

Umsetzung des Passivhaus-Konzepts in Krankenhäusern

Im Auftrag des HMUELV

HESSEN



Hessisches Ministerium
für Umwelt, Energie,
Landwirtschaft und
Verbraucherschutz

Autoren:

Oliver Kah
Kristin Bräunlich
Tanja Schulz
Andreas Grill
Dr. Oliver Ottinger
Roland Schumacher

Darmstadt, Oktober 2013

Die Veröffentlichung wurde erstellt vom:

Passivhaus Institut
Dr. Wolfgang Feist
Rheinstr. 44/46
D-64283 Darmstadt
www.passiv.de

im Auftrag des
Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Inhaltliche Eingrenzung / Haftungsausschluss

Der Inhalt dieser Veröffentlichung wurde mit größter Sorgfalt und nach bestem Wissen und Gewissen zusammengestellt. Hinsichtlich der Verwendung von gezeigten Informationen muss dennoch jeder die Anforderungen von Gesetzen, Normen oder Verordnungen eigenverantwortlich überprüfen. Jegliche Haftung für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Inhalte und Daten sowie insbesondere für eventuelle Schäden oder Konsequenzen, die durch die Nutzung des dargestellten Wissensstoffs entstehen, ist ausgeschlossen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
1 Motivation	1
2 Einleitung	2
3 Besonderheiten im Krankenhaus	5
3.1 Physiologische Randbedingungen - thermischer Komfort	5
3.2 Hygienische Anforderungen	7
3.3 Untersuchung zur Nutzbarkeit der Abwärme	8
3.4 Ausgangsbedingungen zur Umsetzung des Passivhaus-Konzepts	13
4 Planungsempfehlungen	14
4.1 Heizwärmebedarf	16
4.2 Heizung	17
4.3 Dampferzeugung	18
4.4 Trinkwarmwasserbereitung	18
4.5 Kühlung	19
4.6 Lüftung	22
4.7 Beleuchtung	24
4.8 EDV	26
4.9 Zentrale Sterilgutversorgungsabteilung (ZSVA)	27
4.10 Bildgebende Verfahren	28
4.11 Sonstige Ausstattung und Technik	30
4.12 Energiebilanz	31
5 Gebäudehülle / Heizwärmebedarf	34
5.1 Heizwärmeanforderung	34
5.2 Gebäudehülle	42
6 Heizung	51
6.1 Wärmeübergabe	51
6.2 Heizungsversorgungsleitungen	53
6.3 Wärmeerzeugung	53
6.4 Heizungspumpen	55
7 Dampferzeugung	55
8 Trinkwarmwasserbereitung	56
8.1 Warmwasserbedarf	57
8.2 Wassersparende Armaturen	59
8.3 Verteilverluste - Wärmedämmung der Warmwasserleitungen	59
8.4 Hygienische Anforderungen - Lösungsansätze	61
8.5 Systemvergleich - Trinkwarmwasser-Verteilverluste	62
8.6 Trinkwarmwassererwärmung	65
9 Lüftung	66
9.1 Anforderungen und Dimensionierung der Luftmengen	66
9.2 Lösungsansätze zur kontrollierten Lüftung	72
9.3 Effizienzanforderungen an das RLT – Gerät in Kürze	79
9.4 Wärmerückgewinnung aus der Abluft - Anforderungen entsprechend der unterschiedlichen Funktionsbereiche	81
9.5 Lüftung im Operationssaal	84
9.6 Auslegung des Lüftungsnetzes unter besonderer Beachtung einer druckverlustreduzierten Dimensionierung	98
10 Kühlung	112
10.1 Einleitung	112
10.2 Interne Gewinne	113
10.3 Methoden zur Kühlung	116
10.4 Kühlenergiebedarf	127

11	Beleuchtung	129
11.1	Einleitung	129
11.2	Tageslichtnutzung	130
11.3	Künstliche Beleuchtung	132
11.4	Energiebedarf der Kunstlichtanlage	138
12	EDV	143
13	Verpflegungsküche: Zubereitung warmer Mahlzeiten	145
14	Zentrale Sterilgutversorgungsabteilung (ZSVA)	146
14.1	Bezugsgröße STE	146
14.2	Reinigungs- und Desinfektionsautomaten	147
14.3	Sterilisation	152
14.4	Gesamtenergiebedarf der ZSVA	157
15	Bildgebende Verfahren	159
15.1	Magnetresonanztomographie (MRT)	159
15.2	Computertomographie (CT)	163
15.3	Ultraschalldiagnostik	166
16	Sonstige Ausstattung	167
16.1	Steckbeckenspüler	167
16.2	Kühlschränke	168
17	Diverse Technik	169
17.1	Aufzüge	169
17.2	Druckluft	171
18	Anhang	172
18.1	Grundrisspläne: Neubau Klinikum Frankfurt Höchst (Stand Vorplanung)	173
19	Literatur	181

1 Motivation

In Deutschland gibt es 2080 Krankenhäuser mit insgesamt 503.422 Betten [Destatis 2009]. Viele dieser Gebäude sind sanierungsbedürftig. Zudem besteht durch den Wandel im Krankenhauswesen und Innovationen in der Medizintechnik auch erheblicher Bedarf an Umbauten bzw. Ersatzbauten.

Statistische Auswertungen der Verbrauchswerte zeigen, dass Krankenhäuser zu den Spitzenverbrauchern gehören. Es werden mittlere Heizenergieverbrauchswerte von rund 250 kWh/(m² a) genannt, wobei dazu insbesondere der Strombedarf mit durchschnittlich 130 kWh/(m² a) sehr hoch ausfällt [EA NRW 2003]. Die individuellen Kennwerte hängen dabei stark von der Art und Ausstattung des Krankenhauses ab. Die Anwendung von Effizienztechnologien bietet, wie Studien zeigen [EA NRW 2003], ein bedeutendes Einsparpotential.

Im Krankenhäusern wächst der Kostendruck. Die Energiekosten belaufen sich auf etwa 3 % der Gesamtkosten [EA NRW 2003]. Spürbare Verbesserungen der Energieeffizienz machen den Betreiber unabhängiger von der zukünftigen Energiepreisentwicklung und senken zudem die laufenden Betriebskosten.

Als öffentliche Einrichtung haben Krankenhäuser eine Vorbildfunktion. Bei 17,8 Millionen Patientinnen und Patienten im Jahr in Deutschland [Destatis 2009] hat ein Engagement für nachhaltige Lösungsansätze besonders im Krankenhausbereich erhebliche Breitenwirkung und das nicht nur im nationalen Kontext. Gemäß der europäischen Richtlinie für Energieeffizienz von Gebäuden müssen neue Gebäude ab dem 31. Dezember 2020 als nahezu Null-Energie-Gebäude umgesetzt werden. Dies gilt auch für Krankenhäuser.

2 Einleitung

Konventionelle Krankenhäuser zählen zu den Gebäuden mit sehr hohen Energieverbrauchswerten und stellen zudem besondere und zuverlässig zu erfüllende Anforderungen an den Komfort der Patienten. Die Anwendung des Passivhaus-Konzepts erscheint vor diesem Hintergrund äußerst interessant. Ein häufiger Irrtum besteht in der Annahme, die Energieeffizienzanstrengungen würden lediglich die Minimierung des Heizwärmebedarfs betreffen. Die Grundidee ist hingegen, bei mindestens gleichem Komfort, eine signifikante Bedarfsreduzierung aller Energieanwendungen in einem Gebäude zu erreichen.

Eine grundlegende Voraussetzung für die Umsetzung des Passivhaus-Standards ist, dass, im Unterschied zu konventionellen Energiebilanzverfahren, *alle* relevanten Energieverbräuche betrachtet werden. Gemäß [DIN V 18599] wird, z.B. im Bereich der Medizintechnik der gesamte funktionsrelevante Stromverbrauch nicht berücksichtigt. Die bedeutenden Abhängigkeiten zwischen den Energieströmen im Gesamtsystem „Gebäude“ können so gar nicht erkannt werden.

Die Gesamtoptimierung zielt auf im Gesamtsystem wirtschaftliche und in der Breite einsetzbare Technologien ab. Es hat sich gezeigt, dass der spezifische Energiebedarf einer jeden Energiedienstleistung durch konsequentes Vermeiden und Reduzieren von Verlusten in den meisten Fällen auf sehr kleine Werte verringert werden kann.

Bei der Frage nach einem Passivhaus-Standard für Krankenhäuser steht daher zu Beginn der Untersuchung eine Analyse der, aufgrund der vielfältigen Energieanwendungen, komplexen Energieströme im Krankenhausbetrieb. Großverbraucher sollen zunächst identifiziert werden. Vor allem im Bereich der Medizintechnik und weiteren Stromanwendungen fehlt eine ausreichende Datengrundlage mit spezifischen energetischen Kennwerten.

Wesentliche Randbedingungen, wie z. B. die internen Wärmegewinne bzw. Lasten, werden durch diese Energieströme entscheidend bestimmt. Aus einer Analyse der Energieströme und möglicher Effizienzpotentiale werden anschließend anwendungsbezogene Kennwerte ermittelt. Neben den internen Gewinnen und energetischen Kennwerten, z.B. zum Verbrauch je Anwendung, sind dies z. B. auch Kennzahlen zum Trinkwarmwasserbedarf im Krankenhaus.

Dabei sind die Energieströme nicht unabhängig voneinander, sondern wie bei der Kühlung offensichtlich wird, miteinander gekoppelt. Geringere Leistungsaufnahmen der Beleuchtung, der EDV oder medizinischer Geräte reduzieren gleichzeitig die Kühllasten. Effizientere Geräte und Anwendungen sparen daher nicht nur direkt Energie, sondern zusätzlich indirekt durch die Reduzierung des Kühlbedarfs.

Ferner lässt die umfassende Verwendung effizienter Apparate und Anwendungen erst den Einsatz von leistungsbegrenzten aber effizienteren Technologien zu, z. B. wenn die Bauteilkühlung und andere passive Kühlmaßnahmen ausreichen und auf konventionelle Klimatechnik weitgehend verzichtet werden kann.

Im Klinikum Frankfurt Höchst entsteht, als Ersatz für das alte Hauptgebäude, ein Neubau mit rund 70.000 m² (BGF), der gemäß eines Beschlusses der Stadt Frankfurt in Passivhaus-Standard realisiert werden soll. Im Auftrag des Landes Hessen konnten begleitend zur Planung des Neubauvorhabens grundlegende Fragestellungen zur Umsetzung des Passivhaus-Standards in Krankenhäusern untersucht werden. Die Untersuchung greift an vielen Stellen auf die Vorplanung zum Neubau des Klinikums Frankfurt Höchst zurück¹ (vgl. Abbildung 1). Ein Plansatz des Ersatzneubaus des Krankenhauses der Maximalversorgung befindet sich im Anhang.

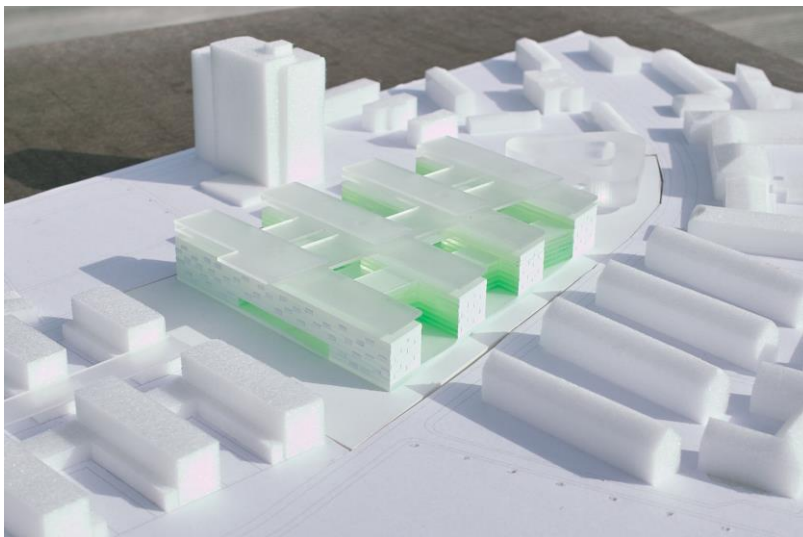


Abbildung 1: Modell des Vorentwurfes
Architekten: woernerundpartner, Frankfurt (Quelle: woernerundpartner)

Die vorliegende Studie stellt die grundlegenden Ergebnisse zur Umsetzung des Passivhaus-Standards in Krankenhäusern vor.

Besonderheiten von Krankenhäusern hinsichtlich der Umsetzung des Passivhaus-Konzepts werden in Abschnitt 3 vorgestellt. Dazu gehören die Anforderungen in hygienisch sensiblen Bereichen und deren Auswirkungen auf den Einsatz von Systemen, die die Energieeffizienz verbessern. Erhöhte Komfortanforderungen der genesenden und älteren Patienten und Patientinnen (vgl. Abschnitt 3.1), unterscheiden ferner Krankenhäuser von anderen Nichtwohngebäuden. Im Krankenhaus

¹ Derzeit (Oktober 2013) ruht die Planung zum Neubau, da auf politischer Ebene noch Entscheidungen zur weiteren Umsetzung des Neubauvorhabens ausstehen. Die spätere Ausführung kann daher von den hier vorgestellten Entwürfen abweichen.

kommen zudem Prozesse zur Anwendung, die erhebliche, für den jeweiligen Raum zu hohe, Abwärmemengen freisetzen.

Die häufig gestellte Frage, ob Investitionen in Energieeffizienz überhaupt sinnvoll sind, wenn Teile des Gebäudes allein durch Nutzung der Abwärme der ohnehin vorhandenen technischen Ausstattung „beheizt“ werden können, wird in Abschnitt 3.3 behandelt.

Durch den ansteigenden Anteil erneuerbar erzeugten Stroms im deutschen Strommix entwickelt sich dessen primärenergetische Bewertung zunehmend dynamisch. Primärenergie-Kennwerte sind nur noch mit Datumsangabe verständlich. Die nachfolgend angegebenen Primärenergie-Kennwerte basieren gemäß [EnEV 2009] auf einem Primärenergiefaktor des nicht erneuerbaren Anteils für Strom von 2,6. Die Berichtigung der [DIN V 18599-1: 2013] gibt bereits einen Wert von 2,0 für Strom vor.

Die im Krankenhaus relevanten Energiedienstleistungen und die bisher üblichen Verbrauchswerte sowie eine Ermittlung der Einsparpotentiale werden in den Abschnitten 4 bis 17 vorgestellt.

Abschnitt 5 fasst die Erkenntnisse aus der Analyse der einzelnen Energieanwendungen in Planungsempfehlungen zusammen. Unter Berücksichtigung der Energieeinsparpotentiale wird in Abschnitt 4.12 der Gesamtenergiebedarf am Beispiel des Klinikums Frankfurt Höchst ermittelt.

Die vorliegende Studie entstand im Auftrag des Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Dafür danken wir herzlich.

Ferner danken wir der Zentralen Errichtungsgesellschaft mbH für das Klinikum Frankfurt Höchst für die stete Unterstützung bei der Durchführung dieses Forschungsvorhabens, den Personen des technischen Personals des Klinikums, die im Rahmen der Studie bei zahlreichen Fragen und Messungen wertvolle Hilfe leisteten, insbesondere Herrn Lauer, Herrn Kluge und Herrn Schader sowie den bei der Neubauplanung beteiligten Planungsbüros für die anregenden Diskussionen.

3 Besonderheiten im Krankenhaus

Vor allem die hygienisch sensiblen Bereiche stellen einen maßgeblichen Unterschied zu anderen Gebäudenutzungen dar. Hinsichtlich der Umsetzung des Passivhaus-Konzepts ist sowohl dieser Aspekt als auch eine Reihe weiterer Besonderheiten zu beachten.

3.1 Physiologische Randbedingungen – thermischer Komfort

Ole Fanger entwickelte in empirischen Studien eine Bewertungsmethode zur thermischen Behaglichkeit. Die Grundidee des in [DIN EN ISO 7730] beschriebenen Verfahrens basiert darauf, dass der thermische Komfort am höchsten ist, wenn sich ein Gleichgewicht zwischen aktivitätsbedingter Wärmeproduktion einer Person und ihrer Wärmeabgabe an die Umgebung einstellt, ohne dass der Körper zusätzliche Anpassungsleistungen zur Temperaturregulation erbringen muss.

Das Bewertungskriterium ist der Prozentsatz der mit diesen Komfortbedingungen Unzufriedenen. Der Anteil der Unzufriedenen sinkt nicht unter 5 %, da es z. B. individuelle Ausprägungen im Stoffwechsel gibt.

Die Aktivität der Person (Metabolismusrate, met), die Wärmedämmung der Bekleidung (clo), die Luft und die Strahlungstemperatur bzw. die empfundene Temperatur sowie die Luftgeschwindigkeit und die Luftfeuchtigkeit beeinflussen das Wärmeempfinden.

Die Raumtemperatur im Pflegebereich sollte vor allem den Bedürfnissen der Patienten genügen. In der Regel handelt es sich um körperlich geschwächte, liegende Personen mit entsprechend geringer Metabolismusrate. Abbildung 2 zeigt für typische Tätigkeiten in einem Pflegezimmer den vorhergesagten Prozentsatz unzufriedener Personen in Abhängigkeit der operativen Temperatur, die als Mittelwert der Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen und der Raumlufttemperatur festgelegt ist.

Die geringste Anzahl Unzufriedener bzw. der höchste Komfort wird im Bereich einer empfundenen Temperatur von 22 bis 23 °C erzielt (vgl. auch [DGKH 2002]). Dies gilt für im Bett liegende Patienten, solche, die noch mit einem Bademantel bekleidet sind, und für das Personal. Für nur leicht gekleidete Patienten bzw. wenn Patienten im Bett gewaschen werden, liegt der Komfortbereich bei noch höheren Raumtemperaturen.

Da das Waschen im Bett nicht ständig stattfindet und höhere Raumtemperaturen z.T. im Zielkonflikt mit anderen Aktivitäten stehen, erscheint eine empfundene Raumtemperatur in den Pflegestationen zwischen 22 und 23 °C als zulässiger Kompromiss.

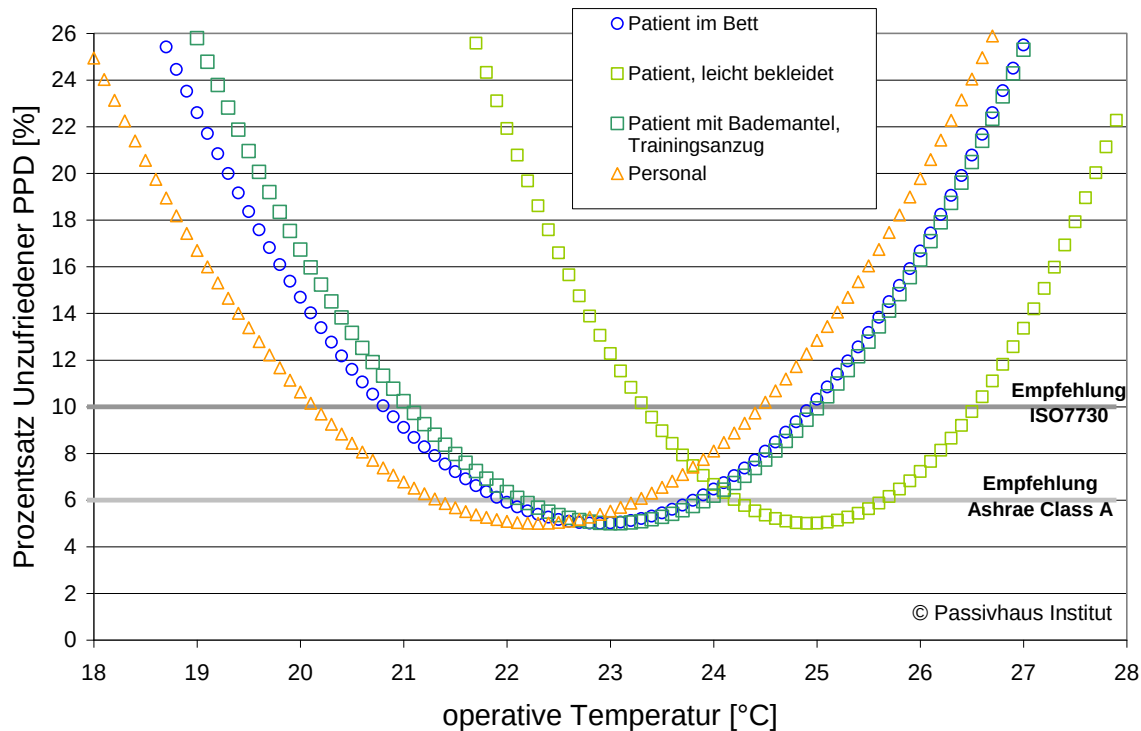


Abbildung 2: Vorhergesagter Prozentsatz unzufriedener Personen für typische Tätigkeiten in einer Pflegestation. Der höchste Komfort bzw. die geringste Anzahl Unzufriedener wird demnach mit operativen Temperaturen zwischen 22 °C und 23 °C erzielt. Leicht bekleidete Patienten bzw. Patienten, die im Bett gewaschen werden, haben nochmals höhere Komfortanforderungen.

Bei einer operativen Temperatur im Bereich zwischen 22 und 23 °C werden die strengen Komfortempfehlungen "Class A" gemäß [ASHRAE] eingehalten.

Randbedingungen:

Patient im Bett (Metabolismusrate 0,8 met / Isolationswert von Decke und Bekleidung 1,9 clo)

Patient leicht bekleidet (Metabolismusrate 1,2 met / Isolationswert der Bekleidung 0,5 clo)

Patient mit Bademantel / Trainingsanzug bekleidet (Metabolismusrate 1,2 met / Isolationswert der Bekleidung 0,8 clo)

Personal leicht bekleidet (Metabolismusrate 1,6 met / Isolationswert der Bekleidung 0,5 clo)

Im Sommer werden gemäß [DGKH 2002] operative Temperaturen bis 25 °C als behaglich empfunden. Wird eine Bauteilkühlung verwendet, sind aufgrund der geringeren Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen, Raumlufttemperaturen bis 26 °C komfortabel.

Gemäß [DGKH 2002] kann im Winter für die meisten Krankenhausräume auf eine Befeuchtung verzichtet werden. In [ASR2012] wird im Allgemeinen auch keine Befeuchtung gefordert. Dort, wo befeuchtet wird, sollte die Raumluftfeuchte auf 30 % r. F. beschränkt werden. Zudem kann ein Wärmerückgewinnungssystem mit Feuchterückgewinnung den erforderlichen Befeuchtungsbedarf erheblich verringern (vgl. Abschnitt 9 Lüftung).

Grundsätzlich helfen moderate, bedarfsgerechte Außenluftströme zu geringe Raumluftfeuchten im Winter zu vermeiden. Bestehen keine gesonderten Anforderungen an die Auslegung der Außenluftmengen, sollten daher die Spielräume, die [DIN EN 13779] hinsichtlich der Dimensionierung bietet, zugunsten moderater Ansätze genutzt werden (vgl. Abschnitt 9 Lüftung).

3.2 Hygienische Anforderungen

Die Hygiene ist in Krankenhäusern eine zentrale Aufgabenstellung. Ihre Funktion ist in Einrichtungen der stationären und teilstationären Krankenversorgung Patienten, Personal und Umwelt vor der Weiterverbreitung von Krankheitserregern und gesundheitsschädlichen Substanzen zu bewahren.

Die Empfehlungen zu krankenhaushygienischen Maßnahmen werden regelmäßig von der Kommission für "Krankenhaushygiene und Infektionsprävention (KRINKO)" beim Robert-Koch-Institut (RKI) herausgegeben. Daneben veröffentlichen die Deutsche Gesellschaft für Krankenhaushygiene sowie Gesundheitsämter u.a. weitere Empfehlungen und Richtlinien.

Im Rahmen der Grundlagenstudie zur Umsetzung des Passivhaus-Standards in Krankenhausbauten stehen vor allem etwaige Auswirkungen der Hygieneanforderungen auf Energieeffizienzmaßnahmen im Vordergrund.

Wie eine Auswertung der Richtlinien zeigt, sind raumluftechnische Anlagen aus der Sicht der Infektionsprävention nur in wenigen Bereichen zwingend erforderlich. Besondere Anforderungen bestehen in den hygienisch sensiblen Bereichen. Diese sind in der [DIN 1946-4] geregelt (vgl. Abschnitt 9 Lüftung).

Demnach gelten in den OP-Bereichen, Untersuchungs- und Behandlungsbereichen sowie der Intensivmedizin teilweise besondere Anforderungen bezüglich Luftfiltrierung, Druckhaltung und Stoffübertragung in einem Wärmerückgewinnungssystem. Die sich daraus ergebenden energetischen Auswirkungen werden im Abschnitt 9 Lüftung behandelt.

In den verbleibenden Bereichen bestehen für Krankenhausanlagen keine besonderen technischen Anforderungen sofern die RLT-Anlagen den grundsätzlichen hygienischen Richtlinien (vgl. [VDI 6022]) genügen.

Bei Planung und Betrieb des Trinkwassersystems gelten bis auf wenige Bereiche Anforderungen wie in öffentlichen Gebäuden oder Wohngebäuden. Es gelten die einschlägigen technischen Regeln. Zusätzliche Anforderung aus hygienischer Sicht müssen in Intensivstationen und in Bereichen zur Behandlung immunsupprimierter Patienten eingehalten werden. Die Trinkwarmwasserbereitung wird in Abschnitt 8 behandelt.

In hygienisch sensiblen Bereichen werden geschlossene Leuchten mit Abdeckungen eingesetzt, da diese leicht zu reinigen sind. Zur Verbesserung der Grundhygiene werden geschlossene Leuchten auch in Bereichen, in denen ihre Verwendung nicht zwingend erforderlich ist, verwendet. Absorption und Reflexion an der Abdeckung verringern den Lichtstrom, so dass höhere Leistungen installiert werden müssen. Der Einfluss auf die Energiebilanz sowie Lösungsansätze zur Effizienzverbesserung werden in Abschnitt 11 diskutiert.

Wie die Auswertung der einschlägigen Richtlinien zeigt, bestehen keine grundsätzlichen Hindernisse, die gegen den Einsatz erprobter Energiespartechniken sprechen. Gelten in hygienisch sensiblen Bereichen besondere Anforderungen, wie z. B. im Bereich der OP-Säle, sind die Lösungsansätze entsprechend anzupassen. Konkrete Lösungsansätze werden in den betreffenden Abschnitten diskutiert.

Grundsätzlich sollten neue Konzepte und Ansätze immer auch möglichst frühzeitig mit den zuständigen Stellen und Hygienikern abgestimmt werden.

3.3 Untersuchung zur Nutzbarkeit der Abwärme

Die Frage, ob sich Effizienzverbesserungen lohnen, die zu einer Reduzierung des Wärmebedarfes von Krankenhäusern führen, wenn dort schließlich unvermeidliche Abwärme in höherem Maße zur Verfügung steht, wird häufig diskutiert.

Das Thema aufgreifend werden im Folgenden die Nutzung der Abwärme und die daraus resultierende Energiebilanz einmal genauer betrachtet.

Beispiel 1: Nutzung der Abwärme mittels der Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

Im Krankenhaus werden u.a. Prozesse und Geräte verwendet, deren Abwärme gezielt abgeführt werden muss, um noch zuträgliche Raumtemperaturen bzw. zulässige Betriebsbedingungen zu gewährleisten, wie beispielsweise in Serverräumen. Die überschüssige Wärme, so ein häufiger Lösungsansatz, wird mittels der Lüftungsanlage im restlichen Gebäude verteilt und deckt dort während der Heizzeit einen Teil des Heizwärmebedarfs.

Den prinzipiellen Ansatz zeigt Abbildung 3. Zur Vereinfachung wird eine Abwärmeleistung von 100 W betrachtet, die durch die Lüftungsanlage abgeführt wird. Davon wird 80 % mittels eines effizienten Wärmerückgewinnungssystems zurückgewonnen und dem Gebäude zugeführt. Unter der Annahme, dass nur 20 % des Zuluftstroms in den Raum mit hoher Wärmelast eingebracht wird, können 64 W der ursprünglich 100 W im restlichen Gebäude genutzt werden. 16 W gelangen mit der Zuluft wiederum in den Raum mit erhöhter Wärmelast.

Im Raum mit überschüssiger Wärme müssen daher 116 W Abwärme durch eine höhere Luftleistung der Lüftungsanlage abgeführt werden, da die hygienisch erforderlichen Luftmengen nicht mehr ausreichen, um die Abwärme abzuführen.

Aus einer zulässigen Erwärmung der Abluft gegenüber der Zuluft (hier von 6 K), kann der zusätzliche Zu- und Abluftbedarf der Anlage ermittelt werden (rund 59 m³/h). Wird eine effiziente Lüftungsanlage zugrundegelegt beträgt die Mehrleistungsaufnahme des Lüftungsgeräts 26 W.

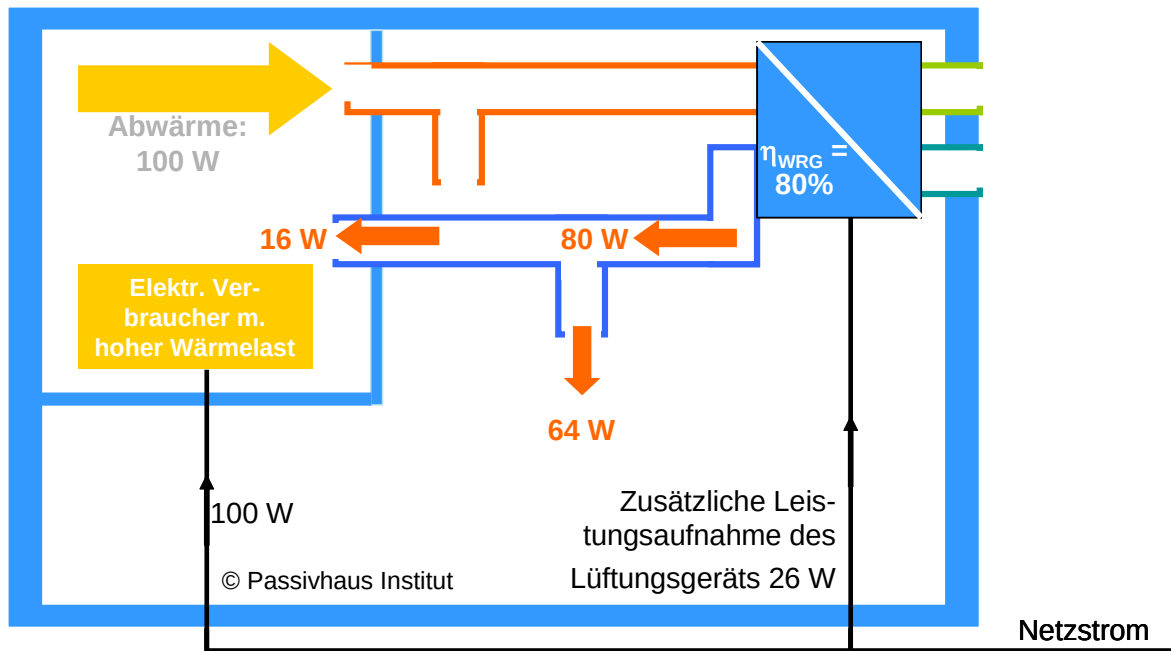


Abbildung 3: Schema zur Verteilung und Nutzung der Abwärme mittels der Lüftungsanlage

Eine Alternative stellt das Ablüften der überschüssigen Wärme im Winter durch Lüftungsklappen oder Fenster direkt nach außen dar. Eine primärenergetische Leistungsbilanz zu beiden Lösungsansätzen zeigt Abbildung 4. Die Ergebnisse zeigen, dass beide primärenergetisch bewertet nahezu gleichwertig sind. Mit steigendem Anteil erneuerbarer Stromerzeugung verschieben sich die Verhältnisse etwas zugunsten der Nutzung der Abwärme.

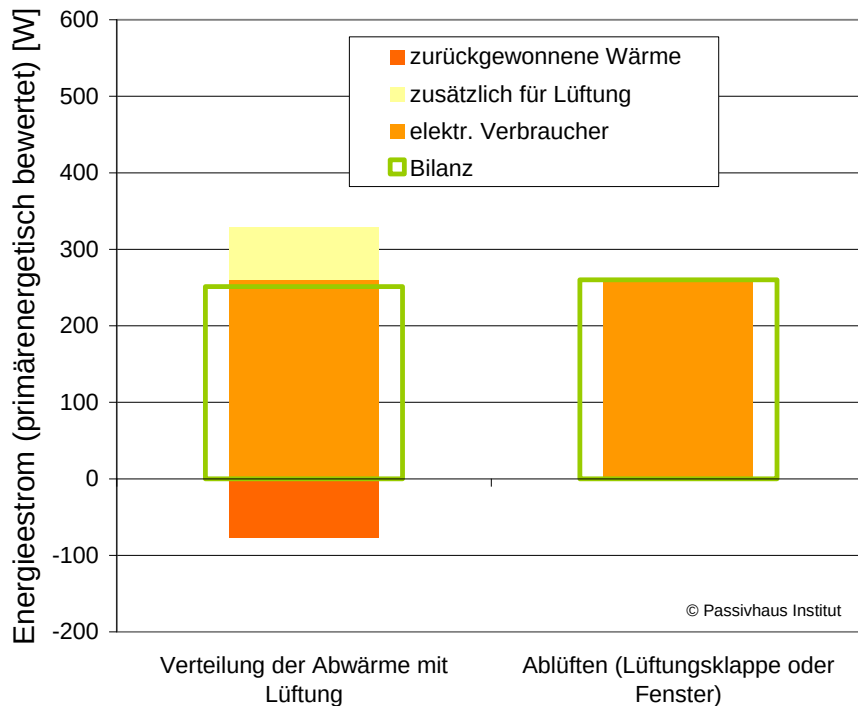


Abbildung 4: Leistungsbilanz der Lösungsansätze Abwärme über die Lüftung nutzen oder direkt ablüften.

Beispiel 2: Nutzung von Niedertemperatur-Prozessabwärme mittels eines Wärmepumpensystems

Im zweiten Beispiel wird Prozessabwärme mit Hilfe eines Wärmepumpensystems erschlossen und durch Anhebung des Temperaturniveaus z. B. im Heizungssystem nutzbar.

Die Prozesse bzw. Geräte sind im Krankenhaus in der Regel im ganzen Jahr, also auch im Sommer in Betrieb. Entsprechend sollte die Nutzung auch ganzjährig betrachtet werden.

Vergleichbar mit der Situation im ersten Beispiel muss in einem Raum überschüssige Wärme abgeführt werden. Es werden die Energieströme für den Fall betrachtet, in dem wiederum eine Wärmeleistung von 100 W abgeführt und nutzbar gemacht werden soll.

Mittels einer Abluftwärmepumpe (Luft/Wasser) wird die Temperatur der Abluft auf die erforderliche Senkentemperatur des Pufferspeichers (55 °C) gebracht. Die Abluft- bzw. Quellentemperatur wird mit 30 °C angenommen. Die Leistungszahlen entsprechen den Werten marktgängiger Wärmepumpensystemen.

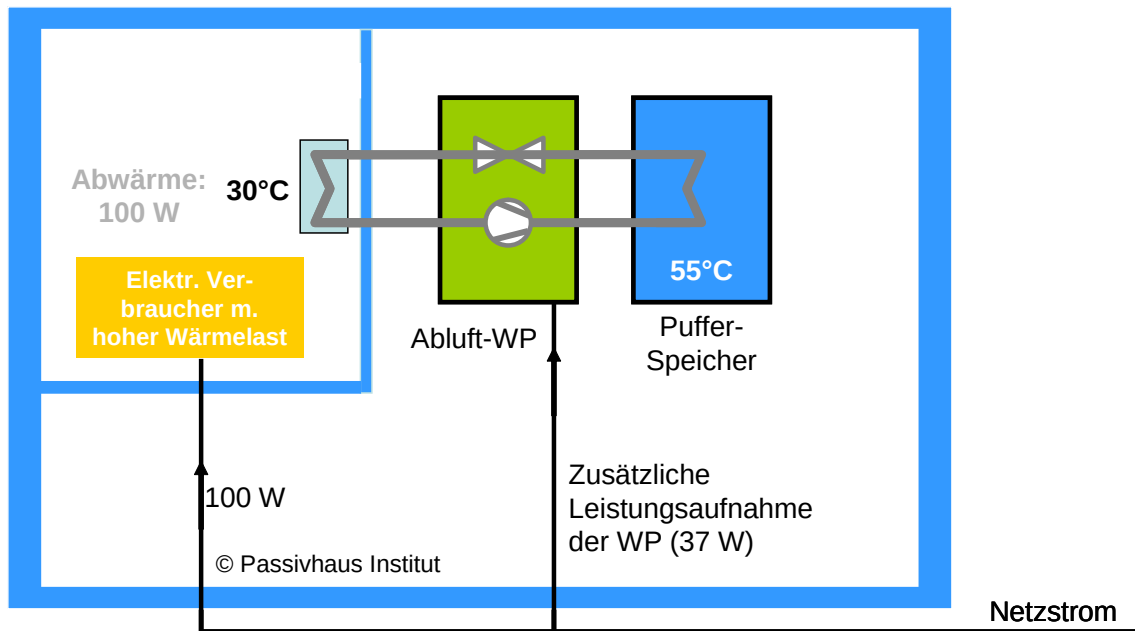


Abbildung 5: Schematischer Lösungsansatz – Nutzung der überschüssigen Wärme mittels einer Abluftwärmepumpe.

Anstatt die Abwärme mit Hilfe der Wärmepumpe nutzbar zu machen, könnte der Pufferspeicher auch über eine Außenluftwärmepumpe versorgt werden. Aufgrund der, im Vergleich zur Abluft (Annahme 30 °C), geringeren Außenlufttemperatur erzielt die Außenluftwärmepumpe erst einmal die energetisch schlechteren Ergebnisse.

Für einen energetischen Vergleich der Lösungsansätze wird eine Gesamtbeurteilung einschließlich des Energiebedarfs der Abwärmequelle angestellt. Im Falle der Außenluftwärmepumpe wird angenommen, dass die Abwärme ungenutzt nach außen abgelüftet wird.

In der Bilanz aus zugeführten und zurückgewonnenen Energieströmen (bzw. durch die Wärmepumpe gelieferte Heizleistung) schneidet die als Außenluftwärmepumpe eingesetzte Wärmepumpe wie zu erwarten schlechter ab als die Abluftwärmepumpe.

Betrachtet man in Abbildung 6 die beiden linken Säulen so liegt der Schluss nahe, die ausgeklügelte Nutzung der Abwärme sei die effektivere Lösung. Wird hingegen in die Verbesserung der Effizienz des abwärmeerzeugenden Prozesses anstatt in die Nutzarmachung der überschüssigen Wärme investiert, gelangt man bereits mit moderaten Effizienzsteigerungen von etwa 30 % zu vergleichbaren energetischen Ergebnissen (Vergleich der Variante Abluft-WP und Außenluft-WP bei höherer Effizienz des Verbrauchers).

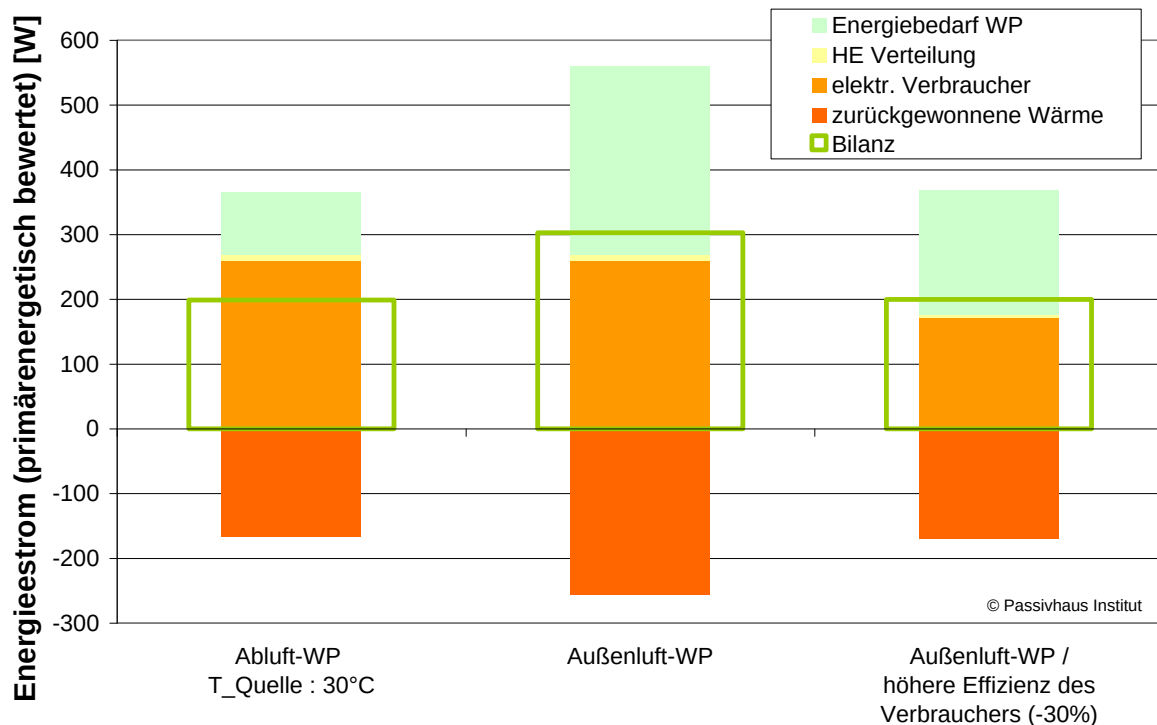


Abbildung 6: Bilanzvergleich der Abwärme- oder Außenluftnutzung mit identischen Wärmepumpensystem. Aufgrund der wärmeren Quelle schneidet die Abwärme-Wärmepumpe besser als eine Außenluft-Wärmepumpe ab. Vergleichbar gute Ergebnisse in der Gesamtbetrachtung (1. und 3. Säule) werden erzielt, wenn die Effizienz des elektrischen Verbrauchers um etwa 30 % erhöht wird.

Fazit

Wie die Beispiele zeigen, senkt die Nutzung von Prozessabwärme den Gesamtenergiebedarf, jedoch erzeugen diese Lösungsansätze in der Regel Sekundärprozesse (z. B. zusätzlichen Abluftbedarf), welche den primärenergetischen Vorteil der Abwärmenutzung auf nur noch einen Bruchteil verringern können.

Ein weiterer Aspekt betrifft die mittelfristige Nutzung. Auch eine vermeintliche Abwärmequelle unterliegt technischen Weiterentwicklungen. Die Abwärmequelle könnte in Zukunft versiegen, wenn der Prozess selbst optimiert wird. In vielen Bereichen sind in den letzten Jahren maßgebliche Effizienzverbesserungen erzielt worden, wie zum Beispiel bei den EDV-Monitoren im Übergang von Röhrenbildschirmen zu aktuellen Flüssigkristallanzeigen.

Ein schönes Beispiel zur unmittelbaren Nutzung der Abwärme im selben Gerät sind gewerbliche Spülmaschinen. Effiziente Geräte kondensieren den Wrasen in der Maschine nach dem Spüldurchgang am Frischwasserzulauf. Dadurch wird das Frischwasser vorerwärmt und die Raumlufbelastung verringert. Außerdem wird die Wärme des Abwassers zur Vorerwärmung des Klarspülwassers genutzt.

Wird in ineffizienten Prozessen zu viel Abwärme freigesetzt, ist deren Nutzung durch zusätzliche Systeme sicherlich sinnvoll. Doch sollte die Optimierung des eigentlich Abwärme erzeugenden Prozesses immer Vorrang haben.

3.4 Ausgangsbedingungen zur Umsetzung des Passivhaus-Konzepts

Ein nahezu durchgängiger Betrieb und erhöhte Anforderungen an den thermischen Komfort gehören zu den Besonderheiten im Krankenhaus. Wärmeschutzmaßnahmen sind daher äußerst lohnend. Ferner führt die Entwurfsaufgabe sowie die Bestrebungen zu kurzen Wegen oftmals zu kompakten Gebäudeentwürfen mit minimierten Wärmeverlustflächen: Dies sind günstige Voraussetzungen zur Umsetzung eines kosteneffizienten passivhaus-üblichen Wärmeschutzes.

Bereits in konventionellen Krankenhäusern werden in den meisten Bereichen raumluftechnische Anlagen eingesetzt.

Eine umfassende Ausstattung des Gebäudes mit kontrollierter Lüftung mit Wärmerückgewinnung ist da nur noch ein kleiner Schritt. Dabei spart die kontrollierte Belüftung nicht nur Energie, sondern unterstützt z. B. in der Pflege durch gute Luftqualität auch Krankenhäuser in ihrer primären Funktion.

Die Bedingungen zur Umsetzung des Passivhaus-Konzepts im Krankenhaus erscheinen vor diesem Hintergrund sehr günstig.

4 Planungsempfehlungen

Häufig wird angenommen, dass der Passivhaus-Standard sich ausschließlich auf den Heizwärmebedarf bezieht. Die Grundidee ist hingegen den Energieeinsatz aller für die Dienstleistung relevanten Anwendungen bei mindestens gleichem Komfort maßgeblich zu reduzieren.

Wie bereits zuvor bei anderen Nichtwohngebäuden (z. B. Bildungsgebäude, Schwimmbäder) bedarf es für den Krankenhausbetrieb zunächst einer Klärung aller relevanten Energiedienstleistungen, der dafür üblichen Verbrauchswerte und einer Ermittlung der Einsparpotentiale, denn die Energieströme innerhalb des Systems Gebäude sind nicht unabhängig voneinander: Die Einflüsse der Nutzung sind umso relevanter, je effizienter das Gebäude ist.

Die langen Nutzungszeiten, der höhere Komfortbedarf der Patienten und die gesonderten Hygieneanforderungen zählen zu den Besonderheiten im Krankenhaus im Vergleich zu anderen Nutzungen. Hinzu kommen energetisch "ineffiziente" Prozesse und Apparate, deren überschüssige Wärme bis auf weiteres gezielt abgeführt werden muss. Charakteristisch im Krankenhaus erscheint ferner die Vielzahl an Energieanwendungen, welche zudem abhängig von der Ausstattung des Hauses ist. Die Studie greift daher die relevanteren Energieverbraucher auf.

Generell gilt auch im energieeffizienten Passivhaus-Krankenhaus, dass die frühzeitige Abstimmung und Beteiligung aller Akteure (auch des Medizintechnikplaners) – die "integrale Planung" – ein wesentlicher Schlüssel zum Erfolg des Projekts ist. Genauere Einzelbetrachtungen im Vorfeld vermeiden spätere Iterationsschritte und erlauben energie- und kostenoptimierte Lösungen.

Es zeigte sich, dass häufig geeignete Kennzeichnungen an Geräten fehlen, die den Energiebedarf ausweisen. Selbst wenn der Wunsch zum Einsatz energieeffizienter Apparaten besteht, ist der Produktvergleich oder die Festlegung einer energetischen Qualität in Ausschreibungen kaum möglich. Dies gilt sogar im Bereich der medizinischen Kühlschränke, da es im Unterschied zu Haushaltsgeräten, für diese Kühlschränke keine Energiekennzeichnung eingeführt wurde.

Bei medizinischen Geräten erschweren zudem die langwierigen Zulassungsverfahren den Prozess einer möglichen Geräteoptimierung. Werden, um energetische Verbesserungen zu erzielen, Veränderungen in Teilbereichen eines Geräts erforderlich, können hohe Aufwendungen für die Typprüfungen entstehen. Hersteller waren in der Regel sehr zurückhaltend, wenn mögliche Geräteanpassungen diskutiert wurden.

Die hygienischen Anforderungen im Krankenhaus haben aus energetischer Sicht vor allem Einfluss auf die Ausführung der Lüftungsanlage. Wie sich zeigte, handelt es sich um wenige Bereiche im Krankenhaus, in denen zusätzliche Anforderungen gelten und in der Regel stehen auch dort mit den hygienischen Anforderungen verträgliche, effizienzverbessernde Lösungen zur Verfügung.

Häufig wird die Frage diskutiert, ob Energieeffizienzanstrengungen im Krankenhaus lohnen, wenn es ohnehin Prozesse gibt, die in hohem Maße Wärme abgeben. Wie eine genauere Analyse von Niedertemperaturabwärme nutzenden Verfahren zeigt, erzeugt das verfügbar Machen der Abwärme zusätzliche Sekundärprozesse, welche den primärenergetischen Vorteil auf nur noch einen Bruchteil der genutzten Abwärme reduzieren. Die Abwärmenutzung ineffizienter Prozesse und Apparate ist sinnvoll und sollte geprüft werden, wenn die Optimierung des eigentlichen Abwärme produzierenden Prozesses nicht möglich ist.

Die Voraussetzungen zur Umsetzung des Passivhaus-Konzepts im Krankenhaus sind gut. Wärmeschutzmaßnahmen sind bei den langen Nutzungszeiten und hohen Komfortanforderungen besonders lohnend. Auch konventionelle Krankenhäuser verfügen in weiten Bereichen über Raumluftechnik. Eine umfassende Ausstattung eines Krankenhauses mit kontrollierter Lüftung mit Wärmerückgewinnung ist nur noch ein kleiner Schritt.

Exemplarisch für den geplanten Neubau des Klinikums Frankfurt Höchst zeigt Abbildung 7 den Anteil am Primärenergiebedarf der größeren Verbraucher eines Krankenhauses bei energieeffizienter Ausführung.

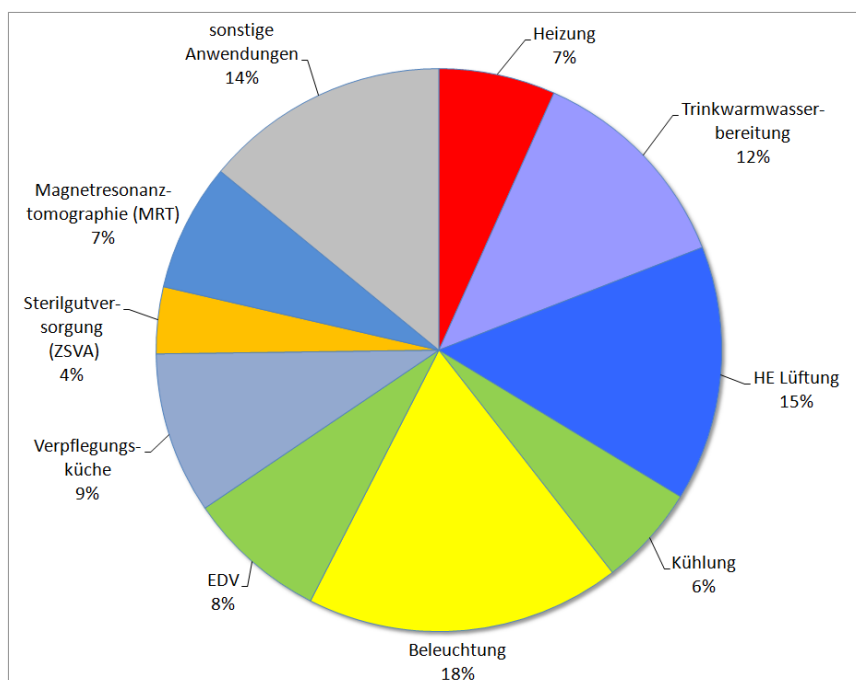


Abbildung 7: Anteile unterschiedlicher Energieanwendungen am Primärenergiebedarf exemplarisch für den geplanten Neubau des Klinikums Frankfurt Höchst.

Eine Übersicht zum Gesamtenergiebedarf eines Krankenhauses der Maximalversorgung gibt Abschnitt 4.12.

Die Erkenntnisse aus der Analyse der relevanten Energieanwendungen wird im Folgenden zusammenfassend vorgestellt.

Für eine abschließende Beurteilung der untersuchten Energieeffizienzpotentiale, ist eine Evaluierung eines realisierten energieeffizienten Passivhaus-Krankenhauses durch messtechnische Untersuchung nötig. Nur dann können die entwickelten Lösungsansätze und Strategien in der Praxis überprüft werden.

4.1 Heizwärmebedarf

Die Kernidee des Passivhauses besteht darin, die Wärmeverluste des Gebäudes soweit zu reduzieren bzw. den Wärmeschutz soweit zu ertüchtigen, dass eine Beheizung über eine Nacherwärmung der hygienisch erforderlichen Luftmengen möglich ist. Die aus Gründen der Wohngesundheit empfehlenswerte kontrollierte Lüftung kann somit zu Vereinfachungen beim Heizungssystem beitragen.

Im Krankenhaus verhält es sich anders. Aufgrund der Belegungsdichten und spezifischen Nutzungen sind die erforderlichen Luftmengen höher als im Wohnbau, zudem erscheint eine Entkopplung von Beheizung und Lüftung zumindest in einigen Bereichen zweckmäßig. Aus grundsätzlichen Überlegungen zur Behaglichkeit, Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz werden daher in Abschnitt 5.1 zunächst geeignete Randbedingungen vorgestellt und abschließend eine Empfehlung zu einem Heizwärmekennwert abgeleitet.

Randbedingungen

- Einheitliche **Raumtemperatur** im Energiebilanzverfahren von 22 °C (erhöhter Komfort für genesende und ältere Patienten)
- Als Ansatz der **internen Gewinne** im Rahmen der energetischen Bilanzierung von energieeffizienten Passivhaus-Krankenhäusern wird ein Wert von 5,5 W/m² empfohlen.

Anforderung an Komponenten und Bauteile

- Wärmedurchgangskoeffizient der opaken Außenbauteile $\leq 0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Ein solcher Wärmeschutz der Außenbauteile mit gebräuchlichen Dämmstoffen liegt heute im wirtschaftlich optimalen Bereich.
- Wärmedurchgangskoeffizient der transparenten Bauteile (Fenster) $\leq 0,8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$: Bietet hohen thermischen Komfort und zusätzliche Freiheiten bei der Art und Anordnung der Beheizung.

- Luftdichtheitskennwert der Gebäudehülle $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$: In den großen und in der Regel sehr kompakten Krankenhaus-Gebäuden sollten jedoch geringere Werte unter $0,4 \text{ h}^{-1}$ angestrebt werden.
- Kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnungssystem in allen Bereichen des Krankenhauses: Es werden Wärmebereitstellungsgrade $\eta_{\text{WRG}} \geq 75 \%$ (Zielwerte $\eta_{\text{WRG}} \geq 80 \%$) empfohlen. Die Erfahrungen aus dem Wohnbau und anderen Nutzungen zeigen, dass es um die Raumluftqualität bei ausschließlicher Lüftung über Fenster häufig nicht gut bestellt ist, daher wird eine kontrollierte Lüftung in allen Bereichen des Krankenhauses empfohlen.

Heizwärmebedarf

Krankenhäuser zählen in der Regel zu den großen und kompakten Gebäuden. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass trotz höherer Raumsolltemperaturen und höherer Luftwechsel im Krankenhaus im Vergleich zu anderen Nutzungen, der Heizwärmebedarf durch den Einsatz von Effizienztechnologien und mit vertretbarem Aufwand auf $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ begrenzt werden kann.

- Empfehlung zum Heizwärme-Kennwert $\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})^2$

4.2 Heizung

Beheizung

- Durch den guten Wärmeschutz spielt die Art der Wärmeübergabe keine große Rolle. Eine Beheizung über Heizflächen, d.h. die Entkopplung von Lüftung und Heizung, ist im Krankenhaus aus unterschiedlichen Gründen praktikabler.
- Synergien können sich z. B. ergeben, wenn Flächenheizsysteme zu Heiz- und Kühlzwecken verwendet werden.

Versorgungslösungen

- Alle gängigen Versorgungslösungen sind möglich. In Kombination mit Flächenheizungen und geringen Vorlauftemperaturen bestehen gute Voraussetzungen für den Einsatz von Wärmepumpensystemen.
- Aufgrund der vorhandenen Grundlast für Trinkwarmwasser und Strom stellt die Kraftwärmekopplung eine interessante Lösung dar.

² Flächenbezug: Energiebezugsfläche nach [PHPP].

- Heizungsleitungen sollten im Neubau grundsätzlich im beheizten Bereich verlegt werden. Ist eine Anordnung im unbeheizten Bereich unvermeidbar, sollten sie so kurz wie möglich geplant und hervorragend gedämmt werden.

4.3 Dampferzeugung

Der Einsatz von Prozessdampf als Wärmeträger sollte in Krankenhaus-Neubauten, aufgrund der hohen Umwandlungsverluste, möglichst vermieden werden.

Gehört auch eine Sterilgutversorgung zum Leistungsumfang des Krankenhauses, ist zumindest Reindampf für die Sterilisationsprozesse erforderlich. Um Verteilverluste zu verringern, sollte der Reindampf möglichst verbrauchsnahe z. B. mit kleinen Schnelldampferzeugern oder aus Prozessdampf mittels Dampfumformern in unmittelbarer Nähe zur Sterilgutversorgung erzeugt werden.

4.4 Trinkwarmwasserbereitung

Die wesentlichen Optimierungspotentiale zur Senkung des Energiebedarfes der Trinkwarmwasserversorgung liegen im sparsamen Umgang mit warmem Wasser durch

- wassersparende Armaturen,
- der Verringerung der Verteilverluste und
- der effizienten Erzeugung des warmen Wassers.
- Prognosen zum Energiebedarf und energetische Optimierungen des Trinkwarmwassersystems sollten auf realistischen Verbrauchswerten beruhen. Liegen keine eigenen Daten, z. B. aus einem Bestandsgebäude mit vergleichbarem Versorgungsumfang vor, kann ein mittlerer Verbrauchswert von 50 Liter pro Planbett und Tag angesetzt werden (Wert basiert auf Literaturangaben und eigenen Messungen).
- Bis zu 50 % des Wärmebedarfs des Trinkwarmwassersystems sind Wärmeverluste der Verteilleitungen. Maßnahmen, welche die Wärmeverluste verringern, reduzieren gleichzeitig den unerwünschten Wärmeeintrag in Kaltwasserleitungen und helfen interne Lasten im Sommer zu senken. Daher sollte das Warmwassernetz möglichst kompakt und gut gedämmt ausgeführt werden.
- Durch die Vermehrung von Legionellen kann vom Trinkwarmwassersystem eine Gesundheitsgefährdung ausgehen. Bezüglich Planung und Betrieb verweist [RKI 2013] auf die einschlägigen technischen Regeln, bis auf wenige hygienisch

sensible Bereiche (z. B. Intensivstation, Bereiche zur Behandlung von immunsupprimierten Patienten) gelten Anforderungen wie in anderen öffentlichen Gebäuden. In zentralen Trinkwarmwasseranlagen ("Großanlagen") sind demnach Temperaturen am Austritt des Trinkwassererwärmers von mindestens 60 °C und im gesamten System über 55 °C zu gewährleisten. Gegenüber einem konventionellen zentralen Verteilnetz mit Rohrdämmungen gemäß [EnEV 2009] konnten die Verteilverluste durch Optimierung des Netzes und höhere Dämmstärken um 33 % vermindert werden. Erhebliche Potentiale bestehen, wenn das System mit geringeren Warmwassertemperaturen betrieben werden könnte. Hierzu werden in Abschnitt 8.4 Lösungsansätze vorgestellt.

- Durch Nutzung von erneuerbaren Energien (wie z. B. thermischen Solaranlagen) kann der mit der Warmwasserbereitung verbundene Kohlendioxid-Ausstoß weiter vermindert werden. Eine Vorerwärmung des Trinkwassers stellt ferner eine interessante Senke zur Abwärmenutzung dar.

4.5 Kühlung

Reduzierung der Kühllasten

- Zunächst sollten immer alle Möglichkeiten zur Reduzierung der Kühllasten ausgeschöpft werden. Dazu zählt in erster Linie die Verbesserung der Effizienz von künstlicher Beleuchtung, EDV und medizinischer Geräte. Vor allem im Bereich der Beleuchtung und der EDV bietet die Entwicklung der letzten Jahre erhebliches Einsparpotential. Um auch die solaren Lasten zu reduzieren, ist ein geeigneter Sonnenschutz maßgeblich. Ausreichend zugängliche Speichermasse, z. B. durch unverkleidete Betondecken, puffern sommerliche Temperaturspitzen, verbessern das sommerliche Verhalten und sind Grundlage für passive Kühlmaßnahmen, welche die Gebäudekonstruktion als Speicher für überschüssige Wärme nutzen und diese zeitversetzt z. B. nachts abführen.
- Wird durchgängig auf energieeffiziente Anwendungen gesetzt, bleiben die internen Lasten in der Fläche im moderaten Bereich (bis 150 Wh/(m²d)) und deren genauer zeitlicher Verlauf spielt bei überwiegend massiver Bauweise keine so große Rolle. Mit passiven Kühlmaßnahmen kann die sommerliche Behaglichkeit weitgehend hergestellt werden.
- Kühlung mittels großer klimatisierter Volumenströme, welche den eigentlich hygienisch erforderlichen Bedarf deutlich übersteigen, sollte zugunsten anderer Systeme, wie z. B. der Bauteilkühlung vermieden werden.

Passive Kühlstrategien

- Zu den passiven Kühlstrategien zählt die freie Kühlung. Wird die Lüftungsanlage zur freien Kühlung nachts genutzt, sind die hygienisch erforderlichen Außenluftmengen als alleinige Strategie zur Kühlung der über den Tag erwärmten Gebäudespeichermassen nicht ausreichend. Dennoch stellt die Nachtlüftung eine energetisch interessante Lösung dar, die ohne zusätzliche Investitionen, da dem Passivhaus-Ansatz gemäß ohnehin flächendeckend kontrolliert belüftet werden sollte, umgesetzt werden kann.
- Geringe Druckverluste des Lüftungssystems und effiziente Ventilatoren zahlen sich auch im Sommerbetrieb aus. Arbeitszahlen von 5 ($W_{\text{therm}} / W_{\text{elektr.}}$) und mehr können mit der Nachtlüftung und stromeffizienten Lüftungsanlagen erzielt werden.
- Wird die Lüftung nachts ausschließlich zur freien Kühlung betrieben, und besteht kein hygienischer Bedarf, so sollte sie aus energetischen Gründen erst beginnen, wenn die Außentemperatur mindestens 5 K tiefer als die Raumtemperatur liegt.
- Ebenfalls zweckmäßig ist die passive Kühlstrategie der adiabaten Kühlung oder auch Verdunstungskühlung. Hierfür wird die Abluft im Lüftungsgerät befeuchtet, welche anschließend durch den Verdunstungsprozess abkühlt und die Temperatur des Außenluftstroms indirekt, über das im Zentralgerät enthaltene Wärmerückgewinnungssystem, verringert.
- Die adiabate Kühlung ist als zusätzliche Maßnahme interessant, da sie vor allem an heißen Sommertagen, an denen die Außentemperatur die Raumtemperatur deutlich übersteigt, die durch Lüftung eingetragene Wärmelast verringert. Die Temperatur des Außenluftstroms kann um bis zu 10 K reduziert werden. Der investive Aufwand ist gering, da im Lüftungsgerät als zusätzliche Komponente lediglich eine Befeuchtung der Abluft vorgesehen werden muss.
- Geringe Druckverluste der Befeuchtungseinheit und hocheffiziente Wärmerückgewinnungssysteme verbessern die Effizienz der adiabaten Kühlung.
- Mit dem Verfahren der adiabaten Kühlung sind Leistungszahlen deutlich über $10 W_{\text{therm.}} / W_{\text{el.}}$ erzielbar (Kühlenergie / elektr. Hilfsenergie).

Bauteilkühlung

- Die Bauteilkühlung erfreut sich zunehmender Beliebtheit. Werden die Geschossdecken aktiviert, stehen große wärmeübertragende Flächen zur Verfügung, um überschüssige Wärme mit geringen Untertemperaturen abzuführen.

- Erst in Kombination mit der Bauteilkühlung steht ausreichend Kühlpotential zur Verfügung, um die im Krankenhaus in der Fläche auftretenden Kühllasten zu decken.
- Die Bauteilkühlung ermöglicht zudem energieeffiziente Kühlkonzepte. Aufgrund der geringen Temperaturanforderung des Kühlkreises, Temperaturen um 20 °C sind in der Regel ausreichend, können weitgehend natürliche Wärmesenken zur Rückkühlung verwendet werden. Werden Kältemaschinen eingesetzt, so verbessern die hohen Kühlkreistemperaturen die Leistungszahlen.
- Eine sorgfältige Planung der Hydraulik und der Umweltwärmesenke sind bei der Bauteilkühlung unerlässlich. Die Auslegung der Hydraulik und der Pumpen (Rohrssysteme mit geringen Druckverlusten und korrekt ausgelegte Pumpen) hat zudem maßgeblichen Einfluss auf die Effizienz des Systems.

Empfehlungen zur Betonkerntemperierung nach [Kalz et al 2012]:

- Rohrdruckverlust kleiner 300 Pa/m
- elektr. Leistungsaufnahme der Primärpumpe (Grundwasser- bzw. Solepumpe) $\leq 40 \text{ W}_{\text{el}} / \text{kW}_{\text{therm}}$
- Temperaturdifferenz Vor- und Rücklauf zwischen 3 und 5 K.
- Messtechnische Untersuchungen in Büro- und Verwaltungsgebäuden mit der natürlichen Wärmesenke Erdreich bzw. Grundwasser belegen Jahresarbeitszahlen bis zu $8,0 \text{ kWh}_{\text{therm}} / \text{kWh}_{\text{el}}$. (vgl. [Kalz et al 2012]).
- Werden zu Kühlzwecken thermisch aktivierte Bauteile in Kombination mit Umweltenergie verwendet, sollte ein Einsatz des Konzepts auch zum Heizen geprüft werden.

Aktive Kühlsysteme

- Neben den zuvor genannten Kühlmaßnahmen, wird auch im energieeffizienten Krankenhaus der Bedarf aktiver Kühlsysteme und die Verwendung von Kältemaschinen bestehen bleiben. Verbindliche Raumtemperaturanforderungen in bestimmten Bereichen, die mit passiven Kühlmaßnahmen nicht immer zu gewährleisten sind, sowie Prozesse und Apparate, die auf absehbare Zeit noch gekühlt werden müssen, sind kaum anders zu lösen.
- Überschüssige Wärme sollte, sofern möglich, direkt an der Quelle erfasst werden, bevor sie zur Erwärmung des Raums führt. Eine einfache Lösung stellt die Absaugung am Gerät dar. Besser ist die Kühlung mit einem Kaltwasserkühlkreis. Einige Geräte werden hierzu mit vorgerüsteter Wasserkühlung angeboten.

- Auch eine bessere Kennzeichnung medizinischer Geräte mit genaueren Angaben zu Wärmelasten wäre wünschenswert, um eine Überdimensionierungen der Kältetechnik zu vermeiden und Betriebspunkte zu optimieren.
- Der Kühlenergiebedarf hängt von der Ausstattung und den im Gebäude untergebrachten Einrichtungen (Sterilgutversorgung, Wäscherei, Verpflegungsküche, etc.) ab. Allgemeine Aussagen sind daher kaum möglich, der Bedarf kann nur anhand des konkreten Projekts ermittelt werden.
- Da die internen Lasten größtenteils auf Elektroanwendungen zurückzuführen sind, sind jedoch überschlägige Abschätzungen zum Kühlbedarf möglich. Basierend auf dieser Annahme (vgl. auch Abschnitt 10) wird davon ausgegangen, dass der Nutzkältebedarf mit vertretbaren Maßnahmen (effiziente Elektroausstattung, geeignete Sonnenschutzmaßnahmen) im energieeffizienten Passivhaus-Krankenhaus auf $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})^3$ begrenzt werden kann.

4.6 Lüftung

Dimensionierung und Regelung der Luftmengen an den tatsächlichen Bedarf anpassen

- Die Belüftung von nicht ständig genutzten Funktionsräumen sollte über Klappen oder Volumenstromregler bedarfsgeführt erfolgen.
- Luftwechselraten, die sich aufgrund des Kühlbedarfs ergeben, sollten mit den tatsächlichen Leistungsdaten der medizinischen Geräte unter Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit ermittelt werden. Energieeffizientere Geräte reduzieren an der Stelle nicht nur den Strombedarf für die Medizintechnik, sondern auch den Kühlbedarf und damit den geförderten Luftvolumenstrom.
- Großzügige Auslegungen der Lüftungsanlage zur Abfuhr der Raumwärme-lasten sollten zugunsten anderer Systeme, wie der Bauteilkühlung oder dezentraler Umluftgeräte mit Kühlfunktion, vermieden werden.
- Auch in OP-Räumen ist eine bedarfsgeführte Lüftung mit Abschaltung außerhalb der Betriebszeiten unter Berücksichtigung einer Vorspülphase von 30 min bei Auslegungsvolumenstrom möglich.
- Empfehlung für den Außenluftbedarf in Patientenzimmer: $30 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Person.

³ Flächenbezug: Energiebezugsfläche nach [PHPP].

Vermeidung unnötig hoher Druckverluste im Kanalnetz

- Kompakte Kanalnetze planen, vor allem dort, wo große Luftströme bewegt werden. Die verbrauchsnahe Anordnung der RLT-Geräte erleichtert in diesen Fällen eine stromeffiziente Lüftung durch geringe Druckverluste.
- Kompromissfindung zwischen räumlicher Nähe von Funktionsbereichen und Technikräumen und möglichst kurzen Außenluft- und Fortluftkanälen ist erforderlich.

Wichtigste Stellschraube für die Reduzierung der Druckverluste der Krankenhaus-Lüftung sind die Filter. Filter mit großer Medienfläche verringern den Druckverlust. Die folgenden Anfangsfilterdruckverluste werden empfohlen:

- $M7 \leq 50 \text{ Pa}$
- $F9 \leq 70 \text{ Pa}$
- $H13 \leq 100 \text{ Pa}$

Geringe Druckverluste im Kanalnetz:

- Empfehlung zum Gesamtdruckverlust eines Strangs (Außenluft bis Zuluft bzw. Abluft bis Fortluft, ohne Zentralgerät und ohne Endständige Filter) des Kanalnetzes 250 Pa.

Anforderungen an das Lüftungskonzept

- Nur in wenigen Bereichen bestehen aufgrund der Krankenhaushygiene gesonderte Anforderungen an das Lüftungssystem.
- Spielräume im Brandschutzkonzept nutzen: Es ist notwendig, erst recht bei Krankenhäusern mit ihrer eigenen Komplexität, in der Frühphase der Vorentwurfsplanung, Lösungen für eine energetisch optimierte Lüftungsplanung unter Berücksichtigung des Brandschutzkonzepts zu finden.
- Auch Krankenhäuser in konventioneller Bauweise sind bereits in weiten Bereichen mit Raumluftechnik ausgerüstet. Es ist daher nur noch ein kleiner Schritt zur umfassenden Ausrüstung des Gebäudes mit kontrollierter Lüftung mit Wärmerückgewinnung. Dabei spart die kontrollierte Belüftung in den Pflegebereichen nicht nur Energie, sondern unterstützt das Krankenhaus durch dauerhaft gute Luftqualität auch in seiner primären Funktion.

Effizienzanforderungen an das Lüftungsgerät und Lüftungskonzept

- Lüftungsgeräte mit hochwertiger Wärmerückgewinnung verwenden. Wärmebereitstellungsgrade $\geq 75 \%$ (Zielwert $\geq 80 \%$)
- Auf eine niedrige elektrische Leistungsaufnahme des Gerätes bei druckverlust-optimiertem Kanalnetz achten. Elektrische Leistungsaufnahme $\leq 0,45 \text{ Wh/m}^3$ sind erzielbar mit einem druckverlusttechnisch optimiertem Kanalnetz (Empfehlung zum Gesamtdruckverlust des Kanalnetzes 250 Pa).
- Auch bei OP-Lüftungsanlagen der Raumklasse 1b sollte die elektrische Leistungsaufnahme $\leq 0,45 \text{ Wh/m}^3$ eingehalten werden.
- Für OP-Lüftungsanlagen der Raumklasse 1a gilt der Grenzwert von $0,45 \text{ Wh/m}^3$ jeweils für den Außenluft-Zuluft-Strang und für den Abluft-Fortluft-Strang; die spezifische Leistungsaufnahme des Umluftventilators sollte $0,15 \text{ Wh/m}^3$ nicht übersteigen. Erzielbar sind die Richtwerte durch entsprechende druckverlustarme Dimensionierung der Komponenten.

4.7 Beleuchtung

Tageslichtnutzung

- Im Vergleich zu anderen Nichtwohngebäuden sind im Krankenhaus vor allem die langen Nutzungszeiten charakteristisch. Viele Bereiche werden auch am Wochenende und in der Nacht genutzt.
- Aufenthaltsräume, wie z. B. die Bettenzimmer, Untersuchungsräume oder büroähnliche Dienstzimmer weisen Raumtiefen auf, welche gewöhnlich mit einseitiger Befensterung ausreichend mit Tageslicht versorgt werden können.
- In Aufenthaltsräumen, deren Zweck eine Tageslichtnutzung zulässt, sollten mit dem Gebäudeentwurf gute Tageslichtverhältnisse angestrebt werden.
- Vor allem im Pflegebereich sind die typischen Nutzungszeiten länger als die Tageslichtverfügbarkeit. In Untersuchungs-, Behandlungs- sowie Therapieräume und z.T. Dienstzimmern stimmen hingegen Nutzungszeiten und Tageslichtangebot besser überein.

Kunstlichtplanung

- Bei der Kunstlichtplanung und Festlegung der Beleuchtungsstärke sollte, sofern im Raum eine Bereichseinteilung bezüglich der Sehaufgabe(n) und des Umfeldes vorgenommen werden kann, eine teilflächenbezogene bzw. eine arbeits-

bereichsbezogene Beleuchtung unbedingt der raumbezogenen Variante vorgezogen werden.

- Ferner verringern helle Räume den Kunstlichtbedarf, denn Tageslicht und Kunstlicht wird effektiver genutzt. Standardreflexionsgrade von Wänden (50 %) und Decken (70 %) sollten überschritten und in der Kunstlichtauslegung (soweit möglich) auch angesetzt werden.
- Für verschiedene Beleuchtungsaufgaben sind unterschiedliche Leuchtentypen vorzusehen, doch auch durch gezielte Produktauswahl können beträchtliche Effizienzpotentiale erschlossen werden.
- Eine bewährte Methode, Effizienzpotentiale in der Beleuchtungsplanung zu nutzen und deren energetische Qualität festzulegen, ist die frühzeitige Vereinbarung von Ziel- und Grenzwerten der installierten elektrischen Leistung abhängig von der geforderten Beleuchtungsstärke und je m² Grundfläche (vgl. [LEE], [SIA 380-4], [VDI 3807-4], [Linder 2012]).

Energiebedarf für Kunstlicht

- Wie Berechnungen zum Kunstlichtbedarf zeigen, weisen die Pflegezimmer und die Flure der Allgemeinpflege, aufgrund der langen Nutzungszeiten, die höchsten Energiebedarfswerte auf. Zwar sind die Mindestbeleuchtungsstärken in den Untersuchungsräumen und Dienstzimmern am höchsten, doch bestehen dort aufgrund der überwiegend am Tage stattfindenden Nutzung auch die besten Voraussetzungen der Tageslichtnutzung. Der Kunstlichtbedarf ist dort daher deutlich geringer als in den Bettenzimmern.
- Ferner belegen die Berechnungen, dass gegenüber den Annahmen der [EnEV 2009] der Energiebedarf beträchtlich reduziert werden kann. Der wesentliche Beitrag wird hierbei mit der effizienten Kunstlichtausstattung erzielt. Gegenüber der effizienten Variante (Zielwerte gemäß [SIA 380-4] werden eingehalten) beträgt die Einsparung alleine durch die optimierte Ausstattung mit Leuchten 70 % in Bettenzimmer bzw. 60 % in Untersuchungsräume und Dienstzimmern.
- Dass die Zielwerte gemäß [SIA380-4] tatsächlich einzuhalten sind, belegen erste optimierte Varianten der Beleuchtungsplanung zum Neubau des Klinikums Frankfurt Höchst. In den Untersuchungsräumen und Dienstzimmern werden die Zielwerte sogar noch unterschritten.
- In Bettenzimmern werden gerne in Versorgungsschienen integrierte Beleuchtungslösungen eingesetzt. Die modulare Systembeleuchtung erfüllt die medizinisch-pflegerischen Ansprüche und schafft eine wohnliche Atmosphäre. Wie

eine Auswertung zeigt, erfüllen sie die empfohlenen Zielwerte auch in der LED-Ausführung nicht. Die Effizienz wird dabei vor allem durch die indirekte Allgemeinbeleuchtung reduziert. Beleuchtungskonzepte mit direkt-strahlenden Deckenleuchten zur Allgemeinbeleuchtung erfüllen hingegen die Anforderungen.

- Übertragen auf die Verhältnisse der Neubauplanung zum Klinikum Frankfurt Höchst beträgt der Endenergiebedarf etwa 12 bis 24 kWh/(m²a) (Ziel- bzw. Grenzwert der installierten elektrischen Leistung gemäß [SIA 380-4] werden eingehalten). Gegenüber einer konventionellen Ausführung (nach [EnEV 2009]) beträgt die Einsparung durch die zuvor ausgeführten Maßnahmen bis zu 65 %.

4.8 EDV

- Im Krankenhaus ist die EDV inzwischen für viele Abläufe unerlässlich. Durch die zunehmende Vernetzung (moderne medizinische Geräte sind häufig direkt in das IT-System eingebunden) und dem Übergang zu elektronischen Patientenakten nimmt deren Bedeutung sogar noch zu.
- Aus unterschiedlichen Gründen besteht ein Trend zu "Green-IT" mit effizienteren Geräten. Entscheidend, wenn auch der EDV-Bereich "grün" werden soll, ist, dass überhaupt Anforderungen an die Energieeffizienz in Ausschreibungen gestellt werden. Da der Bereich sehr dynamisch ist und ständig neue Geräte auf den Markt kommen, müssen sich die Ausschreibungen am jeweils aktuellen Stand der Technik orientieren.
- Bei der Arbeitsplatz-Ausstattung schneidet eine Thin-Client-Lösung (PC ähnliche Endgeräte mit reduzierter Prozessor-Leistung) oder ein Laptop (ohne zusätzlichen Monitor) am günstigsten ab.
- Neben der Ausstattung der Arbeitsplätze besteht, aufgrund der Datenverwaltung, ein erheblicher Energiebedarf in der Serverstruktur.
- Für die Verhältnisse beim Neubau des Klinikum Frankfurt Höchst ergibt sich ein Endenergiebedarf des gesamten EDV-Systems bei effizienter Ausstattung (Ausrüstung mit Thin-Client-Arbeitsplätzen) von etwa 8 kWh/(m²a). Der Wert beruht auf der geplanten EDV-Ausstattung. Andere Systeme und geringere Effizienz erhöhen den Energiebedarf schnell auf 15 bis 20 kWh/(m²a).
- Um neben dem Energiebedarf der Serverstruktur auch den Kühlbedarf gering zu halten, sollten Server mit höherer Temperaturtoleranz verwendet werden. Eine Nutzung der Abwärme sollte geprüft werden.

4.9 Zentrale Sterilgutversorgungsabteilung (ZSVA)

- Zu den energetisch relevanten Prozessen in der zentralen Sterilgutversorgungsabteilung (ZSVA) zählt der Reinigungsprozess der zuvor benutzten Produkte und die anschließende Sterilisation.
- Der größte Energieanteil in Reinigungs- und Desinfektionsautomaten dient der Erwärmung des Wassers. Dort liegt daher auch das wesentliche Einsparpotential. Eine naheliegende und verfügbare Maßnahme ist der sparsame Umgang mit Wasser. Durch Abstimmung der Wassermengen auf die Standzeit vor dem Spülvorgang (der Reinigungsaufwand steigt mit längeren Standzeiten) und die Art der Reinigungsgüter, kann mit verringerten Wassermengen gearbeitet werden. Energieeinsparungen um 20 % sind durch den intelligenten Wassereinsatz möglich. Eine ZSVA im eigenen Hause und kurze Wege zur OP-Abteilung verkürzen z. B. die Standzeiten.
- Ein weiteres aber eher untergeordnetes Einsparpotential bei den Reinigungsautomaten erschließt die Kondensation des Wrasen in der Reinigungskammer am Frischwasserzulauf. Jedoch reduziert die Maßnahme aufgrund der geringeren Feuchtelasten zugleich den Abluftbedarf der Automaten.
- Der größte Teil der zugeführten Energie (über 60 %) gelangt nach dem Reinigungsprozess in Form von Wärme ins Abwasser. Im Gerät integrierte Wärmerrückgewinnungssysteme, wie in gewerblichen Küchenspülmaschinen verfügbar, werden für Reinigungsautomaten der ZSVA nicht angeboten.
- Eine interessante Lösungen bieten Tanksysteme, die eine Wiederverwendung des heißen VE-Wassers (93 °C) aus der Desinfektionsphase ermöglichen. Durch eine Ventilschaltung wird dieses Wasser in einem gesonderten Tank gesammelt und kann in Großreinigungsautomaten, welche ausschließlich Transportwagen und Container reinigen, ein zweites Mal verwendet werden.
- Alternativ kann die im Abwasser enthaltene Wärme auch in einem zusätzlichen, nicht im Gerät befindlichen Wärmerückgewinnungssystem oder mit Hilfe eines Wärmepumpensystems genutzt werden. Eine Bypass-Schaltung muss hierfür sicherstellen, dass stark verschmutztes Wasser aus der Vorspülung nicht durch den Wärmeübertrager gelangt und diesen verschmutzt.
- Die Dampfsterilisation ist das sicherste Verfahren und gemäß einschlägiger Richtlinien im Krankenhaus gegenüber anderen Methoden zu bevorzugen (vgl. [KRINKO 2012]). Bei diesem Verfahren wirkt reiner, gesättigter Wasserdampf auf die Oberflächen des Sterilisiergutes. Gleichzeitig ist er im Vergleich zu anderen Prozeduren, die jedoch nicht in der Breite des Krankenhauseinsatzes empfohlen werden, das energieintensivste Verfahren.

- Bessere Dämmung der Sterilisierkammer und möglichst kurze Beladungszeiten bieten nur kleine Einsparpotentiale. Vergleichbares gilt für verringerte Wärmekapazitäten der heißen Komponenten des Sterilisators als auch des Transportwagens und der Transportbehälter. Jedoch reduzieren diese Maßnahmen die thermischen Lasten in der ZSVA, denn die heißen Bestandteile kühlen in deren Räumen ab und sind daher gleichzeitig ein Beitrag zu verbessertem thermischen Komfort. Geringere Wärmelasten sind ferner Voraussetzung für kleiner dimensionierte Lüftungsanlagen im Bereich der ZSVA.
- Bis zu 70 % der Energie werden durch die Prozessführung mit zyklischen Vakuumphasen und Dampfstößen in der Vakuumanlage (im Kondensator und über die Pumpe) an das Kühlwasser abgegeben.
- Eine Optimierung der Prozessführung, der zyklischen Vakuumphasen und Dampfstöße unter energetischen Gesichtspunkten würde ggf. auch Energie-sparpotential bieten. Eine energetische Optimierung der Prozessführung wäre allerdings nur mit gleichzeitiger Absicherung anhand von umfangreichen mikrobiologischen Studien möglich.
- Erhebliche Wärmemengen gehen im Reinigungsprozess in die warmen Abwässer und während der Dampfsterilisation an den Kühlkreis der Vakuumanlage. Mit geeigneten technischen Lösungen könnte zumindest ein Teil davon in anderen Prozessen, z. B. zur Erwärmung des Trinkwarmwassers, genutzt werden.
- Bezogen auf die Flächenanteile in der Neubauplanung liegt der Primärenergiebedarf der Prozesse Reinigen, Desinfizieren und Sterilisieren zwischen 8 und 10 kWh/(m²a). Lüftungs- und Kühlbedarf in der ZSVA sind darin noch nicht berücksichtigt.

4.10 Bildgebende Verfahren

In der Medizin werden bildgebende Verfahren eingesetzt, um zwei- oder dreidimensionale Bilddaten des Gewebes oder von Organen zu erzeugen.

Magnetresonanztomographie (MRT)

- Die heute eingesetzten Ganzkörpersysteme haben überwiegend Magnetfeldstärken von 1 bis 1,5 Tesla, neuere Systeme auch 3 Tesla. Die hohen Feldstärken des statischen Magnetfelds werden mit tiefgeköhlten supraleitenden Spulen erzeugt. Die dauerhaft erforderliche Kühlung bis nahe an den absoluten Nullpunkt ist ursächlich für einen wesentlichen Anteil des Energiebedarfs des MRT.

- Beim Energiebedarf dominiert, aufgrund der dauerhaften Kühlung, die Grundlast den Verbrauch. Die Prozesse während des eigentlichen Aufnahmezyklus haben, durch die kurzen Aufnahmezeiten, hingegen eher untergeordnete Bedeutung.
- Energetisch interessant sind kürzere Untersuchungszeiten, wenn hierdurch mit insgesamt weniger MRT-Systemen, das Diagnoseaufkommen bewältigt werden könnte. Dasselbe gilt für längere Betriebszeiten, wenn in der Summe weniger Systeme für den Bedarf ausreichend wären.
- Einsparpotentiale liegen auch in der Auswahl spezieller Geräte. Jedoch fehlen von Herstellerseite noch standardisierte Energiekennwerte, welche einfache Vergleiche ermöglichen und als zusätzliche Anforderung Eingang in Ausschreibungen finden können. Weiteres Potential liegt in der effizienteren gebäudeseitigen Kühlung des MRT.
- Maßgebliche Einsparungen wären durch Verwendung neuer supraleitender Materialien möglich, wenn der supraleitende Effekt bereits bei höheren Temperaturen eintritt und auf eine Helium-Kühlung verzichtet werden könnte.
- Der Energiebedarf je Untersuchung, inkl. der umgelegten Bereitschaftsverluste außerhalb der Nutzungszeiten, liegt bei etwa 70 kWh (1,5-Tesla-System) bzw. 120 kWh (3,0-Tesla-System) (unter den in Abschnitt 15.1 beschriebenen Nutzungsbedingungen).
- Theoretische Einsparpotentiale, wenn auf eine Helium-Kühlung verzichtet werden könnte, liegen bei 75 % und mehr.

Computertomographie (CT)

- Die Computertomographie ist ein bildgebendes Verfahren der Radiologie und die Weiterentwicklung des klassischen Röntgenverfahrens. Aus einer Vielzahl von Einzelaufnahmen werden Schnittbilder des Gewebes rekonstruiert.
- Da gemäß des Strahlenschutz-Prinzips, die Strahlenbelastung so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar gehalten werden sollte, zielen viele Weiterentwicklungen auf eine Verringerung der Strahlendosis ab. Die Modulation der Strahlungsintensität der Röntgenröhre, verbesserte Bildrekonstruktionsmechanismen und schnellere Detektoren verkürzen die Aufnahmezeit oder reduzieren die Strahlendosis direkt und tragen dabei gleichzeitig zur Energieeinsparung bei.
- Die aufgeführten Technologien gehören zur Ausstattung moderner CTs und verringern im Wesentlichen den Energiebedarf während des Aufnahmezyklus. Die Grundlast des Geräts fällt hingegen, da sie durchgängig eingeschaltet sind, während der Öffnungszeiten der Abteilung und in Notaufnahmen sogar rund um

die Uhr an. Die erfreulichen Verbesserungen innerhalb des Scanzyklus haben daher keinen durchgreifenden Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf des CT.

- Im Vergleich zur Vorgängergeneration fällt der Verbrauch aktueller Geräte je Untersuchung gut 30 % geringer aus.
- Weitere Energieeinsparpotentiale stecken insbesondere in Maßnahmen, welche den Verbrauch im Bereitschaftsbetrieb, z. B. durch effizientere Gerätekomponenten (Netzteile, Kühlung, etc.), reduzieren bzw. die Zeitdauer in Bereitschaft minimieren. Eine automatische Abschaltung und schnelle Einschaltung einzelner Komponenten, soweit dies technisch möglich ist, vergleichbar mit der Start-Stop-Schaltung der Automotoren, könnte zusätzlich effizienzverbessernd wirken.
- Der Energiebedarf je Untersuchung aktueller Geräte, wenn sie außerhalb der Nutzungszeit (nachts und am Wochenende) abgeschaltet sind, liegt bei etwa 1,4 kWh (unter den in Abschnitt 15.2 dargestellten Nutzungsbedingungen). Bleiben die Geräte bei gleicher Gesamtanzahl an Untersuchungen hingegen dauerhaft eingeschaltet, wie z. B. in Notaufnahmen üblich, steigt der Verbrauch je Untersuchung auf mehr als das doppelte an.

4.11 Sonstige Ausstattung und Technik

- Verpflegungsküche: Energiebedarf je warmer Mahlzeit für alle Energieanwendungen inklusive der erforderlichen Haustechnik von etwa 1,1 kWh (Endenergie).
- Steckbeckenspüler auf Pflegestationen (Reinigungs- und Desinfektionsgerät für Behälter für menschliche Ausscheidungen): elektrische Energieverbrauch (Dampfdesinfektion) je Zyklus etwa 0,25 kWh.
- Medizinische Kühlschränke: Der mittlere Energiebedarf umgerechnet auf ein Volumen von 500 Litern liegt bei etwa 800 kWh/a. Ein Haushaltskühlschrank, der jedoch nicht über die für medizinische Kühlschränke erforderlichen Sicherheitsmechanismen verfügt, in vergleichbarer Größe und EU-Energieeffizienzklasse A++ verbraucht nur etwa 1/5 davon.
- Aufzüge: Der Energiebedarf eines Aufzugs hängt von der Förderlast und den tatsächlichen Fahrzeiten ab. Unter den in Abschnitt 17.1 dargestellten Bedingungen wurde ein mittlerer Energiebedarf eines energieeffizienten Fahrstuhls (VDI 4707 Energieeffizienzklasse A) von etwa 4000 kWh/a ermittelt. Gegenüber Bestandsaufzügen sind Einsparungen von über 40 % zu erwarten.
- Druckluft: Das Vorhalten von Druckluft ist mit hohen energetischen Verlusten verbunden. Mit Druckluft betriebene Geräte sollten daher nach Möglichkeit

vermieden werden. Der abgeschätzte Endenergiebedarf bezogen auf die Verhältnisse der Neuplanung zum Klinikum Frankfurt Höchst liegt bei etwa 2 kWh/(m²a).

4.12 Energiebilanz

Art und Ausstattung eines Krankenhauses haben maßgeblichen Einfluss auf den Energiebedarf. Ob Einrichtungen wie eine Sterilgutversorgung, eine Verpflegungsküche, eine Wäscherei oder bildgebende Diagnoseverfahren im Hause vorhanden sind, ist entscheidend für den Verbrauch.

Die folgenden Energiebedarfswerte können daher nur exemplarischen Charakter haben. Sie beziehen sich auf die Verhältnisse der Neubauplanung des Klinikums Frankfurt Höchst und stellen beispielhaft die Energieanteile dar. Dabei wird nach zwei energetischen Ausführungsvarianten unterschieden:

- Die **Variante Passivhaus** hält, hinsichtlich Heizwärme und Nutzkältebedarf, die empfohlenen Grenzwerte ein. Für die weiteren Anwendungen sind jeweils die in den Abschnitten beschriebenen energieeffizienten Lösungen und Geräte berücksichtigt. Die Wärmeversorgung stellt ein Gas-Brennwertkessel sicher. Im Unterschied zur Vergleichsvariante „EnEV“ wird auf eine solarthermische Anlage zur Trinkwarmwasserbereitung verzichtet, um das Einsparpotential der reinen Energieeffizienz-Maßnahmen zu verdeutlichen. Eine Solaranlage wäre auch in der Passivhaus-Variante einsetzbar und würde die Ergebnisse nochmals verbessern.
- Der **Variante "EnEV"** liegen die Gebäudequalitäten des Referenzmodells gemäß [EnEV 2009] zugrunde. Als Wärmeerzeuger wird dem Referenzmodell folgend ein Gas-Brennwertkessel und zusätzlich eine solarthermische Anlage zur Trinkwarmwasserbereitung angesetzt. Bei den weiteren Energiedienstleistungen werden konventionelle Qualitäten berücksichtigt.

Die energetische Bilanzierung der Gebäudeseite wird mit dem [PHPP] berechnet. Beim Kunstlichtbedarf wird, wie im Abschnitt 11 Beleuchtung, auf das erprobte und gegenüber der [DIN V 18599] übersichtlichere Verfahren der [SIA 380-4] zurückgegriffen.

Den Nutzenergiebedarf und Endenergiebedarf für Heizung, Trinkwarmwasserbereitung, Hilfsstrom und Beleuchtung zeigt Abbildung 8. Durch Anwendung von Effizienzmaßnahmen auf der Gebäudeseite (Heizwärme, Lüftung, Warmwasser und Hilfsenergie) sind demnach Einsparungen von 60 % beim Wärmebedarf und über 50 % beim Endenergiebedarf erzielbar.

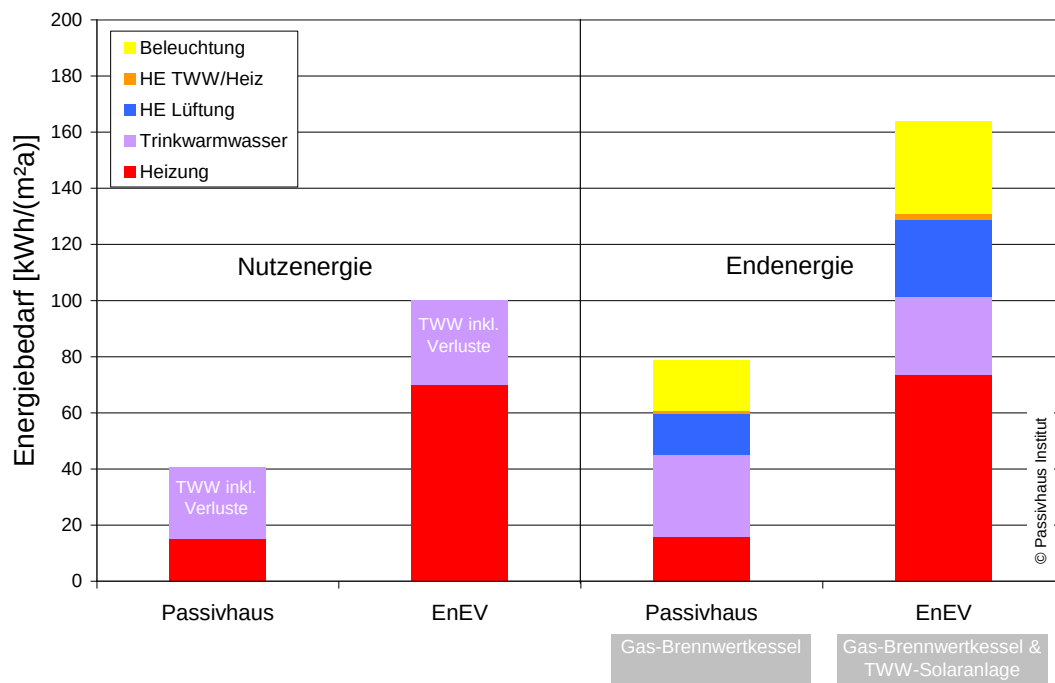
Wie die Energiebilanz in Abbildung 9 zeigt, lohnt auch ein Blick auf die nutzungsspezifischen Energieanwendungen, die in konventionellen Bilanzverfahren (wie z. B.

der DIN V 18599) nicht berücksichtigt werden. Mit zunehmender Energieeffizienz der Gebäudehülle und -technik gewinnen diese Prozesse an Bedeutung.

Der Anteil der in herkömmlichen Bilanzverfahren unberücksichtigten Anwendungen am Gesamtprimärenergiebedarf beläuft sich in der "Passivhaus-Variante" auf beinahe 50 %. Dabei bieten auch diese häufig vernachlässigten Energieanwendungen erhebliche Effizienzpotentiale. Obwohl im Unterschied zur Situation bei Haushaltsgeräten die Energieeffizienz bei medizinischen und professionellen Geräten noch nicht als Thema erkannt worden zu sein scheint, bieten verfügbare Geräte und verbesserte Prozesse in der Summe Einsparpotentiale bei energieeffizienter Ausführung von über 30 %.

Die Vielzahl der Prozesse und Geräte stellt dabei eine Besonderheit im Krankenhaus dar. Umfassende Energieeinsparungen werden sich vermutlich nur bei geeigneter Energiekennzeichnung der relevanten Produkte auch in der Praxis realisieren lassen. Marktrecherchen zu wichtigen Geräten und Anwendungen und ingenieurmäßige Abschätzungen zu deren Energiebedarf sind im Rahmen der Planung kaum leistbar.

Versorgungslösungen, welche Umweltenergie nutzen oder auf dem Einsatz von erneuerbaren Energien beruhen, ermöglichen weitere Reduzierungen des Primärenergiebedarfs der Wärmebereitstellung.



**Abbildung 8: Exemplarische Energiebedarfswerte der "Gebäudeseite" in einem Krankenhaus. Durch Anwendung von Effizienztechnologien kann der Endenergiebedarf um 50 % gegenüber konventionellen Neubauten verringert werden, der Wärmebedarf sogar um 60 %.
Randbedingungen: Tabelle 1**

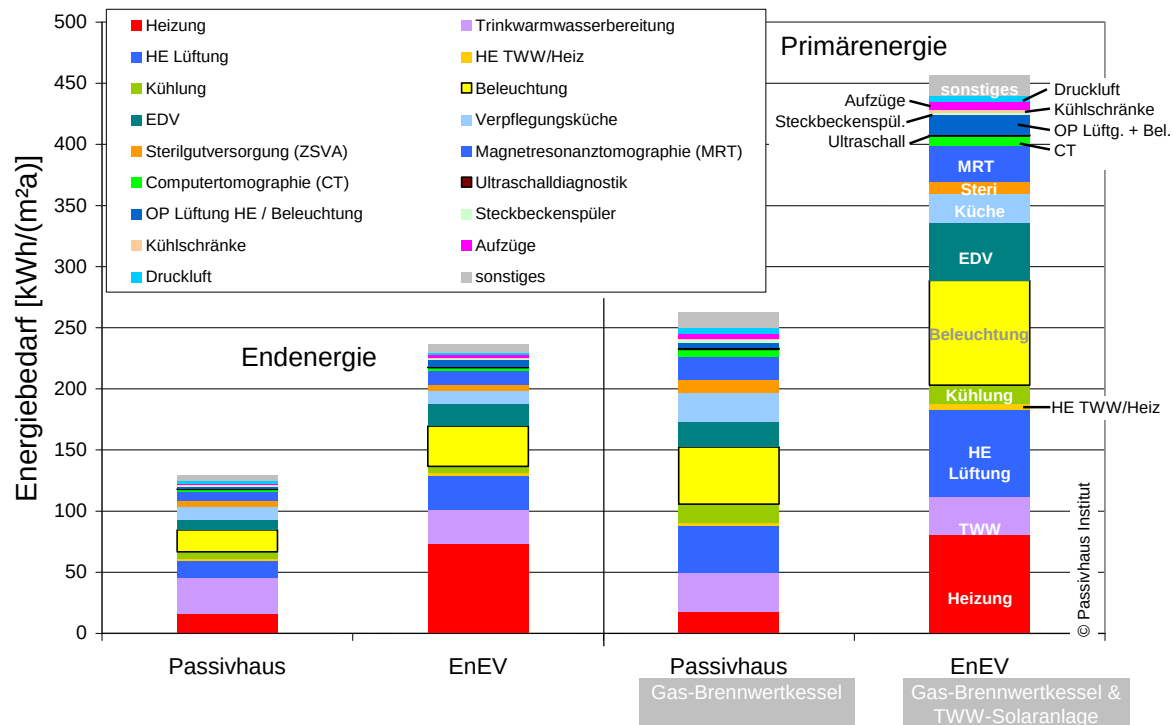


Abbildung 9: Exemplarische Energiebedarfswerte aller Energieanwendungen in einem Krankenhauses. Randbedingungen: Tabelle 1

	Variante "Passivhaus"	Variante "EnEV"
HE Lüftung / volumenbezogene Leistungsaufnahme	0,45 Wh/m ³	0,65 Wh/m ³
HE Lüftung / optimierte Luftführung	Außenluftstrom 80 %	Außenluftstrom 100 %
Kühlung	konservative Annahme Jahresarbeitszahl 2,6, wie in Variante „EnEV“	Jahresarbeitszahl 2,6 / eher optimistische Annahme, dass Nutzkälte wie in Variante „Passivhaus“
Beleuchtung	Annahme zwischen Zielwert und Richtwert gemäß SIA 380-4	Annahme Referenzausführung gemäß [EnEV2009]
Verpflegungsküche	konservative Annahme, wie in Variante „EnEV“	
Sterilgutversorgung	konservative Annahme, wie in Variante „EnEV“	
Magnetresonanztomographie (MRT)	CT A	CT B
Computertomographie (CT)	MRT B	MRT C
Ultraschalldiagnostik	gleiche Annahme	
OP Lüftung HE / Beleuchtung	Stromeffizienz Umluft: 0,15 Wh/m ³ / Beleuchtung „Effizient“ vgl. Abschnitt 9.5.3	Stromeffizienz Umluft: 0,60 Wh/m ³ / Beleuchtung „Standard“ vgl. Abschnitt 9.5.3
Steckbeckenspüler	gleiche Annahme	
Kühlschränke	konservative Annahme Energiebedarf - 30 %	
Aufzüge	VDI 4707 / Effizienzklasse A	VDI 4707 / Effizienzklasse C
Druckluft	gleiche Annahme	

Tabelle 1: Randbedingungen zu den dargestellten Varianten

5 Gebäudehülle / Heizwärmebedarf

5.1 Heizwärmeanforderung

Wohngebäude sowie Schulen, Kindergärten und Bürogebäude werden inzwischen schon routinemäßig im Passivhaus-Standard errichtet. Durch genaue Analyse der Nutzung konnten zweckmäßige Anforderungen an den Heizwärmebedarf entwickelt werden. Realisierte Projekte zeigten, dass die Umsetzung auch in der Praxis möglich ist und dass die extrem geringen Heizwärmeverbräuche sich auch in realen Gebäuden einstellen.

Die Kernidee des Passivhauses besteht darin, die Wärmeverluste des Gebäudes soweit zu reduzieren bzw. den Wärmeschutz soweit zu ertüchtigen, dass die Beheizung über eine Nacherwärmung der *hygienisch erforderlichen Luftmengen* möglich ist. Die aus Gründen der Wohngesundheit empfehlenswerte kontrollierte Lüftung kann somit zu Vereinfachungen beim Heizungssystem beitragen.

Im Krankenhaus sind die erforderlichen Luftmengen, aufgrund der durchgängig hohen Belegung und der spezifischen Nutzungen, höher als im Wohnbau. Die mit der Zuluft transportierbare Heizleistung wäre daher ausreichend auch ein Gebäude mit geringerem Wärmeschutz zu beheizen. Jedoch sind im Krankenhaus recht vielfältige Nutzungen vereint. Die verzahnten Gebäudebereiche weisen unterschiedliche Nutzungszeiten und entsprechend verschiedene Betriebszeiten der Lüftungsanlage auf. Vor diesem Hintergrund erscheint eine Beheizung über die Zuluft nicht generell zweckmäßig.

Aus grundsätzlichen Überlegungen zur Behaglichkeit, Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz soll daher im Folgenden, losgelöst von einer Heizlastanforderung, eine Empfehlung zum Heizwärmekennwert abgeleitet werden.

Randbedingung: Raumtemperatur

Im Krankenhaus bestehen aufgrund der genesenden und älteren Patienten besondere Anforderungen an den thermischen Komfort. Zugleich nehmen mit zunehmendem Wärmeschutz Temperaturunterschiede im Gebäude ab. Im Energiebilanzverfahren wird daher von einer einheitlichen Raumtemperatur von 22 °C im gesamten Gebäude ausgegangen, welche den höheren Komfortbedürfnissen Rechnung trägt.

Randbedingung: Interne Gewinne

Personen, Beleuchtung und weitere Energieanwendungen bestimmen im Krankenhaus die internen Gewinne. Aus einer Analyse der Energieströme und möglicher Effizienzpotentiale werden Randbedingungen zu internen Wärmegewinnen ermittelt.

Es zeigte sich, dass bei der Vielzahl der eingesetzten Geräte spezifische Nutzungsprofile kaum zu ermitteln sind. Viele Geräte werden nur bei Bedarf, andere durchgängig eingesetzt. Außerdem enthalten die Gerätelisten auch Geräte, welche nur als Ersatz vorgehalten werden.

Um dennoch die mittlere Leistungsaufnahme der elektrischen Verbraucher zu ermitteln, wurden Stromleistungsmessungen in unterschiedlichen Abteilungen des Bestandsgebäudes des Klinikums Frankfurt Höchst durchgeführt.

Zur Analyse der Stromleistungsmessungen wurden entsprechend der vermessenen Bereiche Parameter-Modelle entwickelt, welche die wesentlichen elektrischen Verbraucher berücksichtigen (Abbildung 10).

Die Auswertung zeigte, dass in den untersuchten Bereichen "Pflegestation" und "Intensivpflege" die künstliche Beleuchtung den Verbrauch im Bestandsgebäude dominiert.

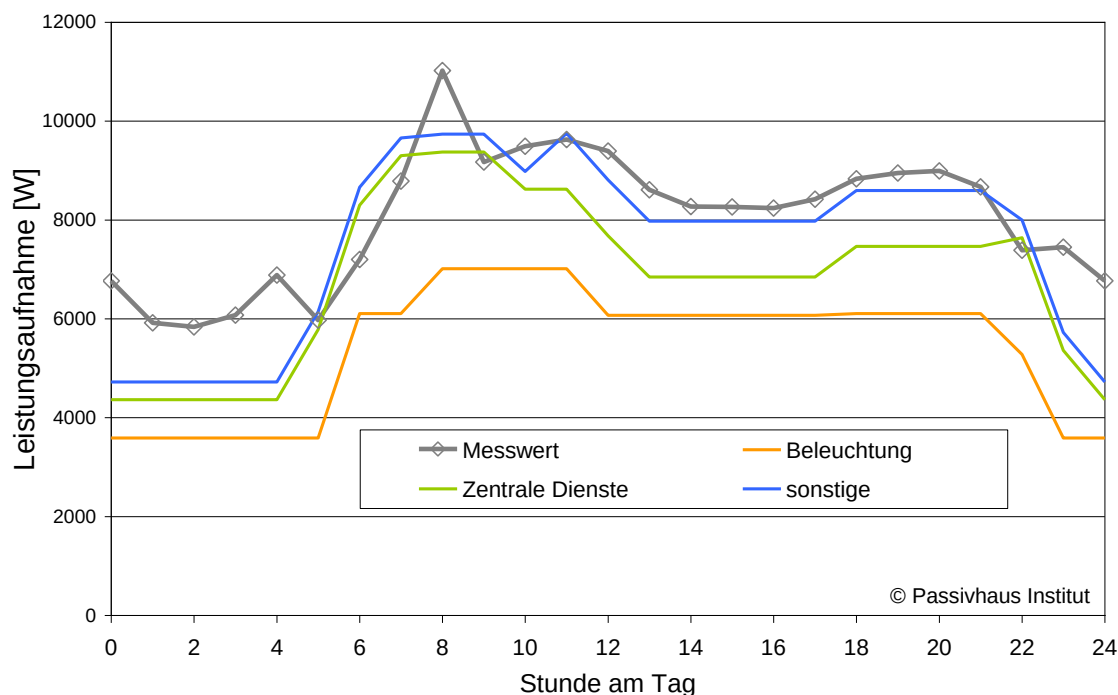


Abbildung 10: Gemessene Stromleistungsdaten und aus den Hauptverbrauchern und Nutzungszeiten berechnete Leistungsaufnahme.
Messdaten einer Pflegestation aus dem Bestandsgebäude des Klinikum Frankfurt Höchst
Zentrale Dienste: allg. genutzte elektrische Verbraucher, wie Telefonanlage, Küche, Steckbeckenspüler etc.

Die Verbrauchsdaten wurden im Bestandsgebäude erhoben. In einem energieeffizienten Krankenhaus-Neubau kommen effizientere Anwendungen zum Einsatz. Alleine im Bereich der künstlichen Beleuchtung und der EDV bestehen durch technische Weiterentwicklungen und Vereinbarung von Ziel- und Grenzwerten im Planungsprozess erhebliche Einsparpotentiale.

Die erhobenen Verbrauchsdaten aus dem Bestandsgebäuden können daher nicht direkt übernommen werden, sondern müssen anhand der Parameter-Modelle auf die Verhältnisse eines energieeffizienten Neubaus übertragen werden.

Neben den elektrischen Verbrauchern tragen die Abwärme der Personen und die Verteilverluste von warmen Leitungen zu den internen Gewinnen bei. Dagegen verursacht die Erwärmung des kalten Wassers in Leitungen und Spülkästen der WCs sowie die Verdunstung von Wasser negative Wärmegewinne, welche ebenfalls berücksichtigt werden.

Abbildung 11 zeigt die ermittelten internen Gewinne gemäß der Bedingungen in der betrachteten Pflegestation und Intensivstation. Ein großer Anteil entfällt dabei auf den Kunstlichtbedarf. Eine Unterscheidung nach effizienter (Grenzwerte eingehalten) und sehr effizienter Beleuchtung (Zielwerte eingehalten) zeigt deren Einfluss. Ziel- und Grenzwerte entsprechen den Empfehlungen der [SIA 380-4] (vgl. auch Abschnitt 11 Beleuchtung).

Gemäß der Analyse liegen die zu erwartenden internen Gewinne im Bereich von 5 bis 6 W/m². Als Ansatz der internen Gewinne im Rahmen der energetischen Bilanzierung von energieeffizienten Passivhaus-Krankenhäusern wird ein Wert von 5,5 W/m² empfohlen.

In Krankenhausbereichen mit hoher Technisierung wird durch medizinische Apparate z.T. bedeutend mehr Wärme freigesetzt, welche, um eine Überhitzung zu vermeiden, in der Regel direkt abgeführt werden muss und daher nur bedingt als interner Gewinn wirksam wird. Dieser Beitrag wird daher im Ansatz zu internen Gewinnen vernachlässigt.

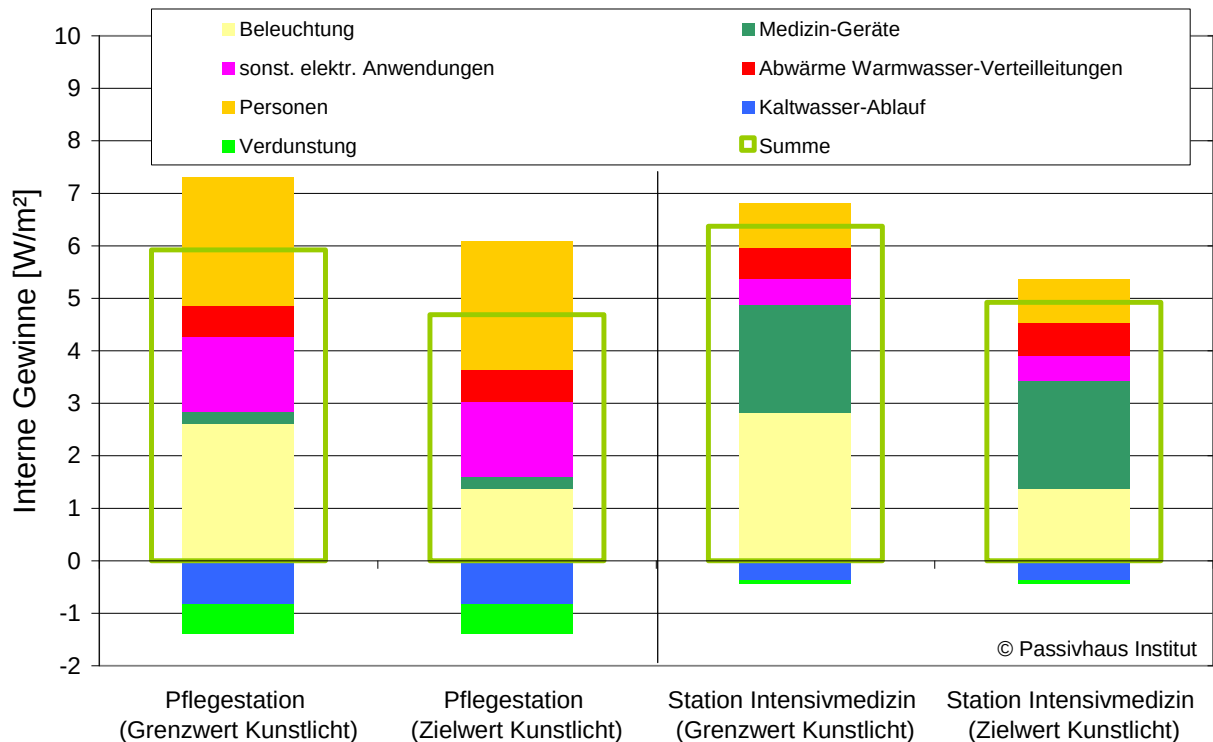


Abbildung 11: Aufstellung der internen Gewinne

Randbedingung: Außenluftwechsel

Auch im Krankenhaus sollten die Außenluftvolumenströme nach dem tatsächlichen Bedarf bemessen werden. Dafür ist in vielen Bereichen die Anzahl der Personen eine wichtige Grundlage (vgl. Abschnitt 9 Lüftung).

Zur Abschätzung eines mittleren Außenluftbedarfes in einem Krankenhaus wird die Planung zum Neubau des Klinikums Frankfurt Höchst zugrunde gelegt. Dabei bestehen erhebliche Spielräume:

- Belegungsdichten und Ansätze zu personenbezogenen Luftmengen müssen festgelegt werden. In Bereichen, welche die [DIN EN 13779] regelt, sind abhängig von der vereinbarten Luftqualitätsklasse unterschiedliche Außenluft-mengen zulässig.
- Konzepte, wie die im Wohnbau übliche "Überströmung" können ferner den Luftbedarf optimieren, wenn hygienische und Brandschutz-Anforderungen dies zulassen (vgl. Abschnitt 9 Lüftung).

Der anhand von Varianten ermittelte mittlere Außenluftstrom im Krankenhaus bewegt sich im Bereich von 1,7 bis 3,0 m³/h je m² NGF.

Anforderung an opake Bauteile

- Wärmedurchgangskoeffizient der opaken Außenbauteile $\leq 0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Unter heutigen ökonomischen Bedingungen liegen diese Werte im wirtschaftlich optimalen Bereich (vgl. Abschnitt 5.2.2 Anforderung an opake Bauteile).

Anforderung an transparente Bauteile und Luftdichtheit

- Wärmedurchgangskoeffizient der transparenten Bauteile (Fenster) $\leq 0,8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Gewährleistet hohe thermische Behaglichkeit auch ohne Heizkörper unter dem Fenster (vgl. Abschnitt 5.2.4 Anforderung an transparente Bauteile).
- Luftdichtheitskennwert der Gebäudehülle $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ (Zielwert Werte unter $0,4 \text{ h}^{-1}$; vgl. Abschnitt 5.2.5 Anforderungen an die Luftdichtheit)

Anforderung an Lüftung

Zahlreiche Untersuchungen belegen unzureichende Luftqualität in Wohngebäuden. Unverändertes Fensterlüftungsverhalten bei gleichzeitig verbesserter Luftdichtheit der Gebäudehülle führt in der Praxis regelmäßig zu geringen Außenluftwechseln. Die [DIN 1946-6] fordert daher, dass mit jeder Wohnbauplanung auch ein schlüssiges Lüftungskonzept erarbeitet werden muss.

Deutlich schlimmer und noch vielen aus eigener Erfahrung bekannt, ist die schlechte Luft in Schulen. Aufgrund der hohen Belegungsdichten sind ausreichende Außenluftwechsel durch Fensterlüftung kaum herzustellen und vor allem im Winter für Schüler mit fensternahen Plätzen häufig mit Zugerscheinungen verbunden. Die flächenbezogenen Frischluftmengen in den Bettenzimmern sind zwar geringer als in Schulklassen, jedoch etwa doppelt so hoch, wie im Wohnbau üblich.

In Funktionsbereichen wie den Operationsträumen, der Intensivstation und Laborräumen eines Krankenhauses ist eine kontrollierte Lüftung verbunden mit hochwertiger Filterung unerlässlich. Aber auch in den übrigen Bereichen insbesondere in den Pflegebereichen sollte eine kontrollierte Lüftung vorgesehen werden, um eine dauerhaft gute Luftqualität sicher zu stellen.

Seit Inkrafttreten der [EnEV 2009] ist eine Wärmerückgewinnung in größeren Anlagen der Raumluftechnik gesetzlich gefordert. Dabei muss die Rückwärmzahl abhängig von Größe und Betrieb der Anlage mindestens 40 bis 50 % betragen. Wird die damit resultierende Reduzierung der Lüftungswärmeverluste mit der elektrischen Antriebsenergie verglichen, sofern die geforderte Mindesteffizienz erfüllt wird, zeigt sich, dass die im Jahr eingesparte Heizenergie gerade mal so hoch ist, wie die dafür benötigte elektrische Energie der Ventilatoren. Eine kontrollierte Lüftung im Pflegebereich, welche die gesetzlich geforderte Mindesteffizienz erfüllt, würde zwar die Luftqualität verbessern, vom ersten Tag an jedoch mehr Primärenergie brauchen als

die Wärmerückgewinnung einspart. Die Gesamtmaßnahme würde daher im Krankenhaus trotz Wärmerückgewinnungssystem den primärenergetisch bewerteten Energiebedarf deutlich erhöhen. Um dies zu vermeiden muss eine effiziente Wärmerückgewinnung ($\geq 80\%$) vorgesehen werden. Arbeitszahlen im Bereich von 10 und mehr werden mit den empfohlenen Effizienz-Anforderungen erzielt. Dies bedeutet, dass mit dem Einsatz von einer kWh Strom im Winterbetrieb 10 kWh Wärme aus der Abluft zurück gewonnen werden.

So kann die reine Komfortkomponente „Zu- und Abluftanlage“ in eine Energiesparmaßnahme verwandelt werden. Dabei sollten die Anlagen auch stromsparend sein, denn in vielen Bereichen des Krankenhauses ist ein durchgängiger Betrieb im Jahr (auch im Sommer) unerlässlich.

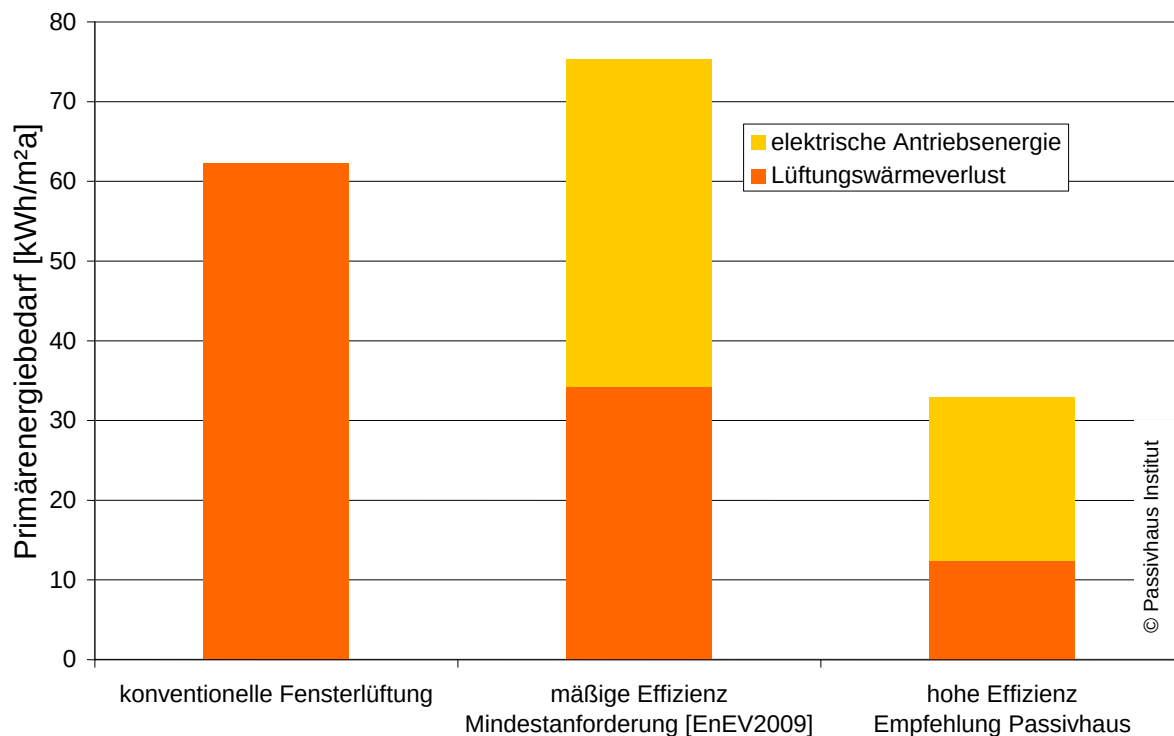


Abbildung 12: Durch Lüftung bedingter Primärenergiebedarf (Lüftungswärmeverluste und ggf. Antriebsenergie) in einer Pflegestation. Bei hoher Effizienz wird die Komfort-Komponente Zu-/Abluftanlage zur Energiesparmaßnahme. Bei nur mäßiger Effizienz bleibt das konventionelle Lüften über Fenster energetisch günstiger.

Randbedingungen:

Klimatensatz Deutschland

mäßige Eff.: WRG 45 %, el. spez. Leistg. SFP 4 (0,90 Wh/(m³) (vgl [DIN EN 13779])

hohe Effizienz: WRG 80 %, spez. el. Leistg. 0,45 Wh/(m³)
(PE-Faktor- Gas 1,1 / PE-Faktor-Strom 2,0)

Doch es gibt noch weitere Argumente die, neben der Heizenergieeinsparung im Winter, für hohe Effizienz der Wärmerückgewinnung sprechen:

- Wird ein hocheffizientes Wärmerückgewinnungssystem verwendet, kann in der Regel auf zusätzliche Heizregister zur Einhaltung behaglicher Zulufttemperaturen verzichtet werden.
- Zudem wird die Wirksamkeit der adiabaten Kühlung im Sommer direkt vom Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung bestimmt. Eine Halbierung des Temperaturänderungsgrad der Wärmerückgewinnung, halbiert auch die mögliche Absenkung der Zulufttemperatur durch die Verdunstungskühlung.

Empfehlung für das Passivhaus-Krankenhaus:

- Zur Sicherstellung einer gesunden Raumluft sollten alle Bereiche durch eine kontrollierte Lüftung versorgt werden.
- Hocheffiziente Wärmerückgewinnung. Anforderung an den Wärmebereitstellungsgrad $\eta_{WRG} \geq 75 \%$.
- Stromeffiziente Lüftungsgeräte: Anforderung an die volumenstrombezogene spezifische elektrische Leistungsaufnahme $P_{el, spez.}$ (elektrische Leistungsaufnahme des Lüftungsgeräts bezogen auf den Zuluftvolumenstrom):
 $P_{el} \leq 0,45 \text{ Wh/m}^3$.

Heizwärmebedarf

Mit den angeführten Einzelanforderungen der Qualitäten von Gebäudehülle und -technik und den nutzungstypischen Randbedingungen kann kein eindeutiger Heizwärme-Kennwert abgeleitet werden. Vielmehr wird durch die Anforderungen ein Bereich von Heizwärmekennwerten aufgespannt.

Krankenhäuser zählen in der Regel zu den großen und kompakten Gebäuden. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass trotz höherer Raumsolltemperaturen und höherer Luftwechsel im Vergleich zu anderen Nutzungen der Heizwärmebedarf im Krankenhaus durch Einsatz von Effizienztechnologien und mit vertretbarem Aufwand auf $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ begrenzt werden kann (vgl. Abbildung 13).

Für das Passivhaus-Krankenhaus wird daher empfohlen den auch aus anderen Nutzungen bereits bekannten Grenzwert von $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})^4$ anzuwenden.

⁴ Flächenbezug: Energiebezugsfläche nach [PHPP].

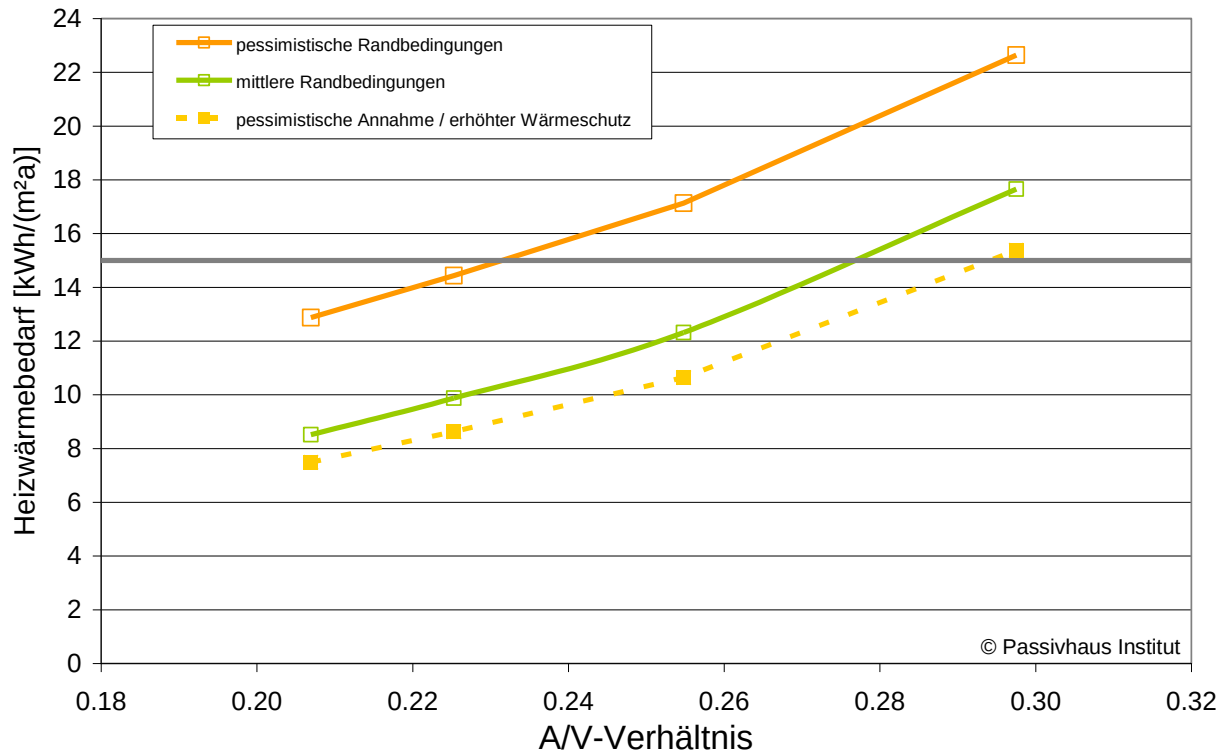


Abbildung 13: Parameterstudie zum Heizwärmebedarf unter den o.g. Randbedingungen. Ein Heizwärmekennwert von 15 kWh/(m²a) wird mit den empfohlenen Ausführungsqualitäten und den gewöhnlich kompakten Gebäudeentwürfen eingehalten. Annahmen: U-Wert 0.15 / WRG 80 % / starke Verschattung des Gebäudes / spezifischer Außenluftstrom im oberen Bereich (pessimistische Randbedingung) bzw. im mittleren Bereich (mittlere Randbedingung) Geschosshöhe und Gebäudetiefe gemäß der Neubauplanung zum Klinikum Frankfurt Höchst

5.2 Gebäudehülle

5.2.1 Der Passivhaus-Standard

Hinsichtlich der Gebäudehülle bestehen für Krankenhäuser im Passivhaus-Standard keine Unterschiede zu vergleichbaren Gebäudetypen. Komponenten und Bauteile für Fassaden, Dach und Gründung bzw. Kellerdecke müssen in gleicher Weise hinsichtlich der Vermeidung von Wärmeverlusten eine deutlich verbesserte Qualität aufweisen. Unverzichtbare Elemente für das Erreichen des Passivhaus-Standards sind die sehr gute Wärmedämmung der opaken und transparenten Hüllflächen und eine wärmebrückenfreie bzw., zumindest wärmebrückenminimierte sowie luftdichte Ausführung der Gebäudehülle. Die folgenden Anforderungen sind [Kah et al. 2010] entnommen und werden hier verkürzt wiedergegeben.

5.2.2 Anforderung an opake Bauteile

Alle beheizten Gebäudebereiche sind durchgehend und lückenlos wärmegedämmt auszuführen. Dabei sollten Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) im Mittel von weniger als $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreicht werden. Vor allem der Bereich des unteren Gebäudeabschlusses (Gründungen oder Kellerdecken) stellt hier eine Herausforderung dar, da hier häufig unvermeidbare Wärmebrücken auftreten. Dagegen kann im Dach ein deutlich besserer Wärmeschutz kostengünstig realisiert werden.

Wirtschaftlichkeitsberechnungen auf Basis des Lebenszykluses zeigten bereits 2006, dass sich wirtschaftlich optimale Dämmstärken der Außenbauteile deutlich in Richtung höherer Effizienz verschoben haben (vgl. [Kah et al. 2008]). Der Trend setzte sich in den letzten Jahren fort, wie eine Aktualisierung dieser Berechnungen in [Kah 2013b] belegt. Gestiegene Energiepreise und geringe Hypothekenzinsen machen, trotz Teuerung der Preise am Bau, Wärmedämm-Maßnahmen nochmals lohnender. Im Passivhaus übliche Wärmedurchgangskoeffizienten der opaken Bauteile ($\leq 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) liegen heute, selbst ohne öffentliche Förderung, im wirtschaftlich optimalen Bereich. Aufgrund der höheren Raumtemperaturanforderungen im Krankenhaus sind Wärmedämm-Maßnahmen sogar nochmals rentabler.

Brandschutz

Krankenhäuser sind Sonderbauten. Daher können durch die Brandschutzbehörden über die jeweilige Landesbauordnung hinausgehende Anforderungen gestellt werden.

Die hessische Bauordnung: [HBO 2003] stellt in Abhängigkeit der Gebäudeklasse folgende Anforderungen an die Außenwandverkleidung einschließlich Wärmedämmung und Unterkonstruktion:

Für Gebäudeklasse 1 - 3 wird die Baustoffklasse B2 (normal entflammbar), und für Gebäudeklassen 4 und 5 die Baustoffklasse B1 (schwerentflammbar) gefordert, wobei die Baustoffklasse B1 für die Unterkonstruktion nur dann ausreicht, wenn die Brandausbreitung lange genug begrenzt bleibt.

5.2.3 Wärmebrückenfreiheit

Die lückenlose Umfassung des beheizten Gebäudevolumens mit Wärmedämmung lässt sich nicht immer bedingungslos herstellen. Durchdringungen und Schwächungen der Dämmschicht erfordern wo immer sie auftreten (müssen) eine gesonderte Betrachtung. Vor allem bei großvolumigen Gebäuden führen einzelne Schwachstellen nur zu einer geringen, in der Energiebilanz kaum erkennbaren, Erhöhung der Wärmeverluste. Häufig führt aber die Summe aller Durchdringungen, z. B. bei Befestigungen von vorgehängten hinterlüfteten Fassaden (VHS), durchaus zu einer relevanten Verschlechterung des Fassaden-U-Wertes. Gerade diese Fassadenform erfreut sich bei Nichtwohngebäuden großer Beliebtheit, da sie vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten bietet.

Die Befestigung von Vorhangfassaden erfolgt durch eine Unterkonstruktion, die die gesamte Dämmebene durchdringt und die Last auf die Außenwand abträgt. Konventionelle Systeme bestehen aus Baustahl oder Aluminium und verschlechtern den U-Wert der Außenwand (auch bei einer thermischen Trennung mit PVC Unterlegblättchen) massiv. [Schnieders 2007] hat gezeigt, dass herkömmliche Aluminiumunterkonstruktionen den U-Wert im Vergleich zum ungestörten Bauteil mehr als verdoppeln können. Mittlerweile sind eine ganze Reihe wärmebrücken-reduzierter und passivhaus-geeigneter Lösungen für die Befestigung von Vorhangfassaden am Markt verfügbar und wurden bereits im Protokollband Nr. 35 „Wärmebrücken und Tragwerksplanung“ des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser vorgestellt [AkkP 35].

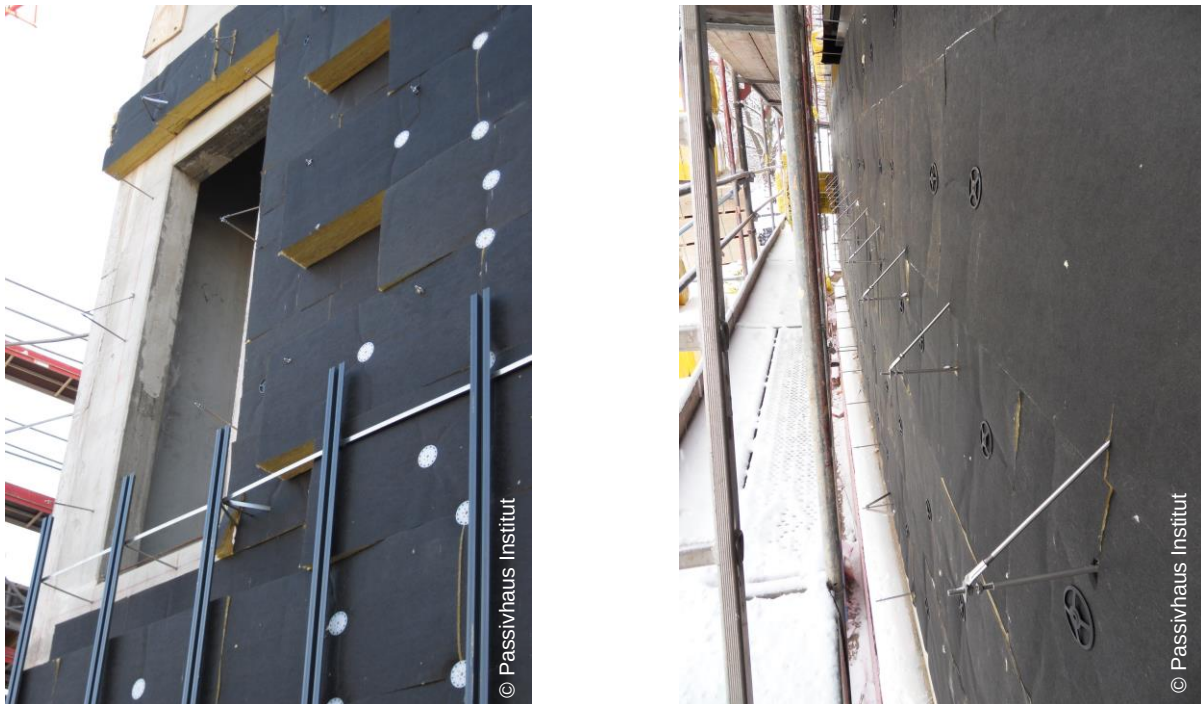


Abbildung 14: Vorgehängte hinterlüftete Fassade mit Mineralwollgedämmung. Besonderes Augenmerk wurde hier auf die wärmebrückenarme Unterkonstruktion mit Gelenkstäben gelegt.]

Auch der untere Gebäudeabschluss ist häufig wärmebrückenbehaftet, da thermische Trennungen im Bereich der Gründung bzw. der Kellerdecke bei großen Gebäuden aus statischen Gründen nicht möglich sind. Schließt das beheizte Gebäudevolumen den Keller mit ein, so verläuft die Wärmedämmung im Bereich der Gründungsplatte. Erfreulicherweise sind mittlerweile druckbelastbare Dämmstoffe in geeigneter Stärke bauaufsichtlich zugelassen, so dass die Dämmung unterhalb der Gründungsplatte verlegt werden kann und so eine geschlossene außenliegende Dämmebene um das gesamte Gebäude hergestellt werden kann. Stellt der untere Gebäudeabschluss allerdings eine Tiefgarage dar, bietet sich an die Dämmung im Bereich der untersten Kellerdecke vorzusehen. Allerdings ist hier Vorsicht geboten, da die Dämmebene durchdringende Stützen und Wände z.T. enorme Wärmebrücken darstellen. Wo immer möglich sollten selbst Kelleraußenwände im Bereich der Decke in Stützen aufgelöst werden. Grundsätzlich gilt Stützen rufen geringere Wärmebrückeneffekte hervor als linienförmige Durchdringungen von Wänden. Wo immer Stützen oder Wände unvermeidlich sind, ist die Begleitdämmung eine sinnvolle Maßnahme (vgl. [Schulz 2007]).

5.2.4 Anforderung an transparente Bauteile

Bereiche, die dem regelmäßigen oder ständigen Aufenthalt von Personen dienen, müssen über Fenster ausreichend mit Tageslicht versorgt werden. Auch die Möglichkeit die Fenster bei Bedarf zu öffnen erhöht die Zufriedenheit der Nutzer und

wird vor allem im Sommer geschätzt. Die Möglichkeit der Fensterlüftung weist noch einen weiteren Vorteil auf. Die kontrollierte Lüftung muss nicht für alle Eventualitäten ausgelegt werden, da im Bedarfsfall zusätzlich über Fenster gelüftet werden kann.

Gleichzeitig treten an transparenten Bauteilen im Winter die geringsten Oberflächen-temperaturen und größten Wärmeverluste auf. Temperaturunterschiede z. B. zur gegenüberliegenden Innenwand (sog. Strahlungstemperaturasymetrie) können als unbehaglich empfunden werden. Wird ein hoher thermischer Komfort gefordert und soll die Art und Anordnung der Beheizung keine Rolle spielen, dann müssen thermisch hochwertige "Passivhaus-geeigneten" Fenstern eingesetzt werden. Diese werden auch „Energiegewinn-Fenster“ genannt, da sie während der Heizperiode mehr solare Einträge ermöglichen als Wärmeverluste erzeugen, eine überwiegende Südorientierung vorausgesetzt. Möglich wird dies durch eine 3-fach-Wärmeschutzverglasung sowie gedämmte Fensterrahmen.

Bei Wärmedurchgangskoeffizienten unter $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und Fensterhöhen bis 2 m bleiben die abfallenden Luftströmungen auch ohne Heizkörper vor dem Fenster im behaglichen Bereich (vgl. Abbildung 15).

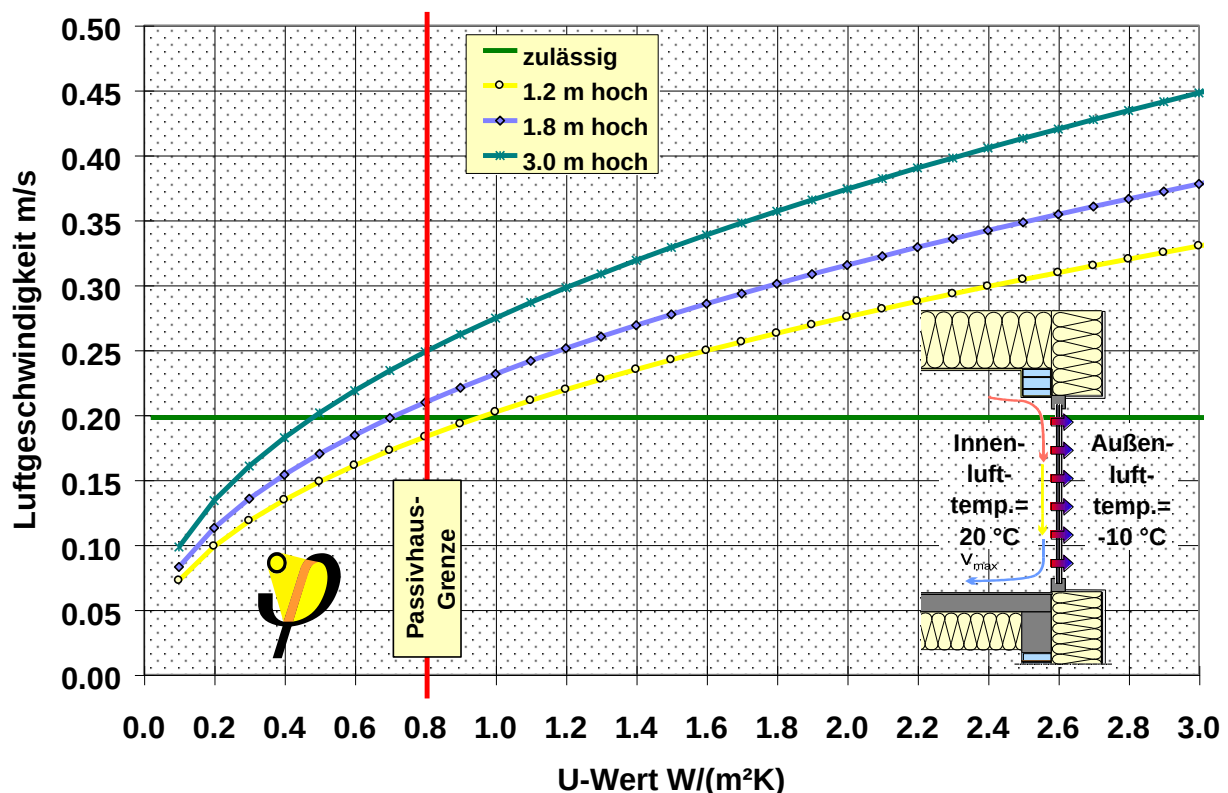


Abbildung 15: Mittlere Geschwindigkeit des am Fenster abfallenden Kaltluftstroms in Abhängigkeit von U_w . (Quelle: [AkkP 14])

In der Regel werden bei Nichtwohngebäuden überwiegend Pfosten-Riegel-Konstruktionen vorgesehen. Unabhängig ob Einzelfenster oder Fensterbänder, der Einbau

muss nahezu wärmebrückenfrei erfolgen. Die Energieeinsparung der transparenten Bauteile aufgrund ihrer hervorragenden Wärmedämmung wird andernfalls durch hohe Einbauwärmebrücken deutlich reduziert.



Abbildung 16: Einbau eines Fensterbandes vor der tragenden Wand in der Dämmebene.

5.2.5 Anforderungen an die Luftdichtheit

Die Bedeutung luftdichter Gebäudekonstruktionen ist heute unumstritten und hat Eingang in Normen und in gesetzliche Verordnungen gefunden. Eine sorgfältig geplante und ausgeführte dichte Gebäudehülle vermeidet nicht nur Wärmeverluste, sondern ist die Grundlage für eine dauerhaft schadensfreie Konstruktionen. Zugscheinungen, wie sie aus Bestandsgebäuden z.T. noch bekannt sind, gehören damit der Vergangenheit an. Dabei nimmt die natürliche In- und Exfiltration aufgrund des thermischen Auftriebs mit der Gebäudehöhe zu. Luftdichtheit zahlt sich daher bei mehrstöckigen Gebäuden, wie z. B. Krankenhäusern, besonders aus.

Der Luftdichtheitskennwert n_{50} ist das Verhältnis aus gemessenem Leakagestrom bei definierten Druckbedingungen (50 Pa Über- bzw. Unterdruck) und dem Gebäudevolumen. Bei großen Gebäuden wird das Verhältnis von Leakage behafteter Gebäudeoberfläche und dem Gebäudevolumen immer günstiger. Je größer und kompakter das Gebäude, desto besser wird bei gleicher Ausführungsqualität der Fassaden und des Dachs der Luftdichtheitskennwert n_{50} . Dies zeigen auch exemplarische Ergebnisse aus der Praxis am Beispiel von Sporthallen (Tabelle 2). Die Passivhaus-Anforderung eines n_{50} -Werts kleiner gleich $0,6 \text{ h}^{-1}$ wird deutlich unterschritten. In großen und in der Regel sehr kompakten Krankenhaus-Gebäuden sollten daher geringere n_{50} -Kennwerte unter $0,4 \text{ h}^{-1}$ angestrebt werden.

	Drucktest-Kennwert $n_{50} [h^{-1}]$
Einfeldturnhalle, Unterschleißheim [PHI 2002]	< 0,2
Einfeldturnhalle, Heidelberg [Bermich / Lubs 2004]	< 0,3
Schule mit Einfeldturnhalle, Aufkirchen [Vallentin / Lackenbauer 2004]	0,1
Dreifeldturnhalle, Wängi (CH) [Fent 2004]	0,1
Dreifeldturnhalle, Laatzen [Kis / Grobe 2006]	< 0,3

Tabelle 2: Drucktestergebnisse bei Sporthallen. Aufgrund der Größe der Objekte wird der für Passivhäuser empfohlene n_{50} -Kennwert von $0,6 h^{-1}$ regelmäßig deutlich unterschritten. (Quelle [Kah/Theumer 2012])

5.2.6 Entwurf, Zonierung und Orientierung

Entwurf

Eine integrale Planung ist der Schlüssel für kosteneffizientes und energiesparendes Bauen. Die grundlegenden Entscheidungen über Größe, Form und Orientierung eines Gebäudes werden bereits in der Entwurfsphase getroffen und beeinflussen maßgeblich den Energiebedarf. Eine frühzeitige Integration der Fachingenieure (z. B. Bauphysik, Gebäudetechnik und Brandschutz) hilft den Planungsprozess des Passivhaus-Krankenhauses im Hinblick auf kostengünstige Lösungen zu optimieren.

Das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen (A/V-Verhältnis) ist aufgrund der Größe von Krankenhäusern häufig besser als im Vergleich zu Wohnhäusern. Wird weiter auf einen kompakten Gebäudeentwurf, eine möglichst mehrgeschossige Bauweise sowie auf eine große Gebäudetiefe geachtet, kann der Passivhaus-Standard mit vergleichsweise geringem Aufwand erreicht werden.

Einfache Details, die sich möglichst häufig wiederholen, verringern einerseits den Planungsaufwand und andererseits das Auftreten von Mängeln bei der Umsetzung. Die Erfahrung hat gezeigt, dass hierdurch die hohen Qualitätsanforderungen hinsichtlich der Wärmebrückenfreiheit und Luftdichtheit deutlich einfacher erreicht werden können.

Der Eingangsbereich von Krankenhäusern erfordert besondere Aufmerksamkeit, da hier luftdichte und zugleich wärmegedämmte Türkonstruktionen benötigt werden, die

sich zugleich als dauerhaft und gebrauchstauglich erweisen. Im Hinblick auf die Barrierefreiheit muss eine automatische Türöffnung vorhanden sein.

In [Kah 2012a] werden die Infiltrationswärmeverluste unterschiedlicher Eingangslösungen und die wesentlichen Einflussgrößen für den Luftaustausch vorgestellt. Eingangsbereiche mit Türschleusen (Windfängen) verringern den Luftaustausch gegenüber Lösungen ohne Schleuse um durchschnittlich 30 %. Karusselltüren können bei geeignetem Betrieb (Drehung nur bei Bedarf) die Infiltration durch den Eingang, ebenfalls deutlich reduzieren. Jedoch liegen gebräuchliche Durchmesser um 4 m, während z. B. bei Schiebetüranlagen, geringere Breiten für das Passieren mit Gepäck oder Rollstühlen ausreichend sind. Der Luftaustausch durch Karusselltüren liegt unter diesen Bedingungen deutlich über den Werten von konventionellen Türanlagen.

Zudem hat die Luftdichtheit der Gebäudehülle maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse. Im Unterschied zu Eingangskonzepten mit Türschleusen ist die Funktion von Karusselltüren nahezu unabhängig von der Luftdichtheit der Gebäudehülle. Bei nur mäßig luftdichten Gebäuden, wie sie hier nicht betrachtet werden, oder mehreren Eingängen, die im Raumlufverbund stehen, können Karusselltüren interessante Lösungen darstellen. Aufgrund der Größe von Krankenhäusern ist der Einfluss des zusätzlichen Infiltrationswärmeverlusts auf den Heizenergiebedarf in der Regel gering.

Die Infiltration durch den Eingang verursacht im Winter nicht nur zusätzliche Wärmeverluste, sondern schränkt insbesondere die Behaglichkeit im Bereich des Eingangs erheblich ein. Grundsätzlich verbessern Maßnahmen, welche die Infiltration verringern, auch den Komfort eingangsnah. Sind dort Informationsschalter vorgesehen, sollten sie zudem durch Brüstungen gegen die Türen abgeschirmt werden.



Abbildung 17: Eingangsbereich einer Passivhaus-Schule mit Windfang (Frankfurt Riedberg). Architektur: 4a, Stuttgart [Kah et al. 2010].

Auch im Bereich des Windfangs gilt die Regel, dass es nur eine luftdichte (und wärmedämmende) Ebene gibt. Das heißt, nur eine der zwei Türebenen muss luftdicht und in Passivhaus-Qualität ausgeführt werden, für die zweite Ebene reicht ein einfacherer Standard aus.

Zonierung

Kurze Wege und eine Optimierung der Abläufe gelten als Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Betrieb von Krankenhäusern. Im übertragenen Sinne gilt das auch für die Versorgung des Gebäudes mit Frischluft und Wärme. Eine funktionale Gliederung mit räumlicher Konzentration von Räumen gleicher Nutzung vereinfacht und verkürzt das Lüftungskanalnetz und spart so Baukosten und Energie, da optimierte Netze geringere Druckverluste und somit einen niedrigeren Stromverbrauch erzeugen.

Im Zusammenhang mit der Planung und Optimierung des Lüftungskanalnetzes ist unbedingt auf eine frühzeitige Berücksichtigung der Brandschutzbelange zu achten! Die Erfahrung hat gezeigt, dass andernfalls teure Umplanungen oder gar Nachrüstungen von z. B. Brandschutzklappen die Baukosten in die Höhe treiben können. Dies unterstreicht nochmals die Wichtigkeit der integralen Planung.

Orientierung

Hinsichtlich des Heizenergiebedarfes spielt die Ausrichtung des Gebäudes keine so große Rolle, da Krankenhäuser meist groß und kompakt sind und die Passivhaus-Anforderungen ohnehin einfacher erreichen als z. B. kleinere Wohngebäude. Für die sommerliche Behaglichkeit bzw. die Minimierung des Kühlbedarfs dagegen erweist sich eine Orientierung als vorteilhaft, bei der Nutzungsbereiche mit hohen internen Wärmelasten nach Norden ausgerichtet sind. Dies umfasst z. B. Serverräume, Küchen aber auch Räume mit Geräten die eine hohe Wärmeabgabe aufweisen (MRT,CT, ZSVA, vgl. Abschnitte 12 bis 17).

Grundsätzlich sollte das Angebot an Solarstrahlung zur Reduzierung des Heizwärmebedarfs im Winter nutzbar bleiben. Zu hohe Eigenverschattung der Gebäudeteile oder gar eine dauerhafte Verschattung sowie Sonnenschutzverglasungen sind zu vermeiden. Um flexibel die solaren Gewinne nutzen zu können sind temporäre Verschattungselemente geeignet.

5.2.7 Bauweise

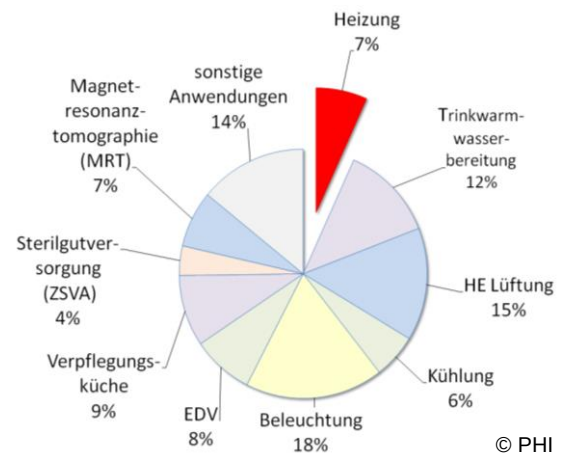
Die Art der Nutzung hat einen deutlichen Einfluss auf das thermische Verhalten des Gebäudes. Während in Gebäuden mit geringer Belegungsdichte (z. B. Wohngebäude) die Bauweise keine bedeutende Rolle spielt, zeigte sich bei Bildungsgebäuden mit hoher zeitlich konzentrierter Belegung ein Vorteil bei massiven

Konstruktionen. Krankenhäuser weisen sich durch eine 24-Stunden-Nutzung aber mäßige Belegungsdichte aus. In einigen Bereichen werden zeitlich begrenzt hohe interne Lasten erzeugt z. B. durch Geräte der bildgebenden Diagnostik. Vor allem in den Sommermonaten und in der Übergangszeit ermöglichen Speichermassen aufgrund ihrer Wärmespeicherkapazität die tägliche Temperaturamplitude zu dämpfen. Von Bedeutung ist die thermische Kopplung dieser Speichermassen an den Raum. Verkleidungen und Einbaumöbel reduzieren die Wärmeaufnahme der massiven Bauteile. Maßnahmen zur passiven Kühlung, wie sie in Abschnitt 10 beschrieben, werden können nur dann effektiv umgesetzt werden, wenn ausreichend thermische Speichermasse zur Verfügung steht.

6 Heizung

Auch ein Krankenhaus in Passivhaus-Qualität braucht noch eine Heizung. Obwohl der Heizenergiebedarf um rund einen Faktor 4 gegenüber konventionellen Krankenhaus-Neubauten geringer ist, gehört die Heizung immer noch zu den größeren Positionen im Gesamtprimärenergiebedarf von Krankenhäusern.

**Anteil des Heizenergiebedarfs
(exemplarisch) am Gesamtprimär-
energiebedarf (vgl. Abschnitt 4.12)**



6.1 Wärmeübergabe

Aufgrund des ausgezeichneten Wärmeschutzes spielt die Art der Wärmeübergabe keine große Rolle für den thermischen Komfort. Werden statische Heizflächen verwendet, kann deren Anordnung unter rein praktischen Gesichtspunkten („Wo stört der Heizkörper am wenigsten?“) und mit dem Ziel das Leitungsnetz kompakt zu halten erfolgen. Eine Anordnung an der Außenfassade ist aufgrund der hohen Verglasungsqualität nicht erforderlich.

In den Nasszellen der Bettenzimmer ist in der Regel ein höheres Raumtemperaturniveau (z. B. 24 °C) zu ermöglichen. Werden hierzu Heizkörper in der Nasszelle vorgesehen, vereinfacht sich deren Anbindung, wenn die Heizkörper beidseitig der an das Bettenzimmer grenzenden Innenwand installiert werden.

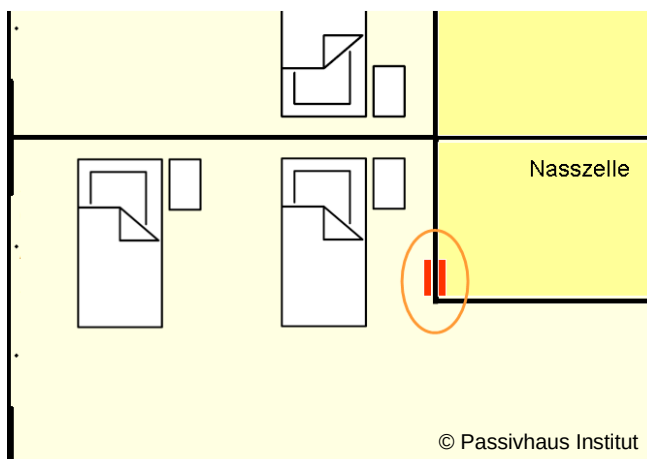


Abbildung 18:
Vereinfachung der Heizkörper-
installation durch Anordnung an
angrenzender Innenwand und
Nutzung einer gemeinsamen
Versorgungsleitung.

Im Unterschied zu den Pflegestationen werden Untersuchungs- und Funktionsbereiche nicht dauerhaft genutzt. Die bedarfsgeführte Lüftung trägt hier wesentlich zur Energieeffizienz im Krankenhaus bei. Außerhalb der Nutzungszeit sollte die Lüftung in diesem Bereich außer Betrieb genommen werden.

In Bereichen mit dauerhaftem Lüftungsbedarf, wie den Bettenzimmern, kann eine Nacherwärmung der Zuluft als alleinige Heizquelle und mit dem Ziel der Systemvereinfachung geprüft werden. Eine Vereinfachung der Beheizung ist zu erwarten, wenn eine Gruppe von Räumen mit nur einem Heizregister versorgt werden kann. Hierzu muss die Raumgruppe ein ähnliches Lastverhalten (gleiche Orientierung und Nutzung) aufweisen.

Die Anforderungen im Krankenhaus unterliegen einem steten Wandel, z.B. verkürzte sich in den letzten Jahren aufgrund der Fallpauschale die durchschnittliche Verweildauer der Patienten und damit sank der Bedarf an Planbetten. Statische Heizflächen stellen auch vor dem Hintergrund von Umnutzungen vermutlich die praktikablere Lösung dar.

Werden Flächenheizungen verwendet, können die geringen Heizleistungen mit kleinen Flächen (ggf. nur Teilflächen) und mit niedrigen Vorlauftemperaturen gedeckt werden. Dadurch verbessert sich die Arbeitszahl und damit die Effizienz von Wärmepumpensystemen.

Immer häufiger wird die Betonkerntemperierung (BKT) eingesetzt. Sie wird vor allem zur Kühlung im Sommer vorgesehen, ihre Nutzung ist jedoch auch zum Heizen im Winter interessant. Aufgrund der großen wärmeübertragenden Fläche, sind geringe Übertemperaturen zum Beheizen ausreichend. Gewöhnlich genügen Vorlauftemperaturen bis max. 30 °C Diese Systeme bieten günstige Voraussetzungen für den Einsatz von Wärmepumpen, denn deren Effizienz hängt wesentlich vom Temperaturniveau ab.

Bestehen erhöhte Komfortanforderungen oder sind wechselnde Nutzungen zu erwarten, kann ein zusätzliches schnell reagierendes Heizsystem sinnvoll sein. Geringe Wärmeleistungen sind ausreichend, so dass weiterhin die Hauptlast mittels der BKT gedeckt wird. Im Pflegebereich können beispielsweise Heizkörper im Bettenzimmer mit Heizflächen, welche höhere Raumtemperaturen in den Nasszellen herstellen, kombiniert werden. Wird im Zusatzheizsystem das Temperaturniveau der BKT genutzt, kann auf ein zusätzliches Verteilsystem verzichtet werden.

Dass die Auslegung des hydraulischen Systems (geringe Druckverluste) und der Pumpen sich maßgeblich auf die Effizienz des BKT-Systems auswirkt, erscheint offensichtlich, wird in der Praxis jedoch zu häufig unzureichend beachtet. Weitere Hinweise zur BKT gibt Abschnitt 10.3.3.

Werden Flächenheizsysteme, wie beispielsweise Deckensysteme, zu Heiz- und Kühlzwecken verwendet, müssen größere Flächen vorgesehen werden, denn die Kühllast bestimmt in der Regel die Systemauslegung.

6.2 Heizungsversorgungsleitungen

Heizungsversorgungsleitungen sollten im Neubau grundsätzlich im beheizten Bereich verlaufen. Sind Leitungen im unbeheizten Bereich unvermeidbar, dann sollte die Leitungsführung so kurz wie möglich sein. In unbeheizten Räumen verlaufende Heizungsleitungen (z. B. unbeheizten Kellern oder Technikgeschossen) sollten die Dämmstärken gemäß den Angaben in Abschnitt 8.3 zur Trinkwarmwasserbereitung eingehalten (vgl. Tabelle 3) werden.

In Bereichen, in denen ein Kühlbedarf nur außerhalb der Heizperiode auftritt, sollte geprüft werden, ob das Heizwärmeverteilnetz außerhalb der Heizperiode z. B. in Kombination mit Deckensystemen (Heiz- und Kühldecke) zu Kühlzwecken verwendet werden kann.

6.3 Wärmeerzeugung

Alle gängigen Wärmeversorgungslösungen sind auch in hocheffizienten Passivhaus-Krankenhäusern zur Deckung des verbleibenden Heizwärmebedarfs geeignet.

Besonders interessant ist der Einsatz von erneuerbaren Energien in Kombination mit der effizienten Energienutzung in Passivhaus-Gebäuden. Aufgrund der in der Regel begrenzten Verfügbarkeit erneuerbarer Energien wird deren Anteil im Gebäudemix nur nennenswert werden, sofern in den Gebäuden ausreichend sparsam damit gehaushaltet wird. Werden Holz oder Holzpellets als Energieträger verwendet, kann das Bevorratungsvolumen entsprechend kleiner ausfallen. Trotz des geringen Wärmebedarfs sind bei Krankenhäusern immense Lagergrößen erforderlich. Bei der Neuplanung des Klinikums Höchst wurde der Einsatz von Holzpellets daher verworfen.

Der geringe Wärmebedarf bietet gute Voraussetzungen für die Verwendung von Umweltwärme. Niedrige Vorlauftemperaturen sind bei Flächenheizungen und den geringen Heizleistungen ausreichend und ermöglichen günstige Wärmepumpen-Arbeitszahlen.

Noch effizientere Wärmepumpensysteme sind durch die Nutzung von Prozess-abwärme (z. B. aus der zentralen Sterilgutversorgung oder der Drucklufterzeugung) möglich. Kann Abwärme als Quelle der Wärmepumpe genutzt werden, sind, aufgrund der höheren Quellentemperaturen, höhere Arbeitszahlen möglich. Dabei sollte jedoch stets der Grundsatz gelten, zunächst Abwärme freisetzende Prozesse

effizienter zu machen, bevor ausgeklügelte Verfahren der Abwärmenutzung Anwendung finden (vgl. Abschnitt 3.3 Untersuchung zur Nutzbarkeit der Abwärme).

Im Sommer kann eine reversibel betriebene Wärmepumpe außerdem zur Deckung des noch verbleibenden Kühlbedarfs beitragen. Bei Nutzung von Erdwärme sichert zudem die Kombination von Wärmentzug im Winter und Wärmeeinspeicherung im Sommer, also ein energetisch balancierter Betrieb, gleichbleibende Leistungswerte der Quelle über viele Jahre (vgl. auch Abschnitt 10 Kühlung).

Bei Wärmepumpensystemen erweist sich deren Auslegung als entscheidend. Überzogene Sicherheitszuschläge, was häufiges Takten der Wärmepumpe und somit geringere Arbeitszahlen zur Folge hat, sollten vermieden werden. Zudem sollten die Wärmepumpensysteme für hohe Effizienz im projektspezifischen Einsatzbereich ausgewählt werden.

Wird die BKT mit einer Erdreich-Wärmepumpe kombiniert, sind Jahresarbeitszahlen von 3 bis 5,6 kWh_{therm} / kWh_{el} in einer Querschnittsanalyse messtechnisch belegt (vgl. [Kalz et. al 2012]). Entscheidenden Einfluss auf die Effizienz haben dabei der Energiebedarf der Förderpumpe (Solepumpe / Grundwasserpumpe) und die Vorlauftemperatur. Wird der Hilfsenergiebedarf der Wärmeverteilung mittels BKT hinzugenommen, wurden Jahresarbeitszahlen bis 2,5 kWh_{therm} / kWh_{el} ermittelt.

Eine weitere interessante Versorgungsvariante ist die Anbindung des Erweiterungsgebäudes an eine bestehende Heizungsanlage im Altbau. Dies ist aufgrund des geringen Wärmebedarfes des effizienten Neubaus auch häufig möglich. Allerdings gilt es zu beachten, dass je nach Lage der Gebäude Nahwärmeleitungen erforderlich werden, die unverhältnismäßig hohe Wärmeverluste erzeugen. Um die Effizienz zu verbessern, sollte das Nahwärmenetz kompakt und, soweit möglich, im Gebäude verlaufen.

Krankenhäuser sind auch bei effizientester Ausführung große Stromabnehmer. Der Einsatz von Kraftwärmekopplung (KWK) ist daher wirtschaftlich möglich und stellt eine interessante Lösung dar. Der produzierte Strom kann dem Eigenbedarf dienen oder ins Netz eingespeist werden, wobei die Eigenbedarfdeckung vorzuziehen ist, da die Einspeisevergütung kleiner als die Kosten des eingesparten Stroms ist. Die bei der Stromerzeugung anfallende Abwärme wird zur Deckung des Wärmebedarfes für Raumheizung und Warmwasserbereitung genutzt. Die KWK-Anlage sollte wärmegeführt betrieben werden und die Grundlast des Gebäudes decken. Primärenergetisch ermöglichen KWK-Anlagen zur Wärmeerzeugung gegenüber Gaskesseln durch die Gutschrift des gleichzeitig erzeugten Stroms Einsparungen von rund 40 %. Der primärenergetische Vorteil wird aufgrund des zunehmenden Einsatzes erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung jedoch zukünftig abnehmen und mit der nächsten Anpassung der primärenergetischen Bewertung von Strom vermutlich noch etwa 25 % betragen.

6.4 Heizungspumpen

Hocheffizienzpumpen (Effizienzklasse A) haben im Vergleich zu Standardpumpen höhere Anschaffungskosten, doch lohnt deren Einsatz in Heizwärmeverteilungen und Zirkulationsleitungen der Trinkwarmwasserversorgung. Im Heizungssystem und der Trinkwarmwasserzirkulation sollten grundsätzlich Hocheffizienzpumpen (Effizienzklasse A) verwendet werden.

7 Dampferzeugung

Dampf als Wärmemedium spielt in konventionellen Krankenhäusern eine eher untergeordnete Rolle. Der Anteil der Dampferzeugung am Gesamtwärmebedarf beträgt zwischen 10 und 20 % [EA_NRW 2003].

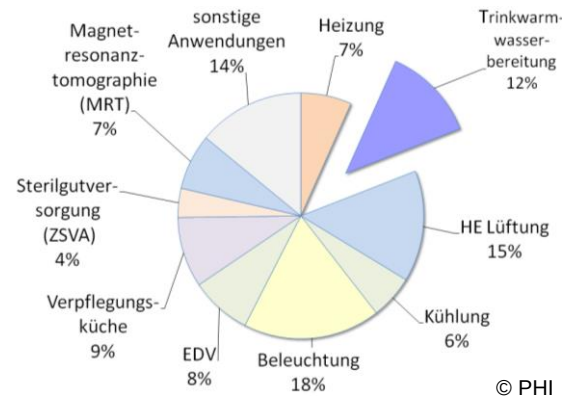
Aus energetischer Sicht sollte der Einsatz von Prozessdampf bei Neubauten, aufgrund der hohen Umwandlungsverluste bei der Erzeugung und der Wärmeverluste der Dampfleitungen, vermieden werden. Je nach Bedarfsstruktur und Verteilung der Abnehmer im Gebäude können die Dezentralisierung der Dampferzeugung und der Einsatz von kleineren Schnelldampferzeugern zweckmäßig sein.

Im Neubau des Klinikums Frankfurt Höchst soll der Einsatz von Dampf auf den Bereich der zentralen Sterilgutversorgung begrenzt werden. Der zur Sterilisation benötigte Reindampf soll dabei entweder mit kleinen Schnelldampferzeugern oder durch Erzeugung von Reindampf mittels Prozessdampf erfolgen. Im Bestandsgebäude hingegen wird Prozessdampf noch umfassender als Wärmeträger, z. B. in der Verpflegungsküche, verwendet.

8 Trinkwarmwasserbereitung

Die Trinkwarmwasserbereitung gehört zu den größeren Verbrauchern in Krankenhäusern. Dabei hängt der Wasserverbrauch von der Ausstattung der Stationen, den im Krankenhaus angebotenen Leistungen und den im Hause untergebrachten Einrichtungen (Wäscherei, Verpflegungsküche, etc.) ab.

Anteil des Trinkwarmwasserbedarfs (exemplarisch) am Gesamtprimärenergiebedarf (vgl. Abschnitt 4.12)



Energieeinsparpotentiale bestehen im Wesentlichen

- im sparsamen Umgang mit warmem Wasser,
- in der Reduzierung der Wärmeverluste der Warmwasserverteilung und der Warmwasserspeicher
- und durch eine energieeffiziente Erzeugung.

Wassersparende Armaturen an Handwaschbecken und Duschen helfen den Wasserverbrauch zu verringern.

Kompakte Verteilnetze, sehr gute Wärmedämmung der Speicher und warmen Leitungen sowie eine Senkung des Temperaturniveaus verringern die Wärmeverluste deutlich. Der Einfluss der Wärmedämmung der Verteilleitungen wird in 8.3 behandelt.

Aus hygienischen Gründen (u.a. der Legionellen Prophylaxe) besteht hinsichtlich der Systemtemperatur in der Regel kaum Spielraum. In Abschnitt 8.4 werden zwei Konzepte vorgestellt, die ein geringeres Temperaturniveau nutzen und somit Energieverluste reduzieren.

Die (Vor-)Erwärmung des Brauchwassers stellt eine interessante Wärmesenke zur Nutzung der Abwärme aus unterschiedlichsten Prozessen dar. Ob energetische Konzepte, welche Abwärme oder Umweltwärme nutzen, zweckmäßig sind, hängt entscheidend vom Warmwasserbedarf ab. Ansätze zu Warmwassermengen und Ergebnisse aus Verbrauchsmessungen werden im nächsten Abschnitt 8.1 vorgestellt.

Mit der Passivhaus-Gebäudehülle nimmt zudem die relative Bedeutung des Trinkwarmwasserbedarfs am Gesamtwärmebedarf zu.

8.1 Warmwasserbedarf

Um Verbrauchsdaten aus unterschiedlichen Krankenhäusern vergleichen zu können, wird, wie auch in der Literatur üblich, die Anzahl der Planbetten als Bezugsgröße für den Wasserbedarf verwendet. Dimensionierung und Auslegung der technischen Ausstattung beruhen in der Regel auf erprobten Ansätzen. Auch ein selten auftretender Spitzenbedarf muss durch die Auslegung der Wärmeversorgung gedeckt werden. Mit der Auslegung wird sichergestellt, dass die technische Einrichtung ihren definierten Zweck erfüllt.

Auslegungsansätze und Verbrauchsmessungen zeigt Abbildung 19. In [Beier 2009] wurde der Brauchwasserverbrauch in 18 verschiedenen Kliniken erhoben. Die Messwerte liegen zwischen 13 und 72 mit einem Mittelwert (Median) von ca. 50 Liter/(Planbett Tag). Der Verbrauch im Bestandsgebäude des Klinikums Frankfurt Höchst liegt mit ca. 35 Liter/(Planbett Tag) unter dem Mittelwert der genannten Studie.

Dass Auslegungsansätze und mittlere Verbrauchswerte sich unterscheiden, ist durch erforderliche Sicherheitszuschläge nachvollziehbar, wie hoch diese Zuschläge sind, sollte jedoch kritisch im Projekt geprüft werden. Aussagen zum späteren Energieverbrauch der Warmwasserversorgung und energetische Optimierungen des Systems auf Basis solcher „überdimensionierter“ Auslegungsansätze bzw. "Standardannahmen" können zu fatalen Fehleinschätzungen führen. Die Folgen sind z. B. erhebliche Überdimensionierungen von thermischen Solaranlagen, Heizungssystemen zur Grundlastdeckung (z. B. BHKWs oder Wärmepumpen) oder Systemen zur Abwärmenutzung für die Brauchwasserbereitung.

Es empfiehlt sich daher Verbrauchsmessungen zum Warmwasser aus vergleichbaren Gebäuden oder bei Modernisierungen aus dem Bestandsgebäude zur bedarfsorientierten Auslegung und Prognose des Energiebedarfs heranzuziehen.

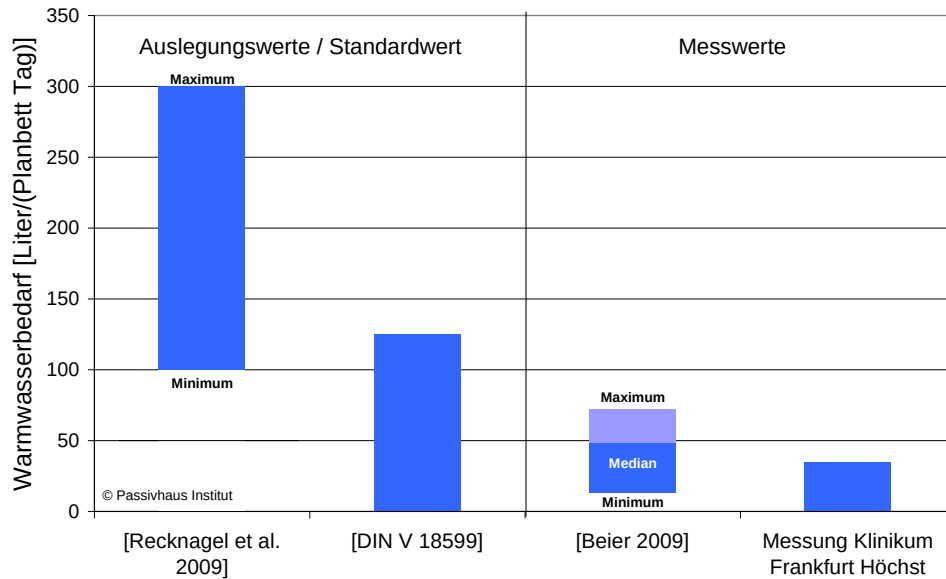


Abbildung 19: Auslegung bzw. Standardwert im Vergleich zu Messwerte.

Anmerkung

[Recknagel et al 2009] eher maximale Verbrauchszahlen zu Krankenhäusern

Messung Klinikum Frankfurt Höchst: Wert ohne Verbrauch der Großküche

Neben der Höhe des Warmwasserbedarfes ist auch der zeitliche Verlauf von Bedeutung. Einen typischen Tagesgang des Wasserverbrauchs zeigt Abbildung 20 (Daten aus dem Bestandsgebäude des Klinikums Frankfurt Höchst). Die größten Verbräuche treten demnach am Vormittag auf.

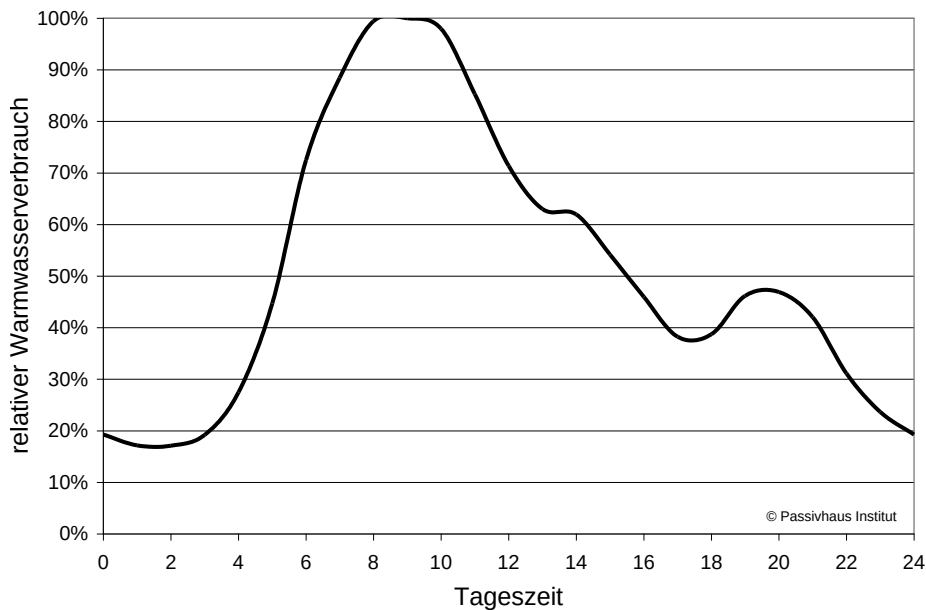


Abbildung 20: Tagesverlauf des Warmwasserverbrauchs in einem Krankenhaus der Maximalversorgung

Quelle: Verbrauchswerte des Klinikums Frankfurt Höchst

8.2 Wassersparende Armaturen

Ein sparsamer Umgang mit Trinkwasser verringert zugleich den Wärmebedarf der Warmwasserbereitung. Erhebliche Reduzierungen sind durch wassersparende Armaturen und Selbstschlussarmaturen erzielbar. Dabei müssen die besonderen hygienischen Anforderungen an Armaturen im Krankenhaus berücksichtigt werden.

Möglichst wenige Zapfstellen nur dort, wo sie auch tatsächlich erforderlich sind, reduzieren zusätzlich den Wasserverbrauch. Dies entspricht auch aus hygienischen Gründen den Empfehlungen des Robert Koch Instituts (vgl. [RKI 1]), denn vom Warmwassersystem kann durch legionellenhaltige Aerosole immer auch ein Infektionsrisiko ausgehen.

Um Stagnation in den Wasserleitungen zu vermeiden, müssen wassersparende Armaturen von Anbeginn bei der Leitungsauslegung berücksichtigt werden. Die Stadt Frankfurt empfiehlt für ihre öffentlichen Gebäude die folgenden Durchflussmengen (vgl. [Linder 2012]):

- Duscharmaturen: Durchfluss maximal 7 Liter/min, Laufzeit max. 40 sec.
- Waschtisch-Armaturen: Durchfluss maximal 5 Liter/min, Laufzeit max. 5 sec.

8.3 Verteilverluste – Wärmedämmung der Warmwasserleitungen

Die Wärmeverteilverluste zentraler Trinkwarmwasseranlagen können bis zu 50 % des Energiebedarfs der Warmwasserbereitung ausmachen. Maßnahmen, welche Wärmeverluste reduzieren, verringern dabei zugleich den Wärmeeintrag in angrenzende Kaltwasserleitungen und in angrenzende Räume. Eine energieeffiziente Warmwasserverteilung trägt daher im Sommer auch zu einem besseren Komfort bei.

Grundsätzlich sollten Warmwasserverteilleitungen möglichst kompakt und gut gedämmt ausgeführt werden. Bei weitläufigen Anlagen kann die Aufteilung auf mehrere Trinkwassererwärmer Leitungslängen verkürzen und Verteilverluste reduzieren.

Für Trinkwarmwasserleitungen liegen wirtschaftliche Dämmstärken bei mindestens 2xDN bis zu einem Rohrdurchmesser von DN 25 (vgl. [Pfluger 2004], [Kah/Feist 2006], [Kah et al. 2008]). Bei größeren Leitungsquerschnitten liegen die optimalen relativen Dämmstärken bei geringeren Werten (vgl. Abbildung 21). Die Ergebnisse decken sich mit den Empfehlungen in [Linder 2012]. Tabelle 3 fasst die Empfehlungen zu Mindestdämmstärken zusammen.

Zudem sollten Rohrhalterungen nicht auf dem Rohr selbst, sondern auf der Dämmschale angebracht werden, und Armaturen, Abzweigungen etc. dürfen beim

Dämmen nicht vergessen werden. Warmwasser-Rohrleitungen sollten ferner nicht im unbeheizten Bereich geführt werden.

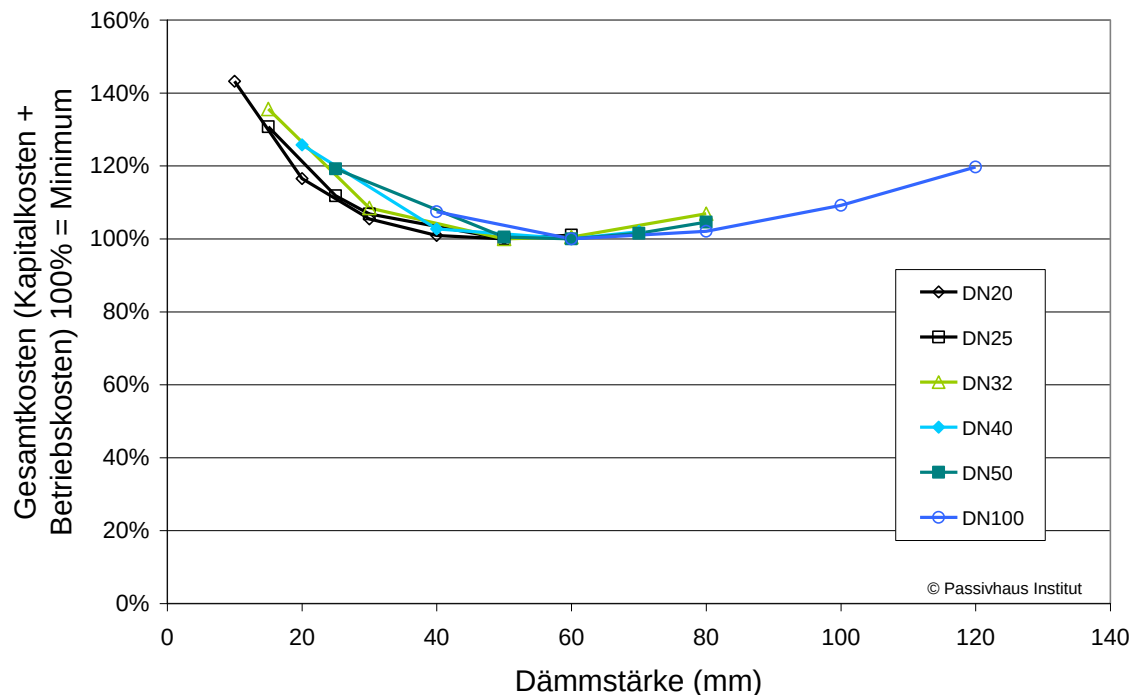


Abbildung 21: Wirtschaftlichkeit der Wärmedämmung von Warmwasserverteilleitungen. Bei größeren Leitungsdurchmessern liegen die Optima bei geringeren relativen Dämmstärken.
(Randbedingungen und Kostendaten aus [Kah et al. 2008])

Nennweite der Rohrleitung	DN20	DN25	DN32	DN40	DN50	DN100
Empfehlung zu Mindest-Dämmstärke [mm]	40	50	50	60	60	100
Mindestanforderung [EnEV 2009]	20	30	30	40	50	100

Tabelle 3: Wärmedämmung der Warmwasserverteilleitungen (bezogen auf eine Wärmeleitfähigkeit von 0,035W/(m K)). Empfehlungen zu Mindest-Dämmstärke gemäß [Linder 2012].

Weiteres Potential zur Verringerung der Wärmeverluste bieten Inliner-Systeme, welche in koaxialen Leitungen Trinkwarmwasser und Zirkulation führen. Im Beispiel verringert sich der Wärmeverlust mit dem Inliner-System im Vergleich zur getrennten Leitungsführung um 43 %.

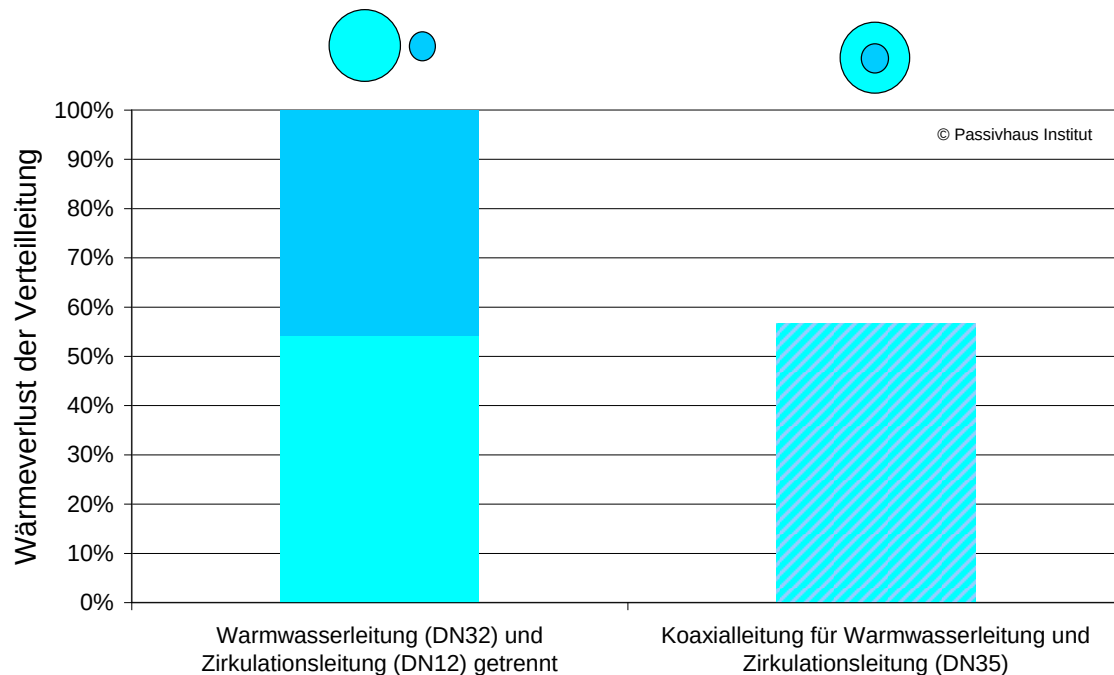


Abbildung 22: Die Rohr-in-Rohrführung der Trinkwarmwasserleitung reduziert für das gezeigte Beispiel den Wärmeverlust gegenüber dem konventionellen System um 43 %. (Annahme: Wärmedämmung der Rohrleitungen gemäß Empfehlung)

8.4 Hygienische Anforderungen – Lösungsansätze

Durch die Vermehrung von Legionellen kann von Warmwassersystemen eine Gesundheitsgefährdung ausgehen. Legionellen sind in der Umwelt nur in geringen Konzentrationen vorhanden, können sich aber bei Wassertemperaturen zwischen 25 und 45 °C stark vermehren. Eine Gefährdung besteht, wenn in feinen Tropfen enthaltene Legionellen mit der Luft, z.B. beim Duschen, eingeatmet werden.

Gemäß [RKI 2013] gibt es im Wesentlichen 2 Wege zur Prävention von Legionellen:

- Eine Verminderung einer Verkeimung warmwasserführender, aerosolbildender Systeme durch geeignete Maßnahmen und
- eine Verminderung von Aerosolkontakten.

Bezüglich Planung und Betrieb verweist [RKI 2013] auf die technische Regel [DVGW W 551] zu Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen. Dabei gelten bis auf einzelne Bereiche die Anforderungen wie in anderen öffentlichen Gebäuden oder Wohnhäusern. Weitergehende Forderungen bestehen z. B. für Intensivstationen und Bereiche zur Behandlung von immunsupprimierten Patienten.

Für Großanlagen gemäß [DVGW W 551] (Anlagen mit mehr als 3 Litern Fassungsvermögen Warmwasser in den Leitungen bzw. Speichern mit mehr als 400 Liter) gilt,

dass am Warmwasseraustritt des Trinkwassererwärmers Temperaturen von mindestens 60 °C und zusätzlich an keiner Stelle im Warmwasserverteilsystem Temperaturen unter 55 °C auftreten dürfen.

Die Verteilverluste des Warmwassersystems können erheblich gesenkt werden, wenn das System mit geringeren Warmwassertemperaturen betrieben wird. Abweichend zur konventionellen Lösung der zentralen Trinkwarmwasserbereitung und Betrieb im hygienisch unkritischen Temperaturbereich oberhalb von 55 °C, werden zwei weitere Ansätze vorgestellt.

Eine mit den hygienischen Anforderungen konforme Variante ist die dezentrale Erwärmung des Trinkwassers mit Warmwassertemperaturen unter 60 °C, sofern das anschließende Leitungsvolumen weniger als 3 Liter umfasst.

Alternativ kann hygienisch unbedenkliches Warmwasser durch Zugabe eines chemischen Desinfektionsmittels, welches eine Vermehrung von pathogenen Bakterienarten im Trinkwasser verhindert (hier Eindosierung von hypochloriger Säure (HOCl)), hergestellt werden. Das Verfahren wird in Krankenhäusern in erster Linie zur Desinfektion von belasteten Trinkwassersystemen eingesetzt. In anderen Nutzungen (z. B. Wohnbau [Großklos et al. 2010], Gewerbeküche [Zistler 2012], Hallenbädern) wird das Verfahren auch zur permanenten Legionellen-Prophylaxe eingesetzt. Die Anwendung ist zulässig (vgl. [UBA 2012]), jedoch sollten gemäß Bundesumweltamt zusätzliche Aufbereitungsstoffe nur aus zwingenden hygienischen oder technischen Gründen dem Trinkwasser zugegeben werden ("Minimierungsgebot").

Das Verfahren wird durchaus kontrovers diskutiert. Der DVGW betont, dass die "permanente, prophylaktische, chemische/elektrochemische Desinfektion von Trinkwasser in Trinkwasser-Installationen, die nach den Regeln der Technik errichtet und betrieben werden, weder notwendig noch sinnvoll ist" (vgl. [DVGW TWIN 5]). Da das Verfahren großes Potential hat und die fachliche Diskussion noch nicht abgeschlossen scheint, wird auch der Lösungsansatz der prophylaktischen Eindosierung eines chemischen Desinfektionsmittels betrachtet.

Die vorgestellten Lösungsansätze werden im nächsten Abschnitt energetisch bewertet.

8.5 Systemvergleich – Trinkwarmwasser-Verteilverluste

Auf die Trinkwarmwasserverteilung ist besonderes Augenmerk zu legen, weil deren Verluste außerhalb der Heizzeit im Gebäude nicht genutzt werden können und darüber hinaus im Sommer unerwünschte Kühllasten verursachen. Zudem können deren Wärmeeinträge kaltes Trinkwasser in den ausgedehnten Krankenhaus-Leitungsnetzen erwärmen, was es aus hygienischen Gründen zu vermeiden gilt.

Im Folgenden werden fünf Varianten der Trinkwarmwasserverteilung und die zugehörigen Wärmeverluste vorgestellt. Die flächenspezifischen Verluste werden exemplarisch für die Situation in einer Pflegestation ermittelt.

In der ersten Variante (TWW zentral) wird eine zentrale Trinkwassererwärmung mit Zirkulation, der gebräuchliche Lösungsansatz in Krankenhäusern, untersucht. Innerhalb eines exemplarisch betrachteten Pflegegeschosses werden die Entnahmestellen, überwiegend Nasszellen der Bettenzimmer, horizontal erschlossen. Eine Steigleitung stellt die Verbindung zum Wärmeversorger her. Trinkwasserleitung und Zirkulation verlaufen auch in der horizontalen Erschließung parallel (vgl. Skizze im Anhang Abbildung 73). Die mittlere Systemtemperatur beträgt 65 °C. Die Leitungen sind gemäß [EnEV 2009] gedämmt.

Leitungsquerschnitt	Leitungslänge je m ² NGF
DN40	0,071
DN25	0,071
DN15	0,085

Tabelle 4 Spezifische Leitungslängen bei horizontaler, stationsweiser Erschließung der Nasszellen und Stationsbädern bei zentraler Trinkwarmwasserbereitung.
(Auswertung einer Pflegestation: Planung zum Klinikum Frankfurt Höchst)

In der ersten Variante verursacht die Warmwasserverteilung Verluste in nahezu gleicher Höhe, wie der eigentliche Nutzwärmebedarf. Dem Nutzwärmebedarf in der Pflegestation liegt ein mittlerer Wasserverbrauch gemäß Abschnitt 8.1 von 50 Liter/(Tag und Planbett) zugrunde.

Die Ergebnisse einer zentralen Trinkwassererwärmung (wie oben), jedoch eines besser gedämmten Warmwasserverteilsystems, welches den Empfehlungen in Tabelle 3 entspricht, zeigt die Variante "TWW zentral, WD verbessert".

Die höheren Dämmstärken reduzieren die Wärmeverluste gegenüber der Ausführung gemäß [EnEV 2009] um 18 %. Aufgrund der erforderlichen größeren Leitungsquerschnitte im Krankenhaus ist die Einsparung durch wirtschaftliche Dämmstärken geringer, als die gewöhnlich im Wohnbau erzielbare Einsparung von etwa 30 %.

Ein alternativer Lösungsansatz untersucht die Erwärmung des Trinkwassers in der betrachteten Pflegestation mit Frischwasserstationen (FWS) (Variante "TWW FWS"). Im Durchflussprinzip wird Trinkwasser in Frischwasserstationen nur bei Bedarf durch einen reinen Heizkreis erwärmt. Bis zu 4 Nasszellen können in der Pflegestation mit einer Frischwasserstation und mit jeweils kurzen Leitungslängen (Leitungsvolumen

deutlich weniger als 3 Liter) erschlossen werden. Das System könnte, aufgrund der direkten Erzeugung des Trinkwarmwassers, mit geringen Temperaturen betrieben werden. Temperaturen des primären Heizkreises von 55 °C wären zur Erhitzung des Trinkwarmwassers ausreichend. Die in den Nasszellen ohnehin vorhandenen Versorgungsleitungen für die Badheizkörper können daher auch zur Warmwasserbereitung verwendet werden.

Gegenüber der zentralen Trinkwarmwassererwärmung (1. Varianten) ist eine Reduzierung der Wärmeverluste um über 50 % möglich.

Technische Fragen, unter anderem nach einer Lösung hinsichtlich der regelmäßigen thermischen Desinfektion der kurzen Leitungen inkl. der Armaturen, konnten jedoch nicht gelöst werden. In der Planung zum Klinikum Frankfurt Höchst wurde der Ansatz daher verworfen.

Ein weiterer Ansatz (Variante "TWW Legionellen-Prophylaxe") setzt, wie in Abschnitt 8.4 beschrieben, auf eine permanente, prophylaktische, elektrochemische Desinfektion des Trinkwassers. Da durch chemische Desinfektion mikrobielles Wachstum verhindert wird, kann das Temperaturniveau des Trinkwassersystem reduziert werden. Die Variante geht wiederum von einer zentralen Trinkwarmwasserversorgung aus, die jedoch auf geringerem Temperaturniveau (Annahme 50 °C) betrieben wird.

Auch mit diesem Ansatz wären erhebliche Reduzierungen der Wärmeverluste des Trinkwassersystems erzielbar (rund 47 %), Wärme von thermischen Solaranlagen und Wärmepumpen wären zudem, aufgrund der geringeren Systemtemperaturniveau, effizienter nutzbar.

Mehrfach wird das Verfahren inzwischen in Hotels und Krankenhäusern zur regelmäßigen, beispielweise wöchentlichen, jedoch noch nicht permanenten Desinfektion des Trinkwassersystems verwendet. Der DVGW bewertet das Verfahren kritisch, nach Einschätzung der Autoren bietet das Verfahren jedoch auch unter hygienischen Aspekten Vorteile. Eine abschließende Bewertung in der Fachöffentlichkeit steht noch aus.

Im Rahmen der Planung zum Neubau des Klinikums Frankfurt Höchst wird das Verfahren nicht weiterverfolgt.

Die letzte Variante ("TWW zentral, WD verbessert, Netz optimiert") sieht, wie in der ersten Variante, eine zentrale Trinkwarmwasserversorgung vor. Im Unterschied zur ersten Variante, wird nur eine Zirkulationsleitung eines Geschosses zur Trinkwasser-Rückführung aller 4 Geschosse verwendet. Durch die Verwendung von Venturi-Strömungsteilern kann, neben einer zusätzlich erforderlichen Steigleitung, auf Zirkulationsleitungen in drei Geschossen verzichtet werden.

Mit der letzten Variante verringern sich die Wärmeverluste gegenüber dem konventionellen zentralen System, durch Optimierung der Leitungslängen und verbesserte Wärmedämmung der Verteilleitungen um 33 %.

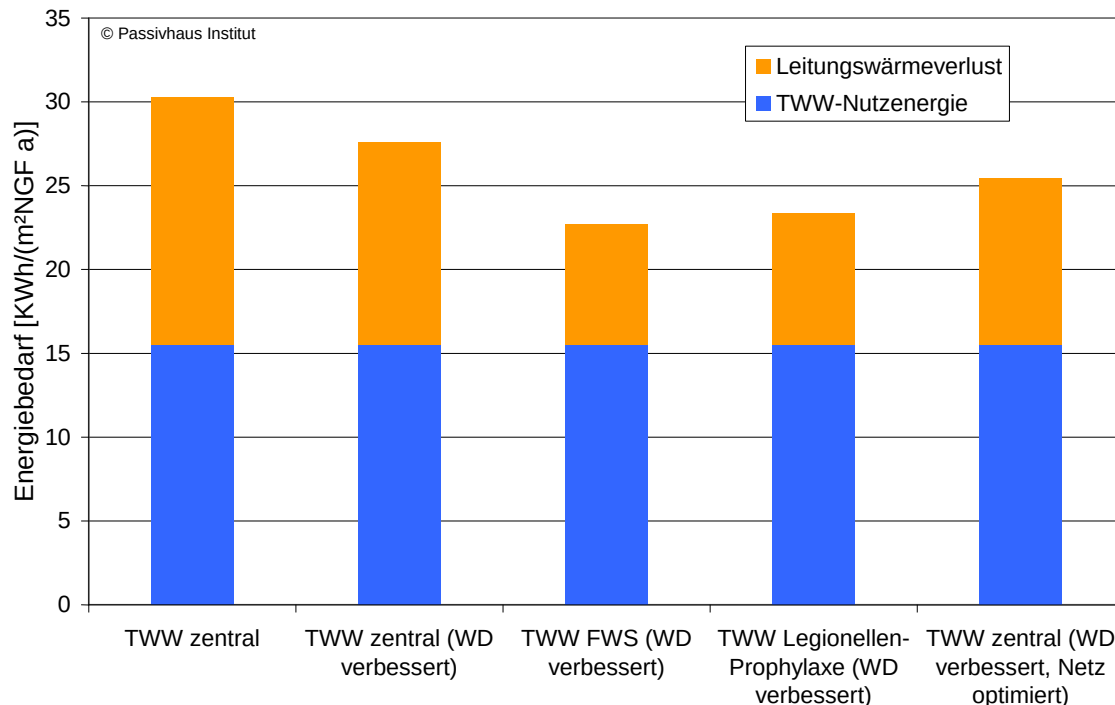


Abbildung 23: Nutzwärmebedarf und Verteilverluste der Trinkwarmwasserversorgung. Bis zu 50 % des Wärmebedarfs sind Wärmeverluste des Trinkwassersystems.

8.6 Trinkwarmwassererwärmung

Die Warmwasserbereitung erfolgt in der Regel in mit Wärmetauschern ausgerüsteten Trinkwarmwasserspeichern. Trotz guter Dämmung verlieren Speicher permanent Wärme und es gilt je größer der Speicher, desto höher die Wärmeverluste. Speicher sollten daher nach dem tatsächlichen Bedarf ausgelegt und gut gedämmt werden. Eine Überdimensionierung sollte auch aus hygienischen Gründen vermieden werden, um die Menge warmen Trinkwassers im System möglichst gering zu halten.

Wird warmes Trinkwasser überwiegend im Durchflussprinzip erzeugt, z. B. mit Frischwasserstationen, ist eine erhebliche Reduzierung der vorgehaltenen Wassermenge möglich. Durch Nutzung von erneuerbaren Energien kann der mit der Warmwasserbereitung verbundene Kohlendioxid-Ausstoß weiter verringert werden.

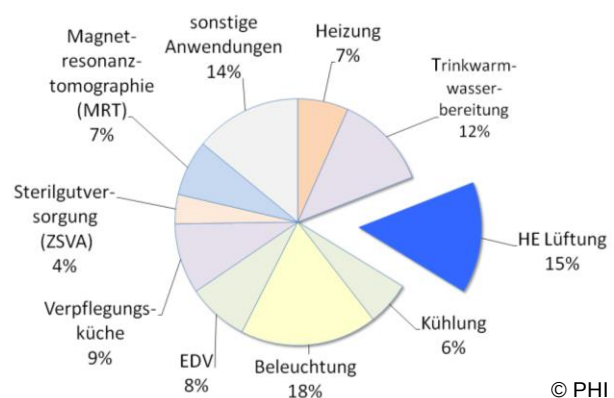
Mit thermischen Solaranlagen kann trotz des geringen Ertrags im Winter rund die Hälfte des Trinkwassers erwärmt werden. Aufgrund der fallenden Preise bei Photovoltaik-Modulen, treten diese jedoch zunehmend in Konkurrenz zur thermischen Solarenergienutzung um die verfügbaren Dachflächen.

Trinkwarmwasser ist zudem eine interessante Wärmesenke für Abwärme aus zahlreichen Anwendungen im Krankenhaus. Mittels Wärmerückgewinnungssystem kann Prozessabwärme zur direkten Vorerwärmung des Trinkwarmwassers verwendet werden. Energetisch lohnend sind solche Systeme, wenn die Wärmerückgewinnung möglichst am Ort der Wärmefreisetzung (d.h. oftmals dezentral) stattfindet.

Zudem ist der Einsatz von Wärmepumpensystemen interessant. Da die Effizienz von Wärmepumpen entscheidend vom Temperaturniveau der Wärmeabnahme abhängt, sollte mit der Wärmepumpe jedoch nur eine Vorerwärmung (z. B. bis 30 °C) erfolgen. Die restliche Erwärmung kann z. B. durch Spitzenlastkessel gedeckt werden. Bei Verwendung von Prozessabwärme als Wärmequelle kann die Effizienz des Systems nochmals erhöht werden.

9 Lüftung

Anteil des Hilfsenergiebedarfs der Lüftung (exemplarisch) am Gesamtprimärenergiebedarf (vgl. Abschnitt 4.12)



9.1 Anforderungen und Dimensionierung der Luftmengen

9.1.1 Anforderungen entsprechend der Funktionsbereiche

In einem Klinikum gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionsbereiche, welche, aufgrund der verschiedenartigen Nutzungen, stark voneinander abweichende Anforderungen an die Auslegung und Ausführung der RLT-Anlage stellen.

Die Anforderungen an viele Bereiche sind in der allgemeinen Normung zu Nichtwohngebäuden (DIN EN 13779) reguliert. Die Norm kann auf die Auslegung der Lüftung für folgende Bereiche angewendet werden:

- Pflegestation mit Bettenzimmern, Nasszellen sowie Dienst- und Besprechungszimmern
- Flure der Pflegestationen

-
- WC
 - Verwaltung mit Büro- und Arbeitsräumen

In Abstimmung mit dem Bauherrn wird die Anforderung an die Luftqualität festgelegt. Die Auslegung der Luftvolumenströme für die entsprechenden Bereiche wird dann gemäß festgelegter Luftqualität bestimmt.

Spezielle Anforderungen an Luftvolumenstrom, Filterung und Lüftungskonzept bestehen im Wesentlichen nur bei folgenden Bereichen:

- OP-Abteilung
- Untersuchungs- und Behandlungsbereiche sowie
- sowie Intensivmedizin

Die Anforderungen an die Auslegung und den Betrieb der RLT-Anlagen dieser Bereiche sind in der [DIN 1946-4] reguliert.

9.1.2 Außenluftbedarf entsprechend der Funktionsbereiche

Funktionsbereich	Raum	spezifischer Volumenstrom [m³/h]	Bezugsgröße	Quelle	Durchschnittlicher Flächenspezifischer Außenluftbedarf je Funktionsbereich [m³/(hm²)] ¹⁾
Pflege-station	Bettenzimmer	40	pro Person (entsprechend Bereich IDA 2)	DIN EN 13779	2,6
	Flur	2	je m² (entsprechend einer spezifischen Stationsfläche von 20 m² pro Person)	DIN EN 13779	
	Dienst – und Arbeitszimmer nach Personen	40	pro Person (entsprechend Bereich IDA 2)	DIN EN 13779	
Intensiv-medizin	Bettenzimmer, Isolierzimmer	100	je Patient	DIN 1946-4	5,6
OP-Bereich	OP-Räume	1200	pro OP	DIN 1946-4	7,2
	Untersuchungs- und Eingriffsräume	40	pro Person	DIN 1946-4	
	sonstige Räume im OP-Bereich	40	pro Person	DIN 1946-4	
	OP-Bereich Aufwachräume und Eingriffsräume mit Narkosegas-anwendung	150	pro Person	DIN 1946-4	
Notfall-versorgung		entsprechend Einzelanforderungen der unterschiedlichen Räume			k.A.
Labor		25 ²⁾	je m² Labor-nutzfläche	DIN 1946-7	23,5
Sterilgut versorgung		entsprechend thermischer Lasten			k.A.
Personal-Umkleide		40	pro Person (entsprechend Bereich IDA 2)	DIN EN 13779	k.A.

Tabelle 5: Außenluftbedarf/Abluftbedarf entsprechend der Funktionsbereiche gemäß gültiger Normen und Richtlinien

¹⁾ gemäß üblicher Planungsvorgaben, ²⁾ Abluftbedarf

In Tabelle 5 sind gemäß gültiger Richtlinien die Außenluftbedarfe der Bereiche eines Krankenhauses zusammengefasst, die auf Grund ihres hohen spezifischen Außenluftbedarfs energetisch bedeutsam sind oder aber von Bereichen, die einen hohen Flächenanteil im Krankenhaus haben (wie z.B. Pflegestationen).

Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sie soll lediglich einen Überblick über die Verteilung des Außenluftbedarfs geben.

Die Empfehlungen für den Außenluftbedarf der Funktionsbereiche, welche nach [DIN 1946-4] reguliert werden, werden im Rahmen dieser Untersuchung als gegeben betrachtet.

Im Gegensatz dazu können für Funktionsbereiche deren Außenluftbedarf nach [DIN EN 13779] reguliert ist, die Richtwerte für den Außenluftbedarf auf Grund von Erfahrungswerten aus der Planung von Passivhaus-Wohngebäuden und Passivhaus-Nichtwohngebäuden anderer Nutzung sowie auf Grund von Erfahrungen aus der Lüftungsplanung konkreter Krankenhausprojekte zumindest hinterfragt werden.

Bereits in [AkkP 23] wurde der notwendige Außenluftwechsel zur Sicherstellung einer komfortablen Luftqualität untersucht. Der Planungsansatz für Passivhaus-Wohngebäude von 30 m³/h pro Person hat sich für Passivhaus-Wohngebäude bestätigt. Aufgrund der ähnlichen Nutzung sowie der Möglichkeit einer zusätzlichen Fensterlüftung (z. B. zur unterstützenden Lüftung im Sommer) kann auch für den Außenluftbedarf für Bettenzimmer in einer Krankenhaus-Pflegestation mit angeschlossener Nasszelle der Planungsansatz für Passivhaus-Wohngebäude herangezogen werden. In der Planung des Klinikums Frankfurt-Höchst fand dieser Ansatz unter Abstimmung mit dem zuständigen Hygieniker Berücksichtigung:

Funktionsbereich	Raum	spezifischer Volumenstrom [m ³ /h]	Bezug	Quelle
Pflegestation	Bettenzimmer	30	pro Person	Vereinbarung zwischen Planer, Hygieniker und PHI bei der Planung des Klinikums Frankfurt - Höchst

Tabelle 6: Außenluftbedarf entsprechend der Empfehlungen für Passivhaus-Wohngebäude unter Abstimmung mit Hygieniker und Planer in einem konkreten Projekt

Einige Funktionsbereiche im Krankenhaus weisen stets sehr hohe Luftwechselraten auf. Neben dem OP-Bereich und der Intensivmedizin betrifft dies vor Allem folgende Funktionsbereiche mit sehr hohem Außenluftbedarf:

- Notfallversorgung
- Sterilgutversorgung
- Personalumkleide
- Labor

In der Notfallversorgung werden die Volumenströme üblicherweise vor allem nach den thermischen Lasten medizinischer Geräte ausgelegt. Außerdem werden Eingriffsräume mit OP-Lüftung vorgehalten. Es wird angenommen, dass bei einer projektspezifischen Planung unter Berücksichtigung der tatsächlichen Wärmeabgabe der medizinischen Geräte und der Gleichzeitigkeit der Nutzung der erforderliche Luftwechsel deutlich reduziert werden kann. Grundsätzlich sollte es vermieden werden den Außenluftbedarf nach dem Kühlbedarf zu dimensionieren. Dezentrale Umluftgeräte mit Kühlfunktion oder Bauteilkühlung stellen eine effizientere Alternative dar.

Bei der Sterilgutversorgung treten prozessbedingt hohe Wärmelasten auf. Eine Reduzierung des mittleren Luftwechsels ließe sich hier durch eine Anpassung der Lüftung auf den tatsächlichen Bedarf (also auf den Betrieb der Anlage) erzielen. Auch hier sollte zur Abfuhr von Wärme und Feuchtigkeit vorzugsweise mit Umluft gearbeitet werden.

Ein sehr hoher Luftwechsel wird stets auch für die Personalumkleiden vorgesehen. Hier ist allerdings davon auszugehen, dass sich das Personal nur zu einem geringen Zeitanteil tatsächlich in der Umkleide aufhält. Eine Reduzierung des mittleren Luftwechsels ist auch hier durch eine bedarfsgeführte Lüftung denkbar. Als Regelgrößen für die Anpassung des Volumenstroms werden CO₂-Gehalt und relative Luftfeuchte in der Abluft empfohlen.

Der Laborbereich weist den größten flächenspezifischen Luftvolumenstrom im Krankenhaus auf. Die [DIN 1946-7] gibt als Planungsempfehlung unabhängig von der tatsächlichen Labornutzung einen Abluftbedarf von 25 m³/h je m² Labornutzfläche an. Bei genauer projektspezifischer Definition und Ermittlung der tatsächlichen Labornutzfläche (Flure, Auswerte- und Schreibfläche sowie Nebenräume zählen beispielsweise nicht zur Labornutzfläche) kann der Luftwechsel auch im Laborbereich deutlich reduziert werden.

9.1.3 Anforderung an die Luftaufbereitung und Luftbehandlung in Abhängigkeit unterschiedlicher Funktionsbereiche

Anforderungen an die Luftaufbereitung und Luftbehandlung bestehen in einem Krankenhaus nur an wenige Funktionsbereiche.

Filtration der Luft

Definierte Anforderungen an die Filtration der Luft werden beispielsweise nur an die Bereiche gestellt, die nach [DIN 1946-4] reguliert werden. Hierzu zählen neben dem OP-Bereich und der Intensivmedizin auch alle Untersuchungs- und Behandlungsräume. In den nach [DIN 1946-4] regulierten Bereichen wird eine zwei-stufige Filterung gefordert wobei als Vorfilter die Filterklasse M7 und als zweite Filterstufe Klasse F9 empfohlen wird. In den OP-Räumen wird eine zusätzliche endständige H13 Filterstufe gefordert. Der energetische Einfluss der Filterdruckverluste (gerade der H13-Filter) und Energieeinsparpotentiale werden an späterer Stelle des Berichts untersucht.

In andere Funktionsbereiche, welche nach [DIN 13779] reguliert werden – hierunter fallen die meisten Räume einer allgemeinen Pflegestation sowie die Personalumkleide – ist, zumindest bei guten Außenluftbedingungen, eine einstufige Filterung der Filterklasse M7 ausreichend für eine gute Raumlufthqualität.

Befeuchtung der Luft

Befeuchtungsbedarf kann aufgrund der hohen Luftwechselrate vor allem in der

- Intensivmedizin,
- im OP-Bereich,
- in der Radiologie und
- in der Notaufnahme

entstehen.

Nach den technischen Regeln für Arbeitsstätten [ASR2012] braucht die Raumlufth üblicherweise nicht befeuchtet zu werden. Wegen der guten Luftfiltration und der staubarmen Raumlufth kann im Winter für die meisten Krankenhausräume auf eine Befeuchtung verzichtet werden. Dort, wo befeuchtet wird, kann der Zielwert auf 30 % r.F. beschränkt werden [L-DGKH]. Für OP-Abteilungen sind aus hygienischen Gründen „ausschließlich Befeuchtungseinrichtungen mit Dampf zulässig“ [DIN 1946-4].

In allgemeinen Pflegestationen sollte durch eine angemessene Dimensionierung des Außenluftvolumenstroms (folglich 9.1.2) ein Befeuchtungsbedarf gar nicht erst

erzeugt werden. Der Einsatz von Wärmerückgewinnungssystemen, welche gleichzeitig eine Feuchterückgewinnung ermöglichen, kann zusätzlich zu einer behaglichen Raumluchtfeuchte beitragen.

Kühlung

Ein Bedarf an Raumkühlung besteht in Krankenhäusern vor Allem durch medizinische Geräte und deren hohe Wärmeabgabe, wie z. B.:

- Computertomographie,
- Sterilisatoren oder
- Röntgengeräte.

Ein relevanter Kühlbedarf besteht des Weiteren im Operationssaal. Die Raumkühlung dient hier nicht primär der Kompensation der Abwärme von medizinischen Geräten, sondern vielmehr der Kompensation der Abwärme der hohen installierten Beleuchtungsleistung, die zur Erfüllung der Anforderung an die hohe Beleuchtungsstärke im OP erforderlich ist, sowie der Erhaltung der Funktion des Lüftungssystems (worauf an späterer Stelle noch eingegangen wird).

Die Raumluftekühlung kann zentral im RLT-Gerät umgesetzt werden oder aber dezentral genau in den Räumen oder Funktionsbereichen, in denen entsprechende Kühllasten auftreten. Im Abschnitt 9.6.4 wird das Thema unter der Fragestellung „zentral oder dezentral?“ noch einmal aufgegriffen.

9.2 Lösungsansätze zur kontrollierten Lüftung

9.2.1 Brandschutztechnische Anforderungen und Lösungen

Brandschutzkonzepte haben einen wesentlichen Einfluss auf die Detailausbildung der Bauvorhaben und der zugehörigen Technik. Im Speziellen im Bereich der Lüftung auf die Aufteilung der betreffenden Zonen und die Möglichkeit das Konzept der gerichteten Überströmung von Zuluft- in Abluftbereiche zu nutzen.

Deshalb ist es notwendig, erst recht bei Krankenhäusern mit ihrer eigenen Komplexität, in der Frühphase der Vorentwurfsplanung die Belange der energetisch optimierten Lüftungsplanung in die Brandschutzkonzepterstellung einfließen zu lassen. Ist das Brandschutzkonzept schon weit gediehen und die Haustechnikplanung mitten in der Vorentwurfsphase, wird es für alle Projektbeteiligten mühsam Anpassungen an der vorliegenden Planung im Sinne einer feingliedrigen Optimierung vorzunehmen. Zudem kann in der Anfangsphase der Erstellung des Brandschutzkonzepts die Kreativität des Brandschutzexperten gefordert werden, um

im Ergebnis Innentüren, Innenfenster und Flurbereiche von brandschutz-technischen Anforderungen freizuhalten, sodass ein effizientes Lüftungskonzept basierend auf der gerichteten Durchströmung (Doppelnutzung des Zuluftvolumenstroms durch Überströmung von Zuluft- in Ablufträume) umgesetzt werden kann.

Zwei prinzipielle Lösungen für die Hauptnutzungsbereiche in Krankenhäusern finden sich bei klassischen Brandschutzkonzepten, die im Folgenden dargestellt sind.

Der erste Fall besteht in einem Rettungsweg aus dem einzelnen Raum hinaus, durch eine zumindest dichtschießende Tür in einen notwendigen Flur mit beispielsweise F30-Anforderungen und dann flüchtend zu den notwendigen Treppenhäusern. Diese oder Varianten mit höheren Anforderungen erschweren oder verhindern die preiswerte Erstellung von Überströmbereichen in Lüftungskonzepten, beziehungsweise machen dies mit normalen technischen Mitteln nicht mehr umsetzbar. Thematik unter folgender Überschrift:

- 1) Bereiche mit Anforderungen an die Fluchtwege mit mindestens dichtschießenden Türen

Eine weitere, bessere Möglichkeit bezogen auf die Belange der Lüftungsplanung besteht in der Ausweisung von definierten Nutzungseinheiten analog der hessischen Bauordnung (vgl. [HBO 2003]) mit keinen direkten brandschutzrechtlichen Klassifizierungen an Innenelemente wie Wände, Türen, Fenster und Flure. Diese Nutzungseinheiten können direkt einen Brandabschnitt bilden oder einen Brandabschnitt durch mehrere Nutzungseinheiten teilen. Die Überschrift dafür:

- 2) Bereiche mit keinen brandschutztechnischen Klassifizierungen an Ausbauelemente innerhalb einer Nutzungseinheit

Nun im Einzelnen:

1) Bereiche mit Anforderungen an die Fluchtwege mit mindestens dichtschießenden Türen und erhöhter Patientendichte

Patientenzimmer und sämtliche Stationsräume sind vom notwendigen Flur durch eine F30-Wand gegebenenfalls abgetrennt. Das Lüftungskonzept ist dadurch dahingehend eingeschränkt, dass eine Überströmung von Zulufräumen in Ablufträume über den notwendigen Flur nicht einfach und preisgünstig realisiert werden kann.

Durch geringe Brandlasten in Besucher-, Personal- und Behinderten-WCs bedingt, könnte eine Überströmung des Zuluftvolumenstroms aus dem notwendigen Flur über bodennahe Überströmelemente in den Türen der Ablufträume, die nach [DIN 18017] reguliert werden, in solchen Toilettenanlagen im Sinne einer brandschutztechnischen Abwägung denkbar sein.

Im Patientenzimmer geht die Lüftungsbilanz, sofern die Nasszellen im Patientenzimmer integriert werden, ungefähr auf: Der patientenbezogene Zuluftstrom stimmt in etwa mit dem Abluftbedarf der Nasszelle überein, sodass eine direkte Überströmung umgesetzt werden kann.

Neben den Patientenzimmern und Ablufträumen nach [DIN 18017] gibt es in einer allgemeinen Pflegestation häufig überwiegend Zulufräume, z. B. Untersuchungsräume, Therapiezimmer, Dienst- und Personalzimmer. Das bedeutet, dass in einer allgemeinen Pflegestation überwiegend ein Zuluftüberschuss herrscht. Die Höhe des Zuluftüberschusses kann, je nachdem wie viele Untersuchungs- und Behandlungsräume direkt in der Station integriert sind, variieren.

Folgende zwei Möglichkeiten bestehen, durch gerichtete Durchströmung den Lüftungsbedarf trotz Brandschutzanforderungen noch etwas zu reduzieren:

- Bei nebeneinanderliegenden Zuluft- und Ablufträumen, die nicht durch Brandschutzanforderungen getrennt sind, kann der Luftvolumenstrom unter Einhaltung der Schallschutzanforderungen zu den Fluren direkt von Zuluft- in Ablufträume überströmen. Alle anderen Räume, in denen eine direkte Überströmung nicht möglich ist, müssen jeweils mit Zuluft und Abluft ausgestattet werden.
- Überströmung von Zuluft- in Ablufträume über beispielsweise einen Deckenkanal im Flurbereich, welcher die brandschutztechnischen Anforderungen zum notwendigen Flur hin erfüllt und somit eine separate Schottung überflüssig macht.

Die verbleibende Differenz zwischen Zuluft- und Abluftvolumenstrom muss ohnehin durch einen zusätzlichen Abluftvolumenstrom in den entsprechenden Räumen kompensiert werden.

2) Bereiche mit keinen brandschutztechnischen Klassifizierungen an Ausbauelemente innerhalb einer Nutzungseinheit

Zu diesen Bereichen können, nach erfolgter Abwägung beziehungsweise Kompensation im Brandschutzkonzept vor allem Funktionsbereiche mit regelmäßiger Personalanwesenheit aber wenig Patientenaufkommen zählen, wie z. B.:

- Laborbereiche
- Pathologie sowie
- Verwaltungsbereiche

In diesen Nutzungseinheiten bestehen dann keine direkten brandschutzrechtlichen Anforderungen an raumtrennende Bauelemente. Das heißt, das Konzept der gerichteten Durchströmung kann auch unter Einbindung des Flurs mit einfachen

baulichen Maßnahmen umgesetzt werden, wenn nicht schallschutztechnische Anforderungen die Umsetzung erschweren.

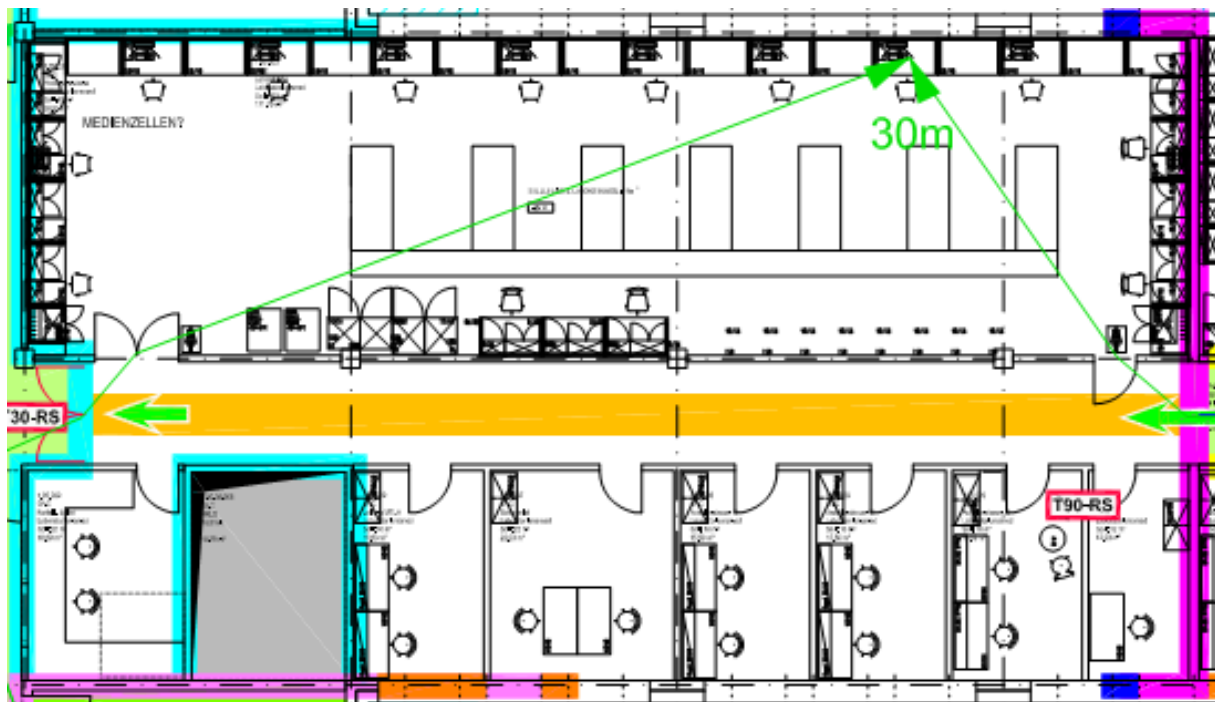


Abbildung 24: Beispiel eines Laborbereichs, welcher eine Nutzungseinheit bildet
 (Quelle: Planung zum Neubau Klinikum Frankfurt Höchst, Architekten:
 woernerundpartner, Frankfurt)

In Abbildung 24 ist beispielhaft der Grundriss eines Laborbereichs im Neubau des Klinikums in Frankfurt Höchst dargestellt. Die Labornutzfläche ist in dem großen Raum im oberen Planbereich angeordnet. Innerhalb der Labornutzfläche besteht ein definierter Abluftbedarf, welcher nach der spezifischen Nutzung bzw. nach [DIN 1946-7] dimensioniert wird. Im unteren Planbereich befinden sich die zum Laborbereich gehörenden Büroräume, in denen die Auswertung der Laborprüfungen erfolgt bzw. noch andere Büro-Arbeitsplätze vorhanden sind.

Der Abluftbedarf der Labornutzfläche wird in aller Regel den Zuluftbedarf der Büroräume übersteigen, jedoch kann durch die gerichtete Durchströmung von Büroräumen in Richtung Labornutzfläche der Luftwechsel und damit der Lüftungswärmeverlust dennoch deutlich reduziert werden.

9.2.2 Lösungsansätze zur kontrollierten Lüftung am Beispiel einer allgemeinen Pflegestation

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, kann in einzelnen Funktionsbereichen, sofern sie denn eine Nutzungseinheit bilden und keine brandschutztechnischen Anforderungen an die Ausbauelemente innerhalb der Nutzungseinheit bestehen, das Konzept der gerichteten Durchströmung angewendet werden und somit durch Doppelnutzung des Volumenstroms der Lüftungswärmeverlust reduziert werden.

In den Pflegestationen ist dies durch die brandschutztechnischen Anforderungen an die Ausbauelemente zumindest erschwert. Dennoch besteht die Möglichkeit durch spezifische Auslegung des Außenluftbedarfs und durch Anpassung des Luftwechsels an den tatsächlichen Bedarf den Lüftungswärmeverlust zu reduzieren. Hierzu werden zunächst einmal die unterschiedlichen Auslegungsvarianten vorgestellt:

- 1) Die wahrscheinlich übliche Auslegung des Außenluftvolumenstroms in Anlehnung an die [DIN EN 13779] nach dem für die Bettenzimmer ein **Außenluftbedarf von ca. 40 m³/(h Person)** angesetzt wird.
- 2) Durch die Möglichkeit der zusätzlichen Fensterlüftung in den Bettenzimmern kann projektspezifisch ein **reduzierter Außenluftbedarf von nur noch 30 m³/(h Person)** angesetzt werden.
- 3) In Pflegestationen gibt es neben der Betten- und Personalzimmer auch Räume, die nicht ständig genutzt werden wie z. B. Untersuchungs-, Therapie- und Behandlungsräume. Der Auslegungsvolumenstrom für diese Bereiche kann in der Summe leicht 25 % des Gesamtauslegungsvolumenstromes der Station ausmachen, obwohl diese Bereiche nur bis zu 10 h am Tag und nur an 5 Tagen in der Woche genutzt werden. Der Lüftungswärmeverlust ließe sich also noch weiter reduzieren durch **bedarfsgeführte Regelung des Volumenstroms** mit Hilfe von entsprechenden Volumenstromreglern vor den benannten Räumen. Dies spräche (aus energetischer Sicht) gegebenenfalls für eine Zusammenfassung der Untersuchungs- und Behandlungsräume in einer Abteilung – in einigen Krankenhäusern wird das zum Teil so umgesetzt. Die Anordnung der Funktionsräume aus medizinischen Gesichtspunkten hat in dem Zusammenhang natürlich immer Vorrang.
- 4) Diese Variante geht von einem **minimalen Außenluftbedarf** aus, der sich entsprechend der Anzahl der Betten in der Station und der Personenanzahl der Belegschaft ergibt. Diese Variante stellt lediglich eine theoretische Option dar, dessen Potential im Wohnbau regelmäßig ausgeschöpft wird.

Folgende Abbildung zeigt den unterschiedlichen flächenspezifischen Außenluftbedarf, welcher sich entsprechend der o.g. Auslegungsvarianten ergibt. Der

energetische Vergleich zeigt, dass schon durch die Reduktion des Außenluftbedarfs in den Bettenzimmern auf $30 \text{ m}^3/(\text{h Person})$ der Lüftungswärmeverlust um gut 10 % bezogen auf die Standardauslegung reduziert werden kann. Durch Anpassung der Lüftung an den tatsächlichen Bedarf sind Reduktionen des Lüftungswärmeverlusts um 25 % möglich. Entsprechend der theoretischen Auslegungsvariante nach dem minimalen Außenluftbedarf kann der Lüftungswärmeverlust der Station sogar um 50 % reduziert werden.

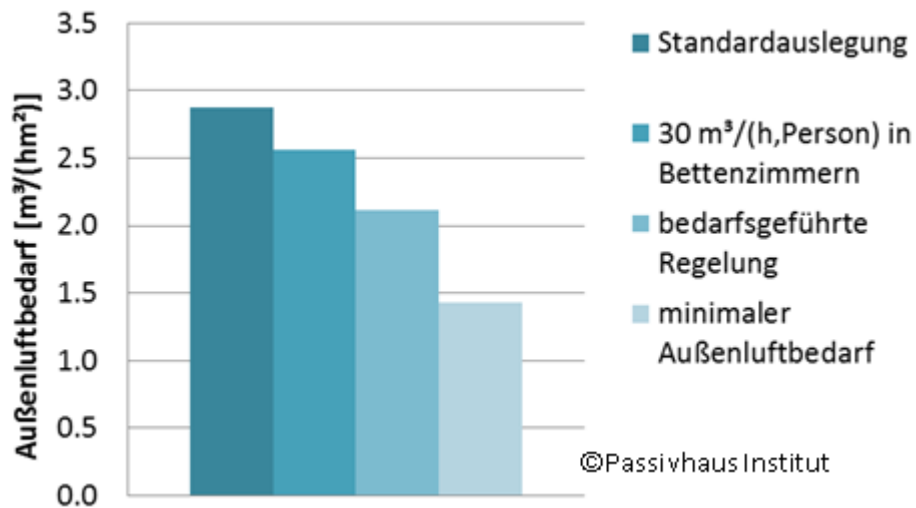


Abbildung 25: Spezifischer mittlerer Außenluftbedarf einer allgemeinen Pflegestation für unterschiedliche Auslegungsvarianten gemäß Beschreibungen im Text

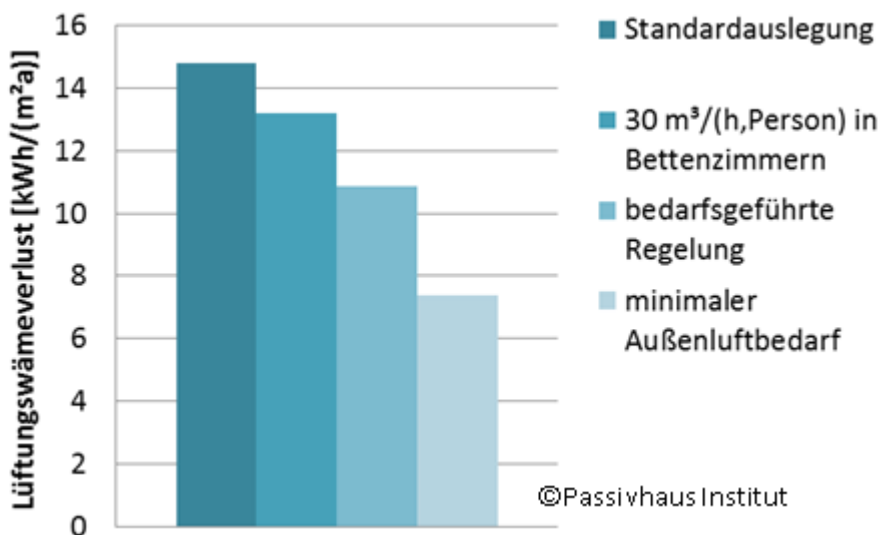


Abbildung 26: Spezifischer mittlerer Lüftungswärmeverlust einer allgemeinen Pflegestation für unterschiedliche Auslegungsvarianten gemäß Beschreibungen im Text unter Annahme folgender Randbedingungen: RLT-Gerät mit effizienter WRG = 80 %, Betriebszeit der nicht ständig genutzten Räume (Untersuchungs-, Therapie- und Behandlungsräume) = 2520 h/Jahr

9.2.3 Konstante oder variable Volumenstrom-Systeme

Wie im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigt, ist eine bedarfsgeführte Regelung für nicht ständig genutzte Bereiche einer allgemeinen Pflegestation energetisch durchaus sinnvoll. Die entsprechenden Bereiche würden somit nur während der jeweiligen Nutzungszeiten belüftet, wodurch sich der Lüftungswärmeverlust der gesamten Station reduziert. Für die Volumenstromregelung gibt es hier zwei Varianten:

- 1) **Variable Volumenstromregelung nach Führungsgröße z. B. CO₂:** Die Volumenströme können an den momentanen Bedarf angepasst werden. Wenn in der regulären Nutzungszeit der jeweilige Raum nicht oder nur mit Teilbelegung genutzt wird, wird der Volumenstrom durch entsprechende Klappenstellung reduziert. Ein Volumenstromregler, der speziell für niedrige Strömungsgeschwindigkeiten optimiert wurde, wird beispielsweise von Trox mit dem „LVC-LowVelocity Regler“ angeboten. Dieser Regler benötigt einen Vordruck von nur noch 30 Pa und bietet damit auch für kleine Strömungsgeschwindigkeiten eine vergleichsweise hohe Genauigkeit der Volumenstromeinstellung.
- 2) **Konstant-Volumenstromregelung mit Sollwertumschaltung:** Diese Volumenstromregelung bietet eine einfache Möglichkeit den Volumenstrom außerhalb der Nutzungszeiten zu reduzieren. Die Volumenstromregler haben zwei Sollwerte zwischen denen umgeschaltet wird. Für diesen Zweck müssen die Konstant-volumenstromregler noch mit einem Stellantrieb („auf-zu“) ausgestattet werden [Trox07].

Damit die Druckverhältnisse (und damit auch die Volumenströme) im Kanalnetz durch die Volumenstromregelung nicht beeinflusst werden, sollte die Lüftungsanlage im Konstant-Druck-Betrieb bzw. mit druckoptimierter Regelung betrieben werden. Die unterschiedlichen Regelstrategien bei Lüftungsanlagen in Nichtwohngebäuden sind bereits in [Kah 2013a] untersucht worden.

Im Gegensatz zu den Untersuchungs- und Behandlungsräumen sind die Bettenzimmer ständig genutzt und bei einer optimierten Nutzung der Pflegestationen kann auch von einer durchgehend hohen Belegungsdichte ausgegangen werden. Jedes Bettenzimmer mit einer variablen Volumenstromregelung auszustatten, wäre daher aus wirtschaftlicher Sicht kaum vertretbar. Der Einsatz von Konstant-Volumenstrom-Reglern oder Volumenstrombegrenzern erscheint hier sinnvoller.

Gerade Volumenstrombegrenzer bieten in dem Zusammenhang eine kostengünstige Alternative zu Volumenstromreglern. Hier wird der voreingestellte Volumenstrom „nur“ innerhalb des Druckverlustbereiches ohne Hilfsenergie begrenzt. Der Volumenstromsollwert kann leicht eingestellt werden. Der Aufwand für die Einregulierung der Lüftungsanlage kann damit erheblich reduziert werden, da nicht mehr jedes einzelne

Ventil eingestellt werden muss. Für die letzten Auslässe eines jeden Strangs sollten jedoch keine Volumenstrombegrenzer installiert werden, um die Druckverluste der jeweils ungünstigsten Stränge zu reduzieren, denn auch für Volumenstrombegrenzer ist eine Druckdifferenz von mindestens 30 Pa erforderlich. Die Einregulierung sollte hier direkt am Auslasselement erfolgen bzw. sollte der Auslass des ungünstigsten Strangs vollständig geöffnet sein.

Die Anpassung der Lüftung an die jeweiligen Nutzungszeiten ist insbesondere auch für die Funktionsbereiche wie z. B. OP, Labor, Verwaltung energetisch relevant. Die Anlagen sollten, sofern keine nutzungsspezifischen Anforderungen gegenteiliges fordern, außerhalb der Nutzungszeiten auf einen Mindestluftwechsel reduziert bzw. wenn möglich ganz abgeschaltet werden.

In Operationsräumen kann darüber hinaus durch die erhöhten hygienischen Anforderungen, welche eine Schutzdruckhaltung gegenüber der Umgebung fordern, noch eine spezielle Anforderung an die Volumenstromregelung bestehen: In dichten Räumen stößt die herkömmliche Volumenstromregelung (Abluft wird entsprechend der Zuluft nachgeführt) an ihre Grenzen. Zur Sicherstellung der Schutzdruckhaltung muss die Volumenstromregelung entsprechend der statischen Druckdifferenz des Raums gegenüber einem Referenzraum erfolgen.

9.3 Effizienzanforderungen an das RLT – Gerät in Kürze

Die kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung ist eine der wichtigen Säulen des energieeffizienten Bauens. Dabei ist die energetische Qualität des Gerätes entscheidend. Neben den speziellen Anforderungen an RLT-Anlagen in Krankenhäusern entsprechend der unterschiedlichen Funktionsbereiche sind allgemeingültige Anforderungen an effiziente RLT-Anlagen auf Krankenhaus-Lüftungsanlagen gleichermaßen anwendbar. In [Kah et. al 2010] wurden Anforderungen an ein energieeffizientes Lüftungskonzept im Nichtwohnbau erarbeitet, hier in Auszügen:

- Lüftungsgeräte mit hochwertiger Wärmerückgewinnung sind zu verwenden. Wärmebereitstellungsgrade $\geq 75\%$ (Empfehlung $\geq 80\%$) sind auch bei Lüftungsanlagen $> 600\text{ m}^3/\text{h}$ möglich. Die Ermittlung des Wärmebereitstellungsgrades erfolgt fortluftbezogen entsprechend der Energiebilanz des Gebäudes und unter Berücksichtigung der Eigenschaft des kompletten Gerätes also mit Ventilatoren und Gehäuse. Der Wärmebereitstellungsgrad kann nur messtechnisch bestimmt werden. Es sind daher messtechnisch nachgewiesene Energiekennwerte zu verwenden. Wenn nur berechnete Auslegungswerte zur Verfügung stehen, kann das PHI den Wärmebereitstellungsgrad abschätzen (Ansatz mit angemessenem Sicherheitsabschlag).

Eine Liste zertifizierter Zentralgeräte findet sich auf der Homepage des Passivhaus Instituts (www.passiv.de) unter dem Menüpunkt „Zertifizierung“.

- Effiziente Lüftungsgeräte einsetzen. Empfehlung für die elektrische Effizienz p_{el} (Leistungsaufnahme des Lüftungsgerätes bezogen auf den Zuluftvolumenstrom): $0,45 \text{ Wh/m}^3$
- Kanalsystem auf geringe Druckverluste auslegen, damit das RLT-Gerät auch entsprechend effizient betrieben werden kann. Der Druckverlust von Zuluft- bzw. Abluftstrang des Lüftungssystems (Kanalnetz, Wetterschutzgitter, Schalldämpfer, Kühler, Erhitzer und Luftverteilung) sollte jeweils 250 Pa nicht überschreiten.
- Geringe interne/ externe Leckagen: Die Leckagen im Lüftungsgerät sollten aus energetischer Sicht 3 % nicht übersteigen.
- Die Lüftung muss hygienisch sein: Das Lüftungsnetz ist immer trocken und daher bezüglich der Hygiene unproblematisch zu halten. Wird die Lüftung in einem Zustand hoher Außenluftfeuchten abgeschaltet, kann es zu hygienisch bedenklichen Feuchten am Filter kommen. Zur Vermeidung einer dauerhaften Durchfeuchtung des Außenluftfilters (besonders von Lüftungsanlagen, die nur intermittierend betrieben werden) empfiehlt das Passivhaus Institut vor Abschaltung des Geräts eine Filtertrocknung durch Zulufrückführung:

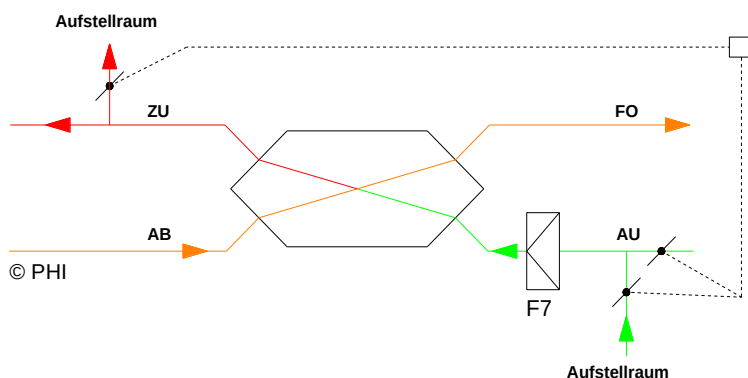


Abbildung 27:
Filtertrocknungsstrategie
durch Zulufrückführung
(schematisch)

- Außerhalb des Lüftungsbetriebs sollten Außen- und Fortluftkanäle durch geeignete Klappen verschlossen sein: Lüftungsklappen in diesen Kanälen sind für Filtertrocknungsstrategien ohnehin erforderlich. In der Regel sind die Klappen bereits im Zentralgerät integriert, energetisch besser ist eine Anordnung in der Dämmebene.
- Die Lüftungsanlage muss in Balance betrieben werden (genauer Balance von Außenluft- / Fortluftmassenstrom). Eine Disbalance und damit eine erzwungene In- und Exfiltration erhöht die Lüftungswärmeverluste (zur Druckhaltung muss im Krankenhaus in bestimmten Bereichen hiervon abgewichen werden):
 - Im Zuge der Inbetriebnahme sind die Volumenströme einzuregulieren.
 - Das Lüftungsgerät sollte über einen automatischen Balanceabgleich verfügen.

9.4 Wärmerückgewinnung aus der Abluft – Anforderungen entsprechend der unterschiedlichen Funktionsbereiche

Besondere Anforderungen an die Wärmerückgewinnung (WRG) bestehen im Krankenhaus nur in Bereichen, in denen kein raumübergreifender Umluftbetrieb zulässig ist und erhöhte hygienische Anforderungen bestehen: „in Räumen, in denen kein raumübergreifender Umluftbetrieb zulässig ist und erhöhte hygienische Anforderungen bestehen, sind ausschließlich WRG-Systeme zulässig, bei denen keine Stoffübertragung möglich ist“ [DIN 1946-4].

Zu diesen hygienisch sensiblen Bereichen zählen die OP-Räume inklusive der angrenzenden Räume sowie Isolier- und Infektionszimmer.

Für alle anderen Funktionsbereiche bestehen keine speziellen Anforderungen bezüglich der WRG.

Wenn diese Bereiche erhöhter Anforderungen an die WRG jeweils über separate Raumlufthechnische-Anlagen (RLT-Anlagen) belüftet würden, könnte die Lüftungsanlage für die übrigen Funktionsbereiche mit einer hochwertigen WRG ausgestattet werden. Anderenfalls käme als Wärmerückgewinnungssystem für eine zentrale Lüftungsanlage nur ein Kreislaufverbundsystem in Frage.

9.4.1 Isolierzimmer/ Infektionszimmer

Spezielle Anforderungen bezüglich der WRG bestehen nach DIN 1946-4 aus hygienischen Gründen beispielsweise für Isolierzimmer und Infektionszimmer: Im erstgenannten Bereich muss ein Keimeintrag aus der übrigen Station in den zu schützenden Bereich verhindert werden. Bei Infektionszimmern muss dagegen eine Übertragung von Krankheitserregern aus dem Infektionsbereich heraus in die übrige Station verhindert werden.

Um die Übertragung von Keimen und Krankheitserregern über den Luftweg vollständig auszuschließen, gibt es verschiedene Ansätze:

- Eine RLT-Anlage für alle Bereiche der Station mit einem Kreislaufverbundsystem für die Wärmerückgewinnung (Abluftstrom und Zuluftstrom verlaufen 100 % getrennt voneinander)
- Isolierzimmer und Infektionszimmer werden jeweils separat be- bzw. entlüftet. Das Isolierzimmer würde demnach mit einer Nur-Zuluft-Anlage, das Infektionszimmer mit einer Nur-Abluft-Anlage (jeweils ohne WRG) ausgestattet werden. Überströmung sowie Nachströmung erfolgen über eine Schleuse zum Stationsflur.

- Isolierzimmer und Infektionszimmer werden jeweils mit einer separaten Zu-Abluftanlage mit hochwertiger WRG ausgestattet.

Vergleicht man die Unterschiedlichen Ansätze energetisch unter Annahme folgender Randbedingungen,

- WRG Kreislauf-Verbund-System (KVS) = 70 % (entspricht einem energetisch hochwertigem Produkt dieser Wärmeübertragungsart)
- WRG für getrennte Anlagen = 80 % (entspricht dem gegenwärtigen Stand der Technik für hochwertige Wärmerückgewinnungsgeräte > 600 m³/h)
- Nur-Abluft, bzw. Nur-Zuluft für einzelne Bereiche: WRG = 0 %,

so ergeben sich die in Abbildung 28 dargestellten spezifischen Lüftungswärme-verluste je m² und Jahr für die gesamte Pflegestation. Grundlage der Untersuchung war das Raumprogramm der Planung des Klinikums in Frankfurt Höchst.

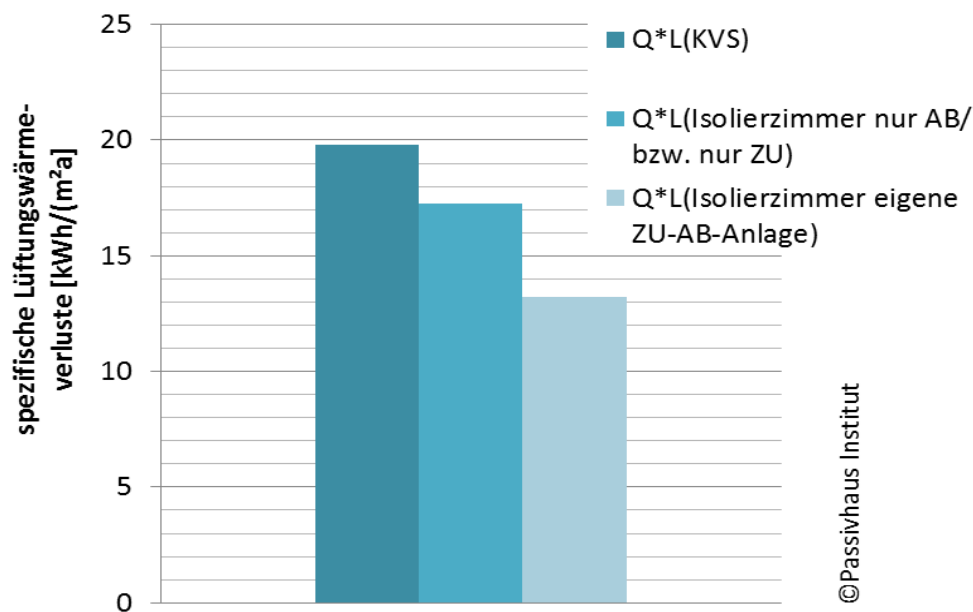


Abbildung 28: Spezifischer Lüftungswärmeverluste Q^*L einer Pflegestation (unter Annahme des Raumprogramms gemäß der Planung des Klinikum in Frankfurt Höchst) für unterschiedliche Konzepte der Integration der Lüftung von Bereichen in denen kein raumübergreifender Umluftbetrieb zulässig ist:

KVS: eine RLT-Anlage für gesamte Station mit Kreislauf-Verbund-System (WRG=70 %);

Isolierzimmer nur AB/ bzw. nur ZU: Isolierzimmer und Infektionszimmer werden jeweils separat be- bzw. entlüftet (WRG=0 %);

Isolierzimmer eigene ZU-AB-Anlage: Isolierzimmer und Infektionszimmer werden jeweils mit einer separaten Zu-Abluftanlage mit hochwertiger WRG ausgestattet (WRG gesamte Station = 80 %)

Von knapp 20 kWh/(m²a) kann der spezifische Lüftungswärmeverlust um 13 % auf ca. 17 kWh/(m²a) reduziert werden, nur durch die separate Be- und Entlüftung der Infektions- und Isolierzimmer mit separater Nur-Ab-bzw. Nur-Zuluft-Anlage. Erfolgt die separate Be- und Entlüftung jeweils mit einer separaten Zu-Abluftanlage mit hochwertiger WRG, so kann der spezifische Lüftungswärmeverlust der Station um insgesamt 33 % auf ca. 13 kWh/(m²a) reduziert werden.

9.4.2 Operationssaal

Bei der Belüftung von Operationsräumen gelten spezielle Anforderungen an die WRG, wenn nur eine Lüftungsanlage mehrere OP-Räume versorgt. In Tabelle 7 sind Unterschiede für ein zentrales und dezentrales Lüftungskonzept dargestellt.

Dezentrales Lüftungskonzept	• Jeder OP erhält eine eigene Lüftungsanlage • Umluft im dezentralen RLT-Gerät zulässig • WRG nicht eingeschränkt • Bsp.: Neubau
Zentrales Lüftungskonzept	• Eine Lüftungsanlage versorgt mehrere Operationsräume • Umluft im Zentralgerät nicht zulässig • WRG beschränkt auf Systeme ohne Luftübertragung • Bsp.: typischer Sanierungsfall

Tabelle 7: Zentrales und dezentrales Lüftungskonzept für OP-Räume

Wenn jeder OP mit einer eigenen Lüftungsanlage be- und entlüftet wird, darf die Abluft aus dem OP-Raum auch für den Umluftbetrieb genutzt werden, die Art der Wärmerückgewinnung wird in diesem Fall gemäß DIN 1946-4 nicht eingeschränkt.

Der Vorteil der dezentralen Belüftung der OP-Räume liegt neben der freien Wahl des Wärmerückgewinnungssystems vor allem in der Betriebssicherheit: fällt auf Grund von technischen Störungen eine Anlage aus, fällt nur dieser eine OP für den momentanen Betrieb aus. Die übrigen OP-Räume können normal weiter betrieben werden.

Wenn eine Lüftungsanlage mehrere OP-Räume versorgt, darf im Zentralgerät keine Umluft gefahren werden, Umluft darf lediglich dezentral über Umluftmodule direkt im OP gefördert werden. Die Wärmerückgewinnung wird aus hygienischen Gründen

eingeschränkt auf Systeme „bei denen keine Stoffübertragung möglich ist“ [DIN 1946-4].

Ein energetischer Vergleich der unterschiedlichen Lüftungskonzepte auch in Abhängigkeit der entsprechenden Raumklasse folgt im nächsten Abschnitt.

9.5 Lüftung im Operationssaal

9.5.1 Lüftungskonzepte in Abhängigkeit der Raumklasse nach DIN 1946-4

Nach DIN 1946-4 werden für Operationsräume in Abhängigkeit der Anforderung an die Keimarmut unterschiedliche Raumklassen definiert, aus denen sich unterschiedliche Anforderungen an die Zuluftqualität sowie die Zuluftteinbringung ergeben. Die Raumklassen der OP-Abteilung werden in Tabelle 8 erläutert.

Raum- klasse	Beschreibung	Luftechnische Anforderungen und Maßnahmen
1	Operationsraum	Außenluftvolumenstrom $\geq 1200 \text{ m}^3/\text{h}$, dreistufige Filterung mit endständiger H13-Filterung
	1a OP-Raum mit hoher hygienischer Anforderung, in dem Partikel- und Keimeintrag in den Schutzbereich zu minimieren sind	Turbulenzarme Verdrängungsströmung (TAV) etwa $3,2 \times 3,2 \text{ m}^2$ über dem gesamten Schutzbereich Gesamtluftmengen bis zu $9200 \text{ m}^3/\text{h}$ erforderlich um Mindest-Zuluftgeschwindigkeit sicherzustellen
	1b OP-Raum ohne definierten Schutzbereich	Turbulente Misch- oder Verdrängungsströmung
2	sonstige Räume einer OP-Abteilung	Außenluftvolumenstrom $40 \text{ m}^3/\text{h}$ je Person zweistufige Filterung Zuluftversorgung kann durch Überströmung aus dem angrenzenden OP-Raum erfolgen

Tabelle 8: Luftechnische Anforderungen in Abhängigkeit an die Raumklasse nach DIN 1946-4

Generell besteht in Operationsräumen auf Grund der Anästhesiegase ein hoher Außenluftbedarf von $\geq 1200 \text{ m}^3/\text{h}$. In der zu den OP-Räumen gehörigen Ein- und Ausleitung besteht prinzipiell ein ebenso hoher Außenluftbedarf. Da der hohe Außenluftbedarf zur Abfuhr der Anästhesiegase aber nur entweder im OP-Raum oder in der Ein- und Ausleitung benötigt wird, empfiehlt [RLT-KH] eine Zuluftversorgung der Vorräume durch Überströmung aus dem OP-Raum zu realisieren. Die Vorräume der OP-Räume werden dann zum Bilanzausgleich mit der gleichen Abluftmenge beaufschlagt.

In Operationsräumen der Raumklasse 1b kann die Zuluft als turbulente Mischströmung in den Raum eingebracht werden. Häufig wird zur besseren Kompensation der Kühllast im Sommer auch hier noch ein zusätzlicher Umluftstrom von $800 \text{ m}^3/\text{h}$ geplant.

In Operationsräumen der Raumklasse 1a wird eine turbulenzarme Verdrängungsströmung (TAV) von etwa $3,2 \times 3,2 \text{ m}^2$ über dem gesamten Schutzbereich gefordert um den Partikel- und Keimeintrag zu minimieren. Es gibt zwei Systeme, welche diese Anforderungen erfüllen können:

1) gemäß Herstellerempfehlungen		Laminar-Air-Flow (LAF)	Differentialflow	
			Mittelfeld ($2 \times 0,8 \text{ m}^2$)	Randbereich
Geschwindigkeit 1)	m/s	0,25	0,4	0,2
Resultierender Zuluft-Volumenstrom gesamt	m^3/h	9200	8500	
Minimale Untertemperatur der Zuluft gegenüber Raumluft 1)	K	$\geq 1 \text{ K}$	$\geq 0,5 \text{ K}$	

Tabelle 9: Unterschied der Auslegung eines Laminar-Airflow-Auslasses und eines Differentialflow-Auslasses am Beispiel einer Deckengröße $3,2 \times 3,2 \text{ m}^2$

Beim Luftauslasssystem Laminar-Airflow (LAF) ist das Ziel, eine gleichmäßige turbulenzarme Verdrängungsströmung über die gesamte Auslassfläche zu erzeugen. Bei einem Auslasselement der Größe $3,2 \times 3,2 \text{ m}^2$ ergibt sich rechnerisch zur Erzielung einer Ausströmgeschwindigkeit von $0,25 \text{ m/s}$ ein erforderlicher Zuluftvolumenstrom von $9200 \text{ m}^3/\text{h}$, welcher sich zusammensetzt aus $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ Außenluft sowie $8000 \text{ m}^3/\text{h}$ Umluft. Laut Herstellerangaben ist zur Erzielung einer

stabilen Strömung eine Untertemperatur von mindestens 1 K gegenüber der Raumlufttemperatur erforderlich.

Beim Luftauslasssystem Differentialflow ist das Ziel durch eine Zwei-Zonen-Zuluftverteilung eine bessere Verdrängungsströmung zu erzielen. Im Kernfeld ca. 2 m x 0,8 m ist die Ausblasgeschwindigkeit mit 0,4 m/s doppelt so hoch wie im Randbereich. Bei einem Auslasselement 3,2 x 3,2 m² ergibt sich rechnerisch zur Erzielung der entsprechenden Geschwindigkeiten ein Zuluftvolumenstrom von 8500 m³/h, welcher sich zusammensetzt aus 1200 m³/h Außenluft sowie 7300 m³/h Umluft.

Durch den etwas geringeren Gesamtluftvolumenstrom beim Auslasssystem Differentialflow reduziert sich entsprechend auch die Leistungsaufnahme für die Förderung des Umluftvolumenstroms.

Anmerkung: Die Ermittelten Volumenströme können je nach Deckensystem konstruktionsbedingt leicht abweichen.

OP-Räume, welche die Raumklasse 1a erfüllen, sind nach DIN 1946-4 nur für wenige Operationen, bei denen nachweislich ein hohes Infektionsrisiko besteht, tatsächlich erforderlich. Wird ein OP-Raum jedoch sowohl für hochaseptische Operationen als auch für hygienisch weniger anspruchsvolle Operationen genutzt, müssen nach DIN 1946-4 die Anforderungen an einen OP-Raum der Raumklasse 1a eingehalten werden.

Dagegen ist die Zweckmäßigkeit von Lüftungsdecken zur Vermeidung von postoperativen Wundinfektionen / Infektionen aktuell in der Diskussion: Nach der Neufassung der DIN 1946-4:2008, stellt die Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention (KRINKO) fest: "Die Studienlage zum infektionsprophylaktischen Effekt von raumlufttechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) mit turbulenzarmer Verdrängungsströmung zeigt gegenwärtig (Stand 12/2009) keinen Vorteil in Bezug auf die Prävention von postoperativen Wundinfektionen / Infektionen im Operationsgebiet (Kategorie III, keine Empfehlung, ungelöste Frage). Eine Differenzierung in Raumklasse 1a und 1b ist somit unter diesem Gesichtspunkt nicht gerechtfertigt." [RKI 2010]. Die Untersuchungen basieren auf Zahlen zu real durchgeführte Operationen.

Eine vergleichende Untersuchung unterschiedlicher OP-Lüftungssysteme der Hochschule Luzern widerlegte die Ergebnisse der o.g. Studie mit Laborprüfungen, die unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt worden. Demnach könne die Kernfragestellung der Untersuchungen, ob eine TAV-Lüftung unter praxisnahen Bedingungen bessere Luftverhältnisse für Patient und Personal ermöglicht als andere Lüftungskonzepte, eindeutig mit "Ja" beantwortet werden [Külpmann2013].

Die Frage nach der Zweckmäßigkeit von TAV-Systemen im OP-Saal ist also bis heute nicht abschließend geklärt. Aus energetischer Sicht wäre es wünschenswert, wenn das energetisch aufwendige TAV-System zukünftig nur dann eingesetzt würde, wenn aus medizinischer Sicht dafür Notwendigkeit besteht und die Zweckmäßigkeit des Systems auch tatsächlich gegeben ist.

9.5.2 Gerätekonzept

9.5.2.1 Anordnung der Gerätekomponenten

In einem OP-Raum der Raumklasse 1a ist zur Sicherstellung der Schutzwirkung im Schutzbereich und zur Bereitstellung des hohen Zuluftvolumenstroms ein Umluftanteil von mehr als $3/4$ des Gesamtvolumenstroms erforderlich. Üblicherweise werden für die Förderung des Luftvolumenstroms zwei Ventilatoren vorgesehen: je ein Ventilator in der Außenluft und ein Ventilator im Abluftstrang. Der Abluftventilator ist in dem Fall raumseitig gesehen vor der Umluftklappe anzuordnen. Eine Umluftklappe teilt dann den Abluftstrom in Fortluft und Umluft auf.

Nachteilig an der Umluftförderung in diesem Fall ist, dass der Fortluftvolumenstrom und damit die Balance des Gerätes nicht genau definiert sind. Der Betrieb der Lüftungsanlage mit balancierten Massenströmen ist im Krankenhaus nicht nur aus energetischer Sicht relevant, sondern vor allem zur Sicherstellung des erforderlichen Außenluftwechsels und der Schutzdruckhaltung von Bedeutung.

Der Abluftventilator (raumseitig vor der Umluftklappe platziert) fördert sowohl die Summe aus Umluftvolumenstrom und Abluftvolumenstrom. Die Volumenstrombestimmung der Umluft anhand der Klappenstellung ist denkbar ungenau.

Mit vertretbarem Aufwand lässt sich der Volumenstrom mittels Wirkdruckmessung an der Ventilatoreinströmdüse bestimmen.

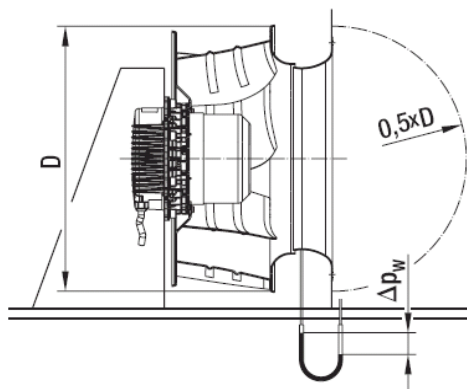


Abbildung 29:
Prinzip der Wirkdruckmessung Δp_w an der Ventilatoreinströmdüse: Der Volumenstrom kann aus der Differenz von statischem Druck vor und in der Einströmdüse ermittelt werden. (Quelle: Produktinformationen ebm-papst GmbH & Co. KG)

Um alle Luftströme (Außenluft, Fortluft und Umluft) genau bestimmen und das Gerät balanciert betreiben zu können, ergibt sich als Konsequenz die Empfehlung einer Geräteausstattung mit insgesamt drei Ventilatoren.

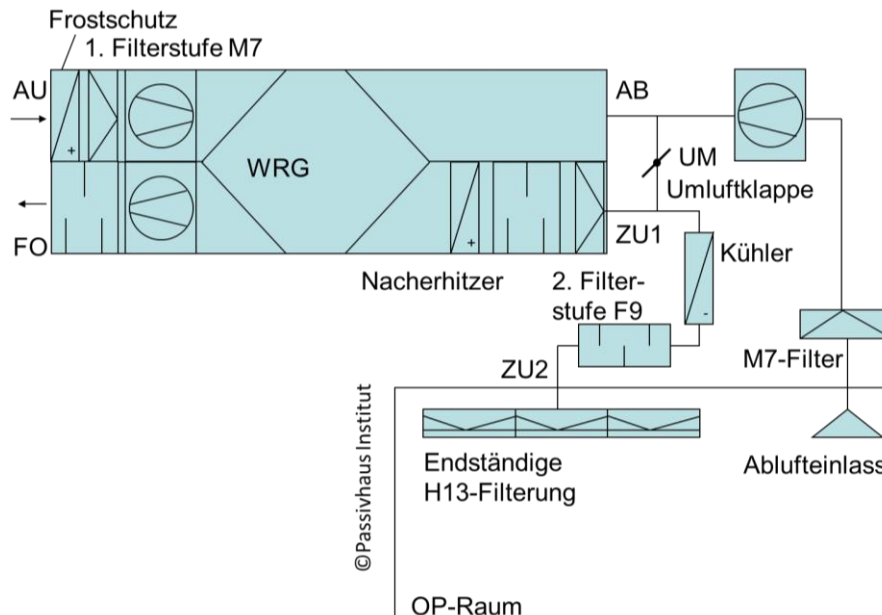


Abbildung 30: Gerätekonzept für die dezentrale Belüftung eines Operationsraumes der Klasse 1a mit Umluftbetrieb

Alternativ zum dezentralen Gerätekonzept kann der hygienisch erforderliche Mindestluftwechsel natürlich auch über eine zentrale RLT-Anlage gefördert werden. Zu beachten sind in dem Fall die bereits erwähnten Einschränkungen bezüglich der Wärmerückgewinnungseinheit. Der Umluftanteil würde in dem Fall dezentral direkt im OP über Umluftmodule (für Deckeninstallation und Wandinstallation erhältlich) gefördert.

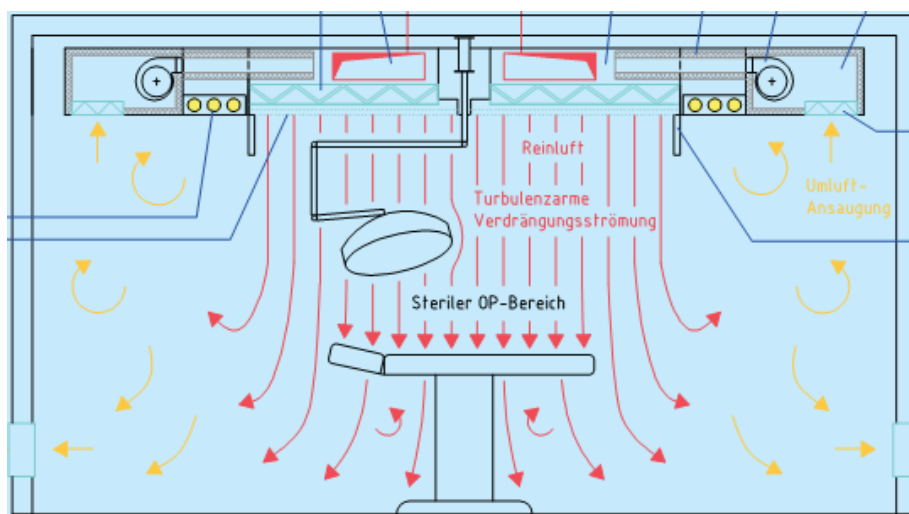


Abbildung 31: Prinzipdarstellung eines OP-Lüftungssystems mit Umluftmodulen im Schnitt (Quelle: LMC Medical Components GmbH)

Um den Außenluftwechsel nicht über die hygienisch notwendigen 1200 m³/h zu erhöhen, sind ausreichend dimensionierte dezentrale Umluftgeräte erforderlich. Konstruktionsbedingt ist die Umluftleistung der Umluftmodule, welche direkt an die OP-Lüftungsdecke angeschlossen werden, begrenzt und unterschreitet möglicherweise den erforderlichen Umluftbedarf. In diesem Fall sind Zusatzmaßnahmen erforderlich, um den Umluftanteil zu erhöhen, z. B. durch zusätzliche Entnahme von deckennaher Raumluft und Beimischung in den Zuluftkanal.

Ist zur Sicherstellung einer bestimmten Raumluftfeuchte ein Befeuchtungssystem notwendig, so ist dieses in der Umluft nach dem Kühler anzuordnen. Aus hygienischen Gründen dürfen im Operationssaal nur Dampfbefeuchter eingesetzt werden.

9.5.2.2 Elektrische Leistungsaufnahme der Ventilatoren

Aufgrund der unterschiedlichen Luftwege und damit auch der verschiedenen Druckverluste für den Umluft-, Außenluft- und Fortluftstrang erscheint es zweckmäßig, die Anforderung an die Stromeffizienz der Ventilatoren für jeden Strang getrennt zu betrachten.

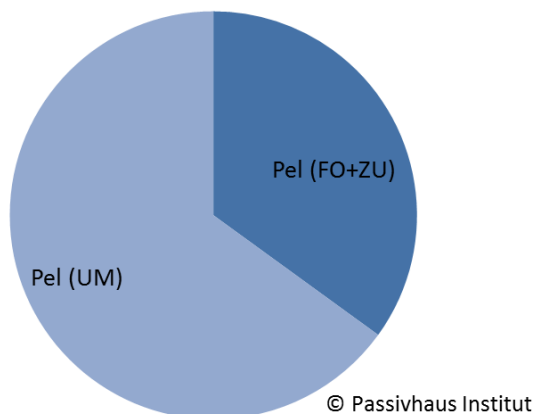


Abbildung 32: Aufteilung der elektrischen Leistungsaufnahme in einem OP-Lüftungsgerät

In Tabelle 10 sind die Komponenten der einzelnen Luftstränge eines OP-Lüftungsgeräts für Raumklasse 1a aufgeführt. Angesichts des enorm hohen Umluftanteils (bis zu 8000 m³/h), zur Erfüllung der Anforderungen an die Schutzwirkung im Operationsfeld und den damit verbundenen hohen elektrischen Leistungsbedarf für den Umluftanteil, lohnt ein genauerer Blick auf die Komponenten im Umluft-Strang.

Komponente	Außenluft-Zuluft-Strang	Abluft-Fortluft Strang	Umluft-Strang
Vorheizregister	X		
1. Filterstufe M7	X	X	X
WRG	X	X	
Nachheizregister	X		
Schalldämpfer	X	X	
2. Filterstufe F9	X		
Kühlregister	X		X
3. Filterstufe H13	X		X
Luftdurchlass ZU	X		X
Luftdurchlass AB		X	X
Sonstiges: Kanalnetz, Wetterschutzgitter, Schalldämpfer...	X	X	X
Summe der Druckverluste der Einzelkomponenten (geräteintern + extern)¹⁾	560 Pa	320 Pa	250 Pa
Ableitung der Anforderung an die spezifische Ventilatorleistung SFP	0,45 Wh/m³ (in Summe)		0,15 Wh/m³

Tabelle 10: Einzelkomponenten eines OP-Lüftungsgerätes je Strang; Randbedingung:

Ventilatorwirkungsgrade $\eta(\text{Umluft}) = 0,6$ und $\eta(\text{Zuluft/Fortluft}) = 0,55$

¹⁾ **Werte basieren auf der Annahme einer effizienten, druckverlustarmen Dimensionierung der Einzelkomponenten, angesetzte Druckverluste siehe Anhang**

Die Aufteilung der Druckverluste auf die einzelnen Stränge aufgrund der Komponentenanzahl sowie die Druckverlustanteile der einzelnen Komponenten im Umluft-Strang sind in Abbildung 33 dargestellt. Hier wird zunächst nicht näher auf die Druckverluste der Einzelkomponenten eingegangen, es wird von einer effizienten und druckverlustarmen Dimensionierung der Einzelkomponenten ausgegangen. Die Energieeinsparpotentiale bei druckverlustarmer Dimensionierung der Einzelkomponenten werden in Abschnitt 9.6 untersucht.

Basierend auf den Druckverlusten der verschiedenen Stränge kann folgende Anforderung an die spezifische Ventilatorleistung definiert werden:

- **Außenluft-Zuluft-Strang + Abluft-Fortluft-Strang in Summe 0,45 Wh/m³**
- **Umluft-Strang 0,15 Wh/m³**

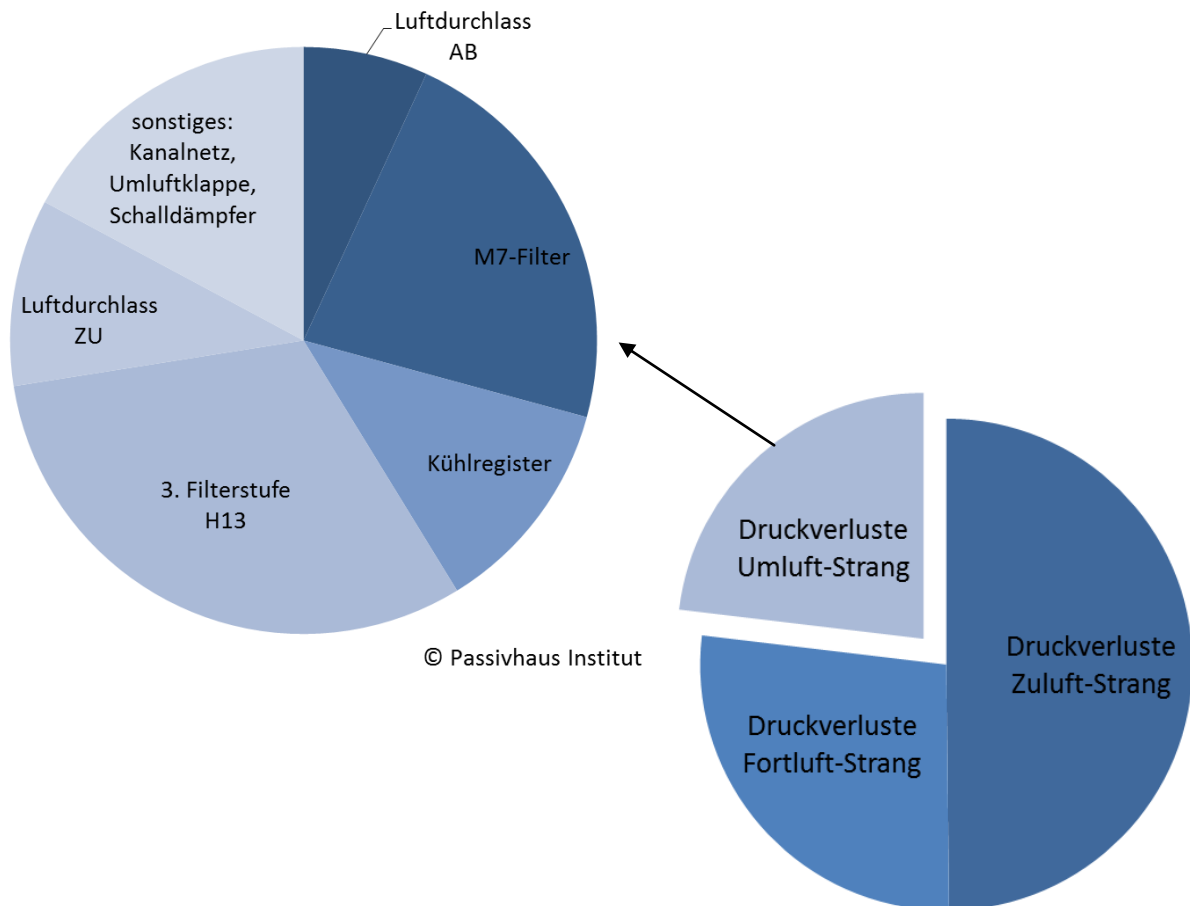


Abbildung 33: Aufteilung der Druckverluste in einem OP-Lüftungsgerät für einen OP-Raum der Raumklasse 1a je Strang (re) und Druckverlustanteile je Komponente im Umluft-Strang (oben)

9.5.3 Energetischer Vergleich unterschiedlicher Systemvarianten unter Berücksichtigung der Kühllast

In Operationsräumen ist zur Erfüllung der Anforderung an die hohe Beleuchtungsstärke (> 1000 lx im gesamten OP nach [DIN EN 12464-1]) üblicherweise eine hohe Beleuchtungsleistung installiert. Diese verursacht einen Großteil der Kühllast im OP. Die Gesamtkühllast schwankt je nach Anzahl der Personen, Art der OP-Leuchten und Umfeldbeleuchtung zwischen etwa 2100 W und 2900 W. Durch die Auswahl effizienterer OP-Leuchten und Umfeldbeleuchtung kann gleichzeitig die elektrische Leistung und die Kühllast im OP reduziert werden. Ein Vergleich der unterschiedlichen Lichtlösungen hinsichtlich des erzielten Lichtstroms bezogen auf die elektrische

Leistung wird im Abschnitt Beleuchtung vorgestellt. Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die angesetzten Leistungen zur Ermittlung der Kühllast im OP.

IWQ	Leistung / Stück Standard- ausstattung [W]	Leistung / Stück effiziente Ausstattung [W]	Anzahl	Σ Leistung Standard- ausstattung [W]	Σ Leistung effiziente Ausstattung [W]
Personen	100	100	5 - 7	500 - 700	500 - 700
OP-Leuchte	250	100	1 - 2	250 - 500	100 - 200
Umfeldbeleuchtung	162	177 ¹⁾	8 - 10	1620	1420
sonstiges: medizinische Geräte, Monitor...	100 -	100 -	1	100 -	100 -
Summe gesamt				2470 - 2920	2120 - >2420

Tabelle 11: Kühllasten in einem OP: Vergleich von üblicher Ausstattung mit effizienter Ausstattung für OP-Leuchte und Umfeldbeleuchtung. Sonstige OP-Ausstattung wurde nur mit einem Wert von 100 W angesetzt; medizinische Anwendungen, die hohe interne Wärmequellen verursachen, müssen zusätzlich berücksichtigt werden.
¹⁾ Die Wattage der Einzelleuchte (LED) ist höher als die der Standardausstattung, jedoch bei einem sehr viel höheren Leuchtenlichtstrom, sodass die Gesamtleuchtenanzahl von 10 Stück auf 8 Stück reduziert werden kann. Quelle: Trilux

Durch den Einsatz von LED-OP-Leuchten kann bei hohem Lichtstrom die Leistungsaufnahme der Leuchte deutlich reduziert werden. Ab Oktober 2013 ist die Reinraum-Einbauleuchte für die Umfeldbeleuchtung des OP-Feldes auch als LED von Trilux verfügbar. Durch zukünftige Optimierungen kann die Leistungsaufnahme möglicherweise noch weiter reduziert werden.

Zur Untersuchung der Möglichkeiten der Kompensation der Kühllast muss zwischen den beiden Raumklassen 1a und 1b unterschieden werden.

9.5.3.1 OP-Raum der Raumklasse 1b

Unter Annahme einer effizienten Beleuchtungsauswahl beträgt die Kühllast in OP-Räumen der Raumklasse 1b ca. 2100 W, mit Standardausstattung ca. 2500 W. Der hygienisch notwendige Luftwechsel in 1b OP-Räumen beträgt 1200 m³/h. Übliche Planungen sehen zur Kompensation der Kühllast jedoch noch einen zusätzlichen Umluftvolumenstrom von 800 m³/h vor, in Summe demnach einen Zuluftvolumenstrom von 2000 m³/h. Die nachfolgende Tabelle vergleicht die erforderliche Untertemperatur der Zuluft in Abhängigkeit des Volumenstroms und der Raum-Kühllast.

Erforderliche Untertemperatur DT [K]	Zuluftvolumenstrom = 2000 m ³ /h	Zuluftvolumenstrom = 1200 m ³ /h
Kühllast = 2500 W	3,7	6,2
Kühllast = 2100 W	3,2	5,3

Tabelle 12: Erforderliche Untertemperatur der Zuluft zur Kompensation der Raumkühllast in Abhängigkeit der Höhe des Zuluftvolumenstroms und der Höhe der Kühlleistung.

Durch die Reduktion der Kühllast auf nur noch 2100 W reduziert sich die erforderliche Untertemperatur bei einem Zuluftvolumenstrom von 1200 m³/h auf 5,3 K. Mit entsprechender Auslassform für eine hohe Raumluftinduktion, kann die Einbringung der Zuluft auch bei dieser Untertemperatur zugfrei erfolgen, indem der Zuluftstrom zunächst parallel zur Decke eingebracht wird. Bis der Luftstrahl in den Aufenthaltsbereich gelangt, hat er ausreichend Raumluft induziert, sodass die Temperaturdifferenz im Aufenthaltsbereich nicht mehr spürbar ist.

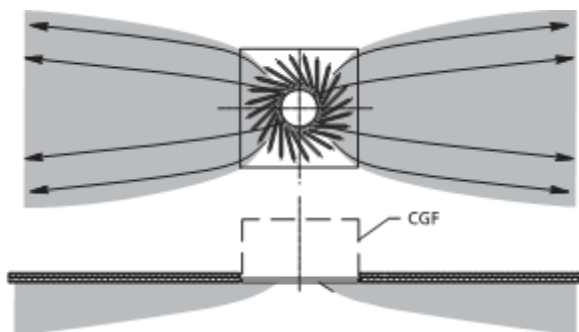


Abbildung 34:
Strömungsbild eines Drallauslasses zur Kaltluftzufuhr: die Jalousieeinstellungen müssen so vorgenommen werden, dass die Einbringung des Zuluftstroms parallel zur Decke erfolgt.
(Quelle: GEA Heat Exchanger)

Die Einsparung des Umluftanteils macht sich natürlich auch in der elektrischen Leistungsaufnahme bemerkbar. Diese reduziert sich bei einem Zuluftvolumenstrom von 1200 m³/h und unter Annahme eines effizienten RLT-Gerätes mit einer Leistungsaufnahme von maximal 0,45 Wh/m³ um 18 % bzw. um 300 kWh/a.

9.5.3.2 OP-Raum der Raumklasse 1a

Die Zuluft einbringung in OP-Räumen der Raumklasse 1a muss zur Aufrechterhaltung der Schutzwirkung ohnehin mit einer gewissen Untertemperatur gegenüber der Raumluft erfolgen. In Abhängigkeit des Lüftungskonzeptes (Laminar-Air-Flow oder Differentialflow) werden von den Herstellern der OP-Decken-Systeme Untertemperaturen $\geq 0,5$ K bis ≥ 1 K empfohlen.

Vergleicht man die internen Wärmequellen mit den Lüftungswärmeverlusten, die sich durch die Untertemperatur der Zuluft gegenüber der Raumluft ergeben, so kommt man schnell zu der Erkenntnis, dass man den OP beheizen müsste, um eine Untertemperatur ≥ 1 K zur Aufrechterhaltung der Strömung realisieren zu können.

ΔT (ZU-AB) [K]	Lüftungswärmeverluste [W]	IWQ Standard [W]	IWQ Effizient [W]	$Q^*_{(H,Stan)}$ [W]	$Q^*_{(H,Eff)}$ [W]
2	6072	2920	2416	3152	3656
1,5	4554	2920	2416	1634	2138
1	3036	2920	2416	116	620
0,9	2732	2920	2416	-188	316
0,8	2429	2920	2416	-491	13
0,7	2125	2920	2416	-795	-291
0,6	1822	2920	2416	-1098	-594
0,5	1518	2920	2416	-1402	-898
0	0	2920	2416	-2920	-2416

Tabelle 13: Raumheizlast $Q^*_{(H,Stan)}$ (Standardbeleuchtung) und $Q^*_{(H,Eff)}$ (effiziente Beleuchtung) im OP als Differenz von Lüftungswärmeverlusten (bedingt durch die Untertemperatur der Zuluft) und internen Wärmequellen unter Annahme einer Gesamtzuluftmenge von 9200 m³/h

Bei herkömmlicher Beleuchtungsausstattung müsste ab einer Untertemperatur von 1 K der Raum über Flächenheizungen an der Wand beheizt werden. Bei effizienter Beleuchtungsausstattung bereits ab einer Untertemperatur von 0,8 K. Das kann in einem Passivhaus-Krankenhaus mit effizientem Lüftungskonzept nicht zielführend sein.

Der Schlüssel liegt hier in der Wahl des Auslasselements. Wie in Tabelle 9 zusammengefasst, werden in Abhängigkeit des OP-Lüftungskonzeptes minimale Untertemperaturen zur Aufrechterhaltung einer stabilen Strömung empfohlen: Für Laminar-Air-Flow-Systeme werden Untertemperaturen ≥ 1 K empfohlen, mit Differentialflow-Systemen ist gemäß Herstellerangaben schon mit einer Untertemperatur von 0,5 K eine stabile Strömung realisierbar. Eine Untersuchung von OP-Lüftungssystemen an der Hochschule

Luzern [Külpmann2013], in der der Schutzgrad auf dem OP-Tisch in Abhängigkeit von der Untertemperatur der Zuluft gegenüber der Raumluft untersucht wurde, kam sogar zu dem Ergebnis, dass auch eine isotherme Einbringung der Zuluft keine Verschlechterung des Schutzgrades zur Folge hat.

Neben dem Vorteil der höheren Schutzwirkung und Strömungsstabilität des Differential-Flow-Systems gegenüber dem Laminar-Air-Flow-System bietet das System des Weiteren den Vorteil des geringeren erforderlichen Zuluftvolumenstroms (folglich der Auslegung nach Tabelle 9). Durch den um ca. 700 m³/h reduzierten Umluftanteil reduziert sich, unter Annahme einer effizienten Umluftführung, die Leistungsaufnahme ebenfalls um 261 kWh/a bzw. um 6 %.

9.5.4 Anpassung der Lüftung an die Nutzungszeiten auch im OP-Bereich?

Der Betrieb der patientenorientierten lokalen Maßnahmen (z. B. TAV) ist im Grunde nur während der Nutzungsdauer des OP relevant. Die Abschaltung der OP-Lüftung außerhalb der Betriebszeiten wird jedoch sowohl für Raumklasse 1a als auch 1b nach [DIN 1946-4] nicht vorgesehen. Außerhalb der Betriebszeiten ist allerdings „eine Reduzierung des Volumenstroms zulässig; dabei ist eine Strömungsumkehr auszuschließen“ [DIN 1946-4]. Die deutsche Gesellschaft für Krankenhaushygiene empfiehlt in diesem Zusammenhang in [RLT-KH] eine Reduktion des Betriebsvolumenstroms auf ca. 30 bis 25 %. Gegenüber eines durchgehenden Betriebs der OP-Lüftungsanlage (außerhalb der Betriebszeiten nur mit Umluft) lässt sich hierdurch Energieverbrauch für den Betrieb der Ventilatoren außerhalb der Betriebszeit um 70 % senken.

In vielen Krankenhäusern im Betrieb wird dieses Potential nicht ausgeschöpft. In einer vom Fraunhofer Institut durchgeführten Untersuchung des Energieverbrauchs in Krankenhäusern [Beier2009] wurde unter anderem die Volumenstromreduktion der OP-Lüftungsanlagen außerhalb der Betriebszeit erfasst. Es zeigte sich, dass bei den untersuchten OP-Bereichen der Betriebsvolumenstrom außerhalb der Betriebszeiten nur auf durchschnittlich 55 % abgesenkt wurde.

Durch eine Abschaltung der OP-Lüftung außerhalb der Betriebszeiten könnte der Stromverbrauch für die Ventilatoren weiter reduziert werden. Nach [ÖNORM 6020] ist die Abschaltung außerhalb der Betriebszeiten durchaus erlaubt, sofern die Lüftungsanlage schon 30 min vor OP-Betrieb zur Vorspülung eingeschaltet wird. In [Dettenkofer2003] wurde nachgewiesen, dass Partikelkonzentrationen, die den Anforderungen an den Operationsbetrieb genügen, schon bereits 10 min nach Wiedereinschaltung der Lüftungsanlage erzielt werden. Der Energieverbrauch der OP-Lüftungsanlage außerhalb der Betriebszeiten ließe sich durch diese Maßnahme in Bezug auf den reduzierten Betrieb (mit 30 % Betriebsvolumenstrom außerhalb der

Betriebszeiten) um mehr als 80 % reduzieren. Der Jahresendenergieverbrauch der unterschiedlichen Betriebsweisen ist in Abbildung 35 dargestellt.

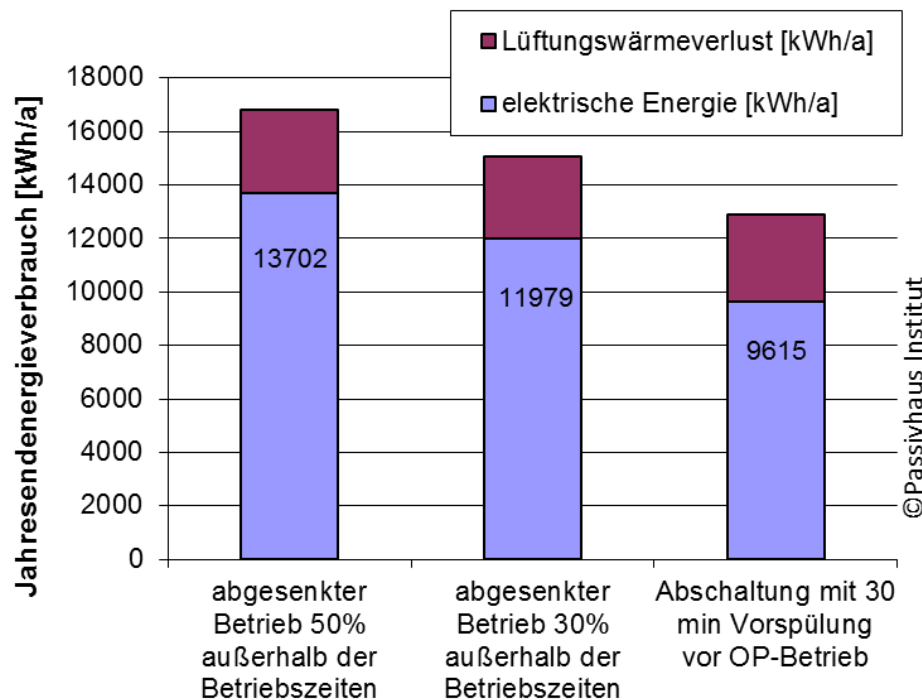


Abbildung 35: Energetische Auswirkungen unterschiedlicher Betriebsweisen der OP-Lüftungsdecken am Beispiel eines OP der Raumklasse 1a (Randbedingungen: 10 h Betrieb pro Tag an 252 Tagen pro Jahr, 1200 m³/h Außenluft mit SFP = 0,45 Wh/m³, 8000 m³/h Umluft mit SFP = 0,15 Wh/m³, GT = 78 kWh)

9.5.5 Befeuchtung im Operationssaal

Häufig wird trotz der hohen Luftwechselraten in Operationsräumen keine Raumluftbefeuchtung vorgesehen. In [ASR2012] wird im Allgemeinen auch keine Befeuchtung gefordert. In einigen Krankenhäusern wird, aus hygienischen Gründen, eine Befeuchtung der Zuluft sogar strikt abgelehnt, denn selbst bei der nach DIN 1946-4 zulässigen Dampfbefeuchtung könne sich im ungünstigsten Fall Kondensat an der Kanalwand niederschlagen.

Je nach Anforderungen an Behaglichkeit und Hygienekonzept ergeben sich folgende Möglichkeiten:

1) Keine Befeuchtung und keine Feuchterückgewinnung

- Aus hygienischer Sicht völlig unbedenklich.
- In diesem Fall werden im Kernwinter eventuelle Behaglichkeitseinbußen in Kauf genommen.

2) Befeuchtung mit Dampf

- Nach DIN 1946-4 zulässige Befeuchtungsart.
- Auf korrekten Einbau und Dimensionierung muss aus hygienischen Gründen besonders geachtet werden.

3) Dampfbefeuchtung mit unterstützender Feuchterückgewinnung (FRG) im Zentralgerät

- Wärmeübertragung mit FRG nur zulässig, wenn jeder Operationssaal mit einer eigenen Lüftungsanlage ausgestattet wird.
- Einsatz der FRG muss mit zuständigem Hygieniker abgestimmt werden.

Bei einer vergleichenden Berechnung des Befeuchtungsbedarfs der Varianten 2 und 3 zeigte sich, dass der Befeuchtungsbedarf beim Einsatz eines Systems zur FRG unter folgenden Randbedingungen:

- Durchschnittlicher Winter, Klimadatensatz Frankfurt
- Raumtemperatur: 21 °C
- FRG = 60 %
- Feuchtequellen im OP: 6 Personen

auf ca. **70 %** bezüglich des Befeuchtungsbedarfs ohne FRG reduziert werden kann.

9.5.6 Fazit: Lüftung im Operationssaal

Aufgrund des enorm hohen Zuluftvolumenstroms, der für das Lüftungskonzept für einen OP der Raumklasse 1a notwendig ist, sollten OP-Räume dieser Anforderung wirklich nur da vorgesehen werden, wo sie aus medizinischer Sicht auch tatsächlich erforderlich sind. Das Lüftungskonzept für die Raumklasse 1b genügt den Anforderungen für die meisten Operationen.

Wenn schon ein energetisch aufwendiges Lüftungskonzept gemäß den Anforderungen für die Raumklasse 1a installiert werden muss, dann sollte dies so effizient wie möglich betrieben werden:

Das Lüftungssystem basierend auf dem Differentialflow ist energetisch günstiger:

- Der erforderliche Gesamtluftvolumenstrom und damit die elektrische Leistungsaufnahme für die Umluftförderung sind etwas geringer.

- Die erforderliche Untertemperatur zur Sicherstellung einer stabilen Strömung ist mit nur 0,5 K um 0,5 K geringer als für LAF-Systeme. Damit kann auch bei reduzierter Kühllast im OP (durch effizientere Beleuchtungssysteme) die Untertemperatur genau so ausgelegt werden, dass die Kühllast im OP gerade kompensiert wird.

Des Weiteren sollte das Lüftungssystem an die tatsächlichen Nutzungszeiten angepasst werden.

Eine Untersuchung der Betriebsweisen von OP-Lüftungssystemen [Dettenkofer2003] zeigte, dass unter Berücksichtigung einer Vorspülzeit von 30 Minuten auch eine Abschaltung der OP-Lüftungsanlage möglich ist, ohne Erhöhung der Partikelkonzentration und der Schutzwirkung im OP-Bereich während des OP-Betriebs.

Angesichts des hohen Umluftanteils zur Erzielung des Schutzgrades in OP-Räumen der Raumklasse 1a ist eine effiziente, d. h. druckverlustarme Auslegung der Komponenten unerlässlich. Der Umluftanteil der OP-Lüftung sollte möglichst effizient gefördert werden. Dies spart Antriebsenergien und verringert zugleich einen etwaigen Kühlbedarf der OP-Zuluft.

Der nächste Abschnitt zeigt, dass mit entsprechender Dimensionierung der Einzelkomponenten spezifische elektrische Leistungsaufnahmen von 0,45 Wh/m³ für das Zentralgerät (Außenluft-Zuluft-Strang + Abluft-Fortluft-Strang in Summe) sowie 0,15 Wh/m³ für den Umluft-Strang realisierbar sind.

9.6 Auslegung des Lüftungsnetzes unter besonderer Beachtung einer druckverlustreduzierten Dimensionierung

Durch die hohen Luftwechselraten, die im Krankenhaus auf Grund der speziellen Anforderungen an die Lüftung der einzelnen Funktionsbereiche bestehen, ergibt sich natürlicherweise auch ein hoher Energiebedarf für die Bewegung der Luft (einerseits ergeben sich durch erhöhte hygienische Anforderungen hohe Luftmengen, andererseits aber auch zur Kompensation der Kühllasten, verursacht durch medizinische Geräte).

Neben der Anpassung des Lüftungsbetriebs an den tatsächlichen Bedarf birgt der Druckverlust der einzelnen Lüftungskomponenten in dem Zusammenhang ein erhebliches Energieeinsparpotential.

Bauteil	Druckabfall in Pa		
	Niedrig	Normal	Hoch
Luftleitungssystem Zuluft	200	300	600
Luftleitungssystem Fortluft	100	200	300
Heizregister	40	80	100
Kühlregister	100	140	200
Wärmerückgewinnungseinheit H3 ^a	100	150	250
Wärmerückgewinnungseinheit H2-H1 ^a	200	300	400
Befeuchter	50	100	150
Luftwäscher	100	200	300
Luftfilter F5-F7 je Filterstufe ^b	100	150	250
Luftfilter F8-F9 je Filterstufe ^b	150	250	400
HEPA-Filter	400	500	700
Gasfilter	100	150	250
Schalldämpfer	30	50	80
Luftdurchlass	30	50	100
Lufteinlass und -auslass	20	50	70

^a Klasse H1-H3 nach EN 13053.

^b Endgültiger Druckverlust vor Ersatz.

Tabelle 14: Empfehlungen für Druckverluste von Bauteilen in Luftbehandlungseinheiten nach [DIN EN 13779]

In Tabelle 14 sind Druckverluste für Komponenten einer RLT-Anlage angegeben, wie sie nach DIN EN 13779 beispielhaft empfohlen werden. Die Druckverluste werden hier in 3 Kategorien: niedrig, normal und hoch eingeteilt, was die Effizienzkategorie der Komponente in Bezug auf den Strombedarf widerspiegelt. Es zeigt sich, dass ein Großteil des Differenzdrucks einer Lüftungsanlage auf die Filterung der Luft verwendet wird, gerade in Krankenhäusern, in denen in einigen Bereichen sogar eine dreistufige Filterung gefordert wird. Auch für die Luftbehandlungseinheiten Heizen, Kühlen und Wärmerückgewinnung wird nach Tabelle 14 ein erheblicher Druckverlust vorgesehen. Bei genauerer Betrachtung der Druckverluste der Einzelkomponenten zeigen sich hier teils erhebliche Einsparpotentiale.

In einer vom Fraunhofer Institut durchgeführten Untersuchung des Energieverbrauchs in Krankenhäusern [Beier2009] wurde unter anderem die spezifische Ventilatorleistung für Krankenhäuser im Betrieb ermittelt. Durchschnittlich wurde eine spezifische Leistungsaufnahme von 1 Wh/m³ allein für den Zuluftventilator der OP-Lüftungsanlagen angegeben. Für Nicht-OP-Lüftungsanlagen lag der durchschnittliche SFP-Wert bei 1,3 Wh/m³ (für Zuluft- und Abluftventilator zusammen). Im Vergleich dazu wird für Passivhäuser üblicherweise eine spezifische Leistungsaufnahme von 0,45 Wh/m³ für die gesamte Lüftungsanlage empfohlen.

Die folgende Betrachtung der Druckverluste der Einzelkomponenten im Hinblick auf Energieeinsparpotentiale verdeutlicht, dass auch in Krankenhäusern und auch in den Funktionsbereichen mit höheren Anforderungen an die Luftbehandlung eine spezifische Leistungsaufnahme des RLT-Gerätes von 0,45 Wh/m³ realisierbar ist.

9.6.1 Wärmerückgewinnung

In [DIN EN 13053] werden Leistungskennzahlen für zentrale raumluftechnische Geräte definiert, auf diese wird in [DIN EN 13779] auch verwiesen. Unter Anderem werden in Abhängigkeit der Betriebsstunden und des Volumenstroms Anforderungen an die Mindesteffizienz und den maximalen Druckverlust von WRG-Systemen gestellt. Für Lüftungsanlagen mit einem Außenluftvolumenstrom $< 4000 \text{ m}^3/\text{h}$ und 2600 Betriebsstunden pro Jahr ergibt sich als Anforderung für den maximal zulässigen Druckverlust der WRG-Einheit je nach Effizienzklasse ein Wert von **131 Pa** für die beste Effizienzklasse H1 bis **193 Pa** für die Effizienzklasse H4 (bzw. gar keine Anforderung für die Klasse H5), allerdings bedarf es an der Stelle der Erläuterung, dass bei Luftmengen bis $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ nur eine Mindesteffizienz für die WRG von 40 % gefordert wird. Weiterhin werden im Zusammenhang mit Leistungsdaten für Geräte auch Luftgeschwindigkeitsklassen im freien Gehäusequerschnitt definiert.

Klasse	Luftgeschwindigkeit $\text{m} \times \text{s}^{-1}$
Klasse V1	maximal 1,5
Klasse V2	$> 1,5$ bis 2
Klasse V3	> 2 bis 2,5
Klasse V4	$> 2,5$ bis 3
Klasse V5	keine Anforderung
ANMERKUNG Die Luftgeschwindigkeit im Gerät hat einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch. Die Geschwindigkeiten sind für den Querschnitt des RLT-Gerätes berechnet.	

Tabelle 15: Luftgeschwindigkeitsklassen im freien Gerätequerschnitt nach [DIN EN 13053]

Das heißt, die beste Effizienzklasse in Bezug auf die Geschwindigkeit im freien Gerätequerschnitt ist erst ab einer Luftgeschwindigkeit $< 1,5 \text{ m/s}$ erzielbar. Bei einer Gerätedimensionierung mit so geringen Strömungsgeschwindigkeiten fällt das Gerät im Vergleich zum Kanalnetz ohnehin verhältnismäßig groß aus. Damit bietet das Gerät genügend Raum, um auch die WRG druckverlustarm zu dimensionieren. Eine geringere Strömungsgeschwindigkeit im Wärmeübertrager hat neben dem Effekt des geringeren Druckverlustes im gewissen Rahmen auch noch den Vorteil der verbesserten Wärmeübertragung.

Messungen an Lüftungsgeräten, die als Passivhaus-Komponenten zertifiziert wurden, belegen, dass auch im oberen Einsatzbereich Druckverluste $\leq 100 \text{ Pa}$ für den Wärmeübertrager erzielbar sind.

In nachfolgender Abbildung ist der elektrische Leistungsbedarf für die Komponente WRG in Abhängigkeit des Druckverlustes dargestellt.

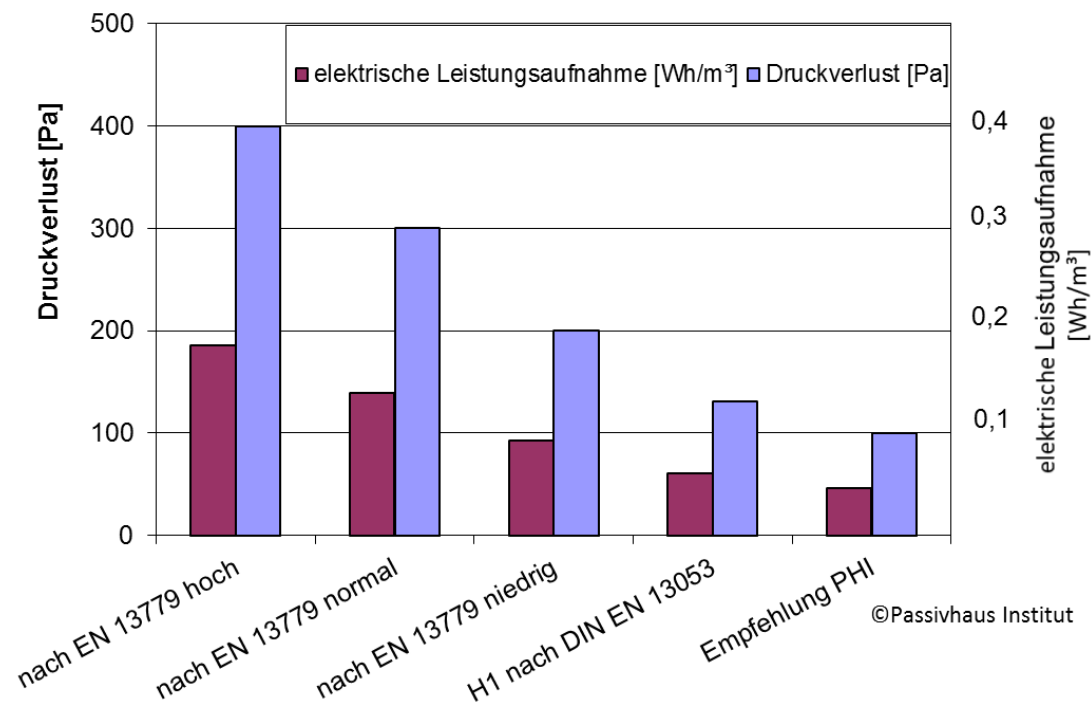


Abbildung 36: Elektrischer Leistungsbedarf für WRG in Abhängigkeit des Druckverlustes am Beispiel eines OP-Saals mit einem Außenluftbedarf von 1200 m³/h: Vergleich von Empfehlungen für den Druckverlust nach [DIN EN 13779] mit der besten Effizienzklasse H1 nach [DIN EN 13053] und den Empfehlungen des PHI

9.6.2 Filterung M7 und F9

Die Filtration der Luft macht in raumluftechnischen Anlagen häufig einen nicht unbedeutenden Teil des Druckverlustes der gesamten Anlage aus. In Krankenhäusern verschärft sich die Situation durch die erhöhten hygienischen Anforderungen, da je nach Funktionsbereich sogar eine zwei- oder dreistufige Filterung gefordert wird.

In [DIN EN 13779] werden Empfehlungen für den maximalen Enddruckverlust der Filter angegeben. Die Empfehlungen reichen von 100 Pa bis 250 Pa für M7-Filter. Um den Energiebedarf für die Filterung zu minimieren, sollte der Enddruckverlust deutlich reduziert werden. Hierfür ist zum einen ein regelmäßiger Filterwechsel (mindestens einmal pro Jahr), zum anderen aber auch eine Begrenzung des Anfangsdruckverlustes notwendig, welcher den Enddruckverlust zusätzlich begrenzt.

Bei entsprechender Filterdimensionierung ist ein Anfangsdruckverlust der M7-Filter von 50 Pa realisierbar, dies belegen Lüftungsgeräte > 600 m³/h, die als Passivhaus-Komponente zertifiziert wurden. Bei einigen Geräten konnte die Anforderung von 50 Pa Anfangsdruckverlust sogar deutlich unterschritten werden.

Der Druckverlust eines Filters wird im Wesentlichen durch seine Filterfläche bezogen auf den Volumenstrom bestimmt. Die Filterfläche eines Filters kann zum einen durch seine Querschnittsfläche aber auch durch Anpassung der Filtertiefe erhöht werden.

In nachfolgender Abbildung werden die energetischen Auswirkungen von M7-Filtern mit unterschiedlichen Betriebsdruckverlusten dargestellt. Mit $0,08 \text{ Wh/m}^3$ ist der elektrische Leistungsbedarf für die Filterung bei einem Betriebsdruck von 265 Pa mehr als doppelt so hoch wie für einen Betriebsdruck von 65 Pa.

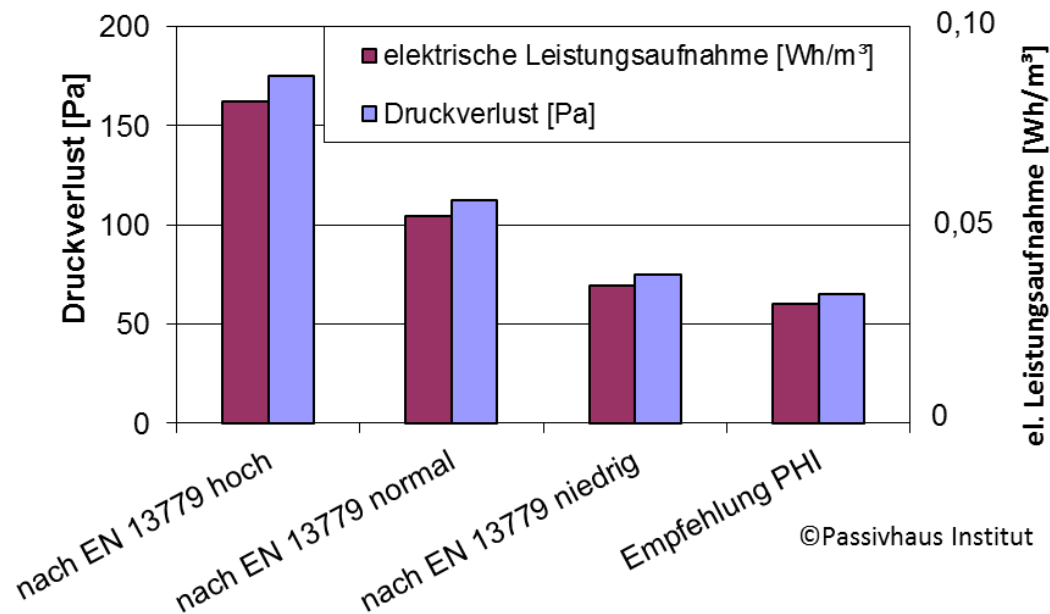


Abbildung 37: Druckverlust und elektrische Leistungsaufnahme für die 1. Filterstufe M7 im Betrieb: Vergleich von Empfehlungen für den Druckverlust nach [DIN EN 13779] und den Empfehlungen des PHI: In [DIN EN 13779] werden Empfehlungen für den maximalen Enddruckverlust der Filter gegeben. Zum Vergleich wurden die Empfehlungen aus [DIN EN 13779] umgerechnet auf einen mittleren Druckverlust unter folgenden Annahmen für die Anfangsdruckverluste: 50 Pa(niedrig), 75 Pa(normal), 100 Pa(hoch) ¹⁾; für die Empfehlungen des PHI wurde angenommen, dass der mittlere Druckverlust der Filter im Betrieb ca. 30 % über dem Anfangsdruckverlust liegt.

¹⁾ In üblichen Planungen werden teilweise noch deutlich höhere Anfangsdruckverluste angesetzt.

Für F9-Filter, welche in Krankenhäusern die empfohlene Filterklasse für die zweite Filterstufe ist, empfiehlt die [DIN EN 13779] Enddruckverluste von 150 Pa bis 400 Pa. Auch hier kann der Energieverbrauch durch einen geringen Anfangsdruckverlust und einen regelmäßigen Filterwechsel deutlich reduziert werden.

In nachfolgender Abbildung werden die energetischen Auswirkungen von F9-Filtern mit unterschiedlichen Betriebsdruckverlusten dargestellt. Der Filter mit dem höchsten Betriebsdruckverlust verursacht hier mit $0,12 \text{ Wh/m}^3$ einen fast dreifachen elektrischen Leistungsbedarf wie ein Filter mit optimiertem Betriebsdruckverlust.

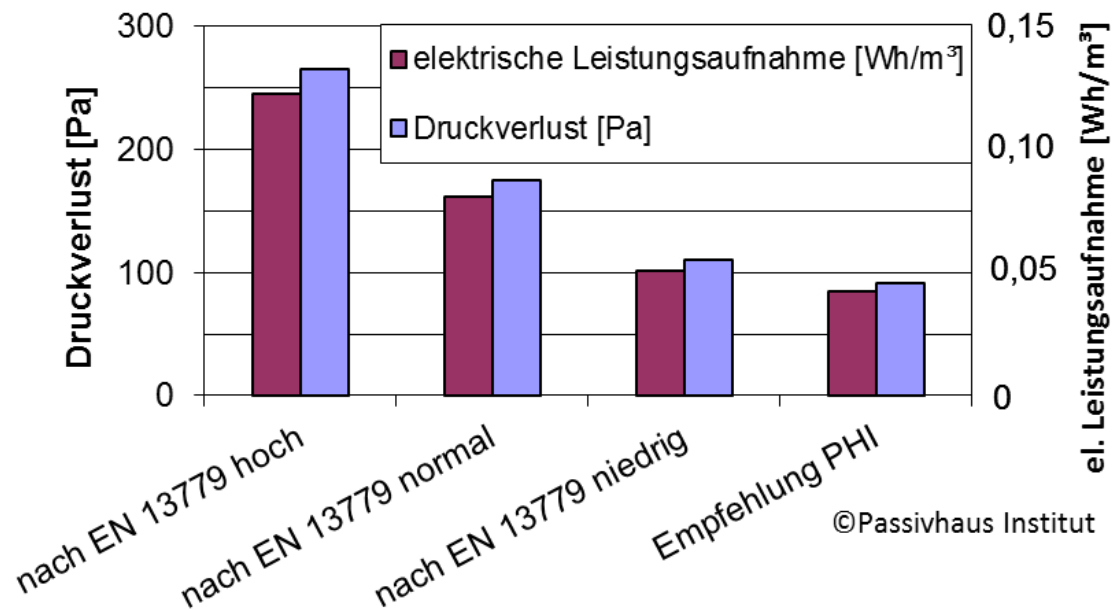


Abbildung 38: Druckverlust und elektrische Leistungsaufnahme für die zweite Filterstufe F9: Vergleich von Empfehlungen für den Druckverlust nach [DIN EN 13779] und den Empfehlungen des PHI: In [DIN EN 13779] werden Empfehlungen für den maximalen Enddruckverlust der Filter gegeben. Zum Vergleich wurden die Empfehlungen aus [DIN EN 13779] umgerechnet auf einen mittleren Druckverlust unter folgenden Annahmen für die Anfangsdruckverluste: 70 Pa(niedrig), 100 Pa(normal), 130 Pa(hoch) ¹⁾; für die Empfehlungen des PHI wurde angenommen, dass der mittlere Druckverlust der Filter im Betrieb ca. 30 % über dem Anfangsdruckverlust liegt.

¹⁾ In üblichen Planungen werden teilweise noch deutlich höhere Anfangsdruckverluste angesetzt.

Neben der Filterfläche hat auch der Filtertyp einen erheblichen Einfluss auf den erzielbaren Druckverlust. Folgende Abbildung verdeutlicht, dass bei gleichem Volumenstrom der Druckverlust deutlich variieren kann. Durch günstigere Anströmbedingungen ist im konkreten Fall der Druckverlust des Kassettenfilters im Vergleich zum Kompaktfiter bei gleichem Volumenstrom stets 10 bis 20 % geringer.

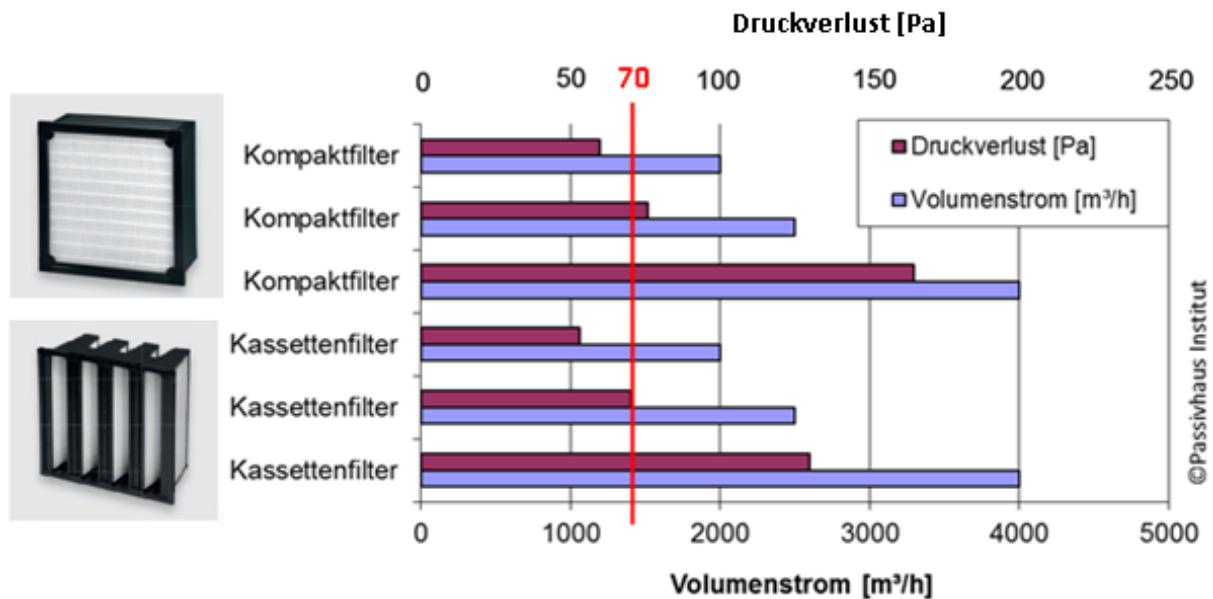


Abbildung 39: Anfangs-Druckverluste marktüblicher Filter der Filterklasse F9 in Abhängigkeit des Volumenstroms und der Filterbauart hier am Beispiel eines Filters für einen Aufnahmerahmen 610 x 610 mm² und einer Filtertiefe von 292 mm (Filterfläche für beide Filter: 18 m²); (Quelle: Produktinformationen Firma Freudenberg)

Für F9-Filter kann demnach bei entsprechender druckoptimierter Dimensionierung die Anforderung an den maximalen Anfangsdruckverlust von 70 Pa für eine energieeffiziente Planung abgeleitet werden.

Fazit: 1. und 2. Filterstufe

Bei entsprechender Filterdimensionierung kann der Druckverlust der Filter und damit auch der elektrische Energiebedarf für diese Komponente deutlich reduziert werden. Anhand von Dimensionierungsbeispielen und Erfahrungen aus der Zertifizierung von Lüftungsgeräten als Passivhaus-Komponenten können folgende Anforderungen an den Anfangsdruckverlust in Abhängigkeit von der Filterklasse für eine effiziente Lüftungsplanung abgeleitet werden:

M7-Filter ≤ 50 Pa (Anfangsdruckverlust)

F9-Filter ≤ 70 Pa (Anfangsdruckverlust)

9.6.3 Endständige Filterung H13

Die endständige Filterstufe H13 verursacht neben der Wärmerückgewinnung den größten Druckverlust. Unter Beachtung der enormen Luftmengen, die in den Funktionsbereichen, in denen eine endständige H13 Filterung zum Einsatz kommt, gefordert wird, wird schnell klar dass eine druckverlustarme Dimensionierung der Filter hier energetisch noch viel größere Auswirkungen hat als bei der ersten und zweiten Filterstufe.

Üblicherweise werden Schwebstofffilter mit einem Anfangsdruckverlust von 250 Pa (Herstellerangaben) ausgelegt. Die [DIN EN 13779] sieht für die endständige Schwebstofffilterung (HEPA-Filter) sogar Druckverluste von 400 bis 700 Pa vor.

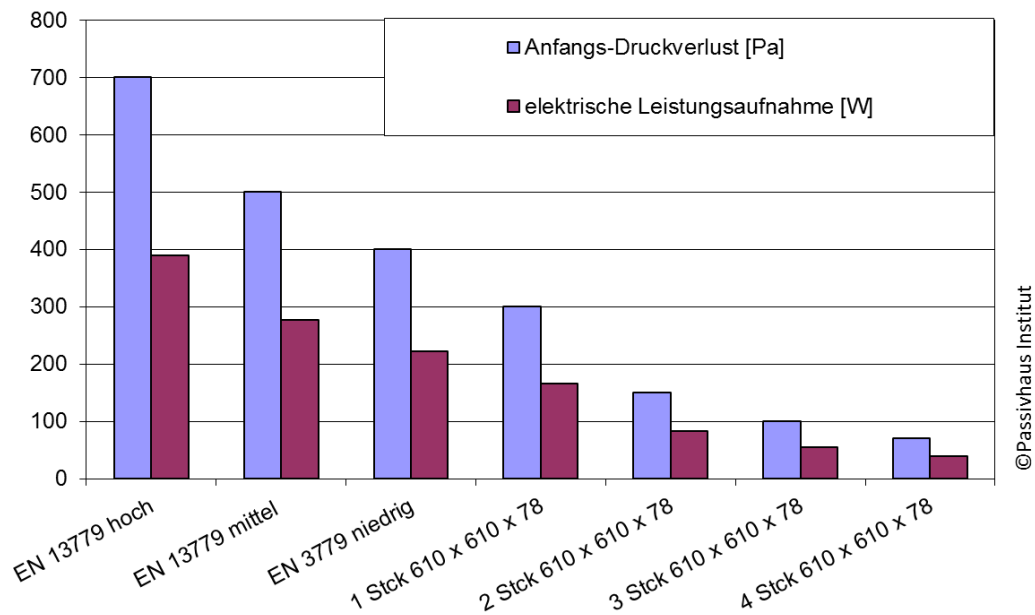
Durch Vergrößerung der Filterfläche lassen sich aber auch die Druckverluste von Schwebstofffiltern deutlich reduzieren. Die Filterfläche lässt sich vergrößern durch

- Vergrößerung der Filterauslassfläche, aber auch durch
- Anpassung der Filtertiefe.

Gerade bei endständigen Filtern (hier ist das Filterelement direkt im Luftauslass integriert) ist eine Vergrößerung der Auslassfläche und damit der Filterauslassfläche im Vergleich zu Filtern, die im Zentralgerät integriert sind, problemlos möglich. Folgende Abbildung verdeutlicht den Einfluss der Filterauslassfläche auf den Druckverlust und damit auf den durch den Filter verursachten Energiebedarf.

Zur Verdeutlichung der enormen Unterschiede zwischen dem Energieverbrauch, der bei druckoptimierter Auslegung möglich ist, und dem bei Druckverlusten gemäß der Empfehlungen nach [DIN EN 13779], wurden diese drei Filterdruckverluste gemäß der Empfehlungen der [DIN EN 13779] ebenfalls im Diagramm dargestellt. Eine übliche Auslegung, wie sie von vielen Herstellern empfohlen wird (im konkreten Beispiel mit ein bzw. zwei Auslässen 610 x 610 mm²), unterschreitet diese Empfehlungen schon deutlich.

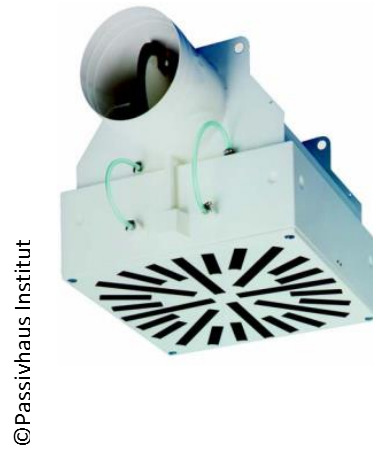
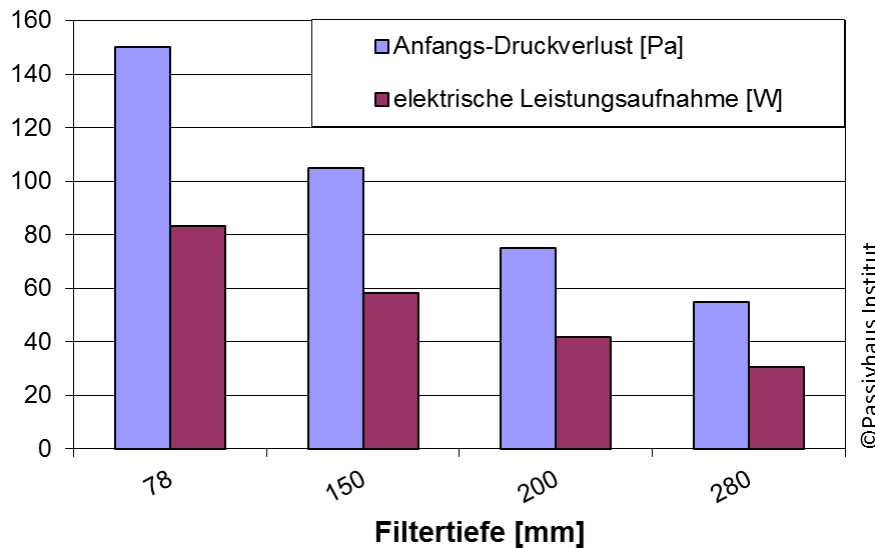
Bei Verdreifachung der Filterauslassfläche (von ein auf drei Schwebstofffilter-Auslasselementen) kann der Druckverlust bereits schon auf 1/3 reduziert werden. Der elektrische Leistungsbedarf verhält sich direkt proportional zum Druckverlust und reduziert sich demnach auch auf 1/3. Mit vier Auslasselementen kann der Druckverlust sogar auf 70 Pa reduziert werden.



V* [m³/h]	Filterausstattung	Druckverlust [Pa]	Pel [W]
1200	1 Stck 610 x 610 x 78	300	167
1200	2 Stck 610 x 610 x 78	150	83
1200	3 Stck 610 x 610 x 78	100	56
1200	4 Stck 610 x 610 x 78	70	39

Abbildung 40: Anfangs-Druckverlust und elektrischer Leistungsbedarf für Schwebstofffilterauslässe in Abhängigkeit der Filterauslassfläche am Beispiel eines OP-Saals der Klasse 1b, Zuluftvolumenstrom = 1200 m³/h, (Quelle: Produktinformationen GEA Heat Exchangers)

Um die Ausdehnung der Filterauslassfläche zu begrenzen, kann der Druckverlust auch durch Erhöhung der Filtertiefe reduziert werden. Nachfolgende Abbildung vergleicht unterschiedliche Filtertiefen und den jeweiligen Einfluss auf den Druckverlust jeweils bei gleicher Filterauslassfläche und gleichem Zuluftvolumenstrom.



©Passivhaus Institut

Filterabmessung	Filtertiefe [mm]	Dp [Pa]	Pel [W]
610x610	78	150	83
610x610	150	105	58
610x610	200	75	42
610x610	280	55	31

Abbildung 41: Anfangs-Druckverlust und elektrischer Leistungsbedarf für Schwebstofffilter-auslässe in Abhängigkeit der Filtertiefe am Beispiel eines OP-Saals der Klasse 1b, Zuluftvolumenstrom = 1200 m³/h, Luftauslass: je 2 Stück 610 x 610 mm². (Quelle: Produktinformationen Firma Freudenberg, Schwebstofffilterauslass rechts: GEA Heat Exchangers)

Bei Verdopplung der Filtertiefe von 78 mm auf 150 mm kann der Druckverlust schon um 1/3 reduziert werden. Bei einer Filtertiefe > 200 mm können sogar für Schwebstofffilter Druckverluste < 75 Pa erzielt werden.

Im Vergleich zur Vergrößerung der Filterauslassfläche ist die Maßnahme die Filtertiefe zu erhöhen bei endständigen Filtern leider etwas schwieriger. Standardauslasselemente sind meist mit einem Filteraufnahmerahmen für einen Filter mit 78 mm Tiefe ausgestattet. Auslasselemente, die auch für die Aufnahme von Filtern mit größeren Bautiefen ausgestattet sind, könnten dadurch zunächst höhere Investitionskosten verursachen. Wenn zukünftig jedoch zur Reduktion der Betriebskosten häufiger die heutigen „Sonderlösungen“ nachgefragt werden, wird sich das hoffentlich zukünftig auch auf Angebot und Preisgestaltung auswirken.

Die Maßnahme der Erhöhung der Filterausblasfläche sowie der Filtertiefe zur Reduktion der Druckverluste ist auch auf die OP-Lüftungsdecken für die Raumklasse 1a anwendbar. Üblicherweise sind OP-Lüftungssysteme mit Flächenfiltern über das gesamte Auslasselement 3,2 m x 3,2 m ausgestattet. Je nach Filtertiefe (80 mm oder 102 mm) sind Anfangsdruckverluste von bis zu 85 Pa möglich. Da im Gegensatz zu den Schwebstofffilterauslässen die OP-Lüftungssysteme meist ohnehin keine Standardelemente sind, sondern vielmehr projektspezifisch angepasst werden müssen, ist die Erhöhung des Filteraufnahmerahmens für den Einsatz höherer Filter in dem Fall durchaus möglich und wird auch von einigen OP-Decken-Herstellern so angeboten.

Es gibt auch Deckensysteme, die mit seitlichen Filtern ausgestattet werden. Dies wird häufig in Sanierungen umgesetzt, wenn der Deckenholraum für die Installation des OP-Lüftungssystems begrenzt ist. Auf diese Weise kann der Aufbau des OP-Lüftungssystems noch einmal um die Höhe der Flächenfilter (in dem Fall 80 bis 100 mm) reduziert werden. Was sich aus Sicht der platzsparenden Installation als gute Lösung erweist, ist aus energetischer Sicht jedoch an letzter Stelle angesiedelt. Der Druckverlust und somit auch die verursachte elektrische Leistung verdreifachen sich durch die seitliche Filteranordnung in Bezug auf die Flächenfilter mit 102 mm Tiefe auf ca. 250 Pa bzw. 1 kW.

Volumenstrom [m³/h]	Filteranordnung	Anfangsdruckverlust [Pa]	Pel [W]
8700	seitliche Filter	ca. 250	1010
8700	Flächenfilter h=80mm	105	420
8700	Flächenfilter h=102mm	85	340

Tabelle 16: Druckverluste und verursachter elektrischer Leistungsbedarf in Abhängigkeit der Filteranordnung eines OP-Deckensystems der Raumklasse 1a. (Datenquellen: LMC Medical Components GmbH, Al-ko THERM GmbH)

Die Funktionalität des OP-Deckensystems unter den gegebenen Umständen steht natürlich an erster Stelle. Die energetischen Auswirkungen einer reduzierten Deckenhöhe sollten jedoch auch berücksichtigt werden. Um diese möglichst gering zu halten, empfiehlt sich eine frühzeitige Abstimmung der entsprechenden Gewerke.

9.6.4 Luftbehandlung Heizen und Kühlen

Wie eingangs erwähnt besteht in Krankenhäusern der Kühlbedarf vor allem durch medizinische Geräte. Die Kühlleistung wird entsprechend der elektrischen Leistung der Geräte ausgelegt. Oft wird der Auslegung der Kühlleistung die Gerätean-

schlussleistung zugrunde gelegt, was schnell zu einer Überdimensionierung der Kühlleistung führen kann. Die tatsächliche Leistungsaufnahme der Geräte während des Betriebs sollte beim Hersteller erfragt werden, bzw. kann die Leistungsaufnahme auch exemplarisch mit geringem Aufwand gemessen werden.

Häufig wird die entsprechende Kühlleistung durch ein Kühlregister im Zentralgerät bereitgestellt. Die RLT-Komponenten sind somit zwar allesamt im Technikraum untergebracht, jedoch erhöht der Druckverlust des Kühlers auf diese Weise die elektrische Leistungsaufnahme des zentralen Ventilators ständig (unabhängig vom entsprechenden Lüftungs- und Kühlbedarf im jeweiligen Raum). Die Druckverlust-erhöhung sind nicht unwesentlich: denn um die hohen Kühllasten zu kompensieren sind mehrreihige Kühlregister erforderlich, die bei üblichen Planungen leicht einen Druckverlust von 100 Pa übersteigen können.

Effizienter ist dagegen die Kühlung dezentral anzuordnen und von der RLT zu entkoppeln: auf diese Weise kann die Kühlleistung dem tatsächlichen Bedarf im jeweiligem Raum viel besser angepasst werden, ohne dass der Zuluftvolumenstrom erhöht werden muss. Dezentrale Kühlung bietet somit im Wesentlichen die Vorteile, dass

- der dauerhafte Druckverlust eines Kühlregisters im Zentralgerät entfällt und
- der Volumenstrom der zentralen RLT-Anlage um den Betrag des zur Kompensation der Kühllast erforderlichen Volumenstroms reduziert werden kann.

Dezentrale Kühlkonzepte können sowohl durch **Kühlflächen im Raum** oder durch **dezentrale Umluftgeräte mit Kühlfunktion** umgesetzt werden. Erste Variante erfordert zwar einen höheren Installationsaufwand, jedoch zeichnet sich diese Variante durch eine sehr effiziente Betriebsweise aus, denn bei großen Kühlflächen ist nur eine geringe Untertemperatur erforderlich. Außerdem entfällt die Hilfsenergie für die Luftverteilung.

Dezentrale Umluftgeräte mit Kühlfunktion sind meist einfacher zu installieren und in den Raum integrierbar. Damit bieten sie eine effiziente dezentrale Kühlvariante, welche auch für Sanierungen oder für die nachträgliche Installation geeignet ist.

Weitere Informationen zu diesen und weiteren Kühlvarianten sind in Abschnitt 10 „Kühlung“ zu finden.

Kühlbedarf besteht in Krankenhäusern des Weiteren im OP-Bereich. Zum einen zur Kompensation der Kühllast der installierten Beleuchtungsleistung, aber auch zur Aufrechterhaltung der turbulenzarmen Verdrängungsströmung. Das Kühlregister sollte nach Möglichkeit im Umluft-Strang (bzw. dezentral) angeordnet werden. Auf diese Weise kann die entsprechende Kühlleistung durch den hohen ohnehin

erforderlichen Umluftvolumenstrom mit nur geringer Temperaturspreizung erzielt werden. Sogar unter Berücksichtigung der Kompensation der Ventilatorabwärme sind nur geringe Temperaturdifferenzen zur Deckung der Raumkühllast und Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des Lüftungssystems ausreichend. Das Kühlregister hat demnach nur eine sehr geringe spezifische Kühlleistung, was sich auch in Bezug auf den Druckverlust bemerkbar macht: Kühlregister mit nur geringer spezifischer Kühlleistung können bei druckverlustarmer Dimensionierung Druckverluste von 35 Pa und weniger erzielen.

Die Beheizung der unterschiedlichen Funktionsbereiche kann sowohl über die Lüftungsanlage als auch über separate Heizelemente erfolgen. Die Entkopplung der Heizung vom Lüftungsbetrieb kann, wie in vielen Nichtwohngebäuden, regelungstechnisch vorteilhaft sein. Bei der Integration des Heizregisters im zentralen RLT-Gerät ist auf eine druckverlustarme Dimensionierung zu achten. Bei entsprechender Gerätedimensionierung sind Druckverluste von 30 Pa und geringer realisierbar.

9.6.5 Frostschutz

Ist im zentralen RLT-Gerät sowieso schon ein Nachheizregister vorhanden, kann dieses auch durch eine Bypassregelung in die Frostschutzstrategie integriert werden. Wichtig ist hier, dass der Heizkreis des Nachheizregisters mit einem Frostschutzmittel betrieben wird. Für einen effizienten Frostschutzbetrieb sollte der Bypass stufenlos regelbar sein. Der Bypass sollte damit nur so weit geöffnet werden, wie für die momentane Frostschutzanforderung notwendig ist.

Alternativ (wenn z. B. die Beheizung ausschließlich über Heizflächen und Konvektoren erfolgt) kann auch ein hydraulisches Heizregister im Außenluftkanal die Frostschutzfunktion erfüllen. Auch hier ist der Heizkreis mit einem Frostschutzmittel zu betreiben. Auf die primärenergetisch ungünstigere Variante des direktelektrischen Frostschutzes sollte verzichtet werden. Bei RLT-Anlagen mit Volumenströmen $> 600 \text{ m}^3/\text{h}$ ist der Mehraufwand für den Frostschutzkreis im Vergleich zu Wohnungslüftungsanlagen durchaus zumutbar.

9.6.6 Dimensionierung des Kanalnetzes

Der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Druckverlustentwicklung im geraden Kanal in Abhängigkeit des Volumenstroms wurde bereits ausführlich in [Pfluger 2012] erarbeitet, im Folgenden eine kurze Zusammenfassung:

Im Gegensatz zu der hierzulande üblichen „Auslegung nach Erfahrungswerten“ – in [Reck09/10] werden beispielsweise für Hauptkanäle einer Komfortlüftungsanlagen Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 4 und 8 m/s empfohlen – werden die Anforderungen an die Strömungsgeschwindigkeit in der Schweiz durch die

[SIA 382/1] sehr viel detaillierter gestellt: In den Hauptkanälen einer Lüftungsanlage dürfen in Abhängigkeit des Volumenstroms folgende Strömungsgeschwindigkeiten nicht überschritten werden:

bis	1000 m ³ /h	3 m/s,
bis	2000 m ³ /h	4 m/s,
bis	4000 m ³ /h	5 m/s,
bis	10000 m ³ /h	6 m/s,
über	10000 m ³ /h	7 m/s.

Mit dieser Auslegung liegen die Druckverlustwerte je m Kanal bei ca. 1 Pa, womit der Einfluss des Kanalnetzes auf den Gesamtdruckverlust bei entsprechend kompakter Kanalführung eher gering ist.

Bei erforderlicher Reduzierung der Kanalhöhe muss auf einen druckverlust-äquivalenten Flachkanalquerschnitt geachtet werden, damit sind auch platzsparende und druckverlustgünstige Kanallösungen realisierbar.

Unnötig lange Kanalführung sollte möglichst durch eine weitere Untergliederung der Lüftungsanlage in mehrere kleinere Anlagen verhindert werden. Vor allem dort wo große Luftvolumenströme erforderlich sind, erleichtert die verbrauchsnahe Anordnung der RLT-Geräte einen stromeffizienten Lüftungsbetrieb durch geringe Druckerluste. Hierbei gilt es einen Kompromiss zu finden zwischen der räumlichen Nähe von Technikraum und Funktionsbereich und Länge der Außen- und Fortluftkanäle (zur Vermeidung unnötiger Wärmeverluste sollten diese auch möglichst kurz und kompakt geführt werden).

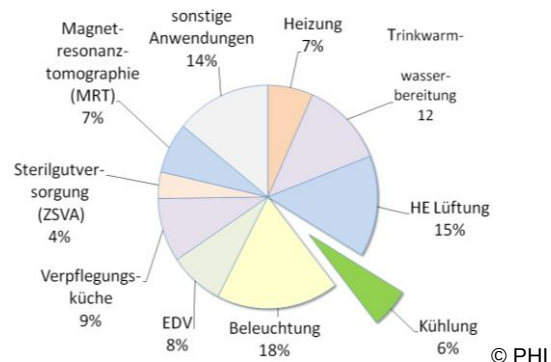
9.6.7 Fazit zur Auslegung des Lüftungsnetzes

Bei entsprechender druckverlustreduzierter Dimensionierung der Komponenten kann sogar in Funktionsbereichen mit dreistufiger Luftfilterung eine spezifische elektrische Leistungsaufnahme des zentralen RLT-Gerätes von 0,45 Wh/m³ eingehalten werden. Für Funktionsbereiche mit geringeren Anforderungen an die Luftaufbereitung (z. B. in den Pflegestationen) kann die spezifische elektrische Leistungsaufnahme sogar noch weiter reduziert werden. Hier sollten 0,3 Wh/m³ angestrebt werden.

Um das Energieeinsparpotential bei der Auslegung des Kanalnetzes optimal auszu-schöpfen, ist eine frühzeitige Planung und Abstimmung mit anderen Gewerken unerlässlich.

10 Kühlung

**Anteil des Kühlenergiebedarfs
(exemplarisch) am Gesamtprimär-
energiebedarf (vgl. Abschnitt 4.12)**



10.1 Einleitung

Die Vermeidung von Kühllasten sollte stets vorrangig betrieben werden. Dazu zählen einerseits die internen Lasten aufgrund der Abwärme der künstlichen Beleuchtung, der EDV und der medizinischen Geräte. Verbesserte Effizienz dieser Anwendungen, spart primärenergetisch hochwertige elektrische Energie und verringert zudem den Kühlbedarf. Insbesondere die Entwicklung der letzten Jahre im Bereich der Beleuchtungstechnik und der EDV bietet erhebliches Energieeinsparpotential.

Neben den internen Lasten sind es vor allem die solaren Lasten, welche, wenn geeignete Sonnenschutz-Maßnahmen fehlen, schnell zur Überhitzung führen können. Dass der Sonnenschutz daher bei Bedarf auch aktiviert sein muss, ist ebenfalls offensichtlich. Gerade bei großen Behängen und höheren Gebäuden, sollte dieser daher ausreichend Wind unanfällig sein und automatisch gesteuert werden. Der Sonnenschutz sollte gemäß [Linder 2012] für Windgeschwindigkeiten bis 13 m/s ausgelegt sein und nach Fassadenorientierung getrennt gesteuert werden.

Ausreichende und gut zugängliche Speichermassen puffern sommerliche Temperaturspitzen und verbessern ebenfalls das sommerliche Verhalten. Wechselwirkungen mit anderen baulichen Anforderungen, wie der Raumakustik und der Anordnung der Versorgungsleitungen (oberhalb abgehängter Decken) sollten frühzeitig im Planungsprozess berücksichtigt werden.

Handelt es sich um Bereiche mit moderaten internen Lasten (vgl. [Zimmermann 1999]), kann die sommerliche Behaglichkeit weitgehend mit passiven Kühlmaßnahmen hergestellt werden. Dazu zählen die Nachtlüftung, die adiabate Kühlung und die Betonkerntemperierung. Aufgrund der begrenzten Kühlleistung, funktionieren diese Ansätze immer nur in Kombination mit ausreichend zugänglicher Speichermasse. Überschüssige Wärme wird tags in die Gebäudekonstruktion eingespeichert und kann z. B. nachts, wenn aufgrund der geringeren Außentemperaturen das Kühlpotential größer wird, abgeführt werden.

In hochtechnisierten Bereichen, wie z.B. den Räumen der Magnetresonanztomographie sind hingegen weitreichendere Maßnahmen und aktive Kühlung erforderlich.

Neben Lösungsansätzen zur energieeffizienten Raumkühlung, wird im Folgenden auch der Nutzkältebedarf eines Krankenhauses abgeschätzt. Mögliche Kühlstrategien und der resultierende Nutzkältebedarf werden maßgeblich durch die internen Lasten bestimmt, die im nächsten Abschnitt näher betrachtet werden.

10.2 Interne Gewinne

Ein Blick auf die Inventarliste des Krankenhauses gibt einen Überblick über die verwendeten elektrischen Geräte. Allerdings ist es mit vertretbarem Aufwand kaum möglich auf dieser Grundlage die mittlere Leistungsaufnahme abzuschätzen. Einige Geräte sind mit geringer Leistung im Dauerbetrieb oder wie im Beispiel von Röntgengeräten mit hoher Leistung nur für Sekunden im Einsatz. Andere Geräte werden als Ersatz vorgehalten.

Im Unterschied zu detaillierten Angaben zu Nutzungsprofilen und Leistungsaufnahmen einzelner Anwendungen sind Stromverbrauchswerte zu kompletten Krankenhäusern oder einzelner Stationen verfügbar. Zur Ermittlung der internen Gewinne werden daher Stromverbrauchsmessungen genutzt, die bereits alle im Krankenhaus vorkommenden elektrischen Verbraucher enthalten. Im Ansatz mit effizienten Elektroanwendungen wird davon ausgegangen, dass die gemäß [VDI 3807-2] empfohlenen Richtwerte zum Stromverbrauch eingehalten werden. Die Richtwerte basieren auf empirisch erhobenen Werten und sollten gemäß [VDI 3807-2] angestrebt werden. Zusätzlich wurden die Ergebnisse anhand des Parametermodells aus Abschnitt 5.1 Heizwärmeanforderung (Randbedingung: Interne Gewinne)), welches die Hauptverbraucher enthält, bei energieeffizienter Ausstattung abgeglichen.

Der durch Personen hervorgerufene Beitrag an internen Wärmegewinnen umfasst die Abwärme der Patienten, des Personals und in der Pflege von Besuchern.

Die Wärmeabgabe von warmen Verteilleitungen werden anhand der Leitungsführung in einem Pflegegeschoss des Neubaus des Klinikums ermittelt (vgl. Abschnitt 8 Trinkwarmwasserbereitung). Als interne Lasten sind nur die Verluste der Trinkwarmwasserleitungen berücksichtigt.

Die Erwärmung des kalten Wassers in Leitungen und Spülkästen und die Verdunstung von Wasser entziehen dem Gebäude hingegen Wärme. Der Einfluss dieser Wärmesenken, der in gebräuchlichen Kühllastverfahren vernachlässigt wird, wird ebenfalls in Ansatz gebracht.

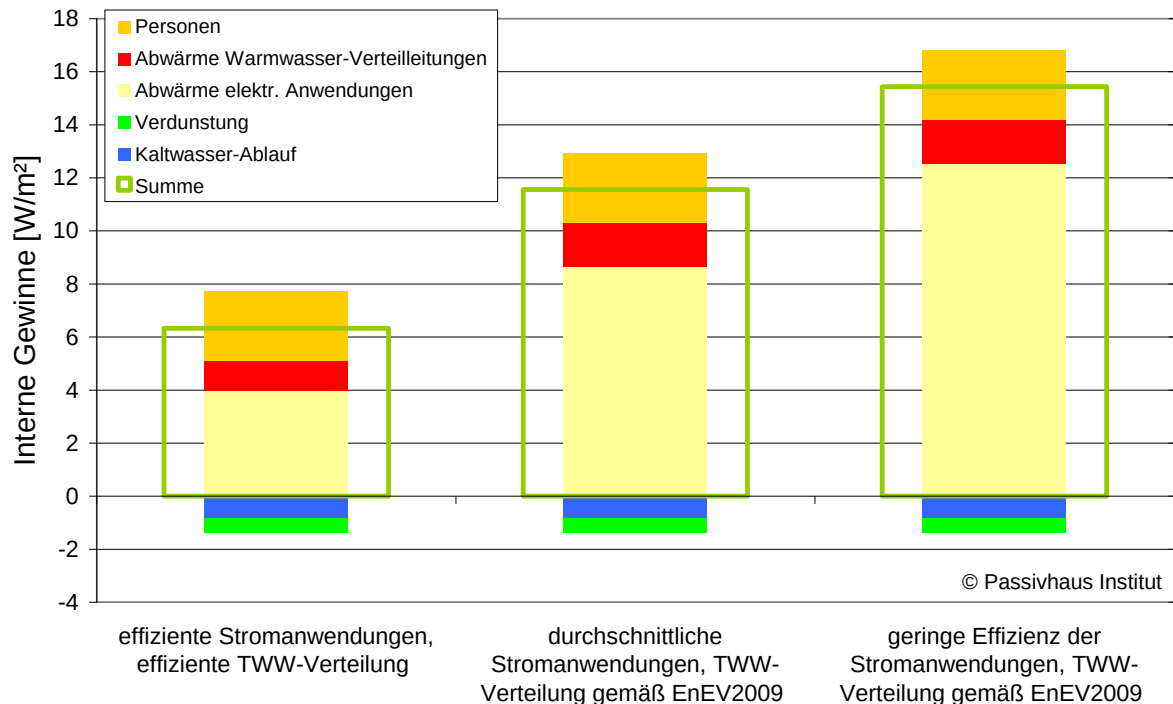


Abbildung 42: Wochenmittlere interne Gewinne

Wie zu erwarten stellen die Elektroanwendungen den größten Beitrag dar. Jedoch belaufen sich auch die Wärmeverluste der Trinkwarmwasserleitungen auf 1 (effiziente Lösung) bis fast 2 W/m² (bei Dämmung der Verteilungen gemäß [EnEV 2009]).

In der Summe treten in der Fläche mittlere interne Gewinne bei Wahl energieeffizienter Lösungen zwischen 5 und 6 W/m² auf. Handelt es sich hingegen um Elektronanwendungen mit nur durchschnittlicher Effizienz, verdoppeln sich die zu erwartenden internen Lasten bereits. Wie eine Analyse anhand des Parametermodells aus Abschnitt 5.1 (Randbedingung: Interne Gewinne) zeigte, haben die Effizienz der künstlichen Beleuchtung und die immer umfassendere EDV-Ausstattung wesentlichen Einfluss auf die internen Gewinne.

Dem Ansatz mit effizienten Stromanwendungen liegt eine Kunstlichtgestaltung zugrunde, welche den Grenzwert gemäß [SIA 380-4] an die spezifische installierte Leistung der Beleuchtung einhält (Grenzwert 3,0 W/(m² 100 lx)) (vgl. auch Abschnitt 11 Beleuchtung). In der EDV wird die Leistungsaufnahme einer Arbeitsplatz-Ausstattung mit Thin-Clients angesetzt (vgl. Abschnitt 12 EDV).

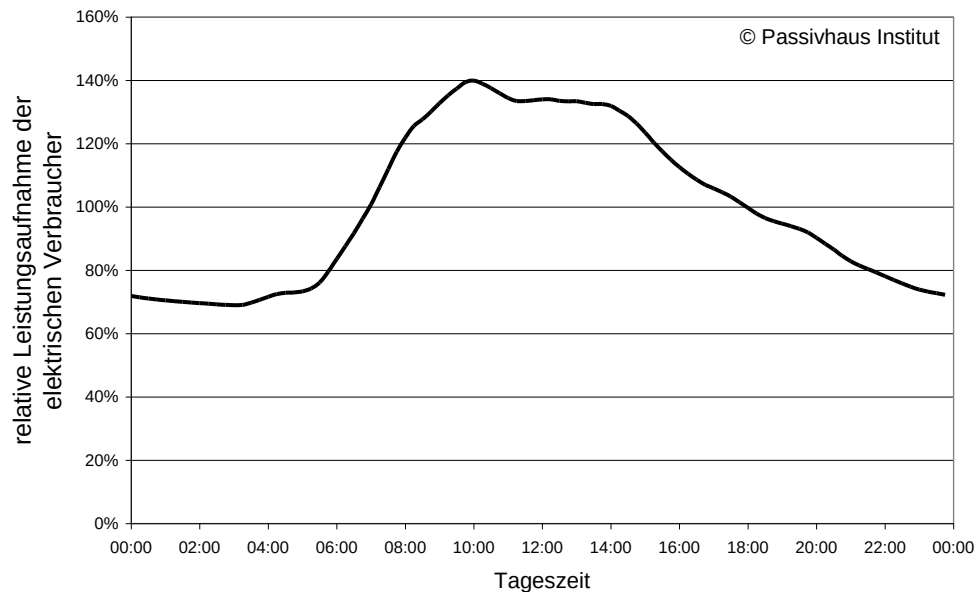


Abbildung 43: Exemplarischer zeitlicher Verlauf der elektrischen Leistungsaufnahme eines Bestandskrankenhauses. 100 % entspricht dem Mittelwert.
Datenquelle: elektrische Verbrauchsmessungen im Bestandsgebäude des Klinikums Frankfurt Höchst.

Beispielhaft zeigt Abbildung 43 ein Zeitprofil der elektrischen Leistungsaufnahme in einem Bestandskrankenhaus. Während der Betriebszeiten, wenn Untersuchungen und Therapien durchgeführt werden, steigt der Stromverbrauch deutlich an und liegt im gezeigten Fall etwa 40 % höher als der Tagesmittelwert.

Außerhalb von Bereichen mit konzentrierten internen Lasten spielt der genaue zeitliche Verlauf bei überwiegend massiver Bauweise und moderaten internen Lasten (Ansatz effiziente Anwendungen) keine so große Rolle. Unter diesen Umständen müssen die internen Lasten nicht zeitgleich abgeführt werden. In der Regel ist es ausreichend, die Summe der Wärmegewinne über den Tag abzuführen, um eine kontinuierliche Erwärmung an aufeinanderfolgenden warmen Tagen zu vermeiden.

Eine geeignete Größe zur Bewertung der internen Gewinne sind daher auch die Tagessummen. Bei einem effizienten Ansatz ergeben sich hier 120 bis 150 Wh/(m² d).

Anders verhält es sich in hoch-technisierten Bereichen. Die internen Lasten müssen anhand der Herstellerangaben gerätespezifisch ermittelt werden. Ein grundlegendes Problem bei der Systemauslegung besteht in der Annahme von Gleichzeitigkeiten.

Besonderes Augenmerk ist im Rahmen der Planung auf die Abstimmung der Kältetechnik auf die tatsächlich abzuführenden Wärmelasten zu legen. Überdimensionierungen erhöhen die Investitionskosten und die Betriebskosten, wenn die Kälteanlage außerhalb des optimalen Betriebsbereichs läuft.

Es bleibt zu hoffen, dass die Bemühungen, Umweltauswirkungen und Energieverbräuche medizinischer Geräte mit Umweltdeklarationen transparent zu machen, fortgeführt werden. Detailliertere Hinweise zur Auslegung der Gerätekühlung und ggf. Lösungsansätze effizienter Systeme wären hinsichtlich umweltverträglicher Produkte ebenfalls wertvoll.

10.3 Methoden zur Kühlung

Die Auswahl des Kühlsystems wird maßgeblich durch die erforderlichen Kühlleistungen bestimmt. Bei Tagessummen der internen Lasten bis 150 Wh/(m² d) stehen passive bzw. hybride Kühlsysteme zur Verfügung, die ohne aktive Kühlung durch Kältemaschinen betrieben werden können (vgl. [Zimmermann 1999]).

Die Abschätzung zu den internen Lasten eines Krankenhauses zeigt, dass unter der Voraussetzung einer energieeffizienten Ausstattung, der sommerliche Komfort weitgehend durch solche Systeme, die auf Nutzung der Gebäudespeichermasse und gezielter Wärmeabfuhr beruhen, verbessert werden kann.

Im Unterschied zur aktiven Kühlung, welche durch Kältemaschinen die ausgelegten Kühlleistungen nahezu immer bereitstellt, nutzen die passiven Systeme natürliche Wärmesenken, welche von den aktuellen Witterungsbedingungen abhängen. Verbindliche Temperaturanforderungen können bei ausschließlichem Einsatz dieser Systeme nicht immer eingehalten werden. Messtechnische Untersuchungen in Büro- und Verwaltungsgebäuden mit thermischer Bauteilaktivierung belegen jedoch, dass behagliche Temperaturen während den Nutzungsstunden im Sommer fast immer eingehalten wurden. Während 95 % der sommerlichen Nutzungsstunden erreichten die Spitzentemperaturen in den meisten untersuchten Gebäuden max. 26 °C (vgl. [Kalz et. al 2012]).

Im Krankenhaus wird es auch weiterhin Bereiche mit verbindlichen Komfortanforderungen (z. B. Intensivstationen und Operationssäle) oder mit hohen räumlich konzentrierten Lasten geben, die aktive Kühlung benötigen. Rein passive oder hybride Ansätze im Krankenhaus sind mit den derzeit verfügbaren Technologien in der zentralen Sterilgutversorgung und der Radiologie nicht denkbar. Die passiven Kühlstrategien sind daher im Krankenhaus bis auf weiteres eine ergänzende, den Kühlenergiebedarf verringernde Maßnahme.

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die möglichen Kühlstrategien.

10.3.1 Freie Kühlung

Im Deutschen Klima zählt die freie Nachtlüftung zu den interessanten und bewährten Maßnahmen, überschüssige Raumwärme im Sommer abzuführen. Im Grundsatz geht es um den Austausch warmer Raumluft durch kühlere Außenluft.

Im Unterschied zu anderen Nichtwohngebäuden wie z. B. Schulen und Bürogebäuden, findet in Krankenhäusern eine Nutzung rund um die Uhr statt. Zudem handelt es sich z.T. um hygienisch sensible Bereiche. Eine Nachtlüftung durch geeignete Gebäudeöffnungen und natürliche Antriebskräfte, wie dies in Schulen erfolgreich praktiziert wird (vgl. z. B. [Kah et al 2010]), scheidet in Krankenhäusern in vielen Bereichen aus. In zahlreichen Räumen kommt daher nur eine freie Kühlung mittels der ohnehin vorhandenen Lüftungsanlage in Frage. Diese Maßnahme ist sehr kostengünstig, da in der Regel keine weiteren Investitionen erforderlich sind. Zudem muss beachtet werden, dass der Komfort auch nachts gegeben sein muss. D.h. Mindesttemperaturen müssen eingehalten werden.

Aufgrund der Erwärmung der Außenluft im Zentralgerät durch Ventilatorabwärme, nicht dicht schließende Bypassklappen (Teildurchströmungen der Wärmerückgewinnung) und weiterer Effekte verliert die freie Lüftung einen Teil des Kühlpotentials. Labormessungen zeigen, dass unter sommerlichen Bedingungen die Temperaturerhöhung im Zentralgerät auch bei effizienten Ventilatoren um 2 K beträgt (vgl. [Kah/Bräunlich 2013]).

Abbildung 44 zeigt den Nutzkälteertrag der freien Kühlung für Frankfurt (bzw. Klimaregion 12). Bei Tageshöchstwerten der Außentemperaturen bis 26 °C können nachts je m³/h Luftvolumenstrom 20 bis 25 Wh Wärme abgeführt werden. Um typische Wärmelasten von 150 Wh/(m² d) abzuführen sind flächenspezifische Außenluftvolumenströme um 6 (m³/h)/m² notwendig (vgl. auch [Zimmermann 1999], [AkkP 22]). In vielen Bereichen eines Krankenhauses ist die Auslegung der Lüftungsanlage hierfür nicht ausreichend.

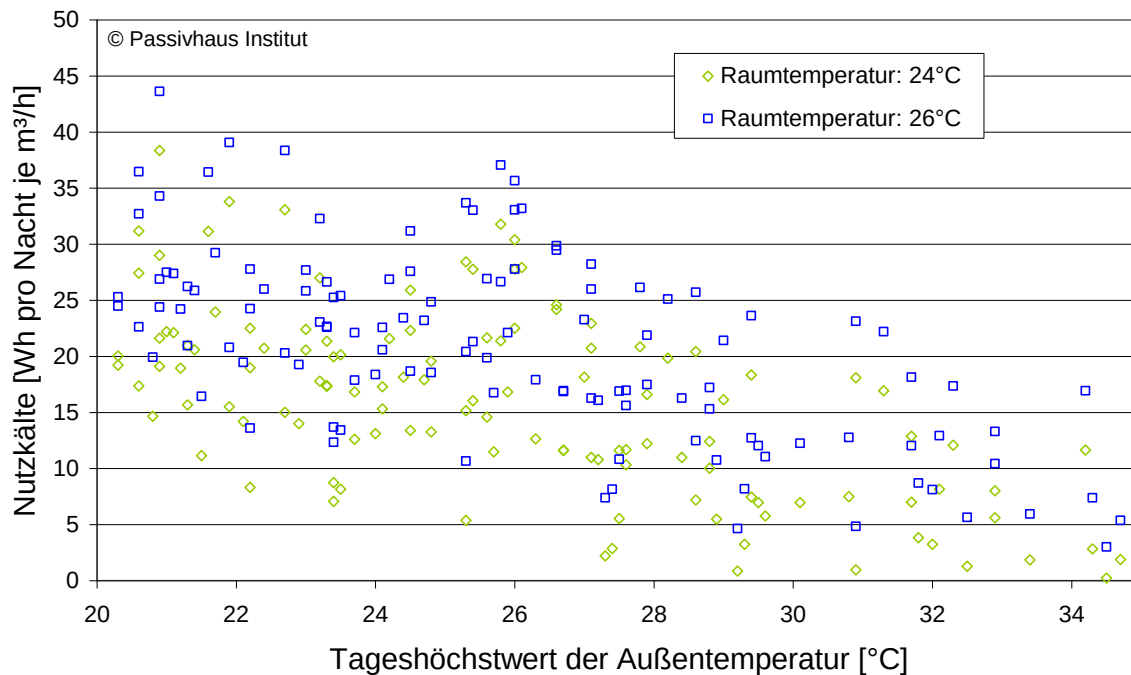


Abbildung 44: Nutzkälteertrag der freien Kühlung je m³/h und pro Nacht für eine konstante Raumtemperatur von 24 bzw. 26 °C. Die Lüftungsanlage wird gezielt nachts in warmen Perioden genutzt, um Wärmelasten des Tages abzuführen. Mit zunehmender Außentemperatur verringert sich das Kühlpotential der Nachtlüftung, da auf warme Tage oftmals auch mildere Nächte folgen. Bei Tageshöchstwerten bis 26 °C können nachts durchschnittlich 20 bis 25 Wh/(m³/h) abgeführt werden.
Randbedingungen: Betrieb der Lüftung von 23:00 bis 7:00, Temperaturerhöhung im Lüftungsgerät 2 K, Klimadatensatz Klimaregion 12, "Oberrheingraben", extremer Sommer [TRY 12].

Um dennoch wirksam zu kühlen, kann der Luftaustausch noch durch zusätzliche natürliche Lüftung erhöht werden. Z. B. beträgt der hygienisch erforderliche Anlagenluftwechsel in den Pflegezimmern etwa 2 bis 3 (m³/h)/m² und ist daher zu gering. In Sommernächten könnte in diesen Bereichen, sofern die Patienten dem zustimmen, zusätzlich über Fenster gelüftet werden.

Die freie Nachtkühlung mittels der Lüftungsanlage ist in der Regel ohne investiven Mehraufwand immer möglich. Auch wenn ihr Potential in vielen Bereichen nicht ausreicht, sollte zumindest ein ergänzender Einsatz der freien Kühlung zu anderen Systemen geprüft werden.

Arbeitszahlen von 5 ($Wh_{\text{therm}} / Wh_{\text{elektr.}}$) und mehr können mit der Nachtlüftung erreicht werden. Wird die Lüftung nicht ohnehin aus hygienischen Gründen in Sommernächten betrieben, sollte die freie Kühlung aus energetischen Gründen erst bei Außentemperaturen beginnen, die mindestens 5 K unter der Raumtemperatur liegen.

10.3.2 Verdunstungskühlung

Verdunstet Wasser in einem abgeschlossenen System, entzieht es dem System sensible Wärme und senkt dadurch die Systemtemperatur. Dieses Prinzip nutzt die Verdunstungskühlung bzw. adiabate Kühlung. In unseren Breiten wird gewöhnlich die Abluft im Zentralgerät befeuchtet und mittels Wärmerückgewinnung deren Abkühlung zur Absenkung der Zulufttemperatur verwendet. Die direkte Befeuchtung der Außenluft ist hingegen nur in Regionen mit extrem trockenen Sommern sinnvoll.

Die Kühlleistung hängt bei diesem Verfahren maßgeblich von der absoluten Feuchte der Außenluft ab, da diese hauptsächlich den Feuchtegehalt der Abluft bestimmt. Das Verfahren eignet sich nicht, wenn im Gebäude größere Feuchtelasten vorhanden sind.

Da in hocheffizienten Passivhaus-Gebäuden ohnehin ein Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnungssystem vorhanden ist, ist der zusätzliche investive Aufwand dieses Verfahrens gering.

Für die klimatischen Bedingungen in Frankfurt (bzw. Klimaregion 12) und unter der Annahme, dass im Gebäude die Personen die wesentlichen Feuchtequellen sind, zeigt Abbildung 45 das verfügbare Kühlpotential. Bei Außentemperaturen über 28 °C stehen Kühlleistungen um 3 W/(m³/h) mit der Verdunstungskühlung zur Verfügung. Aufgrund der Abhängigkeit der Leistung von der Außenluftfeuchte, sinkt die Leistung bei schwülen Sommerbedingungen. Gegenüber trocken-heißen Außenbedingungen kann diese Absenkung etwa 1 W/(m³/h) betragen.

Die indirekte Verdunstungskühlung wird nutzbar, wenn die Außen- über der Ablufttemperatur liegt und verringert in erster Linie den durch Lüftung bedingten Wärmeeintrag. Abhängig von der Abluftfeuchte kann die Zulufttemperatur gegenüber der Außentemperatur um bis zu 10 K verringert werden. Darin enthalten ist bereits der sensible Kühlanteil, der durch reine Rückkühlung (Betrieb der Wärmerückgewinnung im Sommer bei hohen Außentemperaturen) erzielbar ist. Dieser Anteil nimmt, bei jeweils gleicher Raumlufttemperatur, proportional zur Außenlufttemperatur zu. Die im Folgenden dargestellten Kühlleistungen sind jeweils die Summe aus dem Beitrag durch Verdunstung und dem sensiblen Kühlanteil.

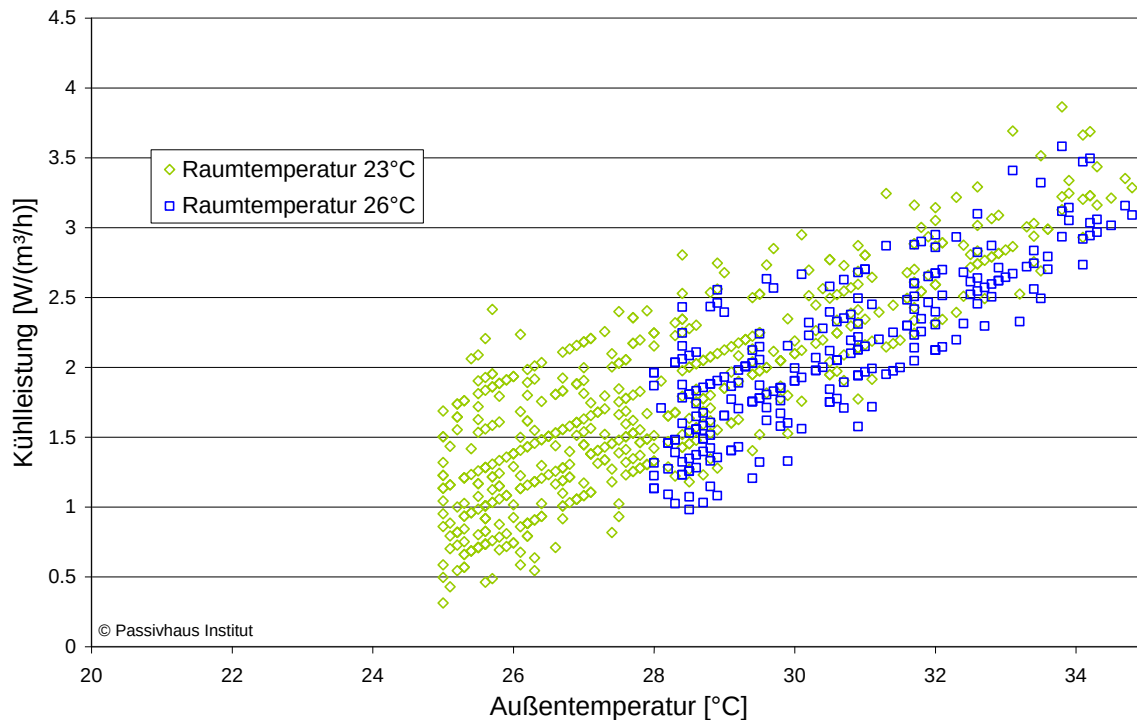


Abbildung 45: Kühlleistung der Verdunstungskühlung. Die Werte wurden für einen heißen Sommer in der Klimaregion 12, "Oberrheingraben" ermittelt (vgl. [TRY 12]).

Randbedingung: Rückkühlgrad der WRG 75 %
(aufgrund der Ventilatorabwärme ist er geringer als der Wärmebereitstellungsgrad)

Die Verdunstungskühlung verringert an heißen Tagen in erster Linie Wärmeeinträge durch Lüftung. Nur ein Teil des Kühlpotentials steht tatsächlich im Raum zur Abführung der internen Lasten zur Verfügung (vgl. Abbildung 46).

Bei flächenspezifischen Luftvolumenströmen um $3 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$, z. B. im Bereich der Pflege, beträgt die mittlere Kühlleistung um 8 W/m^2 . Etwa 3 W/m^2 davon sind an heißen Tagen noch an Kühlleistung im Raum wirksam.

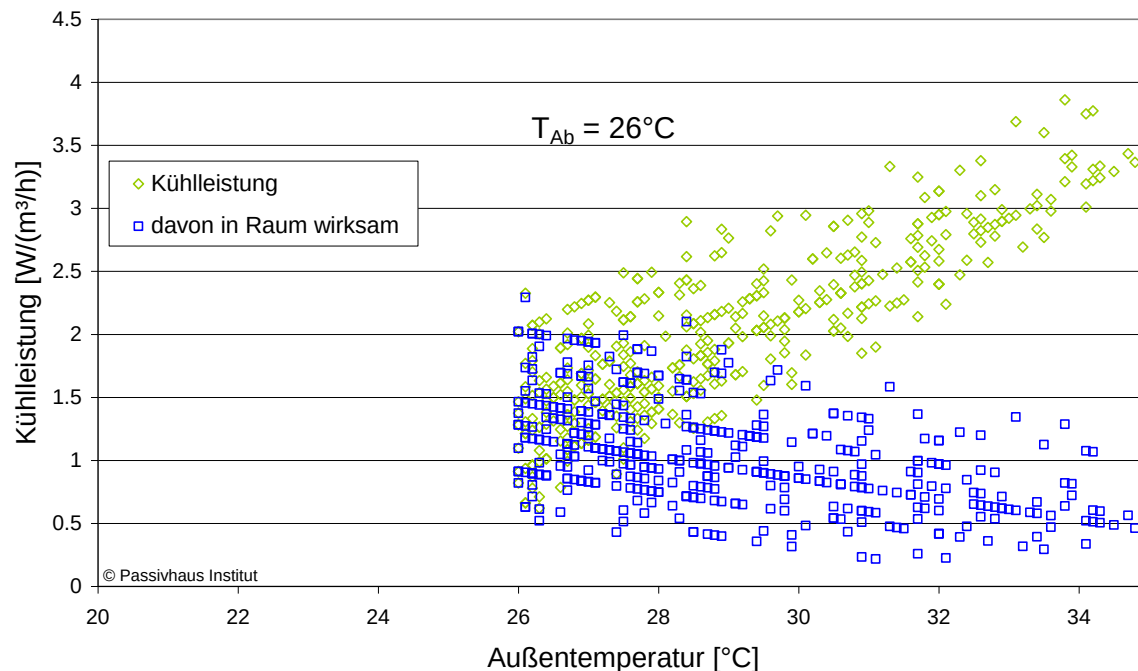


Abbildung 46: Kühlleistung der Verdunstungskühlung. Die Werte wurden für einen heißen Sommer in der Klimaregion 12, "Oberrheingraben" und eine konstante Ablufttemperatur von 26 °C ermittelt (vgl. [TRY 12]). Die Verdunstungskühlung verringert in erster Linie Wärmeeinträge aufgrund der erforderlichen Lüftung. Nur ein Teil davon wird im Raum wirksam.

Randbedingung: Rückkühlgrad der WRG 75 %
(aufgrund der Ventilatorabwärme ist er geringer als der Wärmebereitstellungsgrad)

Wird davon ausgegangen, dass der Lüftungsbetrieb in den meisten Bereichen des Krankenhauses ohnehin erforderlich ist, ist der zusätzliche Energieaufwand der adiabaten Kühlung gering. Druckverluste am Befeuchter erhöhen die Leistungsaufnahme des Ventilators. Zudem sind Pumpen im Wasserkreislauf zu berücksichtigen. Mit dem Verfahren der adiabaten Kühlung sind Leistungszahlen (Kühlenergie / elektr. Hilfsenergie) deutlich über $10 W_{\text{therm.}} / W_{\text{el.}}$ erzielbar. Neben dem elektrischen Energiebedarf besteht, noch ein Wasserbedarf von 2,2 bis 2,6 kg pro kWh Kühlenergie (vgl. [Zimmermann 1999]).

10.3.3 Bauteilkühlung

Die Bauteilkühlung erfreut sich seit den 80er Jahren zunehmender Beliebtheit. Rund 60 % der Büro Neubauten werden inzwischen durch thermisch aktive Bauteile gekühlt [Lohmüller et al. 2009]. Vor allem die mögliche Einbindung von Umweltenergie und damit die Reduzierung des Kühlenergiebedarfs im Vergleich zu konventioneller Klimatisierung macht das Verfahren interessant.

Rohrregister werden hierzu direkt in Bauteile (in der Regel Geschossdecken) der Gebäudekonstruktion integriert. Aufgrund der großen kälteübertragenden Fläche sind

geringe Untertemperaturen zur Kühlung ausreichend. Die Kühlwassertemperaturen liegen gewöhnlich zw. 16 und 22 °C. Einen ausführlichen Überblick zu den verfügbaren Systemen gibt [BINE I/2007].



Abbildung 47:
Rohrregister einer Betonkerntemperierung
(Foto: Architekt Stefan Oehler).
Energon, Ulm, Architektur Oehler Faigle
archkom.

Kühlleistungen von 30 bis 40 W/(m² Bauteilfläche) können mit der Bauteilkühlung erreicht werden. Die max. Kühlleistung ist durch den Taupunkt der Raumluft begrenzt. Werden natürliche Wärmesenken, wie Erdsonden oder Grundwasser, zur direkten Kühlung verwendet, besteht aufgrund deren Temperaturniveaus in der Regel keine Gefahr der Tauwasserbildung am aktivierten Bauteil.

Bewegen sich die zu erwartenden Tagessummen der internen Gewinne, wie weiter oben für eine energieeffiziente Ausstattung in der Fläche ermittelt, um 150 Wh/(m²d), ist sogar ein ausschließliches Entladen der aktivierten Bauteile in der Nacht ausreichend. Bei nächtlicher Entladung kann zudem das Kühlpotential der Außenluft verwendet werden, dessen Erschließung mit Rückkühlwerken sich vergleichsweise einfach und kostengünstig darstellt. Unterstützend sollte eine kleinere Kältemaschine vorgesehen werden, welche das Abführen der eingespeicherten Wärme auch während wärmerer Sommernächte gewährleistet.

Besonders energieeffizient sind Systeme, welche die natürlichen Wärmesenken Erdreich und Grundwasser direkt zur Kühlung im Bauteil verwenden. Die Effizienz des Systems wird wesentlich durch den Energiebedarf der Primärpumpe (Grundwasser- bzw. Solepumpe) bestimmt. Entscheidend sind Rohrssysteme mit geringen Druckverlusten, korrekt ausgelegte Primärpumpen und eine Volumenstromregelung des Kühlmediums abhängig vom Kühlbedarf.

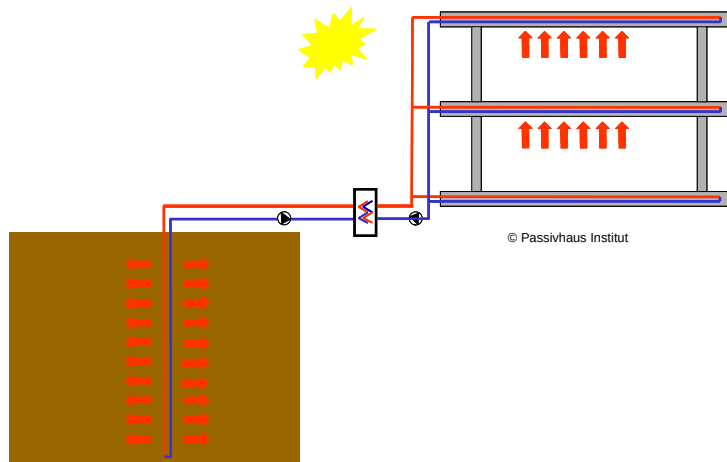


Abbildung 48: Funktionsweise der Betonkerntemperierung kombiniert mit der Wärmesenke Erdsonden. Über einen Wärmetauscher wird die Wärme an die Sole und damit an das Erdreich übertragen (Quelle: [Kaufmann/Schnieders 2012]).

Um den Vorteil der Umweltwärmesenke optimal zu nutzen, werden die Systeme bei geringen Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf des Kühlmediums betrieben. Daher sind zum Abführen der Kühlleistung höhere Massenströme notwendig. Der spezifische Massenstrom bei Betonkerntemperierung liegt gewöhnlich zwischen 5 und 16 kg/(m²h). Bei oberflächennahen Systemen mit höheren Kühlleistungen sind Massenströme zwischen 20 und 35 kg/(m²h) üblich (vgl. [Kalz et al. 2012]). Durch eine Volumenstromregelung des Kühlmediums nach der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf kann der Pumpenenergiebedarf verringert und die Effizienz des Gesamtsystems verbessert werden.

Messtechnische Untersuchungen in Büro- und Verwaltungsgebäuden mit der natürlichen Wärmesenke Erdreich bzw. Grundwasser belegen Jahresarbeitszahlen bis zu 8,0 kWh_{therm} / kWh_{el}. (vgl. [Kalz et al. 2012]). Systemoptimierungen lassen nochmals bessere Werte erwarten.

Sorgfältige Planung der Hydraulik und der Umweltwärmesenke sind unerlässlich. Fehler in der Auslegung des Sondenfeldes können unzureichende Kühlleistungen zur Folge haben, was im späteren Betrieb kaum noch zu korrigieren ist. In Extremfällen kann dies bis zur Nachinstallation von zusätzlichen Kühlsystemen führen.

Zudem hat die Betriebsweise wesentlichen Einfluss auf die Effizienz des Gesamtsystems. Ein durchgängiger Betrieb der Bauteilkühlung mit Nennvolumenstrom des Kühlmediums sollte vermieden werden. Eine Anpassung des Volumenstroms bei Teillast (Volumenstromregelung) und eine Reduzierung der Laufzeiten auf die tatsächlich erforderlichen Betriebszeiten sind wesentliche Schlüssel für energieeffiziente thermisch aktive Bauteile.

Empfehlungen zur Betonkerntemperierung nach [Kalz et al. 2012]:

- Rohrdruckverlust kleiner 300 Pa/m
- elektr. Leistungsaufnahme der Primärpumpe kleiner $40 \text{ W}_{\text{el}} / \text{kW}_{\text{therm}}$
- Temperaturdifferenz Vor- und Rücklauf zwischen 3 und 5 K.

Werden zu Kühlzwecken thermisch aktivierte Bauteile in Kombination mit Umweltenergie verwendet, sollte ein Einsatz des Konzepts auch zum Heizen geprüft werden. Das System ist ohnehin vorhanden, muss jedoch um eine Wärmepumpe ergänzt werden, welche im Winter mit dem Temperaturniveau der Wärmequellen (6 bis 14 °C) die erforderlichen Vorlauftemperaturen erreicht. Zudem sind aufgrund der großen wärmeübertragenden Flächen geringe Übertemperaturen der aktivierten Bauteile ausreichend, was auch im Heizfall effiziente Versorgungslösungen ermöglicht (vgl. Abschnitt 6).

Ein reversibler Betrieb der zum Heizen vorgesehenen Wärmepumpen im Sommer ermöglicht zudem höhere Kühlleistungen. Hinsichtlich der Effizienz bei derartigen Kühlsystemen (mit reversibler Wärmepumpe) kommt ein weiterer Aspekt hinzu. Als Entscheidend erweist sich die Auslegung der Wärmepumpe. Überzogene Sicherheitszuschläge, was häufiges Takten der Wärmepumpe und geringere Arbeitszahlen zur Folge hat, sollten vermieden werden. Zudem sollten die Wärmepumpensysteme für hohe Effizienz im projektspezifischen Einsatzbereich ausgewählt werden.

Um die langfristige Leistungsfähigkeit der Umweltenergie oberflächennaher Geothermie zu erhalten, sollte über das Jahr eine nahezu ausgeglichene Bilanz zwischen entzogener (Heizbetrieb im Winter) und eingespeicherter Wärme (Kühlbetrieb im Sommer) geachtet werden.

10.3.4 Abfuhr räumlich konzentrierter Kühllasten

In hochtechnisierten Bereichen sind häufig zusätzliche Kühlmaßnahmen erforderlich. Sofern möglich sollte die Wärme direkt an der Quelle erfasst werden, bevor sie zur Erwärmung des Raums führt. Eine einfache Lösung stellt die Absaugung am Gerät dar. Das Lüftungssystem muss hierzu in den Räumen entsprechend vorbereitet werden. Eine Luftleitung muss zur Abführung der Wärme bis zum Gerät geführt werden. Änderungen und Erweiterungen um zusätzliche Geräte sind aufwendig. Flexibler ist die Kühlung mit einem Kaltwasserkreis. Einige Geräte werden hierzu mit vorgerüsteter Wasserkühlung angeboten.

Die Erfassung der Lasten direkt an der Quelle ist aufgrund der relativ hohen Temperaturen am Wärmeentstehungsort außerdem effizienter, denn die Wärme

kann bei höheren Temperaturen des Kühlmediums und mit ggf. kleineren Massenströmen abgeführt werden.

Zusätzliche Kühlleistungen im Raum können mit Wasser-Luft-Systemen, wie Induktionsauslässen oder Gebläsekonvektoren und mit Kühldecken eingebracht werden. Die Systeme werden ebenfalls mit einem Kaltwasserkühlkreis betrieben.

Mit Induktionsauslässen können hohe Kühllasten abgeführt werden. Der Primärluftstrom des Lüftungssystems induziert im Auslasselement einen zusätzlichen Umluftstrom im Raum. Abhängig von der Bauform wird durch den Primärluftstrom ein zwei bis viermal höherer Sekundärluftstrom erzeugt. Ein integriertes Wasser-Luft-Kühlregister konditioniert gleichzeitig den Umluft- bzw. bei einigen Geräten auch den Gesamtluftstrom.

Günstig wirkt sich aus, dass der Außenluftstrom bzw. der Primärluftstrom entsprechend den hygienischen Bedarf und ohne Rücksicht auf die Kühllast ausgelegt werden kann. Jedoch erhöht das Induktionsprinzip die Druckverluste des Auslasses. Sind wenige Räume in einem Lüftungssystem mit Induktionsauslässen ausgerüstet, müssen ggf. die Zuluftstränge der restlichen Räume auf den erhöhten Druckverlust dieser Räume eingedrosselt werden.

Eine Alternative bieten Gebläsekonvektoren. Der Umluftvolumenstrom wird bei dieser Ausführung aktiv durch Gebläse gefördert. Z.T. handelt es sich auch um reine Umluftgeräte, die unabhängig von der Raumlufversorgung betrieben werden.

Im Unterschied zu Induktionsauslässen können Gebläsekonvektoren individuell unabhängig vom hygienischen Raumlufbedarf gesteuert werden. Aufgrund des eigenen Antriebs sind zusätzliche Druckverluste durch das Element im Zuluftkanalnetz gering.

Bei verhältnismäßig geringen Kühllasten können auch passive Kühl-Konvektoren eingesetzt werden. Die Kühlung erfolgt durch wassergeführte Leitungen. Jedoch wird hier im Gegensatz zu aktiven Elementen die Raumluf nicht ventilatorgetrieben durch das Kühlregister geführt, sondern passiert dieses vielmehr durch freie Raumlufzirkulation. Diese Kühlelemente werden typischerweise als freihängende Deckenelemente angeboten.



Abbildung 49: Dezentrale Kühlung am Beispiel von Kühlbalken, links: aktives Kühlelement, d. h., die Raumluft durchströmt die wassergeführten Leitungen ventilatorgetrieben; rechts: passives Kühlelement, d.h., die Durchströmung der wassergeführten Leitungen erfolgt durch freie Luftzirkulation im Raum. (Quelle: Swegon)

Die Leistung des Kühlbalkens wird durch die jeweilige Länge bestimmt. Passive Kühlbalken können auf diese Weise immerhin schon eine Kühlleistung von bis zu 250 W/m (Herstellerangaben) erzielen.

Zur Kompensation etwas höherer Kühllasten bieten Kühlflächen im Raum (z. B. als Kühldecken) eine weitere Alternative: Die Deckenelemente werden mittels eines Wasserkreises auf Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur gehalten. Die Kühldecke darf Temperaturen von etwa 16 °C zur Vermeidung von Tauwasser nicht unterschreiten. Wie die passiven Kühlbalken bedarf auch dieses System keiner zusätzlichen Ventilatorunterstützung. Unabhängig vom Betrieb der Lüftungsanlage können mit der Kühldecke Kühlleistungen bis zu 100 W/m² bereitgestellt werden. Kühldeckensysteme können in herkömmliche abgehängte Decken integriert werden und sind im Unterschied zur Betonkerntemperierung weniger träge und daher besser regelbar.

Zur Kompensation größerer Kühllasten können Konvektoren ventilatorgetrieben als aktive Kühlbalken zum Einsatz kommen. Damit sind je nach Balkenbreite und Volumenstrom gemäß Herstellerangaben Kühlleistungen von ca. 600 W/m bei trockener Kühlung, also ohne Kondensatausfall, realisierbar.



Abbildung 50: Beispiel eines dezentralen Kühlelements als Wandmodul (Quelle: Schako)

Aktive dezentrale Kühlelemente sind auch als Wandmodule erhältlich. Angeboten werden diese z. B. von Schako. Je nach Gerätegröße und Umluftvolumenstrom können Kühlleistungen von bis zu 1770 W (bei einem Umluftvolumenstrom von 470 m³/h) erzielt werden.

Mit aktiven dezentralen Kühlelementen sind hohe Kühlleistungen bei verhältnismäßig geringer spezifischer Ventilatorleistung erzielbar, denn im Vergleich zum zentralen RLT-Gerät gibt es außer dem Kühlregister bei der dezentralen Lösung kaum zu überwindende Druckverluste.

10.4 Kühlenergiebedarf

Der Kühlenergiebedarf eines Krankenhauses hängt von der Ausstattung, den angebotenen Leistungen und den im Hause untergebrachten Einrichtungen (Wäscherei, Verpflegungsküche, etc.) ab. Allgemeine Aussagen sind daher kaum möglich, der Bedarf kann nur anhand des konkreten Projekts ermittelt werden.

Anhand der Höhe der internen Lasten, die überwiegend auf Elektroanwendungen zurückzuführen sind, sind jedoch Abschätzungen möglich. Basierend auf dieser Annahme (vgl. auch Abschnitt 10.2) wird davon ausgegangen, dass der Nutzkältebedarf mit vertretbaren Maßnahmen (effiziente Elektroausstattung, geeignete Sonnenschutzmaßnahmen) im energieeffizienten Passivhaus-Krankenhaus auf 15 kWh/(m²a)⁵ begrenzt werden kann.

Wie in den Abschnitten zuvor gezeigt wurde, sind die in der Fläche zu erwartenden internen Lasten mit passiven Kühlmaßnahmen (von der freien Kühlung bis zur Bauteilkühlung) weitgehend zu decken. Da in Teilbereichen zudem verbindliche Raumtemperaturanforderungen bestehen und aufgrund der technischen Ausstattung auch räumlich konzentriert hohe Lasten auftreten, werden ferner Kältemaschinen erforderlich, um auch während Hitzeperioden den Kühlbedarf zu decken. Die passiven Kühlmaßnahmen sind daher nicht ausreichend, verringern jedoch den Bedarf und auch die vorzusehende Leistung aktiver Kältemaschinen.

Die Effizienz von Kompressionskältemaschinen hängt wesentlich vom zu überwindenden Temperaturhub ab. Standard-Kältemaschinen sind häufig für interne Temperaturhübe im Bereich von 30 bis 60 K ausgelegt, wobei, wenn Bauteilkühlung oder effiziente Umluftkühler verwendet werden, in der Regel 10 K ausreichend wären. Gebäudeplaner optimieren Systemtemperaturen und Komponenten daher häufig auf die typischerweise hohen Temperaturhübe der Standard-Kältemaschinen.

Effizienzpotentiale in der Kälteerzeugung, die sich durch geringe Kaltwassertemperaturen (18 bis 20 °C) bei Anwendung der Bauteilkühlung und anderer

⁵ Flächenbezug: Energiebezugsfläche nach [PHPP].

effizienter Systeme ergeben, werden daher häufig nicht genutzt. Also sollten Spielräume genutzt und das Gesamtsysteme auf geringe Temperaturhübe im Kälteprozess ausgelegt werden. Z. B. können die im Sommer ungenutzten Wärmeverteilungen als zusätzlicher Kaltwasserkreis mit höheren Temperaturniveau für effiziente Raumkühlsysteme herangezogen werden (vgl. Abschnitt 6.2).

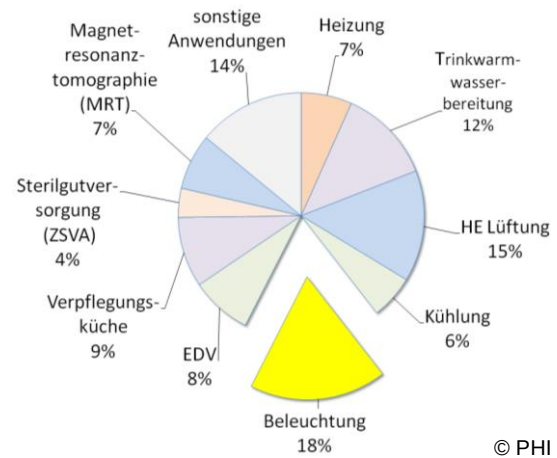
[Wellig et al. 2006] gibt an, dass alleine durch konsequente Abstimmung aller Komponenten auf möglichst geringe Temperaturhübe im eigentlichen Kälteprozess eine Verdopplung der Jahresarbeitszahl erzielbar ist.

Wesentliche Empfehlungen nach [Wellig et al. 2006] in Auszügen:

- Die Wahl des Raumkühl- und Rückkühlsystems legt den benötigten inneren Temperaturhub fest.
- Möglichst kleinen Temperaturhub anstreben (Vermeidung von unnötig tiefen Kaltwassertemperaturen/ Variable Verdampfungstemperatur/ Variable Kondensationstemperatur).
- Richtige Auswahl der Kältemaschine für kleinen Temperaturhub.
- Hoher Gütegrad auch bei kleinem Hub (z. B. Turbo- oder Scrollkompressor / großzügig ausgelegter Verdampfer und Kondensator).
- Auslegung der Wärmetauscher im Kaltwasser-System auf max. 1 K Temperaturdifferenz.

11 Beleuchtung

Anteil des Energiebedarfs für Beleuchtung (exemplarisch) am Gesamtprimärenergiebedarf (vgl. Abschnitt 4.12)



11.1 Einleitung

Genügend Licht für eine Sehaufgabe vorzusehen und gleichzeitig eine angemessene, angenehme Atmosphäre zu schaffen, ist eine herausfordernde Aufgabe. Licht ist für den Menschen von großer Bedeutung. 80 bis 90 % der Informationen aus der Umwelt nehmen wir über das Auge wahr. Licht ist auch ein Zeitgeber für unsere innere Uhr.

Gerade im Krankenhaus darf die vielfältige Bedeutung der Beleuchtung nicht unterschätzt werden. Tageslicht hat im Allgemeinen eine positive Wirkung auf das Wohlbefinden des Menschen. Die Bandbreite des Themas ist groß, im Folgenden steht jedoch der energetische Aspekt im Vordergrund. Dabei sollte die Einsparung jedoch stets durch höhere Effizienz und nicht durch Abstriche bei der Beleuchtungsqualität erzielt werden.

Im Vergleich zu anderen Nichtwohngebäuden sind im Krankenhaus vor allem die langen Nutzungszeiten charakteristisch. Viele Bereiche werden auch am Wochenende und in der Nacht genutzt. Aufenthaltsräume, wie z. B. die Bettenzimmer, Untersuchungsräume oder büroähnliche Dienstzimmer weisen Raumtiefen auf, welche gewöhnlich mit einseitiger Befensterung ausreichend mit Tageslicht versorgt werden können. Flure, Nasszellen, Aufnahmeräume und Befundräume der bildgebenden Diagnostik, Operationsräume, Lagerräume etc. sind hingegen häufig innenliegend und fensterlos.

Eine gute Tageslichtversorgung sollte in Aufenthaltsräumen, deren Zweck eine Tageslichtnutzung zulässt, primär sein. Mit dem Gebäudeentwurf wird hierbei die Tageslichtnutzung maßgeblich beeinflusst. Aufenthaltsräume müssen im Grundriss so angeordnet werden, dass sie ausreichend Tageslicht erhalten. Höhere Fensteranteile verbessern zwar die Tageslichtversorgung, hinsichtlich der sommerlichen

Behaglichkeit und des Heizwärmebedarfs sind jedoch eher moderate Fensterflächen anzustreben.

Neben der Tageslichtautonomie spielt vor allem die Kunstlichtplanung - aufgrund der langen und auch nächtlichen Nutzung - eine bedeutende Rolle. Die elektrische Leistungsaufnahme der Beleuchtungsanlage kann durch eine optimierte Planung gegenüber konventionellen Lösungen um bis zu 70 % reduziert werden.

Weiteres Potential bieten tageslichtabhängige Regelungen der künstlichen Beleuchtung und Anwesenheitssensoren. Allerdings weisen Krankenhäuser zum Großteil kleinere Räume auf, sodass eine Vielzahl solcher Systeme erforderlich sind, um eine flächendeckende Steuerung/Regelung zu erzielen. Dabei werden Lampenleistungen bei effizienter Beleuchtung von 75 bis 120 W in Bettenzimmern oder Untersuchungsräumen gedimmt oder vorzeitig abgeschaltet.

11.2 Tageslichtnutzung

Anordnung und Größe der transparenten Bauteile bestimmen maßgeblich die Tageslichtnutzung. Grundlegende Prinzipien der natürlichen Beleuchtung über einseitig befensterte Fassaden werden nachfolgend wiederholt.

Hohe Fenster verbessern den Tageslichteintrag in der Raumtiefe. Die Fenster in der Fassade sollten daher möglichst hoch angeordnet und - soweit möglich - ohne Sturz ausführt werden.

Laibungen (vor allem oben) und Jalousiekasten reduzieren ebenfalls den Tageslichteintrag. Abgeschrägte Laibungen können den Lichteinfall erhöhen. Ist die Laibung 25 cm tief, erhöht eine 45°-Abschrägung den Lichteinfall um rund 10 % (vgl. [Werner 2013]).

Transparente Flächen im Brüstungsbereich verbessern die Tageslichtversorgung hingegen nur unwesentlich, da diese kaum zur Beleuchtungsstärke auf dem Schreibtisch oder im Patientenbett beitragen. Geringe Brüstungshöhen in den Bettenzimmern der Pflegestationen können hingegen durchaus zweckmäßig sein, da sie den Sichtkontakt der im Bett liegenden Patienten zur Außenwelt verbessern.

Insbesondere im Zusammenhang mit dem sommerlichen Wärmeschutz ist auf eine moderate Fenstergröße zu achten, wohingegen die Tageslichtnutzung mit größeren Fenstern zunimmt. Ab einem Öffnungsanteil der Fassade von 50 % nimmt der Lichteintrag jedoch nicht mehr signifikant zu.

Arbeitsplätze und die der eigentlichen Nutzung vorbehaltenen Bereiche sollten möglichst in der Tageslichtzone, d.h. im fensternahen Bereich, angeordnet werden.

Dieser Bereich erstreckt sich bis zu einer Raumtiefe, deren Abstand zum Fenster der zweifachen Höhe der Fensteroberkante entspricht (etwa 4 bis 5 m).

Die Oberflächen im Raum sollten möglichst hell gestaltet werden (Decke, Wände, Boden). Dunkle Farben sind nur als Akzent einzusetzen. Helle Decken lenken außerdem Tageslicht in die Raumtiefe, um dort die natürliche Ausleuchtung zu erhöhen. Kritisch sind z. B. unbehandelte Sichtbetonoberflächen. Durch helle Oberflächen (Reflexionsfaktoren Decke 0,85 / Wände 0,60 / Boden 0,40) kann die natürliche Beleuchtungsstärke im Raum (Abstand zum Fenster 4 m) gegenüber einer mäßig hellen Gestaltung mit Sichtbeton (Reflexionsfaktoren Decke 0,50 / Wände 0,30 / Boden 0,20) sogar verdoppelt werden (vgl. [Chuard 1993]).

Auch helle Außen- und Innenfensterbänke lenken Tageslicht in den Raum und unterstützen die Tageslichtversorgung.

Der auf die Verglasung auftreffende Lichtstrom wird durch Reflexion und Absorption an den Scheiben geschwächt. Der Lichttransmissionsgrad nimmt daher - wie auch der Energiedurchlassgrad - mit der Anzahl der Scheiben und Beschichtungen ab und liegt bei Dreischeiben-Wärmeschutzglas etwa 10 % unter dem Transmissionsgrad eines konventionellen Zweischeiben-Wärmeschutzglases. Diese Reduktion kann aber durch entsprechend höhere Verglasungsanteile problemlos ausgeglichen werden. Gegenüber Standardverglasungsaufbauten sind durch Antireflexbeschichtungen auf der mittleren Scheibe und abgestimmte Low-E-Beschichtungen auch höhere Lichttransmissionsgrade bei Dreischeiben-Wärmeschutzglas erzielbar.

In vielen Aufenthaltsräumen, die zumindest einseitig befenstert sind, sind gute Tageslichtverhältnisse aufgrund der Raumgröße und vor allem der moderaten Raumtiefen realisierbar. Die Tageslichtzone erstreckt sich häufig nahezu über die gesamte Raumtiefe (etwa 4 bis 5 m). Dazu zählen Bettenzimmer, Untersuchungs- und Behandlungsräume, Therapiezimmer, Dienstzimmer, etc.

Allgemeine Flure hingegen sind häufig innen liegend und ohne Tageslicht. Eine gewisse natürliche Belichtung der Innenzonen kann mittels Fenstern in den Flurwänden von Räumen mit Tageslicht erreicht werden. Technische Anforderungen entsprechend dem Brandschutzkonzept sind dabei zu beachten.

Je nach Entwurf bieten sich Oberlichter oder transluzente Gläser in angrenzenden Seitenstreifen bzw. im Türblatt des Türelementes an. Die letzteren haben oft brandschutz-technische Festlegungen, die sich an reduzierten Qualitäten von Türen orientieren.

Erheblichen Einfluss auf die Tageslichtnutzung kann die Eigenverschattung des Gebäudes durch z. B. die Innenhofsituation haben. Reflexionen an den

Innenhofwänden können den Lichteintrag in die Innenhoffenster deutlich erhöhen. Für einen eher ungünstigen Fall eines engen und hohen Innenhofs (Grundfläche 5 m x 5 m, Höhe 15 m) erhöht sich der Lichteintrag im untersten Geschoss durch helle Gestaltung (Reflexionsgrad 90 %) um einen Faktor 9 gegenüber z. B. farbig gestalteten Innenhofwänden (Reflexionsgrad 30 %).

Reflexionsgrad der Innenhofwände	30 %	60 %	90 %
Faktor der Lichtstromzunahme am Innenhoffenster	1	2,6	9

Tabelle 17: Einfluss der Reflexionsgrade bei starker Verbauung bzw. Innenhöfen auf den Lichtstrom in tiefliegenden Innenhofräumen (Quelle [M. Werner 2013]).

Randbedingungen: Innenhof mit quadratischer Grundfläche (5 m x 5 m)
Höhe des Innenhofs: 15 m

11.3 Künstliche Beleuchtung

Im Krankenhaus bestehen aufgrund der verschiedenen und z.T. sehr anspruchsvollen Sehaufgaben sehr unterschiedliche Anforderungen an die Mindestbeleuchtungsstärke: 200 lx Nennbeleuchtungsstärke in öffentlichen Fluren und Aufenthaltsräumen und bis zu 1000 lx in Operationsräumen. Zudem werden Arzt-Leuchten bzw. OP-Leuchten eingesetzt, welche im Bereich des Operationsfeldes Beleuchtungsstärken wie im Freien bei klarem Himmel (100.000 lx und mehr) erzeugen können.

	Beleuchtungsstärke [lx]
Bettzimmer Allgemein- / Lesebeleuchtung	100/300
Flure mit Mehrzwecknutzung, Tagesaufenthaltsräume	200
Therapieräume, Personal-Aufenthaltsräume, Sterilräume	300
Dienstzimmer, Büroräume, Untersuchungsräume	500
Operationsräume	1.000
Operationsfeld	10.000 bis 100.000

Tabelle 18: Beleuchtungsanforderungen für Bereiche der Sehaufgabe und Bereiche der Tätigkeiten (Quelle [DIN EN 12464-1])

Aufgrund des 24-Stunden-Betriebes und der Anordnung der Räumlichkeiten steht Tageslicht örtlich und zeitlich nicht immer in ausreichendem Maße zur Verfügung und muss durch Kunstlicht ergänzt werden. Vor allem im Pflegebereich sind die typischen Nutzungszeiten länger als die Tageslichtverfügbarkeit. In Untersuchungs-, Behandlungs- sowie Therapieräumen und z.T. Dienstzimmern stimmen hingegen Nutzungszeiten und Tageslichtangebot besser überein (vgl. Abbildung 51).

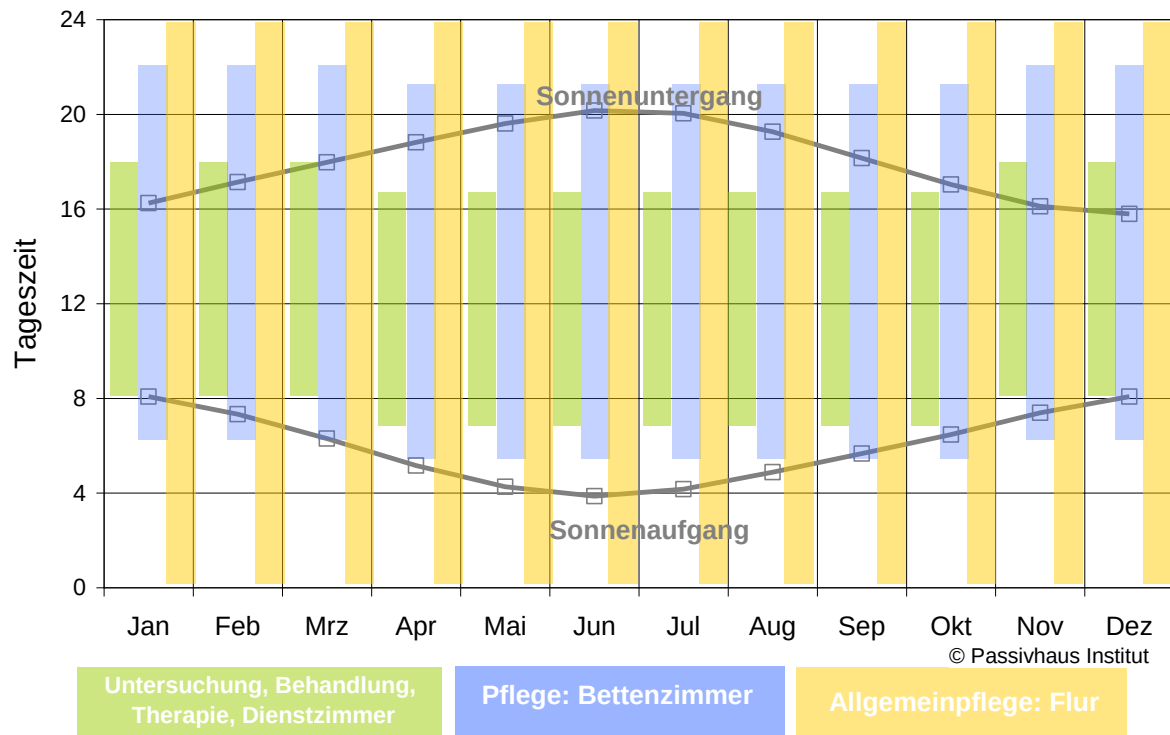


Abbildung 51: Typische Nutzungszeiten im Krankenhaus und Tageslichtverfügbarkeit (Sonnenauf- und Untergang im Jahresverlauf)

Bei ausreichend Tageslicht wird das Kunstlicht kaum noch wahrgenommen, weshalb ein Abschalten häufig vergessen wird. Eine Beleuchtungssteuerung birgt daher Einsparpotential, wenn die Beleuchtung abhängig von Tageslicht und der Belegung geschaltet wird.

Generell sollte der Nutzer aktiv die Beleuchtung ein- und ausschalten können. Um Kunstlicht bedarfsorientiert und energiesparend einzusetzen, sind folgende Strategien empfehlenswert:

In tageslichtversorgten Räumen mit höheren Beleuchtungsanforderungen (ab 500 lx im Bereich der Sehaufgabe) wie z. B. Untersuchungs- und Behandlungsräume sowie Büros ist der Einsatz von Auto-off-Steuerungen, welche bei ausreichender Beleuchtungsstärke automatisch abschalten, zu überprüfen.

Wenig frequentierte Räume wie nicht öffentlich genutzte Flure, Treppenhäuser, Lagerräume, Technikräume etc. sollten mit Zeitrelais oder Präsenzmeldern ausgestattet werden.

In innenliegenden Besucher- und Personaltoiletten, Umkleiden etc. sollten Eingangsbewegungsmelder vorgesehen werden. Auf Steuerungen mit geringem Eigenverbrauch sollte geachtet werden (vgl. auch [Linder 2012]). Sind erhöhte Beleuchtungsstärken zu Untersuchungszwecken (in der Regel 1.000 lx) z. B. in Bettenzimmern oder Untersuchungsräumen fest installiert, sollte durch die Schalterlösung sichergestellt sein, dass die Beleuchtung nur zu diesem Zweck betätigt wird.

Sofern im Raum eine Bereichseinteilung bezüglich der Sehaufgabe(n) vorgenommen werden kann, sind die teilflächenbezogene und die arbeitsbereichsbezogene Beleuchtung unbedingt der raumbezogenen Variante vorzuziehen. Eine teilflächenbezogene oder arbeitsbereichsbezogene Beleuchtung unterscheidet zwischen dem Bereich der eigentlichen Sehaufgabe, indem geeignete Beleuchtungsstärken (vgl. [DIN EN 12464-1]) hergestellt werden müssen, und der unmittelbaren Umgebung, in der geringere Beleuchtungsstärken ausreichend sind.

Neben energetischen Vorteilen können die teilflächenbezogene und die arbeitsbereichsbezogene Variante aufgrund der unterschiedlichen Helligkeitsniveaus der einzelnen Arbeitsbereiche und des Umgebungsbereiches die Atmosphäre des Raumes positiv beeinflussen.

Beleuchtungsstärke [lx] im Bereich der	
Sehaufgabe	unmittelbaren Umgebung
200	150
300	200
500	300
≥ 750	500

Tabelle 19: Beleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe und Anforderung im unmittelbaren Umgebungsbereich (Quelle [DIN EN 12464-1])

Wenn der Bereich der Sehaufgabe während der Planung nicht festzulegen ist, kann dieser auch mit Arbeitsplatzleuchten z. B. in Dienstzimmern individuell an die räumlichen Gegebenheiten angepasst werden.

Sind die erforderlichen Beleuchtungsstärken in den verschiedenen Bereichen festgelegt, bestimmen die Raumeigenschaften (Raumwirkungsgrad), die Leuchtenwahl (Leuchtenwirkungsgrad) und das Leuchtmittel (Lichtausbeute) die elektrische Leistungsaufnahme der Kunstlichtanlage.

Helle Räume verringern den Kunstlichtbedarf, denn sie erhöhen den Raumwirkungsgrad. Standardreflexionsgrade von Wänden (50 %) und Decken (70 %) sollten überschritten und in der Kunstlichtauslegung auch angesetzt werden. Werden die Wände z. B. überwiegend weiß angelegt (Reflexionsgrad 80 %), verringert sich der Kunstlichtstrombedarf einer direkten Beleuchtung gegenüber der Standard-Annahme (50 %) bei gleicher Beleuchtungsstärke um 15 %. Bei indirekter Beleuchtung ist der Einfluss einer hellen Raumgestaltung nochmals größer.

Form und Reflektoren der Leuchte bestimmen den im Raum nutzbaren Lichtstrom, wobei für verschiedene Beleuchtungsaufgaben auch unterschiedliche Leuchtentypen vorzusehen sind. Der Betriebswirkungsgrad beschreibt den Anteil des in der Leuchte emittierten Lichtstroms, der auch tatsächlich im Raum nutzbar ist.

Zudem spielt die Verlustleistung des Vorschaltgeräts und die Lichtausbeute des Leuchtmittels eine große Rolle. Leuchtstofflampen mit elektronischen Vorschaltgeräten sind effiziente und wirtschaftliche Leuchtmittel und werden für viele Beleuchtungsaufgaben in Krankenhäusern eingesetzt. Dreiband-Leuchtstoffröhren der EU-Effizienzklasse A erzielen Lichtausbeuten von über 85 lm/W (Lumen je Watt elektrischer Energie).

Aufgrund zunehmender Vielfalt der Leuchtmittel durch LED-Technik und zugehöriger Leuchten ist die Lichtausbeute des Systems aus Leuchte und Leuchtmittel eine zweckmäßigere Bewertungsgröße. Sie gibt das Verhältnis aus im Raum nutzbarem Lichtstrom und zugeführter elektrischer Leistung an. Eine Auswertung marktverfügbarer Leuchten in [Gasser 2006] als Vorarbeit zur SIA 380-4 belegt erstaunliche Effizienz-Unterschiede. Obwohl Leuchten mit gleichem, effizientem Leuchtmittel gewählt wurden (Leuchtstofflampen mit EVG) schwankt die Leuchten-effizienz fast bis zu einem Faktor 20! 15 % der Leuchtentypen erzielten dabei Leuchten-Lichtausbeuten von 75 lm/W und mehr. Wie die Untersuchung zeigt, können bereits durch gezielte Produktauswahl erhebliche Effizienzpotentiale erschlossen werden.

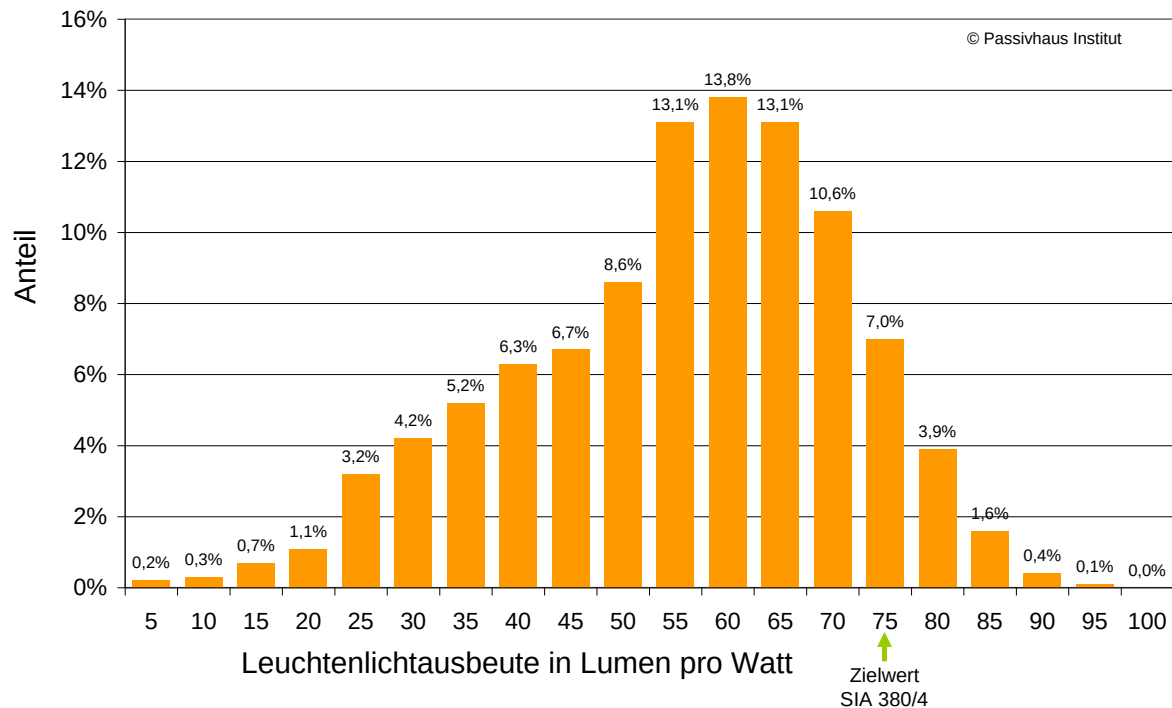


Abbildung 52: Häufigkeitsverteilung der Leuchtenlichtausbeute von Leuchtstofflampen mit EVG. Obwohl nur Leuchten mit effizientem Leuchtmittel ausgewertet wurden, schwankt die Lichtausbeute der Leuchten erheblich (Datenquelle: [Gasser 2006])

In Operationsbereichen und der Intensivpflege müssen aufgrund der hygienischen Erfordernisse geschlossene Leuchten mit Abdeckung, welche leicht zu reinigen sind, eingesetzt werden. In anderen Bereichen des Krankenhauses sind sie nicht zwingend erforderlich, werden aber zur Verbesserung der Grundhygiene gerne eingesetzt. Absorption und Reflexion an der Abdeckung verringern im Vergleich zu offenen Systemen (wie Spiegelrasterleuchten) den nutzbaren Lichtstrom im Raum um etwa 10 % (Einbauleuchte mit Leuchtstoffröhre). Erfreulich ist die gegenwärtige Entwicklung im Bereich der LED-Leuchten. Aktuelle marktgängige Produkte gleichen diesen Effizienzverlust aus bzw. erzielen sogar nochmals höhere Leuchtenlichtausbeuten (vgl. Abbildung 53).

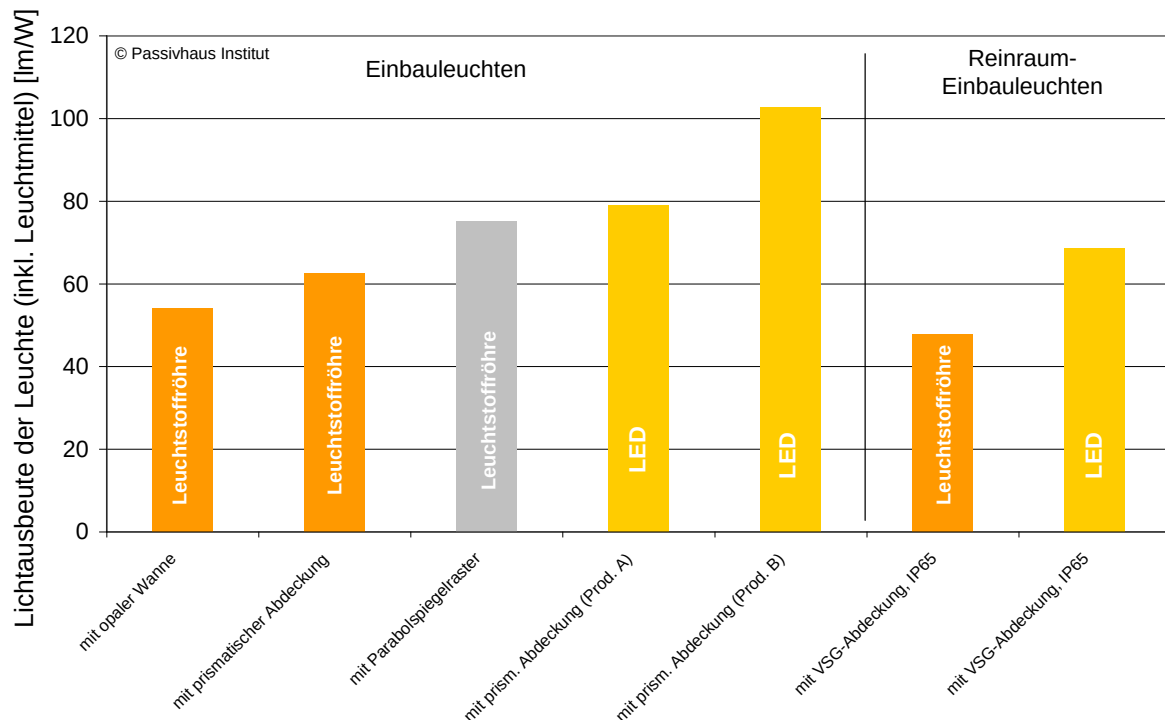


Abbildung 53: Leuchtenlichtausbeuten von Einbauleuchten. Eine Abdeckung der Leuchte (z. B. prismatische Scheibe) verringert den nutzbaren Lichtstrom im Vergleich offenen Spiegelrasterleuchten (dritte Säule). Neuere Entwicklungen mit LED-Technik können den Nachteil der Abdeckung mehr als kompensieren.
Daten: Einbauleuchte im Rastermaß 625 x 625 (mm), Herstellerangabe
 Reinraum-Einbauleuchte 1248 x 298 (mm)

Die Raumgestaltung, teilflächenbezogene Beleuchtungskonzepte sowie die Auswahl und Anordnung der Leuchten bieten erhebliche Spielräume die installierte Leistung und damit den Energiebedarf des Kunstlichtsystems zu beeinflussen. Häufig können durch Optimierungen auch die Anzahl der Leuchten und damit die Investitions- und Wartungskosten verringert werden.

Eine bewährte Methode Effizienzpotentiale in der Planung zu nutzen, ist die frühzeitige Vereinbarung von Ziel- und Grenzwerten der installierten elektrischen Leistung abhängig von der geforderten Beleuchtungsstärke und je m² Grundfläche (vgl. [LEE], [SIA 380-4], [VDI 3807-4], [Linder 2012]). Die Werte gelten einschließlich Betriebsgerät und sind je m² Nettogrundfläche und je 100 lx geforderter Beleuchtungsstärke festgelegt.

Frankfurt fordert für städtische Gebäude in den "Leitlinien zum wirtschaftlichen Bauen" Grenzwerte von 2,5 W/(m² 100lx) und Zielwerte von 2 W/(m² 100 lx) (vgl. [Linder 2012]). Dabei ist die installierte Leuchtenleistung, im Unterschied zu den Angaben in Beleuchtungsberechnungsprogrammen, auf die erforderliche Nennbeleuchtungsstärke und nicht auf die berechnete mittlere Beleuchtungsstärke zu beziehen. Für die Auslegung reicht nach aller Erfahrung ein Wartungsfaktor von 0,8.

Ein Randstreifen von 0,5 m kann bei Berechnung der Nennbeleuchtungsstärke und der Gleichmäßigkeit unberücksichtigt bleiben. Zudem wird nach den Frankfurter Leitlinien gefordert, dass für jede Raumart auch ein rechnerischer Nachweis mit einem geprüften Programm zuführen ist, dass die Beleuchtungsstärke die Sollwerte nach [DIN EN 12464-1] nicht unnötig übersteigen (Abweichung max. 10 % vom Sollwert).

	Empfehlung für Grenzwert	Empfehlung für Zielwert
Leitlinien zum wirtschaftlichen Bauen (Frankfurt/M.) [Linder 2012]	2,5 W/(m ² 100 lx)	2,0 W/(m ² 100 lx)
SIA 380/4, Elektrische Energie im Hochbau [SIA 380/4]	ca. 3,0 W/(m ² 100 lx)	ca. 2,2 W/(m ² 100 lx)
Leitfaden Elektrische Energie im Hochbau [LEE]	ca. 3,3 W/(m ² 100 lx)	ca. 2,4 W/(m ² 100 lx)

Tabelle 20: Planungsempfehlungen für die spezifische installierte Leistung der Beleuchtung

11.4 Energiebedarf der Kunstlichtanlage

Das Raumprogramm in Krankenhäusern zeigt eine große Bandbreite an Nutzungen, Nutzungszeiten, und Raumgrößen. Um wesentliche Einflüsse auf den Energiebedarf und Einsparpotentiale aufzuzeigen, werden fünf häufige Raumkategorien herangezogen (vgl. Tabelle 21). Größe, Geometrie und Fensterflächenanteil entsprechen der Planung zum Neubau des Klinikums in Frankfurt Höchst.

	Nutzungstage in der Woche	Nutzungsstunden je Tag [h]	Beleuchtungsstärke [lx] (Sehaufgabe)	Beleuchtungsstärke [lx] (Umfeld / Allgemein)	Tageslicht / Fensterflächenanteil (Bezug auf Grundfläche)
Pflege 2-Bettzimmer	7	14	300 (Leselicht)	100 (Allgemeinbeleuchtung)	20 %
Untersuchungs- und Behandlungsraum (Raum U/B)	5	10	500	300	20 %
Dienstraum Arzt	5	10	500	300	20 %
Flur Allgemeinpflege 7/7	7	24	200 (tags) 50 (nachts)		Kein Tageslicht
Flur Untersuchung / Behandlung (Flur U/B) 5/7	5	10	200 (tags)		Kein Tageslicht

Tabelle 21: Untersuchte Raumkategorien und Randbedingungen.

Im Folgenden werden verschieden effiziente Lösungen betrachtet. Die effizienteste Lösung (Variante 1) geht davon aus, dass die Kunstlichtanlage die Zielwertvorgaben gemäß [SIA 380-4] erfüllt, d.h. dass die spez. installierte Leistung höchstens $2,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 100 \text{ lx})$ beträgt und, soweit möglich, teilflächenbezogene Beleuchtungskonzepte verfolgt werden. Der Einfluss der Tageslichtnutzung und die Berechnung der Volllaststunden basiert auf dem Verfahren der [SIA 380-4]. Eine sehr helle Raumgestaltung und eine tageslichtabhängige Regelung verbessern die Nutzung des Tageslichtangebots in Variante 1.

Varianten 2 und 3 gehen von einer hellen Raumgestaltung aus. Die Beleuchtungsanlage wird manuell geschaltet, wobei die spezifische Leistung die Grenzwerte nach [SIA 380-4] (Variante 2) bzw. nach [EnEV 2009] (Variante 3) einhält.

Variante	Raumreflexionsgrad (Decke / Wände / Boden)	Kunstlicht- Kontrolle	Kunstlicht / spez. elektr. Leistung
Variante 1 / optimierte Planung (Zielwert SIA 380-4)	80 % / 50 % / 30 %	Tageslicht- regelung	Anpassung an Bereich der Sehaufgabe, Zielwert SIA380-4
Variante 2 (Grenzwert SIA 380-4)	70 % / 50 % / 20 %	Manuelle Schaltung	Einheitliche Beleuchtungs- stärke in gesamten Raum, Grenzwert SIA380-4
Variante 2 (EnEV 2009)	70 % / 50 % / 20 %	Manuelle Schaltung	Spez. Leistung gemäß EnEV2009 der Referenz- ausführung

Tabelle 22: Randbedingungen zur Berechnung des Energiebedarfs: Anhand der Raumgeometrien und Fensterflächenanteilen des Klinikentwurfs und dem Verfahren gemäß SIA 380-4 sind die zu erwartenden Volllaststunden ermittelt.

Die Pflegezimmer und die Flure der Allgemeinpflege haben - aufgrund der langen Nutzungszeiten - die höchsten Energiebedarfswerte (vgl. Abbildung 54). Hinzu kommt, dass die Flure in der Regel nicht direkt mit Tageslicht versorgt werden.

Im Bettenzimmer wird, in den Varianten mit geringerer Effizienz 2 und 3, wie auch in der [DIN V 18599] angenommen, dass im gesamten Raum eine ausreichende Beleuchtungsstärke zum Lesen erzielt wird. Im Bettenzimmer wird die Beleuchtung häufig als Systemlösung aus indirekter Allgemeinbeleuchtung und direkt-strahlender Leselampe, die in die Versorgungsschiene integriert ist, ausgeführt. Die Anschlussleistungen konventioneller Systeme liegen dabei im Bereich der Varianten 2 und 3.

Im Vergleich von öffentlichen Fluren im Pflegebereich und den Fluren im Bereich der Untersuchung und Behandlung wird die Bedeutung der Nutzungszeit deutlich. Obwohl nachts ein reduzierter Betrieb in der Pflege berücksichtigt wird (bereitgestellte Beleuchtungsstärke 50 anstatt 200 lx), ist der berechnete Bedarf dort mehr als doppelt so hoch.

Zwar sind die Mindestbeleuchtungsstärken in den Untersuchungs- und Behandlungsräumen und Dienstzimmern am höchsten, doch bestehen dort aufgrund der überwiegend am Tage stattfindenden Nutzung auch die besten Voraussetzungen für die Tageslichtnutzung. Der Kunstlichtbedarf ist dort daher deutlich geringer als in den Bettenzimmern.

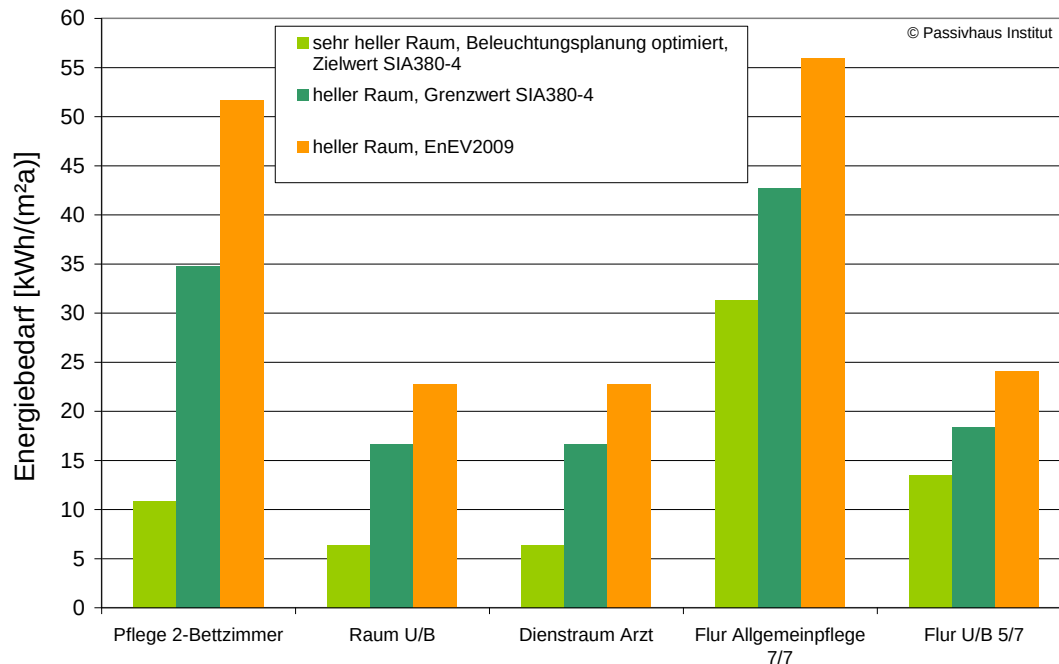


Abbildung 54: Energiebedarf der künstlichen Beleuchtung für ausgewählte Bereiche

Raum U/B: Untersuchungs- und Behandlungsraum

Randbedingungen:

- sehr heller Raum: Raumreflexionsgrade 80 % / 50 % / 30 %

- heller Raum: Raumreflexionsgrade 70 % / 50 % / 20 % Varianten

gemäß Tabelle 22

Gegenüber der Variante 3 mit Kunstlicht gemäß [EnEV 2009] besteht ein erhebliches Einsparpotential. Der wesentliche Beitrag wird hierbei mit der effizienten Kunstlichtausstattung erzielt (vgl. Abbildung 55). Gegenüber der effizienten "Variante 1" (Zielwerte werden eingehalten) beträgt die Einsparung alleine durch die optimierte Ausstattung mit Leuchten 70 % (Bettenzimmer) bzw. 60 % (U/B-Raum, Dienstzimmer).

Dass die Zielwerte gemäß SIA380-4 tatsächlich einzuhalten sind, belegen erste optimierte Varianten der Beleuchtungsplanung zum Klinikum (vgl. Abbildung 55). In den Untersuchungsräumen und Dienstzimmern werden die Zielwerte sogar noch unterschritten. In den Fluren erreicht das untersuchte Konzept mit Einbaudownlights nicht ganz den Zielwert (wobei die mittlere Beleuchtungsstärke den Anforderungswert auch um rund 35 % übersteigt). Lösungsvarianten mit Langfeldleuchten unterschreiten den Zielwert sogar.

Wie weiter oben bereits angeführt, werden in Bettenzimmern gerne in Versorgungsschienen integrierte Beleuchtungslösungen eingesetzt. Die modulare Systembe-

leuchtung erfüllt die medizinisch-pflegerischen Ansprüche und schafft eine wohnliche Atmosphäre. Wie eine Auswertung zeigt, erfüllen sie die empfohlenen Zielwerte auch in der LED-Ausführung nicht. Die Effizienz wird dabei vor allem durch die indirekte Allgemeinbeleuchtung reduziert. Beleuchtungskonzepte mit direktstrahlenden Deckenleuchten zur Allgemeinbeleuchtung erfüllen hingegen die Anforderungen auch in den Bettenzimmern, dies entspricht dem Ansatz aus der Planung zum Klinikneubau.

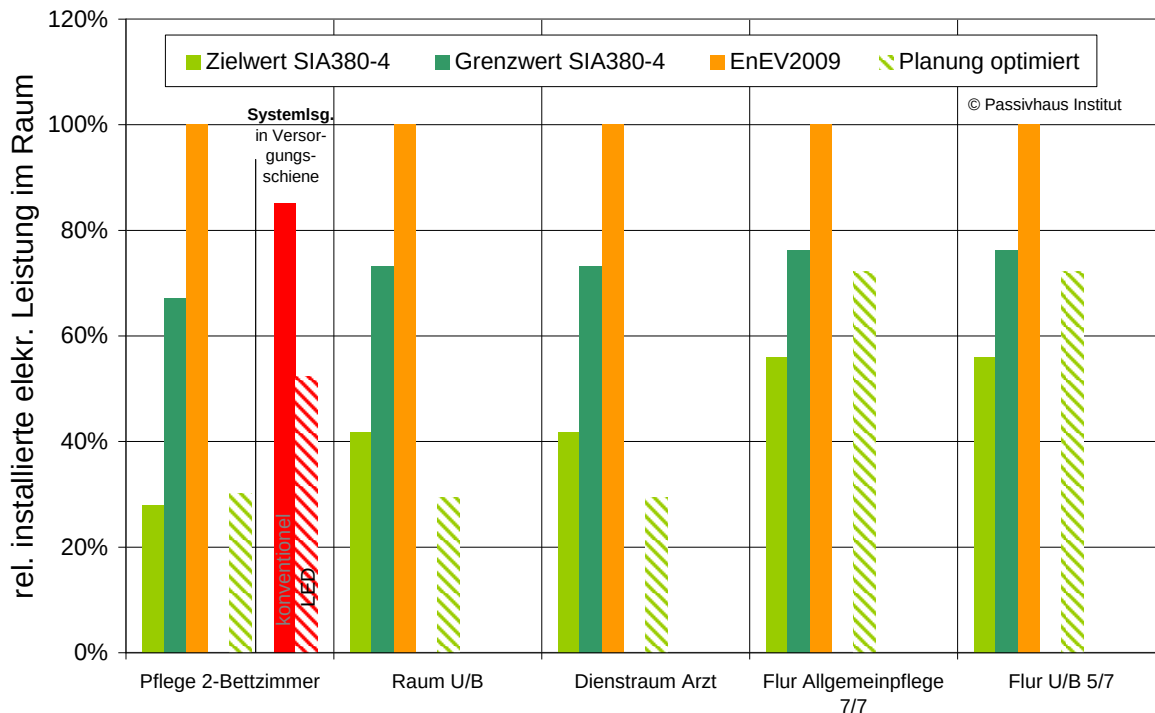


Abbildung 55: Relative elektrische Leistung der Kunstlichtanlage je Raum. Die Beleuchtung gemäß EnEV 2009 entspricht 100 %. Die Optimierung der Lichtanlage unter Einhaltung des Zielwerts leistet den maßgeblichen Beitrag zur Energieeinsparung. Planung optimiert: optimierte Beleuchtungsplanung zum Neubau des Klinikums. Raum U/B: Untersuchungs- und Behandlungsraum

Tages- und Kunstlicht haben im Krankenhaus eine zentrale Bedeutung. Das Beleuchtungskonzept sollte für genesende Patienten eine angenehme und dem Personal eine konzentrationsfördernde Atmosphäre schaffen.

Werden zudem energetische Aspekte berücksichtigt, bestehen in Krankenhäusern erhebliche Einsparpotentiale. Übertragen auf die Verhältnisse der Neubauplanung des Klinikums Frankfurt Höchst, beträgt die mögliche Einsparung durch die zuvor genannten Maßnahmen rund 65 % (vgl. Abbildung 56).

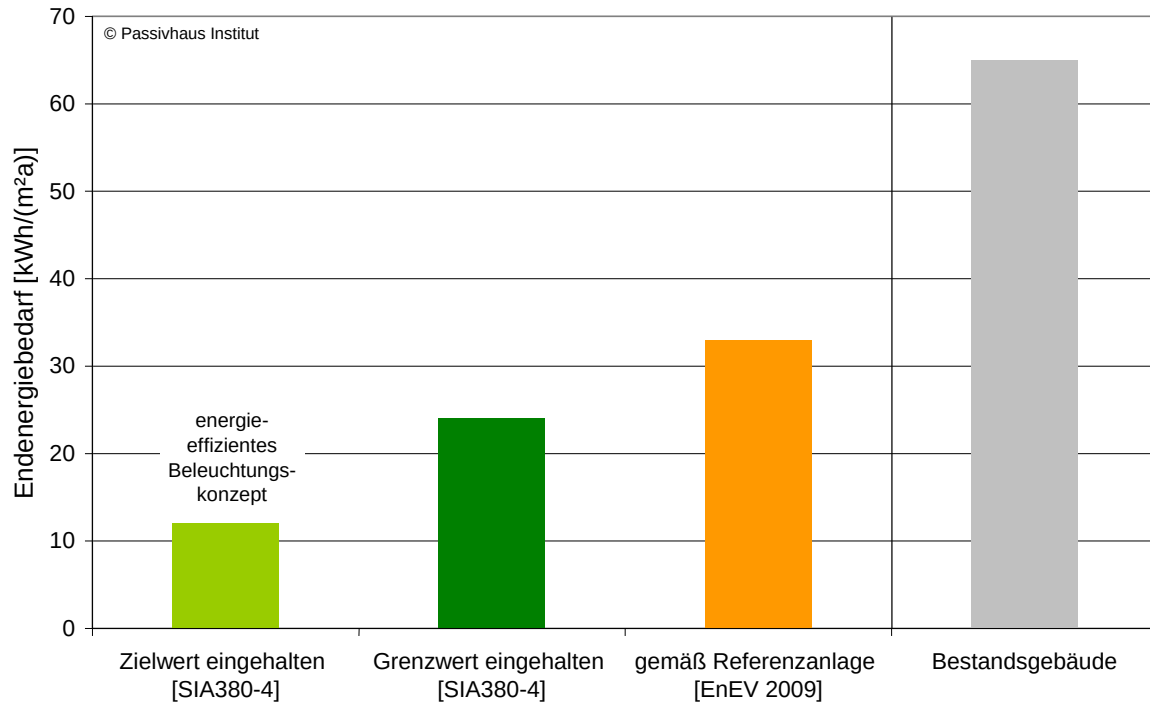
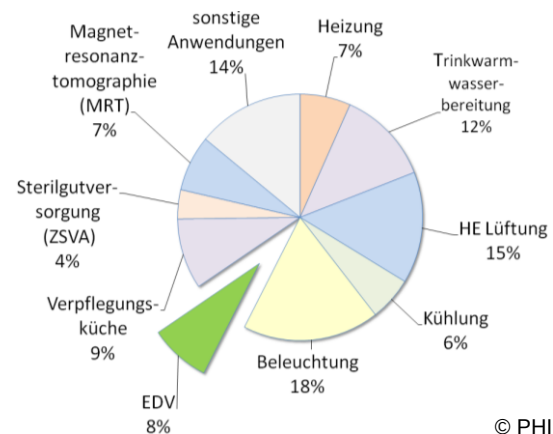


Abbildung 56: Berechneter Endenergiebedarf des Neubaus Klinikums Frankfurt Höchst.
 Durch energieeffiziente Beleuchtungskonzepte bestehen Einsparpotentiale gegenüber konventionellen Ansätzen von 65 %. Das Einsparpotential gegenüber älteren Beleuchtungsanlagen in Bestandsgebäuden ist nochmals größer.

12 EDV

Anteil des Energiebedarfs der EDV (exemplarisch) am Gesamtprimärenergiebedarf (vgl. Abschnitt 4.12)



In den vergangenen Jahren wurden viele krankenhausspezifische Abläufe durch EDV unterstützt und der Trend ist ungebrochen. Daten werden zunehmend elektronisch gesammelt und mittlerweile sind sogar moderne medizinische Geräte direkt in das EDV-System eingebunden. Patienten- und Behandlungsdaten werden elektronisch verwaltet und direkt über die EDV nutzbar gemacht. Im Übergang zu elektronischen Patientenakten ersetzen sie immer häufiger Unterlagen aus Papier.

Visiten werden schon papierlos mit mobilen Endgeräten durchgeführt. Die Patientendaten und Untersuchungsergebnisse sind mit deren Hilfe bei der Visite und bei Untersuchungen direkt am Endgerät abrufbar.

EDV-Geräte werden energieeffizienter. Aus unterschiedlichen Gründen besteht ein Trend zur "Green-IT". Entscheidend ist, dass überhaupt Anforderungen an die Energieeffizienz bei Neuanschaffungen gestellt werden. Die Geräteentwicklung im IT-Bereich ist sehr dynamisch, ständig werden neue Produkte auf den Markt gebracht. Steht eine Neuanschaffung an, sollte sich die Kaufentscheidung daher am aktuellen Stand der Technik orientieren. Zahlreiche Ratgeber unterstützen bei der Produktauswahl.

Den Energiebedarf eines EDV-Arbeitsplatzes zeigt Abbildung 57. Gegenüber einem herkömmlichen einige Jahre alten PC-Arbeitsplatz, kann der Energiebedarf mit aktuellen Geräten deutlich reduziert werden.

Thin-Clients sind PC-ähnliche Endgeräte mit reduzierter Prozessor-Leistung und minimaler Hardwarekonfiguration, die eigentliche Rechnerleistung befindet sich auf zentralen Servern. Im Beispiel wurde dem Thin-Client im Betrieb noch eine serverseitige Leistungsaufnahme von 10 W zugerechnet.

Die Lösung mit Laptop kommt im betrachteten Beispiel auf den geringsten Energiebedarf. Neben dem integrierten Display wird bei diesem Ansatz kein weiterer Monitor berücksichtigt.

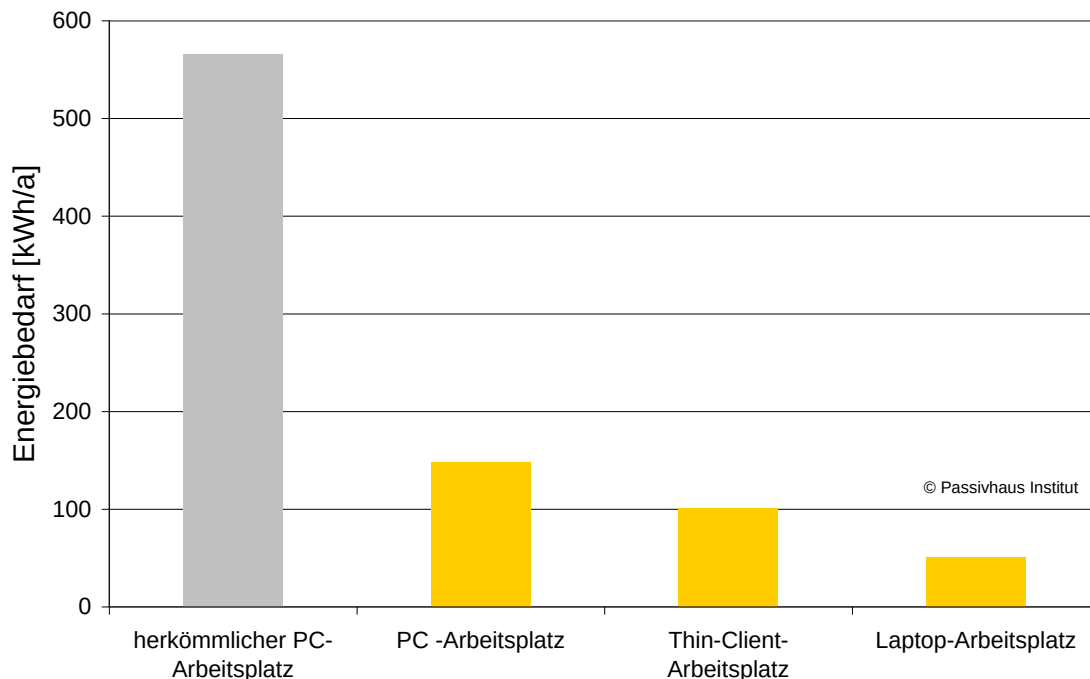


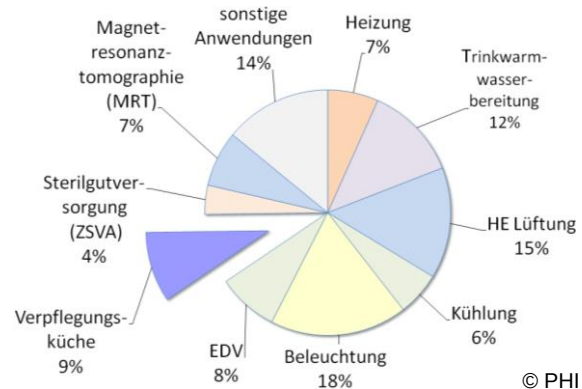
Abbildung 57: Endenergiebedarf eines Arbeitsplatzes im Krankenhaus (z. B. Behandlungszimmer, Dienstzimmer). EDV-Geräte sind in letzten Jahren deutlich energiesparender geworden. Die Säule links entspricht dem Energiebedarf eines einige Jahre alten PC-Arbeitsplatzes.

Ausstattung: PC-Arbeitsplatz: PC, Monitor, Telefon

Neben der Ausstattung am Arbeitsplatz besteht ein erheblicher Energiebedarf in der Serverstruktur. Für eine effiziente EDV-Ausstattung des Neubaus des Klinikums Frankfurt Höchst ergibt sich ein Endenergiebedarf des gesamten EDV-Systems (Ausrüstung mit Thin-Client-Arbeitsplätzen) von etwa 8 kWh/(m²a). Um eine Überhitzung und Ausfälle von Servern zu vermeiden, werden Serverräume klimatisiert. Aufgrund der hohen Leistungsdichten besteht z.T. erheblicher Kühlbedarf. Um neben dem Energiebedarf der Serverstruktur auch den Kühlbedarf gering zu halten, sollten Server mit höherer Temperaturtoleranz verwendet werden. Eine Nutzung der Abwärme sollte geprüft werden. Werden kleinere Serverräume an (möglichst nördlichen) Außenfassaden angeordnet, kann mit geringem Aufwand die freie Kühlung genutzt werden. Außerdem sollte eine Nutzung der Abwärme geprüft werden.

13 Verpflegungsküche: Zubereitung warmer Mahlzeiten

**Anteil des Energiebedarfs für
Zubereitung der warmen Mahlzeiten
(exemplarisch) am Gesamtprimär-
energiebedarf (vgl. Abschnitt 4.12)**



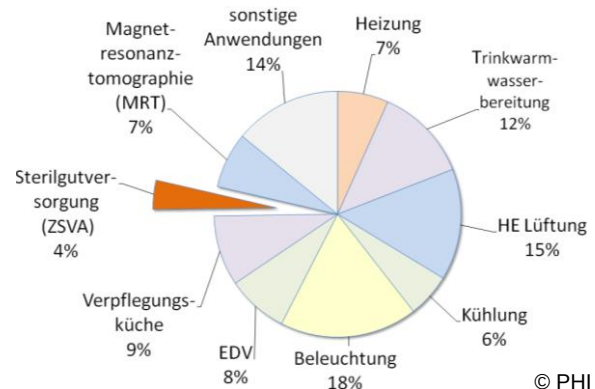
Gewerbliche Küchen zählen zu den energieintensiven Gebäudenutzungen. Die typischen Anwendungen wie Kochen, Braten und Backen ebenso wie das Geschirrspülen und die Lebensmittel-Kühlung sind einerseits mit hohem Energieeinsatz verbunden und erzeugen andererseits hohe interne Wärme- und Feuchtelasten, die mit entsprechend dimensionierten Küchenlüftungen abgeführt werden müssen. Nur ein Bruchteil der aufgewendeten Energie in Küchen dient dem eigentlichen Prozess (z. B. dem Garen); der Rest ist letztlich in den Raum freigesetzte Wärme. Eine energieeffiziente Küchentechnik hat daher gleich mehrfach Vorteile, sie spart Energie, verringert in der Regel die internen Lasten und kann somit zu kleiner dimensionierten Lüftungsanlagen führen.

Eine interessante Synergie von Energiespartetechnologien tritt ein, wenn neben der Energieverbrauchssenkung gleichzeitig die Raumluftbelastung durch Wrasen und Abwärme verringert wird. Einige Küchengeräte bieten bereits Ansätze einer "Lösung im Gerät", welche gleichzeitig den Abluftbedarf stark verringert. Eine Weiterentwicklung derartiger Lösungen in Küchengeräten erscheint wesentlich für zukünftige effiziente Gewerbeküchen. Spülmaschinen werden bereits mit wirksamen Techniken zur Effizienzverbesserung angeboten. Der Energiebedarf kann durch Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser und aus der Abluft (Wrasen) deutlich verringert werden. Als besonders interessant stellt sich die Kondensation des Wrasens heraus, da mit dieser Maßnahme gleichzeitig die Raumluftbelastung und der Abluftbedarf verringert werden kann. Erhebliches Potential birgt auch eine "integrale Planung". Die frühzeitige Beteiligung aller Akteure (auch eines Küchenplaners und des Küchenbetreibers) und die Klärung der tatsächlichen Anforderungen sind wesentliche Schlüssel für den Erfolg des Projekts.

Ausgehend von einem typischen Endenergieverbrauch je warmer Mahlzeit für alle Energieanwendungen inklusive der erforderlichen Haustechnik von etwa 2 kWh sind mit verfügbaren Technologien Energieeinsparungen bis zu 70 % realisierbar. Ausführlich werden Maßnahmen in [Kah 2012b] diskutiert.

14 Zentrale Sterilgutversorgungsabteilung (ZSVA)

Anteil des Energiebedarfs der Sterilgutversorgung (exemplarisch) am Gesamtprimärenergiebedarf (vgl. Abschnitt 4.12)



Die ZSVA eines Krankenhauses stellt Medizinprodukte, wie z. B. Operationsbesteck, bereit. Zum Aufgabenbereich gehören die Reinigung, Desinfektion, Pflege, Sortierung und Sterilisation dieser sensiblen Produkte (vgl. auch [KRINKO 2012]). Z.T. übernehmen auch externe Dienstleister diese Aufgabe.

Zu den energetisch relevanten Prozessen in dieser Abteilung zählt der Reinigungsprozess der zuvor benutzten Produkte und die anschließende Sterilisation. Die ZSVA gehört zu den energieintensiven Abteilungen eines Krankenhauses.

14.1 Bezugsgröße STE

Die Kapazität einer ZSVA oder eines Sterilisators wird gewöhnlich in Sterileinheiten (STE) angegeben. Eine STE ist dabei eine genormte Volumeneinheit von 60 cm x 30 cm x 30 cm. Das Sterilgut und andere Hilfsmittel müssen in ein Behältnis dieser Größe passen. Da die Medienverbräuche und die Größe der ZSVA vor allem vom Umsatz an Medizinprodukten abhängen, wird im Abschnitt zur ZSVA auch dieses eingeführte Maß als Bezugsgröße verwendet.

Richtwerte zum Umsatz an STE in einem Krankenhaus der Grundversorgung gibt Abbildung 58. Demnach werden in einem Haus mit 800 Betten etwa 150 STE pro Tag benötigt.

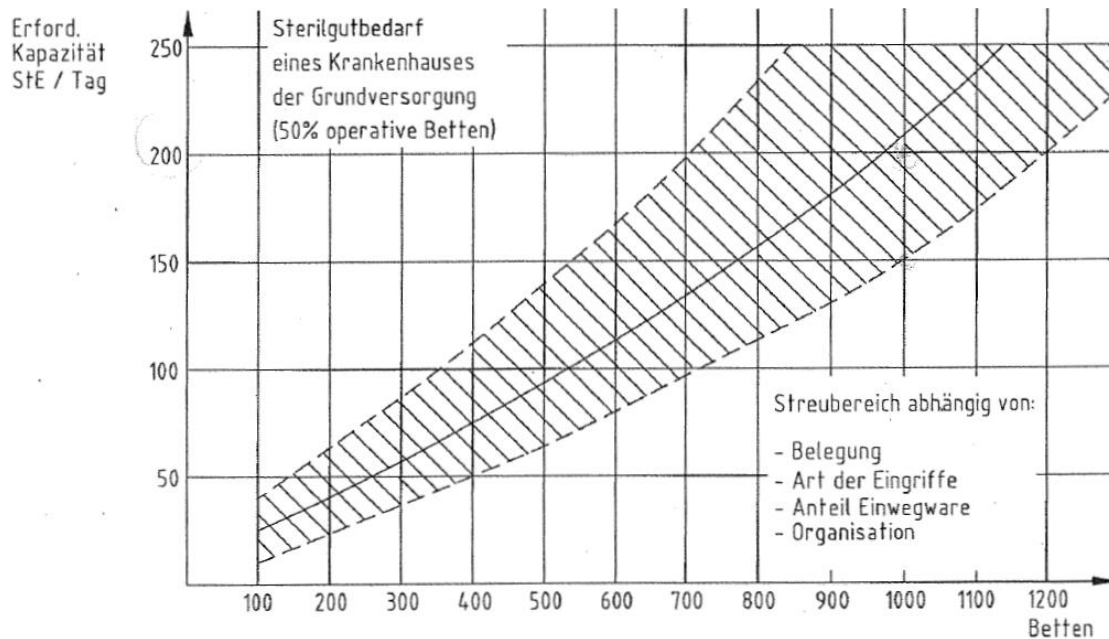


Abbildung 58: Anhaltswerte zum Bedarf an Sterileinheiten als Funktion der Bettenanzahl in einem Krankenhaus der Grundversorgung.
 (Quelle: Datenblatt Kapazitätsermittlung von Dampfsterilisatoren – Richtwerte, F. & M. Lautenschläger GmbH & Co. KG.)

14.2 Reinigungs- und Desinfektionsautomaten

In Reinigungs- und Desinfektionsautomaten werden benutzte Medizinprodukte, wie z. B. Operationsbesteck, gereinigt. Zuvor werden die Instrumente zerlegt und grob vorgesäubert. Das vorbereitete Besteck wird auf Siebe sortiert und im Beschickungswagen in den Automaten gefahren.

Die Automaten bieten unterschiedliche auf die Produkte zugeschnittene Reinigungsprogramme. Im Wesentlichen handelt es sich um vier Prozessschritte:

- Vorreinigen mit kaltem Wasser, da z. B. eiweißhaltige Verunreinigungen wie z. B. Blut, bei höheren Temperaturen gerinnen würden. Größere Verschmutzungen werden entfernt.
- Anschließendes Reinigen mit warmem Wasser (ca. 65 °C) unter Zusatz von Reinigungsmitteln. Das Wasser wird mittels Pumpen umgewälzt, durch Düsen auf das Sterilgut gerichtet und anschließend gefiltert.
- Spülen und Desinfektion mit heißem VE-Wasser (ca. 93 °C).
- Abschließende Gebläsetrocknung bei ca. 100 °C. Hierzu wird Raumluft über HEPA-Filter angesaugt, auf 100 °C erhitzt und in die Reinigungskammer geblasen.

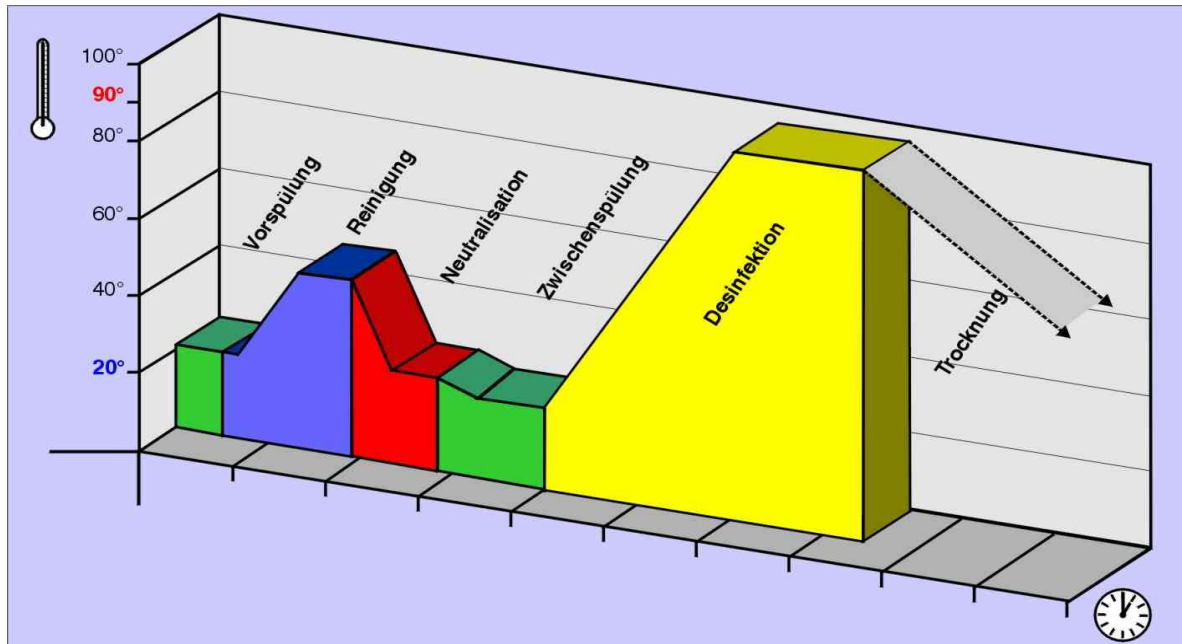


Abbildung 59: Vereinfachte Prozessschritte für chirurgische Instrumente in einem Reinigungs- und Desinfektionsautomaten.
 (Quelle: Miele Professional, Beispiel VARIO-Programm)

Eine Aufstellung zum Energiebedarf eines Reinigungsautomaten zeigt Abbildung 60. Die Angaben zum Energie- und Wasserbedarf geben eine grobe Orientierung und wurden aus Herstellerangaben und Verbrauchsmessungen abgeleitet. Sie können je nach spezifischer Nutzung und erforderlichen Reinigungsprogrammen davon deutlich abweichen.

Die wesentlichen Beiträge zum Energiebedarf gehen auf die Erwärmung des Wassers und des VE-Wassers zurück. Im Unterschied zu gewerblichen Geschirrspülmaschinen (vgl. auch [Kah 2012c]), welche mit der regenerierten und immer noch warmen Spüllauge viele Spülgänge durchführen, wird innerhalb der Reinigungsautomaten keine Mehrfachnutzung angewendet. Dies liegt zum einen an den hygienischen Anforderungen und auch an der geringeren Anzahl der Spülzyklen. Während professionelle Gastronomiegeschirrspülmaschinen 100 und mehr Spülzyklen am Tag durchführen, werden Reinigungsautomaten nur etwa 10 Mal neu gestartet.

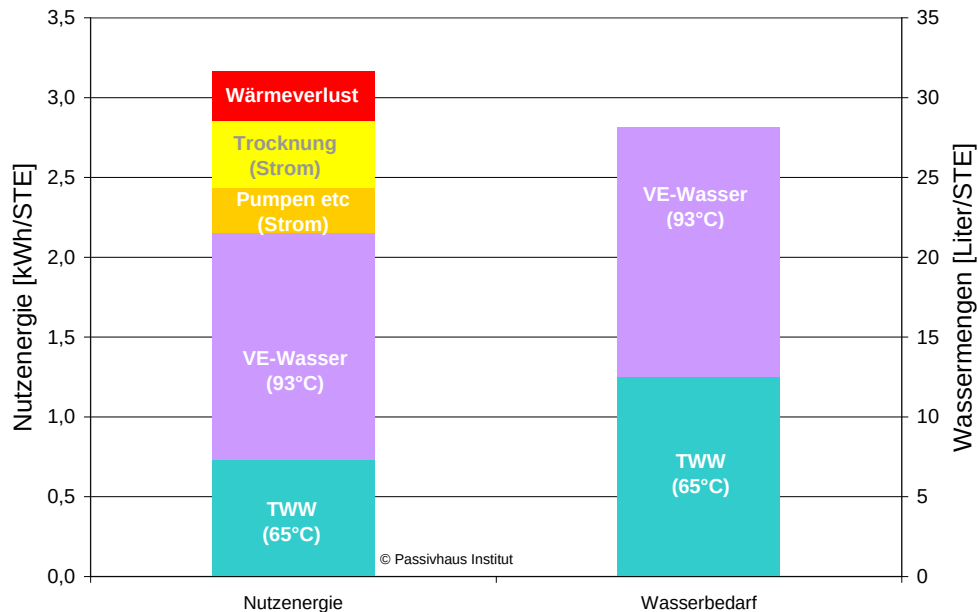


Abbildung 60: Exemplarische Angaben zum Nutzenergie- und Wasserbedarf je Sterileinheit. Der tatsächliche Bedarf hängt vom konkreten Reinigungsgut und dem erforderlichen – Reinigungsprogramm ab. Der wesentliche Anteil liegt mit rund 75 % beim Erwärmen des Wassers und des VE-Wassers.

Da der größte Energieanteil der Erwärmung des Warmwassers dient, liegt dort auch das wesentliche Einsparpotential. Eine naheliegende und verfügbare Maßnahme ist der sparsame Umgang mit Wasser. Durch Abstimmung der Wassermengen auf die Standzeit vor dem Spülvorgang und die Art der Reinigungsgüter kann mit verringerten Wassermengen gearbeitet werden. Sind die Wege zur ZSVA z. B. kurz (ZSVA direkt im Haus) und die Weiterverarbeitung entsprechend zügig, sind Verschmutzungen in der Regel leichter zu lösen. Energieeinsparungen um 20 % sind durch den intelligenten Wassereinsatz möglich (vgl. Abbildung 61).

Zusätzliches Potential bietet die Nutzung des Wrasens aus dem Spülautomat. Durch Kondensation des Wasserdampfes am kalten Frischwasserzulauf sind weitere Einsparungen in geringerem Umfang realisierbar.

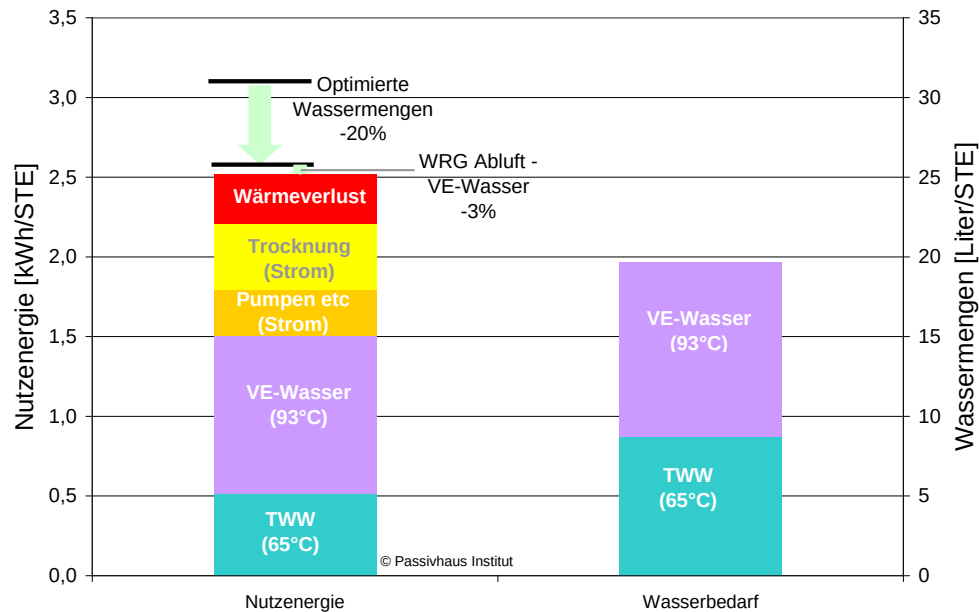


Abbildung 61: Ein wesentliches Energieeinsparpotential liegt in angepassten Wassermengen. Abhängig vom Reinigungsgut und je nach Standzeit der Instrumente sind auch geringere Wassermengen ausreichend. Aus Herstellerangaben wurde ein Einsparpotential von etwa 20 % ermittelt. Zusätzliches Potential bietet die Kondensation der Abluft am Zulauf des VE-Wassers. Beide Technologien sind Markt verfügbar.

Auch bei der energetisch verbesserten Variante gelangt der größte Anteil der Energie nach dem Spülgang ins Abwasser, nur ein Bruchteil geht in die Erwärmung des Sterilguts. Interessant erscheint hier eine Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser. Dabei muss beachtet werden, dass das Abwasser aus der Vorspülung stark verschmutzt ist und die Temperaturniveaus je nach Spülgang verschieden hoch ausfallen.

Eine interessante Lösung besteht in der Wiederverwendung des heißen VE-Wassers aus der Desinfektionsphase. Durch eine Ventilschaltung wird dieses Wasser in einem gesonderten Tank gesammelt und kann in Großreinigungsautomaten, welche ausschließlich Transportwagen und Container reinigen, ein zweites Mal verwendet werden. Einige Hersteller bieten dazu fertige Tanksysteme für größere ZSVA an.

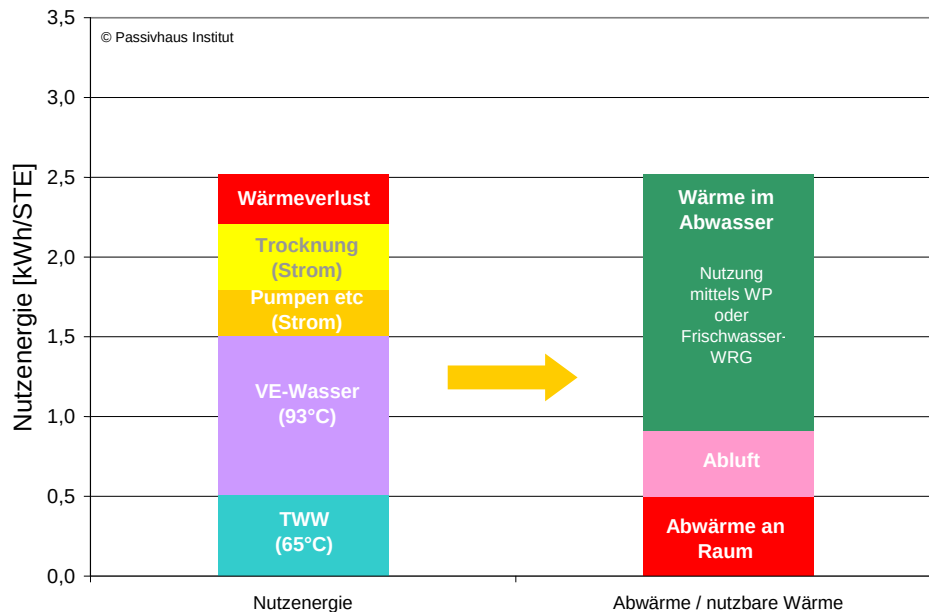


Abbildung 62: Nutzenenergiebedarf des Reinigungsautomaten und Wege der Prozesswärme je Sterileinheit.

Exemplarische Angaben, der tatsächliche Bedarf hängt vom konkreten Reinigungsgut und dem erforderlichen Reinigungsprogramm ab.

Eine weitere Möglichkeit stellt eine reine Wärmerückgewinnung aus einzelnen Prozessschritten dar. Eine Bypass-Schaltung muss hierfür sicherstellen, dass stark verschmutztes Wasser aus der Vorspülung nicht durch den Wärmeübertrager gelangt und diesen verschmutzt. Die Wärme könnte auf das im nächsten Spülgang benötigte Warmwasser übertragen werden. Dabei sprechen die örtliche Nähe und die übereinstimmenden Wassermengen für eine Nutzung im selben Gerät. Leider ist diese energetisch zweckmäßige Anwendung hygienisch kritisch, da im Wärmetauscher Frischwasser- und Abwasserströme aneinander vorbeigeführt werden. Zum Zeitpunkt der Studie gab es noch keine Reinigungsgeräte, welche die Wärme aus dem Abwasser direkt zurückgewinnen.

Alternativ kann das Abwasser auch in einem zusätzlichen, nicht im Gerät befindlichen Wärmerückgewinnungssystem genutzt werden. Z. B. werden für professionelle Geschirrspülmaschinen und Duschabwasser Wasser-Wasser-Wärmeübertrager eingesetzt, welche direkt den Frischwasserzulauf erwärmen. Doppelwandige Konstruktionen stellen eine Trennung von Abwasserstrom und Frischwasserzulauf sicher. Labormessungen belegen Wirkungsgrade um 40 % (vgl. [KIWA 2012]). Auf der Abwasserseite muss durch regelmäßiges Spülen und ggf. Hochdruckreinigung, einer, den Wärmeübertrag vermindernenden Biofilmbildung entgegengewirkt werden.

Ferner kann die Abwasserwärme mit Wärmepumpensystemen genutzt werden. Dabei sollte die Nutzung der unvermischten Abwässer direkt in der ZSVA geprüft werden, denn dort stehen höhere Temperaturniveaus zur Verfügung.

14.3 Sterilisation

Zweck der Sterilisation ist die Abtötung bzw. Inaktivierung von Krankheitserregern. Je nach Medizinprodukt kommen unterschiedliche Verfahren zur Anwendung. Die zuverlässige Sterilisierung auch in Hohlräumen stellt dabei eine besondere Herausforderung dar.

Die **Dampfsterilisation** ist das sicherste Verfahren und gemäß einschlägiger Richtlinien im Krankenhaus zu bevorzugen (vgl. [KRINKO 2012]). Bei diesem Verfahren wirkt reiner, gesättigter Wasserdampf auf die Oberflächen des Sterilisiergutes. Durch die Kondensation auf den Instrumentenoberflächen wird ein hoher Wärmeübertrag sichergestellt. Um eine gleichmäßige Dampfdurchdringung zu erzielen und verbleibende Luft möglichst vollständig aus der Kammer zu entfernen, wird zyklisch ein Vakuum erzeugt. Das Verfahren ist hoch reproduzierbar, es bleiben keine giftigen Rückstände und es ist für die meisten Produktklassen geeignet. Die Einwirkung von Hitze und Dampf ist jedoch mit hohem Energieeinsatz verbunden.

Bei der **Heißluftsterilisation** wird mit trockener Hitze sterilisiert. Das Verfahren wird jedoch als deutlich unsicherer eingestuft, da der Wärmeübergang bei trockener Hitze sehr langsam erfolgt und die thermischen Eigenschaften (Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit) des Instruments sowie die Beladung die lokale Prozesstemperatur beeinflussen.

Ein mikrobizides Gas wird zur **Gassterilisation** bei geringen Temperaturen verwendet. Die Verfahren sollten nur bei thermolablen Sterilgütern verwendet werden, grundsätzlich sollte die Dampfsterilisation bevorzugt werden. Zum Einsatz kommen Ethylenoxid und Formaldehydgas. Aufgrund der toxischen Eigenschaften wird vor allem die Gefährdung des Personals und ggf. durch Rückstände auch der Patienten kritisch bewertet.

Ein weiteres Verfahren, welches vor allem für thermolabile Sterilgüter, angewendet wird, ist die **Niedertemperatur-Wasserstoffperoxid-Sterilisation** (oder auch als Plasma-Sterilisation bezeichnet). Aus Wasserstoffperoxid werden in diesem Verfahren hochreaktive Radikale erzeugt, welche die Zellmembran von Mikroorganismen zerstören. Im Unterschied zur Gassterilisation bleiben keine toxischen Rückstände. Jedoch ist das Verfahren nur eingeschränkt für Hohlkörper geeignet. Im Krankenhaus wird der Einsatz nur für bestimmte, vor allem thermolabile Sterilgüter im Routinebetrieb empfohlen. Da der Prozess bei niedrigen Temperaturen durchgeführt wird, ist der Energiebedarf deutlich geringer, als in der Dampfsterilisation.

14.3.1 Dampfsterilisator

Die Dampfsterilisation ist im Krankenhaus das bevorzugte Verfahren. Der Prozess ist standardisiert, zeigt eine hohe Reproduzierbarkeit bei den Ergebnissen, ist für die meisten Produktklassen geeignet und gilt als wirtschaftliches Verfahren. Gleichzeitig ist es das energieintensivste Verfahren. Die Prozesse im Dampfsterilisator und der damit verbundene Energiebedarf werden daher im Folgenden näher betrachtet. Der Sterilisationsprozess medizinischer Produkte läuft im Wesentlichen in vier Phasen ab (vgl. auch [Meurer et al. 2011]).

Phase I: Anheizzeit / Steigezeit / Entlüftung. Entlüftung zur Erzeugung einer gleichmäßigen Dampfdurchdringung. Steigezeit, in der die Sterilisiertemperatur im freien Innenraum erreicht wird.

Phase II: Ausgleichszeit, bis alle Bereiche des Sterilguts die gleiche Solltemperatur erreichen.

Phase III: eigentliche Einwirkzeit (Abtötungszeit zzgl. Sicherheitszuschlag) bei der vorgegebenen Temperatur zur Abtötung der Mikroorganismen.

Ausgleichs- zzgl. Einwirkzeit werden auch als Plateauzeit bezeichnet.

Phase IV: Abkühlungszeit für Druckentlastung, Trocknung und Wiederbelüftung von Kammer und Beladung.

Ist die Sterilisierkammer befüllt, beginnt zunächst der Entlüftungsprozess, welcher den Anteil nicht kondensierbarer Gase (wie z. B. Luft) möglichst stark verringert und diesen durch Wasserdampf ersetzt. Hierfür sind zwei Verfahren gebräuchlich: Durch Verdrängen der spezifisch schwereren Luft durch Wasserdampf (Gravitationsverfahren) oder mittels des, bei medizinischen Produkten üblichen, fraktionierten Vakuumverfahrens, welches auch die Entlüftung von Hohlräumen sicherstellt. Dabei werden Vakuumpumpen und anschließende Wasserdampfzugabe so lange wiederholt, bis die geforderte Verdünnung erreicht wird. Durch Kondensatbildung und anschließendes Verdampfen bei Vakuum werden Hohlräume entlüftet. Ist der Entlüftungsprozess unzureichend, kann ein erhöhter Restluftgehalt die Abtötungszeit für Mikroben deutlich verlängern.

Der eigentliche Sterilisierprozess startet mit der Ausgleichszeit. Diese Phase beginnt, wenn an einer eher ungünstigen Stelle in der Kammer die Sterilisiertemperatur erreicht wird. Durch sie wird sichergestellt, dass tatsächlich die gesamte Beladung die Sterilisiertemperatur erreicht hat. Die Temperaturen nähern sich in dieser Zeit der theoretischen Sattedampf Temperatur an. Während der eigentlichen Einwirkzeit (auch Haltezeit genannt) wird das Sterilgut in einem engen Temperaturband um die Sterilisiertemperatur gehalten. Dabei muss Wasserdampf auch tatsächlich an den Instrumenten kondensieren, da der mit der Kondensation verbundene hohe Wärme-

übertrag und das flüssige Wasser maßgeblich für die Sterilisationswirkung sind. Die konkrete Einwirkzeit (oder auch Haltezeit) richtet sich nach der Sterilisiertemperatur und den zu behandelnden Mikroorganismen. Um Kondensat an den Kammeroberflächen zu vermeiden, wird auch der Kammermantel dauerhaft mit Dampf beheizt.

Zur Trocknung des Sterilguts wird der Systemdruck in der Kammer auf ein tiefes Vakuum abgesenkt, so dass Kondensat und Tropfen verdampfen. Abschließend wird Sterilluft eingeblasen, welche zusätzlich Wasserdampf aufnimmt. Je nach Trocknungsprogramm können die Schritte auch wiederholt werden. Abbildung 63 veranschaulicht die Prozessschritte und die Druckverhältnisse in der Kammer des Sterilisators.

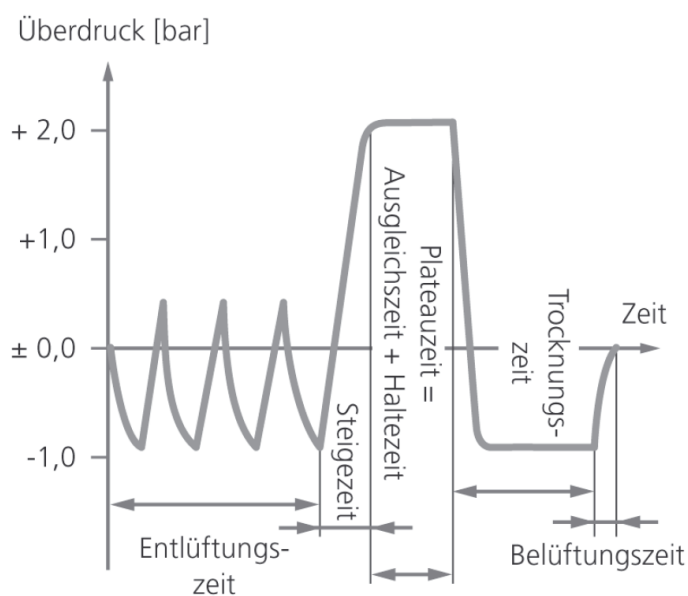


Abbildung 63:
Prozessschritte des fraktionierten
Vakuumverfahrens in der Dampf-
sterilisation.

Quelle: [Meurer et al. 2011]

Nur ein kleiner Teil des Gesamtenergiebedarfs wird zur Erwärmung des Sterilguts, der Behälter, des Transportwagens und der heißen Bestandteile des Geräts (insbesondere die druckfeste, doppelwandige Sterilisierkammer) auf annähernd Sattdampf-temperatur aufgewendet. Die Wärmeverluste der Sterilisierkammer zum Raum und die Verluste bei geöffneter Tür, während dem Be- und Entladen, stellen weitere Beiträge dar.

Die Vakuumpumpe zum Entlüften als auch zum abschließenden Trocknen verursacht zudem einen elektrischen Energiebedarf. Die Vakuumanlage arbeitet besonders effektiv, wenn nicht der gesamte Dampf durch die Vakuumpumpe gesaugt werden muss, sondern die größere Dampfmenge in einem vorgeschalteten Prozess auskondensiert und als flüssiges Wasser abgeführt werden kann. Heutige Sterilisatoren sind daher mit Dampfkondensatoren ausgerüstet.

Der größte Teil der zugeführten Energie (bis zu 70 %) wird prozessbedingt durch zyklische Vakuumphasen im Dampfkondensator und in der Pumpe in das Kühlwasser abgegeben. Häufig wird hierzu auch direkt mit Frischwasser gekühlt.

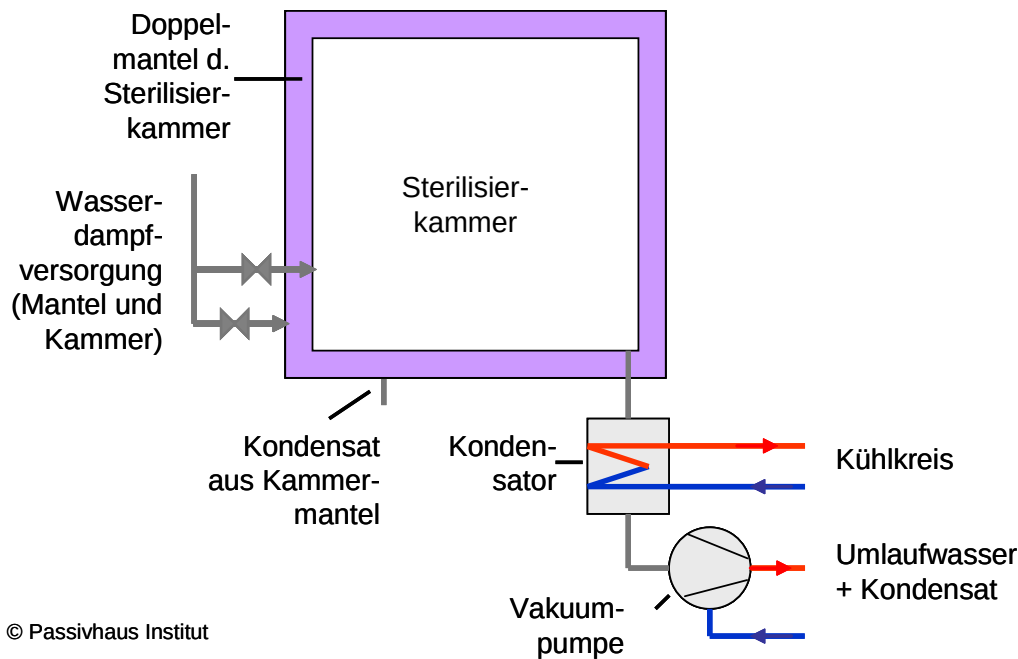


Abbildung 64: Schema eines Dampfsterilisators mit Vakuumanlage. (Quelle: PHI)

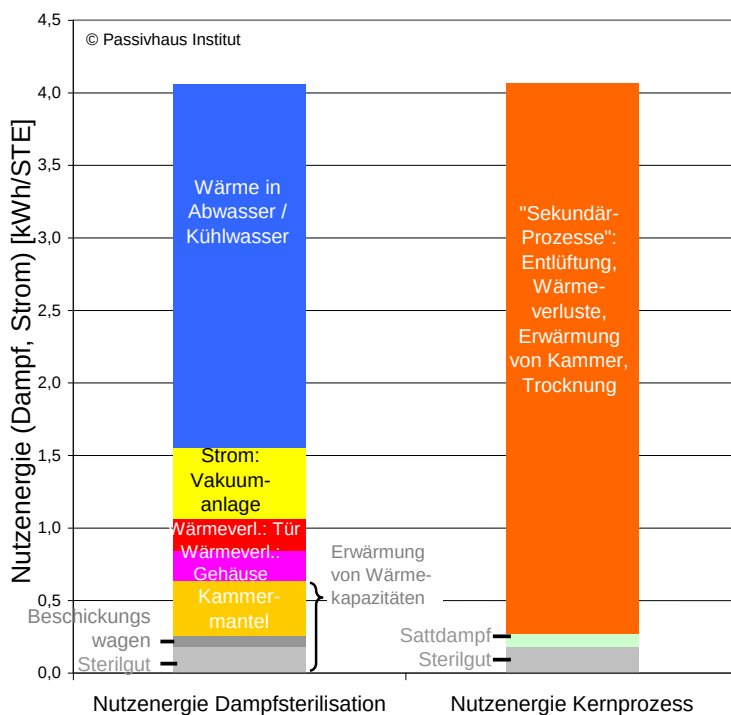


Abbildung 65: Zusammensetzung des Nutzenergiebedarfs der Dampfsterilisation je Sterileinheit. Nur etwa 5 % der eingesetzten Energie gehen in den eigentlichen Kern-(Sterilisations-)Prozess (Erwärmung des Sterilguts und Füllung der Sterilkammer mit Sattdampf).
Die Werte sind anhand Herstellerdaten und Verbrauchserhebungen im Bestandsgebäude des Klinikum Frankfurt Höchst abgeschätzt. Abhängig von den tatsächlichen Betriebsbedingungen, von den zu sterilisierenden Produkten, der Größe des Sterilisators und der Auslastung ist die Schwankungsbreite der Werte groß.

Bessere Dämmung der Sterilisierkammer und möglichst kurze Beladungszeiten bieten nur kleine Einsparpotentiale. Vergleichbares gilt für verringerte Wärmekapazitäten der heißen Komponenten des Sterilisators sowie des Transportwagens und der Transportbehälter. Jedoch reduzieren diese Maßnahmen die thermischen Lasten in der ZSVA, denn die heißen Bestandteile kühlen in deren Räumen ab und sind daher gleichzeitig ein Beitrag zu verbessertem thermischen Komfort. Geringere Wärmelasten sind ferner Voraussetzung für kleiner dimensionierte Lüftungsanlagen im Bereich der ZSVA.

Bis zu 70 % der Energie werden im Kondensator und über die Pumpe an das Kühlwasser abgegeben. Eine Optimierung der Prozessführung, der zyklischen Vakuumphasen und Dampfstöße, unter energetischen Gesichtspunkten würde ggf. auch Potential bieten. Um die Wirksamkeit des Sterilisationsprozesses sicherzustellen, sind die Prozessschritte genau definiert und Bestandteil von Zulassungsverfahren. Eine energetische Optimierung der Prozessführung wäre daher nur mit gleichzeitiger Absicherung anhand von mikrobiellen Studien möglich.

Alleine schon wegen des Wasserverbrauchs sollte eine direkte Kühlung mit Trinkwasser vermieden werden. Weiteres Einsparpotential besteht in einer Wärmrückgewinnung aus dem Kühlwasser und dem Dampfkondensat. Ein Teil dieses Potentials kann durch eine Rückführung von unbelastetem Kondensat aus dem Kammermantel zum Dampferzeuger genutzt werden. Der größere Energiestrom aber erwärmt am Dampfkondensator das Kühlwasser von 15 auf ca. 30 °C. Mittels einer Wärmepumpe kann die Abwärme für andere Anwendungen verfügbar gemacht werden (vgl. auch Abschnitt 3.3). Energetisch am günstigsten wäre, wie bei den Reinigungsmaschinen diskutiert, eine Nutzung zur Erwärmung von zulaufendem Frischwasser oder von im Dampferzeuger benötigtem VE-Wasser. Hygienisch sichere doppelwandige Wärmeübertrager erreichen Nutzungsgrade um 40 % (vgl. 14.2). Erschwerend kommt hinzu, dass die Abwärme nicht kontinuierlich zur Verfügung steht, sondern aufgrund der Prozessführung zeitlich stark schwankt.

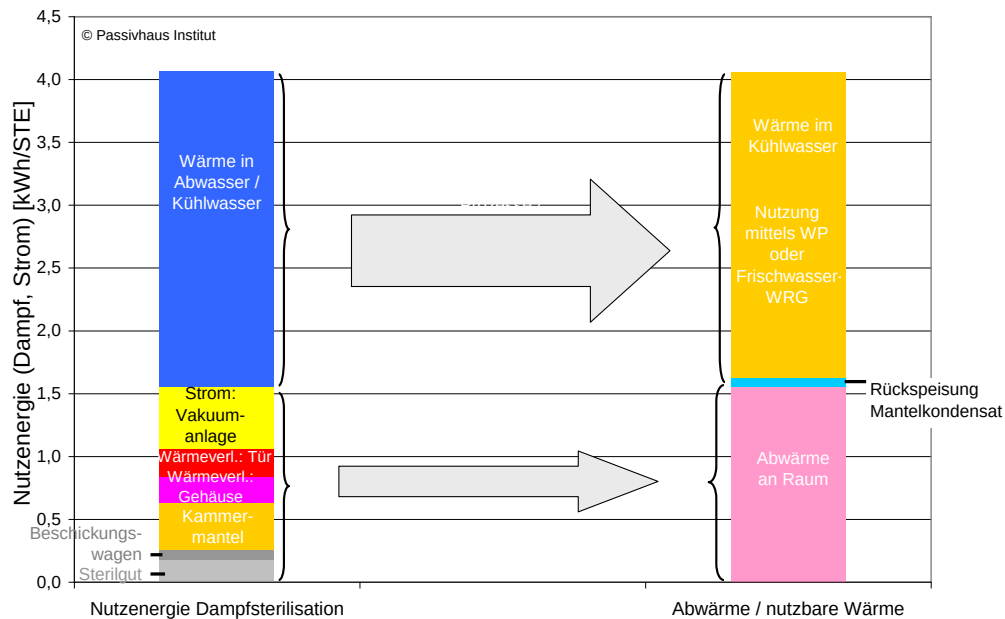


Abbildung 66: Nutzenergiebedarf der Dampfsterilisation und Wege der Prozesswärme je Sterileinheit.

Abschätzung anhand von Herstellerdaten und Verbrauchserhebungen im Bestandsgebäude des Klinikums Frankfurt Höchst. Abhängig von den tatsächlichen Betriebsbedingungen, von den zu sterilisierenden Produkten, der Größe des Sterilisators und der Auslastung ist die Schwankungsbreite der Werte groß.

14.4 Gesamtenergiebedarf der ZSVA

Reinigen, Desinfizieren und Sterilisieren sind in der ZSVA mit einem hohen Energieumsatz verbunden. Wärmeenergie kann in den Apparaturen elektrisch oder auch mit Prozessdampf erzeugt werden. Den Gesamtprimärenergiebedarf, der mit der Aufbereitung einer STE verbunden ist, zeigt Abbildung 67.

Wird Prozessdampf als Energieträger eingesetzt, sind zusätzliche Verluste bei der Verteilung und der Erzeugung zu berücksichtigen, primärenergetisch schneidet der auf Gas basierende Ansatz des Prozessdampfes (Erdgas-Prozessdampfkessel) etwas besser ab. Der Prozessdampferzeuger sollte ferner, um Leitungsverluste zu reduzieren, möglichst in unmittelbarer Nähe zur ZSVA angeordnet werden.

Reindampf wird direkt-elektrisch oder mittels eines Dampfumformers aus Prozessdampf erzeugt. Dessen verbrauchernahe Aufstellung verringert ebenfalls Leitungsverluste.

In Abbildung 67 ist die primärenergetische Bewertung für folgende zwei Versorgungslösungen der ZSVA dargestellt:

- Strom / Reindampf (elektrisch): Strom für Pumpen und Antriebe. Erwärmung des Wassers in den Reinigungsgeräten und die Erzeugung des Reindampfes auf Basis von Strom (direkt-elektrisch).
- Strom / Rein- u. Prozessdampf (Gas): Strom für Pumpen und Antriebe; Als Wärmeträger wird Prozessdampf verwendet, der gasbasiert erzeugt wird. Reindampf für den Sterilisationsprozess und die Erwärmung des Wassers in den Reinigungsmaschinen wird mit Prozessdampf erzeugt.

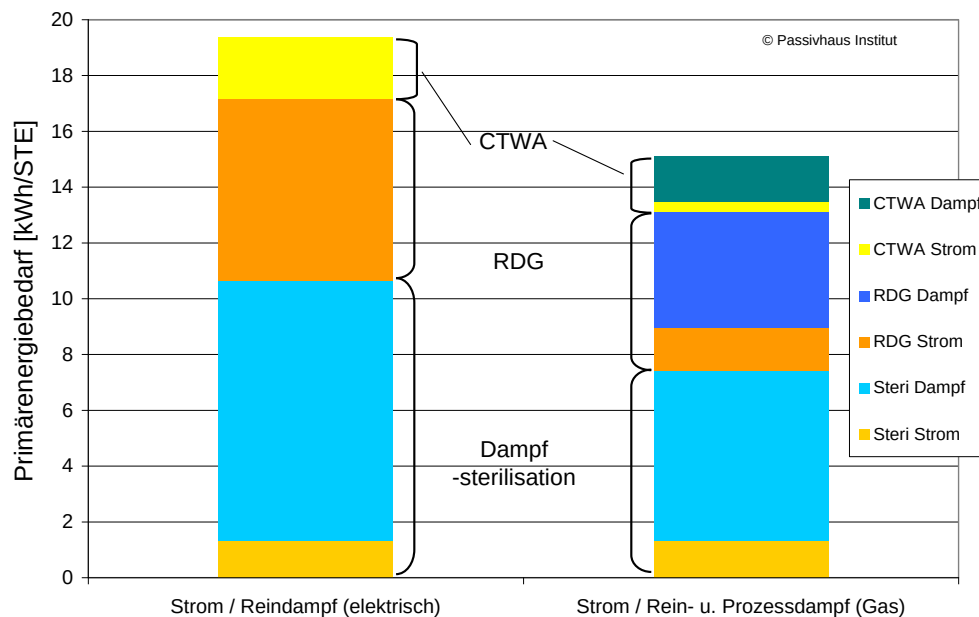


Abbildung 67: Primärenergiebedarf der Aufbereitung einer Sterileinheit (STE) in der ZSVA.
 Abschätzung anhand von Herstellerdaten und Verbrauchserhebungen im Bestandsgebäude des Klinikums Frankfurt Höchst. Abhängig von den tatsächlichen Betriebsbedingungen ist die Schwankungsbreite der Werte groß.
 RDG: Reinigungs- und Desinfektionsgeräte
 CTWA: Großkammer-Reinigungsanlagen

Die heißen Abwässer der Reinigungsprozesse sowie die Abwärme der Vakuumanlage der Sterilisatoren enthalten erhebliche Wärmemengen. Deren Nutzung sollte geprüft werden.

Bezogen auf die Flächenanteile in der Neubauplanung liegt der Primärenergiebedarf der Prozesse Reinigen, Desinfizieren und Sterilisieren zwischen 8 und 10 kWh/(m²a). Der Lüftungs- und Kühlbedarf aufgrund der thermischen Lasten im Raum sind hierbei unberücksichtigt.

15 Bildgebende Verfahren

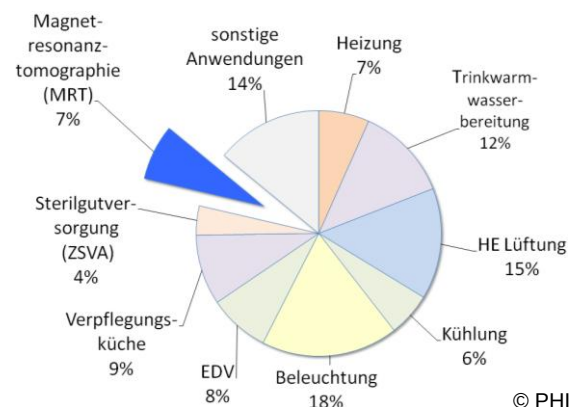
In der Medizin werden bildgebende Verfahren eingesetzt, um zwei- oder dreidimensionale Bilddaten des Gewebes oder von Organen zu erzeugen. Die Verfahren werden überwiegend zur Diagnose krankheitsbedingter Veränderungen angewendet. Tabelle 23 gibt einen Überblick zu häufig eingesetzten und in den folgenden Abschnitten behandelten Untersuchungsmethoden.

	Magnetresonanztomographie (MRT)	Computertomographie (CT)	Sonographie (Ultraschall)
Signalquelle	Radiowellen	Röntgenstrahlung	Schallwellen
Ortsauflösung	++	+++	+
Kontrastauflösung	+++	++	-
Aufwand / Kosten	hoch	mittel	gering
Einzelschichtaufnahme	ja	ja	ja
Volumenaufnahme	ja	ja	ja

Tabelle 23: Bildgebende Verfahren im Vergleich. Quelle: [Kalender]

15.1 Magnetresonanztomographie (MRT)

Anteil des Energiebedarfs der bildgebenden Diagnostik mit MRT (exemplarisch) am Gesamtprimärenergiebedarf (vgl. Abschnitt 4.12)



Die Magnetresonanztomographie oder auch Kernspintomographie ist ein Verfahren der bildgebenden Diagnostik. Basierend auf dem physikalischen Prinzip der Kernspinresonanz wird es zur Darstellung von Gewebe und Organen im Körper eingesetzt. Mit dem Verfahren können Schnittbilder des Körpers, welche eine Beurteilung der Organe oder krankhafter Veränderungen erlauben, gewonnen werden.

Zum physikalischen Prinzip: Einige Atome im Körpergewebe (vor allem Wasserstoffatome) besitzen einen Eigendrehimpuls (einen Kernspin) und sind dadurch magnetisch. In einem äußeren statischen Magnetfeld richten sie sich in Richtung des äußeren Feldes aus. Durch ein zusätzliches hochfrequentes Wechselfeld können die

Kernspins durch resonante Anregung aus der Richtung des äußeren Magnetfelds ausgelenkt werden und präzedieren (rotieren) anschließend um dessen Ausrichtung.

Durch die Präzessionsbewegung der Kernspins im Gewebe, rotiert die Magnetisierungsrichtung des Gewebes und induziert in den Empfängerspulen des MRT ein Spannungssignal.

Nach dem Abschalten des Hochfrequenzfeldes relaxieren die Kernspins, d.h. sie nehmen wieder ihre Ausgangsausrichtung ein. Dabei hängt die Relaxationszeit von der Umgebung des Atomkerns also des Gewebes ab.

Als Signal in der MRT-Diagnostik werden die unterschiedlichen Relaxationszeiten und verschiedenen Gehalte an Wasserstoffatomen in verschiedenartigem Gewebe ausgewertet.

In modernen Geräten wird durch ein zusätzliches Magnetfeld ein "Gradientenfeld" erzeugt. Das Magnetfeld variiert von Schicht zu Schicht in dem zu untersuchenden Gewebe. Durch Abstimmung der Magnetfeldstärke in einer Schicht und dazu passender resonanter Hochfrequenzanregung können selektiv einzelne Schichten angeregt werden. Das zur gleichen Zeit empfangene Signal erhält hierdurch eine Ortsinformation.

Im eigentlichen Aufnahmezyklus werden, neben dem statischen äußeren Magnetfeld, zusätzlich ein "Gradientenfeld" und ein Hochfrequenzfeld geschaltet. Ferner wird das Signal der Empfängerspulen eingelesen und ausgewertet.

Die heute eingesetzten Ganzkörpersysteme haben überwiegend Magnetfeldstärken von 1 bis 1,5 Tesla. Bei Neuanschaffungen werden zunehmend auch 3 Tesla-Geräte gewählt. Der Trend zu höheren Feldstärken ist vor allem durch das bessere Signal/Rausch-Verhältnis begründet, welches nahezu proportional zur Feldstärke zunimmt. Dazu merkt [Rinck P. 2013] an, dass mit den leistungsfähigeren Geräten jedoch nicht belegbar bessere Diagnosen gestellt werden.

Feldstärken im Tesla-Bereich werden mit tiefgeköhlten supraleitenden Magneten erzeugt. Die Kühlung bis nahe an den absoluten Nullpunkt muss dauerhaft erfolgen und ist ursächlich für einen wesentlichen Anteil des Energiebedarfs von MRT-Geräten.

Aufgrund des supraleitenden Effekts wird der Ringstrom nur einmalig in der Spule induziert, fließt dann weiter und erzeugt bei ausreichender Kühlung ein ständiges sehr starkes Magnetfeld.

Im Unterschied zu anderen bildgebenden Verfahren wie der Computertomographie wird beim MRT keine belastende Röntgenstrahlung oder andere ionisierende Strahlung verwendet. Untersuchungen mit dem MRT nehmen zu und ersetzen

zunehmend einfache Röntgenverfahren. Selbst wenn die MRT-Systeme in Zukunft effizienter werden, ist durch den Zuwachs der Anwendungen mit einem Mehrbedarf durch MRTs zu rechnen. Im europäischen Vergleich nimmt Deutschland sogar einen Spitzenplatz bei der MRT-Versorgungsdichte mit 27 Systemen je 1 Mio. Einwohner ein. In Frankreich oder Belgien sind je Einwohner nur rund ein Drittel solcher Systeme in Betrieb (vgl. [Rinck P. 2013]).

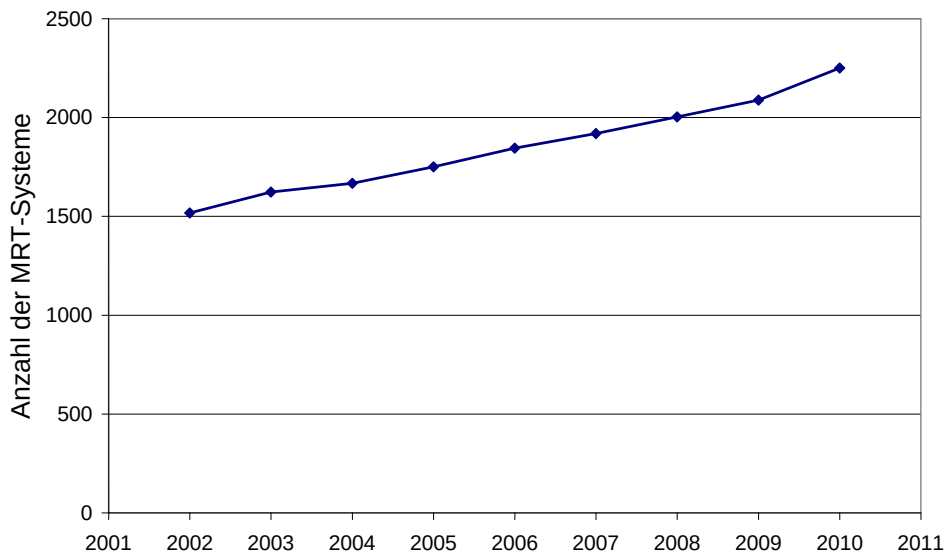


Abbildung 68: Entwicklung der Anzahl der MRT-Systeme in Deutschland
(Daten aus [Rinck P. 2013])

Beim Energiebedarf eines MRT-Systems dominiert aufgrund der dauerhaften Kühlung der supraleitenden Spule die Grundlast den Verbrauch. Die Prozesse während des eigentlichen Aufnahmezyklus, d.h. die Erzeugung des zusätzlichen Gradientenfeldes, des Hochfrequenzfeldes und die Auswertung des Signals haben aufgrund der kurzen Aufnahmezeiten untergeordnete Bedeutung.

Verbesserungen im Bereich der Bildverarbeitung (Bildrekonstruktion) durch komplexere Algorithmen (Fourieranalyse), welche mit weniger Daten (Unterabtastung) Schnittbilder erstellen und die Aufnahmezeiten verkürzen, haben daher eher geringeren Einfluss auf den Energiebedarf.

Energetisch interessant sind kürzere Untersuchungszeiten, wenn hierdurch mit insgesamt weniger MRT-Systemen das Diagnoseaufkommen bewältigt werden könnte. Auch längere Betriebszeiten, soweit dies mit dem Wohl der Patienten und den Arbeitszeiten des Personals vereinbar ist, könnten die Auslastung nochmals erhöhen.

Wie eine Auswertung von Herstellerangaben zeigt, besteht bereits durch Auswahl spezieller Geräte ein Einsparpotential. Entscheidend erscheint jedoch, dass standardisierte Energiekennwerte von Herstellerseite ausreichend kenntlich gemacht

werden und dann als zusätzliche Anforderung Eingang in Ausschreibungen finden können. Ein weiteres Einsparpotential liegt in der Effizienzverbesserung der gebäudeseitigen Kühlung des MRT. Liegen genauere Angaben zur Spitzenlast vor, so können Betriebspunkte und Auslegung der Kältetechnik genauer an den Kühlbedarf angepasst werden.

Große Einsparungen wären durch Verwendung neuer supraleitender Materialien möglich, wenn der supraleitende Effekt bereits bei höheren Temperaturen eintritt und auf eine Helium-Kühlung verzichtet werden könnte. Die meisten Materialentwicklungen bei Hochtemperatursupraleitern sind jedoch zur Drahtherstellung für Spulen wenig geeignet. Hinzu kommt, dass viele dieser Materialien ihre supraleitende Eigenschaft in starken Magnetfeldern verlieren (vgl. [Rinck P. 2013]).

In Abbildung 69 ist der Endenergiebedarf verschiedener MRTs und die möglichen Einsparpotentiale gegenübergestellt. Die Abschätzung erfolgt anhand von Herstellerdaten und Verbraucherhebungen im Bestandsgebäude des Klinikums Frankfurt Höchst.

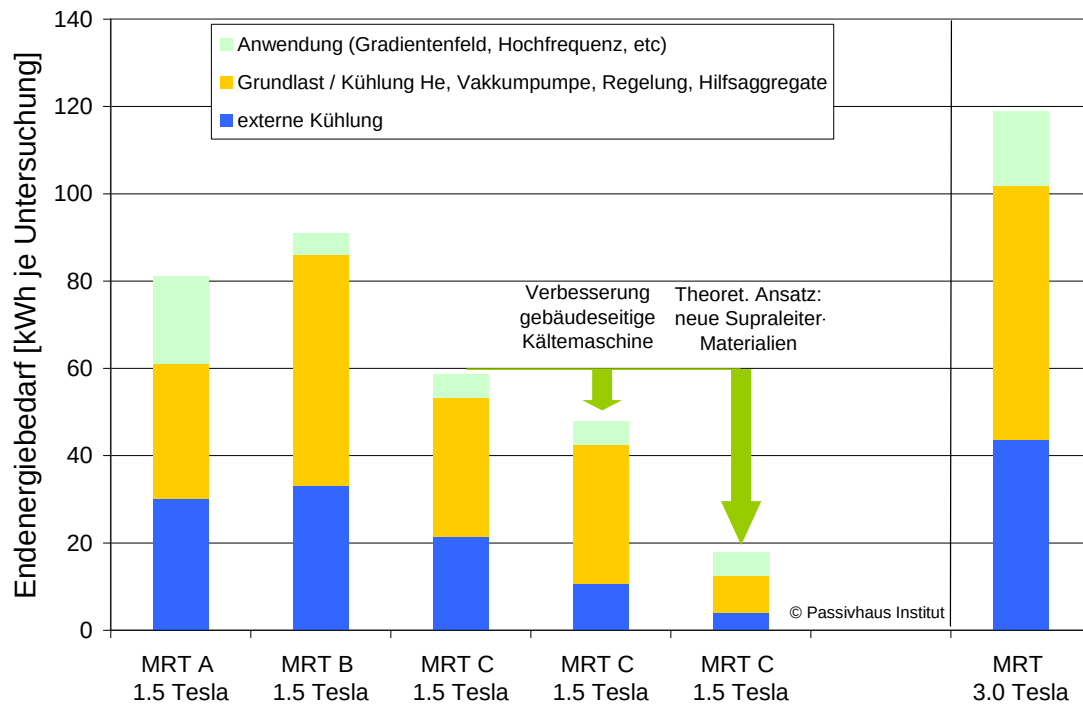


Abbildung 69: Elektrischer Energiebedarf von Magnetresonanztomographen je Untersuchung. Die Daten zu den 1,5-Tesla-Geräten MRT A, MRT B und MRT C zeigen, dass die marktverfügbaren Geräte bereits deutliche Unterschiede im Energiebedarf aufweisen und durch gezielte Gerätewahl Einsparpotentiale erschlossen werden können. Aufgrund des dauerhaften Kühlbedarfs der supraleitenden Spule, dominiert die Grundlast den Energiebedarf beim MRT. Höhere Effizienz der externen (gebäudeseitigen) Kältetechnik birgt weiteres Potential. Wäre durch Einsatz neuer supraleitender Materialien keine Kühlung mit Helium erforderlich, könnte der Energiebedarf maßgeblich gesenkt werden. Die Tendenz bei Neubeschaffungen geht zu leistungsfähigeren MRTs. Die Säule rechts zeigt zum Vergleich den Energiebedarf eines 3-Tesla MRTs. Die Energiekennwerte können abhängig von den tatsächlichen Nutzungsbedingungen abweichen.

Randbedingungen: 255 Nutzungstage im Jahr / 13 Untersuchungen je Tag
 Datenquelle: Produkt-Umweltdeklaration (IPP) von Siemens und General Electric, eigene Daten (Bestandsgebäude Klinikum Frankfurt Höchst)

15.2 Computertomographie (CT)

Dank der Darstellung selbst komplexer anatomischer Verhältnisse wird die CT immer häufiger zur Diagnose bei Fragestellungen eingesetzt, die zuvor noch mit einfacheren Röntgenverfahren untersucht wurden. Der Anwendung der CT nimmt daher in den letzten Jahren zu.

Im Vergleich zu herkömmlichen Röntgenverfahren sind CT-Aufnahmen jedoch aufgrund der Vielzahl der Einzelaufnahmen mit einer höheren Strahlenbelastung verbunden.

Gemäß des Strahlenschutz-Prinzips, die Strahlenbelastung so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar zu halten, zielen viele Weiterentwicklungen auf eine Verringerung der Strahlendosis ab. Dazu zählt z. B. die Verkürzung der Scanzeiten und die Intensitätsmodulation der Röntgenstrahlung. Aber die Entwicklung ist auch aus energetischer Sicht interessant, denn, wenn sich die Scanzeit verkürzt oder der Röhrenstrom in der Röntgenröhre reduziert wird, senkt dies auch den Energiebedarf der Diagnose.

Anstrengungen zur Energieeinsparung sind bei Neuentwicklungen noch eher ein Randthema. Jedoch reduzieren Weiterentwicklungen, welche die Strahlendosis je Applikation verringern, in der Regel auch den Energiebedarf. Zudem bietet die Röntgenröhre aufgrund der geringen Wirkungsgrade sicherlich noch technologisches Potential. Weniger als 1 % der in der Röntgenröhre eingesetzten elektrischen Energie wird in Röntgenenergie umgesetzt.

Die nachfolgend aufgezählten technologischen Entwicklungen reduzieren die Strahlendosis, verkürzen die Untersuchungszeiten und tragen gleichzeitig zur Energieeinsparung während der eigentlichen Bilderfassung bei.

- Neue Szintillator-Detektoren können, da das Signal schneller abklingt, in kürzeren Abständen erneut ausgelesen werden und tragen so zur Verkürzung der Scanzeit bei.
- Mehrzeilen-CTs haben viele Reihen von nebeneinander angeordneten Detektoren. Mit diesen Geräten sind schnellere Untersuchungen möglich, da aus einer Position gleichzeitig eine Vielzahl von Projektionen akquiriert werden.
- Verbesserte iterative Bildrekonstruktionsmechanismen können Schnittbilder bei gleicher Qualität aus weniger Projektionen erzeugen, was ebenfalls die Untersuchungszeiten verkürzt.
- Die erforderliche Intensität der Röntgenstrahlung hängt von der Applikation und der Absorptionsstrecke durch den Patienten ab. Durch eine Abstimmung der Strahlungsintensität an die Absorptionsstrecke wird die Strahlendosis und gleichzeitig der Energiebedarf reduziert.

Die aufgeführten Technologien gehören in der Regel zur Ausstattung moderner CTs und senken den Energiebedarf während des eigentlichen Scans.

Die Grundlast des Geräts fällt hingegen, da es durchgängig eingeschaltet ist, während der Öffnungszeiten der Abteilung und in Notaufnahmen sogar rund um die

Uhr an. Die erfreulichen Verbesserungen innerhalb des Scanzyklus haben daher keinen durchgreifenden Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf des CT.

Weiteres Potential steckt demnach insbesondere in Maßnahmen, welche den Verbrauch im Bereitschaftsbetrieb z. B. durch effizientere Gerätekomponenten (Netzteile, Kühlung, etc.) reduzieren bzw. die Zeitdauer in Bereitschaft minimieren.

Eine Verringerung des Energiebedarfes kann durch schnellere Umlagerungszeiten, kürzere Untersuchungszeiten und dadurch nochmals höhere Auslastungen erzielt werden, wenn dafür weniger Geräte im Einsatz sind.

In der Praxis zu zeitaufwändig ist das Abschalten während der Vorbereitung der Patienten. Ein- und Abschalten dauert aufgrund von Prüfroutinen usw. rund 8 Minuten. Eine automatische Abschaltung und schnelle Einschaltung einzelner Komponenten, vergleichbar der Start-Stop-Schaltung der Automotoren, könnte weitere erhebliche Potentiale erschließen.

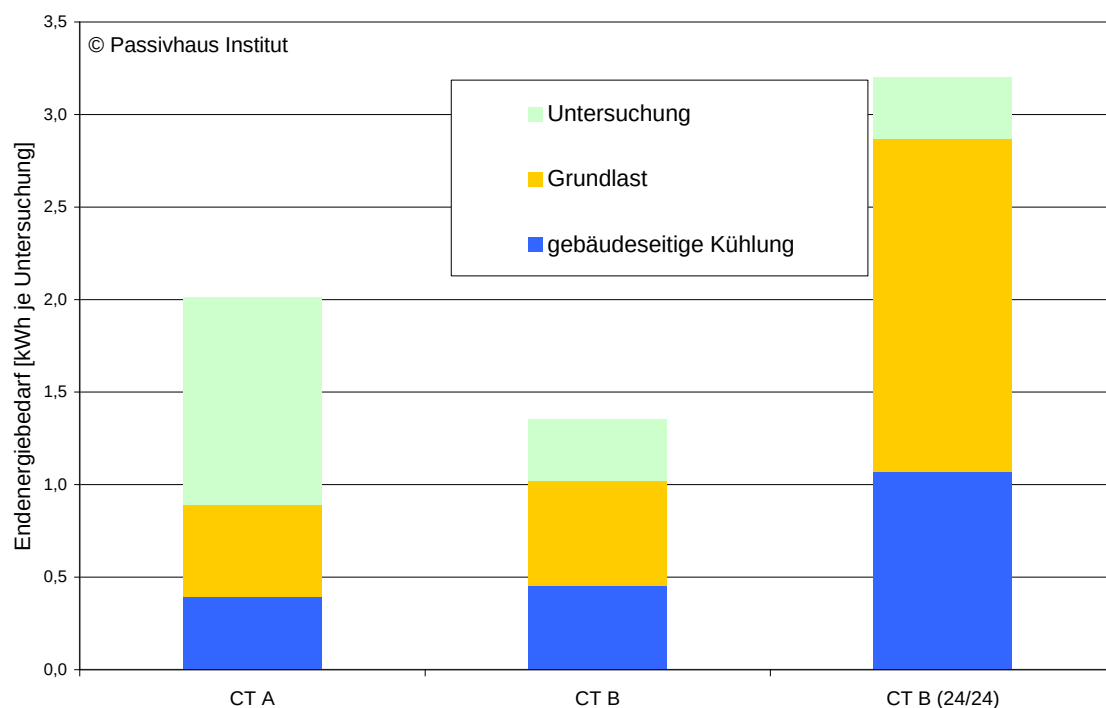


Abbildung 70: Elektrischer Energiebedarf einer Computertomographie mit einem aktuellen Gerät (CT B) und mit einem der Vorgängergeneration (CT A). Weitere Potentiale liegen vor allem in der Reduzierung des Verbrauchs im Bereitschaftsbetrieb. Wird der CT dauerhaft in Betrieb gehalten z. B. in Notaufnahmen (CT B 24/24), steigt der Energiebedarf durch den zusätzlichen Bereitschaftsbetrieb entsprechend an. Da CTs in radiologischen Abteilungen gewöhnlich ausgelastet sind, wird dies auch hier unterstellt. Bei geringerer Auslastung würde der Bereitschaftsbedarf und damit der Gesamtenergiebedarf bezogen auf eine Untersuchung ansteigen. Die Energiekennwerte können abhängig von den tatsächlichen Nutzungsbedingungen abweichen.

Randbed.: CT A, 60 Untersuchungen je Tag / CT B, 70 Untersuchungen je Tag.
Datenquelle: Produkt-Umweltdeklaration (IPP) von Herstellern, eigene Daten
(Bestandsgebäude Klinikum Frankfurt Höchst).

15.3 Ultraschalldiagnostik

Die Sonographie oder umgangssprachlich Ultraschall ist ein bildgebendes Verfahren, welches die Reflexion und Streuung von Schallwellen zur Untersuchung von organischem Gewebe nutzt.

Der Schallkopf sendet kurze Schallwellenimpulse aus, die an Gewebegrenzflächen reflektiert und gestreut werden. Die Laufzeit und die Intensität der reflektierten Schallwelle wird von der Empfangseinheit aufgenommen. Die örtliche Entfernung des Gewebes wird aus der Zeitdifferenz zwischen Aussenden und Empfang bestimmt. Das Vermögen des Gewebes Schallwellen unterschiedlich stark zu reflektieren und zu streuen wird als Echogenität bezeichnet. Grenzflächen mit hoher Echogenität wie z. B. Knochen (reflektieren stark) erzeugen im Empfänger Signale mit hoher Intensität.

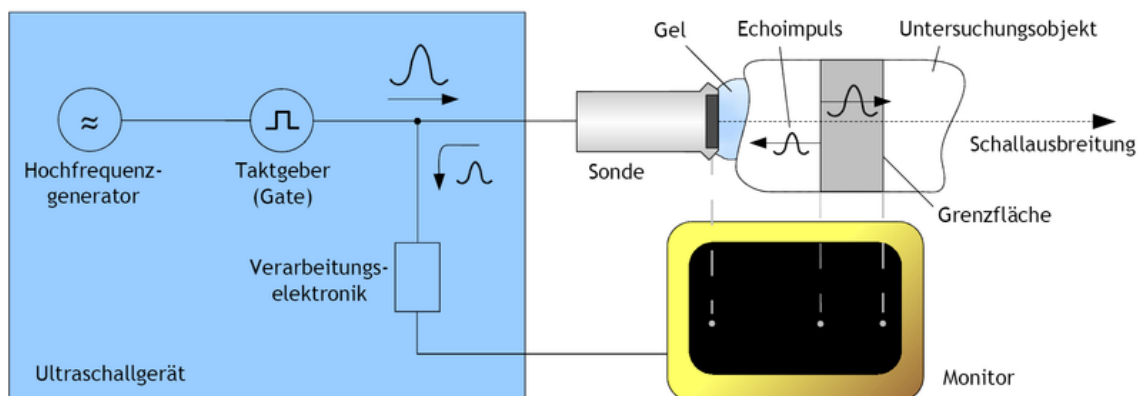


Abbildung 71: Schematischer Ablauf einer Sonographie. Der Schallkopf sendet ein Schallimpuls aus. Reflektierte Schallwellen (Echoimpuls) werden von der Empfangseinheit (Sonde) aufgenommen und in der Elektronik ausgewertet (Quelle Wikipedia)

Piezokristalle und der piezoelektrische Effekt werden gleichermaßen zur Ultraschallerzeugung und zum Empfang des Signals eingesetzt. Die genutzten Frequenzen liegen in der Diagnostik im Bereich von 2 bis 17 MHz.

Die maximal angewendeten Schallintensitäten sind in Richtlinien geregelt, um die Erwärmung des Gewebes durch Absorption zu begrenzen. Nach heutigem Kenntnisstand sind Schallintensitäten von unter 100 mW/cm² unbedenklich.

Für einen Schallwandler mit einer Sendefläche von 100 cm² beträgt die maximale Schalleistung demnach um 1 W und dessen elektrische Aufnahmeleistung sollte nur wenige Watt betragen.

Neuentwicklungen bei der Bildausgabe (Flüssigkristall-Displays, LEDs), effizientere Prozessoren und die Entwicklung von mobilen Geräten senken in der Tendenz den Energiebedarf aktueller Ultraschallgeräte.

System	Mittlere Leistungsaufnahme [W]
3D- oder 4D-Ultraschall / z. B. pränatale Diagnostik hochsensitives fahrbares Gerät	400
3D- oder 4D-Ultraschall / Stromnetz unabhängig im Laptop-Format	80
2D-Ultraschallsystem im Taschenformat / 3,7 Zoll- Display	< 30

Tabelle 24: Leistungsaufnahme von Ultraschallsystemen (exemplarische Werte)

Die Anzahl der Ultraschallsysteme hängt vom konkreten Leistungsangebot des Krankenhauses ab. Einen groben Anhalt kann die geplante Ausstattung des Klinikums in Frankfurt Höchst geben: dort ist etwa ein Ultraschallsystem je 1000 m² NGF vorgesehen (etwa 70 % der Geräte in Untersuchungsräumen und 30 % für den mobilen Einsatz).

16 Sonstige Ausstattung

16.1 Steckbeckenspüler

Ein Steckbeckenspüler ist ein Reinigungs- und Desinfektionsgerät für Behälter für menschliche Ausscheidungen. Dieser reinigt und desinfiziert neben Steckbecken (Bettpfannen), Urinflaschen und Nierenschalen auch Waschschüsseln, Stuhleimer und Sauggläser. Seinen Einsatz findet der Spüler in Krankenhäusern, sowie Alten- und Pflegeheimen.

Das Spülgut wird zunächst mit Kaltwasser vorgereinigt, um Schmutzstoffe zu lösen und anschließend mit Warmwasser ggf. unter Zudosierung von Reinigungschemikalien gespült. Die Desinfektion erfolgt entweder thermisch (mit Wasserdampf), chemisch oder chemo-thermisch.

Bei Desinfektion mit Wasserdampf beträgt der elektrische Energieverbrauch je Zyklus etwa 0,25 kWh.

Pflege- und Intensivstationen sind mit jeweils etwa einem Steckbeckenspüler ausgestattet.

16.2 KÜHLSCHRÄNKE

Arzneimittel und z. B. Blutkonserven sind empfindliche Produkte. Für die spätere Verwendbarkeit ist eine sachgemäße Lagerung z. B. bei vorgegebenen Temperaturen unerlässlich.

Zahlreiche Medikamenten-, Blutkonserven- und auch Labor-Kühlschränke bzw. Gefrierschränke sind in Krankenhäusern im Einsatz. Im Unterschied zu Haushaltskühlschränken haben sie keine einheitliche Energiekennzeichnung. Eine Bewertung verschiedener Modelle und eine gezielte Wahl effizienter Geräte wird dadurch in der Praxis äußerst schwierig.

Wie Abbildung 72 zeigt, bestehen innerhalb einer Kühltürschrankkategorie (z. B. Laborkühlschränke) beträchtliche Verbrauchsunterschiede. Besonders groß ist der Unterschied zu Haushaltsgeräten, was nur zum Teil durch zusätzliche Funktionen wie z. B. einer Zwangsbelüftung der Kühlaggregate oder eines Umluftbetriebs im Innenraum zu erklären ist. Im Vergleich zum mittleren Energiebedarf der zufällig ausgewählten professionellen Kühltürschränke von 800 kWh/a verbrauchen effiziente Haushaltsgeräte (A++) nur noch ein Fünftel.

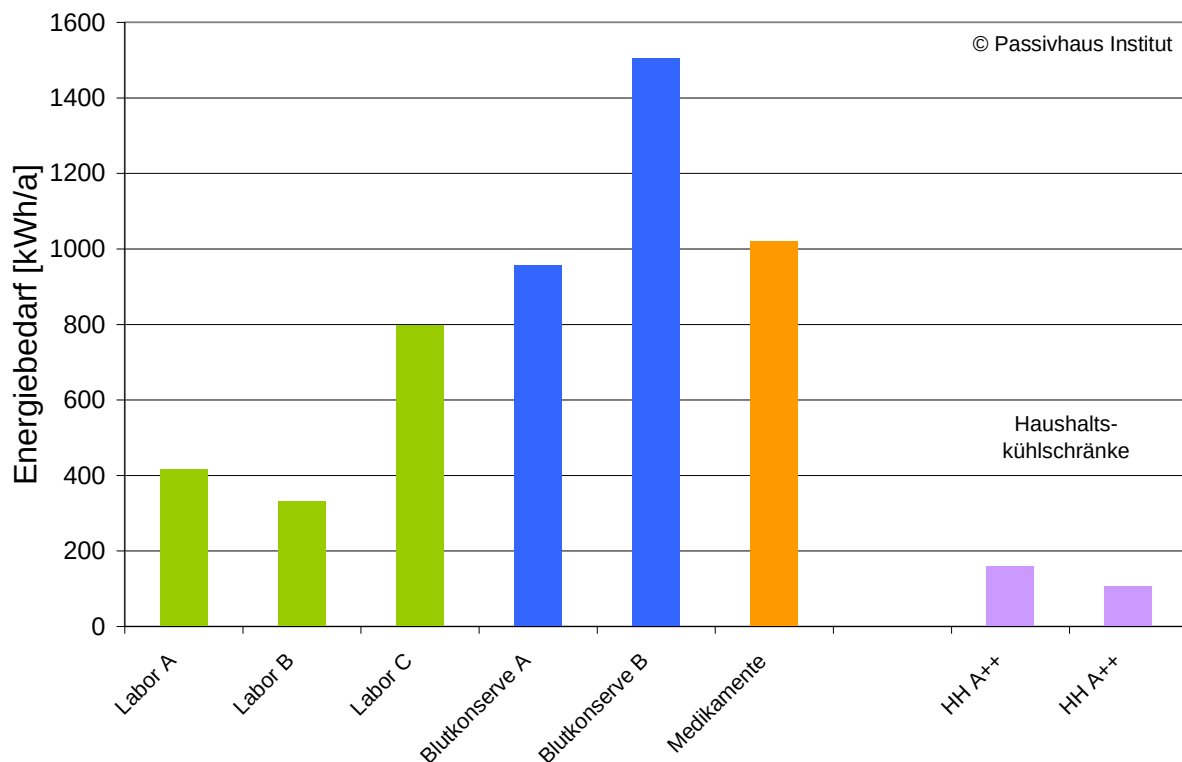


Abbildung 72: Energiebedarf von medizinischen Kühltürschränken (beispielhaft) und Haushaltskühlgeräten (HH) mit jeweils 500 Liter Nutzvolumen.

17 Diverse Technik

17.1 Aufzüge

Aufzüge in Krankenhäusern werden überwiegend für die Personenbeförderung und den Bettentransport zwischen verschiedenen Stockwerken eingesetzt. Ihr durchschnittlicher Anteil am Gesamtenergieverbrauch liegt in der Größenordnung von 5 % [Beier2009]. Der Energiebedarf setzt sich aus dem Fahrtbedarf, dem Energiebedarf während der Fahrt und dem Stillstands- bzw. Standby-Bedarf, dem Energiebedarf bei abgeschaltetem Antrieb zusammen. Aufzüge in Krankenhäusern sind den beiden höchsten, in der [VDI 4707] definierten Nutzungskategorien 4 (2-4,5 h pro Tag) und 5 (> 4,5 h pro Tag) zuzuordnen. Trotzdem verbleibt eine Standby-Zeit von meist mehr als 75 %.

Wegen der hohen Leistungsaufnahme während der Fahrt und den langen Stillstandszeiten lassen sich Energieeffizienzmaßnahmen entweder der Reduktion des Standby-Bedarfs oder des Fahrtbedarfs zuordnen. Wichtige Einflussgrößen auf den Fahrtbedarf sind die Nennlast, die Fahrtenanzahl, die mittlere Hubhöhe und die Antriebsart (Hydraulisch oder durch Seil mit und ohne Getriebe) sowie das Baujahr. Eine Energieeinsparung kann meist nur durch einen Austausch von Anlagenkomponenten oder Neubau erzielt werden. Durch den Einbau einer neuen Antriebstechnik ist gerade bei den stark frequentierten Aufzügen im Krankenhaus ein hohes Einsparpotential vorhanden. Die höchste Effizienz weisen frequenzgeregelte, getriebelose Seilantriebe auf. Ein bei Abwärtsfahrten rückspeisender Umrichter (Rekuperation) kann bis zu 50 % zusätzlich Energie einsparen [Nipkow2006]. Wichtig sind weiterhin eine passende Auslegung, regelmäßige Wartung (Schmierung, Ausrichtung der Führungsschienen, Nachstellung, Ausbalancieren mit Gegengewicht) und eine intelligente, zentrale Steuerung zur Vermeidung von Leer- und Fehlfahrten.

Der Energieverbrauch im Standby-Zustand kann zum Beispiel durch den Einsatz von energiesparender Beleuchtungstechnik in der Kabine sowie von LED-Anzeigentafeln in den einzelnen Stockwerken reduziert werden. Auch eine automatische Abschaltung in den Nutzungspausen von im Stillstand nicht benötigten Einrichtungen (Beleuchtung, Anzeigentafeln, Steuerungsfunktion, Türantrieb, etc.) verringert den Stillstandsbedarf.

Neben dem Bedarf an elektrischer Energie haben Aufzüge auch einen Einfluss auf den Heizenergiebedarf. Eine aus Brandschutzgründen oft eingesetzte offene Schachtbelüftung führt zu hohen Wärmeverlusten durch den Kamineffekt. Soweit möglich, sollten die Aufzugsschächte geschlossen sein und durch temperaturgesteuerte motorische Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) be- und entlüftet werden.

Im Klinikum Frankfurt Höchst wurden repräsentativ Messungen der Leistungsaufnahme für drei Aufzüge durchgeführt. Diese wiesen einen mittleren jährlichen Energieverbrauch von 7025 kWh auf. Aus den Messungen konnte weiter eine mittlere Fahrzeit von etwa 3 h/Tag abgeschätzt werden. Dies liegt in der Größenordnung, die aus der mittleren Frequentierung durch 2000 Mitarbeiter, 800 Betten und 800 Besucher für die Personenaufzüge abgeschätzt wurde und entspricht der Nutzungskategorie 4 laut [VDI 4707].

Für den Neubau des sechsgeschossigen Krankenhauses sind 8 Personen- und 12 Bettenaufzüge geplant, die in zweier Gruppen angeordnet und mit Gruppen-Sammelsteuerung ausgestattet werden sollen. Die Steuerung und die Anordnung spielen eine wichtige Rolle im Hinblick auf den Anteil der Leerfahrten.

	Personenaufzüge	Bettenaufzüge
Anzahl	8	12
Nennförderlast	1050 kg / 13 Personen	3.200 kg / 42 Personen
Fahrgeschwindigkeit	1,6 m/s	1,6 m/s

Nach [VDI 4707] wurden Energieeffizienzklassen für Aufzüge festgelegt. Für die beste Kategorie A muss die Leistungsaufnahme im Standby-Zustand unterhalb von 50 W liegen und der spezifische Energieverbrauch (auf die Nennlast und gefahrene Strecke bezogen) darf nicht größer als 0,56 mWh/(kg m) sein. Bei Neubauten sollte die Aufzugstechnik der Energieeffizienzklasse A genügen. Werden die Minimalanforderungen dieser Klasse für die neuen Personenaufzüge im Klinikum Frankfurt Höchst angesetzt, so ergibt sich ein jährlicher Energiebedarf von 4000 kWh/(Aufzug a), was eine Reduktion von mindestens 42 % bedeutet. Die Bestandsaufzüge sind nach den Messungen (7000 kWh/(Aufzug a)) in die Energieeffizienzklasse C einzuordnen. Ein ähnliches Einsparpotential besteht bei den Bettenaufzügen. Diese haben zwar eine dreifach höhere Nennlast, es ist allerdings auch von einer deutlich geringeren Fahrzeit von etwa 1 h/Tag auszugehen, sodass deren jährlicher Energiebedarf beim Ansatz der Grenzwerte für die Effizienzklasse A bei 4200 kWh/(Aufzug a) liegt. Der Standby-Bedarf liegt bei 10 %, sodass besonders der Einbau von Technik sinnvoll erscheint, die den Energieverbrauch beim Fahren reduziert.

17.2 Druckluft

Druckluft wird sowohl in medizinischen Geräten als auch zu technischen Zwecken im Krankenhaus verwendet. Das Vorhalten von Druckluft ist aufgrund der hohen Umwandlungs-, Speicherungs- und Transportverluste energieintensiv. Die Verwendung von druckluftbetriebenen Geräten sollte daher nach Möglichkeit vermieden werden.

Grundsätzlich sollte die Notwendigkeit der Aufbereitung der Quellluft geprüft werden, denn eine Trocknung oder Reinigung ist sehr energieintensiv und ist ggf. gar nicht notwendig. Es sollte daher strikt zwischen technischer und medizinischer Druckluft unterschieden werden.

Leitungen und Speicher sind druckverlustarm und leckagesicher zu planen. Einzelne Stränge sollten abschaltbar sein.

Zudem sollte die Nutzung, der bei der Verdichtung der Luft entstehenden Abwärme (auf relativ hohem Temperaturniveau), geprüft werden.

Der Energieverbrauch durch Druckluft hat im Krankenhaus eher geringere Bedeutung. Der abgeschätzte Endenergiebedarf bezogen auf die Verhältnisse der Neuplanung zum Klinikum Frankfurt Höchst liegt bei etwa 2 kWh/(m²a).

18 Anhang

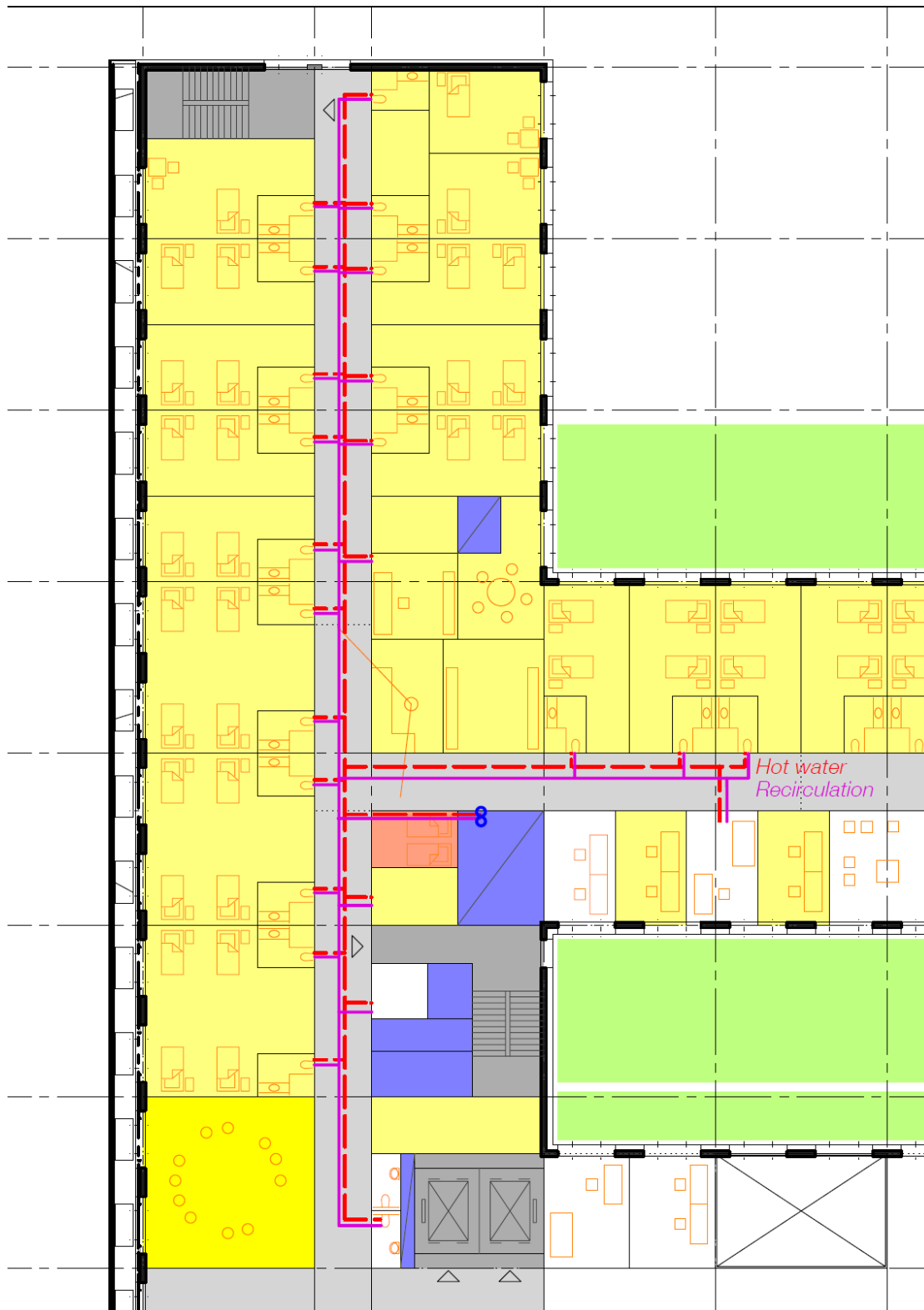
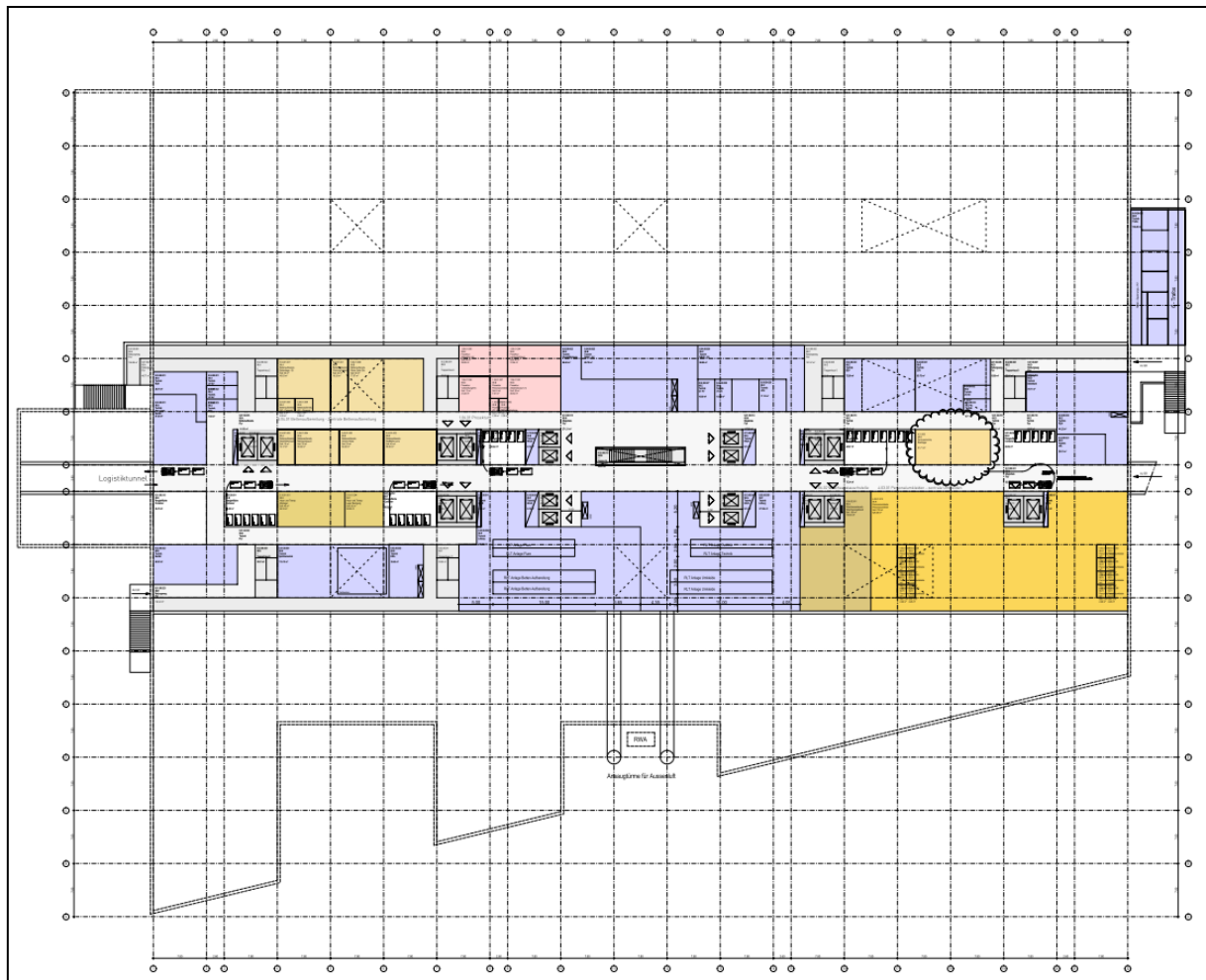


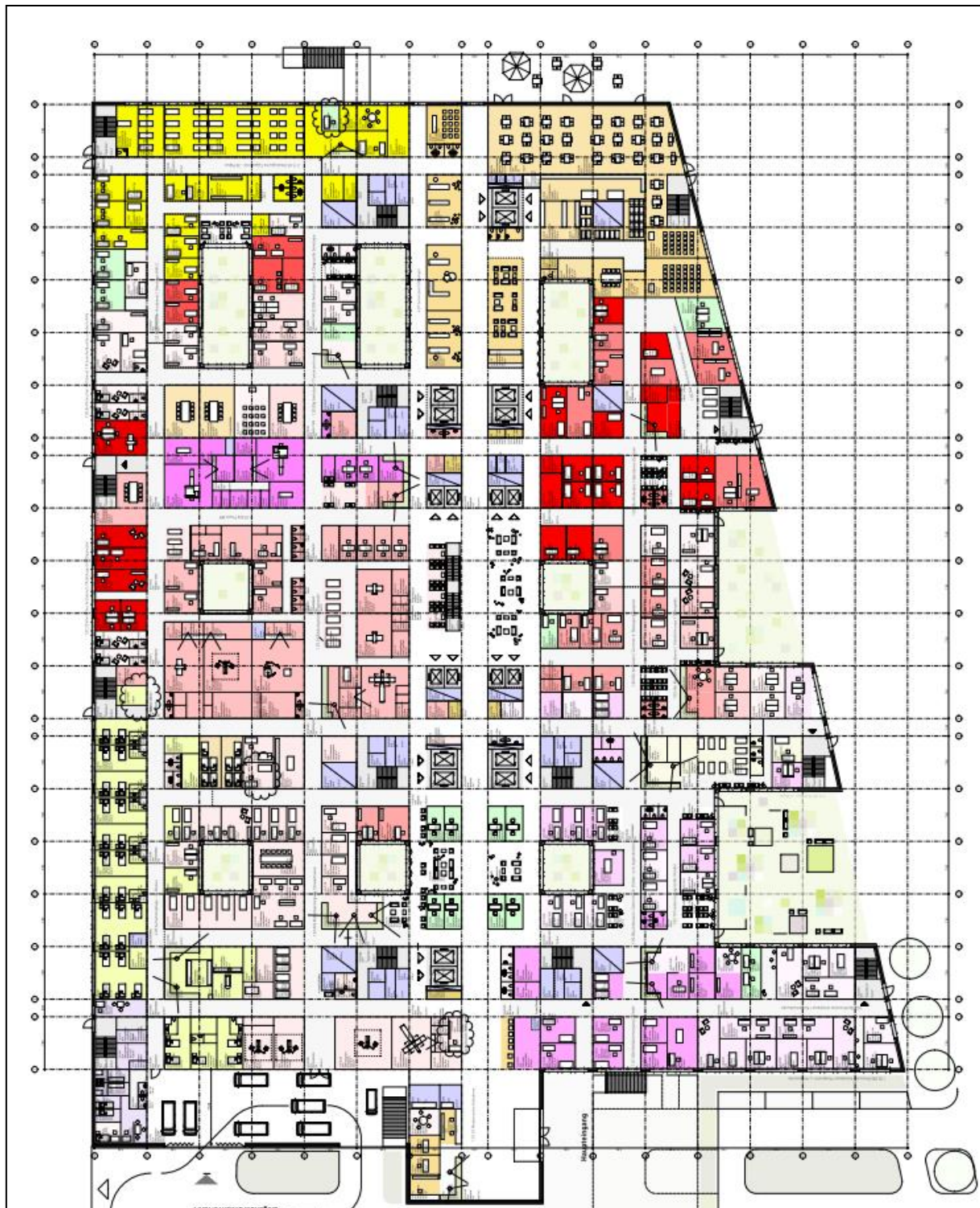
Abbildung 73: Schema zur Leitungsführung des Trinkwarmwassers einer Pflegestation,
 Architekten: woernerundpartner, Frankfurt (Quelle: woernerundpartner)

18.1.1 1. Untergeschoss (Ebene -1)



Architekten: woernerundpartner, Frankfurt (Quelle: woernerundpartner)

18.1.2 Erdgeschoss (Ebene 00)



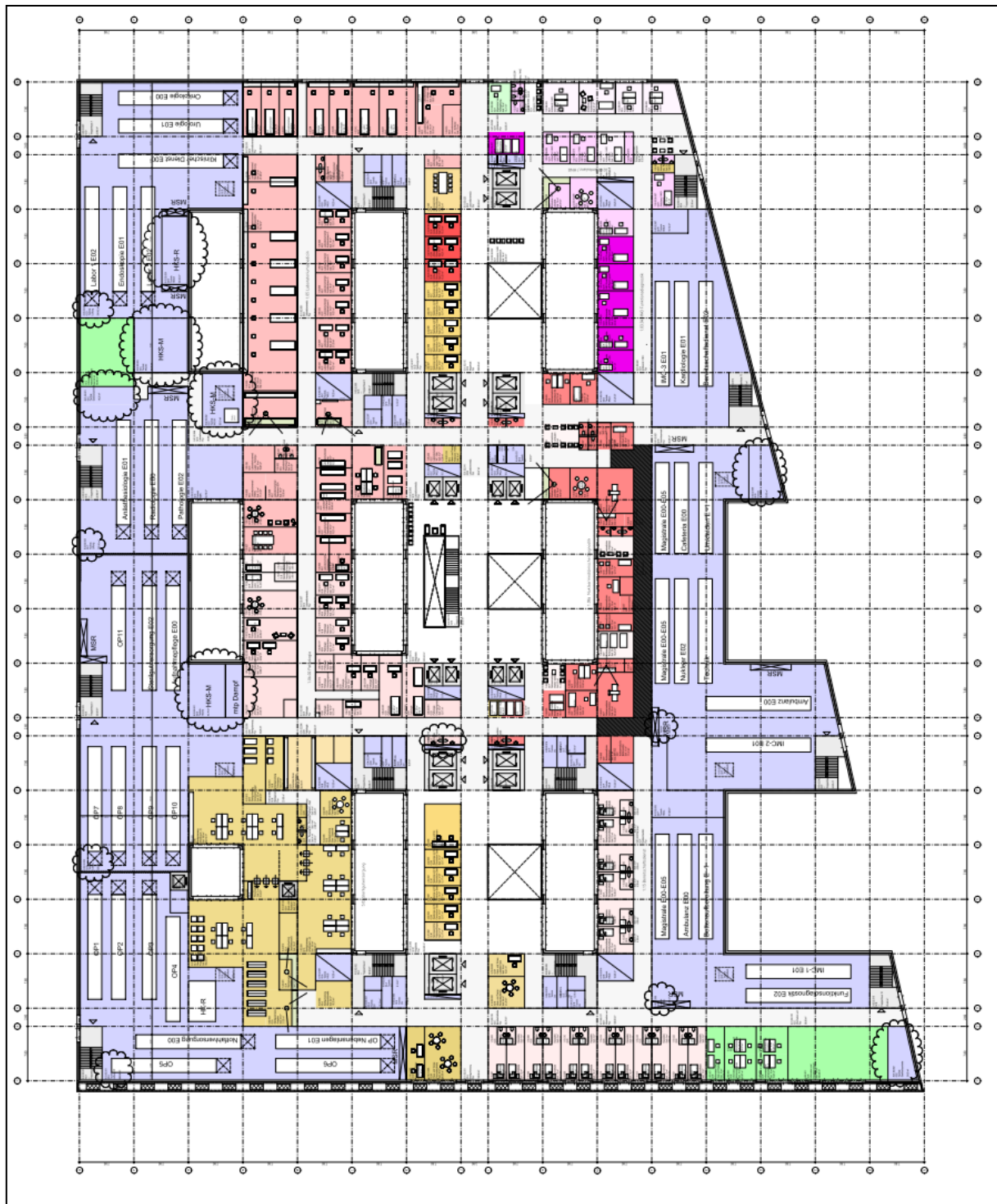
Architekten: woernerundpartner, Frankfurt (Quelle: woernerundpartner)

18.1.3 1. Obergeschoss (Ebene 01)



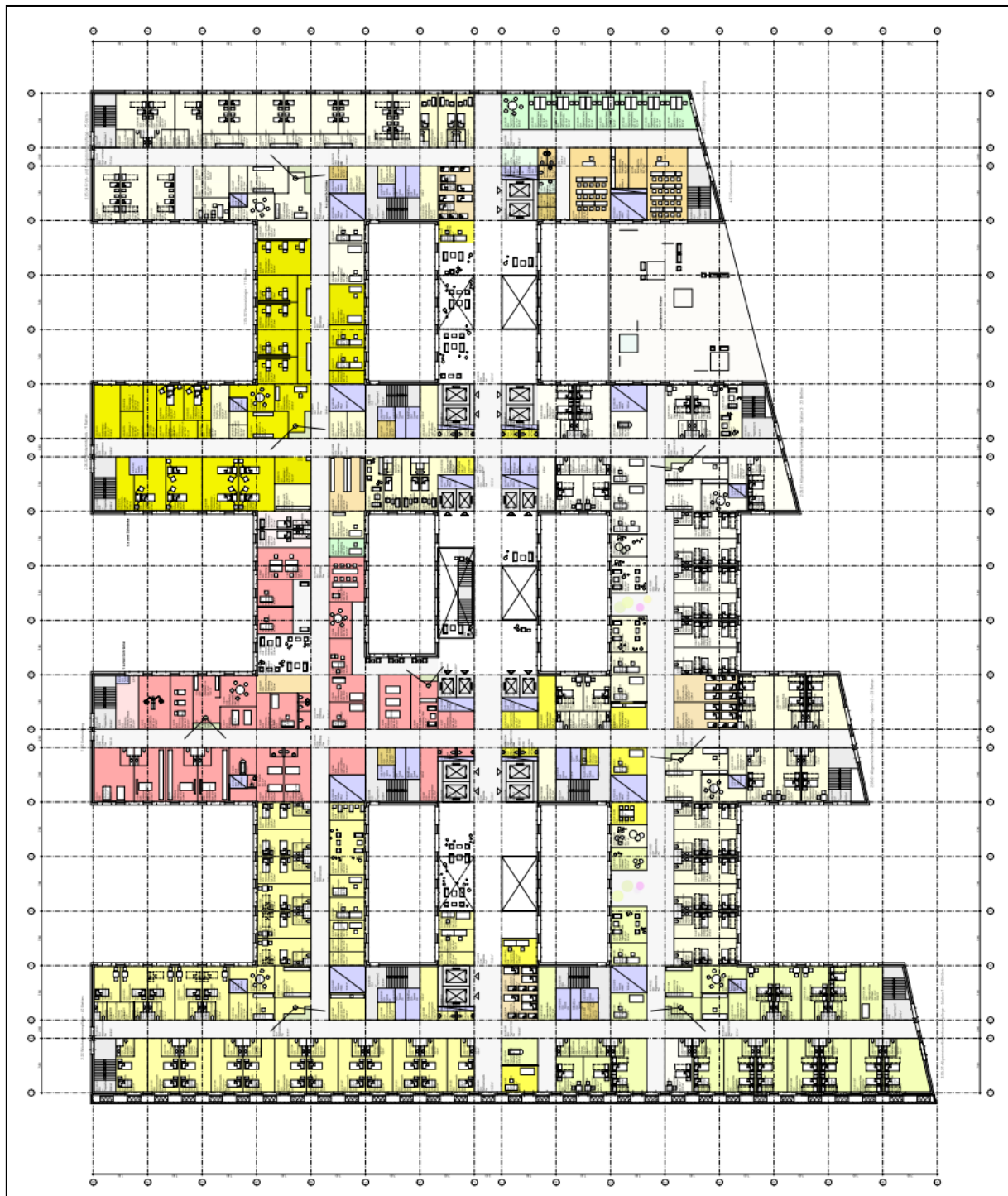
Architekten: woernerundpartner, Frankfurt (Quelle: woernerundpartner)

18.1.4 2. Obergeschoss (Ebene 02)



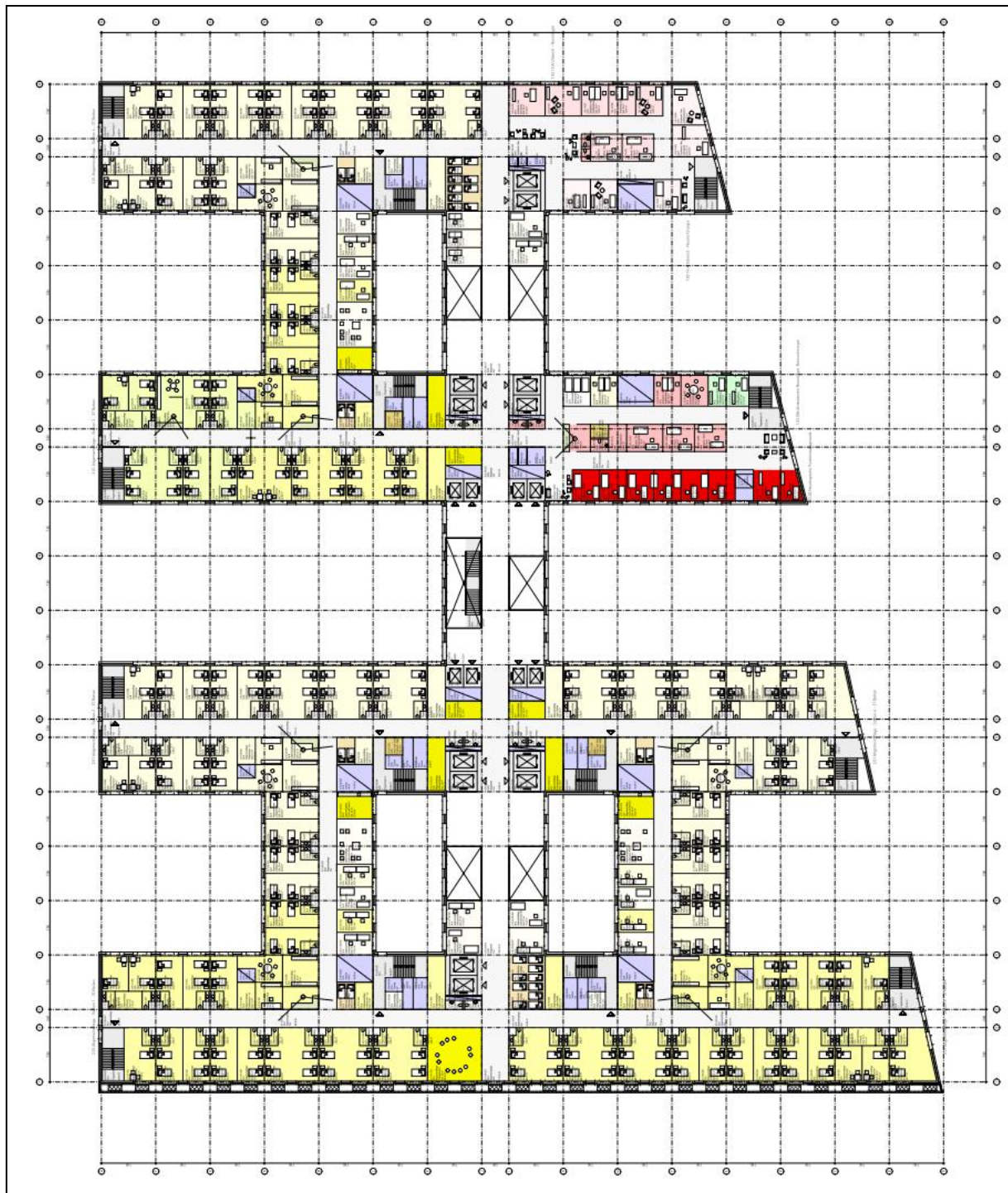
Architekten: woernerundpartner, Frankfurt (Quelle: woernerundpartner)

18.1.5 3. Obergeschoss (Ebene 03)



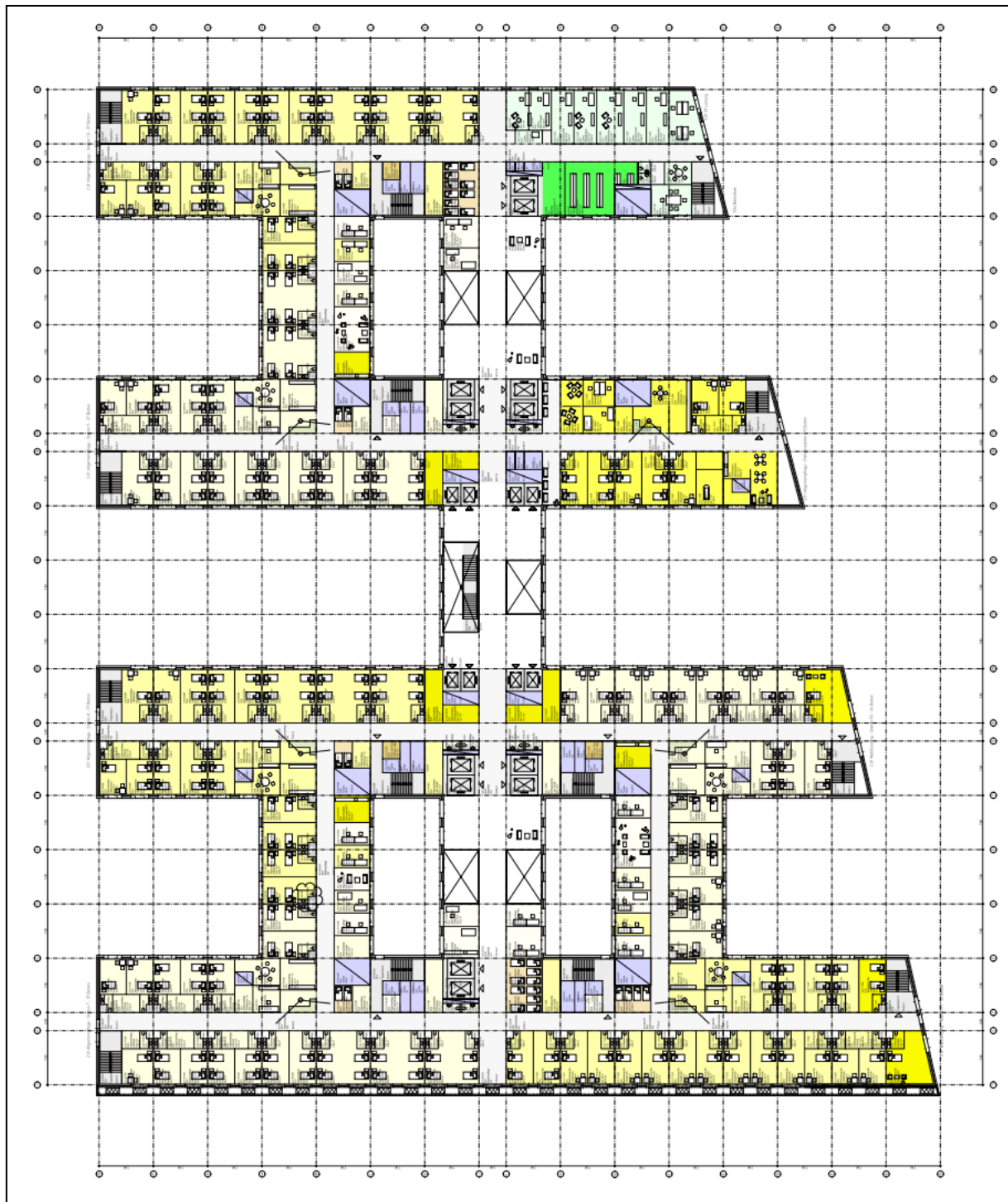
Architekten: woernerundpartner, Frankfurt (Quelle: woernerundpartner)

18.1.6 4. Obergeschoss (Ebene 04)



Architekten: woernerundpartner, Frankfurt (Quelle: woernerundpartner)

18.1.7 5. Obergeschoss (Ebene 05)



Architekten: woernerundpartner, Frankfurt (Quelle: woernerundpartner)

19 Literatur

- [AkkP 14] **„Passivhaus-Fenster“**, Protokollband Nr. 14 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase II, Passivhaus Institut, Darmstadt 1998.
- [AkkP 15] **„Passivhaus-Sommerfall“**, Protokollband Nr. 15 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase II, Passivhaus Institut, Darmstadt 1999.
- [AkkP 22] **„Lüftungsstrategien für den Sommer“**, Protokollband Nr. 22 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, Passivhaus Institut, Darmstadt 2003.
- [AkkP 23] **„Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und -ausbreitung im Raum“**, Protokollband Nr. 23 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2003.
- [AkkP 33] **„Passivhaus-Schulen“**, Protokollband Nr. 33 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase III, Passivhaus Institut, Darmstadt 2006.
- [AkkP 35] **„Wärmebrücken und Tragwerksplanung“**, Protokollband Nr. 35 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase IV, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007.
- [AkkP 40] **„Passivhaus-Verkaufsstätten“**, Protokollband Nr. 40 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase V, Passivhaus Institut, Darmstadt 2012.
- [ASHRAE] **ASHRAE: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**; THIRD PUBLIC REVIEW, MAY 2003.
- [ASR2012] **Technische Regeln für Arbeitsstätten**; ASR A3.6 Lüftung; BAuA Januar 2012
- [Beier 2009] C. Beier, **Abschlussbericht Analyse des Energieverbrauches und exemplarische Best-Practise-Lösungen für relevante Verbrauchssektoren in Krankenhäusern**; Fraunhofer UMSICHT, Obernhausen Juni 2009
- [Bermich/Lubs 2004] R. Bermich; P. Lubs: **„Neubau einer Passivhaus-Turnhalle“**, 8. Passivhaustagung in Krems, Passivhaus Institut, 2004.

-
- [BINE I/2007] Themeninfo I/2007, **Thermoaktive Bauteilsysteme** - Nichtwohnungsbauten energieeffizient heizen und kühlen auf hohem Komfortniveau, BINE Informationsdienst, 2007
- [Chuard 1993] P. Chuard: **Beleuchtungstechnik für Schulen**, EMPA-KWH, CH-8600 Dübendorf 1993
- [Destatis 2009] Statistisches Bundesamt, Stand 2009
- [Dettenkofer 2003] M.Dettenkofer, M.Scherrer et al., **Shutting down operating theater ventilation when the theater is not in use: infection control and environmental aspects**; Infection Control and Hospital Epidemiology, August 2003
- [DGKH 2002] Deutsche Gesellschaft für Krankenhaushygiene, Leitlinienentwurf: **Ausführung und Betrieb von raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) in Krankenhäusern**, Hyg Med 27. Jahrgang 2002 – Heft 3.
- [DIN 1946-4] DIN 1946 Teil 4, Ausgabe: Dezember 2008: **Raumluftechnik - Teil 4**: Raumluftechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin
- [DIN 1946-7] DIN 1946 Teil 7, Ausgabe: Juli 2009: **Raumluftechnik - Teil 7**: Raumluftechnische Anlagen in Laboratorien, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin
- [DIN EN 13053] DIN EN 13053, Ausgabe: November 2007: **Lüftung von Gebäuden** - Zentrale raumluftechnische Geräte-Leistungskenndaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin
- [DIN EN 13779] DIN EN 13779, Ausgabe September 2007: **Lüftung von Nichtwohngebäuden** - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin
- [DIN 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)“, Beuth Verlag, Berlin 2005.

-
- [DIN V 18599] DIN-Normenreihe DIN V 18599, **Energetische Bewertung von Gebäuden**, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin
- [DIN V 18599-1:2013] DIN V 18599-1 Berichtigung 1, Ausgabe Mai 2013: **Energetische Bewertung von Gebäuden** - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger, Berichtigung zu DIN V 18599-1:2011-12
- [DIN 18017] DIN 18017-3, Ausgabe: September 2009: **Lüftung von Bädern und Toilettenräumen ohne Außenfenster - Teil 3**: Lüftung mit Ventilatoren, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin
- [DIN 1946-6] DIN 1946 Teil 6, Ausgabe: Mai 2009: **Raumluftechnik - Teil 6**: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin
- [DIN EN 12464-1] DIN EN 12464 Teil 1, Ausgabe August 2011: **Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1**: Arbeitsstätten im Innenräumen; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin
- [DVGW TWIN 5] DVGW TWIN-Arbeitsblatt Nr. 5 **Desinfektion von Trinkwasser- Installationen zur Beseitigung mikrobieller Kontaminationen**, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V
- [DVGW W 551] DVGW W 551, Ausgabe April 2004: **Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen - Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums - Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen**, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V, Beuth Verlag GmbH
- [EA NRW 2003] Energieagentur NRW, **Leitfaden Energieeffizienz in Krankenhäusern**, 2003

-
- [EnEV 2009] **Energieeinsparverordnung** : Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, Bundesrechtsverordnung, 2009
- [Fent 2004] G. Fent, Dammbühlhalle in Wängi, in „**Die energieeffiziente Sporthalle**“, Hrsg. E.A. Spindler, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 2004.
- [Gasser 2006] Stefan Gasser: **Neues Berechnungsmodell für die Beleuchtung in der SIA-Norm 380/4**, 14. Schweizerisches Status-Seminar "Energie- und Umweltforschung im Bauwesen", ETH Zürich 2006
- [Großklos et al. 2010] M. Großklos; T. Koch; N. Diefenbach, **Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128 in Frankfurt a. M.**, Teilbericht Planungsphase und Null-Emissions-Konzept, Institut für Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt 2010
- [HBO 2003] „Hessische Bauordnung (HBO)“, Juni 2003.
- [Kah 2012a] O. Kah: „**Hochfrequentierte Eingangsbereiche**“, Protokollband Nr. 40 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase V, Passivhaus Institut, Darmstadt 2012
- [Kah 2012b] O. Kah: „**Optimierungspotentiale in gewerblichen Küchen - Vorgehen bei der energetischen Projektierung**“, Protokollband Nr.47 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase V, Passivhaus Institut, 2012
- [Kah 2012c] O. Kah: „**Grundlagen: Behaglichkeit und Energieströme in Küchen**“, Protokollband Nr.47 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase V, Passivhaus Institut, 2012
- [Kah 2013a] O. Kah: „**Regelung und Betrieb der Lüftungsanlage in Lüftung in Passivhaus-Nichtwohngebäuden**“, Protokollband Nr.44 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase V, Passivhaus Institut, 2013
- [Kah 2013b] O. Kah: „**Wirtschaftliche Beurteilung energierelevanter Bauteile**“, Protokollband Nr.42 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase V, Passivhaus Institut, 2013

- [Kah et al. 2008] O. Kah; W. Feist; R. Pfluger; J. Schnieders; B. Kaufmann; T. Schulz; Z. Bastian: „**Bewertung energetischer Anforderungen im Lichte steigender Energiepreise für die EnEV und die KfW-Förderung**“, Ein Projekt des Forschungsprogramms „Zukunft Bau“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Projekt-Nr. 10.8.17.7-06.13, Passivhaus Institut, Darmstadt 2008.
(http://www.bbr.bund.de/cIn_007/nn_22276/BBSR/DE/-Veroeffentlichungen/BBSROnline/2008/ON182008.html)
- [Kah et al. 2010] O. Kah; T. Schulz; S. Winkel; J. Schnieders; Z. Bastian; B. Kaufmann: „**Leitfaden für energieeffiziente Bildungsgebäude**“, Passivhaus Institut; Darmstadt Juli 2010.
- [Kah/Bräunlich 2013] O. Kah; K. Bräunlich: „**Energetische Bewertung von Lüftungsgeräten im Leistungsbereich über 600m³/h**“, Protokollband Nr.44 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase V, Passivhaus Institut, 2013.
- [Kah/Feist 2006] O. Kah, W. Feist: **Wirtschaftlichkeit von Wärmedämm-Maßnahmen im Gebäudebestand 2005**, Studie im Auftrag des Gesamtverbands der Dämmstoffindustrie GDI, Passivhaus Institut, Darmstadt 2006.
- [Kah/Theumer 2012] O. Kah; S. Theumer: „**Wärmeschutz und Lüftungskonzeption bei großen Hallen**“, Protokollband Nr.40 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase V, Passivhaus Institut 2012.
- [Kalender] W. Kalender, Skript „**Computertomographie**“, Universität Erlangen-Nürnberg
- [Kalz et al 2012] D. Kalz; J. Pfafferott, R. Koenigsdorff: **Betriebserfahrungen mit thermoaktiven Bauteilsystemen**, Bauphysik Volume 34, December 2012
- [Kaufmann / Schnieders 2012] B. Kaufmann, J. Schnieders: **Solare Lasten - Sonnenschutz - Tageslicht - Interne Wärmequellen - Kunstlicht - EDV: Betriebserfahrungen Bürogebäude Iuteco**; Protokollband Nr.41 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase V, Passivhaus Institut, 2012

-
- [Kis/Grobe 2006] G. Kis; C. Grobe: „**Neubau einer Dreifeld-Sporthalle im Passivhaus-Standard**“, 10. Internationale Passivhaustagung, Hannover, Passivhaus Institut, 2006.
- [KIWA 2012] **Declaration regarding the efficiency of a shower heat recovery unit**, Kiwa Nederland B.V., Apeldoorn 2012.
- [KRINKO 2012] **Anforderung an die Hygiene bei der Aufbereitung von Medizinprodukten**, Empfehlung der Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention (KRINKO) beim Robert Koch-Institut, Bundesgesundheitsblatt 2012 55: 1244-1310.
- [Külpmann 2013] **OP-Lüftungssysteme im Vergleich**; R. Külpmann; K. Hildebrand; Arbeitsstättenrichtlinie Lüftung; Hochschule Luzern, 2013
- [LEE] **Leitfaden Elektrische Energie im Hochbau**, Institut Wohnen und Umwelt, im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten, Darmstadt 2000.
- [Linder 2012] M. Linder: „**Leitlinien zum wirtschaftlichen Bauen 2012**“, Hrsg. Magistrat der Stadt Frankfurt am Main 2012.
- [Lohmüller et al. 2009] S. Lohmüller; C. Koob; F. Leisering: **Das Marktvolumen für Flächenkühlung in Deutschland**, HLH 60 (2009) Nr.2, S.58-60
- [Meurer et al. 2011] S. Meurer; E. Denhöfer; M. Meurer: **Wissenswertes über die Dampfsterilisation im Gesundheitswesen**, F. & M. Lautenschläger GmbH & Co. KG, Köln 2011.
- [Nipkow 2006] Jüßen Nipkow, Bulletin SEV/VSE, 9/06, 2006
- [ÖNORM 6020] ÖNORM H 6020, Ausgabe Februar 2007: **Lüftungstechnische Anlagen für medizinisch genutzte Räume – Projektierung, Errichtung, Betrieb, Instandhaltung, technische und hygienische Kontrollen**; Austrian Standards plus GmbH, Wien
- [Pfluger 2012] R. Pfluger: **Empfehlung zur Auslegung von Lüftungsnetzen in Lüftung in Passivhaus-Nichtwohngebäuden**; Protokollband Nr. 44 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase V, Passivhaus Institut, 2013

-
- [Pfluger 2004] R. Pfluger: **Integration von Lüftungsanlagen im Bestand – Planungsempfehlungen für Geräte, Anlagen und Systeme**, Protokollband Nr. 30 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [PHI 2002] Drucktestprotokoll zum Neubau der Einfachsporthalle der Ruper-Egenberger-Schule, Unterschleißheim, Passivhaus Institut, 2002.
- [PHPP] W. Feist, R. Pfluger, J. Schnieders, O. Kah, B. Kaufmann, B. Krick, Z. Bastian, W., Ebel: **„Passivhaus Projektierungs Paket Version 8 (2013)“**, Passivhaus Institut, Darmstadt 2013.
- [Recknagel et al. 2009] H. Recknagel, E. Sprenger, E.-R. Schramek, **Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik**; Oldenbourg Industrieverlag München, 2009
- [Rinck P. 2013] P. Rinck, **Magnetic Resonance in Medicine. The Basic Textbook of the European Magnetic Resonance Forum. 6th edition**. 2012. Electronic version 6.8; 2 May 2013. www.magnetic-resonance.org
- [RKI 1] Robert Koch Institut, Richtlinie für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention, (Alte Anlagen der Richtlinie für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention)
- [RKI 2010] Robert Koch Institut, Epidemiologisches Bulletin, Ausgabe Februar 2010/Nr. 4: Kommentar der KRINKO zur DIN 1946-4 (2008)
- [RKI 2013] Robert Koch Institut, Epidemiologisches Bulletin, Ausgabe Februar 2013/ Nr. 8
- [RLT-KH] Külpmann, R. **Leitlinie Raumluftechnische Anlagen in Krankenhäusern**; Deutsche Gesellschaft für Krankenhäuser e.V
- [Schnieders 2007] **„Wärmebrücken und Tragwerksplanung“**, Protokollband Nr. 35 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase IV, hier: Beitrag von J. Schnieders, Passivhaus Institut Darmstadt 2007.

-
- [Schulz 2007] **„Wärmebrücken und Tragwerksplanung“**, Protokollband Nr. 35 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase IV, hier: Beitrag von T. Schulz, Passivhaus Institut Darmstadt 2007.
- [SIA 382/1] SIA 382-1, Ausgabe 2007: **Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen**; SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [SIA 380-4] SIA 380-4, Ausgabe 2006: **Elektrische Energie im Hochbau**, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [Trox07] Airflowcontrol Planungshandbuch – **Systemkomponenten zur Luftverteilung**, Trox Technik 2007
- [TRY 12] Testreferenzjahr, Oberrheingraben und unteres Neckartal (Klimaregion 12), extremer Sommer, DWD.
- [UBA 2012] Bekanntmachung der Liste der Aufbereitungsstoffe und Desinfektionsverfahren gemäß § 11 der Trinkwasserverordnung – 17. Änderung, Bundesumweltamt (Stand: November 2012).
- [Vallentin / Lackenbauer 2004] G. Vallentin; A. Lackenbauer, **„Montessorivolksschule in Aufkirchen mit Turnhalle und Hausmeisterwohnung“**, 8. Passivhaustagung in Krems, Passivhaus Institut, 2004.
- [VDI 3807-2] **„Verbrauchskennwerte für Gebäude – Verbrauchskennwerte für Heizenergie, Strom und Wasser“**, Beuth Verlag, Berlin, November 2012.
- [VDI 3807-4] **„Energie- und Wasserverbrauchskennwerte für Gebäude - Teilkennwerte elektrische Energie“**, Beuth Verlag, Berlin, August 2008.
- [VDI 6022] **„Hygienische Anforderungen an Raumluftechnische Anlagen Büro- und Versammlungsräume“**, Beuth Verlag, Berlin, Juli 1998.
- [Wellig et al. 2006] B. Wellig; B. Kegel; M. Meier, **Verdoppelung der Jahresarbeitszahl von Klimakälteanlagen durch Ausnützung eines kleinen Temperaturhubes**, energieschweiz, 2006.

-
- [Werner 2013] M. Werner: „**Möglichkeiten optimierter Tageslichtnutzung und Kunstlichtsysteme bei der Modernisierung von Nichtwohngebäuden**“, Protokollband Nr. 48 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Phase IV, Passivhaus Institut Darmstadt 2012.
- [Zimmermann 1999] M. Zimmermann, „**Handbuch der passiven Kühlung**“, im Auftrag des Bundesamtes für Energie (Bern), EMPA, CH-Dübendorf 1999.
- [Zistler 2012] Mündliche Mitteilung von Hr. Zistler Universität Passau, dass das Trinkwassers der Gewerbeküche der Universität Passau mit hypochloriger Säure behandelt wird.