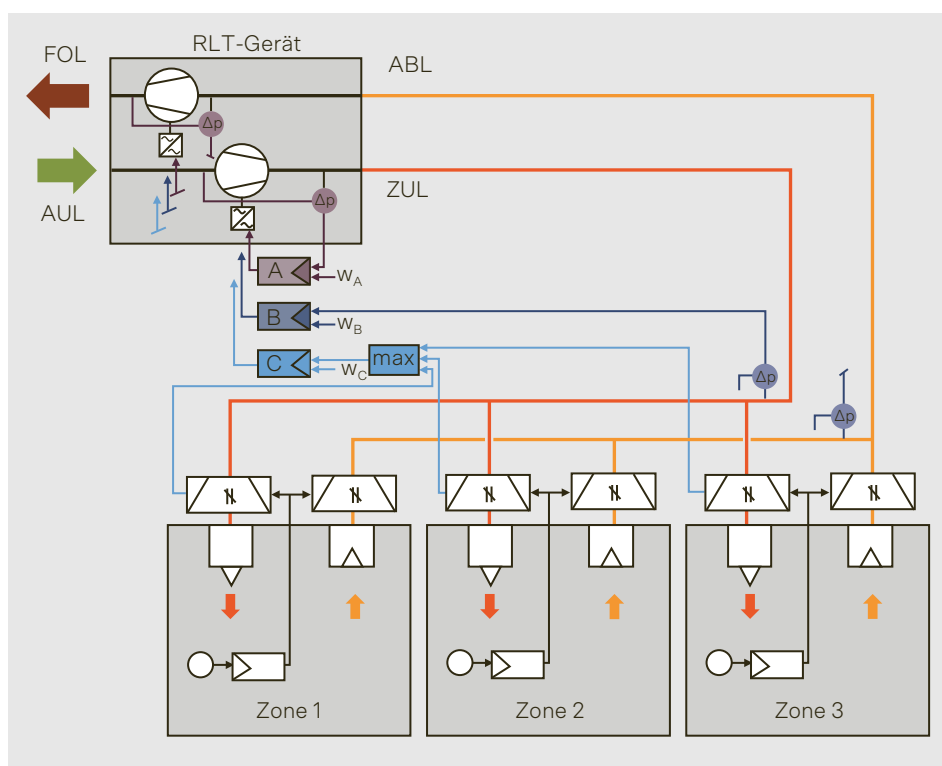


Bild 4.8: Varianten (A, B und C) für die Ventilatorregelung für Mehrzonenanlagen.

Räumen die angestrebte Raumluftqualität zeitweise nicht erreicht wird. Für Nutzungen wie Büros kann dies aber zugunsten einer besseren Energieeffizienz in Kauf genommen werden. Variante C

braucht am wenigsten Energie für die Luftförderung.

Beispiel: Förderdrücke und Ventilatorleistung bei bidirektionalen Lüftungsanlagen

Der Zuluftventilator einer bidirektionalen Lüftungsanlage fördert bei Auslegung 2000 m³/h Luftvolumenstrom bei 500 Pa Förderdruck. Der Druckverlust von der Aussenluftfassung bis zur ersten Verzweigung beträgt 320 Pa. Wie verhalten sich die Förderdrücke und die erforderliche Ventilatorleistung zu den Luftvolumenströmen bei den verschiedenen Varianten von Mehrzonenanlagen?

In Bild 4.9 sind von den drei Varianten A, B und C für Mehrzonenanlagen die erforderlichen Ventilatorförderdrücke in Funktion des Luftvolumenstroms dargestellt und in Bild 4.10 die elektrische Aufnahmeleistung des Ventilators. Bei Variante C hängen beide Funktionen davon ab, wie unterschiedlich die Luftvolumenströme der einzelnen Zonen sind.

Wenn sich der Luftvolumenstrom bei allen VVS-Reglern synchron verän-

derte, entspricht der erforderliche Förderdruck der Anlagenkennlinie. Wenn der ungünstigste VVS-Regler dauernd offen wäre, ergäbe sich die gleiche Kennlinie wie für die Variante B. Für das Beispiel wird angenommen, dass der effektive Verlauf dazwischen liegt, aber durch die minimale Ventilator-drehzahl nach unten begrenzt ist.

Wenn angenommen wird, dass der mittlere Luftvolumenstrom bei 70% des Auslegungswertes liegt, spart Variante B gegenüber Variante A 33% und Variante C gegenüber Variante A sogar 42% Ventilatorenergie ein.

In diesem Beispiel mit einer eher kleinen Anlage ist der Nutzen von Variante C gegenüber B nicht sehr gross. Je grösser die Anlage und je höher die Druckverluste der Luftverteilung gegenüber den Druckverlusten im RLT-Gerät sind, desto interessanter ist aber Variante C.

Druck in Pa

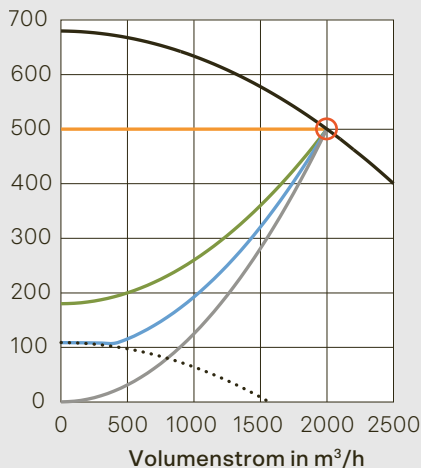


Bild 4.9: Beispiel für den erforderlichen Förderdruck der Varianten A, B und C

El. Aufnahmeleistung Ventilator in kW

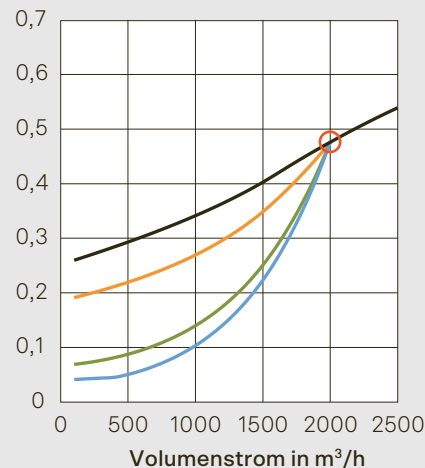


Bild 4.10: Beispiel für die elektrische Aufnahmeleistung des Zuluftventilators für die Varianten A, B und C

Legende

- Variante A
- Variante B
- Variante C
- Ventilator-kennlinie Auslegung
- Ventilator-kennlinie min. Drehzahl
- Anlagenkennlinie

4.9 Quellen

- [EN 308] Europäische Norm EN 308. Wärmeaustauscher – Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungskriterien von Luft/Luft-Wärmerückgewinnungskomponenten. Brüssel, 2021.
- [EN-105] Konferenz Kantonaler Energiefachstellen (EnFK). Vollzugshilfe EN-105 Lüftungstechnische Anlagen, Ausgabe Dezember 2018. Download via www.endk.ch → Fachleute → Vollzugshilfen
- [EnEV] Schweizerische Verordnung über die Anforderungen an die Energieeffizienz serienmässig hergestellter Anlagen, Fahrzeuge und Geräte (Energieeffizienzverordnung, EnEV) Bern, 2017.
- [EU 1253/2014] Europäische Kommission. EU-Verordnung Nr. 1253/2014.4 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen. Brüssel, 2014.
- [Eurovent 6/15] Empfehlung Eurovent 6/15. Luftleckagen in Lüftungsanlagen: Richtlinien zur Verbesserung der Raumluftqualität und zur Korrektur der Leistung. Brüssel, 2021.
- [Handbuch Klimatechnik] Hörner, Berndt; Schmidt, Manfred; Casties, Manfred (Hrsg.): Handbuch der Klimatechnik, Set bestehend aus Band 1: Grundlagen, Band 2: Anwendungen, Band 3: Aufgaben und Übungen. VDE Verlag Berlin/Offenbach, 2018.
- [ISO 16890-1] Norm ISO 16890-1. Luftfilter für die allgemeine Raumlufttechnik – Teil 1: Technische Bestimmungen, Anforderungen und Effizienzklassifizierungssystem basierend auf Feinstaub. International Organisation für Standardization. Genf, 2016.
- [Merkblatt 24] Topmotors. Merkblatt 24. Luftförderung. Download. Bern, 2021. Via www.topmotors.ch → Wissen → Merkblätter. Abgerufen Mai 2022.
- [SIA 180] Norm SIA 180. Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverband (SIA). Zürich, 2014.
- [SIA 2024] Merkblatt SIA 2024. Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2021.
- [SIA 382/1] Norm SIA 382/1. Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverband (SIA). Zürich, 2014.
- [SIA 382/5] Norm SIA 382/5. Mechanische Lüftung in Wohngebäuden. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverband (SIA). Zürich, 2021.

- [SN CEN/TR 16798-4] Schweizer Norm SN CEN/TR 16798-4. Energieeffizienz von Gebäuden – Teil 4: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Anforderungen an die Leistung von Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlssystemen – Technischer Bericht – Interpretation der Anforderungen der EN 16798-3. Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV). Winterthur, 2017.
- [SN EN 12792] Schweizer Norm SN EN 12792. Lüftung von Gebäuden – Symbole, Terminologie und graphische Symbole. Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV). Winterthur, 2003.
- [SN EN 16798-1] Schweizer Norm SN EN 16798-1. Energetische Bewertung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Module M1-6. Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV). Winterthur, 2019.
- [SN EN 16798-3] Schweizer Norm SN EN 16798-3. Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühl-systeme (Module M5-1, M5-4). Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV). Winterthur, 2017.
- [SN EN 16798-3] Schweizer Norm SN EN 16798-3. Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühl-systeme (Module M5-1, M5-4). Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV). Winterthur, 2017.
- [SWKI VA 104-01] Richtlinie SWKI VA 104-01. Raumlufttechnik – Luftqualität – Teil 1 Hygieneanforderungen an raumlufttechnische Anlagen und Geräte. Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieure (Die Planer, SWKI). Urtenen-Schönbühl, 2019.
- [VKF 25-15] Brandschutzrichtlinie VKF 25-15. Lufttechnische Anlagen. Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF). Bern, 2015.
- [Wohnungslüftung] Huber, Heinrich: Wohnungslüftung – Planung, Ausführung, Betrieb. Faktor Verlag. Zürich, 2021.

Warmwasserversorgung

Reto von Euw 5.1 Aufbau und Komponenten

Arten der Warmwasserversorgung

Eine Warmwasserversorgung umfasst die Wassererwärmungsanlage und das Warmwasserverteilsystem. Das Verteilsystem kann warmgehaltene Leitungen (beispielsweise Zirkulationskreis), nicht warmgehaltene Leitungen sowie die Entnahmestellen beinhalten.

Einzelversorgung

Eine Einzelversorgung versorgt eine einzelne Warmwasserentnahmestelle von einer Wassererwärmungsanlage aus. Dabei handelt es sich um Warmwasserentnahmestellen mit geringem Warmwasserbedarf wie Wasch- und Spültische in Industrie- und in Gewerbebauten. Diese können mit Kleinspeicherwassererwärmern (bis ca. 30 l Inhalt) oder Durchflusswassererwärmern versorgt werden. Da in solchen Grossbauten die Warmwasserentnahmestellen vereinzelt im ganzen Bau verteilt sein können, fallen mit Einzelversorgungen die Wärmeverluste durch lange Rohrleitungswege weg.

Gruppenversorgung

Die Gruppenversorgung, auch dezentrale Wassererwärmung im Stockwerk genannt, beliefert eine Warmwasserentnahmegruppe mit zwei oder mehr Entnahmestellen von einer Wassererwärmungsanlage aus. Da die Wassererwärmung (WE) und die Entnahmestellen nahe beieinander liegen, kann auf einen Warmwasser-Zirkulationskreis respektive auf ein Warmhalteband verzichtet werden, sofern die Ausstosszeiten gemäss [SIA 385/1] eingehalten werden. In Wohnbauten lässt die [MuKEn] eine Gruppenversorgung mit einer direkt-elektrischen Erwärmung nur noch in Ausnahmefällen zu. Sie ist nur noch erlaubt, wenn während der Heizperiode das Warmwasser mit dem Wärmeerzeuger für die Raumheizung erwärmt respektive vorgewärmt wird. Auch wenn das Warmwasser primär mittels erneuerbarer Energie oder mit Abwärme bereitet wird, darf eine direkt-elektrische Erwärmung installiert werden.

Zentralversorgung

Die Zentralversorgung versorgt sämtliche Warmwasserentnahmestellen eines Gebäudes oder einer Gebäudegruppe

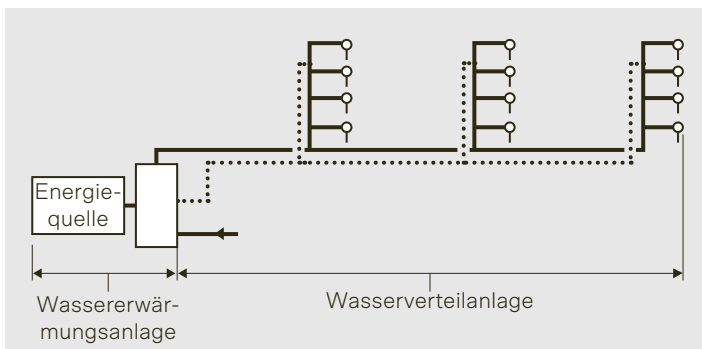


Bild 5.1: Schematische Darstellung einer Warmwasserversorgung.

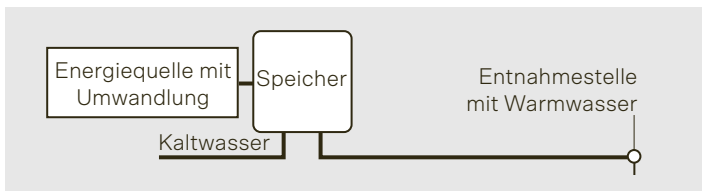


Bild 5.2: Schematische Darstellung einer Warmwasser-Einzelversorgung.

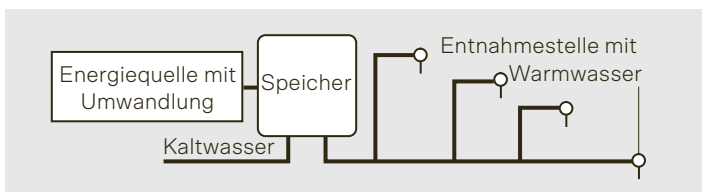


Bild 5.3: Schematische Darstellung einer Warmwasser-Gruppenversorgung.

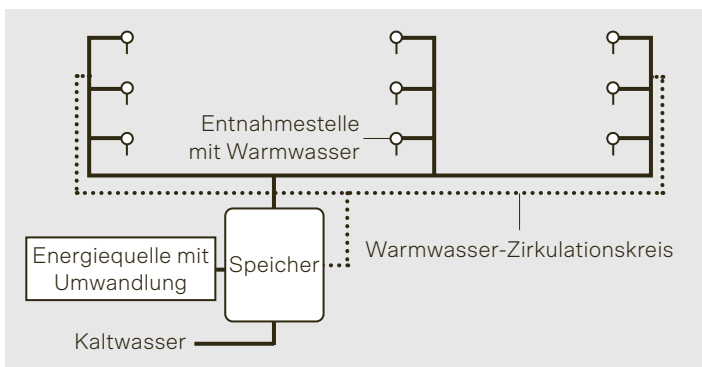


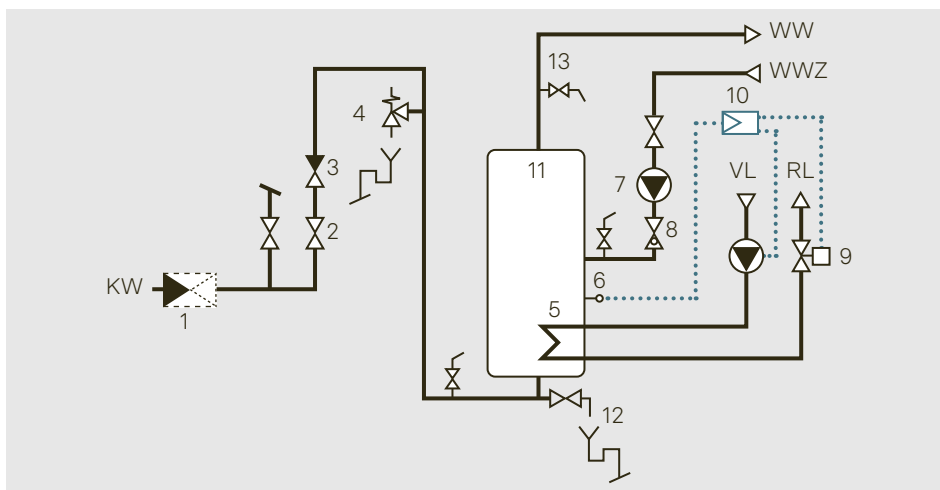
Bild 5.4: Schematische Darstellung einer Warmwasser-Zentralversorgung.

über ein gemeinsames Warmwasserverteilsystem von einer zentralen Wassererwärmungsanlage aus. In Wohnbauten lassen die [MuKE] eine rein direkt-elektrische Erwärmung des Kaltwassers nicht mehr zu. Warmwasser-Zentralversorgungen sollten in die Wärmeerzeugung für die Raumheizung inte-

griert werden, damit diese, mindestens während der Heizperiode, auch das Warmwasser bereitet. Eine Alternative wäre die Nutzung von Solarthermie oder eine Wärmeerzeugung, die den Heizwärmebedarf für das Warmwasser aus mindestens 50% erneuerbarer Energiequellen erbringt.

Komponenten einer Warmwasserversorgung

Bild 5.5: Die wichtigsten Komponenten einer Anlage zur Wassererwärmung.
KW: Kaltwasser
WW: Warmwasser
WWZ: Warmwasserzirkulation
VL: Vorlauf
RL: Rücklauf



- 1 **Druckminderer (oft auch Druckreduzier-ventil DRV)** Wenn der Wasserdruck aus dem Versorgungsnetz zu hoch ist, muss er reduziert werden. Der Druckminderer verringert den Wasserdruck aus dem Versorgungsnetz (Vordruck) auf einen niedrigeren Nachdruck.
- 2 **Absperrventil** Dieses Ventil trennt Netzteile voneinander.
- 3 **Rückflussverhinderer (RV)** Wird kaltes Wasser erwärmt, steigt durch die Volumenzunahme der Druck im Leitungssystem an. Der Rückflussverhinderer verhindert die Druckausbreitung ins ganze Kaltwassernetz.
- 4 **Sicherheitsventil (SV)** Steigt durch die Wassererwärmung der Druck im Leitungssystem über den eingestellten Wert, öffnet das SV und lässt Wasser ab. Sicherheitsventile dürfen auf einen maximal 100 kPa höheren Druck eingestellt werden als der Ruhedruck. Meistens sind sie vom Werk auf einen Druck von 600 kPa eingestellt.
- 5 **Wärmeübertrager (WÜT)** Wärmeübertrager übertragen die Wärme von einem Medium auf ein anderes. Man unterscheidet innenliegende und aussenliegende Wärmeübertrager.
- 6 **Fühler oder Thermostat** Bei Speichern werden entweder (Temperatur-)Fühler oder Thermostaten eingebaut. Der Speicherfühler erfasst nur die Temperatur und gibt sie an den Regler weiter. Der Soll-Wert wird am Regelgerät eingestellt. Bei Speicherthermostaten hingegen werden der Soll-Ein-Wert und der Soll-Aus-Wert (respektive die Hysterese) direkt am Thermostaten eingestellt.

- | | | |
|----|---|--|
| 7 | Warmwasserumwälz-
pumpe (oder
Zirkulationspumpe) | Die Umwälzpumpe fördert das Warmwasser durch den Warmwasser-Zirkulationskreis. Es wird zwischen unregelmäßig und drehzahlgeregelten Umwälzpumpen unterschieden. |
| 8 | Abgleichdrossel | Mit der Abgleichdrosselung kann bei unregelmäßigten Umwälzpumpen auf den effektiven Betriebspunkt auf der Pumpenkennlinie gefahren werden. |
| 9 | Stellorgan | Stellorgane wie Ventile oder Klappen bestehen aus dem Stellantrieb und dem Stellglied. Das Stellorgan stellt aufgrund des Eingangssignals eine Grösse im Stellglied ein. |
| 10 | Regler | Regler bewirken, dass vorgegebene Sollwerte eingehalten werden. |
| 11 | Speicherwasser-
erwärmung (SPWE) | Eine Speicherwassererwärmung (SPWE) ist ein Behälter mit eingebauten Heizflächen. Darin wird das Trinkwarmwasser erwärmt und gespeichert. Die Erwärmung erfolgt mit einem innenliegenden Wärmeübertrager in Stufen; man spricht von einer Stufenladung. Die Einsatzgebiete von SPWE werden in den folgenden Kapiteln erläutert. |
| | Warmwasserspeicher
(WWSP) | Ein Warmwasserspeicher (WWSP) ist ein Behälter zum Speichern von Warmwasser ohne eingebaute Heizflächen. Die Erwärmung erfolgt meistens mit einem aussenliegenden Plattenwärmeübertrager. Da die Ladung von oben nach unten in Schichten erfolgt, spricht man von einer Schichtladung. Die Einsatzgebiete von WWSP werden in den folgenden Kapiteln erläutert. |
| 12 | Entleerung | Entleerung des Speichers. Die Entleerung besteht aus Entleerventil und siphonierter Entwässerungsstelle, beispielsweise einem Bodenablauf. |
| 13 | Beprobungsventil | Um mikrobiologische Untersuchungen während des Betriebs vornehmen zu können, sind Beprobungsventile (abflammbar) vor und nach dem Speicher notwendig. Ist eine Zirkulation vorgesehen, muss jeder Zirkulationskreis über Beprobungsventile verfügen. Entleerventile sind für mikrobiologische Proben oft nicht geeignet. |

5.2 Allgemeine Hinweise für die Wassererwärmung

Die [MuKE] definieren die Grenzwerte für den gewichteten Endenergiebedarf für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Klimatisierung. Im Nachweis müssen nur die hochwertigen Energien berücksichtigt werden. Bei Wohnbauten erlauben die MuKE, den Neueinbau oder Ersatz einer direkt-elektrischen Erwärmung des Kaltwassers nur noch, wenn folgende Voraussetzungen gegeben sind:

a) Das Kaltwasser wird während der Heizperiode mit dem Wärmeerzeuger für die Raumheizung erwärmt oder vorgewärmt; oder

b) Das Kaltwasser wird zu mindestens 50 % mittels erneuerbarer Energie oder nicht anders nutzbarer Abwärme erwärmt oder vorgewärmt.

Wird das Wasser während der Heizperiode über das Heizungssystem erwärmt, sollte folgendes berücksichtigt werden:

- **Zeitliche Verfügbarkeit des Wassererwärmers:** Einige Wärmequellen wie Elektrizität oder thermische Netze können zu bestimmten Tageszeiten vom Energieversorger oder Netzbetreiber gesperrt werden, oder sie liefern nicht die erforderlichen Temperaturen.

- **Notwendige Temperaturen:** Um Warmwasser von $\geq 55^\circ\text{C}$ erzeugen zu können, ist eine heizungsseitige Vorlauf-

Bild 5.6: Schematische Darstellung gemäss [SIA 411] einer Warmwasserversorgung, die in die Heizungsanlage integriert ist.

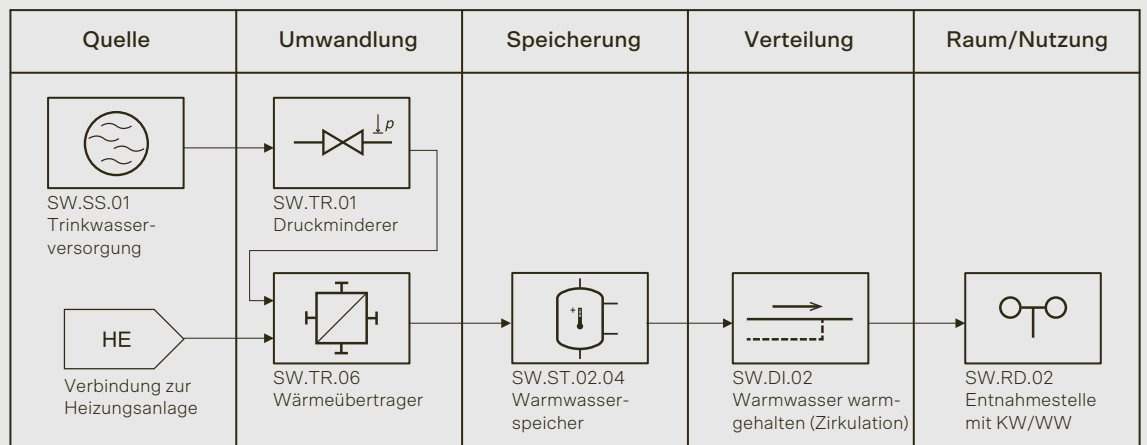
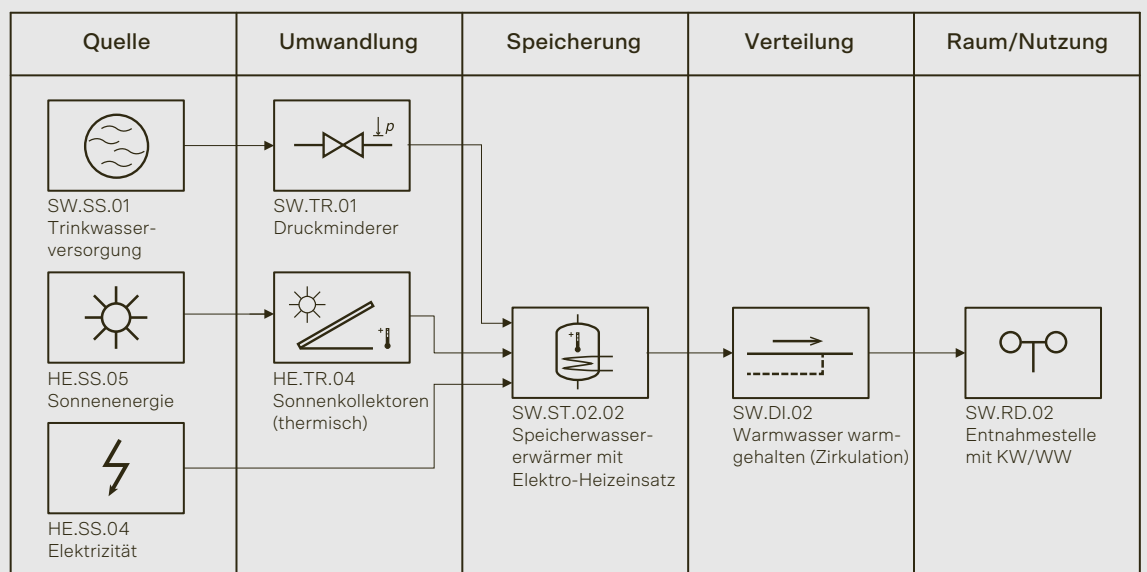


Bild 5.7: Schematische Darstellung gemäss [SIA 411] einer Warmwasserversorgung mit thermischer Solarenergie-nutzung.



temperatur von $< 60^{\circ}\text{C}$ notwendig. Falls keine Zusatzheizung installiert wird, muss der Wärmeerzeuger während der Trinkwassererwärmung diese Temperatur bereitstellen können.

– **Vorlaufzeit des Wärmeerzeugers:**

Eine Vorlaufzeit muss eingeplant werden, wenn der Wärmeerzeuger (beispielsweise ein Holzfeuerungs-system) die geforderte Vorlauf-temperatur nach einem Ein-Befehl nicht sofort erbringen kann. Um die Vorlaufzeit zu überbrücken, kann man den Ein-Fühler im Speicher so platzieren, dass das Spitzen-deckungsvolumen entsprechend vergrössert wird.

– **Mindestlaufzeit des Wärmeerzeugers:** Damit ein Wärmeerzeuger nicht ins Takten gerät, sollte nach dem Einschalten die Mindestlaufzeit eingehalten werden.

– **Thermische Trägheit des Gebäudes:**

Anhand der thermischen Gebäude-masse muss abgeschätzt werden, ob die Raumheizung während der Wasser-erwärmung unterbrochen wird, oder ob Raumheizung und Wassererwärmung parallel betrieben werden.

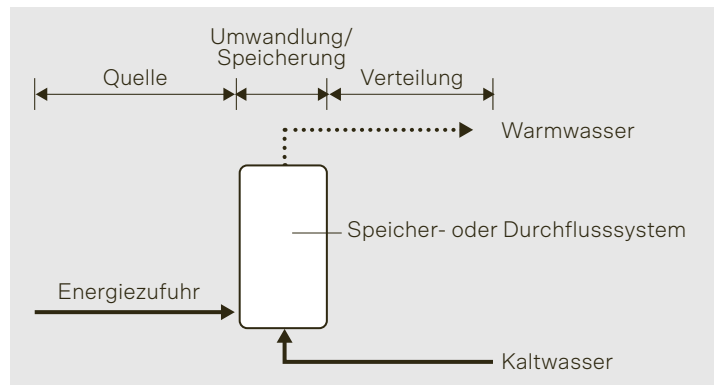
– **Maximale Rücklauf-temperatur:** Bei Wärmepumpen (WP) oder thermischen Netzen muss die höchste zulässige Rücklauf-temperatur eingehalten werden. Bei Wärmepumpen muss zusätzlich noch den Mindest-Massenstrom eingehalten werden.

5.3 Hydraulische Einbindung von Wassererwärmungsanlagen

Direkte Wassererwärmung

Die Energieumwandlung erfolgt innerhalb des Speichers oder im Durchflusssystemwassererwärmer. Darin wird dem Kaltwasser direkt, also ohne zusätzlichen Wärmeträger, Wärme zugeführt.

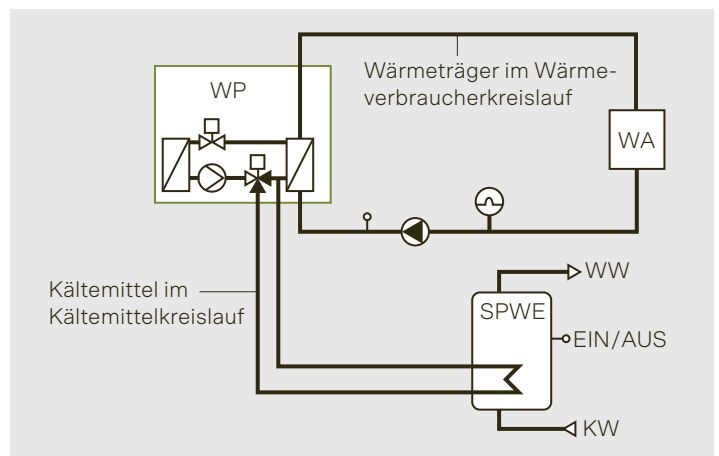
Bild 5.8: Prinzipschema direkte Wassererwärmung.



Einsatzgebiet:

- Bei Einzel- und Gruppenversorgung
- Mit Elektroheizeinsatz (direkt-elektrische Erwärmung) als Nacherwärmung (Zusatzheizung)
- Reiner WP-Wassererwärmer (direkte Verflüssigung im Wassererwärmer)
- Bei Abwärmenutzung (beispielsweise von Kältemaschinen) möglich als Vorerwärmung

Bild 5.9: Beispiel Wärmepumpe mit direkter Verflüssigung im SPWE. WA: Wärmeabgabe



Indirekte Wassererwärmung

Die Energieumwandlung erfolgt in einem separaten Wärmeerzeuger, der einen Wärmeträger erwärmt. Der Wärmeträger führt dem Kaltwasser Wärme zu. Auch die indirekte Wassererwärmung kann mit einem Speicherwassererwärmer oder mit einem Durchflusssystemerwärmer erfolgen.

Einsatzgebiet:

- Bei Gruppen- und Zentralversorgungen
- In Kombinationen von Heizungs- und Warmwasseranlagen

Bild 5.10: Prinzipschema indirekte Wassererwärmung.

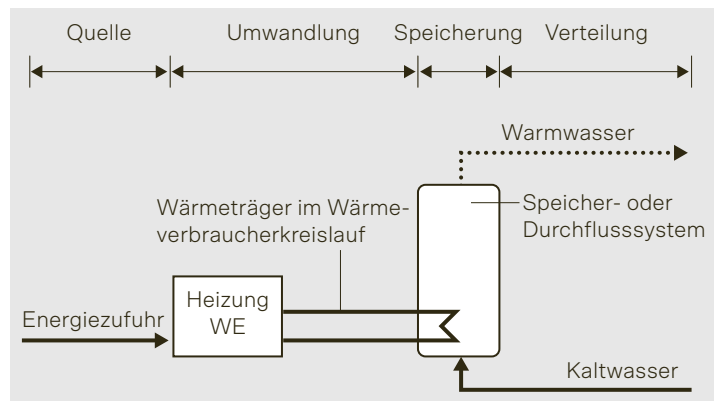
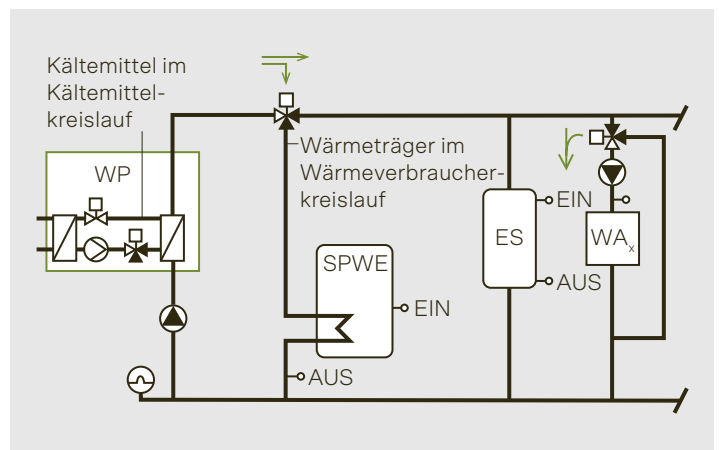


Bild 5.11: Beispiel Wärmepumpe mit indirekter Beheizung des SPWE.



5.4 Wärmeübertragung bei indirekter Erwärmung

Innenliegende Wärmeübertrager

Bei standardisierten Speicherwassererwärmern werden am häufigsten innenliegende Wärmeübertragungen eingesetzt. Die Ladung kommt durch die Konvektion zustande, die der Wärmeübertrager induziert. Durch die Konvektionsströmung schaukelt sich die Warmwassertemperatur in Stufen hoch, bis die Solltemperatur erreicht ist. Während des Ladens bleibt der Massenstrom über dem Wärmeübertrager konstant. Die Rücklauftemperatur steigt mit der Warmwassertemperatur. Da die Wassererwärmung in «Stufen» erfolgt, nennt man diese Speicherladung «Stufenladung».

Vorteile:

- Tiefe RL-Temperaturen zu Beginn des Ladeprozesses
- Bessere Leistungszahl als bei Schichtladung. Der COP sinkt aber gegen Ende des Ladeprozesses.
- Günstige Bauart
- Geringer regeltechnischer Aufwand
- Verschmutzungs- respektive Verkalkungsgefahr kleiner als bei einem aussenliegenden Plattenwärmeübertrager

Nachteile:

- Schlechterer Wärmedurchgangskoeffizient als bei aussenliegendem Wärmeübertrager
- Wärmeübertragerleistung sinkt gegen Ende des Ladeprozesses.
- RL-Temperatur steigt kontinuierlich während des gesamten Ladeprozesses.
- Es kann nicht das gesamte Speichervolumen genutzt werden (Misch- und Kaltwasserzone).

- Während des Ladeprozesses werden durch die Konvektionsströmungen die Temperaturschichten zerstört. Infolgedessen ergeben sich Mischtemperaturen im Speicher. Nach dem Ladeprozess bilden sich die gewünschten Temperaturschichten.
- Speichertemperatur für eine thermische Desinfektion kann gegen Ende des Ladeprozesses nicht aufrechterhalten werden. Die thermische Desinfektion wird in Kapitel 5.7 beschrieben.



Bild 5.12: Schnitt durch einen Speicherwassererwärmer mit innenliegendem Wärmeübertrager. (Quelle: Bosch Thermotechnik GmbH)

Wärmeübertrager, Bauart	Wärmedurchgangskoeffizient W/m^2K	Wärmeübertragerfläche m^2/kW	Temperaturdifferenz Vor- und Rücklauf K
Glattrohrwärmeübertrager	400 bis 600	0,30	6

Tabelle 5.1: Vordimensionierung eines innenliegenden Glattrohrwärmeübertragers gemäss [Stasch].

Aussenliegende Wärmeübertrager

Im Sekundärkreis (Wassererwärmerkreis) fördert eine Umwälzpumpe das Kaltwasser über den aussenliegenden Wärmeübertrager. Das erwärmte Wasser wird im oberen Speicherbereich wieder impulsarm eingeführt. Die Temperaturschichten bleiben erhalten und wandern im Lauf des Ladens von oben nach unten. Man spricht von einer «Schichtladung».

Vorteile:

- Höherer Wärmedurchgangskoeffizient als innenliegender Wärmeübertrager
- Gesamte Speichernutzung möglich (keine Misch- und Kaltwasserzone)



Bild 5.13: Speicherwassererwärmer mit aussenliegendem Wärmeübertrager.
(Quelle: Domotec AG)

Tabelle 5.2: Vor-dimensionierung eines aussenliegenden Plattenwärmeübertrager gemäss [Stasch].

Wärmeübertrager, Bauart	Wärmedurchgangskoeffizient W/m^2K	Wärmeübertragerfläche m^2/kW	Temperaturdifferenz Vor- und Rücklauf K
Plattenwärmeübertrager	800 bis 1200	0,15	primärseitig: 6 sekundärseitig: 6

- Tiefe RL-Temperaturen während des gesamten Ladeprozesses möglich (optimal bei Brennwertkessel)
- Konstante Speicherladetemperatur während des gesamten Ladeprozesses möglich

Nachteile:

- Erschwerte Kombination mit thermischer Solarenergienutzung (Temperaturschichten können während der thermischen Solarenergienutzung zerstört werden.)
- Wird der Aus-Fühler im Sekundärkreis (oder zu weit unten im Speicher) platziert, steigt die RL-Temperatur gegen Ende des Ladeprozesses an. Dies verschlechtert den Wirkungsgrad von Brennwertkesseln.
- Verschmutzungs- respektive Verkalkungsgefahr von Plattenwärmeübertragern
- Höhere Investitionskosten als bei innenliegendem WÜT
- Aufwendigere Hydraulik und Regelungstechnik als bei innenliegendem WÜT
- Zusätzliche Wärmeverluste des aussenliegenden WÜT, deshalb muss letzterer gut gedämmt werden.
- Schlechtere Leistungszahl als bei Stufenladung. Der COP ist durch den gesamten Ladeprozess schlechter, da die WP von Beginn weg die hohen Warmwassertemperaturen liefern muss.

5.5 Ladekonzepte

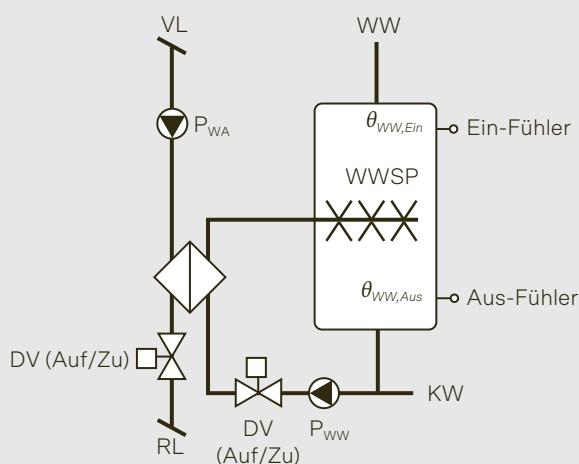
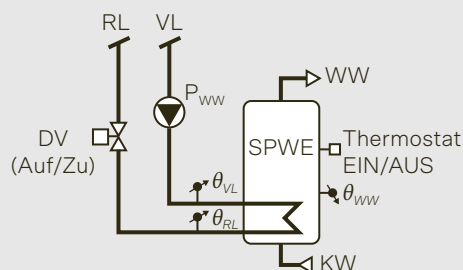
Stufenladung ohne Vorlauftemperaturregelung

Die Speichertemperaturen können über einen Thermostaten oder über einen Ein- und Aus-Fühler erfasst werden. Sinkt die Wassertemperatur im Speicherwassererwärmer unter die Solltemperatur, schaltet sich die Ladepumpe (P_{WW}) ein und lädt den Speicher so lange, bis die Soll-Temperatur wieder erreicht ist.

Erfolgt die Stufenladung mit einem aussenliegenden Wärmeübertrager, so muss das Wasser mit einem Diffusor, beispielsweise einer Schichtlanze, in der Mitte des Speichers eingeführt werden. Die Einströmgeschwindigkeit des Wassers darf nicht höher als 0,1 m/s sein. Durch das impulsarme Einströmen wird eine homogene Verteilung innerhalb des Speichers erreicht. Damit innerhalb des Warmwasserladekreises die Gegenstromzirkulationen unterbunden werden können, wird oft ein Durch-

Bild 5.14: Stufenladung mit innenliegendem WÜT ohne Vorlauftemperaturregelung.

Bild 5.15: Stufenladung mit aussenliegendem WÜT ohne Vorlauftemperaturregelung.



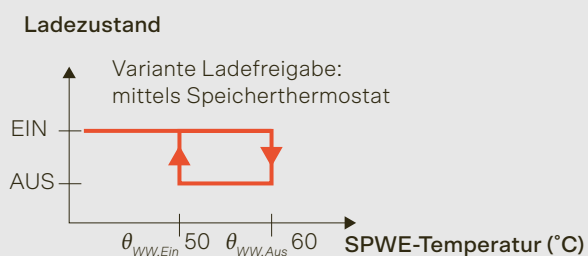
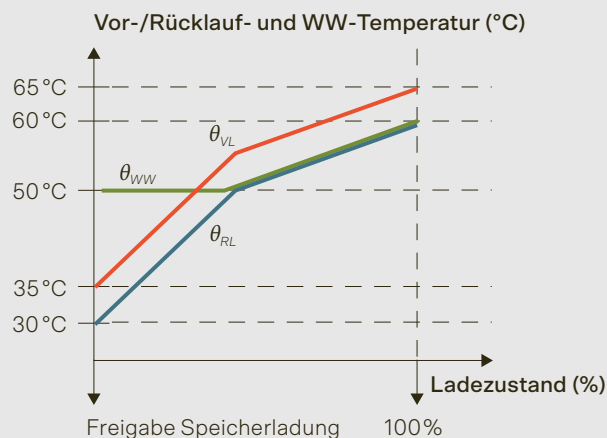
gangsstellorgan (DV) in diesen Kreis eingebaut. In diesem Fall hat das DV keine Regelfunktion, sondern es öffnet, wenn der Ladekreis in Betrieb geht.

Eigenschaften:

- Einfache Hydraulik; niedrige Investitionskosten
- Kein Verkalkungsschutz, da je nach Wärmeerzeugung hohe VL-Temperatur möglich ist.
- SPWE- und WWSP-Ladung erfolgt mittels Stufenladung (induzierte Konvektionsströme im Speicher).
- Konstante Massenströme über innenliegenden respektive aussenliegenden Wärmeübertrager
- Bei einem innenliegenden Wärmeübertrager entsteht im Speicher ein nicht zu erwärmendes Volumen (Kalt- und Mischwasserzone).
- Die RL-Temperatur steigt gegen Ende der Ladung an. Eine WP kann dadurch in Hochdruckstörung gehen, und ein Brennwertkessel kann die Kondensationswärme nicht mehr optimal nutzen.

Bild 5.16: Beispiel Regelfunktion - Stufenladung ohne VL-Temperaturregelung.

Bild 5.17: Beispiel Regelfunktion: Freigabe für SPWE-Ladung mittels Speicherthermostat.



- Der Wärmeerzeuger sollte eine VL-Temperatur erreichen, die mindestens 2 bis 5 K über dem Sollwert der Speichertemperatur liegt.
- Gegen Ende der Ladung sinkt die Wärmeübertragerleistung.
- Damit bei der WP-Wärmeerzeugung keine Hochdruckstörung eintritt, kann der Aus-Fühler im Ladekreis (im VL oder RL) eingebaut werden.

Einsatzgebiet:

- Wassererwärmung mittels Wärmepumpenanlagen
- Anlagen, bei denen längere Warmwasserladezeiten toleriert sind
- Kleinere Wohngebäude (Erwärmung während der Nachtstunden)

hindert und damit die Kalkausscheidung am innenliegenden Wärmeübertrager reduziert. Ist die Speichersolltemperatur erreicht, schaltet die konstant laufende Umwälzpumpe (P_{WW}) wieder ab.

Eigenschaften:

- Bei hohen Kessel-VL-Temperaturen ($> 65^\circ\text{C}$) werden konstante VL-Temperaturen im Wassererwärmerkreis ($\theta_{VL,WW}$) erreicht. Dadurch lagert sich weniger Kalk im SPWE ab.
- SPWE-Ladung erfolgt mittels Stufenladung (induzierte Konvektionsströme im SPWE).
- Variabler Massenstrom über dem Wärmeerzeuger
- Konstanter Massenstrom über innenliegendem Wärmeübertrager
- Durch den innenliegenden Wärmeübertrager entsteht im Speicher ein nicht zu erwärmendes Volumen (Kalt- und Mischwasserzone).
- Die RL-Temperatur steigt gegen Ende der Ladung. Ein Brennwertkessel kann die Kondensationswärme dann nicht mehr optimal nutzen.
- Die VL-Temperatur im Wassererwärmerkreis ($\theta_{VL,WW}$) sollte mindestens 2 bis 5 K über dem Sollwert der Speichertemperatur liegen.
- Gegen Ende der Ladung sinkt die Wärmeübertragerleistung.

Einsatzgebiet:

- Wärmeerzeuger, die VL-Temperaturen über 65°C bereitstellen
- In Anlagen mit stark schwankenden VL-Temperaturen in der Wärmeerzeugung
- Anlagen, bei denen längere Warmwasserladezeiten toleriert sind
- Kleinere Wohngebäude (Erwärmung während der Nachtstunden)

Schichtladung ohne VL-Temperaturregelung, ohne sekundärseitige Beimischschaltung

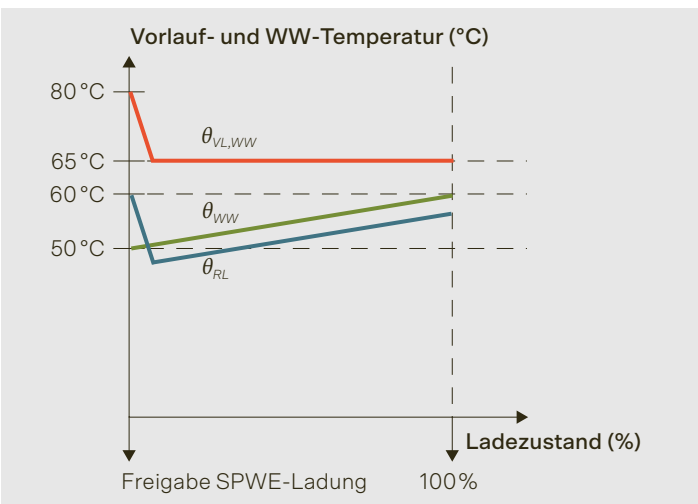
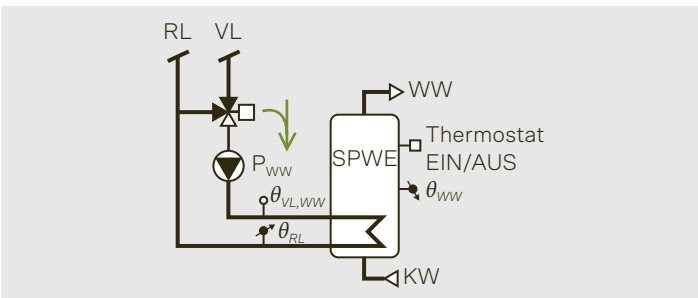
Wird der Sollwert der Speichertemperatur ($\theta_{WW, \text{Ein}}$) unterschritten, schalten sich die Umwälzpumpen im Primärkreis (P_{WA}) ein. Sobald die geforderte VL-Tempera-

Bild 5.18: Stufenladung mit innenliegendem WÜT und mit Vorlauftemperaturregelung.

Bild 5.19: Beispiel Regelfunktion – Stufenladung mit VL-Temperaturregelung.

Stufenladung mit Vorlauftemperaturregelung

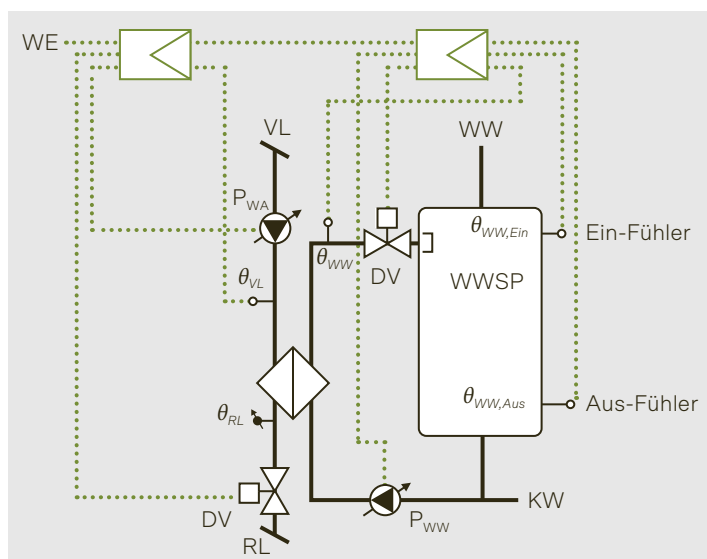
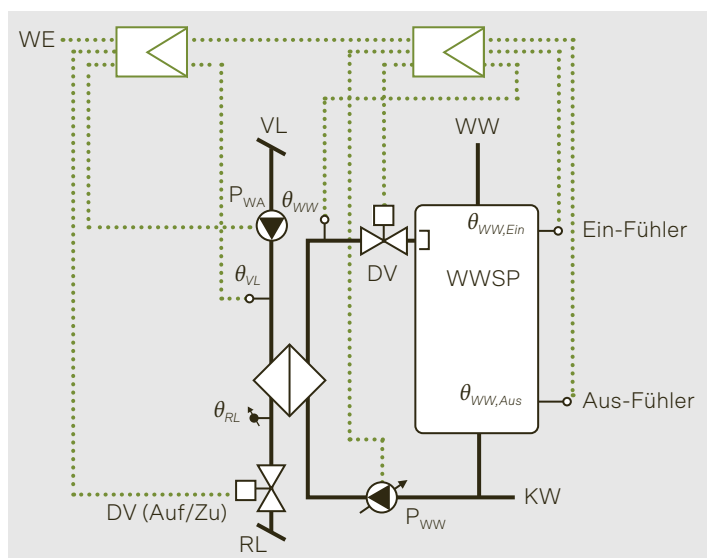
Funktionsweise: Sinkt die Speichertemperatur (θ_{WW}) unter den Sollwert, startet die SPWE-Ladung. Das 3-Weg-Stellorgan mischt RL-Wasser bei, um die Solltemperatur ($\theta_{VL,WW}$) zu erreichen. So wird eine zu hohe Ladetemperatur ver-



tur erreicht ist, schaltet sich der Sekundärkreis (P_{WW}) zu. Die Leistungsabgabe muss sekundärseitig variabel sein. Die Ladung des Speichers erfolgt von oben nach unten. Das Wasser sollte impulsarm mit einem Diffusor, beispielsweise einer Prallplatte, unterhalb des Spitzendeckungsvolumens (Ein-Fühler) in den Speicher eingeführt werden. Wenn der Aus-Fühler ($\theta_{WW,Aus}$) die geforderte Warmwassertemperatur misst, stellt die Warmwasserladung ab.

Bild 5.20: Schichtladung mit aussenliegendem WÜT; ohne VL-Temperaturregelung ($m'_{Prim} = \text{konstant}$, $m'_{Sek} = \text{variabel}$).

Bild 5.21: Schichtladung mit aussenliegendem WÜT; mit VL-Temperaturregelung ($m'_{Prim} = \text{variabel}$, $m'_{Sek} = \text{variabel}$).



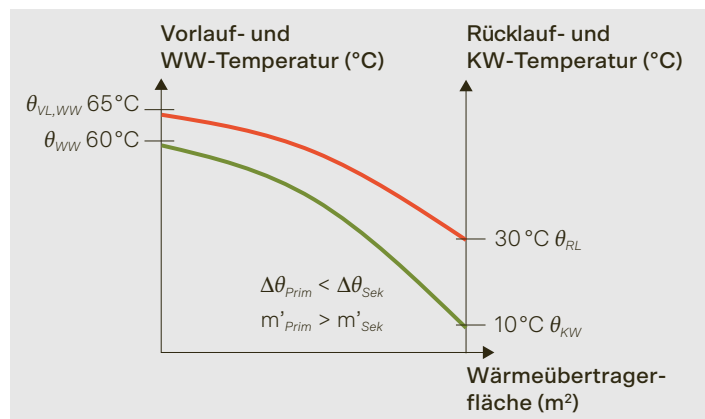
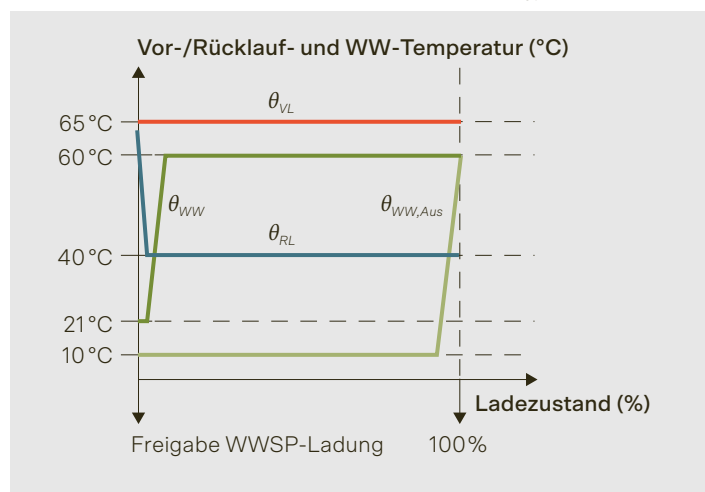
mit der drehzahlregulierten Pumpe der kleinste Massenstrom nicht erreicht werden kann, muss dieser mit einem Durchgangsventil (DV) nachgedrosselt werden. Der modulierende Wärmeerzeuger passt die Leistung je nach Leistungsbedarf an. So kann die primärseitige Pumpe (P_{WA}) einen konstanten Massenstrom fördern (Bild 5.20). Falls die Modulation beschränkt ist oder kein modulierender Wärmeerzeuger zum Einsatz kommt, kann primärseitig eine drehzahlregulierte Pumpe (P_{WA}) vorgesehen werden (Bild 5.21).

Eigenschaften:

- Keine primärseitige Vorlauftemperaturregelung
- WWSP-Ladung erfolgt mittels Schichtladung.
- Geforderte Warmwassertemperatur (θ_{WW}) wird bei Ladestart nicht erreicht. Impulsarmer Speichereintritt ist notwendig.

Bild 5.22: Beispiel Regelfunktion: Schichtladung ohne VL-Temperaturregelung und sekundärseitiger Temperaturhochhaltung.

Bild 5.23: Möglicher Temperaturverlauf im Wärmeübertrager bei variablem Massenstrom ($m'_{Prim} > m'_{Sek}$).



- Modulierende Wärmeerzeugung oder primärseitig variable Massenströme nötig
- Wird der Aus-Fühler ausserhalb des WWSP platziert, kann der ganze Warmwasserspeicher ausgenutzt werden (keine Kalt- und Mischwasserzone). In diesem Fall steigt die RL-Temperatur gegen Ende des Ladeprozesses an. Ein Brennkessel kann die Kondensationswärme dann nicht mehr optimal nutzen.
- Befindet sich der Aus-Fühler im WWSP, bleibt die Mischzone im WWSP erhalten. Das garantiert tiefe RL-Temperaturen während des gesamten Ladeprozesses.
- Verkalkungsgefahr des Wärmeübertragers

Bild 5.24: Schichtladung mit aussenliegendem WÜT; mit VL-Temperaturregelung und sekundärseitiger Temperaturregelung mittels konstantem Massenstrom primär- und sekundärseitig.

Einsatzgebiet:

- Bei mittlerem und grossem Warmwasserbedarf und bei grossen Warmwasserspitzen
- Mehrfamilienhäuser (MFH), Krankenhäuser, Sportzentren, Schwimmbäder, Hotels etc.

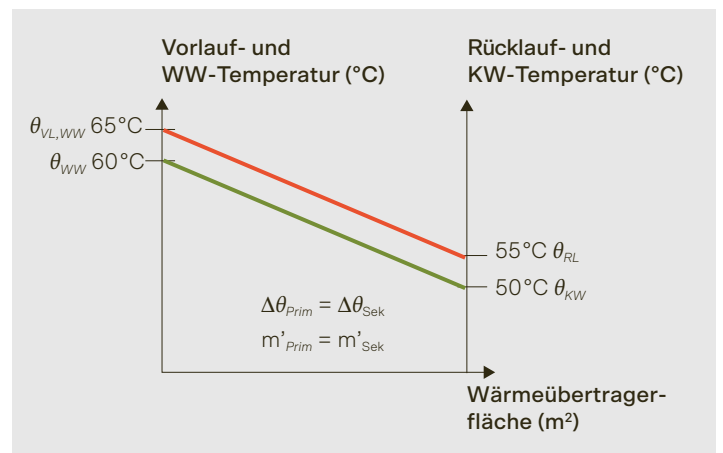
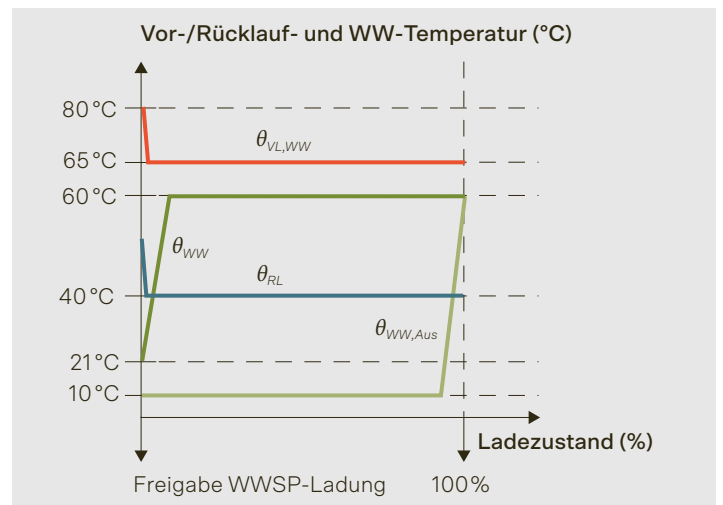
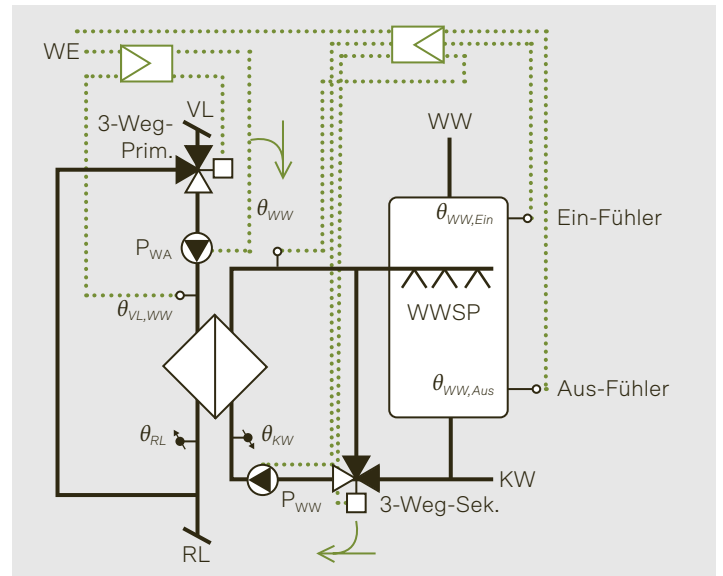
Schichtladung mit VL-Temperaturregelung und sekundärseitiger Beimischung

Funktion mit konstantem Massenstrom primär- und sekundärseitig: Spricht der Ein-Fühler ($\theta_{WW, Ein}$) an, weil die Solltemperatur unterschritten ist, geht die Umwälzpumpe (P_{WA}) im Primärkreis in Betrieb. Mit dem 3-Weg-Stellorgan wird RL-Wasser beigemischt, bis die Solltemperatur ($\theta_{VL, WW}$) erreicht ist. Dieses Verfahren verhindert eine zu hohe VL-Temperatur über dem Wärmeübertrager und reduziert damit Kalkausscheidungen. Gleichzeitig wird der Sekundärkreis hochgefahren. Dabei befindet sich das 3-Weg-Stellorgan in der Stellung «Umlenkung», bis die gewünschte WW-Temperatur (θ_{WW}) erreicht ist. Anschliessend regelt das 3-Weg-Stellorgan Kaltwasser bei und hält die gewünschte WW-Temperatur aufrecht. Der Speicher wird von oben nach unten homogen geladen, bis

Bild 5.25: Beispiel Regelfunktion – Schichtladung mit VL-Temperaturregelung und mit sekundärseitiger Temperaturhochhaltung.

Bild 5.26: Möglicher Temperaturverlauf im Wärmeübertrager bei konstanten Massenströmen ($m'_{Prim} = m'_{Sek}$).

die Solltemperatur beim Aus-Fühler erreicht ist und die Warmwasserladung ausser Betrieb geht.



Eigenschaften:

- Primärseitige Vorlauftemperaturregelung
- Konstante Leistungsabgabe (primärseitig) respektive konstante Leistungsaufnahme (sekundärseitig)
- WWSP-Ladung erfolgt mittels Schichtladung.
- Konstanter Massenstrom in Primär- und Sekundärkreis
- Wird der Aus-Fühler ausserhalb des WWSP platziert, kann der ganze Warmwasserspeicher ausgenutzt werden (keine Kalt- und Mischwasserzone).
- Minimale Verkalkungsgefahr des Wärmeübertragers
- Höhere RL-Temperaturen als bei Schichtladung ohne sekundärseitige Beimischschaltung (somit schlechterer COP bei WP oder schlechterer Wirkungsgrad bei Brennwertkessel)
- Modulierende Wärmeerzeugung oder primärseitig variable Massenströme nötig, falls KW-Temperatur (θ_{KW}) stark variiert.

Einsatzgebiet:

- Bei mittlerem und grossem Warmwasserbedarf und bei grossen Warmwasserspitzen
- MFH, Krankenhäuser, Sportzentren, Schwimmbäder, Hotels etc.

- Bei Wärmeerzeugern mit hohen VL-Temperaturen

Durchlaufwassererwärmung System «Frischwassermodul»

Im Frischwassermodul (auch Frischwasserstation genannt) sind ein Volumenströmsensor und ein Temperaturfühler (Mikroprozessregelung) installiert. Bei Warmwasserbezug spricht der Volumenströmsensor an, und die leistungsgeregelte Frischwasserladepumpe fördert warmes Heizungswasser aus dem oberen Energiespeicherbereich durch den Plattenwärmeübertrager des Frischwassermoduls. Der Rücklauf strömt in den unteren Bereich des Energiespeichers (ES) zurück.

Die Mikroprozessregelung misst die Volumenströme und die Temperaturen auf der Heizungs- und Trinkwasserseite und errechnet den momentan notwendigen Volumenstrom der Frischwasserladepumpe. Diese sorgt dafür, dass das Warmwasser auch bei kleinen Bezügen und unterschiedlichen Energiespeichertemperaturen gleichmässig erwärmt wird.

Die Frischwasserladepumpe wird mit einer Pulsweitenmodulation (PWM) angesteuert. Mit diesem Signal kann sie sehr

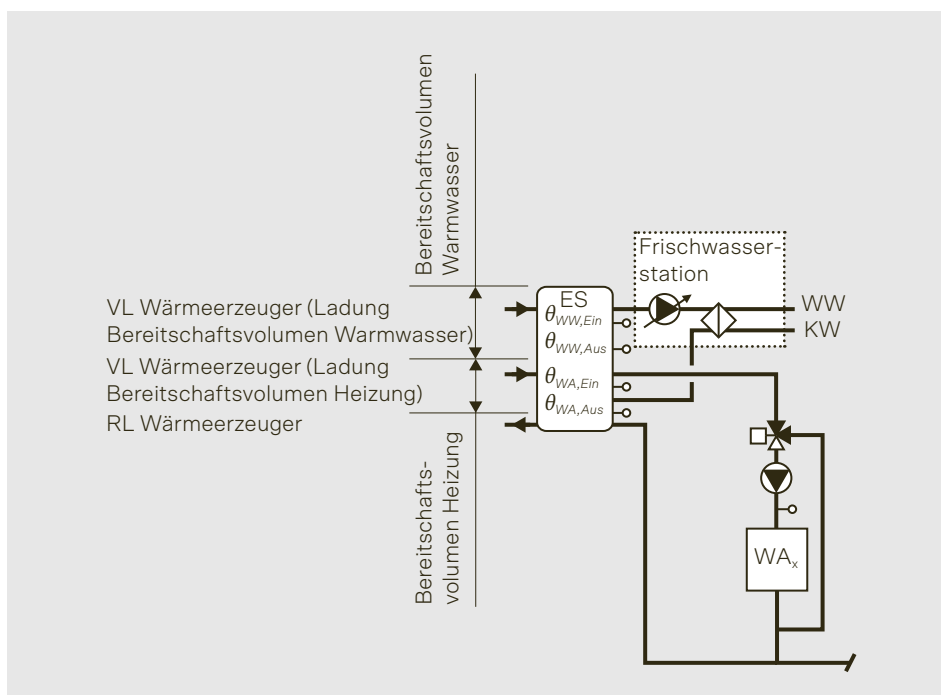


Bild 5.27: Einbindung eines Frischwassermoduls.

kleine Volumenströme fördern und innerhalb weniger Millisekunden die Leistungsabgabe ändern. Die Warmwassertemperaturen können so auch bei schwankendem Warmwasserbezug konstant gehalten werden.

Eigenschaften:

- Warmwasserspeicherung erfolgt im Energiespeicher auf der Heizungsseite und nicht auf der Trinkwasserseite.
- Gesamtes Wärmeangebot wie Abwärme, Sonnenenergie etc. kann im Energiespeicher genutzt werden.
- Notwendiger Spitzenleistungsbedarf muss vor der Frischwasserstation bereitgestellt werden.
- Energiespeicher ist notwendig, um die Leistung des Wärmeerzeugers zu optimieren.
- Temperaturschichten im Energiespeicher müssen durch Vorkehrungen wie einem Diffusor aufrechterhalten bleiben.

Einsatzgebiet:

- EFH und MFH
- Duschen in Sportzentren und Schwimmbädern mit grossen Schüttleistungen

5.6 Wassererwärmung mittels Abwärme

Abwärmennutzung aus Abwasserreinigungsanlagen

- Grundsätzlich gibt es drei Varianten, Wärme aus Abwasser zu gewinnen:
- Wärmerückgewinnung aus gereinigtem Abwasser nach der Abwasserreinigungsanlage (ARA)
 - Wärmerückgewinnung aus Abwasser aus der öffentlichen Kanalisation vor der ARA
 - Wärmerückgewinnung aus dem Schmutzwasser im Gebäude oder auf dem Areal

Nachfolgend wird die Variante «Wärmerückgewinnung aus dem Schmutzwasser im Gebäude oder auf dem Areal» erläutert.

Funktion: Das Abwasser im Abwasserschacht hat zwischen 16 und 23 °C. Im Schacht werden die Fäkal- und Schmutzstoffe zurückgehalten und regelmässig mit der Spülpumpe direkt in die Kanalisation gefördert. Bei Wärmebedarf wird dem im Abwasserschacht gesammelten Schmutzwasser so viel Wärme entzogen, wie der Verdampfer in der WP benötigt. Das abgekühlte Schmutzwasser fliesst in die Kanalisation. Das Schmutzwasser kann bis auf 5 °C abgekühlt werden; kommunale Vorschriften müssen dabei beachtet werden.

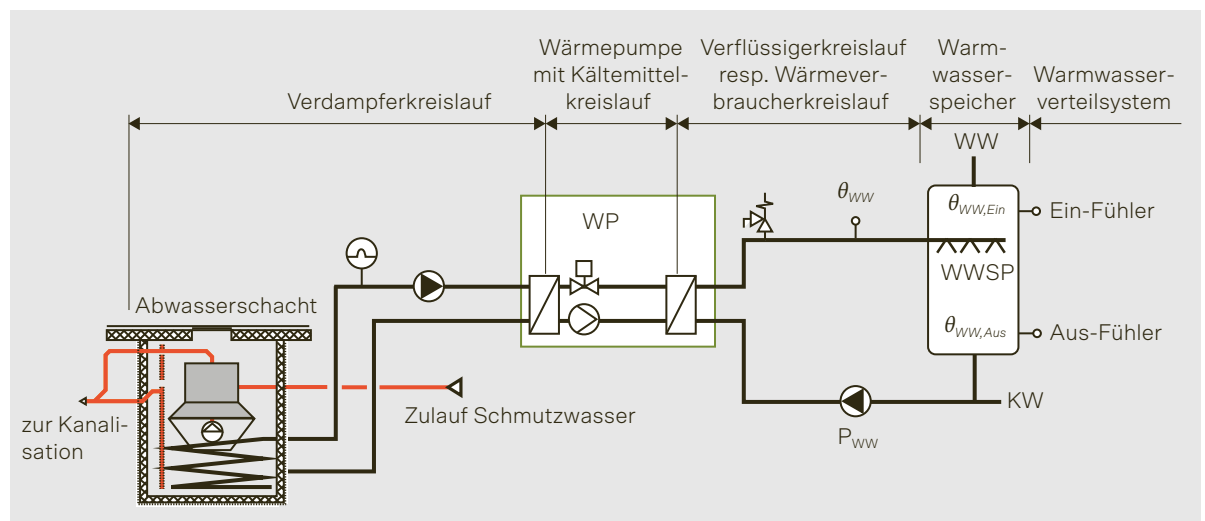


Bild 5.28: Abwasserwärmennutzung mit indirekter Wassererwärmung.

Eigenschaften:

- Sämtliches Abwasser kann genutzt werden: allgemeines häusliches Abwasser inklusive WC, Abwasser von Schwimmbädern, Hotels, Spitälern, Grossküchen, Wäschereien etc.
- Verdampferseitiges Temperaturangebot zwischen 16 und 23 °C
- Zusatzheizung nur bei Inbetriebnahme und bei Revisionsarbeiten notwendig
- Warmwasserbedarf kann das ganze Jahr gedeckt werden. Eine Anbindung der Abwasserwärmerückgewinnung an das Heizsystem ist in der Regel gemäss [WAS-WRG] nicht sinnvoll.
- Bei Kleinobjekten ist der Wartungsaufwand im Verhältnis zum Nutzen gross.

Einsatzgebiet:

- Mittlere Wohnbauten zwischen 10 und 30 Wohneinheiten (Warmwasserbedarf $\Phi_{WW} \geq 70$ kW)
- Gewerbe- und Industriebauten mit grossem Abwasseranfall und Warmwasserbedarf, beispielsweise Spitäler oder Schwimmbäder

Abwärmenutzung aus Anlagen und Prozessen

Für die Vorwärmung des Warmwassers lässt sich beispielsweise die Abwärme aus gewerblichen Kältemaschinen nutzen. Da bei der Wärmerückgewinnung meist nur Temperaturen < 50 °C erreicht

werden, sollte aus hygienischer Sicht nicht das Trinkwasservolumen, sondern das Betriebswasservolumen vorerwärmt werden.

Funktion beim Speichern der Abwärme im Betriebswasservolumen:

Der Vorwärmkreis geht in Betrieb, sobald der WWSP-Ladekreis in Betrieb ist und die Temperatur im Vorwärmkreis (θ_{VE}) grösser ist als diejenige im WWSP-Ladekreis (θ_{KW}). Die erforderliche Warmwassertemperatur im WWSP-Ladekreis (θ_{WW}) kann mit oder ohne sekundäre Beimischschaltung erreicht werden.

Funktion beim Speichern der Abwärme im Trinkwasservolumen:

Mit der Abwärme aus einem Kälteprozess, beispielsweise einer gewerblichen Kältemaschine, kann das Kaltwasser auf ca. 40 °C vorerwärmt werden. Dabei nutzt die Warmwasserladung die überschüssige Abwärme aus dem Verflüssiger der Kältemaschine direkt über das Kältemittel oder indirekt über einen Wärmeträger. Falls das vorgewärmte Wasservolumen nie eine Temperatur über 55 °C erreicht, ist aus hygienischer Sicht eine thermische Desinfektion erforderlich. Gemäss der [SIA 385/1] muss in solchen Fällen der Vorwärmkreis jeden Monat einmal während 6 Stunden auf 60 °C erwärmt werden.

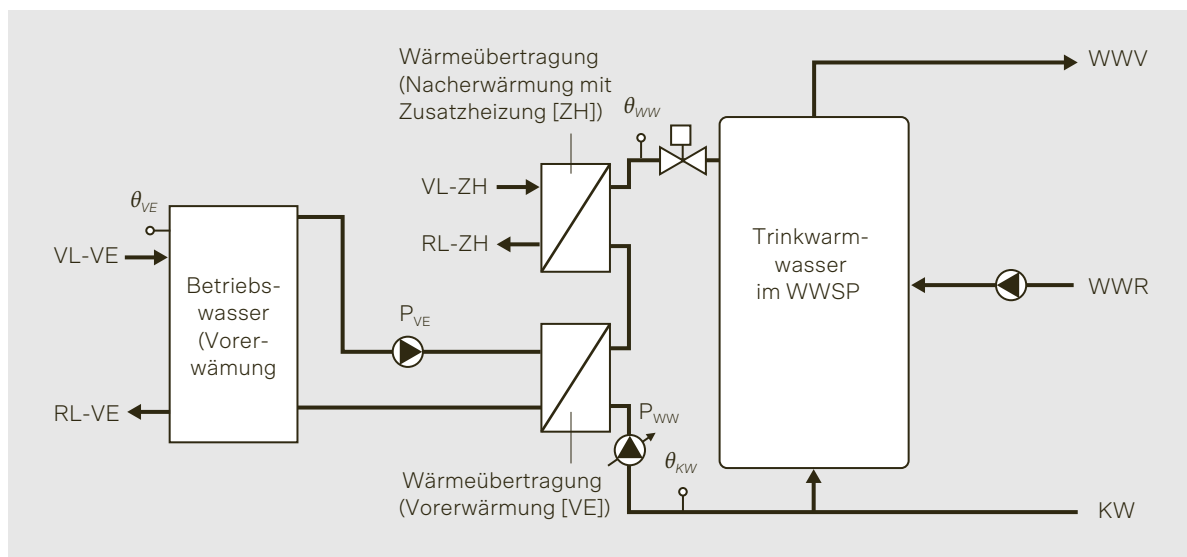


Bild 5.29: Wärmerückgewinnung im Betriebswasservolumen.

In Bild 5.30 wird die anfallende Abwärme der Vorerwärmung (VE) indirekt über einen Wärmeträger zugeführt. Steigt die Fühlertemperatur innerhalb des Verflüssigerkreises (θ_{RK}), wird die Restwärme über den Rückkühler (RK) abgegeben. Während der thermischen Desinfektion (Legionellenschutzladung) wird die gesamte Kondensationswärme ebenfalls über den RK abgegeben. Die Nacherwärmung (NA) erfolgt, sobald der Ein-Fühler ($\theta_{WW, Ein}$) den Warmwasserladekreis frei gibt. Dabei entnimmt die Umwälzpumpe (P_{WW}) das vorerwärmte Wasser aus dem Nachwärmerspeicher (Position «Umlenkung») und führt es über die Zusatzheizung, die das Wasser auf die geforderte Temperatur bringt. Indem das Wasser nur aus dem Nachwärmer entnommen wird, kann ein Hin- und Herpendeln des Wassers zwischen den beiden Speichern verhindert werden. Einmal monatlich erfolgt eine thermische Desinfektion, bei der die beiden Speicher mindestens 6 Stunden lang auf 60 °C erwärmt werden. Die Legionellenschutzschaltung wird ausser Betrieb genommen, sobald die geforderte Temperatur am Ausfühler ($\theta_{Legio, Aus}$) im

VE erreicht ist. Weitere Informationen zu Legionellen enthält Kapitel 5.7.

Eigenschaften:

- Abwärme wird während des gesamten Warmwasserbezugs genutzt. Notverflüssiger wie Rückkühler im Verflüssigerkreis sind empfehlenswert, falls die Abwärme nicht genutzt werden kann.
- Nacherwärmung erfolgt mittels Schichtladung und sekundäreseitiger Temperaturregelung. Falls keine sekundäreseitige Temperaturregelung vorgesehen wird, muss primärseitig die Leistungsabgabe geregelt werden.
- Legionellenschutzschaltung für regelmässige Nacherwärmung des Vorwärmerspeichers. Diese erfolgt mittels Schichtladung.
- «Legionellen-Barriere» innerhalb des Spitzendeckungsvolumens

Einsatzgebiet:

- Gewerbe- und Industriebauten (Gastro- und Lebensmittelindustrie)

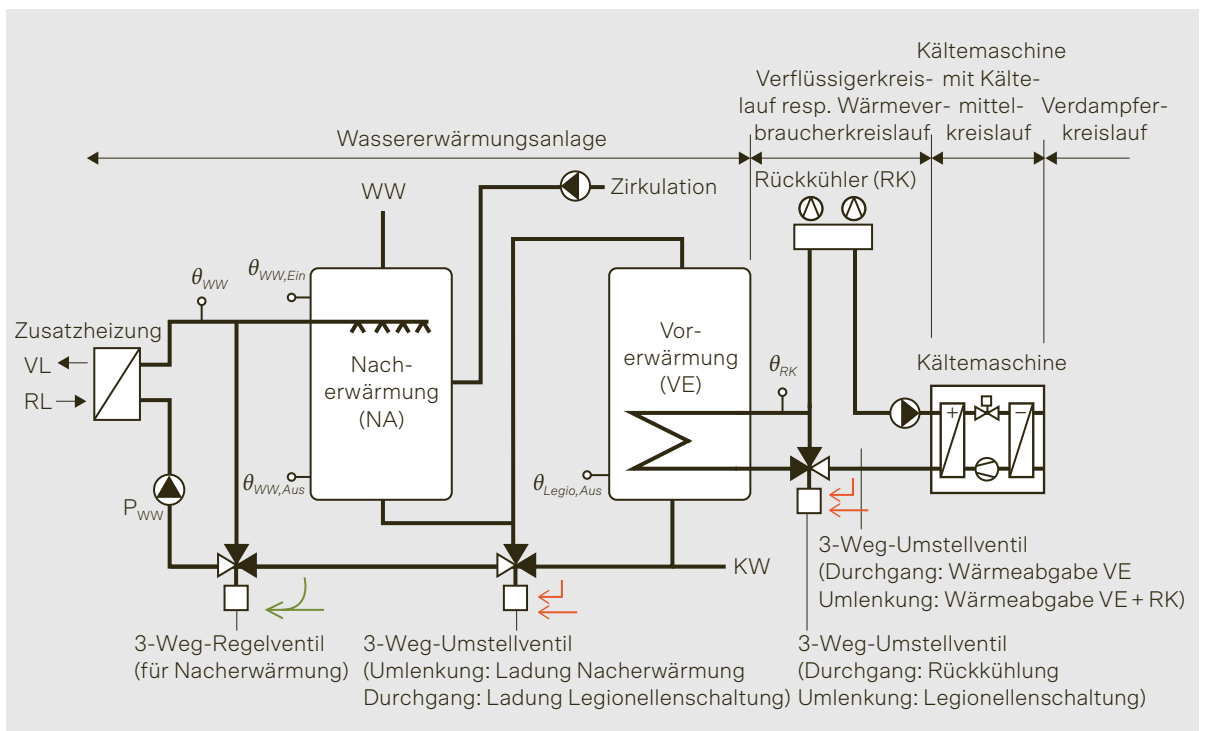


Bild 5.30: Abwärmee-nutzung (aus gewerblicher Kälte) im Trinkwasservolumen.

5.7 Legionellen

Legionellen sind im Wasser lebende Bakterien, die beim Menschen die Krankheit Legionellose verursachen können. Die Krankheitsbilder reichen von milden grippalen Symptomen bis hin zu schweren Lungenentzündungen. Die Infektion erfolgt über die Atemwege, etwa wenn jemand legionellenhaltige Aerosole einatmet. Legionellenhaltiges Wasser zu trinken ist hingegen nicht gefährlich, weil die Magensäure die Bakterien abtötet. Die [BAG/BLV-Empfehlungen] enthalten Informationen zu Legionellen und Legionellose sowie Empfehlungen für Präventionsmassnahmen. Legionellen kommen auch in natürlichen Gewässern und feuchten Milieus vor, aber meist in geringen Mengen. In wasserführenden Anlagen hingegen finden sie oft günstige Bedingungen, denn sie vermehren sich vorwiegend im Biofilm bei Temperaturen von 25 bis 45 °C. Deshalb wird in der [SIA 385/1] an allen Entnahmestellen eine Mindesttemperatur von 50 °C nach der siebenfachen Ausstosszeit verlangt. In den warmgehaltenen Leitungen (Zirkulationskreise und in Leitungen mit Warmhaltebändern) muss eine Mindesttemperatur von 55 °C aufrechterhalten werden. Bei einem warmgehaltenen Verteilsystem wird in der [SIA 385/1] keine Speichertemperatur definiert. Diese muss dann je nach Wär-

meverlusten der warmgehaltenen Leitungen bestimmt werden. Falls keine warmgehaltene Verteilung vorhanden ist, definiert die SIA-Norm eine Speichertemperatur von 55 °C am Austritt des Warmwasserspeichers.

Als Infektionsquellen kommen alle wasserführenden Anlagen infrage, bei denen sich Aerosole bilden können. Zu den wichtigsten Infektionsquellen im Trinkwasserbereich gehören:

- Grundsätzlich alle Entnahmestellen (wegen Aspirationsgefahr), besonders solche mit Aerosolbildung wie Duschen
- Verdunstungskühltürme
- Whirlpoolanlagen
- Apparate zur direkten Raumluftbefeuchtung

Grundsätze der Vorbeugung einer Legionellenvermehrung

Die Leitungsführung muss so geplant werde, dass das Wasser nicht in den kritischen Temperaturbereichen stagniert. Nicht warmgehaltene Verteilungen und Ausstossleitungen sollten nach einem Wasserbezug schnellstmöglich auf unter 25 °C abkühlen. Ein Wärmesiphon verhindert, dass sich die nicht warmgehaltenen Leitungen wegen einer möglichen Gegenstromzirkulation erwärmen (siehe Bild 5.32 und Bild 5.33).

Damit in warmgehaltenen Leitungen die Mindesttemperatur von 55 °C aufrecht

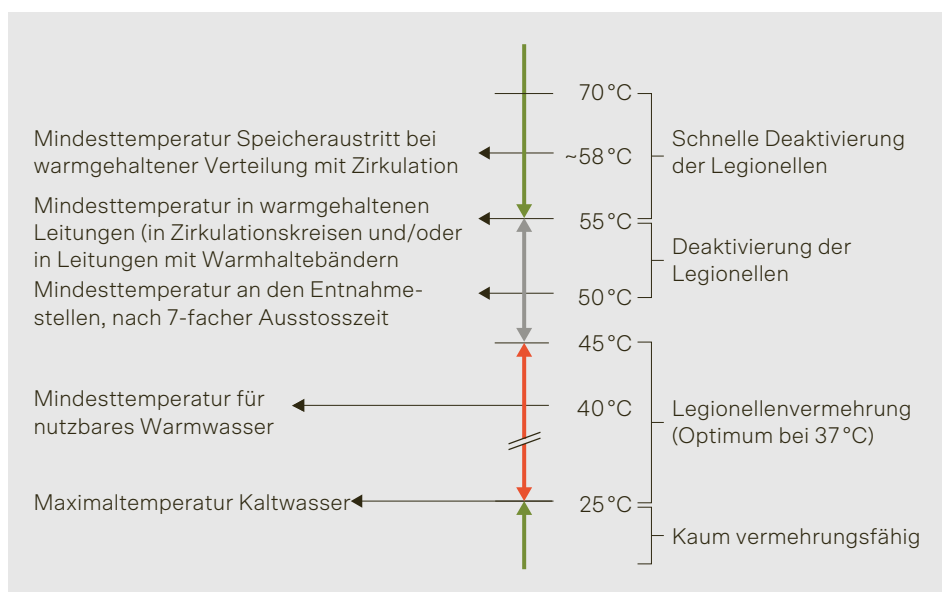


Bild 5.31: Einfluss der Warmwassertemperatur auf Legionellen und entsprechende Empfehlungen an die Auslegungstemperaturen gemäss [SIA 385/1].

erhalten werden kann, müssen die Leitungen durchgehend gedämmt werden. Bei einer Zirkulation ist der hydraulische Abgleich zwischen den Zirkulationskreisen unumgänglich (siehe Bild 5.34). Weiter müssen die Temperaturen bei warmgehaltenen Leitungen (Zirkulation

und Warmhaltebänder) und Komponenten überprüfbar sein (siehe Bild 5.35). Die Kaltwassertemperaturen dürfen nicht über 25 °C steigen. Deshalb müssen Kaltwasserleitungen durchgehend gegen Erwärmung gedämmt werden. Weiter sollten sie nicht parallel zu Warmwasser- oder Heizungsleitungen

Bild 5.32: Prinzip eines warmgehaltenen Verteilers.

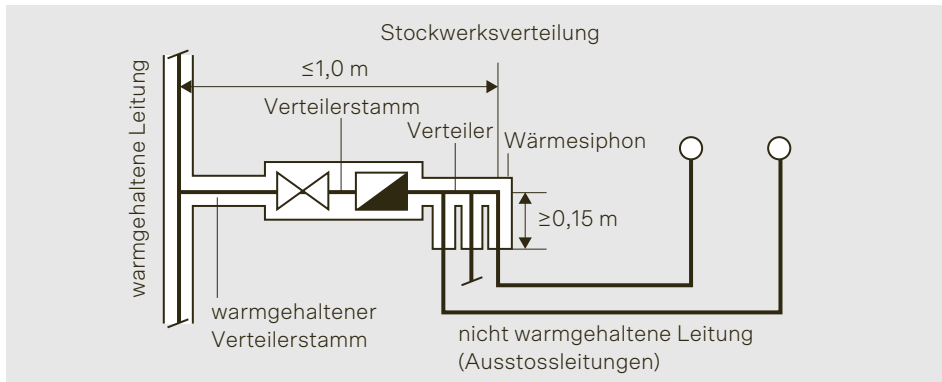


Bild 5.33: Prinzip eines nicht warmgehaltenen Verteilers.

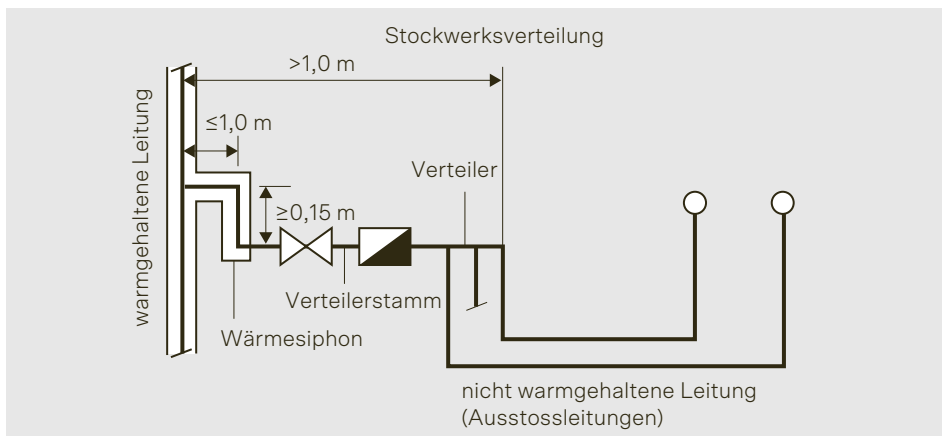
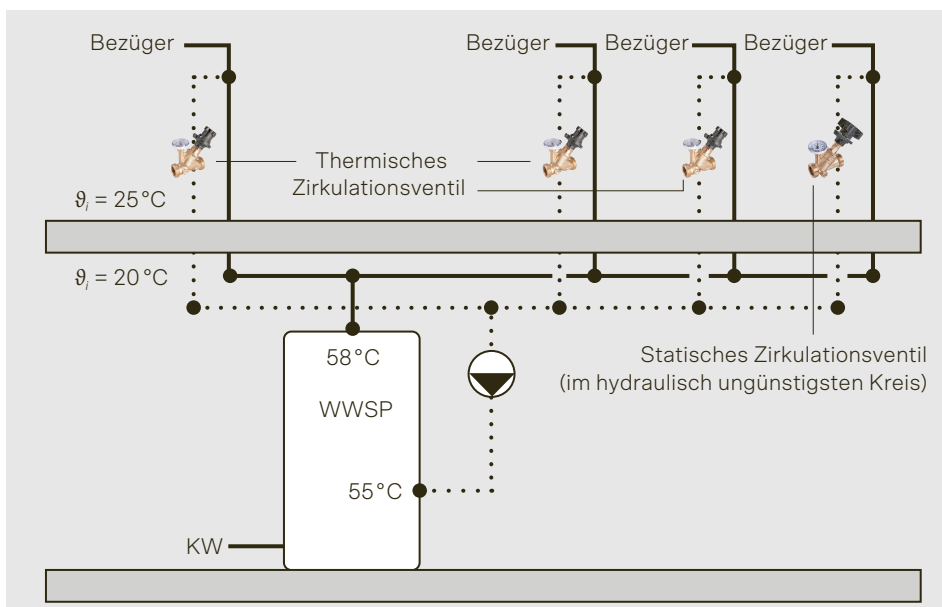


Bild 5.34: Der hydraulische Abgleich von allen Zirkulationskreisen muss möglich sein.



verlegt werden. Kaltwasserinstallatio-
nen sollten sich grundsätzlich nicht in
warmen Umgebungen befinden.

Empfohlene Materialien

In Trinkwasserinstallationen dürfen nur
toxikologisch und mikrobiologisch un-
bedenkliche Materialien verwendet wer-
den. Es werden Produkte empfohlen,
die mit dem SVGW-Konformitätszei-
chen «Wasser» oder «Hygienische Un-
bedenklichkeit» versehen sind (siehe
Bild 5.36).

Stagnierendes Wasser Vermeiden

Wasser muss fließen! Lange Stagnati-
onszeiten müssen nicht nur im Betrieb,
sondern bereits ab Erstbefüllung der In-
stallation vermieden werden. Wasser
sollte nicht mehr als 72 Stunden in
Trinkwasserinstallationen stehen. Wer-
den Entnahmestellen wie Duschen oder
andere aerosolbildende Armaturen län-
ger als eine Woche lang nicht benutzt,
sollten sie vor einem erneuten Einsatz
gespült werden. Dies betrifft insbeson-
dere Duschen in Hotelzimmern, Zweit-
und Ferienwohnungen, gegebenenfalls

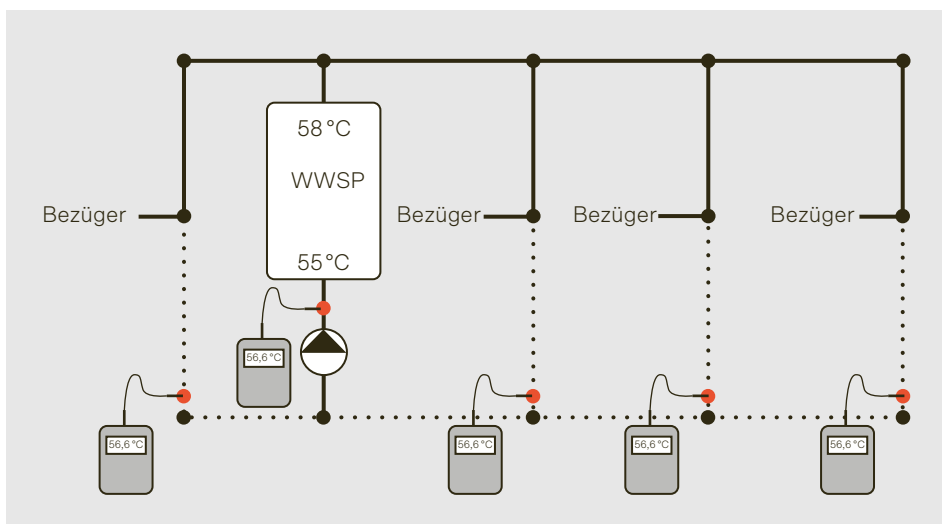


Bild 5.35: Tempera-
turen in allen Zirkula-
tionskreisen und
Strängen (Warmhal-
tebändern) müssen
überprüfbar sein.



Bild 5.36: Komformi-
tätszeichen «Was-
ser» (links) und «Hy-
gienische Unbeden-
klichkeit» des
[SVGW] (rechts).

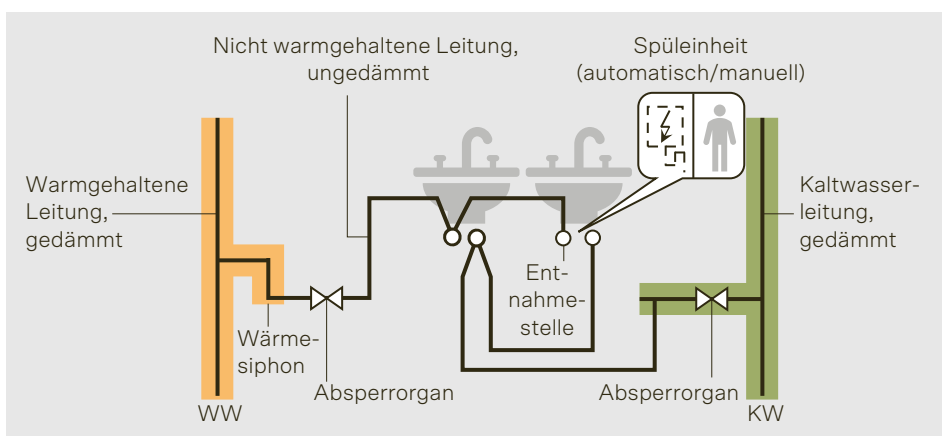


Bild 5.37: Stock-
werksverteilung mit
Spüleinheit – auto-
matisch oder manu-
ell – beispielsweise
in Spitälern, Pflege-
heimen oder Hotels.

auch Schulen mit reduzierter Nutzung während Ferienzeiten. Kalt- und Warmwasser-Bezugsstellen, die üblicherweise länger als drei Tage nicht benutzt werden, sollten regelmässig gespült werden. Dies kann manuell nach einem Spülplan oder automatisiert erfolgen (siehe Bild 5.37).

Wird eine Entnahmestelle nur selten oder nicht mehr genutzt, bietet sich ein Rückbau an. Der Rückbau sollte bis unmittelbar zum Abzweiger von der Verteilleitung erfolgen. Selten durchströmte Teilstrecken dürfen maximal viermal so lang wie die Nennweite sein (siehe Bild 5.38).

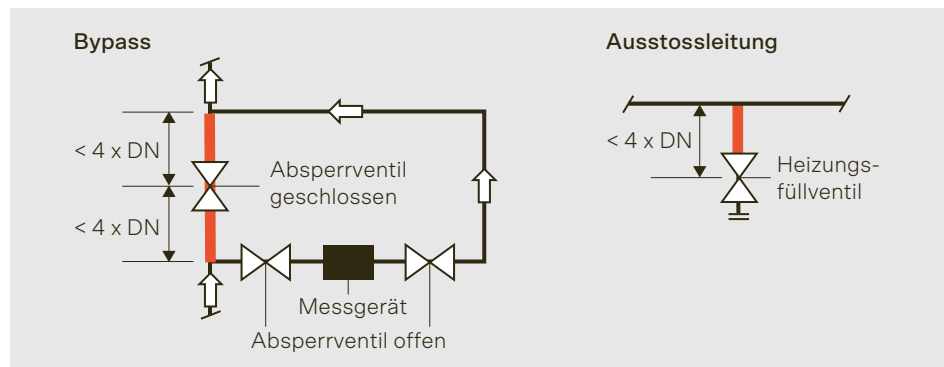


Bild 5.38: Länge von selten durchflossenen Teilstrecken ($l \leq 4 \times DN$).

5.8 Quellen

- [BAG/BLV-Empfehlungen] BAG-/BLV-Empfehlungen, Legionellen und Legionellose. Bundesamt für Gesundheit (BAG) und Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV). Bern, 2018. www.bag.admin.ch, www.blv.admin.ch
- [MuKE] Konferenz Kantonalen Energiedirektoren (EnDK). Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich – MuKE. Ausgabe 2014 (Nachführung 2018 – aufgrund geänderter Normen), Bern. www.endk.ch
- [SIA 385/1] Norm SIA 385/1. Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2020.
- [SIA 411] Norm SIA 411. Modulare Darstellung der Gebäudetechnik. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2016.
- [Stasch] Afjei Thomas.; et al. Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen – Teil 1: STASCH-Planungshilfen. Bundesamt für Energie. Bern, 2002.
- [SVGW] Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW). www.svgw.ch, Abgerufen Mai 2022.
- [WAS-WRG] Van Velsen Stefan, Benz Michael. Wärmerückgewinnung aus Schmutzwasser – Vorabklärung bezüglich des Potentials der Wärmerückgewinnung aus Schmutzwasser im Gebäude respektive auf dem Grundstück. Bundesamt für Energie. Bern, 2013.

Beleuchtung

Björn Schrader 6.1 Energieeffiziente Beleuchtung

Die Beleuchtung von Gebäuden erfolgt vorzugsweise mittels Tageslicht, denn Tageslicht ist CO₂-neutral und kostenlos. Ausserdem besitzt es eine herausragende Lichtqualität, weshalb die Nutzerinnen und Nutzer eines Gebäudes Tageslicht gegenüber Kunstlicht bevorzugen. Daher sollte die Zeit, in der Kunstlicht im Gebäude benötigt wird, auf ein Minimum reduziert werden. Zur energetischen Bewertung der Beleuchtung in einem Gebäude wird in der Schweiz die Norm [SIA 387/4] verwendet. Auch Gebäudelabel wie Minergie verlangen die Anwendung der Norm.

Tageslichtplanung in der frühen Projektphase

Für eine optimale Tageslichtversorgung ist es entscheidend, die Öffnungen der Gebäudehülle bewusst zu platzieren und zu dimensionieren. Weitere Faktoren wie der sommerliche Wärmeschutz oder die passive Solarenergienutzung beeinflussen die Planung der Gebäudeöffnungen ebenfalls. Ausserdem ermöglichen die Gebäudeöffnungen den Blick ins Freie, und die Nutzerinnen können sich über ihre Umwelt informieren, etwa zu Tageszeit, Position oder Wetter. Beim Entwurf des Gebäudes müssen das Klima sowie der Standort mit seiner Topografie und seinen Verbauungen zwingend berücksichtigt werden. Nur so können wichtige Entscheidungen wie Ausrichtung und Kubatur, die grossen Einfluss auf die Tageslichtversorgung und auch auf den Gesamtenergieverbrauch haben, frühzeitig in die richtigen Bahnen gelenkt werden. Im weiteren Projektverlauf können diese kaum geändert werden, und eine falsche Entscheidung lässt sich später nur mit grossem gebäudetechnischem Aufwand ausgleichen.

Zielkonflikte

Die Tageslichtnutzung steht in einem unmittelbaren Zielkonflikt zu anderen Anforderungen: Im Winter ist die optimale Nutzung der passiven solaren Gewinne gefragt, was mit der Tageslichtnutzung gut vereinbar ist. Im Sommer soll das Gebäude jedoch vor Überhitzung durch die Solarstrahlung geschützt werden. Die strengen Vorgaben im Bereich des sommerlichen Wärmeschutzes haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass eine über das ganze Jahr optimale Tageslichtnutzung eine grosse Herausforderung ist.

Bild 6.1: Oblichter sorgen für ausreichend natürliches Licht im Schulzimmer. (Foto: Velux)



6.2 Tageslicht

Die optimale Nutzung von Tageslicht hilft, den Stromverbrauch für die Beleuchtung von Gebäuden massiv zu reduzieren. Im Schweizer [Arbeitsgesetz] ist die besondere Bedeutung des Tageslichts für die Gesundheit hinterlegt.

Einflussparameter auf die Tageslichtversorgung

Bild 6.2 zeigt, dass eine gute Tageslichtversorgung nicht durch eine einfache Flächengewichtung, beispielsweise Glasfläche zu Bodenfläche, erreicht werden kann. Dabei bleiben die meisten lichttechnisch relevanten Parameter unberücksichtigt. Daher muss die Schweizer Norm [SN EN 17037] «Tageslicht in Gebäuden» bei der Auslegung der Gebäudeöffnungen berücksichtigt werden. In der Norm wird die Beurteilung des Tageslichts in Innenräumen behandelt. Dabei werden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Tageslichtzufuhr
- Aussicht
- Sonnenlichtexposition
- Blendschutz

Einfache Abschätzmethode in frühen Planungsphasen

In frühen Planungsphasen kann mit einfachen Abschätzmethode gearbeitet werden, um gute Voraussetzungen für die Tageslichtversorgung zu schaffen. Die folgenden Empfehlungen lassen sich mit den in Tabelle 6.1 beschriebenen Abschätzmethode gut nachvollziehen.

- Der obere Teil des Fensters lässt Licht in die Tiefe des Raumes. Die Sturzhöhe sollte daher so klein wie möglich sein.
- Der untere Teil des Fensters bringt für die Belichtung des Raumes nur einen geringen Nutzen. Eine Brüstung bis auf Arbeitshöhe ist sehr sinnvoll.
- Balkone und feste Auskragungen beeinflussen die Tageslichtversorgung über das ganze Jahr negativ. In der Schweiz eignen sich horizontale Auskragungen auch nur selten als sommerlicher Wärmeschutz. Deshalb erfordern

sie eine genaue Analyse bezüglich ihrer Wirksamkeit.

- Bei der Wahl des Glases müssen der Lichttransmissionsgrad τ sowie der g- und der U-Wert berücksichtigt werden.
- Oberlichter können bei gleicher Grösse einen Raum besser mit Tageslicht versorgen als Fenster, weil mehr Licht direkt vom Himmel in das Gebäude dringen kann.

Sommerlicher Wärmeschutz und Blendschutz

Bei allen Überlegungen zum Tageslicht muss der sommerliche Wärmeschutz mitberücksichtigt werden. Der Blendschutz ist vor allem für Arbeitsplätze wichtig, sollte sich aber an der Art der Raumnutzung und an den Bedürfnissen der Nutzer orientieren. In vielen Wohngebäuden kann der Blendschutz vernachlässigt werden.

Grundsätzlich wird der Blendschutz auf der innenliegenden Fensterseite montiert, um im Winter auch die passiven solaren Gewinne nutzen zu können. Ausserdem sollte der Blendschutz auch dann einen Aussenbezug zulassen, wenn er geschlossen ist. Dies lässt sich beispielsweise durch die Perforation der Behänge erreichen.

Im weiteren Verlauf der Planung kann mittels Softwaretools der Tageslichtquotient für die unterschiedlichen Nutzungszonen des Gebäudes ermittelt werden. Er stellt das Verhältnis zwischen Aussen- und Innenraumbeleuchtungsstärke an einem bestimmten Punkt im Raum dar. Die SN EN 17037 gibt Zielwerte für den Tageslichtquotienten vor.

Noch genauere Aussagen zum späteren Gesamtenergieverbrauch des Gebäudes liefern integrale Simulationen mit Klimadaten des jeweiligen Standortes. So können auch mögliche Fahrstrategien für den sommerlichen Wärmeschutz evaluiert werden.

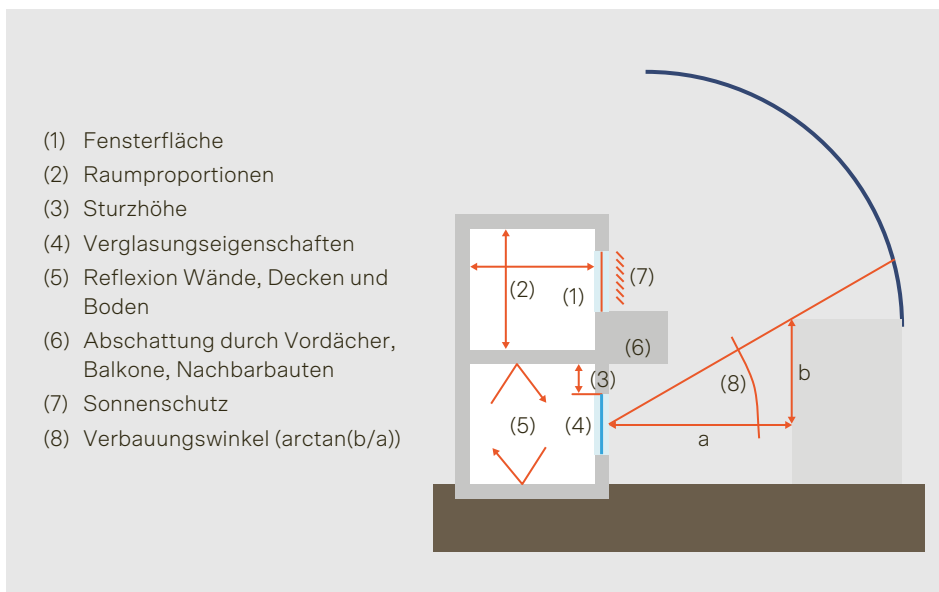


Bild 6.2: Die wichtigsten Einflussparameter auf die Tageslichtversorgung von Innenräumen. (Quelle: [Minergie Tageslicht])

Abschätzungsmethoden zur Tageslichtversorgung	
<p>2H-Regel – Tageslichtversorgung in die Raumtiefe (Schnitt)</p> <p>Tageslicht kann bis in eine Raumtiefe eindringen, die gleich dem Zweifachen der Höhe der Fensteroberkante im Raum ist. Alternativ kann auch ein Winkel von 30° an der Oberkante des Fensters abgetragen werden.</p>	
<p>Verschattung durch Auskragungen oder Balkone</p> <p>Auskragungen verkürzen den Bereich, in dem Tageslicht genutzt werden kann, um das gleiche Maß, wie die Auskragung tief ist.</p>	
<p>Verschattung durch Verbauung</p> <p>Die Abschattung durch gegenüberliegende Objekte beeinträchtigt die Tageslichtversorgung insbesondere in der Raumtiefe, weil die Objekte die Direktverbindung zwischen Himmel und Nutzfläche unterbrechen.</p>	<p style="text-align: right;">Schnitt</p>
<p>45°-Regel – seitliche Tageslichtversorgung im Raum (Grundriss)</p> <p>Ein vertikales Fenster lässt ausreichend seitliches Licht in die Bereiche des Raumes, die in einem Winkel von 45° links und rechts des Fensters liegen.</p>	<p style="text-align: right;">Grundriss</p>

Tabelle 6.1: Mittels einfacher Regeln lässt sich die Tageslichtversorgung eines Raumes bereits in frühen Planungsphasen abschätzen. (Quelle: [Minergie Tageslicht])

6.3 Kunstlicht

Die Energieeffizienz einer Beleuchtungsanlage ist nur ein Teilaspekt unter vielen bei der Kunstlichtplanung. Heute werden weitere Anforderungen an eine integrative Kunstlichtplanung gestellt.

Anforderungen Kunstlichtplanung

In erster Linie muss die Planung folgende drei Hauptwirkungen des Lichts berücksichtigen:

- Visuelle Wirkung von Licht
- Emotionale Wirkung von Licht
- Biologische Wirkung von Licht

Der Sonnenverlauf und das Tageslicht prägen den Rhythmus des Menschen. Mit dem Aufkommen des elektrischen Lichts im 19. Jahrhundert brach eine neue Epoche an. Im Zuge der Industrialisierung wurde der Umgang mit künstlichem Licht näher untersucht, um die Beleuchtung auf die Sehauflagen der einzelnen Arbeitsprozesse abzustimmen und die Produktivität zu steigern. In diesem Zusammenhang entstanden die ersten lichttechnischen Regelwerke. Mit weiteren Erkenntnissen wurden diese angepasst und zu den heute gültigen Normen entwickelt.

Bild 6.3: Lichtlösung mit einer Mischung aus Pendelleuchten über den Arbeitsplätzen und präzise positionierter Aufbaustrahler, die die Wände beleuchten.
(Foto: Zumtobel)



Quantitative und qualitative Lichtplanung

Beruhet die Lichtplanung ausschliesslich auf dem Nachweisen der in den Normen hinterlegten Werte, wird von einer «quantitativen Lichtplanung» gesprochen. Dabei gilt es neben der Beleuchtungsstärke weitere Werte wie Gleichmässigkeit, Blendung, Leuchtdichteverteilung etc. nachzuweisen [SN EN 12464-1].

Licht unterstützt und beeinflusst die Raumwirkung und die -atmosphäre. Werden wahrnehmungspsychologische und raumbeeinflussende Aspekte des Lichts berücksichtigt, spricht man von einer «qualitativen Lichtplanung». Die Abstimmung des Lichts auf den Raum und seine Materialien ist dabei entscheidend, um eine positive emotionale Wirkung bei den Nutzerinnen auszulösen.

Integrative Lichtplanung

Wird auch die dritte Funktion, die biologische Wirkung des Lichts, in die Planung einbezogen, spricht man von «integrativer Lichtplanung». Die biologische Wirkung des Lichts erhält in den letzten Jahren immer mehr Beachtung. Dabei wird untersucht, wie Licht wichtige Prozesse im menschlichen Körper beeinflusst. Erst 2001 wurde der für die Synchronisation des Wach-Schlaf-Rhythmus verantwortliche Rezeptor nachgewiesen. Seitdem sind grosse Anstrengungen zur Erforschung der Zusammenhänge und Wirkungsmechanismen von Licht auf den Menschen unternommen worden.

2019 hat die Internationale Beleuchtungskommission CIE den [Standard S 026] herausgegeben, der die spektrale Empfindlichkeit der unterschiedlichen Rezeptoren definiert. Empfehlungen und Handlungsanweisungen für Planende, die eine einfache Implementierung in die Praxis ermöglichen, sind jedoch noch kaum vorhanden.

Kunstlichtplanung in der frühen Projektphase

Die Beleuchtungsanlage wird zwar erst gegen Ende der Erstellung im Gebäude installiert. Wie erwähnt geht es bei der heutigen integrativen Lichtplanung um mehr als nur um die Belichtung von Räumen. Die Beleuchtungsanlage ist keine rein gebäudetechnische Installation, sondern ein raumgestalterisches Element, das in einem interdisziplinären Team erarbeitet wird.

Daher muss frühzeitig entschieden werden, welches Gewicht die Lichtplanung (Tageslicht und Kunstlicht) erhalten soll und ob es sich um eine rein quantitative Lichtplanung handelt. Wird ein integrativer Ansatz gewählt, der die emotionalen und biologischen Wirkungen berücksichtigt, erfordert dies erweiterte Kompetenzen, die nicht bei einem Elektroplaner angesiedelt sind.

Energieeffizienz und Gebäudeautomation

Die künstliche Beleuchtung hat grossen Einfluss auf den Elektrizitätsverbrauch in einem Gebäude [BFE]. Neben effizienten Leuchten ist eine Lichtsteuerung, die sowohl das Tageslicht als auch die Präsenz berücksichtigt, eine Grundvoraussetzung zum Erreichen der Energievorgaben gemäss der SIA 387/4. Dabei wird auch hier wieder eine gute Tageslichtversorgung vorausgesetzt.

Im Zweckbau ist eine intelligente Steuerung von Beleuchtung und Beschattung heute Standard. Im Wohnbau hat sie sich bisher nicht durchgesetzt, ist aber auch dort unbedingt empfehlenswert, um den Komfort und die Energieeffizienz zu steigern. Details zur Gebäudeautomation liefert Kapitel 8.

Normen

Vorgaben zur künstlichen Beleuchtung sind in der Wegleitung zur Verordnung 3 zum Arbeitsgesetz verankert und in der SN EN 12464-1 hinterlegt. Neben der Beleuchtungsstärke müssen Vorgaben zu Farbwiedergabe, Gleichmässigkeit, Blendung etc. eingehalten werden.

Die Vorgaben zur Beleuchtungsstärke werden auch im Merkblatt [SIA 2024] «Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik» referenziert, das für die Vorprojektphase herangezogen werden sollte.

Als Kenngrösse zur Überprüfung der energieeffizienten Kunstlichtplanung wird die spezifische Leistung p , mit der Einheit W/m^2 verwendet. Im weiteren Projektverlauf wird schliesslich die SIA 387/4 angewendet, die auch die Vorgaben der SN EN 12464-1 referenziert.

Das übergeordnete Ziel der SIA 387/4 ist die Optimierung des Elektrizitätsbedarfs. Dieser erfasst nicht nur die Beleuchtung, sondern alle baulichen und gebäudetechnischen Einflussgrössen. Die Optimierung des Elektrizitätsbedarfs erfolgt daher aus der Sicht des Planungsteams und nicht der einzelnen Fachplanerin. Als Kenngrösse zur Überprüfung einer energieeffizienten Lichtplanung (Tageslicht, Kunstlicht, Steuerung) wird der spezifische Elektrizitätsbedarf pro Jahr mit der Einheit kWh/m^2a verwendet.

Abschätzmethoden

Für erste Konzeptüberlegungen können auch bei der Kunstlichtplanung Abschätzmethoden verwendet werden. Im weiteren Prozessverlauf wird die Planung mittels lichttechnischer Simulationen und Visualisierungen konkretisiert. Die folgenden Methoden dienen einem ersten Plausibilitätscheck in einer frühen Projektphase. Die aufgeführten lichttechnischen Grundgrössen werden in Abschnitt 6.4 erläutert.

$$E_n = \frac{\Phi_{ges} \cdot \eta_R \cdot \eta_L \cdot WF}{A}$$

E_n =	Nennbeleuchtungsstärke
A =	Beleuchtete Fläche
Φ_{ges} =	Lichtstrom aller Leuchten
η_R =	Raumwirkungsgrad
η_L =	Leuchtenwirkungsgrad
WF =	Wartungsfaktor

Stark vereinfachte Berechnung:

$$k_p = \eta_R \cdot \eta_L \cdot WF$$

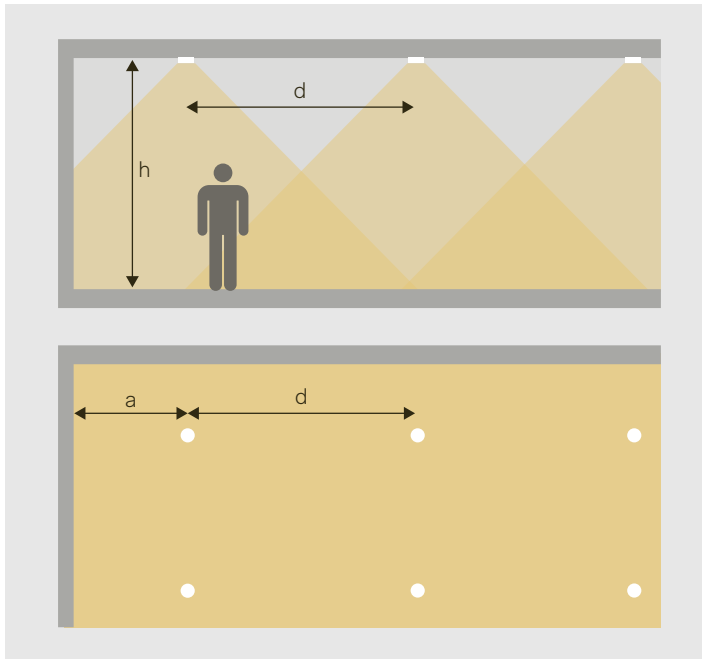
$$E_n = \frac{\Phi_{ges} \cdot k_p}{A}$$

Unter der Annahme, dass es sich um eine effiziente Leuchte und um helle Räume mit rund 3 m Raumhöhe handelt, kann für $k_p = 0,6$ angenommen werden.

Ein weiterer Aspekt bei der Auslegung der Beleuchtung sind die Abstände zwischen den Leuchten. Diese sind sowohl aus lichttechnischer als auch aus energetischer und ökonomischer Sicht entscheidend. Als Faustregel gilt: Der Abstand zwischen den Leuchten d entspricht der Höhe h zwischen dem Boden und der Unterkante der Leuchte. Für eine gleichmässige Verteilung sollte der Abstand zur Wand a der Hälfte von d entsprechen (Bild 6.4).

Bild 6.4: Der Abstand zwischen den Leuchten d sollte der Höhe h entsprechen.

Der Abstand zur Wand a sollte der Hälfte von d entsprechen. (Quelle: [Ercol])



6.4 Lichttechnische Grundlagen und Grössen

Als Licht wird der Wellenlängenbereich zwischen 380 und 780 nm der elektromagnetischen Strahlung bezeichnet (Bild 6.5). Dieser Bereich ruft im Auge eine Hell- und eine Farbempfindung hervor.

Lichtstrom Φ

Einheit: Lumen (lm)

Der Lichtstrom Φ gibt an, welche Lichtmenge eine Lichtquelle abgibt.

$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} s(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

Beleuchtungsstärke E

Einheit: Lux (lx)

Die Beleuchtungsstärke E beschreibt die Menge des Lichtstroms, die auf eine Fläche trifft. Die Beleuchtungsstärke ist eine der Grössen, die in den lichttechnischen Normen wie der SN EN 12464-1 hinterlegt ist und die bei der Planung eingehalten werden muss.

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

Leuchtdichte L

Einheit: (cd/m²)

Die Leuchtdichte L ergibt sich aus dem Verhältnis der ausgestrahlten Lichtstärke I zur Grösse der leuchtenden Fläche A , die vom Auge aus einer bestimmten

Beleuchtungsstärkewerte

Tageslicht	5000–100 000 lx
Vollmond	1 lx
Büro	500 lx

Tabelle 6.2: Beleuchtungsstärken im Vergleich.

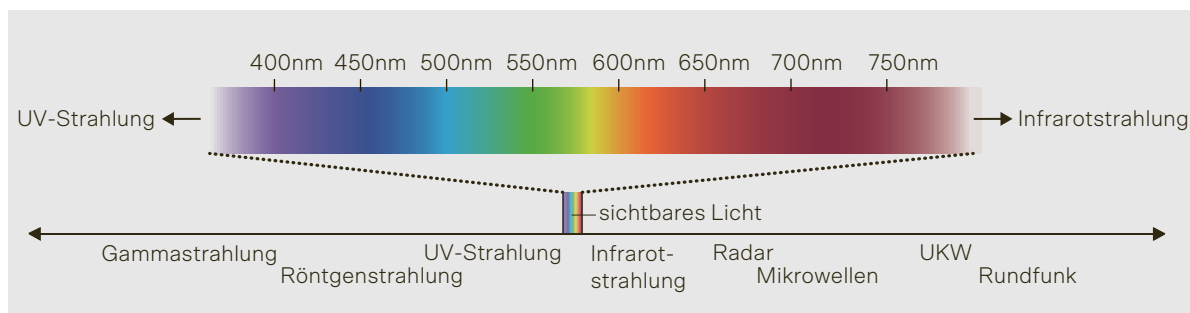


Bild 6.5: Elektromagnetische Strahlung und das für den Menschen sichtbare Spektrum. (Quelle: Wikipedia)

Richtung gesehen wird. Die Leuchtdichte ist die einzige lichttechnische Grundgrösse, die das menschliche Auge direkt wahrnehmen kann. Zur Veranschaulichung kann dafür am ehesten der Begriff der Helligkeit verwendet werden.

Reflexionsgrad ρ

Der Reflexionsgrad ρ ist eine einheitenlose Materialgrösse. Er gibt an, wie viel Licht – respektive elektromagnetische

Strahlung – von einer Oberfläche reflektiert wird.

- 0 = ideal schwarz (= keine Reflexion)
- 1 = ideal weiss (= maximal mögliche Reflexion)

Für völlig diffuse Materialien (beispielsweise Papier oder matte Dispersionsfarbe) gilt folgender Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke E und Leuchtdichte L :

$$L = \frac{E \cdot \rho}{\pi}$$

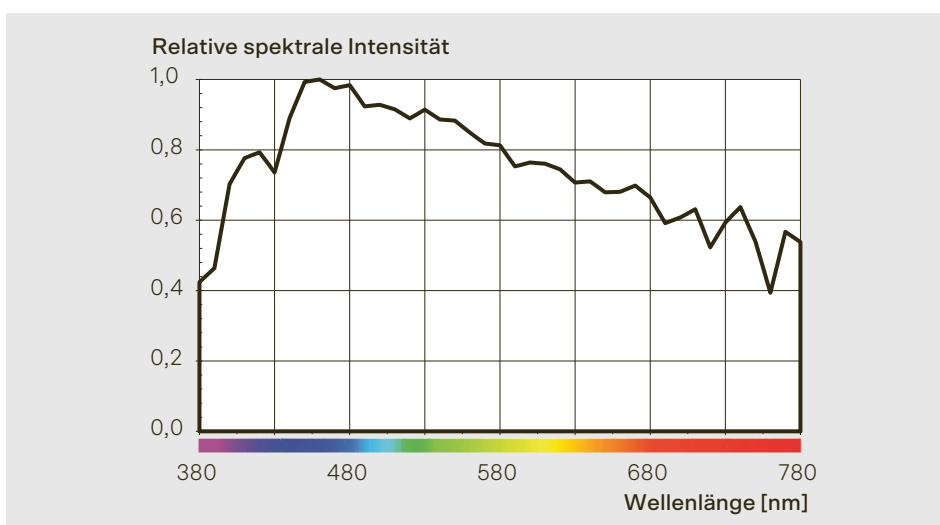


Bild 6.6: Strahlungsfluss $s(\lambda)$ des Tageslichtspektrums. (Quelle: Licht@hslu)



Bild 6.7: Lichttechnische Grundgrössen.

Raumwinkel Ω

Einheit: Steradian (sr)

Der Raumwinkel Ω ist die Fläche einer Kugelkappe der Einheitskugel dividiert durch den Radius der Einheitskugel R im Quadrat. Der Raumwinkel wird benötigt, um andere lichttechnische Grössen zu berechnen.

Lichtstärke I

Einheit: Candela (cd)

Die Lichtstärke I bezeichnet den Teil des Lichtstroms, der in eine bestimmte Richtung (pro Raumwinkel) abgestrahlt wird (Bild 6.8).

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

Bild 6.8: Der Lichtstrom Φ pro Raumwinkel Ω ergibt die Lichtstärke I . (Quelle: Schrader 2011, eigene Darstellung)

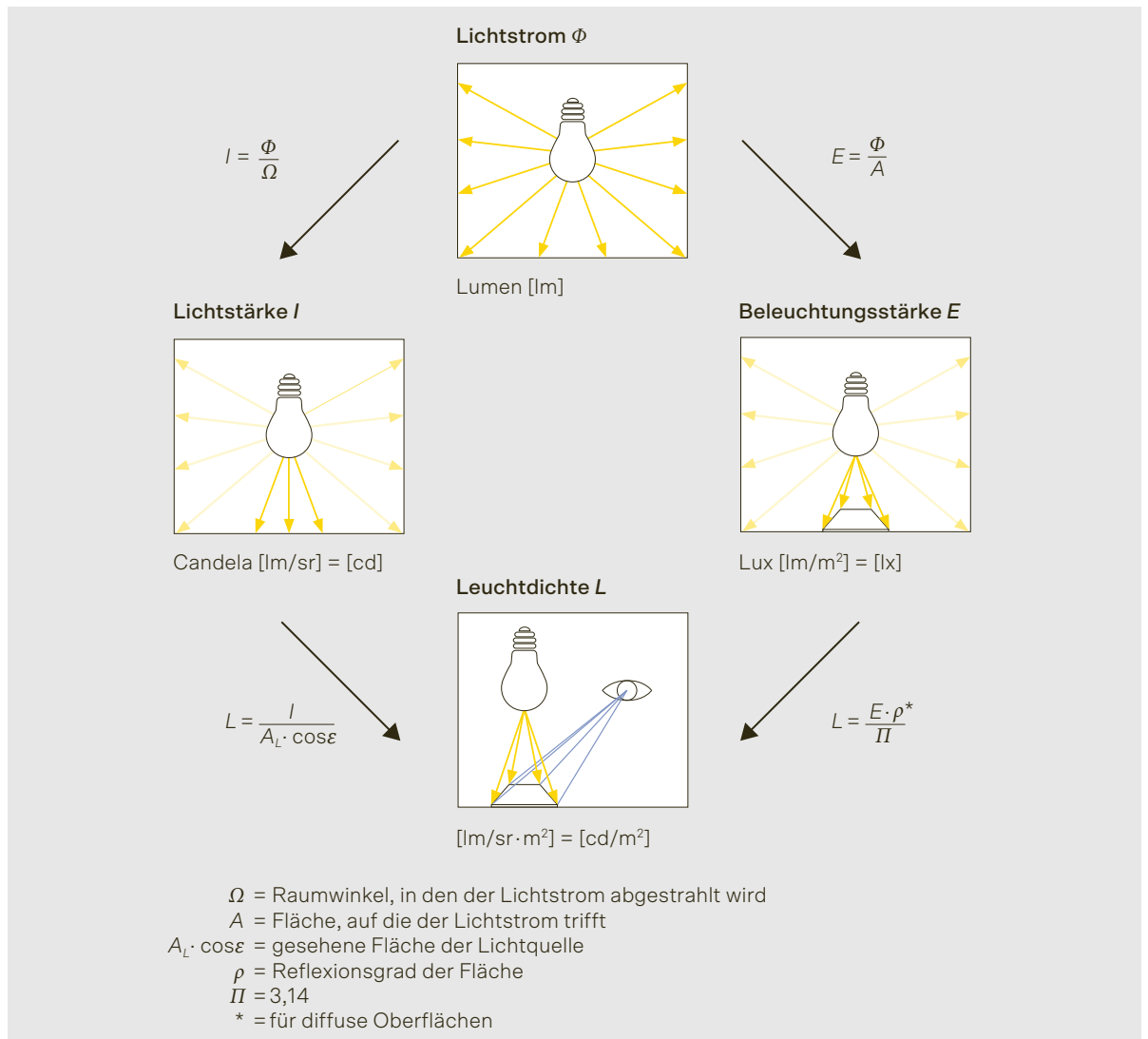
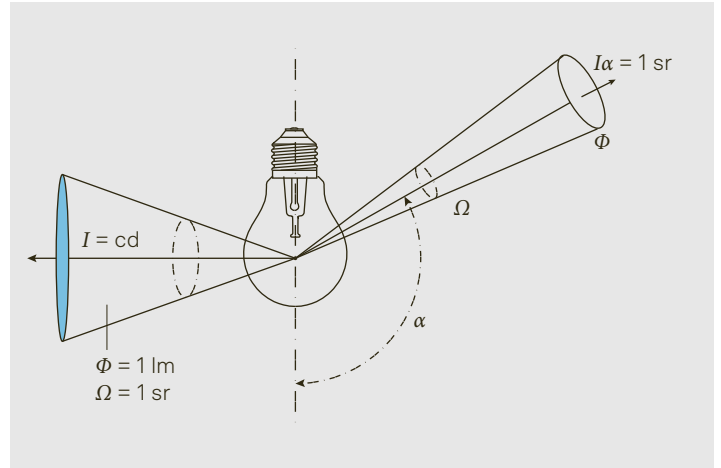


Bild 6.9:
Zusammenhang der
lichttechnischen
Grundgrössen.
(Quelle: Zumtobel)

Lichtstärkeverteilungskurve

Werden die Lichtstärkewerte in der jeweiligen Richtung als Länge abgetragen, erhält man die räumliche Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) einer Lichtquelle. Bild 6.10 zeigt beispielhaft die LVK eines Downlights. Die Lichtstärkeverteilungskurve dient zur Beurteilung der Strahlungscharakteristik einer Leuchte.

6.5 Lampen und Leuchten

Eine Leuchte ist eine Vorrichtung zur Beleuchtung, in die ein Leuchtmittel fest eingebaut ist oder eingebaut werden kann. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden Leuchten meist als Lampen bezeichnet. Fachsprachlich ist die Lampe jedoch das Leuchtmittel, zum Beispiel die Glühlampe oder die Leuchtstofflampe. Die Leuchte besteht aus dem Gehäuse, der Montagevorrichtung, dem Reflektor, der Lampenfassung und, je nach Leuchtentyp, dem Betriebsgerät (Bild 6.11).

Lampenarten

Auf dem Markt existierten bis vor rund zehn Jahren zahlreiche unterschiedliche Lampen. Diese unterschieden sich in ihrer Art der Lichterzeugung, der Leistungsstufe, der Effizienz, dem Sockel und weiteren Eigenschaften voneinander. Die Auswahl der Lampe war stark von der jeweiligen Anwendung abhängig, und sie war entscheidend für die Effizienz der Beleuchtungslösung. Seit 2010 werden immer mehr lichtemittierende Dioden (LED) verwendet. In weniger als zehn Jahren hat die LED-Technik die Lichterzeugung revolutioniert. Heute ist LED die Hauptlichtquelle, und die klassischen Lampen haben kaum noch eine Bedeutung im Markt. Dadurch werden kaum noch ineffiziente Lampen eingesetzt. Aus diesem Grund wird hier auf die unterschiedlichen Lichterzeugungsarten und Lampen nicht näher eingegangen.

Bild 6.10: Lichtstärkeverteilungskurve eines Downlights, das den gesamten Lichtstrom nur nach unten abstrahlt. (Quelle: Anzeige der LVK in der Software [Relux])

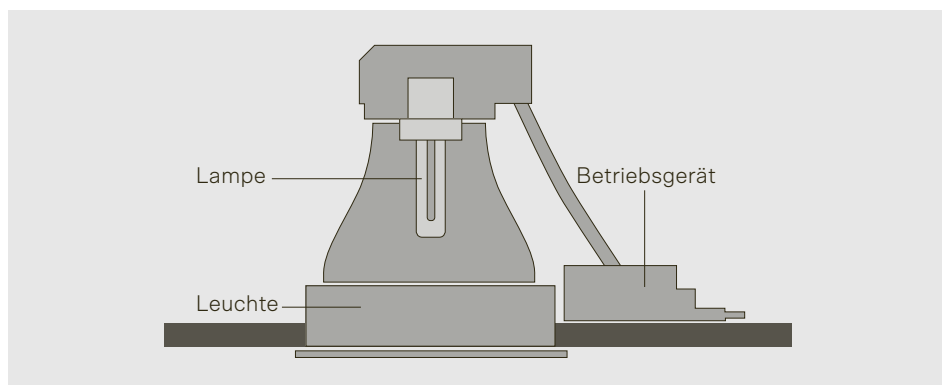
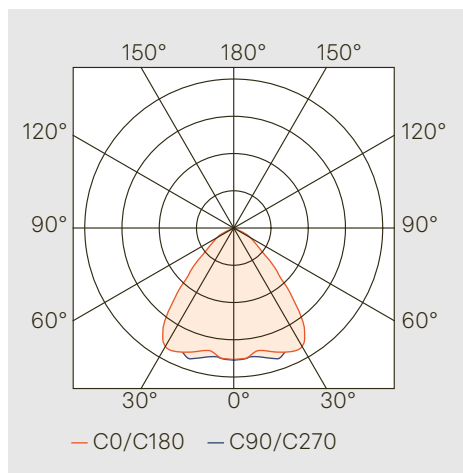


Bild 6.11: Unterscheidung Leuchte – Lampe. (Quelle: Licht@hslu)

Eigenschaften von Lampen:

Jede Lichtquelle hat ein charakteristisches Spektrum, das von der Art der Lichterzeugung abhängt (Bild 6.12). Aus dem Spektrum der Lichtquelle lassen sich wichtige Eigenschaften ermitteln, die für die Lichtqualität entscheidend sind. Für die Lichtplanung sind der Lichtstrom, die Farbtemperatur und die Farbwiedergabe die wichtigsten Größen.

Lichtstromausbeute der Lampe:

Einheit: Lumen/Watt [lm/W]
Die Leistungsaufnahme in Watt gibt an, wie viel Leistung P die Lampe beim Betrieb benötigt. Aus dem Lichtstrom Φ und der Leistung P lässt sich die Lichtstromausbeute der Lampe berechnen,

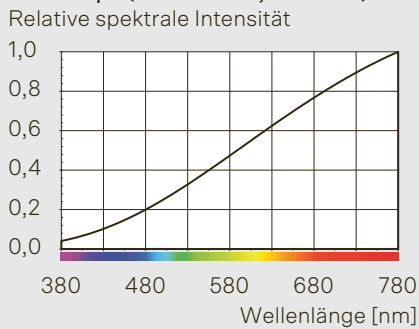
die als Mass für die Effizienz der Lichtquelle verwendet wird.

$$\eta_{Lampe} = \frac{\Phi}{P}$$

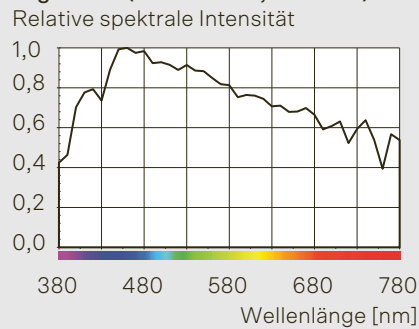
Farbwiedergabe:

Der Farbeindruck, den eine Lichtquelle auslöst, ist auf deren Abstrahlungsspektrum zurückzuführen. Der Farbwiedergabeindex Ra (englisch Colour Rendering Index, CRI) ist eine Grösse, mit der sich die Qualität der Farbwiedergabe von Lichtquellen beschreiben lässt. Zur Beurteilung werden 8 respektive 14 Testfarben herangezogen. Der Farbwiedergabeindex ist einheitenlos; das Maximum liegt bei einem Wert von 100 und wird nur von Glühlampenlicht und Tageslicht erreicht. Von einer guten Farb-

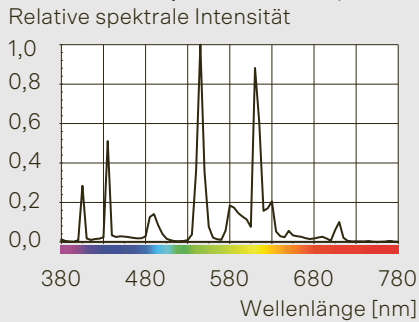
Glühlampe (Ta = 2700 K, Ra = 100)



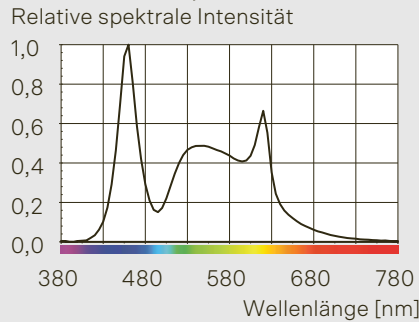
Tageslicht (Ta = 6500 K, Ra = 100)



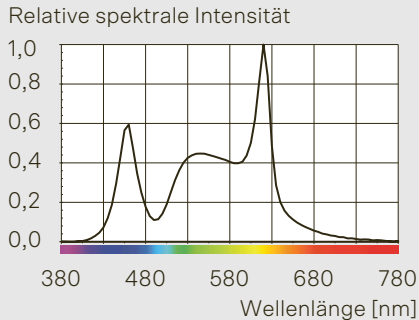
Leuchtstofflampe (Ta = 4000 K, Ra = 80)



LED (Ta = 5700 K, Ra = 89)



LED (Ta = 3700 K, Ra = 92)



LED (Ta = 2700 K, Ra = 89)

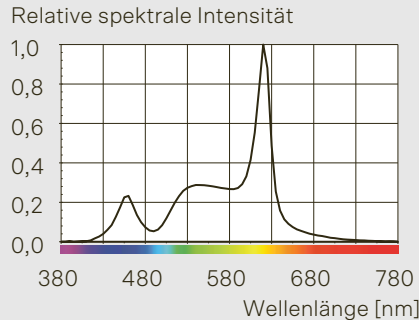


Bild 6.12: Charakteristisches Spektrum unterschiedlicher Lichtquellen.
Ta: Farbtemperatur
Ra: Farbwiedergabeindex
(Quelle: Licht@hslu)

wiedergabe spricht man ab einem Wert von 80 und von einer sehr guten ab einem Wert von 90.

Das in die Jahre gekommene System ist für die Beurteilung von LED unzureichend. Für eine genauere Aussage kann der Ra für 14 Testfarben mit der zusätzlichen Angabe des R9-Wertes für gesättigtes Rot genutzt werden. Alternative Systeme wie das [TM-30] der Internationalen Beleuchtungskommission CIE sind Gegenstand internationaler Diskussionen. Sie eignen sich besser für die Beurteilung der Farbwiedergabe von LED, haben sich aber noch nicht durchgesetzt.

Farbtemperatur:

Die Farbtemperatur T_a , (englisch CCT, Correlated Color Temperature) wird in Kelvin (K) angegeben. Sie sagt aus, wie die Farbe der Lichtquelle empfunden wird, etwa als warm oder als kalt (Bild 6.13). Es wird auch der Begriff Lichtfarbe verwendet.

Die Farbtemperatur ist die Temperatur eines schwarzen Strahlers, der den gleichen Farbeindruck wie die bewertete Lampe hervorruft. Glühlampen haben eine Farbtemperatur von 2500 bis 3400 K. Bei Halogenglühlampen liegt die Farbtemperatur etwas höher. LED decken ein Spektrum von etwa 1500 bis 8000 K ab.

Zur Vereinfachung werden die Farbtemperatur und die Farbwiedergabe bei vielen Lichtquellen codiert mit drei Zahlen (YXX) angegeben. Die erste Zahl gibt Auskunft über den Farbwiedergabeindex, die letzten beiden Zahlen beziehen sich auf die Farbtemperatur.

965 beispielsweise bedeutet Farbwiedergabeindex $R_a \geq 90$ und Farbtemperatur 6500 K.

Leuchtentypen

Auf dem Markt gibt es sehr viele unterschiedliche Leuchtentypen. Die Auswahl des richtigen Typs für die jeweilige Anwendung sollte durch einen Lichtplaner erfolgen.

Die meisten Lampen benötigen für einen stabilen Betrieb ein Vorschaltgerät oder einen Treiber, der die notwendige Strom- beziehungsweise Spannungsversorgung übernimmt. Dabei wird zwischen dimmbaren und nichtdimmbaren Geräten unterschieden. Darüber hinaus gibt es intelligente dimmbare Treiber mit einer Bus-Schnittstelle; diese basieren heute mehrheitlich auf dem DALI-Standard. Der Stand-by-Verbrauch von modernen DALI-Vorschaltgeräten liegt bei unter 0,3 W pro Gerät.

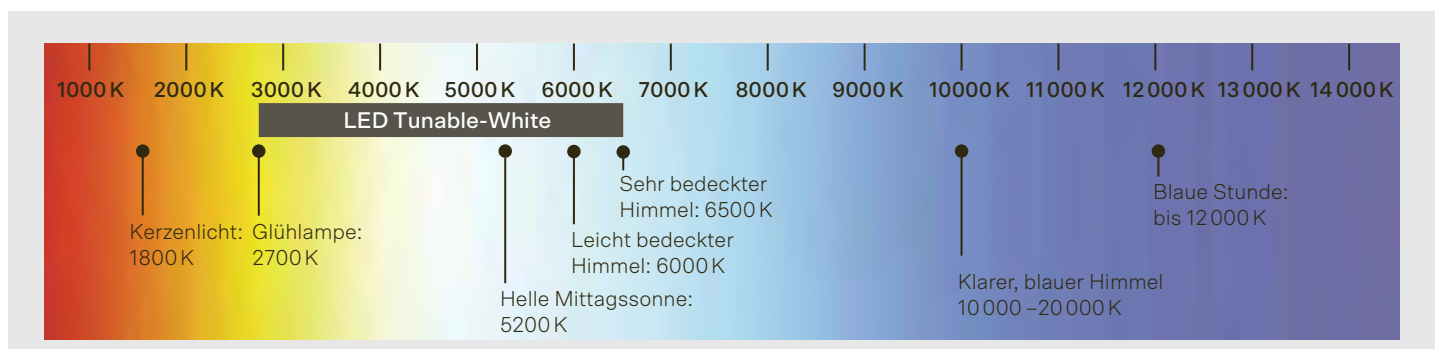
Lichtstromausbeute der Leuchte:

Einheit: Lumen/Watt [lm/W]

Mit dem Wirkungsgrad η_{LOR} , dem Lichtstrom der Lampe und den Angaben zur Leistung der Lampe und des Treibers kann die Lichtstromausbeute der Leuchte ermittelt werden. Sie gibt Aufschluss über die Effizienz der Leuchte. Empfehlenswert ist eine Lichtstromausbeute > 100 lm/W. Aktuelle Informationen und Tipps zu effizienten Lampen und Leuchten bieten [toplicht.ch] und [topten.ch].

$$\eta_{Leuchte} = \frac{\Phi_{Lampe} \cdot \eta_{LOR}}{P_{Lampe} + P_{Treiber}}$$

Bild 6.13: Farbtemperatur unterschiedlicher Lichtquellen: Licht mit einem hohen Blauanteil wird als kalt empfunden. (Quelle: Licht@hslu)



6.6 Quellen

- [Arbeitsgesetz] Wegleitung zur Verordnung 3 zum Arbeitsgesetz, 2. Kapitel, 2. Abschnitt, Artikel 15 Beleuchtung. Staatssekretariat für Wirtschaft (SECO). Bern, 2018 und Wegleitung zur Verordnung 4 zum Arbeitsgesetz, 2. Kapitel, 4. Abschnitt, Artikel 17 Fenster. Staatssekretariat für Wirtschaft (Seco). Bern, 2016.
- [BFE] Prognos et.al. Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2020 nach Verwendungszwecken. Bundesamt für Energie (BFE). Bern, 2021.
- [Erco] Erco Ratgeber. www.erco.com/guide
- [Minergie Tageslicht] Minergie Schweiz (Hrsg.). Minergie Wissen: Tageslicht. Basel, 2020. www.minergie.ch
- [Relux] Relux. www.relux.com
- [SIA 2024] Merkblatt SIA 2024. Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik. Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein (SIA). Zürich, 2021.
- [SIA 387/4] Norm SIA 387/4. Elektrizität in Gebäuden – Beleuchtung: Berechnung und Anforderungen. Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein (SIA). Zürich, 2017.
- [SN EN 12464-1] Schweizer Norm SN EN 12464-1. Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen. Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV). Winterthur, 2021.
- [SN EN 17037] Schweizer Norm SN EN 17037+A1. Tageslicht in Gebäuden. Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV). Winterthur, 2022.
- [Standard S 026] Norm CIE S 026. CIE-System für die Metrologie optischer Strahlung für ipRGC-beeinflusste Antworten auf Licht (in Englisch). Commission Internationale de l’Eclairage. Wien, 2018.
- [TM-30] Commission Internationale de l’Eclairage. Technical Memorandum – Method for Evaluating Light Source Color Rendition Wien, 2020.
- [toplicht.ch] Toplicht.ch. www.toplicht.ch
- [topten.ch] Topten.ch. www.topten.ch → Beleuchtung

Elektrische Geräte und Anlagen

Jürg Nipkow

7.1 Strom gewinnt an Bedeutung

Gebäudetechnik braucht auf der einen Seite Strom, um ihre Funktion zu erfüllen, also etwa einen Raum mit Licht oder Ersatzluft zu versorgen. Auf der anderen Seite benötigen fast alle gebäudetechnischen Systeme Strom als Hilfsenergie etwa für den Betrieb eines Brenners, für Pumpen, Steuerung und Regelung. Bei neueren Bauten erhält elektrische Energie zusätzlich Gewicht, weil in ihnen oft Wärmepumpen installiert sind. Zudem gibt es viele neue Anwendungen der allgemeinen Gebäudetechnik, die ebenfalls auf Strom angewiesen sind. Das Merkblatt [SIA 2056] listet dazu 26 Kategorien auf, siehe Tabelle 7.1.

Wichtig für den effizienten Einsatz von elektrischer Energie in Gebäuden sind auch moderne Lösungen für elektrische Antriebe. Dazu gehören Frequenzumrichter, EC-Motoren und deren Steuerungen respektive deren Energiemanagement. In komplexen Anlagen schafft eine Gebäudeautomation (GA) die Voraussetzung für ein gutes Energiemanagement. GA wird in grösseren Nichtwohnbauten standardmässig eingesetzt, aber auch zunehmend in Wohnbauten – Stichwort «Smart Home». Aber auch die GA selbst benötigt Strom – ihren Verbrauch gilt es ebenfalls kritisch zu betrachten. Auf jeden Fall muss er bei Ausschreibungen berücksichtigt werden. Details dazu enthält Kapitel 8.

7.2 Merkblatt SIA 2056 «Elektrizität in Gebäuden»

Die frühere Norm SIA 380/4 «Elektrische Energie im Hochbau» von 2006 ist in fast allen Teilen veraltet. Sie wurde durch folgende Dokumente abgelöst:

- Die Kapitel zur Lüftung inklusive Ventilatorleistung und Regelung wurden durch die Norm [SIA 382/1] «Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen» ersetzt.
- Die Kapitel über Beleuchtung wurden durch die Norm [SIA 387/4] «Elektrizität in Gebäuden – Beleuchtung: Berechnung und Anforderungen» ersetzt.
- Die übrigen Elektrizitätsverbraucher werden im neuen Merkblatt SIA 2056 «Elektrizität in Gebäuden – Energie- und Leistungsbedarf» behandelt.

Hauptzweck des Merkblatts SIA 2056 ist die Ermittlung des elektrischen Energie- und Leistungsbedarfs in Gebäuden in der Phase Vorprojekt gemäss [SIA 112]. Es stellt keine Anforderungen, enthält in den Hinweisen und Tabellen aber umfangreiche Sammlungen zu aktuellen effizienten Werten. Somit dient es, zusammen mit den anderen relevanten Normen, durchaus dem rationellen Einsatz von Elektrizität in Gebäuden. Gegenüber der früheren SIA 380/4 behandelt SIA 2056 folgende Themen neu respektive anders:

- Geräte: Der frühere Begriff «Betriebs-einrichtungen» wird nicht mehr verwendet. Elektrische Geräte werden nicht mehr als einzelne Kategorien behandelt, sondern als Gerätekombinationen funktioneller Art zusammengefasst. Dies ermöglicht im Vorprojekt eine bessere Quantifizierung des Strombedarfs. Beispiele für Gerätekombinationen: «Gastro 1» ist etwa eine Teeküche mit Külschrank und Geschirrspüler. «Gastro 2» enthält alles von «Gastro 1» plus Backofen, Grill etc., ist aber noch kein Res-

taurant. «Büro sporadisch» und «Büro normal» sind kleine respektive normal ausgestattete Büroarbeitsplätze. Für alle Gerätekombinationen sind Energie- und Leistungsbedarf je nach Ausstattung angegeben.

– Prozessanlagen: Es werden nur einige häufig vorkommende Anlagen wie gewerbliche Kühl- und Tiefkühlmöbel oder Grossküchengeräte behandelt. Industrielle Prozessanlagen können wegen ihrer Vielfalt nach wie vor nicht besprochen werden.

– Beleuchtung: SIA 2056 enthält eine vereinfachte Berechnungsmethode, basierend auf der Norm SIA 387/4. Die Berechnung nach SIA 387/4 ist nur bei komplexen Projekten nötig.

– Allgemeine Gebäudetechnik: Unter diesem Begriff gibt es viele neue Anwendungen mit teils grossem Elektrizitätsbedarf, von Inhouse-Mobilfunk über Videoüberwachung bis Zutrittskontrolle.

SIA 2056 liefert für 26 Kategorien (Tabelle 7.1) Angaben zu Energie- und Leistungsbedarf.

– Wärme: SIA 2056 macht knappe Angaben dazu, wie der elektrische Leistungs- und Energiebedarf von Wärmepumpenheizungen (basierend auf [SIA 384/3]), von Hilfsenergie für Heizung und Warmwasser sowie von elektrischen Heizbändern berechnet wird.

– Lüftung und Klimatisierung: Nach SIA 2056 wird der Leistungs- und Energiebedarf von Lüftungsanlagen anhand der Nutzfläche, der spezifischen Ventilatorleistung oder der Druckdifferenz ermittelt. Die Anlagenplanung, die die Basisdaten hierfür liefert, muss nach SIA 382/1 erfolgen.

– Elektrizitätsbedarf von Wohnbauten: Anhand eines einfachen Rechenmodells können der Leistungs- und der Energiebedarf von Wohnbauten ermittelt werden, basierend entweder auf der Personenzahl oder der Wohnungsfläche.

– Elektrizitätserzeugung: Für gebäudeeigene Photovoltaikanlagen (PV) und Wärmekraftkopplung (WKK) liefert SIA 2056 einfache Berechnungsmodelle, mit denen sich deren Beitrag zur Elektrizitätsbilanz ermitteln lässt. Auch Batteriespeicher als Teil der PV werden berücksichtigt. Die berechneten Werte dienen nur der Abschätzung in der frühen Projektphase; für die Projektierung muss nach den einschlägigen Normen und Methoden gerechnet werden (Merkblätter [SIA 2061] und [SIA 2062]).

Das Merkblatt [SIA 2024] «Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik» liefert neben dem thermischen Bedarf auch eine Abschätzung des elektrischen Leistungs- und Energiebedarfs von Gebäuden. Die angegebenen Schätzwerte basieren allerdings nur auf der Nettogeschossfläche pro Raumnutzung und berücksichtigen die allgemeine Gebäudetechnik nicht. Deshalb sind die Ergebnisse aus SIA 2056 umfassender und genauer.

Tabelle 7.1: Jüngst sind viele neue Anwendungen zur allgemeinen Gebäudetechnik hinzugekommen. Alle von ihnen benötigen Strom für den Betrieb – mindestens in Form von Hilfsenergie.

Kategorien allgemeiner Gebäudetechnik nach SIA 2056	
6.1	Notlichtanlage
6.2	Beschattungsanlage
6.3	Schrankenanlage
6.4	Zentrale Parkuhr
6.5	Dreh- und Karusselltür
6.6	Schiebetür
6.7	Drehkreuz und -sperre
6.8	Dachrinnenheizung
6.9	Satellitenempfänger
6.10	Allgemeine elektrische Widerstandsheizungen im Freien
6.11	Inhouse-Mobilfunkanlage
6.12	Gebäudeautomation
6.13	Brandvermeidungsanlage
6.14	Rauch- und Wärmeabzugsanlage
6.15	Audioanlage und elektroakustisches Notfallwarnsystem
6.16	Einbruchmeldeanlage
6.17	Zutrittskontrolle
6.18	Videoüberwachungsanlage
6.19	Transformator
6.20	Schaltgerätekombination
6.21	USV-Anlage
6.22	Dieselektrische Netzersatzanlage
6.23	Aufzug
6.24	Fahrtreppe und Fahrsteig
6.25	Elektrofahrzeug
6.26	Kleinstverbraucher

7.3 Typischer Stromverbrauch Haushalt und Büroarbeitsplatz

Die Haushalte verursachen gemäss Statistik des Bundesamts für Energie (BFE) rund 33 % des schweizerischen Stromverbrauchs, wobei ein grosser Teil davon auf Elektroheizungen (witterungsabhängig) und elektrische Wasssererwärmung entfällt. Im Zusammenhang mit der Gebäudetechnik ist deshalb eher der typische Haushaltstromverbrauch interessant (Bild 7.1).

Gemäss neuesten Daten hat er zwischen 2011 und 2019 bei MFH-Wohnungen um rund 20 % und bei EFH um über 25 % abgenommen. Dabei unterscheiden sich die Werte nach Haushaltgrösse [EnergieSchweiz]. Der typische Haushaltstromverbrauch wurde ohne elektrische Warmwasserbereitung, aber mit Geschirrspüler berechnet. Bei EFH wurde zusätzlich ein separates Gefriergerät einberechnet. Bei MFH wurde der Allgemeinstrom mit einem festen Wert von 285 kWh angenommen (2011 mit 400 kWh).

Bei einigen Geräten und Anlagen hat der Stromverbrauch in den letzten Jahren – auch dank Vorschriften – stark abgenommen. Dazu gehören vor allem die Beleuchtung, Kühl- und Gefriergeräte, Wäschetrockner (Wärmepumpentrockner) und Umwälzpumpen.

Zum Elektrizitätsverbrauch in Dienstleistungsgebäuden gibt es in SIA 2056 umfangreiches Datenmaterial. Die Verbrauchswerte für Gerätekombinationen werden für typische Nutzungszeiten (beispielsweise Büro 261 Tage, Verkauf 313 Tage, Hotel 365 Tage) und mit den Intensitäts- respektive Effizienzklassen «Tief», «Mittel» und «Hoch» angegeben. Tabelle 7.2 zeigt Beispiele für jährliche Stromverbrauchswerte der Gerätekombination «Büro normal». Sie ist ausgestattet mit PC oder Laptop, Monitor(en), Ladegeräten, Telefon, Arbeitsplatz- oder Netzwerkdrucker (anteilig). Auch für zentrale Dienste wie Informations- und Kommunikationstechnik (IKT Zentral) oder gastronomische Einrichtungen (Gastro 1 und Gastro 2) wurden in SIA 2056 entsprechende Elektrizitätsverbrauchswerte zusammengestellt.

Tabelle 7.2: Beispiele für den Stromverbrauch der Gerätekombination «Büro normal» für 261 Betriebstage. Die Intensitätsklasse «Hoch» steht für einen hoch ausgerüsteten (z. B. zwei PCs, mehrere Monitore) und intensiv genutzten Arbeitsplatz mit eher ineffizienten Geräten, Klasse «Tief» für einen knapp ausgestatteten mit effizienten Geräten.

	Intensitätsklasse		
	Tief	Mittel	Hoch
Betrieb	170	350	850
Bereitschaft	30	60	260
Gesamt	200	410	1110
Werte in kWh/a			

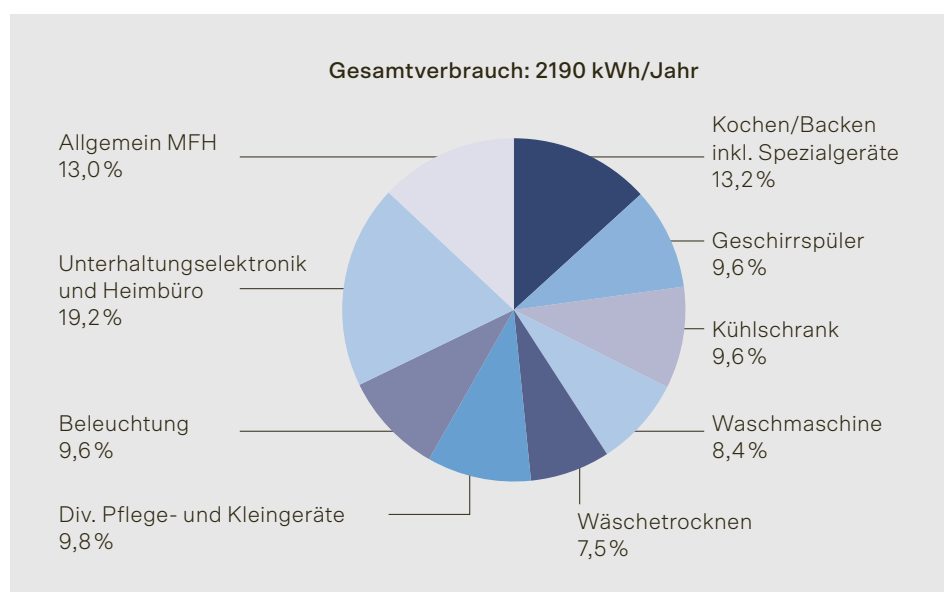


Bild 7.1: Typischer Haushaltstromverbrauch 2019 für eine Wohnung mit zwei Personen im MFH.

7.4 Stromverbrauch messen

Es gibt verschiedene Gründe, den Verbrauch von elektrischen Geräten und Anlagen zu messen. Dazu gehören unter anderem:

- Funktions- und Erfolgskontrolle bei Neubauten sowie nach Erneuerungen oder Effizienzmassnahmen
- Abrechnung von Energiekosten nach tatsächlichem Verbrauch, etwa in Gemeinschaftswaschküchen in MFH oder für zentrale Dienste in Nichtwohnbauten
- Zustandsaufnahme vor Sanierungen oder Erneuerungen

Steckbare Geräte zu messen ist einfach: Dafür gibt es preisgünstige, heutzutage meist recht genaue Energie- und Leistungsmessgeräte mit Zwischenstecker (Beispiele in Bild 7.2). Wenn die Werte über einen Zeitraum auch grafisch ausgegeben werden sollen, sind registrierende Messgeräte erforderlich. Diese sind teuer.

Die Messung und Erfassung fest installierter Geräte oder Anlagen erfordert oft dreiphasig messende Geräte und eine entsprechende Installation durch Fachpersonen. Bei der Auswertung solcher Messungen ist es wichtig, Einrichtung und Parameter der Messung einwandfrei zu dokumentieren. Nur so erhält man nachvollziehbare und vertrauenswürdige Ergebnisse.

Bild 7.2: Zum Messen des Stromverbrauchs von steckbaren Geräten gibt es kostengünstige und hinreichend genaue Messgeräte in Form von Zwischensteckern. (Bilder im Uhrzeigersinn: EMU Check/EMU Electronic AG; Energiemessgerät EMR-1 220-240V/Max Hauri AG; Energiemessgerät Digital IP20/A. Steffen AG; CLM1000/Transmetra GmbH)



7.5 Elektrische Motoren und Frequenzumrichter

Elektrische Antriebe sind wichtige Verbraucher 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, Aufzügen, Umwälzpumpen von Heizgeräten, Kleinlüftern in Elektronikgeräten etc. Bei vielen dieser Anwendungen wurden und werden teilweise noch immer sehr ineffiziente Einphasen- oder gar Spaltpol-Asynchronmotoren eingesetzt. Heute sind jedoch für fast alle Anwendungen auch hocheffiziente sogenannte EC-Motoren verfügbar. EC steht für «electronically commutated», also für elektronisch kommutierte Permanentmagnet-Motoren mit Wirkungsgraden über 80%. Demgegenüber erreichen die erwähnten alten Motoren nur 10 bis 30%. Bei einer wichtigen Kategorie von Antrieben ist die effiziente Technik seit 2009 vorgeschrieben: Nassläuferumwälzpumpen bis 2500 W hydraulischer Leistung müssen der europäischen und der schweizerischen Vorschrift zur Mindesteffizienz des EEI (Energy Efficiency Index) genügen, um zum Verkauf zugelassen zu sein. Der aktuelle Mindestwert ist $EEI \leq 0,23$; die Richtlinie wird überarbeitet, im Fokus stehen unter anderem ein Mindest-EEI $\leq 0,20$ und die Erweiterung auf Trinkwasser-Zirkulationspumpen.

In der Schweiz sind ausschliesslich Produkte zum Verkauf zugelassen, die die Anforderungen der EU-Richtlinie respektive des Anhangs der Energieeffizienzverordnung (EnEV) erfüllen. Planerinnen und Installateure brauchen sich daher nur zu vergewissern, dass sie keine illegalen «Schnäppchen» einsetzen. Zu beachten ist allerdings nach wie vor, dass die Pumpen richtig, das heisst knapp dimensioniert werden: Oft wird angenommen, dass infolge der automatischen Drehzahlregelung von modernen Motoren eine Überdimensionierung

kein Problem mehr sei. Aber die Regelung läuft dann möglicherweise am unteren Anschlag und kann ihre Funktion nicht richtig erfüllen.

Bei Lüftungsventilatoren gibt es für grössere Geräte mit getrennten Motoren ebenfalls Vorschriften zur Ventilator- und zur Motoreffizienz. Für kleinere, in der Regel als Kompaktventilatoren gebaute Geräte gibt es vorläufig keine analoge Vorschrift. Hier gilt es zusätzlich zu den Vorgaben der Norm SIA 382/1 darauf zu achten, wirklich effiziente Ventilatoren einzusetzen. Solche Geräte sind meist mit der Bezeichnung «EC-Ventilator» versehen.

Bei Aufzugsantrieben ist mittlerweile die Frequenzumrichtertechnik Standard, nicht zuletzt wegen der präzisen Anhalteregelung. Eine grosse Rolle spielt hier der Stand-by-Verbrauch. Er wird in der Energieetikette der Aufzugsindustrie [VDI 4707] detailliert berücksichtigt. Die Labelkategorie A macht anspruchsvolle Vorgaben für die Effizienz, die nur mit grossem Aufwand zu erreichen sind. Aber auch mit Label B sind Lifte recht effizient.

Versteckte Kleinverbraucher in grosser Zahl werden unter anderem in Rolllädenantrieben eingesetzt. Zurzeit sind immer noch ineffiziente Rohrmotoren im Handel, beispielsweise mit 100 bis 300 W Leistungsaufnahme. Bei effizienten Motoren liegt die Leistungsaufnahme zwischen 20 und 50 W. Da ihre Laufzeiten sehr begrenzt sind, verursachen ineffiziente Motoren in diesem Bereich trotzdem keinen relevanten Elektrizitätsverbrauch. Kritischer kann die drahtlose Fernsteuerung solcher Anwendungen sein, da deren Empfänger im Stand-by-Betrieb oft einige Watt Leistung aufnehmen. Da sie stets laufen, ergibt sich über das Jahr gesehen ein beträchtlicher Energieverbrauch. Dies gilt auch für alle sogenannten IoT-Geräte, die über das Internet der Dinge (Internet of Things) vernetzt sind. Die entsprechenden Energieverbrauchswerte werden oft nicht deklariert und müssen vom Planer erfragt werden.

7.6 Gebäudetechnik gesamthaft optimieren

Gebäudetechniksysteme betreffen viele verschiedene Gewerke, sind meist komplex, haben sehr viele Einflussgrössen und vielfältige Ziele. Natürlich steht im Vordergrund, dass sie ihre Funktion erfüllen und die gegebenen Anforderungen einhalten – dabei darf aber der Elektrizitätsbedarf nicht vergessen werden. Ein hoher Stromverbrauch schlägt sich jahrzehntelang in den Betriebskosten nieder und hat neben ökologischen auch wirtschaftliche Nachteile.

Bei Systemen mit Antrieben ist oft nicht der Motor ausschlaggebend für Effizienz und Elektrizitätsbedarf, sondern beispielsweise die Bemessung von Lüftungskanälen, die Steuerung oder Regelung (Stand-by, Vernetzung), unnötige Zusatzfunktionen oder grosse Sicherheitszuschläge. Deshalb müssen bei der energetischen Optimierung alle Komponenten und Einflüsse betrachtet werden. Hierfür liefert das Merkblatt SIA 2056 umfassende Grundlagen. Mindestanforderungen für die Energieeffizienz gibt es für zahlreiche Komponenten der Gebäudetechnik. Meist basieren sie auf EU-Richtlinien oder Verordnungen, die in der Regel auch in die Schweizer EnEV übernommen werden. Dies bedeutet, dass sehr ineffiziente Produkte nicht zum Verkauf zugelassen sind. Allerdings gibt es bei den zugelassenen Produkten oft einen beträchtlichen Spielraum hinsichtlich der Energieeffizienz. Wenn Energieetiketten oder andere Energielabels existieren, helfen sie bei der Bewertung.

7.7 Quellen

- [EnergieSchweiz] Bundesamt für Energie, EnergieSchweiz. Faktenblatt «Stromverbrauch eines typischen Haushalts». Bern, 2021.
www.energieschweiz.ch/haushalt
- [SIA 112] Norm SIA 112. Modell Bauplanung. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2014.
- [SIA 2024] Merkblatt SIA 2024. Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2021.
- [SIA 2056] Merkblatt SIA 2056. Elektrizität in Gebäuden – Energie- und Leistungsbedarf. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2019.
- [SIA 2061] Merkblatt SIA 2061. Batteriespeichersysteme in Gebäuden. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2021.
- [SIA 2062] Merkblatt prSIA 2062 (Entwurf). Photovoltaik auf und an Gebäuden. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich.
- [SIA 382/1] Norm SIA 382/1. Lüftungs- und Klimaanlageanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2014.
- [SIA 384/3] Norm SIA 384/3. Heizungsanlagen in Gebäuden – Energiebedarf. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2020.
- [SIA 387/4] Norm SIA 387/4. Elektrizität in Gebäuden – Beleuchtung: Berechnung und Anforderungen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2017.
- [VDI 4707] Richtlinie VDI 4707 Blatt 1:2009. Aufzüge – Energieeffizienz. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Düsseldorf, 2009; in Überarbeitung; Publikation voraussichtlich Oktober 2022.

Gebäudeautomation

Olivier Steiger

Unter dem Begriff der Gebäudeautomation (GA) werden alle Einrichtungen zur Steuerung, Regelung, Überwachung und Optimierung von gebäudetechnischen Anlagen zusammengefasst. Das Einsatzgebiet der GA umfasst herkömmlicherweise das Raumklima (HLK), die Beleuchtung, den Sonnenschutz und das Gebäudemanagement. Zunehmend werden auch weitere Anlagen eingebunden, beispielsweise die Gebäudesicherheit, das technische Monitoring [AMEV 135], Multimedia, Sanitärtechnik, Haushaltgeräte, Energiemanagementsysteme und das Active Assisted Living (AAL), also Assistenzsysteme fürs Leben im Alter [Monekosso; et al.]. GA-Systeme sind sowohl im Zweck- als auch im Wohnbau vorzufinden. Letztere werden oft als Hausautomation oder Smart Home bezeichnet. Die GA erfüllt verschiedene Aufgaben, dazu gehören etwa: Energieeffizienz verbessern, Komfort steigern, Sicherheit erhöhen, zusätzliche Funktionalität bieten oder Kosten senken. Energie spart die GA, indem sie gebäudetechnische Anlagen bedarfsgeführt betreibt, beispielsweise:

- Beleuchtung und Belüftung laufen nur bei Anwesenheit von Personen
- Bereitstellen von Wärme und Kälte entsprechend dem Bedarf in den Räumen.

Den Komfort erhöht die Gebäudeautomation, indem sie auf die Bedürfnisse der Nutzerschaft reagiert, beispielsweise:

- Farbtemperatur der Beleuchtung wird entsprechend der Tageszeit und Nutzung eingestellt
- Luftqualitätsregelung nach Raumbeleuchtung und Personendichte.

Die treibenden Kräfte für GA sind vielfältig. Dazu gehört etwa das Energiesparen. Der Anteil der Gebäude am inländischen Endenergieverbrauch liegt bei gut 44 % [BFE 2021]. Das Sparpotenzial ist demzufolge beachtlich. Zudem sind Gebäude zunehmend nicht mehr nur Energieverbraucher, sondern auch -erzeuger. Dadurch entsteht ein Bedarf nach Monitoring- und Managementlösungen.

Weiter verbringen viele Menschen bis zu 90 % ihrer Lebenszeit in Innenräumen [EUA 2013]. Ein hoher Komfort ist deshalb ein wesentlicher Faktor für unser Wohlbefinden und unsere Gesundheit.

Schliesslich nimmt der Bedarf nach GA auch infolge der weltweit steigenden Lebenserwartung zu. Mit ihr steigt die Zahl derer, die betreut und medizinisch versorgt werden müssen. Hier können intelligente Gebäude einen Beitrag leisten.



Bild 8.1: Gebäudeautomation dient unter anderem der Energieeffizienz, dem Komfort und der Sicherheit. (Foto: FrankBoston/stock.adobe.com)

8.1 Aufbau

Die Kernelemente eines GA-Systems sind in Bild 8.2 schematisch dargestellt. Herzstück ist der Controller, auch Automationsstation oder speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) genannt. Dabei handelt es sich um einen eingebetteten Rechner, der die Steuerungs-, Regelungs-, Überwachungs- und Optimierungsaufgaben übernimmt.

Der Controller verfügt über Ein- und Ausgänge zum Einlesen und Ausgeben von elektrischen Signalen. Die notwendigen Informationen werden im Gebäude mittels Sensoren (auch: Messfühler) erfasst. Beispielsweise messen Temperatursensoren die Raum- und Aussentemperaturen für die Heizungsregelung, und pyroelektrische Sensoren (PIR) detektieren die Anwesenheit von Personen für die präsenzbasierte Beleuchtungssteuerung.

Die Sensorwerte werden über die Eingänge eingelesen und durch den Controller unter Berücksichtigung von Bedienparametern, beispielsweise Sollwerte, verarbeitet. Die Steuerbefehle werden wiederum über die Ausgänge an Aktoren (auch: Stellglieder) ausgegeben und durch diese in elektrische, mechanische oder andere physikalische Grössen umgesetzt. Damit greifen die Aktoren aktiv in die gebäudetechnischen Prozesse ein. Reale GA-Systeme bestehen nebst den Sensoren, Aktoren und Controllern aus zahlreichen weiteren Komponenten, darunter Bediengeräte und Netzwerkkomponenten. Diese werden gemäss

[EN ISO 16484-2] folgenden drei Ebenen zugeordnet (Bild 8.3):

- Feldebene
- Automationsebene
- Managementebene

In der Feldebene werden die unterschiedlichen gebäudetechnischen Anlagen mithilfe der Feldgeräte (Sensoren, Aktoren, Raumbediengeräte) betrieben. Die Automationsebene übernimmt die eigentlichen Automatisierungsaufgaben, also die Steuerung, Regelung, Überwachung und Optimierung der Anlagen. Dazu werden die von der Feldebene gelieferten Daten sowie Vorgaben aus der Managementebene verwendet. Auf der Managementebene erfolgt die übergeordnete Bedienung und Beobachtung der Prozesse sowie die Alarmierung bei Störungen. Vermehrt wird die Managementebene zusätzlich mit Cloud-Diensten des Gebäudebetreibers verbunden oder komplett in die öffentliche Cloud ausgelagert.

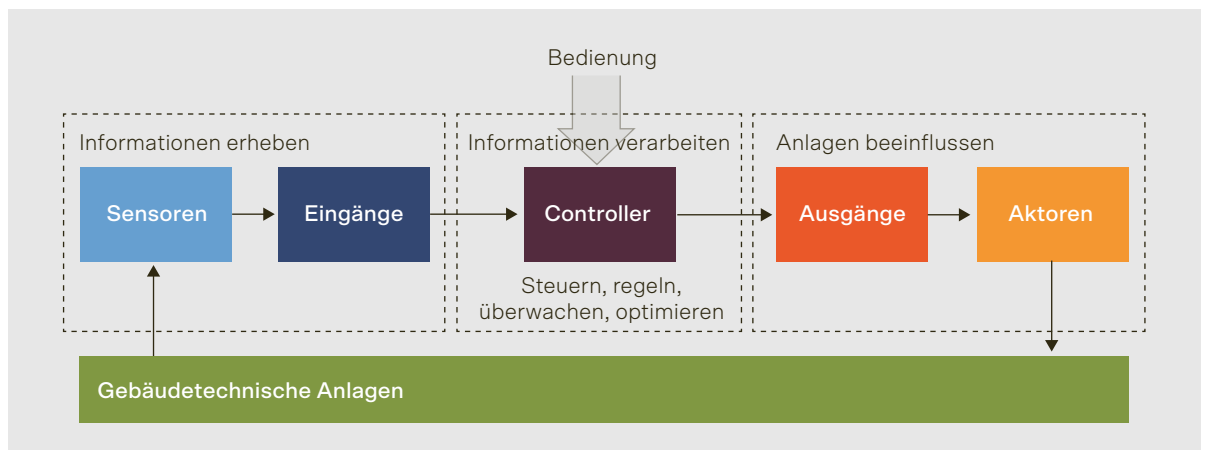


Bild 8.2: Schematische Darstellung der Kernelemente eines GA-Systems. (Quelle: Olivier Steiger)

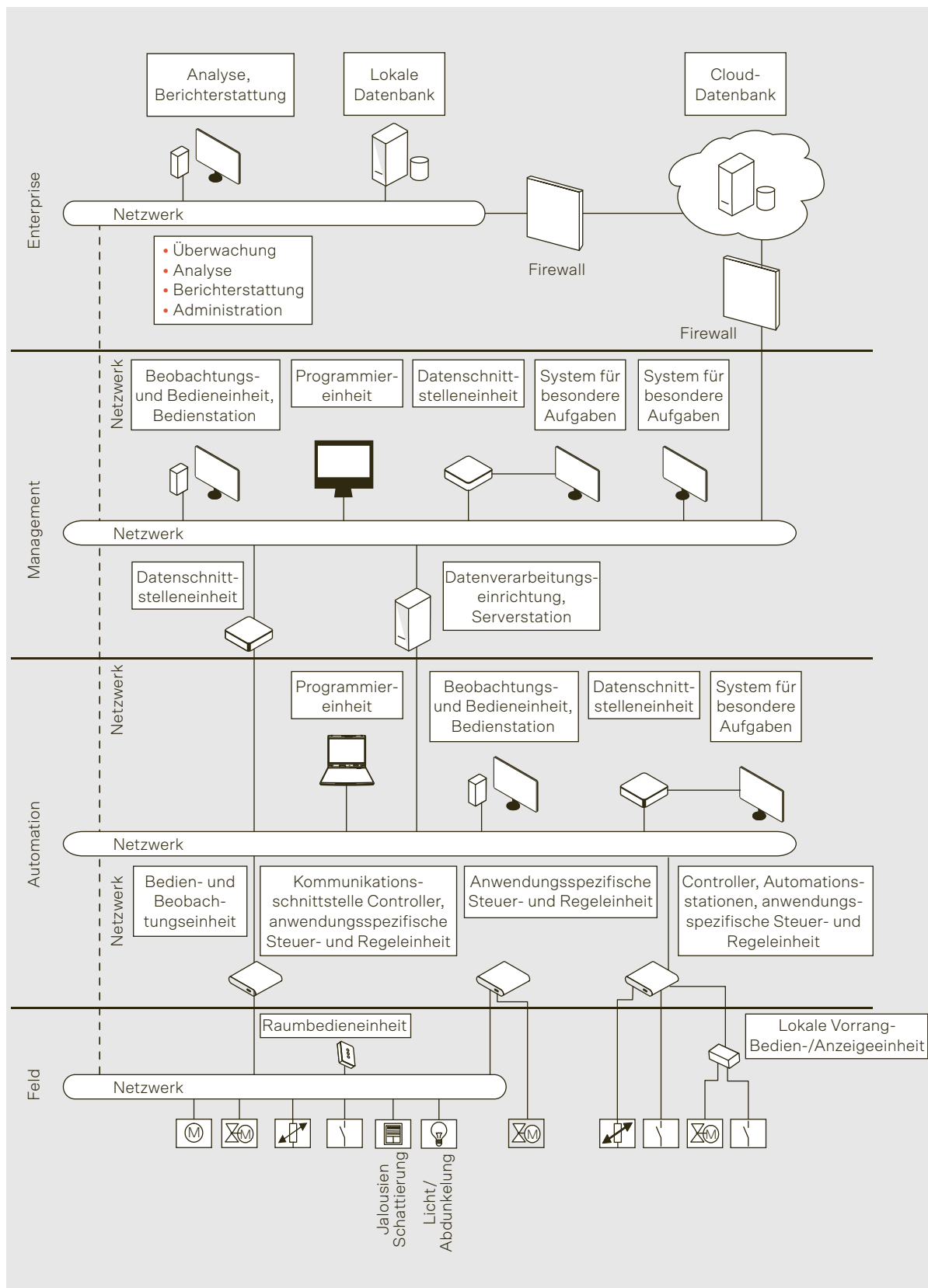


Bild 8.3: Allgemeines Modell der Hardware (gerätetechnische Sicht) eines GA-Systems. (Quelle: [EN ISO 16484-2:2016])

8.2 Funktionen

Die GA setzt sich aus mehreren Teilsystemen zusammen [DIN 276-1]:

- Dem Gebäudemanagementsystem (auch: Gebäudeleittechnik oder englisch Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA, also Überwachung, Steuerung und Datenerfassung)
- Dem (Anlagen-)Automationssystem (auch: Direct-Digital-Control-Gebäudeautomation, DDC-GA)
- Dem Raumautomationssystem

Zu jedem Teilsystem werden Funktionen definiert. Dabei handelt es sich um die standardisierte, kleinste Programmeinheit für die GA. Funktionen sind also die Bausteine, woraus sich die verschiedenen Anwendungen der GA zusammensetzen. Die Funktionen der Anlagenautomation sind definiert in der Norm [EN ISO 16484-3], diejenigen der Raumautomation in der [VDI 3813 Blatt 2]. Managementfunktionen sind in beiden Normen definiert. Eine entsprechende Übersicht ist in der Tabelle 8.1 und Tabelle 8.2 zu finden.

8.3 Systemkommunikation

Ein zentraler Bestandteil der GA ist die Systemkommunikation, also die kommunikative Verbindung unterschiedlicher Komponenten. Ursprünglich wurden Direktverbindungen (auch: Punkt-zu-Punkt, P2P, PtP) zwischen den Geräten hergestellt. In den 1970er-Jahren wurden dann die ersten Bussysteme für die Gebäudeautomation entwickelt, um die bis anhin übliche Parallelübertragung von digitalen Signalen sowie die analoge Signalübermittlung zu ersetzen. Dadurch liess sich der Verkabelungsaufwand wesentlich reduzieren und die Erweiterbarkeit der Systeme verbessern. Die Anforderungen an heutige Bussysteme gehen darüber hinaus. Nebst der Erweiterbarkeit stehen die Interoperabilität – also die Fähigkeit zur Zusammenarbeit von verschiedenen Systemen und Standards – die Zuverlässigkeit und die Echtzeitfähigkeit im Vordergrund. Für Anwendungen im Smart Home werden überdies eine einfache Installation und Inbetriebnahme, niedrige Kosten sowie die Kompatibilität zur bestehenden Haustechnik und Elektroinstallation vorausgesetzt.

Einige etablierte Bussysteme sind in Bild 8.4 dargestellt. Feldbusse werden hauptsächlich in der Feldebene eingesetzt. Sie dienen der Kommunikation von Feldgeräten untereinander und mit

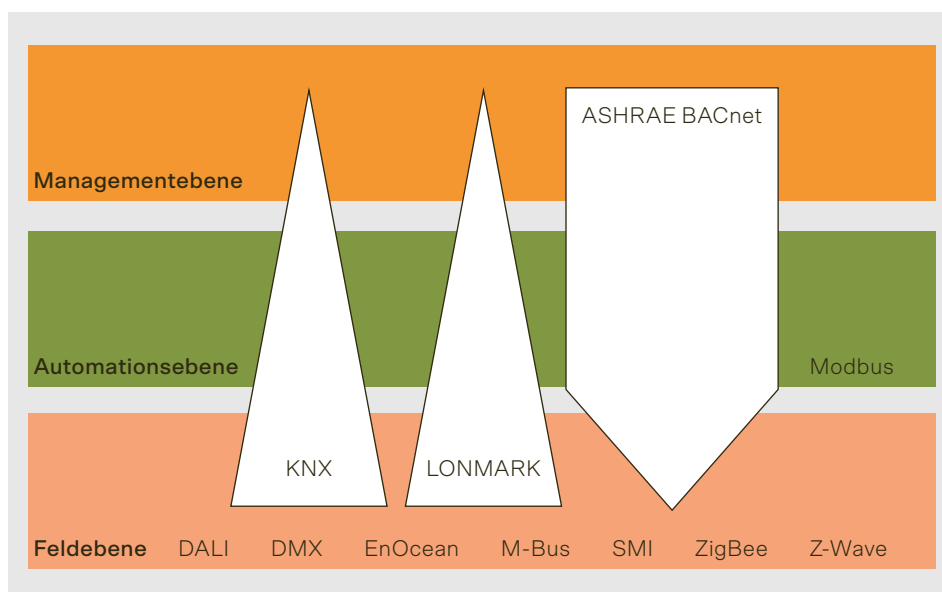


Bild 8.4: Bussysteme für die Gebäudeautomation. (Quelle: Olivier Steiger)

dem Controller. Andere Bussysteme verbinden Komponenten auf verschiedenen Ebenen, etwa Controller mit der Managementebene.

Weiter unterscheiden sich die Bussysteme nach ihren Einsatzgebieten. So können BACnet, EnOcean, KNX, LON, Modbus, ZigBee und Z-Wave gewerkeübergreifend eingesetzt werden. Andere be-

schränken sich auf einzelne Gewerke: DALI und DMX für die Beleuchtung, SMI für den Sonnenschutz, M-Bus für das technische Monitoring (beispielsweise für die Erfassung von Zählerständen).

	Ein- und Ausgabe-funktionen	Verarbeitungsfunktionen	Managementfunktionen	Bedienfunktionen
Zweck	Einlesen und Ausgeben von analogen Werten, binären Zuständen, Zählwerten	Steuerung, Regelung, Überwachung und Optimierung von gebäudetechnischen Anlagen	<ul style="list-style-type: none"> – Kommunikation mit Komponenten in- und ausserhalb des Automationsnetzwerks – Aufzeichnen und Archivieren von Datenpunkten 	<ul style="list-style-type: none"> – Einblenden von Datenpunkten im Anlagenbild – Benachrichtigung und Alarmierung
Anwendungsbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> – Einlesen des Frostwächters über analogen oder binären Eingang – Stellen des Heizventils über analogen Ausgang 	<ul style="list-style-type: none"> – Schalten eines elektrischen Antriebs (Steuerung) – Einstellen der Zulufttemperatur mittels PID-Regler (Regelung) – Erfassen der Betriebsstunden einer Kältemaschine (Überwachung) – Energierückgewinnung (Wärme, Kälte, Feuchte) aus Rückluft (Optimierung) 	<ul style="list-style-type: none"> – Kommunikation mit einer Brandmeldeanlage – Aufzeichnung (Logging) von Datenpunkten 	<ul style="list-style-type: none"> – Einblendung von Sensorwerten im Anlagenbild – Benachrichtigung per SMS bei Störungen

Tabelle 8.1: Funktionen der Anlagenautomation, gemäss [EN ISO 16484-3].

	Sensorfunktionen	Aktorfunktionen	Bedien-/Anzeige-funktionen	Anwendungsfunktionen
Zweck	Überführen von physikalische Grössen in Ausgabeinformationen. Diese dienen wiederum als Eingabeinformation für Anwendungs- oder Aktorfunktionen	Umwandeln von Eingabeinformationen, die aus Bedien- oder Anwendungsfunktionen stammen, in physikalische Grössen	Umwandeln von Bedienvorgängen in Ausgabeinformationen. Diese stehen dann den Anwendungsfunktionen als Eingabeinformationen zur Verfügung	Bilden die Funktionalität ab, die durch die Automation erzielt werden soll (für Beleuchtung, Sonnenschutz, Raumklima)
Anwendungsbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> – Erzeugen von Präsenzinformation («anwesend»/«abwesend») aus dem Präsenzmeldersignal – Berechnung der Raumtemperatur aus dem Messsignal eines Temperatursensors 	<ul style="list-style-type: none"> – Berechnen des aktuellen Schalt- oder Dimmwerts der Beleuchtung aufgrund von manueller Bedienung – Stellen von Ventilen, Luftklappen oder Ventilatoren aufgrund von Eingabeinformationen aus Bedien- oder Anwendungsfunktionen (z. B. zur Regelung der Raumtemperatur) 	<ul style="list-style-type: none"> – Umwandeln einer manuellen Lichtschalter-Betätigung in eine Ausgabeinformation – Einstellen des Raumtemperatur-Sollwerts über Stellräder, grafische Bedienfelder oder ähnliche Geräte 	<ul style="list-style-type: none"> – Auswahl der Raumnutzungsart (Szenen) – Lichtschaltung basierend auf Präsenz – Nachführen der Lamellenstellung von Jalousien gemäss dem aktuellen Sonnenstand – Einstellen der Drehzahl von Ventilatormotoren durch Ermitteln der Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Sollwert

Tabelle 8.2: Funktionen der Raumautomation gemäss [VDI 3813 Blatt 2].

8.4 Umsetzung der Gebäudeautomation

Die fachgerechte Umsetzung einer Gebäudeautomation gliedert sich in fünf Phasen. Dabei sollten die geplante Nutzung sowie der Betrieb immer im Vordergrund stehen. Auch wird ausdrücklich empfohlen, die GA integriert für alle beteiligten Gewerke zu planen und nicht auf einzelne Gewerke aufzuteilen.

– **Phase 1 – Anforderungen:** In dieser Phase werden die Anforderungen des Anlagebetreibers ermittelt (wirtschaftlich, zeitlich, technisch). Weiter werden die administrativen Rahmenbedingungen gesammelt, also Gesetze, Normen, Labels. Diese Phase dient der Bestimmung der Bedürfnisse. Diese werden in einem Pflichtenheft zusammengetragen.

– **Phase 2 – Entwurfsplanung:** Hier werden Konzepte erarbeitet für die Raum- und Anlagenbedienung, Benachrichtigung und Alarmierung, das technische Monitoring usw. Die Konzepte dienen zur Festlegung der Funktionalität und erlauben eine erste, grobe Kosten- und Termschätzung.

– **Phase 3 – Ausführungsplanung:** In dieser Phase werden die GA-Komponenten und Funktionen ausgewählt sowie die entsprechende Systemtopologie (Aufbau, Systemkommunikation) festgelegt. Auch werden die nötigen Massnahmen für die Realisierung eingeleitet. Eine ausführliche Betrachtung der Ausführungsplanung ist zu finden in [Kranz].

– **Phase 4 – Realisierung:** Nun werden die Anlagen gebaut, programmiert, konfiguriert, in Betrieb genommen und der Bauherrschaft übergeben.

– **Phase 5 – Bewirtschaftung:** In dieser Phase werden die Anlagen betrieben und unterhalten, als Teil des Facility Managements. Weiter kann eine Betriebsoptimierung stattfinden, um den Energieverbrauch und die Energiekosten zu senken respektive um sicherzustellen, dass die ursprünglichen Anforderungen erfüllt werden.

Gebäudetechnische Anlagen sollen so betrieben werden, dass die vereinbarten Anforderungen mit geringem Energieverbrauch erfüllt werden. Die europäische Norm [EN 15232-1] stellt Hilfsmittel zur Verfügung, erstens zur Planung eines GA-Systems, das wesentlich zu einer guten Energieeffizienz des Gebäudes beiträgt, und zweitens zur Abschätzung der Grösse dieses Beitrags. Zu diesem Zweck wurden vier GA-Effizienzklassen A, B, C, D definiert, die sich auf der Funktionalität der GA abstützen.

– Klasse D entspricht GA-Systemen, die nicht energieeffizient beziehungsweise nicht vorhanden sind. Gebäude mit derartigen Systemen sollen modernisiert werden, neue Gebäude dürfen nicht so gebaut werden.

– Klasse C entspricht Standard-GA-Systemen und wird oft als Bezugswert verwendet.

– Klasse B entspricht erweiterten GA-Systemen und einigen speziellen TGM-Funktionen (TGM = Technisches Gebäudemanagement).

– Klasse A entspricht hoch energieeffizienten GA-Systemen und TGM.

Zu jeder Klasse lassen sich die möglichen Einsparungen beim thermischen und elektrischen Energiebedarf bestimmen – abhängig vom Gebäudetyp und von dessen Nutzung. Beispielsweise lassen sich bei Büros gemäss der Norm 30% bei der thermischen Energie (Heizung und Kühlung) sparen, wenn von der GA-Effizienzklasse C auf die Klasse A ausgebaut wird. Bei der elektrischen Energie (Beleuchtung und Hilfsgeräte) sind es 13%.

Weiter bestimmt die Norm, getrennt für Wohn- und Nichtwohnbauten, für jede GA-Effizienzklasse, welche Variante der einzelnen GA-Funktionen verwendet werden muss. Bei den Klassen handelt es sich also um vier Grade von Ausstattungen mit GA- und TGM-Funktionen.

8.5 Quellen

- [AMEV 135] Empfehlung AMEV Nr. 135. Technisches Monitoring als Instrument zur Qualitätssicherung. Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik (AMEV). Berlin, (2017).
- [BFE 2021] Bundesamt für Energie. Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 – 2020 nach Verwendungszwecken. Bern, 2021.
- [DIN 276-1] Norm DIN 276-1. Kosten im Bauwesen – Teil 1: Hochbau. Deutsches Institut für Normung (DIN). Berlin, 2008.
- [EN 15232-1] Norm EN 15232-1 (SIA 386.111). Energieeffizienz von Gebäuden – Teil 1: Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement. Europäisches Komitee für Normung. Brüssel, 2017.
- [EN ISO 16484-2:2016] Norm DIN EN ISO 16484-2 (Entwurf). Gebäudeautomationssysteme – Teil 2: Hardware. Deutsches Institut für Normung (DIN). Berlin, 2016.
- [EN ISO 16484-2] Norm DIN EN ISO 16484-2. Systeme der Gebäudeautomation (GA) – Teil 2: Hardware. Deutsches Institut für Normung (DIN). Berlin, 2004.
- [EN ISO 16484-3] Norm DIN EN ISO 16484-3 (SIA 386.153). Systeme der Gebäudeautomation (GA) – Teil 3: Funktionen. Deutsches Institut für Normung (DIN). Berlin, 2005.
- [EUA 2013] Europäische Umweltagentur (EUA). Raumluftqualität. In: Signale 2013. Kopenhagen, 2013.
- [Kranz] Kranz Hans R. BACnet Gebäudeautomation 1.12. CCI Dialog GmbH. Karlsruhe, 2013.
- [Monekosso; et al.] Monekosso Dorothy et al. Ambient Assisted Living. IEEE Computer Society Publications Office. Los Alamitos, 2015.
- [VDI 3813 Blatt 2] Richtlinie VDI 3813, Blatt 2. Gebäudeautomation (GA) – Raumautomationsfunktionen (RA-Funktionen). Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Düsseldorf, 2011.

Photovoltaik

Christof Bucher

9.1 Allgemeine Anforderungen

Eine Photovoltaikanlage (PV-Anlage) ist eine elektrische Installation, die wie die übrigen elektrischen Installationen im Gebäude der Niederspannungsinstallationsverordnung [NIV] und der Niederspannungsinstallationsnorm [NIN] genügen muss. Die PV-Anlage stellt aber eine Reihe weiterer Anforderungen an den Planer und den Installateur, die in der Gebäudetechnik sonst kaum auftreten:

- Der PV-Generator ist oft gut einsehbar und stellt deshalb erhöhte Anforderungen an die architektonische Gestaltung.
- Das Montagesystem verbindet die PV-Module mit der Gebäudehülle und muss über Jahrzehnte zuverlässig den Elementarkräften, insbesondere Wind- und Schneelasten, standhalten. Dabei darf es die Funktion der Gebäudehülle nicht beeinträchtigen oder muss diese sogar unterstützen.
- Von den Solarzellen bis zum Wechselrichter führen die Kabel Gleichstrom, im Aussenbereich sind diese zudem der Witterung ausgesetzt. Dadurch ergeben sich erhöhte Anforderungen an das Material und die Installation.

9.2 PV-Module

Unter der Vielzahl an bekannten Technologien werden an Gebäuden in erster Linie PV-Module aus kristallinen Siliziumzellen sowie Dünnschichtmodule verwendet. Dabei erreichen erstere über 80 % Marktanteil.

Die typischen Eigenschaften sowie die Vor- und Nachteile sind in Tabelle 9.1 dargestellt. In der Praxis hängt die Entscheidung «Dünnschicht oder kristallin» oft von den optischen und mechanischen Eigenschaften der jeweiligen Produkte ab. Die physikalischen Eigenschaften in Tabelle 9.1 spielen dabei eine untergeordnete Rolle.

Watt-Peak (W oder Wp)

In der PV-Branche hat sich die Bezeichnung «Watt-Peak» (Spitzenleistung) mit der formal nicht korrekten Einheit «Wp» eingebürgert. Gemeint ist damit die Leistung eines PV-Moduls in Watt unter Standardtestkonditionen (Standard Test Conditions, STC). Das heisst: 1000 W/m² Einstrahlung bei 25 °C Zelltemperatur und einem Lichtspektrum von Air Mass (AM) 1,5 (Standardwert für Sonnenlicht). Es wird jedoch empfohlen, auf die Einheit Wp zu verzichten und dafür beispielsweise die Schreibweise $P_{STC} = 5 \text{ kW}$ zu verwenden.

Zelltyp	Vorteile	Nachteile
Kristalline Siliziumzellen	<ul style="list-style-type: none"> – Hoher Wirkungsgrad – Hohe Lebensdauer – Silizium kommt in der Erdhülle sehr häufig vor – Synergien zur Elektronikindustrie 	<ul style="list-style-type: none"> – Aufwendige Herstellung der Solarzellen aus Reinstmaterial – Module müssen aus einzelnen Zellen zusammengebaut werden
Dünnschichtzellen	<ul style="list-style-type: none"> – Geringer Material- und Energieverbrauch – Homogenes Erscheinungsbild – Potenziell sehr günstige Produktionsverfahren – Etwas toleranter bezüglich Teilverschattungen 	<ul style="list-style-type: none"> – In der Regel tiefere Wirkungsgrade als kristalline Zellen – Zum Teil Verwendung von seltenen oder heiklen Materialien (Ga, In, Cd, Te) – Produktionsmaschinen sehr technologiespezifisch

Tabelle 9.1: Vergleich: kristalline Module und Dünnschichtmodule.

Heute ist die Vielfalt an PV-Modulen so gross wie nie zuvor. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale von PV-Modulen sind:

- Glas-Folie oder Glas-Glas: Gegenüber den Standardmodulen mit einer Tedlar-Rückseitenfolie habe Glas-Glas-Module auch rückseitig ein Glas. Dies macht sie zwar geringfügig teurer als die Glas-Folien-Module, aber auch deutlich langlebiger. Sie sind zudem mechanisch stabiler und deshalb für Anwendungen in der Fassade besser geeignet.
- Gerahmt oder rahmenlos: Rahmenlose Module (meist Glas-Glas-Module) sind etwas heikler bei Transport und Montage. Dafür sind sie optisch schöner und weniger kritisch bezüglich Verschmutzung. Module, die mit weniger als 10° Neigungswinkel installiert werden, sind deshalb bevorzugt rahmenlos.
- Erscheinungsbild: Hier hat sich in den letzten Jahren wohl am meisten verändert, wobei die Schweiz diesbezüglich international eine Führungsrolle einnimmt. Die Methoden zur Beeinflussung des Erscheinungsbildes sind dabei sehr vielfältig.

Bild 9.1: Kantonswappen produzieren Strom – kristalline PV-Module, die mit einem Digitaldruckverfahren eingefärbt wurden. (Quelle: Stiftung Umweltarena Schweiz)

Optik von PV-Modulen

Mit diversen Verfahren lässt sich das Erscheinungsbild von PV-Modulen beeinflussen. Einige Beispiele:

- Mit Digitaldruck lassen sich beliebige Bilder, Formen und Farben auf die Rückseite des Frontglases aufbringen.
- Ätzen des Frontglases lässt das PV-Modul matt und warm erscheinen.
- Mit selektiv reflektierenden Schichten lassen sich gezielt Lichtanteile reflektieren. Dabei geht weniger Energie verloren als bei einem Digitaldruckverfahren, die Farben sind aber weniger gut kontrollierbar.
- Oberflächenfolien beeinflussen das Aussehen und die Haptik der Glasoberflächen.

Bild 9.2: Eine fassadenintegrierte PV-Anlage, die sich kaum von einer normalen Fassade unterscheidet. (Quelle: Viridén + Partner AG)

Bild 9.3: Grau bedruckte PV-Module, geschuppt verlegt. (Quelle: Stiftung Umweltarena Schweiz)



9.3 Montagesysteme

Die meisten PV-Komponenten sind heute soweit standardisiert und optimiert, dass eine Anlage rasch, einfach und kostengünstig installiert werden kann. Dies trifft aber nur bedingt auf die Verbindung des Montagesystems mit dem Dach zu: Falsch konzipiert oder installiert, birgt es die Gefahr von erheblichen Schäden an Anlage und Gebäude. Der lückenlose statische Nachweis des Montagesystems ist ein kritischer Punkt und soll in jedem Projekt vom Installateur respektive der Systemlieferantin eingefordert werden.

Auf Flachdächern haben sich Montagesysteme mit Schwerlastfundation ohne Dachdurchdringung durchgesetzt. Auf Schrägdächern werden meistens ein- oder zweilagige Profilschienen eingesetzt, die mit dem Dach verschraubt oder an die Dachhaut genietet werden. Für Anlagen an der Fassade steht ein breites Angebot zur Auswahl. Dabei ist die fehlende Erfahrung mit den meist in Kleinstserien hergestellten Systemen noch eine grosse Herausforderung.

9.4 Solarkabel

Auf die Solarkabel muss besonders geachtet werden, weil sie im Gegensatz zu anderen Elektrokabeln täglich Witterungseinflüssen ausgesetzt sind. Hinzu kommt, dass sie Gleichstrom führen und oft weder mit Schaltern noch mit Sicherungen geschützt werden können. Deshalb gilt es, bei der Wahl und Installation von Solarkabeln folgende Grundsätze zu beachten:

- Doppelt isolierte Kabel mit hoher UV-Resistenz verwenden.
- Die Kabel sollen trotz UV-Schutz nicht direkter Sonnenstrahlung ausgesetzt sein.
- Auf erhöhten Schutz gegen mechanische Beanspruchung achten – wo möglich in geschlossenen und geerdeten Metallkanälen und Rohren verlegen.

Bild 9.4: PV-Montagesystem für Gründächer.

Bild 9.5: PV-Montagesystem für Kiesdächer.

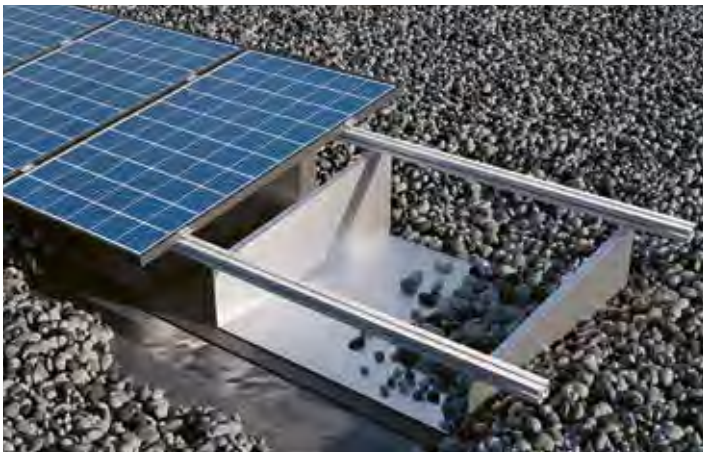
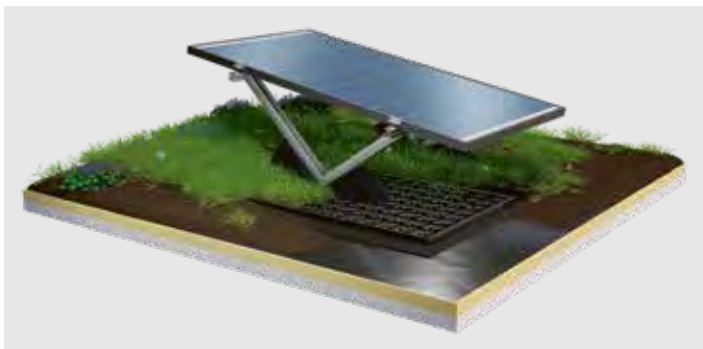


Bild 9.6: PV-Montagesystem für Schrägdächer.



9.5 Stecker

Ein noch ungelöstes Problem in der PV-Branche sind die DC-Stecker. Teilweise deklarieren die Modulhersteller die verwendeten Stecker als «MC4-kompatibel» und meinen damit, dass sie sich ohne allzu viel Gewalt in einen anderen, ebenfalls «MC4-kompatiblen» Stecker einstecken lassen.

Ob die Kontakte nach kurzer Zeit zu korrodieren beginnen, weil sie beispielsweise aus unverträglichen Materialien gefertigt sind und dabei ein akutes Brandrisiko verursachen, ist bei der Installation nicht überprüfbar. Darum dürfen nur Stecker vom gleichen Hersteller miteinander verbunden werden.

Gefahr durch Gleichstrom

Während Wechselstrom (englisch Alternating Current, AC) hundert Mal pro Sekunde einen Nulldurchgang hat, fließt Gleichstrom (englisch Direct Current, DC) ohne Nulldurchgang immer in die gleiche Richtung. Das hat zur Folge, dass ein Lichtbogen infolge eines losen Kontakts bei Wechselstrom hundert Mal pro Sekunde erlöscht und oft nach kurzer Zeit gar nicht mehr zu brennen beginnt. Demgegenüber kann der Lichtbogen unter Gleichstrom selbst bei grösserem Abstand zwischen den losen Kontakten noch weiterbrennen. Deshalb führt ein Wackelkontakt bei Gleichstrom schneller zu einem Schaden als bei Wechselstrom. Mit einer qualitativ hochwertigen Installation kann dieses Risiko jedoch stark reduziert werden.

Bild 9.8: Fünf verschiedene Fabrikate von PV-Modul-Steckern. Sie sind untereinander nicht kompatibel, auch wenn sie mechanisch zusammensteckt werden können.



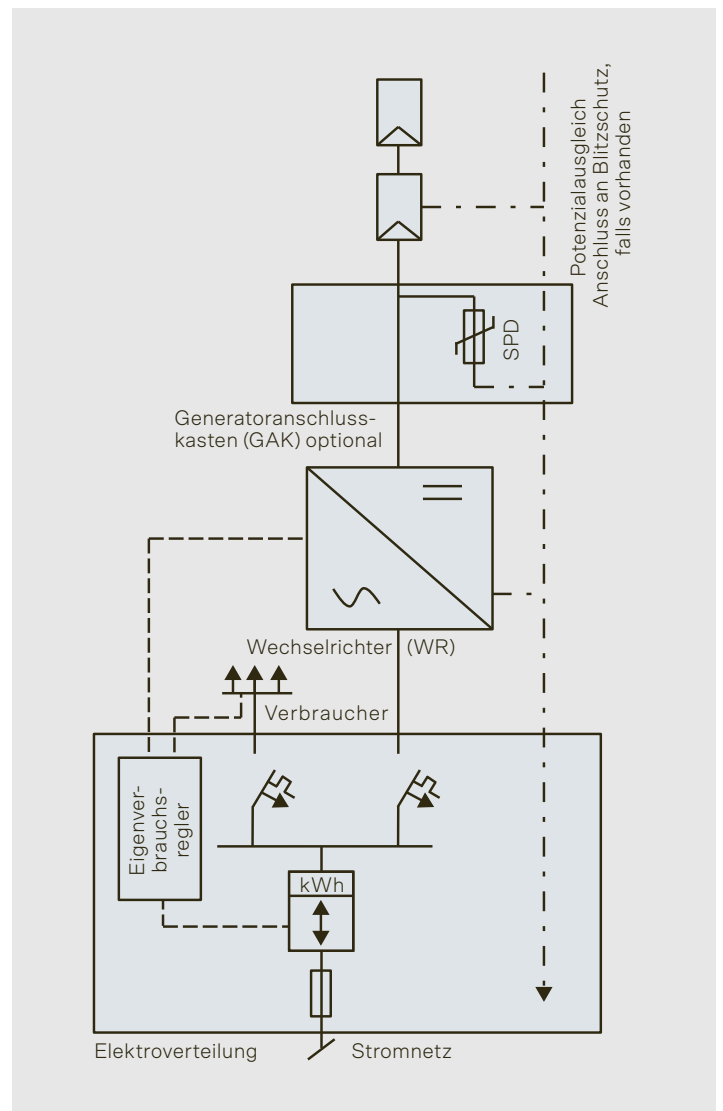
9.6 Generatoranschlusskasten

Im Generatoranschlusskasten (GAK) werden die Strangkabel gesammelt und parallel auf die Gleichstromhauptleitung geschaltet. Üblicherweise sind folgende Schutz- und Schaltelemente eingebaut:

- Strangsicherungen
- Überspannungsableiter (SPD)
- Gleichstromhauptschalter
- Überwachungseinheit

Bei Anlagen mit Strang- oder Multi-strangwechselrichtern wird meistens auf einen GAK verzichtet. In diesem Fall werden die Strangkabel direkt am Wechselrichter angeschlossen. Dieser sammelt dann nicht nur die Kabel, sondern übernimmt auch die Schutz- und Schaltfunktion des GAK.

Bild 9.7: Elektro-Übersichtsschema einer PV-Anlage mit Eigenverbrauchsregler. (Quelle: Basler & Hofmann AG)



9.7 Wechselrichter

Der Wechselrichter hat zwei Hauptaufgaben: Er wandelt den Gleichstrom von den PV-Modulen in netzkonformen Wechselstrom um und er betreibt die Module im optimalen Betriebspunkt (MPP). Zudem soll er die Netzqualität nicht negativ beeinflussen, was eine Reihe von Detailanforderungen mit sich bringt.

Moderne Wechselrichter sind wahre Multitalente und können in aller Regel mehr als die aktuellen Vorschriften verlangen. Dies ist auch zwingend notwendig, denn die Vorschriften rund um den Anschluss von PV-Anlagen werden laufend angepasst. Dies soll aber keinen Austausch der Wechselrichter zur Folge haben.

Wechselrichter gibt es in Leistungsklassen von wenigen hundert Watt bis weit über ein Megawatt. Dabei ist es jedoch nicht immer die Grösse einer PV-Anlage, welche die Grösse des Wechselrichters bestimmt. Auch viele Grossanlagen werden mit einer Vielzahl kleiner Wechselrichter betrieben. Welches Wechselrichterkonzept effizienter ist, ist letztlich oft eine Philosophiefrage: Viele kleinere Wechselrichter haben eine höhere Ausfallquote als ein grosser, dafür ist der Ertragsausfall bei einem Defekt kleiner und der Installateur kann das Gerät selbst austauschen. Auch aus logistischen Gründen ist es bei Gebäuden meist einfacher, mehrere kleine statt eines grossen Wechselrichters zu installieren.

Dimensionierung des Wechselrichters

Heute ist fast jedes PV-Modul mit fast jedem Wechselrichter kompatibel. Trotzdem müssen folgende Punkte beachtet werden:

- Die maximale Strangspannung darf die maximal zulässige Eingangsspannung des Wechselrichters nicht überschreiten.
- Der maximale Strom aller Stränge darf den maximal zulässigen Eingangsstrom des Wechselrichters nicht überschreiten.

- Gewisse Module müssen geerdet werden. In diesem Fall muss der Wechselrichter über eine galvanische Trennung von Gleich- und Wechselstromseite verfügen (Transformator).
- Die Leistung von PV-Modul und Wechselrichter müssen aufeinander abgestimmt sein.

Der letzte Punkt gibt dabei immer wieder Anlass zu Diskussionen: Weil die Nennleistung der PV-Module nur selten oder bei schlechter Ausrichtung gar nie erreicht wird, kann der Wechselrichter kleiner dimensioniert werden als die PV-Module. Doch wie viel kleiner?

(Bild 9.11) zeigt die Energieertragsverluste als Funktion der Wechselrichtergrösse mit Anlagestandort Zürich. Je kleiner der Wechselrichter gewählt wird, desto tiefer sind die Kosten für den Wechselrichter und Netzanschluss. Diese Einsparungen müssen den erwarteten Ertragsverlusten gegenübergestellt werden, um die optimale Wechselrichtergrösse zu finden. Bei stetig sinkenden Kosten für die PV-Module dürfte man jedoch mit rund 1 bis 2 % Ertragsverlust nicht ganz falsch liegen. Bei einer optimal nach Süden ausgerichteten Anlage im Schweizer Mittelland ist dies bei etwa 70 % Wechselrichterleistung der Fall. Eine horizontal installierte Anlage braucht hingegen nur 60 % der Wechselrichterleistung um 99 % der Solarenergie ins Netz einzuspeisen.

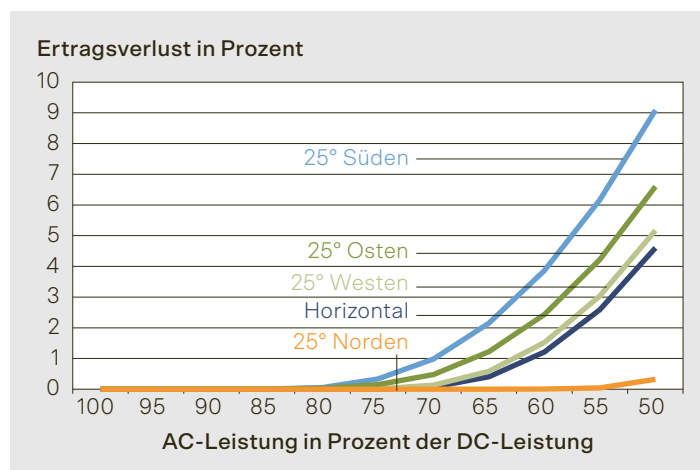


Bild 9.9: Wechselrichter von Fronius, 3 kW. (Quelle: Fronius Schweiz AG)



Bild 9.10: Wechselrichter von ABB, 20 kW. (Quelle: ABB)

Bild 9.11: Ertragsverlust in Abhängigkeit der Wechselrichterdimensionierung für eine PV-Anlage in Zürich. (Quelle: Basler & Hofmann)



9.8 Schutz- und Sicherungselemente

In PV-Anlagen müssen verschiedene Schutz- und Sicherheitselemente integriert werden. Die wichtigsten sind:

- Blitzschutz: Eine PV-Anlage löst keine Blitzschutzpflicht aus. Ob ein Gebäude einen Blitzschutz benötigt oder nicht, hängt nicht von der PV-Anlage ab, sondern wird von den Feuerversicherungen bestimmt. Die Vorschriften zur Umsetzung werden in den Leitsätzen des Schweizerischen Verbands für Elektro-, Energie- und Informationstechnik (SEV) festgehalten [SEV].

- Überspannungsableiter: Überspannungsableiter reduzieren das Risiko, dass eine von einem Blitzschlag induzierte Spannung Schaden an Elektroinstallationen anrichten kann. Falls ein Gebäude ein äusseres Blitzschutzsystem hat, werden Überspannungsableiter im Idealfall beim Gebäudeeintritt der Kabel der PV-Anlage installiert. Dann muss ein SPD Typ 1 vorgesehen werden. Nur dieser ist in der Lage, den Strom eines Direkteinschlags abzuleiten. Wenn kein Blitzschutz vorhanden ist, genügt ein SPD Typ 2, der möglichst nahe beim zu schützenden Gerät installiert werden soll. Sind die Leitungen kürzer als 30 m, darf sogar ganz auf einen Überspannungsableiter verzichtet werden. In der Südschweiz ist dies wegen der höheren Gewitterwahrscheinlichkeit bei weniger als 20 m der Fall.

- Sicherungen: Wechselstromseitig werden dieselben Sicherungen wie in herkömmlichen Elektroinstallationen eingesetzt. Auf der Gleichstromseite verhindern DC-Sicherungen, dass im Kurzschlussfall bei einer Parallelschaltung mehrere intakte Stränge auf einen kurzgeschlossenen Strang Strom einspeisen. Der Kurzschluss in einem einzelnen, nicht mit anderen Strängen parallel geschalteten Strang kann nicht abgesichert werden, weil er fast dem normalen Betriebsstrom entspricht. Kleinere PV-Anlagen benötigen deshalb meistens keine DC-Sicherungen.

- Fehlerstromschutzschalter (FI-Schalter): Sie trennen eine PV-Anlage vom Netz, wenn beispielsweise durch einen Isolationsfehler Strom aus der Anlage auf die Erde abfließt. Für PV-Anlagen, die nicht galvanisch vom Netz getrennt sind, also solche mit Wechselrichtern ohne Transformator, ist eine Fehlerstromüberwachung vorgeschrieben. Meistens ist diese aber bereits im Wechselrichter integriert. Ein zusätzlicher FI-Schalter ist dann notwendig, wenn das Wechselstromkabel zum Wechselrichter durch brandgefährdete Räume verlegt wird. Das kann der Fall sein, wenn sie durch einen Stall in einem Bauernhof führen.

9.9 Trenn- und Schaltelemente

Wechselstromseitig werden dieselben Komponenten wie in herkömmlichen Elektroinstallationen als Trenn- und Schaltelemente eingesetzt. Gleichstromseitig müssen gleichstromtaugliche Schalter verwendet werden.

Basierend auf der Empfehlung [NA/EEA 2020] des VSE verlangen einige Netzbetreiber den Einsatz eines sogenannten Netz- und Anlageschutzes (NA-Schutz) als separate Trennschalter. Dieser überwacht das Stromnetz und trennt die Anlage vom Netz, wenn die Spannung oder die Frequenz nicht mehr im zulässigen Bereich sind. Da diese Funktionen ohnehin im Wechselrichter eingebaut sind, ist der Einsatz eines zusätzlichen NA-Schutzes umstritten. Verschiedene internationale Normen halten fest, dass die geräteintegrierte Schutzfunktion von Wechselrichtern für den NA-Schutz genügen.

9.10 Messeinrichtungen

Traditionell kennt man bei PV-Anlagen die folgenden drei Messanordnungen:

- Überschussmessung (Bild 9.12, oben):

Nur überschüssiger Solarstrom wird ins Netz eingespeist und gemessen. Dies ist das kostengünstigste Messsystem, da es für die PV-Anlage keinen zusätzlichen Zähler braucht. Der Trend hin zu mehr Transparenz in der Stromproduktion führt aber dazu, dass die Überschussmessung nicht immer akzeptiert wird. Bei Anlagen grösser als 30 kVA wird heute auch bei einer Überschussmessung eine zusätzliche Produktionsmessung gefordert.

- Einspeisemessung (Bild 9.12, Mitte):

Zu Zeiten hoher Einspeisevergütungen war dies die bevorzugte Messanordnung. Damit kann die Stromproduktion gemessen und der Strom verkauft werden. Weil die Einspeisung ins öffentliche Netz heute aber nicht mehr wirtschaftlich ist, wird diese Messanordnung weniger oft verwendet.

- Hintermessung oder Hinterschaltung (Bild 9.12, unten): Diese Messanordnung wurde früher besonders innerhalb von Arealnetzen verwendet, wenn der Solar-

strom verkauft werden sollte, aber eine Leitung zum Einspeisepunkt für die PV-Anlage unverhältnismässig teuer gewesen wäre. Heute wird die Hintermessung oft im Zusammenhang mit Eigenverbrauchsanlagen verwendet, die aufgrund ihrer hohen Leistung eine separate Produktionsmessung benötigen.

Die Netzbetreiber setzen zunehmend intelligente Stromzähler (Smart Meter) ein. Dies bedeutet, dass jede PV-Anlage und jede Verbrauchsstätte ein eigenes, relativ kostengünstiges Messgerät erhalten.

Als Messanordnung kann dabei meist die Einspeisemessung gewählt werden. Dies bedeutet aber nicht, dass aller Strom eingespeist wird und kein Eigenverbrauch möglich ist. Die Messwerte von Smart Metern können beliebig miteinander verrechnet werden. Falls also in einem Gebäude der Solarstrom eines Tages einem anderen Verbraucher zugewiesen werden soll, braucht es dafür lediglich eine neue Konfiguration des Messsystems beim Netzbetreiber und keinen Eingriff vor Ort.

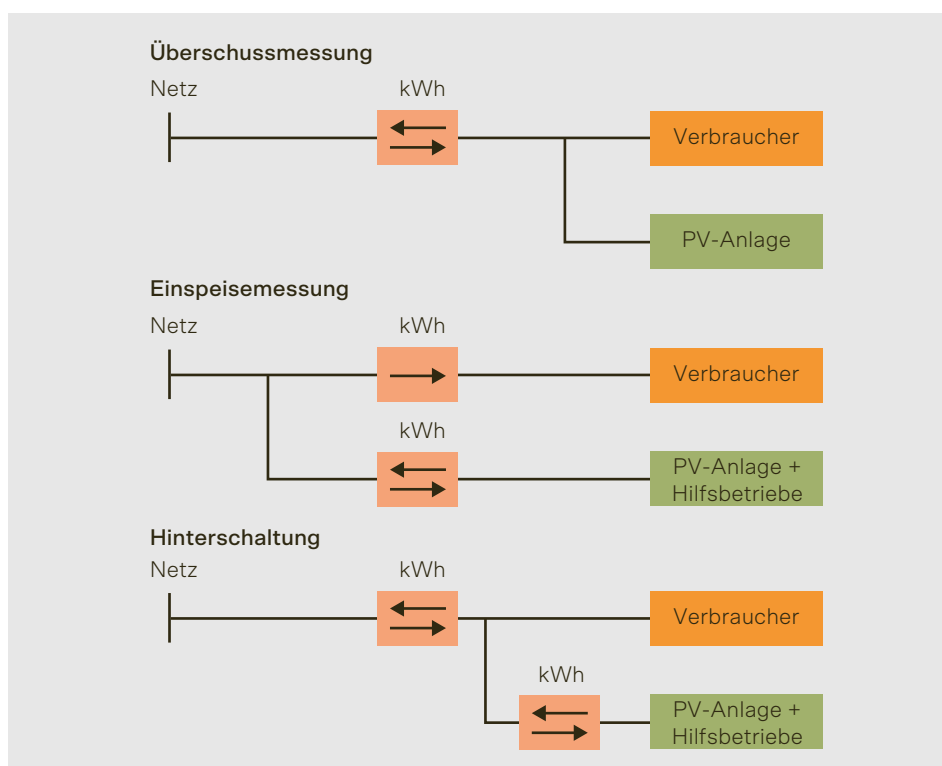


Bild 9.12: Schemas für Produktionsmessungen an PV-Anlagen.



Bild 9.13: Wechselrichterunabhängiges Monitoringsystem SolarLog. (Quelle: Solare Datensysteme GmbH).

9.11 Kommunikationssystem

Ein Kommunikationssystem gehört heute zum Standard einer PV-Anlage, einzig bei Kleinanlagen wird manchmal darauf verzichtet. Typischerweise nimmt das Kommunikationssystem folgende Funktionen wahr:

- Bidirektionale Schnittstelle zwischen PV-Anlage und Betreiber
- Täglicher Versand der Anlageertragsdaten per E-Mail
- Alarmierung im Fehlerfall per E-Mail oder SMS

Das System ist dabei über Breitbandanschluss oder Mobilfunk mit dem Internet verbunden. Fast jeder Wechselrichterhersteller liefert zu seinen Geräten ein passendes Kommunikationssystem. Damit ist zwar die bestmögliche Anlagebedienung und Anlageüberwachung möglich, jedoch ist keine Kompatibilität zu anderen Wechselrichtern gegeben. Wer also ein Portfolio von verschiedenen PV-Anlagen überwachen möchte, setzt besser auf ein anlageunabhängiges Kommunikationssystem.

9.12 Batteriespeicher

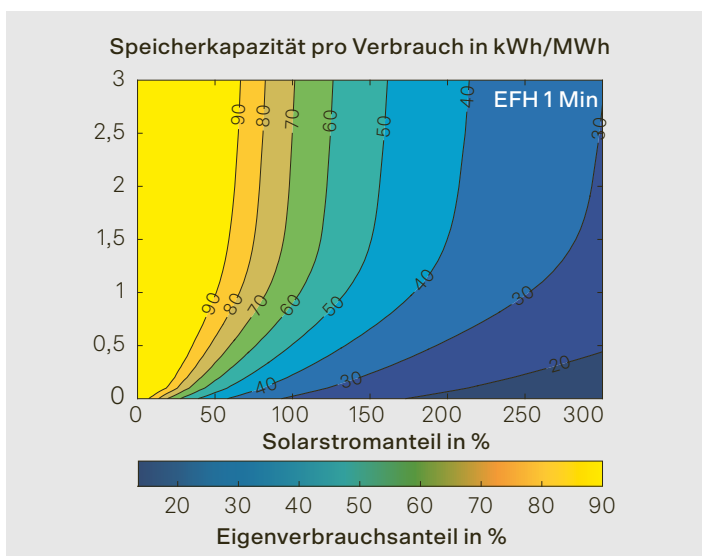
Einen Batteriespeicher als Teil einer PV-Anlage anzusehen, ist nicht ganz unumstritten. Tatsache ist: Obwohl Batteriespeicher in der Schweiz bisher weder gefördert werden noch von der Steuer abgezogen werden können, wird heute rund jede vierte neu gebaute PV-Anlage mit einem Speichersystem ausgerüstet. Finanziell lohnt sich diese Investition derzeit meist nicht. Vielmehr ist es der emotionale Wert, möglichst viel des eigenen Solarstroms selbst verbrauchen zu können, der die Entscheidung für einen Speicher massgeblich beeinflusst. Auch die Ökologie von Batterien ist umstritten: Da Batterien im Gegensatz zu PV-Anlagen Strom nur speichern, aber nicht produzieren können, haben sie per se nur negative Umweltauswirkungen. Wenn aber dank Batterien mehr erneuerbare Energie ins Stromnetz eingespeist werden kann, ist dies positiv zu werten.

Heute braucht die Schweiz noch keine Batterien, um Solarstrom ins Netz zu integrieren. In Zukunft dürfte sich dies aber ändern. Wenn Massnahmen wie die Flexibilisierung von Verbrauchern und von konventionellen Kraftwerken ausgeschöpft sind, könnten die Batteriespeicher eine systemrelevante Rolle übernehmen. Die rasant zunehmende Elektromobilität dürfte aber etwa zehnmal mehr Speicherkapazität mit sich bringen, als für die Speicherung in Gebäuden erforderlich ist. Falls die Elektroautos also künftig bidirektional geladen werden können dürften sich Heimspeicher erübrigen.

Die Dimensionierung von Batteriespeichern hängt vom Einsatzzweck ab. Zur Eigenverbrauchsoptimierung sind eine bis zwei Stunden Speicherkapazität pro kW DC-Leistung der Anlage sinnvoll, oder ungefähr ein halber Tagesbedarf der Verbraucher, die mit der Batterie versorgt werden sollen. Bild 9.14 zeigt, wie sich der Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit der PV-Anlageleistung und der Batteriekapazität verändert.

Bild 9.14:

Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit des Verhältnisses von installierter Speicherkapazität zum jährlichen Stromverbrauch für ein Einfamilienhaus.



9.13 Eigenverbrauchsregler

Bevor über die Anschaffung eines Batteriespeichers nachgedacht wird, sollten die Möglichkeiten zur Optimierung der Verbraucher geprüft werden. Insbesondere Trinkwarmwasser, Heizung (Wärmepumpen) und die Elektromobilität bieten ein sehr grosses und teils finanziell interessantes Potenzial zur Erhöhung des Eigenverbrauchs von Solarstrom. Regler zur Optimierung des Eigenverbrauchs lassen sich in die folgenden Kategorien einteilen:

- Wechselrichtergesteuertes System: Viele Wechselrichter bieten heute die Möglichkeit, nahezu ohne Mehrkosten Verbraucher ein- und auszuschalten. Populär ist dabei insbesondere die Übersteuerung des Rundsteuersignals zur Freigabe eines (Wärmepumpen-) Warmwasserspeichers oder einer Wärmepumpe.
- Eigenverbrauchsregler: Ab wenigen hundert Franken sind Regler erhältlich, welche die PV-Produktion mit dem Stromverbrauch vergleichen und gestützt darauf die Verbraucher im Gebäude beeinflussen. Ladestationen für Elektrofahrzeuge haben solche Regler meist integriert.
- Gebäudeautomationssysteme: Wesentlich teurer sind Systeme, die das Gebäude automatisieren und dabei den Eigenverbrauch optimieren. Diese werden jedoch primär zur Komfortsteigerung im Gebäude angeschafft – sie optimieren den Eigenverbrauch nur nebenbei.

Bild 9.15: Eigenverbrauchsregler Smartfox. (Quelle: DAfi GmbH)



9.14 Energieertrag einer PV-Anlage

Der jährliche Energieertrag einer PV-Anlage lässt sich bereits mit sehr wenigen Angaben zur Anlage erstaunlich genau abschätzen. Der «ideale Jahresertrag» E_{ideal} berechnet sich nach folgender Formel:

$$E_{ideal}(\text{kWh}) = \frac{P(\text{kW})}{1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} \cdot H \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right)$$

Dabei ist P die Anlageleistung in kW, die bei STC (also = 1 kW/m² Bestrahlungsstärke) gilt, und H die Jahressumme der Globalstrahlung in kWh/m².

In der Realität fällt der jährliche Anlageertrag E_{real} , der effektiv ins Stromnetz eingespeist wird, meist geringer aus. Dafür sind eine Reihe von Verlusten verantwortlich, wie der Wirkungsgrad des Wechselrichters, die ohmschen Verluste in den Kabeln, die verminderte Effizienz der PV-Module durch hohe Zelltemperaturen oder eine geringe Globalstrahlung. Das Verhältnis von realem zu idealem Energieertrag wird «Performance Ratio» (PR) genannt:

$$\frac{E_{real}}{E_{ideal}} = PR$$

Die Erfahrung zeigt nun, dass die allermeisten PV-Anlagen über das Jahr gesehen eine PR von 75 bis 85 % (0,75 bis 0,85) erreichen. Sind von einer geplanten Anlage also nur gerade die Leistung, der Standort sowie die Ausrichtung und Neigung bekannt, lässt sich der Anlageertrag mit einer geschätzten PR von 80 % (0,8) recht genau vorhersagen:

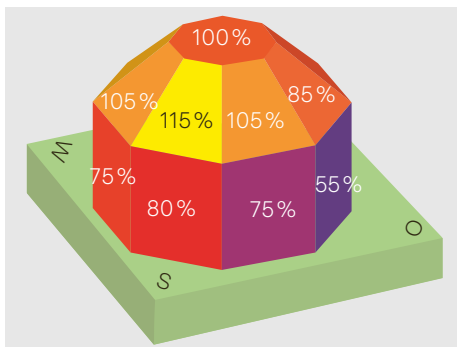
$$E_{real} = PR \cdot E_{ideal}$$

Simulationsprogramme können helfen, den Energieertrag noch genauer abzuschätzen. Allerdings ist eine höhere Genauigkeit tückisch: Die grossen Unbekannten sind unter anderem die wirkliche Globalstrahlungssumme, die Verschmutzung der PV-Module sowie ihr

Schwachlicht- und Temperaturverhalten. Diese Einflüsse wiegen in Summe deutlich schwerer als die Fehler einer vereinfachten Rechenmethode. Auf eine präzise Ertragssimulation kann deshalb bei PV-Anlagen ohne starke Teilverschattung meist verzichtet werden.

Im Schweizer Mittelland erzielt eine nach Süden ausgerichtete PV-Anlage mit rund 30 bis 45 ° Neigungswinkel die höchsten Erträge. Doch selbst relativ starke Abweichungen von dieser optimalen Ausrichtung reduzieren den Energieertrag nicht übermässig. So lässt sich beispielsweise auf einem Flachdach, auf dem die Module horizontal installiert und nicht geneigt werden, immer noch rund 90 % des maximalen Energieertrags erzielen. Dies trifft zumindest in nicht allzu schneereichen Gegenden zu (Bild 9.16).

Bild 9.16: Relativer Energieertrag von PV-Anlagen auf verschieden ausgerichteten Flächen in Prozent. Als Basis (100 %) dient die Einstrahlung auf die horizontale Fläche gemäss [SIA 2028]. (Quelle: Swissolar)



9.15 Eigenverbrauch

Die aktuellen Rahmenbedingungen führen auf der einen Seite dazu, dass die Gestehungskosten für Solarstrom meistens tiefer sind als die für Strom aus der Steckdose. Auf der anderen Seite sind aber die Rückliefertarife für ins Netz eingespeisten Solarstrom oft tiefer als dessen Gestehungskosten. Selbst verbrauchter Solarstrom ist somit rentabel, während eingespeister Solarstrom ein Verlustgeschäft ist. Der Eigenverbrauchsanteil, also der Anteil am Solarstrom, der zeitgleich zur Produktion vor Ort verbraucht oder gespeichert wird, hängt dabei insbesondere von folgenden Rahmenbedingungen ab:

- Leistung der PV-Anlage: Je kleiner die Anlage ist, desto grösser ist der Eigenverbrauch.
- Stromverbrauch: Je höher der Stromverbrauch im Gebäude ist, desto höher ist der Eigenverbrauch.
- Verbrauchsprofil: Je mehr Strom tagsüber verbraucht wird, desto höher ist der Eigenverbrauch. Wohnungen haben einen relativ tiefen Eigenverbrauchsanteil, während Pflegezentren und Büros einen hohen Eigenverbrauchsanteil haben. Ein Sonderfall sind Schulen: Einerseits haben sie eine ausgeprägte Tagesnutzung, andererseits führen die Wochenenden und die Sommerferien dazu,

Eigenverbrauchsanteil in %

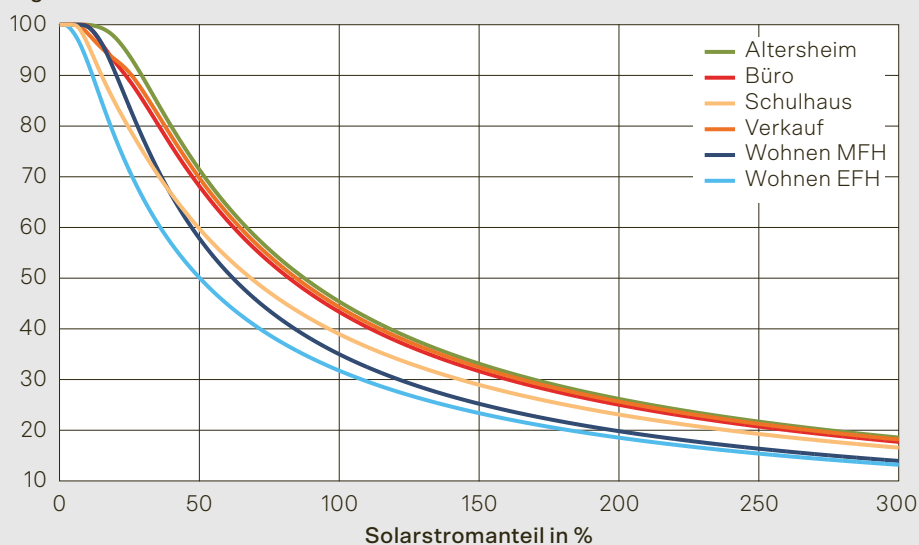


Bild 9.17: Eigenverbrauchsanteile verschiedener Nutzungsprofile.

dass ein Eigenverbrauchsanteil von 100 % selbst bei sehr kleinen PV-Anlagen kaum erreicht werden kann (Bild 9.17).

- Optimierung: Mit Lastverschiebungen lässt sich der Eigenverbrauch erhöhen.
- Batteriespeicher: Mit Speichern kann der Eigenverbrauch typischerweise verdoppelt werden.

Seit 2018 dürfen sich mehrere Stromverbraucher zu einem einzigen Endverbraucher zusammenschliessen, wenn sie über eine PV-Anlage verfügen, deren Leistung mindestens 10 % der Anschlussleistung des Zusammenschlusses entspricht. Dies nennt man «Zusammenschluss zum Eigenverbrauch» (ZEV). Diese vermeintlich einfache Regelung und die weiterführenden Bestimmungen dazu ziehen eine ganze Reihe von Konsequenzen mit sich. Einige davon sind:

- Weil die Partner eines ZEV als ein einziger Endverbraucher gelten, dürfen sie die Strommessungen und -verrechnungen innerhalb des ZEV selbst machen. Sowohl an die Messungen als auch an die Verrechnungen werden aber von Ge-

setzes wegen verschiedene, teils hohe Anforderungen gestellt.

- Verbraucht der ZEV mehr als 100 000 kWh pro Jahr, darf er den zugekauften Strom am liberalisierten Strommarkt selbst beschaffen.
- Um die Mieterschaft vor potenziell höheren Stromkosten zu schützen, greift die Energieverordnung stark in die Preisgestaltung von eigenverbrauchtem Solarstrom ein.

Trotz diesen Vorschriften und gewissen Unsicherheiten lohnt sich Eigenverbrauch finanziell oft. Die Umsätze und Margen sind aber meistens gering und bedingen schlanke Strukturen im Betrieb eines ZEV. Weiterführende Informationen dazu sind im «Leitfaden Eigenverbrauch» von Swissolar zu finden [Swissolar].

Was ist Eigenverbrauch?

Nach Artikel 16 des Energiegesetzes [EnG] ist selbst produzierte Energie, die «am Ort der Produktion» verbraucht wird, Eigenverbrauch. Etwas konkreter wird Artikel 14 der Energieverordnung [EnV], in der die Elektrizität dann als am Ort der Produktion verbraucht gilt, wenn sie «das Verteilnetz des Netzbetreibers nicht in Anspruch genommen hat».

In der Praxis ist auch das noch nicht eindeutig. So wird in der Schweiz phasensaldierend gemessen, das heisst, wenn gleichzeitig auf einer Phase Strom eingespeist und auf der anderen bezogen wird, gilt dies trotzdem als Eigenverbrauch. Wenn hingegen innerhalb eines 15-minütigen Messintervalls zuerst fünf Minuten Strom bezogen und danach fünf Minuten Strom eingespeist wird, so ist dies kein Eigenverbrauch.

9.16 Quellen

- [EnG] Energiegesetz vom 30. September 2016. www.admin.ch
- [EnV] Energieverordnung (EnV) vom 1. November 2017. www.admin.ch
- [NA/EEA 2020] Branchenempfehlung VSE – Netzanschluss für Energieerzeugungsanlagen an das Niederspannungsnetz. Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE). Aarau, 2020.
- [NIN] Niederspannungs-Installationsnorm, SN 411000
- [NIV] Verordnung über elektrische Niederspannungsinstallationen, Niederspannungs-Installationsverordnung (NIV) vom 7. November 2001. www.admin.ch
- [SEV] Electrosuisse: Leitsätze des Schweizerischen Verbands für Elektro-, Energie- und Informationstechnik (SEV), Blitzschutzsysteme, 4022. Fehraltorf, 2008.
- [SIA 2028] Merkblatt SIA 2028 – Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). Zürich, 2008.
- [Swissolar] Swissolar: Leitfaden Eigenverbrauch. Zürich, 2021. www.swissolar.ch

Anhang

10.1 Autoren

Reto von Euw, Prof. dipl. HLK-Ing. FH, dipl. Sanitärtechniker TS; Dozent für Gebäudetechnik am Institut Gebäudetechnik und Energie (IGE) der Hochschule Luzern – Technik & Architektur in Horw. Präsident der SIA NK 385, Mitglied der SIA Kommission für Gebäudetechnik- und Energienormen (KGE).

Zoran Alimpic, Prof. Dr. dipl. HLK-Ing. FH, MBA; eidg. dipl. Energieberater; hauptamtlicher Dozent am Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE und am Zentrum für Integrale Gebäudetechnik ZIG der Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Abteilung Gebäudetechnik in Horw.

Heinrich Huber, Prof. dipl. Masch.-Ing. FH und HLK-Ing. FH; hauptamtlicher Dozent für Gebäudetechnik am Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE und Leiter der Prüfstelle Gebäudetechnik am Zentrum für Integrale Gebäudetechnik ZIG der Hochschule Luzern – Technik & Architektur in Horw.

Christof Bucher, Christof Bucher, Prof. Dr. sc. ETH Zürich; Dozent, Leiter Labor für Photovoltaiksysteme an der Berner Fachhochschule – Technik und Informatik. Leiter und Dozent CAS Photovoltaik an der Hochschule Luzern. Vorsitzender des nationalen Normenkomitees CES/IEC TC 8 und 82. Mitglied Swissolar-Fachkommission «PV Technik».

René Mosbacher, Chemiker FH, Fachjournalist und Lektor, arbeitet bei Faktor Journalisten AG und beim Faktor Verlag. Seine Themenschwerpunkte sind Gebäudetechnik sowie Energie und Nachhaltigkeit am Bau.

Marvin King, Dipl. Ing. Architekt SIA, Bauökonom AEC; Senior Wiss. Mitarbeiter an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur. Leiter diverser Forschungsprojekte zu Themen des nachhaltigen Bauens und Sanierens, mit Schwerpunkten der gesamtheitlichen Betrachtung des Lebenszyklus von Gebäuden und Bauteilen.

Jürg Nipkow, dipl. El.-Ing. ETH/SIA; ARENA Arbeitsgemeinschaft EnergieAlternativen, Zürich. Langjährige Tätigkeit als Experte für Energieeffizienz, ehem. Mitglied der SIA-Kommission 2056 «Elektrizität in Gebäuden».

Björn Schrader, Prof. dipl. El.-Ing. TU; Dozent, Leiter der Themenplattform Licht@hslu an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur. Mitglied des Expert Boards der Electrosuisse, Inhaber des Beratungsbüros Lichtkollektiv, Zürich.

Gianrico Settembrini, dipl. Arch. ETH/SIA, MAS EN Bau; Senior Wiss. Mitarbeiter und Leiter der Forschungsgruppe Nachhaltiges Bauen und Erneuern am Institut für Gebäudetechnik und Energie der Hochschule Luzern – Technik & Architektur.

Olivier Steiger, Prof. Dr. dipl. El.-Ing. ETH; Dozent und Forschungsgruppenleiter am Institut für Gebäudetechnik und Energie (IGE) der Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw. Seine Schwerpunkte sind Gebäudeautomation und IoT.

10.2 Abkürzungen

AAL	Ambient Assisted Living, auch Active Assisted Living, sinngemäss: Assistenzsysteme fürs Leben im Alter	EEl	Energy Efficiency Index
AC	Alternating Current, Wechselstrom	EER	Energy Efficiency Ratio, Leistungszahl, bei Kältemaschinen meist anstelle des COP verwendet
AMEV	Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik, Deutschland	EFH	Einfamilienhaus
ARA	Abwasserreinigungsanlage	EnEV	Energieeffizienzverordnung
AWN	Abwärmenutzung	EnOcean	Herstellerübergreifender Standard für die Überwachung und Steuerung von Gebäudetechnik mit batterieloser Funksensorik
BACnet	Building Automation and Control Networks, Netzwerkprotokoll für die Gebäudeautomation	ES	Energiespeicher
BAG	Bundesamt für Gesundheit	ESEER	European Seasonal Energy Efficiency Ratio, Leistungszahl, die die saisonalen Rahmendingungen in Europa berücksichtigt
Bafu	Bundesamt für Umwelt	EUA	Europäische Umweltagentur
BFE	Bundesamt für Energie	EWS	Erdwärmesonde
BIM	Building Information Modeling, Bauwerksdatenmodellierung	FBH	Fussbodenheizung
BLV	Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen	FI-Schalter	Fehlerstromschutzschalter
BSK	Brandschutzklappe	FWS	Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz
CCT	Correlated Color Temperature, engl. für Farbtemperatur	GA	Gebäudeautomation
ChemRRV	Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung	GAK	Generatoranschlusskasten, bei PV-Anlagen
CIE	Internationale Beleuchtungskommission	GWP	Treibhauspotenzial, engl. Global Warming Potential
COP	Leistungszahl bei Wärmepumpen, engl. Coefficient of Performance	g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad
CRI	Farbwiedergabeindex, engl. Colour Rendering Index (auch → Ra)	HK	Heizkreis
DALI	Digital Addressable Lighting Interface, Protokoll für Beleuchtungsanlagen in der Gebäudeautomation	HLC	In der Gebäudetechnik umfassend für Heizung, Lüftung, Klima
DC	Direct Current, Gleichstrom	IEQ	Indoor Environment Quality, Raumluftqualität
DDC-GA	Direct-Digital-Control-Gebäudeautomation, (Anlagen-)Automationssystem	IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
DEC	Desiccative and Evaporative Cooling, Kühlung durch Trocknung und Verdunstung	IPCC	Weltklimarat, engl. Intergovernmental Panel on Climate Change
DMX	Digital Multiplex, Protokoll für die digitale Beleuchtungssteuerung in der Gebäudeautomation	IoT	Internet of Things, Internet der Dinge
DRV	Druckreduzierventil, auch: Druckminderer	IV	Isolierverglasung
DV	Durchgangsstellorgan	JAZ	Jahresarbeitszahl, bei Wärmepumpen
eBO	Energetische Betriebsoptimierung	KM	Kältemaschine
EATR	Exhaust Air Transfer Ratio, Abluftübertragungsrate	KNX	Konnex-Bus, in der Gebäudeautomation
EC	Electronically Commutated, elektronisch kommutiert, bei Elektromotoren, auch: bürstenlose Motoren	KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
		KVS	Kreislaufverbundsystem
		KW	Kaltwasser
		LED	Lichtemittierende Diode oder Leuchtdiode
		LON	Local Operating Network, Feldbus in der Gebäudeautomation
		LSV	Lärmschutz-Verordnung

LVK	Lichtstärkeverteilungskurve	r. F.	Relative Luftfeuchte
MFH	Mehrfamilienhaus	SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition, in der Gebäudeautomation für Überwachung, Steuerung und Datenerfassung
Modbus	Feldbus, in der Gebäudeautomation		
MPP	Maximum Power Point, Betriebspunkt der maximalen Leistung eines PV-Moduls	SDG	Sustainable Development Goals, Ziele zur nachhaltigen Entwicklung gemäss der Uno-Agenda 2030 für die nachhaltige Entwicklung
MP-Bus	Kurz für Multi Point Bus, Mehrpunktbus, technische Norm für die Steuerung von HLK-Anlagen	Seco	Staatssekretariat für Wirtschaft
MuKEn	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich	SFP	Specific Fan Power, spezifische Ventilatorleistung
M-Bus	Kurz für Meter-Bus, technische Norm für das Monitoring des Energieverbrauchs in der Gebäudeautomation	SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
NA	Nacherwärmung	SL	Standardlösung für die Wärmeversorgung gemäss MuKEn
NA-Schutz	Netz- und Anlageschutz, bei PV-Anlagen	SMI	Standard Motor Interface, Schnittstellenstandard für Jalousie- oder Rollladenmotoren in der Gebäudeautomation
NGF	Nettogeschossfläche	SNG	Systemnutzungsgrad
NIN	Niederspannungsinstallationsnorm	SNV	Schweizerische Normen-Vereinigung
NIV	Niederspannungsinstallationsverordnung	SPD	Surge Protective Devices, Überspannungsableiter
NW	Nachwärmespeicher	SPS	Automationsstation oder speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), in der Gebäudeautomation
OACF	Outdoor Air Correction Factor, Aussenluftkorrekturfaktor	SPWE	Speicherwassererwärmer
ODP	Ozonabbaupotenzial, engl. Ozon Depletion Potential	StSV	Eidgenössische Strahlenschutzverordnung
P2P	Siehe PtP	SV	Sicherheitsventil
PE	Polyethylen	SVGW	Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches
PEne	Graue Energie	SWKI	Ehem. Schweizerischer Verein von Wärme- und Klimaingenieuren, heute Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren
PIR	Pyroelektrische Sensoren	Ta	Farbtemperatur, in der Beleuchtungstechnik
PPD-Index	Predicted percentage of dissatisfied, Index zum Beschreiben des voraussichtlichen Anteils an mit dem Raumkomfort Unzufriedenen	TABS	Thermoaktives Bauteilsystem
PR	Performance Ratio, Verhältnis von realem zu idealem Energieertrag einer PV-Anlage	TEWI	Total Equivalent Warming Impact
PtP	Point to Point, Punkt-zu-Punkt-Verbindungen respektive Direktverbindungen, in der Gebäudeautomation	TGM	Technisches Gebäudemanagement
PV	Photovoltaik	THG	Treibhausgas
PWM	Pulsweitenmodulation, z. B. zur Leistungsregelung von elektrischen Geräten	THGE	Treibhausgasemissionen
PWÜ	Platten-Wärmeübertrager	UBP	Umweltbelastungspunkte, in der Ökobilanzierung
Ra	Farbwiedergabeindex (auch → CRI)	ÜSLD	Überströmungsdurchlass
RK	Rückkühler	USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
RL	Raumluft, bei Lüftungen	UV	Umstellventil
RL	Rücklauf, bei Heizung, Kühlung, Warmwasser	U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
RLT	Raumlufttechnik		
RV	Rückflussverhinderer		

VAV	Variable Air Volume, Variabler Volumenstrom, in der Raumluftechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VE	Vorerwärmung
VKF	Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
VL	Vorlauf
VOC	Volatile Organic Compounds, flüchtige organische Verbindungen
VT	Totalvolumen, bei thermischen Solaranlagen
VV	Vorwärmvolumen, bei thermischen Solaranlagen
VVA	Variable Air Volume, siehe VVS
VVS	Variabler Volumenstrom, in der Lüftungstechnik
VW	Vorwärmespeicher
VZ	Bereitschaftsvolumen, bei thermischen Solaranlagen
WA	Wärmeabgabe
WE	Wärmeerzeuger, in der Wärmetechnik
WE	Wassererwärmung, in der Warmwasserversorgung
WKK	Wärmeerkraftkopplung
WNG	Wärmeerzeugernutzungsgrad
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung
WÜT	Wärmeübertrager
WV	Wärmeverbraucher
WW	Warmwasser (warmes Trinkwasser – Vorlauf)
WWSP	Warmwasserspeicher
WWZ	Warmwasserzirkulation
ZEV	Zusammenschluss zum Eigenverbrauch, bei PV-Anlagen
ZigBee	Spezifikation für drahtlose Netzwerke in der Gebäudeautomation
Z	Zirkulation (warmes Trinkwasser – Rücklauf)

10.3 Schlagwortverzeichnis

A

Abgleichdrossel 35, 151
 Abhängigkeiten Architektur und Gebäudetechnik 6
 Abluftübertragung 137
 Absorptionskälteanlage 107
 Absperrventil 150
 Abtauung 46
 Abwärme 23
 Adiabatische Befeuchtung der Fortluft 109
 Adsorptionskälteanlage 108
 Agenda 2030 8
 Anlagenautomation 191
 Atmung 16
 Ausdehnungsgefäß 33
 Ausrichtung 78
 Ausscheidung 16
 Aussenfühler
 Aussenluft 46
 Aussentemperaturfühler 33
 Platzierung 39
 Automationsebene 7

B

BACnet 191
 Bauteilkühlung 116
 Behaglichkeit 15
 thermische 17
 Beimischschaltung 34
 Bekleidungsart 17
 Bekleidungsfaktor 16
 Beleuchtung 169
 Energieeffizienz 169
 Zielkonflikte 169
 Beleuchtungsstärke 174
 Beprobungsventil 151
 Bilanzperimeter 24
 biophysikalische Daten Mensch 16
 Blendschutz 170
 Blockheizkraftwerk 73
 Brennwert 24
 Brüstungsgerät 118
 Bypass, interner 35

C

Changeover 118
 clo 16, 17
 CO₂
 als Indikator für Luftqualität 19
 Austoss von Menschen 19
 Konzentration in Raumluft 19, 124

D

DALI 191
 DDC-GA 190
 Deckenheizung 88
 Dekarbonisierung 9, 11
 Direktschaltung 34
 DMX 191
 Drosselschaltung 34
 Druckminderer 150

E

EATR 137
 Eigenverbrauch 205
 Einsatzenergie 24
 Einspritzschaltung 34
 Einzelraumlüftung 144
 Elektrische Geräte und Anlagen 181
 Elektrizität in Gebäuden 181
 Elektromagnetische Strahlung, Spektrum 174
 Endenergie 24
 Energetische Betriebsoptimierung 114
 Energie
 Begriffsdefinition 23
 eigenproduziert 24
 geliefert 24
 Energiegewichtungsfaktor 24
 Energiequellen 24
 Energiestrategie 8
 Energieträger 24
 Kennwerte 28
 Energieumwandlung, Stufen 25
 EnOcean 191
 Entleerung 151
 Entzugsleistung 48
 Erdwärmeregister 48
 Erdwärmesonde 48

F

Farbtemperatur Lichtquellen 179
Farbwiedergabe 178
Feinstaub in Raumluft 20
Feldebene 7
Fensterlüftung 101
Feuchte 21
Feuchteproduktion durch
Menschen 20–21
Flachkollektor 76, 77
Free Cooling 112
Frequenzumrichter 184
Frischwassermodul 161
Fühler 33, 150
Fußbodenheizung 88

G

Gebäude als System 5
Gebäudeautomation 187
 Aufbau 188
 Bussysteme 190
 Funktionen 190
 Managementebene 7, 188
 Systemkommunikation 190
 Umsetzung 192
Gebäudetechnik
 allgemeine 182
 Stromverbrauch optimieren 185
 und Energie 22
 und Nachhaltigkeit 8
 und Strom 181
Gesamtenergiedurchlassgrad Vergla-
sung 103
Gewerbliche Kälte 110
Graue Energie 10, 25
Grundwasser 47

H

Heizfläche, Leistung 88
Heizkörper 88
Heizkurve 40
Heizungsanlage
 Komponenten 31
 Pumpenauslegung 41
 Pumpendiagramm 42
 Verteiler 37, 38
Heizungsunterstützung 84
Heizwert 25
High-Flow-Solaranlage 80
Hilfsenergie 25
Holzbrennstoffe 64
Holzfeuerungssystem 66

Holzheizung 64

 Hydraulische Einbindung 66
 mit oder ohne Energiespeicher 68
 Planungshinweise 66
 Praxisbeispiel 68

Holzverbrennung, Phasen 66

I

Induktionsgerät 118
Integrale Gebäudetechnik 5

K

Kalkausscheidung 81
Kälteabgabe im Raum 115
Kälteabgabesystem, Vergleich 118
Kälteanlage
 Desiccative and Evaporative Coo-
ling 109
 technisches Konzept 106
Kälteerzeugung 93, 105
 Auslegung 105
 Prinzip 107
Kältemaschine
 Druck-Enthalpie-Diagramm 100
 Kreisprozess 100
 Teillastverhalten 110
Kältemittel 95
 Einsatzgrenzen 98
 Energy Efficiency Ratio 99
 European Seasonal EER 99
 in der Luft stabile 96
 natürliche 96
 rechtlicher Status 96, 97
 systematische Einteilung 95
 Treibhauseffekt und TEWI-Kenn-
wert 99
 verbotene 96
Kältemittelkreis 43
Kältespeicherung 93
Kältetechnik, Trends 120
Kälteverteilung 93
Kesselrücklaufhochhaltung 36, 37
Klimakälte 91
 Begriffe 91, 95
 Einbettung in Energieversorgung 91
 Energetische Betriebsoptimie-
rung 114
 Energieeffizienz 91
 Energiequelle 112
 hydraulische Grundschaltung 92, 93
 Planungshinweise 92
 Schnittstellen 93, 94

- Symbole 92
- Wärmerückgewinnung 112
- Klimastrategie 8
- Klimawandel 8
- KNX 191
- Kombispeicher 85
- Komfort, thermischer 15
 - Abschätzung Kühlbedarf 101
- Kompressionskälteanlage 107
- Kompressortypen, EER 110
- Kondenswasserbildung 46
- Konvektion 16
- Konvektive Decke 118
- Kreislaufwirtschaft 12
- Kühldecke 116–118
- Kühllast 101
- Kühlpanel 118
- Kühlsegel 118
- Kühlung, Notwendigkeit 101
- Kunstlicht 172
 - Abschätzmethoden 173
 - Energieeffizienz 173
 - Normen 173
 - Planung 172
 - und Gebäudenautomation 173

L

- Lampen
 - Eigenschaften 178
 - Lichtstromausbeute 178
 - Typen 177
- Legionellen 165
 - empfohlene Materialien 167
- Leistungsfähigkeit und Raumtemperatur 15
- Leuchtdichte 174
- Leuchte, Lampe; Unterscheidung 177
- Leuchten 177
 - Lichtstromausbeute 179
 - Typen 179
- Lichtstärke 176
- Lichtstärkeverteilungskurve 177
- Lichtstrom 174
- Lichttechnik, Grössen 174–176
- Lichttechnik, Grundlagen 174
- Log-p-h-Diagramm 43
- LON 191
- Low-Flow-Solaranlage 80
- Luftarten gemäss SIA 382/1 126
- Luftbelastung 125
- Luftherhitzer
- Lufterneuerung 123

- Anlagentypen 141
- Arten von Druckverlusten 134
- Begriffe 126
- Brutto-Temperatureffizienz 136
- Druckverlust 132
- Druckverluste von Anlagenteilen und Komponenten 134
- Einzonenanlage 144
- Enthalpieübertrager 136
- Feuchteübertragung 136
- Funktionen 126–127
- Komponenten 126, 127
- Kreislaufverbundsystem 135
- Leckage 135
- Mehrzonenanlage 144
- Sicherheits- und Überwachungsfunktion 131
- Symbole 127
- Ventilatorenergie 132
- Vorschriften, Normen 123
- Wärmerückgewinnung 135
- Wärmeübertrager 135
- Luftfeuchtigkeit 16
- Luftheizung 88
- Luftraten 124
- Lüftungsanlage
 - bidirektionale 141, 142, 146
 - mit Lufterwärmung (Luftheizung) 88
- Lüftungsgerät
 - Luftvolumenströme 140
 - Temperatureffizienz 140
 - Wärmeflüsse durch Gehäuse 138
- Lüftungssysteme 144
- Luft-Wärmeübertrager, hydraulische Schaltung 131

M

- M-Bus 191
- met 15, 18
- Modbus 191

N

- Nachtkühlung 22
- Nennbeleuchtungsstärke 173
- Norm-Heizlast 88
- Nutzenergie 26

O

- OACF 137
- Ökobilanz 9
- Ökobilanzdaten 9

P

- Performance Ratio 203
- Photovoltaik 195
 - allgemeine Anforderungen 195
 - Batteriespeicher 202
 - Eigenverbrauch 204
 - Eigenverbrauchsregler 203
 - Energieertrag 203
 - Ertragsverlust 199
 - Gefahr durch Gleichstrom 198
 - Generatoranschlusskasten 198
 - Kommunikationssystem 202
 - Messeinrichtungen 201
 - Relativer Energieertrag 204
 - Schutz- und Sicherungselemente 200
 - Stecker 198
 - Trenn- und Schaltelemente 200
 - Wechselrichter 199
- Platten-Wärmeübertrager 135
- PMV-Index 17
- PPD-Index 17
- Primärenergie 26
- Primär-Kreislauf 93
- PV-Anlage 195
 - Elektro-Übersichtsschema 198
- PV-Generator 195
- PV-Module 195
 - Montagesysteme 197
 - Optik 196

R

- Radon 20
- Raumautomation 191
- Raumgruppe 27
- Raumklimageräte, Energieetikette 119
- Raumluftfeuchte 20, 125
- Raumluftqualität 124
 - Belastung durch Personen 19
 - nach Nutzung 20
- Raumnutzung 27
- Raumtemperatur, operative 15–16
- Raumwinkel 176
- Raumzone 27
- Reflexionsgrad 175
- Regelung 39
- Regler 33, 151
- RLT-Anlage, Bezeichnungen 141
- Rotor-Wärmeübertrager 135
- Rückflussverhinderer 150
- Rückkühler 93, 111–112

S

- Sanfte Klimatechnik 22
- SCADA 190
- SDG 8
- Sekundärenergie 26
- Sekundärkreislauf 93
- SFP
 - äussere 133
 - innere 133
 - zusätzliche 133
- Sicherheitstemperaturbegrenzung 35
- Sicherheitsventil 33, 150
- SMI 191
- Solaranlage, thermisch 76
 - Ausrichtung 79
 - Einsatzgebiet 78
 - für Wassererwärmung und Heizungsunterstützung 84
 - Kollektorbauart 77
 - mit aussenliegendem Wärmeübertrager 81
 - mit Holzfeuerung und Kombispeicher 85
 - mit innenliegendem Wärmeübertrager 80
 - mit separatem Vorwärmespeicher 82
 - mit Wärmepumpe und Kombispeicher 86
 - Planungshinweise 77
 - Praxisbeispiel 80
 - Richtwerte für den Bau 79
 - Überhitzungsprobleme 81, 83, 84, 86, 87
- Solarkabel 197
- Sommerlicher Wärmeschutz 170
- Sonnenstrahlung, Begriffe 76
- Sorptionskühlung 109
- Speicherwassererwärmung 151
- Spezifische Wärmeabgabe Mensch 18
- Standardnutzung 27
- Stellorgan 33, 151
- Strahlungsangebot Erdoberfläche 76
- Strahlungsasymmetrie 88
- Stromverbrauch
 - Haushalt und Büro 183
 - Intensitätsklasse 183
 - messen 184

T

- Tageslicht 170
 - Abschätzmethoden 170
 - Einflussparameter 170–171
 - Planung 169
- Tageslichtspektrum, Strahlungsfluss 175
- Temperaturasymmetrie 19
- Temperaturbereiche für konditionierte Wohnungen und Büros 17
- TEWI, Berechnung 99
- Thermische Einflüsse Raum 104
- Thermische Netze
 - Einteilung 70
 - mit direktem Anschluss 71
 - mit indirektem Anschluss 72
 - Praxisbeispiele 71
- Thermischer Widerstand Bekleidung 16
- Thermisches Raummodell 102
- Thermoaktives Bauteilsystem (TABS) 88
- Thermostat 33
- THG-Emissionen im Lebenszyklus von Gebäuden 11

U

- Umlenkschaltung 34
- Umwälzpumpe 33, 40–41

V

- Vakuurröhrenkollektor 77
- Ventilatoranordnung in RLT-Geräten 140
- Ventilatorleistung, spezifische 132
- Verdichterbauart 107
- Verdunstung 16
- Vereisungsschutzmassnahme 140
- Vollklimaanlage mit Rotor 143
- Vorlauftemperaturregelung, witterungsgeführt 39
- Vorwärmespeicher 82

W

- Wärmeabgabe 16, 88
 - Anordnung 88
 - Leistungsgrenze 88
 - Vorlauftemperatur 88
- Wärmeerzeuger 31
- Wärmefluss in Gebäuden 22
- Wärme kraftkopplung 73
 - Praxisbeispiele 74
- Wärmelast 101, 102

- Wärmeleistung Mensch 15
- Wärmeproduktion Mensch 16, 104
- Wärmepumpe 43
 - Betriebsarten 51
 - bivalent-alternativer Betrieb 59
 - bivalent-paralleler Betrieb 62
 - Coefficient of Performance (COP) 45
 - Effizienzkennzahl 43
 - Erdwärmeregister 48
 - hydraulische Einbindung 50
 - Jahresarbeitszahl (JAZ) 45
 - Leistungszahl 45
 - Luft-Wasser- 44
 - mit Energiespeicher 55
 - mit Kombispeicher 57
 - ohne Energiespeicher 53
 - Planungshinweise 46, 48
 - Praxisbeispiele 53
 - Sole-Wasser- 48
 - Störungen 49–50
 - Systemgrenze 43, 44
 - Systemnutzungsgrad (SNG) 45
 - Wärmeerzeugernutzungsgrad (WNG) 45
 - Wasser-Wasser- 47
- Wärmequelle
 - Arten 44
 - Strahlungs- und Konvektionsanteil 116
- Wärmerückgewinnung 27
 - Leckage 136
 - Luftströme 136
- Wärmespeicher 32
- Wärmeübertrager 150
- Wärmeverbraucher 32
- Wärmeverteilung
 - Hydraulik 34
 - Regelung 39
- Warmwasserspeicher 151
- Warmwasserversorgung 149
 - Aufbau 149
 - Komponenten 149, 150
 - nicht warmgehaltener Verteiler 166
 - Stockwerkverteilung mit Spüleinheit 167
 - warmgehaltener Verteiler 166
- Wassrerwärmer, zeitliche Verfügbarkeit 152

Wassererwärmung

- allgemeine Hinweise 152
- aussenliegende Wärmeübertrager 156
- direkte 154
- Durchlaufwassererwärmung System «Frischwassermodul» 161
- hydraulische Einbindung 154
- indirekte 154, 155
- Ladekonzepte 157
- mit Abwärme 162, 163
- Schichtladung 158, 159, 160
- Stufenladung 157, 158
- Vordimensionierung Glattrohrwärmeübertrager 155
- Vordimensionierung Plattenwärmeübertrager 156
- Watt-Peak 195
- Witterungsfühler 33
- WRG-Komponenten, Kenndaten 139

Z

- «zehn R» 13
- ZigBee 191
- Zirkularität 13
- Zirkulationspumpe 151
- Zufriedenheit der Nutzenden 17
- Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV) 205
- Zusatzheizung 79
- Z-Wave 191